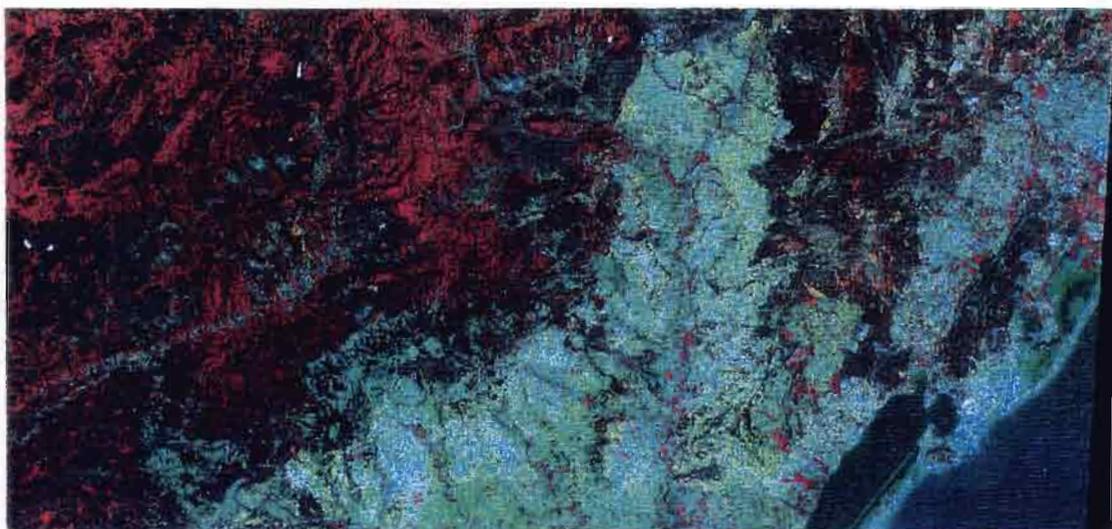




**SUIVI PAR TELEDETECTION DE LA BATHYMETRIE PRE-LITTORALE
APPORT DE L'IMAGERIE SPOT ET LANDSAT ET PERSPECTIVES DE L'IMAGERIE AEROPORTEE**

Cas du lido de Sète à Marseillan (Hérault)



LANDSAT 03.05.1990



CNES SPOT 19.07.1989

Stéphane LOUBIE
DESS "Activités et aménagements littoraux et maritimes"
UNIVERSITE de MONTPELLIER I, II, et III

Septembre 1994

Avant-propos

Ce rapport est réalisé dans le cadre d'un stage de DESS "Activités et aménagements littoraux et maritimes", effectué sur une période de cinq mois en participant à un programme du Pôle Télédétection : "Caractérisation et suivi par télédétection de la morphologie littorale". Cette action associant l'Université Paul Valéry (Montpellier III), l'Institut des Aménagements Régionaux et de l'Environnement (I.A.R.E) et l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM) a été entreprise pour évaluer les capacités de la télédétection satellite à répondre au suivi morphodynamique des littoraux bas sableux. Ce stage constitue pour nous une introduction à la télédétection satellite.

Remerciements

Mes remerciements vont aux personnes qui m'ont apporté aide et conseil pour la réalisation de cette étude, et tout particulièrement à Régine Chaume pour m'avoir accueilli dans l'Unité de Télédétection et de Traitements d'Images de Montpellier de l'Institut français de Recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), ainsi qu'aux personnes de ce laboratoire : Sandrine Buendia, Nadine Dessay, Frédérique Seyler, Jean-Philippe Chereil, Jean-Marie Fotsing et Marc Lointier.

Je remercie Didier Moulis (Institut des Aménagements Régionaux et de l'Environnement - IARE), Maurice Nadal et Benoît Ségala (Pôle Télédétection), pour leurs accueil, leur aide et leurs conseils tout au long de ce stage. Mes remerciements vont également à Jean-Pierre Barrusseau et Emile Akaongo pour m'avoir donné accès à leurs bases de données du Laboratoire de Recherche en Sédimentologie Marine (L.R.S.M.), et au personnel du centre de Météorologie Nationale de Fréjorgues pour son accueil.

Je remercie aussi, les informaticiens du centre ORSTOM (Alex, Claire, Hervé, Pierre) pour leur aide précieuse et leur disponibilité, M. Ducale pour son soutien quotidien et les stagiaires de l'unité de télédétection (Alice, Véronique, Arona, José, Paolo) qui m'ont enrichi de leur différence culturelle ... et thématique! Sans oublier Sandra et Florence pour leur patience.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

PARTIE I MORPHODYNAMIQUE LITTORALE DE LA ZONE D'ETUDE ET DONNEES DE TERRAIN

- I. Présentation du lido de Sète
- II. L'alternance des profils littoraux
- III. Présentation d'éléments de courantologie pré-littorale
- IV. Les données de références

PARTIE II TRAITEMENT COMPARE D'UNE IMAGE SPOT ET D'UNE IMAGE LANDSAT TM

- I. Eléments de télédétection et sélection des images-satellites
- II. Environnement matériel et logiciels
- III. Pré-traitement des images SPOT et LANDSAT TM
 - II.1. Choix de la zone d'étude
 - III.2. Tentatives de correction des images satellites
 - III.3. Analyse en Composantes Principales
 - III.4. Combinaisons linéaires de canaux
- IV. Traitement de l'image SPOT
 - IV.1. Analyse de la corrélation bathymétrie - radiométrie
 - IV.2. Classifications dirigées à partir des cartes d'isobathes
 - IV.3. Classification par méthode de régression linéaire
- V. Traitement de l'image LANDSAT TM
 - V.1. Analyse de la corrélation bathymétrie - radiométrie
 - V.2. Classification par méthode de régression linéaire
- VI. Amélioration des images et comparaison des résultats

PARTIE III APPROCHE DE L'UTILISATION DE L'IMAGERIE AERIENNE SUR LE LIDO DE THAU

- I. Choix de la mission aérienne
- II. Constitution de la mosaïque
- III. Critiques méthodologiques et perspectives d'utilisations

CONCLUSION
BIBLIOGRAPHIE
ANNEXES

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le littoral du Languedoc-Roussillon s'incurve sur 214 km de côtes bordant le golfe du Lion des Albères à la Camargue. Il constitue un espace exigü, écologiquement fragile, et convoité. Il est le support depuis 1963/1964 d'une importante opération d'aménagement du territoire. Cet espace de contact est marqué par son rôle d'interface dynamique entre la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère. Comme la plupart des systèmes littoraux, il est soumis à de nombreuses agressions, tant naturelles qu'anthropiques, parmi lesquelles on peut relever :

- l'élévation contemporaine du niveau de la mer, marquée depuis la fin du XIXème siècle (1,5mm/an, Paskoff - 1985) responsable, selon certains auteurs, d'une déperdition de 2 à 3 m³ de sédiments par an et par mètre linéaire de plage (Ruéda - 1985),
- les diminutions d'apports potamiques. Le Rhône est le principal pourvoyeur d'apports sédimentaires pour notre région (85% des apports alluviaux du Golfe du Lion). Actuellement, il ne déverse plus que 4 millions de tonnes de sédiments fins par an, contre 21 millions avant son aménagement (Galtier G.-1958),
- les déséquilibres engendrés par l'aménagement : obstacles à la dérive littorale (épis brise lames...), hauts de plages indurés, dunes dégradées...

Le lido de l'étang de Thau n'échappe pas à ces phénomènes perturbateurs qui influencent sa dynamique et sa morphologie. Cette lagune est séparée de la mer par un étroit cordon littoral, large de 700 à 1100m, qui s'allonge du nord-est/sud-ouest en s'appuyant sur le cap d'Adge et le mont Saint-Clair de Sète (carte page 5).

L'Institut des Aménagements Régionaux et de l'Environnement (I.A.R.E.), le Laboratoire de Recherche en Sédimentologie Marine (L.R.S.M.), et le Service Maritime de la Navigation du Languedoc-Roussillon (S.M.N.L.R) réalisent depuis six ans des campagnes de relevés topographiques et bathymétriques localisées sur le lido. Ces opérations de suivis entrent dans le cadre du IX et X contrat de plan État/Région "Recherche et développement", consacré à l'Aménagement Régional et à l'Environnement, dans lequel s'inscrivent "la préservation, la restauration et la gestion des littoraux sableux"(mesure 3.4.). L'objectif est de réaliser une modélisation du fonctionnement morphodynamique d'une façade maritime en intégrant l'imagerie satellite.

La répétition des prises de vues des satellites a déjà été mise à contribution pour diverses études littorales : écologie, urbanisme, milieu

physique... La détermination de la bathymétrie des eaux côtières par l'emploi de cette technique n'est pas un fait récent (Pirazzoli - 1982, Cuq - 1983, Masson - 1990, Garlant -1991...). Différentes études ont démontré qu'elle nécessite un concours de circonstances favorables, rarement réunies comme le souligne F. Verger (1989).

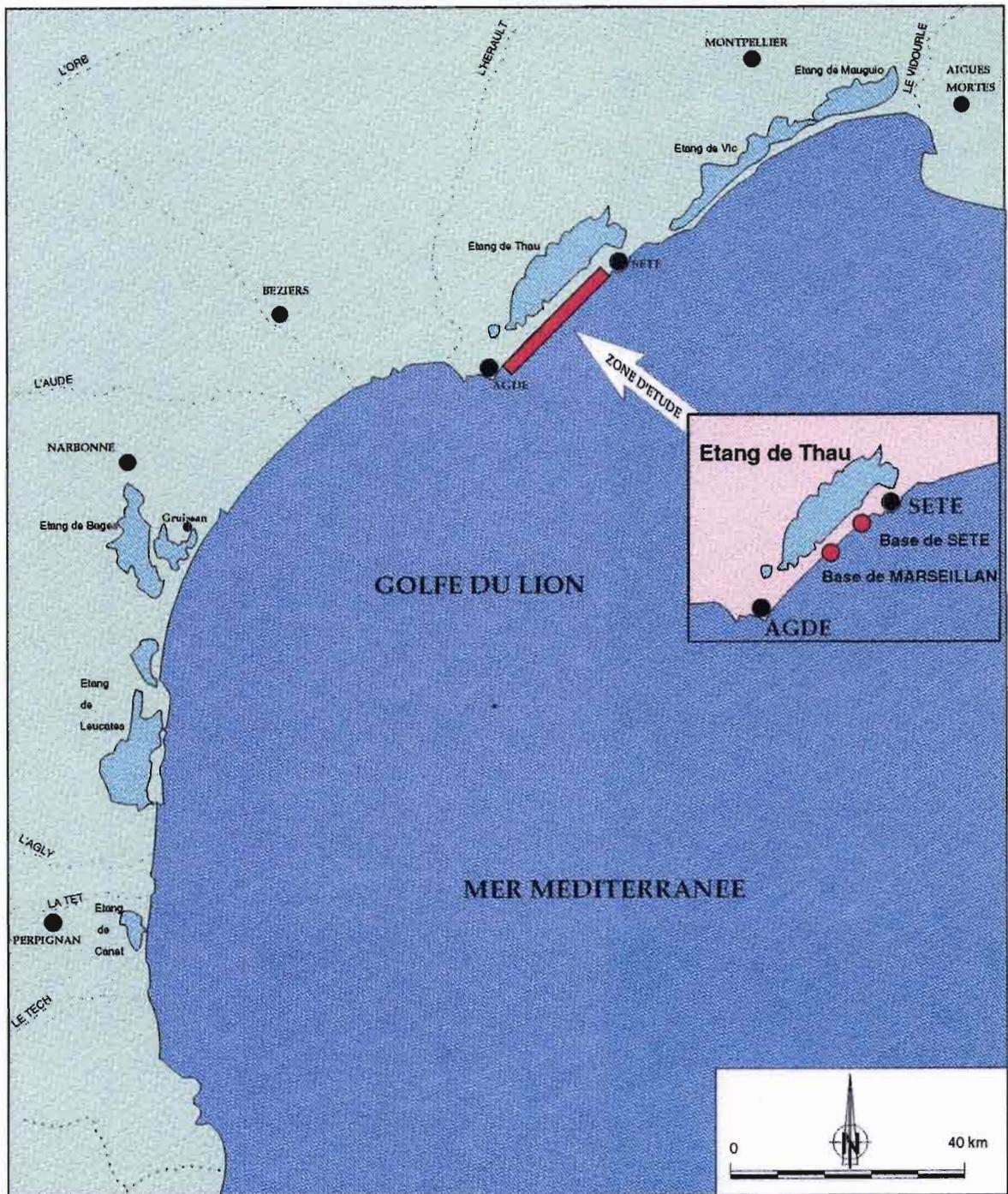
En 1993, une première évaluation des apports des images-satellite SPOT au suivi morphodynamique du lido de Sète a été effectué (Sigaud - 1993). Ce travail a développé une recherche sur des images estivales, et une méthodologie qui a largement orienté notre démarche.

Le présent rapport s'inscrit dans la continuité thématique de cette analyse, avec pour but de proposer une cartographie de la répartition des petits fonds au droit de l'étang de Thau et de préciser certaines hypothèses :

- le choix d'enregistrements spectraux hivernaux est-il approprié à une étude sur les milieux littoraux ?
- la sélection d'une imagerie d'hiver représentative des données de terrain au jour de leur acquisitions est-elle possible ?
- ces enregistrements radiométriques peuvent-ils permettre d'observer une morphologie littorale plus marquée, et ainsi améliorer les résultats ?
- l'existence d'une relation entre la radiométrie et la bathymétrie peut-elle être confirmée ?
- les résultats obtenus sur des images SPOT et LANDSAT sont-ils comparables en milieu marin ?
- les photographies aériennes peuvent-elles compléter l'information issue de l'imagerie satellite.

Pour répondre à ces attentes, une connaissance du fonctionnement des lidos bas sableux est requise (Partie I). Elle permet d'éclairer les procédés de traitements d'images-satellite (Partie II). Diverses missions aériennes semblent pouvoir être utilisées pour enrichir l'étude des formes pré-littorales, et permettre la production de documents de travail (Partie III).

En conclusion, nous pourrions déterminer si la télédétection satellite et aérienne peut apporter des éléments d'informations, en complément des opérations de suivi au sol.



LOCALISATION DU SECTEUR D'ETUDE AU SEIN DU GOLFE DU LION

S.L.-1994

PARTIE I

MORPHODYNAMIQUE LITTORALE DE LA ZONE D'ETUDE ET DONNEES DE TERRAIN

Pour comprendre et interpréter les données optiques, il nous semble opportun de présenter quelques éléments de la morphodynamique littorale.

I. Présentation du lido de Sète

De la mer vers la terre, le système littoral méditerranéen, comme celui du lido de l'étang de Thau, peut être schématisé en trois parties successives (cf. figure 1) :

- L'avant-plage, limitée par la zone de déferlement des vagues et le trait de côte : elle comporte des accumulations sableuses sous forme de barres immergées, séparées entre elles par des fosses de lévigation (Barrusseau et Saint-Guily-1981). La forme de ces barres, rectilignes ou festonnées, révèle leur adaptation à la dynamique. En 1989, devant la base de Sète deux barres étaient observées contre trois devant la base de Marseillan (Brissaud et Barrusseau-1989). A titre de comparaison, le littoral de l'Aude, situé au sud-ouest du Cap d'Agde, comporte trois barres pré-littorales de type rectiligne (Loubié - 1992).

- La plage émergée ou active : elle représente la partie temporairement inondable par les eaux de tempêtes qui peuvent atteindre le pied de dune et l'éroder. Cette zone comporte une berme de basse plage en limite interne du trait de côte. Cette unité s'élargit de 20 à 80 mètres de Sète à Marseillan.

- L'arrière plage : elle comporte un cordon dunaire de barrage parallèle au trait de côte. Ce cordon se termine par la limite du revers de la dune. Sur le lido sétois, il est peu développé voir absent. La route nationale 112, très proche de la mer, est tracée sur son emplacement. A Marseillan, une restauration de ce cordon a été entreprise en utilisant une technique du génie écologique : les ganivelles, ouvrages constitués d'une palissade de claie de châtaignier qui freinent les fluides et par conséquent piègent les sédiments. Ces derniers sont ici moins fins, comparés à ceux des plages audoises ($d_{50}^1=0.23$ mm contre 0,15 mm : EDF-1984).

Ces trois parties sont en interaction dynamique constante. *"Un écart à ce schéma d'organisation témoignera d'une instabilité qui s'amplifiera avec le temps et se traduira le plus souvent par une érosion accrue"* (IARE-1989) ce qui peut induire une régression du trait de côte vers l'intérieur des terres.

II. L'alternance des profils littoraux

¹ d_{50} exprime le diamètre médian des sédiments

Le fonctionnement de ces trois unités est indissociable de l'élément marin. Nous pouvons, sans entrer dans les détails physiques, présenter ces échanges d'énergie et de sédiments. La nature des transferts dépend de l'énergie totale déployée : maximale lors des phénomènes paroxysmaux. Le cycle d'évolution d'une plage généralement pris en référence (Paskoff-1985) distingue deux phases en fonction d'une alternance saisonnière du profil (été et hiver), l'une soumise à des conditions météorologiques calmes et l'autre attribuable aux conditions météorologiques plus perturbées :

- lors des conditions météorologiques calmes, la houle de beau temps, plus faible, repousse les matériaux vers la plage active grâce à un jet de rive supérieur à sa nappe de retrait. Une berme de beau temps apparaît. La plage se reconstitue au détriment des barres pré-littorales qui se rapprochent de la côte, jusqu'à s'y accoler.

- lors de conditions météorologiques plus perturbées, l'action de la houle et des vagues provoque un démaigrissement de la plage par exportation des matériaux (la capacité de transport de la nappe de retrait étant alors supérieure à celle du jet de rive). Les courants viennent alimenter les barres pré-littorales qui assurent la protection de la plage en forçant le déferlement. Dans le même temps, les courants d'arrachements et de retours éloignent ces barres de la côte.

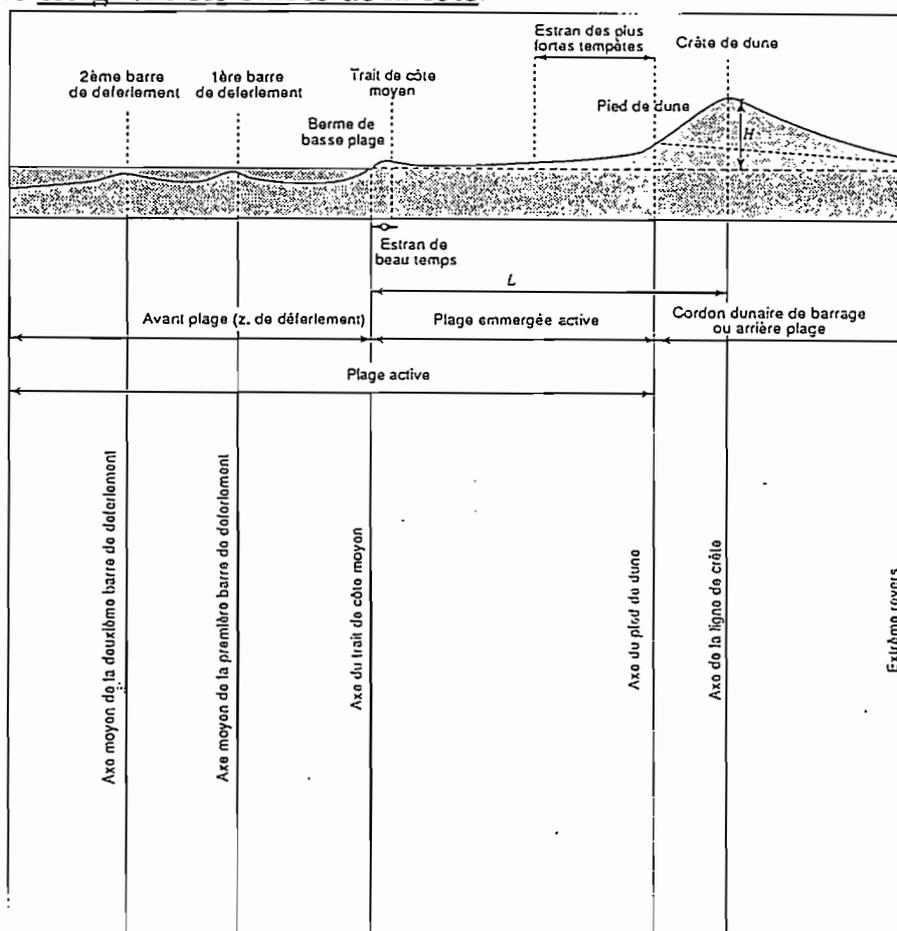


Figure n°1 : Morphologie de la zone littorale (IARE-1989)

Si le système est équilibré, on observe une alternance de transports de masses identiques. Lors des déséquilibres, les masses ne peuvent se neutraliser, il se produit alors un engraissement (prépondérance des importations), ou une érosion (exportations majoritaires) ce qui est le cas du lido de Sète, car un besoin de protection apparaît en divers secteurs (épis, brises lames, ganivelles...).

III. Présentation d'éléments de courantologie pré-littorale

La configuration du lido de l'étang de Thau le rend sensible aux houles de sud-ouest et de sud-est. Leur angle d'incidence par rapport à la côte engendre, ou non, un courant de dérive littorale (*long shore current*) dans la zone de déferlement des vagues (cf. annexe n°2).

L'interprétation des plans de réfraction des houles (cf. annexe n° 1) permet de suggérer un sens d'écoulement de la dérive littorale de direction sud-ouest. La SOGREAH (1984) indique que le transit général résultant de cette dérive, sur une année, est de 17 000 à 45 000 m³ vers le sud-ouest. La masse de sédiments transportés par ce courant est donc importante, comme l'illustre la figure n°2. Elle contribue à la turbidité des eaux pré-littorales, particulièrement après les périodes pluviales où se conjuguent remise en suspension des sédiments et sortie d'eau des étangs. Dans ces conditions, les formes pré-littorales sont masquées par des particules terrigènes en suspension.

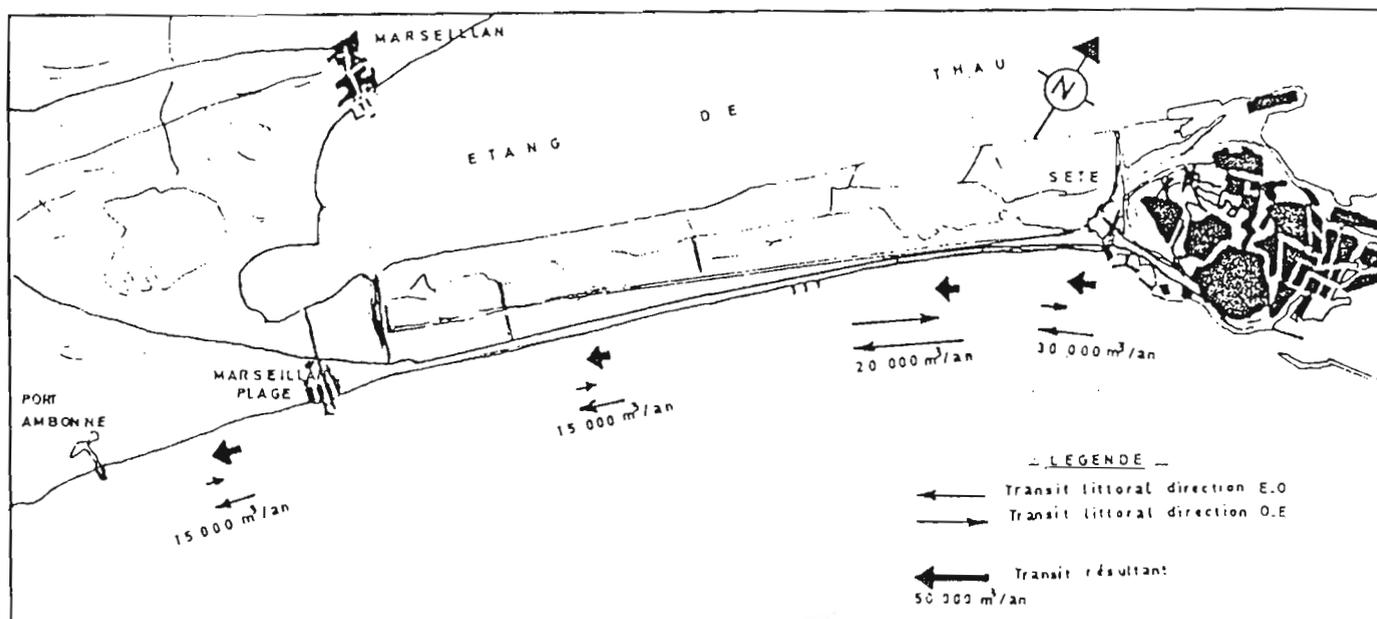


Figure n°2 : Transit littoral le long du lido de l'étang de Thau (Ruéda - 1985)

IV. Les données de références

Face aux diverses agressions physiques, un suivi de cet espace fragile, support et gardien de nombreuses activités économiques (cave de listel, activités conchylicoles, infrastructure routière, tourisme...) s'est imposé.

C'est pourquoi, comme nous l'avons souligné, depuis 1989, L'Institut des Aménagements Régionaux et de l'Environnement (I.A.R.E.), le Laboratoire de Recherche en Sédimentologie Marine (L.R.S.M.) et le Service Maritime de la Navigation du Languedoc-Roussillon (S.M.N.L.R) réalisent des relevés de terrain afin de comprendre et de modéliser le fonctionnement morphodynamique de ce lido.

Les mesures topo-bathymétriques prises comme références dans cette analyse, sont celles effectuées par le L.R.S.M. De fréquence généralement mensuelles, elles sont réalisées au théodolite électro-optique géodimeter140 et positionnées par rapport à des bornes fixes. Elles sont recueillies sous forme d'échogrammes dont le décodage et le dépouillement peuvent donner trois types de documents : des profils, des cartes d'isobathes (cf. annexe 3) et des blocs diagrammes. L'image (voir p11) permet de localiser les différents profils et leurs regroupements au sein de bases (cf tableau 1) :

- au nord-est du lido, la base de Sète (S) est composée de onze profils espacés de cinquante mètres environ,
- la base de Marseillan (M), au centre du lido, comprend elle aussi onze profils identiquement espacés (cf. annexe n°3).

Ces vingt deux profils sont complétés par onze profils topographiques et six profils bathymétriques levés "à un pas spatio-temporel plus large" (J. Brissaud et J.P. Barusseau-1989).

Base	Marseillan	Sète
Type	lido sableux	lido sableux
Forme	rectiligne	rectiligne
Orientation	N-NE	N-NE
Linaire	500 m	500 m
Latéral	50 m	45 m
Cordon dunaire	très érodé	très frustré

Tableau 1: Description des bases de Sète et de Marseillan
(d'après Barusseau, Radulescu -1991)

Les données bathymétriques dont nous disposons pour cette étude sont récapitulées dans le tableau n°7 *in supra*. A ces données, il convient de rajouter les informations tirées de la carte IGN de "Sète-Cap d'Agde" au 1/25 000, des photographies aériennes du 12 et 13.06.1989, du 19.09.1991, et du 3 et 13.07.1992, disponibles à l'IARE.



Photographie n°1 : Le lido de l'étang de Thau coté Sète (cliché S.L. Juillet 1994)



Photographie n°2 : Le lido de l'étang de Thau coté Marseillan(cliché S.L. Juillet 1994)

Bassin de Thau

1.4 gr

Base de Sete

48.20 gr

profil 51

profil 56

profil 511

Base de Marseillan

profil M1

profil M11

Mer Mediterranee

Localisation des bases de Sete et de Marseillan

-extrait de la carte IGN "Sete - Cap d'Agde" et composition coloree sur l'image SPOT du 24.09.89 -
echelle: 1/40 000

1
N

PARTIE I

TRAITEMENT COMPARE D'UNE IMAGE SPOT ET D'UNE IMAGE LANDSAT

La télédétection est définie comme "*l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci*" (J.O. du 12 décembre 1980 - Commission Ministérielle de la terminologie de la télédétection aérospatiale COMITAS - 1988). Avant de présenter l'ensemble des traitements, rappelons préalablement quelques notions de télédétection.

