

CARTOGRAPHIE DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE LA MER SUR LES COTES BRETONNES

Anne Marie JEGOU

Programme d'étude :

Cartographie des zones sensibles à l'eutrophisation

Juillet 1993



DEL/93-12

IFREMER-DERO/EL



0EL04882

C713.1 JEG C

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'AMENAGEMENT LITTORAL

**CARTOGRAPHIE DE LA TEMPERATURE
DE SURFACE DE LA MER
SUR LES COTES BRETONNES**

Anne Marie JEGOU

Programme d'étude :

Cartographie des zones sensibles à l'eutrophisation

Juillet 1993

DEL/93-12

IFREMER
Centre de BREST
S.D.P.
B.P. 70
29280 PLOUZANE
Tél : 98.22.40.40
Télex : 940 627

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DE
L'AMENAGEMENT LITTORAL (DEL)

Laboratoire Hydrodynamique et Sédimentologie

AUTEUR(S) : JEGOU Anne Marie		CODE : N° DEL-93.12
TITRE CARTOGRAPHIE DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE LA MER SUR LES COTES BRETONNES		Date : Juillet 1993 Tirage nb : 20
CONTRAT (intitulé) N° F/002 — B6618/89/07	Cartographie des zones sensibles à l'Eutrophisation. Cas des côtes Bretonnes.	<u>DIFFUSION</u> Libre Restreinte Confidentielle

RESUME

Des thermographies infrarouges AVHRR/NOAA sont analysées pour identifier les zones qui se réchauffent en priorité au printemps sur les côtes bretonnes.

Les résultats montrent que les eaux côtières se réchauffent davantage dans les zones de faible profondeur et/ou de faibles courants. La plupart de ces zones correspondent à des zones à risque vis-à-vis des proliférations excessives d'algues. —

ABSTRACT

Thermal infrared imagery of NOAA AVHRR are analysed to identify Brittany coastal waters where sea surface temperature increase first in spring.

Results show that warmest water are located in shallow areas and also where tidal currents are weak. Most of these areas are considered to be favourable to algal proliferations. —

Mots-clés : Bretagne, télédétection, température de surface de la mer.

Key words : Brittany, remote sensing, sea surface temperature.



Ifremer Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

SOMMAIRE

INTRODUCTION

I - BILAN DES CONNAISSANCES SUR L'HYDROLOGIE DES COTES BRETONNES

I.1. Caractères généraux des structures thermiques au large de la Bretagne

I.2. Hydrologie du Littoral Breton

II - DONNEES DE TELEDETECTION ET METHODES DE TRAITEMENT

II.1. Caractéristiques des données utilisées

II.2. Traitement des données

II.3. Sélection des données

III - ANALYSE DES IMAGES

IV - BILAN GENERAL

IV.1. Evolution thermique et processus hydrodynamiques

IV.1.1. Mise en évidence de la circulation résiduelle

IV.1.2. Mise en évidence de l'intensité du mélange par les courants instantanés

IV.1.3. L'effet du vent

IV.2. Les étapes du réchauffement côtier

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

La croissance des végétaux marins (macro-algues et algues microscopiques) est fortement dépendante de la température de la mer et de l'éclairement solaire. L'élévation de la température au printemps peut accélérer les processus biologiques et favoriser la croissance ou la multiplication de certaines espèces quand elles trouvent l'ensemble des conditions favorables à leur développement.

Pour évaluer la sensibilité des zones côtières à l'eutrophisation, un programme d'étude visant à estimer le rôle de différents facteurs dans l'apparition des proliférations algales et phytoplanctoniques a été entrepris sur les côtes bretonnes. L'identification des zones côtières qui se réchauffent le plus rapidement au printemps fait l'objet du présent rapport.

Etant donné l'absence d'un réseau dense de mesures de températures tout le long du littoral breton, l'étude des variations saisonnières des températures de surface ne peut se faire que par télédétection. Les observations des satellites comme ceux de la série NOAA permettent d'accéder à cette information à l'échelle synoptique de la région Bretagne.

Les données, restituées sous forme cartographique, peuvent donner à la fois une information sur l'évolution saisonnière de la température superficielle sur plusieurs années consécutives et sur le comportement des masses d'eaux en fonction des processus énergétiques et dynamiques en cours. A ce titre, les thermographies de surface peuvent fournir des descriptions synoptiques comparables à celles des modèles mathématiques comme celui du nord-Bretagne. Leur comparaison peut permettre de mettre en évidence l'influence de certains processus physiques sur l'évolution spatiale et temporelle des structures thermiques observées.

Nous décrivons d'abord brièvement les caractéristiques thermiques connues du littoral breton et l'outil de mesure utilisé pour ce travail. Les résultats seront ensuite présentés sous la forme d'un fichier-images commenté et d'une synthèse.

I- BILAN DES CONNAISSANCES SUR L'HYDROLOGIE DES COTES BRETONNES

Les côtes bretonnes appartiennent à deux domaines géographiques :

- La côte nord, d'Ouessant à la baie du Mont-Saint-Michel se rattache à la Manche Occidentale. La profondeur (fig. 1) décroît d'ouest en est révélant, à l'ouest une bande côtière étroite et à l'est une région peu profonde des Roches Douvres au Cotentin qui se situe en grande partie entre l'isobathe - 20 m et - 40 m.

- La côte ouest et sud, d'Ouessant à la Loire dépend du plateau continental Atlantique. Les fonds décroissent rapidement de la côte vers le large. Les isobathes 80 m au nord, 50 m au centre (Belle Ile) et 20 m aux abords de la Loire séparent une "échine dorsale rocheuse" discontinue portant des îles, des bassins sédimentaires situés au large.

A l'échelle de la Manche et du plateau Atlantique, on dispose d'une importante base de données pour décrire l'évolution spatiale et temporelle des températures.

La majorité des travaux ont porté sur la Manche et ses abords (régions frontales de l'ouest-Bretagne). Ces données ont été collectées en général loin des côtes et ne sont pas extrapolables à la zone côtière.

On peut toutefois tirer un certain nombre d'enseignements sur l'évolution des structures thermiques au large des côtes bretonnes au printemps et au début de l'été et recueillir des informations sur la structure thermique verticale qui pourront contribuer à l'interprétation des images satellites.

1.1. Caractères généraux des structures thermiques au large de la Bretagne

Les traits majeurs à retenir sont les suivants :

- le réchauffement de la couche de surface par le rayonnement solaire débute vers mars-avril et se répartit dans la colonne d'eau de manière différente selon les zones.

- Sur le plateau sud-Bretagne, ce réchauffement est plus précoce et donne naissance à une thermocline bien marquée (Le Cann, 1982). La stratification progresse sur le plateau, du large vers la côte, au cours du mois de mai (Pingree, 1975).

- A l'ouest de la Bretagne et en Manche occidentale des fronts thermiques s'établissent de manière permanente durant l'été (à partir du mois de juin). Ces fronts (fig. 2) marquent la séparation entre des eaux chaudes stratifiées situées au large ou en zone côtière et des eaux froides homogènes où la colonne d'eau est entièrement brassée par des courants de forte intensité (> 3 noeuds). Leur existence a été confirmée par des images satellites de l'infrarouge thermique (Mariette 1983 ; Mariette et Verbeque 1985) :

Le front d'Ouessant, exemple type de front de marée qui barre l'entrée de la Manche en période estivale de la pointe du Raz à la Cornouaille anglaise. Les processus intervenant dans la mise en place de ce front ont été largement étudiés (Hénaff, 1973 ; Le Magueresse, 1974 ; Raillard, 1976 ; Garzoli, 1979). Sa formation et sa position moyenne ont

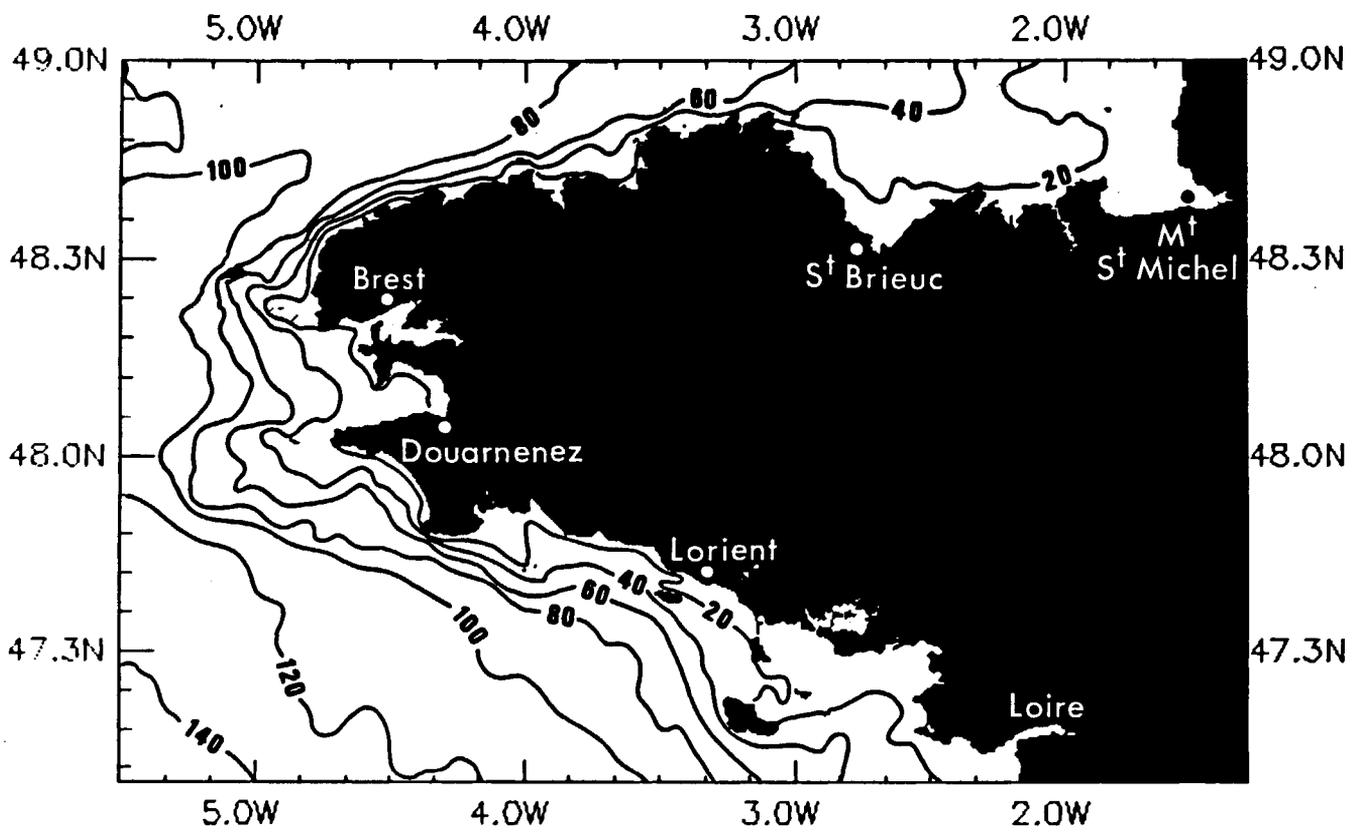


Figure 1 : Domaine d'étude et bathymétrie

pu être modélisés (Pingree-Griffiths, 1978 ; Altazin-Pichon, 1981 ; Mariette, 1983 ; Mariette-Le Cann, 1985).

- Le front côtier de l'Iroise, front interne thermohalin qui limite vers le large les eaux côtières stratifiées de la baie de Douarnenez et de la zone externe de la rade de Brest. Il s'étend de la Pointe Saint-Mathieu à la pointe du Raz. Mis en évidence par Lefevre et Grall (1970), ce front a fait l'objet de travaux selon un cycle annuel (Birrien, 1987).

Ces structures frontales sont fréquemment caractérisées par une anomalie positive de la biomasse phytoplanctonique qui peut parfois évoluer jusqu'à la formation d'eaux colorées (Holligan, 1979 ; Morin, 1984 ; Birrien *et al.*, 1985).

1.2. Hydrologie du Littoral Breton

Les observations hydrologiques spécifiques au littoral sont relativement récentes et ne concernent que certains sites bretons. Les mesures sont trop souvent ponctuelles pour pouvoir suivre les évolutions saisonnières.

On pourra se référer, pour un bilan sommaire, aux synthèses réalisées par Merceron et Sandrin C. (1980), RNO (1981), Blanchard et Jegou (1987). Certains secteurs sont aujourd'hui mieux connus grâce à un certain nombre de travaux conséquents.

1.2.1. Sur le littoral nord Bretagne l'étude des températures et de leur variabilité a été menée dans le golfe normano-breton (CNEXO, 1981 ; CNEXO, 1983 ; Erard *et al.*, 1986) en baie de Saint-Brieuc (Le Hay, 1989), en baie de Morlaix (ISTPM, 1976 ; WAFAR, 1989), par des campagnes de mesures, des observations satellitaires (Vercelli, 1985) ou des simulations numériques (Riou, 1989).

L'ensemble des travaux réalisés montrent les principaux faits suivants :

- les eaux sont caractéristiques d'une zone bien mélangée. Cependant des stratifications verticales ont été observées en baie de Morlaix (Wafar, 1981 ; Riou, 1989) et en baie de Saint-Brieuc (Lehay, 1989). Ces stratifications thermiques ne sont pas permanentes (quelques heures à quelques jours). Elles sont liées aux configurations de morte eau, sans vent en été et sont périodiquement détruites lors des marées de vive eau et par vent fort.

- Il existe un gradient horizontal entre Roscoff et le Cap Fréhel dont le sens varie selon les saisons (Riou, 1989). On observe en hiver une élévation de température d'est en ouest, ce phénomène s'inversant en été. L'écart thermique peut atteindre 2,5 °C.

- Les températures maximales observées sont de 19 °C en baie du Mont-Saint-Michel (Erard *et al.*, 1986) et au fond de la baie de Saint-Brieuc (Lehay, 1989) et de 15 °C en baie de Morlaix (Wafar, 1981).

- Les statistiques de température exploitées pour la période 1962-1987 par Riou (1990) par 2 modèles thermiques, l'un à l'échelle de la Manche (maille 11 km x 11 km), l'autre à l'échelle de la bande côtière Roscoff-Cap Fréhel (maille 2 km x 2 km) permettent d'accéder à une information intéressante : la fréquence annuelle de dépassement des seuils thermiques 17 à 19 °C. L'exploitation de ces statistiques pour le seuil 17 °C par le modèle général met en

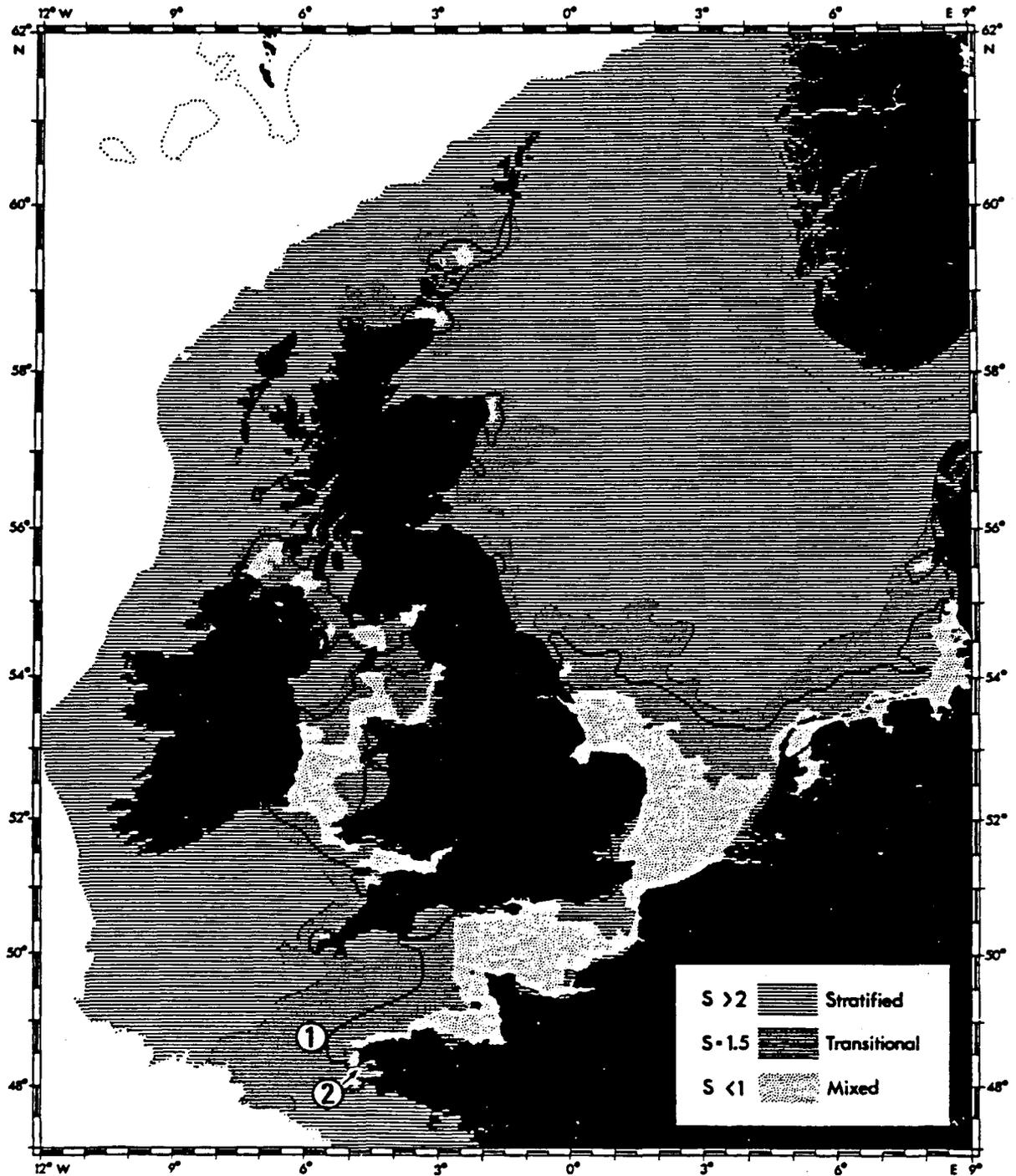


Figure 2 : Position des fronts prédite par un modèle mathématique (Pingree et Griffiths, 1978). Les fronts sont figurés par un trait plein.
 1 : front thermique d'Ouessant
 2 : front côtier de l'Iroise

évidence deux domaines différents sur la côte nord-Bretagne : le golfe normano-breton (de la baie de Saint-Brieuc au Cotentin) où le seuil 17 °C est dépassé plus de 50 jours par an et la côte nord ouest de Saint-Brieuc à l'Aber Wrac'h où ce seuil n'est jamais atteint (excepté dans les baies de Morlaix et de Lannion où il est inférieur à 2 jours par an).

L'utilisation du modèle côtier permet d'affiner ces informations : la baie de Saint-Brieuc apparaît comme la zone la plus chaude du secteur Roscoff-Fréhel. La température 17 °C est dépassée plus de 70 jours par an au sud d'une ligne Binic-Pleneuf. Par contre, cet événement ne survient qu'une trentaine de jours par an en baie de Morlaix et de 7 à 9 jours par an en baie de Lannion.

I.2.2. sur le littoral ouest et sud Bretagne les études des cycles de température ont concerné principalement la rade de Brest (Aminot, 1977 ; SAUM, 1980 ; Delmas, 1981), la baie de Douarnenez et le front interne de l'Iroise (Birrien, 1987), la baie de Vilaine (Maggi *et al.*, 1984, 1986, 1987, 1988 ; Clément 1987).

Ces baies constituent des entités caractérisées par des conditions hydrologiques particulières.

- La rade de Brest est une zone littorale marquée par de forts courants de marée. Les eaux sont généralement thermiquement homogènes toute l'année. Les estuaires (Aulne, Elorn) et leurs abords proches peuvent présenter une stratification thermique marquée en été. Les températures maximales sont de l'ordre de 16 à 19 °C selon les années.

- En baie de Douarnenez, l'étude du cycle annuel de température durant l'année 1983 (Birrien, 1987) a montré qu'en mai s'amorce un début de stratification thermique qui s'accroît pendant le mois de juin. Les températures de surface atteignent 17 °C et celles du fond avoisinent 13 °C ($\Delta T \approx 4$ °C). Cette situation demeure stable pendant toute la période estivale, de juillet à septembre. Un front de nature thermohalin au printemps, puis thermique en été s'établit à l'entrée de la baie (front interne de l'Iroise). Le système est alors séparé en deux : l'un fortement stratifié à l'intérieur de la baie, l'autre fortement brassé au large, au delà de la ligne de front.

- En baie de Vilaine, les mesures effectuées durant plusieurs années (Maggi *et al.*, 1983 à 1987) ont montré que le cycle annuel pouvait subir d'importantes variations. Les températures augmentent rapidement au cours du printemps pour atteindre des maximums estivaux de 17 à 23 °C selon les années. La baie de Vilaine est caractérisée par des courants faibles qui rendent cette zone naturellement favorable à la mise en place d'une stratification estivale (Lazure, Salomon, 1988). L'établissement d'une stratification thermique a pu être observée pendant la période de mai à septembre mais elle n'est pas durable. Son intensité et sa durée dépendent des conditions météorologiques et de l'agitation des eaux.

II - DONNEES DE TELEDETECTION ET METHODES DE TRAITEMENT

II.1. Caractéristiques des données utilisées

Les données de télédétection utilisées proviennent des satellites météorologiques NOAA 9 et NOAA 11 de la série Tiros-NOAA, diffusées par le Centre de Météorologie Spatiale de Lannion.

Ces satellites sont équipés d'un radiomètre, l'Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), comportant cinq canaux dont les canaux 4 et 5 situés dans l'infrarouge thermique à 11 et 12 micromètres.

Le signal capté par les canaux 4 et 5 est le rayonnement émis par la couche superficielle de la mer. Ce signal est atténué lors de la traversée de l'atmosphère et peut être même totalement absorbé par un couvert nuageux. Une correction des effets atmosphériques est donc nécessaire pour restituer la température de surface de la mer (TSM).

L'absorption atmosphérique peut être correctement estimée pour les mesures enregistrées par l'AVHRR parce qu'il possède plusieurs canaux dans l'infrarouge. Des méthodes de correction fondées sur des combinaisons de différents canaux ont été mises au point par plusieurs chercheurs (Deschamp et Phulpin, 1980 ; Mc Millin et Crossby, 1980 ; Mc. Clain, 1983). On décrira plus loin la méthode de calcul utilisée dans le cadre de cette étude.

Le champ de vision des satellites NOAA leur permettent de couvrir une bande de 2 250 km de large à chaque passage. Leur vitesse de rotation élevée leur confère une répétitivité de couverture importante : la région Bretagne peut ainsi être observée 2 fois par 24 h par chaque satellite lorsque les conditions météorologiques sont bonnes.

La résolution au sol est par contre faible (1,1 km sous la trace du satellite) pour une étude fine des zones côtières. Aussi, l'information ne sera pas accessible dans les échancrures étroites du littoral breton tels les estuaires, les abers ou certaines baies de faible superficie.

II.2. Traitement des données

La restitution de la température de surface de la mer (TSM) et des structures thermiques superficielles à partir des données de l'AVHRR nécessite une étape de calibration des comptes numériques en température radiative, une discrimination fiable des zones claires et des zones nuageuses et un algorithme validé de calcul de la TSM, permettant de corriger l'influence de l'atmosphère.

L'ensemble des opérations de traitement a été effectué au moyen du logiciel PESKET (pêche, satellite et krigeage en température) développé par l'IFREMER.

La reconnaissance des zones nuageuses est opérée pour les images de jour à partir de corrélations multicanaux de seuils en réflectance et en température. Cette méthode permet d'opérer une discrimination correcte entre la mer et les nuages et de créer un masque des pixels douteux.

