Notes de cours.

Formations données dans le cadre du Master SILAT (Systèmes d'Information Localisées et Aménagement du Territoire) à l'INAPG, site de Paris Grignon.

Thèmes relatifs aux territoires côtiers

L. LOUBERSAC (Ifremer) Mai 2003

INTRODUCTION : PROBLEMATIQUE GENERALE LIEE A L'OBSERVATION SPATIALE DES MILIEUX COTIERS EN VUE DE LEUR AMENAGEMENT ET LEUR GESTION

Un fait : le "tropisme" côtier

L'occupation et l'exploitation des régions côtières sont actuellement en modification rapide. Ce phénomène touche autant les pays développés que les pays en voie de développement, tout particulièrement les pays producteurs et exportateurs de produits pétroliers ou miniers (Arabie, Pays du Golfe, Iran, Mexique, Venezuela), ou potentiellement exportateurs (Cameroun et Côte d'Ivoire, Chili etc...). Outre les activités relatives à l'exploitation de ressources minérales, dans plusieurs cas de figure d' autres modes d'exploitation du littoral deviennent prépondérants et prennent, pour certains pays, des formes de développement quasi exagérées. C'est le cas de l'aquaculture. 170 000 hectares de bassins ont été construits en zone fragile sur le littoral des Philippines ; en Equateur, ce chiffre atteint 75 000 hectares. C'est également le cas du tourisme pour certains états insulaires des Caraïbes, du Pacifique ou de l'Océan Indien. 5 000 000 de touristes visitent annuellement Hawaii pour une population locale permanente de 1 000 000 d'habitants. Rappelons que les activités touristiques devraient constituer, en chiffre d'affaires à l'horizon 2 000, la première industrie de la planète.

Le phénomène, mondial, entraîne des bouleversements démographiques, économiques et d'environnement parfois considérables. Il est un fait que dans la quasi totalité des pays possédant une façade maritime, il y a déplacement des centres de gravité de peuplement vers les côtes. On estime que les 2/3 de la population mondiale vit à proximité de la mer. En Asie, en Amérique du Sud, en Afrique, les états et provinces côtiers croissent à des taux nettement plus élevés que les états et provinces continentaux. L'impact de ce "tropisme" côtier et du développement d'activités industrielles, commerciale ou d'exploitation de ressources renouvelables, non renouvelables, ou de site (tourisme) prend des formes variées qui dans l'espace, touchent à la fois les zones littorales proprement dites, la zone marine avoisinante et l'arrière pays terrestre.

Ces formes principales sont :

- le développement d'infrastructures : ports, aéroports, complexes industriels, miniers, énergétiques, d'exploitation pétrolière offshore, de transformation agro-alimentaire, complexes urbains, implantations hôtelières et complexes touristiques, implantations aquacoles etc...

- une transformation des espaces naturels : destruction de zones humides, de récifs, de la végétation naturelle de l'arrière pays, rectification et protection du trait de côte, pollutions diverses du milieu marin, augmentation des risques écologiques etc...

compte tenu de ces variétés il est extrêmement difficile de proposer une classification générale des causes de modification ou de destruction des milieux naturels côtiers. Pour les mangroves, par exemple, Blasco (1982) a proposé la hiérarchie suivante, par ordre d'importance décroissante des facteurs de destruction :

– régions humides	exploitations forestières agriculture aquaculture
– régions semi arides et arides	détournements cours d'eau surpâturage extraction du sel
– pays industrialisés	urbanisation aménagement littoral industrialisation pollution

En termes d'impact on peut caractériser les transformations du littoral par les quelques chiffres suivants :

– en France pour une longueur estimée du trait de côte de 4 500 Km on compte 97 m de longueur d'ouvrages de défense par kilomètre : soit 435 Km d'ouvrages,

– au Japon pour 31 000 Km de côtes on dénombre 8 000 Km d'ouvrages de protection. Dans ce pays 1/4 du linéaire côtier est donc artificiel,

– pour les pays tropicaux l'exemple des Sunderbans au Bengale est bien connu. On estime que la surface du plus grand ensemble de mangroves du monde a été réduit de plus de 1 500 Km^2 sur les 100 dernières années.

Ces faits, dont les répercussions sont d'autant plus sensibles que les milieux côtiers sont fragiles et très souvent sont confinés, îles et archipels notamment, justifient pleinement que toutes précautions soient prises pour maîtriser des développements le plus souvent désordonnés et limiter les impacts sur les milieux naturels.

Une conséquence : le besoin d'une approche intégrée du littoral dans le cadre de la planification et la gestion des activités

Progressivement les gouvernements de nombreux pays ont pris conscience des enjeux posés par l'exploitation des ressources côtières ou leur protection et par les conflits entraînés par les diverses activités mises en place. Cette prise de conscience a parfois été aidée par l'occurrence de certaines catastrophes écologiques, notamment d'origine pétrolière, ne respectant pas les frontières. C'est pourquoi plusieurs états, parfois en association, et de nombreuses organisations internationales ont envisagé la définition d'un politique globale et à long terme.

Parmi ces tentatives de gestion coordonnée dont certaines ne furent que des essais et qui s'appuient sur la définition d'une législation et de systèmes d'informations multiparamètres, on trouve par exemple :

– en France les Schémas de Mise en Valeur de la Mer (SMVM), intitulés Schémas d'Aptitude et d'Utilisation de la Mer (SAUM) dans une législation antérieure ; l'Inventaire Permanent du Littoral (IPLI) ; la constitution tout récente (printemps 93) d'un groupe de travail inter organismes suite à la demande de la DATAR sur le thème : "Système d'Observation du Littoral".

– aux USA le Coastal Management Act, le Middle Atlantic Governement Coastal Resource Council.

– au niveau international, des programmes tels que COMAR (UNESCO), Mers Régionales (PNUE)...

– au niveau régional dans le Pacifique Sud, le Programme Régional Océanien pour l'Environnement (PROE) piloté par la Commission du Pacifique Sud (CPS) : UNEP (1983).

On notera que la CEE s'est très tôt intéressée à cette problématique qui est très largement promue dans les appels d'offre de type MAST ou EUROMAR/EUREKA par exemple.

En règle générale ces essais de planification et de mise au point de systèmes informatifs multisources sont encore le plus souvent à l'état de prototypes tout particulièrement en ce qui concerne la mise au point des outils et documents d'aide à la gestion dont la forme peut être extrêmement variée : schéma directeur, image à long terme, plan d'occupation, conservatoire du littoral..

J.M. COUR, alors responsable de la planification dans la société SCET/COOP International, insistait dans une note de synthèse présentée à l'ASTEO en 1984, sur l'intérêt que représente l'élaboration de produits de planification et gestion des régions côtières, produits qui sont éventuellement exportables. L'auteur montre le caractère très pluridisciplinaire de ces produits situés à l'amont des projets de mise en valeur, d'exploitation ou de gestion des ressources et explicite l'intérêt qu'il y a à les maîtriser dans la mesure où ils facilitent la programmation et la mise en oeuvre des projets aval.

Il apparaît, en fait, deux types de freins au développement de systèmes et produits de gestion intégrés à long terme. D'une part, **un frein de type "institutionnel"**, d'autre part, **un frein de type "informatif"**.

Le premier type correspond au fait que l'interface terre–mer et ses zones adjacentes sont, en tous pays, sous la juridiction de multiples collectivités et administrations, dont les prérogatives ont parfois, et même souvent, opposées. Cette multiplicité des centres de décision est telle que toute coordination est délicate, elle l'est donc à fortiori encore plus dès que l'on attaque le problème sur le plan régional ou international. Le fait est que dans les pays en voie de développement dans lesquels les structures administratives ont été calquées souvent sur celle l'Occident, il y a peu de planification ; lorsque celle–ci existe elle demeure sectorielle et par conséquent ne prend pas en considération les problèmes globaux posés par la mise en valeur des côtes. Il est un fait aussi que dans ces pays les projets de grands chantiers sont très souvent tout puissants tant leur impact économique prépondérant fait perdre de vue les autres impacts possibles des activités qu'ils engendrent.

Nous qualifierons le deuxième frein d'"informatif". Il est un fait que les décideurs, notamment dans les pays de la zone intertropicale, ne peuvent utiliser efficacement l'information requise. Les raisons sont soit que celle ci est inexistante ou trop rare, soit que sa forme est mal adaptée aux problèmes posés et ne remplit notamment pas les caractéristiques multispatiales, multiparamètres et multitemporelles requises.

En effet, **l'information doit être multispatiale puisqu'elle intéresse,** indépendamment des frontières, **les zones littorales proprement dites mais aussi les zones marines avoisinantes** (plateaux continentaux) en surface et en profondeur, **et la zone terrestre proche** (bassins versants, bassin d'emplois terrestres...). **Elle doit être multiparamètre, par le fait même que toute activité de planification en matière littorale est par essence pluridisciplinaire. Elle doit être multitemporelle parce que tout système de gestion du côtier doit s'effectuer par rapport à des références et des contrôles dans le temps** et parce que tout schéma de mise en valeur ou de planification étant défini sur des bases temporelles doit pouvoir s'alimenter d'événements et se construire sur une base prospective.

Si l'on considère le critère "multispatial", dans le cas de la France métropolitaine par exemple, quiconque pourra constater que les documents d'information géographique de base interceptant le littoral sont de nature différente, d'échelle différente, adoptant des plans de projection différents, cartes topographiques de l'IGN, carte hydrographique du SHOM par exemple.

Pour de nombreux pays de la zone intertropicale aucun système cartographique précis et actualisé n'est disponible notamment pour ce qui concerne les domaines très sensibles et difficilement pénétrables que sont les mangroves et les récifs coralliens ceci étant le résultat des difficultés qu'il y a à appréhender ces milieux par les méthodes classiques. Pour ces milieux, la première condition, la localisation, étant mal remplie, toute gestion ou approche globale du milieu demeure difficile, voire quasi impossible. Il est significatif de constater dans un Territoire d'Outre Mer français, la Polynésie française, que la cartographie topographique et hydrographique de l'archipel des Tuamotu (84 îles basses et atolls réparties sur plus de 1 800 Km d'Ouest en Est et 500 Km du Nord au Sud) est en grande partie à réaliser aux échelles moyennes alors que ce sont les lagons de ces îles qui produisent en valeur sous forme de perles et de nacres la première exportation du Territoire. On comprend pourquoi faute d'informations géographiques de base les services administratifs et techniques chargés de la gestion du domaine public maritime que constituent les lagons et de l'aménagement des espaces littoraux soient particulièrement démunis.

Existe-t-il une place pour la télédétection ?

Colwell a caractérisé la télédétection, en 1975 aux Etats-Unis, par la notion de multiconcept. Cette notion exprime les nombreuses facettes de l'outil et peut se résumer selon les termes de l'auteur comme suit : "multidate, multispectral, multiéchelle, multipolarisation, multidirectionnel, multidisciplinaire, multithématique et multitraitement". Ainsi que cela a été évoqué précédemment et ainsi qu'il sera décrit ultérieurement, notamment dans la caractérisation des objets littoraux, le littoral, interface entre terres et mers, inclue naturellement un tel multiconcept. **Le littoral est en effet,** et on l'explicite ci-après, **multithématique, il fait appel à la pluridisciplinarité dans son étude et présente une variabilité d'échelles spatiales et temporelles très importante dans son observation.**

Il apparaît donc en première approche que les systèmes d'observation spatiale de la terre en tant qu'outils intégrateurs puissent contribuer par leurs données à l'élaboration de documents facilitant la description de la répartition des milieux qui les composent et optimisant la compréhension de leur fonctionnement et de leur dynamique sous actions naturelles ou artificielles. De tels documents sont indispensables à la mise en oeuvre de systèmes d'aide à la gestion globale des zones côtières. Mais avant d'exposer en première partie les caractéristiques spectroradiomètriques des milieux littoraux, puis, en seconde, les produits dérivés des données d'observation de la terre susceptibles de compenser les freins de type "informatif" évoqués plus haut et d'optimiser l'Aménagement du littoral, étudions plus précisément les potentialités et limites d'utilisation de ces données, en fonction des objets littoraux eux mêmes et des caractéristiques et spécifications des systèmes d'observation actuels.

Tentons tout d'abord de définir "géographiquement" ce que représente le littoral. S'il apparaît relativement aisé de définir géographiquement un système forestier, urbain, rural, il est plus délicat de définir ce qui constitue géographiquement le littoral puisque les phénomènes qui intéressent cette interface sont autant d'origine terrestre que marine.

On pourrait administrativement en limiter l'extension à l'amont, côté terre, aux limites des communes littorales et à l'aval à celle dite des 12 miles nautiques. On pourrait plus logiquement en limiter l'extension à l'amont aux limites des bassins versants terrestres et à l'aval au rebord du plateau continental (limite bathymètrique de - 200m). En effet la pluviométrie ou les modes d'utilisation des sols et de l'espace sur les bassins versants ont un impact sur les phénomènes de surface situés à l'aval dans le domaine marin proprement dit (sédimentation, turbidité, pollution, etc..). D'autre part les phénomènes naturels sur les plateaux continentaux (houles, courant, tempêtes...) vont présenter, par rapport au large des modifications liées à l'approche des côtes dont les signatures seront significatives. En outre les modes d'activités humaines sur la bordure littorale marine et sur ces plateaux sont actuellement particulièrement développés (exploitation pétrolière, pêche, aquaculture, tourisme, plaisance, transport maritime etc...) et entraînent des impacts sur l'environnement littoral jusque dans les bassins d'emploi terrestres.

Pour ce qui suit nous nous limiterons au "littoral marin" c'est-à-dire à l'amont aux limites des plus hautes mer. La partie terrestre du littoral qui inclue écosystèmes naturels et forêts, ressources en eaux douces, ressources en sols, système ruraux et urbains... dont le fonctionnement et la dynamique ont de plus ou moins forts impacts sur les milieux littoraux marins à l'aval est traitée dans cette Ecole d'Eté par ailleurs. Nous rappelons toutefois à l'attention des auditeurs la nécessité qu'il y a à bien intégrer ces composantes terrestres pour toute étude de l'environnement littoral aval.

On distinguera donc pour le "littoral marin" deux grands types de milieux :

- **le milieu subcotidal,** c'est-à-dire toujours ennoyé et typiquement marin, situé en dessous du niveau des plus basses mer.

- **le milieu intercotidal,** situé dans la zone de balancement des marées, là où elles existent, entre hautes et basses mers.

Les objets du littoral composant le premier milieu sont donc essentiellement aquatiques. Les phénomènes observés à distance sur ce milieu vont selon les cas correspondre à plusieurs types d'influences :

– **en surface** (houles, vagues, courants, vents, polluants tels que les hydrocarbures, glaces de mer ou d'eau d'eau douce etc..),

– **dans la colonne d'eau** (turbidité, température, panaches d'émissaires naturels et artificiels, blooms planctoniques etc...),

– **liées au fond** (petits fonds en eau claire dans le domaine optique, présentant eux mêmes des substrats divers, durs ou meubles, végétalisés ou non ; influence du fond sur la courantologie de surface détectable dans le domaine des micro-ondes etc...).

Ces trois types d'influences pouvant le plus souvent se combiner.

Les objets du littoral constituant le deuxième type de milieu (zone intercotidale) ont, à marée basse les caractéristiques de milieux terrestres ; on trouvera donc des objets appartenant :

– aux **sols nus** (sables, vases, rochers etc...)
– aux **végétaux** (végétaux de marais dont les forêts de mangroves, halophytes marines, algues, microflore...)
– aux **animaux** (récifs coralliens, bancs de mollusques ...)
– **à des milieux aménagés** (parcs à huîtres, bassins, cheneaux, filières d'élevage, salines etc...)

