

ETUDE DES TRANSPORTS DE MATIERES EN SUSPENSION EN MANCHE PAR EMPLOI DE L'IMAGERIE CZCS.

THOMAS Y.F. *

RESUME. L'interprétation d'une série de seize enregistrements du radiomètre Coastal Zone Color Scanner opérant sur le satellite Nimbus-7 a permis de caractériser la distribution des matières en suspension des eaux de surface de la Manche lors de l'année 1981.

L'interprétation des documents cartographiques obtenus après calibration de l'imagerie en termes de réflexion diffuse de l'océan et calcul des teneurs en matières en suspension par emploi d'algorithmes fondés sur des mesures *in situ* a permis les opérations suivantes :

- observation des remises en suspension de matériel alluvial infratidal sous l'effet conjugué des courants de marée et de la houle;
- caractérisation des zones intertidales fournissant par érosion des matériaux à la dérive littorale;
- détermination des limites d'extension du panache d'eaux turbides de l'estuaire de la Seine en fonction des débits de celle-ci;
- calcul sur une année moyenne de l'ordre de grandeur de la charge solide et modélisation de cette dernière en tout point de la zone d'étude;
- estimation des masses et volumes de matériaux en suspension sur l'ensemble de la Manche et tentative d'obtention d'un bilan;
- enfin, différenciation des comportements hydrologiques des bassins occidental et oriental de la Manche.

1.- INTRODUCTION : LE PACKAGE CZCS.

Le 24 octobre 1978, la NASA a placé le satellite Nimbus-7 sur une orbite héliosynchrone dont le noeud ascendant est au midi local. Une partie de la charge scientifique utile de ce dernier inclut un radiomètre expérimental à six capteurs: le Coastal Zone Color Scanner (CZCS), premier "package" spatial uniquement dévolu à la mesure des propriétés optiques des eaux de surface de l'océan. Son principal objectif est de fournir une estimation quantitative de la nature et de la qualité des matériaux minéraux et organiques en suspension dans les eaux de surface des océans et des zones côtières.

Pour ce faire, le capteur CZCS dispose :

- de quatre bandes spectrales situées dans le visible, centrées sur 443 (bleu), 520 (bleu-vert), 550 (vert-jaune) et 670 (rouge) nanomètres, larges de 20 nanomètres, destinées à l'estimation de la qualité des eaux;
- d'une bande proche infra-rouge centrée sur 750 nanomètres, large de 100 nanomètres, utilisable pour la discrimination des masses continentales, nuageuses et océaniques;
- d'une bande infra-rouge thermique centrée sur 11500 nanomètres, large de 2000 nanomètres, réservée pour l'estimation de la température des eaux de surface.

* Unité de Recherche "Etude des Rivages" associée au C.N.R.S. (U.A. 910), Laboratoire de Géographie de l'Ecole Normale Supérieure, 1, rue Maurice Arnoux, F 92129 MONTROUGE.

Le capteur CZCS a un balayage actif de 78 degrés centré au Nadir et un champ de vue instantané de 0,049 degré, qui produisent à l'altitude nominale de 955 km une résolution au sol de 0,825 km sur une largeur de balayage de 1566 km. Il est muni d'un dispositif qui permet d'incliner le plan de balayage le long de la trace de ± 20 degrés par pas de 2 degrés afin de minimiser l'influence de la réflexion solaire directe (1).

2. METHODE D'ETUDE.

2.1. Détermination des réflectances:

La luminance due à la diffusion atmosphérique et à la réflexion spéculaire par la surface de l'océan est d'un ordre de grandeur supérieur à celui du signal rétrodiffusé par l'océan. Aussi, une procédure d'extraction du signal utile a-t-elle été mise en oeuvre. Elle inclut les phases suivantes :

- conversion des valeurs digitales en luminance avec prise en compte de la perte de sensibilité des capteurs et de la dégradation du système de calibration (2);
- transformation des luminances en réflectances absolues corrigées par la diffusion et de la transmission Rayleigh ainsi que de l'absorption par l'ozone atmosphérique (3);
- correction de la diffusion par les aérosols par utilisation de la réflectance à 670 nanomètres (4) après déduction du résidu de réflectance diffuse par emploi d'une procédure itérative fondée sur l'existence d'une relation entre les réflectances diffuses des eaux, $R(w, i)$, aux longueurs d'onde $i = 550$ et 670 nanomètres (5): $R(w, i = 670) = 1,87.R(w, i' = 550)^{1,89}$.

