

Université de Bretagne Occidentale

**Apports des hautes
résolutions spatiales
pour l'étude et la cartographie
des algues vertes**

Application à la Grève de St-Michel(22)

Mémoire présenté par

Olivier RUIZ

Pour l'obtention de

La maîtrise de Géographie
Option : Télédétection

Année 1993-94

Cent

R

R110
RUI
A

UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE

**APPORTS DES HAUTES RESOLUTIONS
SPATIALES
POUR L'ETUDE ET LA CARTOGRAPHIE
DES ALGUES VERTES**

Application à la Grève de St-Michel (22)

Mémoire présenté par

Olivier RUIZ

pour l'obtention de

**la Maîtrise de Géographie
option : Télédétection**

Année 1993-94

**IFREMER
Bibliothèque
Centre de Brest**
BP 70 - 29230 PLOUZANÉ

IFREMER-Bibliothèque de BREST



OBR31175

X

Mémoire présenté le 14 Juin 1994

à

L'UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE

par

Olivier RUIZ

à l'issue d'un stage de formation
effectué au département
d'Océanographie Spatiale
du centre

IFREMER DE BREST.

devant le Jury d'examen composé de :

Président :	Mr G. MAINET	U.B.O
	Mr B HALLEGOUET	U.B.O
	Mr J. POPULUS	IFREMER

REMERCIEMENTS

Ce travail de maîtrise a été effectué au département d'Océanographie Spatiale de l'IFREMER. au sein du groupe de recherche "**Sillage**", dirigé par Monsieur Lionel Loubersac. Je lui suis reconnaissant de m'avoir accueilli dans son équipe.

L'encadrement de ce travail a été assuré par Madame Brigitte Guillaumont et Monsieur Jacques Populus, chercheurs à l'IFREMER. Je voudrais leur exprimer ma gratitude pour m'avoir fait bénéficier de leur grande expérience en Télédétection.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur Bernard Hallégouët qui a accepté d'être mon directeur de recherche et qui a supervisé la réalisation de ce mémoire.

Ma gratitude s'adresse aussi à Monsieur Guy Mainet, directeur du département de Géographie, qui a accepté de présider le jury.

Je tiens à remercier également Touria Bajjouk, pour son amitié et sa collaboration lors de la réalisation de cette étude.

Je remercie également Pascal Tallec, "Charlie" Keppel, Tanguy le Guen, Francis Gohin et Marie-Laure Augris pour leur participation aux missions de terrain.

Je tiens aussi à exprimer toute ma gratitude à Monsieur Abderrahim Bentamy pour sa collaboration lors de l'utilisation du logiciel de statistiques S+ .

Je remercie également, Monsieur Laurent Dupont, responsable informatique, qui a toujours été disponible pour résoudre mes problèmes ou répondre à mes questions

Un grand merci à Marie-Pierre Zelverte, à Corinne Tricot et à François Roul, qui par leur sympathie et leur aide ont contribué à la réalisation de ce travail.

Que toutes celles et ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail et que j'aurais injustement oubliés, trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

A mes frères et mes parents

RESUME

Les apports croissants d'effluents agricoles associés avec des situations hydrodynamiques particulières sont à l'origine de fortes proliférations d'algues vertes du type *Ulva lactuca* (ulves). Lorsque la mer se retire les algues se déposent sur les plages et créent des nuisances pour le tourisme et les professionnels de la mer. Les estimations de biomasse sont alors nécessaires à la fois pour comprendre le phénomène et pour mesurer son ampleur.

Pendant la période de forts coefficients de marée de Septembre 1993, deux capteurs à haute résolution ont été mis en oeuvre sur l'Avion de Recherche en atmosphère et de Télédétection (A.R.A.T). La thématique principale de cette expérience était de réaliser une évaluation de la biomasse d'algues vertes avec des capteurs à haute résolution.

Un radiomètre à balayage : le RAMI (mis en oeuvre par le C.N.E.S) possédant des bandes spectrales identiques à celles de S.P.O.T et le C.A.S.I canadien (possédant de nombreuses bandes spectrales) réalisèrent l'acquisition de scènes au dessus de la plage de Saint-Michel-en-Grève (Côte d'Armor). Les bandes spectrales du C.A.S.I avaient été positionnées d'après les mesures de terrain réalisées un mois plus tôt avec le spectromètre de terrain SPECTRON.

Les images ont été corrigées géométriquement et radiométriquement et l'indice de végétation normalisé (N.D.V.I) a été utilisée pour les ulves émergées. Une relation entre la biomasse et le N.D.V.I a été établie d'après les courbes spectrales acquises au mois d'Août. Cette relation a permis d'estimer la biomasse d'algues vertes émergées. Une carte thématique a également été réalisée afin d'étudier la répartition de la biomasse et d'analyser des structures fines comme les différentes formes du réseau hydrographique.

Enfin une discussion envisage de nombreux problèmes opérationnels comme le choix de la meilleure résolution, la disponibilité des capteurs et de l'avion, la possibilité d'effectuer un suivi annuel...

ABSTRACT

The increasing amounts of agricultural effluents associated with particular hydrodynamical locations are resulting in strong proliferations of suspended green algae *Ulva lactuca*. During ebb tide, the algae deposit on beaches, creating a nuisance for both tourism and fishermen. Biomass estimates are hence needed both for understanding the phenomenon and for measuring its magnitude.

During the spring tide period of September 1993, two high resolutions digital sensors were run jointly on the French A.R.A.T (Remote Sensing and Atmospheric Research Aircraft). A pushbroom instrument called RAMI (run by C.N.E.S.) with spectral bands identical to those of S.P.O.T. and the Canadian C.A.S.I (which possesses a lot of spectral bands) acquired images over the sandy beach of St-Michel-en-Grève (Northern Brittany, France). The main topic of this investigation was the biomass assessment of green algae proliferations using high resolution airborne images.

Spectral bandset positioning of C.A.S.I resulted from field measurement made a month earlier with a SPECTRON portable spectrometer.

Geometric and radiometric corrections were carried out on the images and the Normalised Vegetation Index (N.D.V.I) was used to detect deposited seaweeds. A relation between the biomass and the reflectance was established using the spectra acquired in August.

This relation lead to an estimate of the deposited seaweeds. A thematic map was also used to study the biomass distribution of green algae and very thin structures like the shapes of hydrographical network.

In the discussion a few operational issues, such as the choice of better resolution, sensors aircraft availability, and the feasibility of yearly monitoring, are examined.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	8
-------------------	---

CHAPITRE I METHODOLOGIE ET TECHNOLOGIE.

SECTION I LA TELEDETECTION.

I. GENERALITES SUR LA TELEDETECTION.....	10
II. LES VECTEURS.....	10
A. LES AVIONS.....	10
B. LES SATELLITES.....	11
III. LES CAPTEURS.....	11
A. CARACTERISTIQUES.....	11
B. CAPTEURS ELECTRO-OPTIQUES.....	12
C. LES RADARS.....	13

SECTION II METHODOLOGIE DE LA MISSION A.R.A.T

I. DEROULEMENT DE LA CAMPAGNE AERIENNE.....	14
A. LA MISSION A.R.A.T.....	14
1/ DESCRIPTION DE LA MISSION A.R.A.T.....	14
2 / LES CONDITIONS METEOROLOGIQUES.....	15
3 / L'ORGANIGRAMME DECISIONNEL.....	16
B. LE SECTEUR GEOGRAPHIQUE CONCERNE.....	17
1/ LE PHENOMENE DE MAREE VERTE.....	17
2/ DESCRIPTION DU SITE.....	20
3/ FACTEURS PHYSIQUES INFLUENCANT L'ECHOUE.....	21
a) Morphologie.....	21
b) Courantologie.....	23
c) Les vents.....	24
II. LES MISSIONS DE TERRAIN.....	26
A. LA MISSION DE TERRAIN D'AOUT 93.....	26
1/ LES ALGUES VERTES.....	26
2/ METHODOLOGIE DE MISE EN OEUVRE DU SPECTRON.....	26
3/ LES DIFFERENTS TYPES DE MESURES.....	29
B. LA MISSION DE TERRAIN DE SEPTEMBRE 1993.....	30

<i>1/ ACTIVITES EFFECTUEES SUR LE TERRAIN.</i>	30
<i>2/ METHODOLOGIES D'ESTIMATION DE LA BIOMASSE.</i>	31
a) Estimation à partir de photographies aériennes.....	31
b) Méthodologie spécifique à l'expérience A.R.A.T.	31
<i>3/ RESULTATS DE L'ECHANTILLONNAGE.</i>	32

SECTION III
MOYENS ET TECHNOLOGIE

I. VECTEUR ET CAPTEURS AEROPORTES UTILISES.	33
A. L'AVION A.R.A.T.	33
B. LE RAMI.	35
<i>1/ CARACTERISTIQUES TECHNIQUES.</i>	35
<i>2/ SPECIFICITES DES BANDES XS1 ET XS2 (VISIBLE).</i>	36
<i>3/ SPECIFICITES DE LA BANDE XS3 (P.I.R.)</i>	36
C. LE C.A.S.I.	36
II. LE LABORATOIRE DE TRAITEMENT D'IMAGES.	38
A. LES ORDINATEURS ET LES PERIPHERIQUES.	38
B. LES LOGICIELS.....	39

CHAPITRE II
TRAITEMENT DES DONNEES

SECTION I
ANALYSE DES MESURES DE TERRAIN

I. ANALYSE DES SPECTRES COLLECTES AVEC LE SPECTRON	40
A. SIGNATURE SPECTRALE DES ULVES ECHOUEES.	40
B. REFLECTANCE DES ULVES EN FONCTION DE LA BIOMASSE.	41
C. REFLECTANCE DES ULVES EN FONCTION DE L'IMMERSION.....	44
D. DETERMINATION DES BANDES DU C.A.S.I.	44

SECTION II
TRAITEMENT DES SCENES

I. CORRECTIONS GEOMETRIQUE ET RADIOMETRIQUE.	46
A. CORRECTION GEOMETRIQUES DES SCENES.....	46
<i>1/ TECHNIQUE DES POINTS D'AMERS.</i>	46
<i>2/ LA PROJECTION CONIQUE CONFORME DE LAMBERT.</i>	48
B. CORRECTIONS RADIOMETRIQUES.	49
<i>1/ GRANDEURS PHYSIQUES UTILISEES.</i>	51
a) La luminance.	51
b) L'éclairement.	51
c) La réflectance.....	51
<i>2/ CORRECTION EN LUMINANCE.</i>	51
<i>3/ PASSAGE EN REFLECTANCE.</i>	53

II. LES INDICES DE VEGETATION.	53
A. L'INDICE DE VEGETATION NORMALISE OU N.D.V.I.....	53
B. L'INDICE PERPENDICULAIRE DE VEGETATION (P.V.I.).....	54
III. RELATIONS BIOMASSE - INDICES DE VEGETATION.	56
A. ESSAI DE DETERMINATION D'UNE RELATION BIOMASSE-P.V.I.....	56
B. UTILISATION DE RELATION BIOMASSE=f(N.D.V.I).....	57
IV. TRAITEMENTS FINAUX.	58
A. PASSAGE DU N.D.V.I. A LA BIOMASSE.....	58
1/ APPLICATION DU N.D.V.I.	58
2/ PROGRAMMATION D'UNE FONCTION DE TRANSFERT.	59
3/ CLASSIFICATION DE L'IMAGE.	59
B. EVALUATION DE LA BIOMASSE EMERGEE.	60
C. REALISATION D'UN DOCUMENT CARTOGRAPHIQUE.....	62
1/ LA CARTOGRAPHIE PAR TELEDETECTION.....	62
2/ REALISATION D'UNE CARTE THEMATIQUE.....	62

CHAPITRE III RESULTATS ET INTERPRETATION.

SECTION I COMMENTAIRE DE LA CARTE ET EVALUATION DE LA BIOMASSE EMERGEE.

I. ANALYSE DE LA CARTE THEMATIQUE PRODUITE.	65
A. ANALYSE DE LA REPARTITION DE LA BIOMASSE.	65
B. ANALYSE MORPHOLOGIQUE DES ECOULEMENTS.	66
II. RESULTATS DE L'EVALUATION DE LA BIOMASSE D'ULVES EMERGEES.	66

SECTION II COMMENTAIRES DES RESULTATS ET DISCUSSION

I APPORT DES HAUTES RESOLUTIONS SPATIALES:	69
A APPORT POUR L'EVALUATION DE LA BIOMASSE D'ULVES PAR TELEDETECTION.	69
1/ COMMENTAIRES DU RESULTAT DE L'EVALUATION.	69
2/ RATIONALISATION DU TRAITEMENT ET GAIN DE TEMPS.....	69
B. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'EMPLOI DE LA HAUTE RESOLUTION SPATIALE EN CARTOGRAPHIE.....	70
1/ ANALYSE DE STRUCTURES FINES ET REALISATION DE CARTES PRECISES.	70
2/ OPTIMUM DE HAUTE RESOLUTION SPATIALE.....	70
II. DISCUSSION SUR LA METHODOLOGIE DE L'EXPERIENCE.	71
A. METHODOLOGIE DE LA MISSION DE TERRAIN.....	71
1/ PROBLEME DE COORDINATION ET DE DISPONIBILITE.	71

2/ PROBLEMES LIES A L'EMPLOI DU G.P.S DIFFERENTIEL.	71
B. DISCUSSION SUR LA CHAINE DE TRAITEMENT UTILISEE.	72
1/ L'ERREUR RESIDUELLE DE LOCALISATION.	72
2/ APPROXIMATION DE LA MESURE D'ECLAIREMENT.	72
3/ REUTILISATION DE LA RELATION N.D.V.I-BIOMASSE.	72
4/ PROCEDE DE CALCUL DE LA BIOMASSE.	73
III. ETUDE DE FAISABILITE D'UN SUIVI ANNUEL.	74
A. UTILISATION ET DISPONIBILITE DU RAMI.	74
1/ AVANTAGES DE L'EVALUATION PAR TELEDETECTION.	74
2/ AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU RAMI.	74
B. AVANTAGES ET CONTRAINTES LIES A L'EMPLOI DU C.A.S.I.	74
1/ EXTENSION DE L'HYPOTHESE SUR LA RELATION EMPIRIQUE ENTRE LA BIOMASSE ET LE N.D.V.I.	74
2/ CONTRAINTES TECHNIQUES.	75
3/ FACILITE ET SOUPLESSE D'UTILISATION.	76
C. QUEL INSTRUMENT POUR QUEL PROFIL DE MISSION ?.....	76
CONCLUSION.....	77
LISTE DES FIGURES.....	79
LISTE DES CARTES ET DES TABLEAUX.	80
BIBLIOGRAPHIE	81

INTRODUCTION

La télédétection regroupe un ensemble de techniques (capteurs satellitaires, radiomètres de terrain...), mises en oeuvre à partir d'avions, de ballons et de satellites qui ont pour but d'étudier soit la surface de la terre, soit l'atmosphère en utilisant les propriétés des ondes électromagnétiques émises, réfléchies ou diffractées par les différents corps observés (Guyot 1989).

Cette technologie permet de réaliser des observations ayant un caractère répétitif dans le temps et d'étudier des phénomènes à différentes échelles. Ces caractéristiques font de la télédétection une source de données privilégiée pour les géographes.

La zone intertidale correspond à l'espace littoral compris entre les limites extrêmes des basses et des hautes mers. C'est une zone relativement étroite, généralement comprise entre quelques centaines de mètres et quelques kilomètres de large où les variations spatiales peuvent être très importantes sur des espaces relativement restreints.

Le centre I.F.R.E.M.E.R. de Brest a réalisé une expérience aéroportée pour étudier les zones intertidales à partir de données de télédétection. Les caractéristiques de ces zones ont rendu indispensable l'utilisation de capteurs à hautes résolutions spatiales.

Les principaux axes de recherche de cette expérience étaient l'investigation des hautes résolutions spatiales et spectrales, en vue d'une estimation des stocks d'algues et d'une discrimination accrue des cibles. Ces deux objectifs constituaient un préliminaire indispensable à une meilleure gestion du stock.

La thématique de l'expérience sur le site de St-Michel-en-Grève consistait à effectuer une estimation de la biomasse à partir de données de télédétection. Afin de réaliser cette opération, on a cherché à définir une stratégie d'échantillonnage et de traitement des scènes entraînant une réduction significative de l'échantillonnage au sol.

Le but de ce travail de maîtrise était de tenter d'appliquer cette nouvelle méthode pour réaliser des évaluations de biomasse sur de grands espaces comme cette plage. De plus cette évaluation de biomasse a été effectuée dans un souci d'analyse géographique du paysage. La Géographie est basée sur la description, la quantification et l'explication de phénomènes générant des disparités spatiales

Les "marées vertes" sont des proliférations importantes de macroalgues du genre *Ulva*. Ces productions d'algues vertes sont une réponse écologique à l'eutrophisation du milieu marin littoral par l'azote et le phosphore en provenance des cours d'eau (1991, *J.Y Piriou*).

Les proliférations d'ulves constituent une nuisance olfactive quand les échouages en haut de plage se dégradent. Cette nuisance olfactive est très pénalisante pour le tourisme et le ramassage des ulves échouées représente des sommes conséquentes dans le budget des communes concernées.

C'est pourquoi la quantification de la biomasse d'algues vertes est une opération essentielle qui permet de se rendre compte de l'évolution du phénomène de marée verte à St-Michel-en-Grève, qui figure comme l'une des communes les plus touchées des Côtes d'Armor.

D'autre part la disposition des algues sur la plage présente des structures caractéristiques et ce travail avait aussi pour objet d'analyser et d'expliquer la morphologie des dépôts d'algues.

L'expérience menée par L'I.F.R.E.M.E.R s'inscrivait par ailleurs dans un cadre plus général en vue de l'élaboration ultérieure d'un Système d'Information Géographique (S.I.G). Ce S.I.G. devrait permettre de mieux gérer l'espace littoral et d'assurer un suivi de ce type de pollution.

CHAPITRE PREMIER.

METHODOLOGIE ET TECHNOLOGIE.

SECTION I.

LA TELEDETECTION.

I. GENERALITES SUR LA TELEDETECTION.

Cette section s'est largement inspirée de l'ouvrage *d'Alain Couzy* intitulé la Télédétection.

La Télédétection est un nouveau regard sur le monde. Nouveau regard qui fait appel à des techniques de pointe : spatiale, optique, électronique, informatique, des télécommunications, des sciences de la Terre.

Le terme télédétection désigne l'ensemble des méthodes d'acquisition de l'information à distance qui utilisent les rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis par les objets.

Les appareils de mesure (capteurs) sont embarqués sur une plate-forme (vecteur) dont le mouvement lui permettra de parcourir la zone de travail. Les enregistrements radiométriques effectués fournissent des données dont l'information utile doit être extraite et interprétée.

II. LES VECTEURS.

A. LES AVIONS.

Ils constituent le moyen traditionnel d'acquisition des données. En premier lieu le développement considérable de la photographie aérienne a conduit à la forme la plus courante et ancienne de la télédétection (photogrammétrie et photo-interprétation).

L'avion présente des qualités de souplesse permettant d'intervenir au moment précis qui convient et selon une trajectoire définie à l'avance. De plus il peut être équipé des capteurs les mieux adaptés à une mission précise. En revanche son emploi est plutôt onéreux compte tenu des consommations, du personnel nécessaire des contraintes d'infrastructures (aéroports) et des contraintes techniques.

Le stationnement près de la zone de travail est parfois très long et une météorologie défavorable peut conduire à une immobilisation coûteuse de l'appareil et

de son équipage. La limitation de l'altitude de vol conduit à restreindre la superficie observée.

En se déplaçant dans une atmosphère dense, l'avion subit des mouvements suivant les trois composantes de l'espace (mouvements de tangage, de lacet, de roulis) et des variations d'altitude qui introduisent des erreurs dans les enregistrements. On peut remédier à ce dernier type de problème en montant les capteurs sur des plateformes inertielles ou en enregistrant les paramètres des mouvements perturbateurs pour réaliser ensuite des corrections.

Dans tous les cas l'utilisation de capteurs radiométriques aéroportés présente un surcoût par rapport à la photographie aérienne.

B. LES SATELLITES.

C'est leur développement au cours des vingt dernières années qui a conduit à la naissance du concept de télédétection. Ils constituent le vecteur privilégié de la télédétection. Contrairement aux avions dont la trajectoire peut être modifiée à tout instant par le pilote, les satellites ont des orbites fixes généralement fixées une fois pour toutes.

On distingue deux catégories parmi les satellites :

- Les satellites héliosynchrones comme les LANDSAT américains, S.P.O.T et N.O.A.A qui passent toujours aux mêmes points aux mêmes heures.

- Les satellites géostationnaires placés sur une orbite voisine de 36000 km et dont la période de rotation est identique à celle de la Terre ce qui les fait paraître immobiles du sol. Le satellite français Météosat. appartient à cette deuxième catégorie de satellites.

III. LES CAPTEURS.

A. CARACTERISTIQUES.

Ce sont eux qui reçoivent et mesurent le rayonnement issu des objets au sol. Deux paramètres caractérisent les capteurs :

- l'ouverture angulaire qui définit le champ global de l'observation, c'est à dire la taille du territoire que l'instrument observe.

- la résolution spatiale qui mesure l'ouverture minimum des faisceaux enregistrés et qui traduit en résolution linéaire au sol, la dimension de l'objet le plus petit que l'instrument est capable de distinguer.

Le capteur est également caractérisé par sa résolution spectrale liée aux positions et largeur des bandes de longueur d'onde séparées par la technologie de l'appareil.

On distingue deux catégories de capteurs :

- les capteurs passifs qui reçoivent le rayonnement électromagnétique émis par les objets au sol.
- les capteurs actifs qui émettent un rayonnement vers la zone à observer et enregistrent le rayonnement que leur réfléchit cette zone.

B. CAPTEURS ELECTRO-OPTIQUES.

Ces capteurs sont des capteurs passifs dans lesquels un système optique reçoit les faisceaux issus des différents éléments d'une scène pour les renvoyer sur des détecteurs. Ces détecteurs transforment ensuite l'énergie reçue en signal électrique par effet thermoélectrique, photoélectrique, etc.

Les radiomètres sont les capteurs électro-optiques les plus utilisés. Ils mesurent directement la puissance du rayonnement incident et fonctionnent en mode monospectral ou multispectral. On distingue plusieurs types de radiomètres :

- Les radiomètres non imageurs mesurent un rayonnement global. Les spectromètres qui filtrent certaines bandes de longueurs d'onde sont rattachés à cette catégorie.

- Les radiomètres à balayage ou scanners réalisent au contraire une image qui peut être monospectrale ou multispectrale. Le balayage est soit celui de l'objet au sol (champ observé), soit celui de son image formée par l'optique du capteur.

Les radiomètres à balayage par miroir utilisent un miroir plan monté sur un axe qui décrit une rotation ou des oscillations commandées par un moteur. A chaque tour ou oscillation correspond l'acquisition d'une ligne.

Le radiomètre H.R.V du satellite français S.P.O.T dispose de quatre barettes de 1728 détecteurs. Ce système permet d'analyser en une seule fois l'ensemble d'une ligne du paysage transversalement à la trace du satellite en éliminant les risques inhérents au fonctionnement du mécanisme d'oscillation ou de rotation d'un miroir (technique pushbroom).

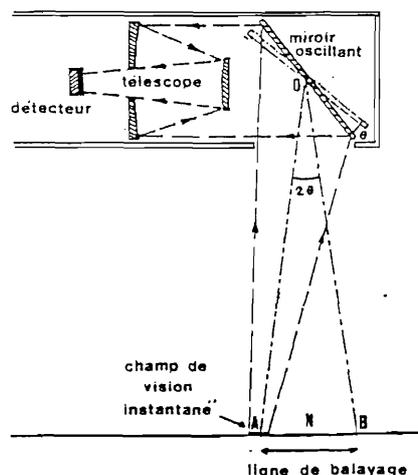


Fig. 1 Principe d'un scanner à balayage par miroir.

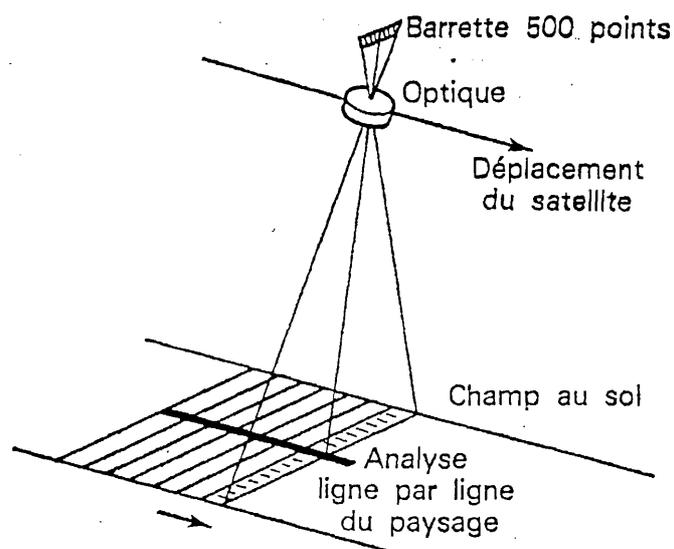


Fig. 2 Principe d'un scanner utilisant la technique pushbroom.