L'estimation de la température de surface (en °C) est obtenue par une méthode courante de calcul utilisée et contrôlée par le Centre de Météorologie Spatiale de Lannion. Cette méthode de type "split-window" consiste en une combinaison linéaire des canaux 4 et 5 (Deschamps et Phulpin, 1980). L'algorithme est le suivant :

$$TSM = 3 \times T_{C4} - 2 \times T_{C5} + 0,5$$

où T_{C4} , T_{C5} sont les températures radiatives du canal 4 et du canal 5 et 0,5 une constante zonale (C_0) qui résulte de l'ajustement statistique de TSM satellitaires et de mesures bateaux (Champagne-Philippe, 1983 ; Castagne *et al.*, 1986).

Cet algorithme permet de définir pour le littoral Manche-Atlantique la température de surface de la mer avec une précision de 0,5 °C.

A l'issue du traitement l'information pour chaque scène est produite sous forme de thermographies positionnées et corrigées géométriquement.

Le domaine étudié est défini comme suit :

. En latitude	49 N	47°10 N
. En longitude	5°30 W	1°15 W

La projection cartographique est de type Mercator et la taille de l'unité élémentaire de mesure ou pixel correspond à une maille de 1 km x 1 km.

Le masque nuage n'est pas reproduit sur les images publiées dans ce rapport. En effet, l'interface terre/mer présente des écarts importants en température et en réflectance. Aussi lors des tests entre les différents canaux, une partie des pixels mer en zone côtière sont éliminés alors que l'information n'est pas forcément erronée. Les images masquées sont utilisées pour l'interprétation, les perturbations locales près des côtes étant appréciées à partir d'une visualisation des différents canaux dans le domaine du visible et de l'infrarouge thermique.

La détermination de la température absolue de la surface de la mer et la rectification géométrique rendent les images comparables entre-elles et permettent donc l'étude de séries chronologiques.

II.3. Sélection des données

Les observations et les études des proliférations algales sur le littoral breton se sont amplifiées vers le milieu des années 1980 avec la mise en place du réseau de surveillance RePHY de l'IFREMER en 1984 destiné à la détection des blooms phytoplanctoniques sur tout le littoral français et par le développement depuis 1986 de programmes d'études concernant les ulves. Ces observations ont montré qu'en Bretagne ces phénomènes présentaient une densité maximale de mai à juillet pendant la période de réchauffement des eaux côtières.

On a donc sélectionné les scènes satellitaires préférentiellement pendant la période mai à juillet et sur 6 années consécutives (1986 à 1991) afin de pouvoir évaluer la variabilité interannuelle des températures de surface. On a ciblé le choix des données sur la première semaine et la dernière semaine de mai, la mi-juin et la mi-juillet.

Pour mettre en évidence les zones côtières qui se réchauffent le plus rapidement on a analysé pour chaque année une image hivernale sensée représenter un état initial de la température de surface avant le réchauffement printanier. Pour certaines années, quand la donnée hivernale n'était pas accessible, l'image de référence utilisée se situe exceptionnellement fin mars, voire début avril à une période où le bilan thermique est déjà positif.

Deux facteurs ont été un obstacle à l'obtention de séries temporelles :

- la couverture nuageuse qui sous nos latitudes limite énormément l'accès aux données.
- La disponibilité des données AVHRR au CMS de Lannion. Les données acquises journalièrement ne sont conservées que 2 ans (archive glissante). Ainsi pour la période 1986-1989, nous avons été contraint d'opérer un choix parmi un nombre limité de scènes acquises par IFREMER pour d'autres applications.

Sur les 23 scènes que nous avons pu sélectionner, 19 scènes ont été retenues pour leur bonne qualité : 5 scènes concernent la période hivernale, 2 scènes le début du printemps (fin mars - début avril). 7 scènes illustrent le mois de mai et 5 la période pré-estivale (juin-juillet). Ces enregistrements correspondent à différentes situations de marée : 9 marées de VE (coefficient > 80), 7 marées de morte-eau (coefficient < 60) et 3 marées moyennes. Il n'a pas été possible de faire un choix en fonction de l'heure marée.

III - ANALYSE DES IMAGES

L'ensemble des images traitées est présenté ci-après dans l'ordre chronologique, accompagnée chacune d'une fiche analytique.

La température de surface de la mer (TSM) est restituée en utilisant une échelle de 27 couleurs avec un pas de 0,5 °C.

Pour faciliter la lecture et la comparaison entre images, la terre a été masquée et 3 gammes de températures ont été utilisées en fonction des périodes suivantes :

- pour la période hivernale et le début de printemps, une gamme courante s'échelonnant de + 6 °C à 18,5 °C et pour les hivers plus froids une gamme débutant à + 5 °C,
- pour la période fin mai à juillet, une gamme allant de + 12 °C à + 24,5 °C.

Le masque nuage n'est pas reproduit. Les zones nuageuses les plus denses apparaissent en blanc.

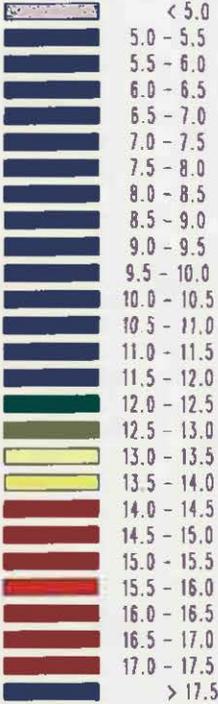
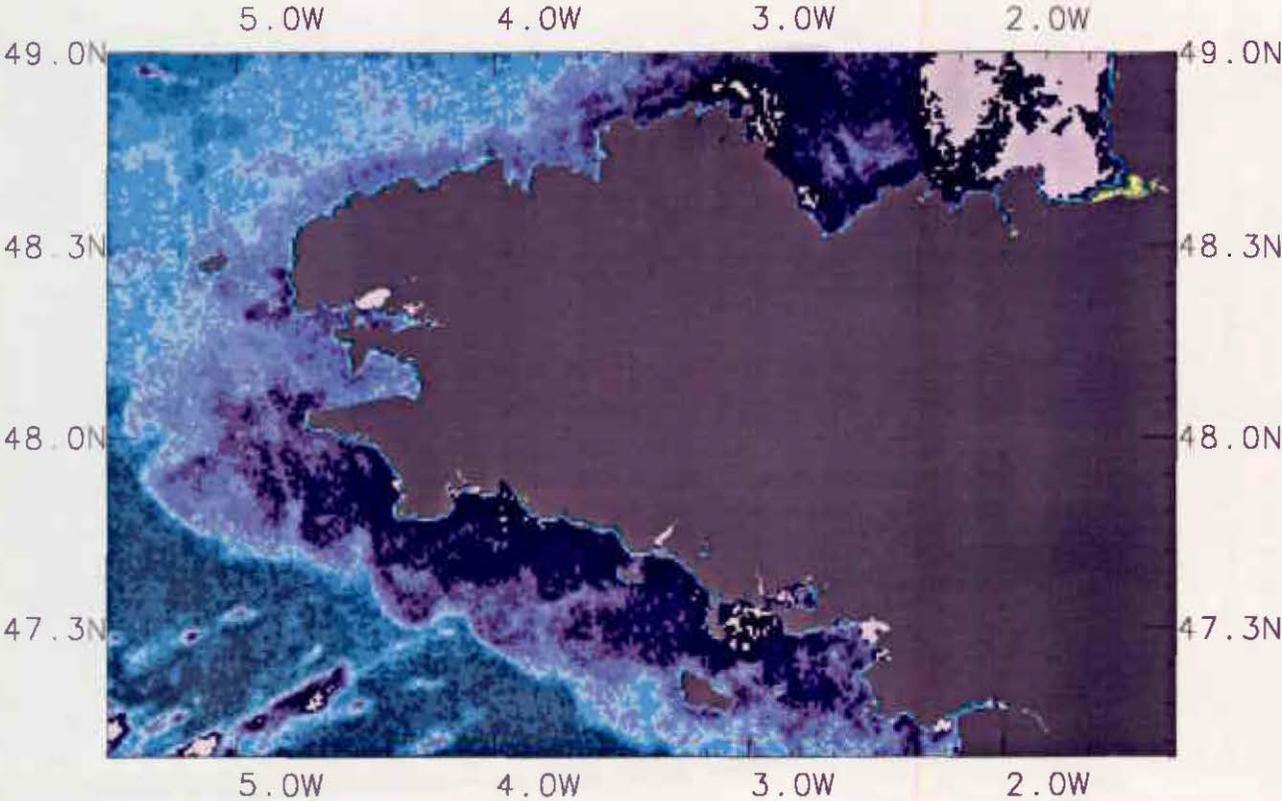
Chaque fiche analytique comporte différentes indications sur les caractéristiques de la marée et les conditions météorologiques au moment de la prise de vue ou dans les jours qui la précèdent : coefficient et heure marée à Brest, direction et vitesse pour 3 sémaphores (Bréhat, Ouessant et Belle Ile).

Les données météorologiques sont issues de fichiers trihoraires acquis auprès de METEO-FRANCE. Des informations météorologiques complémentaires (insolation moyenne mensuelle, bilans climatologiques mensuels, anomalies de température etc.) collectées dans la revue "La Météorologie" et "Metmar" ont été utilisées pour l'interprétation.

temperature tiros du 07 mars 1986

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 9

14 h 14 TU

7-03-1986

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	60	PM	WSW	6	WSW	7	WSW	5

* Moyenne des trois jours précédents.

Sur cette thermographie hivernale, on remarque que les côtes bretonnes sont baignées par des eaux plus froides que les eaux du large.

Les eaux côtières ont une température inférieure à 7 °C, sauf à l'ouest de la Bretagne (baie de Douarnenez et secteur Ouessant-Lannion) où elle atteint 8 °C.

Les masses d'eaux les plus froides sont localisées :

- sur le littoral nord de la Bretagne, à l'est de la baie de Lannion,
- sur le littoral sud où elles forment une bande large de 30 à 50 km, parallèle à la côte, s'étendant de la Loire jusqu'à la pointe du Raz et intéressant des fonds jusqu'à 80 ou 100 m,
- à l'entrée de la rade de Brest.

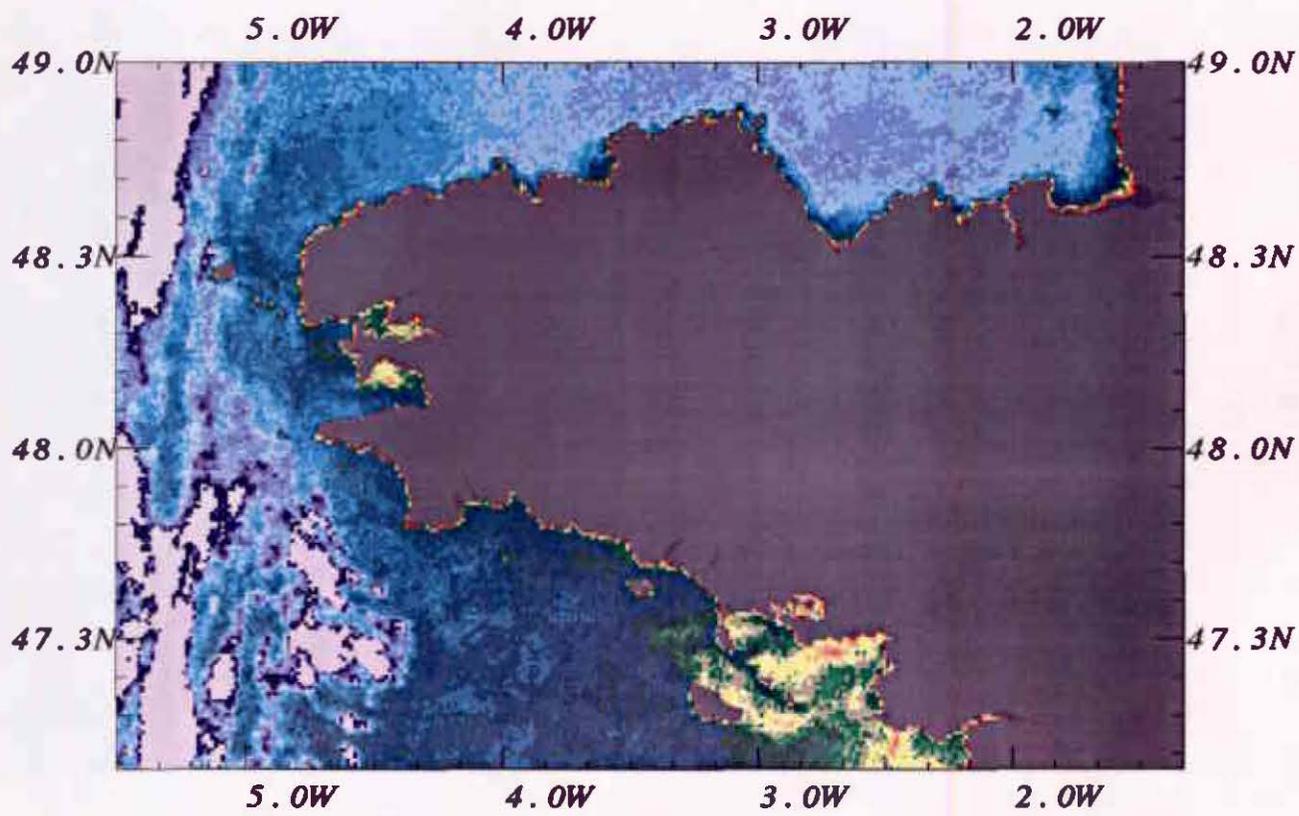
On retiendra de cette thermographie :

- des températures de surface de la mer particulièrement basses. L'hiver 1986 est un hiver froid. L'anomalie négative moyenne (période de référence 1971-1987), relevée en ce début mars est de -1 à -2 °C (cf. cartes SST.GASC-METMAR).
- des températures quasi-identiques sur le littoral sud et le secteur Lannion-Cotentin,
- des valeurs minimales (< 5 °C) dans une zone de faibles profondeurs (fonds < 30 m) située entre le Cap Fréhel, les îles et le Cotentin (la présence de brumes n'est pas à écarter),
- un écart thermique de près de 3 °C en Bretagne nord entre les eaux froides du secteur Lannion-Cotentin et celles plus chaudes de la partie ouest,
- un gradient nord-sud ou côte-large en Bretagne sud de 4 à 5 °C.

temperature tiros du 01 mai 1986

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 9

14 h 29 TU

1-05-1986

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	44	BM - 1 h 30	NW	4	WSW	4	NW	4

* Moyenne des trois jours précédents.

En ce début de printemps, les eaux côtières ont commencé à se réchauffer mais de manière inégale.

Le réchauffement est plus important sur la côte sud que sur la côte nord de la Bretagne : gain de + 5 à + 7 °C pour le littoral de Penmarc'h à la Loire, + 2 °C à + 3 °C pour celui de la pointe Saint-Mathieu au Cotentin (sauf dans les baies).

- En Bretagne nord, la température varie d'est en ouest de 8,5 °C à 10,5 °C. Il existe toujours un écart thermique est-ouest mais plus faible (2 °C), doublé d'un gradient côte-large (2 à 3 °C) au niveau des baies et des fonds inférieurs à 10 m qui se réchauffent. Leur température est identique : 10 à 11 °C.

- En Bretagne sud, la bande froide parallèle à la côte a totalement disparue. La température augmente d'ouest en est (+ 4 °C). Les eaux les plus chaudes (14-15 °C) se situent à l'est entre Quiberon, Belle Ile et la Loire.

- De Quiberon à Penmarc'h et sur la façade occidentale les eaux côtières ont une température du même ordre (11 - 12 °C), sauf dans les grandes baies où certains secteurs se réchauffent plus vite. C'est le cas pour le nord de la baie de Douarnenez et le sud-est de la Rade de Brest qui ont des températures similaires à la zone Loire-Vilaine (14 - 15 °C).

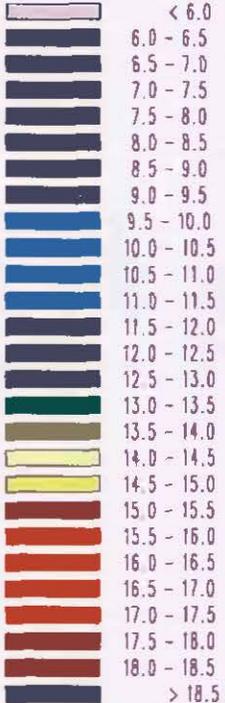
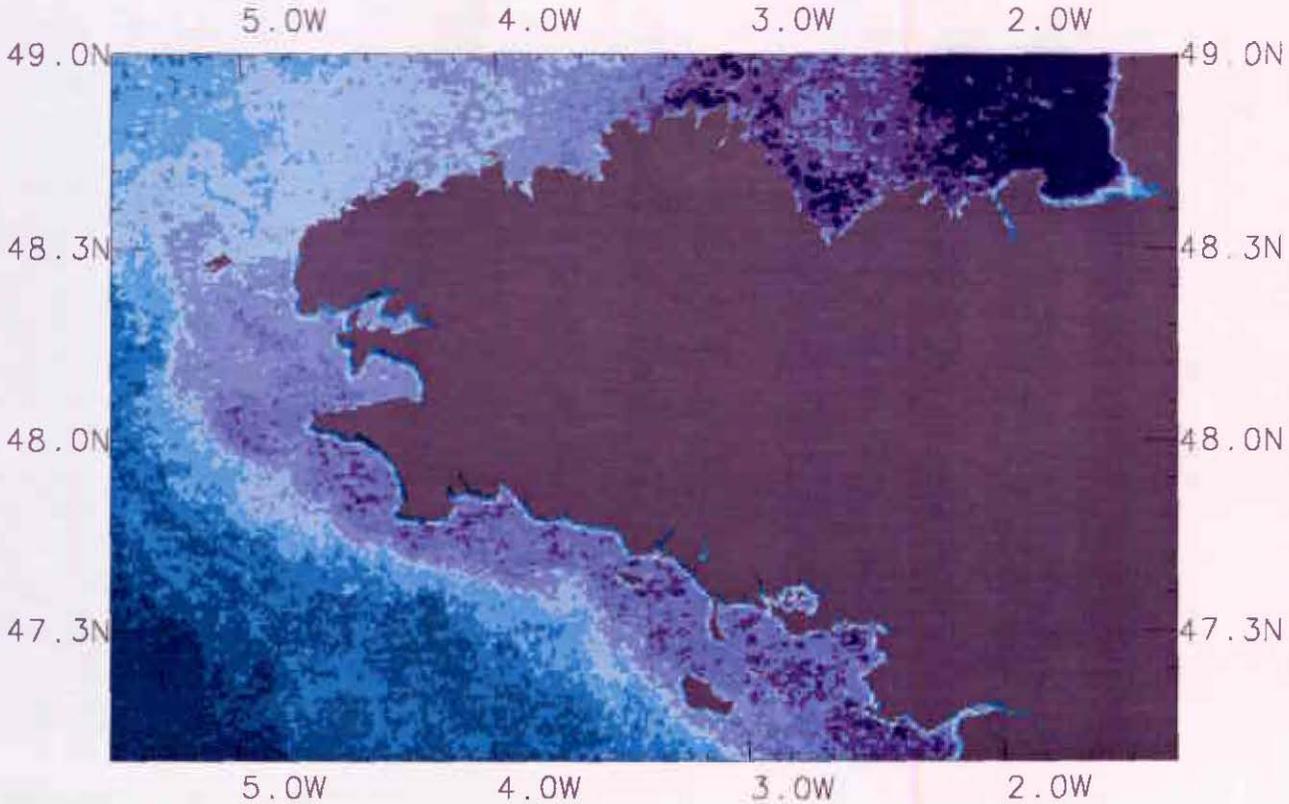
On peut constater :

- une certaine inertie thermique de la zone nord Bretagne,
- une forte amplitude entre les valeurs hivernales et printanières dans le secteur Quiberon - Belle-Ile - Loire. Celle-ci peut dépendre d'une stratification de densité due à la présence d'eaux douces en provenance de la Loire et de la Vilaine qui sont en crue.

temperature tiros du 12 mars 1987

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 9

15 h 09 TU

12-03-1987

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	56	PM	ESE	7	ESE	9	ESE	5

* Moyenne des trois jours précédents.

Comme en 1986, les températures du mois de mars indiquent un déficit, conséquence d'un nouvel hiver froid. En 1987 ce déficit est de l'ordre de 1 °C.

Les températures côtières varient entre un minimum de 7 °C pour les eaux situées à l'extrême est de la Bretagne nord et un maximum de 9,5 °C entre Ouessant et l'île de Batz.

On retrouve dans l'ensemble les mêmes structures que sur l'image du 7 mars 1986, pour des conditions de marée identiques :

- la division est-ouest du littoral nord Bretagne à l'est de la baie de Lannion, marquée par la présence de masses d'eau nettement plus froides à l'est qu'à l'ouest (gradient 2,5 °C),
- le minimum de température entre Fréhel, les îles et le Cotentin,
- la bande froide du sud de la Bretagne.

La configuration de certaines structures thermiques diffèrent d'une image à l'autre, en sud Bretagne et Bretagne occidentale en particulier. On peut supposer que les conditions météorologiques (vent, état de la mer) influent notablement sur la variabilité de ces structures : le 7/03/1996 les vents sont de secteurs ouest-sud-ouest dominant les jours précédents la prise de vue, le 12/03/1987 ils sont de secteur est dominant.

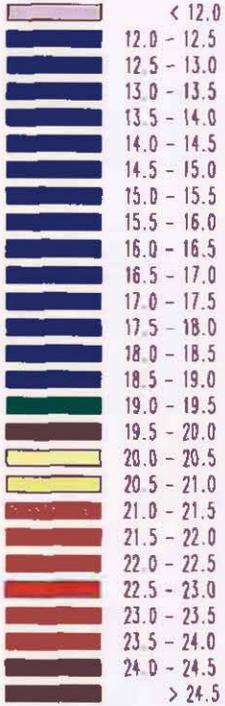
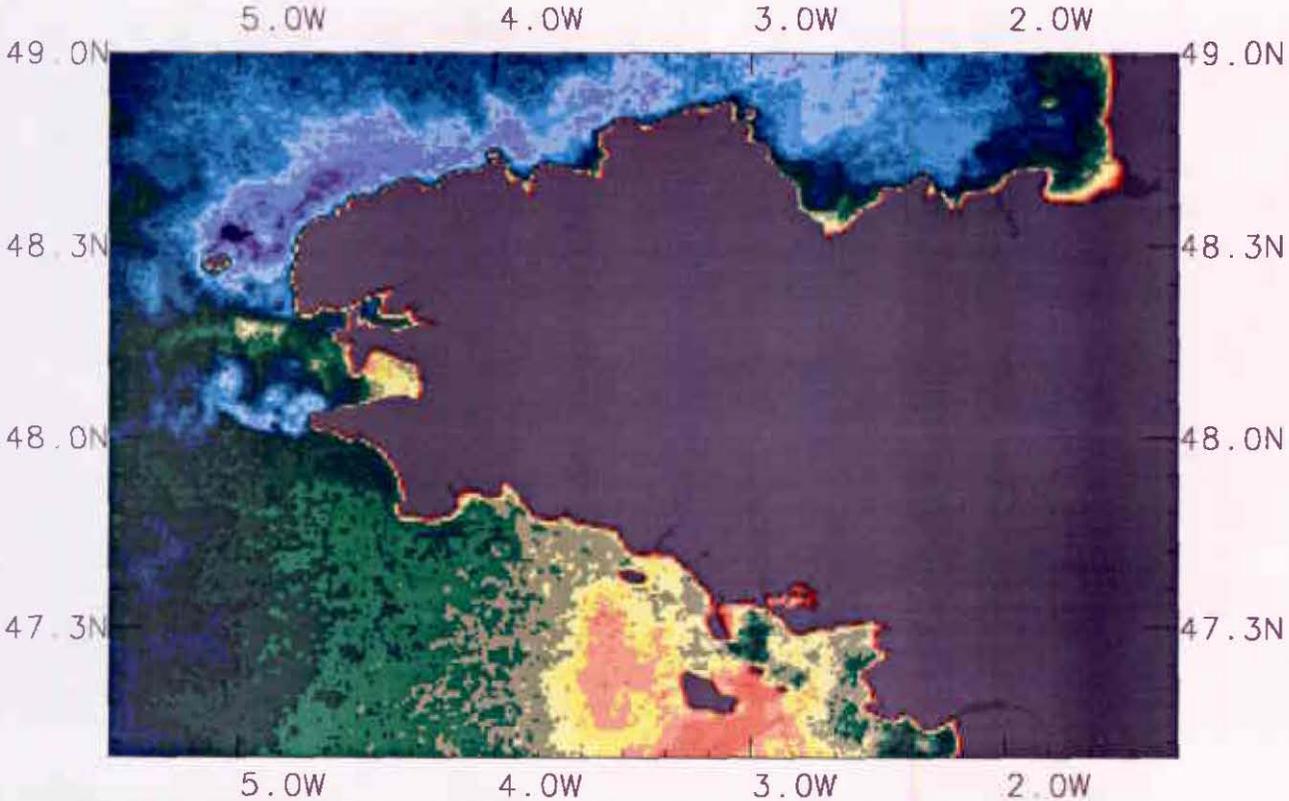
L'existence de mesures effectuées dans le secteur Loire-Vilaine par l'IFREMER (Maggi et al., 1988) et le Laboratoire d'Océanographie Physique de l'UBO (Le Cann, 1988) nous ont permis de valider les températures enregistrées en surface par satellite pour la zone considérée (7,5 °C à 8 °C).