2.2. Détermination de la charge solide:

Les concentrations en matières en suspension, MES, sont estimées sur la base d'une relation entre la teneur en MES et la réflectance diffuse des eaux, $R(w, i)$, à la longueur d'onde i .

La réflectance diffuse des eaux a été déterminée à 4 des 6 longueurs d'onde du radiomètre CZCS (443, 520, 550 et 670 nanomètres). Au-dessus de la surface, par établissement du rapport entre la luminance ascendante mesurée selon un angle de 45 degrés avec la verticale d'une part et l'éclairement descendant d'autre part. La réduction des effets de perturbation dus à la réflectance de surface sur la luminance ascendante a été minimisée par emploi d'un filtre polarisant, permettant ainsi d'assimiler le signal capté à la seule composante diffuse de la réflexion de la masse d'eau. La mesure de la sensibilité relative des capteurs de luminance et d'éclairement a été réalisée en orientant les deux collecteurs de lumière vers une source lumineuse diffuse et isotrope. La précision attendue d'un tel dispositif est de 5% sur l'ordre de grandeur de la réflectance (6).

Parallèlement, des échantillons d'eau étaient prélevés en surface pour détermination de la teneur en MES associée.

L'étude d'une série de 145 spectres de réflexion diffuse acquis en Manche, dans le golfe normand-breton (7), nous a permis de retenir l'expression ci-après pour relier au mieux la teneur en MES, exprimée en mg.l^{-1} , aux réflectances diffuses, mesurées au-dessus de la surface, à la longueur d'onde de 550 nanomètres (5): $\text{MES} = 96,78.R(w, i = 550)^{1,19}$.

3. RESULTATS.

Une chronique de 16 scènes CZCS, acquises par la station de réception du Department of Electrical Engineering of Electronics de l'Université de Dundee (Grande Bretagne), couvrant la zone géographique $48^{\circ} 30' \text{ N.}$ à 51° N. et 3° W. à 2° E. a fait l'objet d'un traitement préliminaire. 7 images, formant une chronique convenablement répartie dans le temps, ont été retenues.

3.1. Les conditions d'acquisition de l'imagerie:

Les conditions d'acquisition: numéro d'orbite, date, heure T.U., gain, tilt, angle zénithal solaire, angle zénithal de visée, angle de rétrodiffusion et exposant d'angstrom retenu, ainsi que les conditions hydro-climatologiques: coefficient de marée et heure de la pleine mer du Havre, débit de la Seine à la station de jaugeage de Poses (Seine Maritime), pression atmosphérique, vitesse et direction du vent, état de la mer, visibilité et nébulosité observés au sémaphore climatologique du cap de la Hève (Seine Maritime) sont rappelés ci-après (tableaux 1 et 2).

Une cartographie infographique des teneurs en MES des eaux de surface a été réalisée après rectification géométrique de chaque image. Elle met en relief la variabilité temporelle des MES et montre leurs variations spatiales instantanées (fig. 1 à 7).

3.2. La circulation des masses d'eaux:

D'une façon générale, on constate que le positionnement de la zone frontale entre les eaux claires et turbides montre une bonne correspondance avec le schéma courantométrique.

En outre, la distribution des MES révèle - sur certaines images - une structure turbide localisée à l'emplacement d'un tourbillon décelé par modélisation numérique des courants de marée en Manche (8 et 9) ; le "tourbillon de Barfleur". Situé à l'est du Cotentin, ce tourbillon qui se développe dans le sens anticyclonique a un rayon de 40 à 50 km, son centre est placé à environ 25 km de la côte et crée près de Barfleur des courants résiduels extrêmement forts (de l'ordre de 27 cm.s^{-1}). La structure turbide quant à elle s'observe particulièrement bien sur les images du 14 février et du 22 juin 1981 où des turbidités légèrement plus élevées que celles des eaux environnantes contribuent à la mettre en valeur.