C. LES RADARS.

Les capteurs actifs sont principalement des radars utilisés dans le domaine des hyper-fréquences, pour lequel l'atmosphère est quasiment transparente. Cette propriété permet un fonctionnement par temps couvert ce qui confère un avantage considérable par rapport aux systèmes passifs dans les régions affectées par des conditions météorologiques défavorables (Cassanet, 1984). On distingue plusieurs catégories de radars :

- le radar latéral qui est généralement aéroporté et utilisé pour des opérations de nature cartographique dans les zones à forte nébulosité ou à couvert végétal très dense.
- le radar à ouverture synthétique (S.A.R) qui permet d'effectuer des mesures altimétriques très précises ou comme à bord d'E.R.S.1, de déterminer la vitesse des vents sur l'océan à partir de l'étude de la rugosité de la mer (diffusiomètre).

SECTION II.

METHODOLOGIE DE LA MISSION A.R.A.T.

I. DEROULEMENT DE LA CAMPAGNE AERIENNE.

A. LA MISSION A.R.A.T.

1/ DESCRIPTION DE LA MISSION A.R.A.T.

Afin de résoudre la problématique de départ qui consistait à estimer la biomasse d'algues vertes présente sur la plage de St-Michel-en-Grève à partir de données de télédétection, L'I.F.R.E.M.E.R a réalisé une campagne aéroportée baptisée mission A.R.A.T. (Avion de Recherche Atmosphérique et de Télédétection).

Le projet A.R.A.T. consistait comme son nom l'indique à mettre en oeuvre un avion équipé de deux capteurs passifs: le RAMI français du C.N.E.S et le C.A.S.I. (Compact Airborne Spectrographic Imager), instrument canadien loué à la société I.T.R.E.S.

L'expérience s'est déroulée à St-Michel-en-Grève et sur deux autres sites (Roscoff et la Baie de Morlaix) qui correspondaient chacun à une thématique particulière :

- Roscoff pour l'étude des couverts algaux
- la baie de Morlaix pour l'étude des sédiments.

Dans le cadre de ce mémoire, seules les données concernant le phénomène saisonnier de marée verte qui se produit sur la grève de St-Michel ont été utilisées et traitées.

Les dates de l'expérimentation ont été imposées par les forts coefficients de marée de la mi-septembre 1993. Ils étaient respectivement de 116 le 17/09/93 et de 115 et 113 le 18/09/93. L'acquisition des images a été réalisée dans une fenêtre horaire correspondant à l'heure de la basse mer +/- 1h30.

2/ LES CONDITIONS METEOROLOGIQUES.

Un suivi météorologique a été réalisé durant toute la campagne par la cellule de la Météorologie Nationale implantée sur l'aéroport de Guipavas. Pour que la mission soit un succès, il était impératif que les images soient acquises par temps clair et dégagé. Chaque matin avant le décollage, des prévisions étaient transmises par télécopie à l'équipe coordonnant la mission.

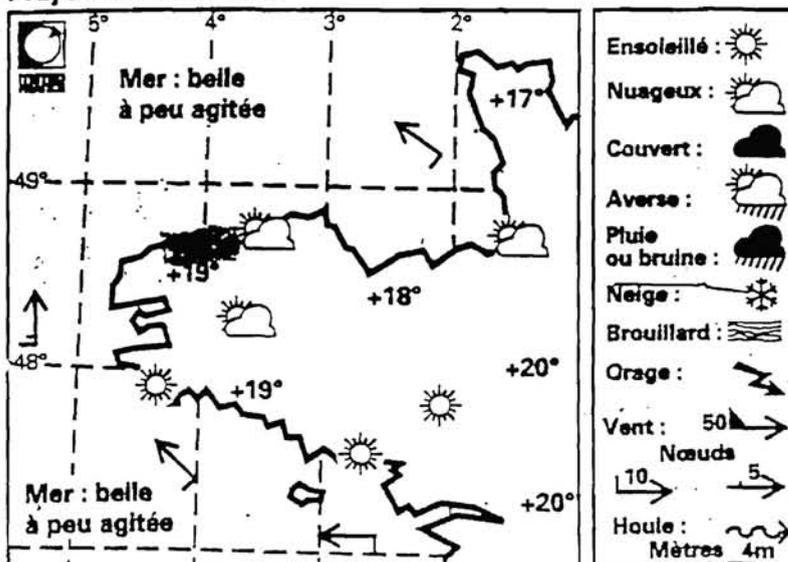
Le 17 Septembre, le plafond nuageux était bas au-dessus du site et l'acquisition des scènes s'est déroulée à une altitude beaucoup plus basse que prévu.(700 m).

Le 18 Septembre les conditions météorologiques étaient optimales (cf. carte de prévision du 18/09/93) avec de belles éclaircies et les acquisitions des scènes RAMI et C.A.S.I. ont été réalisées à deux niveaux de vol (1500 et 3000 m) conformément au plan de vol.

LE TEMPS



Aujourd'hui à 13 h



PRÉVISIONS POUR LA JOURNÉE DU 18 SEPTEMBRE EN BRETAGNE OCCIDENTALE. — Très belles éclaircies puis le ciel se couvrira en soirée à l'avant d'une nouvelle perturbation. Vent modéré devenant assez fort de sud à sud-ouest. Températures stationnaires.

POUR LA MARINE (domaine côtier entre La Hague et Saint-Nazaire). — Vent de sud 10 à 15 nœuds (3-4 B) fraîchissant 15 à 20 nœuds (4-5 B) en fin de journée à la pointe de Bretagne. Mer devenant peu agitée. Visibilité 5 à 10 milles.

POUR L'AGRICULTURE. — Pluie prévue : traces.

Température maximale : 19° à 20°.

Température minimale : 7°.

Hier à 13 h

Fig. 3 : Situation météorologique du 17 et 18 Septembre 93.

3/ L'ORGANIGRAMME DECISIONNEL.

Afin de faire face aux aléas de la météorologie, un organigramme décisionnel avait été réalisé afin de prévoir le déroulement de la mission en cas de conditions météorologiques contraires. Si les conditions se révélaient très défavorables sur le littoral breton, des sites de report avaient été définis en Charente Maritime.

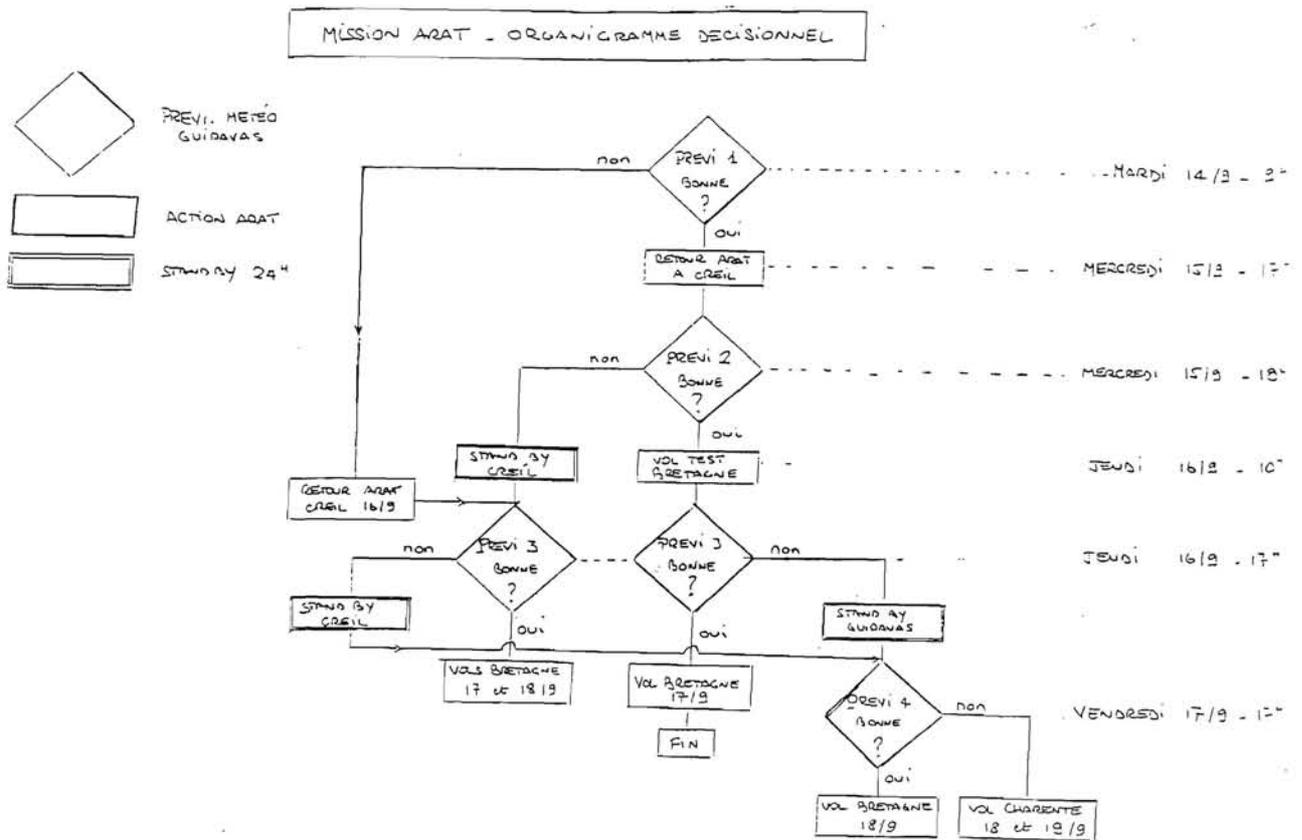


Fig. 4 : Organigramme décisionnel de la mission A.R.A.T.

B. LE SECTEUR GEOGRAPHIQUE CONCERNE.

1/ LE PHENOMENE DE MAREE VERTE.

Les proliférations littorales d'algues macrophytes du genre *Ulva sp.* sont des phénomènes mondialement connus depuis plusieurs dizaines d'années. Sur le littoral breton, la production d'ulves atteint 100 à 150.000 tonnes par an. Ce phénomène de marée verte est une conséquence de l'eutrophisation des eaux par les nitrates et les phosphates.

Dans le cas de la Bretagne, les nitrates sont issus de la pollution diffuse agricole. Les apports de phosphates, en plus d'une origine agricole par le biais du ravinement, proviennent de la pollution urbaine insuffisamment traitée en stations d'épuration.

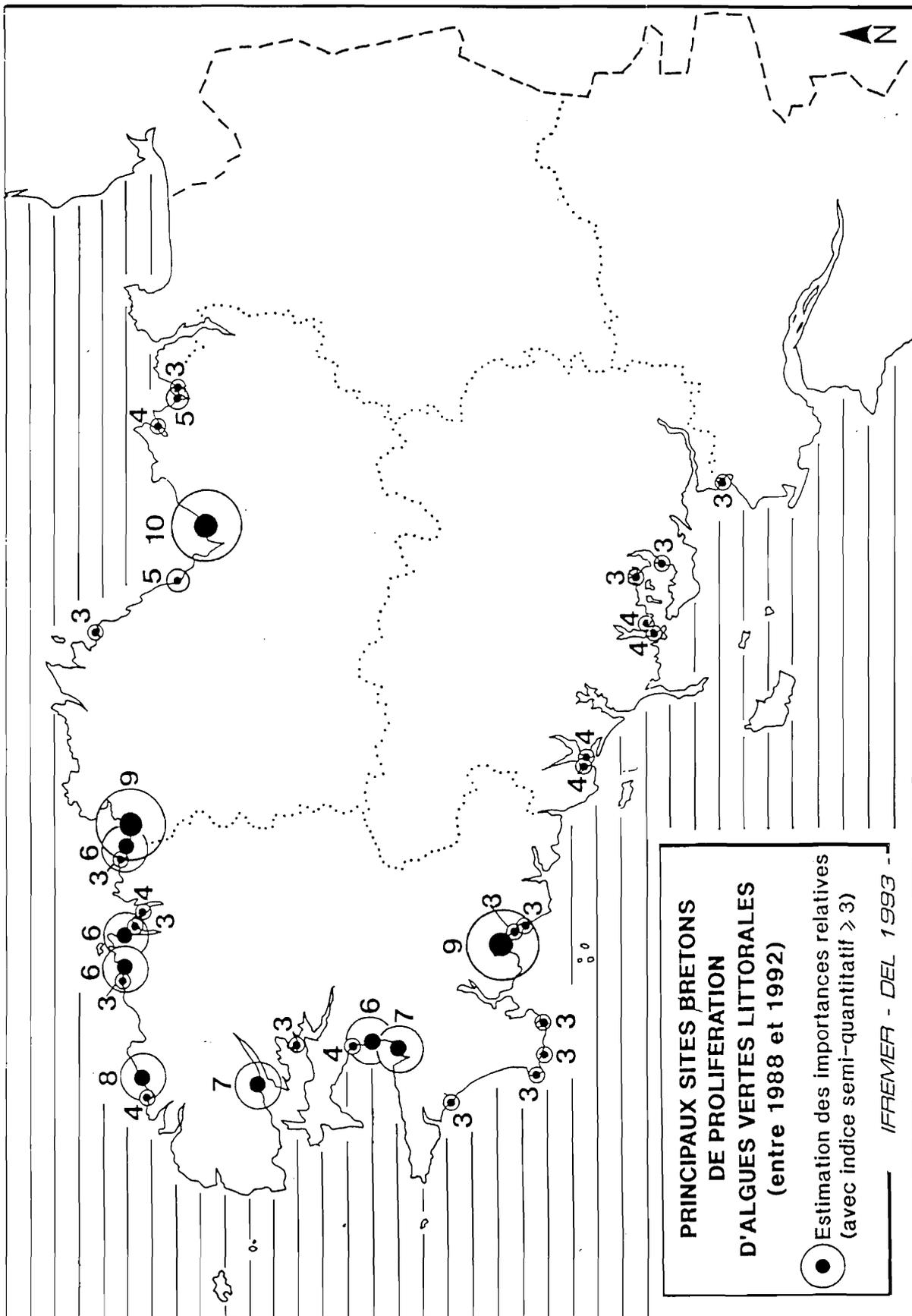
Les vecteurs de ces apports excessifs en sels nutritifs sont les rivières qui collectent nitrates et phosphates sur l'ensemble de leurs bassins versants et les rejettent dans le milieu littoral.

A St-Michel-en-Grève, l'eutrophisation se manifeste à la faveur d'apports en azote et en phosphore provenant des épandages d'engrais dans les terres constituant le bassin versant du Yar. Les proliférations d'ulves ne se développent que lorsque l'apport d'éléments nutritifs coïncident avec la période de croissance végétale (fin du printemps - début de l'été). Les eaux de ressuyage provoquent une accumulation du phosphore et de l'azote dans la rivière qui les rejette ensuite dans la Manche.

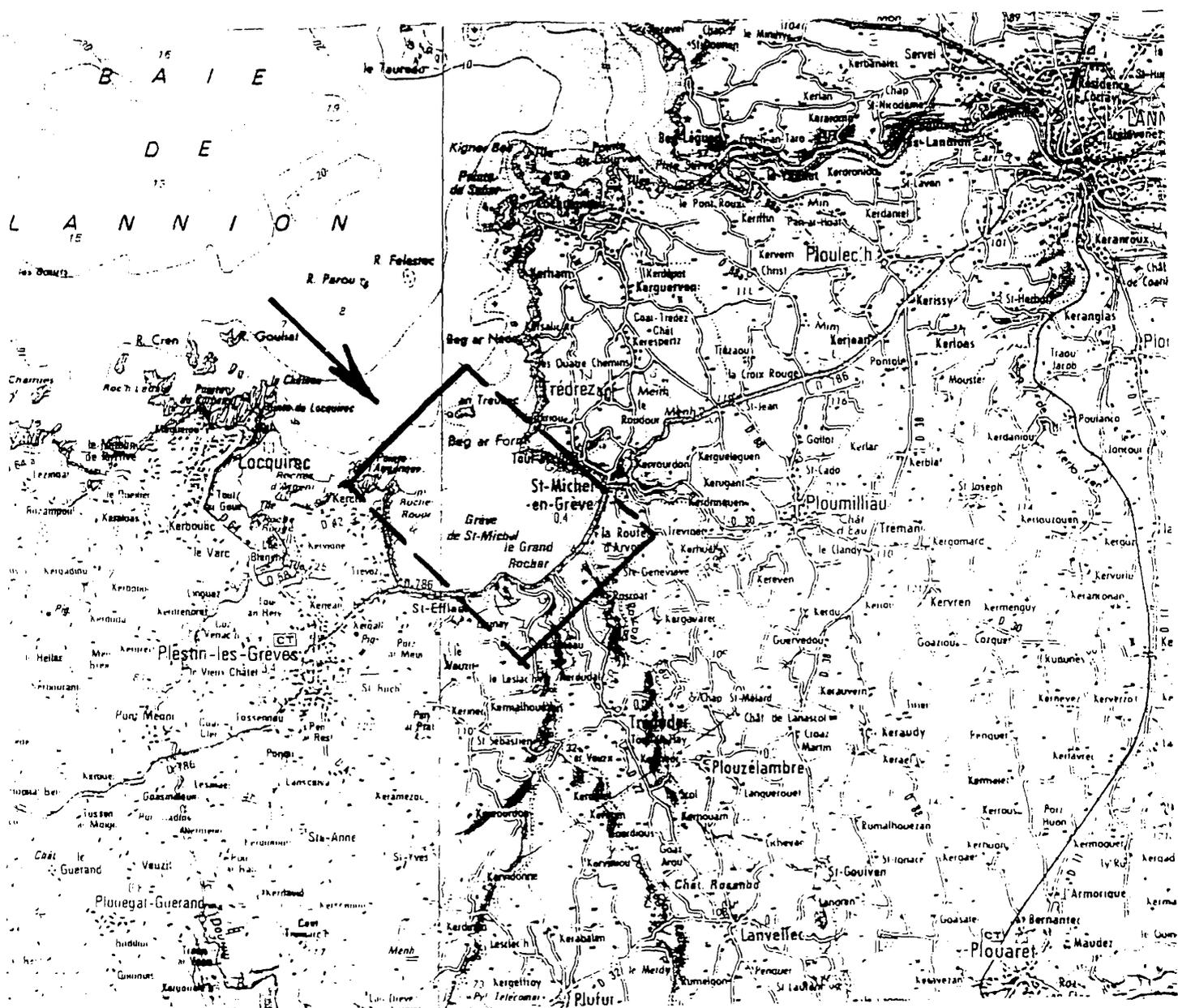
Trois conditions doivent être réunies pour qu'il se crée une marée verte à Ulves (*Ulva.sp*) sur un littoral sableux :

- Un estran de sable fin à faible pente (effet de lagunage).
- Une arrivée d'eau douce à flux de nitrates suffisant, débouchant dans la zone de production algale en flottaison.
- Une circulation résiduelle de marée très faible ou nulle provoquant un piégeage de la masse d'eau en fond de baie et, par là même, des ulves qui y baignent.

Lorsque ces conditions sont réunies, les ulves prolifèrent et constituent une nuisance pour les riverains, quand les échouages en haut de plage se dégradent. Cette nuisance olfactive est très pénalisante pour les communes côtières : elle gêne l'activité touristique locale et génère une charge supplémentaire dans le budget communal. Le coût du ramassage des ulves échouées sur les plages a pu être estimé à environ 2,5 millions de francs par an. La prolifération d'ulves gêne également les professionnels de la mer car elle entrave les activités conchylicoles.



Carte 1 : Sites bretons touchés par le phénomène de marée verte.
(d'après J.Y Piriou, 1987).



2875 lignes

Fréquence acquisition		2,4	
Heure entrée / sortie	14,25	14,26	loc
Altitude GPS	10310 ft		
dérive / corrigée {o/n}:	-2	oui	
cap géog. Litton	137		
vitesse sol	180 kts		
écart sur axe		NC	

MTO Cu + ombres Cu

NOTES ©

Carte 2 : Plan de survol de la grève pour l'acquisition de la scène RAMI à 3000 m.

2/ DESCRIPTION DU SITE.

La grève de Saint-Michel est située dans le département des Côtes d'Armor entre Les communes de Plestin-les-Grèves et de St-Michel-en-Grève. Comme son nom l'indique, il s'agit d'une grève ou grande étendue de sable blanc qui descend en pente douce vers la mer. Elle est orientée du nord-ouest vers le sud-est et mesure environ 3,5 km de long sur 2,2 km de large.

La grève de St-Michel est bordée à l'ouest et à l'est par des versants schisteux qui ont des commandements d'environ cinquante mètres. Dans sa partie la plus au sud, la grève est bordée par un talus convexo-concave dont le commandement est d'environ quatre-vingt-dix mètres. La route départementale D 786 qui relie les communes de St Michel-en-Grèves et de St-Efflam longe ce talus. Au sud-est le talus s'avance suivant une direction nord-sud et forme un promontoire de 84m d'altitude que l'on nomme le Grand Rocher. Le grand Rocher est constitué de quartzite.

Dans sa partie centrale, le talus est entaillé par une rivière : le Yar qui s'écoule ensuite sur la Grève à basse mer. Plus au nord-est on remarque une autre échancrure dans le talus due au ruisseau de Roscoat qui s'écoule lui aussi sur la grève avant de se jeter dans la Manche. Le bassin versant du Yar et du Roscoat a une superficie de 116 km². et le Yar reçoit 600 mm de précipitations utiles annuelles. Les paysages agraires de ce bassin versant sont constitués de bocage et de semi-bocage. Le bassin versant est occupé à 75% (5644 ha) par la surface agricole utile (S.A.U) , à 23,7% par les bois et la surface urbanisée ne représente que 1,3% de la superficie totale.

La grève de Saint-Michel fait partie des nombreux sites des Côtes d'Armor touchée par le phénomène de marée verte.



Fig. 5 : Marée verte sur la grève de St Michel.

3/ FACTEURS PHYSIQUES INFLUENCANT L'ECHOUAGE.

a) Morphologie.

Sur la grève les courbes de niveaux sont parallèles au niveau des basses mers et au tracé du fond de la baie. Elles sont régulièrement espacées (cf fig. 6) depuis le zéro des cartes marines jusqu'à la mi-marée (+5 m) . La faible pente de la plage (0,3% en moyenne) facilite les échouages d'ulves.

Les ripple marks (rides de plage) et les dunes hydrauliques constituent des pièges lors de la marée descendante. Des échouages peuvent se produire à tous coefficients de marée mais les coefficients les plus forts offrent une probabilité plus importante de les générer. En effet, les courants de marée ont tendance à "pousser" les ulves en haut de plage lors du flot. Plus celles-ci montent haut (gros coefficient de marée), plus elles ont de chance de se faire piéger au jusant.

De plus l'existence dans le haut de l'estran d'un sillon pré-littoral contribue à retenir les ulves. Ceci se fait d'autant plus en période estivale que le sillon s'est engraisée, suivant un processus périodique classique.

En effet à la suite de la déstabilisation du sable par la marée noire de 1978 et par les travaux qui ont suivi, le sable du bas de plage tend à migrer vers le haut, et une sorte de barre de faible relief se forme au voisinage du niveau des hautes mers de niveau ordinaire (*Pinot, 1987*). Cette barre débute un peu en avant du Grand Rocher et s'étire jusqu'à la hauteur de la commune de St-Michel-en-Grève. La barre est échancrée par les eaux du Yar et du Roscoat. Ces deux rivières traversent la barre sableuse en un seul point situé à égale distance des deux embouchures, si bien que les eaux décrivent des coudes sur le haut de l'estran afin de rejoindre cet exutoire.

La grève est constituée de sablons, bien triés, dont la granulométrie varie entre 63 et 130 microns. La distribution des sédiments les plus fins au centre de l'anse occidentale correspond à la zone la plus abritée de la baie et la granulométrie plus grossière des niveaux supérieurs correspond avec l'augmentation de l'hydrodynamisme, due à la pente plus accentuée.

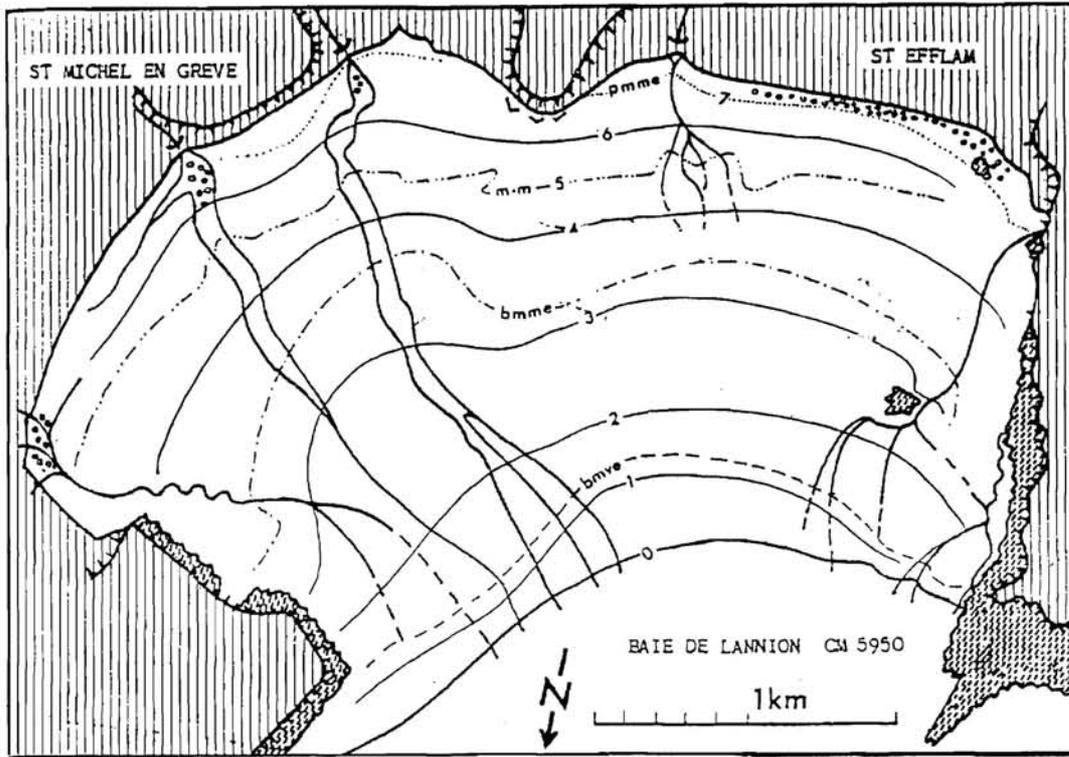


Fig. 6 : La lieue de Grève : Bathymétrie en m et niveaux de marée.
(d'après Chassé, 1972).

