

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DES RECHERCHES OCEANIQUES

FACTEURS HYDROCLIMATIQUES ET APPARITIONS D'EAUX COLOREES, EN BAIE DE VILAINE, DURANT L'ANNEE 1984

Par

Pierre MAGGI, Abderrazak MASTOURI, Isabelle TRUQUET

IFREMER. DEPARTEMENT MILIEU ET RESSOURCES. NANTES

Louis SOULARD

CENTRE METEOROLOGIQUE DEPARTEMENTAL
DE NANTES-CHATEAU BOUGON

Yvon CADIOU, Christine LE PAUL et Louis GIBOIRE

IFREMER. DEPARTEMENT INFORMATIQUE. NANTES

CENTRE DE NANTES

B.P. 1049

44037 NANTES CEDEX 01

AUTEUR (S) : MAGGI (P.), MASTOURI (A.), TRUQUET (I.) SOULARD (L.), CADIOU (Y.), LE PAUL (C.) et GIBOIRE (L.)		CODE : N° <u>DERO-86.06-MR</u>
TITRE FACTEURS HYDROCLIMATIQUES ET APPARITIONS D'EAUX COLOREES, EN BAIE DE VILAINE, DURANT L'ANNEE 1984.		date : 20 août 1986 tirage nb : 60 Nb pages : 65 Nb figures : 34 Nb photos :
CONTRAT (intitulé) N° _____		DIFFUSION libre <input checked="" type="checkbox"/> restreinte <input type="checkbox"/> confidentielle <input type="checkbox"/>

RÉSUMÉ

Les fortes pluies de printemps ont provoqué un enrichissement et une dessalure des eaux superficielles côtières ; à cette stratification haline est venue s'ajouter, dès le début de l'été, une stratification thermique importante. Début avril, les conditions de milieu ont été optimales pour déterminer l'efflorescence printanière à diatomées *Skeletonema costatum* responsable de la couleur marron prise par l'eau de mer. Cette prolifération brève a rapidement disparu sous l'effet de l'agitation des masses d'eau.

Après la pluviosité exceptionnelle du mois de mai, les conditions sont redevenues propices à un développement abondant des petites diatomées (*Chaetoceros* et *Rhizosolenia*), courant juin, alors que la température de l'air atteignait des valeurs élevées en période de faible agitation des eaux. Ces eaux colorées allaient être suivies d'une prolifération du dinoflagellé *Dinophysis acuminata* qui contaminait les moules, conduisant alors les pouvoirs publics à interdire la pêche et la commercialisation des moules de la baie de Vilaine, entre le 7 et le 13 juillet.

Par ailleurs, il existe des phases de consommation accrue des sels nutritifs dues à ces proliférations en baie de Vilaine ; ces phases ont été particulièrement marquées en avril et surtout en juin-juillet où phosphates et nitrates constituent des facteurs limitant la croissance phytoplanctonique.

ABSTRACT

Spring heavy rainfalls led to lower salinity and higher nutrient content of coastal surface waters. Such salinity gradient was completed by a strong thermal stratification in early summer. In the first days of April, all the best environmental conditions were obtained in order to initiate the spring bloom of *Skeletonema costatum* which turned in yellow brown the color of sea water. Then, an increase in water turbulence led this short bloom to disappear.

Following exceptional May rainfalls, favorable conditions have favored the June increase of small diatoms (*Chaetoceros* and *Rhizosolenia*) whereas high values of air temperature were reached during low water turbulence period. Further to these discolored waters an out burst of *Dinophysis* cf. *acuminata* was observed, leading to mussel contamination and consequently, to a ban, by french administration, of mussels fishing and marketing in Vilaine bay during July 7 to 13.

Besides, high levels of nutrients uptakes by blooming algae are easy to detect during April and June-July period, where phosphates and nitrates were limiting factors for phytoplankton growth.

mots-clés Eaux colorées - Baie de Vilaine - Facteurs hydroclimatiques - Diatomées - Température - Salinité - Stratification - Sels nutritifs

key words Bloom - Vilaine bay - Hydro-climatic factors - Diatoms - Temperature - Salinity - Stratification - Nutrients

© IFREMER - Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, 1986



SOMMAIRE

	Pages
I - INTRODUCTION	1
II - LES FACTEURS CLIMATIQUES	2
1 - Précipitations atmosphériques	1
2 - Température de l'air	5
3 - Régime des vents	7
4 - Insolation	11
5 - Etat de la mer	14
6 - Coefficient de marées	15
III - LES FACTEURS HYDROLOGIQUES	19
1 - Méthodologie	19
a) Fréquence des campagnes de prélèvements	19
b) Stratégie de prélèvements	19
c) Technique d'échantillonnage	19
d) Méthode analytique	21
2 - Résultats	21
a) Température	21
b) Salinité	26
c) Chlorophylle	26
d) Nitrates	35
e) Nitrites	35
f) Phosphates	44
g) Silicates	44
h) Oxygène dissous	53
IV - CONCLUSIONS	58

I - INTRODUCTION

Les perturbations des écosystèmes observées, en baie de Vilaine, depuis quelques années :

- manifestations d'eaux colorées estivales suivies de troubles diarrhéiques parmi les consommateurs de moules en 1978, 1980, 1983 (ALZIEU et al, 1983 ; LASSUS et al, 1984 ; MAGGI et al, 1984) et 1984 (MAGGI et al, 1984 ; MASTOURI, 1986)
- mortalités massives d'animaux marins en 1982 (MAGGI, 1982 ; MAGGI et al, 1985)

ont mis en évidence la nécessité d'entreprendre un suivi de la qualité des eaux de ce secteur.

Une commission quadripartite, composée de représentants des administrations, des professionnels de la mer, de scientifiques et d'élus locaux, a été mise en place à la demande des autorités dès la fin 1982 dans le but de définir les axes de recherches permettant de trouver des solutions aux problèmes posés.

Mais, auparavant, dès janvier 1982, l'Institut Scientifique et Technique des Pêches Maritimes (1) avait entrepris une étude phytoplanctonologique (ANDRESEN LEITAO et al, 1983) complétée par une étude bactériologique conduite par le Laboratoire de Microbiologie Pharmaceutique de l'Université de Rennes (GRIMANDI et al, 1983). Le but était de rechercher l'origine des troubles de type gastro-entérites consécutifs à la consommation de moules et tenter de faire la part entre ce qui pouvait être d'origine bactérienne et ce que l'on soupçonnait, alors, dû à une toxine produite par des dinoflagellés.

Cette première étude a été suivie par la mise en place d'un programme plus vaste, en 1983, qui a permis de déterminer l'espèce phytoplanctonique responsable des "eaux brunes" de printemps signalées par les pêcheurs de la baie de Vilaine. Cette eau colorée de la mi-mars 1983 était en effet due à une efflorescence de la diatomée Skeletonema costatum dont la prolifération a été favorisée par des conditions particulières du milieu (MAGGI, 1983). Ce programme a également permis de détecter la prolifération de diatomées, des genres Nitzschia et Rhizosolenia, qui est apparue début juin, également favorisée par les conditions hydroclimatiques qui ont régné (MAGGI et al, 1984). Par la suite, le bloom a épuisé le stock de sels nutritifs et les populations de diatomées ont régressé à l'avantage d'un dinoflagellé rendant les moules toxiques : Dinophysis cf. acuminata, ce qui a contraint les autorités préfectorales à suspendre la commercialisation des moules en juillet et août.

 (1) L'Institut Scientifique et Technique des Pêches Maritimes a été, au 1er janvier 1985, fusionné avec le Centre National pour l'Exploitation des Océans donnant naissance à l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer.

Le présent travail s'inscrit dans le programme 1984 des travaux de l'IFREMER ; il cherche à préciser le rôle des facteurs hydroclimatiques dans le déclenchement des proliférations phytoplanctoniques.

II - LES FACTEURS CLIMATIQUES

Certains paramètres climatiques locaux (précipitations atmosphériques, température de l'air, vent, insolation...) peuvent jouer un rôle dans le déclenchement des phénomènes d'eaux colorées. En effet, l'analyse des données météorologiques, fournies par le Centre Météorologique départemental de Nantes-Château Bougon et le Sémaphore de l'île d'Yeu a montré le rôle de ces différents paramètres dans l'apparition, puis la disparition, des proliférations phytoplanctoniques, durant l'année 1983 (MAGGI et al, 1984). On peut penser que le suivi, mensuel en saison froide, puis hebdomadaire en saison chaude, voire journalier en période critique, de ces paramètres devrait permettre de mieux comprendre les phases de développement du phytoplancton.

Dans ce qui suit, on va essayer d'examiner, tout au long de l'année 1984, les fluctuations des paramètres climatiques susceptibles de nous renseigner sur les causes et les conséquences d'éventuelles perturbations des écosystèmes du milieu.

1 - Précipitations atmosphériques

La pluviosité a été exceptionnellement importante à l'automne 1982 et au printemps 1983 alors que pour 1984, on retient les mois de janvier, mars, mai et novembre qui ont été très pluvieux avec respectivement 66, 38, 83 et 122 % d'excédents hydriques (fig. 1).

L'analyse décadaire de la répartition des précipitations (tabl. 1) montre que 76 % de la pluviosité de mars s'est produite durant la troisième décade, alors que, pour le mois de mai, elle a été importante et répartie sur la totalité du mois.

Mais ces représentations décadaires ou mensuelles, ne nous renseignent pas sur la durée et l'intensité des précipitations ; nous avons donc représenté sur la figure 2, les précipitations journalières cumulées pour les 12 mois de l'année 1984. La pente des courbes ainsi obtenues nous renseigne sur l'intensité des précipitations: lorsqu'elle est faible la pluviosité est peu importante, lorsqu'elle est forte la pluviosité est élevée. Sur chaque courbe mensuelle nous avons également représenté la droite théorique des précipitations cumulées établies à partir des normales calculées sur la période 1951-1980 ; cette droite correspond à une situation théorique qui voudrait que la pluviosité soit uniformément répartie sur tous les jours du mois.

En janvier, la pluviosité a été de 66 % supérieure à la normale alors que le mois de février a été déficitaire de 39 %.

Du 1er au 22 mars, la pluviosité a été faible mais, durant le reste du mois, il est tombé 61 mm d'eau soit quasiment la valeur normale mensuelle (65 mm) sur 9 jours. Cette pluviosité importante était préoccupante mais heureusement avril a été un mois exceptionnellement sec puisqu'il n'est tombé que 2,5 mm (alors que la normale est de 46 mm), limitant momentanément les risques d'enrichissement du milieu par les apports telluriques.

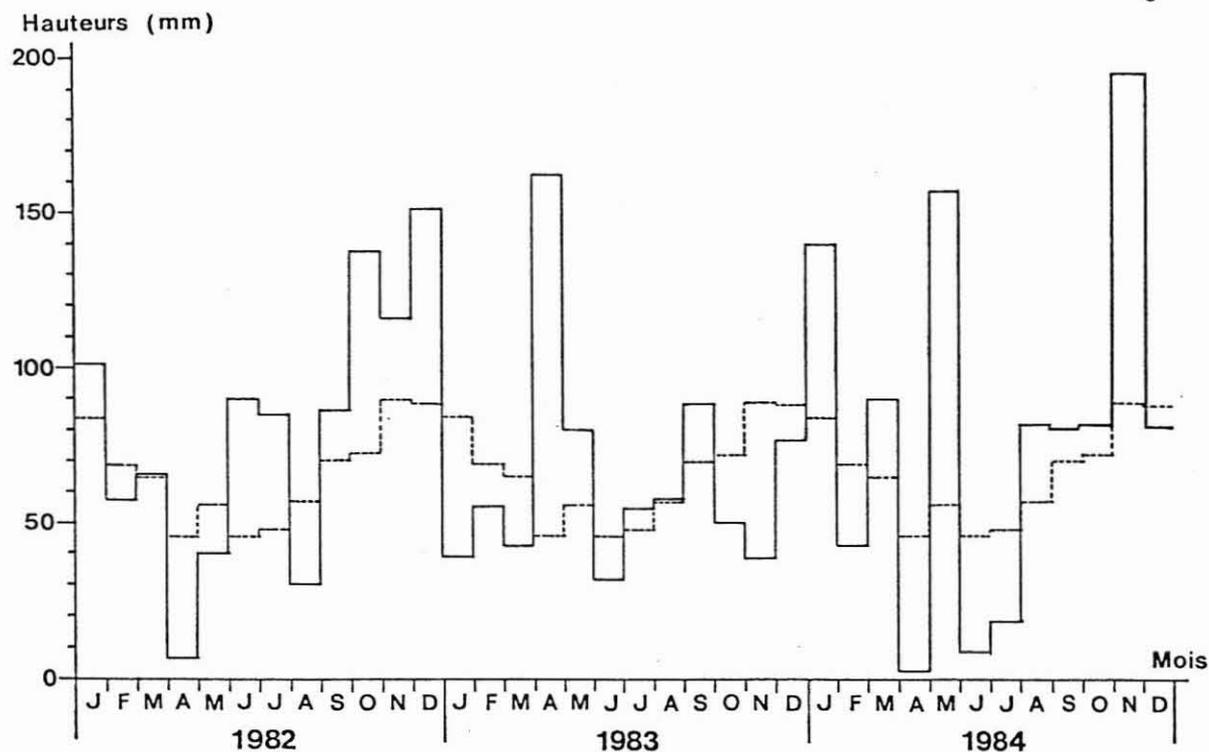


Fig. 1.- Précipitations mensuelles de 1982 à 1984 (—) et normales mensuelles correspondantes calculées sur la période 1951-1980 (---).

Mois	1ère décade	2ème décade	3ème décade	Total	normale
janvier	20,8	46,1	73,1	140,0	84
février	22,6	7,3	12,7	42,6	69
mars	1,0	20,1	68,8	89,9	65
avril	2,5	Traces	0	2,5	46
mai	58,7	43,7	56,5	158,9	56
juin	4,4	4,0	0,6	9,0	46
juillet	13,0	4,0	2,8	19,8	48
août	16,2	1,1	63,9	81,2	57
septembre	27,0	8,9	43,5	79,4	70
octobre	30,2	13,1	37,8	81,1	72
novembre	46,1	76,8	74,7	197,6	89
décembre	7,7	56,3	16,8	80,8	88
TOTAL	-	-	-	982,8	790

Tabl. 1.- Précipitations mensuelles pour 1984 et normales mensuelles calculées sur la période 1951-1980 (exprimées en mm).

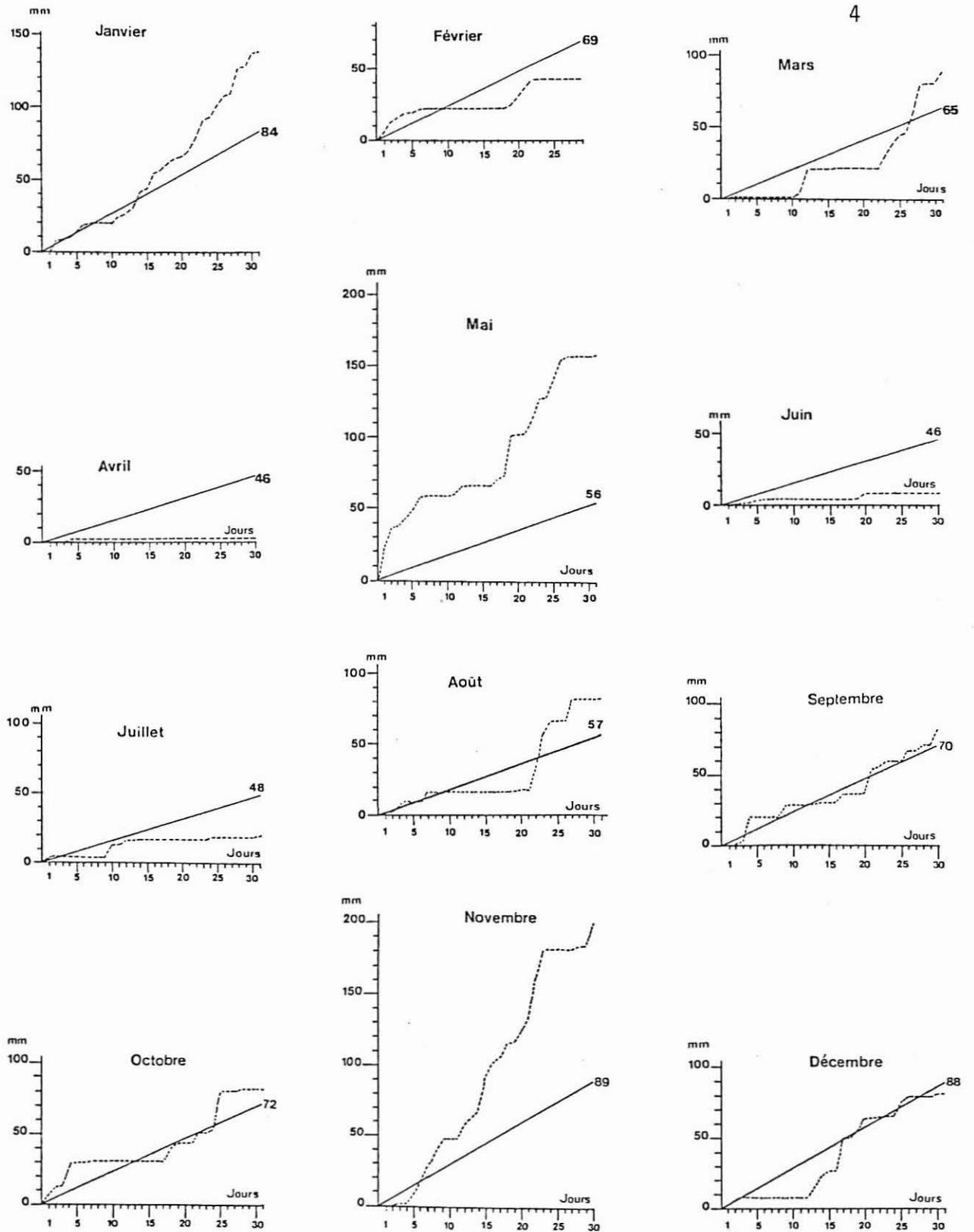


Fig. 2.- Hauteurs journalières cumulées des précipitations atmosphériques pour l'année 1984 (---) et normales théoriques correspondantes calculées sur la période 1951-1980 (—).

Le mois de mai a été particulièrement pluvieux avec une hauteur d'eau de 158,9 mm alors que la normale n'est que de 56 mm (183 % d'excédent hydrique). Cette pluviosité exceptionnelle a drainé vers la mer de grandes quantités de sels nutritifs par le lessivage des sols lors de pluies violentes. La pluviosité a été ensuite très fortement déficitaire durant juin (80 %) et juillet (58 %) puis supérieure à la normale en août (42 %), septembre (13 %) et octobre (12 %).

Les précipitations de novembre (197,6 mm) ont été très supérieures à la normale (89 mm) : 122 % d'excédent. Les apports de sels nutritifs par lessivage ont alors moins d'importance car la température de l'eau et la durée d'ensoleillement représentent alors des facteurs limitants pour le développement du phytoplancton. Par contre le lessivage des sols, par les pluies automnales et hivernales, permet la reconstitution du stock de sels nutritifs qui ne sera pleinement utilisé qu'au moment du bloom printanier.

Enfin la pluviosité de décembre a été légèrement inférieure à la normale (8 %).

2 - Température de l'air

L'évolution moyenne de la température de l'air a une répercussion sur la valeur des températures du milieu aquatique et indirectement sur la vitesse de croissance et la multiplication du phytoplancton. L'étude de l'évolution des températures minimales et maximales (fig. 3) permet d'avoir une idée sur les fluctuations de ce paramètre pendant les deux périodes critiques : mars-avril et juin-juillet.

Du 1er janvier au 10 février 1984, les températures extrêmes de l'air ont été bien supérieures aux normales ; cependant le net refroidissement consécutif, qui a duré jusqu'à la mi-avril, a stoppé le démarrage de la végétation -tant terrestre que marine- qui s'amorçait à cette période de l'année où la durée de l'éclairement journalier augmente régulièrement.

L'exceptionnelle élévation des températures extrêmes, observée durant la seconde moitié d'avril, a constitué un facteur favorable aux multiplications phytoplanctoniques qui se sont produites dès la mi-avril mais n'ont pas duré car d'autres facteurs leur ont été défavorables.

Durant tout le mois de mai et le début de juin, nous observons une chute importante et durable des températures extrêmes de l'air en dessous des normales.

Les températures extrêmes de l'air seront ensuite plutôt supérieures aux normales jusqu'au début septembre avec même des périodes particulièrement chaudes du 9 au 21 juin, du 17 au 23 juillet, du 27 au 30 juillet, du 14 au 22 août et du 26 août au 4 septembre.

Il faut noter que le brusque échauffement de l'air constaté lors de la deuxième décade de juin s'est répercuté au milieu qui a connu un développement inaccoutumé des populations phytoplanctoniques. Ce phénomène n'a pas pris de grande ampleur à cause de la chute consécutive des températures (du 22 juin au 5 juillet), ce qui a, en outre, limité la désoxygénation des eaux profondes où de grandes quantités de matières organiques devaient être l'objet de dégradations bactériennes.