Enfin, la répartition des MES sur l'image du 26 mars 1981 souligne remarquablement les différences de comportement de la Manche Ouest d'une part et du bassin oriental de cette dernière d'autre part ; aux eaux claires situées à l'ouest du golfe normand breton font contraste des eaux nettement plus chargées en MES. Les courbes d'isoturbidité épousent dans l'ensemble l'allure des courbes isobathymétriques. On a là un phénomène lié aux variations de possibilité de stratification des eaux (10) ; au fur et à mesure que l'on se dirige vers l'Est, les profondeurs d'eau deviennent plus faibles et les courants de marée plus forts; la production d'énergie cinétique turbulente par frottement des courants sur le fond devient alors importante. En Manche orientale la couche turbulente intéresse l'ensemble de la masse d'eau (11). Cette homogénéisation verticale des eaux ramène en surface des particules tant minérales qu'organiques, accroît la diffusion optique des eaux et donc leur réflectance. De telles situations ne peuvent être observées en hiver: les eaux des bassins occidental et oriental étant alors homogénéisées sous l'effet des tempêtes, elles ne peuvent l'être davantage en été: les états de mer cléments étant favorables à la décantation du stock de MES; elles existent essentiellement en saison intermédiaire lorsque d'une part un stock important de MES est mobilisable et que d'autre part les échanges de chaleur à l'interface air-mer ont déjà contribué à stratifier les masses d'eaux du bassin occidental.

3.3. Les fronts estuariens :

Les lentilles d'eaux à fortes turbidités situées aux débouchés des estuaires de la Seine et des fleuves côtiers sont observables sur les images. Ainsi, par exemple, les effets des variations de débit de la Seine sur le régime turbide des eaux de surface de l'embouchure de la Seine ont pu être appréciés :

SCENE	1	2	3	4	5	6	7	numéro
ORBITE	11488	11668	12221	12525	13437	14349	14387	numéro
DATE	01.02.81	14.02.81	26.03.81	17.04.81	22.06.81	27.08.81	06.09.81	j.m.a
HEURE	10.55	11.30	11.49	11.45	11.20	11.09	10.48	h. mn
GAIN	1	1	1	1	1	1	1	code
TILT	0	18	0	18	18	18	18	°
ANG. SOL.	69,3	63,8	48,0	39,6	27,8	41,5	44,9	°
ANG. VIS.	22,2	30,2	33,5	41,8	28,3	24,3	30,8	°
ANG. DIF.	106,7	130,3	115,3	126,6	155,1	160,5	146,9	°
EXP. ANG.	1	1	1	1	1	1	1	

Tableau 1.- Conditions d'acquisition de l'imagerie.

SCENE	1	2	3	4	5	6	7	numéro
COE. MAR.	47	51	64	76	70	69	44	cent.
P.M.	+3.39	+6.00	-1.20	+2.36	-1.34	+3.04	-3.36	h.mn
DEBIT	1100	790	780	520	350	290	230	m ³ .s ⁻¹
PRE. ATM.	1027,6	1013,4	1001,8	1008,1	1016,0	1016,9	1011,5	mb
VIT. VEN.	2	2	13	3	7	1	2	m.s ⁻¹
DIR. VEN.	220	120	280	60	340	260	220	°
ETAT MER	1	1	3	3	3	1	1	code
VISIBILI.	200	250	1500	2000	3000	200	700	dam
NEBULOSI.	0	0	0	1	1	1	1	code

Tableau 2.- Conditions hydro-climatologiques observables lors de l'acquisition de l'imagerie.

Point	1	2	3	4	5
Latitude	48°30'N	48°30'N	48°30'N	48°30'N	48°30'N
Longitude	0°00'W	0°15'W	0°30'W	0°45'W	1°00'W
01-02-1981	>20.0	>20°0	>20°0	>20°0	>20.0 mg.l ⁻¹
14-02-1981	16.9	16.9	17.5	19.2	6.3 mg.l ⁻¹
26-03-1981	10.8	9.6	9.5	9.6	9.1 mg.l ⁻¹
17-04-1981	6.3	6.3	6.4	6.6	6.6 mg.l ⁻¹
22-06-1981	2.4	2.4	2.4	2.4	2.7 mg.l ⁻¹
27-08-1981	2.8	2.4	2.4	2.2	2.3 mg.l ⁻¹
06-09-1981	3.2	3.0	3.1	3.0	3.3 mg.l ⁻¹

Tableau 3.- Teneurs en matières en suspension, exprimées en mg.l⁻¹, en cinq points de la baie de Seine pour chacune des 7 images traitées.