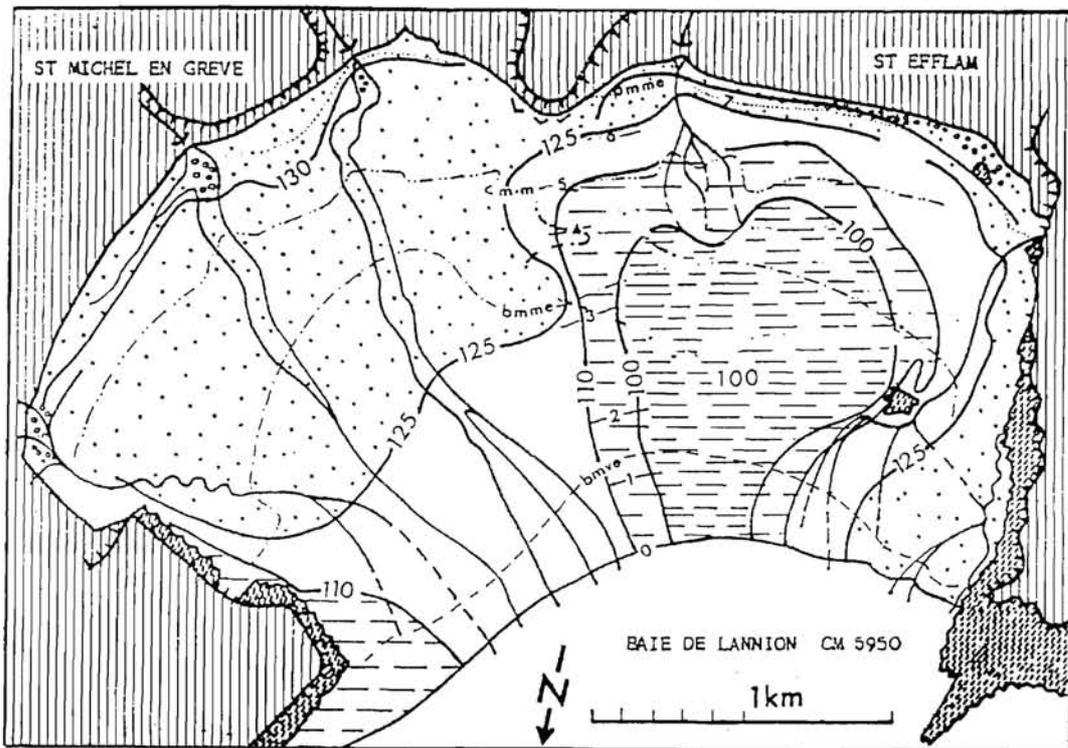


Fig. 7 : Granulométrie, Courbes d'isomédiannes en $10^{-3}m$.
(d'après Chassé, 1972).

b) Courantologie.

Le phénomène dominant sur le littoral breton est la marée semi-diurne. La mer se retire pour revenir 12 h 25 mn plus tard. Le déplacement de telles masses d'eau dans un laps de temps aussi courts entraîne des courants importants près des côtes. Ces courants sont très variables géographiquement et dépendent de la forme du littoral, de la profondeur et des caractéristiques de la marée (P. Garreau, 1993)

Les substances nutritives responsables de la prolifération des ulves restent confinées près de la côte car au large de la Baie de Lannion il existe des courants circulaires (cf fig 8) qui empêchent l'évacuation de l'azote et du phosphore. Le long du rivage de la grève de St-Michel, les courants résiduels sont très faibles (vitesse maximum = 0,25 m/s), entraînant un renouvellement très lent des eaux.

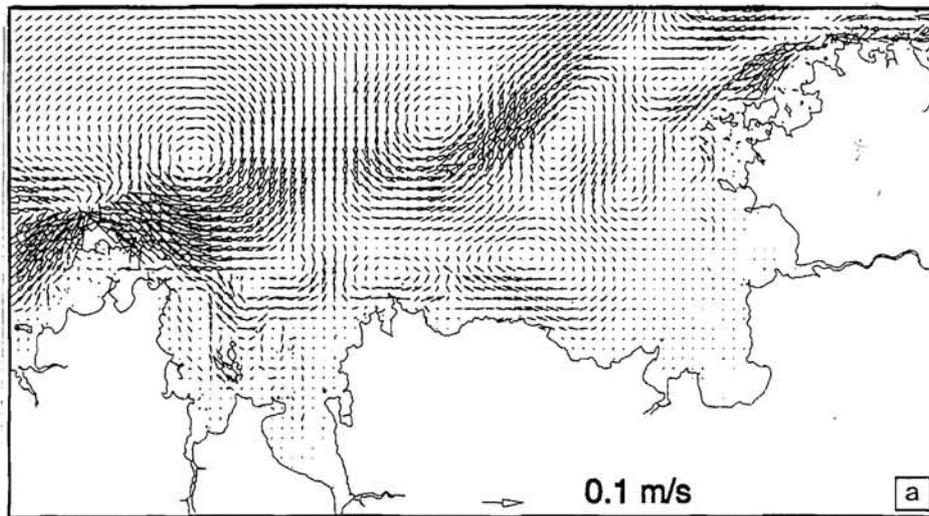


Fig. 8 : Courants résiduels lagrangiens dans la baie de Lannion. (d'après P.Garreau, 1993).

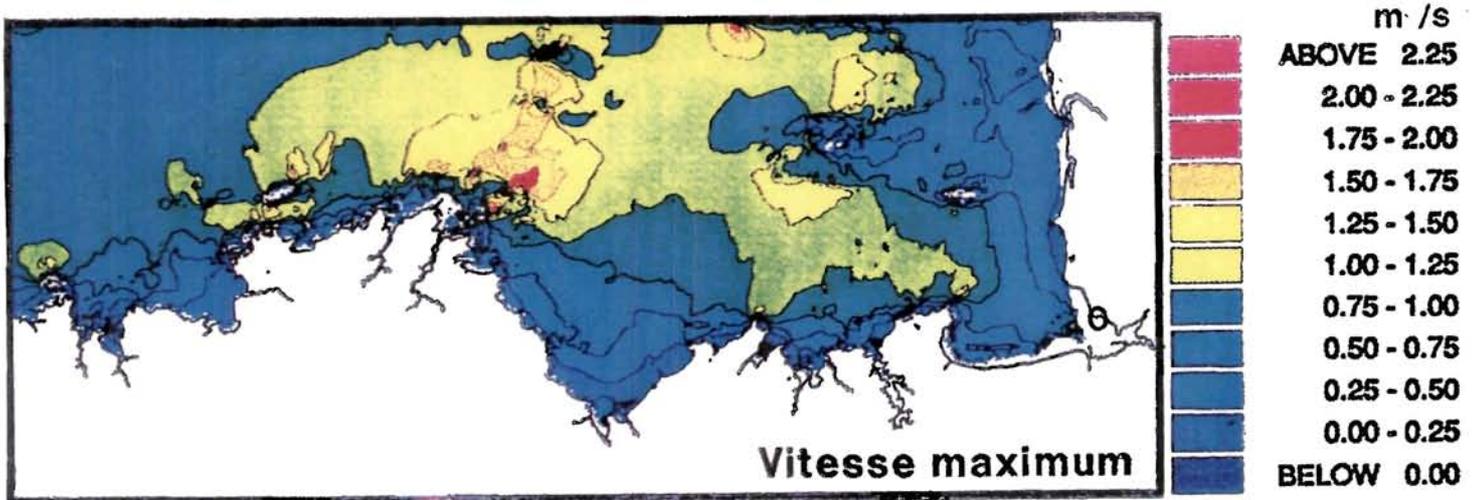


Fig. 9 : Intensité maximum du courant au cours d'un cycle de marée.

c) Les vents.

D'après Louineau, 1985, les vents ont un double rôle. Ils définissent les zones d'échouage et les périodes pendant lesquelles les ulves s'échouent. La houle a tendance à pousser les proliférations d'ulves du bas de l'eau dans le sens de son propre déplacement. A St-Michel-en-Grève les dépôts d'ulves ont une orientation générale nord-ouest sud-est du fait de la dominance des vents de nord-ouest (cf fig 10).

Les échouages importants se font en période de calme car les ulves ont le temps de se déposer sur le sable, alors que les fortes houles brassent les algues et les enlèvent de la plage lorsque la marée descend. A l'entrée de la baie de St-Michel, la houle maximale annuelle enregistrée n'atteint seulement que 3,50 m.

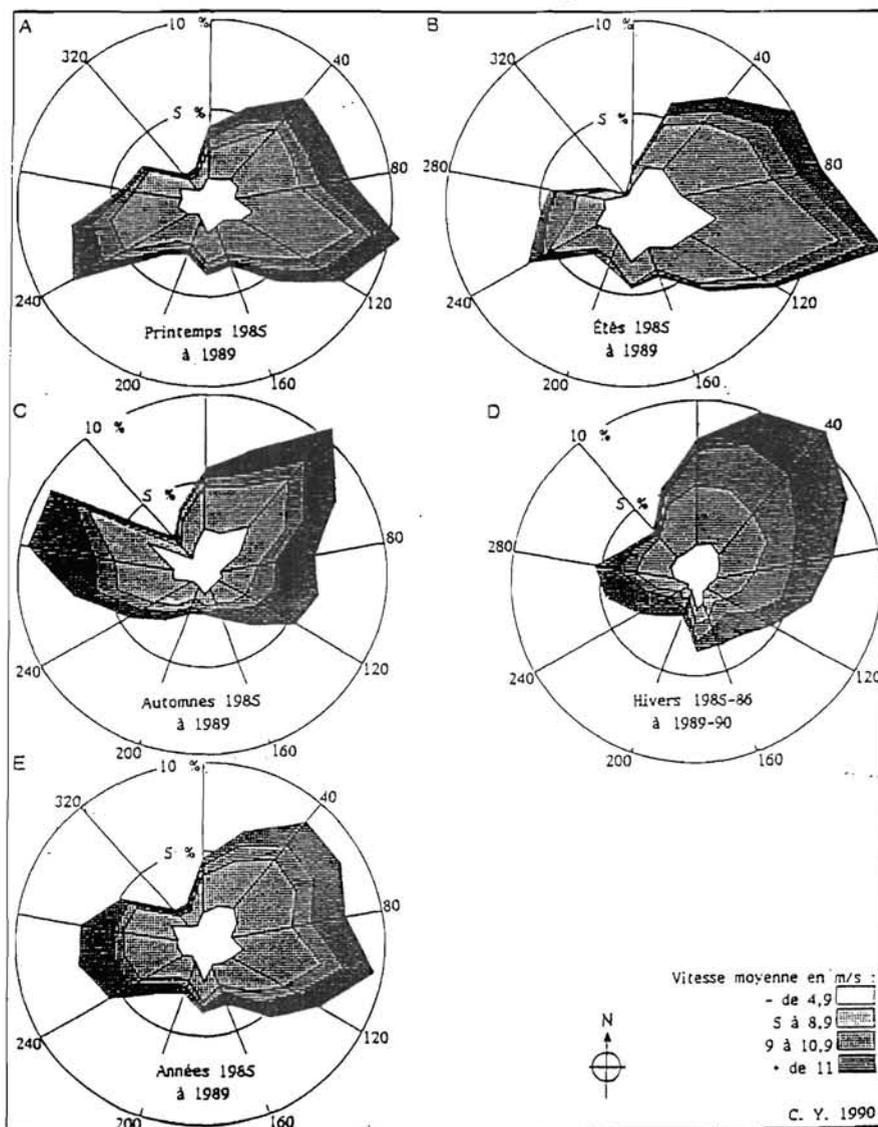


Fig. 10 : Sémaphore de Batz. Fréquences de la direction des vents pour chaque saison et pour l'ensemble des années 1985 à 1989 : représentation catagraphique. (d'après C.YONI, 1990).

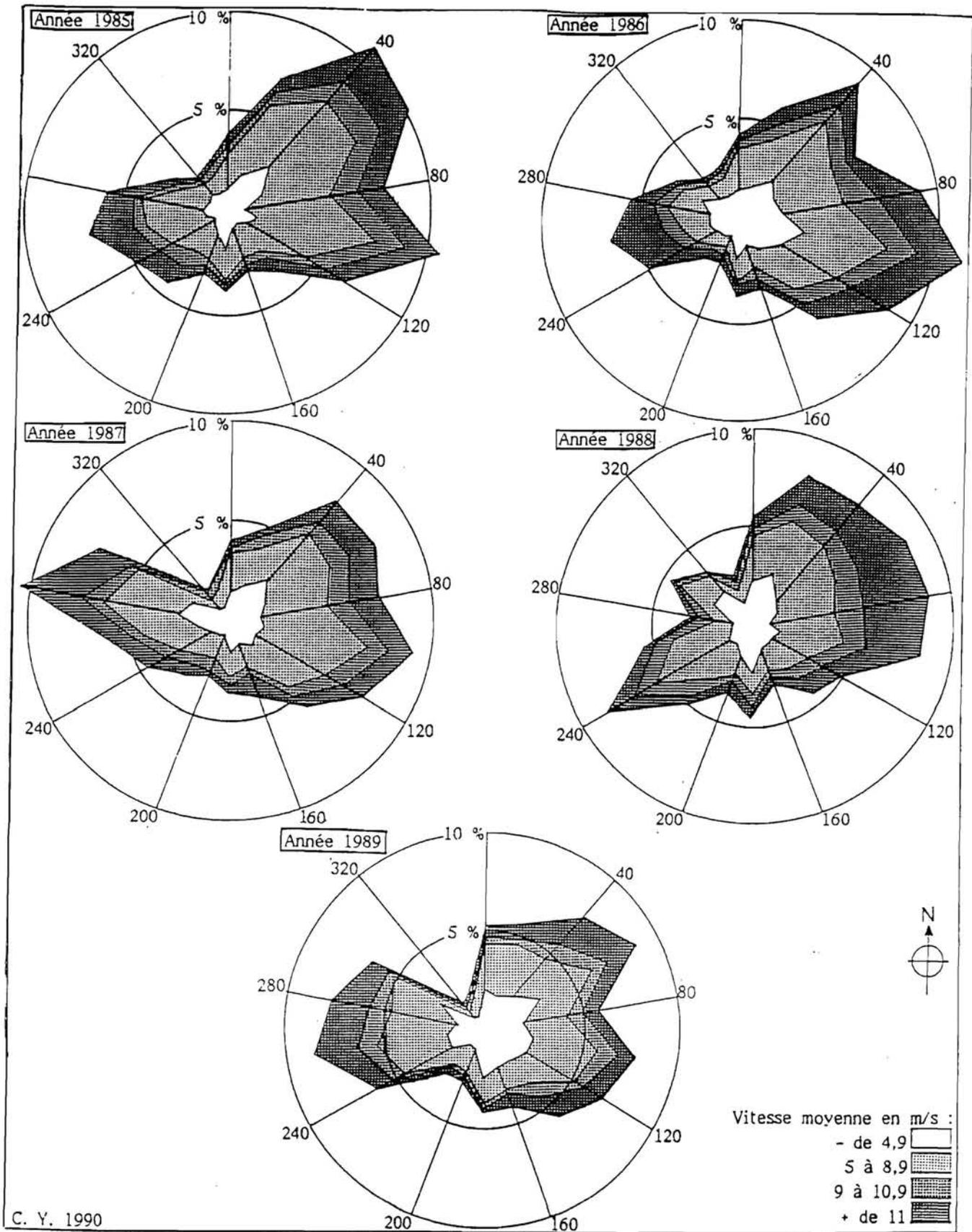


Fig. 11 : Sémaphore de Batz. Fréquences de la direction des vents pour les années 1985 à 89 représentation catagraphique (d'après C.Yoni, 1990).

II. LES MISSIONS DE TERRAIN.

Pour valider les données et préparer la campagne aéroportée, il fut nécessaire de réaliser deux missions de terrain qui se déroulèrent respectivement en Août et en Septembre 1993. Cette dernière mission s'est déroulée en même temps que le vol de L'A.R.A.T.

A. LA MISSION DE TERRAIN D'AOUT 93

Le but de ces deux campagnes étaient d'acquérir des spectres d'algues vertes dans diverses conditions. Dans ce but un spectromètre de terrain, le SPECTRON SE590 a été loué à un institut anglais : le N.E.R.C. (Natural Environment Research Council), rattaché à la faculté de Géographie de l'Université de Southampton.

1/ LES ALGUES VERTES.

Les algues responsables du phénomène de marée verte sur la grève de St-Michel sont des algues macrophytes du genre *Ulva.sp* ou Ulves. Ce type d'algue est composé d'une fronde lobée translucide de couleur verte et vit fixé sur les rochers ou flotte détaché.

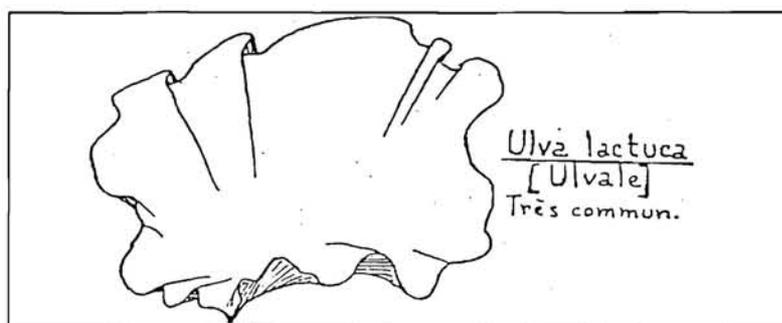


Fig. 12 : Représentation d'une ulve (*ulva.sp*).

2/ METHODOLOGIE DE MISE EN OEUVRE DU SPECTRON.

Le SPECTRON SE590 est un spectro-radiomètre de terrain léger capable d'acquérir des mesures spectrales tous les 11 nm dans une gamme de longueur d'onde allant de 400 à 1100 nm. Cet instrument comporte trois éléments différents reliés par des câbles :

- Une tête mesurant la luminance de la cible.
- Une tête mesurant l'éclairement incident.
- Un boîtier de contrôle permettant de déclencher les mesures.

La collecte des spectres est séquentielle. On mesure tour à tour le spectre de la cible puis celui de la référence. La tête mesurant la luminance de la cible est fixée au bout d'une perche afin d'éviter que l'ombre de la personne qui manipule ne vienne interférer dans les mesures. Le spectre de référence peut être obtenu de deux façons : en utilisant un panneau blanc de calibration dont la réflectance est connue (99%) ou en mesurant l'éclairement incident à l'aide de la tête prévue à cet effet. Dans ce second cas on fixe la tête d'éclairement sur un trépied en s'assurant de l'horizontalité du dispositif à l'aide d'un niveau à bulles.

Une fois les mesures effectuées, elles sont ensuite sauvegardées sur une Minicassette à l'aide de l'enregistreur inclus dans l'unité centrale. Les spectres ainsi collectés sont visualisés et traités sur un micro-ordinateur portable de type P.C. avec un logiciel fourni par le N.E.R.C.

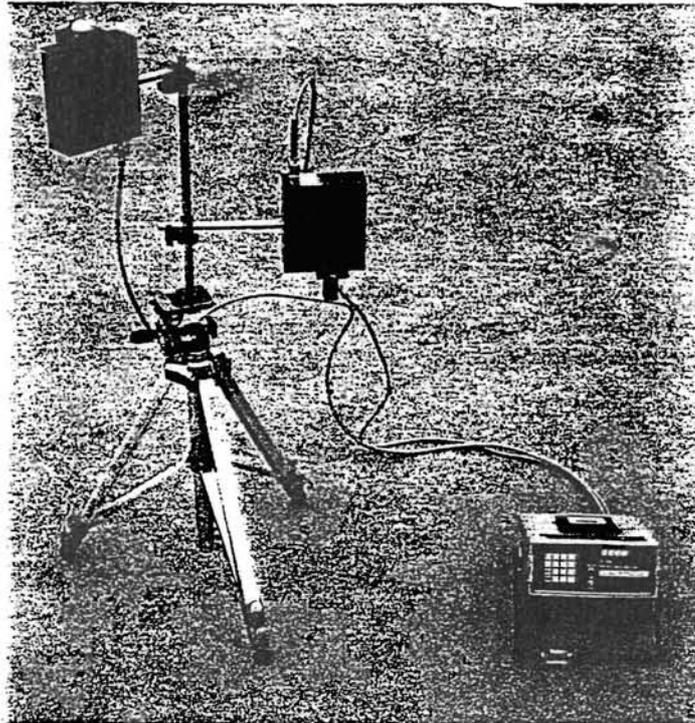


Fig. 13 : Le spectro-radiomètre de terrain SPECTRON SE 590.



Fig. 14 : Mise en oeuvre du SPECTRON sur le terrain.

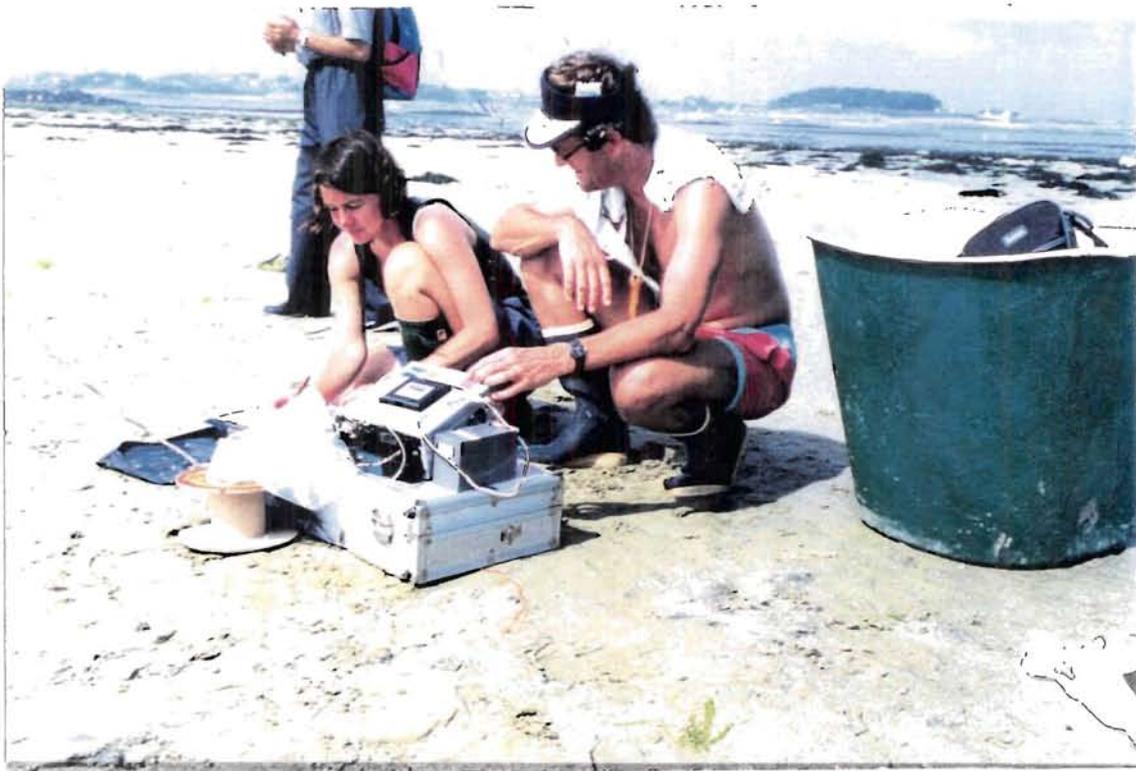


Fig. 15 : Mise en oeuvre du SPECTRON sur le terrain.

3/ LES DIFFERENTS TYPES DE MESURES.

A marée basse les 16 et 17 Août 1993, la grève de St-Michel était découverte sur environ 1,5 km. Les mesures effectuées avec le SPECTRON SE590 ont concerné uniquement les populations d'Ulves (*Ulva sp.*) largement majoritaires et le sable.

Tout d'abord on a effectué des mesures sur les ulves pour voir comment leur signature spectrale était susceptible de varier en fonction de la quantité d'eau qui les recouvrait.



Fig. 16 : Mesure de la réflectance des ulves immergées.

