

Évaluation, par télédétection satellitaire, des stocks de *Macrocystis pyrifera* dans le golfe du Morbihan (archipel de Kerguelen)

Macrocystis pyrifera
Télédétection spatiale
SPOT-1
NOAA-11 AVHRR
Archipel de Kerguelen

Macrocystis pyrifera
Remote sensing
SPOT-1
NOAA-11 AVHRR
Kerguelen archipelago

Thomas BELSHER^a et Marie-Catherine MOUCHOT^b

^a Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER),
Centre de Brest, Département Environnement littoral, B.P. 70, 29280 Plouzané,
France.

^b Centre Canadien de Télédétection, Division des Applications, 1547 Merivale
Rd, K1A 0Y7, Ottawa, Canada.

Reçu le 16/01/92, révisé le 2/04/92, accepté le 7/04/92.

RÉSUMÉ

Macrocystis pyrifera, algue pouvant atteindre 60 m de long, est présente en quantité aux îles Kerguelen. Aux fins de réalisation d'une cartographie qualitative et quantitative de cette espèce, les satellites SPOT-1 et NOAA-11 ont été programmés pour l'acquisition de scènes centrées sur l'île Noire pendant l'été austral 1988. L'exploitation des données du satellite SPOT-1 a permis d'estimer que le stock végétal représenté par *Macrocystis pyrifera* s'élève à 1 106 000 t (poids humide) et qu'il occupe une superficie de 186,30 km² dans le golfe du Morbihan. Une classification suivant la densité montre que 60 % de cette biomasse végétale sont répartis sur 30 % de la superficie concernée. Ainsi, les herbiers les plus denses représenteraient un potentiel de 13 220 t d'alginate de qualité industrielle. L'exploitation des données du satellite NOAA-11 a permis de situer l'archipel de Kerguelen dans son contexte océanique et de positionner les données SPOT.

Les divers documents cartographiques issus du traitement des données spatiales ont offert la possibilité de comparaisons et de recalages des données antérieures, tant biologiques que physiques. La validation des données spatiales a été effectuée au cours d'une mission de terrain, englobant la période d'acquisition de ces données.

Oceanologica Acta, 1992. 15, 3, 297-307.

ABSTRACT

Use of satellite imagery in management of giant kelp resources, Morbihan Gulf, Kerguelen archipelago

Macrocystis pyrifera, algae which grow to about 60 m in length, are widely present in the Kerguelen Islands. A satellite program has been initiated to map these species quantitatively and qualitatively as well as to establish a possible correlation between their occurrence and sea-surface temperature. Data from SPOT-1 and NOAA-11 AVHRR were acquired during the 1988 austral summer around the area of "l'île Noire". SPOT-1 data processing has permitted estimation of the biomass (wet weight) of *Macrocystis pyrifera* at 1 106 kt, spread over an area of 186.30 km² in the Morbihan Gulf. Supervised classification shows that 30 % of the vegetal coverage carries 60 % of the total biomass. These clusters of seaweed

represent a potential of 13 220 tons of industrial-quality alginates. NOAA-11 data have permitted the location of SPOT-1 imagery on the Kerguelen archipelago.

The different thematic maps obtained by processing the remotely-sensed data have permitted assessment of previously acquired biological and physical data. The validation of the remotely-sensed data was carried out through a ground-truthing mission at the time of acquisition.

Oceanologica Acta, 1992. 15, 3, 297-307.

INTRODUCTION

L'objectif principal de cette étude est la cartographie qualitative et quantitative de *Macrocystis pyrifera* (Linnaeus) C. Agardh, algue dominante et potentiellement exploitable du golfe du Morbihan de l'archipel de Kerguelen.

Macrocystis pyrifera, *Fucophyceae*, est présent en quantité aux îles Kerguelen (Belsher et Mouchot, 1990). Cette algue macrophyte appartient à la famille des Lessoniaceae, de l'ordre des Laminariales, et peut atteindre 60 m de long. La croissance s'effectue par un méristème intercalaire. La longévité des frondes est de neuf mois et celle du crampon, qui assure la fixation par de nombreux haptères, d'environ huit ans (North, 1986). *Macrocystis pyrifera* est présent, non seulement dans les eaux antarctiques et subantarctiques de l'hémisphère sud, mais également le long des côtes californiennes dans l'hémisphère nord (Michanek, 1979 ; North, 1971 ; 1986). Il a, de plus, été introduit au nord de la Chine en 1978 (North, 1986) afin d'accroître les ressources culturelles de ce pays. Dans la même optique, des essais d'acclimatation ont été réalisés en France, à Roscoff, par l'Institut Scientifique et Technique des Pêches Maritimes (ISTPM), en 1972 (Braud *et al.*, 1974).

Dans l'archipel de Kerguelen, *M. pyrifera* est généralement fixé sur substrats rocheux, de la profondeur de - 20 m à la côte.

Le long des côtes californiennes, l'homogénéité des champs de *Macrocystis pyrifera*, leur étendue, la teneur en acide alginique et sa qualité, ont permis le développement d'une exploitation mécanisée. Le stock exploitable était, en 1984, de 47 230 t poids humide pour une superficie de 4 765 ha. Il peut atteindre, et même dépasser certaines années, 100 000 t (North, 1986). Dans l'optique d'une exploitation similaire à celle pratiquée ailleurs dans le monde, notamment le long des côtes californiennes, des opérations de localisation et de biométrie ont eu lieu depuis plusieurs années dans le golfe du Morbihan de l'archipel de Kerguelen (Grua, 1964 ; Delépine, 1976 a ; b ; Delépine *et al.*, 1987 ; Arnaud, 1974). Par ailleurs, la gène représentée par ces champs pour la navigation a constitué un autre motif d'intérêt, expliquant leur signalisation déjà sur les cartes les plus anciennes, sous l'appellation la plus courante de «goémon géant». Une synthèse des observations disponibles les plus fiables, pour la période allant de 1952 à 1988, a été effectuée, en préalable d'une mission de terrain, qui s'est déroulée pendant l'été austral 1988.

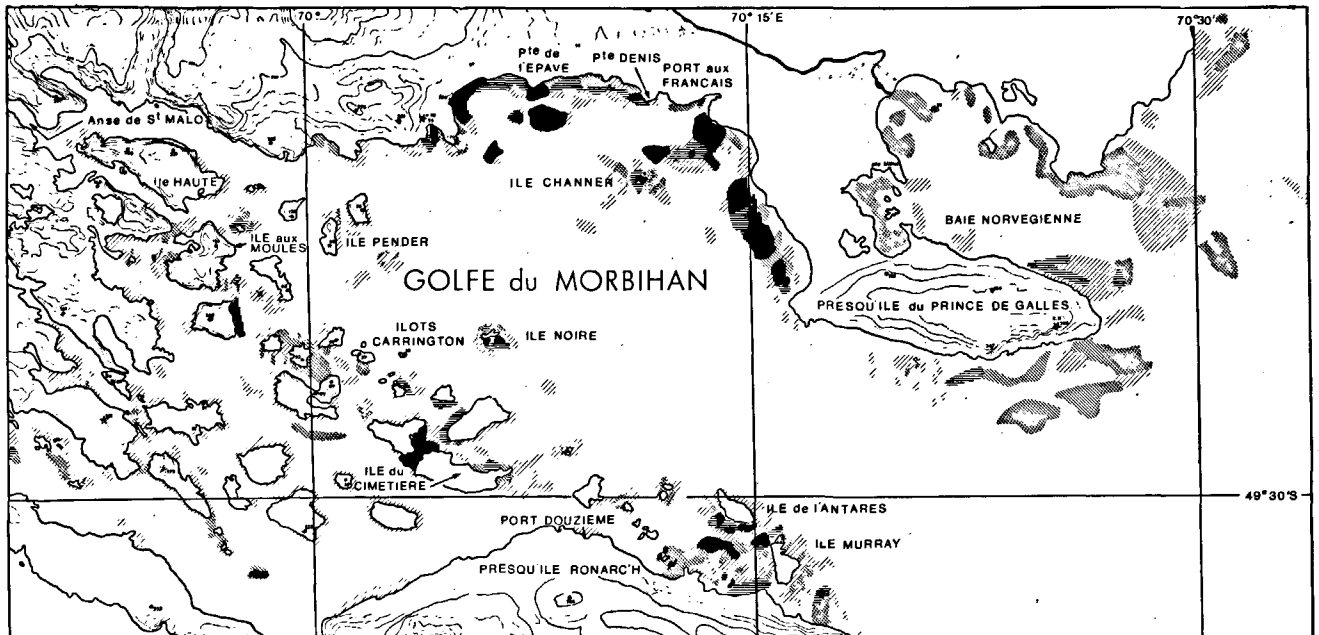
Il apparaît des différences notables suivant les observateurs quant à la localisation des champs de *Macrocystis*

