Télédétection, 2003, vol. 3, n° 1, p. 85-96
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2003 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

SPECTRORADIOMÉTRIE DE LA MATIÈRE PARTICULAIRE DANS L'OUED SEBOU (MAROC) : APPLICATION AUX DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION

PIERRE LAROUCHE [a*], MOHAMMED EL-MOUTTAKI [b,‡] et ABDERHAMMANE DJOUAI [b]

a Institut Maurice-Lamontagne, Ministère des Pêches et des Océans, Canada, B. P. 1000, Mont-Joli, Québec, Canada G5H 3Z4.
b École Normale Supérieure – Takkadoum, B.P. 5118, Rabat, Maroc.
Courriel (,‡) : LaroucheP@dfo-mpo.gc.ca ; Melmouttaki@yahoo.fr*

(soumis le 13 août 2002 ; révisé le 21 octobre 2002 ; accepté le 17 novembre 2002)

Une méthode empirique utilisant des données de spectroradiométrie a été utilisée afin de déterminer les meilleurs algorithmes permettant de mesurer la teneur en sédiments en suspension à partir de données de télédétection dans le plus important estuaire marocain (oued Sebou). Les résultats indiquent que l'estuaire du Sebou exhibe une importante variabilité spatiale et temporelle des concentrations de sédiments en suspension variant entre 20 et 300 mg l^{-1} pour la zone étudiée. Les matières organiques composent environ 17 % de la matière totale et semblent provenir d'apports terrigènes. De façon générale, l'utilisation de la réflectance dans la bande 700-900 nm offre les meilleurs résultats permettant ainsi l'emploi d'une grande variété de capteurs orbitaux. L'analyse de la dérivée des spectres a permis de montrer que la concentration de sédiments en suspension pouvait aussi être estimée à l'aide des bandes situées à 643 et 673 nm pour la dérivée première et à 726 et 836 nm pour la dérivée seconde.

Mots-clefs : radiométrie ; sédiments ; estuaire ; Sebou ; Maroc ; télédétection.

SPECTRORADIOMETRY OF PARTICULATE MATTER IN THE OUED SEBOU (MOROCCO) : APPLICATION TO REMONTE SENSING DATA

An empirical method using spectroradiometric measurements has been used to determine the best algorithms to measure suspended sediment concentrations from remote sensing data for the most important Morrocan estuary (oued Sebou). Results show that the Sebou estuary is characterized by an important spatial and temporal variability of its suspended sediment matter concentration ranging from 20 to 300 mg l^{-1} for the studied zone. Organic matter composed approximately 17 % of the total suspended matter load and appears to be of terrigeneous origin. In general, the use of reflectance in the 700-900 nm spectral region gives the best results allowing the use of a large variety of orbital sensors. The spectral derivative analysis showed that suspended sediment concentrations can also be derived from the 643 and 673 nm bands using the first derivative and from the 726 and 836 nm bands using the second derivative.

Keywords : Radiometry ; sediments ; estuary ; Sebou ; Morocco, remote sensing.

1. INTRODUCTION

Les estuaires sont des zones de transition entre les eaux douces de provenance terrestre et les eaux salées de la mer. Ils possèdent donc des propriétés physiques, biologiques et sédimentaires très dynamiques qui varient en fonction des paramètres de la marée, du vent, du débit d'eau douce et de la géomorphologie de l'estuaire. Ces écosystèmes, généralement riches, possèdent une forte biodiversité qui a rapidement conduit à leur colonisation humaine. Un des indices de la qualité de l'eau d'un estuaire est sa charge en sédiments en suspension puisque ceux-ci sont souvent des agents de transport de diverses substances polluantes. L'obtention d'information juste sur la teneur en sédiments en suspension est donc importante afin d'assurer les populations riveraines d'un approvisionnement en eau de bonne qualité. Le suivi temporel de la charge sédimentaire se heurte toutefois à des problèmes d'échantillonnage puisqu'il existe souvent des différences spatiales et temporelles importantes dans la concentration de ces matières. Il apparaît donc important de bien caractériser cette variabilité avant de procéder au choix d'un site de suivi.

La télédétection peut apporter une solution à ce problème en offrant une vision quasi instantanée et à grande échelle d'une région donnée qui pourrait améliorer la connaissance de la variabilité spatio-temporelle des sédiments en suspension dans les estuaires. Plusieurs chercheurs se sont attaqués à ce problème et ont montré qu'il était possible d'évaluer la concentration en matières particulaires dans

* Correspondant principal

différents milieux en utilisant des données provenant de capteurs tels que AVHRR de NOAA (Bowers *et al.*, 1998 ; Ruhl *et al.*, 2001 ; Stumpf and Pennock, 1991 ; ten Brummelhuis *et al.*, 2001), CZCS (Doerffer and Fisher, 1994 ; Mayo *et al.*, 1993 ; Tassan and Sturm, 1986), MSS et TM de Landsat (Brakel, 1984 ; Dinnel *et al.*, 1990 ; Karageorgis and Anagnostou, 2001 ; Keiner and Yan, 1998 ; Lathrop, 1992 ; Mertes *et al.*, 1993 ; Richie and Cooper, 1988 ; Stumpf, 1988) et HRV de SPOT (Doxaran *et al.*, 2002 ; Forget and Ouillon, 1998 ; Froidefond *et al.*, 1991 ; Lathrop and Lillesand, 1989). Dans ces travaux, on indique que la grande variabilité des conditions atmosphériques prévalant au moment de la prise des images rendait impossible l'établissement d'un algorithme universel utilisant uniquement les mesures de réflectance au capteur (Clark, 1993). Les travaux réalisés sont aussi spécifiques à un environnement particulier caractérisé par un certain type de sédiments ayant une signature spectrale propre. Il demeure donc encore indiqué de caractériser les propriétés spectrales des divers estuaires de manière individuelle.

Le but de cet article est donc de rapporter les résultats obtenus dans le cadre d'un programme de détermination des caractéristiques spectro-radiométriques du principal estuaire marocain, l'oued Sébou.

2. SITE D'ÉCHANTILLONNAGE

L'oued Sebou est le plus important estuaire marocain et le seul estuaire navigable donnant accès à un port intérieur. Son embouchure est située sur la façade Atlantique du Maroc près de la ville de Kénitra (figure 1). Drainant un bassin versant de 40 000 km^2, son débit moyen est de l'ordre de 200 m^3.s^{-1} à l'embouchure. Même s'il est fortement régularisé par un réseau de barrages pour fins d'irrigation qui peut parfois conduire à un débit presque nul, son débit maximum peut tout de même atteindre 5 000 m^3.s^{-1} lors de fortes crues (Elherradi, 1989). Afin d'obtenir le maximum de variabilité dans les teneurs en sédiments en suspension, nous avons retenu comme site d'échantillonnage la portion de l'estuaire comprise entre l'embouchure et le pont de Kénitra en amont, soit une distance d'environ 10 km. De faible largeur (300-500 m), cette zone est caractérisée par un gradient de salinité (Elherradi, 1989), ainsi qu'une marée pouvant atteindre 3 m (Combe, 1966). La bathymétrie de l'estuaire est caractérisée par d'importantes battures (100 m de largeur) entre lesquelles se situe un chenal navigable d'une profondeur variant entre 2 et 5 m à marée basse.