Dans un deuxième temps, on a empilé des ulves et procédé à des mesures pour voir la variation de la signature spectrale en fonction du nombre de couches empilées. On a donc effectué des mesures sur quatre couches empilées puis on a retiré à chaque mesure une couche d'ulves.

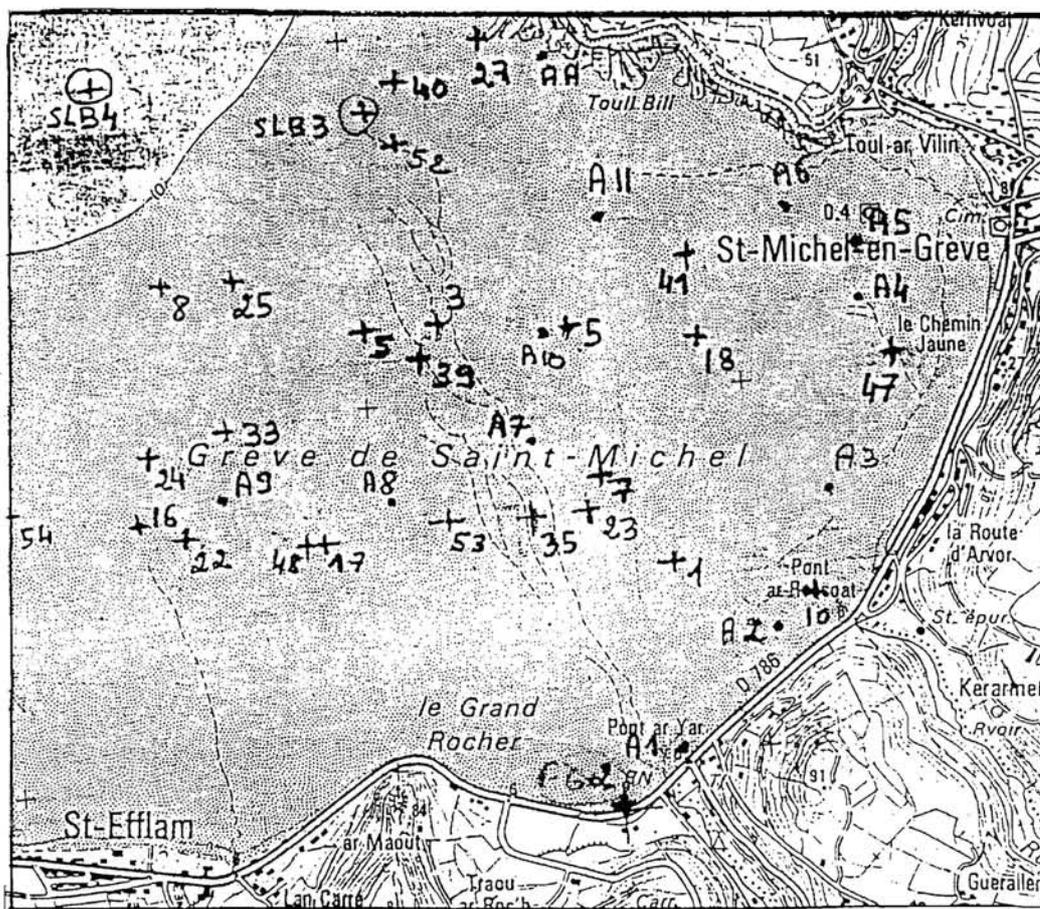
B. LA MISSION DE TERRAIN DE SEPTEMBRE 1993.

1/ ACTIVITES EFFECTUEES SUR LE TERRAIN.

Cette mission s'est déroulée le 17 Septembre 1993, simultanément avec le vol à 700 m de l'avion. Elle a nécessité deux équipes :

- la première composée de Francis Gouin et Tanguy Le Guen était chargée du positionnement des quadrats et des pesées des algues à l'aide d'un peson.
- la seconde équipe composée de Pascal Tallec et de René Charles Keppel du C.E.V.A. (Centre d'Etude et de Valorisation des algues) était chargée de localiser les différentes stations à l'aide d'un G.P.S. (Global Positionning System).

Les emplacements des stations sont reportés sur la carte suivante :



A points de terrain A.R.A.T
+ points de terrain J.Y. Piriou

Carte 3 : Emplacements des quadrats sur la grève.

2/ METHODOLOGIES D'ESTIMATION DE LA BIOMASSE.

a) Estimation à partir de photographies aériennes.

Un suivi de la prolifération des Ulves avait déjà été effectué et des estimations de la biomasse émergée avaient été réalisées par le département de l'Environnement Littoral (D.E.L.) de L'I.F.R.E.M.E.R et par le C.E.V.A. Ces estimations reposaient sur une méthode fondée sur l'utilisation conjointe de photographies aériennes et d'échantillonnages de terrain. Deux types de photographies au 1/ 20.000^{ème} étaient utilisées :

- un lot de photographies couleur pour établir un découpage en zones et sous-zones, dans l'eau et sur l'estran, d'équidensités de coloration verte.

- un lot de photographies infrarouges, noir et blanc, afin de discerner les limites entre estran et zones couvertes d'eau (frange d'eau littorale, cours des filières d'eau douce).

Cette méthode nécessite au moment de la prise de vue, une importante équipe de terrain chargée d'effectuer des mesures de densité des algues sur l'estran et dans l'eau.

L'estimation de la biomasse se fait à partir d'agrandissements au 1/10.000^{ème} des photographies couleurs couvrant le mieux le secteur de répartition des algues vertes. Ensuite une confrontation entre photographies est réalisée afin d'aboutir à un classement global des intensités de vert relatives à un même mode de dépôt.

La surface de chacune des sous-zones est calculée par la méthode de pesée de calques. Enfin on multiplie la surface ainsi déterminée par la densité qui lui a été affectée. La somme des biomasses obtenues par sous-zone, donne la biomasse totale présente sur la grève.

Le but de la mission A.R.A.T était de substituer à cette méthode d'estimation, une autre méthode d'estimation de la biomasse. Cette nouvelle méthode serait beaucoup plus précise du fait de l'emploi de la haute résolution spatiale et beaucoup plus souple car nécessitant un échantillonnage de terrain moins important.

b) Méthodologie spécifique à l'expérience A.R.A.T.

La dimension des quadrats réalisés sur le terrain était donc fonction des résolutions spatiales prévues lors du vol A.R.A.T. (cf. carte). Pour les résolutions du C.A.S.I d'environ 3-4 mètres on a utilisé des quadrats de 4 mètres de côté et pour les résolutions plus fines du RAMI (0.80 m et 1.60 m) des quadrats de 2 mètres de côté.

Ces quadrats ont été positionnés au G.P.S différentiel et placés dans les zones où la couverture d'algues était homogène.

L'étape suivante a consisté à peser suivant la dimension du quadrat, soit la totalité, la moitié ou le quart de la biomasse. Les biomasses ont été ensuite évaluées en m² (biomasse représentative de l'ensemble du quadrat échantillonné).

3/ RESULTATS DE L'ECHANTILLONNAGE.

Les résultats des estimations de biomasse dans les quadrats sont rassemblés dans le tableau suivant :

Stations	Coordonnées			Biomasse (kg/m ²)	Pourcentage de Couverture
	X	Y	Qualité		
A1	164737 164731 164727 164732	124995 124992 124997 125000	8D9 8D9 8D9 8D9	28,14	100
A2	165165 165160 165156 165160	125336 125334 125338 125343	8D9 8D9 8D9 8D9	1,44	100
A3	165207 165204 165200 165202	125703 125701 125703 125706	7D9 7D9 7D9 7D9	1,23	33
A4	165286 165277 165285	126082 126091 126099	8D9 8D9 8D9	0,04	30
A5	165257 165252 165248 165253	126381 126377 126381 126385	8D9 8D9 8D9 8D9	0,86	5
A6	165189 165183 165179 165184	126472 126486 126473 126476	8D9 8D9 8D9 8D9	0,92	12
A7	164437 164432 164428 164432	125843 125839 125844 125847	8D9 9D9 9D9 9D9	0,72	25
A8	164041 164037 164034 164038	125754 125751 125754 125757	9D9 9D9 9D9 8D9	2,75	40
A10	164185 164190 164176 164182	126157 126154 126159 154162	8D9 8D9 8D9 8D9	2,67	55
A11	164621 164618 164615 164618	126521 126519 126522 126524	7D9 7D9 7D9 7D9	1,61	60
AA	164525 164516 164506 164516	126939 126931 126938 126947	7D9 7D9 7D9 7D9	1,81	55

Tableau 1 : Vêrités de terrain réalisées pour l'expérience A.R.A.T.

SECTION III. MOYENS ET TECHNOLOGIE.

I. VECTEUR ET CAPTEURS AEROPORTES UTILISES.

A. L'AVION A.R.A.T.

On désigne par vecteur, la plate-forme portant les instruments qui est en l'occurrence, ici, un avion, propriété de L'I.G.N., de Météo-France et de L'I.N.S.U (Institut National des Sciences de l'Univers).

L'appareil est un Fokker 27, modifié pour être compatible avec les exigences des campagnes scientifiques. Sa voilure a été modifiée afin d'augmenter l'autonomie de vol et un groupe auxiliaire de puissance a été installé afin d'alimenter les instruments scientifiques.

Des baies équipées de verres optiques ont été également aménagées sous le fuselage afin de pouvoir utiliser des caméras ou des spectromètres-imageurs tels que le RAMI ou le C.A.S.I.

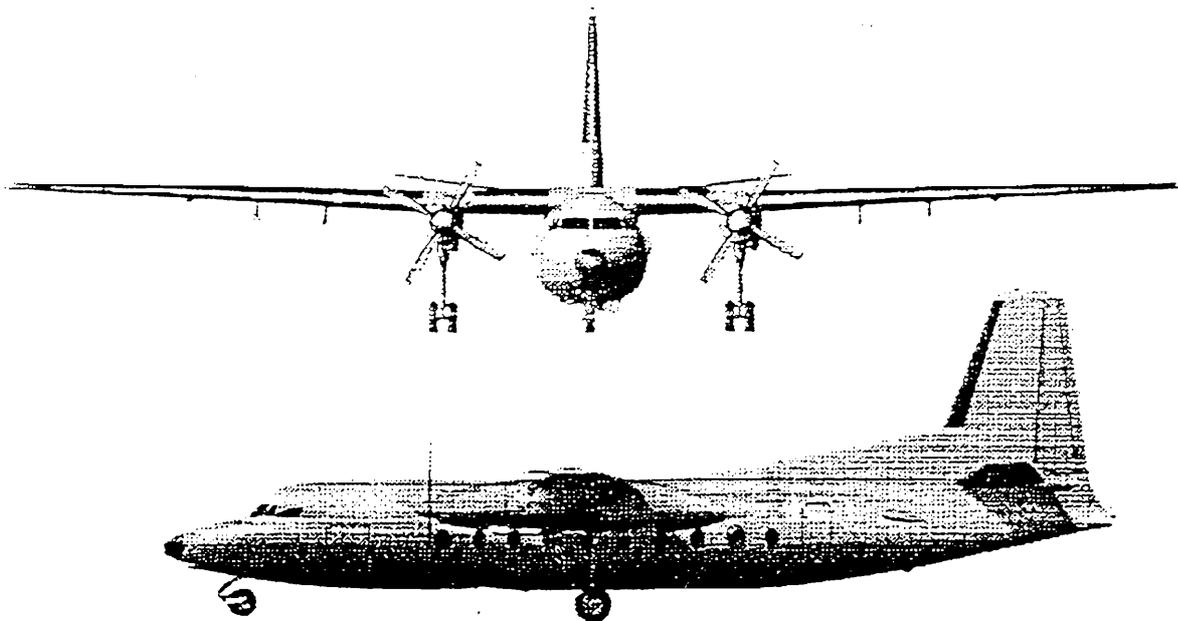


Fig. 17 : L'avion de Recherche en Atmosphère et de Télédétection.

Fokker 27-MK 700 pressurisé	Bi-turbopropulseur
Envergure	29 m
Longueur	23,5 m
Hauteur	8,5 m
Masse maximum décollage	17 t
Masse à vide	11,5 t
Charge scientifique utile	1,6 à 2,6 t
Longueur piste décollage	1400 m
Vitesse de croisière à 5800 m	350 km/h (190 noeuds)
Vitesse minimale de travail	240 km/h (130 noeuds)
Altitude plafond	5800 m
Altitude de service	5800 m
Autonomie de vol	3h à 4h30
Potentiel de vol	5000 h
Base d'utilisation scientifique	300 h annuelles
Pilotes	2
Navigateur	1
Directeur scientifique	1
Ingénieur-Informaticien	1
Ingénieur Capteur-Electronique	1
Passagers scientifiques	4

Tableau 2 : Caractéristiques techniques de l'appareil.

B. LE RAMI.

1/ CARACTERISTIQUES TECHNIQUES.

Le RAMI est l'instrument qui a permis d'étudier l'apport des hautes résolutions spatiales. Il fut conçu à l'origine pour simuler les prises de vue du satellite S.P.O.T. et sert aujourd'hui à préparer les futures missions spatiales avec des capteurs à très haute résolution.

Cet instrument est un radiomètre multispectral à quatre canaux dans le visible et le proche infrarouge (P.I.R.). Les quatre canaux couvrent les longueurs d'ondes suivantes :

bande bleue	450-510 nm
bande verte XS1	510-600 nm
bande rouge XS2	610-700 nm
bande P.I.R XS3	760-950 nm

Le RAMI comme son nom l'indique fait appel à un principe de balayage. Chacun des 1728 éléments d'une barrette C.C.D. délivre un signal électrique proportionnel à la luminance du pixel correspondant au sol. L'ensemble de ces signaux simultanés constitue une image. L'analyse ligne par ligne du paysage s'effectue au fur et à mesure que l'avion avance. Au cours des vols, différentes résolutions spatiales ont ainsi pu être testées à l'aide de cet instrument. Ainsi à 1500 m, on dispose d'une résolution de 0.80 m; et à 3000 m de 1,60 m.

Lors de l'expérience, le RAMI fut utilisé principalement pour deux applications

:

- L'estimation des pourcentages de couverture des fucales dans le secteur de Roscoff.
- L'estimation des biomasses d'ulves dans le secteur de St-Michel-en-Grèves.



Fig. 18 : Le radiomètre à balayage RAMI .

2/ SPECIFICITES DES BANDES XS1 ET XS2 (VISIBLE).

XS1 : 0.5 μm à 0.6 μm et XS2 : 0.61 μm à 0.68 μm

La réflectance dans le visible permet de préciser les délimitations des peuplements et certains aspects géomorphologiques. Ce domaine permet une perception de la zone subtidale.

- le vert (XS1) : il sera utilisé pour souligner l'importance de la couverture végétale en milieu intertidal car le maximum de réflectance des plantes chlorophylliennes est situé dans le vert jaune : 550 nm (*Lieutaud et Durand, 1992 ; Guyot, 1989*).

- le rouge (XS2) : la réflectance dans ce canal est sensible à l'absorption de la lumière par les pigments chlorophylliens et donc à l'activité photosynthétique de la plante. Il présente donc des absorptions différentielles suivant les espèces, leur croissance et leur état général. Il permet ainsi une discrimination spécifique (*Lieutaud et Durand, 1992 ; Guyot, 1989*).

3/ SPECIFICITES DE LA BANDE XS3 (P.I.R.).

XS3 : 0.79 μm à 0.89 μm .

La réflectance dans ce canal est liée à la densité et à la structure interne des végétaux. Le proche infrarouge est fortement réfléchi par la végétation et absorbé dans sa quasi-totalité par l'eau. Son utilisation sera donc limitée à la zone intertidale (*Lieutaud et Durand, 1992 ; Guyot, 1989*).

C. LE C.A.S.I (COMPACT AIRBORNE SPECTROGRAPHIC IMAGER).

L'instrument canadien C.A.S.I., loué à la société canadienne ITRES, est un spectromètre-imageur à balayage. Sa matrice C.C.D détecte à un temps t une ligne entière d'une image. Ce procédé permet d'avoir un plus long temps de fixation par pixel et il en résulte une plus grande sensibilité.

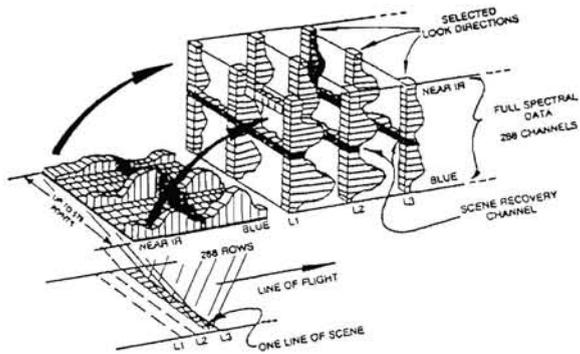
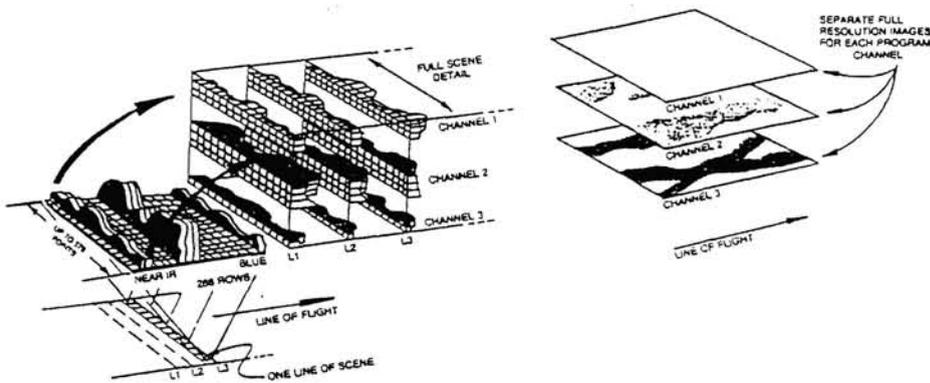
Le C.A.S.I. peut fonctionner suivant deux modes :

- un mode spatial ou chaque ligne comporte 512 pixels et où l'on peut disposer jusqu'à 15 bandes spectrales dont l'emplacement et la largeur sont programmables.

- Un mode spectral où l'on dispose de 288 bandes spectrales de 1,8 nm de large, définies par l'utilisateur, réparties sur 39 lignes parallèles à l'axe de vol.

Lorsque l'on fait fonctionner le C.A.S.I en mode spatial, les pixels obtenus sont rectangulaires. Ainsi pour le vol à 3000 mètres, la résolution spatiale de l'instrument est de 3,8m par 5m.

IMAGING MODE DATA COLLECTION:
Bands of adjacent 1.8 nm wide spectral lines are summed, effectively providing programmable width/programmable centre spectral filters (bands) for each of up to 578 scene points.



MULTISPECTROMETER MODE DATA COLLECTION: For a programmable number of points in a scene ("look directions") full spectral data may be collected providing a "Rake Spectrograph". Simultaneously a single spectral imaging band is collected (scene recovery band) to allow identification of scene features in relation to spectral data points.

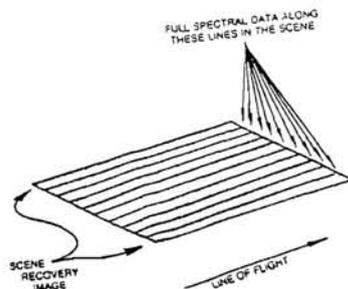


Fig. 19 : Le mode spatial et le mode spectral du C.A.S.I.

II LE LABORATOIRE DE TRAITEMENT D'IMAGES.

A. LES ORDINATEURS ET LES PERIPHERIQUES.

Le microcalculateur Vax qui équipait le laboratoire de traitement d'images étant technologiquement dépassé, les traitements effectués dans le cadre de ce travail de maîtrise ont été réalisés sur une station de travail.

Cette station dédiée au traitement d'images était une SUN de type SPARC 1+ ayant subi des modifications telles que l'ajout d'une carte graphique plus performante et d'une extension jusqu'à 40 Mégaoctets de la mémoire vive (R.A.M). Cette station est munie d'un lecteur de disques magnéto-optiques et d'une table à numériser. D'autres périphériques tels que les lecteurs de CD ROM, de C.C.T (Compatible Computer Tape) et d'Exabytes (cassette 8 mm) ont également été utilisés via le réseau Ethernet de l'I.F.R.E.M.E.R.

Les images résultant des traitements, incluses dans ce rapport, ont été imprimées à l'aide d'une imprimante laser couleur Canon.

Le traitement d'images nécessitant des opérations gourmandes en puissance de calcul, il est prévu ultérieurement de travailler sur une station de travail DEC Alpha beaucoup plus puissante que l'actuelle station SUN.

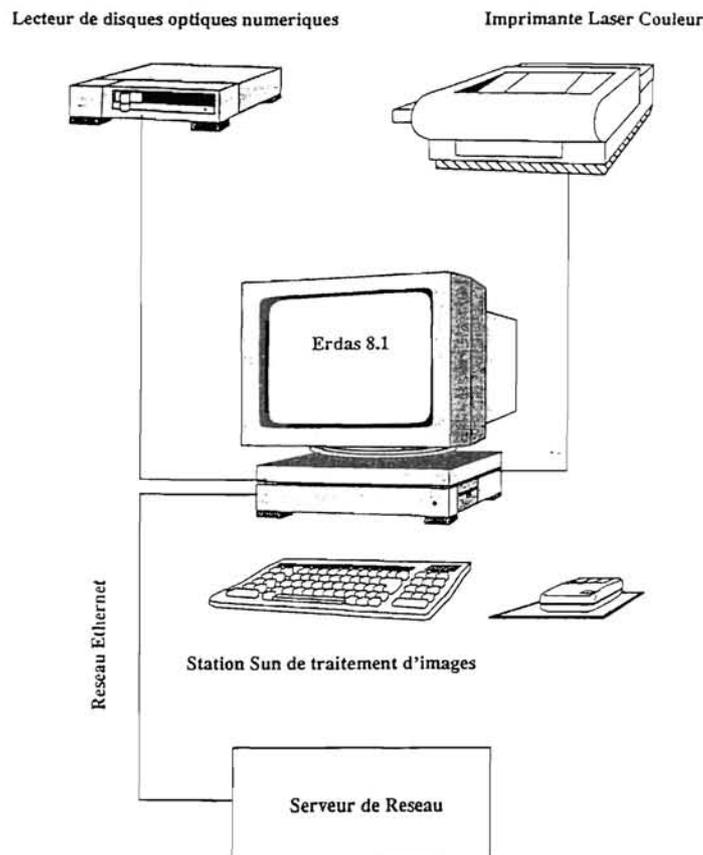


Fig.20 : Station de traitement d'images.

B. LES LOGICIELS.

Lors du dépouillement des mesures de terrain acquises avec le spectroradiomètre de terrain SPECTRON, il a été nécessaire d'écrire des routines permettant de tracer et d'imprimer les spectres. Ces petits programmes ont été écrits à l'aide d'un macro-langage de programmation nommé PV.WAVE.

La modélisation des relations reliant les données de terrain aux scènes a été effectuée à l'aide du logiciel de statistique S+.

Le traitement des scènes a été réalisé avec le logiciel de traitement d'images ERDAS qui est actuellement l'un des standards du marché. ERDAS se décompose en plusieurs modules dont les plus utilisés sont :

- Le module de visualisation d'images.
 - Le module de traitement des images.
 - L'interface graphique interactive de programmation.
 - Le module de composition de cartes.
- une interface graphique permet d'accéder à ces différentes parties.

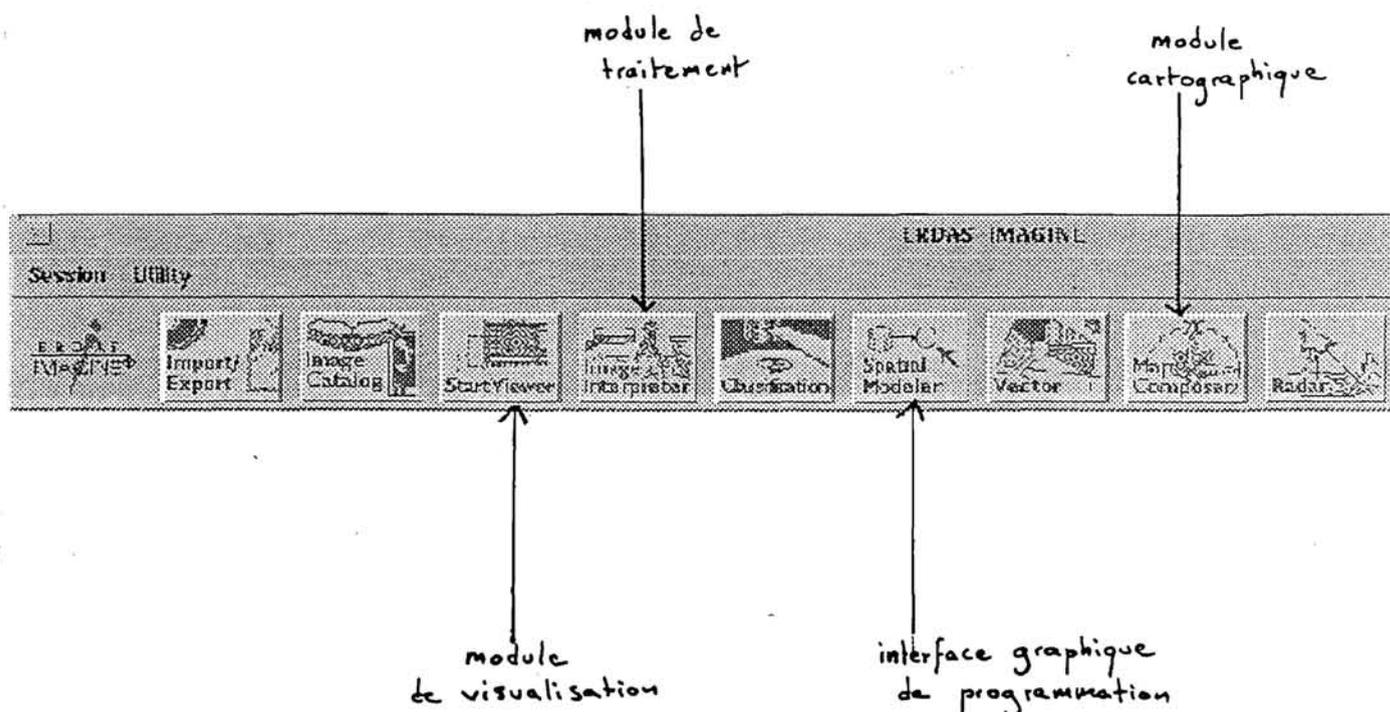


Fig. 21 : Schéma d'organisation du logiciel ERDAS version 8.1.