pyrifera. Ces divergences s'expliquent tant par les objectifs qui ont guidé ces cartes que par la disparité des moyens d'observation. Les difficultés d'observations, depuis la côte et en mer ou par des moyens aériens, ainsi que le caractère sporadique de celles-ci, expliquent également pour une bonne part les contradictions entre cartes. Pour cette raison, il est délicat de comparer les données des différentes missions. De plus, pendant la période d'observation considérée, soit une quarantaine d'années, la totalité des champs du golfe du Morbihan n'a pas été suivie, et l'on ignore la part prise par les fluctuations dues à des facteurs naturels. Celles-ci ne sont pas négligeables, comme le montrent les résultats des suivis effectués le long des côtes californiennes, notamment par Jensen *et al.* (1980) à l'aide de divers capteurs dont LANDSAT. Des fluctuations notables sont également mentionnées par North (1986).

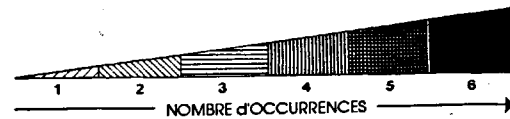
Afin de synthétiser au mieux l'ensemble de ces données, une carte d'occurrence a été établie (fig. 1). Elle permet de faire le point sur les signalisations déjà acquises et offre la possibilité d'une comparaison avec les données SPOT. La première remarque qu'il est possible de formuler est que les observations les plus fréquentes concernent les secteurs proches de Port-aux-Français, donc les plus facilement observables ainsi que les plus fréquentés, comme ceux, également, de l'île du Cimetière. La seconde est que, pour l'obtention de données relatives à la gestion d'une telle ressource naturelle, renouvelable, susceptible de subir d'importantes variations saisonnières et d'être exploitée, il est nécessaire de disposer d'un système précis et souple d'observation à grande échelle. Cette nécessité se transforme en exigence à de telles latitudes où toute opération de terrain est aléatoire et coûteuse.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'observation par satellite, de par sa vision globale et répétitive, pallie la plupart des lacunes des autres méthodes. De plus, l'enregistrement numérique des données permet d'obtenir des informations quantitatives telles que la surface et la densité des peuplements toutes deux indispensables à l'évaluation précise du tonnage disponible. A cet effet, le satellite d'observation de la terre SPOT-1, a été programmé pour l'acquisition de scènes, centrées sur l'île Noire, au cours de l'été austral 1988. Durant la même période, une mission de «vérité de terrain», destinée à valider les données spatiales, a été conduite.



LE FIGURÉ EST ÉTABLI EN FONCTION DU NOMBRE D'OBSERVATIONS, ISSUES DES SOURCES SUIVANTES : cartes SHOM n° 6087 (1952), document bathymétrique C. Leciaire (1967), cartes IGN (1967 et 1973), carte de bionomie benthique R. Delépine (1967 à 1973), carte géologique J. Nougier (1970), observations en mer D. Rochard et T. Belsher (1988).



Points de triangulation: primordiale (▲¹⁷), calculés (☆¹⁴), graphiques (●²⁶)

Conception graphique: M. TRINDADE (INTERA) et P. BODENES (IFREMER)

Figure 1

Synthèse des observations sur *Macrocyctis pyrifera* de 1952 à 1988.

Summary of observations on *Macrocyctis pyrifera* (1952 to 1988).

Afin d'avoir une vision globale de l'archipel de Kerguelen dans son contexte océanique, de positionner les données SPOT et de préparer la couverture totale à haute résolution, le satellite NOAA-11, dont le champ de vision est de 2 000 km, et la résolution de l'ordre de 1,1 km, a également été programmé.

Exploitation des données satellitaires existantes

Les premières images spatiales sur l'archipel de Kerguelen ont été acquises par le satellite SPOT-1, le 7 avril 1987, avant la définition de ce programme. Bien qu'entachées de plusieurs nuages, elles ont permis d'effectuer des traitements préliminaires sur les systèmes numériques d'analyse d'images COMTAL 20/1 et IVAS (logiciels Gipsy et Gringo ; Belbeoch, 1983) du Centre IFREMER de Brest, ainsi qu'ARIES III (logiciel Dipix) du centre Canadien de Télédétection à Ottawa.

L'une des particularités de *Macrocyctis pyrifera* étant d'apparaître en surface, grâce à des flotteurs formés le long des frondes, sous forme d'un dais de densité variable, l'étude de la réponse dans le proche infrarouge a été privilégiée.

Huit sites-tests, pour le golfe du Morbihan et un pour la Baie norvégienne attenante à ce golfe, ont pu ainsi, avec l'aide de données historiques issues de recherches bibliographiques, être sélectionnés (fig. 2). Les traitements ont

été poursuivis, sur l'archipel de Kerguelen, et au cours du transit sur le bateau *Marion Dufresne*, vecteur logistique des TAAF (Terres Australes et Antarctiques Françaises), avec la station portable de traitement d'image T.I.M. (Traitement d'Image sur Micro-ordinateur) de l'IFREMER (logiciel Multiscopie de CAP SESA, micro-ordinateur Compaq 386, moniteur Aydin) définie spécialement pour la circonstance.

Acquisition de données satellitaires

Des scènes, centrées sur l'île Noire (49°26' latitude S-70°06' longitude E) du golfe du Morbihan ont été programmées sur les satellites SPOT-1 et NOAA-11 de façon à couvrir la période d'acquisition des données, soit du 18 novembre au 15 décembre 1988. Parmi les images obtenues par le satellite SPOT-1, celles du 26 novembre 1988 ont été retenues du fait de l'absence totale de couverture nuageuse et de l'état de surface de la mer, exceptionnellement calme ce jour-là. Elles ont été traitées sur les systèmes numériques d'analyse d'image utilisés pour l'exploitation des données satellitaires existantes décrits au paragraphe précédent. Quant aux images provenant du satellite NOAA-11, celle du 1^{er} décembre 1988, qui offre une bonne vision de l'intégralité de l'archipel de Kerguelen, a été traitée au Centre Canadien de Télédétection sur le système numérique d'analyse d'images ARIES III.

Acquisition de données de terrain

Radiométrie

Des acquisitions de signatures spectrales ont été entreprises à l'aide d'un radiomètre portatif Cimel, simulant les trois bandes spectrales de SPOT. Ces acquisitions, effectuées tant au sol qu'à partir d'hélicoptère, ont eu pour but de voir s'il était possible de discriminer les différentes populations de grandes algues recensées, à savoir *Lessonia flavicans* Bory et *Durvillea antarctica* (Chamisso) Hariot, de celles à *Macrocystis pyrifera* (Delépine et al., 1987), ainsi que d'établir une corrélation entre l'intensité du signal et la densité des populations observées (fig. 3, tab. 1).