Les mesures sur la verticale montrent que les eaux sont homogènes en température du fond à la surface.

temperature tiros du 10 juillet 1987

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 9

15 h 24 TU

10-07-1987

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	81	PM	WNW	4	NNW	5	NNW	5

* Moyenne des trois jours précédents.

En l'absence d'images archives pour le printemps 1987, nous analyserons l'image du 10/07/1987 qui représente une situation caractéristique de la période estivale.

On remarque d'abord l'importance de l'élévation de température des eaux de surface qui s'est produite depuis l'hiver. Cette hausse varie de + 6,5 °C sur la côte nord ouest de la Bretagne à + 11 °C sur tout le littoral de Bretagne sud et dans certaines baies comme celle de Douarnenez, Saint-Brieuc ou du Mont-Saint-Michel.

On peut observer une grande différence de température entre la côte nord et la côte sud Bretagne (écart thermique de l'ordre de 7 °C).

- En Bretagne nord les eaux sont globalement plus froides (14,5 °C à 15,5 °C), sauf dans les baies et les zones de faibles profondeurs de l'ouest Cotentin où les températures sont supérieures à 17,5 °C.

- En Bretagne sud les valeurs sont plus élevées. La température dépasse partout les 19 °C.

- En Bretagne occidentale le contraste thermique est fort (gradient horizontal entre 3 et 4 °C sur quelques milles).

- Les maxima de température (> 20 °C) intéressent la zone Groix-Belle Ile-baie de Vilaine, la baie de Douarnenez et le fond des baies de Saint-Brieuc et du Mont-Saint-Michel.

A cette époque de l'année, ces différences importantes de température sont liées à la capacité plus ou moins grande des eaux à se stratifier. La formation et la persistance de la thermocline saisonnière va dépendre des actions antagonistes du flux de chaleur reçu, de l'intensité des courants de marée et de l'action du vent.

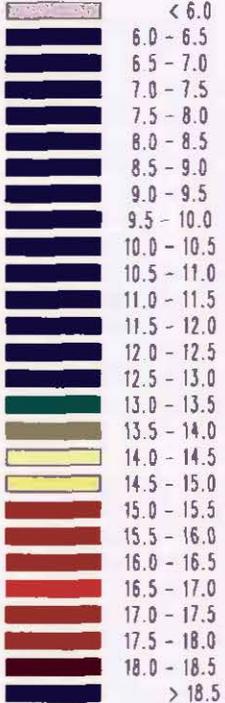
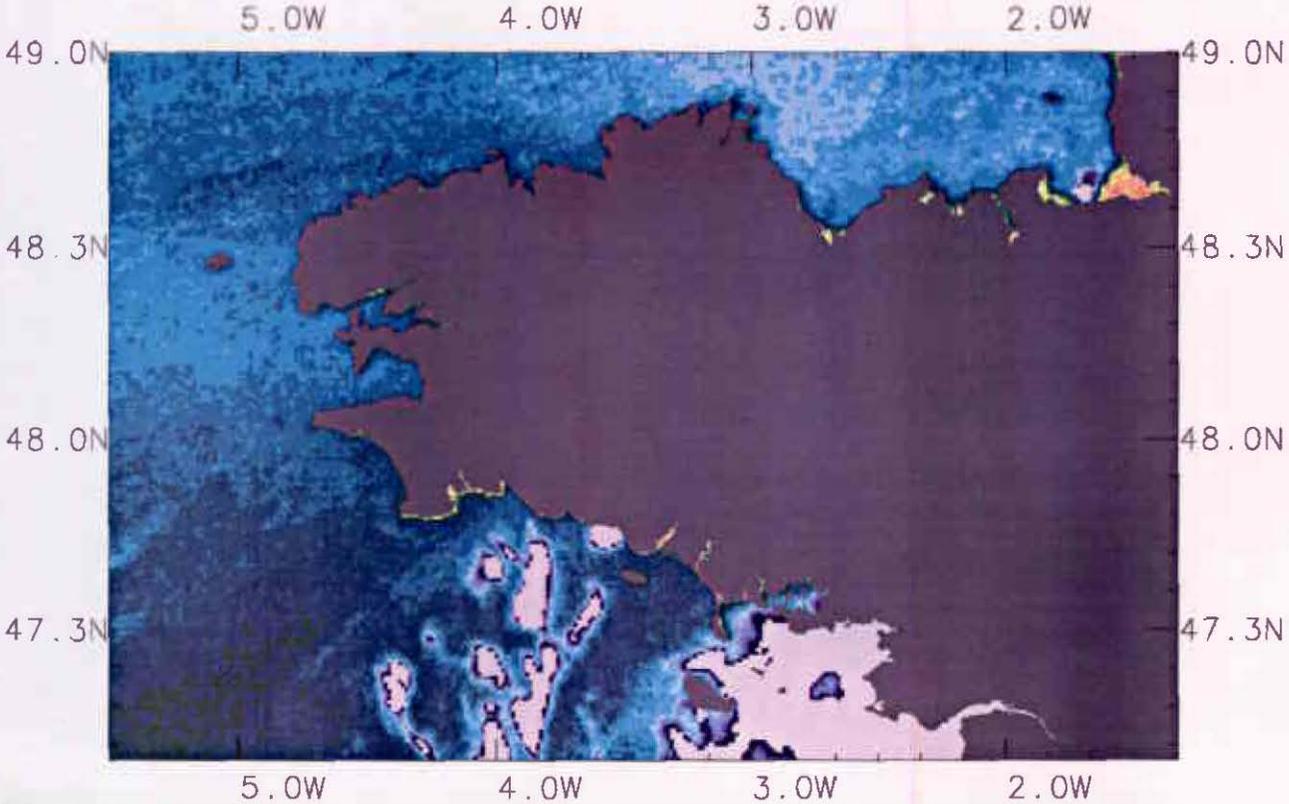
En se référant à différents travaux qui ont permis de classer les eaux selon un indice de stratification pour différents secteurs du littoral breton : Bretagne ouest (Mariette, 1983 ; Mariette et Le Cann, 1985), zone Loire Vilaine (Lazure et Salomon, 1988), Bretagne nord (Garreau, 1993), on peut trouver une bonne correspondance entre eaux froides et eaux bien mélangées par les courants de marée et entre eaux chaudes et eaux plus calmes et stratifiées, là où la profondeur est importante (cf. chapitre IV Bilan général).

L'image du 10/07/1987 présente ainsi une cartographie de l'intensité des courants de marée, pour des conditions hydrométéorologiques de début de revif et de vent faible.

temperature tiros du 03 avril 1988

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 9

15 h 43 TU

3-04-1988

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	91	PM - 1	NW	4	NNW	6	NW	4

* Moyenne des trois jours précédents.

Pour l'année 1988 nous ne disposons pas de données hivernales.

L'image du 3/04/1988 fournit l'exemple d'une situation de début de printemps, correspondant à une période de transition caractérisée par la disparition des structures hivernales et une homogénéisation thermique des eaux. Le bilan thermique étant positif à cette période de l'année, on observe des eaux plus chaudes au fond des baies et des estuaires.

L'homogénéisation des eaux a du être renforcée par les conditions hydrométéorologiques : période de revif et surtout de vents très forts de secteurs W à WNW durant la deuxième quinzaine du mois de mars.

L'image n'est pas interprétable sur la majeure partie de la côte sud Bretagne en raison de la présence de nuages. On peut constater que :

- les masses d'eaux sont pratiquement homothermes (10 à 11 °C) de Penmarc'h à la baie de Lannion,

- à l'est de la baie de Lannion les eaux sont un peu plus froides (9 à 10 °C) mais l'écart thermique entre l'est et l'ouest du littoral nord-Bretagne ne dépasse pas 1 °C,

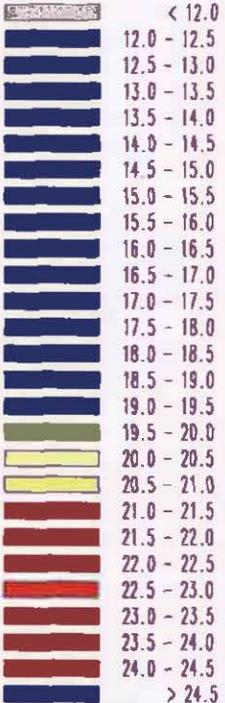
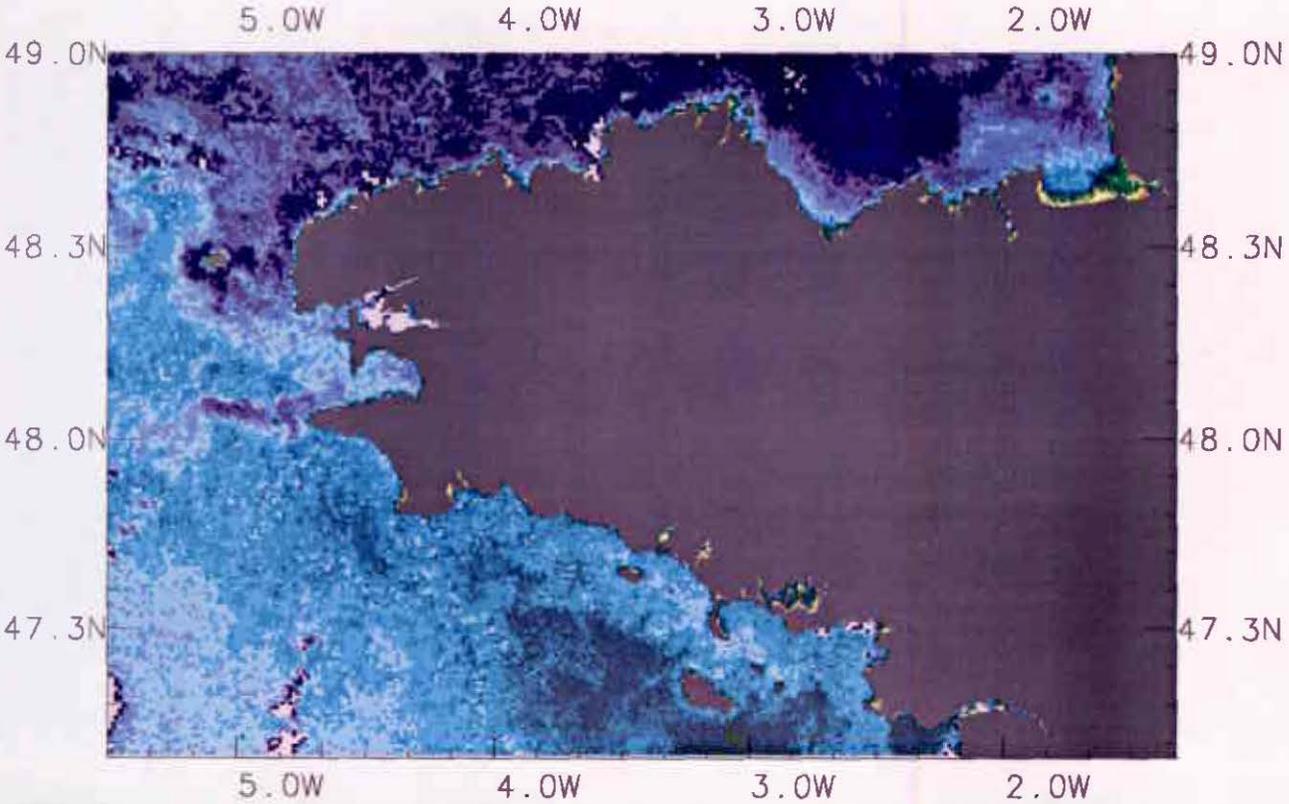
- le minimum de température (9 °C) est décelable au nord ouest de la baie de Saint-Brieuc, sous forme d'une structure en forme de langue,

- le maximum (> 14 °C) se rencontre au fond de la baie du Mont-Saint-Michel.

temperature tiros du 20 mai 1988

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 9

15 h 36 TU

20-05-1988

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	60	PM + 2 h 40	ENE	5	ENE	7	NNW	2

* Moyenne des trois jours précédents.

A la fin du mois de mai, les eaux de surface se sont bien réchauffées.

Depuis avril, la hausse des températures a été plus élevée au sud qu'au nord de la Bretagne.

Le Δt au nord est d'environ 3 °C, au sud il est de 5 °C au niveau de la pointe de Penmarc'h.

Il en résulte une dichotomie entre le littoral nord baigné par des eaux fraîches (13 à 14 °C) depuis la pointe de Saint-Mathieu jusqu'aux îles Chausey et un littoral sud aux eaux plus chaudes (15,5 °C à 16,5 °C).

En Bretagne nord, il existe un gradient côte-large. L'écart thermique d'au moins 2 °C est lié au réchauffement des fonds de baie et des fonds inférieurs à 20 m dans le secteur baie de Saint-Brieuc-Cotentin.

Le maximum de température (> 18 °C) est détectable en baie du Mont-Saint-Michel où l'on se trouve à PM.

En sud-Bretagne, les températures sont homogènes sur tout le littoral. On ne repère pas de structures particulières sauf aux abords de Quiberon où les eaux sont légèrement plus fraîches ou encore à l'entrée de la Loire où s'étend une tache chaude. La présence de cette tache est peut-être due à une stratification thermohaline liée au panache de la Loire dont les débits sont supérieurs à 1 000 m³/s.

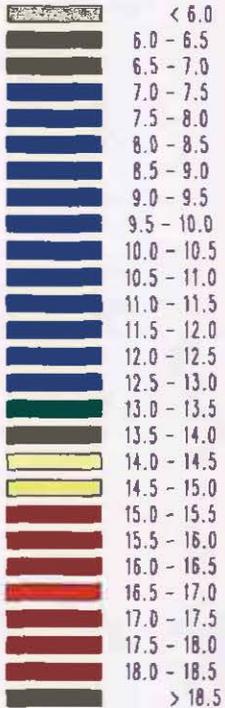
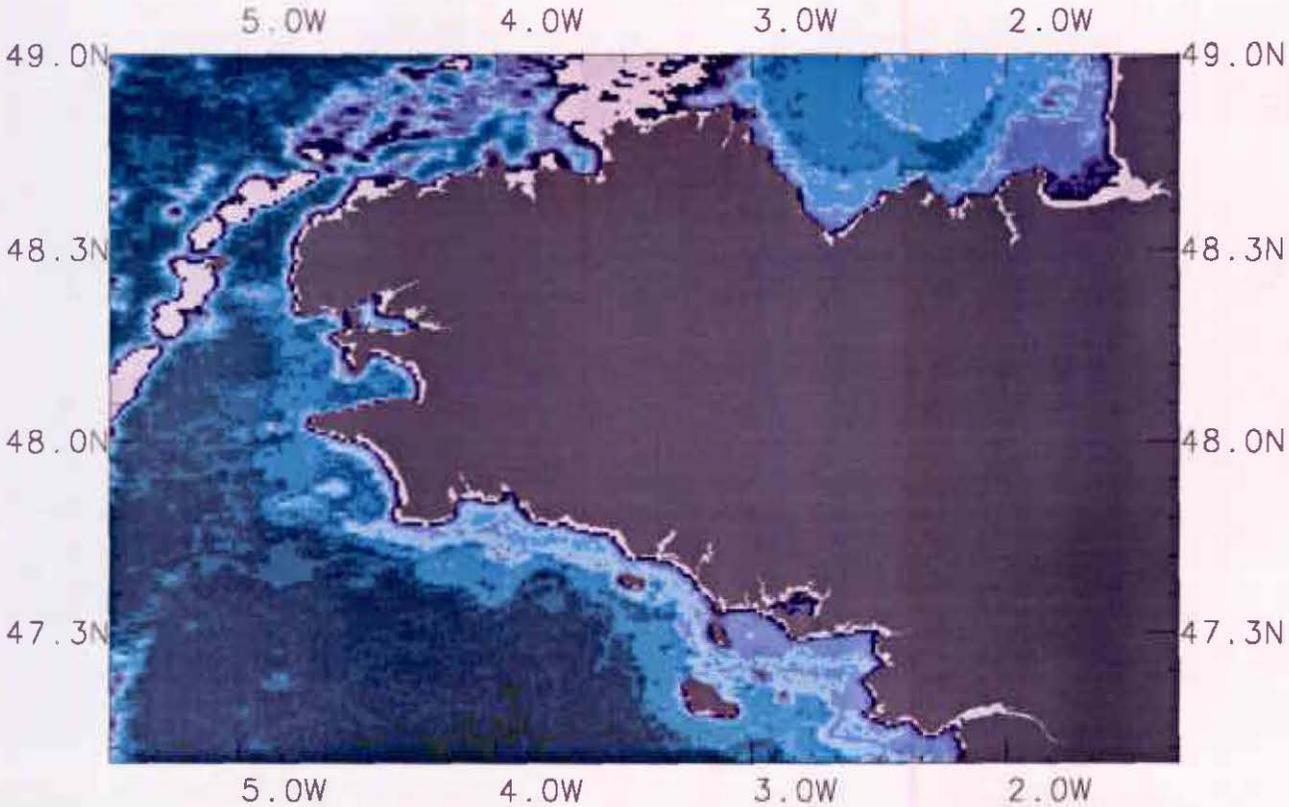
L'image du 20/05/1988 montre qu'on se trouve encore en période transitoire : certaines structures estivales commencent à apparaître. A l'ouest de la Bretagne, par exemple, l'amorce de formation du front thermique est révélé par la présence d'une tache froide aux abords de l'île de Sein. L'écart thermique avec les eaux alentours est déjà important (2 °C).

On observe, par ailleurs, la présence d'eaux plus chaudes (17 à 18 °C) dans les parages de Belle-Ile. Dans certains secteurs comme la rade de Brest, ou la baie de Lannion, les informations sont masquées par quelques pixels nuageux (en blanc).

temperature tiros du 11 fevrier 1989

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 11

1 h 41 TU

11-02-1989

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	94	BM + 0 h 20	SW	5	S	7	SSE	6

* Moyenne des trois jours précédents.

L'hiver 1988-1989 est un des plus doux enregistré au cours du siècle, sur la moitié nord de la France (cf. La Météorologie).

L'image du 11/02/1989 montre que les eaux côtières bretonnes ont des températures supérieures en moyenne de 2 °C par rapport à celles de 1986 ou 1987. Elles varient de 7,5 °C en baie du Mont-Saint-Michel à 10,5 °C en baie de Douarnenez.

Sur la côte nord et nord-ouest, la présence de nuages rend toute interprétation impossible.

On retrouve des traits caractéristiques de la période hivernale : bande froide dans le sud Bretagne de la pointe du Raz à la Loire (9 à 10 °C), valeurs en température de l'eau de mer identiques en sud-Bretagne et dans le secteur Saint-Brieuc-Cotentin.

Mais on relève aussi des différences dans la configuration des structures :

- en Bretagne nord, une langue d'eau chaude pénètre au NW de la baie de Saint-Brieuc vers le cap Fréhel puis s'incurve vers le NE. Cette structure témoigne du trajet résiduel des eaux en provenance de l'Atlantique à travers le dédale des tourbillons du golfe normano-breton (Breton, Salomon, 1991).

Elle correspond à la masse d'eau décrite par P. Garreau (1993) qui descend vers le sud entre les Minquiers et les Roches Douvres et qui parcourt d'est en ouest la baie de Saint-Brieuc. Tout au long de son parcours, des échanges s'opèrent par dispersion avec les masses d'eau voisines plus froides d'où cette structure de langue qui est mise en évidence en période de VE (coef. 108 le 8/2/1989), .

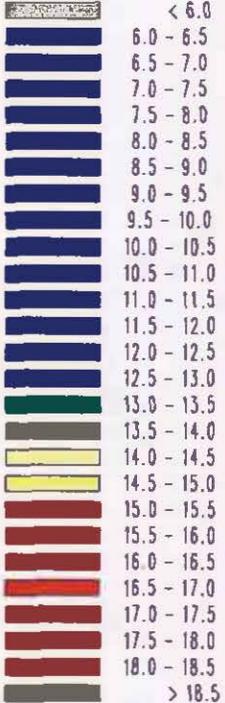
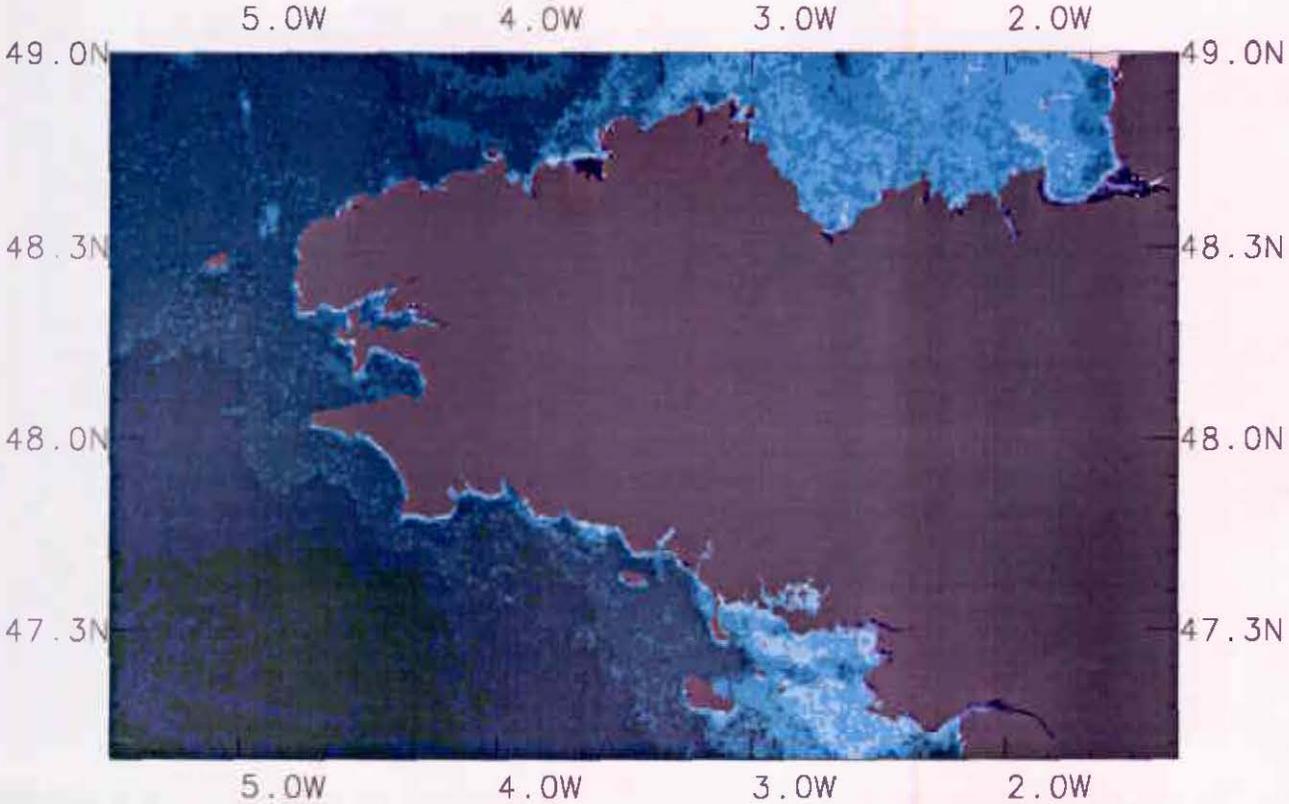
- En Bretagne sud le gradient côte-large est beaucoup moins prononcé (2 à 3 °C) et la bande froide est moins homotherme qu'en 1986 et 1987. Il semble que les plages de température correspondent davantage à la bathymétrie. Les eaux sont plus froides (9 à 9,5 °C) sur une bande large de 5 à 10 milles correspondant grossièrement à des fonds < 30 m.