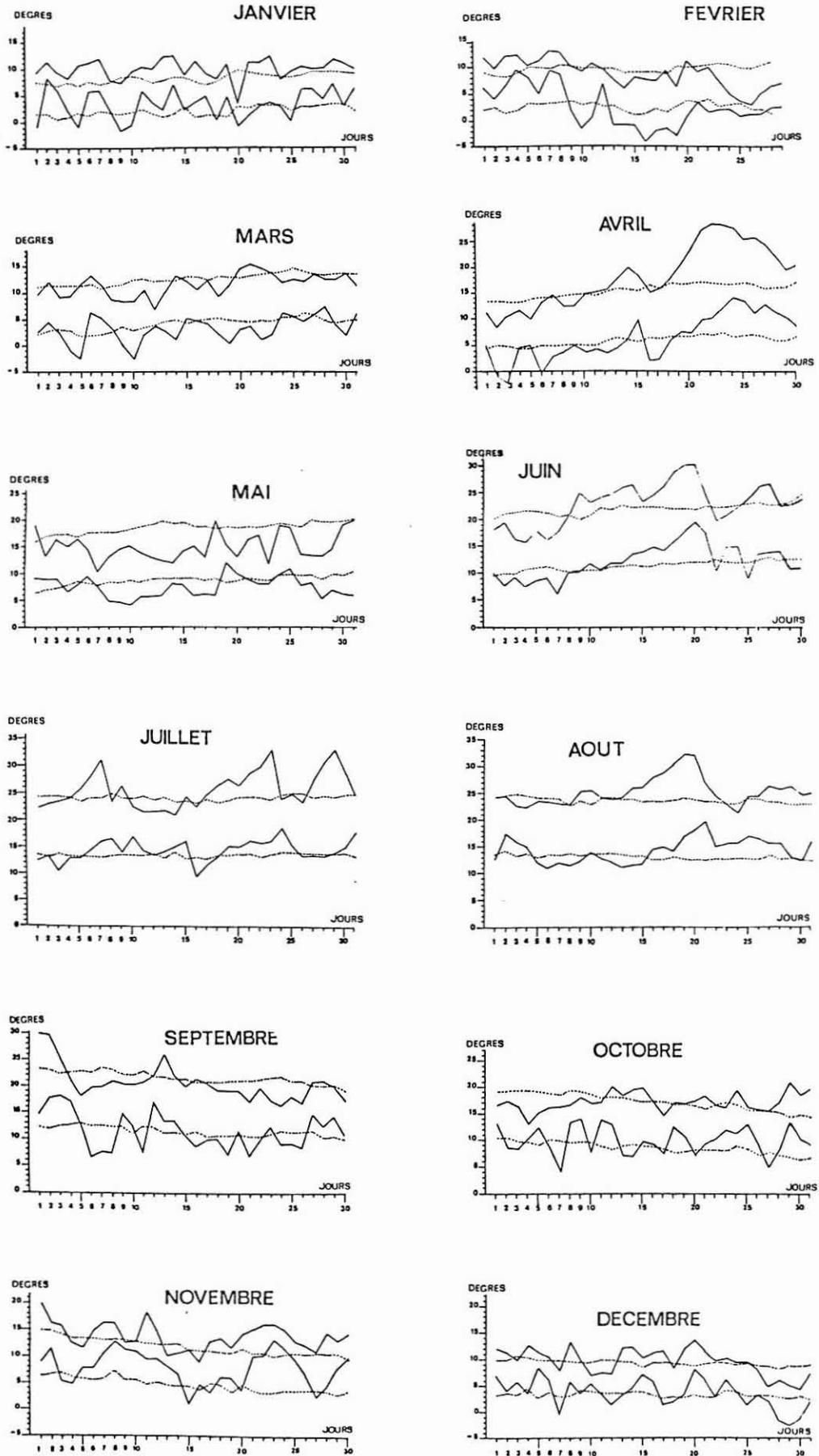


Fig. 3.- Températures journalières minimales (— en bas) et maximales (— en haut) de l'air, pour l'année 1984 et normales théoriques correspondantes (---) calculées sur la période 1951-1980.

Puis jusqu'à la mi-octobre, les températures extrêmes de l'air seront, dans leur ensemble, légèrement inférieures aux normales.

Le reste de l'année verra une oscillation des températures extrêmes autour de la normale avec une période plus froide à la fin de l'année. A cette époque de l'année, d'autres facteurs limitants le développement interviennent comme la durée journalière d'éclairement.

3 - Régimes des vents

Rappelons que, d'après leur vitesse, on distingue les vents :

- calmes : inférieurs à 2 m/s,
- faibles : 2 à 4 m/s,
- modérés : 5 à 9 m/s,
- forts : 10 m/s et plus.

En baie de la Vilaine, la configuration des rivages et l'ouverture assez large sur l'océan atlantique ne font qu'accentuer le rôle des vents sur la physico-chimie du milieu marin :

- les vents de terre, soufflant des secteurs 360° à 80° avec une certaine force, favorisent le mélange des eaux continentales aux eaux océaniques ; cependant, du fait de la configuration des rivages, les vents faibles ont peu d'influence sur une grande partie de la baie ;
- les vents de mer, issus des secteurs 180° à 280°, au contraire retardent ce mélange des eaux et peuvent maintenir, dans la frange littorale, les eaux dessalées et enrichies favorables au développement du phytoplancton lorsque les autres facteurs du milieu sont optimaux.

Dans certaines conditions, les vents de mer peuvent favoriser la concentration d'organismes phytoplanctoniques en poussant, vers le rivage, des eaux superficielles fortement colonisées ; les vents de terre peuvent avoir des effets contraires.

D'une manière générale, l'absence de vent et les eaux calmes qui en résultent sont des facteurs favorables à la multiplication des organismes dans un volume limité d'eau. A l'opposé, des vents d'une certaine force, en agitant la mer, favorisent la dispersion des organismes au sein des eaux et peuvent ainsi contribuer à la disparition de la coloration donnée à la mer lors d'une efflorescence phytoplanctonique.

L'analyse mensuelle des vents a été effectuée en fonction de leur direction et de leur vitesse (fig. 4, 5 et 6).

En janvier, les vents calmes ont été rares et les vents modérés et forts abondants, concourant à l'agitation de la mer (1) et limitant le gradient de salinité à la zone marine directement sous l'influence des apports de la Vilaine.

 (1) Rappelons que, en janvier et début février, de nombreuses tempêtes se sont produites en Atlantique et en Manche ; beaucoup d'oiseaux marins éprouvèrent des difficultés pour se nourrir et, affaiblis, furent victimes d'une épizootie.

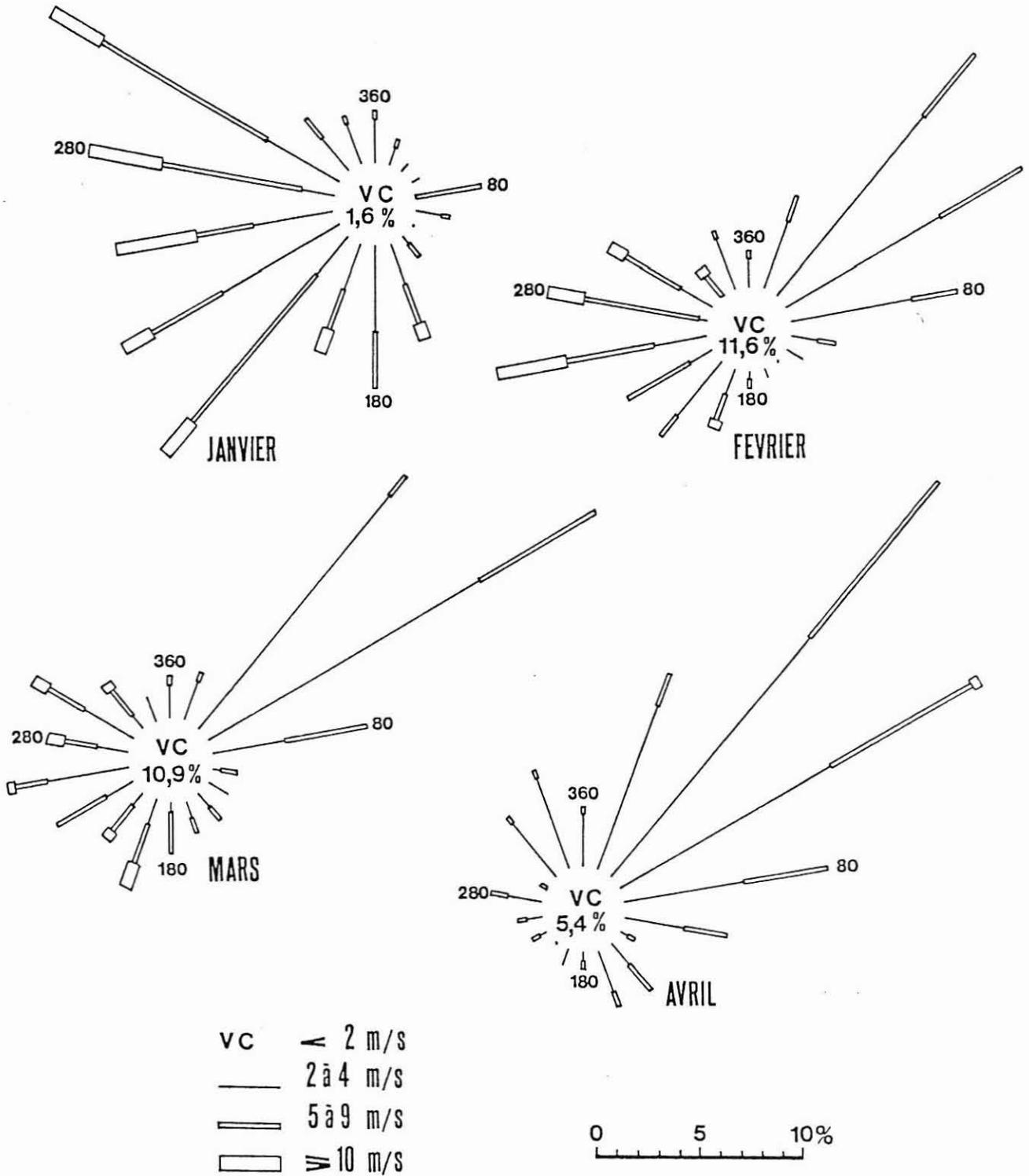


Fig. 4.- Pourcentages relatifs des intensités des vents, en fonction des directions, pour les quatre premiers mois de 1984.

VC : vents calmes.

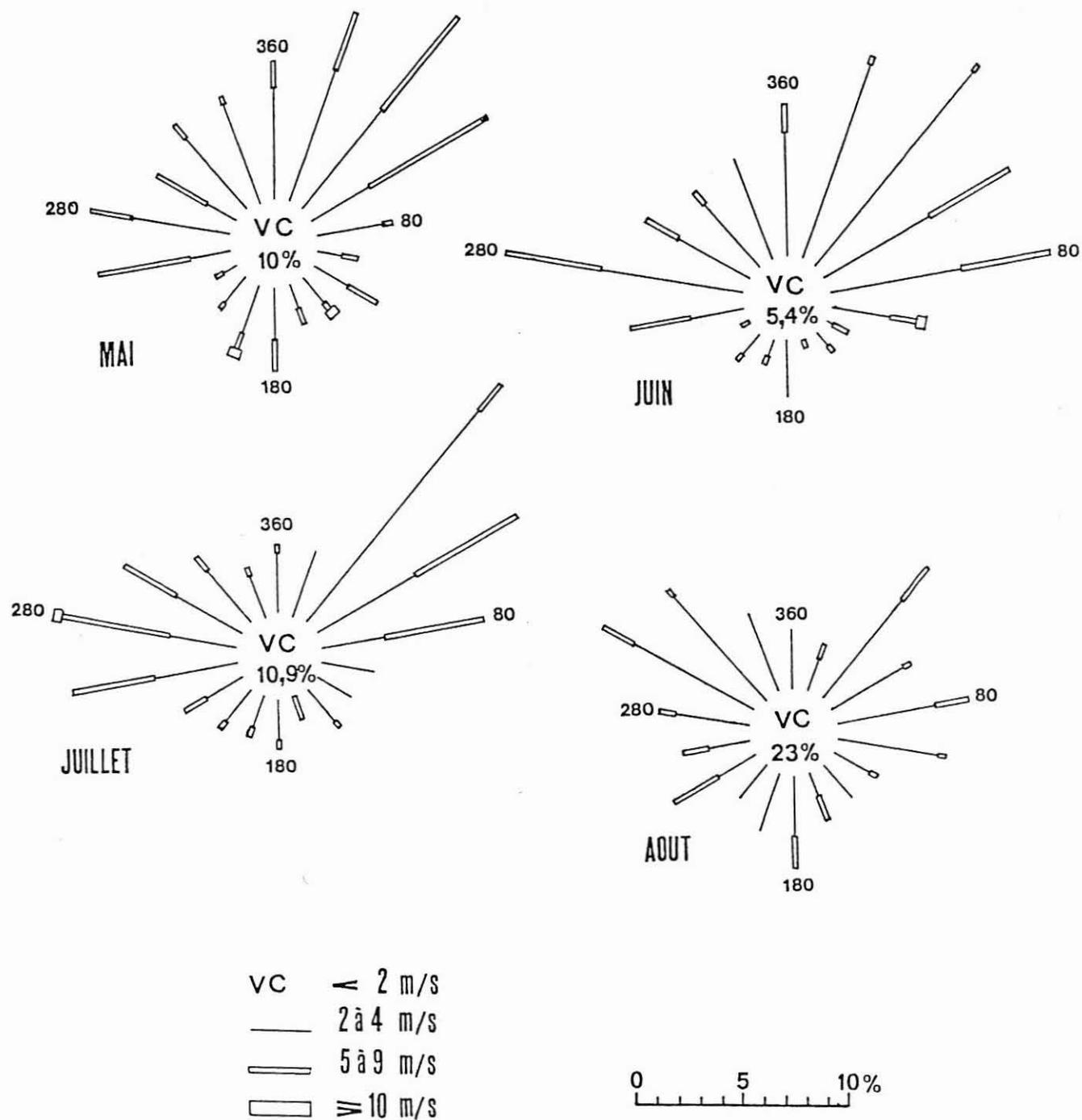


Fig. 5.- Pourcentages relatifs des intensités de vents, en fonction des directions, pour les mois de mai à août 1984.

VC : vents calmes.

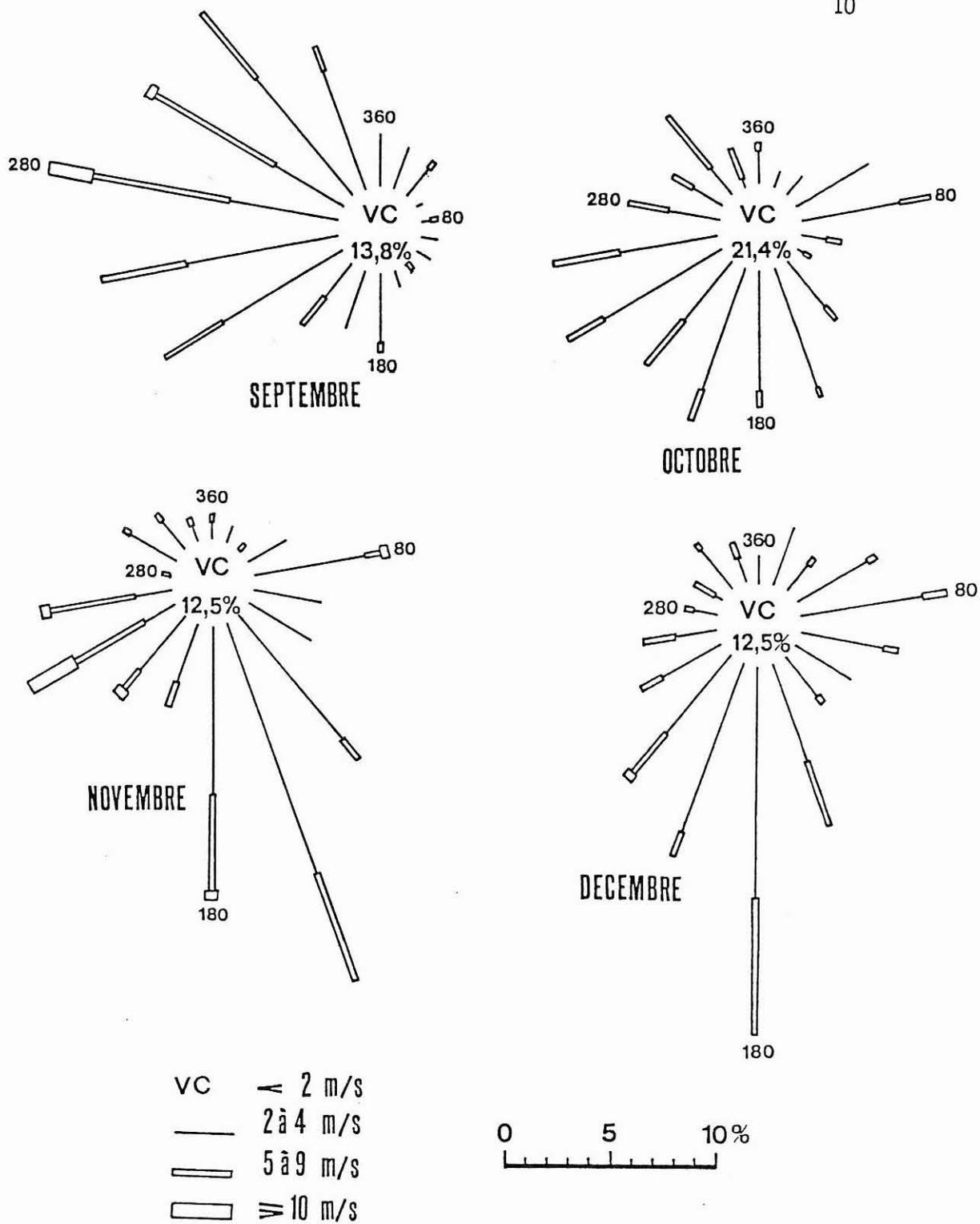


Fig. 6 .- Pourcentages relatifs des intensités de vents, en fonction des directions, pour les quatre derniers mois de l'année.

VC : vents calmes.

En février, les vents calmes ont été abondants. Ceux de terre ont surtout été faibles et secondairement modérés, c'est-à-dire avec peu d'action sur l'agitation des eaux. Les vents de mer n'ont pas été très fréquents mais ce sont surtout ceux d'intensités modérés et fortes qui dominaient. Dans l'ensemble, ils ont donc été défavorables au mélange des eaux côtières avec les eaux océaniques ; toutefois la faible pluviosité du mois a limité les risques de stratification haline hors de l'estuaire interne.

La situation des vents en mars ressemble beaucoup à celle de février ; toutefois, la forte pluviosité de la dernière décade du mois ne perturbera pas le milieu car le mois d'avril va être fortement déficitaire en précipitations avec seulement 2,5 mm alors que la normale est de 46 mm.

En avril, les vents de terre ont nettement dominé avec surtout des intensités faibles sans grande influence sur la mer ; toutefois, leur constance, ajoutée à d'importants vents modérés issus des mêmes secteurs a eu quelques effets sur le brassage des eaux. Si l'on examine les régimes des vents d'avril par décades (fig. 7), on constate que les vents calmes et faibles ont fortement dominé durant les deux premières périodes et avec une fréquence plus élevée pour les vents de terre. Durant tout ce temps, les vents ont donc eu une action mineure sur l'agitation de la mer ; ils ont favorisé la préparation de l'efflorescence printanière tardive du phytoplancton qui s'est produite vers le 10-12 avril alors que s'amorçait une phase de réchauffement de l'air qui allait durer jusqu'à la fin du mois. Cette efflorescence disparaît vers le 20 avril alors que les températures exceptionnellement élevées de l'air n'ont pas encore été atteintes. Tout se passe comme si le phénomène, préparé en période de morte-eau et de vents calmes et faibles, disparaissait à la fin de la vive-eau, et à l'amorce d'une décade où la nette dominance des vents de terre calmes et modérés favorisait la dispersion des eaux superficielles riches en phytoplancton.

De mai à août, les vents calmes et faibles, qui sont sans effet notable sur l'agitation des eaux de la baie de Vilaine, ont largement dominé cependant que les vents forts étaient quasiment absents.

En l'occurrence, l'intense coloration des eaux, signalée du 7 au 13 juillet, s'est manifestée pendant une période assez calme. Cette situation étant maintenue, la régression du phénomène est liée aux modifications des autres facteurs hydroclimatiques.

De septembre à novembre, les vents calmes et faibles ont dominé tandis qu'en décembre, les vents modérés ont été abondants. Il est à noter que le mois d'octobre a été particulièrement calme ; mais à cette période de l'année le vent n'a plus un rôle important vis-à-vis des organismes phytoplanctoniques qui ne sont plus présents qu'à de faibles densités.

4 - Insolation

L'examen de la figure 8 nous permet d'étudier l'évolution mensuelle de l'insolation.

Ainsi, on note une insolation normale de janvier et supérieure à la normale en février, mars et surtout avril pour lequel on a enregistré un excédent de 50 %.

VC < 2 m/s
 — 2 à 4 m/s
 = 5 à 9 m/s
 □ ≥ 10 m/s

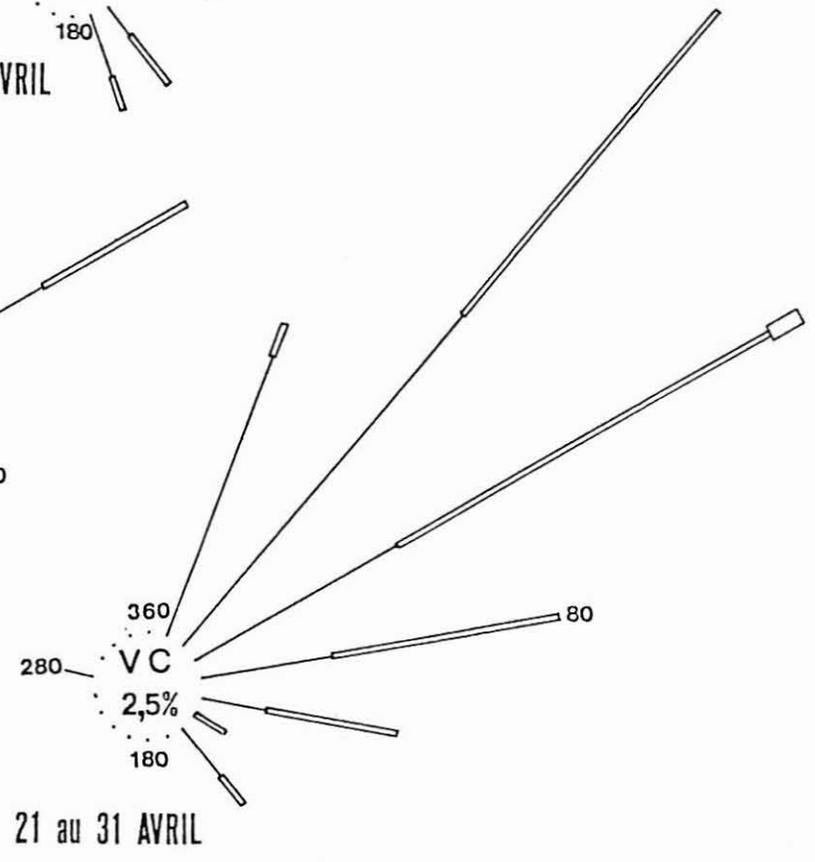
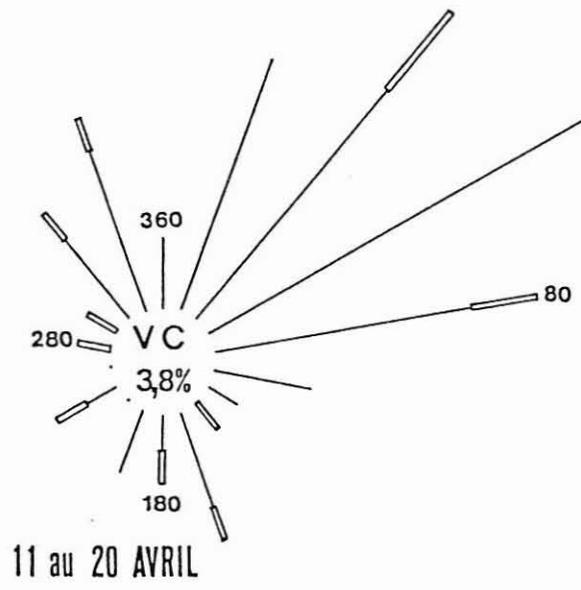
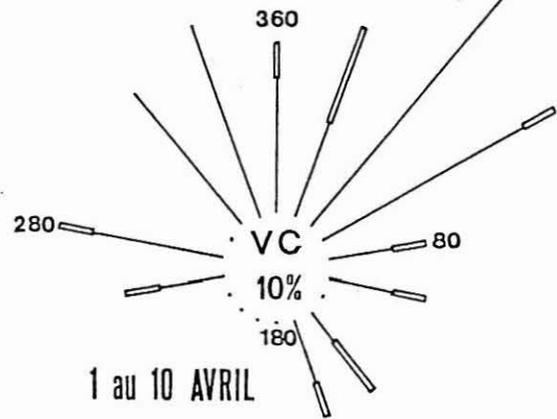
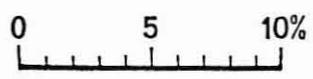


Fig. 7.- Pourcentages relatifs des intensités de vents, en fonction des directions, pour les trois décades d'avril 1984.
 VC : vents calmes.