On constate donc pour les deux types de milieux décrits : subcotidal et intercotidal une très grande variété de faciès, compliquée par diverses influences (telles que la marée), dont les caractéristiques spatiales et temporelles possèdent les particularités suivantes :

– sur le plan des caractéristiques spatiales :

la répartition générale des littoraux est linéaire, l'ampleur de cette répartition est directement mise en évidence lorsque l'on regarde un planisphère,

les littoraux sont caractérisés par des **éléments de taille réduite** constituant des paysages très variés dont la structuration est manifeste. Celle-ci est le résultat de processus naturels (gradients liés à l'ennoiement, à la salinité, à l'hydrodynamique, à la pénétration de la lumière) ou artificiels (structuration des paysages, cultures marines, salines, aménagements portuaires, aménagements de protection, etc...),

– sur le plan des caractéristiques temporelles :

les milieux constituant les littoraux sont très évolutifs à des échelles très variées. Ces échelles sont soit aléatoires (tempêtes par exemple), soit correspondent à des rythmes plus ou moins stricts (régimes hydrologiques, régimes phénologiques, marées...).

Des considérations précédentes, il résulte que :

il est nécessaire d'observer les littoraux avec une résolution spatiale élevée (répartition et structuration des milieux),

il est également nécessaire d'effectuer ces observations sur des bases multitemporelles (évolution) d'échelle très variable.

Les systèmes d'observation de la terre possèdent-ils ou possèderont-ils les spécifications adéquates permettant, en complément des mesures de terrain, de fournir sur des bases opérationnelles les éléments nécessaires à une bonne caractérisation des phénomènes de surface en zone littorale? C'est ce que nous proposons d'analyser dans ce qui suit.

Objets littoraux et spécifications des systèmes d'observation aérospatiaux

C'est au collège of Marine Studies de l'Université du Delaware : Klemas (1980), Klemas, Gross (1987) que les premières analyses des adéquations entre les spécificités des milieux côtiers et les performances techniques des systèmes d'observation aérospatiale ont été faites. Des analyses similaires ont été menées en Allemagne : Gierloff-Emden (1982). Nous avons également à l'IFREMER tenté de poursuivre et de compléter ce type de reflexions.

De ces différents travaux, il ressort qu'il n'y a pas à l'heure actuelle de systèmes de télédétection correctement adaptés à l'étude de tous les cas de figure présentés sur les zones côtières. Les adéquations entre les contraintes posées et les performances des systèmes doivent en effet s'établir en termes :

- de type de vecteur,
- de type de capteur,
- de précision géométrique des données,
- de disponibilité des données.

a) type de vecteur

Pour les systèmes spatiaux actuellement opérationnels, il y a incompatibilité entre la haute résolution spatiale qu'il est nécessaire d'utiliser pour observer les zones côtières et la haute résolution temporelle. Ceci est un handicap majeur qui limite l'utilisation de la télédétection de haute résolution (LANDSAT/TM, SPOT/HRV, SAR/ERS-1 actuellement) aux études du côtier n'impliquant pas de phénomènes à haute dynamique (au mieux acquisition tous les 3 jours sur le SAR/ERS-1). La figure n°1, sur laquelle nous avons répertorié les caractéristiques des principales missions spatiales actuelles, précise cette incompatibilité. On notera que théoriquement la répétitivité potentielle d'observation de SPOT, est un avantage sur LANDSAT, notamment car il sera plus aisé sur un même site d'obtenir, grace à la possibilité de visées latérales, des données à différents stades de la marée.

Le vecteur aérien, pour sa part, est mieux adapté aux études du côtier, puisqu'il permet d'obtenir des résolutions au sol supérieures aux plus hautes performances actuelles des satellites (10m avec SPOT/HRV canal panchromatique) et des données répétitives. En outre, ce vecteur permet d'embarquer un plus grand nombre de capteurs. Par contre les limitations de vision synoptique, l'augmentation des coûts d'acquisition avec la répétitivité et les contraintes atmosphériques, la lourdeur des traitements de mise en conformité géométrique des données, réduisent encore l'utilisation opérationnelle actuelle de ce vecteur en dehors de la photographie aérienne. On citera, par exemple, les essais de mise au point de systèmes opérationnels de détection de la pollution par les hydrocarbures en mer, aux USA principalement, pour lesquels de très gros efforts ont été fournis, et dont les ambitions ont du être considérablement réduites.

Il s'avère, pour les systèmes spatiaux actuels que la résolution maximale (10m) permet difficilement la caractérisation opérationnelle d'une partie des activités humaines (navigation de plaisance, ouvrages de défense et d'aménagement, bassin aquacole en marais,

élevage ostréicole...) intéressant le littoral ainsi que de certain phénomènes naturels tels que l'érosion littorale (sauf cas particulier de côtes de forte dynamique sédimentaire).

La résolution temporelle accessible la plus élevée (3 j) ne permet pas l'étude de forte dynamique, liée aux marées ou au contrôle de la navigation par exemple et permet mal, sur des bases opérationnelles les études liées à la dispersion due aux courants (dilution de rejets, polluants dérivants etc...).

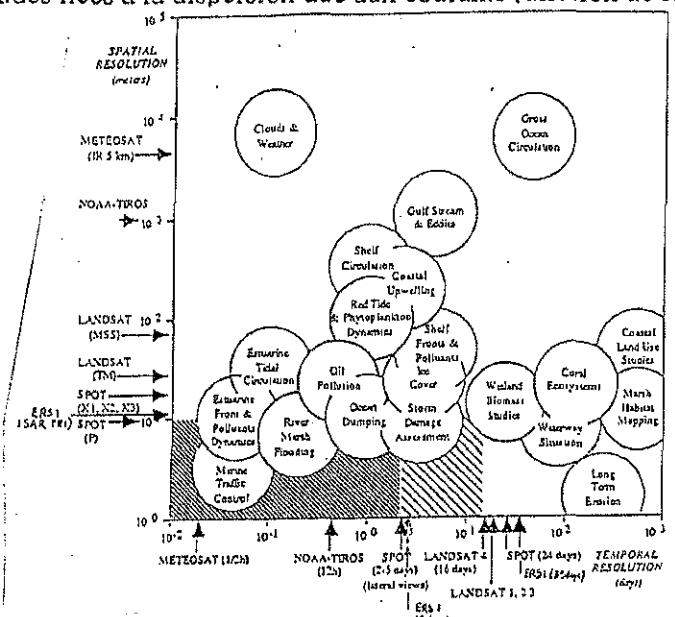


Figure N°1 : adéquation entre les contraintes d'observation des milieux marins et côtiers et les résolutions spatiales et temporelles des principales missions satellitaires actuelles ; (d'après Klemas).

b) type de capteur

Indépendamment des contraintes de résolution et de répétitivité définis précédemment V. Klemas a présenté un tableau, (fig. 2, ci-après), récapitulatif des capteurs existants et de leurs performances, placés sur un satellite ou sur un avion, vis à vis de différents objectifs intéressant les zones littorales. De ce tableau il ressort que l'observation optimale pour le suivi des phénomènes qui touchent au côtier nécessiterait que puisse être utilisée la quasi totalité des bandes spectrales, de l'ultraviolet aux ondes radar et l'ensemble des types de capteurs disponibles, actifs ou passifs, de préférence imageurs.

la solution optimale serait donc d'associer sur une même plate-forme spatiale, ou sur différentes plateformes travaillant en phase :

- un scanner multispectral (travaillant dans des bandes spectrales dont on va étudier ci-après les spécifications),
- un scanner thermique,
- un radar imageur,
- des radiomètres micro-onde,

tout en bénéficiant d'une très haute résolution spatiale < 5m et d'une très haute répétitivité (la journée ou moins) ce qui actuellement est techniquement très difficilement envisageable et qui au vu du tableau précédent nécessite dans plusieurs cas de figure des expérimentations complémentaires.

On notera l'accès très difficile au paramètre salinité, paramètre hydrologique de toute première importance en océanographie côtière.

Figure 2 : Performances des systèmes de télédétection pour les études côtières (d'après KLEMAS)

Capteur	Plate-forme	Végét. et usage du sol	Biomasse et stress végétaux	Erosion côtière	Types de fond	Bathymétrie	Sédim en Susp (SS)	Concentr. tration en SS	Concen-Cloro-phylle	Hydro-carbures	Temp. de sur-face	Salinité	Circulation due aux courants	Vagues	Vents
Photographie	A	5	2	5	4	3	4	3	3	4	0	0	3	3	2
	S	4	2	4	3	2	4	3	2	3	0	0	3	2	1
Scanners multi-spectraux	A	5	4	5	4	3	5	4	4	5	0	0	3	3	2
	S	4	3	4	3	3	4	4	3	3	0	0	3	2	1
Scanner IR thermique	A	1	1	2	0	0	2	1	0	4	5	2	4	0	2
	S	0	0	1	0	0	2	1	0	3	5	0	4	0	1
Laser Profileurs	A	0	0	3	3	4	1	0	0	1	0	0	0	5	2
	S	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0
Fluorescence laser	A	1	0	1	0	1	2	3	4	4	1	2	1	0	0
	S	0	0	0	0	0	1	1	2	1	0	0	0	0	0
Radiomètres micro ondes	A	1	0	1	0	0	1	1	1	4	4	4	3	2	4
	S	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	3	2	1	3
Radar imageur	A	4	2	4	0	1	2	0	0	4	2	2	3	4	3
	S	3	1	3	0	1	1	0	0	2	1	1	2	3	2

Légende :

5 – Opérationnel
4 – Résultats positifs mais pas encore opérationnels
3 – Potentiel réel mais expérimentations requises
2 – Utilité potentielle mais besoins en recherche
1 – Utilité limitée
0 – Non utilisable

Plate forme :

A – Avion
S – Satellite

On conclura toutefois des analyses précédentes que le couplage de données spatiales de haute résolution (≈ 10m) et de répétitivité acceptable, issues de scanners multispectraux travaillant dans le domaine optique et thermique, et de données radar de type SAR présentent un potentiel intéressant pour un nombre d'études littorales non négligeable dont la partie II de ce document fournit plusieurs illustrations.

c) précision géométrique des données

La précision géométrique et par conséquent, grâce à une bonne navigation, la précision cartographique des produits dérivés nous paraît être un critère très important pour la définition d'outils d'aménagement et de gestion globale des côtes. **En effet, cette précision géométrique et géographique est essentielle pour satisfaire au besoin de localisation, de quantification et de caractérisation de zones d'intérêt,** base des inventaires des milieux naturels. D'autre part, la précision géométrique d'une maille image standard (à pas de 20 ou 10m pour SPOT) est une des conditions nécessaires, à la fois à toutes étude comparative multidate, élément de constitution des dossiers de contrôle des évolutions du milieu, comme à la génération de bases de données géographiques utilisables dans des systèmes d'aide à la décision tels que les S.I.G. (Systèmes d'Information Géographique).

Considérant ces critères, il nous apparaît que, dans le cas de SPOT, la qualité géométrique des niveaux de prétraitement 2 (A et B) et S : cf. Guide des utilisateurs de données SPOT (1988) qui permettent dans le premier cas des superpositions entre les données spatiales et des cartes et dans le second cas des superpositions multidates entre différentes données spatiales d'une même zone sont de toute première utilité notamment parce que les représentations des trois domaines : terres émergées, zone de balancement des marées (intercotidal) et zone marine (subcotidal) seront standardisées (même échelle, même maille, même projection...) , ce qui n'est par forcément le cas dans les représentions cartographiques traditionnelles, topographiques et hydrographiques notamment. Les mêmes caractéristiques de précision s'adressent aux données image prétraitées du SAR d'ERS1.

d) disponibilité des données

L'un des critères complémentaires à considérer dans le cadre de l'application des données spatiales aux études et recherches en environnement littoral comme à l'aménagement et la gestion de cet environnement particulièrement dynamique est celui de la disponibilité, sur une période suffisamment longue et sans interruption, de données de même caractéristiques permettant les suivis d'évolution. A ce titre, l'assurance de la mise à disposition du même type d'information (même bandes spectrales, même résolution, mêmes niveaux de prétraitement, mêmes formats...) sur une longue durée, assurant sur une quinzaine d'années, au minimum, la continuité du service et pour un système tel que SPOT un atout.

I) OBJET DU LITTORAL ET SIGNATURES SPECTRALES

1.1 Milieux littoraux intertidaux

Comme nous l'avons vu dans la partie introductive ces milieux complexes sont constitués de cibles minérales (sables, rochers, vases, etc...) et de cibles vivantes (algues, végétaux supérieurs, bancs de mollusques, coraux...) plus ou moins "pures" à l'échelle du pixel d'observation. **Le littoral intertidal constitue très généralement une "mosaïque" ou se développent, s'imbriquent, se chevauchent des communautés biologiques différentes, des substrats de natures géologiques et granulométriques variables, des gradients d'humidité liés à l'inondation, l'exondation etc..., le tout perturbé par la main de l'homme** (cultures marines, salines, aménagements divers...). Les recherches en matière de caractérisation spectroradiométrique de ces cibles intertidales sont encore relativement rares (Viollier et al 1985, Gross et al 1987, Ben Moussa, 1987, Guillaumont et al 1988, Zacharias et al 1992 ...). Synthétisons ci-après, les résultats généraux obtenus.

1.1.1 Cibles du domaine intertidal observées dans le domaine optique

a) Cibles minérales

Les signatures spectrales de cibles minérales "pures" telles que sable, sables vaseux, vases, roches **présentent entre le violet bleu et l'infrarouge proche des signature monotones.** Seules sont détectables des variations de niveau, elles mêmes résultant de nombreux facteurs tels que la couleur naturelle du substrat, la teneur en eau, en matière organique, la granulométrie... L'analyse spectroradiométrique ne permet donc à priori, dans ces longueurs d'ondes, que d'obtenir des discriminations entre les grandes classes d'objets : bancs sableux et bancs vaseux par exemple. **Par contre la réponse spectrale d'un sédiment peut être considérablement modifiée par le dépôt, en surface, de matière vivante** telle que la microflore. La figure 3 ci-dessous présente les signatures spectrales de cibles minérales et les modifications liées à la présence de microphytobenthos, (diatomées), sur une vase ainsi que celles d'une roche colonisée par des cirripèdes (crustacés favorisant l'installation d'une microflore dans les anfractuosités).

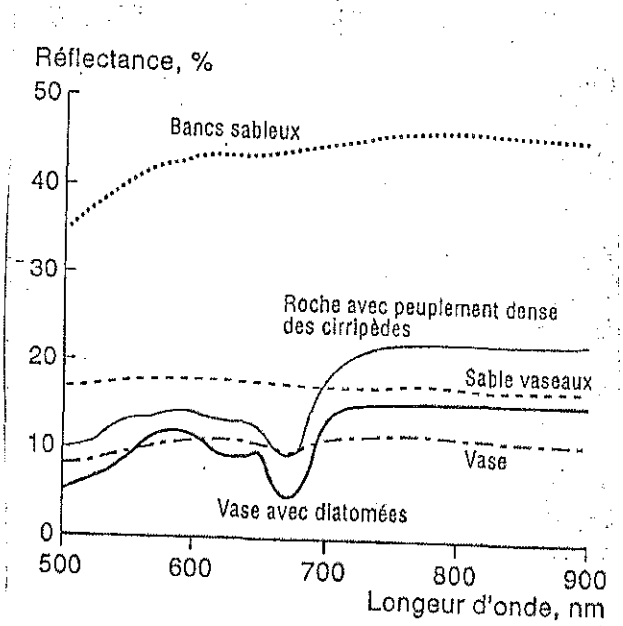


Figure 3. Réflectances spectrales de différents types de substrats en zone intertidale et influence de la présence de microflore. (d'après Guillaumont 1991).