I. Éléments de télédétection et sélection des images satellites

Éléments préliminaires

La télédétection passive regroupe l'ensemble des techniques mesurant le rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par les objets sous éclairage solaire. Ce rayonnement est décomposable en une somme de longueurs d'ondes sinusoïdales élémentaires appelées composantes élémentaires du rayonnement (cf. annexe n°4).

A la surface de la terre, le rayonnement solaire subit trois processus classiques : absorption, réflexion et transmission. La réflexion est mesurée physiquement par le rapport de l'énergie réfléchie sur l'énergie incidente qui donne la réflectance. Cette mesure dépend de la nature de la cible et de la longueur d'onde considérée. La réflectance est exprimée par une information numérique : la radiométrie. La télédétection satellite est donc la technique d'acquisition d'informations sur la surface terrestre dans différentes longueurs d'ondes du spectre électromagnétique.

La signature spectrale de l'eau est fonction "*du rayonnement solaire dont la partie qui atteint la surface de l'eau est réfléchie de manière spéculaire, une autre réfractée qui pénètre dans l'eau. Cette partie réfractée est ensuite partiellement absorbée et diffusée ; L'atténuation du rayonnement en fonction de la profondeur se manifeste sous forme exponentielle*" (Bonn F. et al. -1992). Ainsi les longueurs d'ondes inférieure à $0.5\mu\text{m}$ ont une diffusion importante dans l'eau ; les molécules d'eau étant plus petites qu'elle (diffusion de Raleigh). Le seuil de $0.45\mu\text{m}$ défini comme

celui de l'absorption minimale dans l'eau, est donc aussi celui de la réflectance maximale (cf. figure n°3). Au dessus de cette limite, l'absorption du rayonnement est exponentielle jusqu'à l'infrarouge.

Par conséquent :

- la courbe de réflectance du comportement spectral de l'eau diminue du visible à l'infrarouge,
- l'intervalle reconnu comme celui de la pénétration maximale de la lumière dans l'eau, est compris entre 0,45 et 0,57 μm (Lyrenza et al.: - 1979)², ce qui est assimilable aux deux premiers canaux LANDSAT TM et aux premiers canaux de SPOT. Nous tenterons de le confirmer ou de l'infirmer par la suite, après avoir pris connaissance des vecteurs et capteurs utilisés.

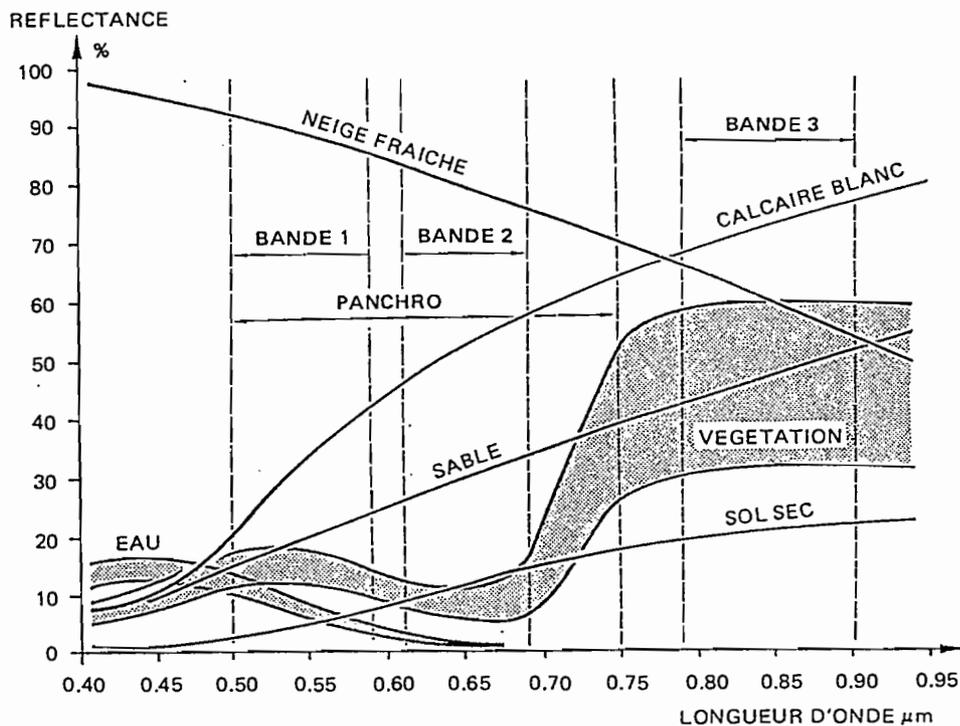


Figure n°3 : Signature spectrale typique et bandes spectrales de SPOT (SPOT IMAGE)

Spécificité des vecteurs et capteurs utilisés

La notion de vecteur se définit comme un véhicule aérien ou spatial transportant une plate-forme où sont installés des capteurs ou détecteurs.

* Le satellite SPOT3

Depuis le lancement du premier Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT1) en 1986, mis en veille en 1991, se sont succédés deux autres satellites, SPOT2 et l'actuel SPOT3. Le satellite SPOT évolue à une altitude de 818 km à l'équateur pour 833 km à l'apogée (M.C. Girard - 1989), selon une orbite quasi polaire³, phasée et héliosynchrone.

²Cité par Lessard G. L. et al-1989-

³L'inclinaison est de 98,7° au lieu de 90° pour une inclinaison polaire

Il passe au noeud descendant à la même heure locale, 10 h 30, avec une précision de plus ou moins 15 minutes. Après 26 jours et 369 orbites soit : 14+5/26 révolutions par 24h, et il repasse sur ses traces, assurant une répétition des observations. SPOT3 est équipé de deux capteurs multibandes Haute Résolution Visible (HRV) comportant quatre canaux :

canaux	μm	résolution spatiale
XS1=Vert	0,50-0,59	20 m
XS2=Rouge	0,61-0,68	20 m
XS3=Proche infrarouge	0,79-0,89	20 m
P=Panchromatique	0,51-0,73	10 m

Tableau 2 : Caractéristiques des canaux de SPOT3

En visée verticale, chaque instrument balaye au sol une largeur de 60 km portée à 117 km quand les deux capteurs sont pointés dans des directions adjacentes. Ils peuvent réaliser des visées obliques à +/- 27° grâce à des miroirs orientables, ce qui augmente la répétition des observations et permet l'obtention de couples stéréoscopiques.

* Le satellite LANDSAT5

Originellement appelé E.R.T.S. pour Earth Ressources Technology Satellite, le programme LANDSAT, pour Land Satellite, a été doté de deux types de systèmes de détection :

- un analyseur multispectral (Multi Spectral Scanner) avec une résolution 79 mètres (LANDSAT 1, 2, 3)

- et un dispositif de cartographie thématique (Thematic Mapper) des satellites LANDSAT 4 et LANDSAT 5 actuellement en fonctionnement. Entre autres objectifs assignés à ce satellite, remarquons la détermination des littoraux et des voies navigables cités par le Service de Consultance en Observation de la Terre (SCOT Conseil) en 1989.

Comme son homologue français, le satellite de la NASA gravite selon une orbite polaire (705 km), de type circulaire et héliosynchrone. Le renouvellement de la couverture terrestre se réalise tous les 16 jours, soit après 233 révolutions. Le satellite traverse l'équateur à 9h45 a.m. (Joly G.-1988). Le recueil des données est assuré par un radiomètre équipé de sept capteurs à haute résolution dont les caractéristiques sont décrites dans le tableau 3 :

canaux	μm	résolution spatiale
TM1=Bleu	0,45-0,52	30 m
TM2=vert	0,52-0,61	30 m
TM3=Rouge	0,62-0,69	30 m
TM4=PIR	0,78-0,90	30 m
TM5=Moyen IR	1,55-1,78	30 m
TM6=IR Thermique	10,4-12,5	120 m
TM7=Moyen IR	2,08-2,35	30 m

Tableau 3 : Caractéristiques des canaux de LANDSAT 5

Lors de la prise de vue, les seize capteurs de chacun des canaux enregistrent les signaux relatifs à seize lignes successives de balayage avec une résolution de 30 m. Seul, le sixième canal enregistre les signaux relatifs à quatre lignes de balayage pour une résolution de 120 m. Chaque scène enregistrée couvre une surface trois fois supérieure à celles des scènes SPOT, soit 185x185 km.

Les images satellites recueillies par chaque capteur sont composées d'une mosaïque de taches élémentaires appelées pixels (*picture element*). Chaque pixel est localisé par des coordonnées cartésiennes et affectés de valeurs radiométriques dans chacun des canaux de l'enregistrement.

La répétition des observations, les diverses résolutions spatiales prédisposent l'utilisation de ces capteurs pour une étude littorale, même si tel n'est pas l'objectif qui leur était assigné. Néanmoins, ils comportent au minimum une bande spectrale entre 0.45 μm et 0.5 μm , connue comme étant celle de la pénétration maximale dans l'eau.

D'après Diaw et al. (1986), le canal xs1 est le plus sensible à la diffusion de l'éclairement par les éléments en suspension dans l'eau (matière dissoute, plancton et matière jaune). Il peut être utilisé pour une reconnaissance des formes sous marines de -12 à -30 mètres (Memanteau-1992) ou pour la détermination de la couverture végétale des fonds marins jusqu'à -15 mètres contre -5 mètres pour xs2 (Koudil - 1993). Le canal xs2, et par assimilation le canal TM3, se définissent comme étant "*moins sensibles à la diffusion de la lumière par les particules en suspension mais encore peu absorbés pour se révéler aptes à réfléchir l'éclairement incident reçu par les petits fonds*" (Diaw et al. - 1986).

Le fort pouvoir d'absorption de l'eau dans le proche infrarouge est utilisé pour mettre en évidence le contraste des réflectances milieu terrestre /milieu aquatique. Cette fenêtre peut servir à tracer de manière précise les lignes instantanées de rivages (Pestre et Verger -1980), ou révéler le tracé d'anciens contacts mer/continent (Memanteau -1990). Mais elle "*reste inapte à fournir des informations tant sur le fond que sur la colonne d'eau*" (Diaw et al. - 1986). L'océanographie peut faire appel à cette longueur d'onde pour étudier les phénomènes de surface comme la houle ou les charges turbides (Diaw et al. - 1986, Anselme et al.- 1992).

Les fenêtres correspondant à une faible absorption auront une utilisation préférentielle pour l'étude des milieux marins. Les canaux xs1 et xs2 de SPOT ou les canaux TM1 TM2 et TM3 de LANDSAT sont, par exemple, utilisés pour la localisation des hauts fonds ou pour affiner les cartes marines. Enfin, soulignons que la signature spectrale de l'eau dépend étroitement de la nature du fond en zone peu profonde et des caractéristiques de la masse liquide : charge en particules triptoniques, charge en éléments planctoniques, présence de matières organiques dissoutes (matière jaune), température, état de la surface...

Avant de présenter les outils de traitements utilisés, attardons-nous sur le choix des images.

Sélection des images-satellites

Pour sélectionner les images, le choix a été établi suivant la représentativité des mesures bathymétriques au jour de la prise de vue. Même si un certain décalage existe entre les mesures de terrain et les enregistrements satellites, il ne doit pas comporter d'événements susceptibles de modifier significativement le milieu (cf. partie I).

Le choix de la scène LANDSAT a porté sur la scène du 30.01.1991. Contrairement aux autres scènes disponibles (3.05.1990, 10.10.1990 et 28.08.1990), celle-ci correspondait à une période de mesures *in situ*.

Selon le centre météorologique de Montpellier-Fréjorgues, durant les 11 jours qui séparent les enregistrements multi bandes des mesures de terrain (le 12.02.1991), aucun événement météorologique susceptible de perturber la morphologie littorale n'a été noté. Seuls ont été signalés, quelques millimètres de pluies et un vent de mer relativement faible. Les informations techniques recueillies sur cette image sont présentées dans le tableau 4 :

date de l'acquisition	30-01-91
satellite	LANDSAT 5
mode spectral	TM
centre de la scène	latitude : N 43°44" longitude 03°20"
qualité de l'image	lignage et colonage
nébulosité	néant

Tableau 4 : Caractéristiques de la scène LANDSAT

La sélection d'une scène SPOT a été plus délicate. Les scènes correspondant à des périodes pour lesquelles les mesures de terrains sont disponibles ont été triées à partir de différents critères éliminatoires :

- couverture nuageuse importante sur la zone littorale : scènes du 30.06.1990 (xs) et du 04.12.1990 (P+xs)
- prise de vue et relevés de terrains entrecoupés de périodes météorologiques impropres à la conservation en l'état du système littoral (vents importants d'est à sud-est, orages violents, mer forte à agitée), scènes du 26.05.1992 (xs), 18.10.1992 (xs)
- positionnement (K.J.) ne comprenant qu'une partie de la zone d'étude (voir annexe n°5) : scène du 03.06.1990 (xs)
- enregistrement effectués en dehors de la période hivernale : scène du 03.06.1990 (xs), scène du 26.05.1992 (xs), scène du 30.06.1990 (xs).

Ainsi seules les scènes du 24.09.1989 (xs) et du 17.02.1994 (P+xs) se sont révélées intéressantes pour notre étude.

Pour la scène SPOT du 24.09.1989, l'intervalle entre les mesures de terrain et l'enregistrement de l'image est plus grand que pour la scène LANDSAT, les mesures de terrain étant réalisées le 05.09.1989. Toutefois, dans cet espace temporel large, les conditions météorologiques sont restées suffisamment stables pour assurer une pérennité du système pré-littoral.

Cette scène est de bonne qualité, sans couvert nuageux. Les caractéristiques de la scène entière sont regroupées dans le tableau 5 :

date de l'acquisition	24-09-89
satellite	SPOT 1
mode spectral	XS
KJ	047-263
coin bas droite de la scène	latitude : N 42°50'46 longitude : E 03°59'57
heure	11h06
pré traitement	1B
azimut solaire	+168,7°
angle d'incidence	⁴ Left 26,2
qualité de l'image	colonage
nébulosité	néant

Tableau 5 : Caractéristiques de la scène SPOT de 1989

- L'image SPOT (P+xs) de 1994 possède une qualité optique supérieure à l'image de 1989, sans couvert nuageux et sans bruit pouvant la perturber. Les mesures de terrain de référence, ont été réalisées après la prise de vue, le 20.02.1994. Il n'existe aucun événement météorologique significatif entre les deux. Cependant, la scène présente une turbidité en zone littorale (cf. image p18). En effet, huit jours avant la prise de vue, un important orage était noté. La masse de sédiments charriée par les courants littoraux est encore importante et masque les formes pré-littorales. Cet état imprévu n'était pas perceptible sur le "Quick look" de l'image.

satellite	SPOT 3	SPOT 3
mode spectral	XS	P
KJ	0476-262	0476-262
coin bas à droite de la scène	latitude : N 43°15'49 longitude : E 03°53'24	latitude : N 43°06'23 longitude : E 03°49'43
heure	11h10	11h10
pré traitement	1B	1B
azimut solaire	+165.4°	+165.3°
angle d'incidence	Left 29.3	Left 29.3
qualité de l'image	excellente	excellente
nébulosité	néant	néant

Tableau 6 : Caractéristiques de la scène SPOT de 1994

De ces observations il ressort que seules deux images sont réellement exploitables dans le cadre d'une étude bathymétrique. Les données de terrain leur correspondant sont regroupées dans le tableau 7. Elles servent de référence à l'interprétation des enregistrements satellites.

	carte bathymétrique	profil, topobathymétrique	modèle 3d
LANDSAT 30.01.91	aucune	S1,S2,S3,S4,S6,S11	aucun
SPOT 24.09.89	Sète et Marseillan	complets	Sète et Marseillan

Tableau 7 : Correspondance entre les images et les données disponibles

⁴La trace du satellite est à l'ouest de la scène



II. Environnement matériel et logiciels

L'Unité de Télédétection et de Traitement d'Image du centre O.R.S.T.O.M. de Montpellier (U.T.T.I.M.) dispose de différents matériels :

- un dérouleur de bande magnétique et un CDrom pour le transfert des données brutes,
- une station SUN,
- un scanner Sharp JX-300 pour la numérisation des données, telles les photographies aériennes et les cartes,
- un lecteur de disque optique numérique,
- une imprimante couleur TEKTRONIX Phaser III-PXI et une imprimante couleur CANON FP-510,
- un Macintosh (LCIII).

Ces équipements sont liés par un réseau Ethernet permettant le transfert d'informations d'une machine à l'autre (cf. p 18 figure A).

La visualisation et le traitement d'images sont exécutés sur deux types de logiciels :

- le logiciel PLANETE développé à l'ORSTOM par M. Rakoto (SEAS-la Réunion), intégrant : visualisations, classifications, statistiques, filtrages, corrections géométriques...

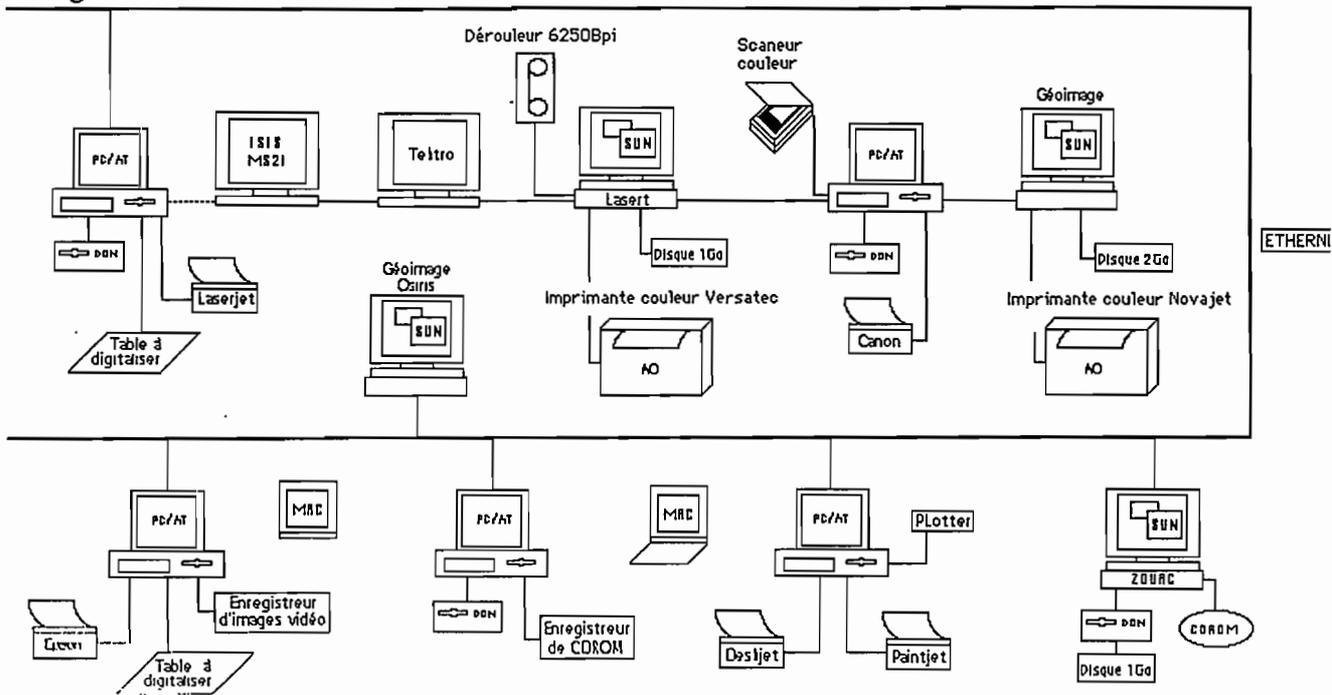
- le logiciel "Outil et Système Intégré de Recherche en Imagerie Spatiale" (OSIRIS), développé par D. Lille et V. Pierre (ORSTOM Nouméa/LATICAL), S. Dupont et L. Gautheron (SMAI/ESTEL). Ce logiciel intègre des modules de traitement de PLANETE et d'OPAL (cf. p 18 figure B).

La numérisation des photographies aériennes se fait à l'aide du logiciel COLORLAB développé par J. Noël. Le traitement des images aériennes est effectué à l'aide du logiciel GEO-IMAGE. Les extractions en ASCII sont réalisées à l'aide des logiciels SPYGLASS et OSIRIS et traitées sous tableur (EXCEL).

Cet ensemble de matériels et de logiciels nous a permis de procéder à l'exploitation des scènes retenues dans le cadre de ce travail.

NB : L'utilisation de modules de ces logiciels sera parfois citée en référence de bas de page pour les manipulations particulières.

Figure A



OSIRIS

Logiciel de teledetection et de traitement d'image
 ORSTOM / Mission Technique Teledetection
 Territoire de Nouvelle Calédonie

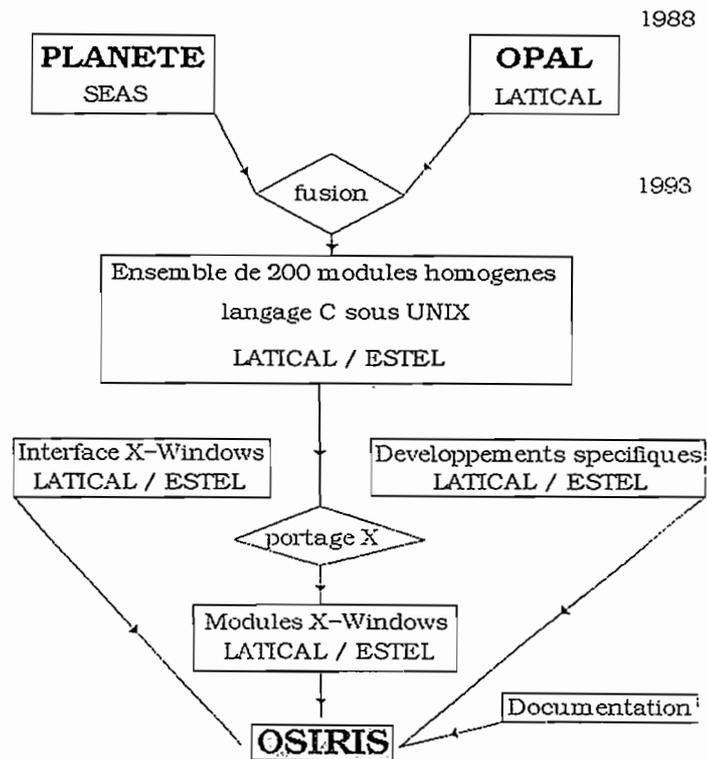


Figure B

III. Pré-traitement des images SPOT et LANDSAT

III.1. Choix de la zone d'étude

Visualisation et extraction

L'imagette SPOT, disponible au "Pôle Télédétection", est un extrait de 512 lignes x 512 colonnes d'une scène entière centré sur la zone d'étude. L'image a subi un pré-traitement de niveau 1B⁵, c'est à dire une correction radiométrique complète, une égalisation des réponses des détecteurs et une correction des déformations géométriques inhérentes au système d'acquisition.

L'image LANDSAT, mise à disposition par le GUTLAR, est une scène entière de 2 944 lignes x 3 600 colonnes (cf. tableau 7). La lenteur d'exécution du traitement rend nécessaires l'extraction de la partie utile de l'image⁶. Elle est réalisée selon des dimensions identiques par rapport à la scène SPOT.

La visualisation des deux premiers canaux de l'image SPOT permet d'identifier les éléments du système littoral (cf. figure 1). Deux barres d'avant côte sont bien individualisées. D'autres éléments concernant la masse liquide sont visibles. Il s'agit notamment des panaches de turbidité présents au sortir du canal des Quilles et sur la partie nord du bassin de Thau. On distingue aussi clairement les tables conchyliques et leur répartition sur l'étang. En comparant visuellement ces canaux, ils semblent receler des informations similaires sur le milieu aquatique. Ce que pourrait confirmer leur fort coefficient de corrélation : par exemple 0,96 % pour SPOT entre les canaux xs1 et xs2 (cf. tableau 10).

	xs 1	xs 2	xs 3
xs 1	78.35	100.21	98.41
xs 2	100.21	138.73	139.32
xs 3	98.41	139.32	175.06

Tableau 8 : Matrice de covariance des canaux bruts de l'image SPOT -24.09.89-

Sur l'image LANDSAT, la structure du système littoral immergé est moins perceptible. Les structures conchyliques, pour leur part, apparaissent. Cette image permet cependant de délimiter la zone littorale chargée en sédiments (réflectance élevée), et les zones turbides qui s'épanchent sous la forme d'un panache à la sortie du canal des Quilles ou du port de Sète.

⁵ Les produits SPOT sont disponibles selon quatre niveaux de prétraitement :

1A = simple égalisation des réponses spectrales

1B = correction radiométrique et géométrique

2 = correction radiométrique et géométrique dans une projection cartographique donnée

S = rectification permettant une superposition à une scène de référence.

⁶Le canal TM6 (IRT) a volontairement été supprimé des traitements, sa résolution de 120 m et son ouverture spectrale ne pouvant apporter des éléments intéressants pour la thématique des petits fonds.

Le panache sortant du port de Sète est le plus marqué, il s'allonge en mer en s'incurvant vers le nord-est. Cette turbidité peut être mise en relation avec les activités du port et/ou avec les sorties d'eau des étangs, c'est ici que débouche un des canaux reliant l'étang de Thau à la mer.

	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
TM1	15,7	11,22	17,84	24,02	42,58	-2,37
TM2	11,22	10,95	17,15	24,95	42,92	-6,06
TM3	17,84	17,15	29,81	43,96	76,34	-10,68
TM4	24,02	24,95	43,96	84,67	136,57	-17,17
TM5	42,58	42,92	76,34	136,57	240,37	-26,63
TM7	-2,37	-6,06	-10,68	-17,17	-26,63	26,72

Tableau 9 : Matrice de covariance des canaux bruts de l'image LANDSAT

NB : La matrice de corrélation découle de la matrice de covariance. C'est une division de chacun des termes par la racine carrée des produits des variances (écarts types) des deux canaux correspondants. Une valeur élevée proche de 1 indique des canaux très corrélés, avec un contenu d'informations identique (FOIN-1987).

Les canaux du domaine visible présentant le plus d'intérêt pour l'étude d'un milieu littoral sont : xs 1 et xs 2 de SPOT et TM 1, TM 2 et TM 3 de LANDSAT (cf. tableaux 10 et 11).

Ces corrélations sont dues à des ouvertures spectrales proches, et à un poids élevé de l'élément liquide qui représente environ 85 %, contre 15% pour la terre sur l'image SPOT et environ 75 %, contre 25% pour la terre sur l'image LANDSAT TM.

	xs 1	xs 2	xs 3
xs 1	1	0.96	0.84
xs 2	0.96	1	0.89
xs 3	0.84	0.89	1

Tableau 10 : Matrice de corrélation des canaux bruts de l'image SPOT -24.09.89-

	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
TM1	1,00	0,87	0,84	0,67	0,70	-0,12
TM2	0,87	1,00	0,95	0,82	0,84	-0,35
TM3	0,84	0,95	1,00	0,88	0,90	-0,38
TM4	0,67	0,82	0,88	1,00	0,96	-0,36
TM5	0,70	0,84	0,90	0,96	1,00	-0,33
TM7	-0,12	-0,35	-0,38	-0,36	-0,33	1,00

Tableau 11 : Matrice de corrélation des canaux bruts de l'image LANDSAT-

Traitements préliminaires

Le niveau de pré-traitement des images retenues ne permet pas d'obtenir des données référencées et donc superposables. De plus, il existe une distorsion géométrique sensible sur le bord de l'image, inhérente à la prise de vue (voir page 24). Il se pose un problème identique pour comparer les images et les cartes de références. La rectification des images est réalisée à partir de points d'amers terrestres correspondant "à quelques pixels de l'image dont la localisation précise va concourir à rectifier les déformations ..." (G.Joly-1986).