- l'image du 1er février 1981 montre une situation de crue, débits de l'ordre de $1100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, et des teneurs en MES toujours supérieures à $13 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$;
- l'image du 17 avril 1981 associe des valeurs moyennes de turbidité, environ 6 à $7 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, et des débits du fleuve de l'ordre de $550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
- enfin, l'image du 6 septembre 1981 montre une situation estivale typique avec un faible débit du fleuve, environ $230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, et des eaux marines aux turbidités faibles et voisines de $2,5$ à $3 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. Des conditions favorables: faible agitation prolongée des eaux et débits fluviaux voisins de l'étiage ont privilégié les mécanismes de décantation.

On notera qu'il a été possible de déterminer la fonction de variation des teneurs moyennes en MES de début février à début septembre 1981 en chaque point de la zone d'étude. On fournit ici, à titre d'exemple, les résultats obtenus en 5 points de la baie de Seine au droit de l'estuaire (tab. 3).

3.4. Les turbidités côtières:

Une frange turbide ourle le littoral: elle est particulièrement développée dans le golfe normand breton en période hivernale (images du 1er et du 14 février, du 26 mars et du 17 avril 1981) où son extension est fortement liée aux houles de tempête; de forts courants de marée l'entretiennent également au large du cap de la Hague et de la pointe de Barfleur en participant à la remise en suspension et au transport des dépôts meubles de ces zones peu profondes. Enfin, les falaises vives qui entaillent les dépôts de marnes d'âge Jurassique du littoral du Calvados ainsi que les séries crayeuses d'âge Crétacé du Pays de Caux (voir tout particulièrement l'image du 6 septembre 1981) sont soumises à des mécanismes d'érosion variés entretenus tant par les eaux de ruissellement que par les vagues de tempête qui alimentent, certes irrégulièrement mais de manière notable, les eaux de surface en MES (12).

4. CONCLUSION

L'imagerie CZCS semble confirmer, via l'existence de la structure turbide qui lui est associée, un tourbillon prédit par emploi de modèles numériques et dont l'ordre de grandeur de taille est d'environ 3 à $5 \cdot 10^3 \text{ km}^2$.

Par ailleurs, l'exceptionnelle abondance et qualité de l'imagerie disponible -16 scènes pour la seule année 1981 - nous a autorisé à déterminer l'ordre de grandeur des teneurs en MES sur un cycle annuel en chaque point de la Manche et à calculer une fonction décrivant sa variation (13). Cette description met en relief de très fortes variations temporelles des teneurs en MES sous l'effet conjugué des débits fluviaux, des courants de marée et de la houle.

- (1) NASA. *The nimbus-7 users' guide*. Edited by C.R. Madrid, Management and Technical Services Company, Betsville, Maryland, 1978.
- (2) Syn (Y.Y.). Corrections for in-flight calibration of the coastal zone color scanner. *International Journal of Remote Sensing*, 4, 1983, p. 829-834.
- (3) Viollier M., Tanré D. & Deschamps P.Y.- An algorithm for remote sensing of water color from space. *Boundary Layer Meteorology*, 18, 1980, p. 247-267.
- (4) Gordon H.R.- Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the oceans. *Applied Optics*, 17, 1978, p. 1631-1636.
- (5) Thomas Y.F.- Télédétection de structures turbides en Manche. *L'Espace Géographique*, 13, 1984, p. 273-276.