Photographie et vidéo aérienne

Une caméra vidéo de marque Hitachi a été utilisée, parallèlement à un appareil photographique Bronica 6 x 6 pour pouvoir identifier et quantifier *de visu* les peuplements d'algues des sites-tests sélectionnés (fig. 3, tab. 1).

Photographie et vidéo sous-marine

La caméra vidéo utilisée, modèle OE 2330A de la marque Osprey Electronics Ltd (système PAL) permettant l'enregistrement de prises de vues en couleur et de clichés photographiques, est équipée d'un objectif grand-angulaire de 24 mm (F 2,5), dont l'angle de vision en immersion est de 65,07 degrés. Le fonctionnement de la caméra est commandé par les unités de contrôle Cyclops OE 1210A et OE 1211A et les prises de vues vidéo sont enregistrées à l'aide d'un magnétoscope Sony VO-3800P (type U-matic).

Les vues sont prises depuis le navire en dérive, la caméra étant montée verticalement sur un bâti rigide, tout au long

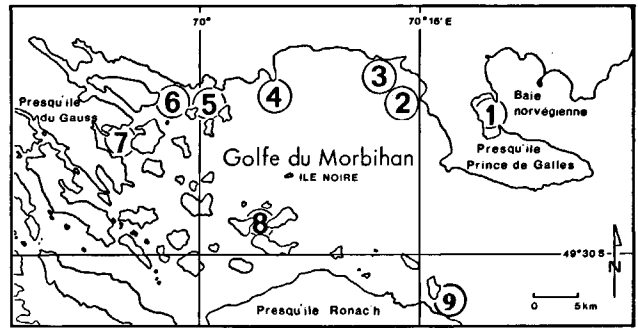


Figure 2
Localisation des sites tests.

Location of pilot areas.

de trajets d'observation, à des profondeurs comprises entre - 5 et - 25 m (fig. 3, tab. 1). La base de données, constituée par le dépouillement des séquences vidéo, a été exploitée à l'aide du progiciel KnowledgeMan (Kman) et du logiciel interactif de saisie et d'exploitation statistique Vidéo 1 (Nédélec, 1987; Anonyme, 1988 a ; b ; 1989).

Mesures de biomasse

De par le monde, plusieurs méthodes ont été utilisées pour estimer la biomasse de *M. pyrifera*, dont la taille rend la mesure délicate. Les méthodes d'exploitation couramment utilisées aux États-Unis conduisant, par faucardage, au prélèvement de la matière première dans les cinquante premiers centimètres sous la surface, il est nécessaire d'acquies cette donnée de biomasse pour évaluer le stock exploitable (North, 1986). C'est celle qui a été calculée par Delépine (1976 a ; b), et que nous avons utilisée, après quelques mesures et prélèvements *in situ*, dans un but de

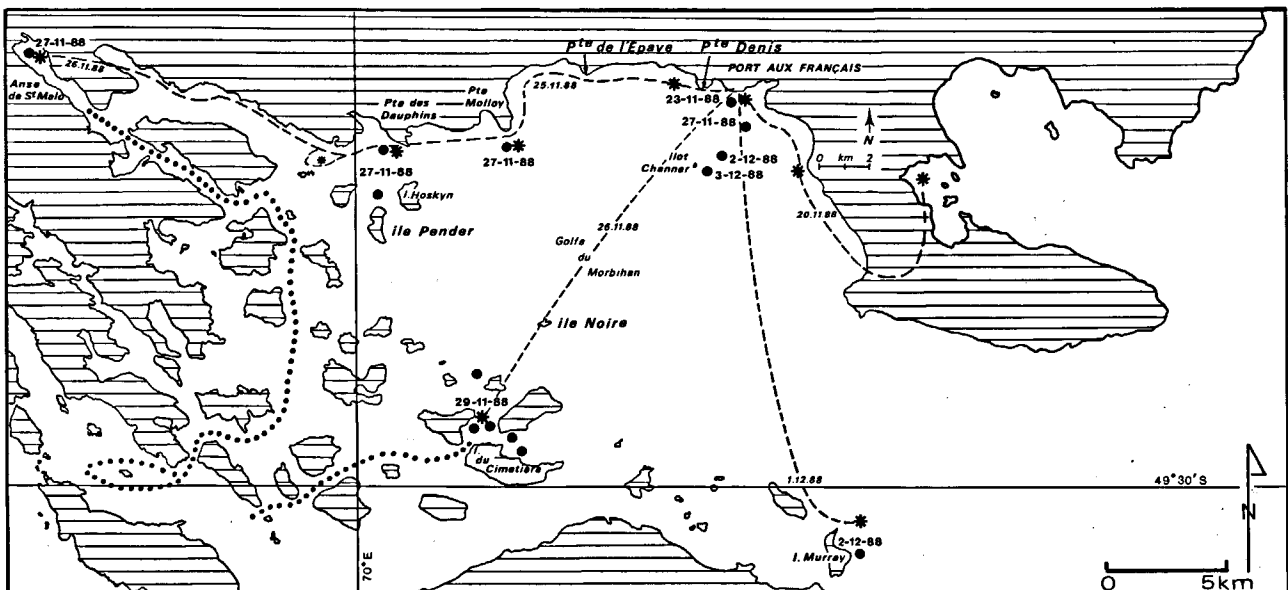


Figure 3

Report des trajets d'observation et des secteurs d'acquisition des données. Navire *La Japonaise*: trajet 27.11.1988 : vidéo et photo sous-marine ● Hélicoptère "Alouette 2" : trajet --- 25.11.1988 : radiométrie vidéo et photo aériennes *.

Plotting of data after RV La Japonaise cruise and helicopter flights.

Tableau 1

Liste et dates des travaux réalisés pendant la mission de terrain menée du 18 novembre 1988 au 15 décembre 1988 dans l'archipel de Kerguelen.

List of projects carried out in the Kerguelen archipelago (18 November 1988 to 15 December 1988).

En vol (hélicoptère) :

Radiométrie et photographie aérienne à 1 000 et 250 m,
Vidéo des secteurs survolés
20/11, 25/11, 26/11, 1/12, 5/12, 13/12

En mer (navire *La Japonaise*) :

Photographie et vidéo sous-marine entre - 5 et - 25 m,
Radiométrie, biométrie,
Dragages, disque de Secchi, sondages ponctuels, température et salinité *
23/11, 27/11, 29/11, 2/12, 3/12, 7/12, 8/12

En mer (embarcation pneumatique) :

7/12, 8/12, 12/12, 13/12 : biométrie

A terre :

Récoltes et observations dans champs d'algues et dans laisses de mer ;
Radiométrie
22/11, 6/12,
Traitement des données, constitution de l'herbier de référence
21/11, 23/11, 26/11, 28/11, 1/12, 6/12, 8/12, 9/12, 10/12, 14/12

vérification rapide, étant donné la courte durée de la mission de terrain (du 18 novembre au 15 décembre 1988). Ainsi, la biomasse superficielle (poids humide) est-elle, d'après Delépine (1976 b), «between 3,4 and 22,5 kg/m² for canopies cut 0,5 m beneath the sea surface ; the most common values are between 7 and 12 kg/m² with an estimated average value of 5 to 10 kg/m²».

Cette variabilité est liée à la densité des herbiers que nous avons classés en fonction des distances séparant les frondes en surface ; prélèvements et pesées ont été effectués au sein de ces différentes classes.