Pour superposer les images à la carte IGN numérisée, une rectification géométrique polynomiale de degré 1, par plus proche voisin est utilisée en s'appuyant sur trois points d'amers⁷, bien répartis. Elle permet d'obtenir une spatio-carte sur laquelle les profils de mesure sont localisés (cf. page 11).

L'utilisation de masques radiométriques affine l'étude statistique de la répartition des pixels (Cuq-1983) en éliminant le mode présentant le moins d'intérêt. Nous avons utilisé deux options :

- soit, un réétalement de la dynamique de type linéaire (entre le minimum et le maximum) ou par palier (sur des intervalles radiométriques délimités sur les histogrammes)
- soit, la création d'un canal binaire qui masque les thèmes ne présentant aucun intérêt. La mise à profit de la bimodalité de l'histogramme du canal infrarouge permet de discriminer aisément les deux modes "terre" et "eau", en attribuant la valeur 0 à la terre et la valeur 1 à la mer.

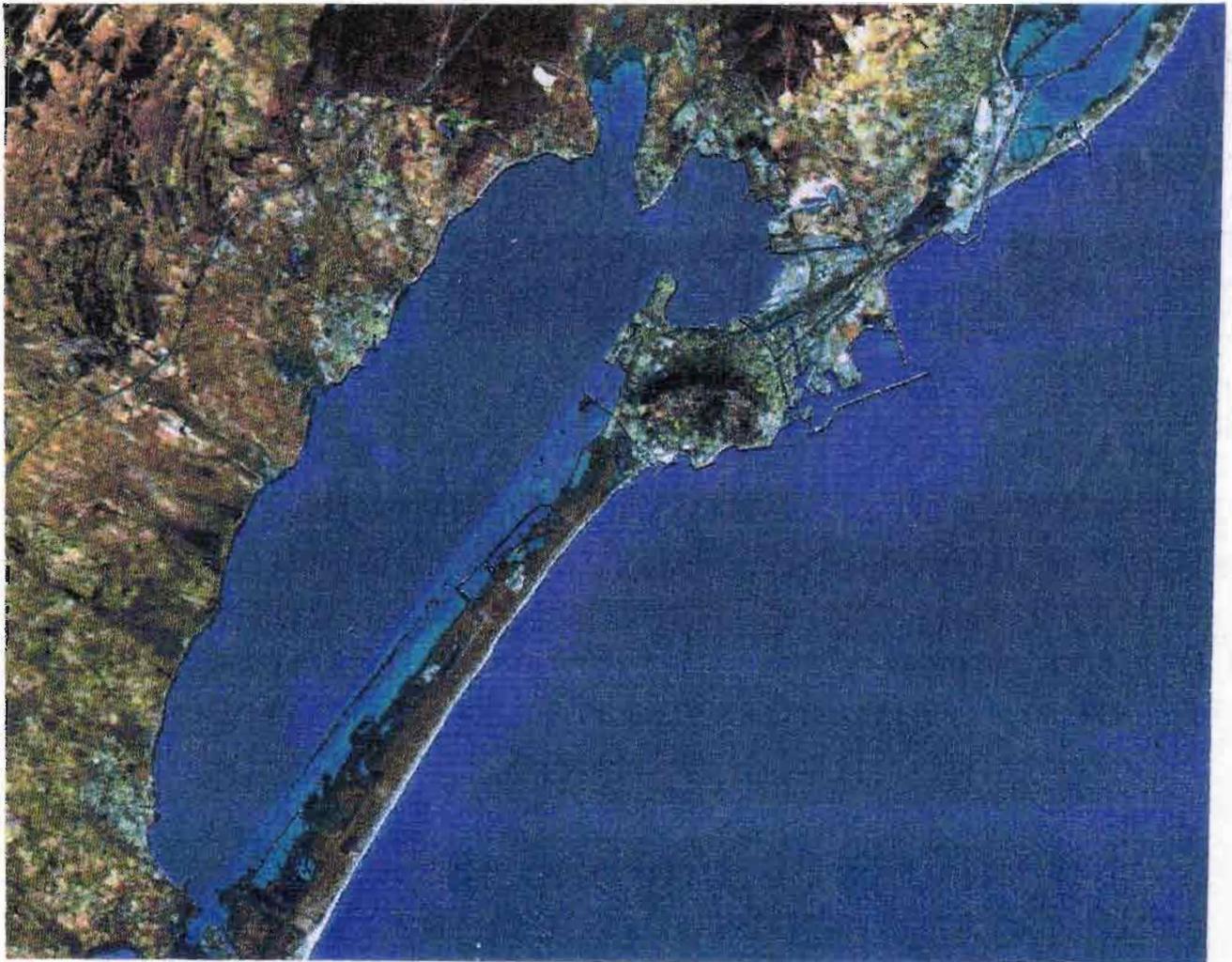
La multiplication des masques avec les autres canaux permet de ne visualiser que les informations concernant le thème d'étude. La séparation optimale après affinage des seuils permet de retenir le canal XS3 pour SPOT et les canaux TM4 et TM5 pour LANDSAT. Ce traitement est complété par l'application manuelle d'un masque sur l'étang de Thau.

Composition colorée

La composition colorée est une synthèse basée sur la sélection de trois canaux (de préférence les plus décorrélés) auxquels on affecte les couleurs de base : bleu, vert et rouge. L'image trichrome obtenue peut réunir les résultats d'opération de synthèse ou de comparaison entre les canaux et/ou les néo-canaux.

Sur les données SPOT, les trois canaux ont été mis à contribution pour réaliser une composition colorée en fausse couleur, en affectant le maximum de poids au canal bleu (Bleu = $x_{s1} \cdot 8$, Vert = $x_{s2} \cdot 8$, Rouge = $x_{s3} \cdot 4$), et ce contrairement aux traitements en milieu terrestre où l'on affecte en général le bleu sur quatre niveaux. La "synthèse additive" (Couzy-1981) de 256 couleurs obtenue, fait ressortir la végétation en rouge, les marais salants en vert, les plages et les sols nus en blanc et les zones lagunaires et marines en bleu.

⁷-Wgref-OSIRIS



Superposition de deux compositions colorées sur la scène LANDSAT TM
du 30.01.1991

Pour la réalisation d'une composition colorée sur l'image LANDSAT, nous avons essayé différentes combinaisons (B=TM2, V=TM3, R=TM5; B=TM2, V=TM3, R=TM4; B=acp2, V=acp3, R=acp1).

Par la suite, nous avons retenu la combinaison pour laquelle le milieu maritime présente le meilleur rendu optique (B8=TM1, V8=TM2, R4=TM3).

NB : Pour mettre en valeur les deux éléments terrestre et marin sur une même image, on effectue deux compositions que l'on superpose ensuite :

- * la première sur le domaine terrestre avec un masque radiométrique sur la mer (Bleu=TM2, Vert=TM3 et Rouge=TM5),

- * la seconde est réalisée de manière opposée pour le milieu marin (Bleu=TM1, Vert=TM2 et Rouge=TM3).

La visualisation de ces premiers traitements révèle certains défauts sur les images, en particulier des perturbations sous forme de lignes et de colonnes. Certains traitements peuvent limiter ces perturbations.

III.2. Tentatives de correction des images satellites

Les méthodes de délignage visent à pallier aux enregistrements de données erronées par des capteurs défectueux.

L'image-satellite SPOT

La visualisation des canaux bruts de la scène multibande SPOT révèle une bonne qualité optique, sans couverts nuageux. Le seul défaut réside en un lignage vertical. L'amplitude de cette perturbation est de 1 à 2 comptes radiométriques. Elle est évidente sur les surfaces homogènes à faibles radiométries : l'étang de Thau et la pleine mer. Une extraction des comptes radiométriques sur un profil horizontal de l'ensemble de l'image est réalisée. Elle ne permet pas de faire ressortir la périodicité de ce phénomène. Les caractères de cette perturbation, son impact léger sur la zone littorale, n'incitent pas à engager une procédure de délignage. Seul un filtre "par moyenne"⁸ a été testé, sans amélioration suffisante.

L'image-satellite LANDSAT TM

La visualisation et le réétalement de la dynamique de l'image TM font ressortir une perturbation plus importante que celle de l'image SPOT. Elle s'étend sur toute la scène. Elle est particulièrement marquée sur le domaine maritime et altère tous les canaux, même si les canaux rouge, infrarouge et moyen infrarouge paraissent les plus touchés. Ce bruit se manifeste par des hachures verticales, séparées entre elles par un lignage horizontal d'une occurrence de 16 lignes (cf. p 27 et graphique 1-2-3-4). La nature de cette répétition est sans doute révélatrice d'un réglage déficient du balayage. Ce phénomène a déjà été constaté sur des zones de réponses homogènes comme l'eau, la neige et le désert (D.L. Helder et al. - 1992).

⁸FENET3 du logiciel PLANETE

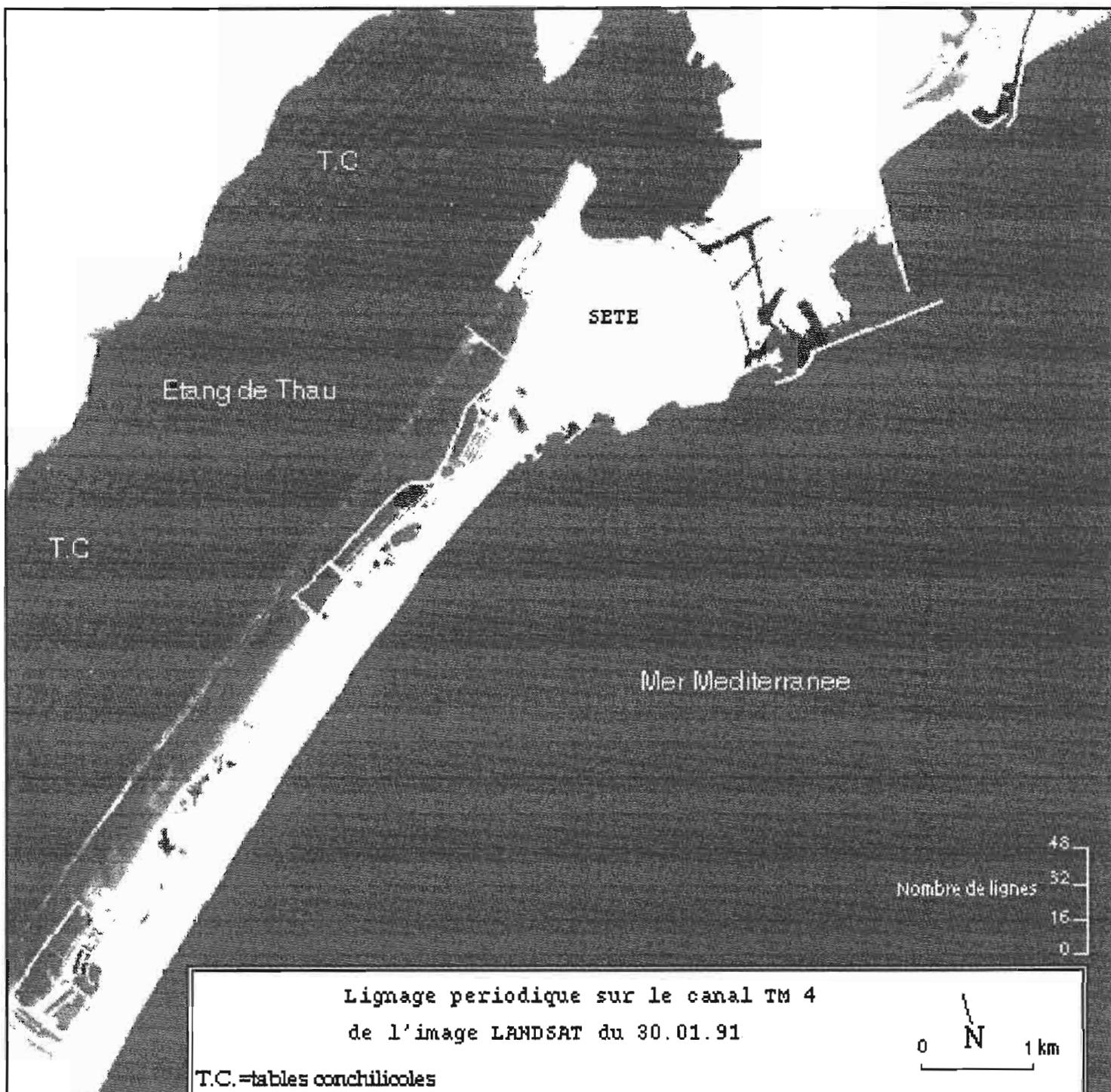
Dans un premier temps, la recherche d'une solution s'est tournée vers l'application de différents filtres visant à éliminer le bruit contenu dans les données. L'utilisation des transformations de valeurs par moyenne (lissage avec conservation des contours), variance (indice de texture), dilatation, érosion, écart-type, donne des résultats insatisfaisants.

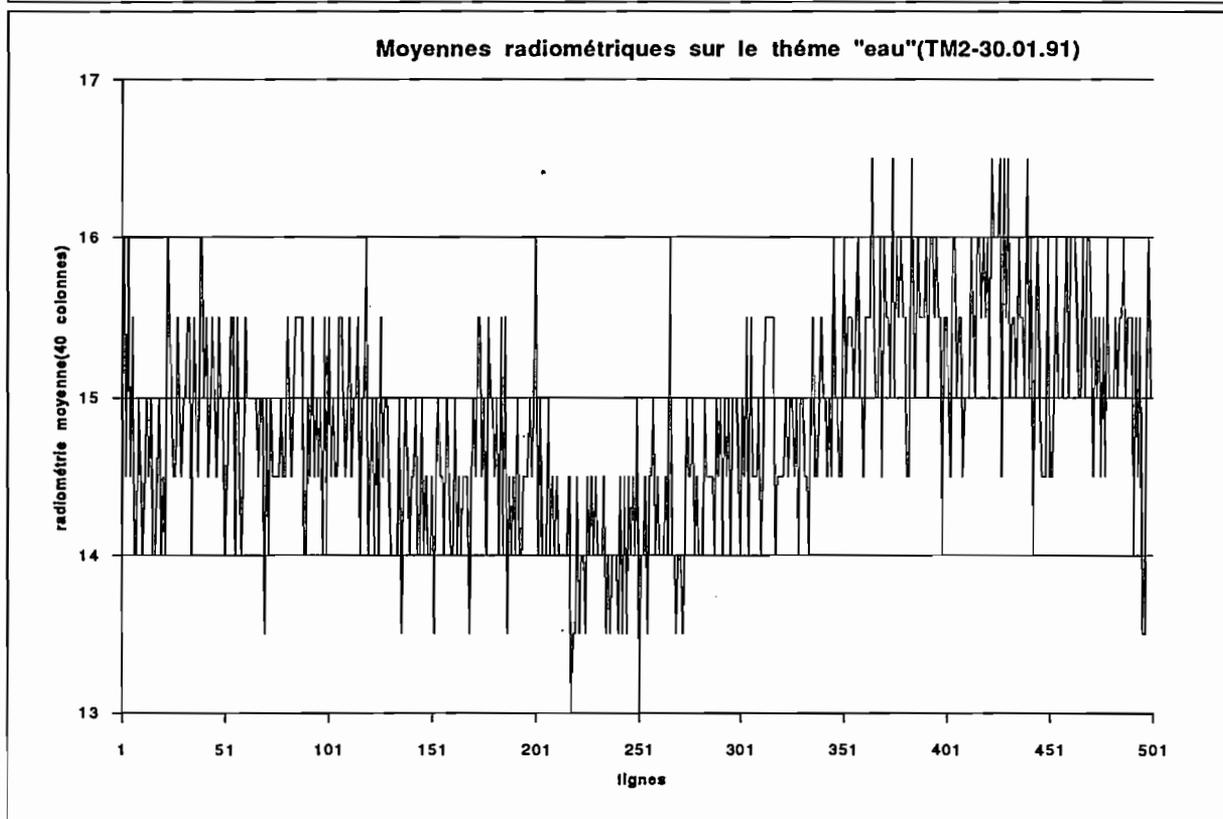
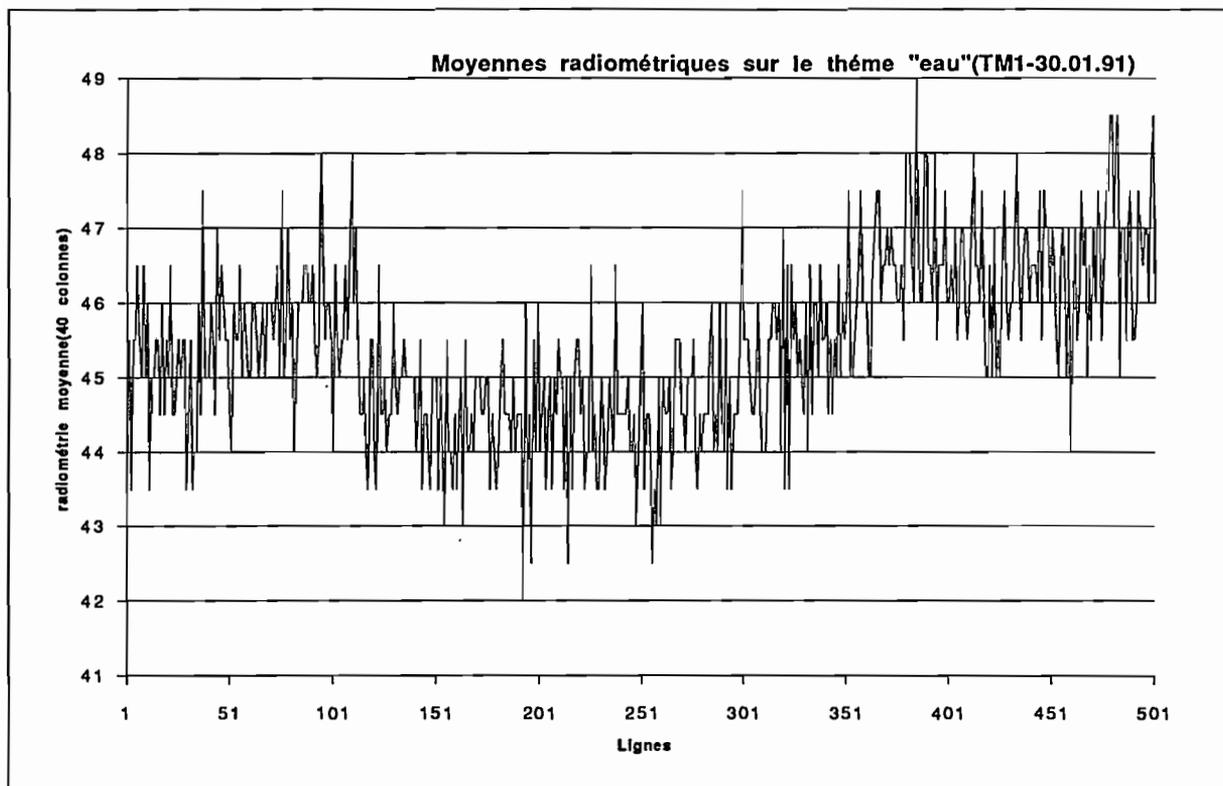
Dans un second temps, une autre technique a été suggérée par les articles de Srinivan et *al.* (1988) et d'Helder et *al.* (1992) qui proposent l'utilisation de la transformée de Fourier dans des conditions similaires. Cette dernière remplace *"une fonction unique, mais difficile à décrire mathématiquement, par une série beaucoup plus maniable de fonctions sinus et cosinus dont la somme reconstitue la fonction initiale"*(Bracewell R.-1989). Ce traitement appliqué à la radiométrie permet d'obtenir une méthode globale d'analyse de structure-texture mettant en évidence les périodicités plus fortes, qui se traduisent sur le spectre en densité angulaire par des hautes fréquences spatiales sous forme de *"pics"*(cf. graphique 5 p 30). Cependant, ce traitement est trop long pour être appliqué à l'ensemble de l'image ; de plus l'application d'algorithmes rapides de calcul est possible lorsque la dimension de l'image a une puissance de deux (Rakoto M. - 1992).

C'est pourquoi, l'extraction d'un carré de 256 lignes x 256 colonnes (2⁸) sur le domaine maritime est réalisée afin d'expérimenter la transformée de Fourier rapide (TFR). Du résultat de cet essai, il ressort un élément périodique de direction angulaire 90°. L'annulation de cette fréquence, qui représente 20% des informations, permet de synthétiser une nouvelle image sans perturbation périodique (cf. graphique 6 et image résultante page 31).

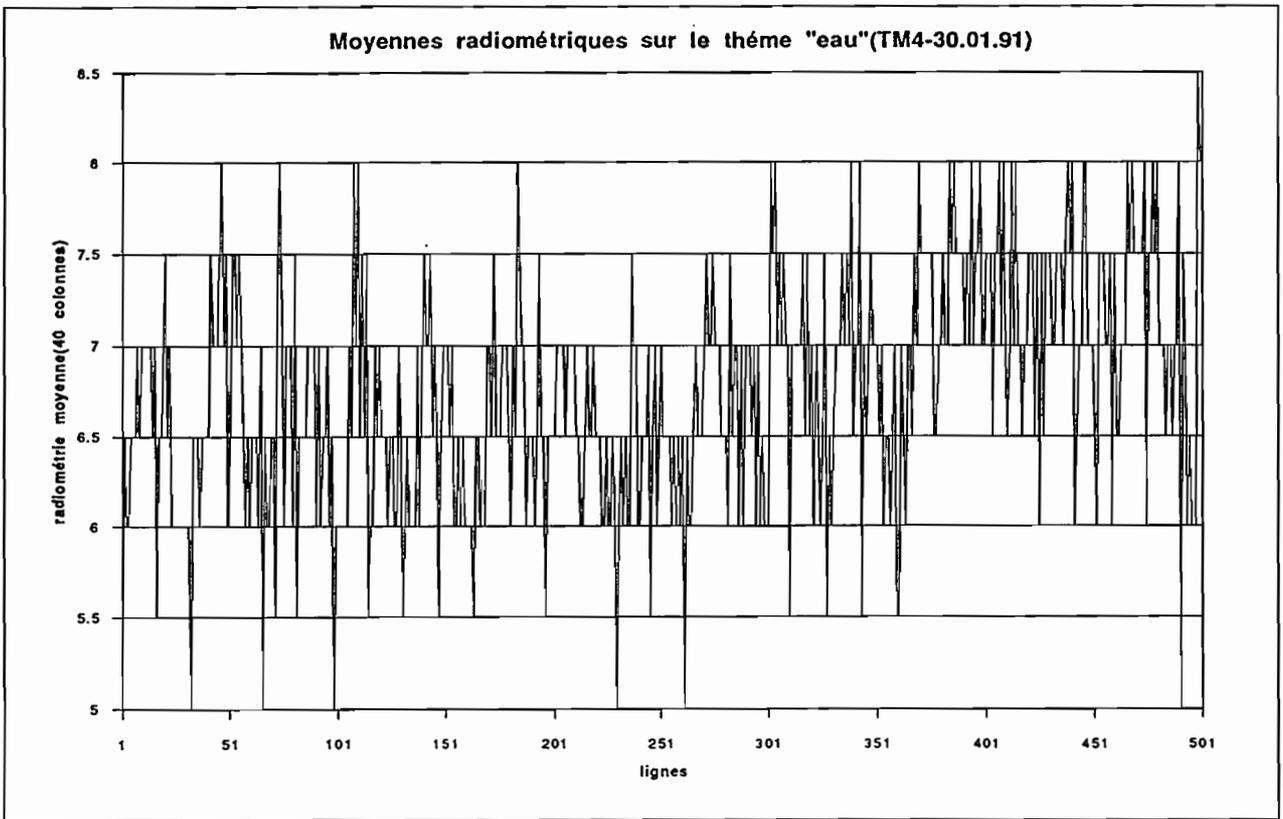
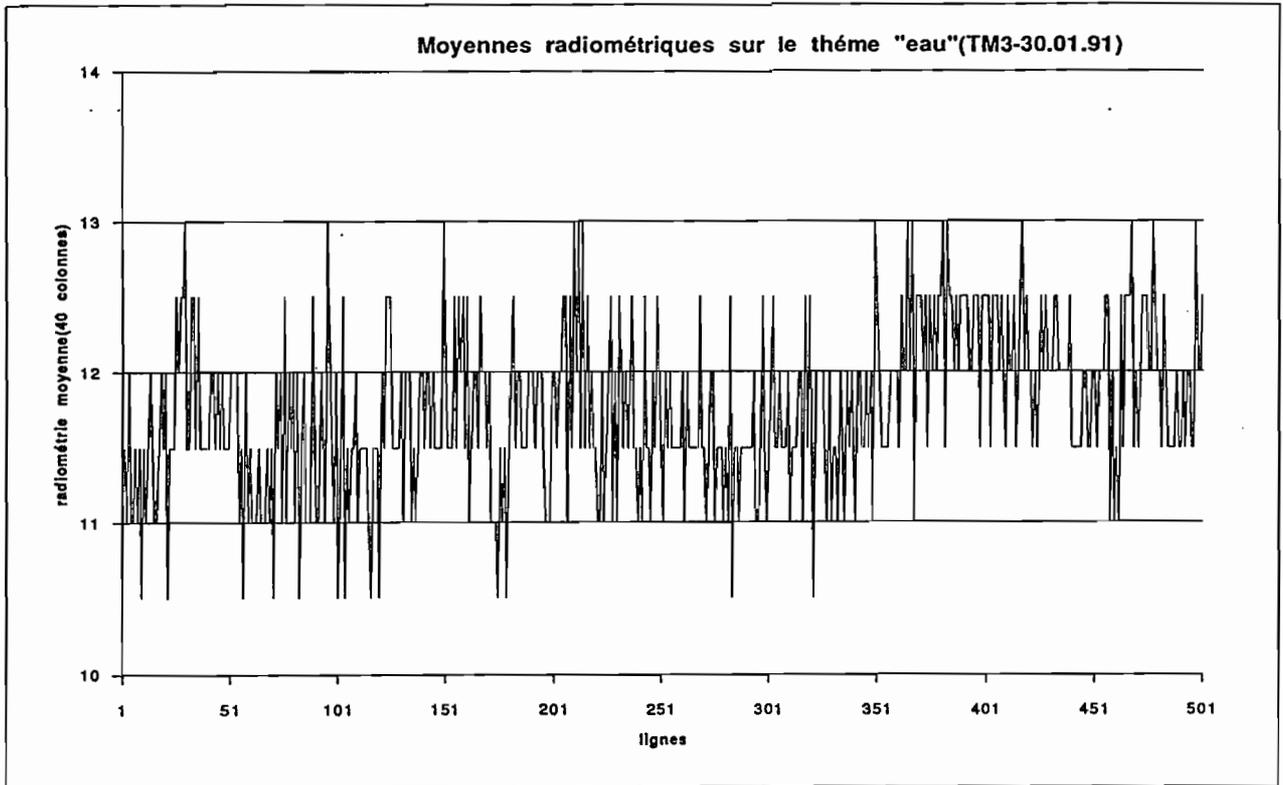
Or, cette suppression concerne principalement le domaine aquatique. La présence de phénomènes ondulatoires, sous forme de traînées s'appuyant sur les espaces de contact entre la terre et l'eau, points à forts gradients radiométriques, souligne une perte importante d'informations sur l'élément liquide.

Sur l'image que nous avons traitée (et selon le mode de traitement défini ci-dessus), la transformée testée perturbe de manière trop importante le milieu aquatique, et ce jusqu'à le rendre inutilisable pour une étude océanographique. L'image sera donc traitée dans l'état par la suite, faute d'avoir pu tester une méthode satisfaisant à la fois la correction de l'image et l'étude thématique en cours.