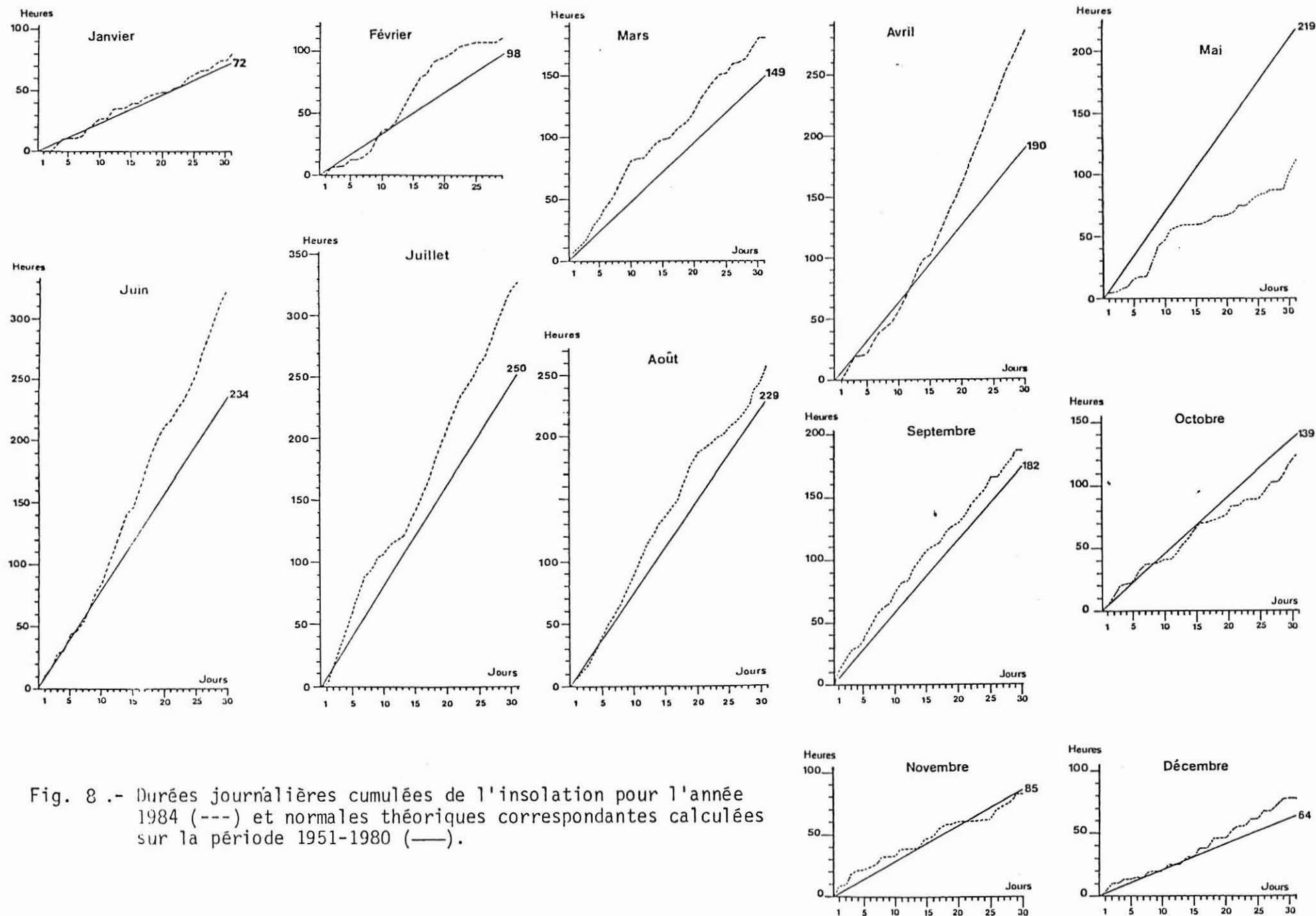


Fig. 8.- Durées journalières cumulées de l'insolation pour l'année 1984 (---) et normales théoriques correspondantes calculées sur la période 1951-1980 (—).

En fait, l'efflorescence phytoplanctonique printanière d'avril cesse alors que l'insolation devient le plus fortement excédentaire. L'insolation est un facteur essentiel au développement du plancton végétal mais, aussitôt une certaine durée d'insolation mensuelle atteinte, le démarrage de la photosynthèse se produit et tout excédent semble alors sans effet apparent. Dès le mois de mars, la durée d'insolation est assez importante pour apporter l'énergie lumineuse nécessaire à la multiplication du phytoplancton.

Le mois de mai, marqué par une pluviosité exceptionnelle, a connu un ensoleillement déficitaire de 49 %, ce qui traduit, de toute évidence l'importance de la nébulosité pendant cette période. En revanche, au cours de la période sèche de juin-juillet, l'insolation a été tellement excédentaire que la durée journalière de l'ensoleillement s'est élevée à 11 heures en moyenne ; ceci est dû, bien entendu, à la durée importante des jours en été. Par conséquent, l'insolation ne semble pas constituer un facteur essentiel dans le déclenchement des blooms estivaux. En effet, la durée journalière de l'insolation est trop importante pour constituer un facteur limitant le développement du plancton végétal. Il est cependant certain qu'une forte insolation, par mer calme, provoque un échauffement important des eaux superficielles qui favorise la multiplication des espèces phytoplanctoniques dans cette couche. Enfin d'août à décembre, on note une insolation voisine de la normale.

5 - Etat de la mer du vent

Nous avons analysé les données recueillies par le Sémaphore de l'île d'Yeu qui est le point d'observation le plus proche de la baie de Vilaine. L'état de la mer, observé à 3, 6, 9, 12, 15, 18 et 21 heures temps universel, est décrit en fonction de la hauteur moyenne des vagues (tabl. 2).

MER	HAUTEURS MOYENNES (m)
Calme	0
Ridée	0 à 0,1
Belle	0,1 à 0,5
Peu agitée	0,5 à 1,25
Agitée	1,25 à 2,50
Forte	2,50 à 4
Très forte	4 à 6
Grosse	6 à 9
Très grosse	9 à 14
Enorme	14 et plus

Tableau 2 : Différents états de la mer du vent.

Les tableaux 3 et 4 et la figure 9 regroupent les pourcentages relatifs des différents états de la mer, calculés par décades et par mois, pour toute l'année.

Il ressort de l'analyse de ces résultats que la mer a été le siège d'une très forte agitation en janvier et début février : les tempêtes ont été nombreuses durant cette période. Cette agitation s'est réduite ensuite fin février et en mars.

Durant tout le mois d'avril, la mer a été surtout belle (63,8 %) et secondairement peu agitée (33,8 %) constituant ainsi un milieu propice aux proliférations phytoplanctoniques qui allaient se matérialiser par une coloration brune des eaux.

De mai à août, la mer a été l'objet d'un très faible brassage ; en effet, hormis durant les premières décades de mai et juin où la mer a été jusqu'à agitée et forte pendant un temps non négligeable, la période considérée a été caractérisée par une mer ridée, belle ou peu agitée. La seconde décade de juin a été particulière avec essentiellement mer ridée (21,4 %) ou belle (78,6 %), favorisant la multiplication du phytoplancton dans un espace réduit c'est-à-dire une apparition d'eau colorée, notamment lors de la première décade de juillet où l'on observait une mer ridée à 21,4 % et belle à 54,3 %. Ensuite, l'état de la mer n'a pratiquement pas changé durant le reste du mois et on a plutôt tendance à expliquer le déclin du phénomène d'eau colorée par les fluctuations d'autres paramètres surtout hydrologiques et non pas, par un fort brassage des eaux du milieu, comme ce fut le cas pour le bloom printanier qui n'a duré que quelques jours.

6 - Coefficients de marées

Vers le début de la deuxième décade d'avril, les coefficients de marées de mortes-eaux ont été nettement inférieurs à 50, ce qui a assuré une stabilité du milieu suffisante pour soutenir la floraison printanière de diatomées. Quant aux coefficients de marées de vives-eaux, le maximum observé le 16 avril a atteint 113, valeur témoignant l'agitation du milieu mise en cause dans la disparition des tâches colorées vers le 18 avril (fig. 10).

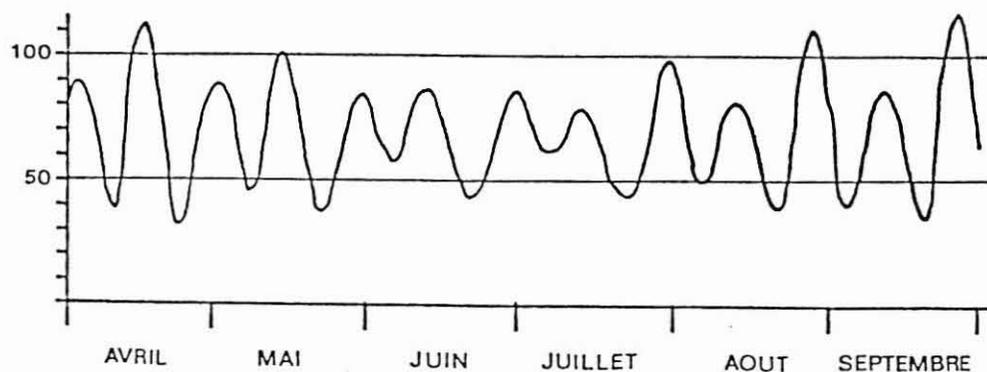


Fig. 10 - Variations des coefficients de marées entre le 1er avril et le 30 septembre 1984.

Mois	Mer	1ère décade	2ème décade	3ème décade	Mois entier
JANVIER	1 - Ridée	0	0	0	0
	2 - Belle	8,6	0	0	2,8
	3 - Peu agitée	47,1	15,7	18,2	26,7
	4 - Agitée	31,4	38,6	29,9	33,2
	5 - Forte	12,9	40,0	24,7	25,8
	6 - Très forte	0	5,7	20,8	9,2
	7 - Grosse	0	0	6,5	2,3
FEVRIER	1 - Ridée	0	0	0	0
	2 - Belle	8,8	41,4	25,4	25,4
	3 - Peu agitée	7,4	51,4	44,4	34,3
	4 - Agitée	41,2	5,7	19,0	21,9
	5 - Forte	29,4	1,4	11,1	13,9
	6 - Très forte	13,2	0	0	4,5
	7 - Grosse	0	0	0	0
MARS	1 - Ridée	0	0	0	0
	2 - Belle	34,9	49,2	24,7	35,6
	3 - Peu agitée	46,0	50,8	18,2	37,1
	4 - Agitée	19,0	0	39,0	20,5
	5 - Forte	0	0	18,2	6,8
	6 - Très forte	0	0	0	0
	7 - Grosse	0	0	0	0
AVRIL	1 - Ridée	0	0	0	0
	2 - Belle	61,2	64,3	65,7	63,8
	3 - Peu agitée	32,8	35,7	32,9	33,8
	4 - Agitée	6,0	0	1,4	2,4
	5 - Forte	0	0	0	0
	6 - Très forte	0	0	0	0
	7 - Grosse	0	0	0	0
MAI	1 - Ridée	0	0	0	0
	2 - Belle	7,1	62,9	45,5	38,7
	3 - Peu agitée	62,9	37,1	45,5	48,4
	4 - Agitée	28,6	0	5,2	11,1
	5 - Forte	1,4	0	3,9	1,8
	6 - Très forte	0	0	0	0
	7 - Grosse	0	0	0	0
JUIN	1 - Ridée	10,0	21,4	2,9	11,4
	2 - Belle	21,4	78,6	54,3	51,4
	3 - Peu agitée	50,0	0	42,9	30,9
	4 - Agitée	15,7	0	0	5,2
	5 - Forte	2,9	0	0	1,0
	6 - Très forte	0	0	0	0
	7 - Grosse	0	0	0	0

Tabl. 3 - Pourcentages relatifs, décadaires et mensuels, de l'état de la mer du vent pour le premier semestre 1984.

Mois	Mer	1ère décade	2ème décade	3ème décade	Mois entier
JUILLET	1 - Ridée	21,4	0	12,8	11,5
	2 - Belle	54,3	55,7	76,9	62,8
	3 - Peu agitée	24,3	31,4	10,3	21,6
	4 - Agitée	0	11,4	0	3,7
	5 - Forte	0	1,4	0	0,5
	6 - Très forte	0	0	0	0
	7 - Grosse	0	0	0	0
AOUT	1 - Ridée	0	24,3	32,9	19,4
	2 - Belle	41,4	65,7	31,6	45,8
	3 - Peu agitée	54,3	10,0	34,2	32,9
	4 - Agitée	4,3	0	1,3	1,9
	5 - Forte	0	0	0	0
	6 - Très forte	0	0	0	0
	7 - Grosse	0	0	0	0
SEPT.	1 - Ridée	10,0	14,3	0	8,1
	2 - Belle	35,7	44,3	8,6	29,5
	3 - Peu agitée	31,4	34,3	52,9	39,5
	4 - Agitée	20,0	7,1	37,1	21,4
	5 - Forte	2,9	0	1,4	1,4
	6 - Très forte	0	0	0	0
	7 - Grosse	0	0	0	0
OCTOBRE	1 - Ridée	0	0	0	0
	2 - Belle	18,6	57,1	22,1	32,3
	3 - Peu agitée	34,3	21,4	40,3	32,3
	4 - Agitée	31,4	18,6	32,5	27,6
	5 - Forte	12,8	2,9	5,2	6,9
	6 - Très forte	2,9	0	0	0,9
	7 - Grosse	0	0	0	0
NOVEMBRE	1 - Ridée	0	0	0	0
	2 - Belle	20,0	15,7	7,1	14,3
	3 - Peu agitée	45,7	51,4	18,6	38,6
	4 - Agitée	34,3	38,6	38,6	33,8
	5 - Forte	0	4,3	28,6	11,0
	6 - Très forte	0	0	7,1	2,4
	7 - Grosse	0	0	0	0
DECEMBRE	1 - Ridée	0	1,4	0	0,5
	2 - Belle	44,3	20,0	44,2	36,4
	3 - Peu agitée	38,6	40,0	42,9	40,6
	4 - Agitée	17,1	35,7	11,7	21,2
	5 - Forte	0	2,9	1,3	1,4
	6 - Très forte	0	0	0	0
	7 - Grosse	0	0	0	0

Tabl. 4 - Pourcentages relatifs, décadaires et mensuels, de l'état de la mer du vent pour le second semestre 1984.

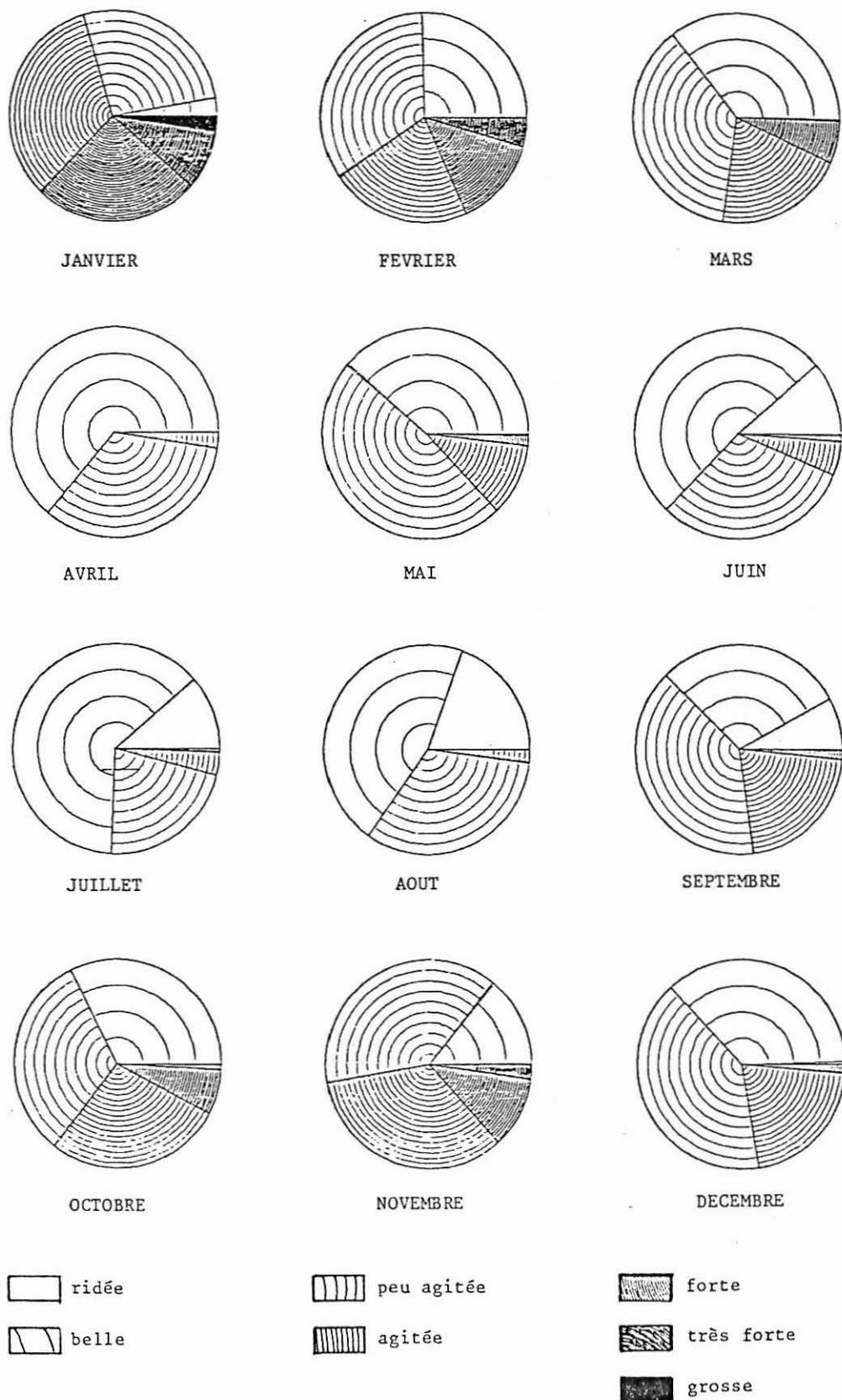


Fig. 9 - Pourcentages relatifs des différents états de la mer pour les mois de 1984.

Par la suite, les coefficients de marées de vives-eaux ont été faibles en juin (84 et 86) et juillet (86 et 78) et ceux de mortes-eaux (57 et 43 en juin ; 60 et 42 en juillet) ont été élevés durant la même période. Il en est résulté un faible brassage des eaux qui a favorisé la multiplication des populations phytoplanctoniques dans les eaux superficielles.

III - LES FACTEURS HYDROLOGIQUES

L'étude des facteurs hydrologiques de la baie de Vilaine, durant l'année 1984, a été abordée dans un double but :

- donner une représentation des distributions spatio-temporelles des paramètres retenus pour en tirer les conséquences sur le cycle de développement du phytoplancton ;
- déterminer les parts respectives des eaux de la Loire et de la Vilaine dans le processus aboutissant aux manifestations d'eaux colorées.

1 - Méthodologie

a) Fréquence des campagnes de prélèvements

Les campagnes de prélèvements ont généralement été réalisées en période de mortes-eaux et au voisinage de la basse mer, à raison de deux fois par mois en été et une le reste de l'année. Toutefois, lors des efflorescences de printemps et d'été, des campagnes supplémentaires ont été effectuées.

Pour mener à bien ce lourd programme, nous avons bénéficié du concours d'Administrations, telles que : Douanes, Affaires Maritimes, Centre Régional Opérationnel de Surveillance et Sécurité de l'Atlantique, qui ont mis gracieusement leurs navires à notre disposition (*).

b) Stratégie de prélèvements

Nous avons effectué des prélèvements d'eau en surface, à 1 m, 3 m, 5 m et toutes les dizaines de mètres ainsi qu'au voisinage du fond, en 20 stations réparties en baie de Vilaine (fig. 11). Certaines sont directement sous l'influence des apports de la Vilaine tandis que d'autres sont affectées par ceux de la Loire.

c) Technique d'échantillonnage

Les prélèvements d'eau, aux différents niveaux, ont été effectués à l'aide de bouteilles à renversement de type Tsurumi.

Nous avons réalisé des analyses pour déterminer :

- les teneurs en oxygène à - 1 m et au fond ;

 (*) Nous adressons nos remerciements à ces différents Services ainsi qu'aux équipages des vedettes Pen Bock, DF 16 Mervent et PM 56 Courlis.

