

25 • TRAITEMENT DES DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION ET AMÉNAGEMENT DU LITTORAL

25.1 Introduction : problématique générale

L'occupation et l'exploitation des régions côtières sont actuellement en modification rapide tout particulièrement pour les pays producteurs et exportateurs de produits pétroliers ou miniers, mais parce que d'autres modes d'exploitation du littoral deviennent également prépondérants tels que l'aquaculture, le tourisme ou encore les questions désormais relatives à la protection, la préservation et la réhabilitation des milieux naturels.

Dans la quasi-totalité des pays possédant une façade maritime, il y a en effet déplacement des peuplements vers les côtes : 2/3 de la population mondiale vivent à moins de 400 km de la mer. L'impact se traduit par :

- 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 et des modes d'occupation des bassins versants, rectification et protection du trait de côte, pollutions diverses du milieu marin, augmentation des risques écologiques, etc.

La prise de conscience progressive de ces risques et la nécessité d'une gestion plus efficace transparait à tous les niveaux et se concrétise par des procédures de gestion coordonnée, qui le plus souvent s'appuient sur une législation :

- en France les schémas de mise en valeur de la mer (SMVM), plus récemment les directives territoriales d'Aménagement (DTA),
- aux États-Unis le Coastal Management Act, le Middle Atlantic Government Coastal Resource Council,
- au niveau international, des programmes tels que COMAR (UNESCO), Mers Régionales (PNUE)... L'Union européenne, très tôt intéressée à cette problématique lance des expérimentations spécifiques sur l'information et les études intégrées des zones côtières. Celles-ci ont abouti à des directives majeures dont nous citerons ici celle de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) qui intègre les problématiques de gestion des eaux continentales, des eaux souterraines et des eaux très côtières (1 mille nautique en deçà des lignes de base) ou encore celle de la Stratégie marine européenne qui s'intéresse à la connaissance et la gestion intégrée des Zones économiques exclusives (200 milles nautiques).

Face à de tels développements, que nous décrivons ci-après, s'est posée et se pose de façon de plus en plus prégnante (cf. les initiatives nationales françaises dans le cadre du Grenelle de la mer) la question de la préservation, la protection et la réhabilitation de zones et espaces côtiers impactés ou susceptibles de l'être : création de parcs et réserves marines, d'aires marines protégées, etc.



Ces législations et procédures nécessitent la mise en œuvre de produits de planification et de gestion, eux-mêmes dérivés de systèmes d'information multiparamètre pour lesquels la télédétection constitue une source de données.

Les zones côtières présentent la difficulté d'une extension, de type linéaire, indépendante des frontières, avec une interface entre terre-mer et ses zones adjacentes, en tous pays, qui est sous la juridiction de multiples collectivités et administrations, dont les prérogatives sont le plus souvent opposées. Par ailleurs, de même que pour les applications présentées dans les autres chapitres, l'information fournie doit être multispatiale, multiparamètre et multitemporelle. Or, en France métropolitaine par exemple, les documents classiques d'informations géographiques de base interceptant le littoral ont été de nature différente, d'échelle différente, adoptant des plans de projection différents : cartes topographiques de l'Institut géographique national, cartes marines du Service hydrographique et océanographique de la Marine. Ceci explique le lancement par l'association IGN-SHOM du programme Lito3D® qui vise à rendre cohérentes ces deux représentations et fait appel à des outils intégrateurs tels que le LIDAR.

Pour de nombreux pays de la zone intertropicale très peu de systèmes cartographiques précis et actualisés sont encore disponibles notamment pour ce qui concerne les domaines très sensibles et difficilement pénétrables que sont les mangroves et les récifs coralliens.

25.2 L'observation spatiale des milieux côtiers

25.2.1 Les objets du littoral et de la mer côtière

Il est délicat de définir ce qui constitue géographiquement le littoral puisque les phénomènes qui intéressent cette interface sont autant d'origine terrestre que marine.

On peut, sur un plan administratif, en limiter l'extension à l'amont, côté terre, aux limites des communes littorales et à l'aval à celle dite des 12 milles nautiques. On peut, sur des critères environnementaux liés aux échanges d'eau et aux flux, en limiter l'extension à l'amont aux limites des bassins versants terrestres et à l'aval aux zones d'extension en mer de ces flux. On peut encore, sur des bases géographiques et topographiques, proposer une extension allant d'une cote d'altitude définie (200 m par exemple) au rebord du plateau continental (limite bathymétrique de - 200 m). Pour ce qui suit nous nous limiterons au « littoral marin » c'est-à-dire limité à l'amont par la laisse des plus hautes mer. On distinguera alors deux grands types de milieux :

- le subcotidal, toujours ennoyé car situé en dessous du niveau des plus basses mer, lieu d'influences, souvent combinées entre elles, provenant de la surface (houles, vagues, courants, vents, polluants tels que les hydrocarbures, glaces, etc.), de la colonne d'eau (turbidité, température, panaches d'émissaires, blooms, planctoniques, etc.), du fond (petits fonds observés en eau claire dans le domaine optique, présentant eux-mêmes des substrats divers, durs ou meubles, végétalisés ou non, issus de constructions animales tels que les récifs coralliens ; influence du fond sur la courantologie de surface détectable dans le domaine des hyperfréquences, etc.).

- l'intercotidal, situé dans la zone de balancement des marées, là où elles existent, comprenant des sols nus (sables, vases, rochers, etc.), des végétaux (plantes de marais dont les mangroves, halophytes marines, algues, microflore...), des animaux (banques de mollusques, coraux découverts...), des milieux aménagés (parcs à huîtres, bassins, chenaux, filières d'élevage, salines, etc.).

En plus d'une répartition générale linéaire, les littoraux sont caractérisés par des éléments de taille réduite constituant des paysages très variés dont la structuration manifeste est le résultat de processus naturels ou artificiels.

Enfin les milieux constituant les littoraux sont très évolutifs à des périodicités très variées, aléatoires (tempêtes par exemple) ou périodiques à basses ou hautes fréquences (régimes hydrologiques, régimes phénologiques, marées...).

Compte tenu de ces éléments, on se pose ci-après la question de savoir si les systèmes d'observation de la Terre possèdent la résolution spatiale et les périodicités d'observation suffisantes pour permettre, en complément des mesures classiques de terrain, de fournir sur des bases opérationnelles les éléments nécessaires à une bonne caractérisation des phénomènes, notamment de surface, en zone littorale.

25.2.2 Objets littoraux et spécifications des systèmes d'observation aérospatiaux

Les premières analyses des adéquations entre les spécificités des milieux côtiers et les performances techniques des systèmes d'observation aérospatiale (Klemas *et al.*, 1980 ; Gierloff-Emden, 1982 ; Loubersac, 1983) montrent qu'il n'y avait pas encore, dans les années 1990, de systèmes de télédétection correctement adaptés à l'étude des zones côtières. En effet, dans les années comprises entre 1980 et 2000, les systèmes d'observation disponibles rendaient encore incompatible le couplage efficace entre la haute résolution spatiale et la haute résolution temporelle nécessaires à l'observation des systèmes littoraux, des avancées significatives ont cependant été atteintes. Peu à peu, l'utilisation de la télédétection de haute résolution aux études du côtière, limitée auparavant à l'étude de phénomènes n'impliquant pas de haute dynamique, voit ses applications évoluer.

La figure 25.1 illustre la question posée. La représentation (échelles logarithmiques) de la résolution temporelle exprimée en jours (abscisse) et de la résolution spatiale exprimée en mètres (ordonnée) offertes par les principales missions actuelles (fin 2009) d'observation de la Terre permet les déductions suivantes.

La résolution spatiale (dizaine de mètres) des systèmes spatiaux tels que SPOT ou ERS permet difficilement la caractérisation opérationnelle d'une partie des activités humaines intéressant le littoral ainsi que de certains phénomènes naturels tels que l'érosion littorale (sauf cas particulier de côtes de forte dynamique sédimentaire) ou l'impact de catastrophes naturelles. Par contre les très hautes résolutions de SPOT 5 (5m) ou encore d'Orbview 3, de FORMOSAT, de QUICKBIRD, d'IKONOS, de GEOEYE, de KOMPSAT, etc., s'approchent des résolutions requises par une majorité d'applications.