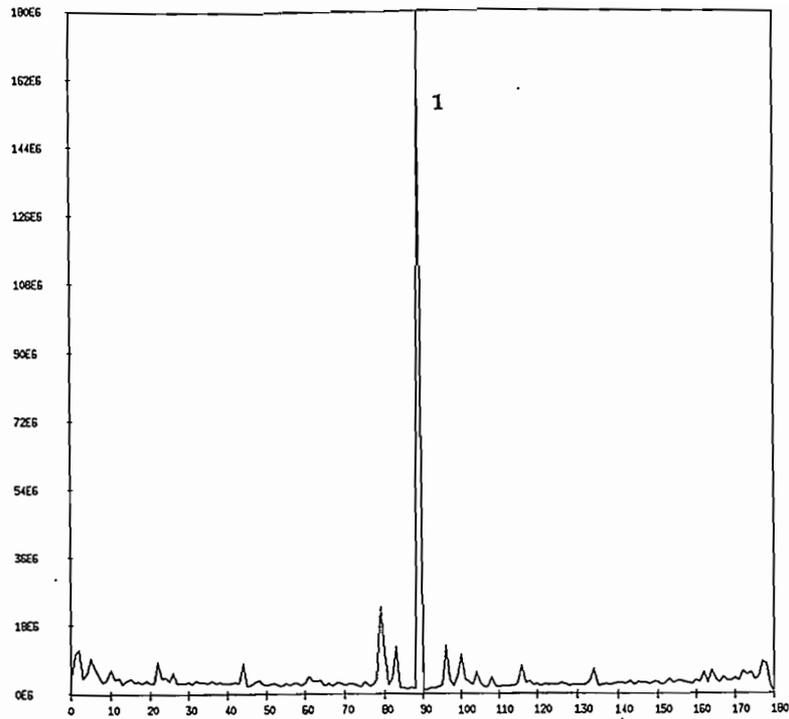




Graphiques 1 et 2

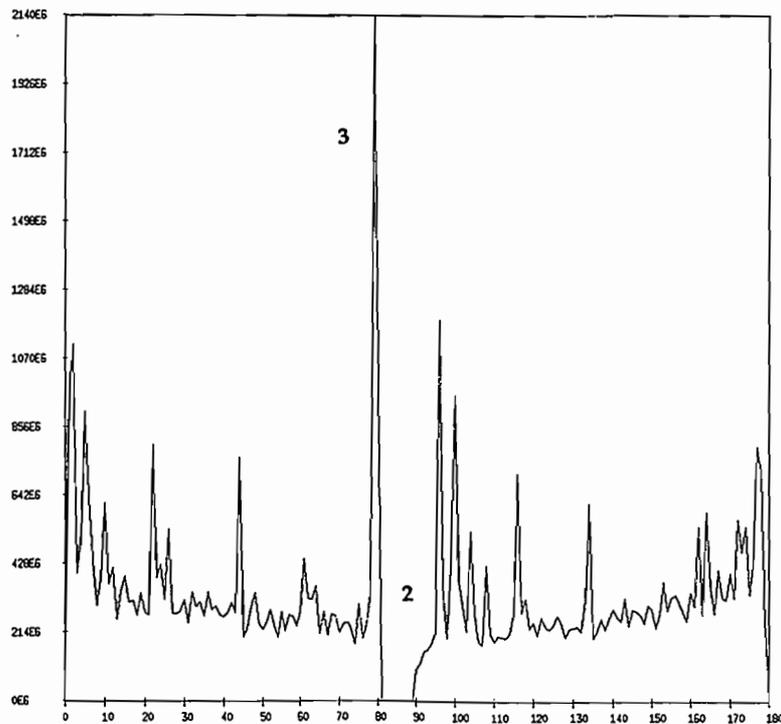


Graphiques 3 et 4



Graphique. 5

**SPECTRE EN DENSITE ANGULAIRE
DE LA TRANSFORMEE DE FOURIER RAPIDE
sur 256 lignes/256 colonnes**



**SPECTRE EN DENSITE ANGULAIRE
DE LA TRANSFORMEE DE FOURIER RAPIDE APRES EXTRACTION
DE L'ELEMENT PERIODIQUE DE DIRECTION 90°
sur 256 lignes/256 colonnes**

1 -éléments périodiques forts

2 -éléments enlevés

3 -artefact = réhaussement artificiel

Graphique. 6



Delignage du canal TM 4 de l'image LANDSAT du 30.01.91
par la Transformée de Fourier Rapide

A = Artéfacts

0 N 1 km

III.3. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'intérêt mathématique de l'Analyse en Composantes Principales est de conserver la variance totale de l'image tout en condensant l'information sur les premières composantes. Cette transformée de Karhunen-Loëw (Foin P. - 1987) induit un changement des axes de référence. La composante principale correspond au maximum de variance des données d'entrée, la seconde contient le maximum des variances immédiatement après la première, et ainsi de suite (Bonn F. et al. - 1992).

Les matrices de corrélations appliquées à chaque composante d'ACP que nous avons obtenue, montre que ces trois axes ne sont absolument pas corrélés entre eux, ils comportent donc des informations différentes, complémentaires.

Pour l'image LANDSAT deux types d'ACP ont été testés : un premier traitement a pris en compte tous les canaux, hormis le canal thermique (cf. tableau 13) ; un second test a été pratiqué sur les trois canaux du domaine visible, pour obtenir ainsi une ACP plus restrictive (cf. tableau 14).

Sur l'image SPOT, les trois canaux ont été mis à contribution (cf. tableau 12). Le premier axe de l'ACP sur l'image SPOT paraît apporter moins d'informations sur le domaine maritime que le second axe, où cette information semble se concentrer.

SPOT 24.09.89	composante 1	composante 2	composante 3
variance	365.7	23.0	3.4
pourcentage	93.27 %	5.87 %	0.86 %
xs 1	0.4385	0.5199	0.7331
xs 2	0.6027	0.4350	-0.6689
xs 3	0.6667	-0.7352	0.1226

Tableau 12 : Coefficients des combinaisons linéaires sur la scène SPOT

LANDSAT	composante 1	composante 2	composante 3	composante 4	composante 5	composante 6
TM 30.01.91	1	2	3	4	5	6
variance	364	24	12,2	5,2	1,8	0,7
pourcentage	89,25	5,88	3,00	1,27	0,43	0,16
TM1	0,1502	0,1603	0,6756	-0,0563	-0,6808	-0,1693
TM2	0,1509	-0,0154	0,4087	-0,0736	0,2255	0,8681
TM3	0,2654	-0,0347	0,5109	-0,0071	0,6731	-0,4628
TM4	0,4696	-0,0247	-0,2264	-0,8509	-0,0478	-0,0352
TM5	0,8085	0,1198	-0,2457	0,5114	-0,0905	0,0441
TM7	-0,0999	0,9787	-0,0618	-0,0763	0,1488	0,0187

Tableau 13 : Coefficients des combinaisons linéaires sur six canaux de la scène LANDSAT TM

L'ACP sur six des sept canaux de l'image LANDSAT TM (cf. tableau 13) rassemble le maximum d'informations sur l'eau dans ses deux premières composantes. Les autres axes renferment le bruit de l'image (lignages, colonages).

LANDSAT TM 30.01.91	composante 1	composante 2	composante 3
Variance	52	3.3	0.7
TM1	0.497	0.850	0.173
TM2	0.446	-0.079	-0.891
TM3	0.744	-0.521	0.419

Tableau 14 : ACP restrictive : coefficients des combinaisons linéaires sur 3 canaux de la scène LANDSAT TM

Sur l'ACP restrictive, la variabilité des informations est nettement tranchée sur l'ensemble des axes. L'individualisation des informations sur le thème "eau" est nette sur les deux premiers axes (cf. tableau 14). Sur le second apparaissent les bruits, le troisième axe renferme le maximum d'informations sur les phénomènes périodiques et non périodiques.

III.4. Combinaisons linéaires de canaux

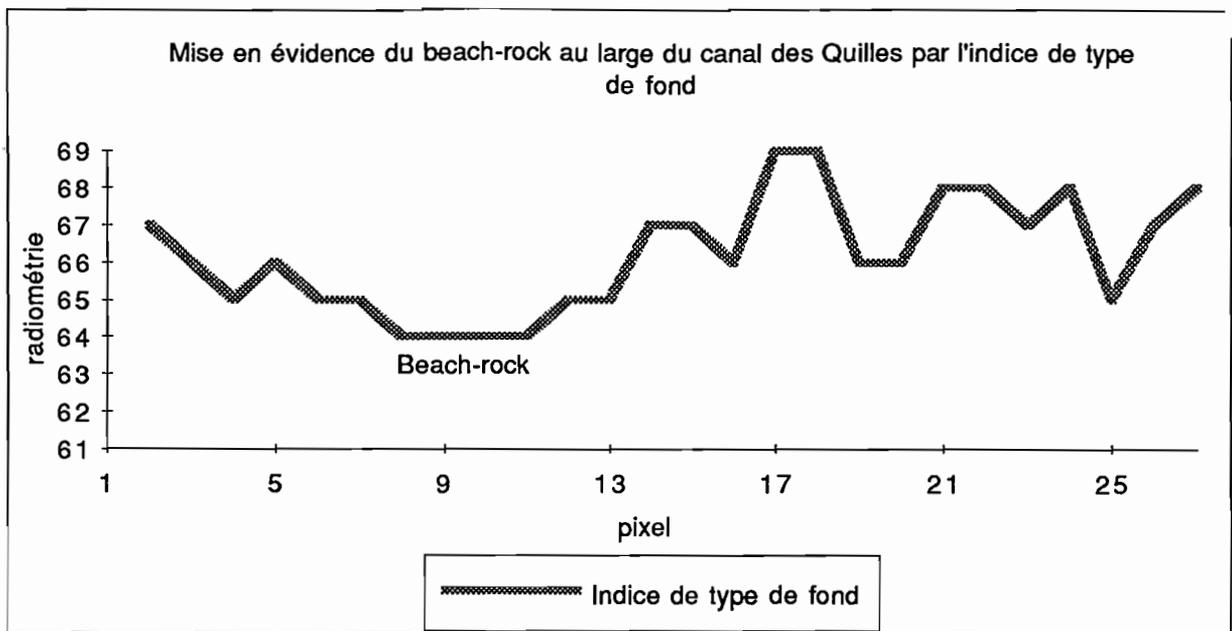
L'analyse d'images formées à partir de la manipulation des données brutes provenant de bandes spectrales différentes peut mettre en exergue ou dissimuler certaines informations plus ou moins intéressantes. Pour cela on utilise des indices. Ces derniers sont des combinaisons linéaires de plusieurs canaux auxquels on affecte un coefficient différent.

Indice de type de fond

il est exprimé par le rapport arctg (vert/rouge). Les valeurs élevées caractérisent les fonds meubles alors que les valeurs faibles caractérisent un fond dur (Bour et *al.* -1986, Hoareau-1987).

Comme nous l'avons souligné, le fond de la mer peut affecter de façon sensible la réflectance d'une colonne d'eau peu profonde, ce qui est le cas des domaines côtiers. Le type de fond rencontré peut influencer la réflectance de l'eau jusqu'à des profondeurs de -40 m en eau très claire (Guyot G. - 1992).

La nature des fonds peut être analysée par l'indice de type de fond. Ses réponses sont homogènes sur notre site, ce qui est confirmé par l'extraction des comptes radiométriques de cet indice sur la profil S1 (cf. graphique 9). En général, les comptes radiométriques de cet indice sont compris entre 66 et 69 sur l'ensemble du domaine maritime de la scène SPOT.



Graphique 7 : Substrat dur et indice de type de fond

Cet indice met en évidence la nature dure de la surface sombre située au large du canal des Quilles (cf. graphique 7). Il s'avère que cette étendue est un grès de plage comme cela peut apparaître sur notre côte, par exemple au large de Palavas - les Flots (Ségala - 1992). Outre cet affleurement, il révèle une sensible homogénéité sur l'ensemble des fonds au droit des plages du lido de Sète. Ainsi, il n'est apparu aucune différence importante de substrat apte à perturber les réponses radiométriques.

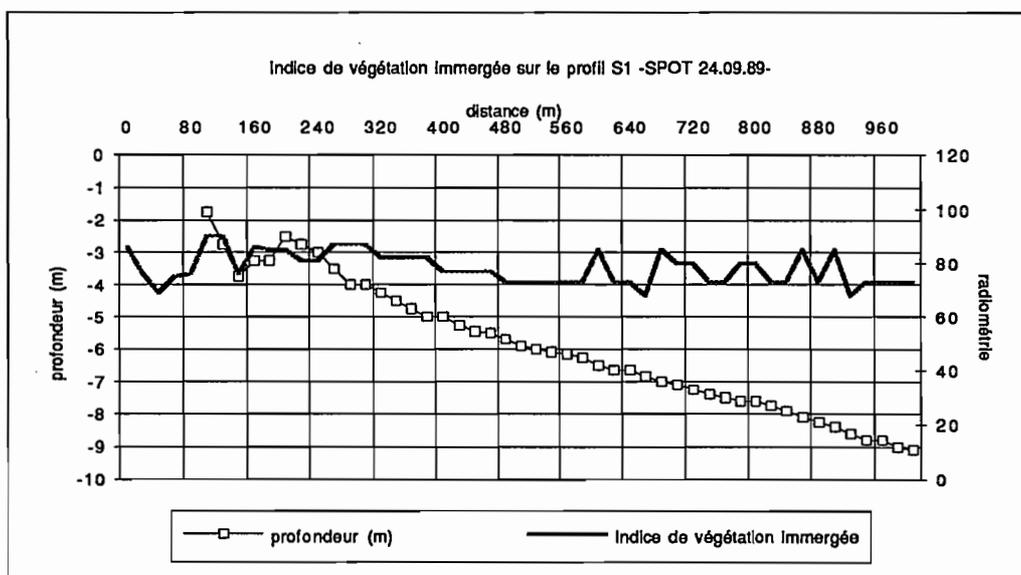
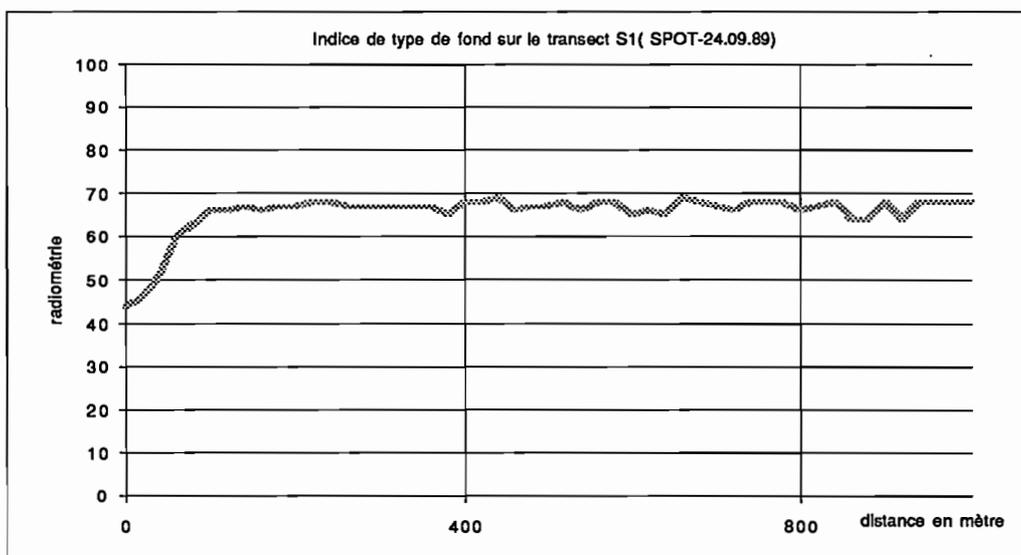
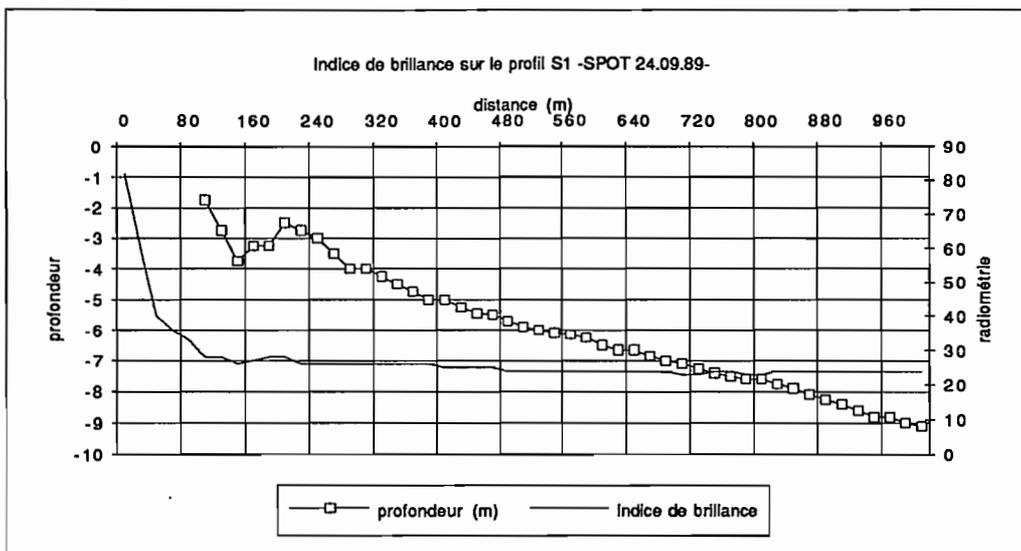
L'indice de brillance : $\sqrt{(\text{rouge}^2 + \text{proche infrarouge}^2)}$.

Selon Viollier et *al.* (1985), cet indice individualise les grands ensembles d'occupation du sol. Pour le domaine maritime cet indice est exprimé par le rapport : $\sqrt{(\text{vert}^2 + \text{rouge}^2)}$. Sur nos images, il permet d'observer avec plus de netteté les grandes unités de masse d'eau, ainsi que leurs panaches de turbidité. L'indice de brillance ne permet pas de lever d'autres arguments en défaveur de l'homogénéité de la masse d'eau (cf. graphique 8).

L'indice de végétation immergée⁹

L'indice de végétation immergée est défini par le rapport x_{s1}^2/x_{s2}^2 . Il est utilisé pour déterminer la nature du fond jusqu'à -12 m (Ben Moussa-1987, Belsher-1987, Hoareau-1988). Sur nos images il n'autorise pas d'extraire des informations utiles pour la suite de cette étude, ses réponses radiométriques désordonnées pouvant être interprétées comme une présence de végétation immergée en divers secteurs (cf. graphique 10). L'indice de végétation immergée présente donc une répartition hétérogène pouvant traduire une activité végétale présente en divers secteurs, mais difficile à circonscrire au regard des connaissances de terrain.

⁹Appelé aussi de transparence, ou de nature de fond



Graphiques : 8-9-10 : Répartition des réponses radiométriques des indices suivant le Profil S1

IV. Traitement de l'image SPOT

Nous avons souligné que la réponse spectrale des eaux en domaine littoral, en plus de l'état des facteurs atmosphériques et des réglages des capteurs, est dépendante de plusieurs facteurs : état de la surface, constituants présents dans la colonne d'eau, hauteur de la colonne et nature du fond. Ces restrictions apportées, nous allons tenter d'établir une corrélation entre la bathymétrie et la radiométrie.

IV.1. Analyse de la corrélation bathymétrie - radiométrie

Apports des courbes superposées de la radiométrie en fonction de la bathymétrie

La comparaison des comptes radiométriques des trois canaux de SPOT et des profils bathymétriques S1, S6, S11, révèle une répartition différente de la radiométrie selon les longueurs d'onde considérées. La courbe radiométrique du canal xs1 est similaire à la courbe bathymétrique sur les profils extraits (cf. graphiques 11 et 14). Les réflectances diminuent lorsque l'on s'approche des fosses de lévigation. Elles augmentent au niveau des rides pré-littorales pour ensuite diminuer à nouveau vers le large. Cette similitude des courbes radiométriques et bathymétriques est moins marquée sur le canal xs2 (cf. graphiques 12 et 15). Elle devient nulle sur le canal xs3 où les réponses radiométriques sont homogènes sur la quasi totalité du profil (cf. graphiques 13 et 16).

Apports des diagrammes de dispersion de la profondeur en fonction de la radiométrie

Un diagramme de dispersion de la profondeur en fonction de la radiométrie est effectué sur les trois canaux. Il présente une organisation de la radiométrie décroissante en fonction de la profondeur (cf. graphiques 17 à 19, 23 et 24). Les nuages de points obtenus s'organisent sous la forme d'une ellipse allongée, ce qui laisse présumer une relation entre les deux variables.

La différence des valeurs radiométriques extrêmes recueillies sur ces diagrammes donne un intervalle de variation quatre fois plus large pour le canal xs1 par rapport au canal xs3 (cf. graphiques 19, 23 et 26), et deux fois plus large pour le canal xs2 (cf. graphiques 20, 23 et 26). Les canaux xs2 et xs3 apparaissent donc comme les moins appropriés pour étudier la bathymétrie littorale.

L'application de ce type de diagramme aux trois axes de l'ACP (cf. graphiques 20 à 22, 24 et 27) permet de préciser que les deux premières

composantes présentent une répartition linéaire similaire à celle de xs1, ce qui n'est pas extrapolable aux indices utilisés (cf. graphiques 25 et 28).

Par conséquent

On peut émettre l'hypothèse d'une relation plus ou moins étroite entre les paramètres radiométriques de la masse d'eau considérée, et les courbes de relevés bathymétriques.

Les deux variables utilisées étant quantitatives, la répartition du nuage de points évoque une relation linéaire, dont on peut mesurer l'intensité au moyen d'un coefficient de corrélation.

Les valeurs de ce coefficient sont calculées sur les trois profils, S1, S6, S11, en fonction de la radiométrie des trois canaux bruts et des six néo-canaux créés. Les résultats figurent dans le tableau 15.

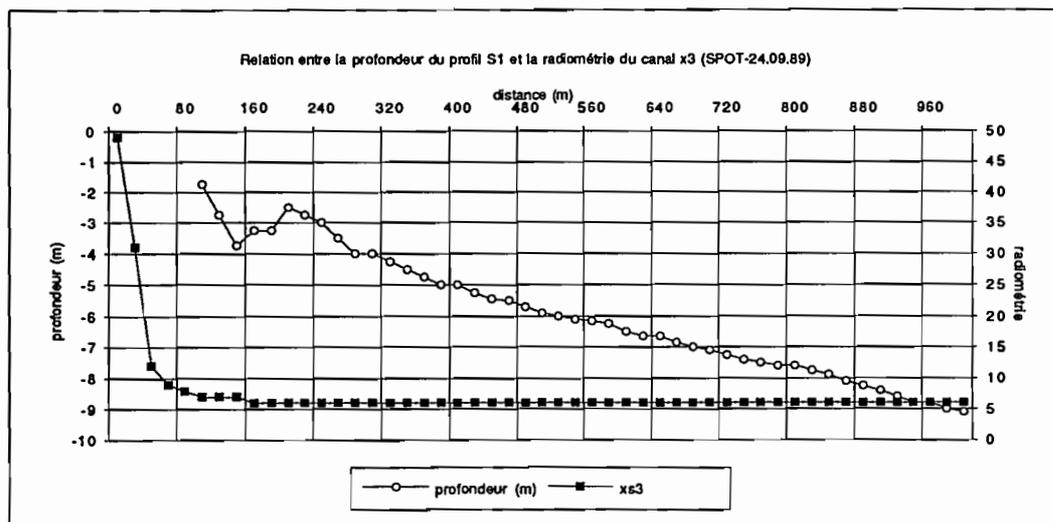
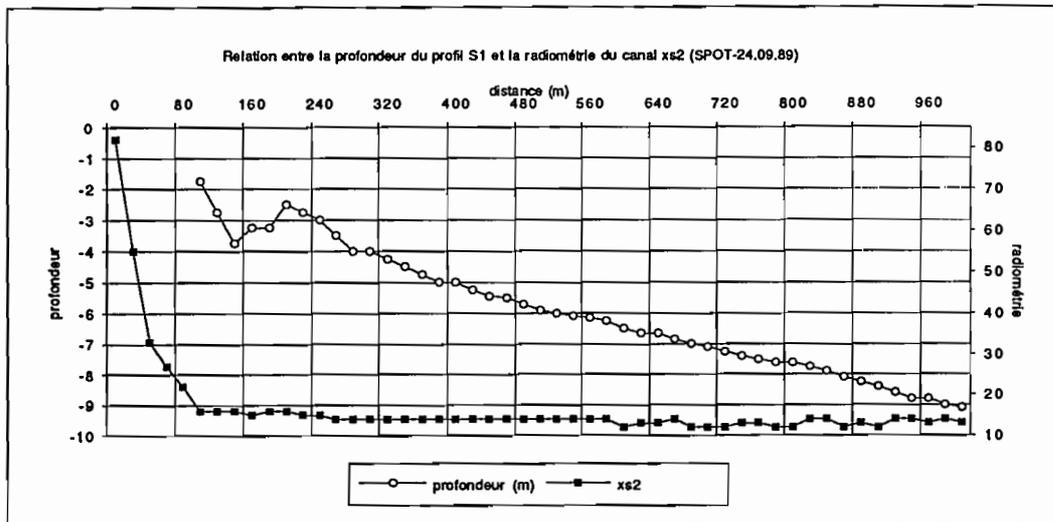
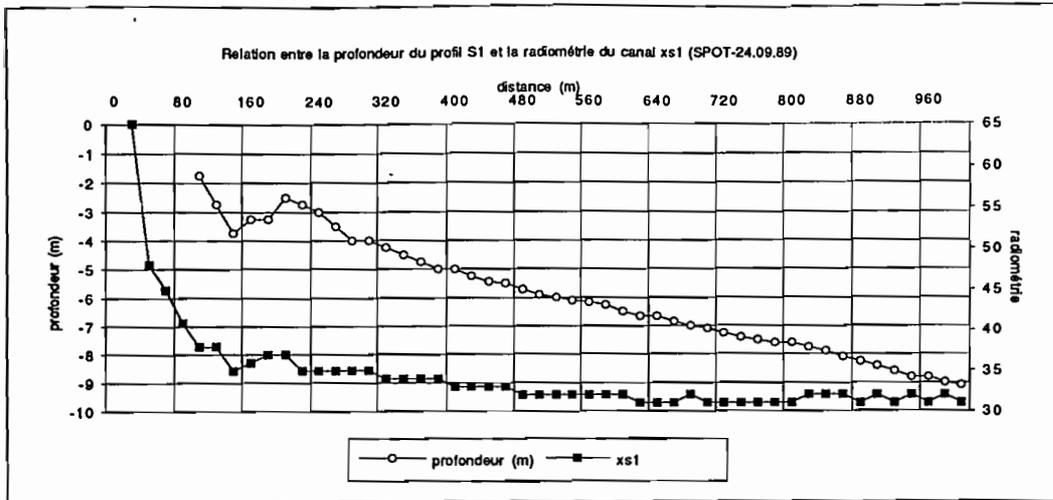
NB : si le coefficient vaut 1, l'échantillon est parfaitement en corrélation. Plus la valeur de ce coefficient approche 1, plus cela suppose une relation étroite entre les deux variables. Inversement, si le coefficient de corrélation vaut 0, la relation est inexistante.

	profil S1	profil S6	profil S11
xs1	0.803	0.7071	0.711
xs2	0.5441	0.4336	0.5332
xs3	0.228	0.2187	0.2622
indice de brillance	0.7548	0.6353	0.6789
indice de type de fond	0.6143	0.1958	0.1907
indice de végétation immergée	0.3864	0.1762	0.2172
CP1	0.7168	0.5063	0.6142
CP2	0.766	0.7002	0.7041
CP3	0.6158	0.4159	0.5179