D'autre part Guillaumont et al 1988 ont montrés dans le cas de présence de microflore que la modification de la réponse spectrale était directement liée à la teneur en pigments (chlorophylle et phaeopigments). Un tel résultat permettant d'une part de caractériser la présence/absence de microflore sur un estran et d'autre part ouvrant la possibilité (des recherches sont encore nécessaires) de caractériser une abondance, est important. En effet le microphytobenthos contribue avec le phytoplancton et les macrophytes (algues) à la production primaire des écosystèmes côtiers. Sa participation est particulièrement importante là où les étendues sablo-vaseuses découvrant à marée basse sont vastes. On estime par exemple qu'il constitue pour près de 50 % de la production primaire de la baie de Fundy, au Canada. Sa variabilité temporelle est forte et les méthodes classiques d'observation et de mesure sont très difficiles de mise en oeuvre.

A noter qu'en zone tropicale des phénomènes équivalents (présence de voile algaire) sont détectables dans les parties émergées des "salitrales ou "tannes" (Loubersac et al 1988), zones nues des marais en arrière des mangroves. (cf. paragraphe b.3.2 ci-après, et chapitre II ; application à l'aquaculture).

b) cibles végétales

Pour ces cibles trois domaines spectraux peuvent être distingués :

- dans le domaine visible où une partie du rayonnement est absorbée par les pigments (cf. fig. 4),

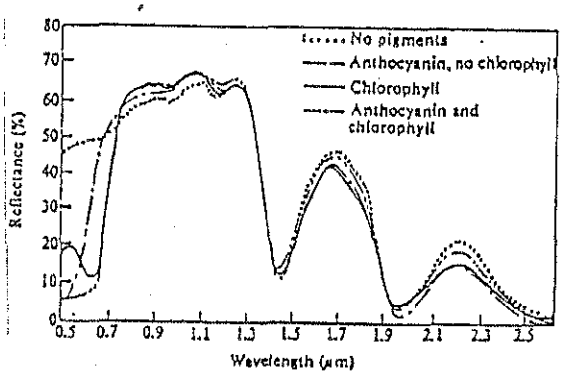


Figure 4. Variation de la réflectance des feuilles de Coleus en fonction des différences d'équipement pigmentaire (d'après Hoffer, 1978). On notera la forte variabilité dans la portion visible du spectre visible.

- dans l'infrarouge proche où le niveau dépend de la structure anatomique de la plante,
- dans l'infrarouge moyen, au delà de 1,3 μm où les propriétés optiques sont affectées par la teneur en eau.

On distinguera dans ce qui suit, outre le cas de la microflore évoqué précédemment, trois grandes classes de végétaux :

- les algues macrophytes,
- les phanérogames marines,
- les plantes halophytes des marais.

b – 1 Les algues macrophytes

L'une des originalités des algues par rapport aux autres végétaux supérieurs est leur grande diversité pigmentaire adaptée à la variabilité de leur environnement lumineux (Levavasseur 1986).

Les figures 5 et 6 ci-après présentent les réponses spectrales de différents groupes d'algues (vertes, rouges, brunes). Si la réponse est proche de zéro entre 400 et 500 nm en raison de l'absorption par la chlorophylle et si les valeurs absolues des réflectances sont, au delà de 700 nm, extrêmement dépendantes des conditions d'éclairement, de couverture, du degré d'immersion (cf. 11), **la portion 500–700 nm traduit la diversité des pigments présents.** Bien que les gammes de variation soient faibles, cette diversité des pigments est susceptible d'être perçue dans les bandes larges d'un capteur de type HRV.

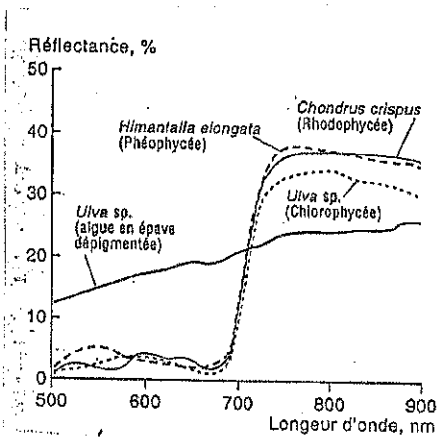


Figure 5. Réflectance spectrales de différents groupes d'algues (d'après Guillaumont, 1991).

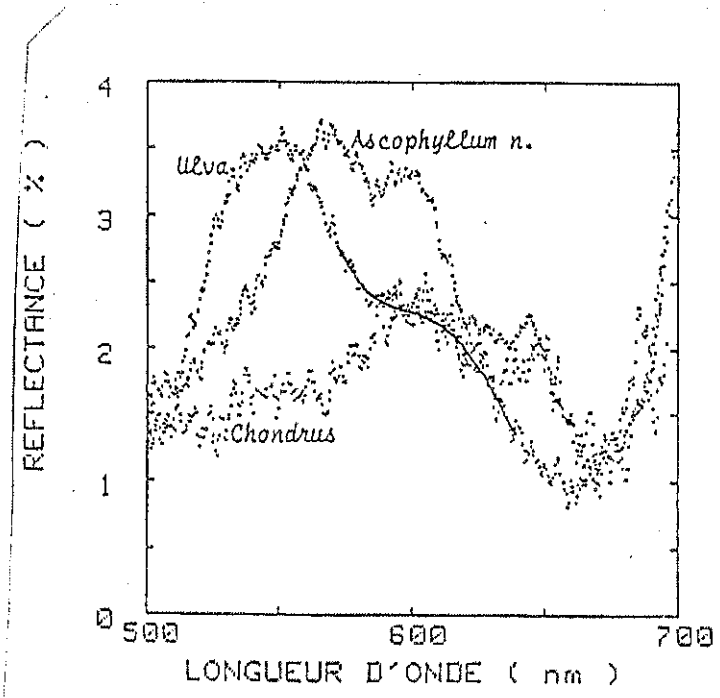


Figure 6. Variation de la réflectance entre 500 et 700 nm des 3 algues Ulva sp. (verte, Ascophyllum nodosum (brune) et Chondrus cripus (rouge) (d'après Viollier et al, 1985).

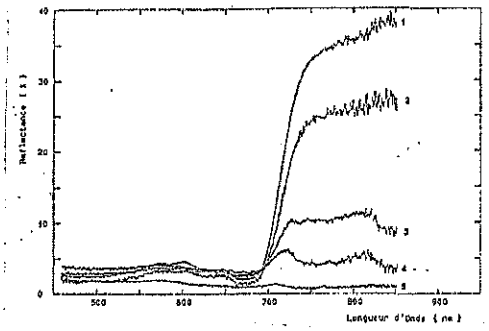


Figure 7. Variation de la réflectance de Fucus serratus en fonction du degré d'immersion.
1–2 algues hors de l'eau
3–4 algues à fleur d'eau
5 immersion complète (1,40 m d'eau)
(d'après Ben Moussa 1987)

La figure 8 présente les résultats obtenus après intégration des valeurs de spectroradiométrie de terrain sur les canaux XS1 et XS2 et montrent qu'un indice de type $XS1/XS2$ dit "indice pigmentaire" constitue un moyen de discriminer les principales populations végétales d'un site.

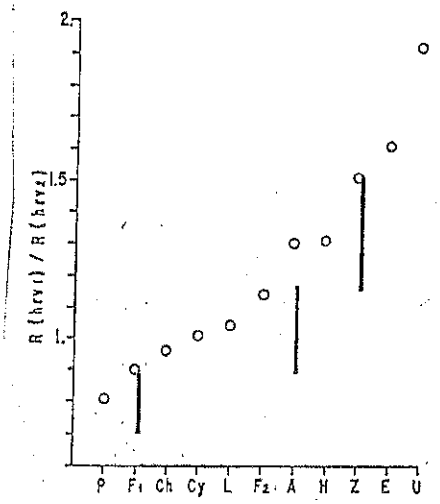


Figure 8. Le rapport des réflectance des canaux SPOT HRV1 et HRV2 constitue un indice de la composition pigmentaire des algues. Dans l'ordre :

P Palmaria palmata
F1 Fucus serratus
Ch Chondrus crispus
Cy Cystoseira
L Laminaria digitata
F2 Fucus serratus, en dégénérescence
A Ascophyllum nodosum
H Himanthalia elongata
Z Zostera marina (phanérogame)
E Enteromorpha sp
U Ulva sp

Les points correspondent à des mesures "HRV" (intégrées sur la largeur des canaux). Les barres correspondent aux écarts types de mesures "Cimel". D'après ce graphique, la distinction entre différents groupes, des algues les plus foncées jusqu'aux algues vertes, semble possible. Ce principe ne pourra cependant s'appliquer aux données réelles de SPOT que dans la mesure où l'on aura vérifié que les pixels analysés remplissent la condition de cible "pure" (surface homogène). (d'après Viollier et al, 1985).

Là encore, les résultats obtenus, malgré leurs limites offrent des perspectives d'application dans le domaine du suivi de l'environnement. En effet **si les algues brunes (phéophycées) présentent généralement une certaine pérennité dans le temps en ce qui concerne leur extension et leurs caractéristiques radiométriques** (cf. en partie II une application les concernent), **les algues vertes présentent des fluctuations très importantes en termes de développement et de répartition, très souvent liées à des phénomènes d'enrichissement soudain du milieu** (pollutions par excès de nitrates). Le suivi et le contrôle de l'évolution de ces dernières, véritables indicateurs écologiques, difficiles par les moyens traditionnels, devraient donc à terme être possibles par télédétection.

On notera enfin que la disposition horizontale des thalles et la forte épaisseur du couvert généralement constatée limitent la pénétration du rayonnement solaire en épaisseur. Ben Moussa a montré que pour les algues brunes l'indice de végétation normalisé (NVI) atteignait son maximum à partir de 4 thalles d'épaisseur ce qui correspond à l'épaisseur atteinte in-situ quasi systématiquement. En conséquence si une estimation directe de la biomasse est restreinte, une estimation du pourcentage de couverture pourra être obtenue.

b – 2 Phanérogames marines

Ces plantes à fleurs, qui colonisent des zones sableuses et sablo vaseuses, parfois sur des surface considérables en zones tropicales (herbes à tortues) présentent à l'immersion comme les algues macrophytes un port planophylle (non dressé). Dans le cas de zostères (cf. figure 9) on observe une corrélation significative entre la biomasse et l'indice de végétation normalisé.

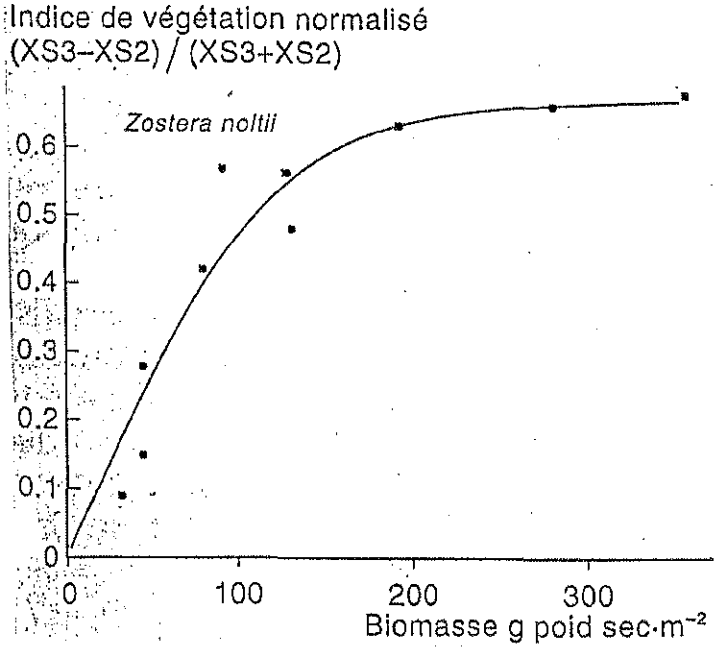


Figure 9. Relation Biomasse de Zostera *noltii* Horn. (= *Zostera nana* Roth)/Indice de végétation (d'après Guillaumont 1988).

D'autre part l'analyse des réflectances spectrales d'un herbier de phanérogames marines (cf. fig.10) **montre la variabilité de la réponse en fonction de la couverture, elle même évoluant de manière saisonnière en fonction du développement de la plante. C'est l'étude de cette variabilité par analyse multitemporelle d'images de télédétection qui permettra,** outre les levés de doute vis à vis d'algues macrophytes occupant les mêmes domaines – la variabilité du couvert des algues brunes est faible avec le temps et pour les algues vertes les cycles sont différents de ceux de phanérogames marines – **de mettre en oeuvre le suivi d'évolution de ces herbiers.**

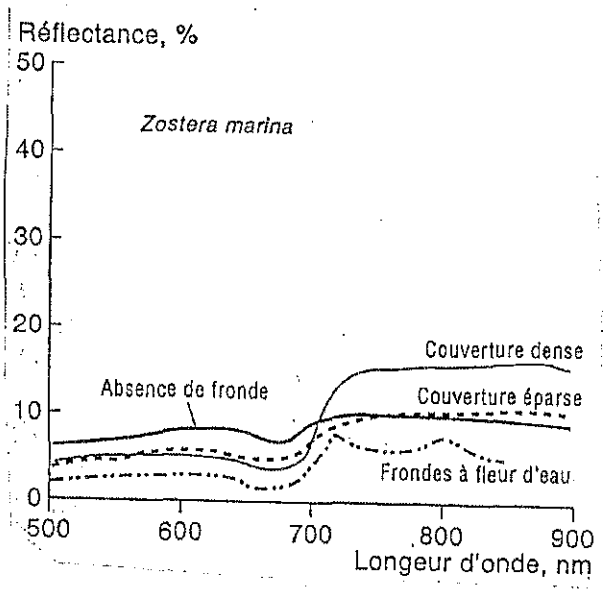


Figure 10. Réflectances spectrales d'un herbier de phanérogames marines (Zostera marina L.)

b – 3 Plantes halophytes

b.3.1 Marais maritimes tempérés

Les plantes halophytes des marais maritimes de la zone tempérée (et froide) ne présentent pas, à la différence avec les marais maritimes tropicaux évoqués plus loin, de formations de mangroves, constituant de véritables forêts.

Les plantes rencontrées sont généralement de petite taille, au port le plus souvent érigé (à la différence avec les végétaux étudiés précédemment).

L'analyse des signatures spectrales obtenues sur ces végétaux dénote une phénologie très complexe, certaines plantes étant pérennes, d'autre annuelles. **Les fluctuations de la réponse spectrale peuvent être rapides et importantes en fonction de facteurs naturels** (épiaison, floraison...) ou artificiels (fauchage, pâturage...). (voir fig. 11, 12 et 13).