- (6) Zbinden R.- *Les suspensions de la baie du Mont St Michel; étude microgranulométrique et radiométrique*. Thèse présentée à l'Université de Paris I-Panthéon-Sorbonne pour le titre de Docteur de 3ème cycle, 1981, 302 p..
- (7) Pingree R.D. & Maddock L.- Tidal residuals in the English Channel. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 57, p. 339-354.
- (8) Fornerino M.- *Modélisation des courants de marée en Manche*. Thèse présentée à l'Université Scientifique et Médicale et l'Institut Polytechnique de Grenoble pour le titre de Docteur Ingénieur, 267 p..
- (9) Simpson J.H. et Pingree R.D.- Shallow sea fronts produced by tidal stirring. In: *Oceanic fronts in coastal processes*; Bowman M.J. & Esaias W.E., Ed., Berlin, Springer Verlag, 1981, p. 29-42.
- (10) Agoumi A., Enderlé M.J. & Gras R.A.- Modélisation du régime thermique de la Manche. *Oceanologica Acta*, 4, 1983, p. 393-406.
- (11) Dupont J.P., Lafite R. & Lamboy M.- Contribution de l'étude des suspensions à la compréhension des mécanismes hydrosédimentaires estuariens et littoraux en Manche centrale et orientale. In : *La Baie de Seine*, Colloque National du C.N.R.S. organisé par le GRECO "MANCHE", Caen, 24-25 et 26 avril 1985, Vol. 2, p. 85-92.
- (12) Thomas Y.F.- Apport de la télédétection à l'étude des structures turbides: la Manche. In : *Télédétection et gestion des ressources : l'aspect opérationnel*, 5ème Congrès de l'Association Québécoise de Télédétection, Chicoutimi, 22-24 mai 1985, à paraître.

Figure 1.- Concentration en MES des eaux de surface de la Manche: l'échelle de gris correspond à une segmentation linéaire en 21 classes de la gamme 6,0 à 15,0 mg.l⁻¹; orbite CZCS n° 11488 du 01-02-1981 à 10h 55 mn T.U.

Figure 2.- Concentration en MES des eaux de surface de la Manche: l'échelle de gris correspond à une segmentation linéaire en 21 classes de la gamme 3,5 à 11,5 mg.l⁻¹; orbite CZCS n° 11668 du 14-02-1981 à 11h 30 mn T.U.

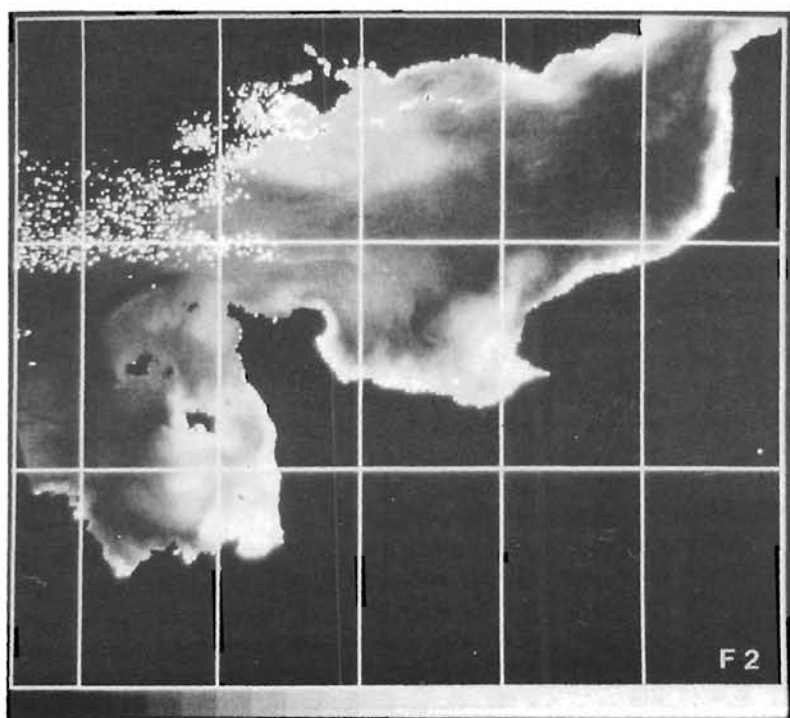
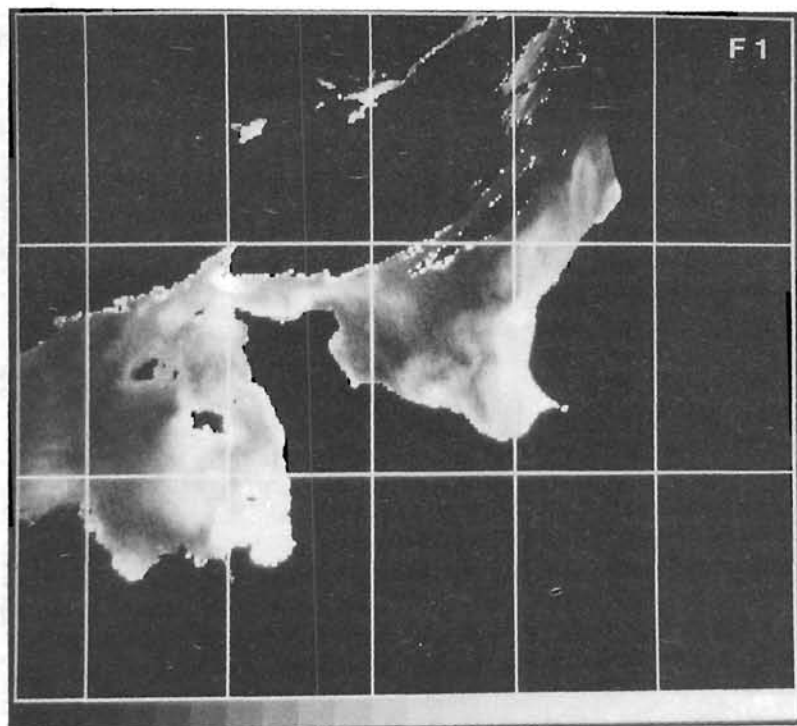
Figure 3.- Concentration en MES des eaux de surface de la Manche: l'échelle de gris correspond à une segmentation linéaire en 21 classes de la gamme 1,2 à 7,1 mg.l⁻¹; orbite CZCS n° 12221 du 26-03-1981 à 11h 49mn T.U.