Dragages

En complément des données obtenues par vidéo et photographies sous-marines, il a été procédé à des dragages (drague Rallier du Baty). Ceux-ci ont permis d'identifier les espèces dominantes en bordure des champs de *Macrocystis pyrifera*, et de confirmer, pour plusieurs parcours, l'extension sous-marine de ces champs.

Récoltes et observation

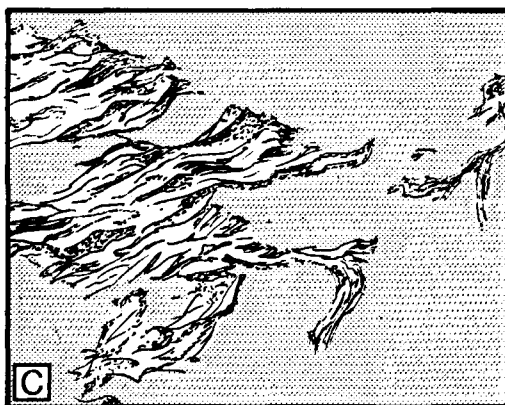
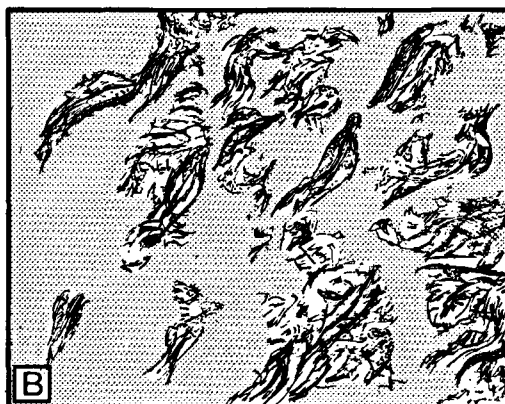
Les trajets du navire «La Japonaise» dans le golfe du Morbihan ont été mis à profit pour constater, *de visu*, la présence ou l'absence des populations d'algues macrophytes (fig. 3).

RÉSULTATS

Données de terrain

Les observations effectuées tant d'hélicoptère qu'en mer ou de la côte ont montré que les populations à *Macrocystis*

pyrifera en 1988 sont toujours largement majoritaires par rapport à celles à *Lessonia flavicans* et *Durvillea antarctica*. Ces deux dernières populations, quand elles sont présentes, sont trop proches de la côte et leur étendue trop faible (≤ 1 pixel) pour pouvoir être discriminées de celle-ci, sur l'imagerie SPOT, entre elles ou des champs de *Macrocystis pyrifera*. Quant à ceux-ci, ils peuvent



5 m

Figure 4

Classification des populations de *Macrocystis pyrifera* (schémas d'après photographies aériennes) : A : classe 1 ; B : classe 2 ; C : classe 3.

Macrocystis pyrifera populations classified after analysis of aerial photographs.

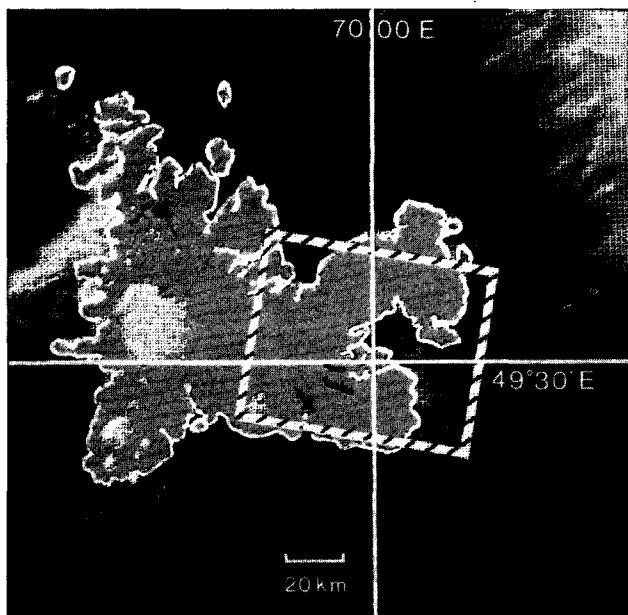


Figure 5

Scène NOAA-11 du 1.12.1988. Vision globale de l'archipel de Kerguelen et positionnement de la scène SPOT.

NOAA-11 satellite data with localization of SPOT data.

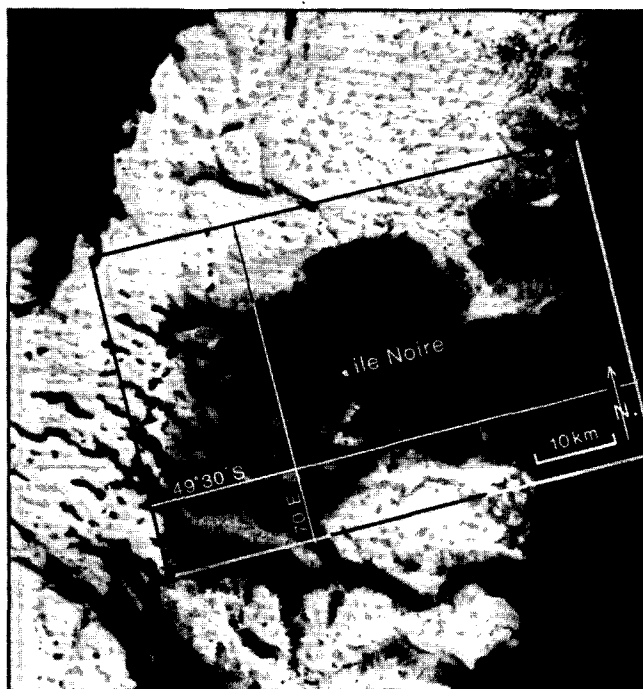


Figure 6

Scène multispectrale du satellite SPOT-1 (26 novembre 1988) englobant le golfe du Morbihan, avec les limites de la zone étudiée.

SPOT satellite multispectral data (26 November 1988), with localization of the studied area.

s'étendre de l'isobathe 20 m à la côte, être séparés de celle-ci par un chenal d'eau libre ou bien par les deux autres espèces présentes. Ils forment, du fait qu'une partie de la fronde est soutenue par des flotteurs, des dais plus ou moins denses en surface.

Tableau 2

Mesures de biomasse par classe (en kg/m²).

Biomass data by class (kg/m²).

	Classe 1		Classe 2		Classe 3	
	23.3	22.6	5.8	15.1	2.5	5.2
	23.3	21.8	12.9	7.9	0.0	3.1
	18.3	24.0	14.1	13.2	0.0	2.8
	17.8	24.3	7.3	11.1	1.9	6.2
	22.0	23.9	12.0	11.1	4.5	5.1
	26.0	20.1	8.2	10.4	3.9	6.9
	23.5	19.7	3.2	3.2	4.0	2.0
	21.8	25.3	18.6	10.2	5.1	0.6
	24.3	20.6	13.8	7.1	3.0	0.0
	23.9	23.5	4.1	10.7	9.1	2.1
Moyenne	22.5		10.0		3.4	
Écart-type	2.2		4.1		2.4	
Biomasse minimale	17.8		3.2		0.0	
Biomasse maximale	26.0		18.6		9.1	

La méthodologie de traitement de l'imagerie spatiale sera donc conditionnée par la recherche de cette information de surface qui, du fait des propriétés de réflexion de la lumière par les végétaux chlorophylliens, proviendra essentiellement du proche infrarouge.

Le système de vidéo et de photo sous-marine ne pouvant être utilisé qu'en dérive, et étant donné l'impossibilité de naviguer dans les champs de *Macrocystis pyrifera*, les parcours sous-marins ont suivi uniquement les bordures de ces champs. Sur les dix parcours sous-marins analysés, six révèlent la présence de populations de *M. pyrifera* non visibles de la surface (anse de Saint-Malo, île Pender, île Murray, pointe de l'Épave, pointe Denis, îlot Channer). Parmi eux, la population de *M. pyrifera* est dominante dans les secteurs de l'anse de Saint-Malo et des îles Pender et Murray.