La résolution temporelle optimale, extrêmement variable selon les applications, n'est pas encore satisfaite pour les très hautes répétitivités par les systèmes satellitaires existant actuellement (au mieux 1 jour avec ORBVIEW et ENVISAT pour les études typiquement côtières). Ainsi les applications opérationnelles de la télédétection aux phénomènes liés aux marées, au suivi de la dispersion due aux courants et aux vents (dispersion de rejets, polluants dérivants, etc.), ou encore au contrôle de la navigation, sont le plus souvent limitées. Ce sont donc les programmes articulant un ensemble de satellites de haute résolution lancés en constellation (cf. COSMO SKYMED par exemple) qui permettront de résoudre cette double contrainte d'une observation de haute résolution spatiale et temporelle.

Le vecteur aérien a pour limites : une vision synoptique limitée, des coûts d'acquisition augmentés avec la répétitivité et les contraintes atmosphériques, la lourdeur des traitements de mise en conformité géométrique des données.

Le tableau 25.1 (adapté d'après Klemas) récapitule les performances des principaux capteurs placés sur satellite ou sur avion pour les différents objectifs intéressant les zones littorales. Pour certains capteurs, l'utilisation de certaines plates-formes n'est pas techniquement envisageable et n'a donc pas été indiquée. Il en ressort que l'observation optimale



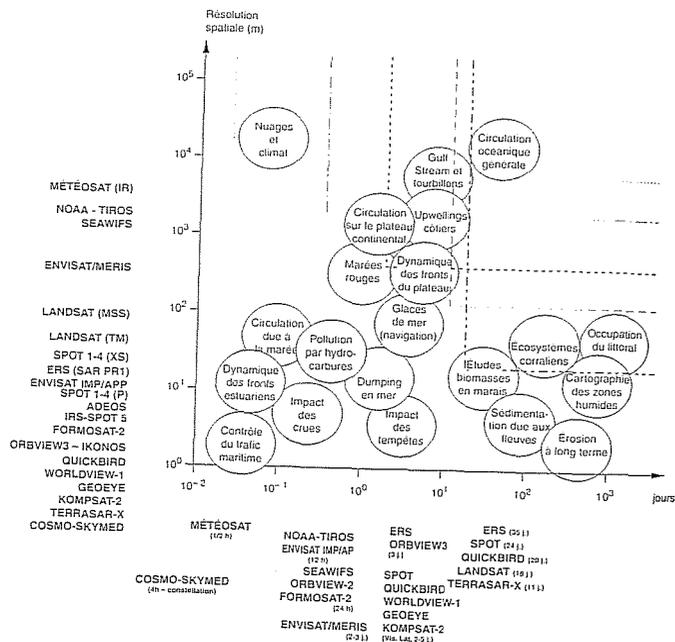


Figure 25.1 - Possibilité de détection des phénomènes marins et côtiers par les principaux capteurs et vecteurs satellitaires actuels d'observation de la Terre (adapte, compléte et actualise d'après Klemas, autorisation IFREMER)

pour le suivi des phénomènes qui touchent au côtier nécessiterait l'utilisation de la quasi totalité des bandes spectrales, de l'ensemble des types de capteurs disponibles, sans pour autant permettre une mesure fiable d'un important paramètre hydrologique : la salinité dont nous savons cependant (cf. chapitre 4.4) qu'un programme tel que SMOS permettra d'accéder à basse résolution spatiale à ce paramètre. La solution optimale, mais techniquement difficilement envisageable, serait donc d'associer sur une même plateforme, ou sur différentes plates-formes travaillant en phase : un imageur multispectral, un imageur thermique, un radar (notamment imageur), des radiomètres hyperfréquences. Le tout avec une résolution spatiale significativement inférieure à 5 m et une répétitivité de la journée ou moins.

Les données spatiales actuellement disponibles issues de capteurs multispectraux travaillant dans le domaine optique et thermique, et de données radar de type SAR présentent un potentiel intéressant pour nombre d'applications, dont on présente ci-après un échantillon.

Tableau 25.1 - Performance des systèmes de télédétection pour les études côtières

Capteur	Plateforme	Vents		Concentration en ss		Bathymétrie		Concentration chlorophylle		Circulation due aux courants		Vagues		Hydrocarbures		Érosion côtière		Végétation et usage du sol		Sédiments en suspension (ss)		Types de fond		Biomassé et stress végétaux		Température de surface		Salinité	
Radar altimètre	S	3	0	3	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lasers profilers	A	2	0	4	0	0	4	1	3	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fluorescence laser	A	0	2	1	4	1	0	4	1	1	2	0	0	1	2	0	0	1	2	0	0	1	2	0	0	1	2	0	0
Photographie	S	1	2	2	2	2	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	0	0	0	0	0	0
Baliseurs multibande	A	1	3	3	3	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0
Radar imageur	S	1	2	3	2	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	0	0	0	0	0	0
Baliseurs IR thermique	A	3	0	1	0	3	4	4	4	4	4	2	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Radiomètres micro-ondes passives	S	2	0	1	0	2	4	3	3	3	3	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0
Radar diffusiomètre	S	1	1	0	0	3	0	3	1	1	2	0	0	1	2	0	0	1	2	0	0	1	4	0	0	0	0	0	0
	S	1	1	0	1	2	2	4	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0
	S	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0
	S	4	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A - Avion ; S - Satellite ; 4 - Opérationnel ; 3 - Potentiel réel mais expérimentations requises ; 2 - Utilité potentielle ; 1 - Utilité limitée ; 0 - Non utilisable



APPLICATIONS

25.3 Les comportements spectraux des objets du littoral

Les comportements spectraux d'objets spécifiques au domaine maritime des domaines intercotidaux et subcotidaux sont présentés ici.

25.3.1 Les milieux littoraux intercotidaux et subcotidaux

Le littoral intercotidal (entre la zone de balancement des marées) constitue très généralement une « mosaïque » de communautés biologiques différentes, de substrats de natures géologiques et granulométriques variables, de gradients d'humidité liés à l'inondation, l'exondation etc., le tout perturbé par l'action de l'homme (cultures marines, salines, aménagements divers...). Il y correspond des pixels et des mixels variés.

Les milieux subcotidaux (sous la limite des plus basses mers) correspondent aux zones littorales en permanence inondées par les eaux saumâtres ou marines. La réponse spectrale

de la mer dépend de la teneur en sédiments ou pigments (couleur de l'eau), des caractéristiques des fonds, de l'action du vent en surface, des houles, des courants, de la pollution, etc.

25.3.2 Les cibles minérales du domaine intercotidal (domaine optique)

Les cibles minérales « pures » telles que sable, sables vaseux, vases, roches présentent entre le violet-bleu et l'infrarouge proche des comportements spectraux monotones (voir chapitres 4 et 23). 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... Par contre la réponse spectrale d'un sédiment peut être considérablement modifiée par le dépôt, en surface, de matière vivante telle que des diatomées soulignant la présence de microphytobenthos. Guillaumont *et al.* (1988) ont montré, dans le cas de présence d'une microflore, que la modification de la réponse spectrale était directement liée à la teneur en pigments (chlorophylle et phaeopigments). Un tel résultat est important car le microphytobenthos, avec le phytoplancton et les algues macrophytes, contribue à la production primaire des écosystèmes côtiers, en particulier là où les étendues sablo-vaseuses découvrent à marée basse sont vastes. Sa variabilité temporelle est forte et les méthodes classiques d'observation et de mesure sont très difficiles à mettre en œuvre.

25.3.3 Les cibles végétales du domaine intercotidal (domaine optique)

Leur comportement spectral est analogue à celui des végétaux terrestres présenté au chapitre 4. On distinguera dans ce qui suit trois grandes classes de végétaux : les algues macrophytes, les phanérogames marines, les plantes halophytes des marais maritimes ou tempérés, dont les mangroves.