Les travaux antérieurs dans l'estuaire du Sebou ont montré que la concentration de sédiments en suspension variait entre 45 et 1850 mg.l^{-1} selon les saisons et le débit d'eau douce. Ces sédiments de type argileux sont surtout composés d'illites (31 %), de smectites (27 %), de chlorites (16 %), de kaolinites (13 %) et d'interstratifiés (13 %) (Elherradi, 1989). La taille de ces particules varie entre 1 et 4 μm (Lewis and McConchie, 1994). La fraction organique des matières en suspension est de l'ordre de 15 % (Elherradi, 1989). Aucune information n'existe sur la concentration en matières dissoutes colorées.

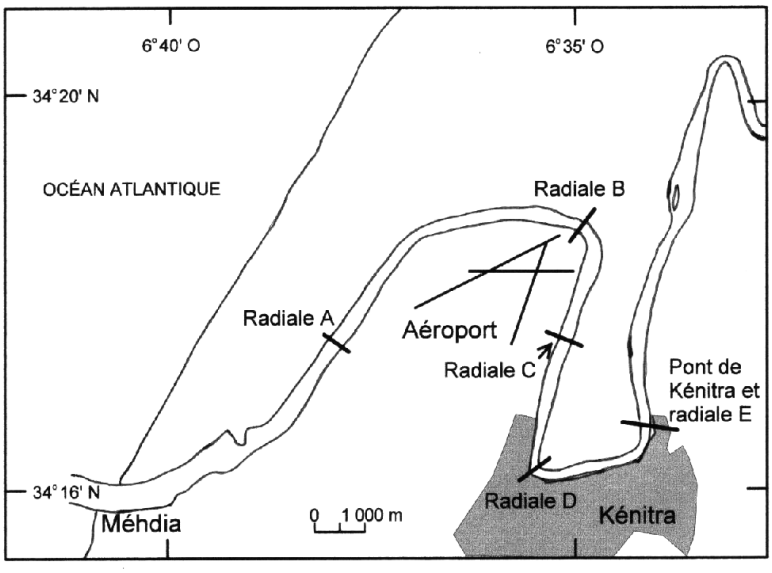


FIGURE 1 Carte de l'oued Sebou indiquant la localisation des cinq radiales échantillonnées (A-E). Les stations individuelles ne sont pas montrées. *Map of oued Sebou showing the location of the five sampled radials (A-E). Individual stations not shown.*

3. MÉTHODOLOGIE

Dans les milieux affectés d'une forte variabilité, les méthodes d'étalonnage directes entre la réflectance mesurée par le capteur et les mesures *in situ* impliquent un important travail de terrain afin d'obtenir suffisamment de points de mesure pour élaborer un algorithme statistiquement fiable. Comme c'est le cas pour l'oued Sebou, nous avons donc opté pour un étalonnage indirect utilisant un spectroradiomètre portatif permettant d'assurer la simultanéité des mesures radiométriques au-dessus de l'eau avec celles des propriétés de la masse d'eau.

Nous avons donc réalisé une campagne de terrain le 28 mai 1997 en échantillonnant aussi rapidement que possible à 2 reprises 5 radiales (A-E) de 3 stations réparties sur l'ensemble de la zone d'étude (figure 1). De façon générale, nous avons tenté de placer les stations de façon équidistantes le long des radiales avec une station située au centre du chenal. La première séquence de mesures a été effectuée entre 9 h 30 et 10 h 55 TU au milieu de la marée descendante et la seconde entre 13 h 10 et 14 h 10 TU au début de la marée montante. Le marnage prévu à cette date était de 1,8 m correspondant à une période située entre une marée de vive-eau et de morte-eau. La position des stations a été mesurée à l'aide d'un récepteur GPS portatif assurant une précision de localisation d'environ 30 m. Les mesures radiométriques au-dessus de l'eau ont été réalisées à l'aide d'un appareil *Analytical Spectral Devices Personal Spectrometer II*. Cet appareil mesure la luminance (L) à 512 bandes discrètes d'une largeur de 1,4 nm entre 316 et 1 040 nm. Chaque échantillonnage consistait à récolter 10 spectres consécutifs. Chacun de ces spectres, acquis en 150 ms à l'aide d'une lentille ayant une ouverture de 1° était automatiquement corrigé pour l'effet du courant noir et emmagasiné pour traitement ultérieur. Nous avons aussi acquis régulièrement des mesures radiométriques du côté blanc d'un panneau photographique Kodak (*Kodak grey card*) ayant une réflectance diffuse de 90 % entre 400 et 1 000 nm. Ces panneaux possèdent une réflectance bi-directionnelle équivalente (moins de 2 % de différence) à celle d'un panneau de *Spectralon* (Soffer *et al.*, 1995). Les données de luminance de l'eau et du panneau blanc étaient captées à une hauteur d'environ 50 cm. Les mesures étaient prises en orientant l'embarcation de façon à obtenir le moins de réflection spéculaire possible par les vaguelettes présentes tout en gardant le capteur du côté ensoleillé de l'embarcation. Le traitement des données a d'abord consisté à examiner chacun des spectres recueillis afin d'éliminer ceux qui étaient contaminés par une réflection spéculaire du soleil. Par la suite, nous avons calculé une moyenne des spectres valides à chaque station et transformé les données en réflectances à l'aide de la formule suivante :

$$R_{eau}(\lambda) = \frac{L_{eau}(\lambda)}{L_{panneau}(\lambda)} \times R_{panneau}(\lambda) \quad (1)$$

où R est la réflectance et L est la luminance mesurée avec le radiomètre. Aucune correction n'a été effectuée pour la luminance de l'atmosphère réfléchie par la surface de l'eau puisque celle-ci ne représente qu'une très petite fraction de la luminance de l'eau mesurée lorsque les concentrations de sédiments sont importantes (Doxaran *et al.*, 2002).

Nous avons aussi calculé la dérivée première et seconde des spectres de réflectance en utilisant d'abord un filtre moyen sur sept points afin d'éliminer les bruits de haute fréquence présents dans le spectre (Demetriades-Shah *et al.*, 1990) puis en calculant le gradient local entre deux longueurs d'ondes consécutives du spectre (Tsai and Philpot, 1998).

À chaque station, nous avons aussi recueilli un échantillon d'eau qui était immédiatement filtré à l'aide d'une pompe manuelle sur un filtre pré-pesé GF/F de 0,4 µm. Ces échantillons ont d'abord été séchés le soir même à 70 °C pendant 24 h. Les filtres séchés ont ensuite été repesés afin de calculer la concentration de matière particulaire totale puis carbonisés pendant 1 heure à 550 °C et à nouveau pesés afin de déterminer la quantité de matière organique particulaire présente dans l'échantillon.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Comme indiqué à la section 2, il existe très peu de données sur les sédiments en suspension dans l'oued Sebou. En plus des mesures radiométriques, les résultats présentés ici apportent donc un complément d'information important sur la dynamique des sédiments dans la portion estuarienne de ce fleuve.