L'information obtenue en surface ne révèle donc qu'une partie de cette ressource végétale.

L'analyse comparée des observations, mesures *in situ*, prélèvements, pesées, données bibliographiques et documents obtenus par voie aérienne a permis de classer les peuplements de *M. pyrifera* selon la densité des frondes en surface, en trois classes (fig. 4 A, B, C) :

- classe 1 : distance interfronde < 2 m (fig. 4 A) ; superficie : 8,57 km² ; biomasse : 139 000 t ;

- classe 2 : 2 m < distance interfronde < 5 m (fig. 4 B) ; superficie : 46,8 km² ; biomasse : 468 000 t ;

- classe 3 : distance interfronde > 5 m et < 20 m (fig. 4 C) ; superficie : 130,93 km² ; biomasse : 445 000 t ;

auxquelles correspondent les biomasses moyennes « poids humide » suivantes, issues des données de terrain (tab. 2) :

- classe 1 = 22,5 kg/m² ;

- classe 2 = 10,0 kg/m² ;

- classe 3 = 3,4 kg/m².

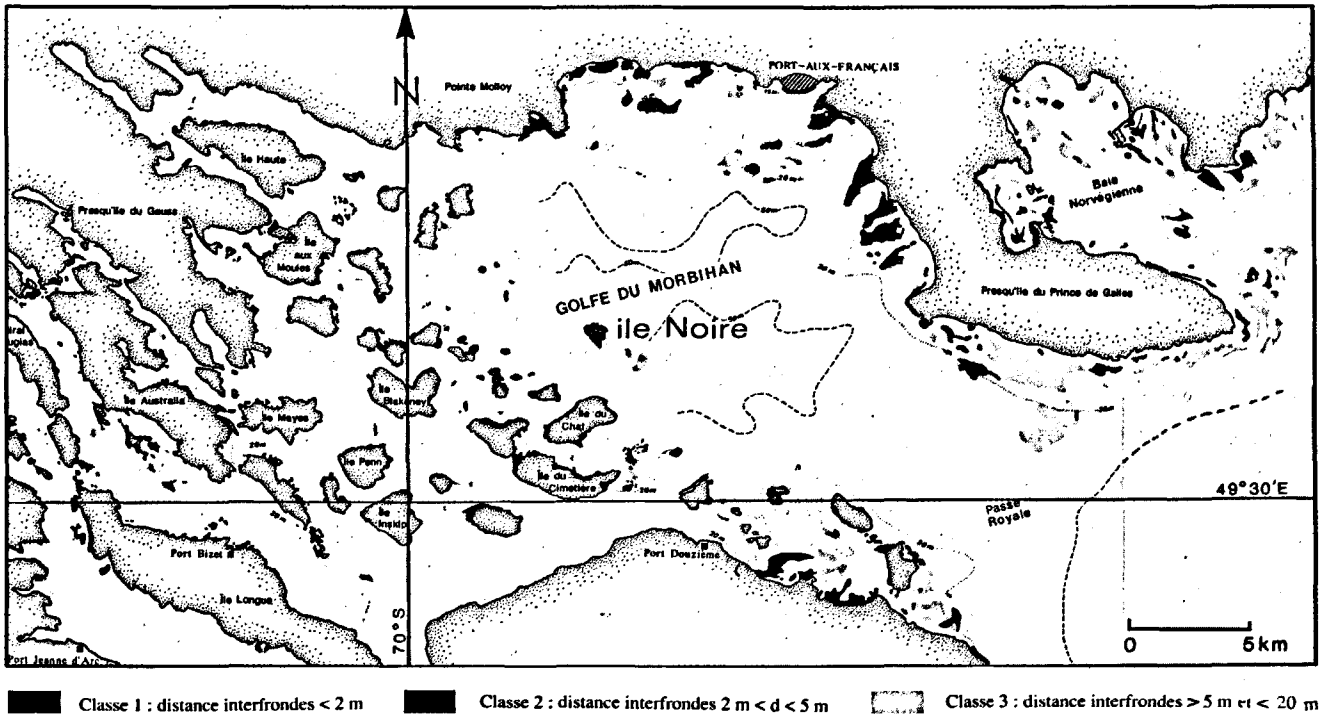


Figure 7

Terres Australes et Antarctiques Françaises. Carte thématique des populations de *Macrocyctis pyrifera* (golfe du Morbihan) après traitement de l'imagerie SPOT, acquise le 26/11/1988.

Thematic map of Macrocyctis pyrifera (Morbihan Gulf) after processing of SPOT data, obtained on 26/11/1988.

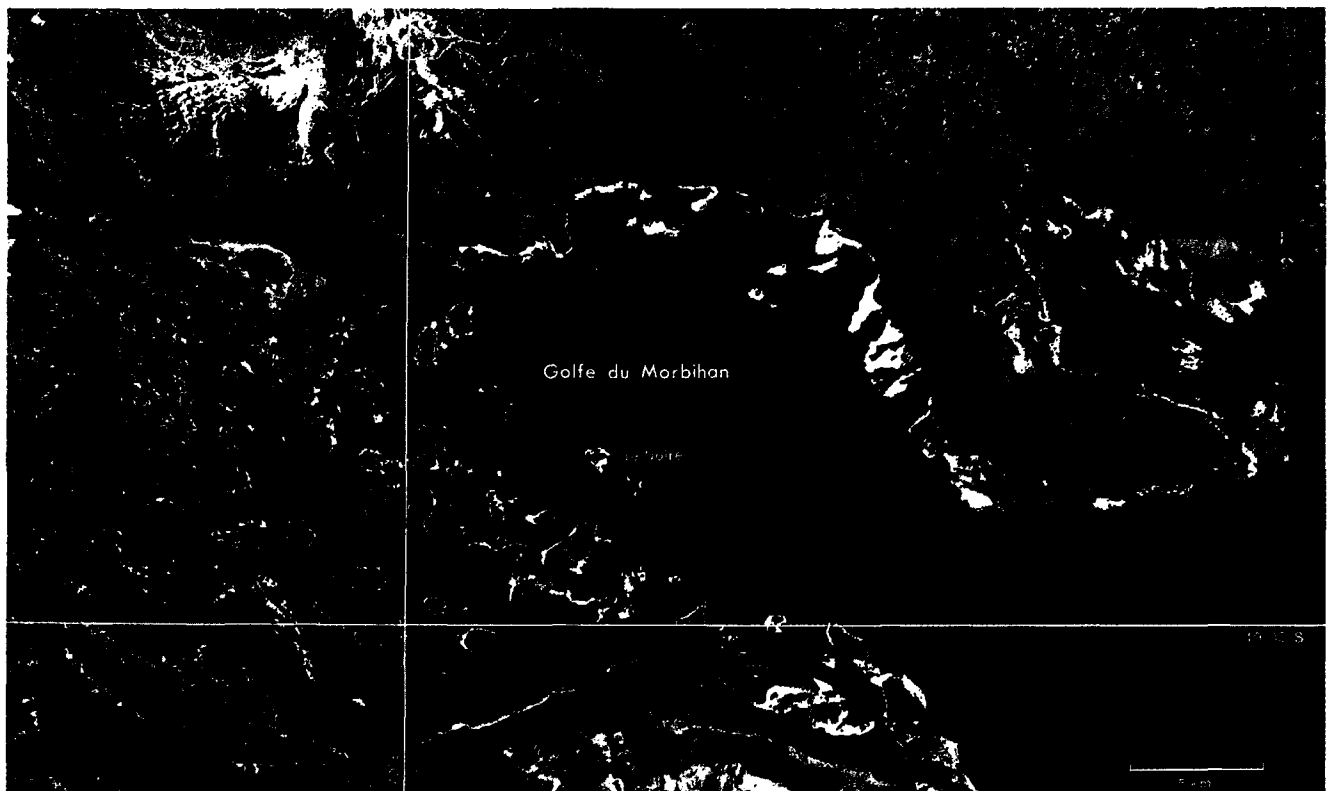


Figure 8

Image SPOT-1 traitée avec localisation des populations les plus exploitables de *Macrocyctis pyrifera* (golfe du Morbihan ; classes 1 et 2).