CHAPITRE DEUXIEME TRAITEMENT DES DONNEES.

SECTION I. ANALYSE DES MESURES DE TERRAIN.

I. ANALYSE DES SPECTRES COLLECTES AVEC LE SPECTRON.

A. SIGNATURE SPECTRALE DES ULVES ECHOUÉES.

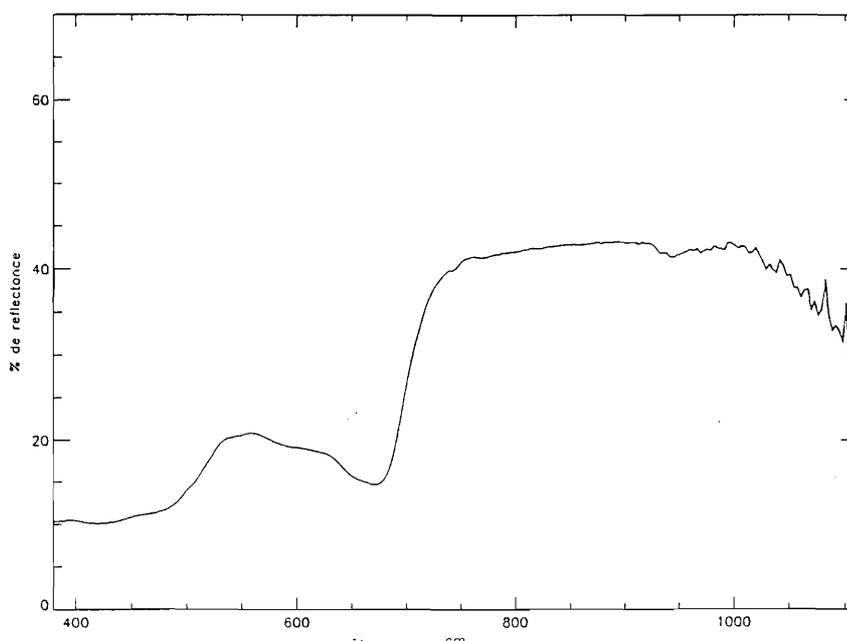


Fig. 22 : Spectre. des ulves échoués.

Dans le domaine du visible, la courbe présente le pic caractéristique des algues vertes, situé vers 560 nm avec une réflectance de 7% . La courbe croit ensuite rapidement jusqu'à atteindre la valeur de 16% de réflectance puis elle atteint un plateau entre 750 et 930 nm. Le maximum de réflectance (16,5%) est atteint à 915 nm.

B. REFLECTANCE DES ULVES EN FONCTION DE LA BIOMASSE.

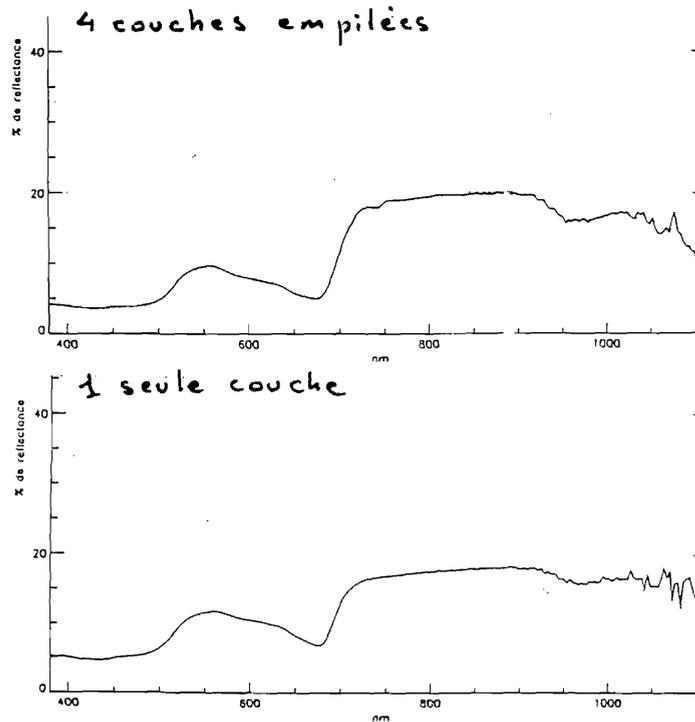


Fig. 23 : Spectres d'ulves en fonction de la biomasse.

Afin de déterminer cette relation, on a utilisé les résultats de la mission de terrain d'Août. Au cours de cette mission on avait empilé de façon artificielle des ulves et étudié, en retirant une couche à chaque mesure, la variation de réflectance en fonction du nombre de couches. Des évaluations de biomasse avaient également été réalisées pour les différentes épaisseurs d'algues empilées.

Pour chaque spectre acquis avec le SPECTRON, on a déterminé la réflectance moyenne des ulves dans les canaux XS2 et XS3. Connaissant ces valeurs on a ensuite calculé l'indice de végétation normalisé pour chacun des spectres.

L'indice de végétation normalisé a été calculé d'après l'expression suivante :

$$NDVI = \frac{R_{xs3} - R_{xs2}}{R_{xs3} + R_{xs2}}$$

où R_{xs3} est la réflectance dans l'infrarouge et R_{xs2} celle dans le rouge.

Les couples de valeurs (N.D.V.I., biomasse) ainsi obtenus ont permis de déterminer la relation :

$$BIOMASSE = f(N.D.V.I)$$

N° du spectre	Biomasse en kg/m ²	N.D.V.I
UV33	0,12	0,129
UV38	0,65	0,257
UV37	0,92	0,304
UV36	1,18	0,347
UV35	1,55	0,417
UV34	1,88	0,460
UV28	2,33	0,495

Tableau 3 : Resultats des mesures de terrain effectuées avec le SPECTRON.

Biomass (Kg/m²) as function of NDVI

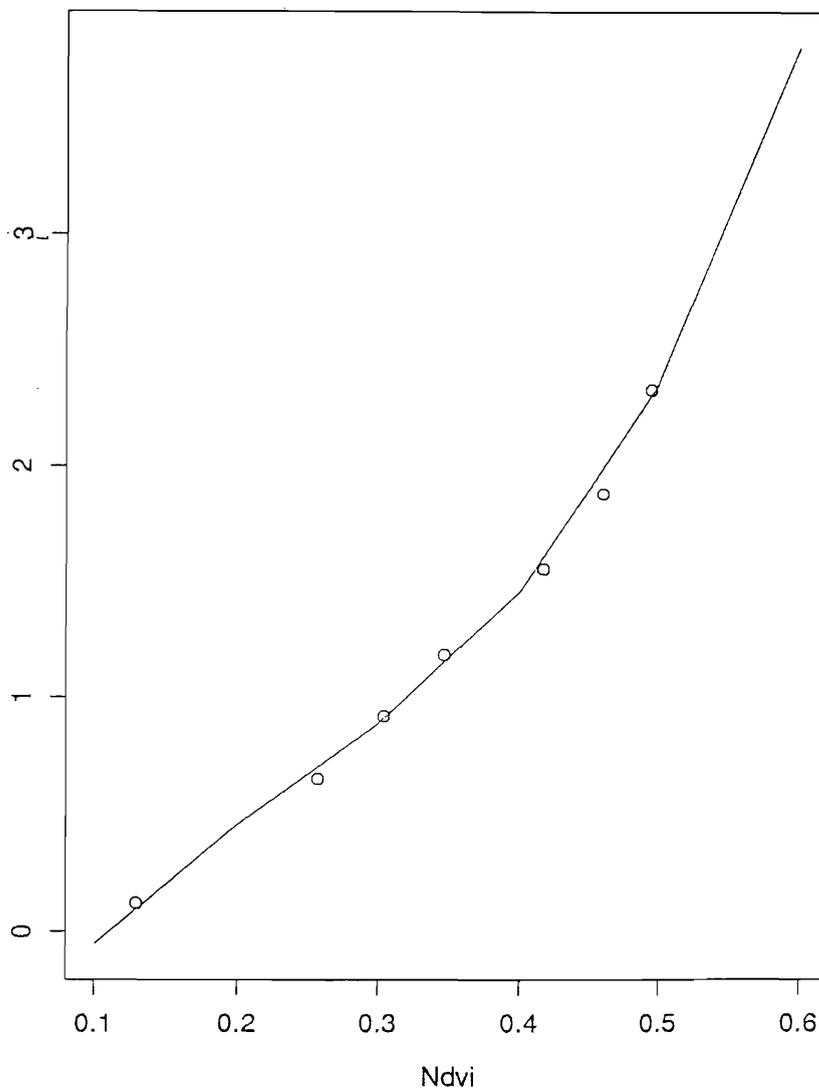


Fig. 24 : Relation entre le N.D.V.I et la biomasse.

L'équation de la courbe représentant la fonction : $BIOMASSE = f(N.D.V.I)$ a été déterminée en utilisant le logiciel de statistiques S+.

Cette relation qui permet de passer du N.D.V.I à la biomasse s'exprime de la façon suivante :

$$BIOMASSE = -0.85 + 10,11 * NDVI - 24,86 * NDVI^2 + 34,91 * NDVI^3$$

Remarque : Cette relation n'a été établie que pour des ulves émergées et n'est pas valable pour estimer la biomasse des andains de haut de plage car il se produit pour des épaisseurs considérables, un phénomène de saturation du N.D.V.I.

C. REFLECTANCE DES ULVES EN FONCTION DE L'IMMERSION.

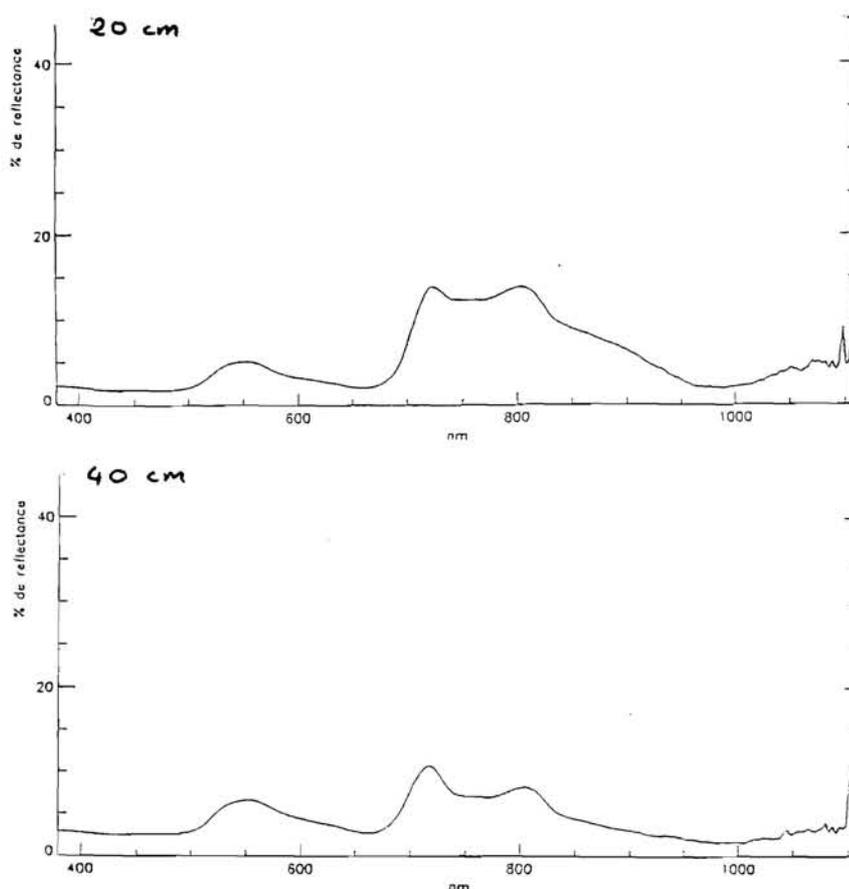


Fig. 25 : Spectres d'ulves en fonction de l'immersion.

Dans le visible, le spectre ne varie pas beaucoup pour une faible profondeur d'eau (jusqu'à 30 cm). Au-delà de 30 cm d'immersion, la partie visible du spectre se décale vers des valeurs plus élevées de réflectance .

La pente de la courbe dans le proche infrarouge est identique à celle des ulves échouées mais la courbe ne dépasse pas la valeur de 14% de réflectance. Dans l'infrarouge on n'observe plus un plateau mais deux pics situés respectivement vers 720 nm et vers 805 nm. Lorsque la profondeur d'immersion augmente, le premier pic se décale vers 690-700 nm. Le second pic se situe toujours vers 805 nm mais son maximum décroît de 14% de réflectance à 7% avec l'augmentation de l'immersion des ulves.

D. DETERMINATION DES BANDES DU C.A.S.I.

Ces collectes de spectres ont permis de définir l'emplacement des bandes spectrales du C.A.S.I. afin d'obtenir une discrimination optimale entre les ulves immergées et émergées et entre les différentes strates de biomasse.

Bande	Longueur d'onde (nm)	3000 m	1500 m	700 m
1	415.5 - 434.7	X		
2	480.4 - 499.9	X	X	X
3	547.7 - 558.3	X	X	X
4	567.2 - 574.4	X	X	
5	585.0 - 592.2	X		
6	597.5 - 604.7	X		
7	640.4 - 649.4	X	X	
8	667.3 - 679.9	X		X
9	715.8 - 721.2	X	X	X
10	744.6 - 750.1	X	X	
11	764.5 - 771.7	X		
12	806.0 - 809.6	X		
13	806.0 - 811.4		X	X
14	885.7 - 891.1		X	X
15	885.7 - 892.9	X		

Tableau 4 : Emplacements des bandes spectrales du C.A.S.I et du RAMI pour les différentes altitudes.

Remarque : Le C.A.S.I. utilisé en mode spatial peut utiliser jusqu'à 13 bandes spectrales à 3000 m, 8 bandes à 1500 m et 6 bandes à 700 m.

SECTION II

TRAITEMENT DES SCENES.

I. CORRECTIONS GEOMETRIQUE ET RADIOMETRIQUE.

A. CORRECTION GEOMETRIQUES DES SCENES.

Pour obtenir à partir de données de télédétection brutes, une représentation graphique superposable à des documents cartographiques, il est nécessaire d'appliquer une correction géométrique aux données (*Guyot, 1986*). Cette opération consiste à ré-échantillonner les données de manière à rectifier leur distorsion géométrique. Une manière classique de procéder consiste à rectifier la projection de chaque image dans un système de projection géographique. Les images corrigées sont alors superposables aux documents cartographiques de même projection.

Les images du RAMI ont été livrées avec une correction géométrique tenant compte du roulis et des lacets mais pas du tangage. Bien que ces scènes aient subi une première correction géométrique, il subsistait quelques distorsions dans l'axe de vol probablement dues aux variations de vitesse. Aucune des images provenant du C.A.S.I ou du RAMI n'étaient géoréférencées . Ces opérations qui constituent un préliminaire indispensable à tout traitement radiométrique ont été réalisées avec le logiciel ERDAS.

1/ TECHNIQUE DES POINTS D'AMERS.

Les amers correspondent à quelques pixels de l'image dont la localisation précise va concourir à rectifier les déformations de l'image (*Guyot, 1986*). En théorie les amers doivent être répartis régulièrement mais les contraintes du paysage réduisent cette distribution à la répartition des éléments localisables dans le paysage. La qualité du ré-échantillonnage est proportionnelle au nombre d'amers. Les déformations importantes ne sont rectifiables qu'avec des polynômes de degré élevé nécessitant davantage d'amers pour résoudre le système d'équation.

Dans un premier temps l'image du RAMI (3000 m) a été corrigée en utilisant la technique des points d'amers. Cette méthode consiste à identifier des points remarquables de l'image et à déterminer les coordonnées de des points correspondants dans le système de projection Lambert I sur la carte I.G.N. au 1.25000 de la zone concernée.

Les points identifiés sur la carte sont placés par le logiciel sur une image blanche qui est déjà géoréférencée dans le système de projection Lambert I.

Le logiciel calcule ensuite une fonction de déformation de l'image à rectifier par rapport à celle de référence et applique cette fonction à l'image à corriger géométriquement. Afin d'obtenir une bonne précision une fonction de transformation polynomiale d'ordre deux a été utilisée.

A l'issue de cette transformation, les deux images avaient le même référentiel géographique (Lambert I).

L'image RAMI géoréférencée et corrigée géométriquement sert ensuite d'image de base pour géoréférencer et rectifier l'image C.A.S.I acquise à la même altitude de vol.

2/ LA PROJECTION CONIQUE CONFORME DE LAMBERT.

La projection conique conforme de Lambert (1772), est surtout utilisée pour cartographier les régions ayant une orientation est-ouest prédominante. C'est une représentation conique conforme utilisée pour le calcul des triangulations géodésiques et pour l'établissement des cartes topographiques françaises. La France est divisée en quatre zones :

Lambert I : zone Nord lat. = 55.0 gr
Lambert II : zone Centrale lat. = 52.0 gr
Lambert III : zone Sud lat. = 49.0 gr
Lambert IV : zone Corse lat. = 46.85 gr

Cette division du territoire a pour principale conséquence qu'aucun point du territoire ne se trouve à plus de 200 km au nord ou au sud d'une isométrie centrale. L'origine des longitudes est le méridien de Paris situé à 2° 20' 14" à l'est de Greenwich.

Les méridiens régulièrement espacés en longitude sont représentés par des droites concourantes en un point S, formant entre elles des angles égaux, nommés "convergence des méridiens". Les parallèles régulièrement espacés en latitude sont représentés par des arcs de circonférence de centre S dont le rayon est fonction des conditions que l'on impose à la représentation : équivalente, conforme...

Cette projection est définie par les paramètres suivants :

Paramètres de la projection conique conforme Lambert I.

Origines : méridien 0°(Paris) (2°20'14" Est du méridien international)
parallèle 55 gr (49°30')

Parallèles standards : 1er 48°35'54.68225"
2ème 50°23'45.28187"

Shifts x : 600 000 mètres
y : 1 200 000 mètres

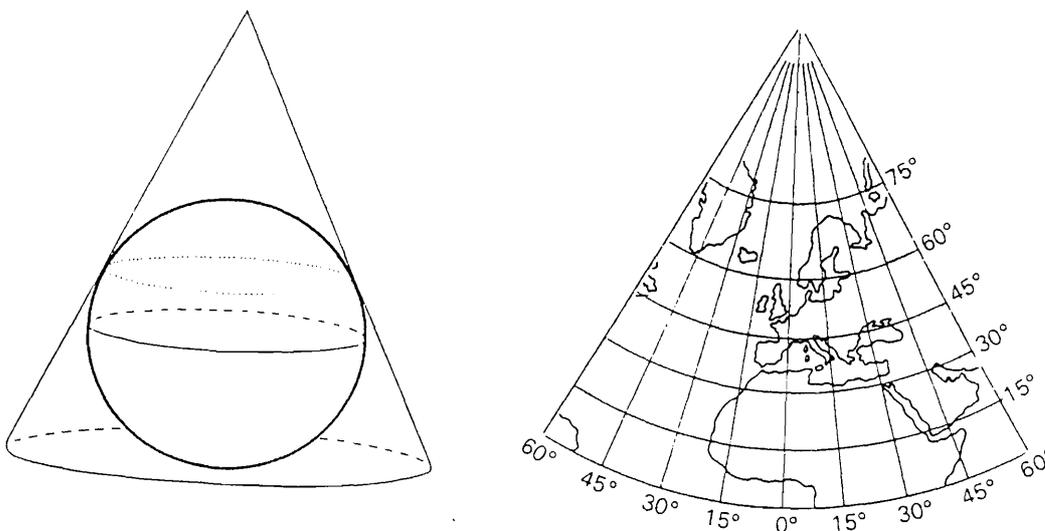


Fig. 27 : Projection conforme conique de Lambert 1.

B. CORRECTIONS RADIOMETRIQUES.

L'étape de la correction radiométrique ne présente que peu d'intérêt pour le géographe. Néanmoins en l'absence de pré-traitement antérieur, il est nécessaire de réaliser cette correction afin que les valeurs des pixels n'expriment plus des comptes numériques bruts mais des grandeurs physiques exprimées dans le système d'unités adéquat.

1/ GRANDEURS PHYSIQUES UTILISEES.

a) La luminance.

La luminance ou radiance (L) est définie comme la quantité d'énergie émise par unité de surface et d'angle solide. Elle s'exprime en $W.m^{-2}.sr^{-1}$.

b) L'éclairement.

L'éclairement ou irradiance (E) est défini comme le flux incident d'énergie reçu par unité de surface. Il s'exprime en $W.m^{-2}$.

c) La réflectance.

Elle se définit comme le rapport de la luminance dans un hémisphère sur l'éclairement incident. Il s'agit d'une grandeur adimensionnelle qui s'exprime en %.

2/ CORRECTION EN LUMINANCE.

Les images du RAMI ont été expédiées par le C.N.E.S et reçues sur des C.C.T. au format B.I.L. Les données brutes n'étaient pas calibrées en luminance. Cette opération a été effectuée en divisant les comptes numériques de chaque canal par un coefficient d'étalonnage déterminé par le C.N.E.S en fonction des réglages de sensibilité et de gain des différentes voies de l'instrument RAMI. Ces coefficients rassemblés dans le tableau suivant diffèrent selon les canaux et les différentes scènes.

altitude d'acquisition Coef. d'étalonnage/canal	700 m	1500 m	3000 m
CXS1	3,46	2,99	3,66
CXS2	3,20	3,70	3,14
CXS3	2,12	2,99	3,88

Tableau 5 : Coefficients de calibration du Rami.

Il n'a pas été nécessaire de réaliser une correction de ce type pour les données du C.A.S.I qui étaient déjà corrigées en luminance.

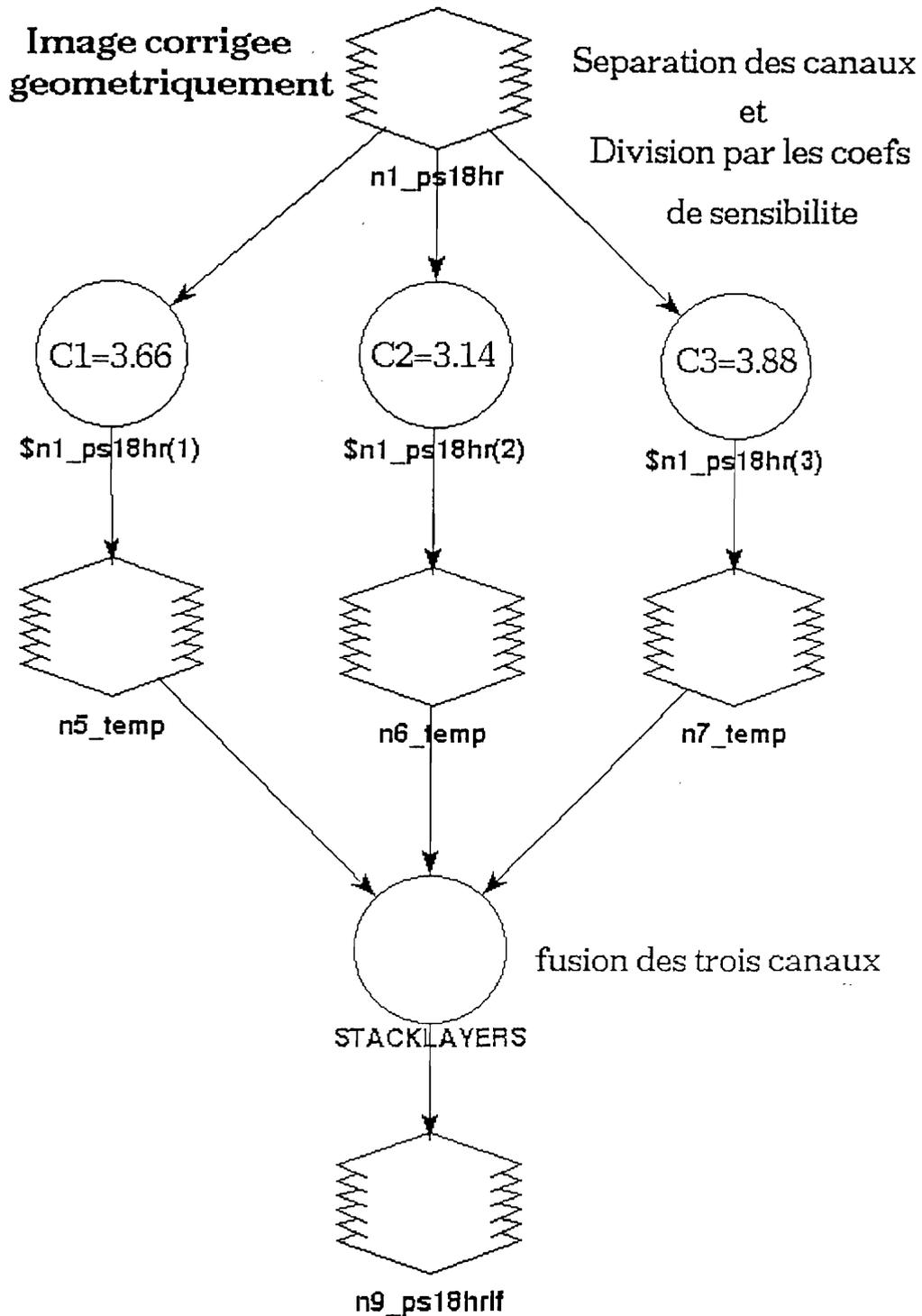


Fig. 29 : Algorithme de la correction en luminance.