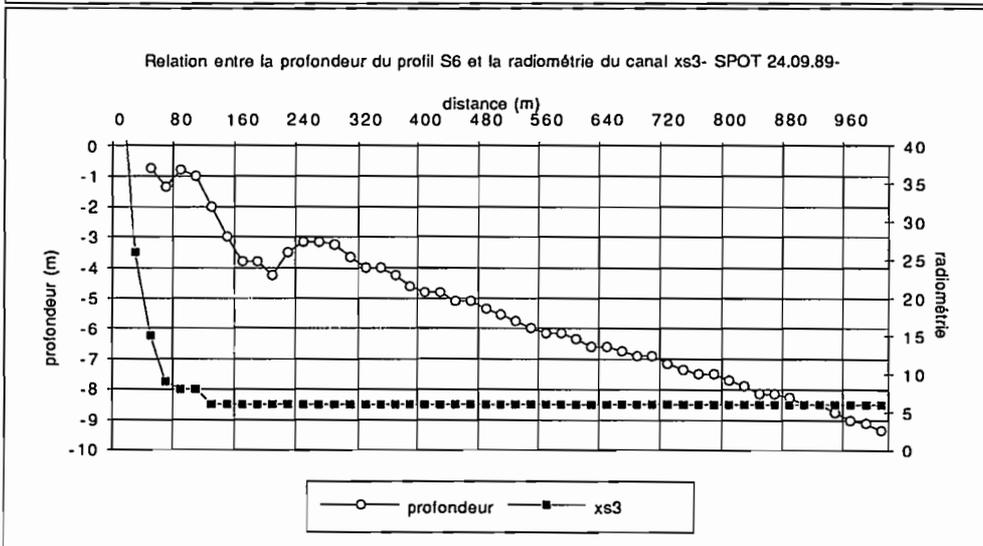
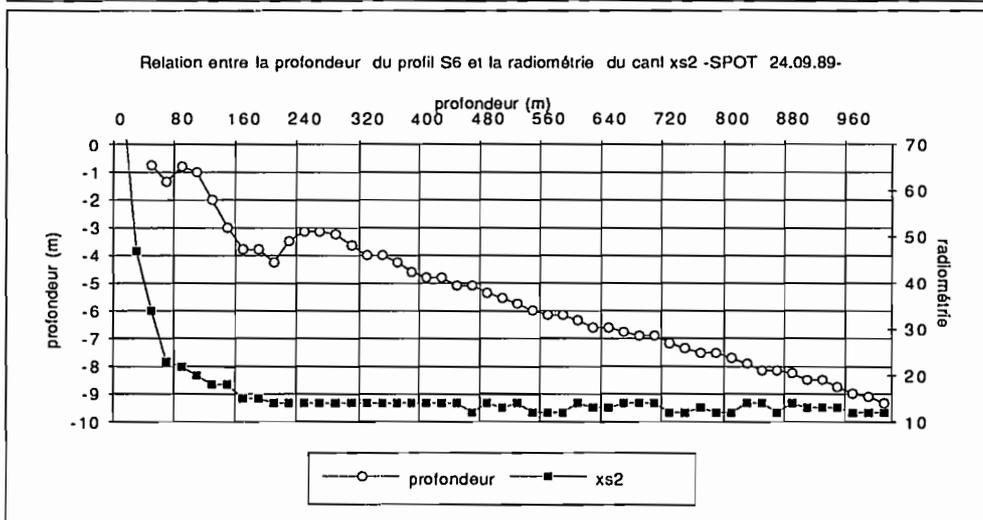
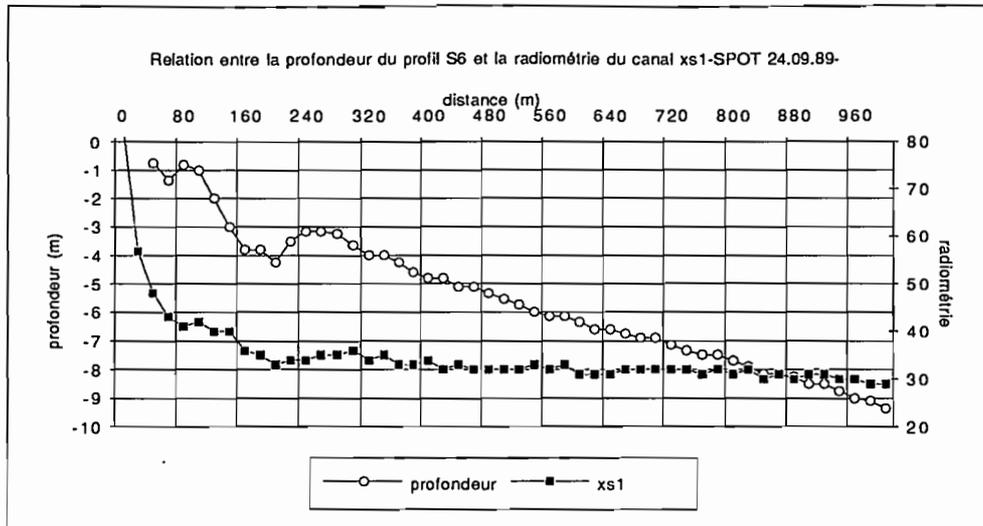
Tableau 15 : Coefficient de corrélation entre la radiométrie et la bathymétrie (SPOT)

On peut remarquer que des valeurs élevées de ce coefficient, comprises entre 0.7 et 0.8, ne sont représentées que par xs1 et CP2. Un seul néo canal possède un coefficient élevé : l'indice de brillance, avec des valeurs entre 0.75 et 0.63. Si l'indice de brillance classique, qui couple les canaux xs2 et xs3, avait été utilisé, il est certain que la corrélation n'aurait pas été aussi prononcée. En ce qui concerne le canal xs3, la relation est encore moins marquée que sur le canal xs2.

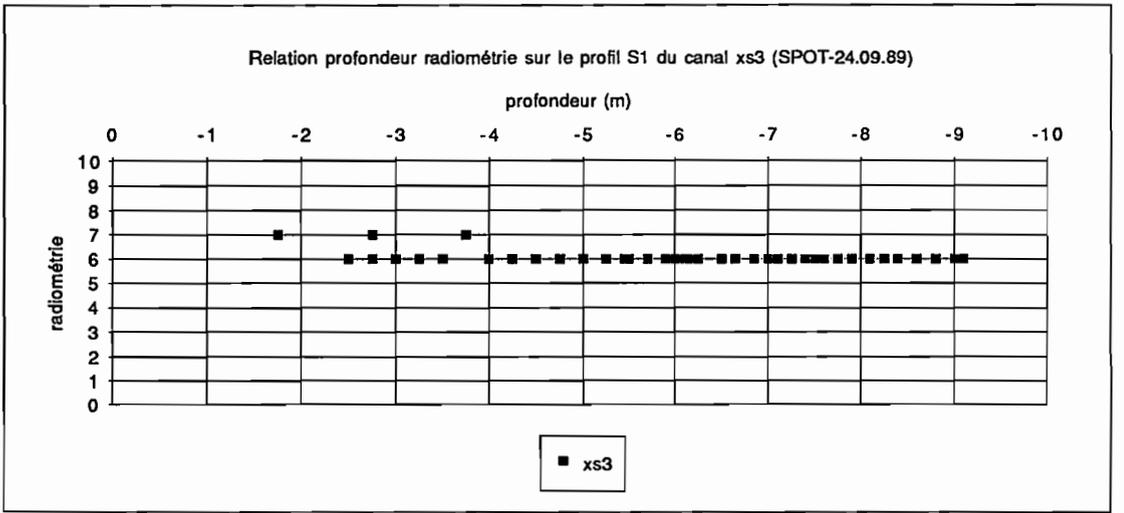
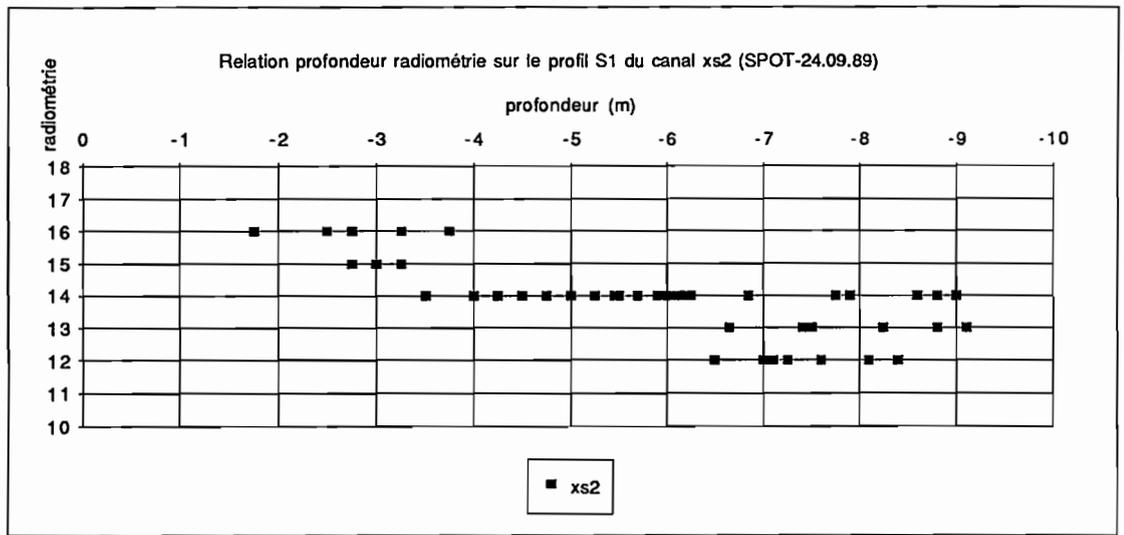
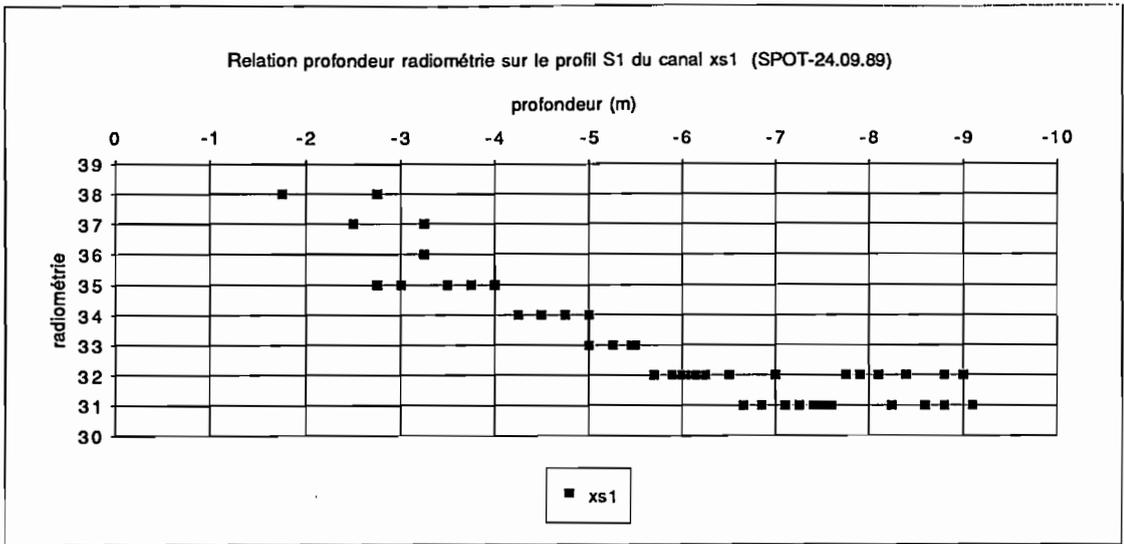
Ainsi, la relation radiométrie bathymétrie est évidente. Cependant, elle ne s'exprime pleinement que sur un nombre restreint de canaux. Le niveau de corrélation sur le canal xs1, la stabilité sur les trois profils de référence souligne l'intérêt que nous allons porter à ce canal. Au vue de ces résultats, les autres canaux sont alors éliminés de notre démarche.



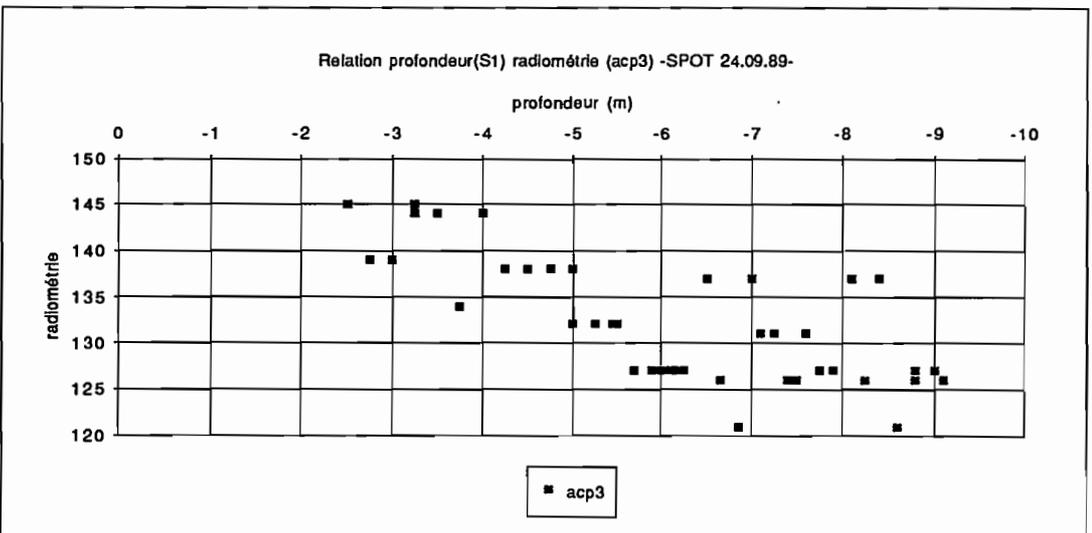
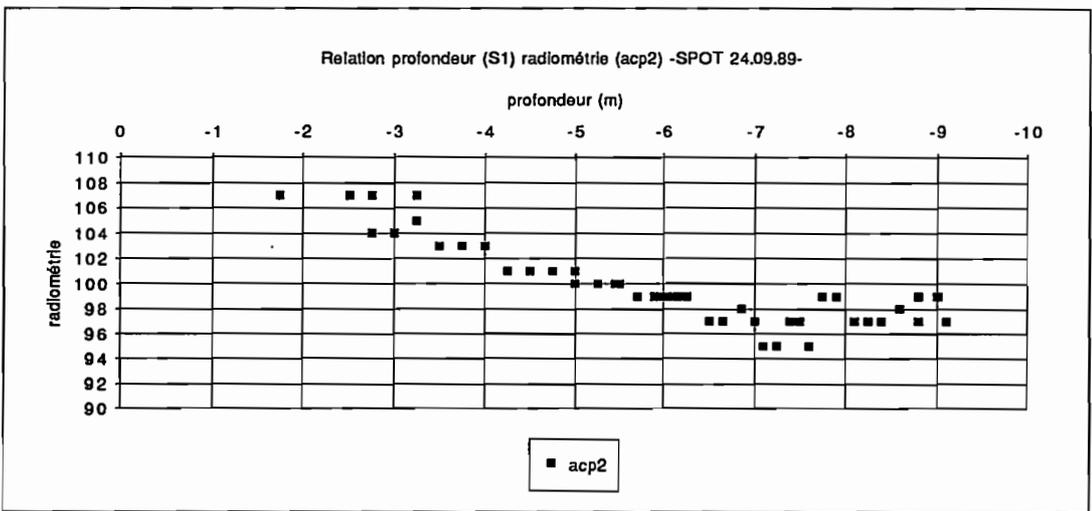
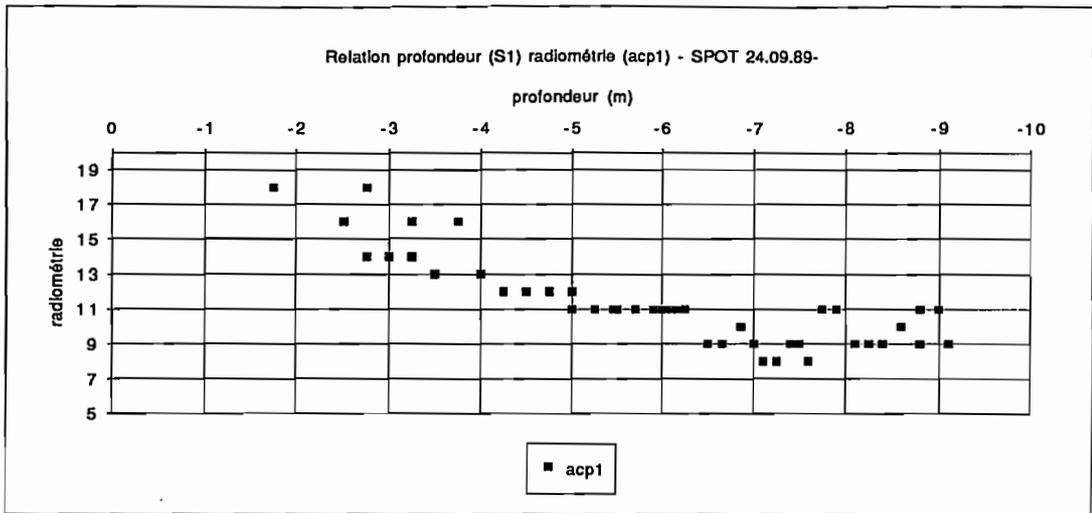
Graphiques 11, 12, 13 : Comparaison de la radiométrie des trois canaux de l'image SPOT du 24.09.89 avec la distance et la profondeur du profil S1



Graphiques 14, 15, 16 : Comparaison de la radiométrie des trois canaux de l'image SPOT du 24.09.89 avec la distance et la profondeur du profil S6

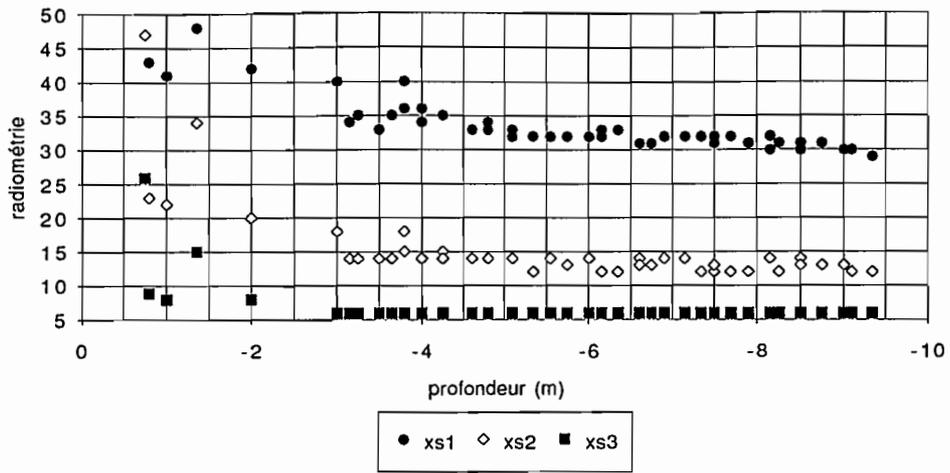


Graphiques 17, 18, 19 : Relation profondeur-radiométrie sur les trois canaux l'image SPOT du 24.09.89 avec la distance et la profondeur du profil S1

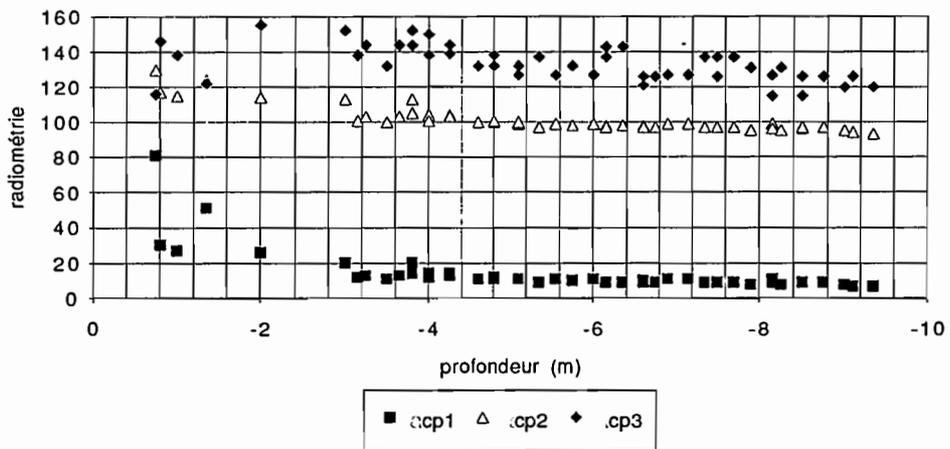


Graphiques 20, 21, 22 : Relation profondeur-radiométrie sur les trois ACP réalisées sur l'image SPOT du 24.09.89 avec la distance et la profondeur du profil S1

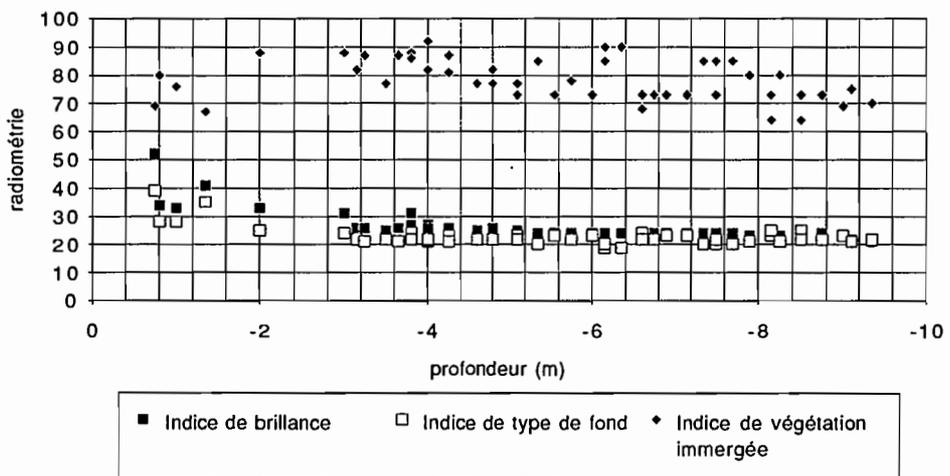
Relation profondeur (S6) radiométrie (xs1, xs2,xs3) -SPOT 24.09.89-



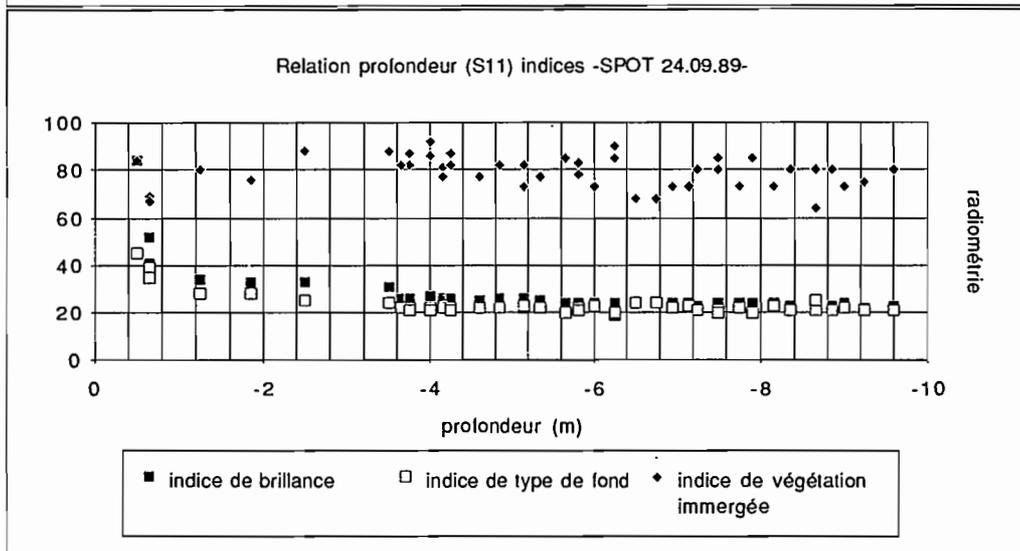
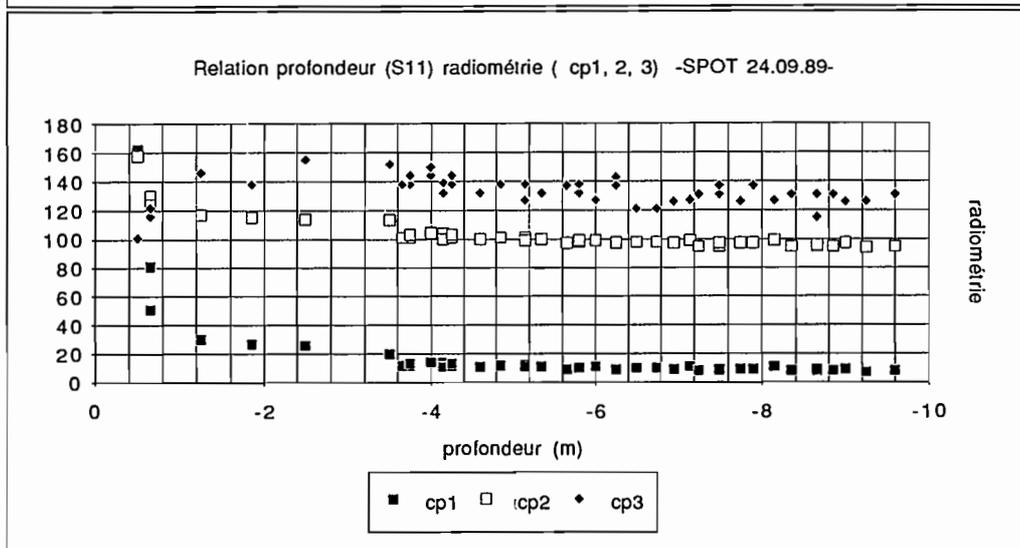
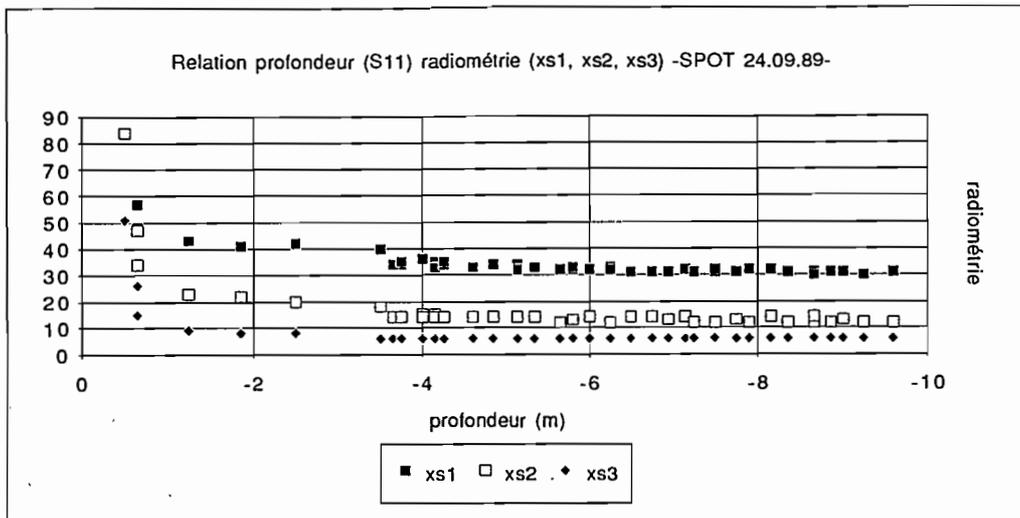
Relation profondeur (S6) radiométrie (.cp 1, 2, 3) -SPOT 24.09.89-



Relation profondeur (S6) indices -SPOT 24.09.89-



Graphiques 23, 24, 25 : Relation profondeur-radiométrie sur xs1-xs2-xs3, .cp1- .cp2- .cp3, indices de brillance, de type de fond et de végétation immergée réalisées sur l'image SPOT du 24.09.89 avec la distance et la profondeur du profil S6



Graphiques 26, 27, 28 : Relation profondeur-radiométrie sur xs1-xs2-xs3, CP1-CP2-CP3, indices de brillance, de type de fond et de végétation immergée réalisées sur l'image SPOT du 24.09.89 avec la distance et la profondeur du profil S11

IV.2. Classifications dirigées à partir des cartes d'isobathes

L'objectif de la classification est de regrouper l'ensemble des pixels d'une image en un nombre réduit de classes. *"Les traitements de classification constituent une phase décisive dans l'analyse des images. Leur finalité est de réduire la masse des données originelles à un document cartographique exploitable; cette opération implique donc l'élimination des redondances et des informations d'intérêt secondaire"*(Cuq-1983).