SPOT image with localization of exploitable Macrocyctis pyrifera populations (Morbihan Gulf) after processing of SPOT data.

Exploitation des données satellitaires

Imagerie NOAA-11

L'image du 1^{er} décembre 1988 permet la vision de l'intégralité de l'archipel de Kerguelen et le positionnement, par rapport à celui-ci, de l'image SPOT sélectionnée (fig. 5).

Imagerie SPOT-1

A l'exception du lignage habituel, affectant de manière inégale les différents canaux et en rapport avec le faible niveau de luminance de la mer, l'image obtenue le 26 novembre 1988, dans le mode multispectral, est de bonne qualité (fig. 6). On constate aussi des défauts d'étalonnage, qui sont dus à des problèmes de non-linéarité différentielle entre détecteurs et entre barettes. Ces défauts sont de l'ordre de 1 à 2 pas de quantification et sont les plus importants en XS1 (0,50 à 0,59 μm) et XS2 (0,61 à 0,68 μm) (Anonyme, 1986).

Grâce aux données radiométriques issues des mesures *in situ*, une relation linéaire a pu être établie entre les taux de réflectance et la densité des peuplements, autorisant la définition de classes d'équidensité. Les comptes numériques y , mesurés sur l'image SPOT, caractérisant l'eau libre et la classe végétale la plus dense, sont respectivement de 5 et de 35. Les valeurs de radiométrie correspondantes x , acquises sur le terrain, sont de 20 et de 140, d'où le système d'équations : $5 = a \cdot 20 + b$ et $35 = a \cdot 140 + b$. Trois groupes de mesures, assimilables à des peuplements de densités différentes, peuvent être distingués. Les valeurs extrêmes de chacun de ces groupes, reportées dans la relation linéaire établie, permettent alors de définir les classes d'équidensité suivantes :

- classe 1, densité forte : $y = 27,25$ à $35,00$ pour $x = 109$ à 140
- classe 2, densité moyenne : $y = 12,50$ à $27,25$ pour $x = 95$ à 109
- classe 3, densité faible : $y = 5,00$ à $12,50$ pour $x = 50$ à 95

• Paramètres de seuillage

En moyenne, chacune des frondes s'étale en surface sur 1 m de large. Sachant que la taille du pixel est de 20 m, il s'ensuit qu'un peuplement de classe 1 couvrira de 50 à 100 % du pixel, qu'un peuplement de classe 2 couvrira de 20 à 50 % du pixel, et qu'un peuplement de classe 3 couvrira moins de 20 % du pixel.

Lorsque l'eau est libre de toute végétation, le compte numérique relevé (CN) dans le canal couvrant le proche infrarouge (XS3) est égal à 5, alors que sur un site test de classe 1 il est égal à 35. On peut donc déterminer, en fonction du pourcentage de couverture, le CN de seuillage pour chacune des classes.

Les paramètres de seuillage retenus sont donc les suivants :

- classe 1 : $21 \leq \text{CN} \leq 35$;
- classe 2 : $11 \leq \text{CN} \leq 20$;
- classe 3 : $5 \leq \text{CN} \leq 10$.

Les valeurs de seuillage de la classe 3 sont à la limite du seuil de bruit des détecteurs (évalué à environ 2 CN pour les faibles luminances), et sa détermination est donc restreinte par ce facteur (Anonyme, 1986). Les classes sont alors étudiées séparément, puis reportées sur une carte, dont le trait de côte est issu de la donnée SPOT. Une carte

thématique, où les trois classes sont différenciées, est donc d'abord produite (fig. 7).

Par contre, si on ne considère que les classes 1 et 2 les plus denses, il est possible d'utiliser des méthodes de seuillage entièrement automatiques, car le niveau de bruit ne représente plus un obstacle. En effet, la régularité du lignage induit par les défauts propres aux détecteurs et à la faible luminance de la mer, permet de le différencier sans ambiguïté des réponses données par la plus grande partie des populations de *Macrocystis pyrifera* les plus denses. Aussi, une image directement produite à partir des données SPOT et sur laquelle figurent finalement les populations les plus facilement exploitables, ainsi que l'information géographique terrestre, est donc présentée (fig. 8). Cependant, ce type de traitement, plus rapide que le précédent, entraîne des disparités en certains points très proches de la côte, ainsi qu'au niveau des populations de la classe 2 prises en compte, par rapport à la carte thématique exhaustive.

• Domaine marin : végétation immergée

L'indice spécifique au traitement de la végétation immergée à faible profondeur $(XS1)^2/(XS2)$ mis au point lors de programmes précédents (Belsher, 1987 ; Ben Moussa, 1987) n'a donné aucun résultat probant. En effet, la végétation visée au-delà de la bordure du champ de *Macrocystis pyrifera* se développe à des profondeurs supérieures à 20 m. Par ailleurs, les mesures effectuées au disque de Secchi, lors de l'acquisition de l'image SPOT le 26 novembre 1988, ont établi que la transparence de l'eau ne dépassait pas 10 m à ce moment. Aussi, la détection des fonds situés en dessous de cette limite s'est-elle avérée impossible.

• Calcul des superficies de la végétation émergée

Pour chacune des classes le calcul des superficies a été effectué et les chiffres suivants ont été obtenus :

- classe 1 : 8,57 km^2 ;
- classe 2 : 46,80 km^2 ;
- classe 3 : 130,93 km^2 ;

soit une superficie totale de 186,30 km^2 . Les classes 1 et 2 totalisent 55,37 km^2 , soit 30 % de la superficie totale. Les erreurs commises sur le calcul des superficies sont dues à :

- la résolution spatiale du capteur (20 x 20 m), qui entraîne une erreur approximative de 2 % ; l'erreur sera relativement plus importante pour les champs de faible étendue que pour ceux de grande dimension ;
- les populations végétales émergées autres que celles à *Macrocystis pyrifera* sont englobées du fait de l'impossibilité de les discriminer ;
- de la même manière, lorsque les champs s'étendent jusqu'à la côte, le signal de celle-ci interfère avec celui de la végétation marine. L'imprécision relative du trait de côte des cartes existantes, en cours de réfection, ne permet pas toujours de trancher équitablement. Les disparités entre la carte thématique (fig. 7) et l'image SPOT traitée (fig. 8) en sont d'ailleurs une illustration.

En appliquant à chacune des classes les valeurs de biomasse correspondantes, on arrive aux tonnages suivants (poids humide) :

- classe 1 : 193 000 t ;
 - classe 2 : 468 000 t ;
 - classe 3 : 445 000 t ;
- soit un total de 1 106 000 t.

Les classes 1 et 2 totalisent 661 000 t, soit 60 % du tonnage total. Il s'ensuit que sur 30 % de la superficie couverte par cette espèce, on retrouve 60 % de la biomasse. D'après Delépine (1976 b), la biomasse «poids sec» étant 10 % de celle «poids humide», le stock exploitable serait de 110 600 t (66 100 t pour les classes 1 et 2), soit respectivement 22 120 t et 13 220 t d'alginate potentiel de qualité industrielle. Selon le cours international pratiqué en

1987 où l'alginate industriel était estimé à environ 5 \$ le kg, la valeur marchande du stock évoluerait entre 111 M\$ (si seule la classe 1 est exploitée) et 177 M\$ (si l'on prend en compte les classes 1 et 2).