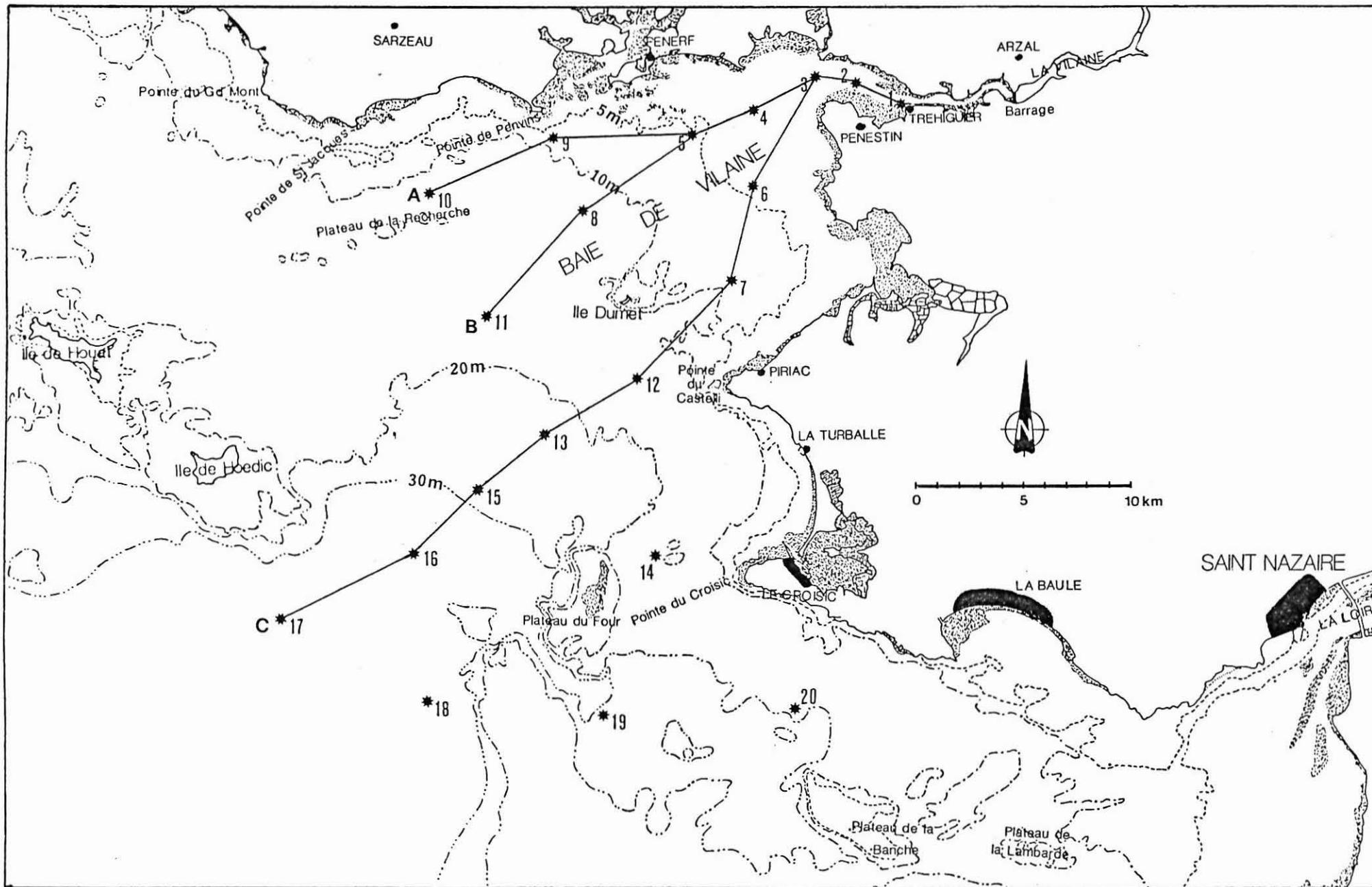


Fig. 11 - Localisation des stations de prélèvements et des radiales d'études.

- la salinité, la température et les teneurs en nitrates, phosphates, nitrites, silicates, chlorophylle a à tous les niveaux considérés.

d) Méthodes analytiques

Pour doser l'oxygène dissous, nous avons utilisé la méthode de WINKLER, décrite en détail par STRICKLAND et PARSONS (1972). Le taux de saturation en oxygène a été calculé en utilisant les Tables Océanographiques Internationales de l'UNESCO. La mesure de la température a été effectuée à l'aide de thermomètre à mercure gradué au 1/10 de degré celcius.

Les salinités ont été analysées sur un salinomètre à induction, type Guildline Autosal, modèle 8 400.

Pour les sels nutritifs, les échantillons, aussitôt passés sur filtres en microfibrilles de verre Whatman GF/C de 0,45 µm de porosité et de 25 mm de diamètre, ont été conservés en flacons de polyéthylène dans la carboglace, puis au congélateur à - 30°C jusqu'à l'analyse. Les teneurs ont été déterminées par dosage colorimétrique en analyse automatique (TREGUER et LE CORRE, 1975) sur Technicon Auto-Analyzer II suivant les méthodes de :

- BENSCHNEIDER et ROBINSON (1952) pour les nitrites,
- WOOD et al. (1967) pour les nitrates,
- MURPHY et RILEY (1962) pour les phosphates,
- FANNING et PILSON (1973) pour les silicates.

Enfin, la chlorophylle a a été dosée selon la méthode de YENTSCH et MENZEL (1963) et calculée d'après les équations de LORENZEN (1966).

2 - Résultats

Nous avons représenté les valeurs obtenues pour les différents paramètres étudiés, au niveau des 16 stations sur des profils bathymétriques correspondants aux radiales A, B et C (cf. fig. 11).

a) Température (fig. 12 à 14)

Jusqu'en mars, les eaux superficielles de la baie de Vilaine sont plus froides (6 à 9°C) que les eaux profondes (9 à 10°C).

Rapidement, en avril, les eaux superficielles s'échauffent et la température de toute la couche d'eau est alors voisine de 10°C.

Les eaux de surface vont se réchauffer brutalement en mai et surtout en juin, et une thermocline saisonnière apparaît en surface. Les eaux superficielles deviennent moins denses et une stratification stable s'installe avec un gradient de 8 à 9°C entre la surface et les fonds de 15 à 35 m.

Les eaux de fond sont alors plus froides que les eaux de surface puisque l'échauffement des eaux superficielles ne se répercute que lentement et partiellement vers le fond.

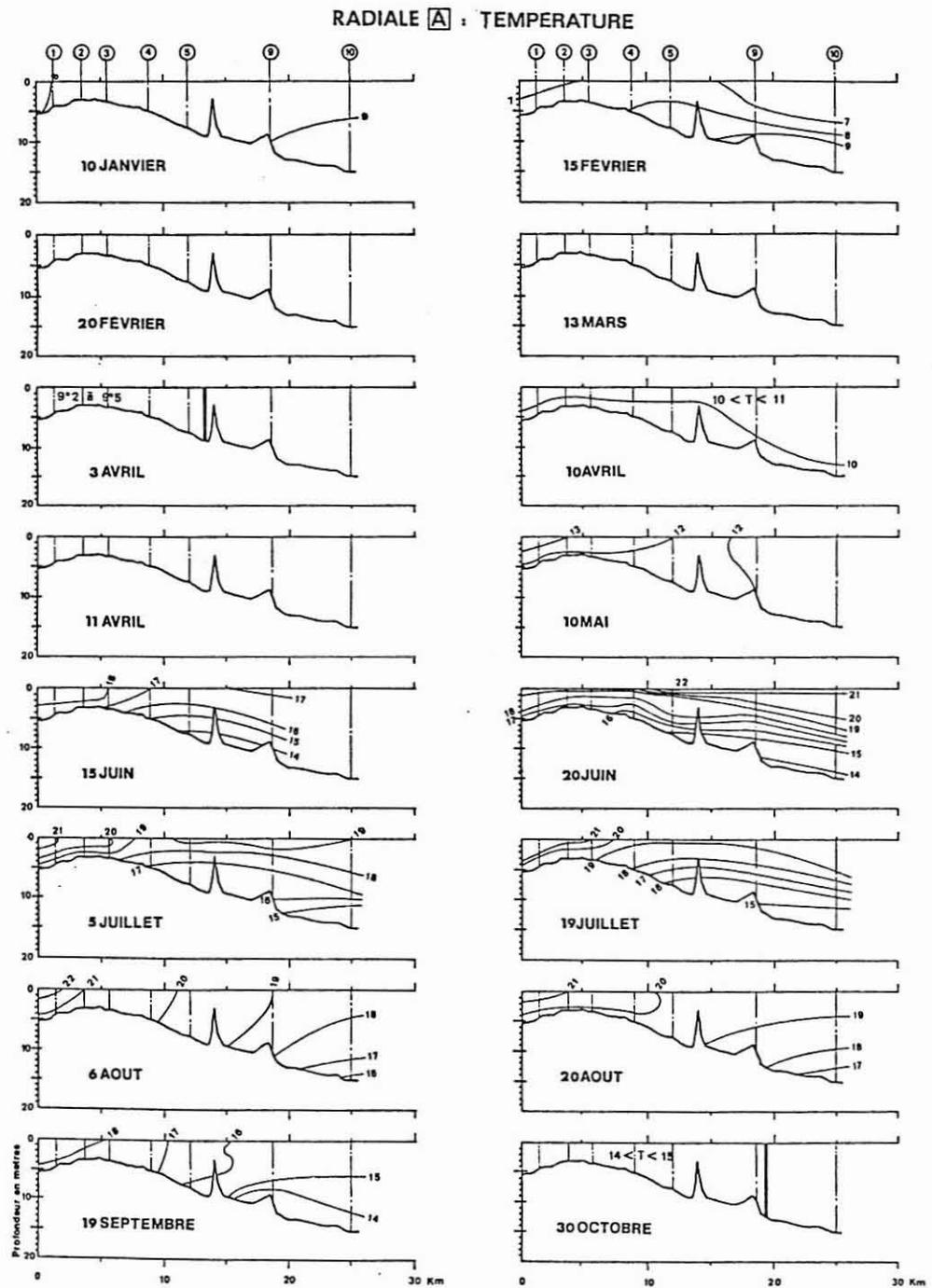


Fig. 12 : Températures, en degrés Celsius, le long de la radiale A (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

RADIALE B : TEMPERATURE

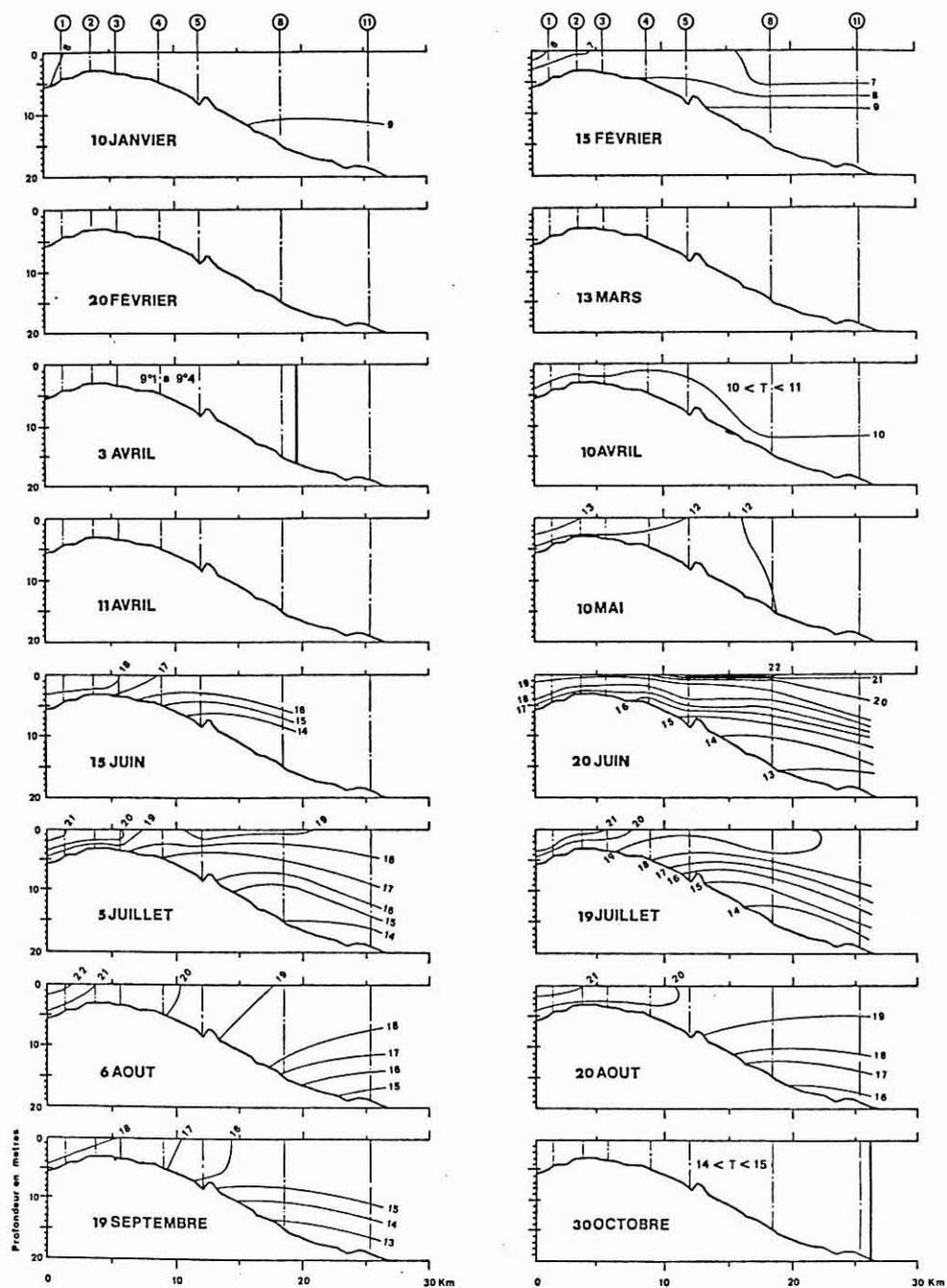


Fig. 13 : Températures, en degrés Celsius, le long de la radiale B (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

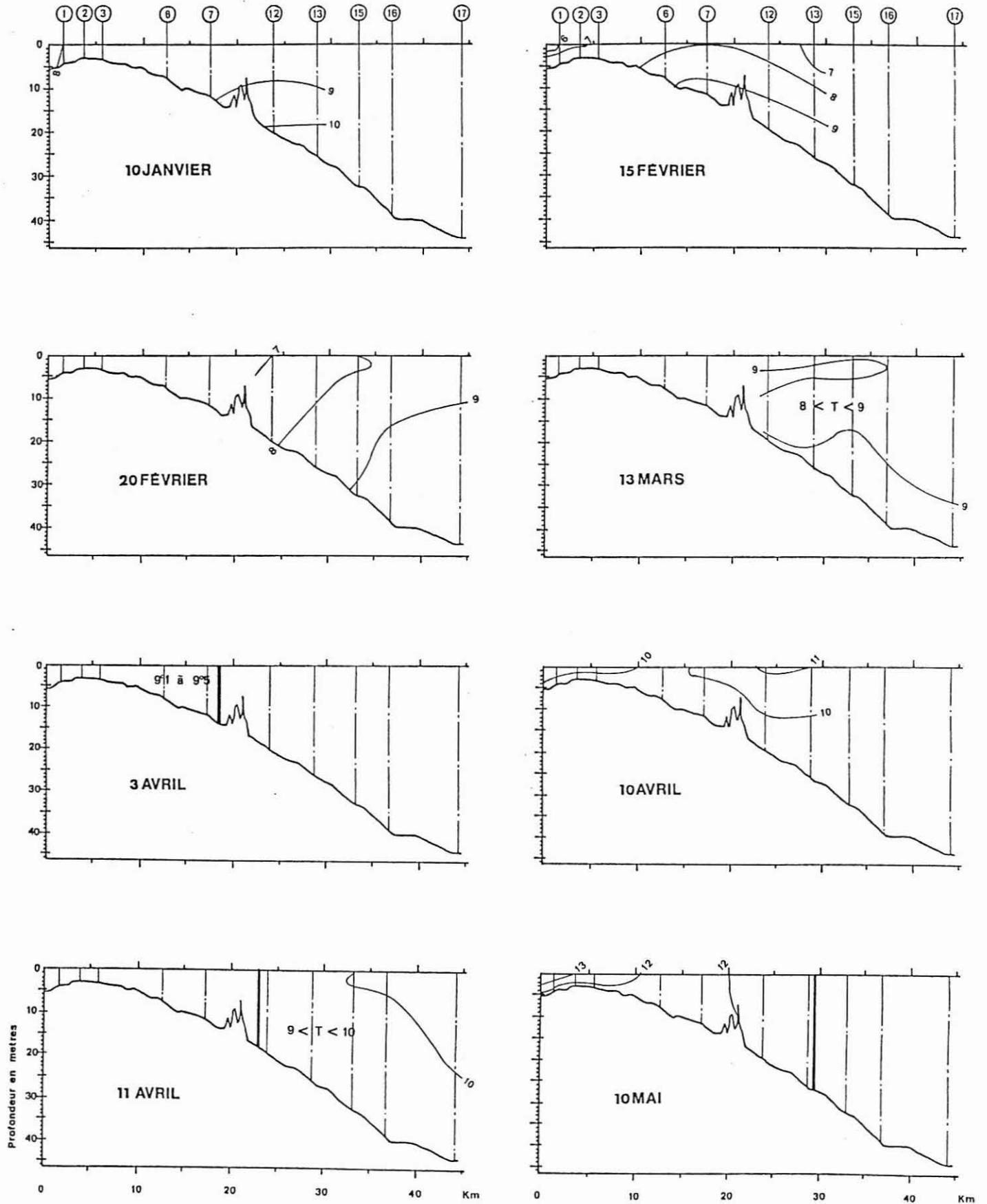


Fig. 14 a : Température, en degrés Celsius, le long de la radiale C (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

RADIALE C : TEMPERATURE

25

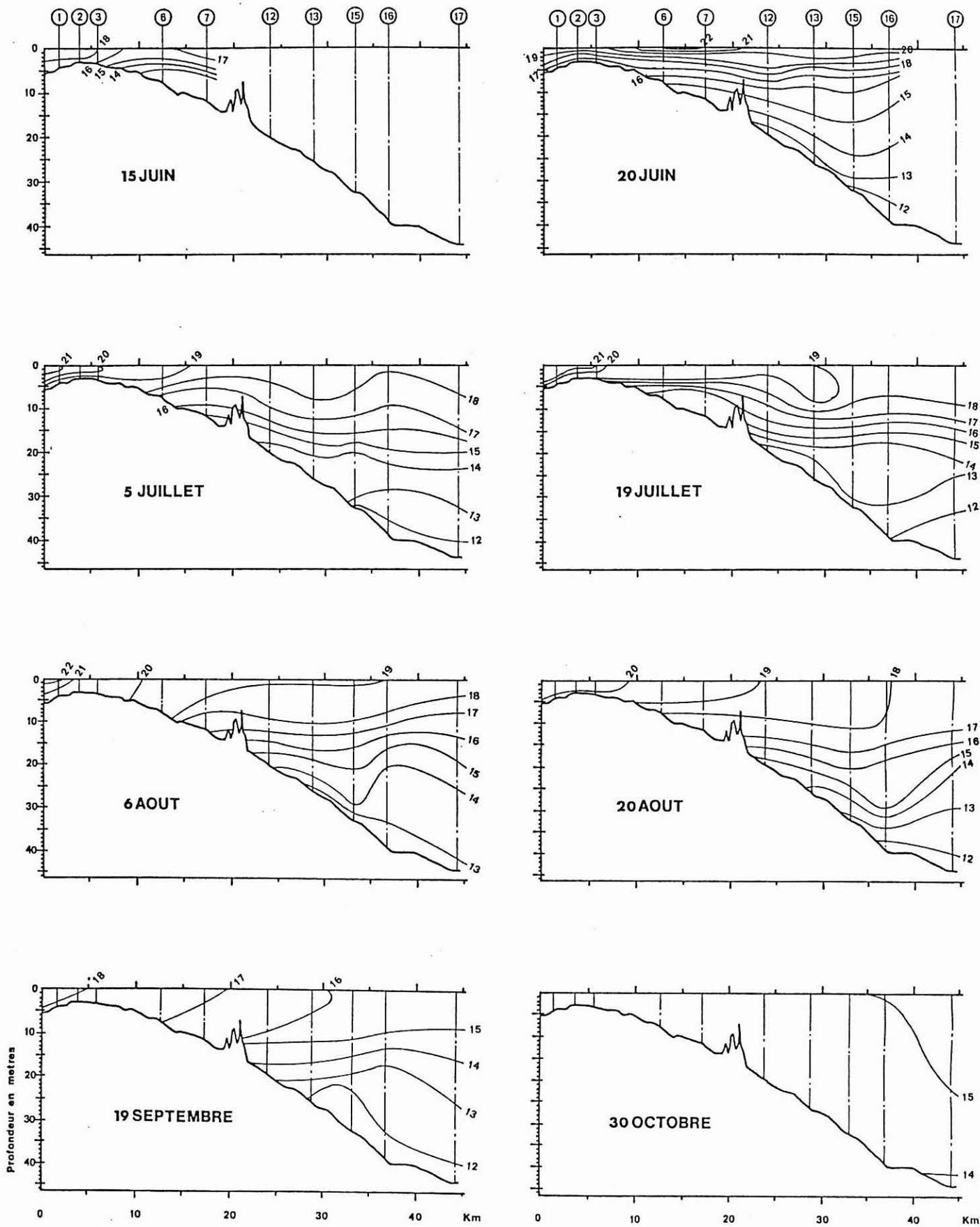


Fig. 14 b : Températures, en degrés Celsius, le long de la radiale C (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

L'échauffement des eaux de surface se poursuit en juillet et août mais la répercussion aux eaux profondes est alors plus rapide, diminuant ainsi la valeur de l'écart thermique entre ces deux niveaux. Toutefois, la stratification thermique demeurera en juillet puis s'estompera progressivement en août pour disparaître en septembre, les eaux de surface se refroidissant et augmentant de densité.

Enfin, en octobre, la totalité de la masse d'eau est à une température moyenne comprise entre 14° et 15°C.

On peut donc retenir qu'en juin s'installe une stratification thermique des eaux qui persistera durant tout l'été, mais, cependant, à aucun moment il n'y aura établissement d'une thermocline fortement marquée.