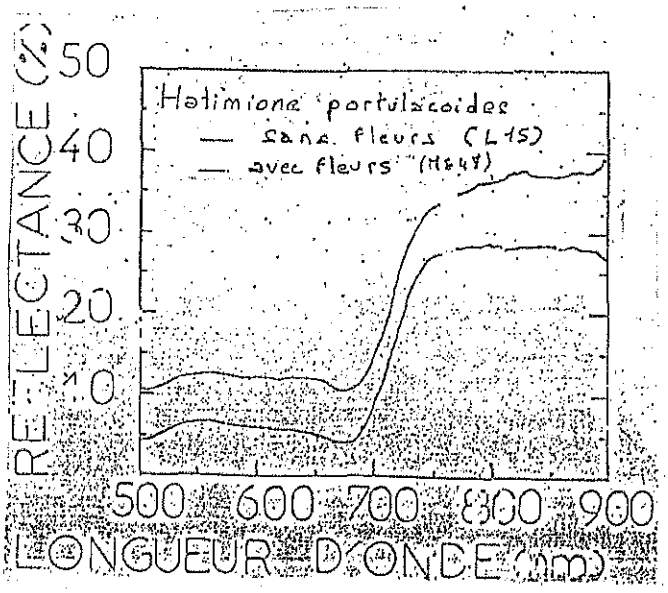


Figure 11. Signature spectrale de Halimione portulacoides, sans fleurs (courbe du bas) avec fleurs (courbe du haut). Cotentin, Sept., 1985.

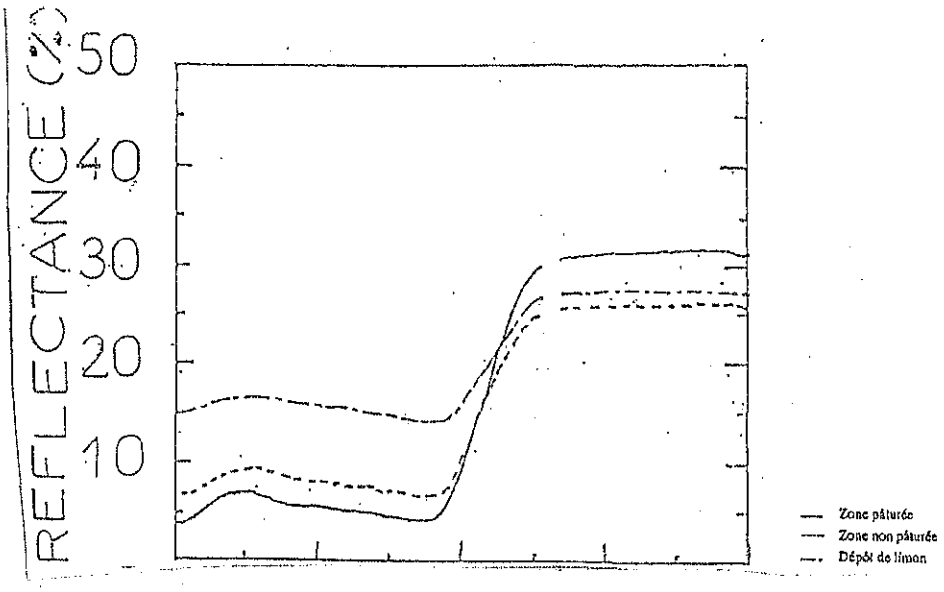


Figure 12. Comparaison des signatures spectrales de Puccinellia maritima dans différentes conditions. (courbes obtenues à l'aide du spectroradiomètre HRS – Baie du Mont Saint Michel, Septembre 1985).

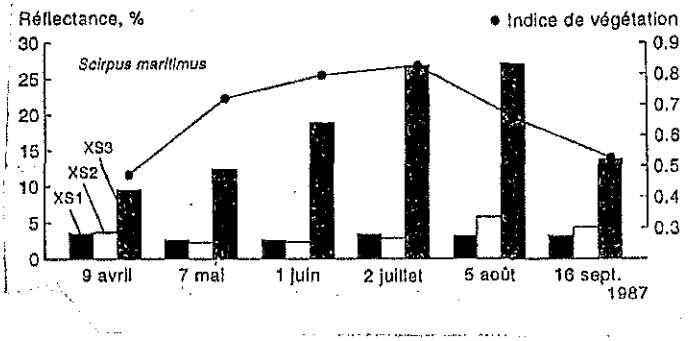


Figure 13. Exemple de variation saisonnière de la réflectance : Scirpus maritimus L. Radiomètre CIMEL (d'après Guillaumont et al 1988).

La caractérisation des peuplements en place ne pourra donc s'effectuer que par suivi multidate des réponses spectrales.

Si des résultats significatifs ont pu être obtenus aux U.S.A. (Gross et al 1987) sur la cartographie et la quantification de la biomasse d'espèces végétales de marais et notamment par l'établissement des lois significatives corrélant cette biomasse à l'indice de végétation (cf. fig. 14), ceux-ci l'ont été dans des cas favorables (grandes étendues quasi monospécifiques de la plante Spartina alterniflora dominante dans les marais de l'Est des U.S.A., faible modification des paysages par l'homme)

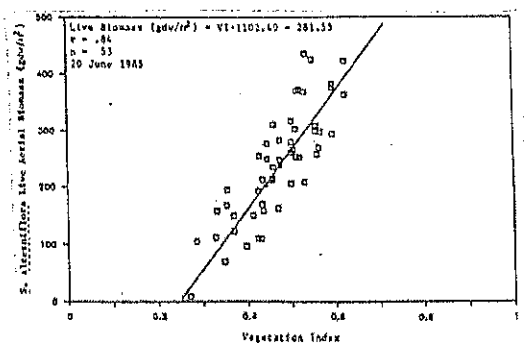


Figure 14. Relation biomasse de Spartina alterniflora et indice de végétation (d'après Gross et al 1987).

Or, pour ce qui concerne l'application de la connaissance des réponses spectroradiométriques obtenues sur les marais maritimes européens, il faudra à la fois intégrer les fluctuations saisonnières naturelles de chaque compartiment de l'écosystème (cf. fig. 15) et les fluctuations liées aux caractéristiques locales d'occupation du milieu en tenant compte d'un calendrier des travaux lié à ces occupations.

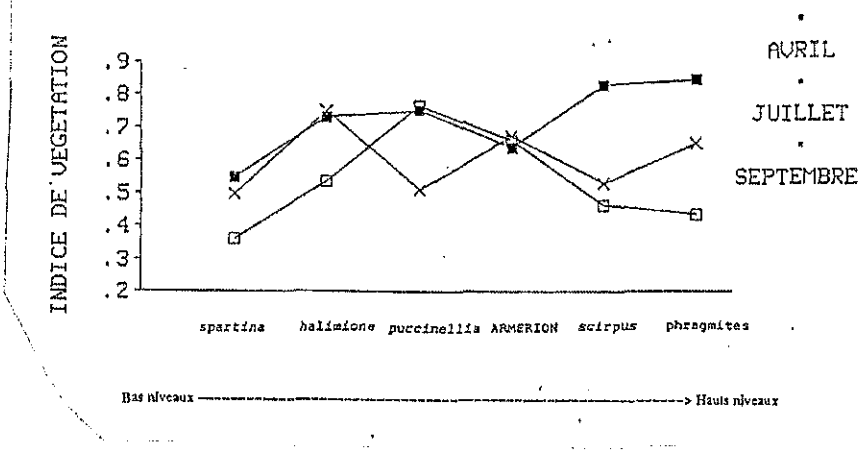


Figure 15. Valeurs de l'indice de végétation au long du gradient de répartition des espèces à différentes périodes d'observation pour les marais charentais (d'après Caillaud et al, 1987).

En effet ces marais voient leur morphologie résulter très souvent des activités qui ont poussé (dès le 10e siècle pour les marais du Centre Ouest) toute une population à endiguer, poldériser, convertir en salines, claires ostréicoles, marais à poissons le milieu naturel. D'autre part ces marais voient leur évolution dépendre directement de la gestion de l'eau qui découle de ces activités.

On abordera au chapitre II un exemple de méthodologie appliquée à la détermination des types d'activités en marais.

b.3.2 Marais maritimes tropicaux

Les marais maritimes tropicaux correspondent généralement à des formations de mangroves. **Ce sont des écosystèmes forestiers fragiles** au même titre que les forêts de montagnes tropicales et les forêts inondées. Ces écosystèmes très spécifiques puisqu'ils se sont adaptés à la vie à l'interface terre-mer ont une diversité génétique très réduite, une soixantaine d'espèces ligneuses constituant leur flore, et voient leur tolérance écologique très étroite notamment pour ce qui concerne le gradient de salinité et la durée quotidienne d'immersion. **Ce sont enfin des systèmes parmi les plus productifs du monde**, leur biomasse aérienne en poids sec étant de l'ordre de 300 tonnes par hectare en régions humides et la productivité primaire atteignant 12 à 15 tonnes par hectare et par an dans les mangroves denses de Malaisie.

Ces écosystèmes étant forestiers nous renvoyons pour les généralités relatives à leur comportement radiométrique au chapitre "Ecosystèmes naturels et forêts" traité par ailleurs dans cette Ecole d'Eté.

Citons le fait qu'un nombre d'études importantes a été mené par voie de télédétection dans le domaine optique sur ces milieux à la fois pour réaliser un inventaire cartographique et tenter de caractériser les formations végétales ; citons par exemple : Chaudury (1983), Blasco et al. (1983), Damen (1986), Populus et Hertz (1986), Barkey et Blasco (1987), Diaw et al. (1987), Denis et al. (1987), Moreau, Vereesi (1989), Roy (1989), Thollot et al. (1990)....

Ajoutons d'autre part qu'en climat tropical, là où existe une saison sèche, les milieux de mangroves sont associés à des marais nus sursalés situés entre la mangrove et la ligne des plus hautes mers et dénommés "tannes" ou "salitrales". La figure 16 ci-après représente dans le cas du marais de Mara (Nouvelle Calédonie) les différentes unités de paysage rencontrées.

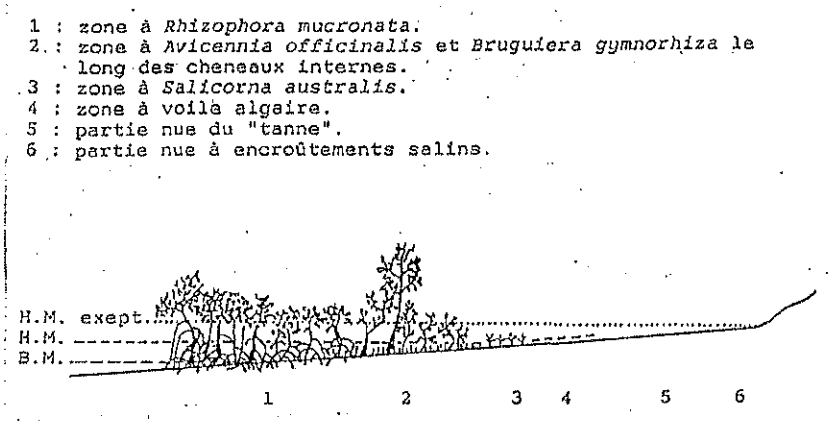
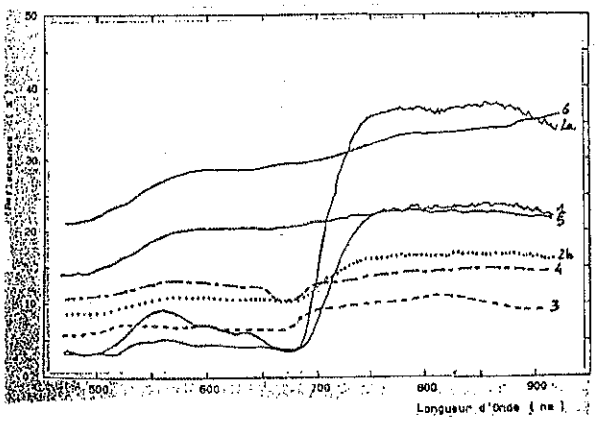


Figure 16. Marais de Mara, Nouvelle Calédonie. Unités de paysages reconnues sur la zone intertidale.

Les zones 1 et 2 correspondent à la forêt de mangrove proprement dite.
La zone 3 à une zone de transition entre forêt et sols nus colonisée par une (des) espèce(s) halophytes dont le comportement radiométrique obéit aux lois générales présentées pour les plantes halophytes des marais tempérés (cf. paragraphe b.3.1 ci avant).
Les zones 4, 5 et 6 correspondent à des substrats sablo-vaseux nus ou recouverts d'un dépôt d'origine végétale (voile algaire). Le comportement radiométrique de ces zones obéit aux lois générales présentées pour les cibles minérales (cf. paragraphe 1.1.1 ci avant).

La figure 17 ci-dessous présente les réponses spectrales caractéristiques de chacune des zones reconnues sur la figure 16



La figure 17. Signatures spectrales des objets du littoral correspondant à la figure 16 (Loubersac, 1991).
1 : zone 1 : Rhizophora mucronata
2a : zone 2 : Bruguiera gymnorhiza dense (bord de chenal)
2b : zone 2 : Avicennia officinalis (densité faible)
3 : zone 3 : Salicorna australis et vase
4 : zone 4 : zone nue à voile algaire
5 : zone 5 : partie nue du "tanne", zone médiane
6 : zone 6 : partie nue du "tanne" à encroûtement salins

1.1.2 Cibles du domaine intertidal observées dans le domaine des hyperfréquences actives (radar)

On rappelle (cf. fig. 18) ci-dessous que **parmi les paramètres affectant la réponse radar (SLAR ou SAR) la rugosité du substrat observé joue un rôle important ainsi que la constante diélectrique qui est elle même dépendante de la teneur en eau de la cible.** Sachant que sur des estrans découverts on rencontre des faciès sédimentaires présentant selon l'hydrodynasmisme des gradients significatifs de granulométrie, donc de rugosité, (généralement grossière sur les parties hautes, fine sur les parties basses) et d'humidité (faible sur parties hautes et forte sur parties basses), on concoit que la réponse radar puisse offrir une signature représentative de ces gradients.

Les études récentes (Populus et al. 1993 sous presse) montrent sur des estrans de l'estuaire de la Loire observés par le SAR de ERS-1 **une sensibilité de la mesure avec le paramètre granulométrie du sédiment.**

On rappelle qu'une surface est considérée comme lisse si :

$$h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta}$$

avec h : hauteur moyenne des variations de surface
λ : longueur d'onde
θ : angle d'incidence
et présente une rugosité pour des valeurs supérieures.

L'application de cette formule au SAR d'ERS-1 $\lambda = 5{,}6$ cm, $\theta = 23°$ (au centre de la scène) montre que la mesure de rugosité sera significative pour $h \approx 0{,}8$ cm.

On déduit de ce résultat que par temps très calme (mer sans vent), en présence de vastes estrans découverts composés de faciès vaseux et sablo-vaseux, il n'y aura pas descrimination significative du contact terre-mer, les deux cibles ayant des coeffificents de rugosité sensiblement équivalents.

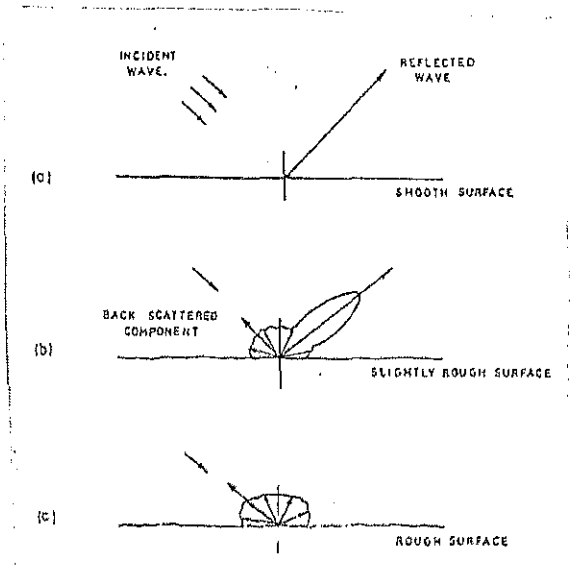


Figure 18. Types de réponses radar en fonction de la rugosité du substrat.