■ Les algues macrophytes

Par rapport aux autres végétaux supérieurs, les algues ont une grande diversité pigmentaire adaptée à la variabilité de leur environnement lumineux (Levavasseur, 1986). L'étude de différents groupes d'algues (vertes, rouges, brunes) montre une réponse faible entre 400 et 500 nm (absorption par la chlorophylle) et des valeurs absolues des réflectances, au-delà de 700 nm, extrêmement dépendantes des conditions d'éclaircement, de couverture, du degré d'immersion. Dans la portion 500-700 nm, les réflectances traduisent la diversité des pigments présents (figure 25.2).

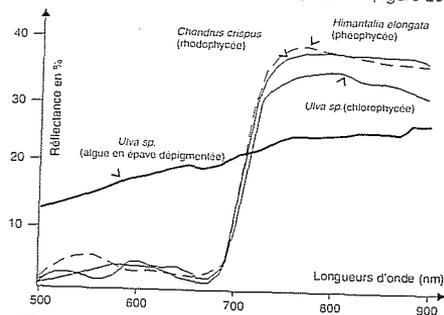


Figure 25.2 - Exemple de courbes de réflectance spectrales de différents groupes d'algues (d'après Guillaumont, 1991)

Bien que les gammes de variation soient faibles, Vollier *et al.* (1985) ont montré que cette diversité des pigments est susceptible d'être perçue dans les bandes larges d'un capteur de type HRV, ce qui a conduit à l'élaboration d'un indice XS1/XS2 (voir chapitre 4), permettant de discriminer les principales populations végétales d'un site dans la mesure où l'on aura vérifié que les pixels analysés remplissent la condition de cible « pure ».

Une synthèse par Guillaumont *et al.* (1997) fournit plus d'éléments sur les principes et méthodes de télédétection des algues macrophytes.

■ Les phanérogames marines

Ces plantes à fleurs colonisent des zones sableuses et sablo-vaseuses, parfois sur des surfaces importantes en zones tropicales (herbes à tortues). Elles présentent à l'émerison, comme les algues macrophytes, un port planophylle. Dans le cas de zostères, on observe une corrélation significative entre la biomasse et l'indice de végétation normalisé (cf. § 4.3.4). D'autre part l'analyse des réflectances spectrales d'un herbier de phanérogames marines montre la variabilité de la réponse en fonction de la couverture, elle-même évoluant de manière saisonnière en fonction du développement de la plante. L'analyse diachronique par télédétection est une voie de suivi d'évolution de ces herbiers.

■ Les marais maritimes tempérés

Les plantes halophytes des marais maritimes de la zone tempérée (et froide) sont généralement de petite taille, érectophylles (contrairement aux végétaux présentés ci-dessus). Leurs comportements spectraux dénotent une phénologie variée (espèces pérennes, espèces annuelles), les fluctuations de la réponse spectrale peuvent être rapides et importantes en fonction de facteurs naturels (épaison, floraison...) ou artificiels (fauchage, pâturage...).

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

Dans des cas favorables — grandes étendues quasi monospécifiques de *Spartina alterniflora* et faible modification des paysages par l'homme — des résultats significatifs ont pu être obtenus aux États-Unis (Budd *et al.*, 1982). Ils conduisent à la cartographie et la quantification de la biomasse d'espèces végétales de marais, notamment par l'établissement de lois significatives corrélant cette biomasse à l'indice de végétation.

Pour les marais maritimes européens, plusieurs travaux ont montré qu'il faut à la fois prendre en compte les fluctuations saisonnières naturelles de chaque compartiment de l'écosystème et le calendrier des travaux correspondant aux caractéristiques locales (parfois anciennes) d'occupation du milieu (digues, polders, salines, claires ostréicoles, marais à poissons). L'évolution de ces marais dépend directement de la gestion de l'eau qui découle de ces activités en pleine évolution.

■ Les marais maritimes tropicaux

Ils correspondent généralement à des formations de mangroves (voir plus loin), écosystèmes forestiers fragiles, car leur diversité génétique est très réduite (une soixantaine d'espèces ligneuses constitue leur flore) et leur tolérance écologique est très étroite (gradient de salinité et durée quotidienne d'immersion en particulier). Ce sont des systèmes parmi les plus productifs du monde ; la biomasse aérienne en poids sec est



de l'ordre de 300 tonnes/hectare en régions humides et la productivité primaire atteint 12 à 15 tonnes/hectare/an dans les mangroves denses de Malaisie.

Un nombre important d'études a été mené, notamment dans le domaine optique, à la fois pour réaliser des inventaires et à zonations cartographiques et tenter d'en caractériser les communautés végétales. Nous détaillerons cet aspect dans le paragraphe suivant.

Là où existe une saison sèche, les milieux de mangroves sont associés à des marais nus sursalés situés en arrière de la mangrove et dénommés « tannes » ou « salitrales ». La figure 25.3 représente la succession des unités paysagères d'un marais maritime tropical en Nouvelle-Calédonie. 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) dont le comportement radiométrique est celui des plantes des marais tempérés (voir paragraphe précédent). Les zones 4, 5 et 6 correspondent à des substrats sablo-vaseux nus ou recouverts d'un dépôt d'origine végétale (voile algale), leur comportement radiométrique est majoritairement celui des cibles minérales.

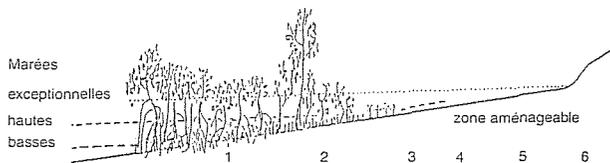


Figure 25.3 - Marais de Mara, Nouvelle-Calédonie. Unités de paysage reconnues sur la zone intercotidale.

L'utilisation combinée d'un indice de végétation normalisé $XS3-XS2/XS3+XS2$ et d'un indice de brillance $(XS1+XS2)^2$ (voir chapitre 4) permet, en s'appuyant sur des mesures spectrales, de classifier les unités principales de ce type de paysage : mangrove arbustive, zone de transition et sols nus proprement dits (Loubersac, 1987). Une application à la présélection de sites d'aquaculture est donnée ci-après.

■ Cas particulier concernant le suivi de la mangrove

Un ensemble de travaux a été mené sur ces environnements tropicaux (Aschbacher *et al.*, 1995). Ceux-ci faisaient principalement appel aux données de haute résolution visible.

Blasco *et al.* (1998) ont analysé les diverses technologies de télédétection appliquées à la mangrove pour en conclure à la fin des années quatre vingt dix que malgré les avancées de la télédétection satellitaire, c'était toujours la photographie aérienne qui convenait le mieux pour étudier la densité, la phénologie, le statut hydrologique, les impacts anthropiques ainsi que la taille et la composition floristique des mangroves. La photographie aérienne a ainsi été utilisée à plusieurs reprises pour cartographier des zones de mangroves dans le monde (Verheyden *et al.*, 2002) en validant les classes identifiées par interprétation visuelle à l'aide des données de terrain : jusqu'à dix classes ont pu être distinguées mais aucune information sur leur précision n'est disponible. Verheyden *et al.* (2002) ont montré que les photographies aériennes permettaient une identification jusqu'au niveau de l'espèce. Grâce à la mise en place d'une clé d'identification basée sur trois caractères structuraux (tonalité de gris, texture et forme et taille de la couronne au niveau de la canopée), la plupart des arbres individuels peuvent être identifiés. Toutefois, la clé d'identification doit être révisée pour chaque lieu étudié, car l'analyse de la

photographie aérienne met en évidence des différences significatives dans l'interprétation des mangroves.

À la fin de 2009, la très haute résolution (THR) des images satellitaires optiques et radar, désormais opérationnelle, permet d'entrevoir avec confiance leur utilisation pour la cartographie et le suivi de cet écosystème et de ces sous-ensembles. En effet, les capteurs optiques THR (1 m à 60 cm) ne sont opérationnels que depuis les années 2000-2001, et la THR radar (1 m) n'a fait son apparition qu'en 2007 avec les satellites TerraSAR X et Radarsat-2.