4.1. Matériel particulaire

Sur le tableau 1, on présente l'ensemble des mesures des matières en suspension. De façon générale, on observe qu'il existe un important gradient longitudinal des concentrations avec les valeurs les plus faibles mesurées près de l'embouchure de l'estuaire.

TABLEAU 1 Concentrations des matières en suspensions dans l'estuaire de l'oued Sebou le 28 mai 1997 pour les 3 stations (a-c) composant chacune des radiales (A-E). *Suspended matter concentrations in the oued Sebou May 28 1997 for the 3 stations (a-c) making each radial (A-E).*

Station	Total (mg l^{-1})	Matières organiques (mg l^{-1})	Sédiments (mg l^{-1})	% de matières organiques	% de sédiments
A1a	28	6	21	22	78
A1b	21	7	15	31	69
A1c	49	11	38	23	77
B1a	110	20	90	18	82
B1b	40	9	31	23	77
B1c	93	18	75	19	81
C1a	33	10	23	30	70
C1b	47	12	35	25	75
C1c	66	13	53	20	80
D1a	83	14	70	17	83
D1b	199	29	170	15	85
D1c	372	41	331	11	89
E1a	346	45	301	13	87
E1b	265	38	228	14	86
E1c	287	39	248	13	87
A2a	101	15	86	14	86
A2b	85	18	67	21	79
A2c	81	15	65	19	81
B2a	168	26	142	16	84
B2b	171	26	145	15	85
B2c	170	26	144	15	85
C2a	168	26	142	15	85
C2b	155	27	129	17	83
C2c	198	30	169	15	85
D2a	234	32	202	14	86
D2b	345	42	303	12	88
D2c	284	40	244	14	86
E2a	302	43	259	14	86
E2b	340	43	297	13	87
E2c	346	44	303	12	88
Moyenne	173	26	199	17	83

Les concentrations de sédiments en suspension et de pourcentage de matière organique concordent bien avec les résultats obtenus antérieurement pour la même période de l'année (Elherradi, 1989). Par ailleurs, des différences parfois importantes apparaissent entre les stations composant les radiales indiquant que l'estuaire ne peut être considéré comme étant latéralement homogène.

Les plus faibles concentrations de matières en suspension ont été observées près de l'embouchure lors du premier échantillonnage. Il existe une forte corrélation (0,98) entre les concentrations de matières organiques particulaires et de sédiments pour l'ensemble des données indiquant probablement une origine terrigène de la matière organique particulaire. Sur la figure 2, on montre toutefois que le pourcentage de matière organique est relié de façon inverse à la concentration de sédiments. Les stations montrant les plus forts pourcentages de matériel particulaire organique étaient toutes situées en aval de la radiale C lors du premier échantillonnage indiquant probablement l'effet des eaux marines toujours présentes dans la portion aval de l'estuaire à cette phase de la marée. La nature de la matière organique dans cette zone ne peut être confirmée à partir des données recueillies mais il apparaît raisonnable de supposer qu'il s'agit d'une combinaison entre des matières de nature terrigène en provenance de l'amont et du phytoplancton qui aurait pénétré dans l'estuaire lors de la marée montante précédente.

La variabilité temporelle induite par la marée est clairement visible pour les radiales A, B et C alors que les concentrations mesurées au début du flot sont de 2 à 4 fois plus importantes que lors du jusant. Cet effet de la marée est beaucoup moins important aux radiales D et E.

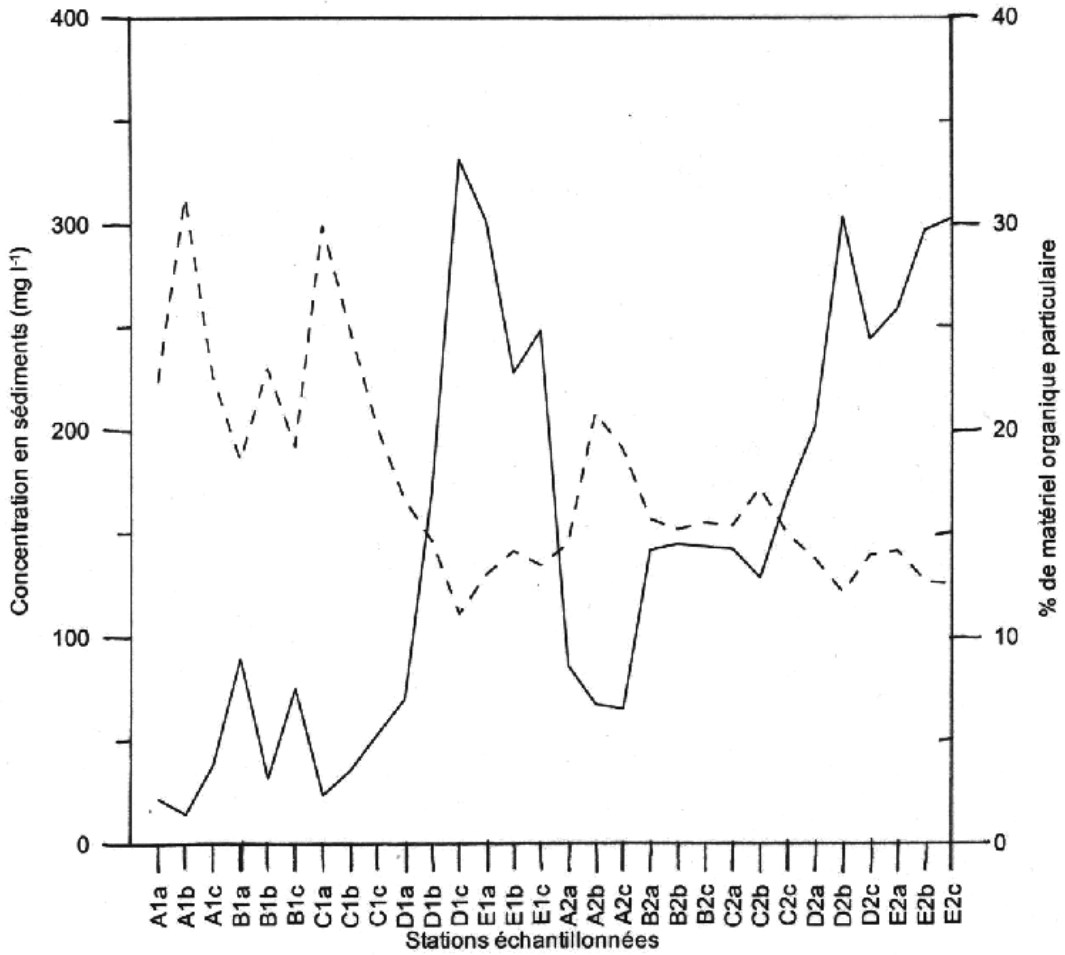


FIGURE 2 Relation entre la concentration de sédiments en suspension (trait continu) et le pourcentage de matériel organique particulaire (trait tireté). *Relation between the suspended sediments concentrations (continuous line) and the percentage particular organic material (dashed line).*