1.2 Milieux littoraux subcotidaux

Ainsi que nous l'avons évoqué en introduction ces milieux correspondent aux zones littorales en permanence inondées par des eaux saumâtres ou marines. On se reportera au chapitre "Réflectance des eaux, caractéristiques physiques" du thème "Ressources en eau" développé dans cette Ecole d'Eté tout particulièrement pour ce qui concerne :

- la charge en sédiments en suspension,
- la caractérisation de la présence de phytoplancton et pigments chlorophylliens dans les eaux,
- les mesures de la température de surface.

En complément du chapitre évoqué ci-dessus on traitera ci-après plus particulièrement deux cas de figure :

- le cas des zones peu profondes en eau claire et plus spécifiquement du triple problème de la caractérisation des coefficients d'atténuation diffuse, des types de fond et de la bathymétrie dans le domaine optique.

- le cas d'observation de la suface de la mer dans le domaine des hyperfréquences (radar).

1.2.1 Détermination des types de fond et de la bathymétrie en eau claire par petits fonds dans le domaine optique

Les données satellitaires haute résolution dans le domaine visible, obtenues au-dessus de zones faiblement immergées ($o<z<20$ mètres environ) peuvent être utilisées pour diverses applications parmi lesquelles figurent la caractérisation des fonds et leur cartographie ou l'estimation de la bathymétrie de la région considérée. **Ces deux aspects, étude des fonds et bathymétrie, sont étroitement liés puisque le signal mesuré au-dessus des petits fonds dépend à la fois des propriétés de réflexion du fond et de l'influence de la colonne d'eau qui le surmonte.** Ces influences sont bien décrites par un modèle de décroissance exponentielle du signal avec la profondeur à laquelle se trouve le fond. On peut trouver différentes formulations de ce modèle dans la littérature (Lyzenga, 1978 , 1981 ; Paredes et Spero, 1983 ; O'Neill et Miller, 1989), elles sont toutes très proches et sont du type :

$$(1) \quad L_i(z) = L_{i\infty} + [A_i - L_{i\infty}] * e^{-2K_i z}$$

avec $L_i(z)$: Luminance mesurée au-dessus d'un fond à une profondeur z
$L_{i\infty}$: Luminance mesurée au-dessus d'un fond à une profondeur infinie
A_i : Albédo du fond
z : Profondeur du fond
K_i : Coefficient d'atténuation diffuse

Ce dernier paramètre, K_i, décrit quantitativement la décroissance de l'énergie solaire incidente en surface avec la profondeur. Outre le fait qu'il renseigne sur les caractéristiques optiques de la masse d'eau, sa connaissance peut intervenir dans certains algorithmes destinés à caractériser les fonds ou à estimer la profondeur à laquelle se trouve ce fond. Bien qu'il existe des méthodes d'étude des petits fonds, par exemple statistiques, qui ne nécessitent pas de connaître K, sa connaissance peut améliorer la précision et simplifier le traitement de l'image (Hallada, 1984).

Certains des termes de ce modèle peuvent être obtenus directement sur les images : $L_i(z)$, valeur mesurée au-dessus d'un fond "détectable" et $L_{i\infty}$ qui peut être obtenu en moyennant les luminances au-dessus des régions océaniques profondes pour lesquelles le fond n'intervient plus sur le signal. **Pour chaque pixel considéré, les inconnues sont donc : le terme qui représente les propriétés de réflexion du fond (réflectance ou albédo), la profondeur du fond et le coefficient d'atténuation diffuse.**

Pour une tranche d'eau optiquement homogène et à une longueur d'onde donnée, le coefficient d'atténuation diffuse est défini comme le taux auquel le logarithme népérien de l'éclairement descendant est atténué avec la profondeur (Jerlov, 1976 ; Preisendorfer, 1976), soit :

$$(2) \qquad K_d(\lambda, z) = - \frac{d\,(\mathrm{Ln}\,(E_d(\lambda, z)))}{dz}$$

avec $E_d(\lambda,z)$: Eclairement à la longueur d'onde λ et à la profondeur z

On trouve dans la littérature un assez grand nombre de publications donnant les valeurs spectrales de coefficients d'atténuation diffuse définies pour différentes tranches d'eau et différents types d'eau (Jerlov 1956, 1976 ; Morel et Prieur 1975, 1988 ; Smith et Baker 1978).

K_d pour une tranche d'eau Z_1Z_2 est défini par :

$$(3) \qquad Kd\,[(\lambda)\,(Z1, Z2)] = \frac{1}{(Z2 - Z1)} * \ln \frac{Ed(\lambda, Z1)}{Ed\,(\lambda, Z2)}$$

et se calcule par mesures d'éclairement descendant à Z_1Z_2 à l'aide de spectroradiomètres immergeables. Les figures 19 et 20 ci-après présentent respectivement les valeurs spectrales de coefficients d'atténuation diffuse obtenues pour des eaux océaniques du Pacifique Central et d'eau côtières caractéristiques des lagons de Polynésie (Takapoto et Moorea).

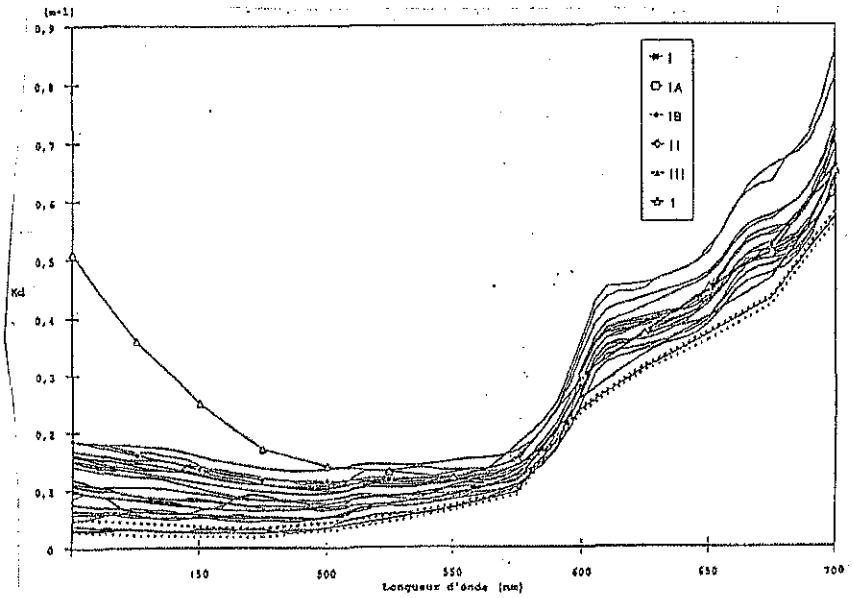


Figure 19. Valeurs spectrales des coefficients d'atténuation diffuse pour 21 stations étudiées en Polynésie Française. Les spectres correspondant aux classes océaniques I à III de Jerlov et à la classe côtière la plus claire (1) sont également représentés (d'après Maritorena 1993).

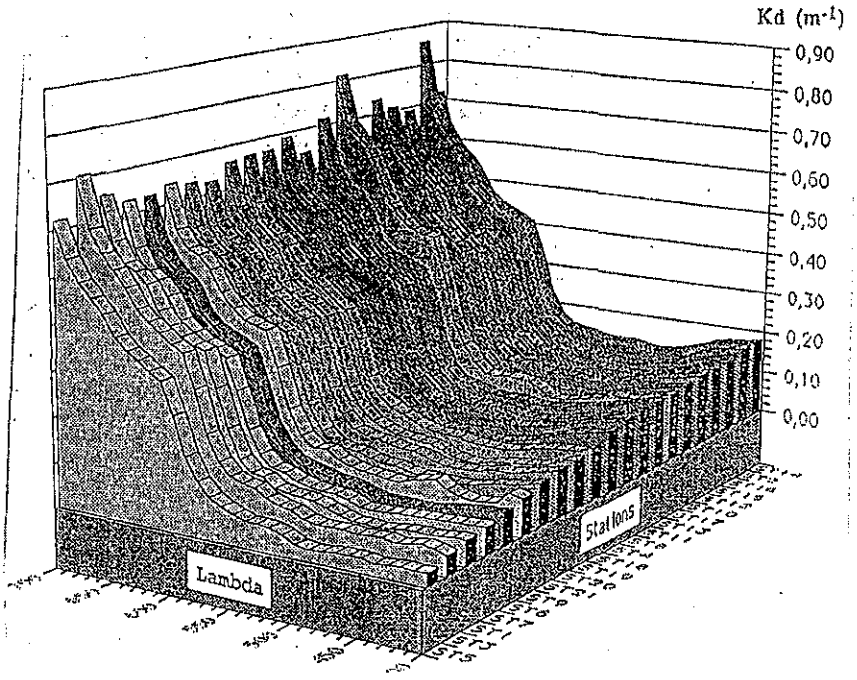


Figure 20. Mêmes spectres de Kd que sur la figure 19, les stations étant classées par ordre croissant de valeur de Kd (400 nm). Les stations océaniques sont figurées en clair, les stations lagonaires de Takapoto en gris clair et celles de Moorea en foncé (d'après Maritorena 1993).

On observe de ces figures que la région 400-570 nm est caractéristique des faibles valeurs de K_d qui correspondent, aux radiations qui pénètrent le plus profondément dans la colonne d'eau. Pour les eaux océaniques les spectres présentent une zone quasiment plate entre 400 et 500 nm alors que pour les eaux lagonaires ces spectres présentent une pente plus ou moins marquée entre 400 nm et le minimum situé entre 470 et 500 nm.

On constate également si l'on tient compte du positionnement des bandes spectrales des satellites "opérationnels" travaillant dans le domaine optique tels que LANDSAT TM et SPOT que **seules les bandes TM1 (450-520 nm), TM2 (520-600 nm) et dans une moindre mesure TM3 (630-690 nm) de LANDSAT et XS1 (500-590 nm) et dans une moindre mesure XS2 (610 -690 nm) et P (510-730 nm) de SPOT seront utilisables pour caractériser la bathymétrie et la nature des fonds à faible profondeur compte tenu des valeurs des coefficients d'atténuation diffuse dans ces bandes spectrales.**

De la formule (1) ci-avant il ressort que si l'on utilise à partir d'un système satellitaire opérationnel tel que LANDSAT ou SPOT, ou à partir d'un système aéroporté, un seul canal de radiométrie adéquate , le problème consistant à extraire soit la bathymétrie, soit le type de fond en eaux "claires", connaît trois inconnues : K_i, A_i et z. Avec 2 bandes spectrales i et j, donc avec deux équations, resteront 5 inconnues à déterminer : K_i, K_j, A_i, A_j et z ; 7 inconnues avec trois canaux etc...

Il est donc nécessaire si l'on souhaite notamment caractériser les paramètres z et A, utilisables dans toute étude d'environnement, soit d'introduire des mesures obtenues in-situ (détermination de K, mesures de z) et mettre en oeuvre des méthodes statistiques, soit utiliser des transformations de variables reposant elles-mêmes sur l'utilisation de modèles physiques, soit utiliser une méthode hybride entre les deux solutions précédentes.

a) approche physique : principes de la méthode de Lyzenga

La figure 21 ci-après (Jupp et al. 1985) présente le comportement de quatre types de fonds tels que rencontrés en milieux coralliens (eaux claires) en fonction de la bathymétrie pour les canaux MSS4 et 5 de LANDSAT dont les bandes spectrales sont sensiblement comparables aux bandes TM2 et TM3 de LANDSAT et XS1 et XS2 de SPOT.

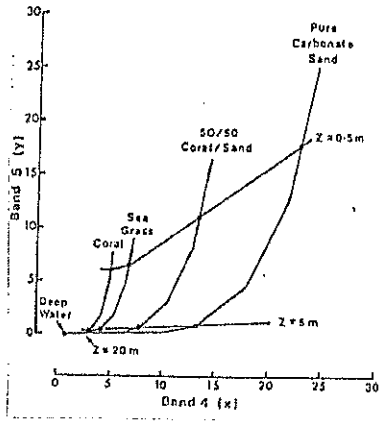


Figure 21. Comportement radiométrique de quatre types de fonds en fonction de la bathymétrie pour les canaux MSS4 et 5 de LANDSAT équivalents aux canaux XS1 et XS2 de SPOT (Jupp et al. 1985).

Lyzenga (1978) a montré que pour un fond donné la transformation Xi = ln (Li – Li ∞) équivaut approximativement à linéariser les signaux correspondant aux différentes bathymétries. En conséquence pour deux canaux dans un repère Xi, Xj, les points caractérisant la radiomètrie mesurée s'alignent suivant des droites de pente Ki/Kj dont l'écartement est fonction de la variation du type de fond.

La figure 22 ci-après fournit pour les canaux TM1, XS1 et XS2 les signaux de différents fonds après linéarisation.

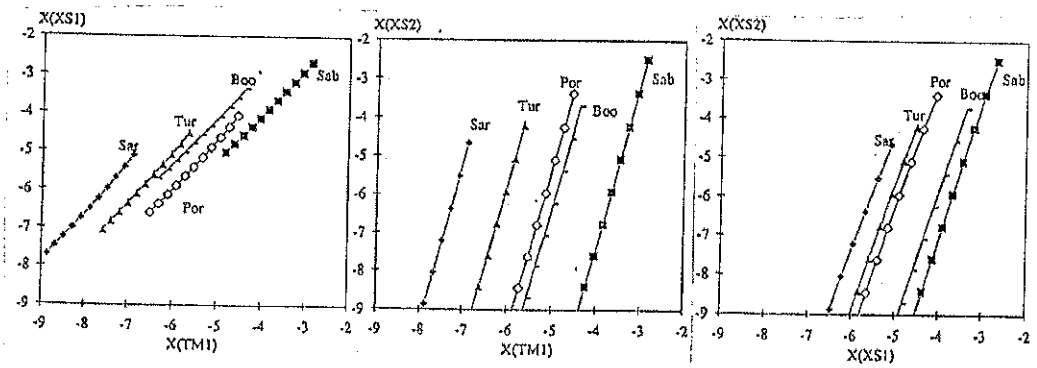


Figure 22. Représentation, pour les différents plans définis par les paires de canaux, des signaux de différents fonds, linéarisés par Xi = ln (Li – Li∞). Chaque point correspond à un accroissement de l'épaisseur de la couche d'eau de 1 mètre partant d'une colonne d'eau d'épaisseur nulle. (d'après Maritorena 1993).

b) Méthode par rotation d'angle arctg (Ki/Kj)

En conséquence de ce qui précède, à **partir de 2 canaux i et j et après linéarisation, une rotation d'axes, d'angle arctg (Ki/Kj) permettra de définir deux méocanaux YF et YZ dont les expressions en fonction des valeurs mesurées sur chaque canal sont indépendantes de la profondeur pour YF et du type de fond pour YZ.**

Le problème revient donc :

1) à définir le rapport Ki/Kj ; trois solutions sont envisageables :

a) introduire des valeurs de la littératures si des déterminations de Ki et Kj ont pu être réalisées,

b) introduire des points d'appui de localisation et bathymétrie connues sur des fonds homogènes. En chacun de ces points on connaît z, Li(z), Lj(z) et A est constant donc de l'équation (1) on tire Ki et Kj,

c) en absence de mesure physiques, identifier sur l'image des zones dont les fonds sont supposés uniformes et pour lesquels la bathymétrie est variable. On aura en traitant statistiquement les valeurs des pixels de ces zones :

$$Ki/Kj = \sqrt{a + (a^2 + 1)}$$

$$\text{avec } a = \frac{\text{var}(i) - \text{var}(j)}{2\,\text{covar}(i, j)}$$

2) à segmenter l'image après rotation d'axe YF en classes pour lesquelles le type de fond est considéré comme homogène.