Si des méthodes d'analyse et de classification des écosystèmes de mangroves ont été développées depuis le lancement des premiers satellites optiques permettant de discriminer différentes classes de densités au sein des mangroves, il apparaît clairement que la résolution spatiale des données joue un rôle plus important que la résolution spectrale (nombre et largeur des canaux) dans l'étude de la structure intrinsèque des mangroves (Wang *et al.*, 2004). En effet, le gain de résolution des données THR permet dorénavant d'appréhender les écosystèmes forestiers à l'échelle de l'individu ou du groupement d'individus. Et il est ainsi possible de différencier les différentes strates composant les secteurs de mangroves en combinant les valeurs radiométriques et des critères texturaux (Proisy *et al.*, 2007). Toutefois, les références bibliographiques concernant l'étude des mangroves par télédétection optique très haute résolution sont encore rares.

D'autre part, les contraintes climatiques inhérentes à la zone intertropicale ont favorisé l'essor de l'utilisation de capteur radar à synthèse d'ouverture (SAR) dont les acquisitions sont indépendantes du couvert nuageux et peuvent également être réalisées de jour comme de nuit. Des premières études, menées notamment en Guyane française et en Asie, ont permis de montrer le potentiel de ce type d'images pour la cartographie et surtout le suivi temporel et l'évolution des mangroves (Proisy, 2000 ; Rosenqvist *et al.*, 2007).

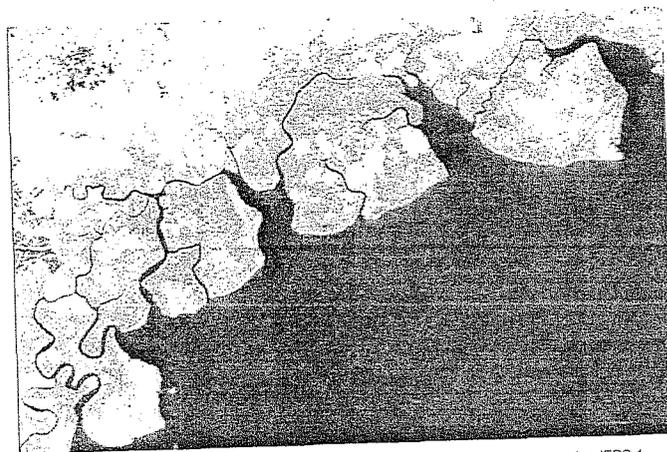


Figure 25.4 - Exemple de composition colorée multitemporelle de données radar JERS-1 (déforestation des mangroves près de Perak en Malaisie) (Rosenqvist *et al.*, 2007 ; ©JAXA/METI).



APPLICATIONS

Le potentiel de l'imagerie radar semble concerner plusieurs thèmes : la classification et la zonation des mangroves, l'estimation de la hauteur de la canopée, l'estimation de la biomasse et l'estimation des variations de la hauteur d'eau (Lucas, 2007 ; Wdowinski, 2008).

Les images radar en bande L restent les plus souvent employées pour l'étude des mangroves, et les techniques nouvelles déployées telles que la polarimétrie ou l'interférométrie radar offrent d'ores et déjà des résultats prometteurs.

25.3.4 Le domaine subcotidal : le cas des hydrocarbures

On trouvera aux chapitres 1, 4, 26 et 27 les éléments correspondant à la réponse de la tranche d'eau dans les domaines optique, infrarouge thermique et des hyperfréquences. Aussi se limite-t-on ci dessous au cas particulier d'une pollution de surface et plus particulièrement au déversement d'hydrocarbures, et à l'analyse de la modification du signal télédéteecté à la surface de la mer en présence de ce type de produits.

La détection d'hydrocarbures, flottant généralement en couches minces à la surface de l'océan, peut être envisagée par télédétection, passive comme active, sur la quasi totalité du spectre électromagnétique. Dès le début des activités de recherche en télédétection, un très grand nombre de travaux ont porté sur ce sujet : Stewart *et al.*, 1970 (visible et proche IR) ; Munday *et al.*, 1971 (multispectral dont thermique) ; Hollinger, 1974 (hyperfréquences passives) ; Guinard, 1971 (radar) ; Fantasia *et al.*, 1974 (laser). La synthèse de ces travaux conduit à découper le spectre électromagnétique en portions au sein desquelles les hydrocarbures présentent par rapport à la mer des caractéristiques spectrales suffisamment stables pour permettre leur discrimination.

En télédétection passive, le découpage en bandes de longueurs d'ondes (λ) est le suivant :

- λ entre 300 et 400 nm : réflectance de l'hydrocarbure supérieure à celle de la mer, mais portion du spectre uniquement utilisable de jour par ciel clair ;
- λ entre 420 et 550 nm : réflexion solaire sur l'hydrocarbure masquée par la diffusion due à l'eau ;
- λ entre 650 et 900 nm : réflectance de l'hydrocarbure supérieure à celle de la mer ;
- λ entre 3-5,5 μm d'une part et 8-14 μm d'autre part. Dans cette dernière portion du spectre (voir chapitre 1), la radiation émise est proportionnelle à la température et à l'émissivité de surface du corps observé. Les températures étant supposées égales et l'émissivité de l'huile étant inférieure à celle de l'eau de mer, l'hydrocarbure apparaît plus « froid » : détection utilisable de jour comme de nuit ;
- λ entre 3 mm et 3 cm. Les hydrocarbures présentent une température de brillance supérieure à celle de la mer et variable avec l'épaisseur de l'huile : détection de pollution par le pétrole possible de jour et de nuit et estimation des volumes en jeu par accès à l'épaisseur de la nappe.

En télédétection active, le découpage en bandes de longueurs d'ondes (λ) est le suivant :

- λ entre 250 et 600 nm : les hydrocarbures peuvent réémettre sous excitation lumineuse (laser) une réponse de longueur d'onde décalée par rapport à celle d'excitation (fluorescence). Comme l'onde retour et la longueur d'onde d'excitation dépendent du type, de la densité et de l'âge de l'hydrocarbure, il est possible de caractériser le type de pollution que l'on détecte ;
- λ entre 3 et 30 cm : les hydrocarbures ayant la particularité d'amortir les ondes capillaires d'assez grande amplitude produites par le vent (> 4 nœuds), un signal radar (radar latéral) sera plus rétrodiffusé par l'eau de mer non polluée que par celle couverte d'huile (Wismann, 1993 ; Bjerde *et al.*, 1993).

25.4 Exemples d'applications à l'aménagement des littoraux

Quelques exemples illustrent les apports de la télédétection en matière d'aide à la gestion et l'aménagement des milieux côtiers.

25.4.1 Application à la cartographie de base en milieu corallien

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, tout particulièrement dans le cas des îles basses ou atolls. En effet :

- pour la partie terrestre, les faibles altitudes, les infrastructures peu durables (friabilité des sols et érosion importante), la programmation délicate de prises de vues aériennes sur des îles éloignées et le nombre trop restreint des points de calage pour la photogrammétrie compliquent la mise en place d'un réseau géodésique complet ;
- 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.

Pour cela, un important travail de cartographie de base reste à mener dans les régions tropicales, tant pour la gestion des milieux que pour la navigation. Afin de faciliter ce travail, en France, le Service hydrographique et océanographique de la Marine fait largement appel au traitement de données de la télédétection satellitale.

En Polynésie Française par exemple, où la gestion des espaces maritimes constitués des lagons, des atolls et des îles hautes pose problème en raison du développement d'activités de perliculture, conflictuelles entre elles ou avec d'autres activités (pêche, tourisme), les données de la télédétection aérospatiale ont été utilisées pour élaborer des « iconocartes » de ces îles, là où les levés classiques étaient inexistantes ou fragmentaires.

Pour répondre à des critères de disponibilité, de standards identiques (résolution au sol, radiométrie, format...), de diachronie, de compatibilité entre précision graphique et sémantique avec les applications projetées, les données du satellite SPOT ont été retenues. La méthode développée comporte :

- rectification de l'image SPOT acquise sous un niveau de prétraitement de base (1A ou 1B) en niveau 2A (UTM) ;
- association d'une grille géographique précise (points de calage obtenus *in situ*) ;
- segmentation de l'image en trois zones principales : domaine marin, sols nus, végétation ;
- estimation de la bathymétrie (méthode explicitée au chapitre 4) et calage du modèle à l'aide de points d'appui de bathymétrie connue ;
- habillage de l'ensemble des zones tirées des étapes méthodologiques précédentes par ajout d'éléments extérieurs (toponymie, tracé routiers, etc.) de sorte à obtenir une iconocarte (voir SL 25.1, Loubersac *et al.*, 1994).