Les valeurs minimales rencontrées dans la zone Loire-Vilaine pourraient signifier la présence d'eaux douces, mais cette relation n'est pas facile à établir. Les débits de l'hiver 1989 de la Loire et de la Vilaine sont particulièrement faibles (Loire < 400 m³/s les dix jours précédents).

temperature tiros du 26 mars 1989

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 11

2 H 48 TU

26-03-1989

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	80	BM + 2 h 40	W	8	W	9	W	8

* Moyenne des trois jours précédents.

En 1989, le mois de mars fait figure de mois exceptionnel :

- par la douceur des températures. Sur l'ouest de la France, les températures moyennes de l'air ont été supérieures à 3 °C par rapport à la normale (1951-1980),

- par les épisodes de vents forts de secteur W à SW qui ont sévi à la mi-mars (coup de vent > 30 m/s sur la côte nord et sud) et du 21 au 24 mars (vents > 10 m/s sur l'ensemble des côtes bretonnes),

- par l'enregistrement des débits maximum de l'année pour la Loire (1 000 à 1 400 m³/s du 4 au 13 mars).

Les structures de l'image du 26/03/1989 portent la marque de ces conditions particulières qui ont prévalu durant le mois de mars 1989. On constate ainsi :

- une élévation faible des températures côtières (< 1°). Elles sont comprises entre 9° et 11,5 °C,

- une homogénéisation des masses d'eau dû à l'action du vent. Il en résulte une atténuation, voire une disparition de certaines structures hivernales.

De Quiberon à l'île de Batz, les eaux côtières ont la même température (11 à 11,5 °C).

En Bretagne nord, on retrouve la division thermique est-ouest du littoral mais le gradient est faible (1,5 °C) et les masses d'eau sont homogènes en température à l'est (9,5 °C à 10,5 °C comme à l'ouest (11 à 11,5 °C). La tache froide en baie de Lannion correspondant à une zone nuageuse ancrée sur la partie terrestre.

En Bretagne sud, la bande froide parallèle à la côte a pratiquement disparue. Le gradient thermique côte-large n'est plus que de 1 °C.

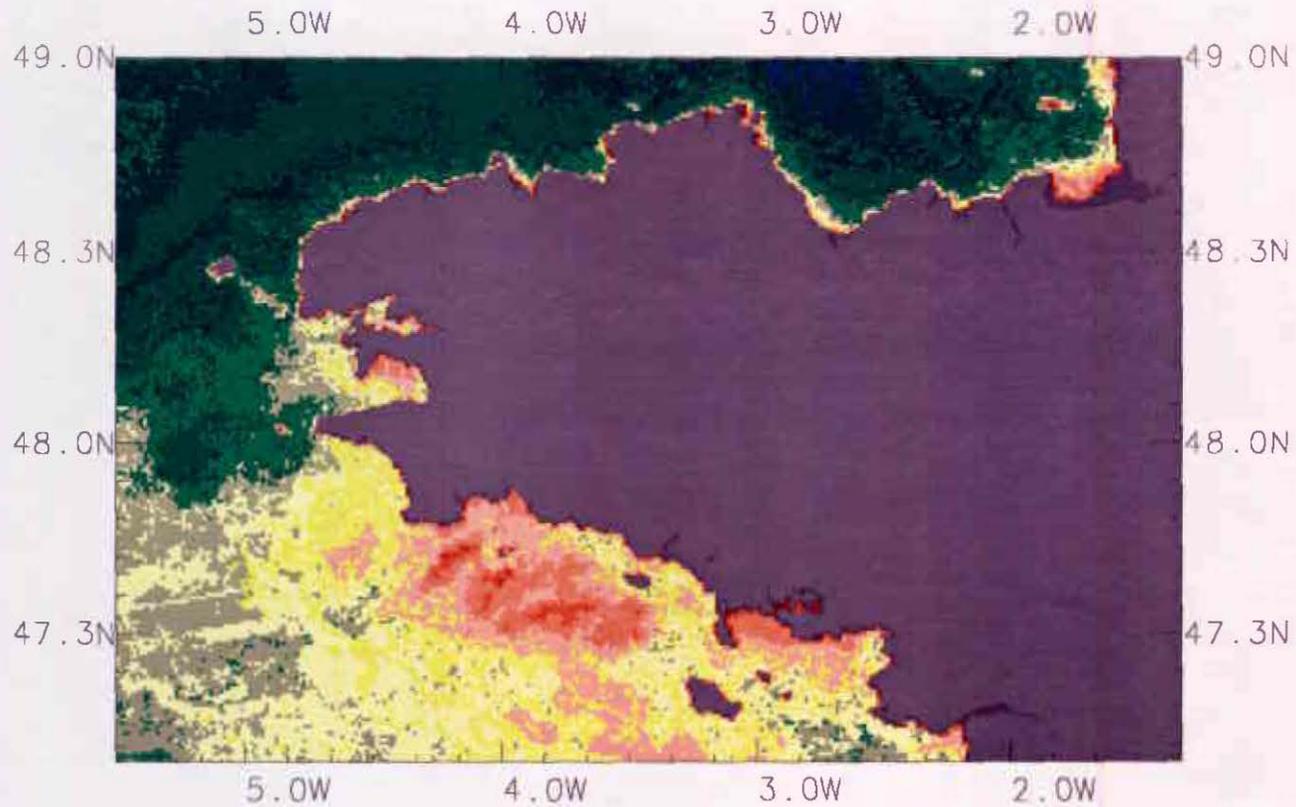
Le littoral sud est lui aussi divisé en deux régions thermiques de part et d'autre de la presqu'île de Quiberon : à l'ouest des eaux plus chaudes, à l'est des eaux plus froides avec un écart thermique de 2 °C.

La persistance d'eaux plus froides de Quiberon à la Loire peut-être liée à la présence d'eaux d'origine fluviale (crue de la Loire) mais on ne peut pas le certifier.

temperature tiros du 08 mai 1989

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 11

13 h 43 TU

8-05-1989

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	86	BM + 2	ENE	6	ENE	7	NE	6

* Moyenne des trois jours précédents.

Cette situation correspond à une période de beau temps anticyclonique avec vents modérés de secteur ENE et à une période de déchet faisant suite à une vive eau de coefficient 104 (le 5/05/1989).

Les températures de la mer se sont notablement réchauffées par rapport au mois de mars : + 2 °C en moyenne en Bretagne nord, hormis les baies (> 4 °C), + 4 °C en Bretagne sud et dans la baie de Douarnenez et la rade de Brest.

L'inversion de gradient a déjà eu lieu, les eaux strictement côtières sont plus chaudes que celles du large. On peut observer :

- une grande différence de température entre la côte nord et la côte sud de la Bretagne. L'écart thermique moyen est de 4 °C,
- une homogénéité thermique des eaux entre l'île de Sein et le Cotentin (12 °C à 13 °C),
- des maxima de température (> 16 °C) en baie du Mont-Saint-Michel, au nord de la baie de Douarnenez, au SE de Penmarc'h et à l'est de Quiberon,
- un minimum de 11,5 °C au NW de la baie de Saint-Brieuc.

On peut considérer qu'à cette époque de l'année, la différence de température entre côte nord et côte sud est lié aux processus de stratification qui sont en cours.

Cette stratification saisonnière est plus précoce dans les secteurs où les fonds sont importants et les courants de marée faibles. On peut trouver ainsi une bonne concordance entre les zones les plus chaudes de l'ouest et du sud de la Bretagne avec les zones de faible courantologie (Le Cann, 1982 ; Salomon-Lazure, 1988). A l'inverse, les zones les plus froides correspondent à des zones de forts courants (> 0,70 m/s, Le Cann, 1982 ; Garreau, 1993).

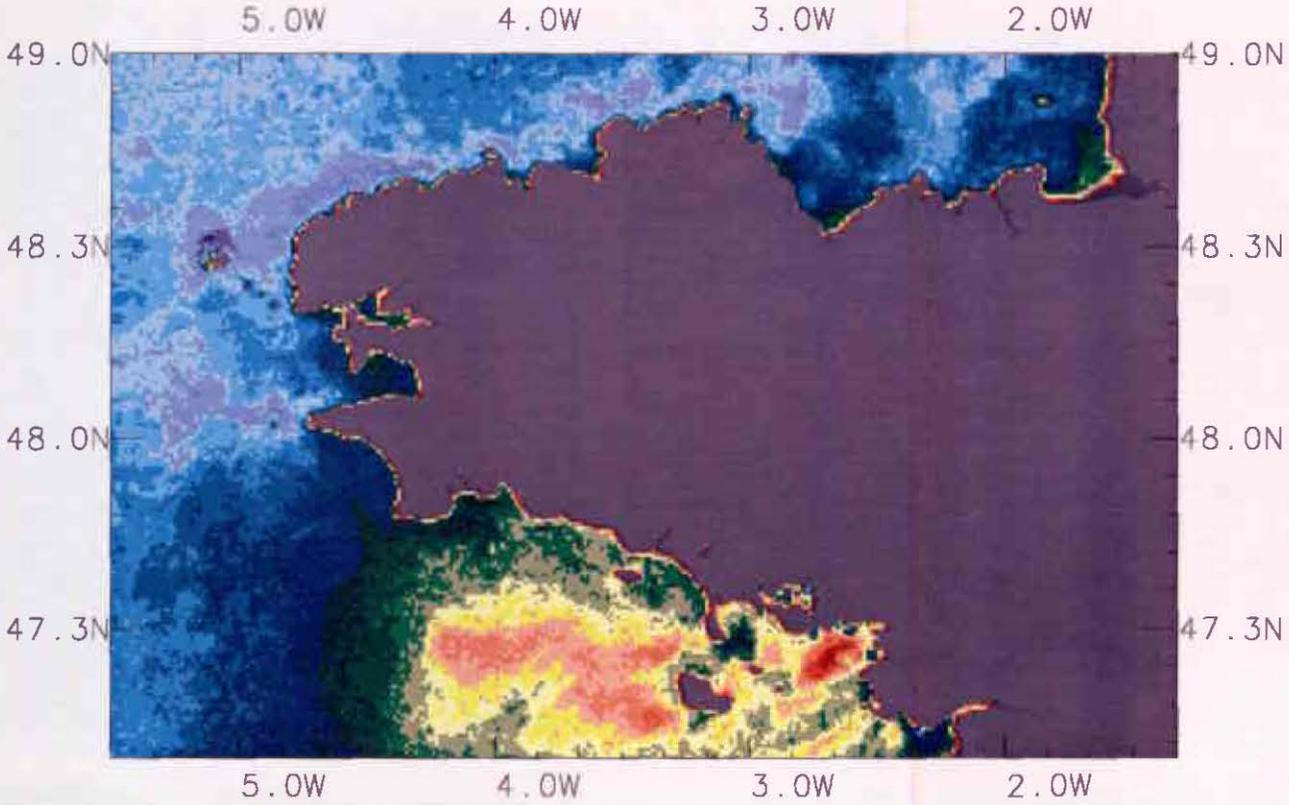
En Bretagne occidentale, seul le front au sud de l'île de Sein et le front interne entre la pointe Saint-Mathieu et la pointe du Raz sont identifiables. Sur le reste de la zone, la marée de vive eau a induit un mélange vertical suffisant pour contrecarrer le développement de la stratification thermique printanière.

La tache chaude au SE de Penmarc'h est un effet diurne (surchauffe de la couche superficielle lors de périodes de fort ensoleillement), mais on peut remarquer que son emplacement correspond à une zone où l'amplitude du courant de marée est minimale sur la côte sud-Bretagne (< 0,3 m/s, Le Cann, 1982).

temperature tiros du 16 juin 1989

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 11

13 h 45 TU

16-06-1989

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	57	PM - 0 h 20	NW	3	NNE	7	N	6

* Moyenne des trois jours précédents.

Le mois de juin 1989 est un mois chaud et très ensoleillé. La deuxième décennie est marquée par un régime de sud à sud-ouest.

Depuis début mai, les eaux de surface ont continué à se réchauffer mais de manière inégale suivant les secteurs.

Là où subsistent des taches froides, le gain en température est faible, de l'ordre de + 2 °C. Il est, par contre important en baie de Saint-Brieuc, en baie de Lannion, en baie de Morlaix, en rade de Brest et en baie de Douarnenez où il atteint + 4 °C et en baie de Vilaine où il dépasse + 6 °C.

On remarque toujours un contraste très net entre les eaux plus froides de Bretagne nord et de Bretagne occidentale et les eaux plus chaudes de Bretagne sud. L'écart thermique est important (> 8 °C), accentué, sans doute, par un effet diurne en Bretagne sud qui induit un accroissement des valeurs en température de la couche superficielle détectée.

On relève des températures < 15 °C autour de Sein et Ouessant et le long de la côte du Léon et du Trégor. Les eaux les plus chaudes se rencontrent dans les baies (17,5 à 19,5 °C), la zone la plus chaude étant la baie de Vilaine (21 à 23 °C).

Les structures correspondent davantage aux structures estivales mais elles sont aussi marquées par les conditions de marée (situation de morte eau) et de vents (faibles à modérés). Les taches froides identifiées en Bretagne ouest et Bretagne nord correspondent aux zones d'intensité maximum des courants de marée. Leur emplacement est en accord avec celui des zones de vitesse maximum publiées par différents auteurs (Le Cann, 1982 ; Garreau, 1993). Il existe un gradient thermique horizontal encore peu important en Bretagne ouest (1,5 à 2 °C sur environ 2 milles) lié à la mise en place du système frontal en mer d'Iroise.

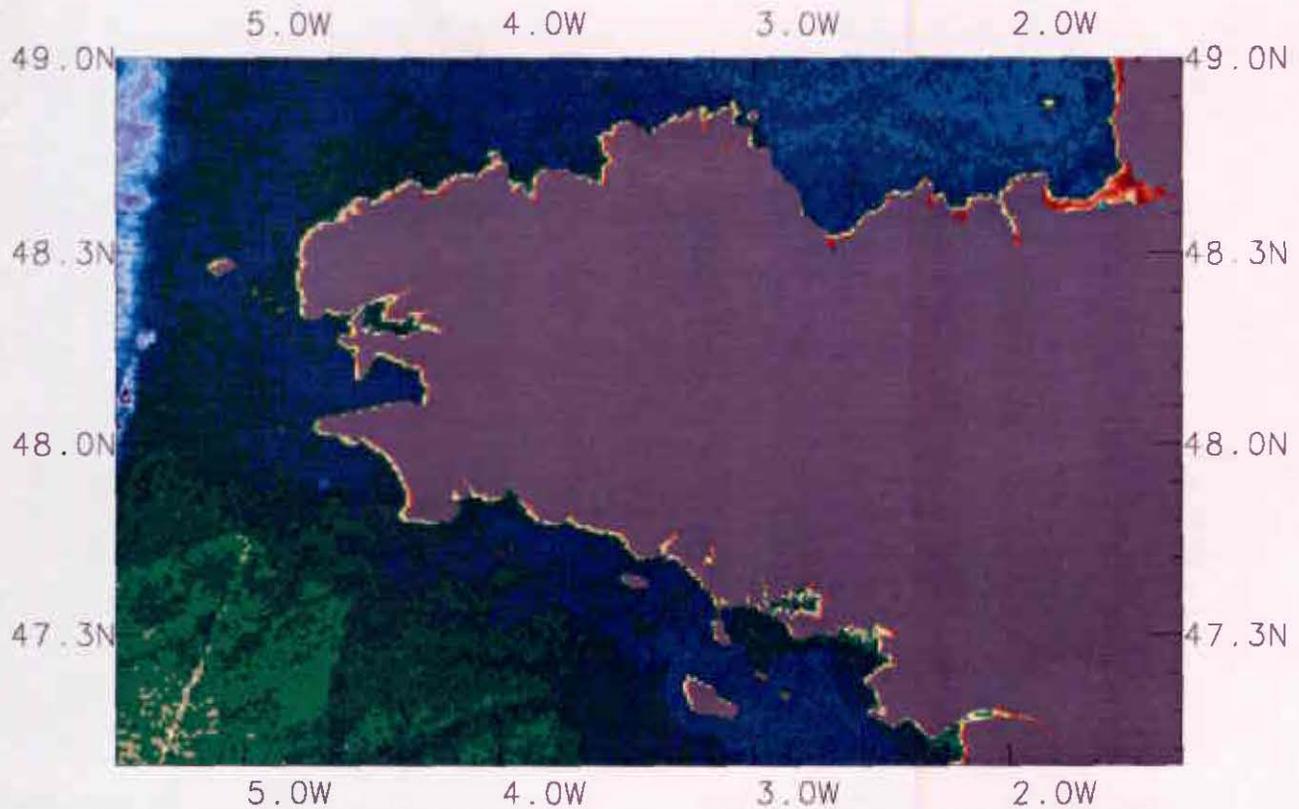
En Bretagne nord, on observe un écart thermique de près de 2 °C entre la zone côtière plus froide et les zones de grande profondeur (fonds > 60 m). En cette période de morte eau et de vents faibles, l'hypothèse d'une légère stratification des eaux au large de la Bretagne nord est plausible (Garreau, 1993).

En Bretagne sud les structures sont assez complexes. L'effet diurne dû au fort ensoleillement, rend l'interprétation difficile. On notera toutefois pour la zone Loire Vilaine, une bonne adéquation entre les taches froides situées au passage de la Teignouse, au SW de Quiberon et de l'entrée de la Loire et les zones de courants maximum calculés par modèle (Salomon-Lazure, 1988).

temperature tiros du 23 fevrier 1990

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 11

13 h 11 TU

23-02-1990

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	70	PM - 2	SSW	7	SSW	9	SSW	5

* Moyenne des trois jours précédents.

L'hiver 1989-1990 est encore une saison exceptionnelle pour sa douceur mais aussi pour la fréquence d'événements météorologiques violents. La Météorologie Nationale a dénombré près de 20 jours de tempêtes sur les côtes Manche et Atlantique (vent moyen > 50 noeuds, force 10 Beaufort) pour la période novembre 1989-février 1990.

Plusieurs perturbations se sont suivies pendant les deux premières décades de février. Elles se sont accompagnées de vents forts de secteur SW dominant.

La relative homogénéité horizontale des températures sur le littoral breton est sans doute due à ces conditions exceptionnelles.

Les valeurs sont comprises entre un minimum de 10,5 ° pour le golfe normano-breton et un maximum de 12,5 °C détecté en Bretagne occidentale et en Bretagne sud.

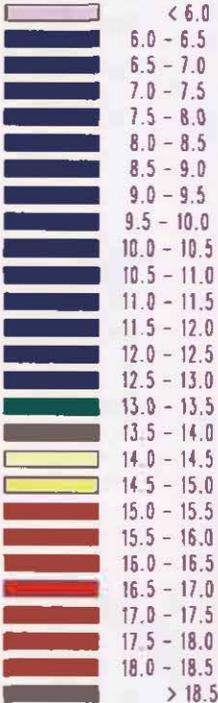
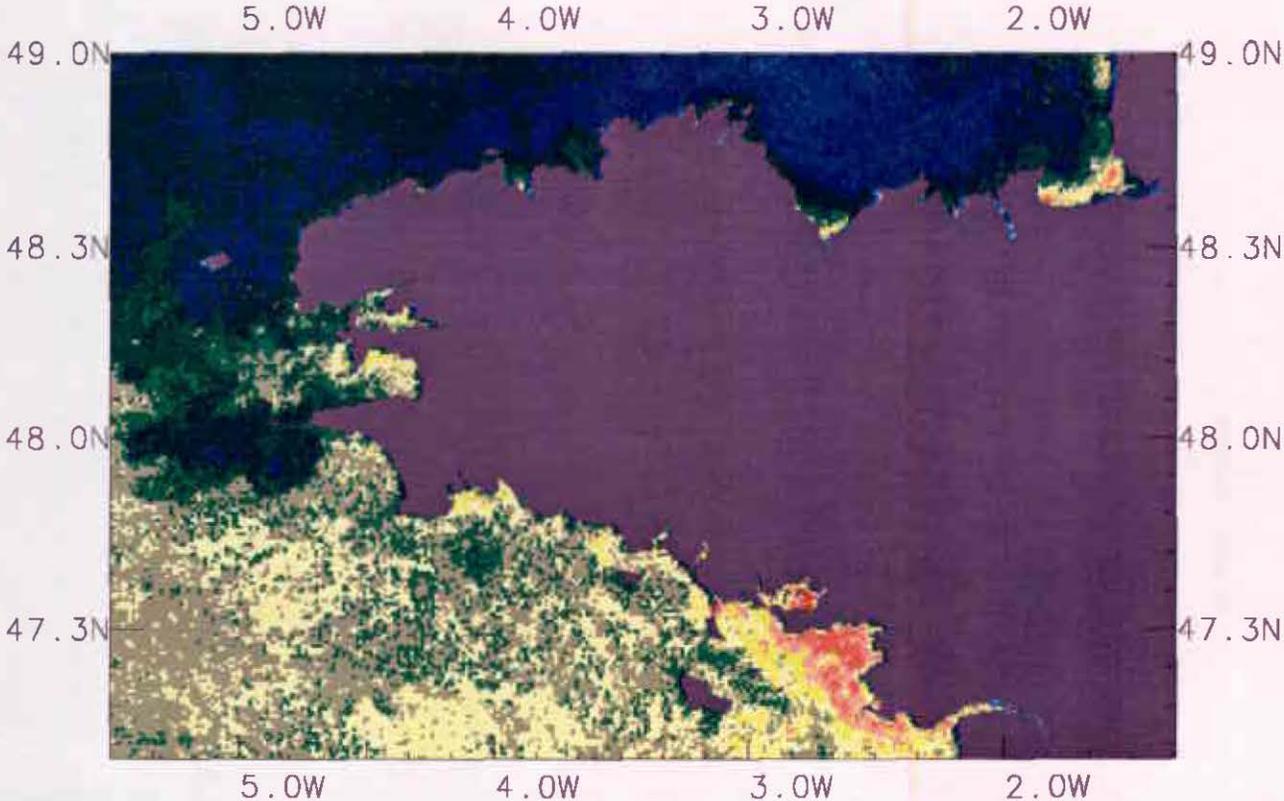
Les structures hivernales repérées au cours des hivers précédents sont ici peu marquées, voire modifiées :

- l'écart thermique est-ouest sur la côte nord est très faible (à peine 1 °C),
- la bande d'eau froide en Bretagne sud est à peine perceptible. Elle est disloquée, voire décollée de la côte dans certains secteurs qui semblent déjà en phase de réchauffement : baie de Vilaine et de Quiberon, baie de Concarneau, anse de Benodet, rade de Brest, etc.,
- les températures élevées en baie du Mont-Saint-Michel sont la signature des zones découvrautes (BM + 1 h 30 à cet endroit).

temperature tiros du 02 mai 1990

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 11

2 h 16 TU

2-05-1990

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	45	BM - 1 h 30	E	6	E	7	E	7

* Moyenne des trois jours précédents.