Pour les pixels situés à l'intérieur d'une même classe (c1) on tirera z d'une équation de type

$$(4)\ z = B_{c1} + C_{c1} Y_Z$$

Cette méthode, séduisante, et dont nous donnons les résultats d'expérimentation dans le chapitre 2 possède malheureusement plusieurs limites. En effet dans les plans Xi, Xj où après linéarisation chaque type de fond se présente sous forme d'un alignement de points, plus l'écart entre Ki et Kj est grand plus il devrait être aisé de différencier les fonds. Or cet écart ne peut croître qu'au détriment de la profondeur de pénétration dans le canal ayant le K le plus élevé. Ainsi, si la paire TM1 – XS2 apparaît comme la plus appropriée celle-ci, comme la paire XS1–XS2, n'est véritablement utilisable que dans les 5 à 7 premiers mètres de profondeur, voir fig. 21, là où XS2 est opérant.

c) variante : transformation en coordonnées polaires

On rappelle que dans un système d'axe défini par les valeurs de 2 canaux Ci et Cj un pixel sera caractérisé par les valeurs de ses deux luminances dans Ci et Cj. Ces deux valeurs correspondent aux coordonnées cartésiennes du pixel. Le même pixel peut être représenté par des coordonnés polaires :

$$d = \sqrt{(Ci)^2 + (Cj)^2}$$

$$\theta = \text{arct } Cj/Ci$$

En se reportant à la fig. 21 on constate que le module (d) apparaît très lié à la profondeur tandis que l'argument (θ) tient compte du caractère foncé ou clair du fond, θ étant faible pour un fond clair et élevé pour un fond sombre. Un telle transformation simple permet d'obtenir une décorellation importante des canaux d'origine (Bour et al. 1986 ; Loubersac et al. 1988). Maritorena 1993 a montré pour le calcul de θ que les paires TM1–XS1 et TM2–XS2 sont les mieux adaptées à une bonne identification des fonds, toutefois l'introduction de valeurs de bathymétrie demeure une nécessité.

d) Le cas des végétaux marins immergés

Ben Moussa (1987) a étudié les variations de réflectance dans les canaux XS1 et XS2 de SPOT en fonction de la bathymétrie pour un type défini de fond (algues brunes) et pour des couverts végétaux variables. A partir d'une relation établie entre la réflectance dans chaque canal et la bathymétrie du type de la formule (1) et à partir de mesures de terrain (mesures de K, et de A sous diverses conditions de couvertures), il a proposé pour XS1 et XS2 les modèles suivants (cf. fig. 23 et 24)

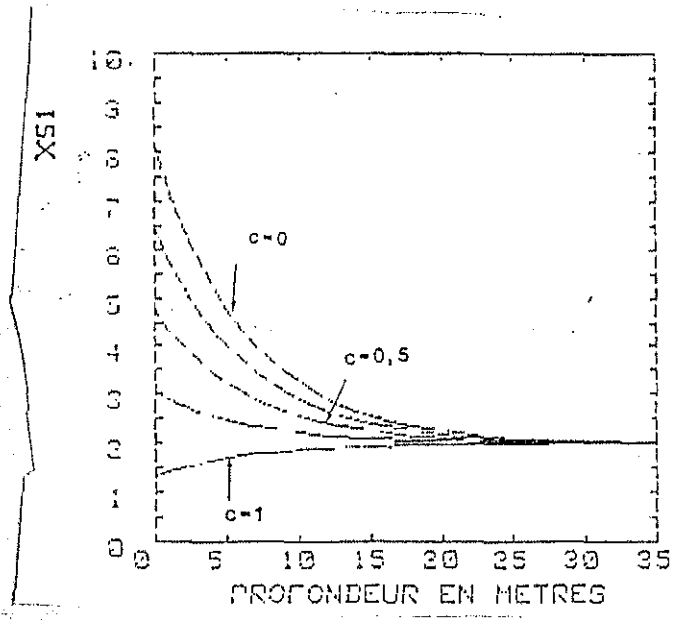


Figure 23. Variation de la réflectance dans le canal XS1, en fonction de la profondeur pour C=0, C=0,25, C=0,5, C=0,75 et C=1 (C = couverture végétale).

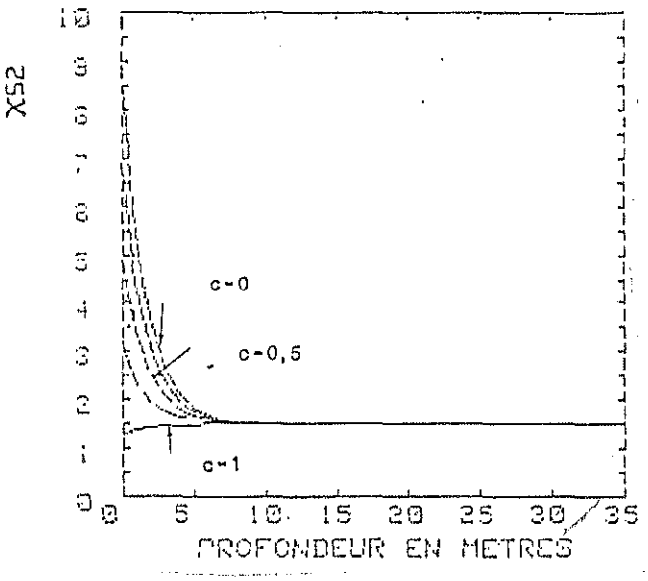


Figure 24. Variation de la réflectance dans le canal XS2 en fonction de la profondeur pour C=0, C=0,25, C=0,5, C=0,75 et C=1.

Ces figures montrent, pour un coefficient K de 0,05 nm^{-1} à 550 nm, qu'il est possible avec XS1 de discriminer un fond clair c=0 d'un fond couvert d'algues jusqu'à 15 mètres environ et jusqu'a 5 mètres avec XS2. Ces figures montrent également qu'a très faible profondeur (premiers mètres) un fond couvert d'algues brunes présente une réflectance inférieur à celle de l'eau du large ($R_{i\infty}$).

L'auteur a montré que le rapport $XS1/XS2$ permettait une bonne discrimination du couvert végétal pour une tranche d'eau de 5 à 10 mètres mais que ce rapport était, pour les très petits fonds, presque invariable avec variations de couverture (cf. fig. 25). Il a proposé d'utiliser le rapport $(XS1)^2/XS2$ permettant de lever ces ambiguités (cf. fig. 26).

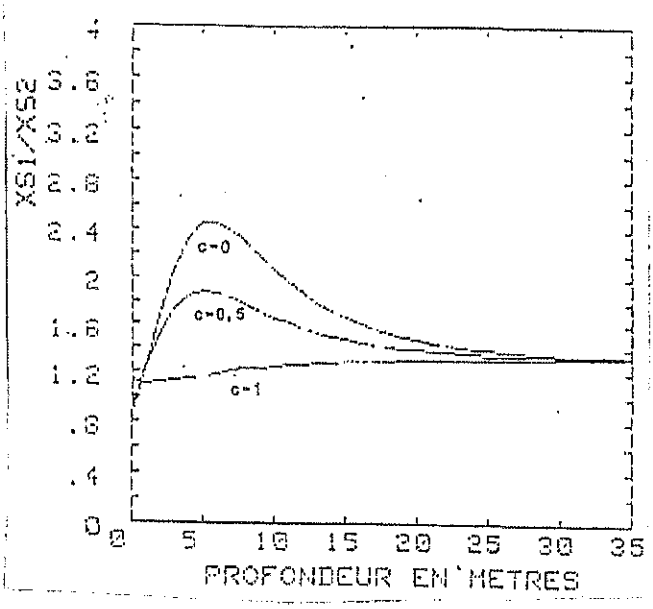


Figure 25. Variation du rapport $XS1/XS2$ en fonction de Z pour C=0, C=0,5 et C=1 (C = couverture végétale) (d'après Ben Moussa, 1987).

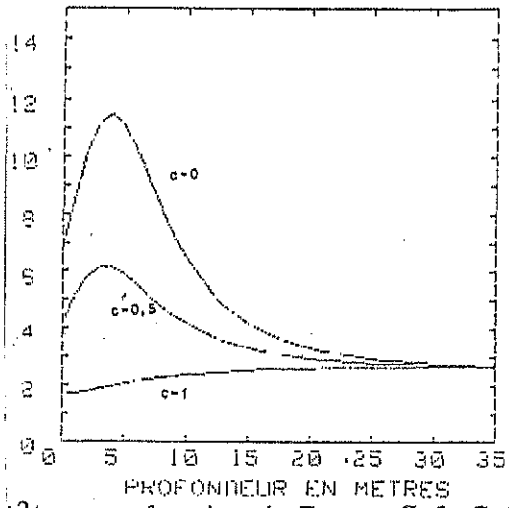


Figure 26. Variation $XS1^2/XS2$ en fonction de Z pour C=0, C=0,5 et C=1 (d'après Ben Moussa, 1987).

1.2.2 Observations des milieux marins (correspondant aux zones subtidales) dans le domaine des hyperfréquences actives (radar)

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 1.1.2 (cf. fig. 18) et tenant compte du fait qu'en raison de la forte constante diélectrique de l'eau l'onde radar ne va pénétrer que de quelques millimètres à la surface, l'un des facteurs prépondérant influençant la réponse radar sera la rugosité de cette surface.

Cette rugosité (agitation de surface de la mer) peut donc être observée et mesurée. Il est toutefois important de noter que cette agitation de surface est le résultat de plusieurs phénomènes dont :

* **l'action locale du vent en surface** (ondes capillaires),
* **les houles** (phénomène périodique dont la direction et la longueur d'onde seront modifiées par la morphologie des côtes et la bathymétrie),
* **les courants** dont les directions et vitesses seront influencées par la bathymétrie notamment là où elle est faible c'est-à-dire à l'approche des côtes.

Ces phénomènes sont interdépendants et sont de modélisation complexe ce qui implique que l'interprétation d'images SAR en milieu marin côtier soit particulièrement difficile très souvent en raison de la richesse des informations locales fournies par le capteur.

Cette interprétation nécessite donc une bonne connaissance de terrain, spécifique au site étudié et le plus souvent un bon couplage avec les données d'autres systèmes d'observation de la terre.

II) AMENAGEMENT DES LITTORAUX

En introduction ont été discutées les notions d'approche intégrée nécessaires à toute étude et recherche en environnement côtier qu'elle soit finalisée ou non et ont été introduits les besoins en matière d'information géographique qui rappelons le intéressent plus particulièrement :

- la cartographie de base,
- la détection et le suivi des pollutions,
- les inventaires des milieux et de leurs ressources,
- les analyses dynamiques du comportement de l'environnement sous contraintes,
- l'introduction des résultats de la modélisation de l'environnement dans des systèmes d'information,
- la mise au point de systèmes d'aide à la décision utile à la planification des activités pour une meilleure gestion des milieux naturels.

Ea partie I, on a montré que la caractérisation de plusieurs phénomènes de surface intéressant le domaine côtier, la répartition des écosystèmes, leur suivi dynamique étaient possibles par observation aérospatiale, malgré les limitations des résolutions spatiales et spectrales des systèmes d'observation actuels,

Nous allons ci-après, en nous basant sur le résultat d'expérimentations, montrer que les techniques d'observation et de mesure à distance sont complémentaires des mesures de terrain et qu'elles sont souvent et mêmes parfois indispensables à la résolution d'un problème de quantification et de caractérisation des milieux. On montrera on outre qu'elles contribuent et contribueront, au fur et à mesure quelle la recherche se développera sur ces sujets en parallèle aux progrès de la technologie, à fournir des produits de plus en plus élaborés et précis, auxiliaires précieux de toute planification et aménagement d'une interface entre terre et mer particulièrement riche, convoitée et fragile.

Il serait long et fastidieux de dresser un bilan complet des possibilités d'utilisation de la télédétection à des fins d'aménagement littoral.

Nous nous proposons donc, ci-après, de traiter et d'illustrer, au travers de cas précis que nous considérons significatifs, les apports de la télédétection en matière d'aide à la gestion et l'aménagement des milieux côtiers tout en explicitant succinctement la méthodologie, découlant elle-même des principes évoqués dans le chapitre I.

2.1 Application à la cartographie de base en milieu corallien : le cas des atolls

La mise à disposition d'une information géographique précise et actualisée sur les zones récifales, les lagons ou plus généralement les zones de petits fonds qui caractérisent la zone intertropicale est le plus souvent une tâche difficile, longue et coûteuse. Ceci est tout particulièrement vrai dans le cas des îles basses ou atolls. En effet :

- pour la partie terrestre la mise en face d'un réseau géodésique complet est compliquée en raison de faibles altitudes. La durabilité des infrastructures est limitée par la friabilité des sols et l'érosion importante (pluies, cyclones). La programmation de prises de vues aériennes sur des îles éloignées est délicate et les points de calage en nombre trop restreint pour la photogrammétrie,

- pour la partie maritime, les profondeurs faibles font que les réseaux de profils de sondage deviennent denses. Les variations du fond, pinacles coralliens isolés, sont souvent aléatoires. Les possibilités de localisation précise sont limitées et les portées optiques ou radioélectriques faibles.

Ces raisons expliquent pourquoi un énorme travail de cartographie de base reste à mener sur les zones de petits fonds de ces régions tropicales, dans le but de réaliser les inventaires et le suivi des ressources renouvelables (pêche et aquaculture côtières), mais également d'apporter une aide efficace à la navigation et de pouvoir obtenir les documents de base nécessaire à l'établissement de tout plan de gestion.

Le problème posé est donc de rendre disponible une information géographique à deux niveaux d'échelle : l'échelle moyenne, 1/50 00 ou équivalent, sur l'ensemble du milieu observé (île, atoll, lagon...), et la grande échelle, 1/5 000 ou équivalent, là où vivent les hommes. Il est également de concilier une représentation terrestre et une représentation marine du milieu puisque tout schéma de mise en valeur des espaces côtiers ne peut se concevoir sans intégration et interconnexion des activités situées en mer et à terre. Il est enfin de permettre l'actualisation des données au fur et à mesure de leur évolution et leur couplage avec des données extérieures dans le but d'élaborer des plans de gestion des domaines terrestres et marins concernés.

Dans le cas de la Polynésie Française le problème est posé pour les atolls des Tuamotu au sein des lagons desquels se développent des activités de perliculture, conflictuelles entre elles ou avec d'autres activités.

Les levés classiques étant inexistants ou fragmentaires sur ces milieux et les impératifs économiques nécessitant une action rapide, il a été décidé de faire appel aux données de la télédétection aérospatiale pour élaborer des "spatiocartes" de ces îles.

Les critères de sélection des données aérospatiales nécessaires étaient les suivants :

- exister ou être facilement disponibles,
- pouvoir être fournies selon des standards identiques de résolution au sol, radiométrie, format, etc..., quelques soient les lieux, sur une période suffisamment longue pour permettre la réalisation complète du programme,
- pouvoir être acquises à des dates différentes de sorte à permettre les mises à jour,
- avoir déjà fait l'objet de démonstrations en matière de manipulation opérationnelle à des fins cartographiques,
- permettre des exploitations à des échelles compatibles avec le besoin (1/5 00 pour les plans d'urbanisme, 1/50 00 pour la réalisation des fonds cartographiques de base),
- d'offrir pour la partie marine une appréhension des petits fonds sur des gammes de profondeurs représentatives des milieux rencontrés.