4.2. Radiométrie

Sur la figure 3, on montre une série de spectres de réflectance représentatifs de la gamme des concentrations en sédiments en suspension observées dans l'oued Sebou et pour des stations situées au centre de l'estuaire (stations b). On observe de façon générale que les réflectances augmentent à toutes les longueurs d'ondes à mesure que les concentrations en sédiments en suspension augmentent. Cet effet diminue toutefois d'intensité aux longueurs d'ondes plus courtes. La forme du spectre de réflectance subit aussi un changement puisque le pic observé vers 550 nm lorsque les concentrations sont faibles disparaît progressivement aux plus hautes concentrations, faisant d'abord place à un plateau situé entre 550 et 700 nm puis à l'apparition d'un nouveau pic situé vers 700 nm. Ceci résulte du masquage du pic de réflectance due à la chlorophylle dans le vert par les sédiments (Goodin *et al.*, 1993). Le pic situé vers 800 nm est pour sa part toujours visible dans les spectres et semble augmenter d'intensité avec la concentration en sédiments en suspension. Ces résultats sont semblables à ceux observés à ce jour dans la littérature et indiquent que les sédiments en suspension de l'oued Sebou possèdent un comportement radiométrique équivalent à ceux d'autres estuaires tels que la Gironde et le Rhone (Doxaran *et al.*, 2002 ; Forget and Ouillon, 1998).

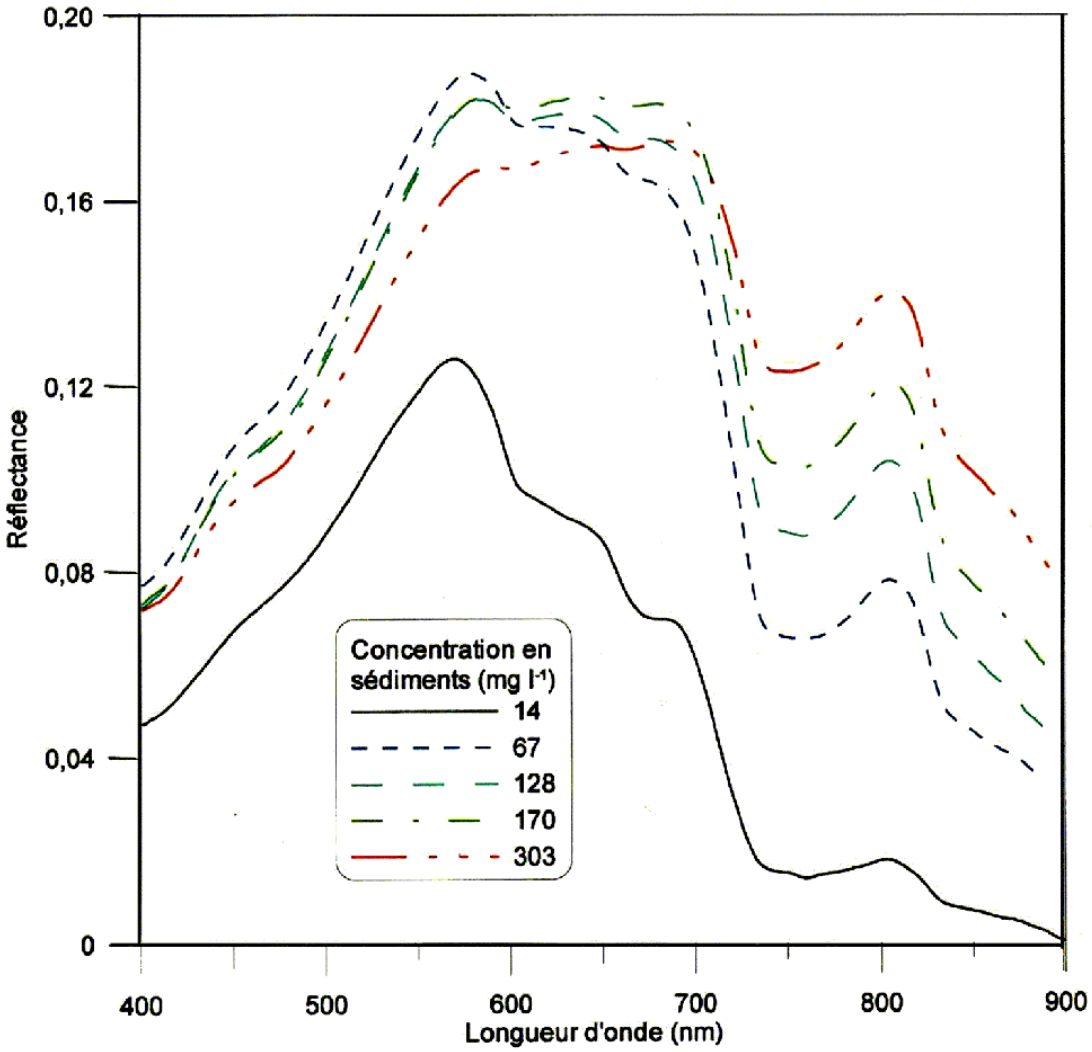


FIGURE 3 Spectres de réflectance pour cinq concentrations de sédiments en suspension. *Reflectance spectras for five suspended sediments concentrations.*

Sur la figure 4, on montre la forme de la courbe de réflectance en fonction de la concentration en sédiments pour trois longueurs d'ondes. On observe que la réflectance mesurée sature vers 75 mg.l^{-1} à 450 nm et vers 150 mg.l^{-1} à 650 nm alors qu'il ne semble y avoir aucune saturation à 850 nm aux concentrations rencontrées. De plus, la forme de la relation apparaît nettement plus linéaire à 850 nm. Cette région spectrale apparaît donc plus appropriée pour les applications dans des milieux à haute teneur en sédiments en suspension.

Les dérivées première et seconde des spectres de la figure 3 sont présentées à la figure 5. On observe que la dérivée du spectre augmente généralement en intensité en fonction de la teneur en matières particulaires vers 525 nm et diminue vers 725 et 825 nm. Il s'agit là d'un comportement normal pour des spectres dominés par les sédiments en suspension tel que mesuré en laboratoire (Chen *et al.*, 1992 ; Goodin *et al.*, 1993) ou en milieu naturel (Chen *et al.*, 1992 ; Forget and Ouillon 1998 ; Han and Rundquist, 1997). Les résultats de la dérivée seconde montrent par ailleurs une augmentation de la valeur de la dérivée vers 725 et 825 nm.