3/ PASSAGE EN REFLECTANCE.

Dans le cadre de l'expérience, il était prévu d'effectuer des mesures d'éclairement incident à bord de l'avion avant et après chaque trajectoire au-dessus du site observé. Cependant un problème au niveau de la connexion des fibres optiques du capteur d'irradiance a empêché l'acquisition des données d'éclairement incident. Par défaut, des mesures d'éclairement incident effectuées avec le SPECTRON à Roscoff, le même jour, à la même heure, ont été utilisées pour mettre les scènes en unités de réflectance.

A partir du spectre d'éclairement incident acquis avec le SPECTRON, on a calculé la moyenne de l'éclairement incident dans les canaux XS1, XS2 et XS3. Il est alors aisé de passer de l'image en luminance à celle en réflectance sachant que la réflectance (R) est définie de la façon suivante :

$$R=L/E$$

où L est la luminance pour une surface hémisphérique et E l'éclairement incident.

II. LES INDICES DE VEGETATION.

A. L'INDICE DE VEGETATION NORMALISE OU N.D.V.I.

Plusieurs indices ont été suggérés par différents auteurs pour mettre en évidence le couvert végétal. Le plus connu de ces indices, est l'indice de végétation normalisé (N.D.V.I) qui varie entre -1 et 1 et s'exprime de la façon suivante :

$$NDVI = \frac{R_{xs3} - R_{xs2}}{R_{xs3} + R_{xs2}}$$

où R_{xs3} est la réflectance dans l'infrarouge et R_{xs2} celle dans le rouge. Cet indice rend compte de la densité du couvert végétal et de l'activité chlorophyllienne des végétaux.

B. L'INDICE PERPENDICULAIRE DE VEGETATION (P.V.I.).

L'observation des données radiométriques montre que la réflectance du sol peut varier en relation avec son degré d'humidité. Si on trace sur un graphique la relation $R_{XS3}=f(R_{XS2})$ pour un sol donné, on obtient une droite appelée "droite des sols" (cf. fig. 31).

Pour la végétation émergée, de nombreuses transformations ont été proposées pour s'affranchir de l'influence de la variabilité de réflectance du sol. Un autre indice : l'Indice Perpendiculaire de Végétation ou P.V.I. mesurant la distance perpendiculaire à la droite des sols. (Richardson & Weigand ; Barret & Guyot 1991), a été proposé pour rendre compte de la densité du couvert végétal.

L'équation de la droite des sols s'écrivant comme suit :

$$R_{xs3} = a.R_{xs2} + b$$

$$PVI = \frac{R_{xs3} - a.R_{xs2} - b}{\sqrt{(a^2 + 1)}}$$

où a est le coefficient directeur de la droite des sols et b son ordonnée à l'origine R_{xs3} est la réflectance dans l'infrarouge et R_{xs2} celle dans le rouge.

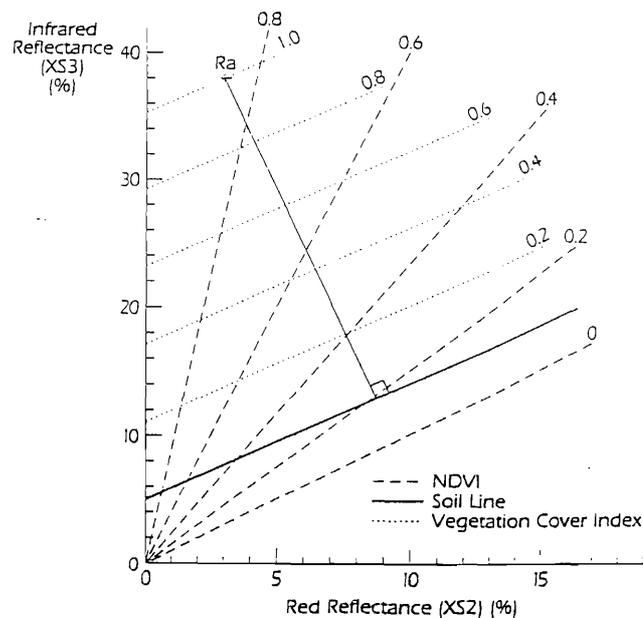


Fig. 30 : Comparaison entre le N.D.V.I et le P.V.I (d'après B.Guillaumont, 1993).

Il est plus intéressant d'utiliser cet indice quand on a un phénomène précoce de saturation de la réflectance comme c'est par exemple le cas avec les Fucales. Dans ce cas précis, on obtient des valeurs similaires du N.D.V.I pour des pourcentages de couverture différents. Toutefois dans le cas des ulves, la saturation ne se produit que pour des épaisseurs considérables.

De plus l'utilisation d'un P.V.I n'était absolument pas indispensable dans le cas de la grève de St-Michel car cet indice sert à s'affranchir de la variation de réflectance due à l'hétérogénéité du sol. L'histogramme bidimensionnel réalisé sur le sable de la Grève révèle une faible dispersion des points qui traduit une homogénéité du sédiment. Par conséquent, l'emploi du N.D.V.I paraît tout à fait satisfaisant dans ce cas de figure.

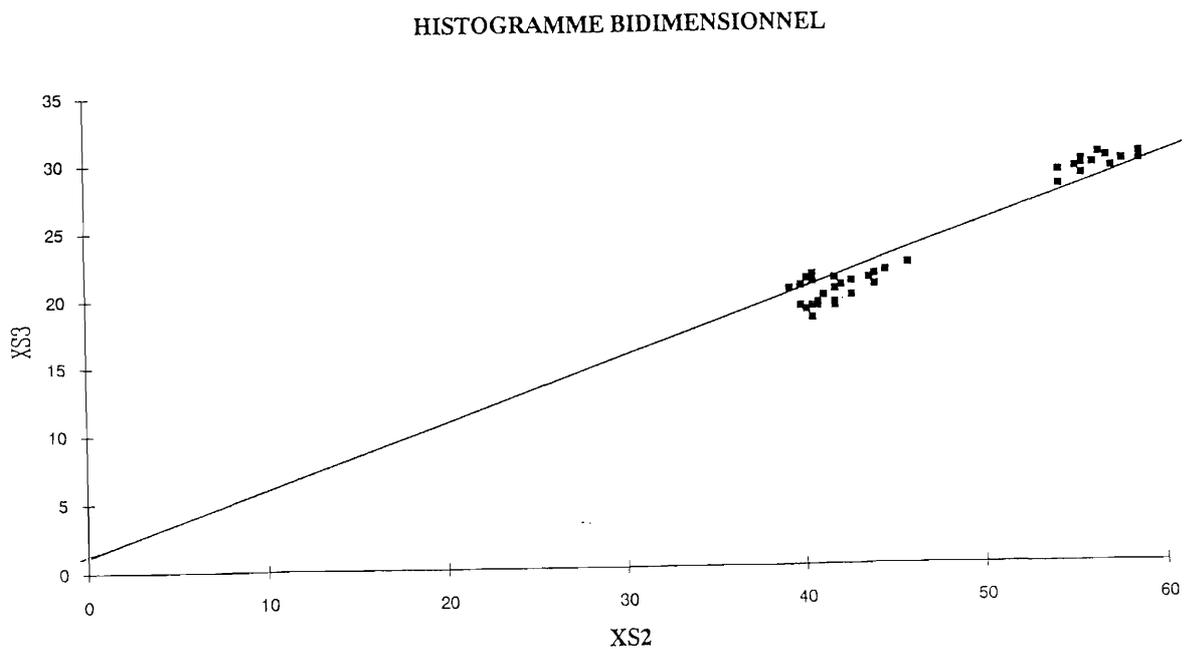


Fig. 31 :Histogramme bidimensionnel du sédiment et droite des sols.

III. RELATIONS BIOMASSE - INDICES DE VEGETATION.

A. ESSAI DE DETERMINATION D'UNE RELATION BIOMASSE - P.V.I.

On a cherché dans un premier temps à établir une relation liant la biomasse et le P.V.I. Cependant le 17 Septembre le plafond nuageux était bas. L'avion aurait normalement dû acquérir la scène à 3000 m ce jour là pendant que les équipes de terrain réalisaient les échantillonnages de biomasse. Les quadrats à échantillonner avaient donc été répartis de façon à coïncider avec la zone couverte par la scène à 3000 m. Du fait de la couverture nuageuse l'avion a acquis un scène à 700 m qui ne couvrait que la partie centrale de la grève. La principale conséquence de cette modification de dernière minute dans le plan de vol concerne les points de terrain. En effet à cette altitude de vol, seulement trois points de terrain étaient situés dans la zone couverte par la scène. Ces trois points étaient insuffisants pour déterminer une relation liant la biomasse et le P.V.I.

Le 17 Septembre, dans le cadre du suivi de la marée verte en baie de Lannion, J.Y. Piriou avait effectué des échantillonnages de biomasse sur le site de St-Michel-en-Grève. Huit estimations de biomasse avaient été réalisées dans la zone couverte par l'image à 700 m et auraient permis de compléter le cas échéant, les données de terrain de la mission A.R.A.T. Cependant, la méthodologie d'échantillonnage, différait car la méthode utilisée pour réaliser l'évaluation de la biomasse était fondée sur l'emploi de photographies aériennes, nécessitant des échantillonnages beaucoup moins précis.

Les zones échantillonnées correspondaient suivant les cas à des pixels de 10 m ou 20 m. Pour pouvoir utiliser ces mesures, il a donc été nécessaire de dégrader la résolution de la scène RAMI de 0,40 m à 10 et 20 m.

Cependant malgré cette dégradation de résolution, aucune relation reliant la biomasse et le P.V.I. n'a pu être trouvée. La colocalisation des données de terrain est apparue alors comme une opération très difficile à réaliser en raison de plusieurs phénomènes. En effet à l'erreur de localisation consécutive à la rectification géométrique (d'environ 2 m), s'ajoutent l'erreur de localisation due à l'emploi du G.P.S (3 m dans le meilleur des cas) et l'erreur sur l'information radiométrique du pixel lors du passage à une résolution moins fine.

B. UTILISATION DE RELATION BIOMASSE=F(N.D.V.I).

Devant l'impossibilité de trouver une relation entre les mesures de terrain et la scène à 700 m, on a réutilisé la relation déterminée avec les mesures de terrain d'Août. Cette relation a été déterminée en ayant procédé à un empilement artificiel des algues sur le terrain. Cet empilement artificiel de plusieurs couches d'ulves correspondait à plusieurs types de dépôt, susceptibles d'être rencontrés dans la zone d'échouage, indépendamment du jour ou de la modification de l'orientation de ces dépôts par le vent. Par conséquent on a émis l'hypothèse que la relation déterminée au mois d'Août restait encore valable un mois plus tard. Cette première hypothèse revient à supposer que le N.D.V.I mesuré sur des tâches d'algues de 30 cm de diamètre avec le SPECTRON, est comparable à un N.D.V.I mesuré sur des pixels de 1,66 m de côté.

III TRAITEMENTS FINAUX.

A. PASSAGE DU N.D.V.I. A LA BIOMASSE.

1/ APPLICATION DU N.D.V.I.

Seules les scènes du RAMI ont été traitées à ce stade, afin de réaliser une évaluation de la biomasse émergée. Pour obtenir une image en biomasse, on a appliqué l'indice de végétation normalisé sur la scène du RAMI corrigée en réflectance, en utilisant l'option N.D.V.I prédéfinie dans le logiciel ERDAS. L'image ainsi obtenue est une image en niveaux de gris ou les valeurs du N.D.V.I s'échelonnent du noir au blanc.

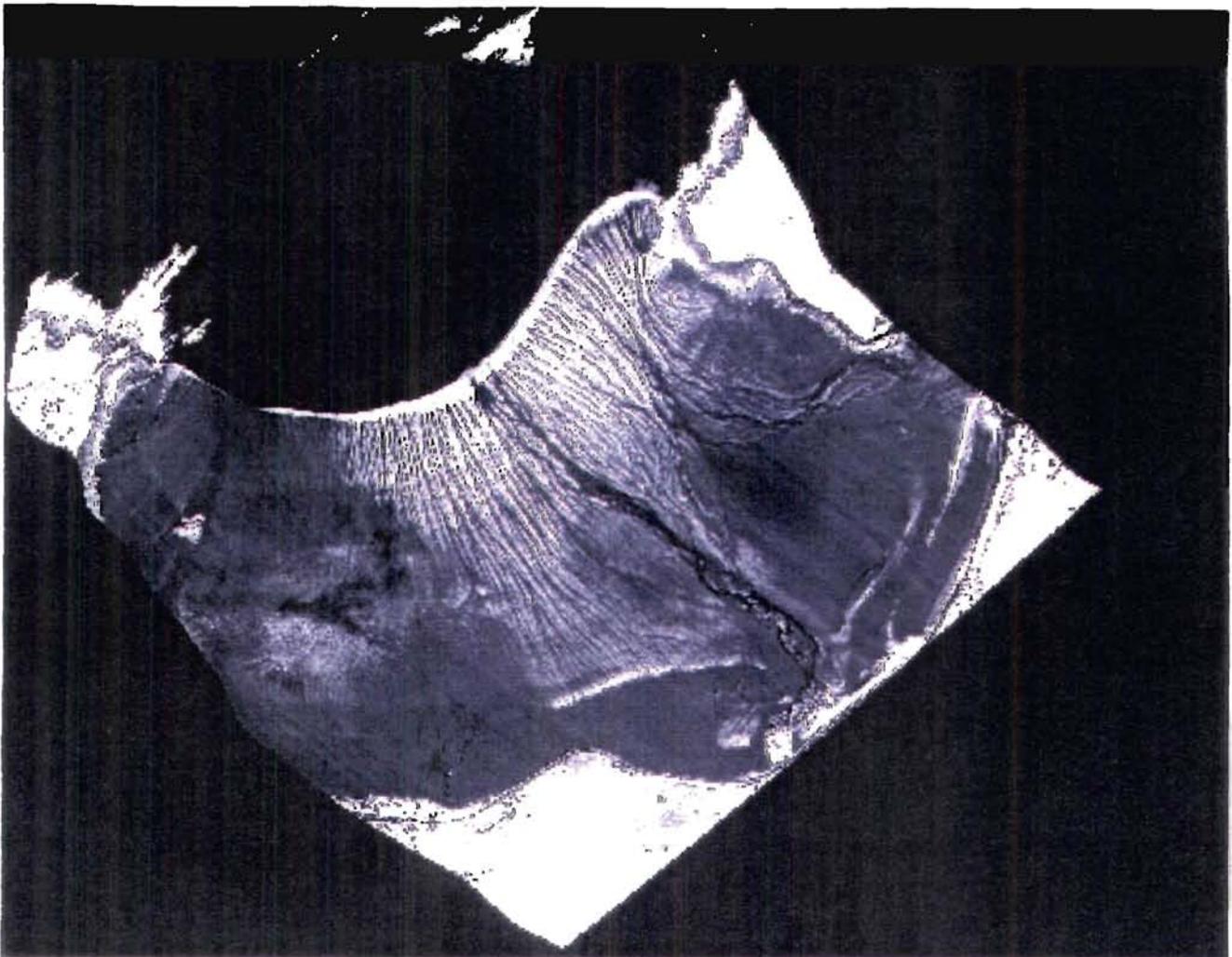


Fig. 32 : Représentation du N.D.V.I par une image en niveaux de gris.

2/ PROGRAMMATION D'UNE FONCTION DE TRANSFERT.

Pour passer de l'image en N.D.V.I à celle en biomasse, on utilise la relation établie précédemment à l'aide des données de terrain. Cette relation a été programmée avec l'interface graphique interactive de programmation incluse dans ERDAS et ensuite appliquée sur la scène à traiter.

A l'issue de ce traitement on obtient une image où les valeurs des pixels expriment des biomasses en kg/m^2 .

3/ CLASSIFICATION DE L'IMAGE.

Une classification non supervisée, qui crée des classes d'égale étendue, a été appliquée sur cette image pour regrouper les valeurs des pixels en six classes de biomasse à des fins de représentation cartographique. Chacune des classes de biomasse a été affectée d'une couleur allant du bleu foncé pour le sable humide jusqu'au rouge vif pour les biomasses les plus fortes. Cet ultime traitement a permis d'obtenir une image en pseudo-couleurs montrant la répartition de la biomasse, qui a servi comme document de base pour l'élaboration de la carte.

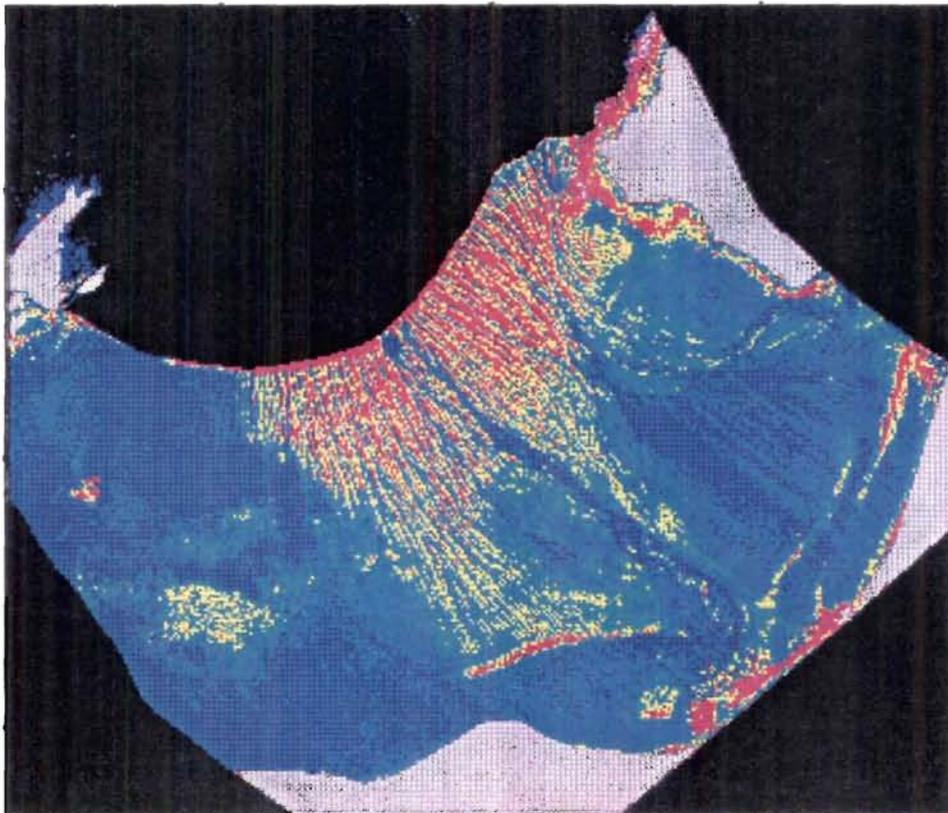


Fig. 33 : Image classée en pseudo-couleurs de la biomasse.

B. EVALUATION DE LA BIOMASSE EMERGEE.

L'évaluation de la biomasse émergée a été réalisée en subdivisant la zone d'échouage des ulves en plusieurs sous zones ou A.O.I (Area of Interest, spécifiques au logiciel ERDAS). La superficie de chacune de ses sous zones a été calculée en hectares avec l'outil de mesure inclus dans le logiciel.

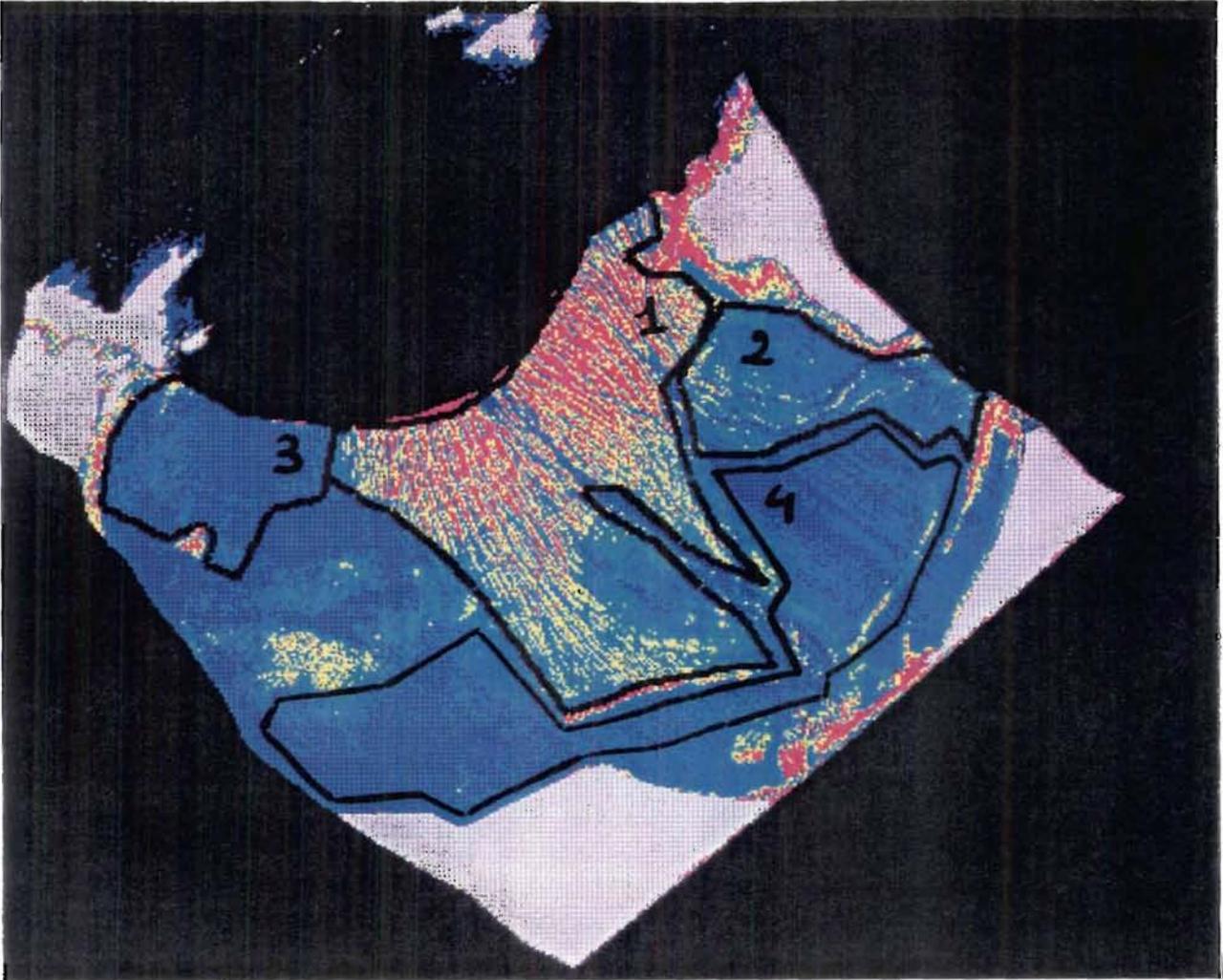


Fig. 34 : Répartition des différentes sous-zones ou (A.O.I).

Le calcul statistique a ensuite permis de connaître quelle était la biomasse moyenne en kg/m^2 affectée à chacune de ces sous-zones. La biomasse totale de chaque zone a ensuite été déterminée en multipliant la biomasse moyenne par le nombre de mètres carrés.