La stratification thermique des eaux ainsi que l'échauffement important des eaux superficielles observé lors de la campagne du 20 juin freinent les échanges avec la colonne d'eau sous-jacente et favorisent la multiplication du phytoplancton avec apparition d'eaux colorées.

b) Salinité (fig. 15 à 17)

Les fortes pluies de janvier, mars et mai se sont traduites par des dessalures assez importantes dans l'estuaire externe de la Vilaine.

L'effet de dessalure, résultant des apports de la Vilaine, est perceptible jusqu'à plus de 20 km de l'embouchure mais les dessalures constatées en février et avril aux extrémités sud-ouest des radiales B et C, témoignent vraisemblablement d'une influence des apports d'eaux dessalées issues de la Loire qui était en crue.

Ces apports d'eau douce ont conduit à l'établissement d'une stratification haline à un moment où la température de l'eau dépasse les 10°C. Ces conditions seront favorables au développement de la diatomée Skeletonema costatum qui est une espèce à affinité septentrionale ayant une croissance optimale entre 15 et 20 p. 1000 de salinité. Il en résultera une efflorescence phytoplanctonique qui ne durera que quelques jours, du fait de l'agitation de la mer se produisant aussitôt après.

c) Chlorophylle a (fig. 18 à 20)

De janvier à mars, les teneurs en chlorophylle a sont faibles : 0,5 à 1 mg/m³ en moyenne.

Lors du bloom d'avril, les teneurs vont atteindre des valeurs élevées (plus de 10 mg/m³) entre la surface et - 10 m surtout dans le fond de la baie (radiales A et B).

En mai, les teneurs restent importantes : plus de 5 mg/m³, toujours dans toute la baie de Vilaine alors qu'elles sont plus faibles à sa périphérie.

Le bloom estival à diatomées induit des valeurs élevées de chlorophylle a dans toute la baie mais avec un gradient large-estuaire assez net ; le phénomène bien marqué lors des prélèvements du 15 juin, s'atténue au moment de ceux du 20 juin où un gradient de chlorophylle a

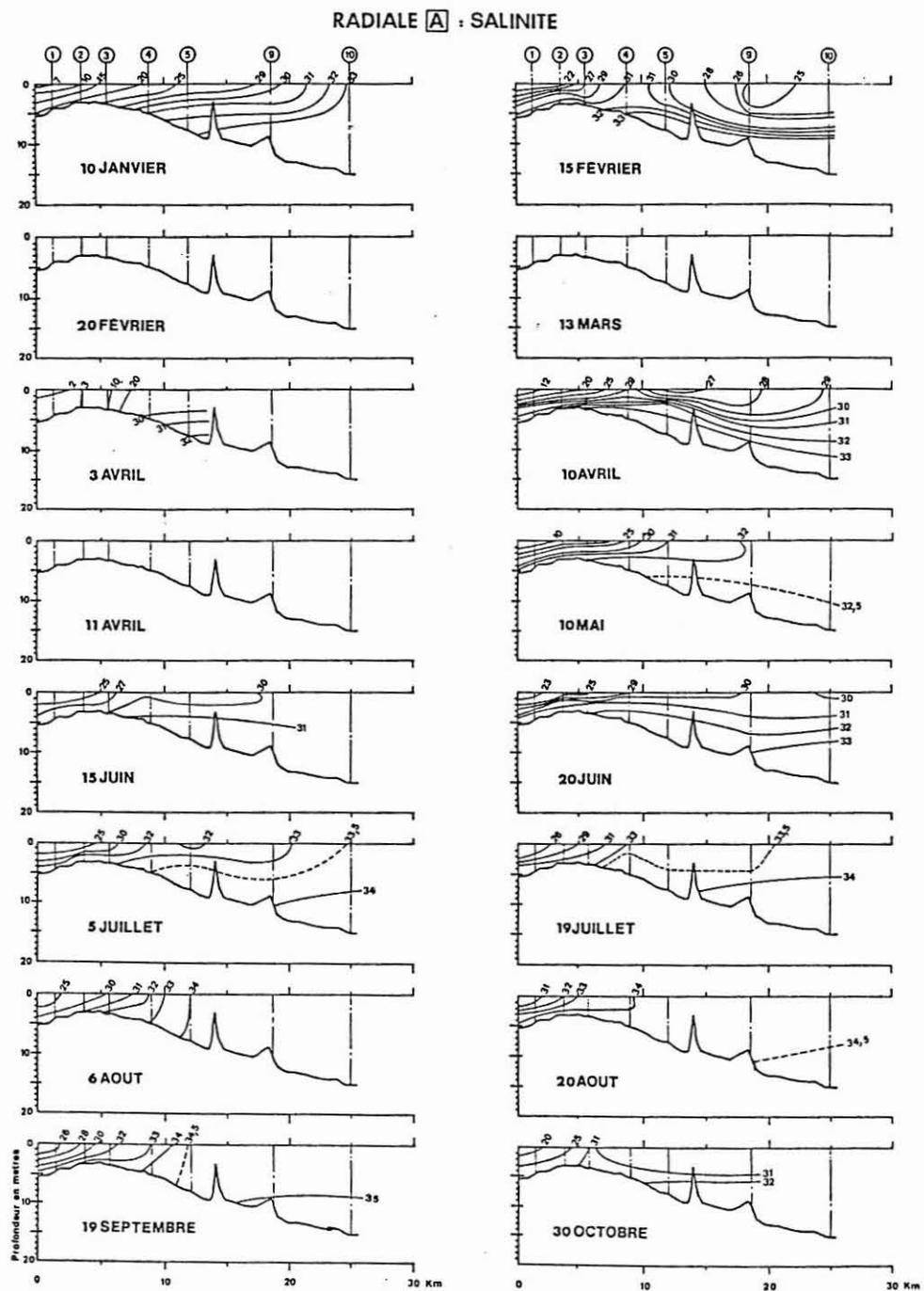


Fig. 15 : Salinités, en g par kg, le long de la radiale A (cf. fig.11), lors des différentes campagnes.

RADIALE B : SALINITE

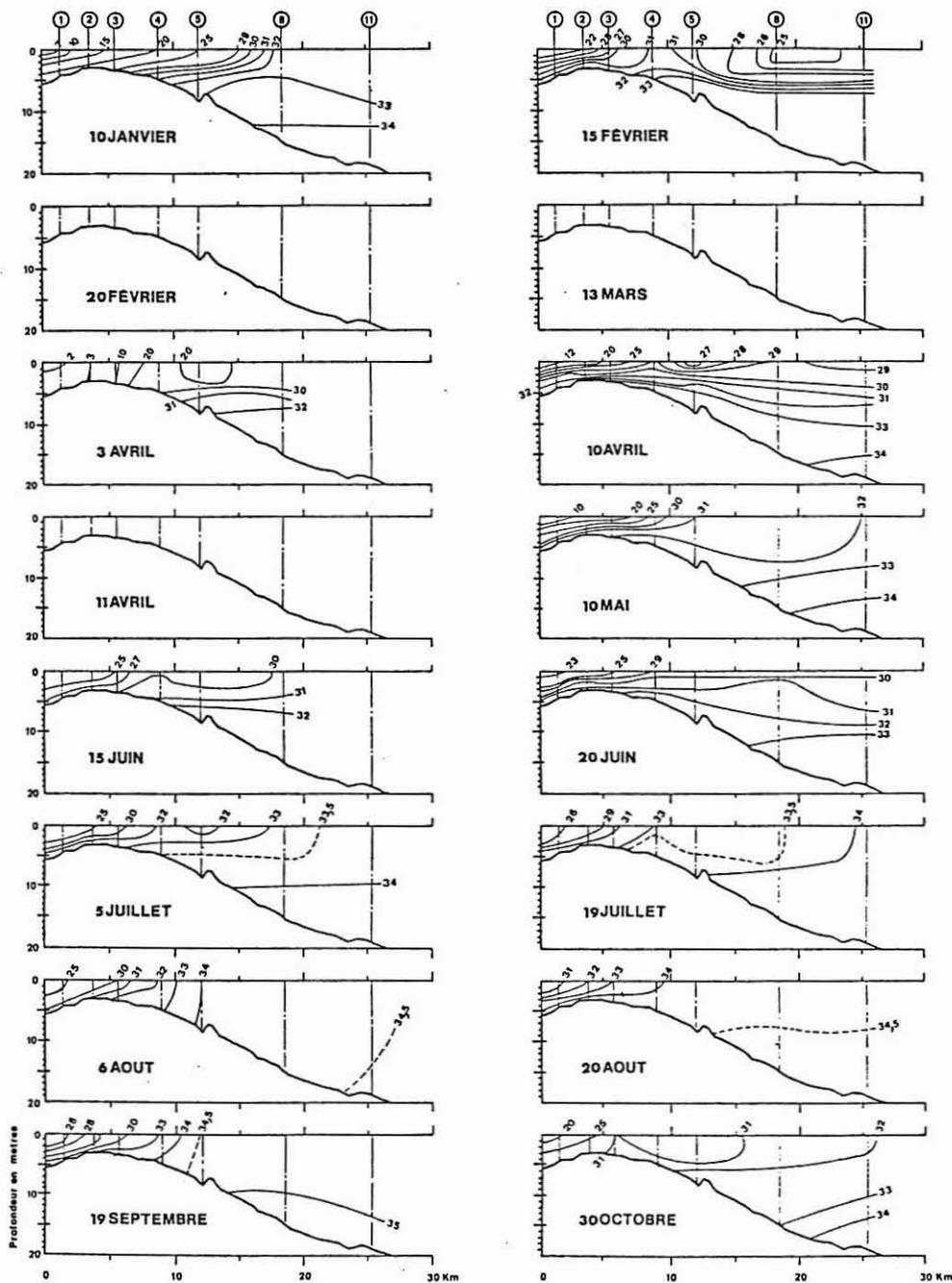


Fig. 16 : Salinités, en g par kg, le long de la radiale B (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

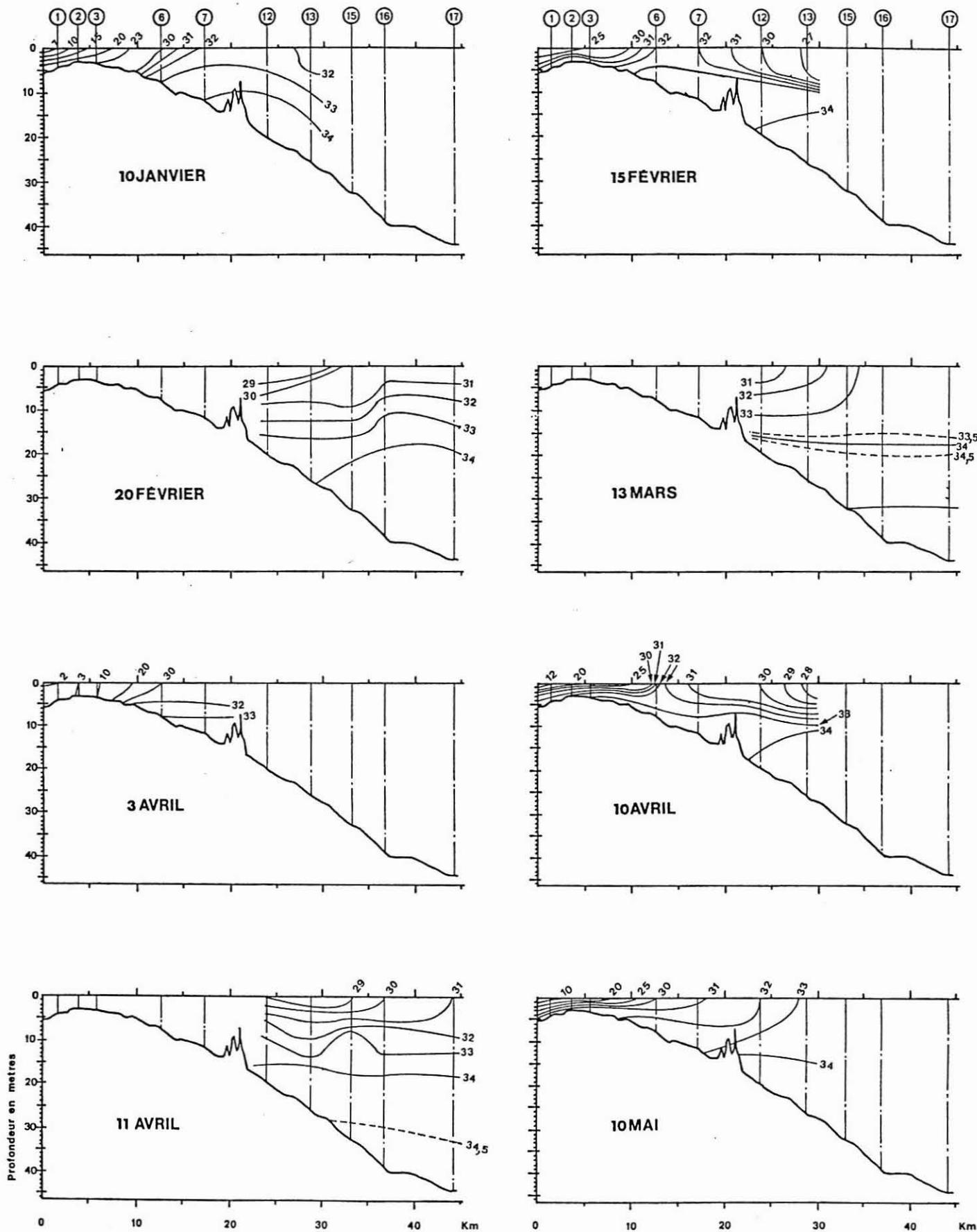


Fig. 17 a : Salinités, en g par kg, le long de la radiale C (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

RADIALE C : SALINITE

30

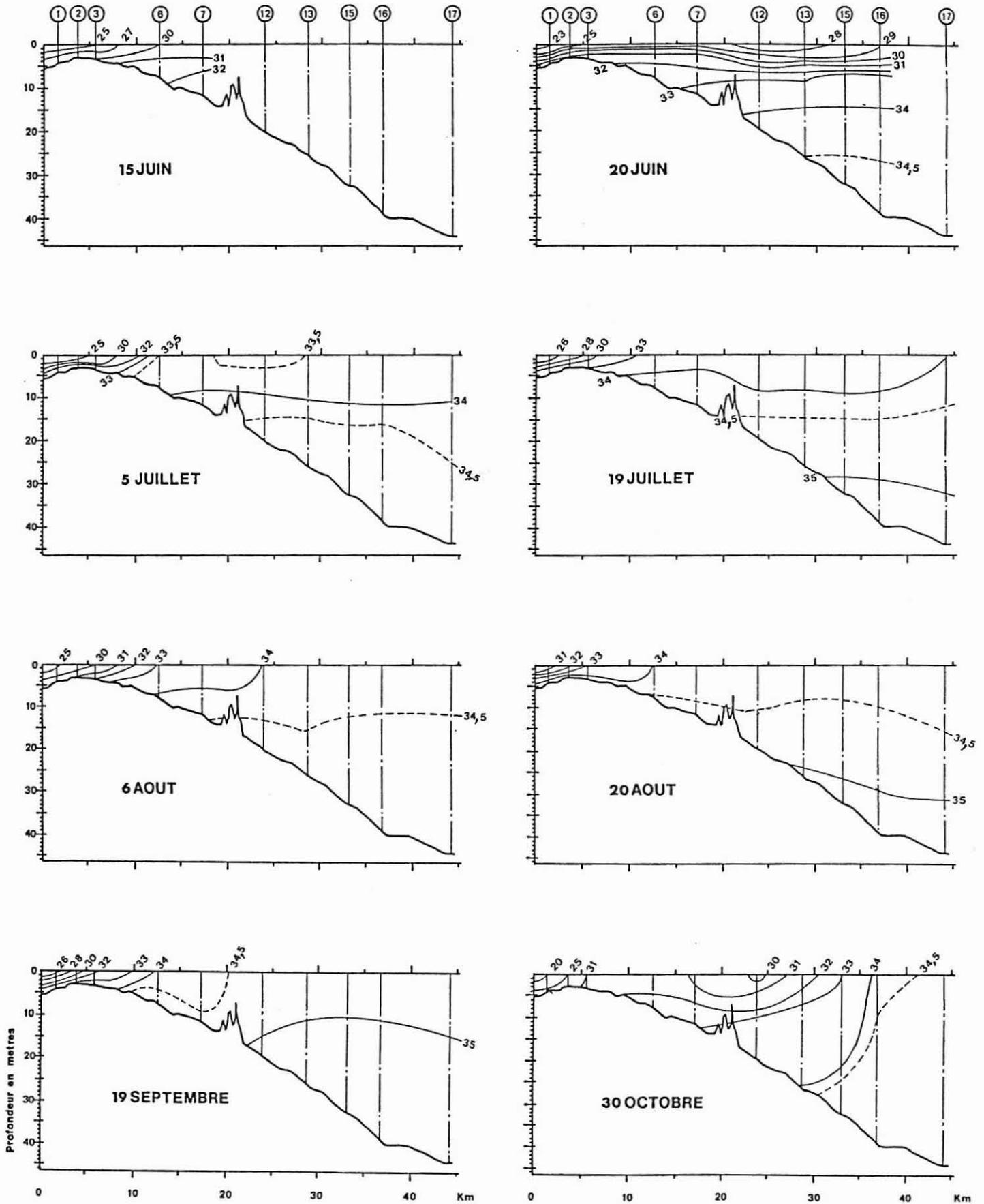


Fig. 17 b : Salinités, en g par kg, le long de la radiale C (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

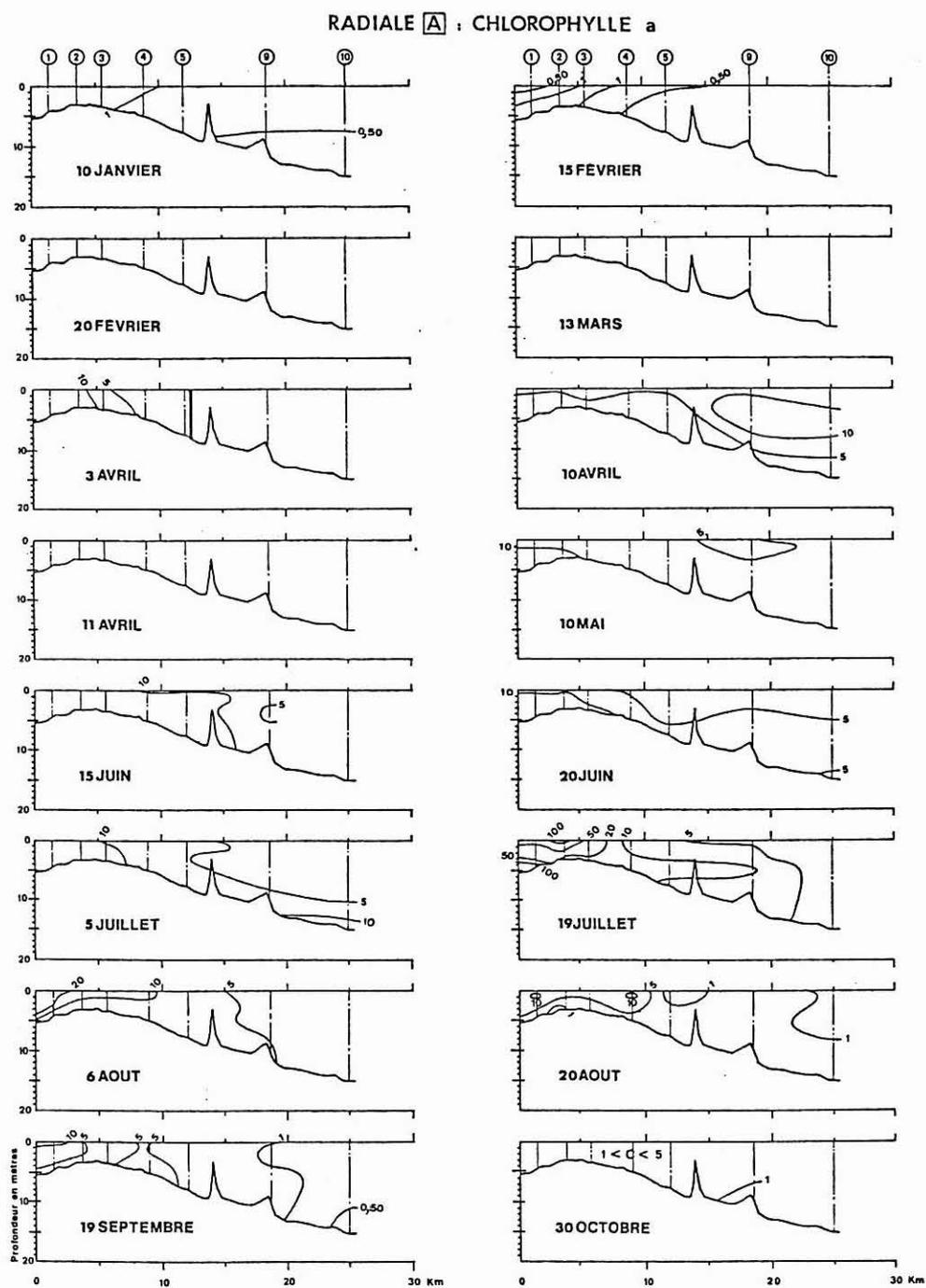


Fig. 18 : Teneurs en chlorophylle a, en mg/m^3 , le long de la radiale A (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