En ce début de printemps, le réchauffement des eaux en Bretagne sud est déjà notable (+ 2°C à + 3 °C) alors que les valeurs de température en Bretagne nord ont très peu varié par rapport à celles du mois de février, sauf localement dans les baies et les faibles profondeurs de l'ouest Cotentin.

On retrouve ainsi une dichotomie Bretagne nord-Bretagne sud déjà décrite pour d'autres situations de début mai (1er mai 1986 et 8 mai 1989) avec globalement :

- des eaux plus froides (11 à 12 °C) de l'île de Sein jusqu'au Cotentin,
- des eaux plus chaudes (13 à 14,5 °C) en Bretagne Occidentale (rade de Brest, Baie de Douarnenez, parages de la presqu'île de Crozon) et en Bretagne sud (de la pointe du Raz à la Loire).

Les températures maximales sont atteintes dans le secteur Loire-Vilaine-Quiberon (15 à 16 °C) et en baie du Mont-Saint-Michel (14 à 16 °C).

Le choix d'une prise de vue nocturne nous affranchit, pour l'interprétation, des effets diurnes mais il est possible qu'il y ait un léger refroidissement de la couche de surface par perte d'énergie en fin de journée (Mariette, 1977). La comparaison de cette situation avec celle du 1er mai 1986 (même coefficient, même heure marée, situation météorologique différente) et celle du 8 mai 1989 (coefficient et heure marée différentes, situation météorologique proche) montrent que certains secteurs se réchauffent plus rapidement que d'autres :

- secteur Loire-Vilaine-Quiberon,
- baie du Mont-Saint-Michel,
- nord de la baie de Douarnenez,
- sud de la rade de Brest,
- à un moindre degré, fond de la baie de Saint-Brieuc.

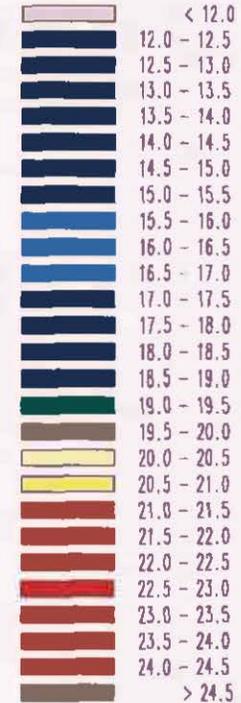
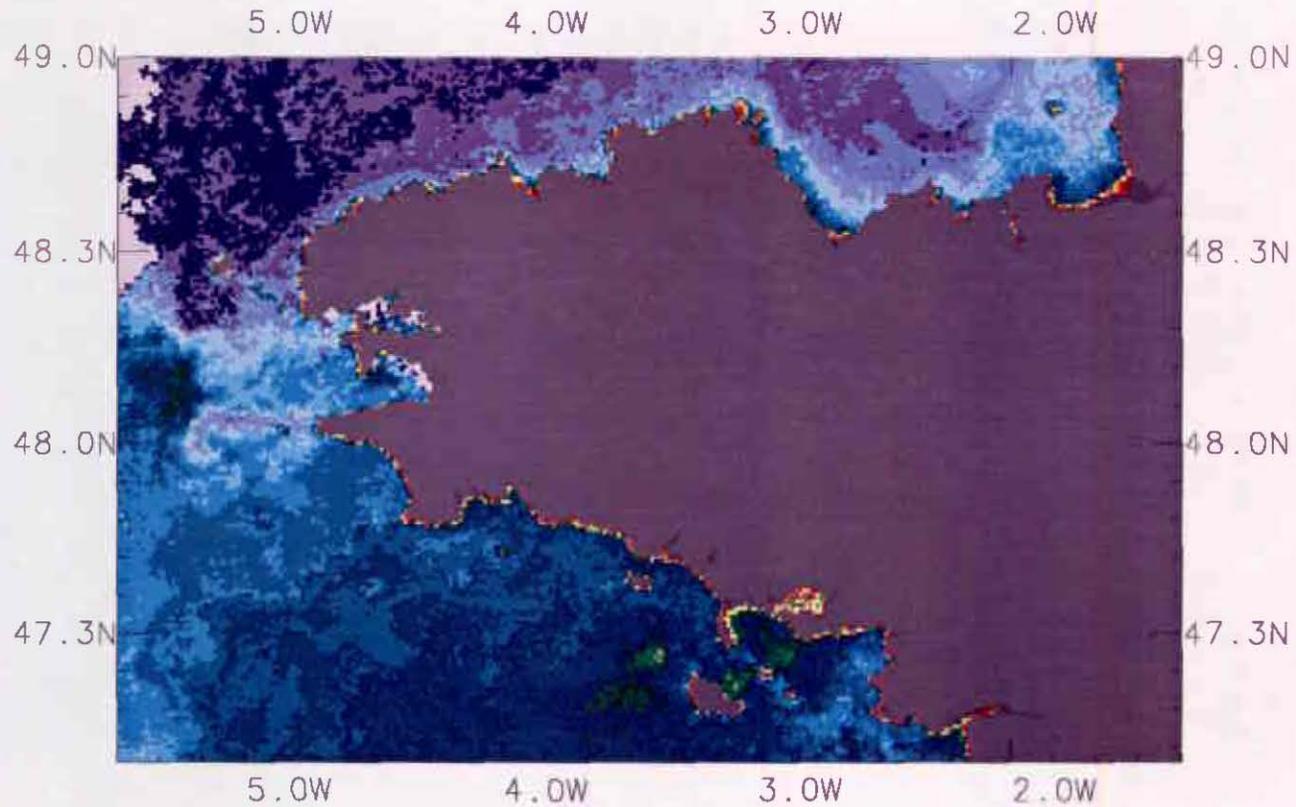
Cette comparaison met aussi en évidence la variabilité interannuelle des températures et l'action de la marée. On retrouve des analogies dans la répartition des structures, surtout en Bretagne nord.

L'effet de mélange des masses d'eau par la marée est particulièrement visible au niveau des zones frontales de l'Iroise : structures en taches froides en morte eau (le 2 mai 1990), jonction des taches froides en vive eau (le 8 mai 1989).

temperature tiros du 27 mai 1990

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 11

12 h 06 TU

27-05-1990

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	87	BM + 1	ENE	7	ENE	6	NE	6

* Moyenne des trois jours précédents.

Fin mai 1990, on retrouve la division thermique Bretagne nord-Bretagne sud, mais les températures ont augmenté entre 2 et 4 °C selon les secteurs, ce qui nous a contraint à changer d'échelle de température (échelle estivale).

Les températures inférieures à 15 °C concernent les eaux de Bretagne nord et la chaussée de Sein. Elles sont plus élevées dans la baie du Mont-Saint-Michel et la baie de Saint-Brieuc (littoral ouest) où on enregistre 16 à 17 °C, de même qu'aux abords du secteur Rance-Pointe du Grouin où s'étend une tache de 16 °C.

En Bretagne sud, les eaux ont partout une température supérieure à 16,5 °C avec un maxima de 18,5 - 19 °C aux abords de Belle Ile et en baie de Quiberon.

Dans ce secteur, la présence de taches plus froides (15,5 °C) sur la chaussée des îles d'Houat et d'Hoedic peut être mise en relation avec l'intensité des courants connus sur ce site. Par contre, il est difficile d'établir l'origine de celles qui s'étalent sur la partie orientale de la baie de Vilaine.

L'information sur la Bretagne occidentale est un peu perturbée par la présence de nuages au niveau des baies.

Cette situation du 27 mai 1990 est à rapprocher de celle du 20 mai 1988. Les conditions de marée ne sont pas identiques mais les conditions météorologiques sont proches (vent d'ENE à N dominant).

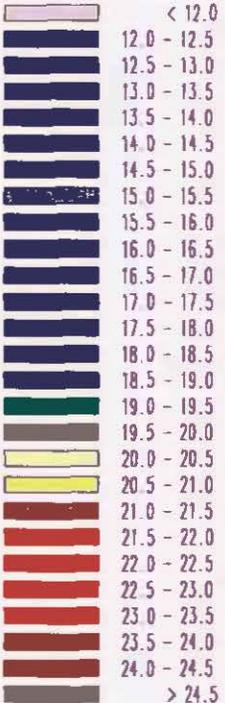
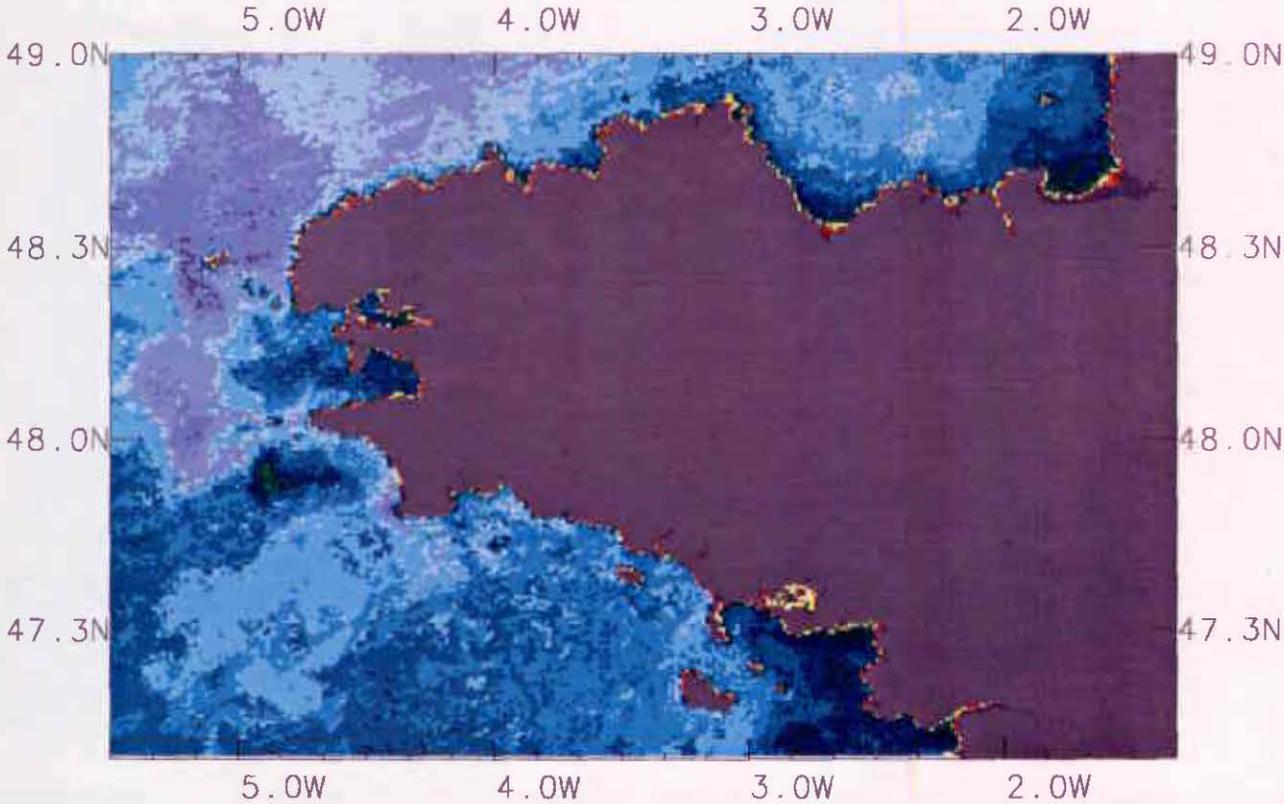
On peut remarquer une certaine similarité des structures en Bretagne nord et en Bretagne occidentale, en particulier la configuration du système frontal à l'ouest.

Les deux images se situant en période de déchet, on assiste à la reconstitution d'une stratification intermédiaire entre Ouessant et l'île de Sein.

temperature tiros du 12 juillet 1990

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 11

13 h 00 TU

12-07-1990

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	79	BM	NW	6	N	6	N	4

* Moyenne des trois jours précédents.

Pendant les 11 premiers jours de juillet prévaut un régime d'ouest cyclonique. Pendant cette période on enregistre sur l'ouest de la France une insolation déficitaire, des températures de l'air inférieures à la normale, des vents de secteur W puis NW dominant, parfois assez forts (7 à 9 m/s en moyenne du 5 au 9 juillet).

L'image du 12/07/1990 traduit par le faible contraste des couleurs, l'effet de l'instabilité météorologique qui a précédé cette situation : réchauffement faible, voire déficitaire des eaux de surface, mélange des masses d'eaux sous l'action des courants de marée (période de revif) et du vent.

On observe en Bretagne nord une élévation des températures d'ouest en est de l'ordre de 2 °C.

En Bretagne occidentale, les fronts thermiques sont bien établis. La zone froide (14 - 14,5 °C) orientée nord-sud par 5° de longitude ouest, correspond au secteur où la colonne d'eau est bien brassée et la température homogène sur la verticale. Elle présente une morphologie de vive eau.

En Bretagne sud les températures de surface accusent un déficit par rapport à la situation précédente de fin mai (- 0,5 à - 1 °C), ce qui n'est pas le cas en Bretagne nord où on constate une augmentation des valeurs de + 1 à + 2 °C.

Le vent est sans doute responsable du refroidissement de la couche de surface et de son homogénéisation.

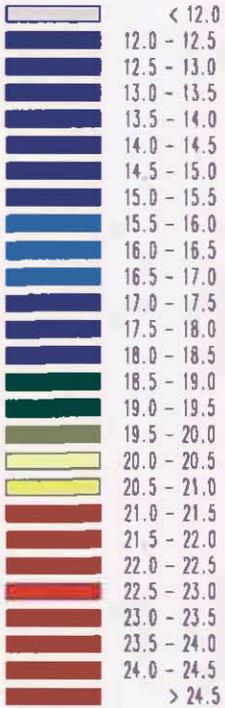
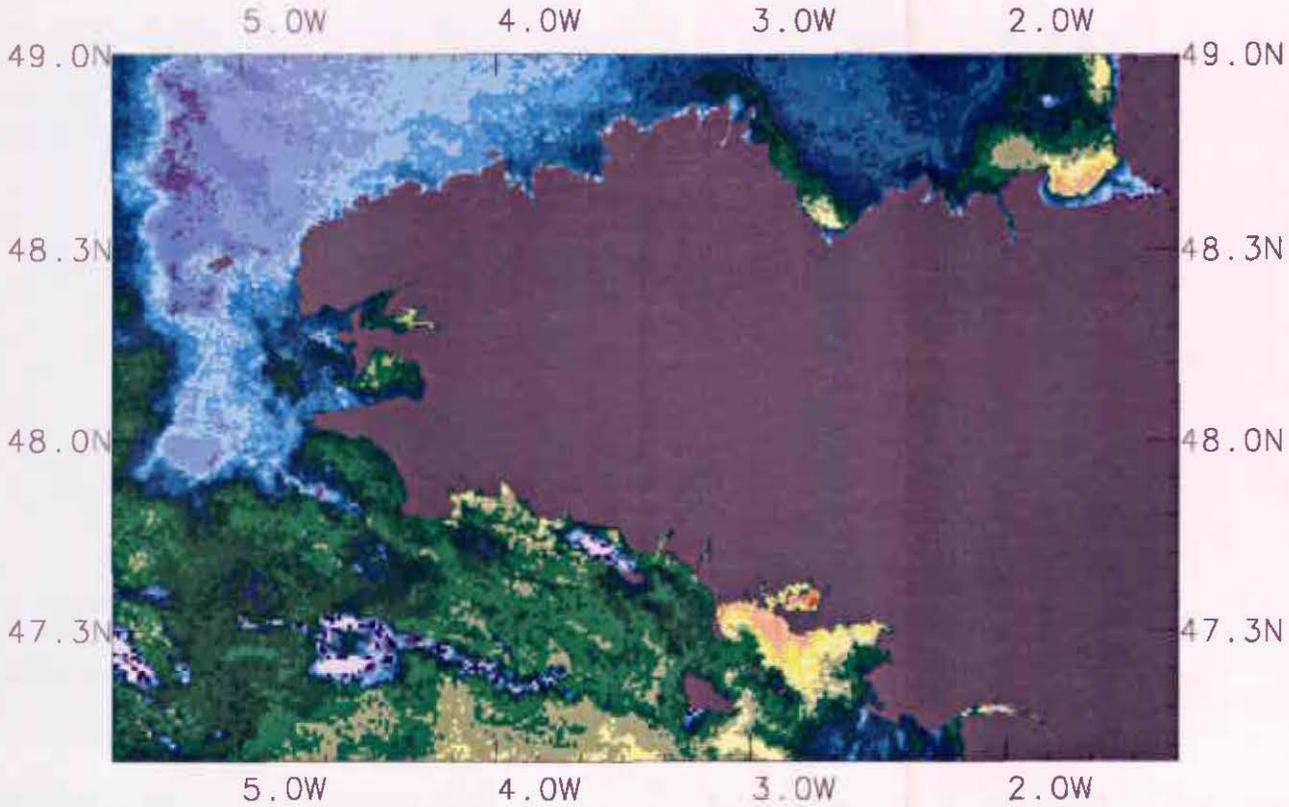
Sur l'ensemble du littoral breton, les eaux les plus chaudes (> 17 °C) se rencontrent dans les zones de faibles profondeurs (< 20 m) du golfe normano-breton et dans les baies de Lannion et de Morlaix, en rade de Brest, en baie de Douarnenez et dans le secteur de Quiberon à la Loire.

La température maximale (18,5 °C) est atteinte en baie du Mont-Saint-Michel, et en baie de Vilaine.

temperature tiros du 25 juillet 1990

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 11

2 h 05 TU

25-07-1990

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	92	BM + 2	ENE	6	ENE	6	NE	7

* Moyenne des trois jours précédents.

La fin du mois de juillet est caractérisé par l'installation de hautes pressions sur la France. On retrouve un temps anticyclonique avec des températures de l'air largement au dessus de la normale et des vents de secteurs E à ENE. Cette thermographie de nuit permet de s'affranchir des échauffements diurnes de la couche de surface, particulièrement importants en Bretagne sud durant cette période, mais il faut tenir compte de perturbations nuageuses sur le sud Bretagne.

On peut remarquer que les températures ont augmenté dans la zone du golfe normano-breton (+ 1 à + 3 °C) et en Bretagne sud (+ 3 à + 4 °C) alors qu'elles sont restées identiques au 12/07/1990 sur le littoral nord-ouest et ouest, excepté dans les baies.

On peut découper le littoral breton en 3 zones thermiques :

- une zone nord-orientale correspondant au golfe normano-breton où TSM > 16 °C, les maximales étant atteintes en baie du Mont-Saint-Michel et en baie de Saint-Brieuc (> 20 °C),
- une zone nord-occidentale de la pointe du Raz à Lannion où TSM < 15 °C, exceptées dans les baies où les températures peuvent dépasser 19 °C (nord baie de Douarnenez, sud rade de Brest),
- une zone sud-Bretagne de la pointe du Raz à la baie de Vilaine où TSM > 18,5 °C, les maximales étant identiques à la baie du Mont-Saint-Michel : 21 °C en baie de Quiberon et baie de Vilaine.

Certaines structures sont marquées par la marée (début de déchet d'une vive eau de 95), avec en particulier :

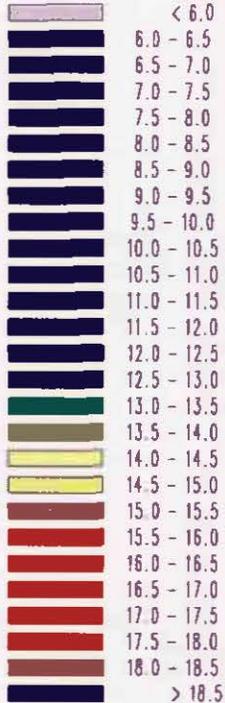
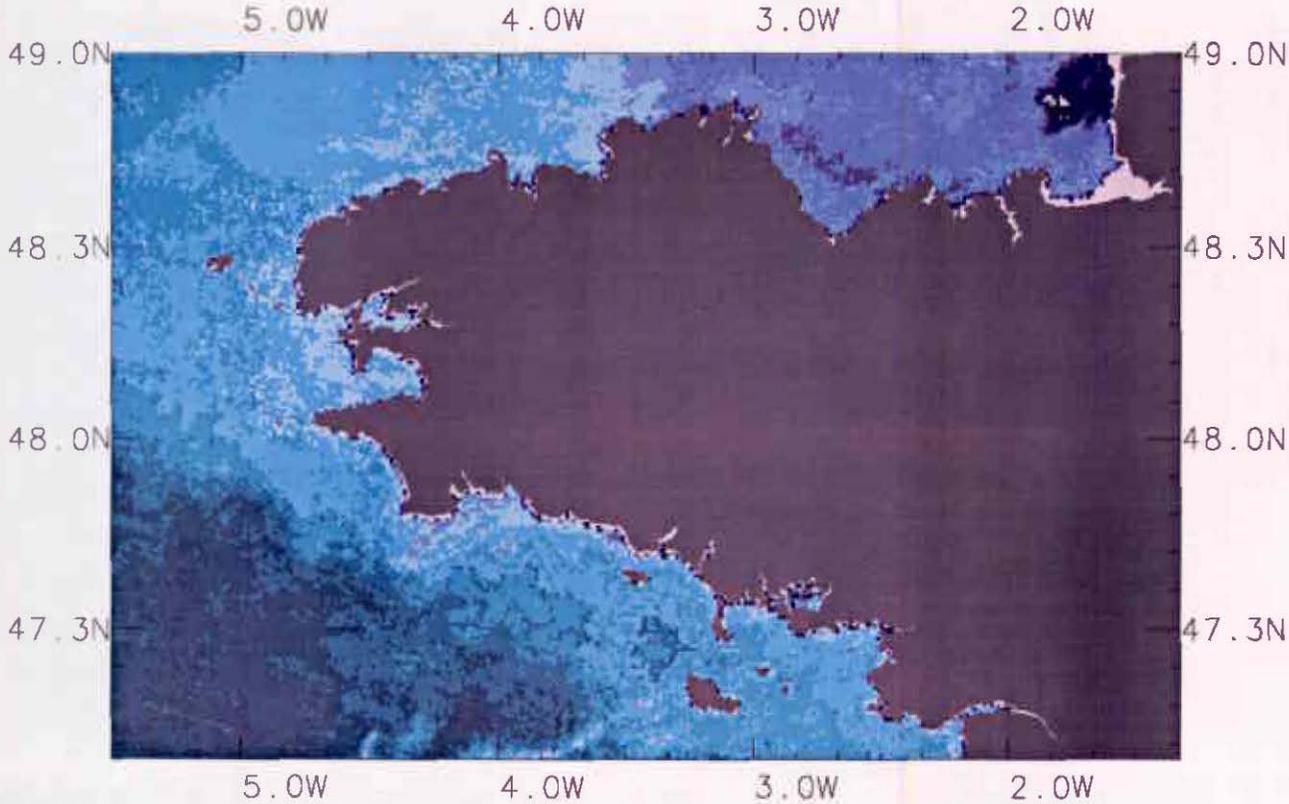
- . une configuration de VE de la zone froide en mer d'Iroise et des fronts thermiques plus marqués (gradients de 4 à 4,5 °C sur environ 6 milles),
- . l'existence de taches chaudes pouvant correspondre à l'expulsion d'eaux chaudes en provenance de la baie du Mont-Saint-Michel pendant la période de jusant : zone Rance-Point du Grouin. C'est une structure que nous avons déjà remarqué pour des conditions d'heure marée quasi-identique le 27/05/1990,
- . la présence d'une langue froide par 3° de longitude ouest correspondant à une masse d'eau déjà identifiée en période hivernale comme témoin de la circulation résiduelle (11/02/1989). Cette structure peut se repérer sur un grand nombre d'images par des taches plus chaudes ou plus froides selon les saisons, la forme en langue n'étant visible que par fort coefficient.