ERDAS Imagine File Information

File Information:

File Name : PS18HBIO.img
Last Modified : Sun Jun 5 20:40:52 1994
Number of Layers : 1

Layer Information:

Name: :Layer_1
Width: 2583
Height: 2260
Type: Continuous
Block Width: 64
Block Height: 64
Pixel Depth: Float
Compression Type: None

Histogram:

Bin Function: Linear
Minimum: -0.0151896
Maximum: 3.70651
Mean: 0.955063

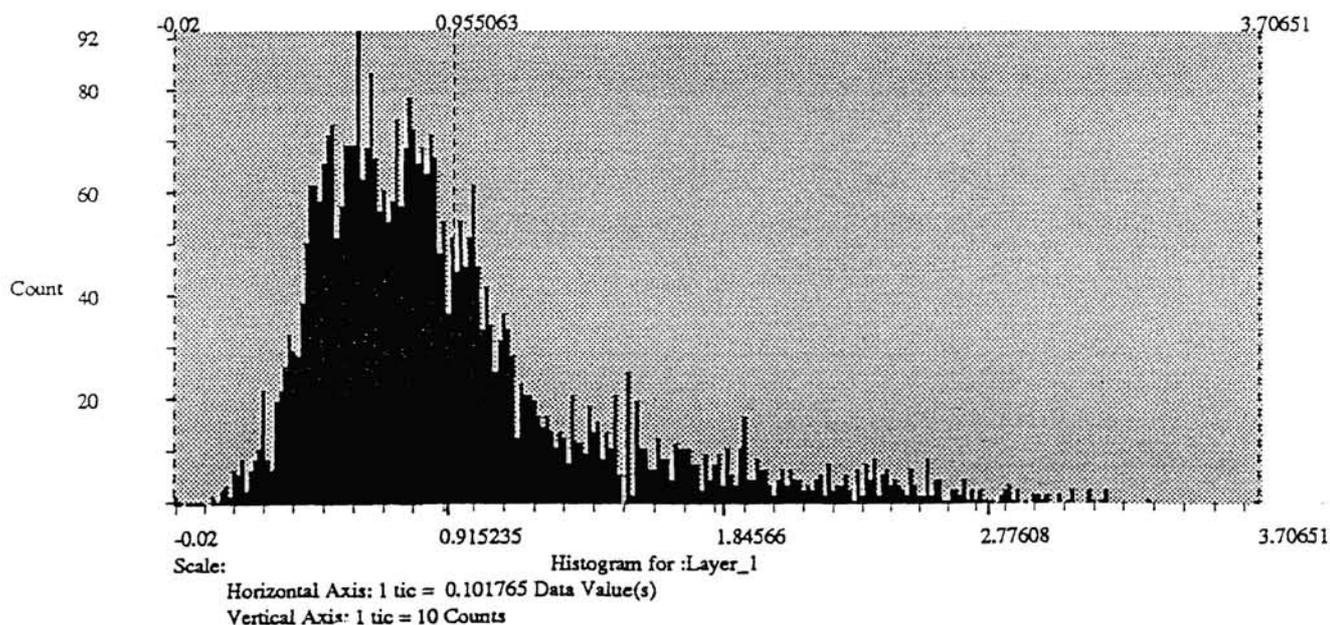


Fig. 35 Histogramme de la zone 1 (zone principale d'échouage).

C. REALISATION D'UN DOCUMENT CARTOGRAPHIQUE.

1/ LA CARTOGRAPHIE PAR TELEDETECTION.

Ce paragraphe s'est largement inspiré du rapport (1989) du Conseil National de l'Information Géographique (C.N.I.G) concernant la typologie et la terminologie des cartes sur fonds d'images.

Depuis une dizaine d'années on assiste à un foisonnement des cartes thématiques mettant à profit les nouvelles techniques de l'informatique et de la télédétection aéroportée (P. FOIN, 1987).

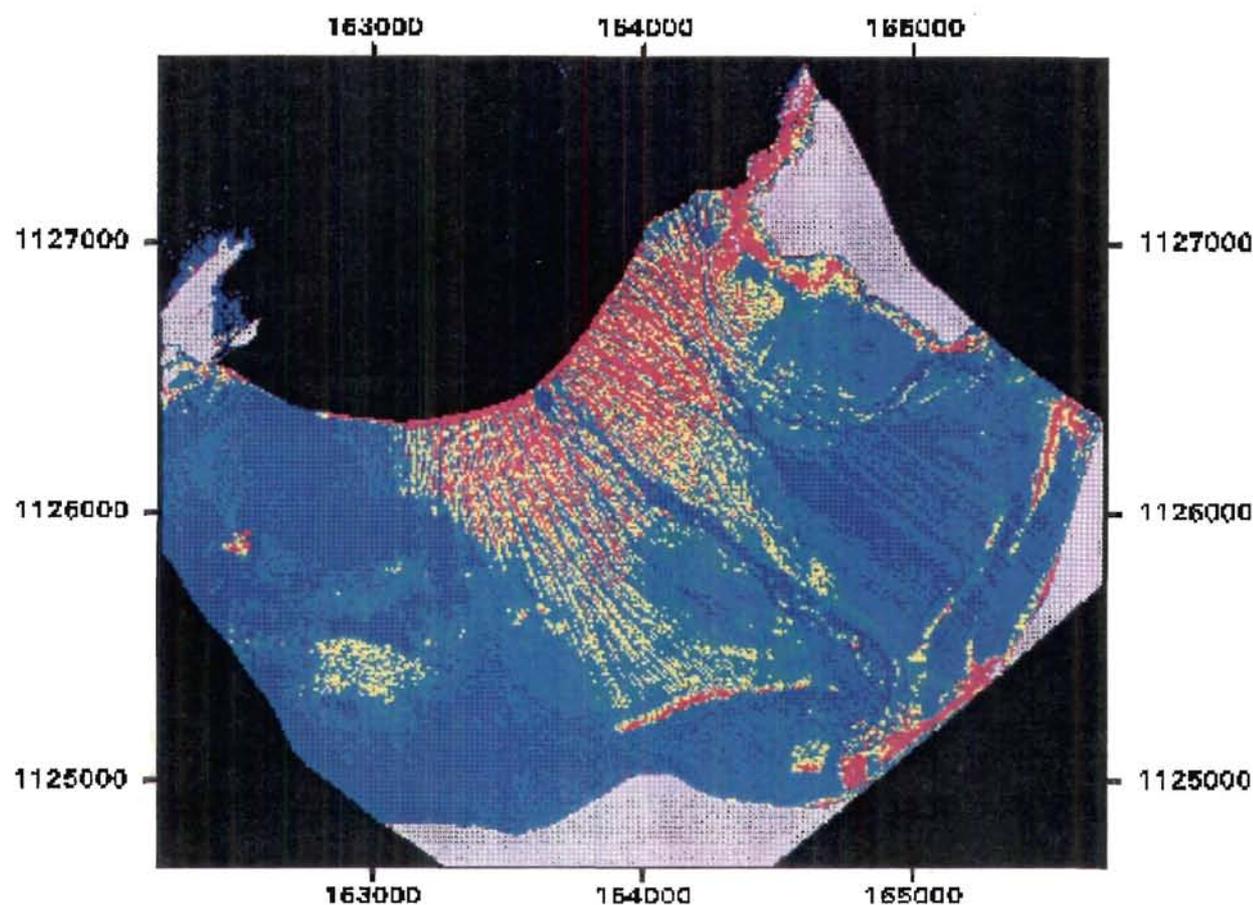
Les produits cartographiques établis sur fond d'image aérienne ou satellitaire sont généralement exprimés sous forme analogique (impressions sur papier, tirage photos ou films) sans doute parce que les utilisations de ces produits sont très proches de celles des cartes traditionnelles qui sont elles-mêmes sous forme analogique (cartes au trait). Cependant avec l'émergence des systèmes d'information géographique numérique et des moyens de stockage de grande capacité, l'utilisation de cartes sous forme numérique se développe.

Le grand intérêt de la forme numérique est son caractère "dynamique"; en effet, sont alors possibles quasi-immédiatement des changements d'échelle, des représentations sélectives de l'information, des modifications dans l'ordre de superposition des plans d'information, ... Ces manipulations de grandes quantités d'informations sont rendues possibles par les progrès réalisées dans les processus de communications et les stockages de grande capacité (disque optique par exemple).

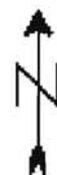
2/ REALISATION D'UNE CARTE THEMATIQUE.

La phase finale de la chaîne de traitement consistait à produire une carte thématique montrant la répartition de la biomasse d'ulves. Ce document a été réalisé avec le module de composition de cartes d'ERDAS.

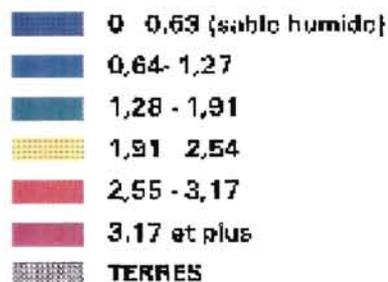
REPARTITION DE LA BIOMASSE D'ULVES



0 1 Kilomètres



BIOMASSE EN KG/M²



GREVE DE ST MICHEL (22)

**ETUDE ET CARTOGRAPHIE DE
L'EUTROPHISATION LITTORALE
MISSION A.R.A.T - AOUT 1993**

Copyright IFREMER 1994

Carte 4 : Répartition de la biomasse émergée d'ulves sur la grève de St-Michel.

Pour créer ce document, on a utilisé l'image classée en pseudo-couleurs de la répartition de la biomasse. L'échelle de cette image a été fixée au 1/25000 dans un souci de rendre la carte compatible avec les cartes de l'I.G.N. Des masques lui ont été ensuite appliqués sur cette image afin de dissimuler la terre et le bourrelet d'ulves immergées, pour lesquels l'évaluation de la biomasse ne s'appliquait pas.

Des éléments complémentaires comme le titre, l'échelle, la légende et l'indication du nord ont été ensuite ajoutés à l'aide du module d'annotation afin d'obtenir un document cartographique en bonne et due forme.

CHAPITRE III.

RESULTATS ET INTERPRETATION.

SECTION I.

COMMENTAIRE DE LA CARTE ET EVALUATION DE LA BIOMASSE EMERGEE.

I. ANALYSE DE LA CARTE THEMATIQUE PRODUITE.

A. ANALYSE DE LA REPARTITION DE LA BIOMASSE.

Cette carte est une carte thématique, destinée à décrire la morphologie des dépôts d'ulves et la répartition de la biomasse.

Les ulves se déposent sur une vaste zone de la grève située de part et d'autre du cours du Yar. Le dépôt d'ulves a une orientation générale nord-ouest, sud-est, en relation avec la direction des vents dominants. On observe un gradient dans la répartition de la biomasse des ulves émergées : les biomasses les plus importantes (3-4 kg/m²) étant situées dans le bas de l'estran et les plus faibles (1 kg/m²) dans le haut. Cependant on note la présence de fortes biomasses dans le haut de l'estran dues à des bourrelets d'accumulation d'algues, encore appelés andains. Ces bourrelets correspondent à la limite extrême atteinte par l'eau lors des marées de forts coefficients. La biomasse de ces andains n'a pas pu être estimée par télédétection en raison d'un phénomène de saturation du signal mais d'après les mesures de terrain, on sait qu'elle peut atteindre 25 kg/m².

Les dépôts d'algues ont une structure particulière qui se répète dans le temps et dans l'espace. En effet les dépôts d'algues se présentent sous la forme de longues lanières ramifiées. Le schéma de dépôt obéit donc à une structure plus ou moins dendritique selon les secteurs. Les traînées d'ulves ont une fréquence spatiale qui varie entre 30 et 50 m.

Ce type particulier de structure s'explique par le ruissellement de l'eau sur la grève lorsque la mer se retire. Ce ruissellement modifie la topographie de la plage et génère des sillons à la surface de la grève. Ces sillons sont en fait de micro-dépressions dirigées suivant les plus fortes pentes. L'eau en se retirant entraîne avec elle les algues

vertes qui s'agglutinent dans ces dépressions et, qui par suite d'un phénomène d'accumulation, finissent par former des traînées d'ulves.

B. ANALYSE MORPHOLOGIQUE DES ECOULEMENTS.

Lorsque la marée descend, l'eau en se retirant, crée des sillons dans le sable, orientés suivant le sens des plus grandes pentes. Les algues sont entraînées par l'eau qui reflue et elles se déposent dans ces sillons. Lorsque les algues sont piégées à un endroit, elles forment un bouchon facilitant ensuite l'accumulation d'autres algues. Ainsi les algues sont des bons marqueurs pour étudier la structure du réseau hydrographique.

Sur l'image classifiée et traitée en fausses couleurs, on distingue plusieurs entités :

Les zones très humides apparaissent en bleu foncé et correspondent à des zones de dépression ou les eaux s'écoulent librement.

Le sédiment apparaît en bleu et la présence d'algues se traduit par des teintes qui s'échelonnent du vert au rouge suivant la biomasse.

Sur l'agrandissement effectué dans la partie centrale de la Grève, là où le Yar et le Roscoat se jettent dans la Manche, on peut voir que l'exutoire de ces deux rivières s'organise sous la forme d'un système deltaïque. Le réseau hydrographique est alimenté par trois types d'écoulements : l'écoulement des eaux marines, celui des eaux continentales superficielles (Yar et Roscoat) et l'écoulement de la nappe phréatique.

Les dépôts d'algues vertes constituent un excellent marqueur pour identifier les différentes formes d'écoulement. On en distingue au moins trois :

- Dans le secteur 1, le réseau du Yar peut être qualifié de subparallèle. Ce type de réseau est surtout commandé par la pente.

- Dans le secteur 2, le réseau du Yar et du Roscoat est un réseau dichotomisé car il y a une certaine symétrie dans l'organisation des différentes ramifications.

- Dans le secteur 3, on est plutôt en présence d'un réseau de type divagant anastomosé car les différentes branches sont beaucoup moins bien organisées.

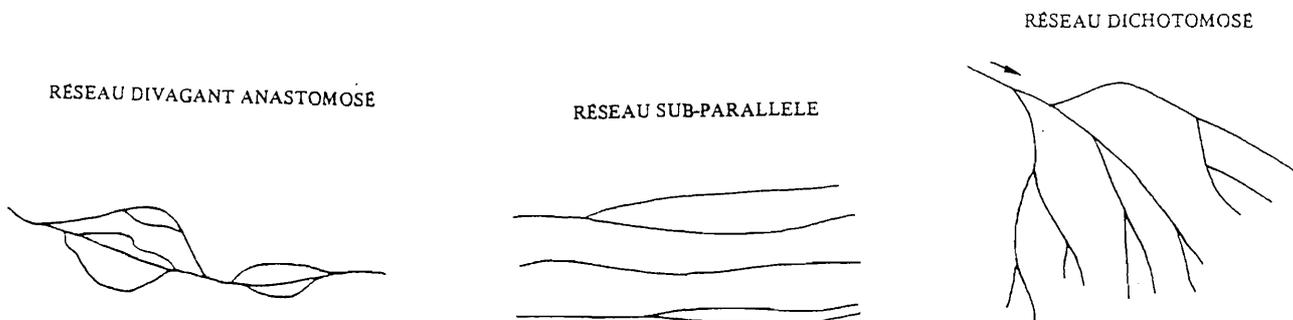


Fig. 36: Structures du réseau hydrographique.

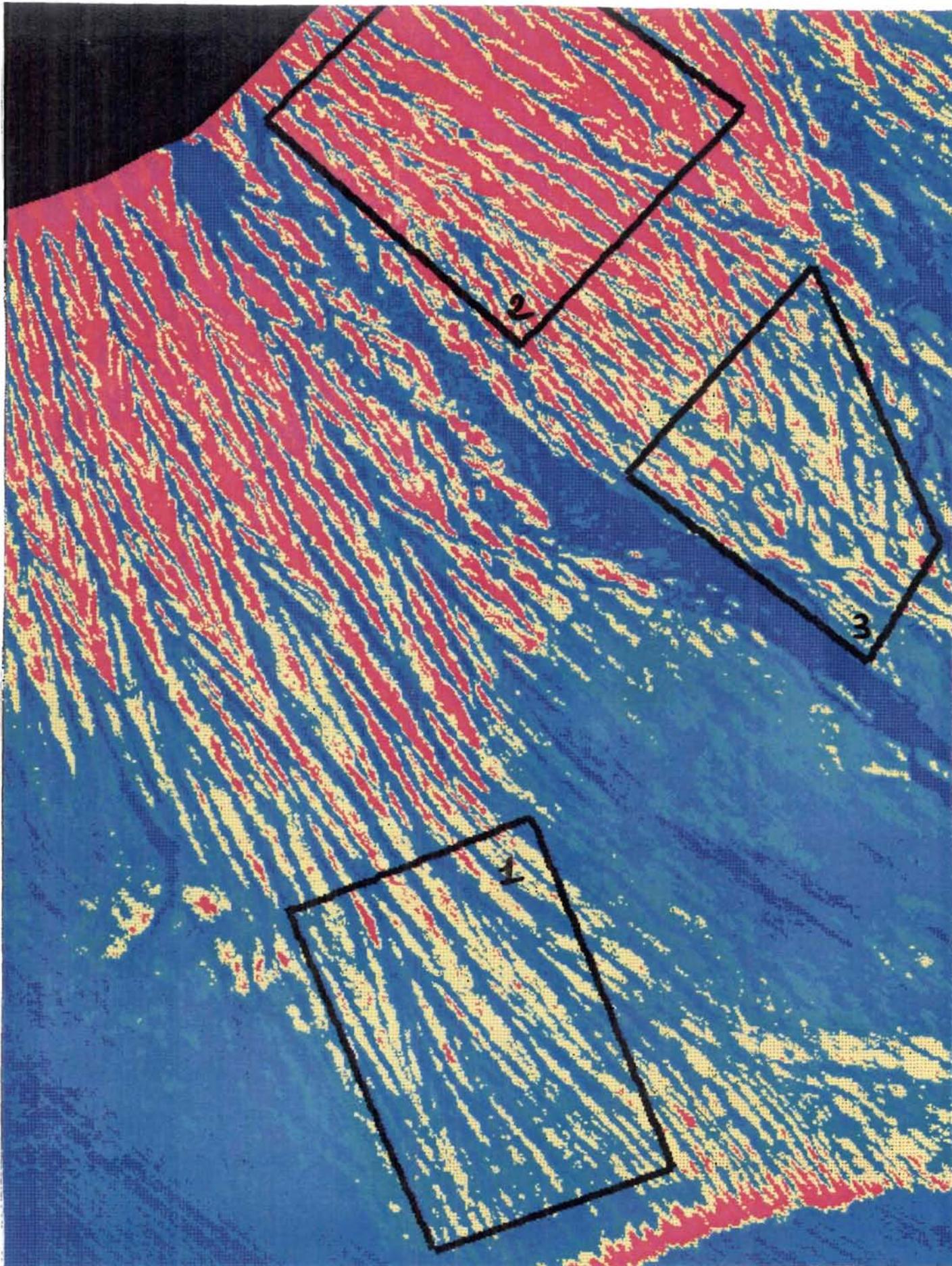


Fig. 37 : Etude de la morphologie du réseau hydrographique.

II. RESULTATS DE L'EVALUATION DE LA BIOMASSE EMERGEE.

Afin d'évaluer la biomasse présente sur la plage, on a subdivisé la grève en plusieurs zones et on a calculé pour chaque zone, le tonnage d'ulves, qu'elle renfermait. Les résultats de ces estimations ont été rassemblés dans le tableau suivant :

	Biomasse moyenne en kg/m ²	Superficie en ha	Biomasse de la zone en tonnes
Zone 1	0,96	149,55	1435,70
Zone 2	0,61	41,60	253,76
Zone 3	0,43	39,03	171,73
Zone 4	0,50	100,53	502,65
Total		279,04	2363,20

Tableau 6 : Résultats de l'estimation de la biomasse émergée.

SECTION II

COMMENTAIRES DES RESULTATS ET DISCUSSION.

I. APPORT DES HAUTES RESOLUTIONS SPATIALES.

A. APPORT POUR L'EVALUATION DE LA BIOMASSE D'ULVES PAR TELEDETECTION.

1/ COMMENTAIRES DU RESULTAT DE L'EVALUATION.

Une évaluation de la biomasse avait été réalisée en même temps que la mission A.R.A.T par J.Y Piriou de l'IFREMER, dans le cadre d'un suivi de l'eutrophisation des eaux littorales, à partir de photographies aériennes et d'échantillonnages de terrain. Cette campagne a évalué la biomasse d'algues émergées à 2100 tonnes (andains non compris).

Avec la méthodologie de la mission A.R.A.T, on arrive à un résultat similaire. Seule la biomasse des andains est impossible à estimer par télédétection car l'accumulation considérable d'algues sature le signal.

L'estimation à 2300 tonnes de la biomasse d'ulves émergée (andains non compris) se situe dans le même ordre de grandeur que l'estimation réalisée en Septembre par J.Y. Piriou en utilisant des mesures de terrain couplées à des photographies aériennes. Le fait de trouver un ordre de grandeur similaire pour la biomasse émergée est satisfaisant et indique que la méthode d'estimation mise au point est valide.

Toutefois, on ne peut pas dire que la télédétection ait augmenté considérablement la précision de l'estimation. La chaîne de traitement utilisée étant encore à un stade expérimental, elle pourra faire l'objet d'améliorations ultérieures.

2/ RATIONALISATION DU TRAITEMENT ET GAIN DE TEMPS.

L'évaluation à partir des photographies suppose un long travail d'interprétation et de mise en relation des différentes strates avec les données de terrain. Pour obtenir un résultat satisfaisant, l'échantillonnage de terrain doit être réalisé sur toute la superficie de l'estran et requiert au moins une dizaine de personnes.

La méthode d'évaluation de la biomasse par télédétection permet de s'affranchir dans un premier temps de la phase d'interprétation des scènes car les différentes classes

de biomasse sont définies en fonction de critères radiométriques. Il en résulte une plus grande rationalité car l'ordinateur élimine une éventuelle erreur dans la constitution des différentes strates et l'affectation de la biomasse moyenne correspondante.

L'apport le plus intéressant, se situe au niveau de la rapidité avec laquelle peut être réalisée une évaluation de la biomasse. Une fois la chaîne de traitement mise au point, il ne faut en effet que quelques jours pour réaliser une évaluation de la biomasse sur un site. La même évaluation par photographies aériennes nécessite généralement plusieurs semaines de travail.

B. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'EMPLOI DE LA HAUTE RESOLUTION SPATIALE EN CARTOGRAPHIE.

1/ ANALYSE DE STRUCTURES FINES ET REALISATION DE CARTES PRECISES.

La haute résolution spatiale permet comme cela a été abordé précédemment d'analyser des structures fines comme les dépôts d'ulves et le réseau hydrographique. L'emploi de la haute résolution spatiale a permis de dresser une carte au 1/25000^{ème} de la grève de St-Michel et serait idéal pour réaliser des documents cartographiques à une échelle plus fine comme le 1/10000^{ème}.

L'utilisation du RAMI avec ses 1,66 m de résolution a constitué un progrès indéniable dans le domaine de la cartographie thématique par rapport aux réalisations antérieures à base d'imagerie S.P.O.T ou LANDSAT.

2/ OPTIMUM DE HAUTE RESOLUTION SPATIALE.

Cependant la haute résolution spatiale génère des volumes de données importants (une scène RAMI de la grève de St-Michel compte neuf millions de points), qui nécessitent lors de leur traitement, une puissance de calcul considérable.

Pour toutes ces raisons, il semble que l'on pourrait avancer la notion d'une haute résolution optimale qui serait un compromis entre la finesse d'analyse et la souplesse de manipulation des données. Cette haute résolution spatiale optimale serait de 5 m et correspondrait à celle préconisée pour la conception des satellites S.P.O.T de nouvelle génération.

II. DISCUSSION SUR LA METHODOLOGIE DE L'EXPERIENCE.

A. METHODOLOGIE DE LA MISSION DE TERRAIN.

Pour mettre au point la chaîne de traitement il a été nécessaire de réaliser une colocalisation entre les données de terrain et les images. Cela est extrêmement difficile à réaliser pour plusieurs raisons :

1/ PROBLEME DE COORDINATION ET DE DISPONIBILITE.

Au cours de la mission de terrain, l'équipe de coordination n'avait pas pris en compte le fait que l'altitude de passage au-dessus de la zone était susceptible d'être modifiée par les conditions météorologiques. Le 17 Septembre, lorsque l'avion est passé à 700 m au lieu de 3000 m, les quadrats avaient été disposées pour correspondre avec la zone couverte par l'image à 3000 m.

L'équipe de terrain n'a pas été avertie de la modification du plan de vol et n'a pas pu redéployer les quadrats afin de les disposer dans la zone couverte par la scène à 700 m. Cette modification du plan de vol a entraîné des difficultés pour déterminer une relation à partir des données de terrain car très peu de quadrats (cinq) se trouvaient dans la zone couverte par l'image à 700 m, beaucoup plus étroite que celle à 3000 m. Le 18 Septembre la scène a pu être acquise à 3000 m mais l'équipe de terrain n'était pas présente sur le site.

Lors de la réalisation de la mission A.R.A.T, il aurait été souhaitable de s'assurer de la disponibilité de l'équipe de terrain durant les trois jours de campagne aérienne. Ce problème de disponibilité illustre bien la difficulté de coordonner une mission de terrain avec une campagne aéroportée. L'idéal consisterait à pouvoir se passer de mission de terrain mais cela suppose que la relation empirique permettant de passer du N.D.V.I à la biomasse reste vraie au cours du temps.

2/ PROBLEMES LIES A L'EMPLOI DU G.P.S DIFFERENTIEL.

Au cours de la mission de terrain, la finesse de localisation du G.P.S a sans doute été surestimée. Cet instrument lorsqu'il est utilisé en mode différentiel avec plusieurs satellites fournit une localisation précise. Toutefois cette localisation précise est susceptible de varier en fonction du nombre de satellites servant à déterminer la position. Lorsque ce nombre est maximum on obtient une localisation au mètre près. Lorsque le G.P.S ne capte pas assez de satellites, la précision de localisation se dégrade et peut tomber à 5m.