RADIALE B : CHLOROPHYLLE a

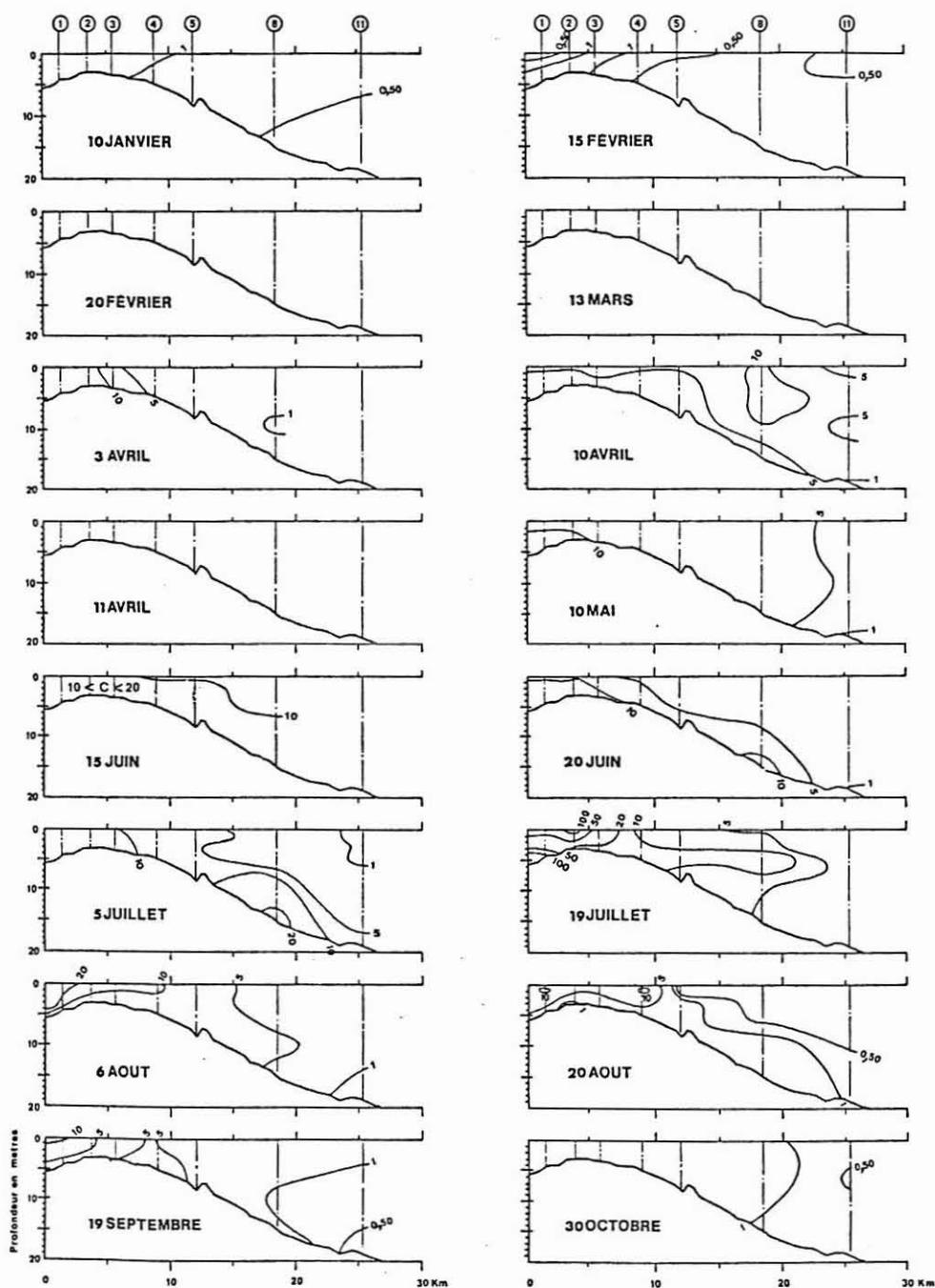


Fig. 19 : Teneurs en chlorophylles a, en mg/m^3 , le long de la radiale B (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

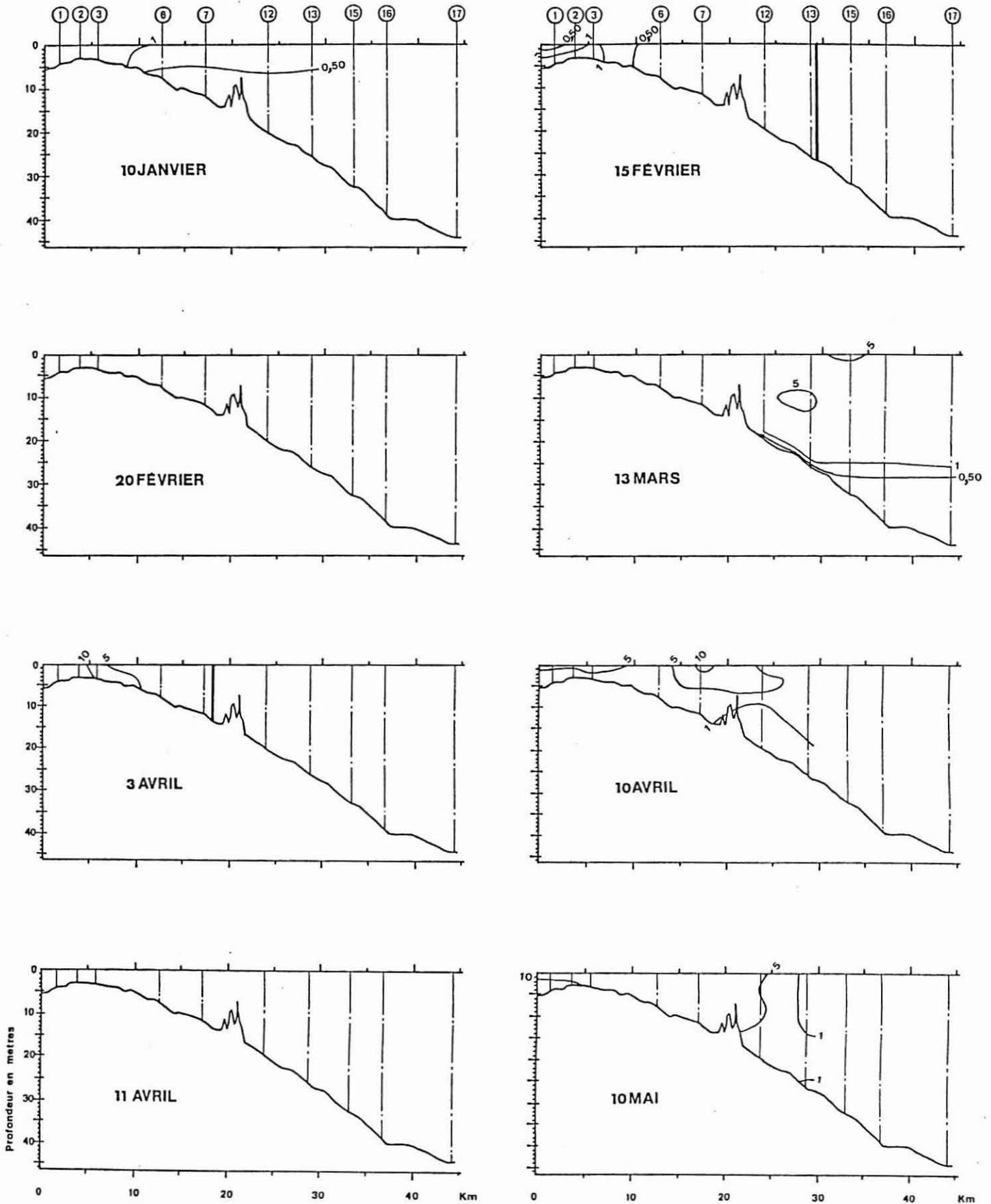


Fig. 20 a : Teneurs en chlorophylle a, en mg/m^3 , le long de la radiale C (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

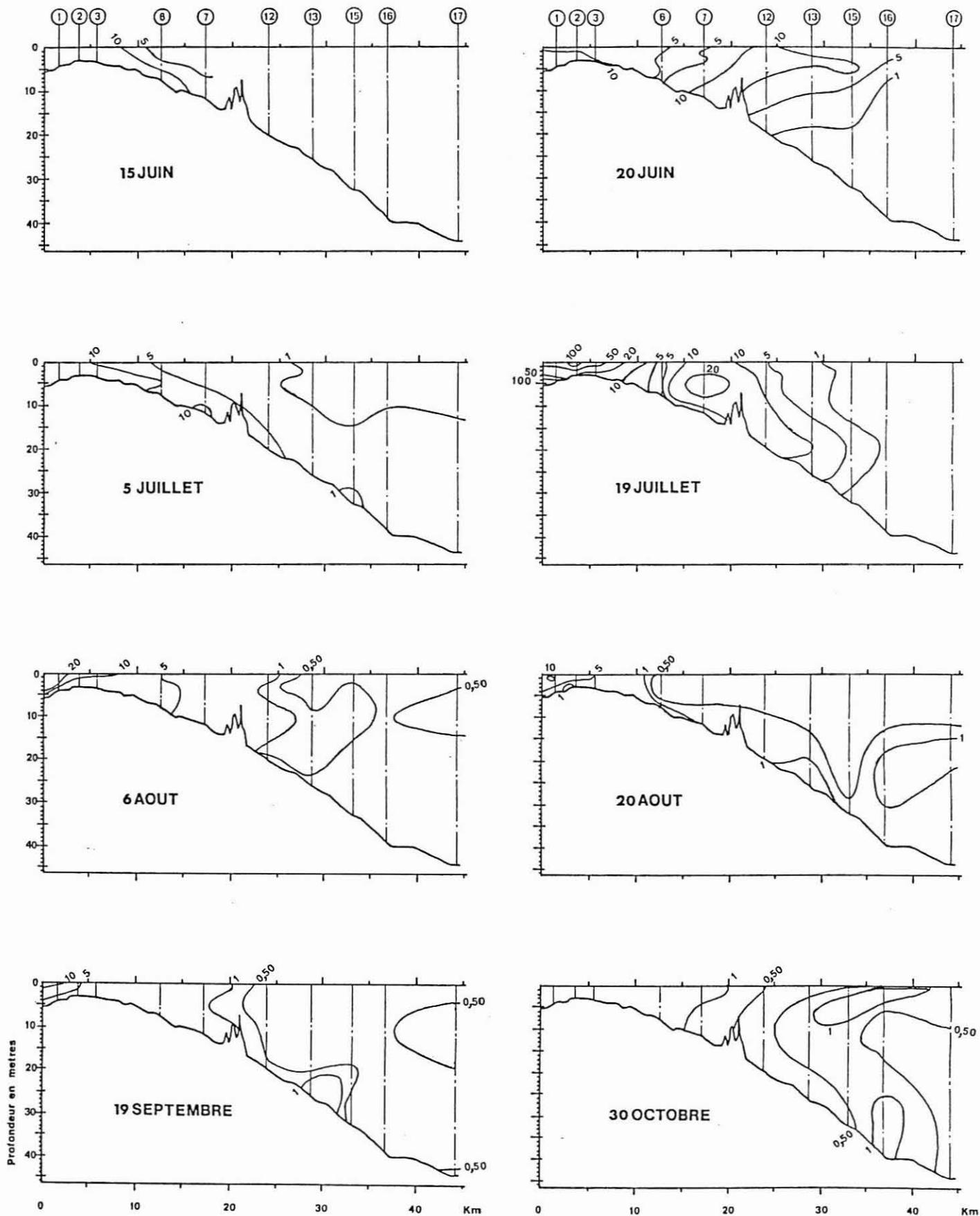


Fig. 20 b : Teneurs en chlorophylle a, en mg/m³, le long de la radiale C (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

entre la surface et le fond semble indiquer une régression des populations phytoplanctoniques dans les eaux de surface et une accumulation de matériel végétal au voisinage du fond ; ceci est très visible sur les radiales A et B et persiste lors de la sortie du 5 juillet.

Ensuite, jusqu'au début août, les teneurs en chlorophylle a deviennent importantes dans toute la couche d'eau de la baie de Vilaine et surtout de l'estuaire où l'on note des valeurs supérieures à 100 mg/m^3 . A la périphérie de la baie, les valeurs faibles (moins de 5 mg/m^3) témoignent de l'intrusion des eaux océaniques à 34-35 p. 1000 plus pauvres. Cet appauvrissement chlorophyllien va s'accroître à partir d'août du fait de la pénétration accrue des eaux océaniques pauvres dans presque toute la baie.

d) Nitrates (fig. 21 à 23)

Les nitrates représentent la forme la plus stable et la plus abondante de l'azote minéral : c'est l'élément le plus important pour la croissance des organismes phytoplanctoniques.

Les nitrates sont très abondants, surtout dans les eaux superficielles, de l'automne jusqu'au début de l'été avec des valeurs souvent supérieures à $10 \mu\text{mol.l}^{-1}$ et pouvant dépasser $200 \mu\text{mol.l}^{-1}$ aux stations les plus estuariennes après des périodes à fortes pluviosités. Le lessivage des sols agricoles doit, en grande partie, être responsable de cet important enrichissement.

L'efflorescence printanière à diatomées Skeletonema costatum n'a consommé qu'une faible partie des nitrates car elle a été brève et localisée. Par contre, le bloom estival à diatomées de petite taille va conduire à un appauvrissement très marqué des nitrates dans les eaux superficielles : les teneurs seront alors inférieures à $1 \mu\text{mol.l}^{-1}$ durant tout l'été ; de nombreuses analyses donneront même des valeurs inférieures au seuil de détection de la méthode analytique utilisée ($0,1 \mu\text{mol.l}^{-1}$), en juillet et août, au sein d'une grande masse d'eaux superficielles. C'est le développement des dinoflagellés, postérieur à la décroissance des populations de diatomées, qui contribuera à achever l'épuisement du stock de nitrates disponible. Ce stock, au plus bas en août, se reconstitue partiellement. Cependant, dès juillet, dans les eaux profondes du fait de l'intense activité bactérienne qui concourt à la minéralisation des cadavres d'organismes phytoplanctoniques tombés sur le fond (cf. fig. 23 b).

Enfin, dès septembre, les apports telluriques amèneront, dans le milieu, de grandes quantités de nitrates qui viendront reconstituer le stock à une période où la consommation par le phytoplancton devient faible.

e) Nitrites (fig. 24 à 26)

Au sein du cycle de l'azote, les nitrites tiennent une place particulière : ils représentent les formes intermédiaires de l'oxydation de l'azote organique en nitrates.

Les nitrites sont, habituellement, présents dans l'eau de mer à de faibles concentrations : moins de $1 \mu\text{mol.l}^{-1}$.

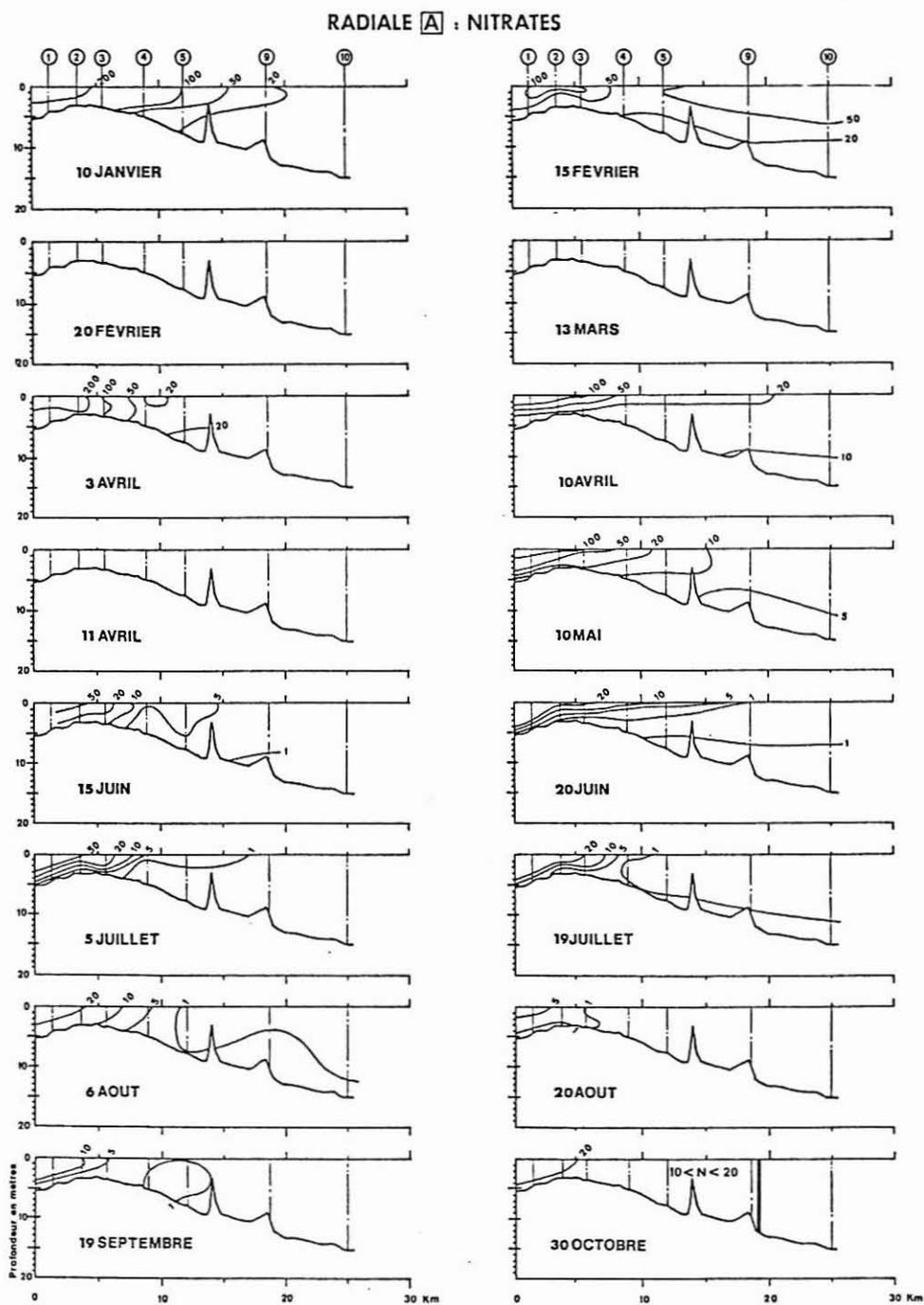


Fig. 21 : Teneurs en nitrates, exprimées en $\mu\text{mol.l}^{-1}$, le long de la radiale A (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

RADIALE B : NITRATES

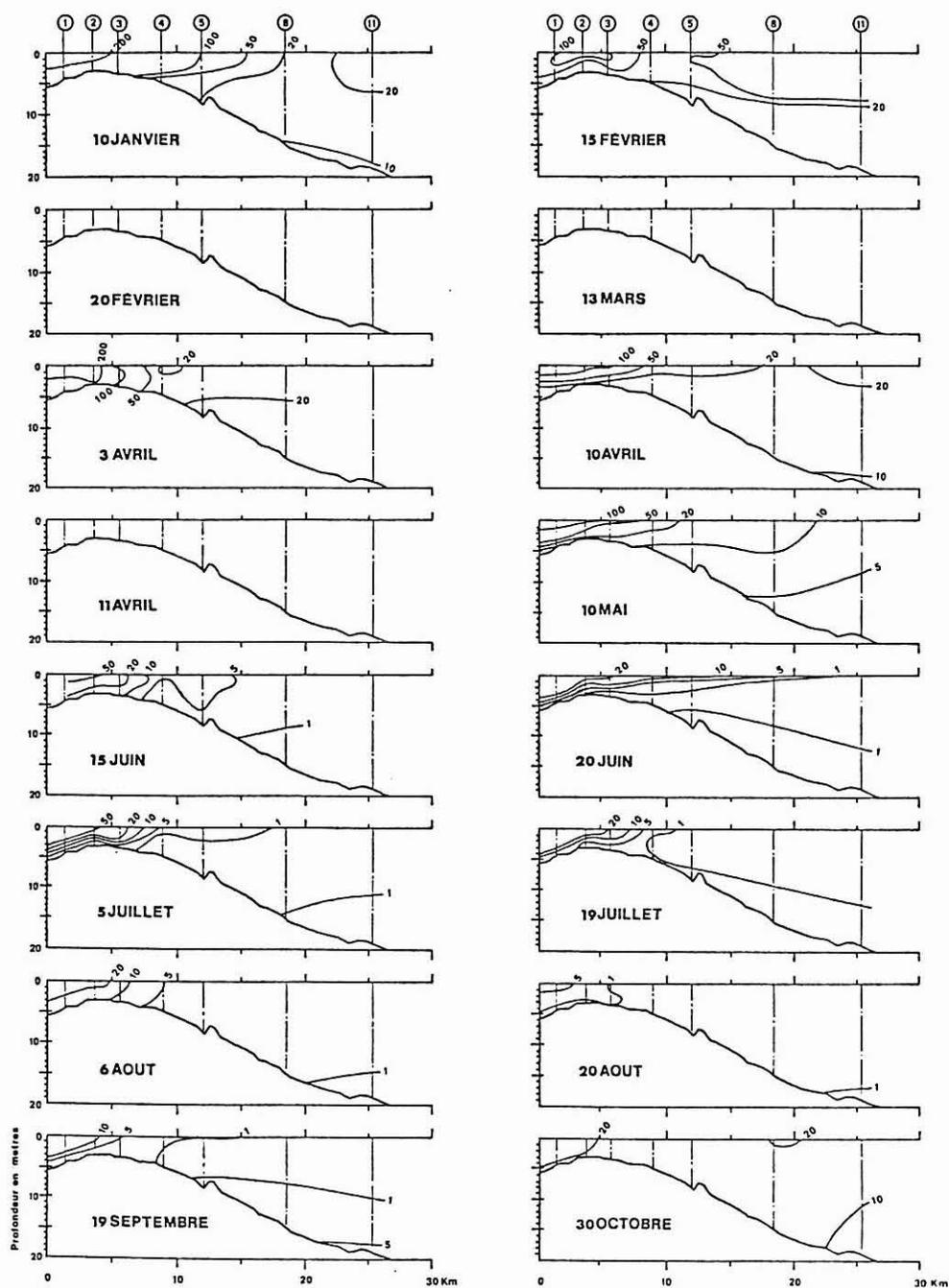


Fig. 22 : Teneurs en nitrates, exprimées en $\mu\text{mol.l}^{-1}$, le long de la radiale B (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