Les données permettant d'aboutir à ces estimations ne concernent que la partie faucardable, c'est-à-dire celle comprise entre - 0,5 m et la surface. Par ailleurs, comme l'ont montré les données issues de parcours sous-marins (vidéo, prélèvements, dragages), les champs de *Macrocystis pyrifera* s'étendent au-delà de la zone délimitée par les frondes émergées. Il s'agit donc d'une estimation minimale, bien que les populations de *Lessonia flavicans* et de *Durvillea antarctica*, faiblement représentées en 1988, n'aient pu être discriminées et soient incluses dans les estimations de *M. pyrifera*. Cependant, afin de préserver la ressource, la totalité du stock ne saurait être exploitée

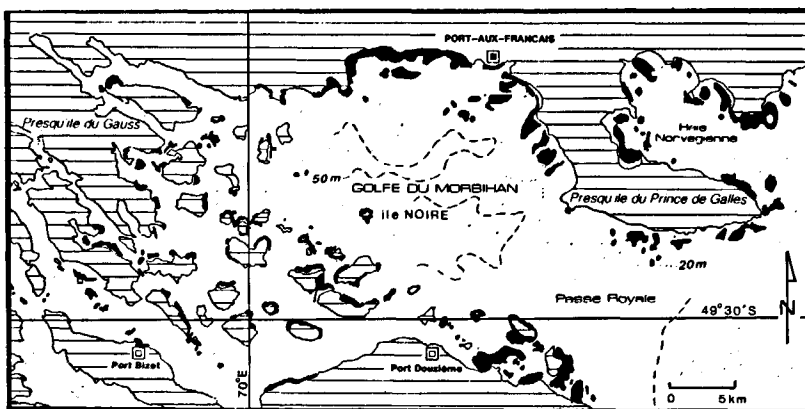


Figure 9

Carte de comparaison entre les données SPOT (1988), toutes classes confondues, et les données historiques pré-spatiales (1952 à 1988) : en noir, concordance entre les deux sources de données.

Comparison map between SPOT data (1988) and pre-spatial data (1952 to 1988): in black, concordance between the two data sources.

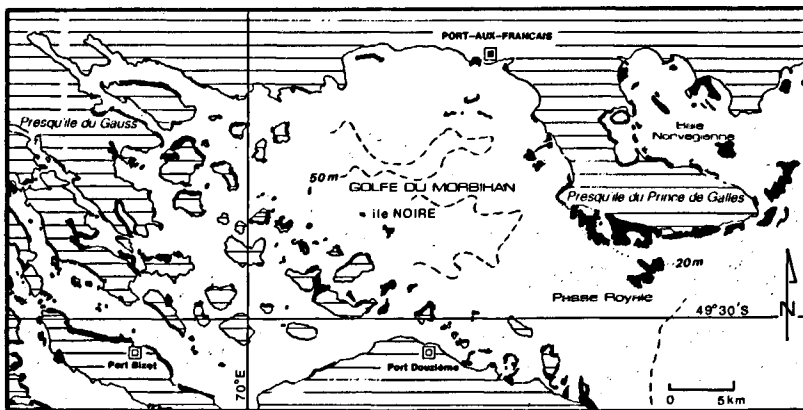


Figure 10

Carte de comparaison entre les données SPOT (1988), toutes classes confondues, et les données historiques pré-spatiales (1952 à 1988) : en noir, présence dans la donnée SPOT, mais non dans les données historiques (dans la limite des données historiques collectées).

Comparison map between SPOT data (1988) and pre-spatial data (1952 to 1988): in black, present in the SPOT data, but not in the pre-spatial data.

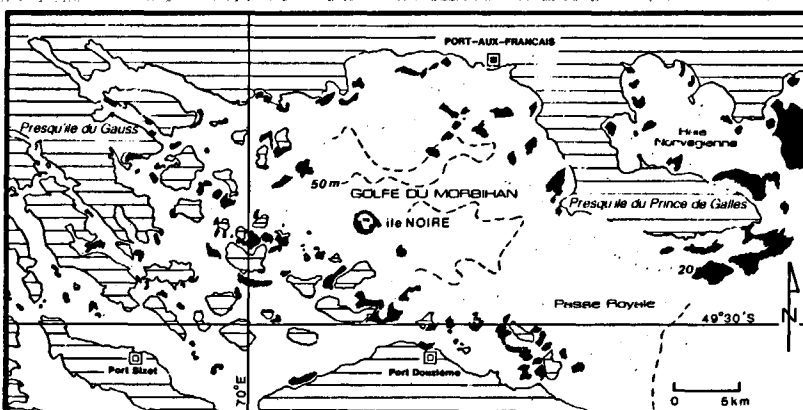


Figure 11

Carte de comparaison entre les données SPOT (1988) et les données historiques pré-spatiales (1952 à 1988) : en noir, présence dans les données historiques, mais non dans la donnée SPOT.

Comparison map between SPOT data (1988) and pre-spatial data (1952 to 1988) : in black, present in the pre-spatial data, but not in the SPOT data.

chaque année. Des études complémentaires seraient nécessaires afin de déterminer le pourcentage du stock exploitable annuellement sans surexploitation.

Afin d'établir l'apport des données spatiales rassemblées sur la carte thématique (fig. 7), par rapport aux données historiques pré-spatiales considérées de 1952 à 1988 (fig. 1), trois cartes comparatives ont été dressées (fig. 9, 10 et 11). La première vise à établir les concordances entre les deux sources de données, la seconde et la troisième, les différences entre les données issues de SPOT et les données historiques. Les concordances sont particulièrement bonnes à proximité de Port-aux-Français, sur le pourtour de la baie norvégienne, dans le secteur proche de Port Douzième, ainsi que le long des côtes de la plupart des îles du golfe (fig. 9). Si l'on examine la carte «Présence dans la donnée SPOT mais non dans les données historiques», l'on s'aperçoit que l'utilisation de SPOT révèle des différences notables le long des côtes de la presqu'île du Prince de Galles, à l'entrée de la baie norvégienne, et le long des côtes de la plupart des îles situées sur une ligne joignant Port Douzième à la Presqu'île de Gauss (fig. 10). Enfin, une troisième carte met en évidence les populations de *Macrocystis pyrifera* cartographiées dans les données historiques mais non présentes dans les données SPOT de 1988 (fig. 11). Étant donné la disparité des méthodes employées et des objectifs visés par les cartes pré-spatiales, et les fluctuations naturelles de *Macrocystis pyrifera*, il s'agit bien entendu d'un constat et non d'une étude critique. Seules de nouvelles données satellitaires, jointes à des vérifications effectuées sur le terrain, permettront de faire, au cours des années, la part des fluctuations naturelles.

CONCLUSION

La démarche utilisée (traitement d'images SPOT, observations de terrain, obtention de données aériennes et sous-marines) a permis d'établir que les champs de *Macrocystis pyrifera* représentaient l'essentiel des populations végétales développées dans le golfe du Morbihan.

La définition de trois classes de densité de *Macrocystis pyrifera* et le calcul de la biomasse moyenne par m² ainsi que celui de la surface correspondante à chacune de ces classes ont permis d'estimer le stock à environ 1 106 000 t (poids humide). Ce stock correspond, pour la classe la plus dense, à 13 220 t d'alginate potentiel de qualité industrielle, soit une valeur marchande d'au moins 111 M\$, d'après les cours internationaux pratiqués en 1987. Les données permettant d'aboutir à ces estimations ne concernent que la partie faucardable, c'est-à-dire celle comprise entre - 0,5 m et la surface. Par ailleurs, comme l'ont montré les données issues de parcours sous-marins (vidéo, prélèvements, dragages), les champs de *M. pyrifera* s'étendent au-delà de la zone délimitée par les frondes émergées.