À partir des 30 stations échantillonnées, nous avons effectué une analyse de corrélation entre les spectres de réflectances filtrés ainsi que les dérivées première et seconde de ces spectres et les concentrations en sédiments en suspension (figure 6). Cette analyse a montré qu'une relation

log-linéaire procurait les meilleurs résultats. La corrélation avec la réflectance augmente graduellement à partir de 400 nm pour atteindre ses valeurs maximales entre 700 et 875 nm (0,98 à 800 nm). La plus faible corrélation observée dans la portion bleu et vert du spectre pourrait être le résultat de la présence de chlorophylle ou de matières colorées dissoutes qui affectent fortement cette région du spectre. La dérivée montre aussi de bonnes corrélations avec les sédiments en suspension entre 570 et 675 nm avec des pics à 572, 622, 643 et 673 nm. Une autre région de fortes corrélations est aussi observée entre 765 et 800 nm avec un pic à 775 nm. Finalement, de fortes corrélations négatives sont aussi observées entre 820 et 880 nm. Ces résultats sont sensiblement équivalents aux analyses effectuées dans d'autres milieux montrant une corrélation entre les sédiments en suspension et la partie rouge et proche infrarouge du spectre (Chen *et al.*, 1992 ; Fraser, 1998 ; Goodin *et al.*, 1993 ; Lahet *et al.*, 2001). Quoique bruyante, l'analyse de corrélation entre la dérivée seconde et les sédiments en suspension montre des pics de corrélation à diverses longueurs d'onde, les plus importants étant situés à 738 et 836 nm.

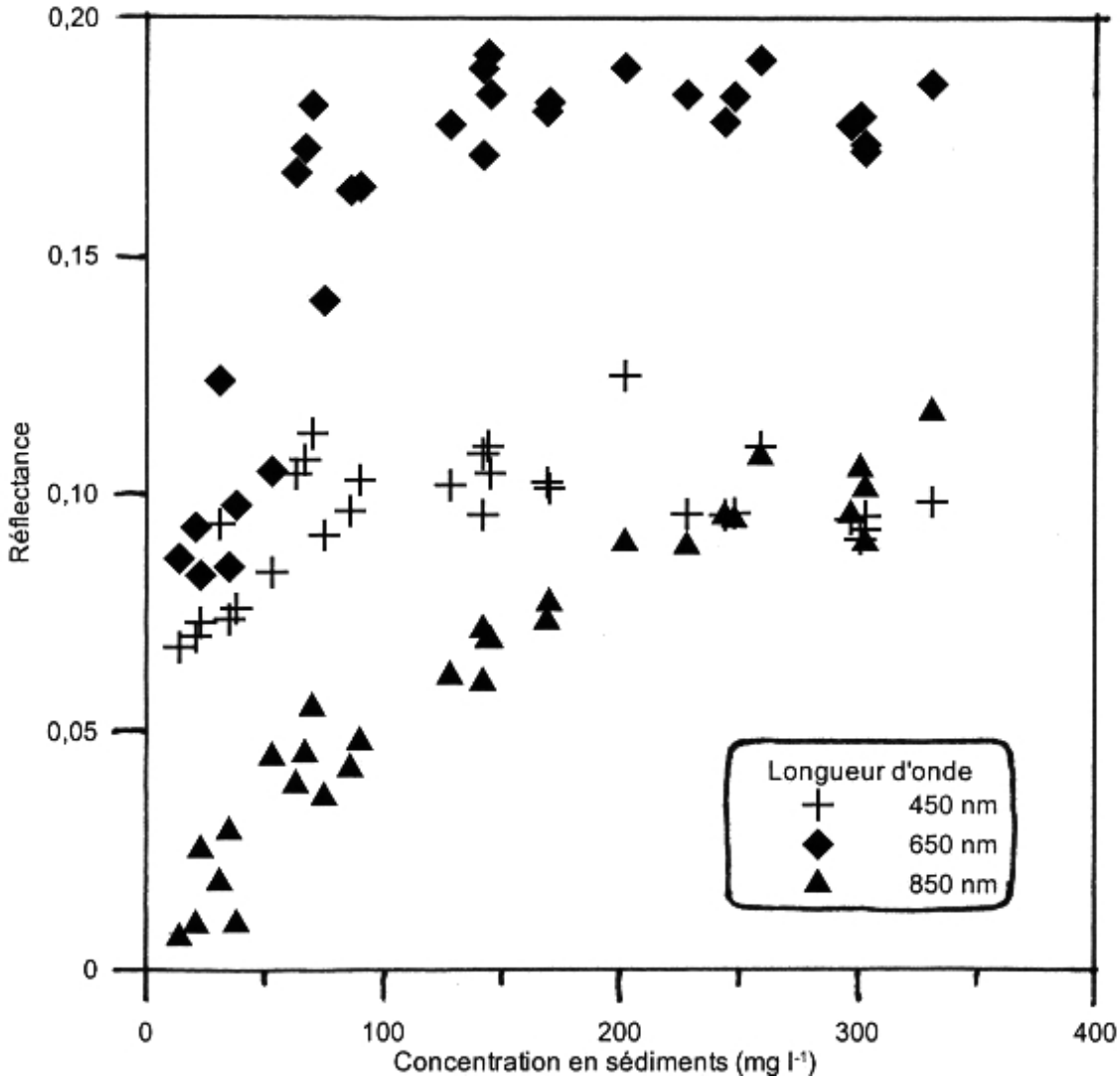


FIGURE 4 Relation entre la réflectance et la concentration de sédiments en suspension pour trois longueurs d'ondes. *Relation between reflectance and suspended sediments concentration at three wavelength.*