D'autres structures peuvent être attribuées à l'action du vent : le désordre apparent des structures en sud Bretagne (passages nuageux et vents assez forts enregistrés à Belle Ile les deux jours précédents la prise en vue (vitesse > 8 m/s) ou encore l'emplacement de la tache chaude en baie de Saint-Brieuc.

temperature tiros du 31 mars 1991

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 11

3 h 00 TU

31-03-1991

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	99	PM - 1 h 30	ENE	7	ENE	10	NE	7

* Moyenne des trois jours précédents.

La scène du 31 mars 1991 est la seule image correcte que nous avons pu sélectionner au cours du premier trimestre 1991. Encore faut-il se méfier de la contamination de certaines structures par la présence de nuages isolés, qui induisent des températures plus basses : au nord de Granville, au SE de Penmarc'h, au SW de Belle Ile.

Cette image se situe en période de flux anticyclonique de NE (depuis le 22/03/1991) et de fin de revif.

On peut constater une certaine homogénéité des températures sur plus des 3/4 des côtes bretonnes, de la Loire jusqu'à l'ouest de la baie de Lannion (températures variant de 9 à 10 °C).

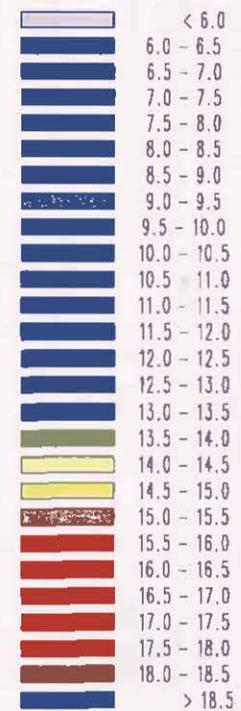
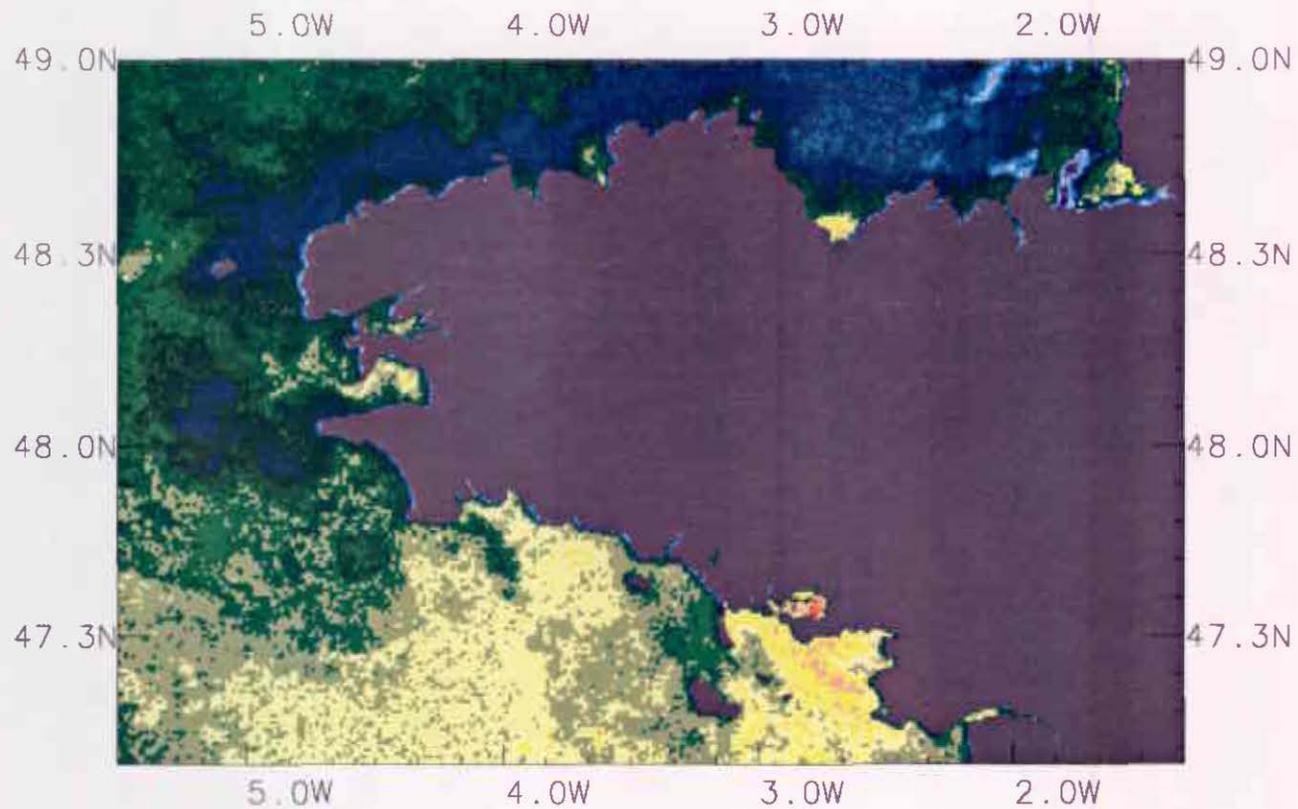
A l'est de la baie de Lannion jusqu'à la côte du Cotentin les eaux sont plus froides (8 à 9 °C) avec une frontière bien marquée avec les eaux plus chaudes à l'ouest.

D'une manière générale, les écarts thermiques sont peu importants : + 1 à + 1,5 °C d'est en ouest en Bretagne nord, + 1 à + 2 °C de la côte vers le large en Bretagne sud.

temperature tiros du 25 mai 1991

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 11

2 h 37 TU

25-05-1991

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	67	PM + 1	NE	3	NE	6	NE	6

* Moyenne des trois jours précédents.

Les températures détectées le 25/05/1991 sont plus basses que celles enregistrées les années précédentes à la même période (20/05/1988 ou 27/05/1990). Cette perte ne peut s'expliquer par l'alternance jour/nuit mais plutôt par le bilan thermique global du printemps 1991, marqué par un déficit de l'insolation depuis le mois de mars et par la prédominance d'un flux frais de NW à NE depuis le 1er mai. Le réchauffement ne deviendra sensible dans l'ouest de la France qu'à partir du 20 mai.

Cette thermographie peut être comparée avec celle du 2/05/1990. Les valeurs en température sont similaires et on observe une configuration très voisine des structures en Bretagne nord et en Bretagne occidentale.

Les deux images sont des prises de vue de nuit. Elles correspondent à une période de mort-eau, l'heure marée diffère mais les conditions météorologiques sont proches (vent de secteur NW à NE dominant durant les deux décades précédentes).

On remarque comme sur l'image du 2/05/1990 :

- des eaux plus froides (< 13 °C) de l'ouest Bretagne au Cotentin, excepté les zones de faible profondeur,
- des eaux plus chaudes (> 13 °C) sur tout le littoral sud Bretagne et dans les baies de l'ouest et du nord Bretagne.

Les températures maximales (14,5 à 15 °C) sont légèrement inférieures à celles du 2/05/90 mais elles concernent les mêmes sites : secteur Loire-Vilaine-Quiberon, baie du Mont-Saint-Michel (en partie masqué par des nuages), baie de Saint-Brieuc, nord de la baie de Douarnenez et sud de la rade de Brest.

Les structures sont comparables dans les secteurs où l'hydrodynamisme est dominé par la marée : nord et ouest Bretagne.

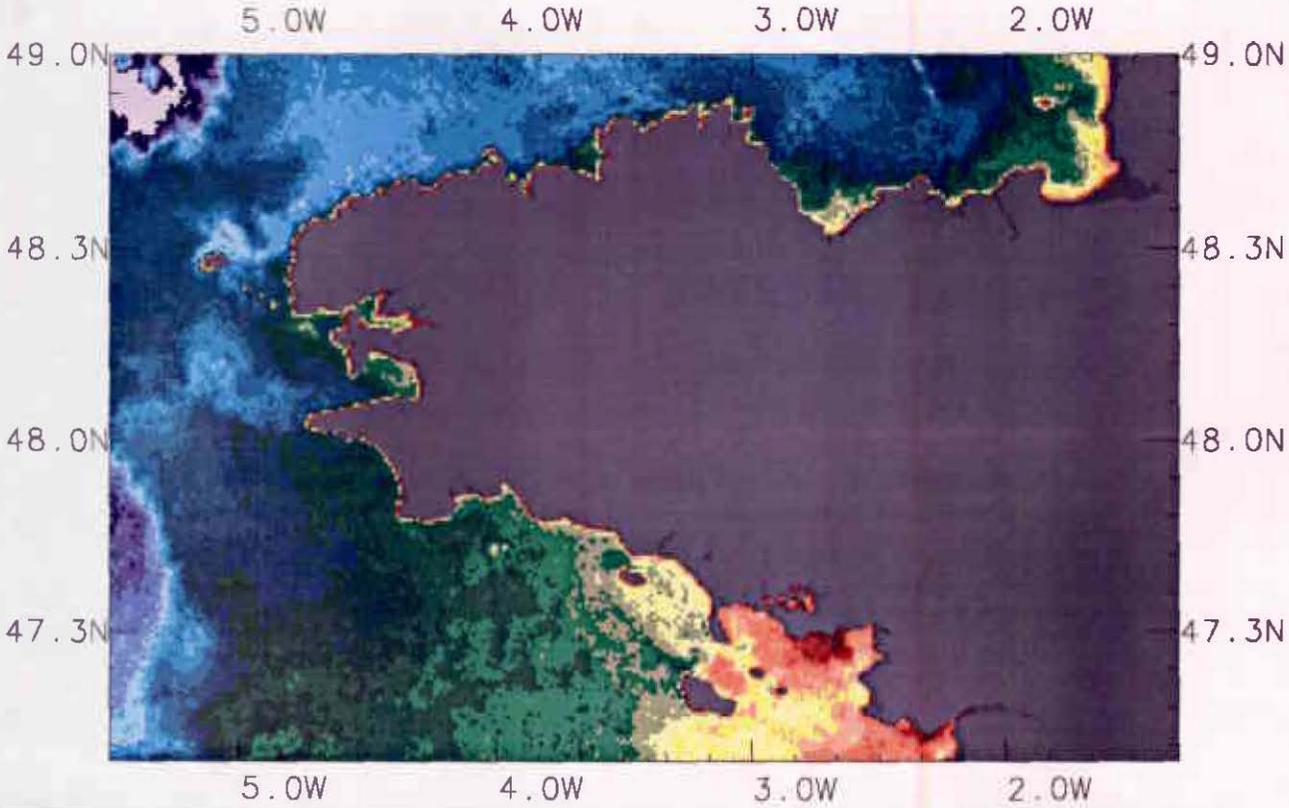
On retrouve les eaux les plus froides (< 11 °C) sous forme de taches au niveau de l'île de Sein et de l'île d'Ouessant, ou de bande parallèle à la côte dans le secteur NW ou sous forme d'une aire couvrant les fonds supérieurs à 20 m dans le golfe normano-breton (présence de pixels nuageux).

Dans le sud Bretagne où les eaux sont sans doute déjà stratifiées, il y a une plus grande variabilité des structures, dues sans doute à l'action du vent. Seule la zone chaude comprise entre Quiberon et le Croisic présente une certaine identité dans sa configuration.

temperature tiros du 10 juillet 1991

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 11

14 h 06 TU

10-07-1991

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	78	PM - 0 h 30	SW	6	SW	9	SW	7

* Moyenne des trois jours précédents.

La Météorologie Nationale décrit le mois de juillet 1991 comme un mois relativement chaud dans l'ouest, ce qui a permis de résorber les anomalies négatives de température de la mer qui subsistaient depuis le mois de mai.

La hausse des températures de surface varie de + 4 à + 7 °C selon les secteurs côtiers, mais il faut tenir compte en Bretagne sud de surchauffes locales possibles de la couche de surface (image de jour).

On trouve les eaux les plus chaudes (> 22 °C) dans le secteur Quiberon-Vilaine, devant la Loire, et sous forme d'une tache au nord de Belle-Ile.

Sur le reste du littoral sud Bretagne les températures sont de l'ordre de 19 à 20 °C. Les valeurs sont identiques dans certaine baies de l'ouest et du nord Bretagne (Douarnenez, rade de Brest, Lannion, Saint-Brieuc) ou légèrement supérieures (baie du Mont-Saint-Michel).

Les eaux les plus froides (15 à 16 °C) intéressent la Bretagne occidentale (taches fraîches des secteurs de Sein à Ouessant) et tout le littoral nord Bretagne, excepté les fonds inférieurs à 20 m précédemment cités.

On retrouve sur cette image une configuration des isothermes caractéristique de l'été et des valeurs en température du même niveau que celles de l'image du 10/07/1987.

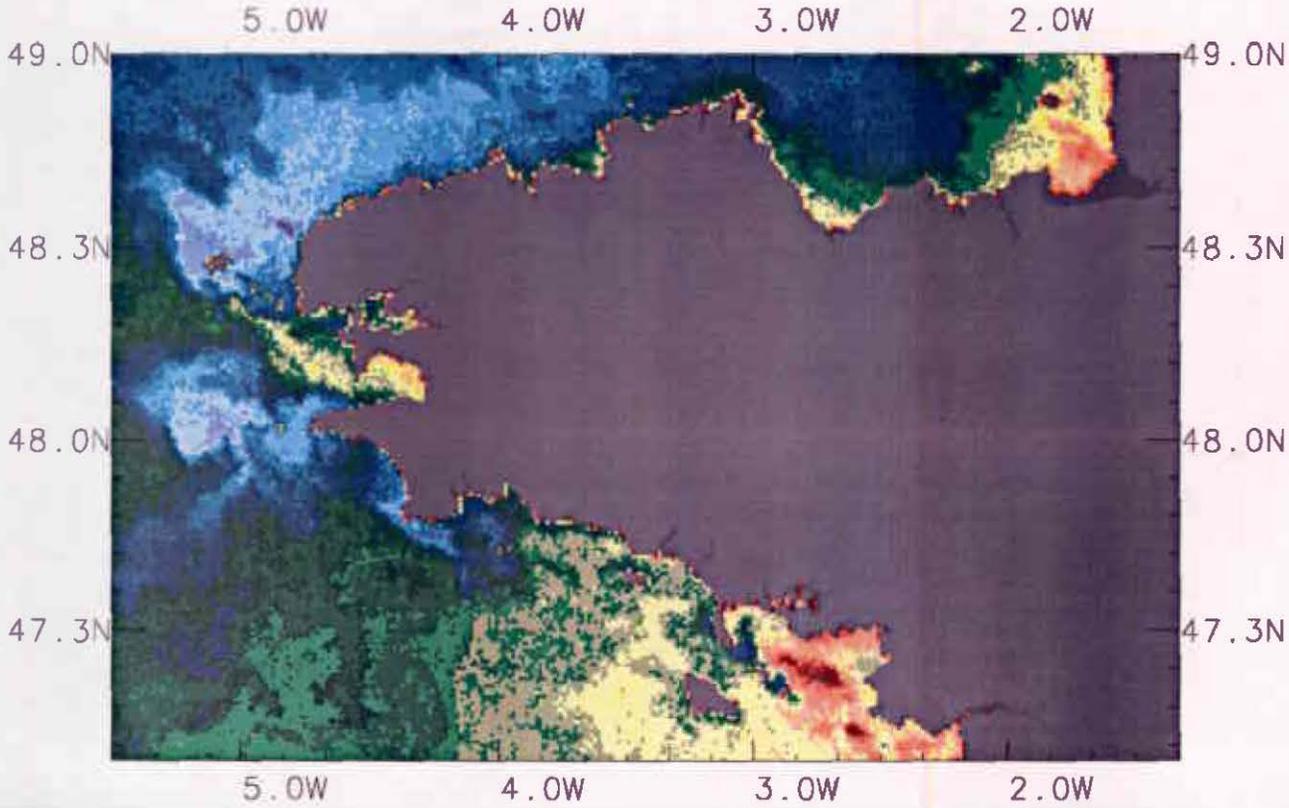
Ces deux images ont en commun une situation de marée quasi-identique (début de revif, même coefficient, heure marée très proche). La situation météorologique par contre est très différente : vents assez forts de SW les jours précédents la prise de vue du 10/07/1991, vents faibles de NW à NNW pour celle du 10/07/1987.

Faute d'images antérieures suffisamment claires, on ne peut évaluer l'influence du vent le 10/07/1991. On peut suspecter toutefois, un effet sur les structures du littoral nord-occidental. Plus homothermes que celles du 10/07/1987.

temperature tiros du 28 juillet 1991

Logiciel Pesket

temperatures c



NOAA 11

14 h 01 TU

28-07-1991

Conditions au moment de la prise de vue	Coef. Marée	Heure marée Brest	METEOROLOGIE*					
			Vent à Bréhat		Vent à Ouessant		Vent à Belle Ile	
			Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s	Direction	Vitesse m/s
	80	PM + 2 h 45	WNW	7	WNW	6	WNW	5

* Moyenne des trois jours précédents.

Les températures de surface le 28/7/1991 sont sensiblement les mêmes que celles du 10/07/1991 sur l'ensemble des côtes bretonnes.

On remarquera toutefois quelques différences :

- des fronts thermiques plus marqués en Bretagne Occidentale (gradients de + 4 à + 5 °C),
- des refroidissements locaux accentués autour de Ouessant et dans le secteur de Sein (- 0,5 à - 1 °C), ou décelés à la pointe de Penmarc'h (- 2,5 °C),
- une déstabilisation des taches chaudes dans le secteur de Quiberon à la Loire avec apparition d'eaux plus froides de Quiberon à Hoedic et entre l'île Dumet et la côte (- 2 °C),
- un réchauffement des eaux de la baie du Mont et des fonds avoisinants (+ 2 °C).

L'évolution de certaines de ces structures est liée à l'intensité des courants de marée due à la situation de marée présente : coefficient de vive eau moyenne (fin de revif) et heure marée (BM + 3).

L'augmentation de la vitesse des courants induit une plus forte turbulence et accroît le mélange avec les eaux de fond. Tant que les eaux de fond ne sont pas réchauffées, ce processus peut être détecté en surface sur des thermographies, les zones les plus brassées apparaissant plus froides (Jegou, Salomon, 1991).

Ainsi, le 28/7/1991, en Bretagne Occidentale, l'intensification des courants de marée produit un renforcement du processus de mélange autour des îles d'Ouessant et de Sein et une baisse des températures de surface.

Dans le secteur Quiberon à la Loire, elle est responsable d'une destratification locale des eaux (chaussée des îles). On trouvera une bonne correspondance entre ces refroidissements locaux et l'énergie dissipée par les courants de marée calculés par des modèles pour les zones concernées (Le Cann, 1982 ; Mariette, 1983 ; Lazure, Salomon, 1988).

La destratification autour de la pointe de Penmarc'h ne peut être interprétée pour le moment, faute d'informations disponibles. L'effet du vent n'est pas à écarter (vents assez forts d'W à WNW les 24 et 25).

IV - BILAN GENERAL

IV.1. Evolution thermique et processus hydrodynamiques

L'information fournie par les thermographies est double : on dispose d'une part d'une information sur l'évolution saisonnière de la température superficielle et d'autre part de renseignements sur la répartition spatiale et temporelle des structures thermiques.

Cette dernière information est importante car elle peut fournir des indications sur le comportement des masses d'eaux en fonction du bilan thermique à l'interface air-mer, des conditions hydrodynamiques (marée, advection, dispersion) et météorologiques (effet du vent) quand les images peuvent être comparées à des résultats de modèles mathématiques.

On a déjà démontré pour une application concernant la Manche (Jegou, Salomon, 1991) que modèle mathématique et thermographies infrarouge procuraient des descriptions synoptiques dont la comparaison permettait à la fois de progresser dans l'interprétation des données satellitales et de valider certaines paramètres physiques décrits de manière théorique par le modèle (advection à long terme, mélange par les courants instantanés).

Sur nos côtes, selon la saison, la signature thermique peut révéler des processus hydrodynamiques différents :

- En hiver, le bilan énergétique étant très faible et la température de l'eau quasiment homogène partout sur la verticale, la mémoire thermique des masses d'eau est plus longue. La température superficielle peut alors être assimilée à un traceur conservatif et témoigner de mouvements advectifs de longue période que peut décrire correctement un modèle de circulation.

- En période estivale les structures thermiques présentent des discontinuités importantes en température qui peuvent traduire l'intensité des courants instantanés. A cette époque de l'année, le réchauffement de la couche superficielle crée une stratification thermique verticale des masses d'eaux avec parfois développement d'une thermocline. Cette stratification ne peut s'établir dans les zones à forts courants de marée qui maintiennent une homogénéisation permanente de toute la colonne d'eau. Ce brassage des eaux retarde le réchauffement superficiel alors que les eaux stratifiées atteignent rapidement des températures élevées.

Dans le cadre de cette étude, on a pu confronter les thermographies aux résultats des modèles mathématiques développés par l'IFREMER pour le Nord Bretagne (Garreau, 1993) et pour le secteur Quiberon à Noirmoutier (Lazure, Salomon, 1988).

Un modèle du plateau Atlantique est actuellement en cours dans le cadre d'un Programme National d'Océanographie Côtière.

Lorsque ce modèle pourra préciser les mécanismes dynamiques et hydrologiques du secteur Sud-Bretagne, les images seront à reconsidérer pour affiner l'interprétation.

IV.1.1. Mise en évidence de la circulation résiduelle

- En hiver le littoral Nord-Bretagne est en général divisé en 2 régions thermiques caractérisées par des eaux froides à l'est, correspondant globalement aux zones de faibles profondeurs du golfe normano-breton et des eaux plus chaudes à l'ouest.

Une frontière thermique plus ou moins marquée selon les années et selon les situations météorologiques séparent les deux régions à l'est de la baie de Lannion. L'écart thermique peut atteindre 2 à 3 °C. Lors d'hivers froids on peut identifier dans le golfe normano-breton, une troisième région de température encore plus basse.

La configuration de ces structures n'est pas directement liée à celle des isobathes. La comparaison des images hivernales avec les trajectoires à long terme calculées par le modèle nord-Bretagne (figure 3) montre une bonne correspondance entre les différentes régions thermiques identifiées en hiver et les mouvements tourbillonnaires à grande échelle qui caractérisent la circulation des masses d'eaux côtières sur ce littoral. Les eaux froides continentales sont confinées dans ces structures tourbillonnaires et ont peu d'échanges avec les masses d'eaux voisines.

L'image du 12/03/1987 restitue le mieux la position des trois tourbillons décrits par le modèle pour des conditions de vent nul : isothermes de température plus élevée marquant jusqu'au Sept Îles l'eau océanique, masse d'eau très froide occupant le fond du golfe normano-breton et masse d'eau de température intermédiaire dont le parcours d'est en ouest en baie de Saint-Brieuc peut être déduit de la densité en pixels froids au fond de la baie et le long de la côte ouest.

Deux signatures thermiques de la circulation résiduelle peuvent être détectées à d'autres saisons :

- . celle de la frontière thermique à l'est de la baie de Lannion. Elle n'est plus visible durant le mois de mai, les eaux étant globalement homogènes à cette époque de l'année sur le littoral nord-Bretagne. On peut à nouveau l'identifier en période estivale quand s'est produit l'inversion thermique ouest-est. A l'inverse de l'hiver, les eaux sont plus froides à l'ouest et plus chaudes à l'est dans le golfe normano-breton. L'advection des eaux froides se fait selon un parcours identique aux eaux chaudes, en hiver, mais sa signature thermique n'est pas aussi nette en raison d'un effet combiné avec le mélange par les courants de marée identifiable en été.