Les modes de classification sont regroupés en deux ensembles selon qu'ils se réfèrent ou non à une vérité terrain : les classifications dirigées¹⁰ et les classifications non dirigées. Seul la première catégorie nous intéresse car nous possédons des séries de mesures de terrain. Trois types de classifications sont testées : la méthode déterministe de classification par distance de Sebestyen elliptique, la méthode de classification par distance Euclidienne et la méthode des hypercubes. La classification dirigée s'appuie sur l'ensemble des signatures spectrales des pixels que l'on a regroupé dans des parcelles d'entraînement prises par rapport à des données auxiliaires : les réalités de terrain.

Les premières données auxiliaires utilisées sont les cartes bathymétriques des bases de Sète et de Marseillan numérisées. La prise de trois points d'amers correspondant à trois extrémités d'une base sur l'image rectifiée géométriquement, permet d'extraire un rectangle de la taille de chacune des cartes bathymétriques après une rectification polynomiale de degré 1. La superposition est ensuite réalisée par "& logique"¹¹, ce qui n'altère pas les informations. Les zones d'entraînements sont ensuite choisies selon les classes de profondeurs des cartes bathymétriques. Les statistiques obtenues sur ces zones permettent une extension de la classification sur toute l'image. La visualisation du résultat donne une classification insatisfaisante. Ce qui est confirmé par la mauvaise relation profondeur-classes bathymétriques. L'amélioration des résultats fait appel à différents procédés :

- repositionnement des bases,
- amélioration quantitative du nombre des classes,
- amélioration qualitative des classes,
- rectification du rapport de taille entre l'extrait radiométrique et la carte bathymétrique (réduction de la taille des cartes numérisées, réduction de la résolution de la numérisation, zoom (taille e l'image multipliée par 2)¹²

Malgré ces nouvelles tentatives de classifications les résultats sur chacune des bases n'ont pas été satisfaisants. Les difficultés rencontrées peuvent provenir de différentes sources plus ou moins complémentaires :

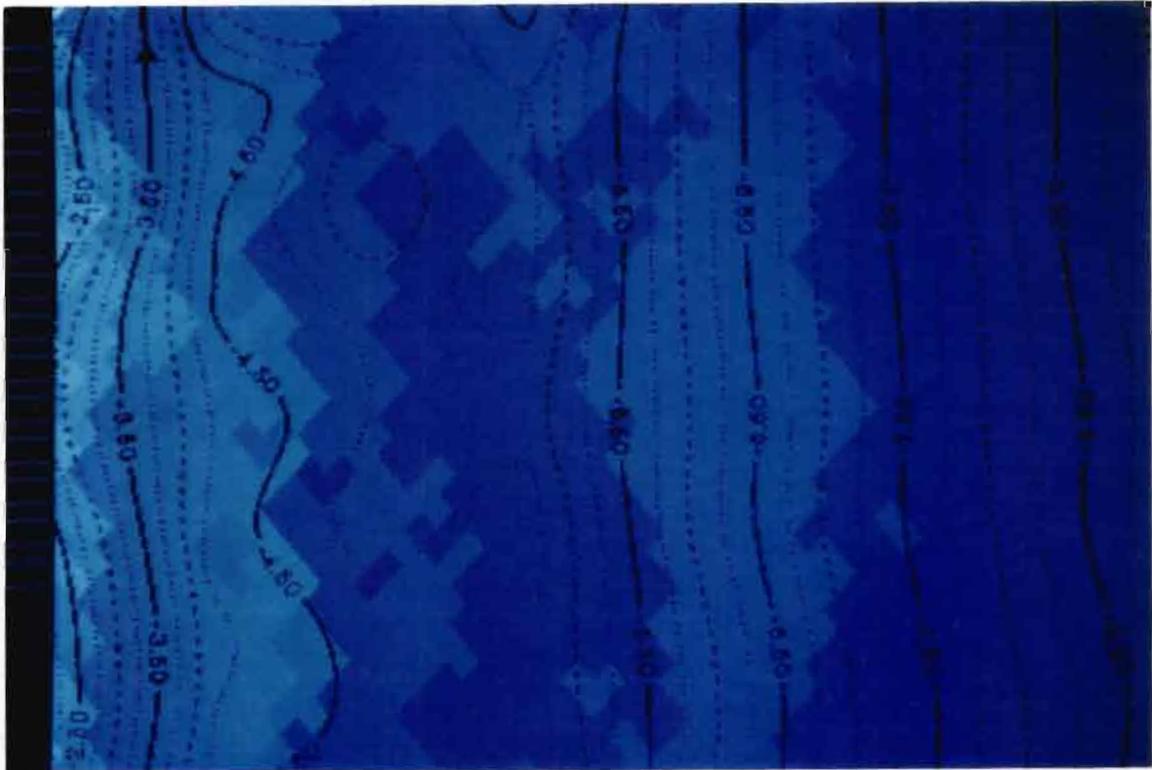
¹⁰Appelé aussi classification supervisée

¹¹CALC IMAGE-PLANETE

¹²Notons qu'un zoom supérieur à deux produit un moyennage des pixels trop important sur l'image.

- imprécision de la carte bathymétrique par rapport aux données brutes. Par exemple, la carte de Marseillan débute à 0 mètre alors que les données brutes débutent entre -0,85m (M11) et -1,25m (M8, 9, 10) et ce entre 85 et 100m des points de référence des profils. Il existe donc une imprécision pour la reconnaissance des petits fonds,
- difficulté de positionner correctement les bases à partir de leur "localisation" sur la carte au 1/25 000. Un repérage de l'extrémité de chaque profil à l'aide d'un GPS¹³ permettrait un positionnement rigoureux sur une image géo référencée
- différence d'échelle trop importante entre la scène et les cartes bathymétriques ; le seuil maximal de lisibilité des cartes étant une résolution de 150 dpi.
- représentativité des mesure de terrain pour la scène

En conclusion de cette phase de traitement, signalons que pour l'étude de la répartition des couples radiométrie/bathymétrie il apparaît nécessaire de procéder à une délimitation précise des classes pour éviter les omissions ou les collisions.



Photographie 3 : Superposition de la carte bathymétrique de la base de Marseillan avec un extrait de la scène SPOT de 1989

¹³Global Positioning System

IV.3. Classification par méthode de régression linéaire

Le postulat sur lequel repose cette démarche suppose que le positionnement des 11 profils sur la carte IGN par le LRSM est sans erreur. Le choix des profils de référence s'est porté sur les profils S1, S6, S11 dont les mesures sont présentes pour les deux images. L'extraction des comptes radiométriques de ces profils et leur superposition avec les courbes bathymétriques fait apparaître un décalage de deux pixels, mis en évidence par les signatures des fosses de lévigation et les barres d'avant-côte. Une correction est possible pour palier à cette imprécision et rendre les deux courbes superposables.

Avant d'utiliser une méthode statistique pour déterminer une classification, poursuivons l'analyse de la corrélation radiométrie bathymétrie. Le tableau n°15 ci-dessous collecte les différents coefficients de corrélation calculer en fonction de la radiométrie du canal xs1 et de la bathymétrie sur les profils de références.

NB : La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus dans l'étude de 1993 montre que les deux relations sont de nature équivalente entre notre canal xs1 et le canal xs1 réétalé utilisé dans cette étude. Malgré la possibilité d'obtenir des valeurs plus élevées à partir de canaux ainsi réétalés, nous préférons le résultat des canaux bruts afin de conserver la radiométrie originelle des images.

Bathymétrie	r ² sur le profil S1	r ² sur le profil S6	r ² sur le profil S11
0/-1m	pas de données	0.6352	0.1795
0/-2m	0.8030	0.4101	0.4824
0/-3m	0.3654	0.6458	0.6826
0/-4m	0.6561	0.4636	0.8404
0/-5m	0.8188	0.6584	0.8615
0/-6m	0.9080	0.6684	0.8601
0/-7m	0.9200	0.6983	0.8354
0/-8m	0.8493	0.7100	0.7950
0/-9M	0.8030	0.7220	0.7824

Tableau 16 : Coefficients de corrélation radiométrie du canal xs1 et bathymétrie des profils S1, S6, S11 -SPOT 24.09.1989-

La relation radiométrie-bathymétrie ne présente pas une progression constante. Pourtant, elle dépasse 0.70 dans 50% des estimations, et atteint 0.60 dans 74 % des cas. La détermination des classes radiométriques en fonction de la bathymétrie est donc calculée sur le canal xs1, et sur le profil présentant le meilleur coefficient de corrélation : S1. L'équation de la droite de régression obtenue est : $Y = 0.86 X + 38.05$. La pente de cette droite, $m = 0.86$, est définie de manière à prendre une valeur positive pour des bathymétries supérieures à -1m, et une valeur négative dans le cas

contraire. La vérification de la classification est réalisée par l'extraction des données relatives aux classes de profondeurs et leur comparaison avec les courbes bathymétriques (cf. graphique 35). Les graphiques obtenus révèlent deux imprécisions :

- la borne supérieure de la classe bathymétrique -5/-6m est trop étendue radiométriquement,
- la classe -2/-3m ne discerne pas les rides pré-littorales.

Afin de corriger ces deux imprécisions, un changement des bornes est réalisé manuellement (cf. graphique 36).

La généralisation de cette classification est effectuée par l'algorithme "hypercube"¹⁴ sur l'image brute. L'image classée obtenue est ensuite rectifiée géométriquement selon l'extrait de la carte IGN numérisée.

NB : Nous ne sommes pas en présence d'une classification par hypercube, mais devant un découpage, une segmentation, d'une partie du canal xs1, selon une justification basée sur les réponses radiométriques des différentes colonnes d'eau. L'utilisation de cet algorithme permet de rendre ce traitement plus pratique.

Le résultat peut être comparé aux images estivales de l'étude de 1993 (L. Sigaud). Sur notre image, on observe une meilleure distinction et une individualisation des rides d'avant-côte. La répartition d'ensemble des petits fonds est assez similaire. Les fosses localisés au sud-ouest de notre scène sont aussi présentes sur l'étude précédente. En outre on remarque que une résolution de 20m x 20m apporte une précision supplémentaire sur les fonds de -5 à -6 mètres. L'individualisation des barres pré-littorales sur notre image, est nette, ce qui confirme l'apport théorique de la partie I concernant la dynamique du système pré-littoral.

V. Traitement de l'image LANDSAT

Le schéma d'analyse réalisé sur la scène SPOT va servir de référence pour le traitement de la scène LANDSAT ; ainsi pour éviter les répétitions, nous laissons de côté la présentation théorique.

V.1. Analyse de la corrélation bathymétrie - radiométrie

La répartition de la radiométrie en fonction de la bathymétrie sur les canaux TM 1, TM 2, TM 3, TM 4, TM 5 et TM 7 suit une organisation similaire à celle des canaux vert, rouge et infra-rouge de la scène SPOT (cf. graphiques 29 à 32).

Les canaux du domaine visible apparaissent comme les plus discriminants pour cette information. Leur coefficient de corrélation élevé entre les deux paramètres qui nous intéressent, le confirme. L'examen du tableau et des graphiques 33 et 34, permet de constater la prépondérance du canal TM2, précédant de peu le canal TM1.

¹⁴Classification par méthode des hypercubes-OSIRIS-

Cette constatation est *a priori* assez surprenante, car les longueurs d'ondes du canal TM1 présentent une fenêtre où l'absorption est plus faible que celle du canal TM2. Cette prépondérance de TM2 et de xs1 est à rapprocher des travaux de Spitzer et Dirk (1986). L'auteur a démontré qu'il n'existe pas de différence significative entre la bande TM2 de LANDSAT5 et la bande xs1 de SPOT 1.

	profil S1	profil S6	profil S11
TM1	0.8	0.7257	0.7443
TM2	0.8352	0.735	0.7062
TM3	0.6539	0.6928	0.678
TM4	0.3403	0.7059	0.6906
TM5	0.3947	0.6806	0.6613
CP1 restrictive	0.4181	0.7283	0.7181
CP2 restrictive	0.3103	0.232	0.1975
CP3 restrictive	0.0709	0.0223	0.0355
CP1	0.3012	0.7077	0.69
CP2	0.1886	0.0083	0.076
CP3	0.639	0.4892	0.5017

Tableau 17 : Coefficient de corrélation entre la radiométrie et la bathymétrie (LANDSAT)

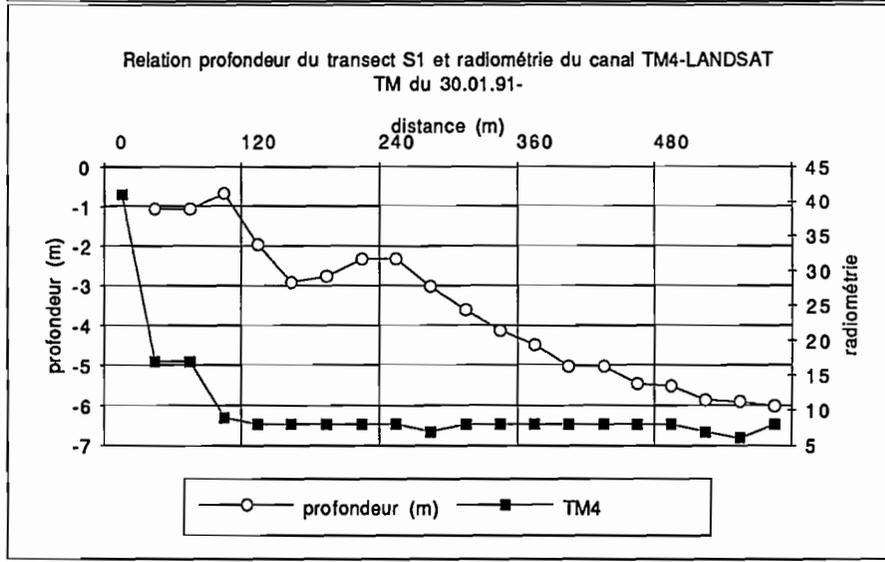
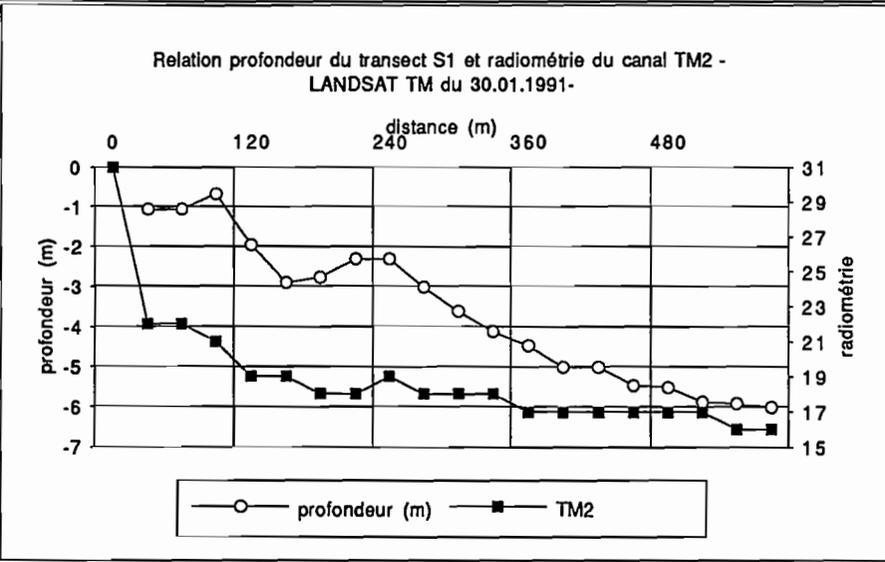
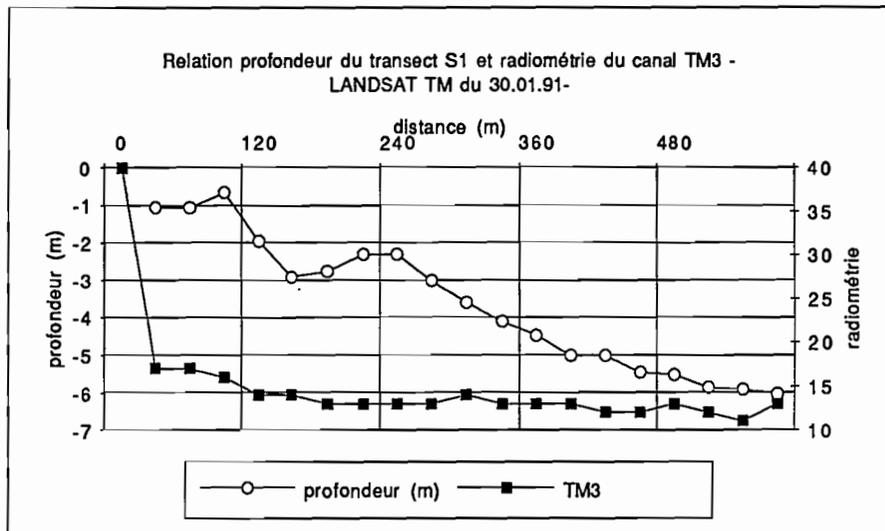
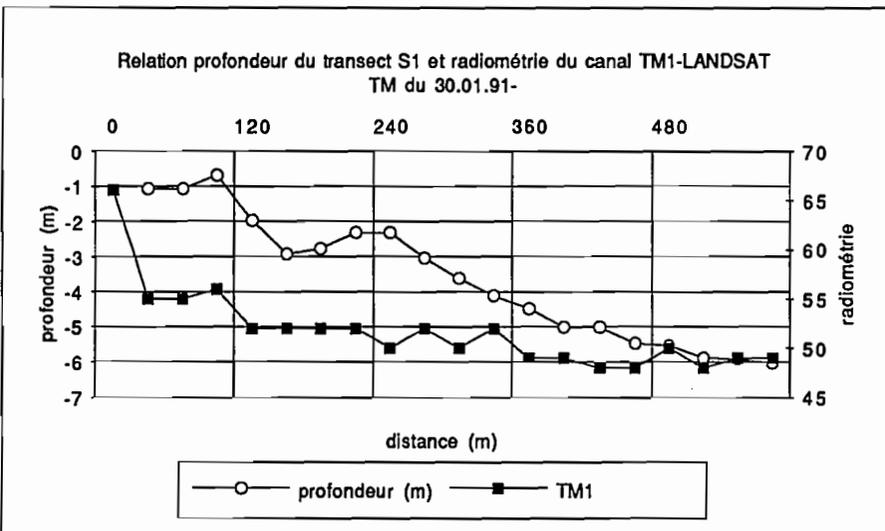
Sur les canaux créés, on remarque que les axes de l'ACP classique semblent peut discriminants pour la relation radiométrie-bathymétrie. Le premier axe de l'ACP restrictive tente de s'individualiser sans toutefois apporter de bons résultats. Sur les profils de référence, les mesures bathymétriques ont été interpolées pour obtenir une moyenne bathymétrique par unité de résolution, comme le propose R. Manière et *al.* (1991).

Ainsi traitée, la corrélation entre la radiométrie et la bathymétrie selon différentes tranches d'eau est supérieure à celle obtenue lors des manipulations précédentes. Sur l'ensemble des profils, le coefficient de corrélation entre ces deux variables est très élevé jusqu'à la limite des relevés terrains, (cf. exemple du profil S1, tableau 18). On observe des coefficients de 0.70 dans plus de 90% des cas observés.

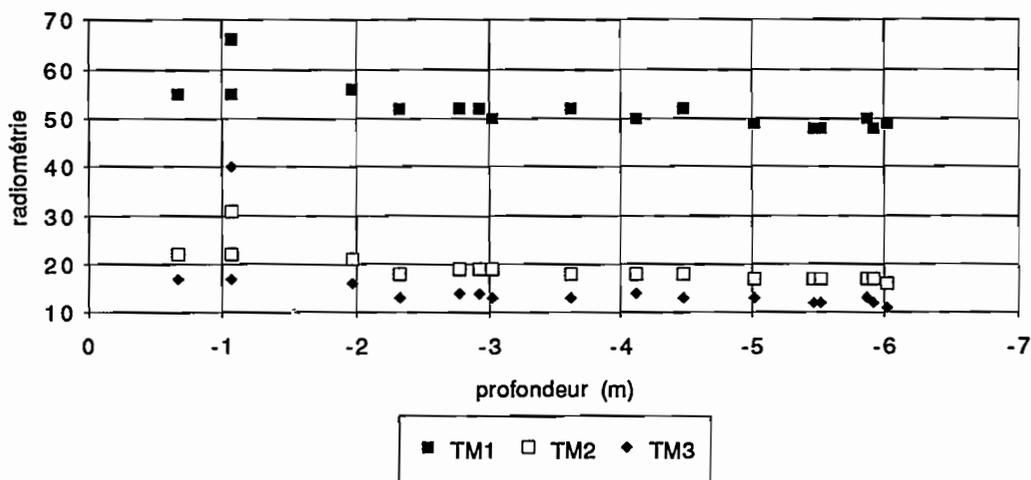
profondeurs sur le profil S1	r^2
0-1m	1
0-2m	0.8002
0-3m	0.7906
0-4m	0.7336
0-5m	0.7908
0-6m	0.8252

Tableau 18 : Corrélation profondeur radiométrie sur TM2

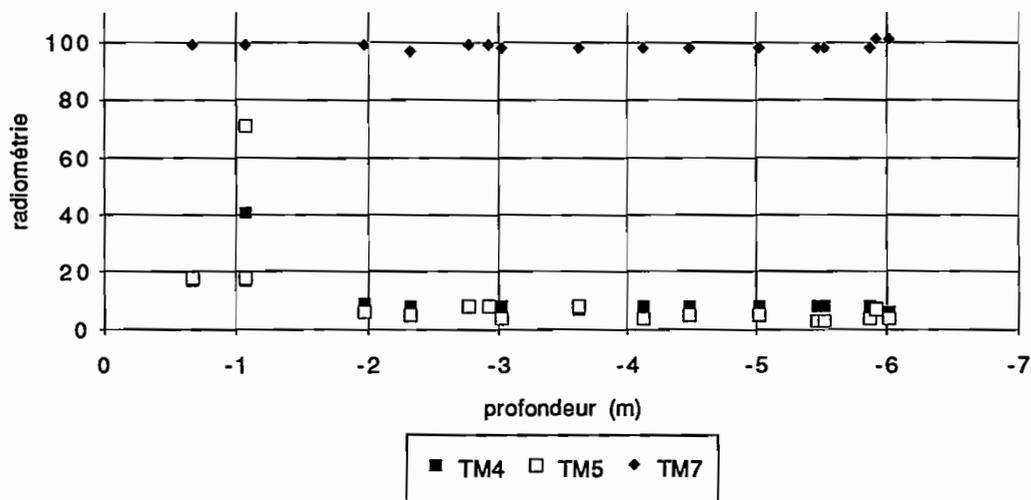
Graphiques 29, 30, 31, 32 : Relation entre la distance-profondeur du profil S1 et les radiométries des canaux du domaine visible et d'un canal du proche infra rouge de LANDSAT TM



Relation profondeur radiométrie sur le profil S1 des canaux TM1, 2, 3 -
LANDSAT 30.01.1991-



Relation profondeur radiométrie sur le profil S1 des canaux TM 4. 5.7 -
LANDSAT 30.01.1991-



Graphiques 33, 34 : Relation profondeur (S1) radiométrie des canaux TM 1, TM2, TM3 et TM4

V.2. Classification par méthode de régression linéaire

La classification par méthode de régression linéaire est effectuée sur la profil S1, qui seul présente des coefficients élevés. Afin de déterminer des intervalles radiométriques, la droite de régression suivante, issue du couple radiométrie-bathymétrie sur le profil S1, est utilisée : $Y = 0.9062 X + 21.5108$

La comparaison de la répartition des classes selon les différentes profondeurs, permet de vérifier que cette image est bien classée (cf. graphique 37).

Des imperfections imputables aux défauts de l'image existent, en particulier pour la classe -4/-5m. Par soucis de ne pas induire une autre perturbation l'image est sauvegardée en l'état. La classe -5/-6m est supprimée, les réponses intégrant des pixels de pleine mer, démontrant ainsi qu'elle n'est représentative d'aucune profondeur.

VI. Amélioration des images et comparaison des résultats

Amélioration optique de la classification

L'application d'un filtre de type majoritaire permet un lissage de l'image. L'algorithme utilisé¹⁵ remplace le pixel central par la valeur la plus élevée qui l'entoure. L'utilisation d'autres programmes d'érosion et de dilatation des données, remplaçant respectivement le pixel central par le maximum ou le minimum des valeurs de la fenêtre, a été testé sans apporter une amélioration significative.

La classification lissée est multipliée par un canal proche infra rouge (xs3, TM4) réécalé en mode binaire (valeur 0 pour la terre, valeur 1 pour la mer). Cela permet d'éliminer les pixels appartenant au domaine terrestre en bordure du trait de côte.