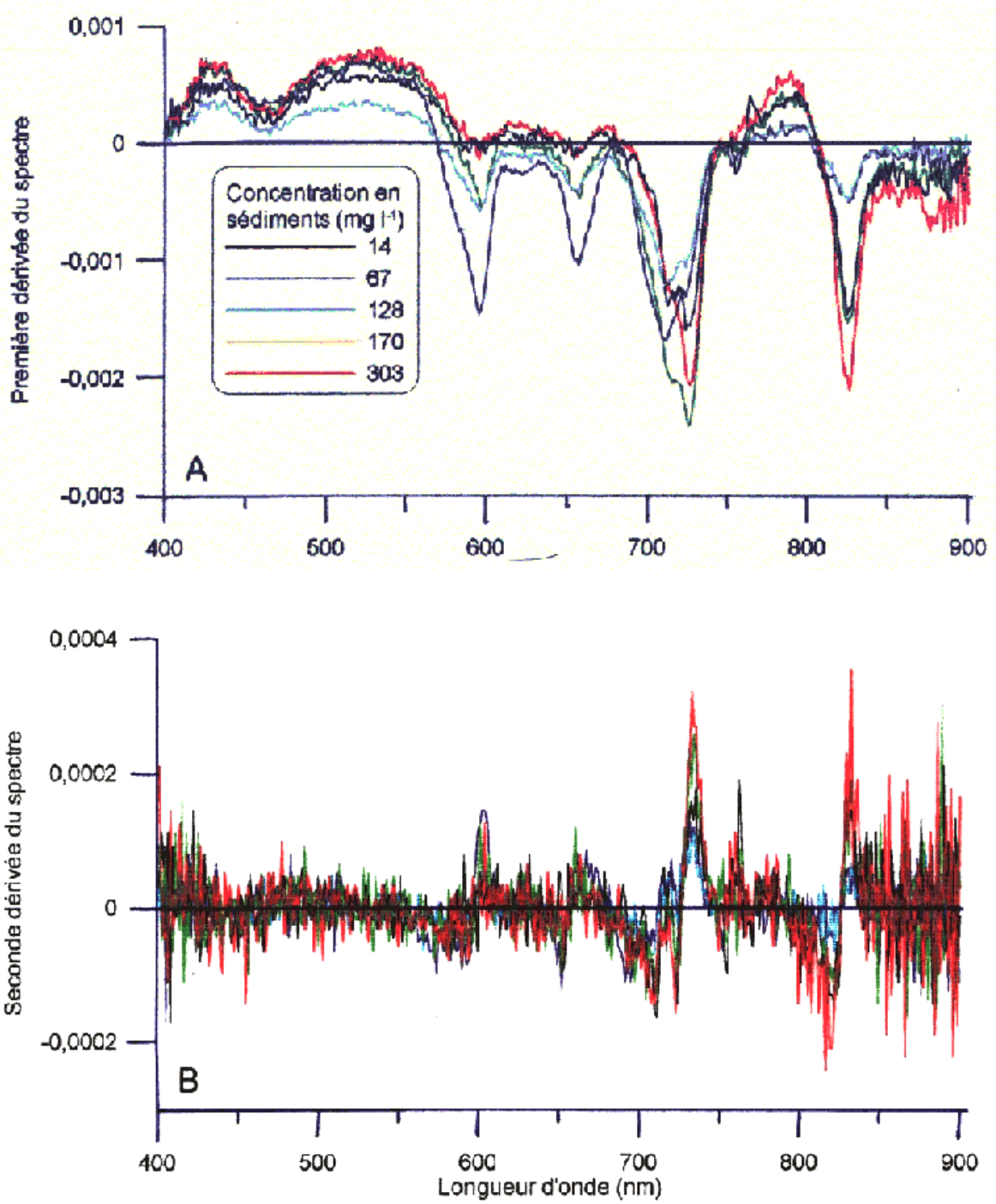


FIGURE 5 Dérivée première (A) et seconde (B) des spectres de réflectance pour cinq concentrations de sédiments en suspension. *First (A) and second (B) derivatives of reflectance spectras for five suspended sediments concentrations.*

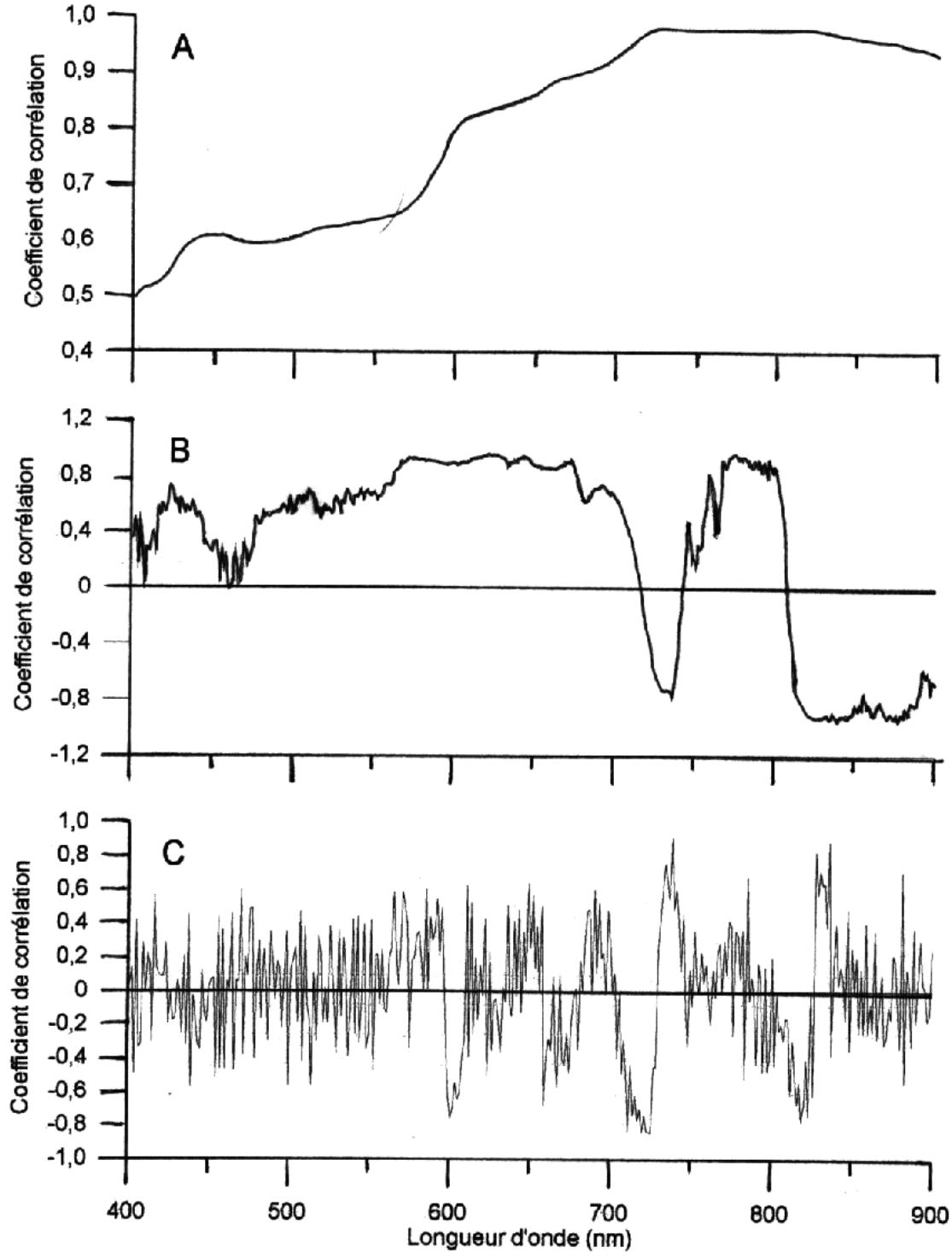


FIGURE 6 Analyse de corrélation entre la réflectance (A) et ses dérivées premières (B) et secondes (C) avec la concentration de sédiments en suspension. *Correlation analysis between reflectance (A) and its first (B) and second (C) derivatives and the suspended sediments concentration.*

Une analyse similaire a été réalisée pour les matières organiques en suspension. Les résultats sont identiques à ceux des sédiments en suspension étant donné la forte corrélation existant entre ceux-ci et les matières organiques. Selon Goodin *et al.* (1993), la dérivée seconde d'un spectre d'un milieu contenant à la fois des sédiments et de la chlorophylle permettrait d'éliminer l'effet des sédiments en suspension, laissant apparaître le signal correspondant uniquement à la chlorophylle. Il n'a toutefois pas été possible de tester cette hypothèse à partir de notre ensemble de données étant donné que la composition du matériel organique dans l'estuaire n'apparaît pas être du phytoplancton.