D'après les méthodes d'exploitation californiennes (North, 1986) et les données accessibles relatant une expérience de faucardage effectuée aux îles Kerguelen (Delépine, 1976 b), deux récoltes par an peuvent être effectuées. A titre comparatif, le stock d'algues exploitables évalué dans le golfe du Morbihan de l'archipel de Kerguelen équivaut à celui de *Laminaria japonica* développé par culture, le long des côtes du nord de la Chine. Le marché mondial des algines est depuis le début des années 1980 de 24 000 t d'algines par an (Arzel et Le Grill, comm. orale). Aussi est-il évident que l'apparition d'une quantité sensiblement équivalente dans le meilleur des cas (deux récoltes/an de la classe la plus dense) d'alginate produit à partir des champs de *Macrocystis pyrifera* de l'archipel de Kerguelen serait de nature à modifier les cours actuellement en vigueur, même si, par souci de préserver la ressource, tout le stock n'est pas exploité. Dans tous les cas, afin d'exploiter au mieux la ressource et d'en tirer le bénéfice maximum, il importe d'évaluer avec le plus grand soin les impacts socio-économiques, écologiques et politiques d'une telle entreprise.

Enfin, la couverture globale et répétitive de l'archipel de Kerguelen par SPOT et NOAA-11 permettrait non seulement d'accéder à la connaissance exhaustive du stock de *Macrocystis pyrifera*, mais aussi d'élargir le champ d'investigation à de nombreuses disciplines concernant tant le domaine océanographique que terrestre.

Remerciements

Cette étude fait partie du programme VEGMA K (Végétaux Marins de l'archipel de Kerguelen), défini dans le cadre de la Coopération franco-canadienne. Il a été sélectionné et financé par l'A.T.P. Télédétection spatiale, les T.A.A.F. et l'IFREMER.

Aussi, les auteurs ont le plaisir de remercier : le Ministère des Affaires Étrangères (France), le Ministère des Affaires Extérieures (Canada), l'A.T.P. Télédétection spatiale (France), l'IFREMER (France), le C.C.T. (Canada), les T.A.A.F., ainsi que : MM. Nougier, Conseiller scientifique de l'Ambassade de France à Ottawa, Lamalle, coordonnateur scientifique T.A.A.F., Pagni, T.A.A.F., Delisle, INTERA (Canada) pour sa collaboration au traitement des images NOAA, Nédélec, Adramer (France), pour sa collaboration au traitement des données vidéo sous-marines, Grotte, IFREMER, pour sa collaboration à l'obtention des signatures spectrales, Rochard et Cau, équipage du navire «La Japonaise», Gouya, Ludman, Loubry, Mathey, Massé, Pérez, équipage des hélicoptères «Alouette 2», Annezo et Bodénès, IFREMER, ainsi que Mme Trindade, INTERA pour la conception et la réalisation de plusieurs figures et les hivernants de la 39^{ème} mission pour leur aide sur le terrain.

RÉFÉRENCES

- Anonyme** (1986.) *Guide des utilisateurs de données SPOT. Manuel de Référence*. CNES et SPOT Image, Toulouse, France, 1, 179 pp.
- Anonyme** (1988 a). Variations locales des populations d'ulves fixées en baie de Saint-Brieuc de juin à septembre 1986. Données acquises par vidéo sous-marine. Rapport ADRAMER, 1988, Brest, France, 41 pp.
- Anonyme** (1988 b). Mise au point d'une méthode de dépouillement des radiales vidéo pour l'étude quantitative des champs de Laminaires. Exploitation informatisée avec ou sans hauteur connue de la caméra. Rapport ADRAMER, 1988, Brest, France, 29 pp.
- Anonyme** (1989). Dépouillement des radiales vidéo réalisées dans la région de Molène en avril et juin 1988. Fonds à maërl et champs de Laminaires. Rapport ADRAMER, 1989, Brest, France, 10 pp.
- Arnaud P.M.** (1974) Contribution à la bionomie marine benthique des régions antarctiques et subantarctiques. *Téthys*, 6, 3, 465-656.
- Belsher T.** (1987). Apport du satellite SPOT à la cartographie qualitative et quantitative des végétaux marins de la Manche, de l'Atlantique nord, de la Méditerranée occidentale et du Pacifique sud. *Colloque SPOT 1. Utilisation des images, bilan, résultats, Paris, novembre 1987*. Ed. Cepadues, Toulouse, 1105-1114.
- Belsher T. et M.-C. Mouchot** (1990). Apport d'images satellitaires à la gestion des populations de *Macrocystis pyrifera*. Golfe du Morbihan-Archipel de Kerguelen. Rapport IFREMER, DERO/EL 20-01, Brest, avril 1990, 47 pp.
- Belbeoch G.** (1983). Logiciel interactif de traitement d'images numériques GIPSY, version II, 292 pp.
- Ben Moussa H.** (1987). Contribution de la télédétection satellitaire à la cartographie des végétaux marins : archipel de Molène (Bretagne, France). *Thèse de Doctorat, Université Aix-Marseille II, France*, 122 pp.
- Braud J.-P., D.H. Etcheverry et R. Perez** (1974). Analyse des possibilités d'acclimatation de *Macrocystis pyrifera* sur les côtes françaises. Technique d'étude : culture en laboratoire puis en aquarium et implantation dans le milieu naturel. Croissance, production de spores, multiplication végétative, teneur en acide alginique et qualité des alginate des thalles implantés. *Sci. Pêche*, 233, 1-15.
- Delépine R.** (1976 a). Note préliminaire sur la répartition des algues marines aux îles Kerguelen. *CNFRA*, 39, 153-159.
- Delépine R.** (1976 b). Seaweeds of the southern ocean. in : *Biomass*, S.Z. El Sayed, éditeur. Scott Polar Research Institute, Cambridge, England, 2, 139-146.
- Delépine R., A. Asensi, H. Etcheverry et T. Antezana** (1987). Algues. in : *Fiches FAO d'identification des espèces pour les besoins de la pêche. Océan austral (zones de pêche 48, 58 et 88, zone de la convention CCAMLR)*. W. Fisher et J.-C. Hureau, éditeurs. Publ. FAO, Rome, I, 234 pp.
- Grua P.** (1964). Sur la structure des peuplements de *Macrocystis pyrifera* (L.) C. Ag. observés en plongée à Kerguelen et Crozet. *C.r. Acad. Sci., Paris*, 259, 1541-1543.
- Jensen J.R., E.J. Estes et L. Tinney** (1980). Remote sensing techniques for kelp surveys. *Photogram. Engng, Remote Sens.*, 46, 6, 743-755.
- Michanek G.** (1979). Phytogeographical provinces and seaweed distribution. *Bot. mar.*, 22, 375-391.
- Nédélec H.** (1987). Exploitation informatisée de films vidéo sous-marins en vue d'une analyse quantitative des peuplements benthiques côtiers. Rapport IFREMER DERO/EL 87.19, France, 25-49.
- North W.J.** (1971). The biology of giant kelp beds (*Macrocystis*) in California. *Nova Hedwigia*, Ed. J. Cramer, 600 pp.
- North W.J.** (1986). Case studies of seven commercial seaweed resources. M.S. Doty, J.F. Caddy and B. Santelices, éditeurs. *FAO Fish. tech. Pap.*, 281, 311 pp.