Outre l'intérêt cartographique direct, la forme numérique des données dérivées de la télédétection et leur géocodage permet directement de générer des fonds cartographiques de référence qui entrent dans la constitution de systèmes d'informations géographiques d'aide à l'aménagement.



25.4.2 Aménagement aquacole (élevage de crevettes tropicales)

L'élevage des crevettes tropicales est très fortement concentré dans les pays en voie de développement, sur le littoral, dans des zones d'accès pas toujours très facile, de cartographie souvent incomplète ou obsolète. Il se caractérise majoritairement par la construction de grands bassins à terre (quelques milliers de mètres carrés à plus de 20 ha de surface unitaire). 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 » ou « tannes », grands espaces de terrain plat sans végétation, à proximité des milieux de mangroves. Au début, l'implantation de fermes se fait sur les « salitrales », enchâssées dans la mangrove, où se développent les juvéniles qui servent à les alimenter et 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, mais aussi à cause d'une mauvaise localisation et caractérisation sur les cartes disponibles des zones favorables que sont les « tannes » ou « salitrales », 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.

Les méthodes explicitées précédemment pour les marais maritimes tropicaux ont été appliquées avec succès à des images spatiales de haute résolution pour 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 des sols sur les bassins versants à l'amont des sites ainsi que l'accessibilité des zones par voies de terre ou de mer, pré-identifier les sites de pompage de l'eau de mer nécessaire à l'élevage.

Ces éléments, croisés avec des éléments extérieurs non directement disponibles par télédétection tels que la qualité physico-chimique des eaux, la productivité du milieu, les contraintes logistiques, les contraintes économiques, etc., permettent d'établir des cartes de présélection de sites à moyenne échelle (1/50 000 notamment) qui ont été pour la première fois utilisées dans le cadre d'un inventaire et d'un plan d'aménagement des sites aquacoles en Nouvelle-Calédonie (Loubersac, 1987 ; SL 25.2).

25.4.3 Applications à la cartographie thématique des algues

La demande croissante au niveau industriel en matière de récolte d'algues brunes et particulièrement de fucales, conduit à une estimation des stocks exploitables, notamment en zone intertidale. Des cartes de classification d'espèces, d'estimation des couvertures et de la biomasse en place, issues de l'établissement d'un modèle empirique reliant le couvert végétal mesuré à la biomasse disponible ont été élaborées grâce aux résultats de la recherche (voir ci-dessus ; SL 25.3 ; d'après Bajjouk, 1996).

Contrairement aux algues brunes dont l'extension et le comportement spectral sont généralement stables dans le temps, les algues vertes présentent des fluctuations très importantes de développement et de répartition, très souvent liées à des pollutions par excès de nitrates. Leur suivi et le contrôle de leur évolution sont difficiles par les moyens traditionnels. L'exploitation de méthodes de discrimination d'espèces sur des données

diachroniques de télédétection offre des perspectives d'application dans le domaine du suivi de l'eutrophisation de l'environnement côtier, notamment en appui à la modélisation de ces phénomènes (Populus *et al.*, 1994).

25.4.4 Applications à la topo-bathymétrie fine des espaces d'interface entre terre et mer : le Lidar

Le lidar est un télémètre émettant des pulses laser¹ à haute fréquence (jusqu'à 80 kHz) dans le proche infrarouge ou dans le visible. Le principe de fonctionnement est le suivant (figure 25.5) : le laser envoie, grâce à un miroir, un rayonnement incident en direction de la surface terrestre qui le réfléchit vers le récepteur. La durée mise par le faisceau pour faire l'aller-retour permet de calculer la distance avion-sol. Le miroir, pivotant autour de l'axe de vol de l'avion, permet au faisceau de balayer le sol et ainsi de couvrir une trajectoire égale à environ 70 % de l'altitude de vol. Le laser est installé dans un aéronef dont la position est connue très précisément grâce à un dGPS et l'inclinaison par la centrale de navigation inertielle (INS). L'association de ces deux outils permet d'acquérir les données altimétriques avec une précision décimétrique autant sur la position du point mesuré que sur l'altitude relevée.

Le lidar aéroporté présente de nombreux avantages par rapport aux techniques topographiques classiques : précision de la mesure d'environ 30 cm en horizontal et 15 cm en vertical, forte densité de mesure (aujourd'hui plus d'un point par mètre carré) permettant de mettre en évidence des détails très fins, rendement élevé allant jusqu'à 40 km² par heure de vol à une altitude de 1 000 m. Par contre, les longueurs d'ondes utilisées interdisent les opérations en présence de nuages ou de brume entre l'avion et le sol, facteur qui peut contraindre les missions.



Figure 25.5 - Principe de fonctionnement du Lidar

1. Laser : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



En environnement littoral, on distingue deux grands modes d'utilisation du Lidar aéroporté : le lidar topographique et le lidar bathymétrique. Le faisceau infrarouge du lidar topographique est absorbé par l'eau et ne peut donc pas donner d'information sur la profondeur. Toutefois, en le couplant avec un second lidar émettant dans une longueur d'onde différente (généralement le vert à 532 nm qui pénètre dans l'eau) le signal réfléchi par le fond permet d'acquérir de la donnée bathymétrique jusqu'à environ trois fois la profondeur du disque de Secchi. Ceci est particulièrement intéressant pour lever les zones côtières auxquelles les moyens nautiques ne peuvent accéder.

La nature du sol et la présence de végétation affectent la précision de la mesure du lidar topographique. L'émission du faisceau laser permet l'acquisition d'un ou plusieurs points de mesure (mode multi-échos) le long de l'onde qui est réfléchi par les obstacles rencontrés (immeuble ou canopée). Il est alors possible d'en déduire la hauteur à condition qu'elle soit supérieure à 0,50 m, limite de détection du double écho. Certains types de végétation basse des marais maritimes donnent toutefois une signature bimodale sur le signal lidar. La mesure de l'énergie du pulse lidar offre la possibilité de recueillir d'autres informations sur les caractéristiques de la surface (rugosité, composition du sol, objets au sol) mais son exploitation demeure encore lourde et peu utilisée.

Cette technologie complexe exige une préparation du vol extrêmement minutieuse en fonction de la marée et des conditions météorologiques.

Le produit final est un ensemble de fichiers ASCII (X,Y,Z, intensité) organisés soit en lignes de vol, soit éventuellement en tuiles dont la taille est fixée en fonction des possibilités de calcul des logiciels utilisés pour construire des modèles maillés.

On se reportera très utilement à Populus *et al.* (2003) et à Hitler *et al.* (2010) qui précisent un ensemble d'applications du lidar topographique sur les interfaces terre-mer qui concernent la mise en œuvre de modèles numériques de terrain des estrans, les applications à la modélisation hydrodynamique, la caractérisation de la géomorphologie d'estran, la cartographie des habitats intertidaux (algues, schorres, herbiers, hermelles, etc.).

On fera de même pour ce qui concerne le Lidar bathymétrique (Irish et White, 1998 ; Guenther *et al.*, 2000 ; Tuell et Park, 2004 ; Collin *et al.*, 2008) et ses applications aussi bien en hydrographie de base que vis-à-vis des questions d'aménagement côtier (évolution du trait de côte, aménagement portuaire, appui à l'ingénierie maritime...).