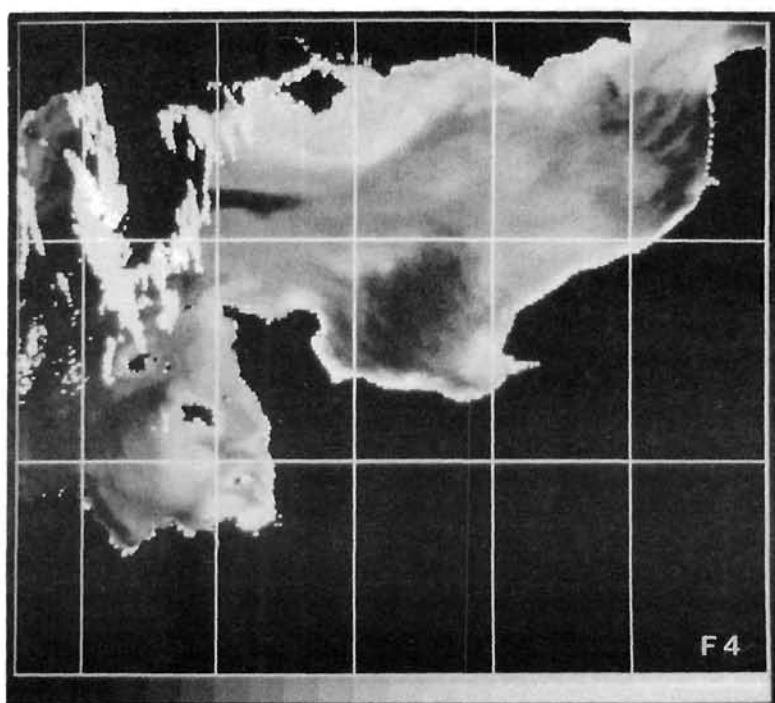
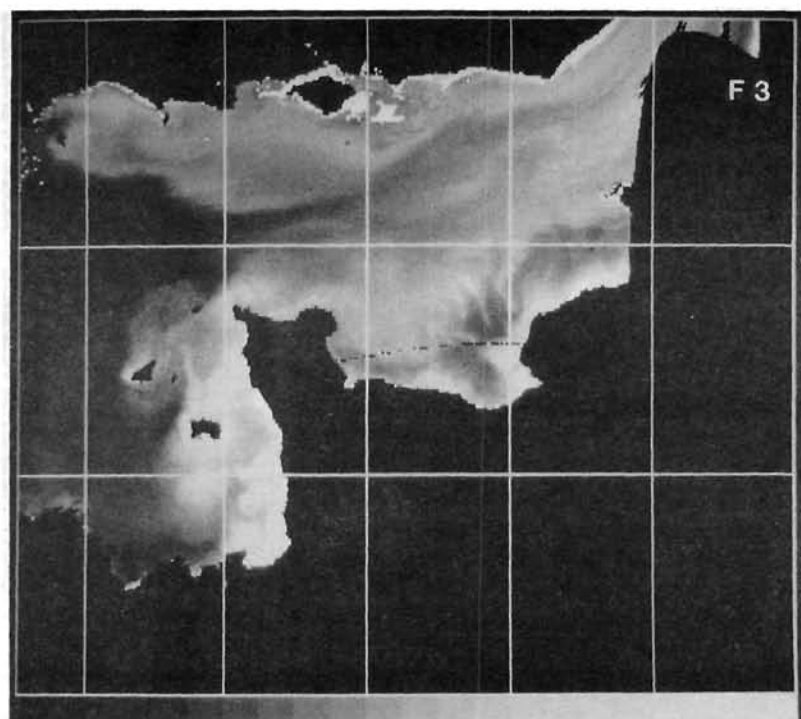
Figure 4.- Concentration en MES des eaux de surface de la Manche: l'échelle de gris correspond à une segmentation linéaire en 21 classes de la gamme 0,5 à 4,5 mg.l⁻¹; orbite CZCS n° 12525 du 17-04-1981 à 11h 45mn T.U.