Dans la pratique la précision de localisation que l'on obtient, se trouve entre ces deux extrémités et se situe vraisemblablement autour de 3m. Cette précision de 3m est un peu insuffisante lorsque l'on utilise des images possédant une haute résolution spatiale avec des pixels de 1,66 m de côté.

B. DISCUSSION SUR LA CHAÎNE DE TRAITEMENT UTILISÉE.

1/ L'ERREUR RÉSIDUELLE DE LOCALISATION.

Les difficultés de colocalisation entre les données de terrain sont aussi en partie imputables à la chaîne de traitement et en particulier à la rectification géométrique des images. Lors de cette opération le logiciel calcule une fonction de transformation mais il subsiste une erreur résiduelle de localisation qui est d'environ 2 m en abscisses et en ordonnées. Il semble impossible d'abaisser cette erreur résiduelle au-delà du seuil de la taille du pixel (1,66 m). Cette erreur de localisation s'ajoute à celle du G.P.S et rend la colocalisation des données de terrain et des images très aléatoire.

2/ APPROXIMATION DE LA MESURE D'ÉCLAIREMENT.

En raison du problème survenu sur le capteur chargé de mesurer l'éclairement incident, il subsiste une erreur radiométrique dans le contenu du pixel. Pour corriger en réflectance la scène RAMI à 3000 m de St-Michel-en-Grève, on a utilisé une mesure d'éclairement non calibrée acquise le même jour, à la même heure, à Roscoff avec le SPECTRON . Toutefois la différence entre la mesure d'éclairement brute et celle calibrée n'excédait pas 1%. Il a donc été possible de faire l'approximation que la mesure brute était très peu différente de la mesure calibrée. Cependant dans le cas où l'on referait une autre expérience aéroportée, il serait souhaitable d'avoir un éclairement incident mesuré depuis l'avion.

3/ REUTILISATION DE LA RELATION N.D.V.I-BIOMASSE.

Enfin on a réutilisé pour passer de l'indice de végétation normalisé à la biomasse, la relation établie avec le SPECTRON. On a émis l'hypothèse que cette relation valable pour des surfaces de 30 cm de diamètre restait encore vraie pour des pixels de 1,66 m de côté. Cette relation a été déterminée en réalisant un empilement artificiel des ulves et en mesurant la biomasse et le N.D.V.I correspondant à chaque nombre de couches. Cette expérience de terrain a été réalisée d'après les travaux d'Habib Ben Moussa. Ce chercheur affirme que la saturation de la réflectance des ulves intervient à partir de cinq couches d'algues superposées. La courbe déterminée d'après les mesures de terrain montre que le N.D.V.I croit encore au delà de cinq couches empilées. L'histogramme de l'image en N.D.V.I révèle que le maximum se situe à 0,6. Ce maximum du N.D.V.I correspond d'après la relation empirique à une biomasse de 3,78 kg/m². La relation déterminée s'avère donc incapable d'estimer la biomasse au delà du seuil de 3,78 kg/m². L'échantillonnage réalisé par J.Y Piriou a

montré qu'il pouvait y avoir des biomasses de 5 kg/m² mais de façon très ponctuelle (jamais sur une superficie supérieure au m²).

On peut donc considérer que la relation que l'on a déterminée empiriquement est satisfaisante pour réaliser une évaluation correcte de la biomasse.

Cependant il aurait fallu effectuer une expérience de terrain plus complète, en empilant davantage de couches d'ulves afin d'être sûr d'avoir atteint le seuil de saturation du N.D.V.I. et de pouvoir déterminer l'équation de la courbe biomasse=f(N.D.V.I) de façon plus précise.

4/ PROCEDE DE CALCUL DE LA BIOMASSE.

Pour évaluer la biomasse émergée de la grève, on a réalisé une division de l'estran en plusieurs sous zones. On a ensuite réalisé une estimation de la biomasse en multipliant la biomasse moyenne de chaque sous zone par sa superficie. Il serait possible au lieu de relier une superficie à une biomasse moyenne, d'affiner le procédé d'estimation sur une zone en réalisant, la somme de toutes les valeurs de biomasse des pixels contenus à l'intérieur de cette zone.

III. ETUDE DE FAISABILITE D'UN SUIVI ANNUEL.

A. UTILISATION ET DISPONIBILITE DU RAMI.

1/ AVANTAGES DE L'EVALUATION PAR TELEDETECTION.

Il serait souhaitable d'utiliser cette nouvelle méthode pour réaliser un suivi annuel du phénomène de marée verte. La chaîne de traitement automatique du signal radiométrique est beaucoup moins arbitraire et plus rapide que l'ancienne méthode fondée sur l'interprétation de photographies aériennes et l'utilisation de mesures de terrain. Néanmoins la réalisation de ce suivi annuel par une méthode de télédétection suppose a priori des moyens matériels importants et coûtera plus cher qu'une évaluation par photographies aériennes.

2/ AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU RAMI.

Le RAMI, l'instrument utilisé pour réaliser l'évaluation de la biomasse est relativement encombrant et nécessite un appareil de même catégorie que le Fokker 27. Cependant avec sa largeur de balayage de 2800 m à 3000 m d'altitude et sa résolution de 1,66 m à cette même altitude, le RAMI est particulièrement intéressant car la biomasse d'ulves de tout le Nord-Finistère et des Côtes d'Armor pourrait être évaluée en une ou deux journées de vol.

Il est possible d'obtenir des heures de vol de l'avion A.R.A.T en présentant un dossier au Programme National de Télédétection Spatiale (P.N.T.S.). Les heures de vol ne sont attribuées qu'à l'issue de l'examen du dossier par une commission scientifique, qui juge les qualités scientifiques du projet.

B. AVANTAGES ET CONTRAINTES LIES A L'EMPLOI DU C.A.S.I.

Une autre solution consiste à utiliser le C.A.S.I au lieu du RAMI. Cependant en raison de performances techniques plus limitées cela suppose d'étendre l'hypothèse de la relation biomasse-N.D.V.I.

1/ EXTENSION DE L'HYPOTHESE SUR LA RELATION EMPIRIQUE ENTRE LA BIOMASSE ET LE N.D.V.I.

Tout d'abord la résolution de 4 m du C.A.S.I à 3000 m conduit à abandonner la notion de pixels purs. Néanmoins comme il n'y a pas de phénomène immédiat de saturation avec les ulves, on pourra réutiliser le N.D.V.I. Néanmoins il faudra vérifier que la relation entre la biomasse et le N.D.V.I, établie sur des surfaces

de 30 cm de diamètre avec le SPECTRON, reste encore valable pour des pixels de 4m de côté.

2/ CONTRAINTES TECHNIQUES.

En raison d'un temps d'intégration plus long dû à une électronique moins performante que celle du RAMI, les pixels du C.A.S.I, utilisé en mode spatial sont rectangulaires.

Afin d'obtenir des pixels carrés, indispensables pour réaliser une image qui soit superposable ensuite à un document cartographique, il faudra dégrader la résolution spectrale afin de diminuer le temps d'intégration. Ainsi à 3000 m, on ne disposera plus que de 8 bandes spectrales au lieu des 13 bandes initiales. L'emploi du C.A.S.I nécessitera, si l'on veut des pixels carrés, de réaliser un compromis judicieux entre la résolution spectrale et la résolution spatiale.

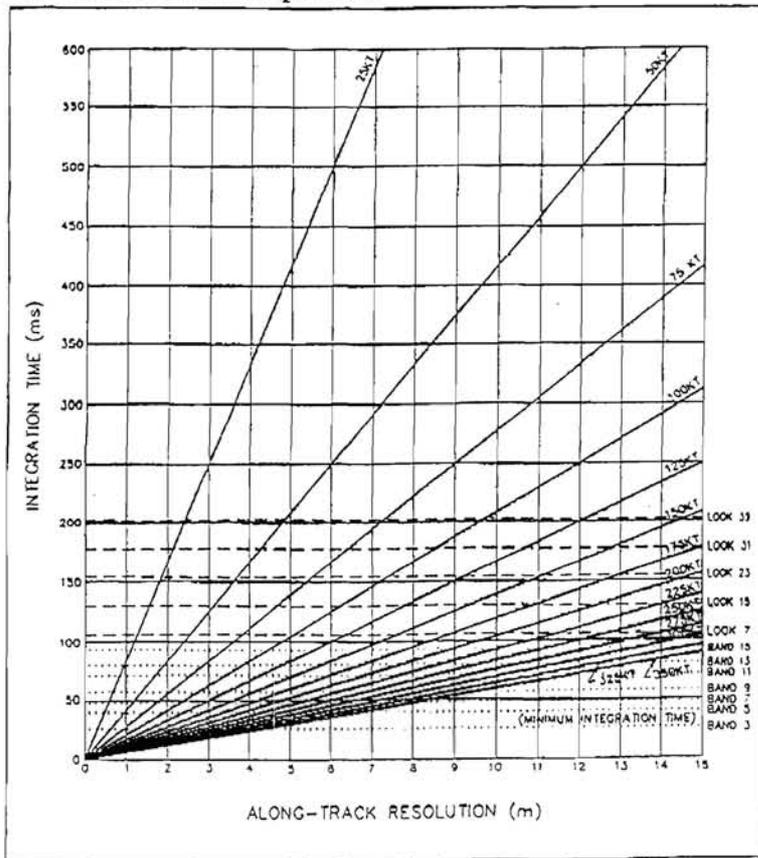


Figure 0.1 (a): Integration Time vs Along-track Resolution (m) and Ground Speed

Fig. 38 : abaque des résolutions spatiales et spectrales du C.A.S.I.

Le problème de la faible largeur de prise de vue (1850 m à 3000 m), obligera le pilote à multiplier les axes de passage pour étudier des zones de grande étendue. Cela posera particulièrement un problème sur les zones littorales très indentées.

3/ FACILITE ET SOUPLESSE D'UTILISATION.

Malgré toutes les contraintes évoquées; le C.A.S.I. demeure un instrument intéressant car il est léger, ne nécessite pas de mise en oeuvre sophistiquée et peut donc être monté sur un gros monomoteur ou un petit bimoteur. Il est possible de trouver sur le marché des avions de location appartenant à des compagnies de photographies aériennes, possédant des trappes sous le fuselage et sur lesquels le C.A.S.I pourrait être installé sans difficulté majeure. Toutefois l'emploi du C.A.S.I serait préférable dans le cas de petites surfaces d'études et une évaluation de la biomasse d'ulves sur les sites de marée verte du nord de la Bretagne serait beaucoup plus longue à réaliser qu'en utilisant le RAMI.

C. QUEL INSTRUMENT POUR QUEL PROFIL DE MISSION ?

L'emploi du RAMI ou du C.A.S.I devra être en premier lieu déterminé par le profil de la mission que l'on voudra réaliser.

S'il s'agit d'une estimation globale d'algues vertes sur les côtes du nord de la Bretagne, le RAMI se révèle être beaucoup plus performant mais aussi d'emploi plus onéreux que le C.A.S.I.

Par contre pour des opérations plus ponctuelles d'évaluation de la biomasse sur des sites pas trop étendus, le C.A.S.I supplante le RAMI par sa souplesse, sa facilité de mise en oeuvre et son moindre coût de revient.

Le tableau 7 propose une synthèse des résolutions spatiales et spectrales des deux instruments qui permettra de déterminer en fonction des caractéristiques de la zone à étudier et de l'objectif de la mission, lequel de ces deux instruments est le mieux adapté.

	Altitude (m)	Résolution en X (m)	Résolution en Y (m)	Nombre de bandes	Largeur de champ (m)
RAMI	700	0,40	0,40	5	650
	1500	0,81	0,81	8	1400
	3000	1,66	1,66	13	2800
CASI SPATIAL	700	0,84	2	5	450
	1500	1,90	2,8	5	950
	3000	3,80	5,5	5	1850

Tableau 7 : Comparaison des différents types de résolution du RAMI et du CASI.

CONCLUSION

La problématique de départ de l'expérience A.R.A.T était de mettre au point une méthode d'évaluation de la biomasse émergée par télédétection entraînant une réduction significative de l'échantillonnage de terrain.

Cet objectif a été rempli bien qu'il reste encore quelques améliorations à apporter à la chaîne de traitement mise au point. Ces améliorations concernent surtout l'expérience de terrain du mois d'Août qui a servi à déterminer une relation empirique entre la biomasse et le N.D.V.I. Dans un premier temps il faudrait donc réaliser davantage de mesures afin d'améliorer la relation empirique, ce qui permettrait ensuite d'abandonner la réalisation d'un échantillonnage de terrain se déroulant en même temps que la campagne aérienne.

En effet les résultats de la mission de terrain de Septembre, se sont révélés à l'usage inutilisables, en raison des modifications survenues dans le plan de vol de l'avion pour cause de conditions météorologiques défavorables. Les difficultés rencontrées lorsque l'on a voulu réaliser une colocalisation entre les données de terrain et celles des images, démontrent clairement qu'il est très difficile d'obtenir une parfaite coordination entre la campagne aérienne et les équipes de terrain.

L'estimation de la biomasse qui a été effectuée, ne concerne que les ulves émergées. On pourrait compléter l'estimation en réalisant des travaux sur les courbes spectrales des ulves immergées afin de trouver une relation qui permette d'en estimer la biomasse.

Le deuxième objectif de la mission A.R.A.T était d'employer la haute résolution spatiale pour réaliser une cartographie de la répartition des ulves immergées. En plus de la réalisation de ce document, l'emploi de la haute résolution a permis d'étudier des structures fines comme les dépôts d'algues ou les formes du réseau hydrographique de la grève. L'étude des dépôts d'ulves a permis de mieux comprendre comment fonctionne le mécanisme d'échouage de ces algues sur la grève.

L'emploi de la haute résolution spatiale s'est révélé à l'usage, être une source de données très prometteuse pour les personnes étudiant le littoral ou réalisant des aménagements.

Les deux capteurs testés lors de l'expérience A.R.A.T : le RAMI et le C.A.S.I se sont révélés être des instruments complémentaires, chacun étant adapté à un profil particulier de mission. Ainsi le RAMI plus coûteux et plus difficile à mettre en oeuvre que le C.A.S.I. serait mieux adapté pour réaliser des évaluations de biomasse et la cartographie de grands espaces. Le C.A.S.I, moins performant, mais plus simple

d'utilisation et surtout moins cher d'emploi que le RAMI conviendrait bien pour l'étude de petites zones.

Il serait donc particulièrement intéressant d'utiliser ces nouveaux capteurs aéroportés pour réaliser un suivi annuel du phénomène de marée verte. D'autant plus que cette nouvelle méthode d'évaluation de la biomasse par télédétection est avantageuse par la rapidité d'acquisition des données et de leur traitement.

Le seul inconvénient notable se situe au niveau financier car l'évaluation de la biomasse par télédétection est onéreuse par rapport à la méthode utilisant des photographies aériennes et un échantillonnage de terrain.

Néanmoins malgré cet inconvénient d'ordre financier, l'utilisation de la haute résolution spatiale serait une source privilégiée d'informations pour la constitution et la mise à jour d'un S.I.G chargé de gérer l'espace littoral. En employant un capteur comme le RAMI, il serait en effet possible de réaliser une évaluation de la biomasse et une cartographie de sa répartition sur tous les sites du nord de la Bretagne, en seulement quelques jours.

LISTE DES FIGURES.

Fig. 1 Principe d'un scanner à balayage par miroir.	12
Fig. 2 Principe d'un scanner utilisant la technique pushbroom.	13
Fig. 3 Situation météorologique du 17 et 18 Septembre 93.	15
Fig. 4 Organigramme décisionnel de la mission A.R.A.T.	18
Fig. 5 : Marée verte sur la grève de St Michel.	20
Fig. 6 La lieue de Grève : Bathymétrie en m et niveaux de marée. (d'après Chassé, 1972).	22
Fig. 7 Granulométrie, Courbes d'isomédiannes en 10-3m. (d'après Chassé, 1972).	22
Fig. 8 : courants résiduels lagrangiens dans la baie de Lannion. (d'après P.Garreau, 1993).	23
Fig. 9 Intensité maximum du courant au cours d'un cycle de marée.	23
Fig. 10 : . Fréquences de la direction des vents pour chaque saison et pour l'ensemble des années 1985 à 1989 : représentation catagraphique.(d'après C.YONI, 1990).	24
Fig. 11 : . Fréquences de la direction des vents pour les années 1985 à 89 représentation catagraphique (d'après C.Yoni, 1990).	25
Fig. 12 : Représentation d'une ulve (ulva.sp).	26
Fig. 13 : Le spectro-radiomètre de terrain SPECTRON SE 590.	27
Fig. 14 : Mise en oeuvre du SPECTRON sur le terrain .	28
Fig. 15 : Mise en oeuvre du SPECTRON sur le terrain .	28
Fig. 16 : Mesure de la réflectance des ulves immergées.	29
Fig. 17 : L'avion de Recherche en Atmosphère et de Télédétection.	33
Fig. 18 : Le radiomètre à balayage RAMI.	35
Fig. 19 : Le mode spatial et le mode spectral du C.A.S.I.	37
Fig. 20 : Station de traitement d'images.	38
Fig. 21 : Schéma d'organisation du logiciel ERDAS version 8.1.	39
Fig. 22 : Spectres des ulves échouées.	40
Fig. 23 : Spectres d'ulves en fonction de la biomasse.	41
Fig. 24 : Relation entre le N.D.V.I et la biomasse.	42
Fig. 25 : Spectres d'ulves en fonction de l'immersion.	44
Fig. 26 : Scène RAMI non corrigée de la Grève de St-Michel.	48
Fig. 27 : Projection conforme conique de Lambert 1.	49
Fig. 28 : Scène RAMI (3000 m) corrigée géométriquement.	50
Fig. 29 : Algorithme de la correction en luminance	52
Fig. 30 : Comparaison entre le N.D.V.I et le P.V.I	54
Fig. 31 : Histogramme bidimensionnel du sédiment et droite des sols.	55
Fig. 32 : Représentation du N.D.V.I par une image en niveaux de gris.	58
Fig. 33 : Image classée en pseudo-couleurs de la biomasse.	59
Fig. 34 : Répartition des différentes sous-zones ou (A.O.I).	60
Fig. 35 : Histogramme de la zone 1 (zone principale d'échouage).	61
Fig. 36: Structures du réseau hydrographique.	66
Fig. 37 : Etude de la morphologie du réseau hydrographique.	67
Fig. 38 : abaque des résolutions spatiales et spectrales du C.A.S.I.	75

LISTE DES CARTES ET DES TABLEAUX.

Carte 1 Sites bretons touchés par le phénomène de marée verte. (d'après J.Y Piriou, 1987).	18
Carte 2 : Plan de survol de la grève pour l'acquisition de la scène RAMI à 3000m	19
Carte 3 : Emplacements des quadrats sur la grève.	30
Carte 4 : Répartition de la biomasse émergée d'ulves sur la grève de St-Michel.	62
Tableau 1 : Vértés de terrain réalisées pour l'expérience A.R.A.T.	32
Tableau 2 : Caractéristiques techniques de l'appareil.	34
Tableau 3 : Resultats des mesures de terrain effectuées avec le SPECTRON.	42
Tableau 4 : Emplacements des bandes spectrales du C.A.S.I et du RAMI pour les différentes altitudes.	45
Tableau 5 : Coefficients de calibration du Rami.	51
Tableau 6 : Résultats de l'estimation de la biomasse émergée.	68
Tableau 7 : Comparaison des résolutions du C.A.S.I et du RAMI.	76

BIBLIOGRAPHIE

BEN MOUSSAH H., 1987 : Contribution de la télédétection satellitaire à la cartographie des végétaux marins : Archipel de Molène (Bretagne / France). Thèse de 3ème cycle, Université d'Aix-Marseille, 118 p.

BOUVIER P., 1992 : Etude de la sensibilité des bassins versants des Côtes d'Armor et d'Ille et Vilaine vis à vis de l'eutrophisation littorale. Cas du Douaron, du Yar, du Roscoat, de l'Ic, du Gouet, de l'Urne, du Gouessant, de l'Islet et de la rivière de Dol. Contrat U.B.O - I.F.R.E.M.E.R, Brest, 203 p.

CASSANET J., 1984 : Satellites et capteurs. Coll Télédétection satellitaire. Ed. Paradigme, Caen 126 p.

CATALOGUE SEDIMENTOLOGIQUE DES CÔTES FRANCAISES, 1987 : Côtes de la Manche et de l'Atlantique, de la Baie du Mont Saint-Michel à la frontière espagnole, Ed Eyrolles, 179 p.

CENTRE D'ETUDE ET DE VALORISATION DES ALGUES (C.E.V.A.), 1991 : Suivi du développement des Ulves en baie de St Brieuc pendant la campagne de déphosphatation de 1991. Rapport réalisé pour le Conseil Général des Côtes d'Armor, Pleubian, 19 p.

CENTRE D'ETUDE ET DE VALORISATION DES ALGUES (C.E.V.A.), 1993 : Estimation de la biomasse des algues vertes en baie de St Brieuc par photographies aériennes le 21 Juin 1993. Rapport réalisé pour le Conseil Général des Côtes d'Armor, Pleubian, 15 p.

CHASSE J.M. , 1972 : Economie Sédimentaire et Biologique des Estrans Meubles des Côtes de Bretagne. Thèse de Doctorat d'Etat Es Sciences Naturelles Université Paris VI, 293 p.

CONSEIL INTERNATIONAL DE LA LANGUE FRANCAISE, 1989, Dictionnaire de l'Océan, Paris, 761 p.

COUZY A., 1981 : La Télédétection. Coll. Que sais je , n°1919, P.U.F, Paris, 127 p.

DENEGRE J., 1988 : Thematic Mapping from Satellite Imagery, International Report. Ed. International Cartographic Association, London & New-York, 214 p.

FOIN P., 1987 : Cartographie topographique et thématique. Coll Télédétection satellitaire. Ed. Paradigme, Caen 118 p.

GARREAU P., 1993 : Condition hydrodynamique sur la côte Nord-Bretagne, rapport interne I.F.R.E.M.E.R. D.E.L, Brest, 20p.

GERARD J. et al, 1986 situation des apports d'origine agricole au milieu marin, rapport de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (E.N.G.R.E.F), Paris, 71 p.

GROTTE A., 1992 Méthode de Cartographie des couvertures algales et sédimentaires à partir de données de Télédétection. Thèse de 3ème cycle, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 195 p.

GUILLAUMONT B., 1989 : Utilisation de l'imagerie satellitaire pour les comparaisons spatiales et temporelles en zone intertidale. Estuaries and Coasts : Spatial and Temporal Intercomparisons ECSA19 Symposium, Ed. Michael Elliot & Jean Paul Ducrotoy, Caen, 6p

GUILLAUMONT B. et al., 1993 : Spatial distribution and quantification of Fucus species and Ascophyllum nodosum beds in intertidal zones using spot imagery. In Hydrobiologica 260/261, Kluwer Academic Publishers, 9 p

GUYOT G., 1989 : Signatures spectrales des surfaces naturelles. Coll. Télédétection satellitaire. Ed. Paradigme, Caen, 150 p.

INTERNATIONAL CARTOGRAPHIC ASSOCIATION, 1984 : Basic Cartography for students and technicians. Ed. R.W ANSON, London & New-York, 2 vol., 347 p.

JOLY G., 1986 : Traitements des fichiers-images. Coll. Télédétection satellitaire. Ed. Paradigme, Caen, 150 p.

MONNIER I., 1989 : Essai de discrimination des ceintures algales de la zone intertidale de Molène avec des données S.P.O.T. Mémoire de D.E.A.(Gestion et Aménagement des littoraux), Université de Bretagne Occidentale, Brest, 66 p.

PAUL S et al., 1991 : Introduction à l'étude de la télédétection spatiale et de son vocabulaire, La documentation française, Paris, 316 p.

PINOT J.P., 1987 : Des îles disparues sur la lieue de Grève; Les Iles du Trégor : bulletin de l'Association pour la Protection, l'Etude et la Gestion des Iles Trégorroises (A..P.E.G.I.T.), n°2, Lannion, 6 p.

PIRIOU J.Y et al. ,1989 : Les marées vertes à Ulves : conditions nécessaires, évolution et comparaison de sites Estuaries and Coasts : Spatial and Temporal Intercomparisons ECSA19 Symposium, Ed. Michael Elliot & Jean-Paul Ducrotoy, Caen, 6p

PIRIOU J.Y. ,1990 : Evaluation du stock maximal d'ulves en 1990 dans le sud de la baie de St Brieuc. Rapport I.F.R.E.M.E.R (D.E.L), Plouzané, 15 p.

PIRIOU J.Y et al.,1993 : Cartographie des zones sensibles à l'eutrophisation littorale ; cas des côtes bretonnes. Contrat C.E.E - I.F.R.E.M.E.R. - Région Bretagne, rapport de synthèse, Plouzané, 80 p.

TALLEC P., 1992 : Essai d'interprétation bathymétrique et morphodynamique à partir de données S.P.O.T. Mémoire de D.E.S.S. de Télédétection, G.D.T.A, Toulouse, 56 p.

YONI C., 1990 : Les dunes de Keremma - Baie de Goulven - Finistère. Evolution du milieu naturel depuis l'intervention du conservatoire du littoral et des rivages lacustres. Mémoire de maîtrise de Géographie, U.B.O, Brest, 259 p.