25.4.5 Application à la cartographie rapide de l'impact de catastrophes naturelles

C'est avec l'augmentation du nombre de catastrophes recensées par an ainsi que des coûts liés aux événements destructeurs que les problématiques liées aux risques sont apparues sur le devant de la scène politique et médiatique internationale depuis une vingtaine d'années. Les efforts en matière de réglementation et de prévention se sont intensifiés et, en décembre 1986, la résolution 41-65 de l'ONU, relative aux principes de la télé-détection, pose les premiers fondements de l'utilisation de l'imagerie spatiale dans la caractérisation des catastrophes naturelles. En 2000, la signature de la Charte Internationale « Espace et Catastrophes Majeures » (CECM, cf. www.disasterscharter.org) engage les fournisseurs d'images satellites, sur demande des états ou des protections civiles, à mettre à disposition des données satellitaires en vue d'une cartographie rapide des dommages liés à une catastrophe. La cartographie d'urgence s'inscrit dans ce contexte en transformant de la donnée brute spatiale en information géographique consommable par les organismes gestionnaires des crises ou les équipes de secours engagées sur le terrain.

Alors que dans un cycle de production normal de produits dérivés de la télé-détection le temps imparti se compte généralement en semaines ou en mois, pour la cartographie rapide (dédiée à la gestion de crise), le temps disponible se compte plutôt en heures. L'objectif est de délivrer une information géographique pertinente aux utilisateurs moins de 12 heures après l'acquisition des données brutes par le satellite. Les produits du service sont des cartes numériques créées à la volée à partir des données satellitaires événementielles et de référence, fusionnées avec toutes les informations géolocalisées accessibles.

■ La charte internationale « Espace et catastrophes majeures » (CECM)

Depuis la fin de l'année 2000, la charte internationale « Espace et catastrophes majeures » met à disposition des organisations de protection, de défense, de sécurité civile et de secours du monde entier les ressources des agences spatiales signataires. L'objectif est de faire bénéficier gratuitement la communauté internationale du potentiel d'information offert par l'imagerie spatiale en cas de désastre majeur, ceci au travers d'un guichet d'entrée unique mobilisant de façon prioritaire les moyens spatiaux.

À l'heure actuelle, dix agences spatiales sont membres de la charte : la NOAA (USA), ISRO (Inde), CONAE (Argentine), JAXA (Japon), CNSA (Chine), USGS (USA), DMC International Imaging (UK) ayant rejoint les membres fondateurs : le CNES (France), l'ESA (l'agence spatiale européenne) puis CSA (Canada). Des accords spécifiques lient également des sociétés privées telles que Digital Globe (satellite Quickbird) ou GeoEye (satellite GeoEye-1) à la charte CECM.

Ainsi, les moyens spatiaux associés à la charte par l'intermédiaire de ces agences spatiales sont des systèmes optiques – SPOT, IRS, SAC-C, PCES, GOES, ALOS, MERIS, Landsat, constellation DMC, les séries de satellites chinois FY, SJ et ZY – et des plateformes radar – ERS, ENVISAT, ALOS et RADARSAT.

Entre novembre 2000 et septembre 2008, la Charte internationale a été déclenchée à plus de 196 reprises pour des catastrophes naturelles ou technologiques de tous types. Environ 20 % de ces déclenchements étaient relatifs à des catastrophes affectant les milieux littoraux (tsunamis 4 %, ouragans 10 %, pollutions pétrolières 6 %). Toutefois certains événements spécifiques aux milieux littoraux étaient parfois regroupés avec des événements plus génériques tels que les ouragans avec les inondations ou les tsunamis avec les tremblements de terre. En 2008, les déclenchements de la charte concernant les inondations et les vagues océaniques représentaient plus de 51 % (Gillespie et Adams, 2008).

Dans la pratique, les agences spatiales signataires de la charte fournissent les données et participent souvent à l'élaboration de l'information de crise. Cette valeur ajoutée est réalisée en interne ou déléguée à un opérateur spécialisé tels que le SERTIT (cf. sertit.ustrasbg.fr) en France ou le DLR-ZKI en Allemagne (Allenbach *et al.*, 2008).

Les produits cartographiques réalisés en situation de crise peuvent être classés dans quatre grandes catégories : carte de référence (lorsque les fonds cartographiques de référence sont inaccessibles ou obsolètes), carte d'extension de l'événement (produit fondamental qui distingue de la manière la plus exhaustive possible les zones affectées et non affectées par le phénomène), carte d'intensité et carte d'impact. Les cartes d'impact constituent un pas supplémentaire dans la description des effets induits par les catastrophes naturelles. Il s'agit de fournir une information sur les enjeux affectés par la catastrophe.



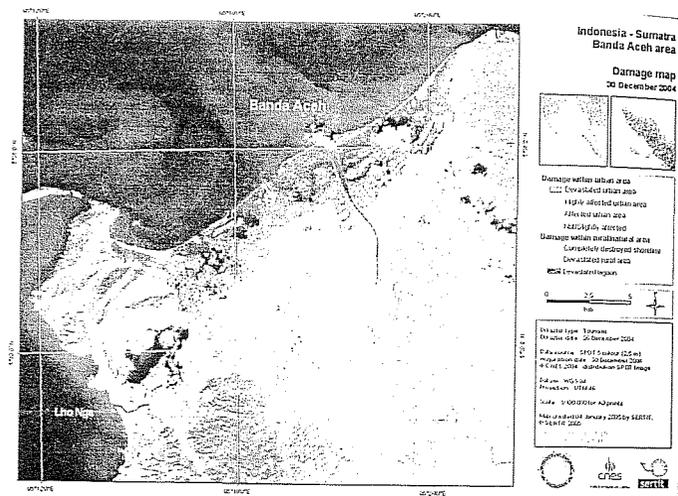


Figure 25.6 – Intensité et type de dégâts en fonction de l'occupation dans la région de Banda Aceh en Indonésie après le tsunami du 26 décembre 2004 [CEMC]

■ Potentiel de l'imagerie spatiale pour la cartographie événementielle et spécificités du milieu littoral.

L'équation de base de la cartographie événementielle est de disposer d'un observateur, capteur, enregistreur sur les lieux de la catastrophe dans un laps de temps le plus réduit possible après l'événement (voire au moment de l'événement) tout en bénéficiant d'une résolution spatiale d'observation pertinente.

Concernant le premier point, à savoir la disponibilité d'un outil d'observation au bon moment au bon endroit du globe, il est clair que la multiplication des plates-formes opérationnelles, combinée aux capacités de pointage des satellites actuels, entraîne une bonne probabilité pour que les lieux d'une catastrophe soient « imagés » au moins une fois dans les 24 heures suivant l'événement (cf. figure 25.1). Les systèmes radar opérationnels, qu'ils soient commerciaux comme RADARSAT ou institutionnels comme ENVISAT et ERS, permettent de s'affranchir des conditions atmosphériques locales parfois préjudiciables pour les systèmes optiques.

Concernant la pertinence des résolutions spatiales, il est important de tenir compte de la classe d'aléa – cyclone, tsunami – qui s'exprime sur le terrain de façon spécifique (ou signature de l'événement). À titre d'exemples, pour délimiter l'extension du champ d'inondation provoqué par le passage du cyclone *Nargis* sur le delta de l'Irrawaddy au Myanmar en mai 2008, la résolution décimétrique d'un capteur radar suffit largement. Pour inventorier les immeubles affectés par le tsunami de décembre 2004, les résolutions métriques et inframétriques des satellites Quickbird et Ikonos sont nécessaires.