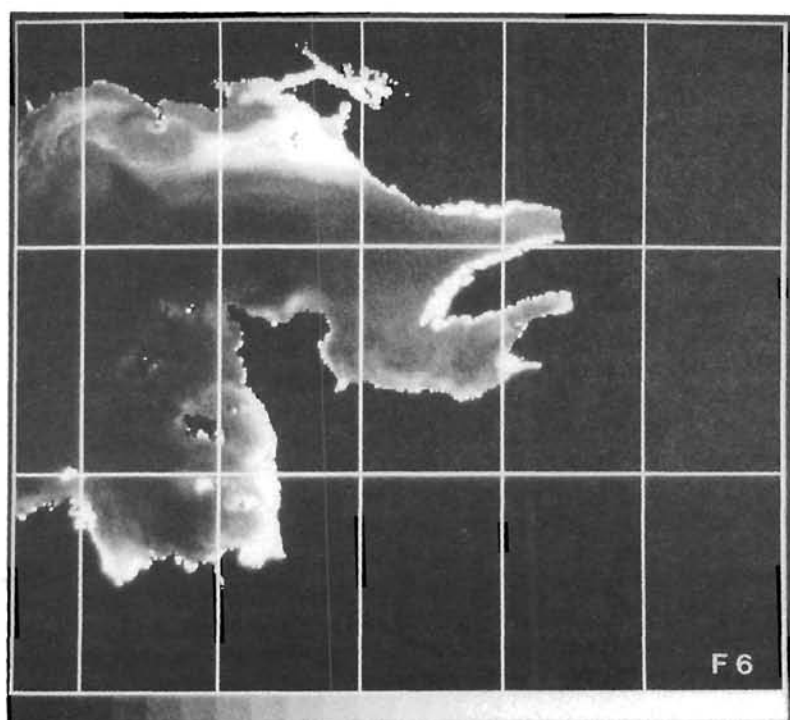
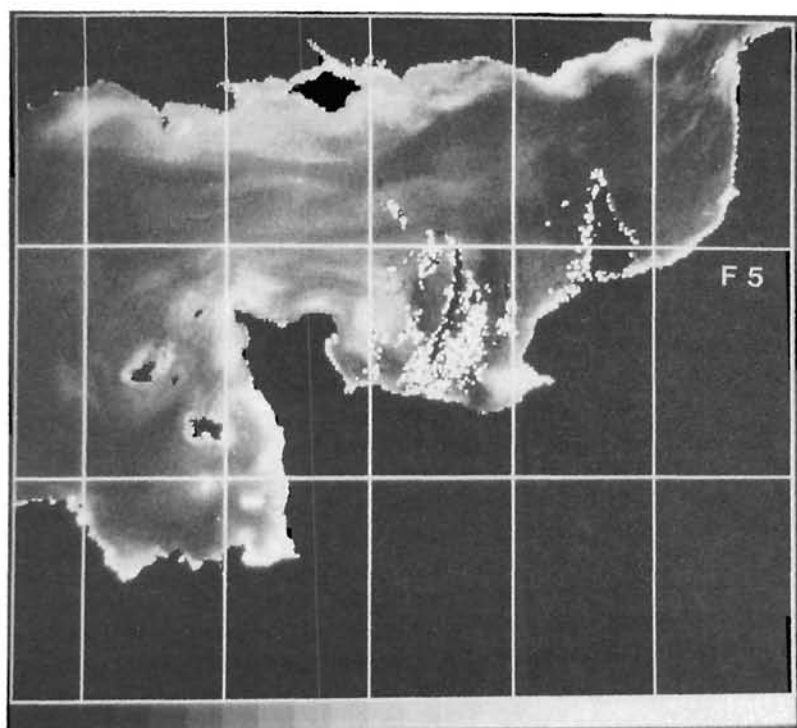
Figure 5.- Concentration en MES des eaux de surface de la Manche; l'échelle de gris correspond à une segmentation linéaire en 21 classes de la gamme 1,0 à 2,1 mg.l⁻¹; orbite CZCS n° 13437 du 22-06-1981 à 11h 20mn T.U.