À la suite de ces résultats, nous avons tenté d'établir des relations entre les concentrations en sédiments en suspension et les données spectrales (tableau 2). On observe que les régressions obtenues à partir des analyses dérivées ne sont pas meilleures qu'avec l'utilisation de la réflectance uniquement et que l'utilisation de la dérivée seconde n'apparaît pas un bon outil pour l'estimation de la concentration de sédiments en suspension pour l'oued Sebou. L'utilisation de l'analyse dérivée est particulièrement indiquée dans le cas où la variabilité environnementale est forte ou ne peut être considérée comme spectralement additive indépendamment de la longueur d'onde utilisée (Lahet *et al*., 2001). Ceci est normalement le cas dans les régions de mélange entre les eaux douces et salées alors que la dilution des matières colorées dissoutes modifie considérablement le spectre de réflectance. Dans le cas de l'oued Sebou, il est probable que l'utilisation d'une telle technique serait plus adaptée dans la zone située plus près de l'embouchure de l'estuaire ou encore dans son panache.

4.3. APPLICATION AUX DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION

Plusieurs satellites transportent maintenant des capteurs multibandes (Thematic Mapper, Enhanced Thematic Mapper, Haute Résolution Visuelle, Ikonos, Orbview-3, LISS-3, Quickbird) ayant une résolution spatiale variant entre 2,6 et 30 m. Tous ces capteurs possèdent une bande spectrale large couvrant généralement la plage de longueur d'ondes comprise entre 750 et 900 nm. Nos résultats ont montré que cette bande spectrale est fortement corrélée aux concentrations de sédiments en suspension dans l'oued Sebou. Pour chacun de ces capteurs, nous proposons donc un algorithme de forme log-linéaire permettant de mesurer la concentration des sédiments en suspension pour cet estuaire (tableau 3). Dans ce cas, nous avons estimé la réflectance au sol équivalente à la bande passante du capteur en moyennant les valeurs mesurées par le radiomètre dans cette bande. Puisque dans plusieurs travaux antérieurs on a aussi noté que les rapports de bandes entre le proche infrarouge et le bleu procuraient généralement de meilleurs résultats que l'utilisation d'une bande unique, sur le tableau 3, on propose aussi des relations basées sur ce rapport de bandes en utilisant une relation de type linéaire-linéaire qui procure la meilleure estimation de la concentration en sédiments. Les résultats montrent que, pour l'oued Sebou, l'utilisation d'un rapport de bandes ne procure pas d'augmentation de la qualité de la relation.

Les algorithmes proposés ont sensiblement tous le même coefficient de corrélation indiquant que tous ces capteurs devraient pouvoir mesurer la concentration de sédiments en suspension avec une précision équivalente. D'autres facteurs doivent toutefois être considérés avant de sélectionner un capteur spécifique dont la résolution spatiale recherchée ainsi que la sensibilité du capteur et sa capacité d'utilisation aux grandes concentrations de matières en suspension (saturation du capteur).

L'utilisation des résultats utilisant des bandes spectrales spécifiques ou encore l'analyse dérivée du spectre présentée à la section précédente ne sont applicables que lors de l'emploi de capteurs hyperspectraux aéroportés tels que *le Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer* (AVIRIS) et le *Compact Airborne Spectral Imager* (CASI). Pour le moment, le seul capteur hyperspectral satellitaire disponible est le Hyperion à bord du Earth Observer-1 de la NASA. D'autres capteurs hyperspectraux satellitaires (Naval Earth Map Observer, Orbview-4) devraient être disponibles d'ici quelques années rendant alors plus accessible l'information nécessaire à l'utilisation des algorithmes présentés dans le cadre du présent travail.

Il est à noter toutefois, qu'avant d'utiliser ces algorithmes, il est nécessaire d'effectuer une correction radiométrique des images afin de calculer la réflectance à la surface de l'eau (Doxaran *et al*., 2002 ; Forget and Ouillon, 1998). Ce travail est généralement accompli à l'aide d'un logiciel de modélisation atmosphérique permettant de prendre en compte les conditions atmosphériques particulières au moment de la capture de l'image.

TABLEAU 2 Corrélation entre les données spectrales et la concentration de sédiments en suspension. Log(Sédiment) = a * X + b où X est la réflectance, sa première ou sa seconde dérivée. *Correlation between spectral data and suspended sediment concentration. Log(sediment) = a * X + b where X is reflectance, its first or second derivative.*

X	a	b	r^2
R(800)	8,83	1,19	0,96
dR(622)	2 692	1,96	0,93
dR(643)	2 706	2,22	0,90
dR(775)	2 552	1,25	0,91
$d^2R(738)$	6 821	1,06	0,83
$d^2R(836)$	4 023	1,51	0,79

TABLEAU 3 Algorithmes proposés pour la détermination des concentrations de sédiments en suspension dans l'Oued Sebou à l'aide des données provenant de divers capteurs orbitaux. TM : Landsat, Thematic Mapper ; ETM : Landsat, Enhanced Thematic Mapper ; XS : SPOT, HRV ; OV : OrbView3 ; IK : Ikonos ; LI : IRS-1D, LISS-3 ; QB : QuickBird. Log(Sédiment) = a * réflectance + b pour les bandes simples et Sédiment = a * rapport de réflectance + b pour les rapports de bandes.
Proposed algorithms for the measurement of suspended sediment concentration in Oued Sebou from orbital sensors. TM: Landsat: Thematic Mapper; ETM: Landsat, Enhanced Thematic Mapper; XS, SPOT, HRV; OV: Orbview3; IK: Ikonos; LI: IRS-1D, LISS-3; QB: QuickBird.
*Log(Sediment) = a * reflectance + b for the simple band and Sediment = a * reflectance ratio + b for band ratios.*

Bande spectrale	a	b	r^2
TM4	10,77	1,24	0,94
ETM4	10,72	1,24	0,94
XS3	10,82	1,25	0,94
OV4	10,78	1,24	0,94
IK4	9,70	1,22	0,95
LI3	9,87	1,22	0,95
QB4	10,78	1,24	0,94
TM4/TM2	476	-71	0,90
ETM4/ETM2	483	-73	0,90
XS3/XS1	450	-66	0,91
OV4/OV2	477	-71	0,90
IK4/IK2	424	-79	0,91
LI3/LI1	434	-76	0,91
QB4/QB2	477	-71	0,90

5. CONCLUSION

Les résultats ont montré que l'oued Sebou était caractérisé par une forte variabilité tant spatiale que temporelle de sa charge en matières particulaires rendant difficile la sélection d'une station de suivi représentative de l'ensemble de l'estuaire. L'établissement de relations significatives pour une grande variété de capteurs orbitaux offre toutefois la possibilité d'utiliser les données satellitaires pour l'établissement de cartes de sédiments en suspension couvrant une plus grande variété de conditions environnementales (marée, débits) afin de définir le site le plus propice à l'établissement d'une station de suivi de l'oued Sebou. Les résultats obtenus indiquent aussi qu'il serait possible d'utiliser un radiomètre à une seule bande (800 nm) pour estimer la concentration de sédiments en suspension. Ceci pourrait rendre le monitorage de ce paramètre beaucoup plus simple tout en réduisant les interventions humaines.