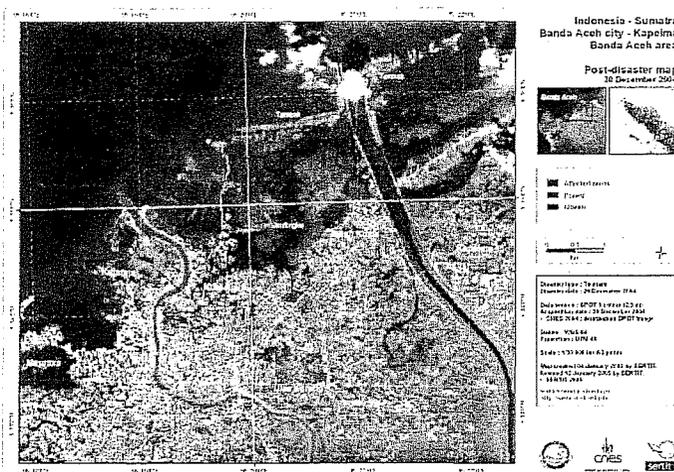
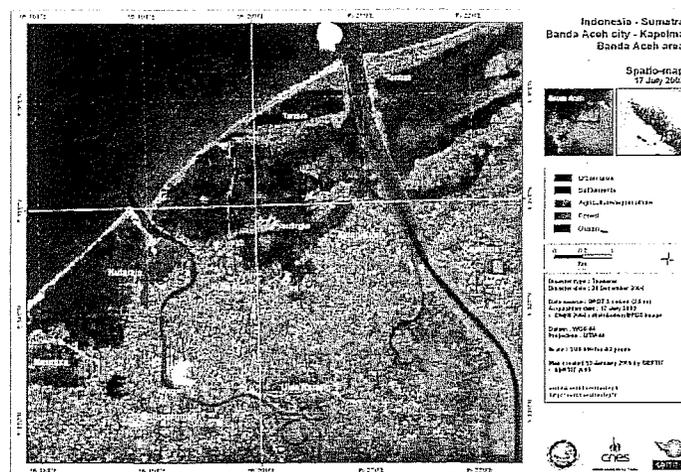


Figure 25.7 – Cartographie avant et après le tsunami du 26 décembre 2004 dans la région de Banda Aceh en Indonésie [CEMC]

APPLICATIONS

Deux types de catastrophes particulièrement destructeurs affectent spécifiquement les milieux côtiers : les ouragans et les tsunamis où la proximité de l'océan ou de la mer joue un rôle prépondérant dans l'intensité des événements.

Les cas de cartographie rapide liés à des ouragans sont nombreux de même que les types d'impacts liés à ces événements comme l'illustrent les cartes réalisées lors de l'ouragan *Katrina* au USA en août 2005 ou suite au passage du cyclone *Nargis* en mai 2008 :

- érosion des îlots barrières liée aux vagues de tempête ;
- destruction des habitations de la façade littorale par l'effet conjugué des vents et de la montée des eaux de la mer ;
- inondations dont les causes sont multiples (montées des eaux de la mer, gonflements des rivières par les précipitations) ou conjuguées (blocage des écoulements des fleuves par la remontée du niveau de la mer sous le cyclone).

Les effets d'un tsunami sur le littoral, (voir figure 25.7) consistent en l'arrachement des habitations, de la végétation et le charriage de tous ces éléments vers l'intérieur des terres. L'arrachement peut être si intense qu'il peut aller jusqu'à la modification profonde du trait de côte comme cela a été cartographié après le tsunami du 26 décembre 2004 dans la province d'Aceh en Indonésie. En arrière du littoral, l'impact du tsunami peut être rapproché à ceux d'une inondation.

25.5 Conclusion, perspectives

Depuis le début des années 1970, notamment avec le lancement du premier satellite d'observation de la terre ERTS (précurseur de la série LANDSAT MSS) un ensemble de missions spatiales de différents types a fourni sur l'océan et la mer côtière un nombre considérable d'informations environnementales.

Les avancées scientifiques et techniques que la mise à disposition de ces données ont entraînées viennent d'être très succinctement évoquées et illustrées. Pendant la même période des développements importants ont également été menés en télédétection aéroportée comme en témoigne le lancement des conférences internationales sur le sujet depuis 1994.

Il n'en reste pas moins que les spécificités propres des milieux littoraux imposent des contraintes spatiales et temporelles d'observation et de mesure tout à fait particulières que les techniques de télédétection ne peuvent pas encore totalement satisfaire.

Les perspectives de développement futur des applications côtières de la télédétection aérospatiale se positionneront sur les axes suivants :

- la très haute résolution spatiale avec les satellites de nouvelle génération de résolution inframétrique et de satellites en constellation,
- la très haute résolution spectrale (programmable) que la conception de missions aéroportées peut permettre,
- l'évolution des capteurs de couleur de l'eau et salinité (voir chapitre 4 et 27).

D'autre part, indépendamment des développements technologiques et méthodologiques propres à la télédétection, un avenir certain existe dans le mixage et la fusion des données géoréférencées qu'elle procure avec les données géographiques numériques classiques et celles de la modélisation numérique. C'est pourquoi, tant sur le plan des concepts, des mises au point techniques et méthodologiques que des applications, les réflexions et travaux s'orientent vers la communication étroite et la synergie entre données, méthodes et

outils de la télédétection, de la modélisation numérique hydrodynamique, hydrosédimentaire ou biologique des écosystèmes et des systèmes d'informations géographiques (SIG). Cette synergie est indispensable pour élaborer des systèmes d'information territoriaux opérationnels sur la mer côtière qui soient utiles à l'aide à la décision, à l'orientation de choix et à la communication optimisée comme au partage de l'information environnementale.

Bibliographie

- ALLENBACH B., ANDREOLI R., BATTISTON S., BESTAULT C., *et al.*, 2008, Question de cartographie d'urgence, *Actes de conférence du Festival International de Géographie de Saint-Dié-des-Vosges*, 2 - 5 oct. 2008.
- ASCHBACHER J., TIANGCO P., GIRI C. P., OFREN R. S., PAUDYAL D. R., ANG Y. K., 1995, Comparison of different sensors and analysis techniques for tropical mangrove forest mapping, *IGARSS'95 Congress*, 3, p. 2109-2111.
- BAJOUK T., GUILLAUMONT B., POPULUS J., 1996, Application of airborne imaging spectrometry system data to intertidal seaweed classification and mapping, *Hydrobiologia*, 326/327, 463/471.
- BEN MOUSSA H., 1987, *Contribution de la télédétection satellitale à la cartographie des végétaux marins : Archipel de Molène*. Thèse de doctorat d'Université Aix Marseille II, 122 p.
- BJERDE K. W., SOLBERG S., SOLBERG R., 1993, Oil spill detection in SAR imagery, *IGARSS'93 Congress*, p. 943-945.
- BLASCO F., LAVENUE F., CHAUDURY M. U., KERR Y., 1983, *Simulations SPOT au Bangladesh. Étude des mangroves des Sunderbans*. Rapp CNES/GDTA, 31 p.
- BUDD J. T. C., MILTON E. J., 1982, Remote Sensing of salt marsh vegetation in the first four proposed Thematic Mapper bands, *Int. Jnl. Rem. Sens.* 3 (2), p. 147-161.
- COLLIN A., ARCHAMBAULT P., LONG B., 2008, Mapping the Shallow Water Seabed Habitat With the SHOALS, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 46 (1), n° 10, pp. 2947-2955.
- FANTASIA J. F., INGRAO H. C., 1974, « Development of an experimental airborne laser remote sensing system for detection and classification of oil slicks. », *Proc 9th Int Symp. Rem. Sens. of Env.*, Ann Arbor MI, p. 1711-1745.
- FORGET P., ROUSSEAU S., CAUNEAU F., CHAPRON B., KERBAOL V., CUO F., BONNAFOUX G., BLEFARD C., GARELLO R., GRASSIN S., BONICEL D., HAJJI H., 1996, *Expérimentation radar GLOBESAR en baie d'Audierne*. Rapport technique LSEET, Univ Toulon. Ref. 94/CNES/0380.
- GIERLOFF-EMDEN H. G., 1982, « Remote sensing for coastal areas » *Symp. IGARSS'82*, München WA-8, p. 11-18.
- GILLESPIE A. AND ADAMS B., 2008, An Introduction to the International Charter: Space and Major Disasters, *6th International Workshop On Remote Sensing for Disaster Management Applications*, 11-12 September 2008, Pavia, Italy EUCEMTR.
- GOHIN F., LANGLOIS G., 1993, Using geostatistics to merge in situ measurements and remotely-sensed observations of sea surface temperature, *Int. Jnl Rem. Sens.*, 14 (1), p. 9-19.