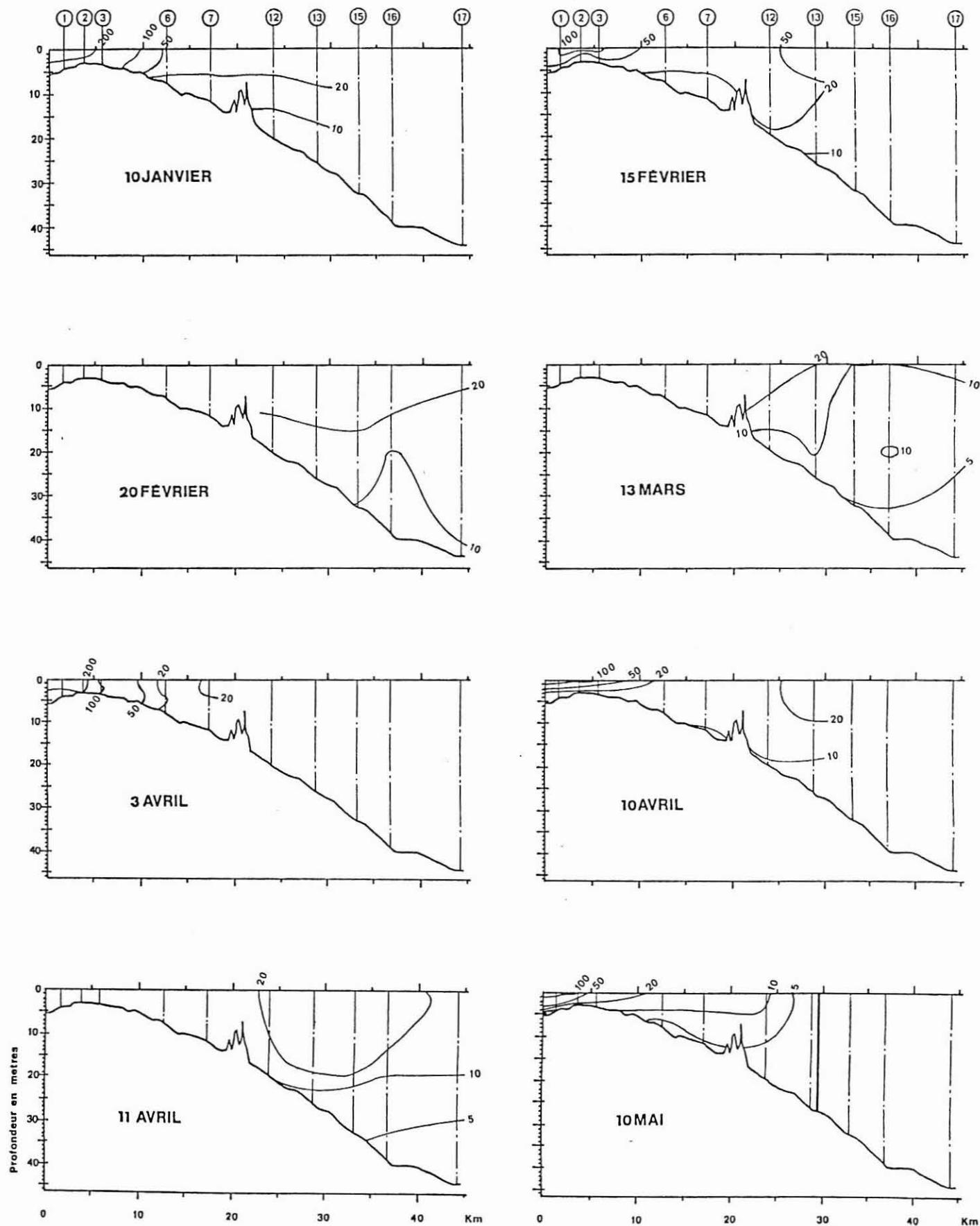


Fig. 23 a : Teneurs en nitrates, exprimées en $\mu\text{mol.l}^{-1}$ le long de la radiale C (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

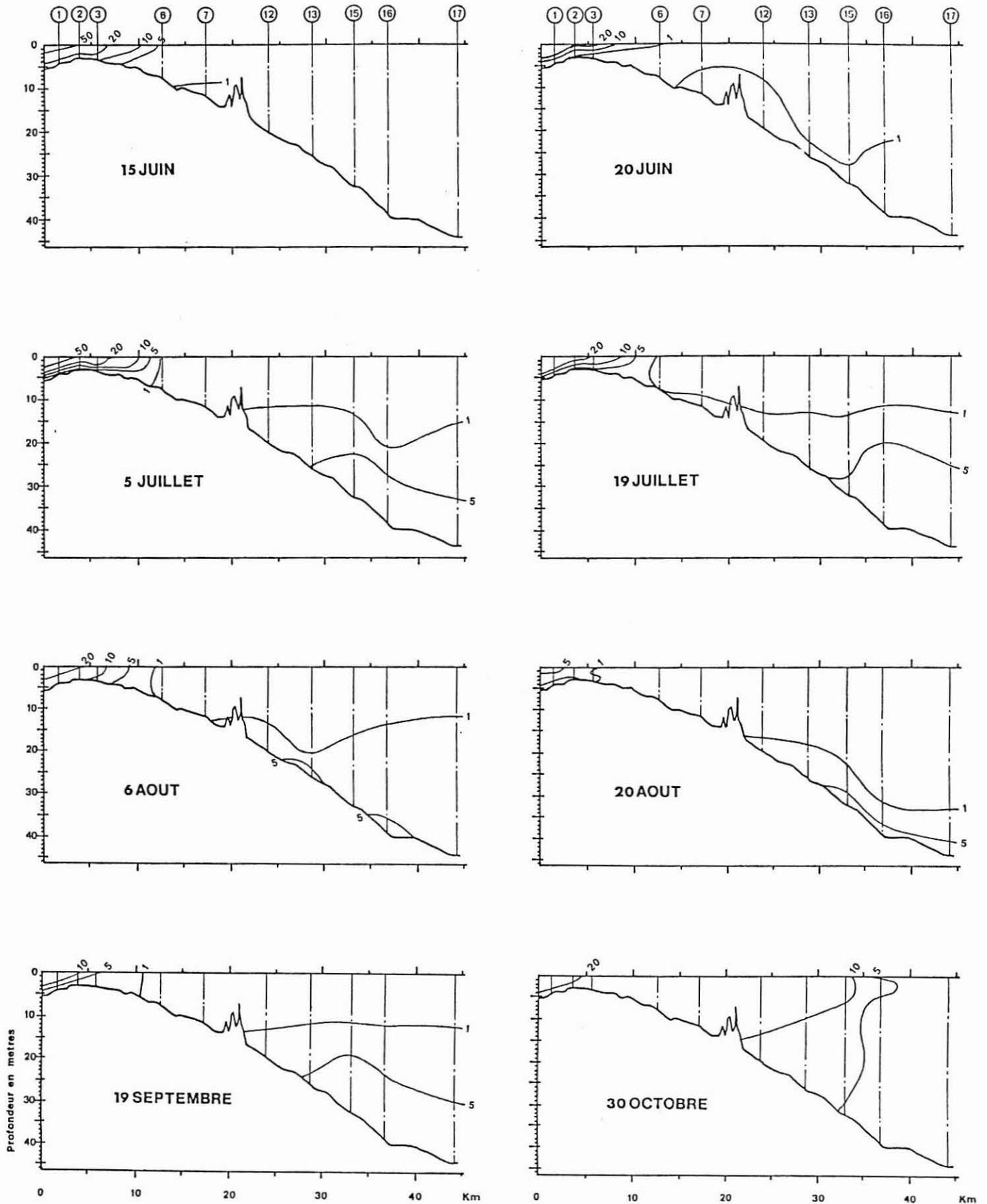


Fig. 23 b : Teneurs en nitrates, exprimées en $\mu\text{mol.l}^{-1}$, le long de la radiale C (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

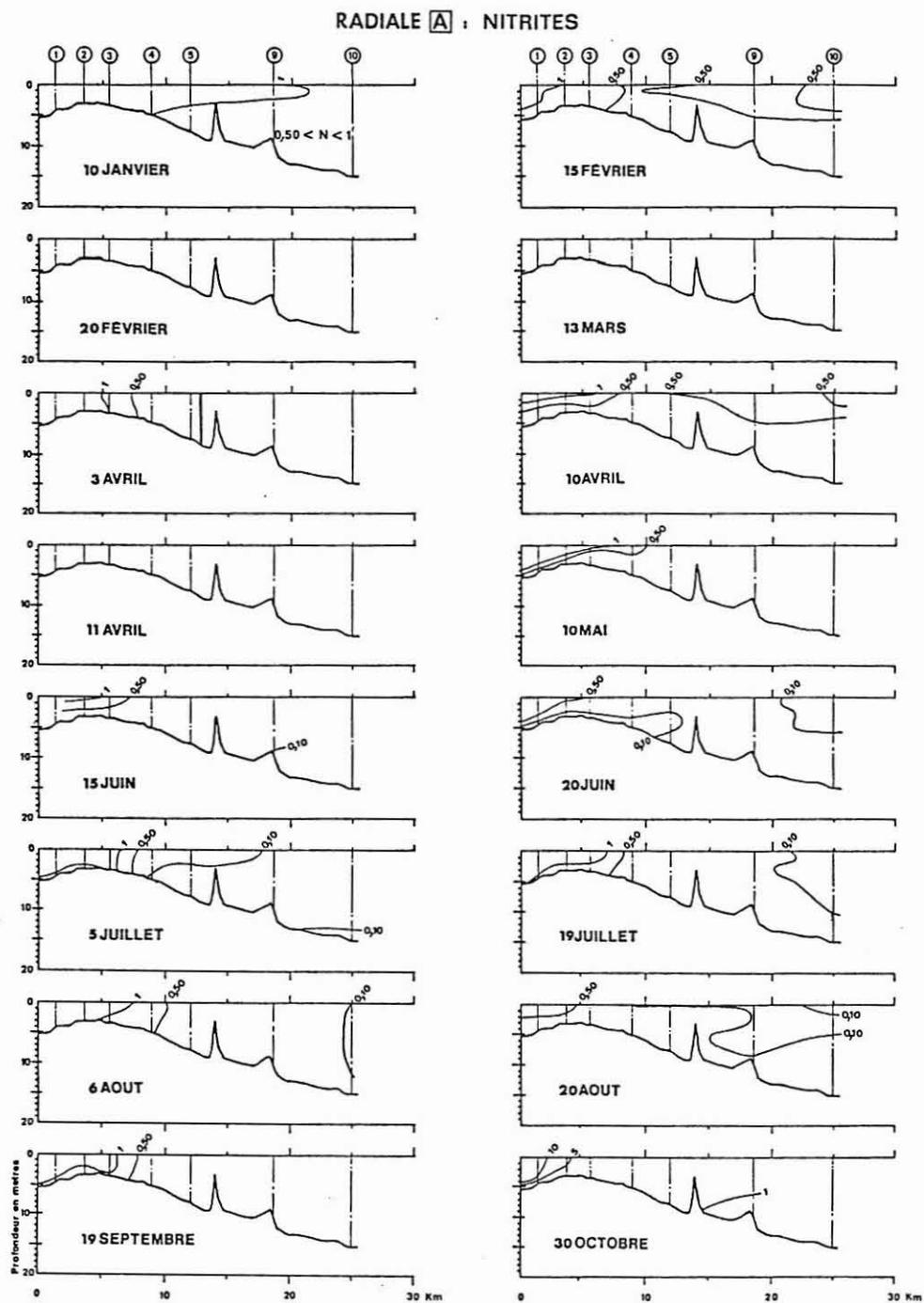


Fig.24 : Teneurs en nitrites, exprimées en $\mu\text{mol.l}^{-1}$, le long de la radiale A (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

RADIALE B : NITRITES

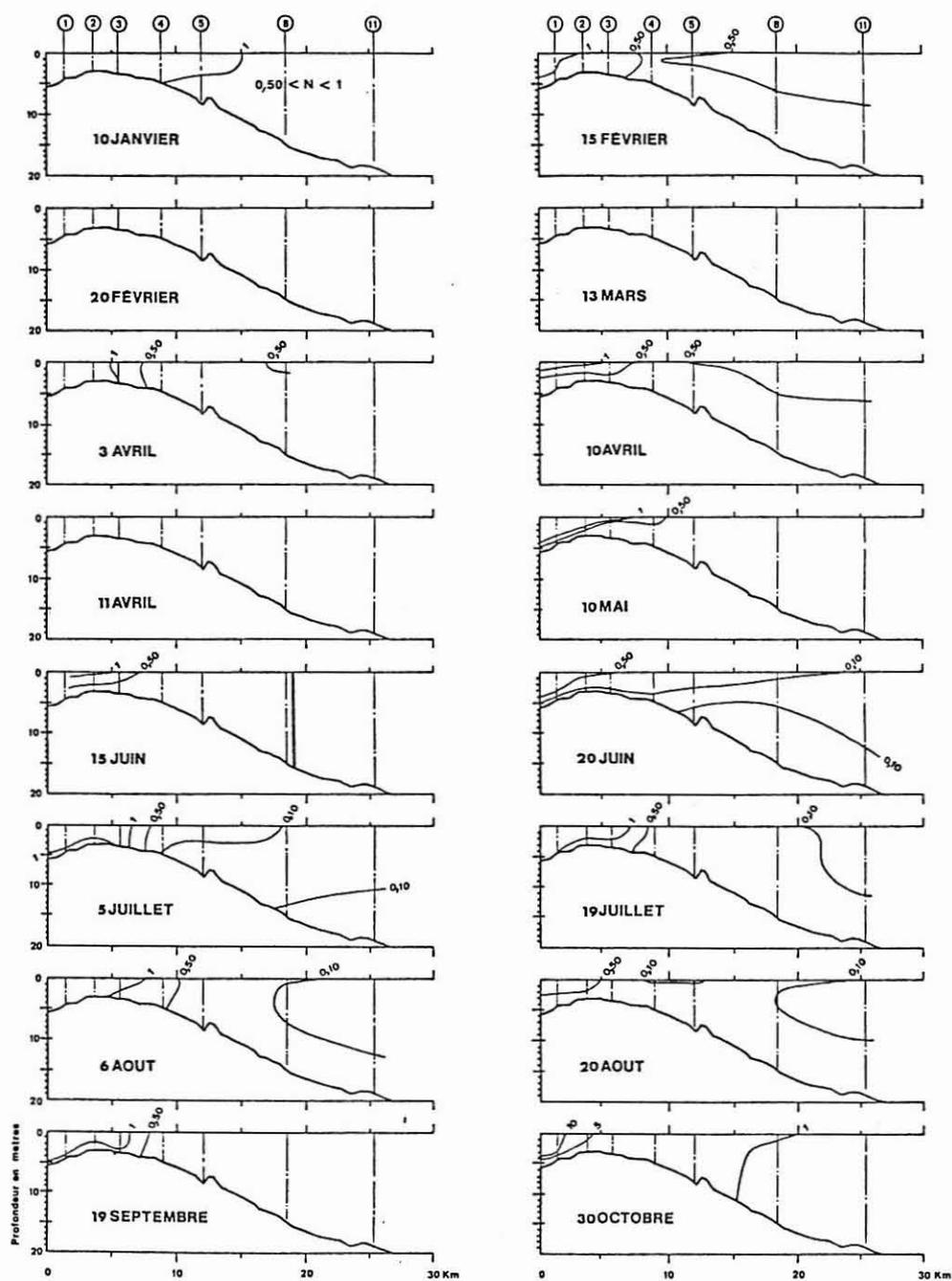


Fig. 25 : Teneurs en nitrites, exprimées en $\mu\text{mol.l}^{-1}$, le long de la radiale B (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

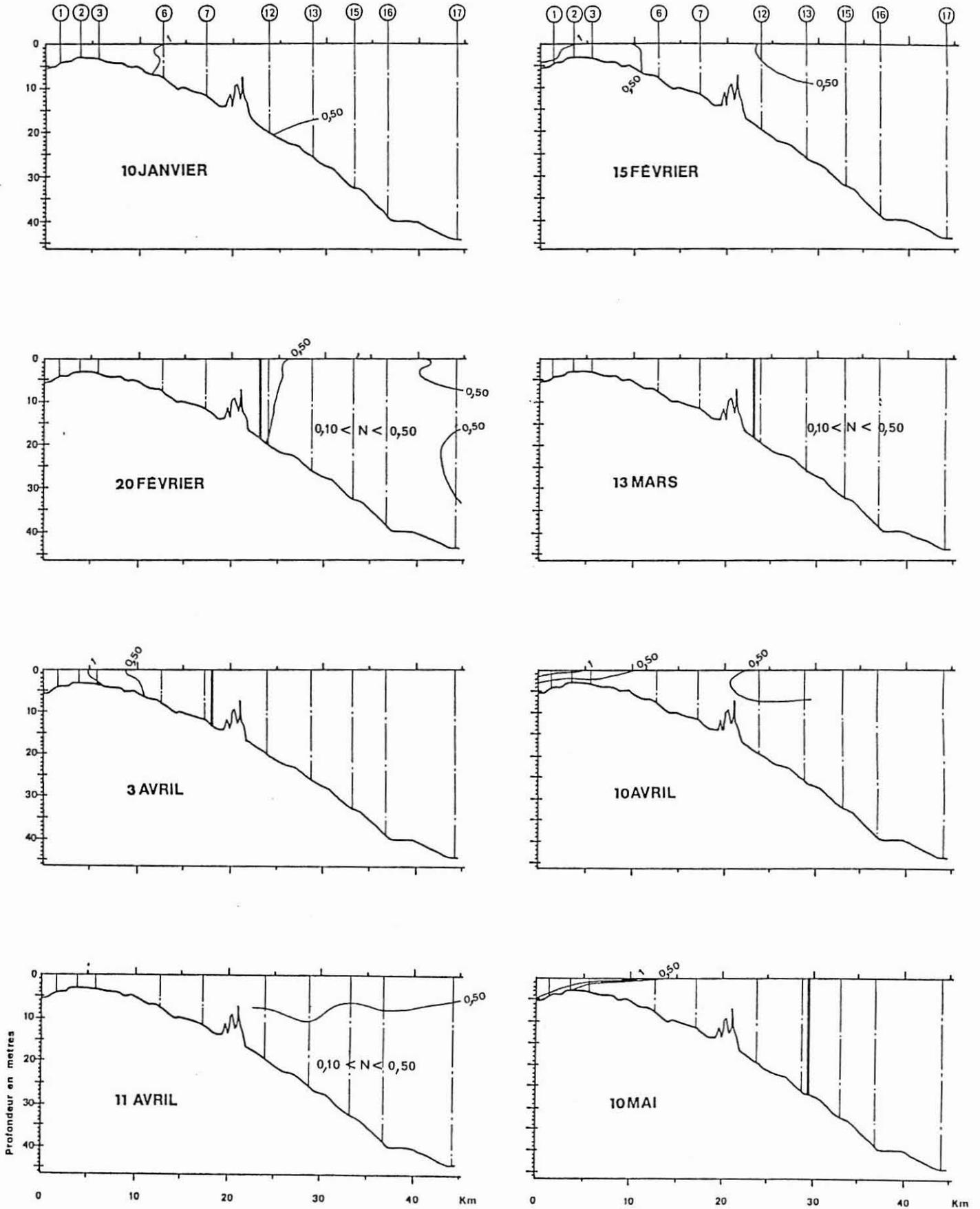


Fig. 26 a : Teneurs en nitrites, exprimées en $\mu\text{mol.l}^{-1}$, le long de la radiale C (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

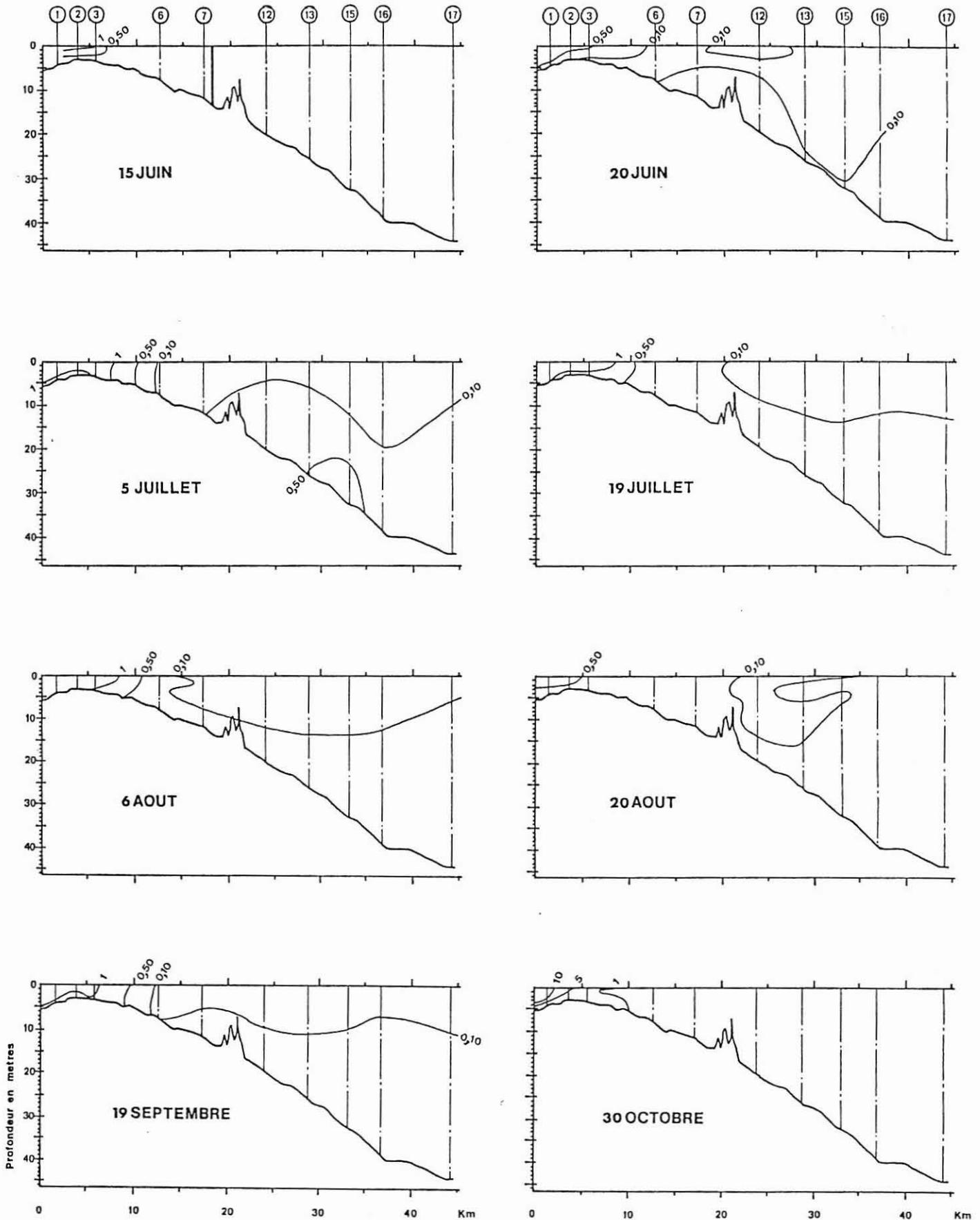


Fig. 26 b : Teneurs en nitrites, exprimées en $\mu\text{mol.l}^{-1}$, le long de la radiale C (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

En baie de Vilaine, les valeurs de nitrites, les plus élevées, ont été relevées en janvier et en octobre dans la zone directement sous l'influence de la Vilaine. En janvier, la zone à concentrations comprises entre 1 et 5 $\mu\text{mol.l}^{-1}$ correspond au panache de dilution de la Vilaine, le long de la côte du Morbihan ; ces apports sont à relier aux pluies de décembre 1983 et janvier 1984. En octobre on observe la même situation de cette zone (caractérisée par des teneurs oscillant entre 1 et 5 $\mu\text{mol.l}^{-1}$) mais plus étendue qu'en janvier et aussi des concentrations exceptionnellement élevées en estuaire (de l'ordre de 10 $\mu\text{mol.l}^{-1}$) ; on peut également attribuer ces apports à la période pluvieuse qui a débuté le 21 août et s'est terminée fin octobre.