Le choix s'est porté sur les données de la photographie aérienne pour les levés à grande échelle et sur celles des données du satellite SPOT, qui répondent aux critères cités précédemment.

La méthode développée consiste succinctement :

– à rectifier l'image SPOT acquise sous un niveau de prétraitement de base (1A ou 1B) en niveau 2A (UTM) grâce à un logiciel d'ajustement polynomial des déformations de l'image et de modélisation de la prise de vue du satellite,

– à associer une grille géographique précise à l'aide de points de calage obtenus in-situ après "spatiopréparation" (méthode qui, à partir de données SPOT brutes et rehaussées, permet d'identifier des pixels caractéristiques qui seront positionnés en absolu par levés GPS),

– à segments l'image en 3 zones principales : domaine marin, sols nus, végétation, par seuillages sur XS3 et sur les indices de végétation et de brillance,

– à modéliser la bathymétrie conformément à la méthode développée précédemment (cf. paragraphe 1.2., a et b) en calant ce modèle à l'aide de points d'appuis de bathymétrie connue.

Les résultats de cette modélisation pour les lagons d'atolls de type polynésien offrent sur les dix premiers mètres une erreur relative sur la mesure de z de l'ordre de 10 % et de 20 % entre 10 et 20 mètres. Au-delà de 20 mètres les résultats de modèle n'ont plus de signification en raison de la perte du signal et du bruit dû au capteur.

– à habiller l'ensemble des zones tirées des étapes méthodologiques précédentes (terres émergées, végétation, tranches de bathymétrie) par ajout d'éléments extérieurs (toponymie, tracé routiers, etc...) de sorte à obtenir la spatiocarte dite à "norme pacifique".

On comparera ci-dessous les figures 27 et 28 qui présentent dans le cas de l'atoll de Manihi, la carte hydrographique disponible à la spatiocarte à "norme pacifique".

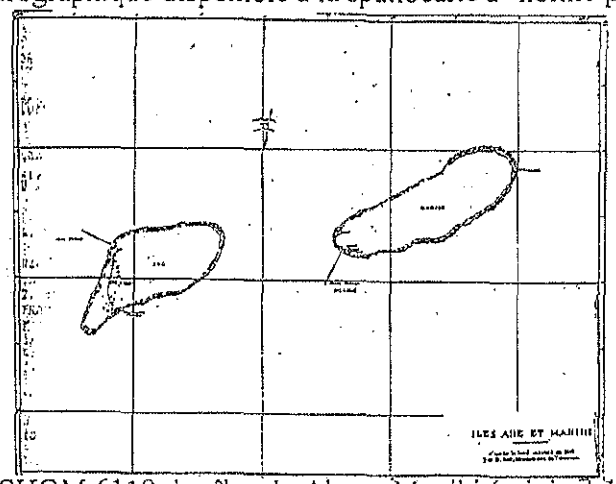


Figure 27. Carte SHOM 6110 des îles de Ahe et Manihi (original 1/175 000 d'après levé exécuté en 1947).

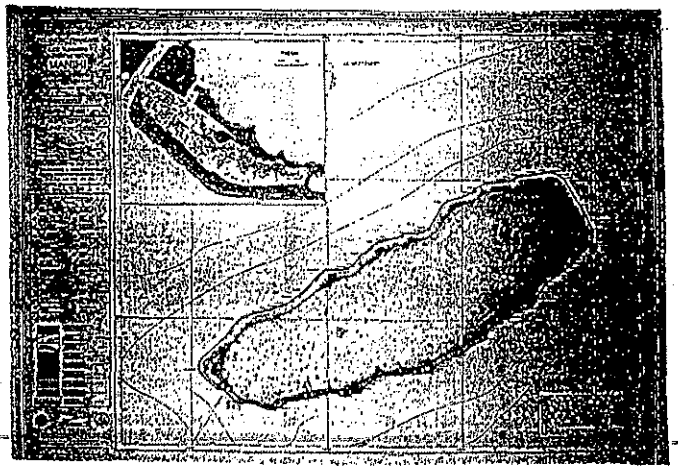


Figure 28. Spatiocarte à "norme pacifique" de l'île de Manihi (original 1/50 000).

2.2 Détection des pollutions en mer

Nombre de pollutions en mer induisent à la surface ou dans la masse d'eau des modifications susceptibles d'être détectées à distance.

La détection et le suivi de pollutions chroniques dans la masse d'eau (rejets urbains, ?? industriels, etc....) n'est en l'état actuel de la recherche et des possibilités techniques pas opérationnelle, d'une part en raison des contraintes de résolution et répétitivité évoquées en introduction et d'autre part en raison de la non-disponibilité présente de capteurs satellitaires de forte sensibilité et de haute résolution travaillant en bande étroite.

Par contre un type de pollution généralement spectaculaire ayant touché ou susceptible de toucher la quasi-totalité des côtes mondiales et ayant pour des environnements côtiers fragiles (marais maritimes notamment) des impacts importants est caractérisables par télédétection : la pollution par hydrocarbures (accidentelle ou chronique).

Pour la détection et la caractérisation de ce type de pollution, c'est dans la portion des hyperfréquences du spectre électromagnétique que les perspectives d'utilisation opérationnelles de la télédétection sont les plus fortes; en effet :

a) une nappe d'huile à la surface de la mer provoquant un amortissement notable des vagues capillaires, le coefficient de rugosité de surface diminue (cf. fig. 18) et donc il y aura modification de la rétrodiffusion radar,

b) au-delà de 3 cm de longueur d'onde, l'influence de l'atmosphère étant nulle ou quasi nulle la détection pourra s'effectuer "tout temps", critère d'opérationalité indispensable.

La figure 29 ci-après présente la mise en évidence sur une image SAR d'ERS-1 de la nappe d'hydrocarbures résultant de l'accident de l'"Aegean Sea" dans la baie de la Corogne Espagne) le 13 Déc. 1992, soit 9 jours après la catastrophe.

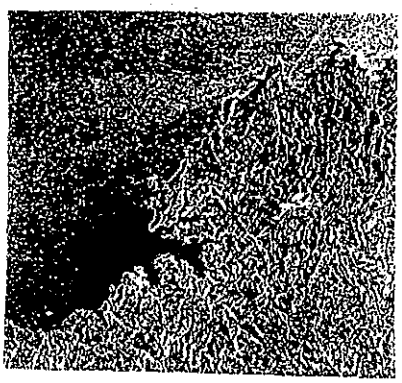


Figure 29. Image SAR ERS1 du 13/12/1992 de la région de la Corogne.

2.3 Inventaire des milieux et de leurs potentialités d'aménagement

Les possibilités offertes par la télédétection de caractériser les phénomènes de surface et notamment la répartition des écosystèmes sur des bases bi-dimensionnelles sont particulièrement précieuses :

- pour dresser et mettre à jour des inventaires,
- en déduire des potentialités d'aménagement,
- établir des présélections de sites.

A titre d'illustration on traitera ci-après deux cas de figure :

- celui de la présélection de sites favorables à un aménagement aquacole en zone tropicale,

- celui de la présélection de sites favorables à l'algoculture.

2.3.1 Aménagement aquacole (élevage de crevettes tropicales)

L'élevage des crevettes est un secteur de l'aquaculture dont le taux de croissance est tout à fait exceptionnel : la production mondiale de crevettes d'élevage a été multipliée par 36 entre 1972 et 1987. C'est aussi un secteur de l'aquaculture dont le développement est très fortement concentré dans les pays en voie de développement, sur le littoral, dans les zones d'accès pas toujours très facile, de cartographie souvent incomplète ou obsolète. C'est enfin un secteur de l'aquaculture qui se caractérise majoritairement par la construction de grands bassins à terre (quelques milliers de mètres carrés à plus de 20 hectares de surface unitaire). Parce que ce secteur de l'aquaculture est en développement rapide, dans des pays où la protection de la nature manque encore de force face aux intérêts économiques à court terme, l'élevage des crevettes apparaît aujourd'hui de plus en plus comme un destructeur du milieu naturel, au point de risquer de se mettre en danger lui-même par la destruction de biotopes qui lui sont nécessaires. En effet les zones les plus favorables à la construction de bassins d'élevage de crevette sont les "salitrales" dénommées encore "tannes", grands espaces de terrain plat sans végétation, à proximité des milieux de mangroves, milieux d'interface entre la forêt, les terres et l'eau sur des littoraux saumâtres. Lorsque commence l'implantation de fermes dans une région vierge, elle se fait sur les "salitrales", les fermes se retrouvant enchâssées dans la mangrove, où se développent les juvéniles qui servent à les alimenter, où s'enrichit l'eau qui sera envoyée dans les bassins. Ces "salitrales" sont facilement aménageables, l'impact de l'aménagement sur l'environnement est très souvent minime et de tels sites se prêtent bien à un élevage semi-intensif.

Lorsque la pression foncière se fait plus forte, les fermes débordent sur la mangrove, la détruisant peu à peu, au risque de détruire des équilibres biologiques précieux, dont ceux qui leur fournissent tout ou partie de leurs besoins en juvéniles. On estimait en 1977 qu'1,2 millions d'hectares de mangrove ont été convertis dans la région Indo-Pacifique en bassins d'aquaculture, toutes espèces confondues.

Si les fermes débordent sur la mangrove c'est parce que la pression foncière se fait forte mais aussi parce que les zones favorables que sont les "tannes" ou "salitrales" ne sont pas connues, en raison, généralement, d'une mauvaise localisation et caractérisation sur les cartes.

En se reportant aux figures 16 et 17 discutées en partie I, on constate que les "tannes" (zones 4,5 et 6) de la figure 16, convertibles en bassins peuvent être discriminés des autres composants de l'environnement., en raison de leur différence de réponse dans le domaine optique. C'est pourquoi plusieurs projets ont été menés à partir d'images spatiales de haute résolution, le premier avec SPOT en Nouvelle Calédonie, à l'aide de méthodes basées sur le traitement numérique des mesures satellitaire (ségmentation des indices de végétation, de brillance des sols et de l'indice pigmentaire) de sorte à :

- localiser les zones favorables,
- quantifier leurs aires,
- caractériser leurs formes,
- fournir les informations qualitatives sur les types de sol, les réseaux de drainage,

- caractériser l'occupation de sols sur les bassins versants à l'amont des sites,
- caractériser l'accessibilité des zones par voies de terre ou de mer,
- préidentifier les sites de pompage de l'eau de mer nécessaire à l'élevage.

Ces éléments, croisés avec des éléments extérieurs non directement disponibles par voie d'observation à distance telle que qualité physico-chimique des eaux, la productivité du milieu, les contraintes logistiques, les contraintes économiques, etc... permettent :

a) d'établir des cartes de présélection de sites à échelle moyenne (1/50 000 notamment), cf. figure 30.

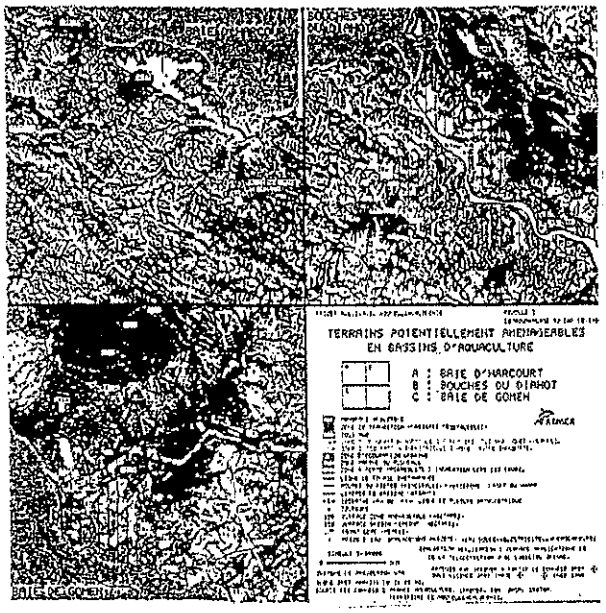


Figure 30. Carte de présélection de sites (échelle originale 1/50 00); région nord du Territoire de Nouvelle Calédonie.

b) de dresser un inventaire global utile au lancement de projets d'aménagement sur des bases régionales (schéma Directeurs Régionaux) en tenant compte des particularités locales.

Ainsi le projet mené en Nouvelle Calédonie a-t-il montré que la surface globale des milieux naturels aménageables ("tannes") était estimée à 6 200 ha, eux mêmes hiérarchisés selon trois classes de priorité d'aménagement, dont les plus favorables se situent sur les côtes centre Ouest et Nord du Territoire.

2.3.2 Sites favorables à l'algoculture

En raison la demande croissante au niveau industriel en matière de récolte d'algues brunes et particulièrement de fucales, (4 000 tonnes exploitées en 1980 et 15 000 en 1991), a émergé le besoin d'une estimation des stocks exploitables, notamment en zone intertidale, là où les fucales représentent la majeure partie de la biomasse algale.

L'application d'une méthode dérivée des résultats de recherche explicités au paragraphe 1.1.1, b.1, a permis d'établir sur les sites de Pleubihan- Bréhat en Nord Bretagne et de l'Ile de Ré en Poitou-Charentes :

– la séparation des populations algues brunes/autres algues,

– une estimation pour chaque site (cf. fig. 31) des surfaces couvertes pour des pourcentages de couverture locale supérieure à 20 % (une zone est considérée industriellement exploitable si dans une surface unitaire telle qu'un pixel de 400 m2, 20 % de cette surface est recouverte d'algues brunes). Cette dernière méthode est basée sur l'expression mathématique de la réflectance de pixels hétérogènes en fonction des contributions relatives du sol et de la végétation et sur l'expression d'un indice de couvert végétal (VCI) de type :

$$VCI = (R_{XS3} - a\,R_{XS2} - b)/(Ra_{XS3} - a\,Ra_{XS2} - b),$$

avec Ra_{XS3} et Ra_{XS2} les réflectances d'un couvert algal de 100% dans XS3 et XS2.

– une estimation de la biomasse en place grâce à l'appui d'un modèle empirique reliant le couvert végétal mesuré à la biomasse disponible.

L'évolution de la méthode s'effectue actuellement vers l'étude précise de variations saisonnières de l'écosystème.

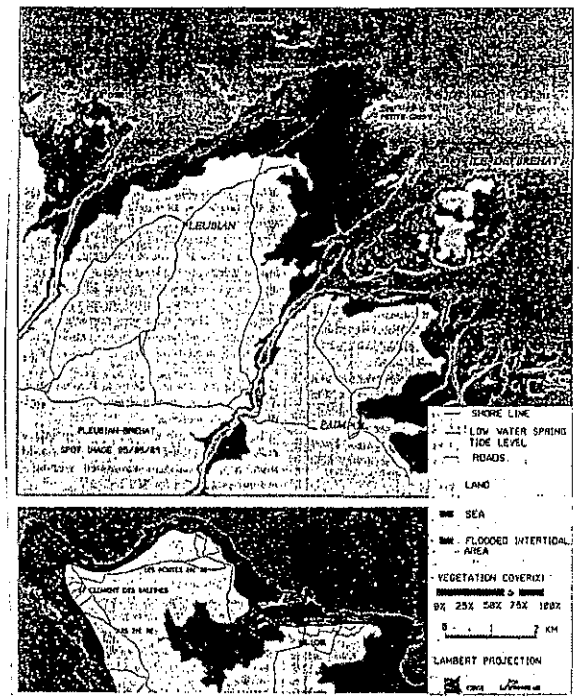


Figure 31. Application de l'indice de couvert végétal sur les sites de Pleubian – Bréhat et de l'Ile de Ré (d'après Guillaumont et al).