Comparaison de la classification sur l'image SPOT et LANDSAT

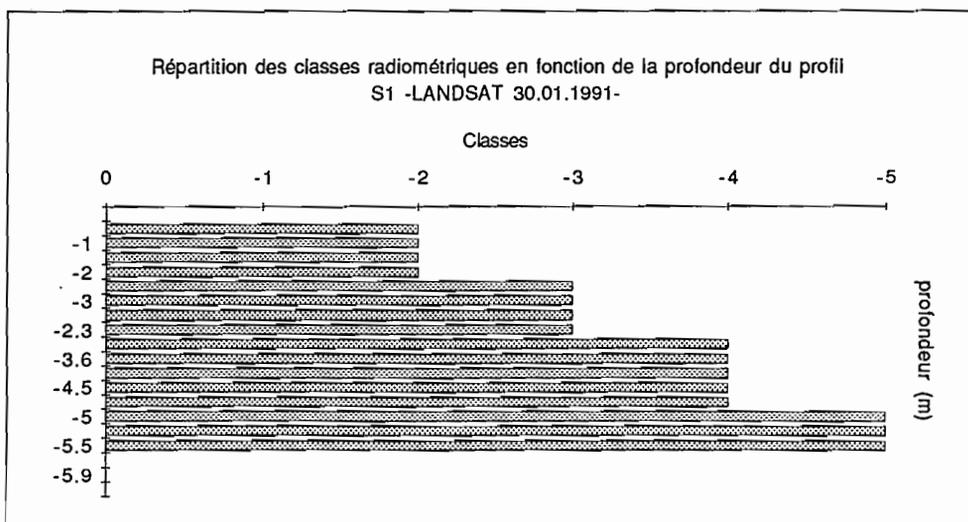
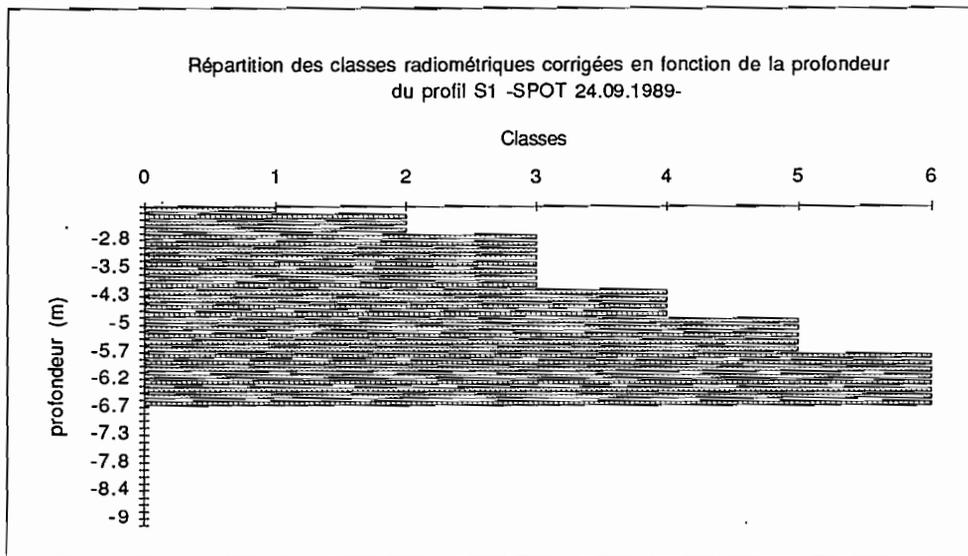
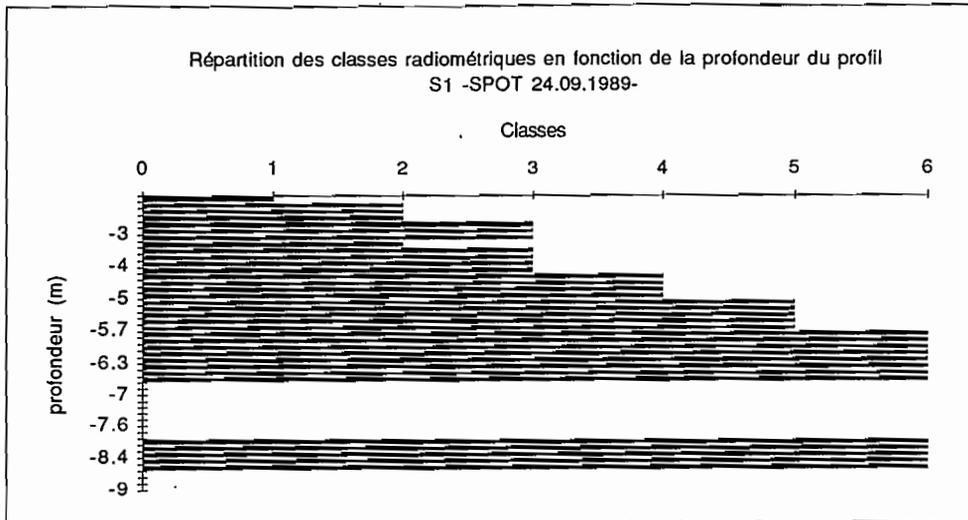
Les résultats de l'image LANDSAT révèlent une imprécision due à la taille des pixels (30 x 30 m). De plus cette image est entachée d'un bruit particulièrement marqué qui n'a pas contribué à clarifier les traitements. Comme on peut le voir sur l'image classée (cf. p 55), la classification est homogène, donc *a priori* fiable entre 0 et -3 mètres. Au delà, les classes sont perturbées par le défaut imputable à la prise de vue. Un autre bruit existe dans la partie centrale du lido, avec une classe bathymétrique qui s'étend exagérément en mer (classe des 3/4m). Une sortie de terrain n'a pas permis d'identifier un éventuel rejet, mais a révélé le caractère très turbide des

¹⁵FENET3 filtre majoritaire-PLANETE.

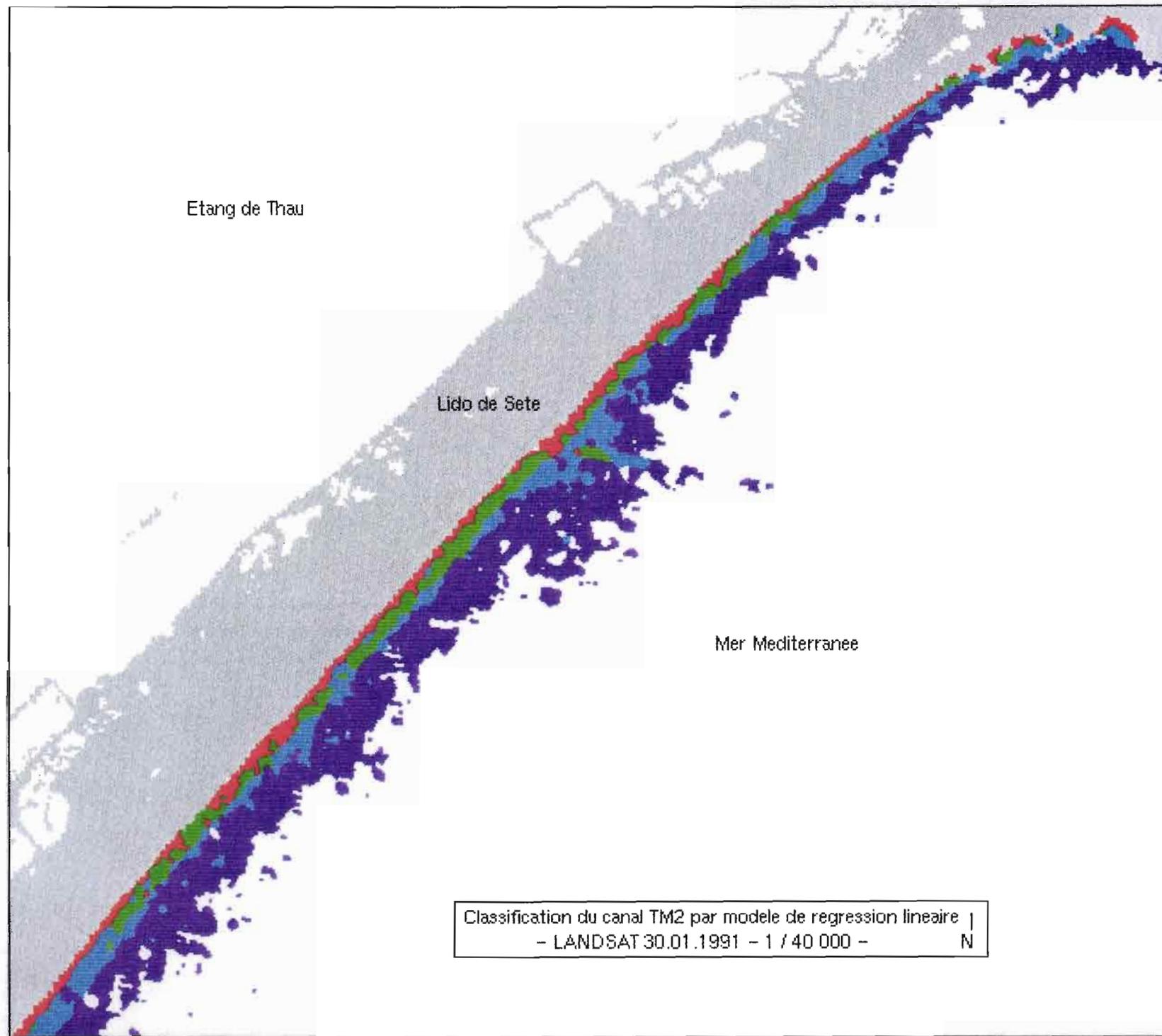
eaux sur cette partie du lido (zone de confrontation des courants littoraux, dérive littorale, zone de déferlement des vagues - cf. partie I).

Pour l'image SPOT (cf. p 54), la classification apparaît comme plus représentative de la bathymétrie, avec une nette individualisation des barres pré-littorales. Comme prévu, le phénomène de colonage lui aussi du à une déficience des capteurs, n'a pas perturbé la classification, hormis pour la tranche d'eau profonde, dont l'homogénéité aide la mise en relief du bruit.

Les images satellites peuvent donc constituer un support pour l'étude de la bathymétrie littorale. Les traitements basés sur une corrélation de la bathymétrie et de la radiométrie semblent pouvoir être appliqués à d'autres techniques de télédétection.



Graphiques 35, 36, 37 Répartition des classes radiométriques suivant la profondeur du profil S1 sur l'image SPOT et l'image LANDSAT TM



Etang de Thau

Lido de Sete

Mer Méditerranée

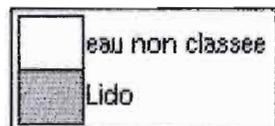
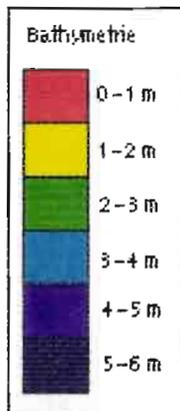


Classification du canal TM2 par modèle de régression linéaire |
- LANDSAT 30.01.1991 - 1 / 40 000 - N

Etang de Thau

Lido de Sète

Mer Méditerranée



Classification du canal XS 1 par modèle de régression linéaire
- SPOT 24.09.1989 - 1 / 40 000 -

N

PARTIE III

APPROCHE DE L'UTILISATION DE L'IMAGERIE AERIENNE SUR LE LIDO DE THAU

I. Choix de la mission aérienne

Nous disposons de trois missions aériennes sur le lido de l'étang de Thau, (mise à disposition par l'IARE) :

- mission du 12/13.06.1989 au 1 / 20 000 prise entre 11h et 12h
- mission du 19.08.1991 au 1 / 8 000 prise à 7h10
- mission du 3.07.1992 au 13.07.1992 au 1 : 20 000 prise entre 9h30 et 13h.

Les photographies de 1992 et de 1989 sont affectées d'un effet spéculaire¹⁶ sur une partie non négligeable des surfaces marines. Le choix s'est porté sur la série présentant la meilleure qualité optique en milieu aquatique.

Seule la mission de 1991 est retenue, car elle présente une bonne qualité optique (l'enregistrement étant réalisé à une heure ou l'angle d'incidence du rayonnement solaire est aigu par rapport à la surface marine).

L'indisponibilité des données de terrains du 17.07.1991 relatives à cette mission aérienne a limité les traitements. seule la constitution d'une mosaïque et une approche des potentialités des images aériennes numérisées seront abordées

II. Constitution de la mosaïque

Numérisation

La numérisation consiste à quantifier l'intensité lumineuse en chaque point ou pixel. La photographie est décomposée en trois canaux auxquels sont attribués une palette. On peut alors recréer une synthèse additive et restituer la qualité trichrome de la photographie couleur.

Les images de la mission de 1991 (1 / 8 000) sont scannées avec une résolution de 150 dpi, ce qui donne un pixel de 1.35x1.35 m. On obtient alors huit fichiers d'environ 1 200 lignes/1 300 colonnes chacun.

¹⁶La réflexion spéculaire est dépendante de la loi de Descartes : l'angle du rayonnement incident est égal à celui de l'angle du rayonnement réfléchi. Cet effet met en relief les effets de surface et masque les fonds marins.

Réalisation de la mosaïque

Le principe d'une telle réalisation repose sur une déformation et un calage successif des images les unes par rapport aux autres. Ceci s'effectue après la prise de points d'appuis identiques sur l'image de référence et l'image à rectifier. Cette étape est délicate, car plus on s'éloigne du "*point principal*", centre de la photographie, plus les déformations augmentent, pour devenir maximales en bordure d'image. Les points retenus doivent donc éviter les ombres portées générées par la visée oblique et la configuration des éléments au sol. Entre 5 et 10 points d'appuis sont pris sur les zones dégagées telles les voies de communications, les bordures de parcelles agricoles et les salines...

Après calcul du polynôme et superposition des images, on prend conscience que les espaces de contact radiométrique peu différenciés sont à éviter lors d'une prise de points d'appuis. En effet, les jetées ou les bordures de quai peuvent présenter une réponse spectrale proche de celle de l'eau à cause de l'humidité qu'ils contiennent. Après une anamorphose, les images sont assemblées. La visualisation du résultat fait apparaître des zones de ruptures en milieu homogène (eau), qui se prolongent en zones hétérogènes (milieu terrestre) par des zones floues. Lors de l'assemblage les "*espaces frontières*" peuvent rester marqués quand la trace de la séparation entre les deux images est extérieure aux limites des frontières de minimum et de maximum. Une des corrections consiste à retracer la frontière en la glissant entre ces deux limites. Il est aussi possible de la circonscrire le long des limites de zones homogènes comme les coupures offertes par les voies de communication ou les limites entre les masses d'eau.

Ces opérations sont ensuite reprises pour les images suivantes, jusqu'à constitution de la mosaïque totale. Le document obtenu rassemble d'un seul tenant, sur 30 x 70 cm, huit images aériennes consécutives. Ces documents sont alors plus aisément utilisables, par exemple lors de suivi de terrain...

NB : une reproduction de cette mosaïque est présentée en fin de partie. L'effet de colonne présent sur cette image est imputable à la reprographie.

III. Critiques méthodologiques et perspectives d'utilisations

Critiques méthodologiques

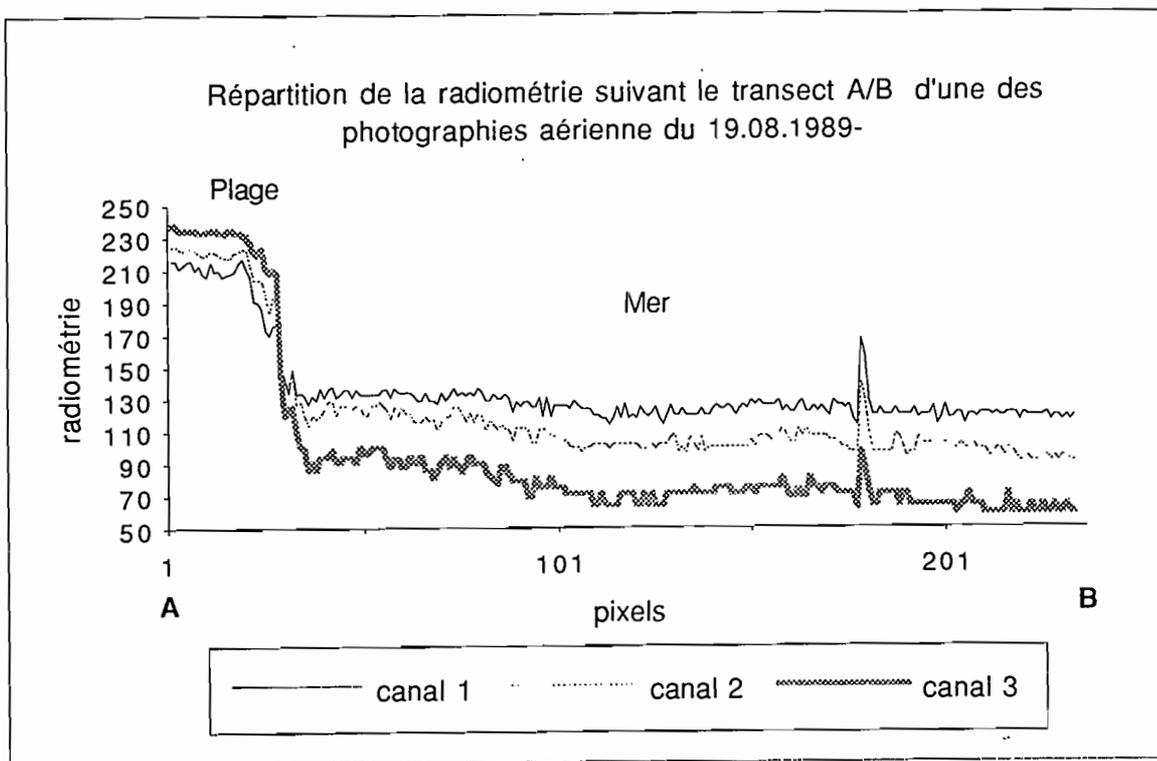
Lors de la prise de vue, l'ensoleillement est différent sur l'ensemble de l'image. Il se produit une diminution de l'absorption de la lumière d'un bord à l'autre de l'image. Cette dernière est visible sur les photographies de la mission de 1991, où l'eau apparaît du bleu clair au bleu plus soutenu de la droite vers la gauche des images. Ce défaut radiométrique se propage dans le même sens sur l'ensemble de la mosaïque.

L'extraction d'histogrammes radiométriques sur les extrémités de la mosaïque fait apparaître une chute des valeurs minimales de 30 unités pour des maxima identiques. Cet état souligne un histogramme plus étalé

dans la partie de l'image proche de Sète par rapport au secteur du Château de Villeroy. Il est préférable de réaliser une correction radiométrique de la balance de luminosité de chacune des images, indépendamment les unes des autres, avant de procéder au mosaïquage. Les images présenteront alors une plus grande homogénéité.

Perspectives

Certaines observations permettent d'entrevoir des possibilités pour l'utilisation de l'imagerie aérienne dans l'étude de la bathymétrie des petits fonds.



Graphique 38

L'extraction d'un profil A-B, (cf. graphique 38 et image p 60) sur une des images aériennes permet de constater qu'il existe une homogénéité de la répartition radiométrique sur les trois canaux. Hormis le pic d'artefact, aux environs du pixel 180, encore inexplicable, on observe une organisation décroissante des valeurs du rivage vers le large sur les trois canaux. De plus, la forme du système immergé se dessine nettement sur ce profil et permet d'individualiser les éléments d'un système littoral immergé.

Il est possible d'appliquer aux photographies aériennes la méthode développée sur les images satellites. Remarquons que la résolution très fine des photographies aériennes nécessiterait la restitution de la mosaïque dans un cadre géo référencé, pour permettre un positionnement exact de chaque extrémité des profils de mesures. Cette échelle de travail ne pouvant

souffrir des imprécisions de localisation rencontrées sur les images satellites. En outre, il serait intéressant de réaliser les relevés de terrain le jour de la prise de vue en positionnant de manière visible les extrémités de chaque profil, par exemple à l'aide de bouées fixes.

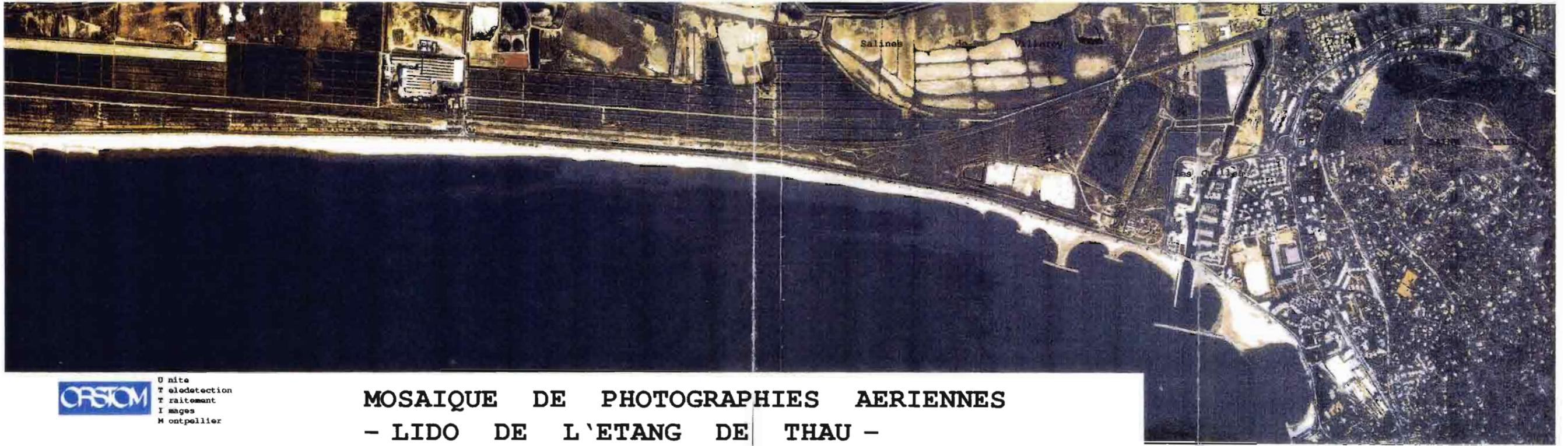
Une seconde proposition, dans le but d'augmenter la vitesse des calculs sur les images aériennes, pourrait résider dans un traitement statistique des informations afin de réduire la masse de données disponibles avant de procéder à une classification. Certes, la précision serait diminuée, mais elle resterait satisfaisante et supérieure à celle des images satellites.



A

B

Localisation du transect A-B sur l'image aeriene
mission aeriene du 19.08.1989 - SPHAIR -



U nite
T eledetection
T raitement
I mages
M ontpellier

MOSAIQUE DE PHOTOGRAPHIES AERIENNES
- LIDO DE L'ETANG DE THAU -

Realisation :
- le 07 / 02 / 1994
- Mairie de Thau (15 / 07 / 1992) (dépense n° 108/92)

CONCLUSION

CONCLUSION

La présence de données bathymétriques sur le lido de l'étang de Thau constitue une source d'information indispensable à l'exploitation d'images satellites. Cette richesse a conditionné le choix de ce site. Cependant l'étude d'un site littoral avec des satellites de ressources terrestre pose un certain nombre de difficultés. Leur ouverture spectrale est peu appropriée, même si chacun comporte au moins une fenêtre de pénétration maximale dans l'eau (entre $0.45\mu\text{m}$ et $0.57\mu\text{m}$). Une image SPOT et une image LANDSAT sont toutefois utilisées pour réaliser une étude bathymétrique sur le lido de Sète à Marseillan.

La sélection de ces images a été effectuée en fonction de leur représentativité au jour des mesures *in situ*. Les critères de choix d'une image représentative de la bathymétrie ont été stricts en incorporant divers paramètres (météorologie, état de la mer...), pour minimiser le risque de choisir une image non exploitable. Malgré ces précautions, une image s'est avérée inexploitable à cause d'une importante turbidité en zone littorale.

La visualisation des deux images sélectionnées révèle qu'elles sont affectées de bruits plus ou moins importants. Sur les traitements testés pour limiter les phénomènes de lignages et de colonages, seule l'application de la transformée de Fourier rapide sur l'image LANDSAT TM a supprimé le bruit. Cependant, cette opération a profondément perturbé la radiométrie en milieu aquatique. Dans l'utilisation que nous en avons faite, la transformée testée s'avère rendre l'image inutilisable pour une étude océanographique.

De plus, certaines réserves doivent être apportées à nos traitements, car ils ont été effectués sans corrections atmosphériques. De plus, les résultats obtenus sont subordonnés à la qualité de la masse d'eau, sa charge, sa courantologie, son agitation. Comme nous l'avons vu, il est difficile de connaître le poids relatif de chacun de ces éléments et donc de s'en affranchir.

Les traitements statistiques des données bathymétriques en fonction de la radiométrie permettent de mettre en évidence une corrélation étroite entre ces deux facteurs jusqu'à -5 pour l'image LANDSAT TM à -6 mètres pour l'image SPOT.

Les cartes bathymétriques localisés sur des bases de mesures (500x1000m) ont permis de réaliser quelques classifications. Cependant la confrontation des résultats aux mesures de terrain a fait apparaître des erreurs de classification. L'échelle des cartes, la difficulté de trouver une technique satisfaisante pour calculer la position des points d'appuis en mer, la maîtrise des modules de traitement, peuvent être autant de facteurs qui ont interféré en défaveur des cartes bathymétriques. Il est certain que les manipulations gagnaient en précision si les extrémités de chaque profil étaient géo référencés. L'absence de points de calage a constitué la principale difficulté de cette étude.

L'utilisation des données bathymétriques brutes (profil de mesure) s'est avérée plus fructueuse, même si elles sont aussi entachés d'imprécisions. La similitude des profils bathymétriques et des radiométries leur correspondant, a autorisé un repositionnement plus juste des profils, en calant les deux mesures sur les barres d'avant-côtes, augmentant ainsi la précision géographique.

La répartition de la radiométrie en fonction de la bathymétrie a confirmé l'existence, sur certains canaux, d'une relation linéaire entre ces deux paramètres. Le calcul du coefficient de corrélation entre les mesures bathymétriques de différents profils et leur réponses spectrales a été effectué sur l'ensemble des canaux et sur des néo-canaux des deux image SPOT et LANDSAT. Les coefficients les plus élevés ont permis de retenir les canaux xs1 et TM2 en vue d'une classification. Le modèle de régression linéaire calculé a permis une segmentation des deux canaux selon des classes d'isobathes.

La classification obtenue sur le premier canal de SPOT fait apparaître l'ensemble des éléments morphologiques immergés du système littoral. L'individualisation nette des barres d'avant-côte est à rapprochée d'une augmentation de la puissance des courants de retour durant cette période de l'année. Ils éloignent ces barres de la côte et permettent donc de les individualiser avec une résolution de 20 x 20 m.

L'image classée fait apparaître la présence d'une tache "*non classée*" au large du canal des Quilles. Celle-ci correspond à la zone de substrat dur mise en évidence par l'indice de type de fond. Au sud du lido, les barres d'avant-côte disparaissent pour laisser place à une zone plus profonde qui figure aussi sur les cartes bathymétriques de navigation (type SHOM au 1 / 50 000). La zone comprise entre 0 et -1m semble anormalement étendue.

Sur ces zones proches du rivage, malgré l'utilisation d'un masque radiométrique, il n'est pas exclu que la classification incorpore des parties de plage. Le sable très humide, ou une eau très chargée, peuvent présenter la même réponse spectrale que des petits fonds à eau claire. En outre la

résolution du satellite limite la précision du tracé, sur une zone de contact pour laquelle il est difficile de déterminer une limite.

La classification sur l'image LANDSAT TM a été effectuée sur le canal TM2. Les essais réalisés sur les ACP restrictives n'ont pas donné de résultats satisfaisants. La résolution de LANDSAT TM ne permet pas de différencier les petits fonds, c'est pourquoi nous n'avons retenu qu'une classe entre 0 et -2 m. Cette classification permet d'individualiser les isobathes jusqu'à -5 m. Au dessous de ce seuil et malgré un coefficient de corrélation élevé entre la radiométrie et la bathymétrie, les réponses sont très désordonnées.

Cette méthode statistique présente des limites. Elle ne peut être appliquée que sur les fonds d'un certain dénivelé, et en eau suffisamment claire pour que la réponse spectrale soit représentative de la hauteur de la colonne d'eau.

En somme, la répétition des observations par satellite permet un suivi régulier des petits fonds, suivi qui peut être ponctué par des couvertures d'images aériennes lors de circonstances exceptionnelles. Les pré-traitements effectués sur ces photographies laissent entrevoir une organisation de la radiométrie dans le même sens que la bathymétrie.

Des prises de vues simultanées avec des images-satellite et aériennes permettraient d'effectuer une classification à partir des mêmes données de terrain, ce qui faciliterait la comparaison des résultats et confirmerait ou infirmerait les premières réponses obtenues. Dans le cas de réponses comparables, les classifications seraient facilitées par la réalisation d'une mosaïque étendue à l'ensemble du lido. La mise en conformité de l'échelle de cet assemblage et des images-satellite, pourrait contribuer à enrichir la connaissance de ce milieu, en comparant ces documents aux réponses spectrales.

La densité des informations transmises par les satellites ou recueillies par les images aériennes se doivent d'être mise en relief par l'utilisation simultanée de différentes méthodes.

Les modèles numériques de terrain en zone immergée basés sur des mesures bathymétriques plus étendues dans l'espace pourrait être utilisés. Certes, la réalisation de ce modèle nécessiterait un suivi plus contraignant, mais permettrait une compréhension plus aisée du fonctionnement morphodynamique du lido. Aussi, l'acquisition d'informations intégrées dans un modèles numériques de terrain "immergé" servirait de base à une modélisation animée, pour illustrer les phénomènes dynamiques.

L'exploitation des images aériennes pourrait aussi être améliorée en procédant à un changement d'échelle de manière à obtenir le système dune/ plage/avant-plage sur dimensionné dans le sens du profil. Cela permettrait d'optimiser la lisibilité des phénomènes de détails, comme les déplacements de barkanes, l'ensablement des ouvrages : ganivelles, épis, brise lames, embouchure de port...