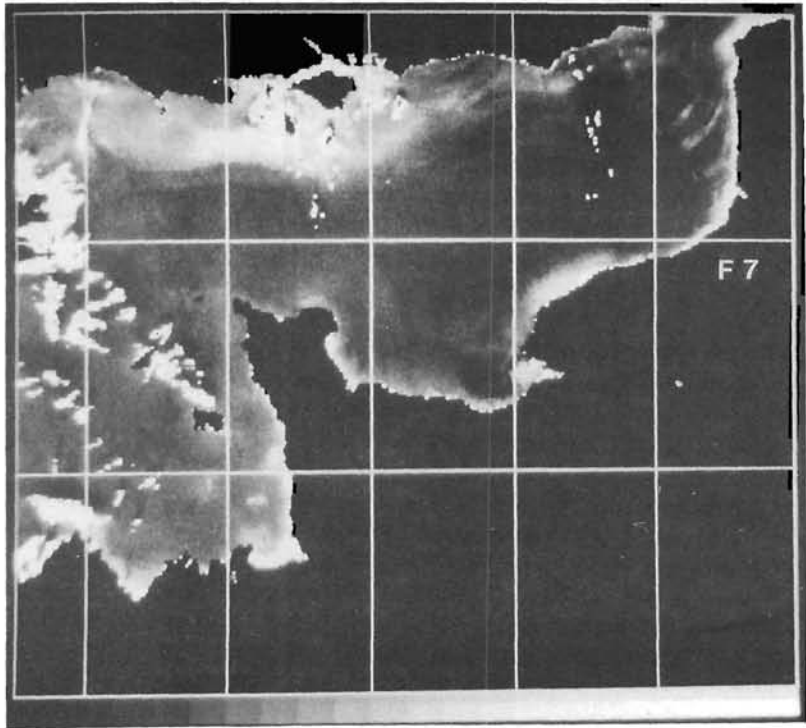
Figure 6.- Concentration en MES des eaux de surface de la Manche: l'échelle de gris correspond à une segmentation linéaire en 21 classes de la gamme 0,6 à 2,6 mg.l⁻¹; orbite CZCS n° 14349 du 27-08-1981 à 11h 09mn T.U.

Figure 7.- Concentration en MES des eaux de surface de la Manche: l'échelle de gris correspond à une segmentation linéaire en 21 classes de la gamme 0,6 à 2,6 mg.l⁻¹; orbite CZCS n° 14387 du 06-09-1981 à 10h 48mn T.U.









Messieurs Viollier M. du Centre d'Etudes en Océanographie et Biologie Marine (Roscoff), Baloi J.V. et Lecomte P. du Laboratoire d'Optique Atmosphérique de l'Université des Sciences et Techniques de Lille (Villeneuve d'Ascq) se sont chargés de la mise en oeuvre du radiomètre permettant la réalisation de ce travail, nous les en remercions vivement.