- GUENTHER G.C., CUNNINGHAM G., LAROCQUE P.E., Reid D.J., 2000, Meeting the accuracy challenge in airborne Lidar bathymetry, Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR, Dresden/FRG, June 16-17, 2000.
- GUILLAUMONT B., BAJJOUK, T., TALEC P., 1997, « Seaweeds and remote sensing : a critical review of sensors and data processing » In *Progress in Phycological Research*, Vol. 12, Chapman and Round Eds. Biopress, p. 213-282
- GUILLAUMONT B., GENTIEN P., VIOLLIER M., 1988, « Mesures radiométriques haute résolution du microphytobenthos intertidal », *Proc. 4th Int Coll. On spectral signatures of objects in rem. Sens.*, Aussois ESA SP 287, p. 333-336.
- GUILLAUMONT B., LAVASSEUR J., 1988, *Variations saisonnières de la réflectance en fonction de la phénologie des plantes des marais*, 3^e Conférence Internationale sur les Zones Humides, Rennes, sept. 1988.
- GUINARD N. W., 1971, « The remote sensing of oil slicks », *Proc. 7th Int Symp. Rem. Sens. of Env.* Ann Arbor MI, p. 1005-1026.
- HITIER B., OGER-JEANNERET H., POPULUS J., BENYOUCEF I., 2010, Chapter 7: Airborne LIDAR in support of geomorphological and hydrodynamic modelling in Geomatic solutions for coastal environments, Editor/Author Details: Mohamed Maanan and Marc Robin, Nova Science Publishers. 180 pp.
- HÖLLINGER J. P., 1974, *The determination of oil slicks thickness by means of multi-frequency passive microwave technique*, Nav. Reserach Lab. CG-D-31-75, Whashington DC.
- IRISH J.L., WHITE T.E., 1998, Coastal engineering applications of high-resolution Lidar bathymetry, Coastal Engineering Volume 35, Issues 1-2, October 1998, pp. 47-71.
- KLEMAS V., GROSS M. F., HARDISKY M. A., 1987, Evaluation of Spot data for Remote Sensing of physical and biological properties of estuaries and coastal zones », *Symp. Int. Spot 1 : utilisation des images, bilans, résultats*, Paris Éd. Cepadues, p. 1035-1040.
- KLEMAS V., PHILPOTT W. D., 1980, *The use of satellites in environmental monitoring of coastal waters*. Final rpt. Univ Delaware NASA NSP-1433.
- KLIMLEY A. P., BUTLER S. B., 1988, Immigration and emigration of a pelagic fish assemblage to seamounts in the Gulf of California related to water mass movements using satellite imagery, *Mar Ecol. Prog. Ser.* 49, p. 11-20.
- LE VOURCH J., MILLOT C., CASTAGNE N., LE BORGNE P., OLRY J.-P., 1992, *Atlas des fronts thermiques en Mer Méditerranée d'après l'image satellitaire*, Mémoire de l'Institut océanographique de Monaco, n° 16, VI, 152 p.
- LEVASSEUR G., 1986, *Plasticité de l'appareil pigmentaire des algues marines macrophytes. Régulation en fonction de l'environnement*. Thèse de Doctorat d'État, Paris VI, 210 p.
- LOUBERSAC L., 1983, *Coastal Zone Inventory by high resolution satellites*, Alpbach Summer School, 27 July - 5 August 1983, ESA SP 205, p. 87-94.
- LOUBERSAC L., 1987, « Spot, un outil d'aide à la présélection de sites favorables à l'aquaculture. Bilan et perspectives du projet PEPs « ALIAS Calédonie », *Symp. Int. Spot 1 : utilisation des images, bilans, résultats*, Paris, Éd. Cepadues, p. 1041-1049.

- LOUBERSAC L., ANDREFOUET S., CHENON F., MOREL Y., VARET H. 1994, Information géographique dérivée des données de la télédétection spatiale de haute résolution sur les lagons des îles hautes et des atolls. Application aux environnements des îles de la Polynésie française : état et perspectives, *Mémoires de l'Institut océanographique de Monaco*, 18, p. 75-84.
- LUCAS R.M., MITCHELL A.L., ROSENQVIST A., PROISY C., MELIUS A. and TICEHURST C., 2007, The potential of L-band SAR for quantifying mangrove characteristics and change: case studies from the tropics, *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst.* 17: 245-264.
- MUNDAY J. C., MACINTYRE W. G., PENNEY M. E., 1971, « Oil slicks studies using photographic and multispectral scanner data », *Proc. 7th Int Symp. Rem. Sens. of Env.*, Ann Arbor MI, p. 1027-1043.
- PETIT M., DAGORN L., LENA P., SLEPOUKHA M., RAMOS A.G., STRETTA J.M., 1994, « Oceanic landscape concept and operational fisheries oceanography », *Mémoires de l'Institut Océanographique de Monaco*, 18 : Les nouvelles frontières de la télédétection océanique, p. 85-97.
- PIRIOU J.-Y., 1993, *Cartographie des zones sensibles à l'eutrophisation : cas des côtes bretonnes*. Rapport IFREMER/CEE/Région Bretagne, Contral 6510-90, 2 vol.
- POPULUS J., GUILLAUMONT B., RUIZ O., TALLEC P. 1994, « Biomass assessment of green algae proliferations with high resolution airborne images », *Proc. Of the first International ETRIM Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, Strasbourg, France, 11-15 sept. 1994, 3, p. 153-164.
- POPULUS J., LAURENTIN A., ROLLET C., VASQUEZ M., 2003, Surveying coastal zone topography with airborne remote sensing for benthos mapping, eProceedings of Earsel's GIS « Remote Sensing of the Coastal Zone », Ghent, 2003 June 5-7, 105 117: pp. 13.
- PROISY C., COUTERON P., FROMARD F., 2007, Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier-based textural ordination of IKONOS images, *Remote Sensing of Environment* 109, pp 379-392.
- PROISY C., MOUGIN E., FROMARD F., AND KARAM M. A., 2000, Interpretation of Polarimetric Radar Signatures of Mangrove Forests, *Remote Sens. Environ.* 71, pp 56-66.
- ROSENQVIST A., FINLAYSON C.M., LOWRY J., TAYLOR D., 2007, The potential of long-wavelength satellite-borne radar to support implementation of the Ramsar Wetlands Convention, *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst.* 17, pp229-244.
- STEWART S., SPELLICY R., POLCYN F., 1970, *Analysis of multispectral data of the Santa Barbara oil slick*, Publ. 3340-4-F, Willow Run Lab / Univ. Michigan, 57 p.
- TJELL G., PARK J. Y., 2004, Use of SHOALS bottom reflectance images to constrain the inversion of a hyperspectral radiative transfer model, Proceedings of SPIE, Laser Radar Technology and Applications IX, Volume: 5412, pp. 9.
- VERHEYDEN, A., DAHDOUH-GUEBAS, F., THOMAES, K., DE GENST, W., HETTIARACHCHI, S., KOEDAM, N., 2002, High resolution vegetation data for mangrove research as obtained from aerial photography, Kluwer Academic Publishers, Environment, Development and Sustainability 4 : 113-133.



- VIOLLIER M., BELSHER T., LOUBERSAC L., 1985, « Signatures spectrales des objets du littoral », *Proc 3rd Int. Coll. On spectral Signatures of objects in Rem. Sens.*, Les Arcs, France, ESA SP 247, p. 253-257.
- WANG L., SOUSA W. P., GONG P., BIGING G. S., 2004, Comparison of IKONOS and QuickBird images for mapping mangrove species on the Caribbean coast of Panama, *Remote sens. Of Env. (91)*, pp432-440.
- WDOWINSKI S., KIM S-W., AMELUNG F., DIXON T.H., MIRALLES-WILHELM F., SONEN-SHEIN R., 2008, Space-based detection of wetlands' surface water level changes from L-band SAR interferometry, *Remote Sensing of Environment 112 (2008) 681-696*.
- WISMANN V., 1993, Radar signatures of mineral oil spills measured by an airborne multi-frequency radar and the ERS1 SAR, *IGARRS'93 Congress*, 3, p. 940, 942.
- ZACHARIAS M., NIEMANN O., BORSTAD G., 1992, An assessment and classification of a multispectral bandset for the remote sensing of intertidal seaweeds, *Canadian J. of Rem. Sens.*, 18 (4), p. 263-274.