Outre l'étude des petits fonds, l'analyse des images a permis l'observation des courants pré-littoraux, des échanges mer/étang, et des zones à forte charge sédimentaire.

La télédétection en milieu littoral doit donc pouvoir, par la richesse des informations qu'elle est en mesure d'apporter, s'intégrer et être exploitée au sein de systèmes d'informations à différentes échelles. Les études d'aménagement du littoral se situent généralement à une grande échelle pour l'aménagement local ou à une petite échelle entre l'aménagement national et l'aménagement régional. Les études bathymétriques entrent dans ce cadre et n'échappent pas à cette constante. C'est pourquoi, la télédétection par satellite peut apporter une vision plus globale, grâce à une observation répétitive entre les deux échelles complétée par les données de terrain.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

ANSELME B., CAUNEAU F. (1991). -Séparation de la houle et de la turbidité en imagerie SPOT du littoral. Revue de Photo-interprétation, Fascicule 5-6, pp. 249-255.

BARRUSSEAU J.P., SAINT GUILY B. (1981). -Dispositions , Caractères et formations des barres d'avant côte festonnées du golfe du Lion. Oceanologica Acta, volume 4, n°3.

BARUSSEAU J.P., BRISSAUD L. (1989). -Observatoire côtier de Sète-Marseillan, résultats de l'évolution morphologique et sédimentologie de la côte-et de l'avant côte entre mai et septembre 1989. IARE et LRSM, 20p+annexes.

BARUSSEAU J.P., RADULESCU M. (1991). Suivi du littoral de Sète- Marseillan. Contrat de plan Etat-Région Languedoc-Roussillon 1989/1991-LRSM, SMNLR, IARE,36 p.

BONN F., ROCHON G. (1992). -Précis de télédétection- Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec. AUPELF Québec. Vol 1, 485p.

BOUR W., LOUBERSAC L., RUAL P. (1986). - Thematic mapping of reef by processing of simulated SPOT satellite data : application to the *Trochus niloticus* biotope on Tetemia reef (new Caledonia); Marine Ecology, Progress serie, Coll 34, pp. 243-249.

BRACEWELL R. (1989). -L'analyse de Fourier. Pour la Science, n°142, pp.74-85.

BRICOUT V., FROIDEFOND J.M. (1993). -La télédétection : un outil pour la bathymétrie côtière. Bull Inst. Géol. Bassin Aquitain, n°53, pp. 199-207.

CNES (1992). -Télédétection spatiale -Université d'été européenne, Toulouse 1990, Coll Enseignement et Espace- CNES,309p.

CUQ F. (1983). -Exemple de cartographie des phénomènes littoraux. L'Espace Géographique, n°3, pp. 265, 271, 295.

CUQ F. (1989). -Océanographie et morphologie littorale. In "Télédétection appliquée. zones tempérées et intertropicales". GIRARD M.C & C.M.(1989). Coll Sciences agronomiques, Masson, Paris, pp. 234-255.

DENNIS. L.H., B.K. QUIRK, J.J. HOOD (1992). -A technique for the reduction of banding in Landsat Thematic Mapper Image. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,vol 58, n°10, pp. 1425-1431.

DIAW A. T. , THOMAS Y.F. (1986). -La dynamique littorale à l'embouchure du Saloum (Sénégal). SPOT 1 Premiers résultats en vol. Toulouse Décembre 1986, CNES, pp. 281-283.

E.D.F. (1984). -Catalogue sédimentologique des côtes de France, de la frontière Espagnole à la frontière Italienne, Eyrolle, Paris, 355p.

GALTIER G. (1958). -La côte sableuse du golfe du Lion. Bulletin de la société Languedocienne de Géographie, 29(2).Fascicule 2, 3 et 4, pp. 149-241.

GARLANT T. (1991). -L'apport des données satellitaires pour la cartographie du domaine littoral. Coll. OSATES. Brest, 24-27 sept 1991,12p.

GAUTHIER A., GELUNE P.(1990). -Le satellite SPOT et l'érosion du littoral : exemple du littoral oriental Corse. Reun. Ann. Sci. de la Terre. Grenoble, n°13, p51.

- GUYOT G. (1992). -Signatures spectrales des surfaces naturelles, Télédétection. Ed. Paradigme, Versailles, 178p.
- JOLY G.(1986). -Traitement des fichiers images- Télédétection Satellitaire. Paradigme, Caen, 137p.
- KOUDIL M. (1993). -Cartographie bio sédimentaire des petits fonds par imagerie SPOT en Méditerranée . Golfe de Calvi et de Saint Florent (Corse). Mémoire de DESS "Télédétection, méthode et applications", GTDA, ENSG, TOULOUSE, 43p+annexes.
- L'HOMER A. (1987). -Application des données multispectrales SPOT à la cartographie des sédiments de la baie du Mont Saint-Michel (Bretagne et Normandie, France). Actes du colloque "Mer et littoral, couple à risque", Biarritz, 565p.
- LOUBERSAC , BELBEOCH G. (1984). -Haute résolution spatiale et environnement littoral (simulation SPOT, Bretagne, France)". Revue de Photo-interprétation, Fascicule 3, pp. 19-22.
- LOUBIE S. (1992). -Le littoral Narbonnais : Genèse, dynamique et impact de l'aménagement touristique. Mémoire de géographie, Montpellier III, 172p+annexes.
- LOUBIE S., RIEUCAU J. (1993). -La protection du littoral Narbonnais. Mappemonde(1993/1). ENS-RECLUS. Montpellier. p48.
- LOUBIE S., RIEUCAU J.(1993). -La protection du littoral. Planche 13-4-1. Atlas Permanent du Languedoc-Roussillon. GIP-RECLUS/Maison de la Géographie- 4p.
- MADEC- CUQ V. (1993). -Intérêt du traitement de données spatialisées pour la géographie du littoral. Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine. Bordeaux, n°53, pp. 193-198.
- MANIERE R., KHIYARH., COURBOULES J. (1991). -Comparaison de différentes méthodes de traitement par analyse en composantes principales des données de Thematic Mapper de LANDSAT-5 appliquées à l'inventaire des forêts méditerranéennes du sud de la France. Int. J. Remote Sensing, vol 12, n°9, pp. 1887-1903.
- MASSON P. (1990). -Cartographie bathymétrique du littoral corallien par classification d'images de télédétection ."Pix-Iles", Nouméa- Tahiti, 19-24 nov 90. pp. 353-383.
- MEMANTEAU L. (1990). -Application de la télédétection au domaine littoral. Télédétection spatiale- Université d'été Européenne. Toulouse -CNES,1992, pp. 203-217.
- NAIZOT T., KHODJA A. (1992). -Traitement numérique des images SPOT du littoral du Parana (Brésil) par les processus spatiaux : Méthode de classification. Revue photo-interprétation, n°1991/92. 5-6. pp. 183-198.
- PASKOFF R. (1985). -Les littoraux : impact des aménagements sur leurs évolution. Masson, Paris, 185p.
- PESTRE CH. VERGER F. (1980). -Géomorphologie de la baie du mont Saint Michel par télédétection des lignes de rivages instantanées. Annales des Mines, Paris, pp. 175-181.
- PIRAZZOLI P.A. (1982). -Télédétection en milieu récifal, utilisation d'une image Landsat pour évaluer la bathymétrie dans l'atoll de Rangiroa (Polynésie française), Océanis, 8, 4,pp.297-308.
- PIRAZZOLI P.A. (1984). -Cartographie des hauts fonds par télédétection dans l'archipel des Gambier (Polynésie française). Espace géographique, 3, pp. 277-284-304.
- RAKOTO M., MERING C., ANDRIANASOLO H. (1992). -Guide de l'utilisateur PLANETE version 2.0. Laboratoire d'informatique appliqué Unité de Télédétection. ORSTOM, 128p.
- RUEDA F. (1985). -Le littoral du Gard et de l'Hérault. SMNLR. 145p.
- SEGALA B. (1992). -Télédétection de la zone littorale de Palavas, recherche d'informations morpho-bathymétriques dans la zone d'atterrage. GUTLAR- Rapport IFREMER- 7p+annexes.

Service de Consultance en Observation de la Terre.(1989). Guide de la Télédétection spatiale en France. Ed. Pierre Johanet et ses fils. Paris. 400p.

SEYLER F. (1986). -Recherches méthodologiques sur le traitement d'images de télédétection aériennes, basée sur l'analyse préalable des formations superficielles avec leurs couvertures végétales. Thèse Univ. Paris VII, 262p.

SIGAUD L. (1993). -Apport de l'imagerie SPOT au suivi de l'étage infra-littoral (cas du lido de Sète). Mémoire de DESS "Activités et aménagements littoraux et maritimes", Montpellier III, 40p.

Société Franco-japonaise d'océanographie, Musée d'Océanographie de Monaco. (1990). -Halieutique, océanographie et télédétection. M. Petit et J.M. Stretta. Ed. Bulletin de l'Institut Océanographique, Monaco, n°6 spécial, 229p.

SOUMARE A. (1994). -Apport de l'imagerie SPOT au suivi multitemporel des paysages littoraux du Delta du Saloum (Sénégal).Rapport de stage. "Réseau Télédétection", AUPELF-UREF,ORSTOM.43p.

SPITZER D. and R.W.J. DIRKS (1986) -Classification of bottom composition and bathymetry of shallow waters by passive remote sensing. Symp. on remote sensing of resource development and environmental management. Erschede, Netherland, pp. 775-777.

SRINIVAN R., CANNON M. and WHITE J. (1988). -Landsat data destripping using power spectral filtering, Optical Engineering, vol-27, n°11,pp.939-943.

TRAVASSOS P. (1994). -Cartographie par télédétection optique et radar du littoral de la Guyane française : Importance de la mangrove pour la production crevillère. Mémoire de DESS Télédétection, Méthodes et Applications, GDTA, ENSG, 32p+annexes.

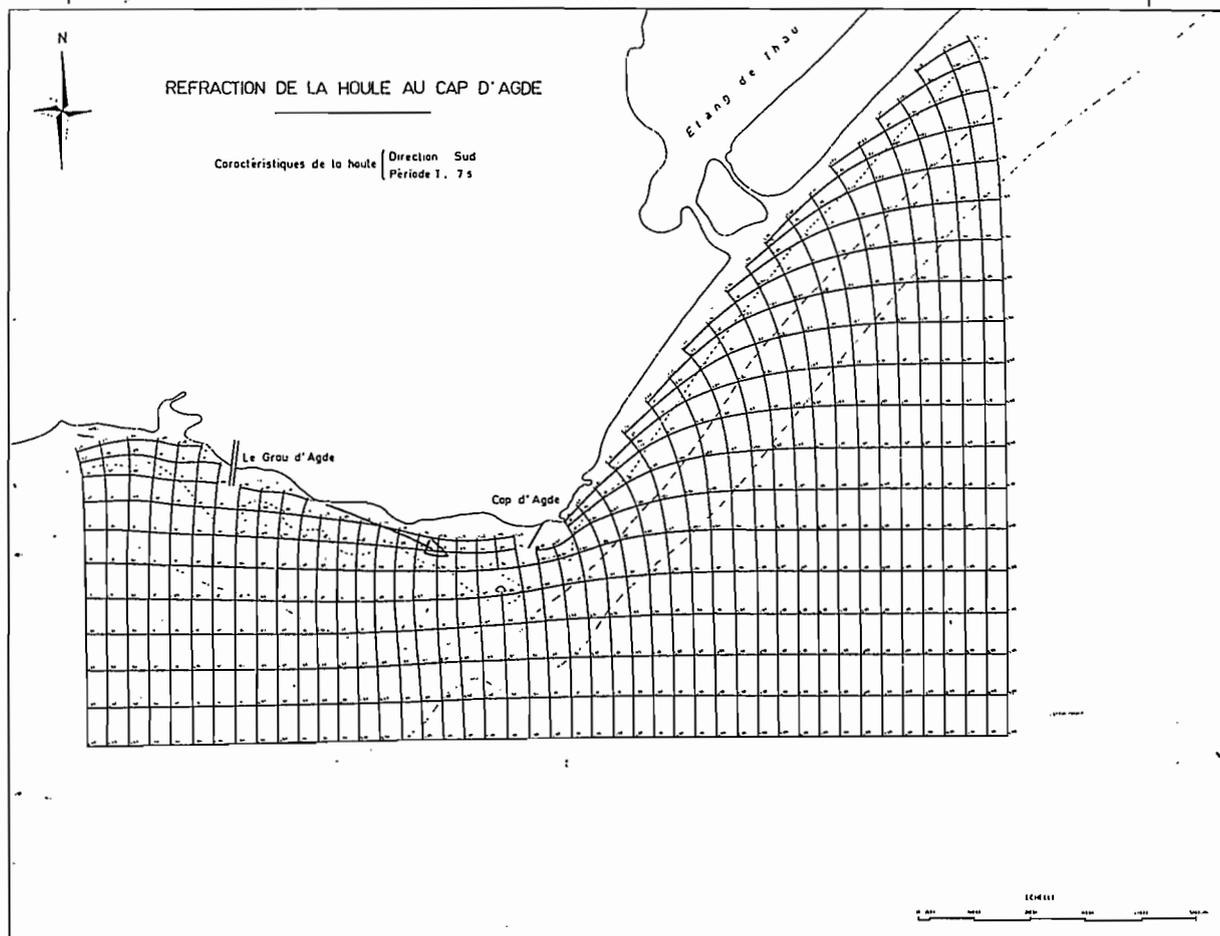
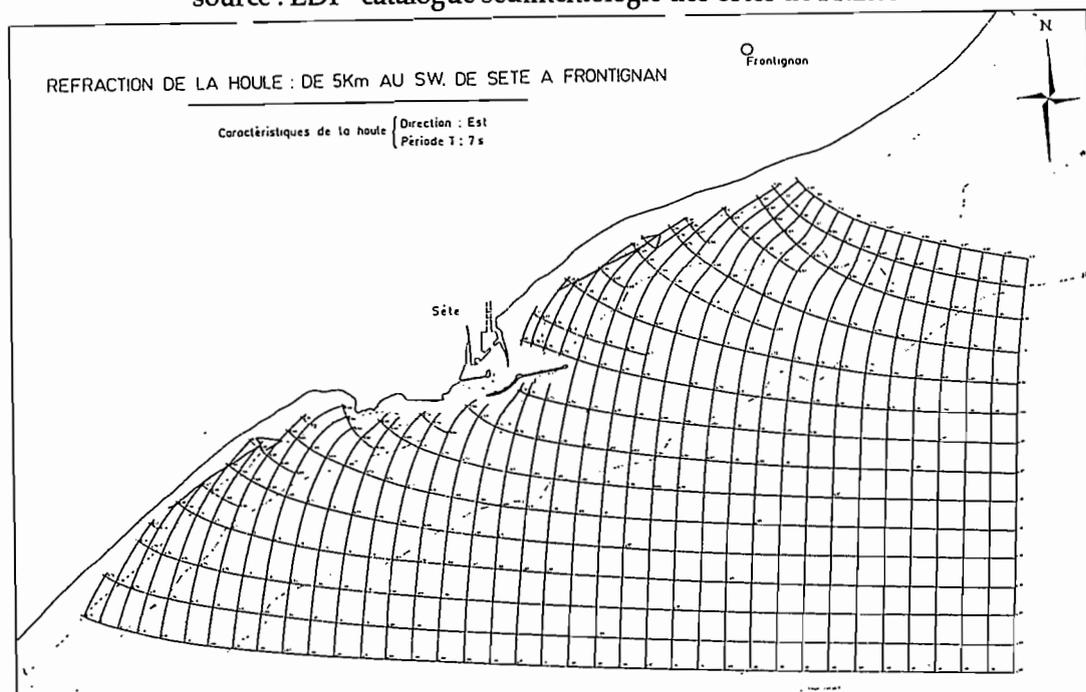
VERGER F. (1989). -L'évolution de la télédétection satellitaire concernant les milieux littoraux. Télédétection en francophonie. Ed AUPELF- UREF, Paris, pp. 11-115.

VERGER F., CUQ F., SALL M., DIAW T., LOUBERSAC L. (1984). -Étude d'un littoral tropical: l'embouchure du Saloum(Sénégal). Simulation d'images SPOT, fiche 0C2. Toulouse.

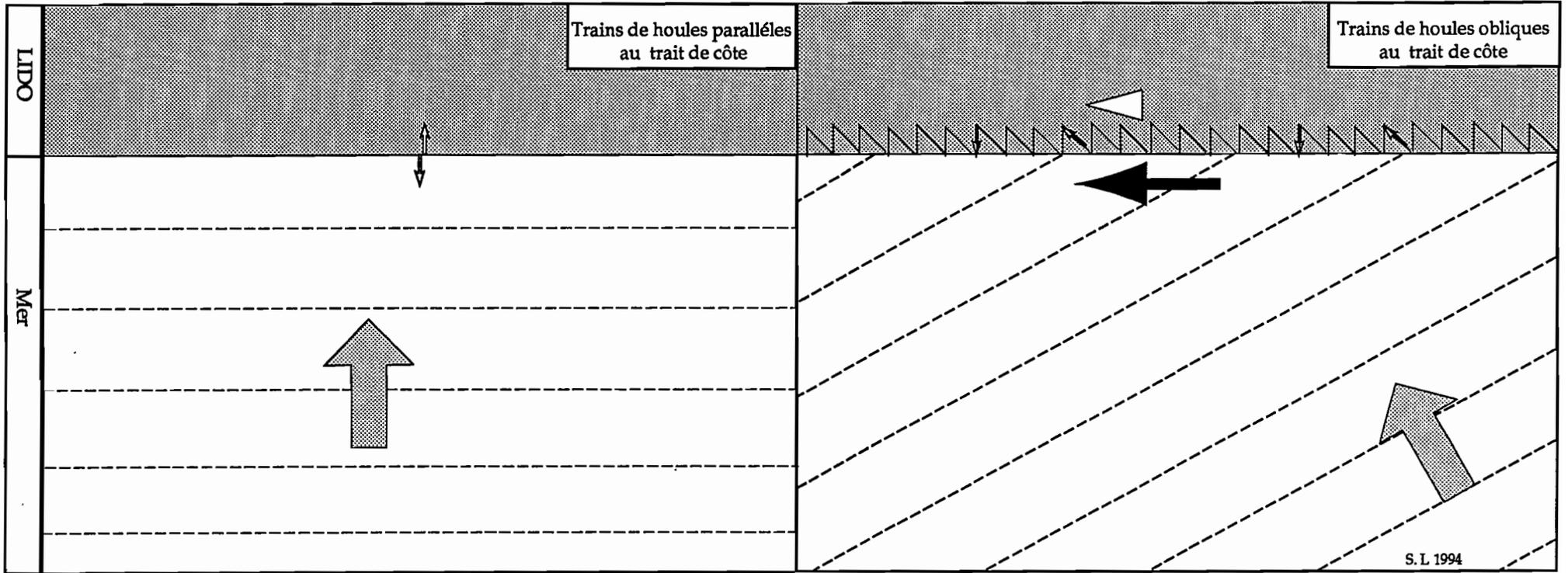
VIOLLER M., BELSHER T., LOUBERSAC L. (1985). -Signature spectrale des objets du littoral. 3rd Int. Coll. on spectral signatures of objects remote sensing. Les Arcs (France) 16-20 dec. 1985. ESA-SP-247. pp. 253-256.

WADSWORTH A. (1988). -SPOT 1, un satellite qui n'a pas peur de l'eau!, La Recherche, 19, 198, pp. 536-538.

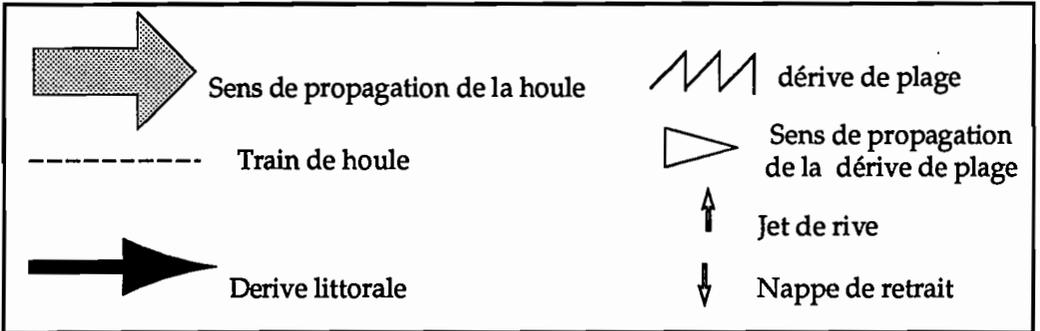
Annexe n°1 : Plan de réfraction des houles
source : EDF "catalogue sédimentologie des côtes de France"



Relation entre la houle et la dérive littorale



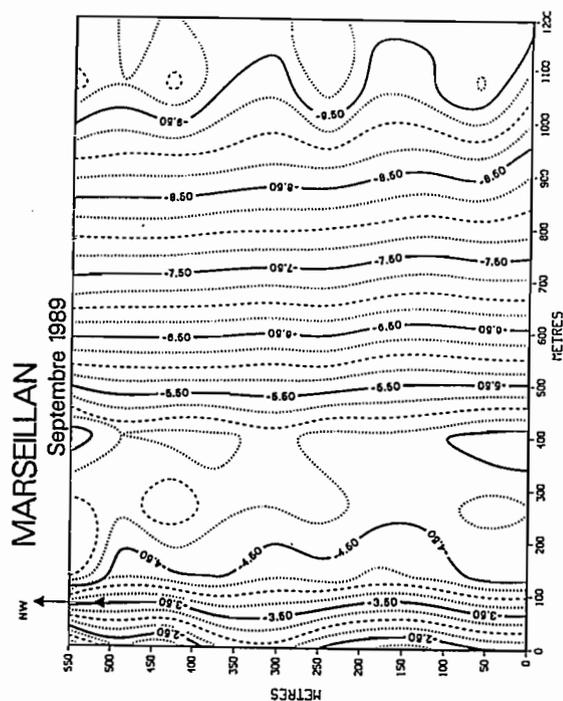
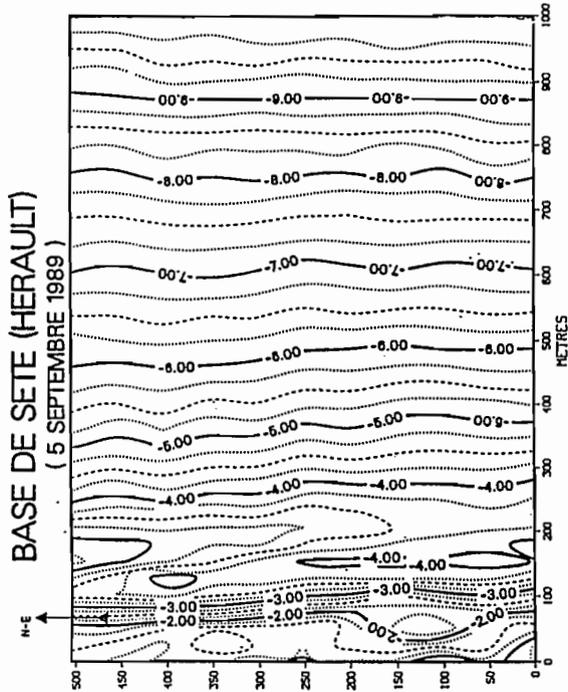
S. L 1994

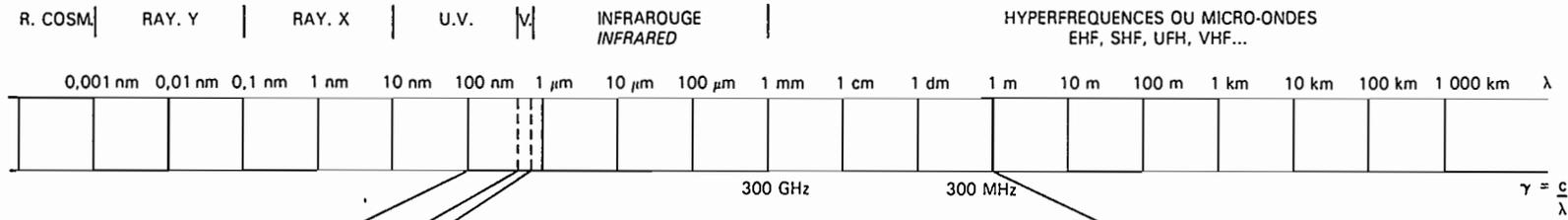


Annexe n° 3 A: Positionnement des bornes des profils des bases de Sète et de Marseillan
(d'après Barusseau, Radulescu-1991)

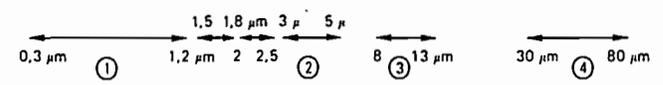
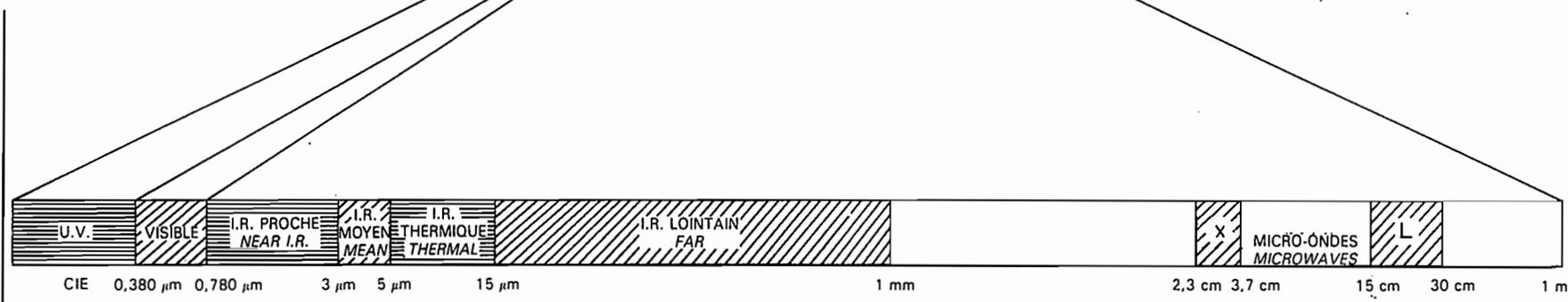
N° de borne	Distance (m)	Dénielée (m)
S1	0	0
S2	49,56	-0,02
S3	99,36	-0,03
S4	148,78	-0,05
S5	199,29	-0,04
S6	261,57	-0,04
S7	298,93	0,01
S8	349,39	-0,10
S9	399,28	0,01
S10	449,28	-0,06
S11	499,35	-0,14
M1	0	0
M2	60,06	0
M3	99,95	0
M4	150,15	-0,05
M5	188,73	0,07
M6	272,73	-0,02
M7	301,32	0,04
M8	345,74	0,11
M9	394,73	0,08
M10	440,03	-0,07
M11	504,97	-0,06

Annexe n° 3 B: Carte bathymétrique des bases de Sète et de Marseillan





Annexe n°4 : Spectre électromagnétique source : "Guide de la télé-détection 1989"



FENETRES ATMOSPHERIQUES
ATMOSPHERIC WINDOWS

RAYONNEMENT REFLECHI REFLECT. RADIATION
RAYONNEMENT EMIS (émission de PLANCK) EMITTED RADIATION (PLANCK emission)

ŒIL EYE

PHENOMÈNES PHYSIQUES
PHYSICAL PHENOMENA

A. PHOT. 0,9 1,2 CAMERAS

CAPTEURS SENSORS

RADIOMETRES RADIOMETERS

PASSIFS PASSIVE

SCANNEURS MULTIBANDE
MULTISPECTRAL SCANNERS

RADARS

ACTIFS ACTIVE

Annexe n°5: extrait de la grille de référence SPOT
source: SPOT IMAGES