- . celle des eaux descendant vers le sud entre les Roches Douvres et les îles Chausey. La structure se révèle par vive eau sous forme d'une langue chaude en hiver (11 février 1989) et froide en été (25 juillet 1990). Elle a une température équivalente aux eaux du centre de la Manche dont elle est issue (cf. courants résiduels en Manche : Salomon, Breton, 1991). Elle correspond à l'effet combiné de l'advection et du mélange par dispersion.

Ces structures confirment le caractère permanent de la circulation résiduelle de marée sur le littoral nord-Bretagne.

- En Bretagne sud la connaissance de la circulation résiduelle est encore sommaire. La situation est plus complexe qu'en Manche car le vent et les courants de densité engendrés par les apports dessalés (Loire, Vilaine) peuvent avoir une influence supérieure à celle de la marée.

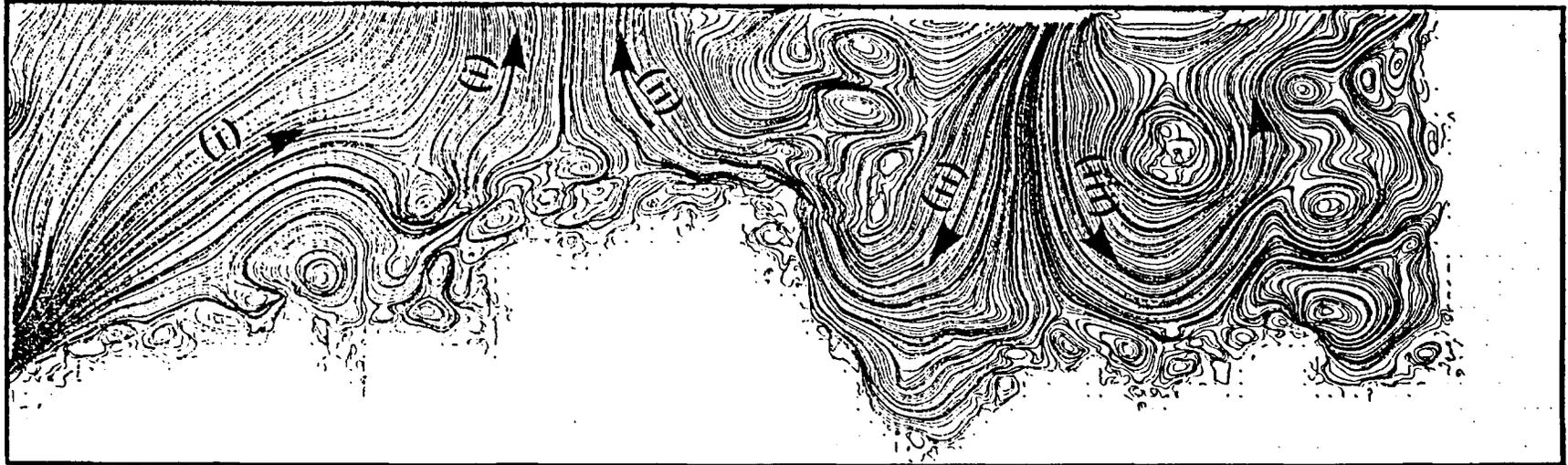


Figure 3 : Trajectoires moyennes à long terme (sans vent) calculées par le modèle Nord-Bretagne (Garreau, 1993).

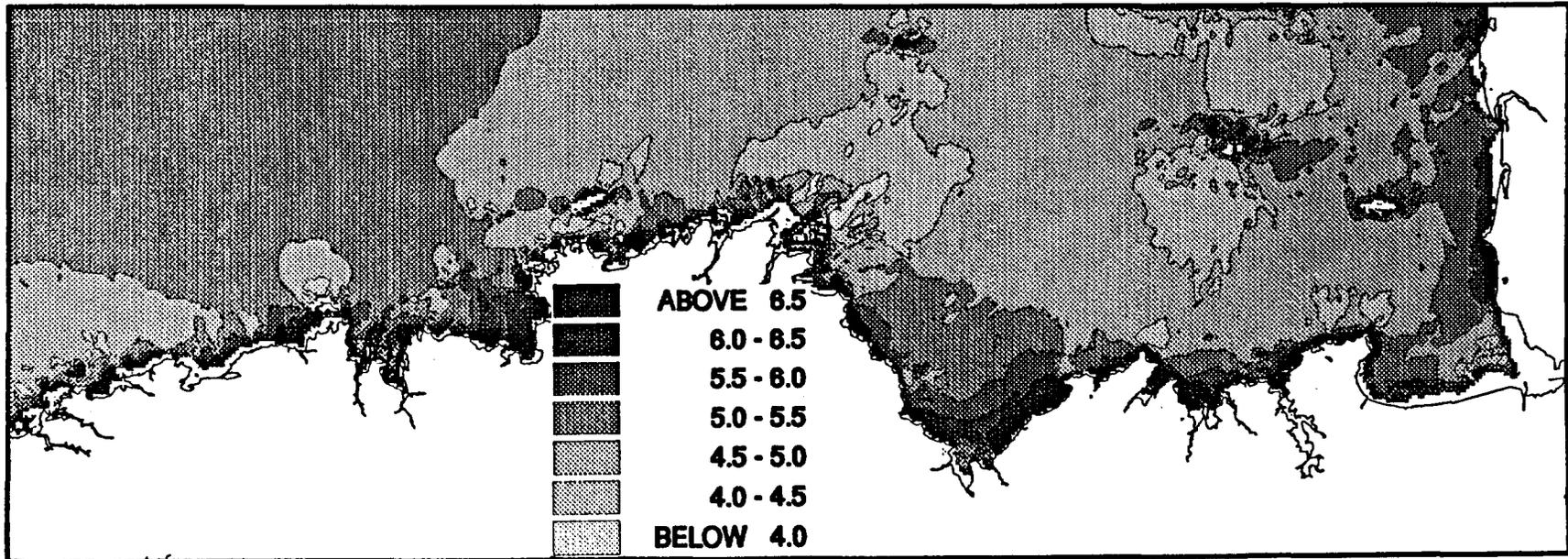


Figure 4 : Indice de stratification ($\log_{10} \left(\overline{cd|U_3|H^1} \right)$) d'après P. Garreau (1993).
Stratification possible $V < -5,5$.

Les schémas de circulation déduits d'observations *in situ* semblent montrer des variations saisonnières liés aux vents dominants.

Les thermographies hivernales montrent la présence régulière d'une bande froide parallèle à la côte et aux isobathes. Cette bande présente une extension et des contours qui semblent varier en fonction des conditions climatologiques (renforcement lors d'hivers froids) et météorologiques (action du vent) voire hydrologiques (étendue réduite par faibles débits, 1989 et 1990).

L'influence de la Loire jusqu'en mer d'Iroise est une hypothèse qui a été avancée par différents auteurs (Morin, 1984 ; Birrien, 1984) à la suite de campagnes de mesures sur le plateau armoricain et en baie de Douarnenez au cours desquelles des tâches d'eaux dessalées ont pu être repérées.

Des mesures contemporaines de l'image du 12/03/1987 existent pour le secteur Belle-Ile-Noirmoutier (Le Cann 1988). Elles ont permis de mettre en évidence une dérive résiduelle orientée vers le nord-nord-ouest parallèlement aux isobathes, affectée facilement par le vent sur des périodes de quelques jours.

IV.1.2. Mise en évidence de l'intensité du mélange par les courants instantanés

En biologie la notion de stratification thermique est importante car elle joue un rôle dans la stabilité verticale des masses d'eaux et conditionne le développement de certaines espèces phytoplanctoniques.

En période de réchauffement, la nature du profil vertical (milieu homogène à stratifié) va dépendre des actions antagonistes du flux de chaleur reçu à la surface de la mer et de l'intensité de la turbulence engendré par les courants instantanés près du fond.

Pour quantifier la stratification les modèles utilisent un paramètre basé sur l'énergie dissipée par la marée. C'est cette énergie qui est la source de la turbulence et qui provoque l'intensité plus ou moins grande du mélange des masses d'eaux par les courants de marée.

Ce paramètre permet de localiser les zones où une thermocline estivale peut être attendue ainsi que les fronts thermiques (frontière entre zones stratifiées et homogènes).

Plusieurs auteurs ont appliqué pour différentes zones d'étude cet indice de stratification en utilisant des grilles de travail et des modes de calcul différents : Garreau (1993) pour la Bretagne nord, Le Cann (1982) pour le plateau continental sud-Bretagne, Mariette-Le Cann (1984) pour les fronts thermiques en Iroise, Lazure-Salomon (1988) pour la zone Loire-Vilaine.

Les résultats donnent des isovaleurs calculées (fig. 4 et 5) ou une classification de zones côtières en fonction de leur degré de mélange par les courants de marée (fig. 6).

On peut constater que les zones où le mélange vertical par les courants de marée est le plus intense sont : l'ensemble du littoral nord-Bretagne (excepté les baies de Saint-Brieuc et de Lannion), les secteurs autour de l'île d'Ouessant et le l'île de Sein et en Bretagne sud la chaussée des îles, de Quiberon à Hoedic.

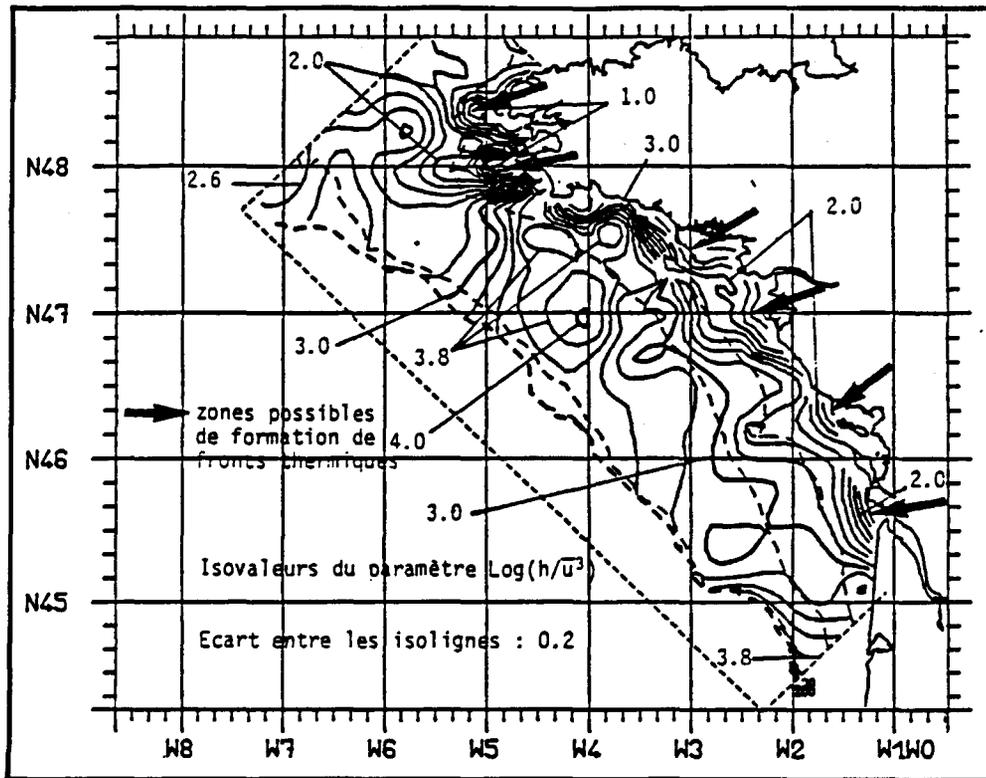


Figure 5 : Isovaleurs du paramètre de Simpson $\log(h/\overline{U_s^3})$ d'après B. Le Cann (1982). Stratification possible $V > 1,6$.

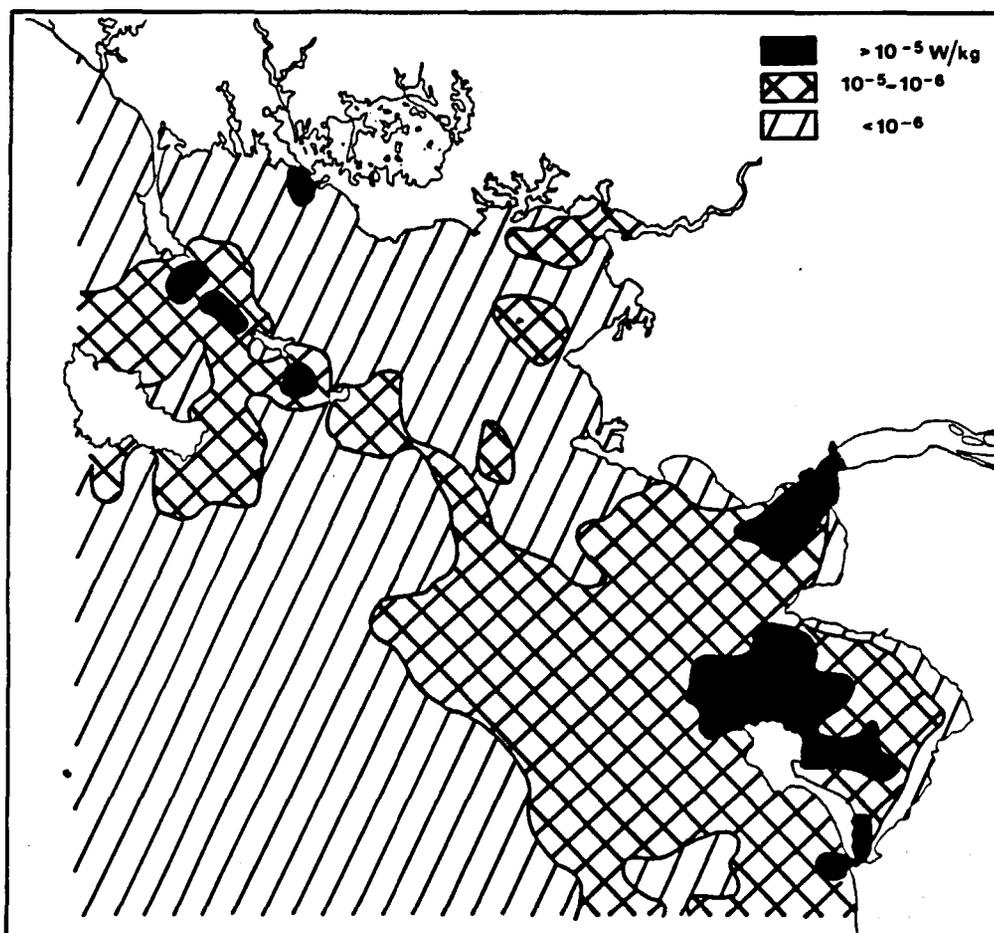


Figure 6 : Puissance dissipée par les courants de marée (w/kg) d'après Salomon-Lazure (1988). Secteur Quiberon Noirmoutier. Stratification possible $\rho < 10^{-5}$ w/kg.

Les calculs de Le Cann (1982) mettent en évidence de fortes valeurs du paramètre de stratification sur tout le littoral sud-Bretagne et définit une zone de stratification maximale possible entre Penmarc'h et Belle-île. Ces calculs ne sont pas assez détaillés pour appréhender correctement la zone côtière mais ils permettent de caractériser à grande échelle les potentialités de stratification des eaux dans le sud-Bretagne.

Les thermographies de mai à juillet montrent que le réchauffement des eaux en surface est plus rapide sur le littoral de Bretagne sud que celui de Bretagne nord, où les eaux restent globalement plus froides plus longtemps (excepté dans certaines baies).

La comparaison entre les images sélectionnées à cette époque de l'année et les résultats des modèles précités peuvent montrer une bonne corrélation, fournissant même une cartographie de l'intensité des courants instantanés en Bretagne nord. C'est le cas des thermographies du 10 juillet 1987 et du 16 juin 1989 où les conditions sont optimales pour repérer l'effet de la marée (vent faible, début de revif).

On peut constater que les eaux les plus brassées sont plus froides par mélange avec les eaux de fond encore froides. Elles se situent à l'ouest (autour de Sein et Ouessant) et sur la côte nord-Bretagne.

Les températures les plus élevées correspondent à des masses d'eaux stratifiées (sud-Bretagne, eaux côtières à l'ouest de la presqu'île de Crozon et baie de Douarnenez (si l'on se réfère aux travaux réalisés sur le front interne de l'Iroise) ou à des zones homogènes de faible bathymétrie (baie du Mont-Saint-Michel) ou de faible courantologie (baie de Saint-Brieuc, baie de Lannion).

On peut noter dans le sud-Bretagne des taches plus froides entre Quiberon et Hoedic ainsi qu'à l'entrée de la Loire correspondant aux zones de forte turbulence prédites par le modèle du secteur Quiberon-Noirmoutier.

Le développement de taches très chaudes en Bretagne sud dont l'emplacement diffère sur les deux images est un effet de surchauffe diurne de la couche superficielle qui se produit fréquemment par condition de vent faible et de mer calme dans des zones stratifiées.

IV.1.3. L'effet du vent

En période de réchauffement l'influence du vent sur l'évolution des structures thermiques se traduit par un effet de transport et par la turbulence induite par le frottement du vent en surface. Cette turbulence tend à homogénéiser les eaux superficielles quand elles sont stratifiées et même à détruire la thermocline quand son intensité se renforce lors d'un coup de vent.

En l'absence de séries temporelles suffisantes, il est difficile d'évaluer l'effet du vent sur les structures thermiques. Deux thermographies de la période estivale semblent pouvoir fournir quelques indications sur ses effets potentiels :

- celle du 12/07/1990 montre un cas de refroidissement de la couche de surface en Bretagne sud accompagné de destratifications locales (taches froides au SW de Penmarch) par condition de vent fort d'ouest à nord-ouest dominant,

- celle du 25/07/1990 met en évidence l'action de transport par le vent par situation de vent d'est à nord-est > 7 m/s sur le nord-Bretagne les trois jours précédents la prise de vue. La position de certaines structures est liée à ces conditions de vent : les eaux les plus chaudes de la baie de Saint-Brieuc sont plaquées sur la côte ouest et l'expulsion de ces eaux chaudes à marée descendante semble être accentuée par le vent, tout comme celles de la baie du Mont-Saint-Michel. Cet effet d'un vent de secteur E à NE a été aussi identifié par des mesures *in situ* en baie de Saint-Brieuc (Le Hay, 1989).

IV.2. Les étapes du réchauffement côtier

Le réchauffement des zones côtières peut s'apprécier à partir des thermographies de l'année 1990 qui représente la série la plus complète. Elles correspondent à une saison exceptionnelle, chaude et très ensoleillée. Les structures thermiques sont bien contrastées. Les températures enregistrées peuvent même être considérées comme des maximales par rapport aux autres années, exception faite de la saison 1989 qui fut, elle aussi particulièrement chaude.

Cette série met en évidence :

- un réchauffement plus rapide des eaux du sud-Bretagne par rapport à celles du nord-Bretagne,

- un réchauffement rapide et plus important de certains secteurs côtiers : secteur Loire-Vilaine-Quiberon, baie du Mont-Saint-Michel, nord de la baie de Douarnenez, sud de la rade de Brest, fond de la baie de Saint-Brieuc,

- un décalage dans le temps du réchauffement de certaines baies : les eaux de la baie de Morlaix et de Lannion se réchauffent plus tard que celles de la baie de Saint-Brieuc, l'est et le sud de la baie de Douarnenez se réchauffent après le secteur nord.

- une plus grande stabilité des structures thermiques en Bretagne nord. En Bretagne ouest l'extension des eaux froides est liée au cycle VE/ME. En Bretagne sud, les températures et les structures sont facilement affectées par le vent,

- des maximas en température dans le secteur Loire-Vilaine-Quiberon pendant la période mai à juillet. La température 17 °C est dépassée fin mai en Bretagne sud, de la pointe du Raz à la Loire, en baie de Douarnenez, en baie de Saint-Brieuc et en baie du Mont-Saint-Michel. Celle de 19 °C est atteinte ou dépassée en juillet dans tous les secteurs précités. Pendant toute la période les températures en baie de Morlaix et de Lannion restent inférieures de 1 à 2 °C par rapport à celles de la baie de Saint-Brieuc.

Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, la différence de comportement thermique des eaux côtières du Nord et du Sud Bretagne est essentiellement lié à l'intensité du mélange vertical des masses d'eaux par les courants de marée.

L'inertie thermique des eaux de la côte nord est due au fort brassage qui retarde le réchauffement et empêche l'établissement d'une stratification thermique durable. Les environs de l'île d'Ouessant et la chaussée de Sein sont les zones les plus soumises à ce mélange par la marée. Sur cette côte nord Bretagne ce sont les zones de faible bathymétrie du golfe normano-breton qui se réchauffent en premier (fonds < 10 m puis fonds < 20 m). Celles qui se réchauffent le plus sont la baie du Mont-Saint-Michel (faible bathymétrie et très forte

amplitude de la marée) et le fond de la baie de Saint-Brieuc (faible bathymétrie et faible courantologie).

En Bretagne sud, les courants de marée sont trop faibles pour bien mélanger les masses d'eau. Le réchauffement superficiel est donc plus important et plus rapide et provoque une stratification thermique des eaux.

A la hauteur de la baie de Douarnenez, le domaine homogène et froid peut montrer une extension minimale (période de mortes eaux, mer calme). Il est alors séparé en deux taches, l'une au nord dans le secteur d'Ouessant, l'autre au sud autour de l'île de Sein. La zone intermédiaire peut se stratifier.

Pour évaluer la reproductibilité de l'évolution décrite pour l'année 1990, on peut comparer les images entre-elles, mais l'interprétation n'est pas toujours facile car les thermographies montrent une variabilité des températures d'une année à l'autre et des variations des structures en fonction des conditions de marée et de vent. De plus certaines années, on ne dispose que d'un jeu restreint d'images.

Pour s'affranchir de ces difficultés nous avons réalisé, sous forme cartographique, une synthèse interannuelle des étapes du réchauffement des eaux superficielles.

Nous avons calculé à une échelle plus grossière pour chaque année et pour chaque image, les écarts thermiques avec les situations hivernales de référence puis la moyenne interannuelle de ces écarts.

Comme il était impossible d'évaluer par voie informatique les pixels douteux en zone côtière, on a opté pour un calcul manuel à partir d'une grille dont la maille d'observation est de l'ordre de 12 km x 12 km.

On a pu ainsi établir 3 cartes de synthèse en fonction des périodes où il y avait le plus d'images disponibles : début mai, fin mai, mi juillet (fig. 7, 8 et 9).

Ces cartes fournissent un schéma global de l'évolution du réchauffement des eaux côtières. Les eaux qui se réchauffent peu sont en bleu, les eaux qui se réchauffent le plus en jaune, rouge et marron.

Début mai, les zones qui se réchauffent en priorité sont la zone Loire-Vilaine-Quiberon, le nord de la baie de Douarnenez, la baie du Mont-Saint-Michel, le fond de la baie de Saint-Brieuc (au sud d'une ligne Binic-Erquy) et le sud de la rade de Brest.

Fin mai, le réchauffement s'amplifie sur la côte sud Bretagne jusqu'à la pointe de Penmarch et sur l'ensemble de la baie de Douarnenez. Il s'intensifie en baie de Saint-Brieuc ainsi que dans le golfe Normano-Breton à l'est du Cap Fréhel.

La baie de Morlaix et de Lannion commencent à se différencier des eaux côtières adjacentes par une augmentation significative de leurs températures.

Mi-juillet, on retrouve les caractéristiques typiques d'une situation estivale : côte nord-ouest de la Bretagne moins réchauffée que le secteur du golfe normano-breton, réchauffement important des secteurs précités ainsi que de la zone côtière externe de la baie de Douarnenez (établissement du front interne de l'Iroise).