Remerciements

Ce travail a bénéficié du support financier de l'Agence Universitaire Francophone (AUF) dans le cadre du programme d'Actions de Recherche Partagées ainsi que de l'Office National de l'Eau Potable (Maroc) pour certaines analyses en laboratoire des échantillons d'eau, de l'École Normale Supérieure – Rabat (Maroc) et de l'Université de Sherbrooke (Canada) pour le support administratif et finalement du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (Brest) pour la fourniture des cartes bathymétriques de l'Oued Sebou.

Références

Bowers, D.G., Boudjelas, S. and Harker, G.E.L. (1998) The distribution of fine suspended sediments in the surface waters of the Irish sea and its relation to tidal stirring. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n° 14, p. 2789-2805.

Brakel, W.H. (1984) Seasonal dynamics of suspended-sediment plumes from the Tana and Sabaki rivers, Kenya : analysis of Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, vol. 16, p. 165-173.

Chen, Z., Curran, P.J. and Hansom, J.D. (1992) Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration. Remote Sensing of Environment, vol. 40, p. 67-77.

Clark, C.D. (1993) Satellite remote sensing of marine pollution. International Journal of Remote Sensing, vol. 14, n° 16, p. 2985-3004.

Combe, M. (1966) Étude de la remontée des marées dans l'estuaire de l'Oued Sebou. Rapports n°1, n°2, n°3, n°4, n°5, n°6, n°7. Service géologique du Maroc, Rabat, Maroc.

Demetriades-Shah, T.H., Steven, M.D. and Clark, J.A. (1990) High resolution derivative spectra in remote sensing. Remote Sensing of Environment, vol. 33, p. 55-64.

Dinnel, S.P., Schroeder, W.W. and Wiseman Jr, W.J. (1990) Estuarine-shelf exchange using Landsat images of discharge plumes. Journal of Coastal Research, vol. 6, n° 4, p. 789-799.

Doerffer, R. and Fisher, J. (1994) Concentrations of chlorophyll, suspended matter, and gelbstoff in case II waters derived from satellite coastal zone color scanner data with inverse modeling methods. Journal of Geophysical Research, vol. 99, n° C4, p. 7457-7466.

Doxaran, D., Froidefond, J.-M., Lavender, S. and Castaing, P. (2002) Spectral signature of highly turbid waters. Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. Remote Sensing of Environnement, vol. 81, p. 1-13.

Elherradi, E. (1989) Contribution à l'étude du comportement des éléments chimiques dans l'estuaire du Sebou (Côte Atlantique marocaine). Université Mohammed V, Rabat, Maroc, 155 p.

Forget, P. and Ouillon, S. (1998) Surface suspended matter off the Rhone river mouth from visible satellite imagery. Oceanologica Acta, vol. 21, no 6, p. 739-749.

Fraser, R.N. (1998) Hyperspectral remote sensing of turbidity and chlorophyll *a* among Nebraska Sand Hills lakes. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n° 8, p. 1579-1589.

Froidefond, J.-M., Castaing, P., Mirmand, M. and Ruch, P. (1991) Analysis of the turbid plume of the Gironde (France) based on Spot radiometric data. Remote Sensing of Environment, vol. 36, p. 149-163.

Goodin, D.G., Han, L., Fraser, R.N., Rundquist, D.C. and Stebbins, W.A. (1993) Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 59, n° 4, p. 505-510.

Han, L. and Rundquist, D.C. (1997) Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration : a case study in a turbid reservoir. Remote Sensing of Environment, vol. 62, no 3, p. 253-261.

Karageorgis, A.P. and Anagnostou, C.L. (2001) Particulate matter spatial-temporal distribution and associated surface sediment properties : Thermaikos gulf and Sporades Basin, NW Aegean Sea. Continental Shelf Research, vol. 21, n° 18-19, p. 2141-2153.

Keiner, L.E. and Yan, X.-H. (1998) A neural network model for estimating sea surface chlorophyll and sediments from Thematic Mapper imagery. Remote Sensing of Environment, vol. 66, n° 2, p. 153-165.

Lahet, F., Ouillon, S. and Forget, P. (2001) Colour classification of coastal waters of the Ebro river plume from spectral reflectance. International Journal of Remote Sensing, vol. 22, n° 9, p. 1639-1664.

Lathrop Jr., R.G. (1992) Landsat Thematic Mapper monitoring of turbid inland water quality. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 58, n° 4, p. 465-470.

Lathrop, Jr. R.G. and Lillesand, T.M. (1989) Monitoring water quality and river plume transport in Green Bay, lake Michigan with SPOT-1 imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 55, n° 3, p. 349-354.

Lewis, D.W. and D. McConchie (1994) Practical sedimentology. Chapman & Hall, New York, 272 p.

Mayo, M., Karnieli, A., Gitelson, A. and Ben-Avraham, Z. (1993) Determination of suspended sediment concentrations from CZCS data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 59, n° 8, p. 1265-1269.

Mertes, L.A.K., Smith, M.O. and Adams, J.B. (1993) Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon river wetlands from Landsat images. Remote Sensing of Environment, vol. 43, p. 281-301.

Ritchie, J.C. and Cooper, C.M. (1988) Comparison of measured suspended sediment concentrations with suspended sediment concentration estimated from Landsat MSS data. International Journal of Remote Sensing, vol. 9, p. 379-387.

Ruhl, C.A., Schoellhamer, D.H., Stumpf, R.P. and Lindsay, C.L. (2001) Combined use of remote sensing and continuous monitoring to analyse the variability of suspended-sediment concentrations in San Francisco Bay, California. Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 53, n° 6, p. 801-812.

Soffer, R.J., Harron, J.W. and Miller, J.R. (1995) Characterization of Kodak Grey Cards as reflectance reference panels in support of BOREAS field activities. Proceedings of the 17th Canadian Symposium on Remote Sensing, Saskatoon, Canada, p. 357-362.

Stumpf, R.P. (1988) Sediment transport in Chesapeake bay during floods : Analysis using satellite and surface observations. Journal of Coastal Research, vol. 4, no 1, p. 1-15.

Stumpf, R.P. and Pennock, J.R. (1991) Remote estimation of the diffuse attenuation coefficient in a moderately turbid estuary. Remote Sensing of Environment, vol. 38, p. 183-191.

Tassan, S. and Sturm, B. (1986) An algorithm for the retrieval of sediment content in turbid coastal waters from CZCS data. International Journal of Remote Sensing, vol. 7, p. 643-655.

ten Brummelhuis, P.G.J., Vos, R.J. and Gerritsen, H. (2001) Skill assessment of SPM transport models using the adjoint technique. Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 53, p. 569-580.

Tsai, F. and Philpot, W. (1998) Derivative analysis of hyperspectral data. Remote Sensing of Environment, vol. 66, p. 41-51.