2.4 Analyses dynamiques du comportement de l'environnement sous contraintes

Nous illustrerons ce paragraphe par un cas spécifique d'étude des marais maritimes du Centre Ouest.

La problématique posée dans le cadre de l'aménagement et la gestion de ces types de milieu est double :

– il s'agit d'une part de caractériser les couverts végétaux dans les marais naturels, notamment pour mieux définir les aptitudes des sites,

– d'autre part de déterminer les taux d'occupation et les types d'activité exercés.

Ainsi que nous l'avons évoqué en partie I (chapitre 1.1.1 b.3) la caractérisation des peuplements en place ne peut s'effectuer que par suivi multidate des comportements spectraux des cibles (cf. fig. 15).

La définition d'une stratégie optimale d'acquisition de données d'observation spatiale a donc été définie telle que suit, sur la base de mesures spectrales effectuées au préalable :

Le début du printemps (Mars – Avril) est une période extrêmement intéressante, les signatures spectrales offrent une bonne dynamique. A cette époque là, certaines espèces sont encore en arrêt végétatif alors que d'autres sont en plein développement.

Au moins de Mai la situation est déjà plus confuse car la croissance est très rapide. L'interprétation y est plus délicate car davantage dépendante des conditions du lieu ou de l'année, c'est une période de transition.

En été la plupart des espèces sont à leur maximum, les valeurs atteintes peuvent toutefois caractériser certaines espèces.

La fin de l'été (fin Août – Septembre) est une période riche en informations car les différentes espèces y ont des comportements plus ou moins divergents.

Il semble donc que deux périodes soient particulièrement favorables : le début du printemps et la fin de l'été.

Une telle stratégie a été mise en oeuvre et appliquée à la zone de la baie de l'Aiguillon à partir d'images SPOT prises en Avril, Septembre et Octobre 1986. Les données calibrées en réflectance et exprimées en indice de végétation normalisé permettent de mettre en évidence la désynchronisme de comportement entre les deux espèces les mieux représentées.

Dans l'interprétation, la connaissance à priori des unités en place ainsi que la répartition altitudinale des espèces (voir paragraphe 2.5) est souvent nécessaire pour lever les ambiguïtés.

En ce qui concerne la détermination des taux d'occupation et des types d'activités l'approche a consisté, à partir d'un calendrier des travaux (cf Figure 32) basé sur des enquêtes de terrain, à définir et à caractériser des classes "état" utiles.

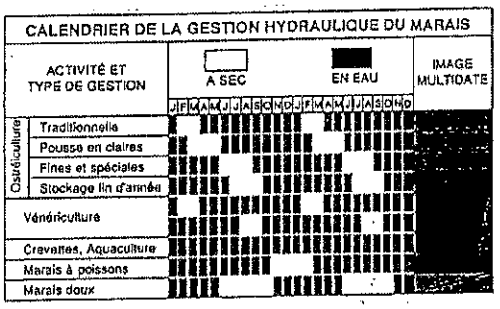


Figure 32. calendrier saisonnier des travaux maricoles.

En effet compte tenu des pratiques et des observations visuelles de terrain, il ressort que les principaux aspects que le marais est susceptible de présenter, successivement au cours de l'année, peuvent être décrits à l'aide de quatre classes "état" caractéristiques :

– l'eau libre, définie comme une eau claire (salée ou douce) dépourvue d'algues et non stagnante. Cette classe correspond à une claire, un bassin ou une réserve régulièrement alimentés en eau, ou du moins depuis moins d'un an. L'épaisseur de la lame d'eau varie selon le type d'activité. Elle est de quelque cm pour la saliculture, de 0,2 à 0,45 m pour l'ostréiculture, de 0,8 à 0,9 m pour la vénériculture ; elle est comprise entre 1 et 1,5 m pour la pénéïculture et l'élevage des poissons.

– l'**eau végétalisée**, est une eau qui n'est plus renouvelée que par les eaux de pluie, qui stagne et au sein de laquelle débute un lent processus d'eutrophisation (couverture par les macroalgues de 40 à 100 %). Cet état passager est un signe d'abandon, ou du moins de délaissement, et ne peut tendre que vers le pourrissement puis le comblement du bassin s'il n'y a pas intervention de l'homme. Cette classe signifie l'abandon, elle est à confirmer sur deux ans minimum.

– **les sols nus**, peuvent être secs ou humides et d'une teinte différente selon leur origine, ce sont soit des fonds de claires, bassins ou réserves non alimentés en eau depuis moins d'un an, (si cette période augmente, le sol d'une claire ainsi gérée est peu à peu colonisé par les halophytes ou par la végétation de marais doux, et signifie alors l'abandon de la zone. Cet état est donc passager et ne peut qu'évoluer vers la friche végétalisée s'il n'y a pas de remise en eau), soit des claires en cours d'entretien ou mises à sécher (l'état est ici signe de gestion et d'occupation des marais ; il est de courte durée dans le cycle annuel, tout au plus deux mois pour une claire).

– Enfin **les sols végétalisés**, toute végétation confondue qui, quelles que soient les zones concernées, excepté le marais agricole, sont le signe d'un abandon déjà avancé, du moins supérieur à un an.

Ces classes permettent de décrire le milieu à un instant t. C'est par la dynamique de ces différents "états", en un même lieu, que l'interprétation thématique peut être confirmée ou précisée.

La classe "**eau libre**" est définie par un indice, dit de mise en eau IME, tel que :

$$IME = (XS3)^2/XS2 \text{ avec les canaux de SPOT}$$

La classe **sols nus** est celle qui comporte la plus forte variabilité. L'humidité, la couleur du sédiment, et le contenu en matière organique affectent significativement la signature spectrale. Cette classe est isolée en utilisant des bornes de classe suivant un intervalle de confiance de 30 % de risque. La zone de recouvrement subsistant entre les sols humides et l'eau végétalisée est levée par l'utilisation de l'indice de végétation normalisé (IVN).

La classe **eau végétalisée** présente une réponse proche d'un couvert végétal. La présence de l'eau diminue les réflectances sur l'ensemble du spectre de 10 à 15 % en moyenne en lissant la courbe.

La classe **des sols végétalisés** possède une gamme de signatures spectrales très étendue (notamment dans l'infrarouge) qui est due à la variété des espèces en présence et à leurs variations phénologiques, à la variation du taux de couverture du sol (de l'ordre de 50 % pour *Juncus maritimus*, 95 % pour *Puccinellia maritima*) et à l'imbrication des différents faciès.

De sorte à lever les différentes ambiguïtés, l'analyse du calendrier de travaux établi permet de définir la stratégie optimale d'acquisition de données. Ce calendrier est basé sur les observations suivantes :

– la période la plus intéressante est la période située après la première grande marée du mois d'Août et s'étalant de la deuxième quinzaine d'Août à la mi-Septembre. C'est le moment où la remise en eau de tous les marais exploités est obligatoire après les deux mois de petits coefficients de marée qui n'autorisent qu'exceptionnellement l'alimentation en eau.

– A la fin du mois de Mars et le début du mois d'Avril. C'est le début du travail des claires avec les périodes d'assecs ou de varangage.

– Au début du mois de Juin où l'on trouve le maximum des assecs pour les marais travaillés.

– Enfin, le mois de Novembre pour lequel correspond la période de remplissage maximal pour ce qui concerne l'ostréiculture.

On présente fig. 33 le résultat d'une telle analyse multidate.

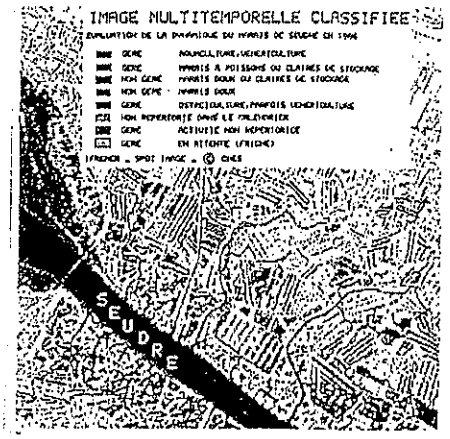


Figure 33. Analyse et caractérisation des activités dans le marais de la Seudre à partir de 3 images SPOT. (D'après Caillaud 1987)

La stratégie mise en oeuvre réside donc dans une double analyse multidate : l'une adaptée à la discrimination des grands types de couverts végétaux en fonction de leurs évolutions saisonnières, l'autre aux modes d'utilisation de l'espace en fonction d'un calendrier de travaux.

Les limites actuelles de ce type d'application des données spatiales aux marais maritimes anthropisés proviennent de la résolution spatiale des systèmes d'observation opérationnels encore trop grossière, tout particulièrement pour ce qui concerne le problème de la caractérisation des taux d'activité.

2.5 Modélisation tridimensionnelle de l'environnement littoral

La télédétection peut être utilisée pour fournir une modélisation tridimensionnelle d'un milieu littoral. On explicite succinctement deux cas de figure.

La modélisation bathymétrique présentée dans le chapitre 1.2.1 permet, là où les coefficients d'absorption diffuse sont faibles, de proposer un modèle approché mais continu de la bathymétrie dans une maille définie, (20 m ou 10 m pour SPOT), sur les petits fonds. Puisque chaque point de cette maille est caractérisé par une valeur de bathymétrie, on peut représenter ce modèle en trois dimensions. (Cf. Figure 34).

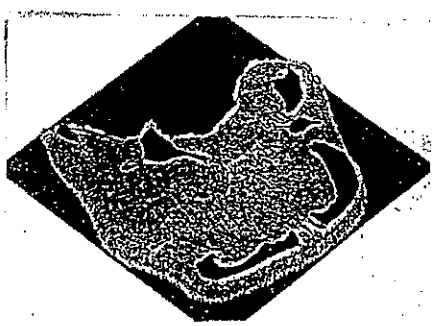


Figure 34. Modèle bathymétrique de l'atoll de Tetiaroa (Polynésie Française) établi à partir d'images P+XS et de mesures in-situ.

D'un tel modèle on peut tirer des produis thématiques tels que carte de pentes, carte des expositions aux vents, aux houles..., qui peuvent eux mêmes être intégrés dans des modèles de fonctionnement des écosystèmes ou dans des systèmes d'information et d'aide à l'aménagement.

D'autre part le couplage d'un modèle bathymétrique à un modèle numérique de terrain (cf. fig. 34) offre une représentation cohérente du littoral terrestre et du littoral marin, représentation nécessaire à une approche globale du littoral et de son aménagement.

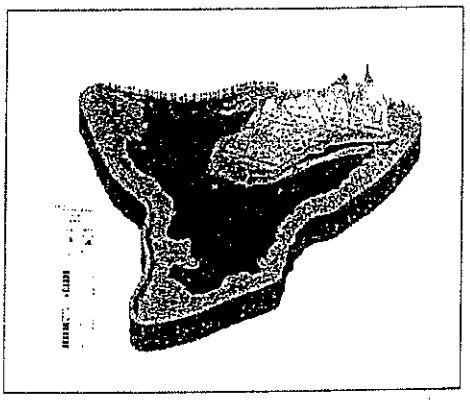


Figure 34. Ile d'Aitutaki, (Iles Cook), exemple de couplage d'un MNT terrestre à un modèle bathymétrique littoral.

Enfin signalons que l'acquisition de données de haute résolution à des heures marées différentes, pour des coefficients différents, permet d'obtenir, par extraction du contour terre–mer, des lignes de rivage instantané qui elles mêmes peuvent être calées en altitude les unes par rapport aux autres, soit à l'aide d'un marégraphe, soit à l'aide d'un modèle local de marée.

Ces lignes de rivage qui peuvent être obtenues par des capteurs tels que HRV (cf. fig. 35), TM ou SAR, (avec les limitations exprimées précédemment), sont à l'origine de la génération de modèles hypsométriques d'estran. De tels modèles sont utilisables pour parfaire la classification des paysages et des phénomènes de surface naturels ou artificiels qui intéressent la zone de balancement des marées en introduisant leur cote. Ils sont également directement utiles à la quantification des surfaces des zones exploitables dont les aptitudes sont directement dépendantes de la durée d'ennoiement par la marée, (cultures marines).

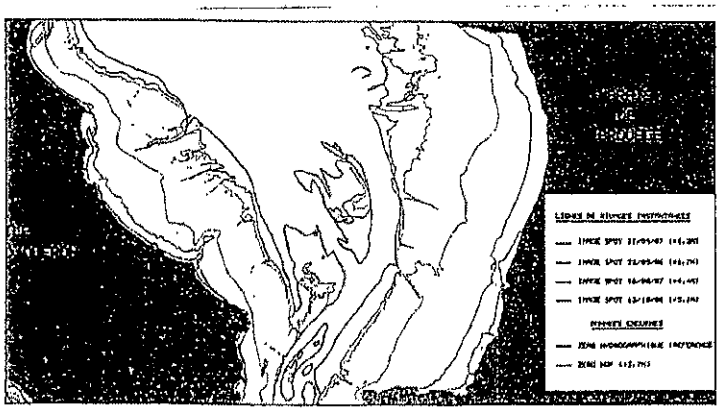


Figure 35. Lignes de rivage instantanné obtenues par observation spatiale (SPOT) sur la région Oléron–Brouage.

CONCLUSION

Sur des milieux d'interface extrèmement complexes et d'évolution rapide que sont les littoraux nous avons vu que la recherche en spectroradiométrie avait été à l'origine du développement de méthodes originales permettant de caractériser les phénomènes de surface et les états des divers milieux qui composent les zones côtières.

Des recherches complémentaires sont nécessaires dans le domaine de la caractérisation des réponses specroradiométriques en bandes étroites, ainsi que dans des régions du spectre peu explorées (infrarouge moyen, micro-ondes...), (cf Figure 2)

D'autre part, sur le plan technique, l'évolution vers la très haute résolution des capteurs embarqués sur des satellites est pour l'observation du littoral, une nécessité qui va permettre à de nouvelles applications de se développer, notamment celles qui intéressent la caractérisation et le suivi de l'action de l'homme sur les milieux littoraux.

Enfin sur le plan méthodologique, l'analyse de séries chronologiques de répétitivité adéquate offrirait d'une part un meilleur suivi des variations des phénomènes de surface en liaison avec leur signification écologique (milieux stables/milieux perturbés), d'autre part d'alimenter des modèles biologiques, sédimentologiques ou physiques de fonctionnement des écosystèmes comme des systèmes d'aide à la décision de type SIG.

Il n'en reste pas moins que la télédétection a fait des progrès considérables et qu'elle devient un outil désormais reconnu comme indispensable à tout aménagement et suivi de l'environnement (cf. la décision récente d'un grand financeur de l'aide internationale, l'Asian Development Bank, de financer en priorité des programmes d'aménagement terrestres et côtiers faisant appel au données de la télédétection dans la zone Asie-Pacifique.)

C'est un outil fédérateur puisque pluridisciplinaire par essence qui contribue dans toute étude de l'environnement côtier à résorber les freins de type "informatif" évoqués en introduction. Son intégration progressive dans des systèmes d'information localisée participera de plus en plus dans le futur, (elle y participe déja) au décloisonnement nécessaire au sein des scientifiques, aménageurs, exploitants, gestionnaires, grand public etc.... qui chacun occupent directement ou indirectment une part des responsabilités en matière de gestion et d'aménagement côtier. Par là même, espérons le, l'utilisation de plus en plus opérationnelle de cet outil fédérateur catalysera la résorption des freins de type "institutionnels" qui s'appliquent tout particulièrement à l'approche globale "terre-mer".