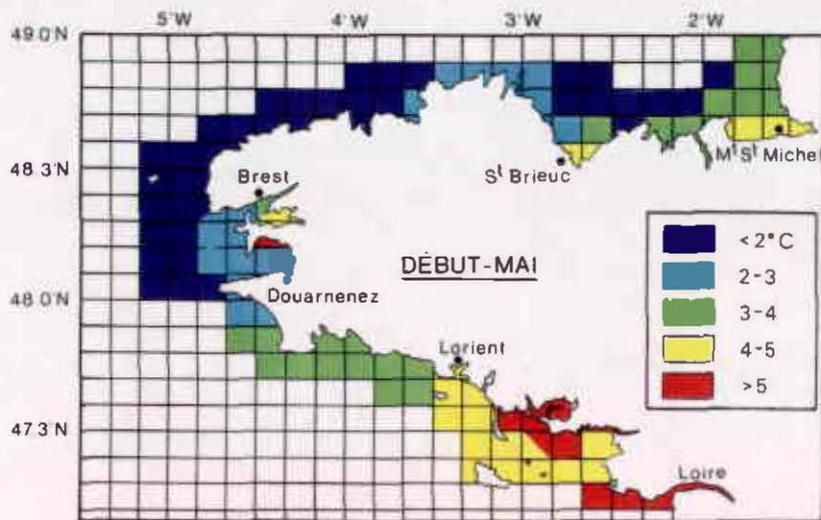


Figure 7 : Réchauffement des zones côtières au printemps. Moyenne des écarts thermiques observés (hiver-début mai). Années 1986, 1989, 1990.

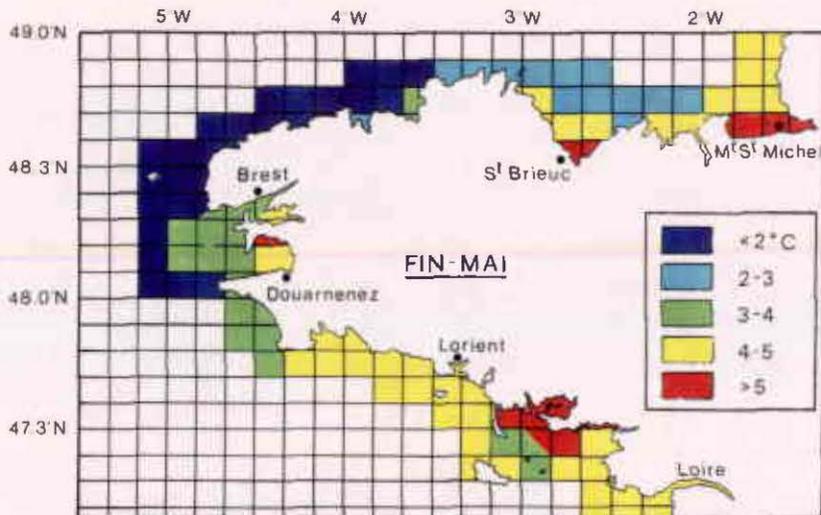


Figure 8 : Réchauffement des zones côtières au printemps. Moyenne des écarts thermiques observés (hiver-fin mai). Années 1990, 1991.

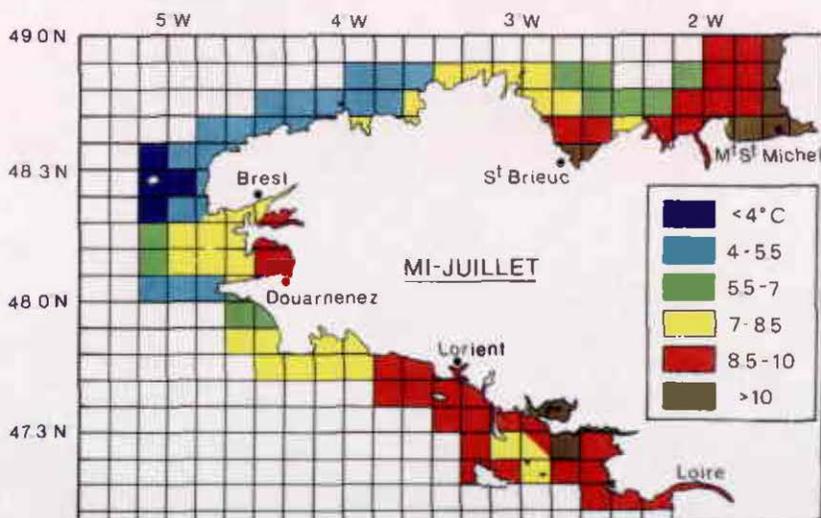


Figure 9 : Réchauffement des zones côtières au début de l'été. Moyenne des écarts thermiques observés (hiver-mi-juillet). Années 1987, 1990, 1991.

Ces cartes montrent que le scénario reste identique d'une année à l'autre. Les variations annuelles vont être liées aux conditions d'ensoleillement qui vont permettre un réchauffement précoce ou tardif des zones repérées et aux conditions météorologiques (action du vent) qui pourront perturber plus ou moins la stabilité de la stratification des eaux côtières à l'ouest et dans le sud de la Bretagne.

Elles confirment qu'en baie de Morlaix et de Lannion, les eaux se réchauffent plus tard qu'en baie de Saint-Brieuc. Ce comportement peut être corroboré par d'autres types d'observations. Ainsi le démarrage des poussées d'ulves (Piriou, communication personnelle) et de phytoplancton (Riou, 1989) au printemps se produit plus tard en baie de Lannion qu'en baie de Saint-Brieuc (décalage d'une quinzaine de jours en moyenne). De même, les statistiques de température établies par Riou (1989) pour une période de 26 ans (1962-1987) montre que la baie de Saint-Brieuc est la zone la plus chaude de la bande côtière Roscoff-Cap-Fréhel. L'examen des fréquences de dépassement de la température 17 °C (cf. chapitre 1) met en évidence le faible réchauffement de la baie de Lannion par rapport à celle de Saint-Brieuc et même de la baie de Morlaix.

Ce déphasage temporel pourrait s'expliquer selon deux hypothèses qu'il serait bon de vérifier par des mesures *in situ* :

- . au niveau local, la différence d'orientation des deux baies peut rendre la baie de Lannion plus sensible aux effets de mélange par la houle.,

- . au niveau régional, les deux baies ne sont pas soumises aux mêmes masses d'eau (Garreau, 1993). La masse d'eau qui baigne la baie de Lannion a une inertie thermique importante par rapport à la masse d'eau plus continentale qui intéresse la baie de Saint-Brieuc.

CONCLUSION

La télédétection se révèle particulièrement adaptée à l'étude des températures de surface de la mer à l'échelle régionale. Néanmoins, la résolution au sol des satellites NOAA ne permet pas d'observations très détaillées du littoral breton.

Cette étude a permis d'appréhender l'évolution saisonnière des structures superficielles à partir d'observations instantanées et de mettre en évidence les zones côtières où se produit une élévation importante de la température au printemps :

- . Littoral sud-Bretagne (en particulier secteur Loire-Vilaine-Quiberon, baie du Mont-Saint-Michel, baie de Saint-Brieuc, baie de Douarnenez, Rade de Brest).

- . Secondairement, avec un décalage dans le temps : baie de Lannion et baie de Morlaix.

De mai à juillet, toute la côte sud Bretagne, la baie du Mont Saint-Michel, la baie de Saint-Brieuc, la baie de Douarnenez et la rade de Brest enregistrent les températures les plus élevées. Le maximum durant cette période étant toujours atteint dans le secteur Loire-Vilaine.

Ce sont en général des zones de faible profondeur et/ou de courants faibles.

Si l'on considère le seul paramètre température, ces sites côtiers correspondent à des zones à risque vis-à-vis des proliférations excessives d'algues mais d'autres facteurs interviennent simultanément dans le déclenchement effectif des proliférations : hydrodynamisme, apports nutritifs, dessalures, etc.

La confrontation des images satellites avec le modèle numérique Nord Bretagne a mis en évidence les relations entre les structures thermiques et certains paramètres hydrodynamiques sur les côtes nord de la Bretagne. Elle a permis de mieux interpréter les images et de valider certains aspects de la circulation résiduelle de marée et les résultats concernant l'intensité des courants instantanés.

Pendant la période de réchauffement, le signal thermique en surface est fortement marqué par l'action de mélange du aux courants et au vent. En Bretagne nord, ainsi qu'en Bretagne ouest, comme nous l'ont montré d'autres résultats de modèles, l'intensité du mélange vertical des masses d'eaux par les courants de marée est prédominante et plus forte qu'en Bretagne sud. Ce brassage des eaux retarde le réchauffement superficiel et empêche la formation ou la persistance d'une stratification thermique verticale et par conséquent d'un développement important du phytoplancton.

En effet, le degré de stabilité des masses d'eaux semble conditionner le développement de certaines espèces phytoplanctoniques. En Bretagne, la fréquence des eaux colorées est manifestement plus grande sur la côte sud, en particulier en baie de Vilaine et au nord de la Loire (Belin, 1989). Par contre les marées vertes sont plus fréquentes sur les côtes nord et ouest de Bretagne, dans des secteurs très côtiers, plutôt restreints, soumis à des conditions hydrodynamiques spécifiques.

Les eaux de Bretagne sud sont typiquement des eaux qui se réchauffent précocement au printemps et qui peuvent stratifier facilement. Ce sont des eaux a priori plus stables verticalement et globalement plus favorables au développement du phytoplancton.

BIBLIOGRAPHIE

AGOUMI A., 1982.

Modélisation du régime thermique de la Manche. Thèse de docteur ingénieur. Ecole Nationale des Ponts et Chaussée. Paris. 127 p, 8 annexes.

ALTAZIN-PICHON A., 1981.

Application d'un modèle de thermocline à la formation du front thermique en mer d'Iroise. Confrontation des résultats avec des mesures *in situ*. Thèse 3e cycle UBO - 140 p.

AMINOT A., 1977.

Interprétation des résultats R.N.O. concernant le site de Brest. I - Paramètres physico-chimiques et hydrobiologiques. Rapport CNEXO/COB/05.Chimie 15 p.

ANTOINE J.Y., DERRIEN M., GAILLARD O., LE BORGNE P., LE GOAS C., MARSOUIN A., 1991.

Operational restitution of small scale SST from AVHRR data over the NE Atlantic and the Mediterranean Sea, 5th AVHRR data user's meeting. Tromsø, Norway, EUMETSAT EUM P. 09, 301-306.

BELIN C., BERTHOME J.P., LASSUS P., 1989.

Dinoflagelles toxiques et phénomènes d'eaux colorées sur les côtes françaises : évolution et tendances entre 1975 et 1988. Hydroecol. Appl., 1/2 : 3-17.

BIRRIEN J.L., LE CORRE P., VIDEAU C., 1985.

Développement de *Gyrodinium aureolum* HULBURT, en baie de Douarnenez et en Mer d'Iroise pendant l'été 1983. Coll. fr. Japon. Océanogr., Marseille, 16-21 sept. 85, 2, 51-64.

BIRRIEN J.L., 1987.

Cycles de variations des éléments nutritifs et du phytoplancton en baie de Douarnenez et dans les secteurs adjacents : importance du front côtier de l'Iroise. Thèse de l'Université de Bretagne Occidentale, Brest, 160 p.

BLANCHARD M., JEGOU A.M., 1987.

Recueil des données hydrologiques (T°, Salinité, O₂ dissous) pour le littoral Manche Atlantique.

CASSANET, 1981.

Etude par télédétection des températures et turbidités des eaux au large de la Loire Atlantique. EPHE (Montrouge), rapport n° 21, 200 p.

CASTAGNE N., LE BORGNE P., LE VOURCH J., ORLY J.P., 1986.

Operational measurement of sea surface temperatures at CMS Lannion from NOAA-7 AVHRR data. Int. J. Remote Sensing, Vol. 7, n° 8, 953-984.

CHAMPAGNE-PHILIPPE M, 1983.

Validation d'un algorithme de correction de SST et restitution de champs sur l'Atlantique NE, La Météorologie, VIe série, n° 33.

CLEMENT J.C., 1987.

Impact des conditions hydrologiques et nutritionnelles sur l'évolution de la production primaire en Baie de Vilaine. Synthèse des données acquises sur la période 1982-1985. Cahier du Mor-Bras, 242 p.

CNEXO-COB, 1981.

Etude écologique d'avant-projet du site marémoteur du Golfe Normano-Breton. Rapport final 1ère année (1980). Juin 1981. 183 p.

CNEXO-Département Environnement Littoral, 1983.

Etude écologique d'avant projet du site marémoteur du Golfe Normano-Breton (2ème année 1980-1981). Contrat CNEXO/EDF n° 80/2233.

DE NADAILLAC G., BRETON M., 1985.

Les courants en baie de Vilaine. Présentation et interprétation des données. Rapport IFREMER DERO/85-08 EL, 73 p.

DELMAS R., 1981.

Etude de l'évolution saisonnière des sels nutritifs dans la rade de Brest, en fonction des apports fluviaux et des échanges avec l'Iroise. Thèse 3e cycle UBO, 163 p.

DESCHAMPS P.Y., PHULPIN T., 1980.

Atmospheric correction of infrared measurements of sea surface temperature using channels at 3.7, 11 and 12 μ . Boundary layer Meteorology, 18, 131-143.

ERARD E., ARZUL G., GENTEN P., LEFEVRE-LE HOERFF G., QUINIQU F., QUINTIN J.Y., VERCELLI C., 1986.

Golfe Normano-Breton. Etude Régionale intégrée. 2. Milieu pélagique. Rapport IFREMER DERO-86.27 EL, 143 p.

GARREAU P., 1993.

Conditions hydrodynamiques sur la côte nord-Bretagne. Programme d'étude : cartographie des zones sensibles à l'eutrophisation. Rapport IFREMER DEL/93.02. 20 p. + annexes.

GARZOLI S.L., 1979.

Contribution à l'étude de la formation et de l'évolution du front thermique sur le plateau continental breton. Ann. Hydro. 5e série, Vol. 7, Fasc. 2 : 5-25.

GOSSE Ph., RIOU J., 1990.

Statistiques de température de la Manche le long des côtes nord Bretagne et ouest Normandie : années 1962 à 1987. Hydroécol. Appl., 1/2 : 21-36.

- GRALL J.R., CORRE P., LE FEVRE J., MARTY Y., TOURNIER B., 1981.
Caractéristiques estivales de la couche d'eau superficielle dans la zone de fronts thermiques Ouest-Bretagne. *Oceanis*, vol. 6, Fasc. 2, 235-249.
- HENAFF G., 1973.
Contribution à l'étude de l'océanographie physique du secteur Nord Gascogne. Thèse de Doctorat de Spécialité (Océanographie Physique), Université de Bretagne Occidentale, Brest, 138 p.
- HOLLIGAN P.M., 1979.
Dinoflagellate blooms associated with tidal fronts around the British Isles. In "Toxic dinoflagellate blooms", (TAYLOR, D.C. & SELIGER H.H. eds), Elsevier, New-York & Amsterdam, pp. 249-25.
- IFREMER DERO/MR/EL, 1987.
Efflorescences phytoplanctoniques. Bilan des études effectuées en 4 ans. Séminaire Nantes 7-8 Déc. 1987. Rapports DERO-88.07-EL, DERO 88-03-MR.
- INSTITUT SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DES PECHES MARITIMES, 1976.
Température et salinité de l'eau de mer au large de Roscoff au cours des années 1959 à 1979. *Trav. Stat. Biol. Roscoff*, 23, 31-39.
- JEGOU A.M., SALOMON J.C., 1988.
Télé-détection Loire Vilaine. Rapport IFREMER DERO/88-01-EL, 58 p.
- JEGOU A.M., SALOMON J.C., 1991.
Hydrodynamique côtière : couplage imagerie thermique satellitaire - modèles numériques. Application à la Manche. *Oceanologica Acta*, Vol. SP, n° 11 : 55-61.
- KERDREUX M., 1987.
Température, salinité, vent, courantologie des marges du Mor Bras. Présentation des mesures. Rapport IFREMER-DERO 87.08-EL.
- L'YAVANC J., 1984.
Etude hydrologique de l'estuaire de l'Elorn. Rapport IFREMER DERO/EL. 29 p. + annexes.
- LANGLOIS G., 1982.
Etude courantométrique et hydrologique de la région côtière située entre les îles de Belle Ile et de Noirmoutier, 195 p.
- LASSUS P., TRUQUET Ph., LE DEAN L., BARDEUIL M., 1989.
Hydrologie et distribution de Dinophysis en juin 1988, dans la frange côtière Nord-Gascogne. Rapport IFREMER DERO-89.08 MR, 45 p.
- LE FEVRE J., GRALL J.R., 1970.
On the relationship of Noctiluca swarming off the western coast of Brittany with hydrological features and plankton characteristics of the environment. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*, 4, 287-306.

LE MAGUERESSE A., 1974.

La structure thermique sur le plateau continental dans le secteur Ouest-Bretagne, son évolution annuelle et quelques aspects de sa variabilité dans une zone frontale. Thèse de Doctorat de Spécialité (Océanographie Physique), Université de Bretagne Occidentale, Brest, 138 p.

LE CANN B., 1982.

Evolution annuelle de la structure hydrologique du plateau continental au sud de la Bretagne, modélisation numérique. Thèse Docteur-ingénieur UBO, Brest, 242 p.

LE CANN B., 1988.

Ciresol : dépouillement des données de courants, de températures et d'hydrologie - 03/03/1987-24/04/1987. Convention IFREMER/UBO/LPO, 136 p. + annexes.

LEHAY D., 1989.

Etude de l'hydrologie et de l'hydrodynamique de la baie de Saint-Brieuc. Approche du rôle de l'hydrodynamisme sur la coquille Saint-Jacques. Thèse Doct. Univ. Bretagne Occidentale, Brest, 338 p.

LUMBY, 1935.

Salinity and temperature of the English Channel. Fisheries investigations II : 14-67.

MAGGI P., MASTOURI A., TRUQUET I., SOULARD L., CADIOU Y., LE PAUL C., GIBOIRE L., 1986.

Facteur hydroclimatiques et apparitions d'eaux colorées en baie de Vilaine durant l'année 1984. Rapport IFREMER DERO-86.6-MR.

MAGGI P., LASSUS P., TRUQUET I., MASTOURI A., SOULARD L., 1987.

Facteur hydroclimatiques et apparitions d'eaux colorées en baie de Vilaine durant l'année 1985. Rapport IFREMER DERO-87.05-MR.

MAGGI P., LASSUS P., LARRAZABAL M.E., ETIENNE M., PEZERON A., MORNET F., SOULARD L., 1988.

Facteurs hydroclimatiques et apparitions d'eaux colorées en baie de Vilaine durant l'année 1987. Rapport IFREMER/DERO-88.06.MR.

MARIETTE V., 1983.

Effets des échanges atmosphériques sur la structure thermique marine. Application à des zones du large et à une zone côtière. Thèse Université de Bretagne Occidentale, Brest, 282 P.

MARIETTE V., VERBEQUE V., 1985.

AVHRR data processing for utilisation in dynamical oceanography. Proc. 3rd Int. Coll. Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing. Les Arcs, France, 16-20 Dec., 1985 (ESA SP-247), 365-369.

MARIETTE V., LE CANN B., 1985.

Simulation of the formation of the Ushant thermal front. Continent. Shelf Res., 4, 637-660.

- McCLAIN E.P., PICHEL W.G., WALTON C.C., AHMAD Z., SUTTON J., 1983.
Multichannel improvements to satellite-derived global sea surface temperatures. *Advances in space research*, 2, 6, pp. 43-47.
- MC MILLIN L.M., CROSSBY D.S., 1984.
Theory and validation of the multiple window sea surface temperature technique. *J. Geophys. Res.*, 89, C3, 3655-3661.
- MERCERON M., SANDRIN X., 1980.
Hydrologie sommaire du littoral breton en vue du choix de sites salmonicoles, CNEXO/COB, Brest, 188 p.
- MERCERON M., GAFFET J.D., 1991.
Température et salinité dans l'Aber Benoît et l'Aber Wrach. Été 1991. Rapport de mesures IFREMER Rapport DEL 91-23.
- METEOROLOGIE NATIONALE, Centre de Météorologie Marine.
Cartes decadaires de la température de surface de la mer : cartes SST-GASC METMAR 1986-1988.
- METEOROLOGIE NATIONALE, Service Central d'Exploitation de la Météorologie.
Température de surface de la mer et temps sur terre : moyennes mensuelles - METMAR 1989-1991.
- MONBET Y., BASSOULLET P., 1989.
Bilan des connaissances océanographiques en rade de Brest. IFREMER technical report, DRO/EL 89-23, 106 p.
- MORIN P., 1984.
Evolution des éléments nutritifs dans les systèmes frontaux de l'Iroise : assimilation et régénération ; relation avec les structures hydrologiques et les cycles de développement du phytoplancton. Thèse de Doctorat de Spécialité (Chimie Marine), Université de Bretagne Occidentale, Brest, 220 p.
- ORBI A., 1986.
Circulation de marée dans le Golfe Normand-Breton. Thèse Doct. Université de Bretagne Occidentale. Brest, 220 p.
- PINGREE R.D., 1975.
The advance and retreat of the thermocline on the continental shelf. *Journal of Marine Biology Association, U.K.*, 55, 965-974.
- PINGREE R.D., GRIFFITHS D.K., 1978.
Tidal fronts on the shelf seas around the British Isles. *J. Geophys. Res.*, 83, 4615-4622.
- PIRIOU J.Y., MENESGUEN A., SALOMON J.C., 1989.
Les marées vertes à ulves : conditions nécessaires, évolution et comparaison des sites. Symposium ESCA 19, Caen, Sept. 1989 "milieux estuariens et littoraux".

QUEGUINER B., TREGUER P., 1984.

Studies on the phytoplankton in the bay of Brest (western Europe). Seasonal variations in composition, biomass and production in relation to hydrological and chemical features. *Bot. Mar.* (27), 449-460.

RAILLARD J., 1976.

Quelques aspects de la structure thermique sur le plateau continental breton. *Ann. Hydro.*, 11-30.

RESEAU NATIONAL D'OBSERVATION (RNO), 1981.

Synthèse des travaux de surveillance 1975-1979 du Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin. Publ. Min. Environ. CNEXO, Paris, 358 p.

RIOU J., 1989.

Modélisation du régime thermique sur le littoral Nord Breton. *Hydroecol. Appl.* : 19-31.

RIOU J., 1990.

Modèle d'écosystème phytoplanctonique marin sur le littoral Nord-Breton (Manche occidentale). Thèse Doctorat Inst. Nation. Polytechn. Toulouse, 430 p.

SALOMON J.C., LAZURE P., 1988.

Etude par modèle mathématique de quelques aspects de la circulation marine entre Quiberon et Noirmoutier. Rapport IFREMER/DERO-88.26-EL, 104 p.

SALOMON J.C. et M. BRETON, 1991.

Courants résiduels de marée dans la Manche. In : Actes du Colloque International sur l'environnement des mers épicontinentales, Lille, 20-22 mars 1990. *Oceanologica Acta*, vol. sp. n° 11 : 47-53.

SAUM, 1977.

Rade de Brest. Etude courantologique. Rapport préliminaire. CNEXO/Unité Littoral, 27 p.

SAUM, 1980.

Schéma d'Aptitude et d'Utilisation de la Mer : rade de Brest. CNEXO-DDE, 197 p. + pièces complémentaires.

TRUQUET I., LASSUS P., TRUQUET P., MAGGI P., 1985.

Influence de la température et de la salinité sur les perturbations phytoplanctoniques observées dans le Mor Bras en 1983 et 1984. Rapport IFREMER DERO 85/MR.

VERCELLI C., 1985.

Le golfe Normand-Breton, étude de la température de la surface à l'aide de données satellitaires. Vol. 1 : 49 p., Vol anne., 35 p.

WAFAR M., 1981.

Nutrients, primary production and dissolved and particulate matter in well-mixed temperate coastal waters (Bay of Morlaix, Western English Channel). Thèse de 3ème cycle, Université de Paris VI, 223 p. + Annexes.