Jusqu'en mai, les teneurs en nitrites des eaux de la baie de Vilaine sont voisines de 0,50 $\mu\text{mol.l}^{-1}$; ensuite, durant tout l'été, elles chuteront au dessous de 0,10 $\mu\text{mol.l}^{-1}$, vraisemblablement du fait de l'accélération des mécanismes d'oxydation des nitrites en nitrates avec l'augmentation de la température de l'eau de mer.

f) Phosphates (fig. 27 à 29)

Les orthophosphates représentent la forme minérale majoritaire du phosphore dissous dans l'eau de mer.

Les teneurs les plus élevées se rencontrent en janvier et en octobre dans la zone d'influence de la Vilaine ; tout comme pour les nitrites, ceci est probablement à corréliser avec les précipitations atmosphériques importantes des deux mois considérés.

Jusqu'au début avril, les teneurs en phosphates des eaux de la baie sont voisines de 1 $\mu\text{mol.l}^{-1}$ puis, courant avril, l'efflorescence à diatomée Skeletonema costatum s'accompagne d'une consommation intense des phosphates dont les teneurs tombent au dessous de 0,25 $\mu\text{mol.l}^{-1}$. Cette chute du stock de phosphates va se poursuivre avec le bloom de juin, pour atteindre des valeurs inférieures à 0,05 $\mu\text{mol.l}^{-1}$ à de nombreuses stations, durant tout l'été.

Un début de reconstitution du stock de phosphates apparaît pendant l'été, d'une part par remise en solution à partir de sédiments vaseux et, d'autre part, par minéralisation de la matière organique des cadavres de phytoplanctons.

g) Silicates (fig. 30 à 32)

La silice dissoute est un élément nutritif important puisqu'il entre dans la composition des frustules des diatomées pour plus de 60 % de leur fraction minérale (PARSONS et al., 1961).

Les eaux océaniques superficielles ont des teneurs en silicates basses : moins de 1 $\mu\text{mol.l}^{-1}$. Les eaux côtières, au contraire, enrichies par les apports fluviaux, peuvent avoir des teneurs élevées : plus de 100 $\mu\text{mol.l}^{-1}$.

En janvier, des concentrations très élevées en silicates sont observées aux stations estuariennes (plus de 100 $\mu\text{mol.l}^{-1}$) jusqu'en mars.

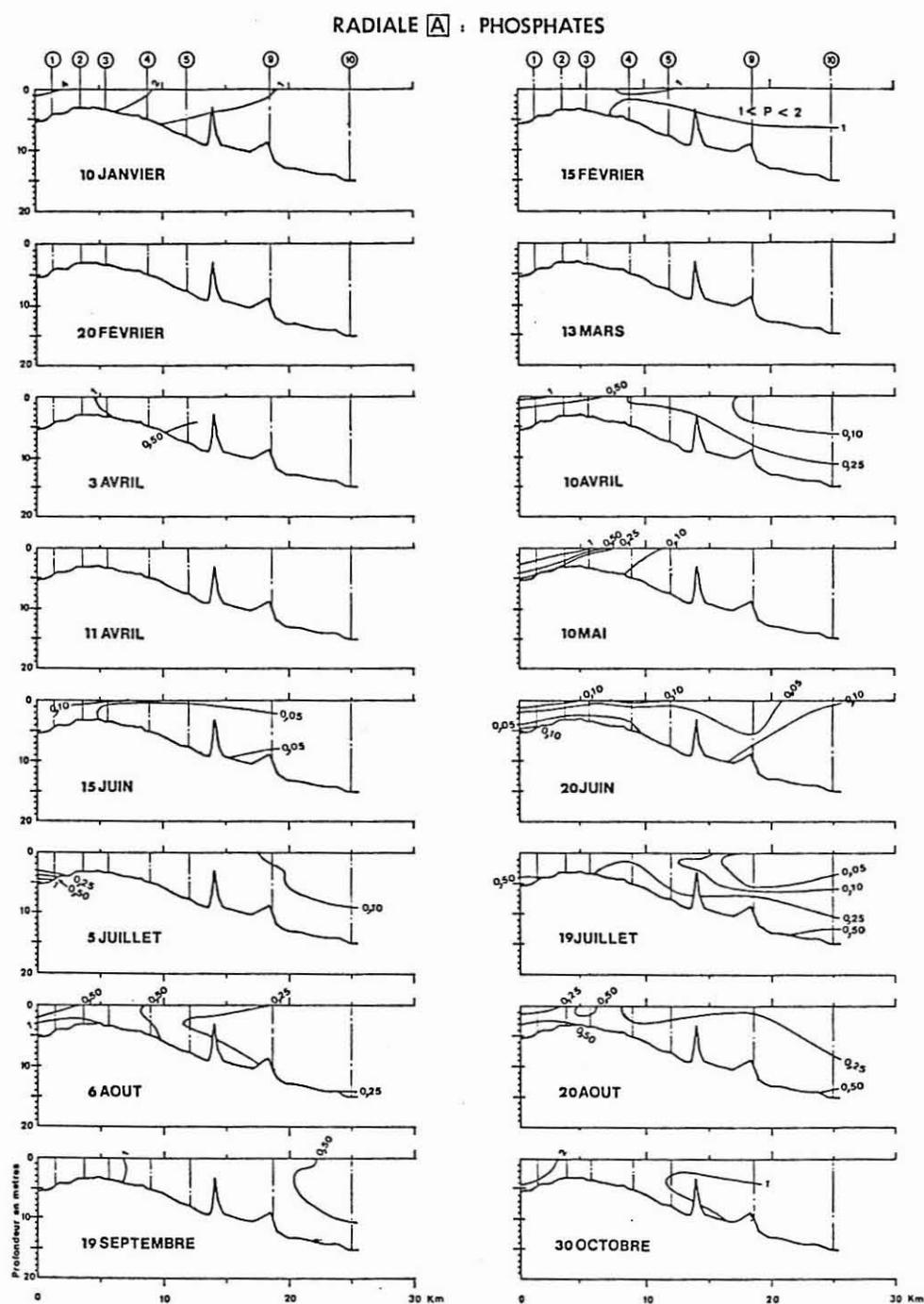


Fig. 27 : Teneurs en phosphates, exprimées en $\mu\text{mol.l}^{-1}$, le long de la radiale A (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

RADIALE B : PHOSPHATES

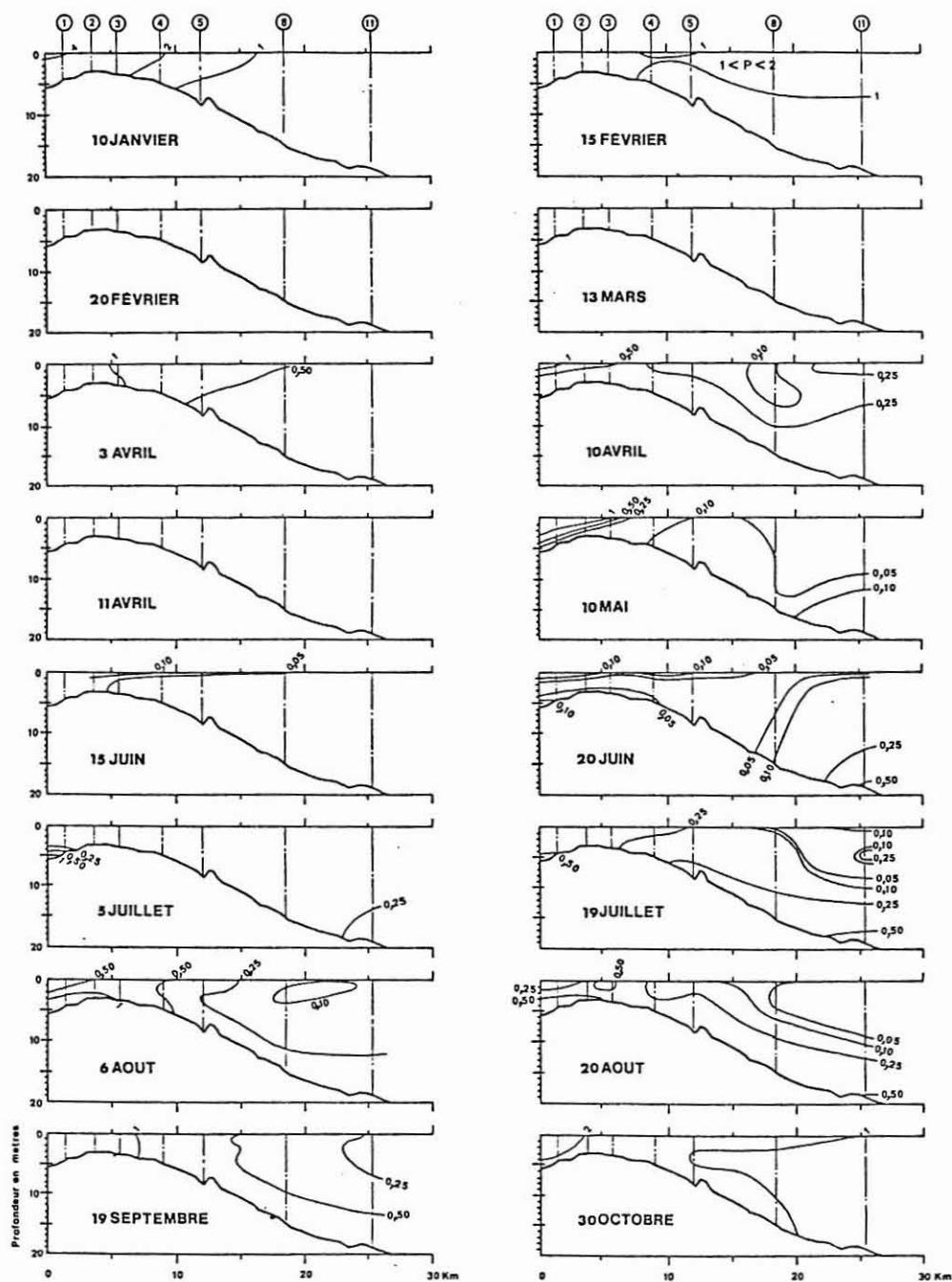


Fig. 28 : Teneurs en phosphates, exprimées en $\mu\text{mol.l}^{-1}$, le long de la radiale B (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

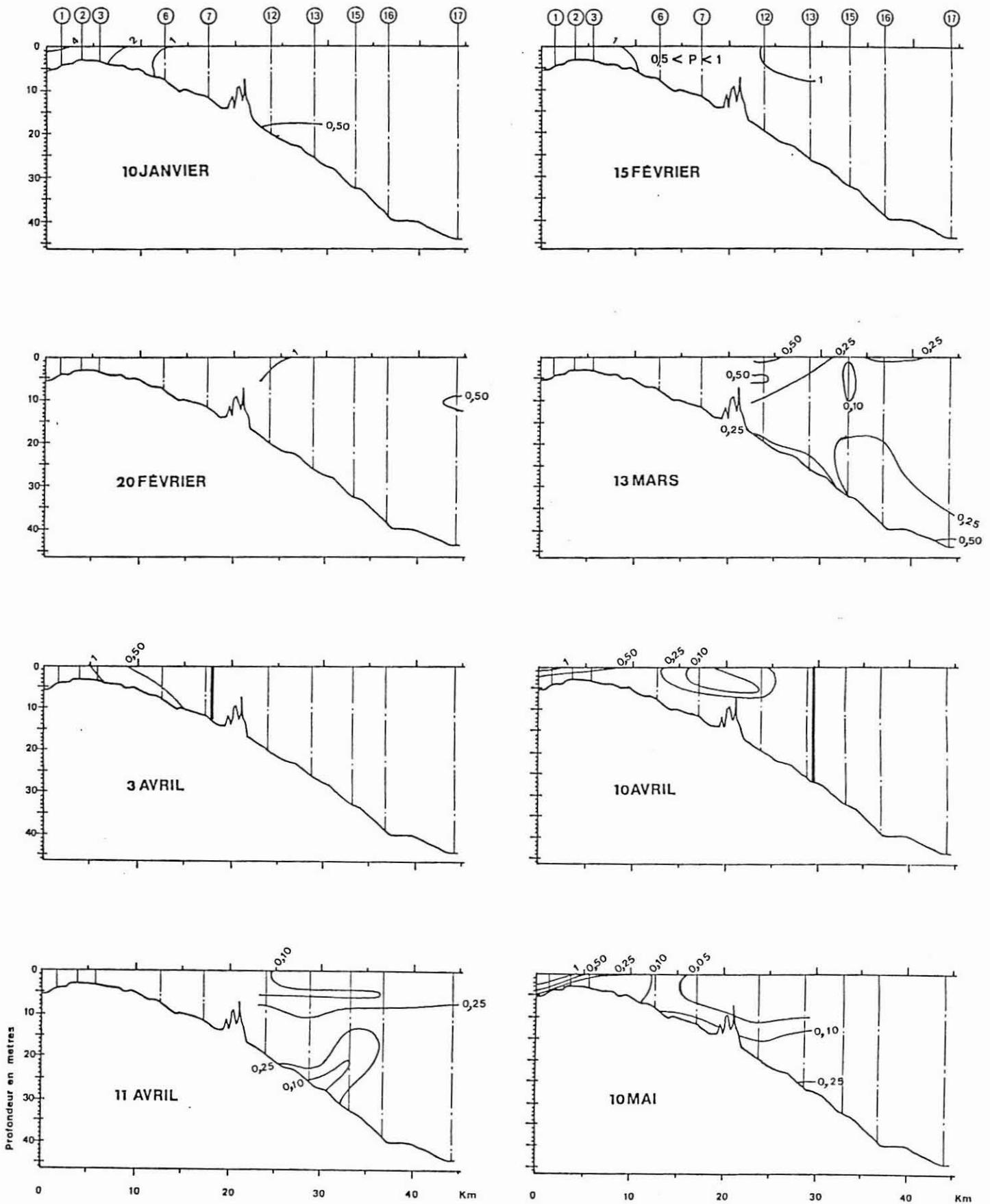


Fig. 29 a : Teneurs en phosphates, exprimées en $\mu\text{mol.l}^{-1}$, le long de la radiale C (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

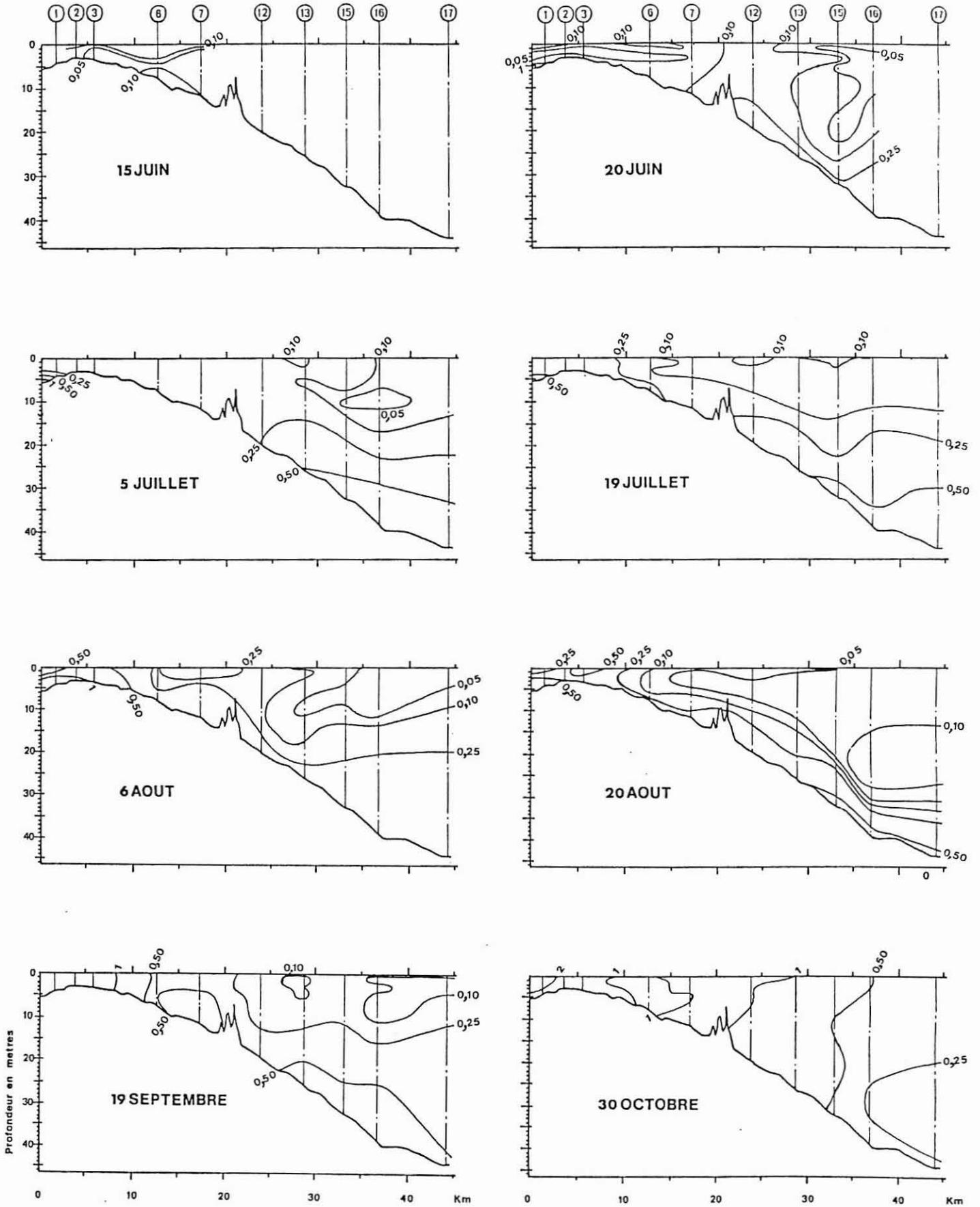


Fig. 29 b : Teneurs en phosphates, exprimées en $\mu\text{mol.l}^{-1}$, le long de la radiale C (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

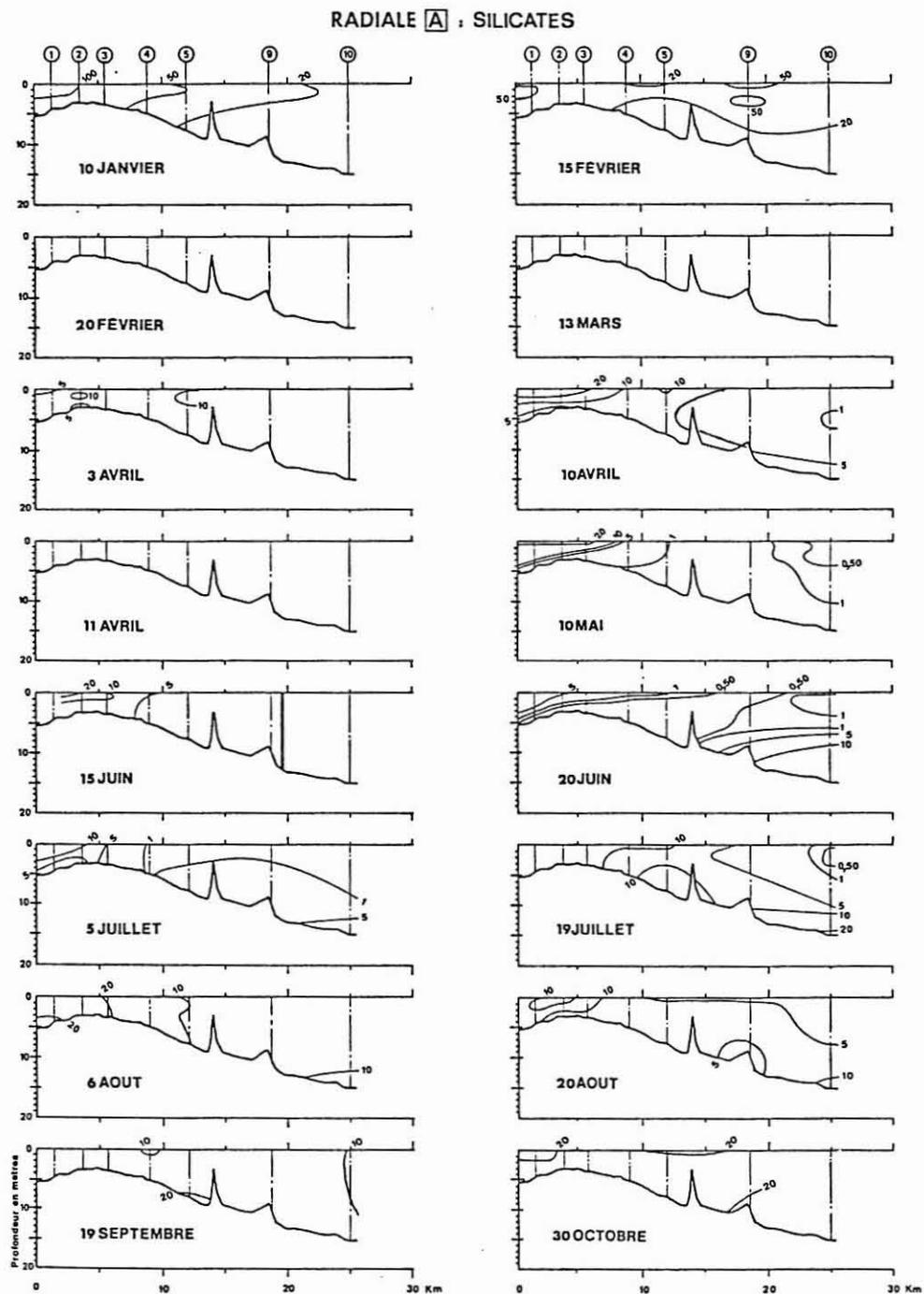


Fig.30 : Teneurs en silicates, exprimées en $\mu\text{mol.l}^{-1}$, le long de la radiale A (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

RADIALE C : SILICATES

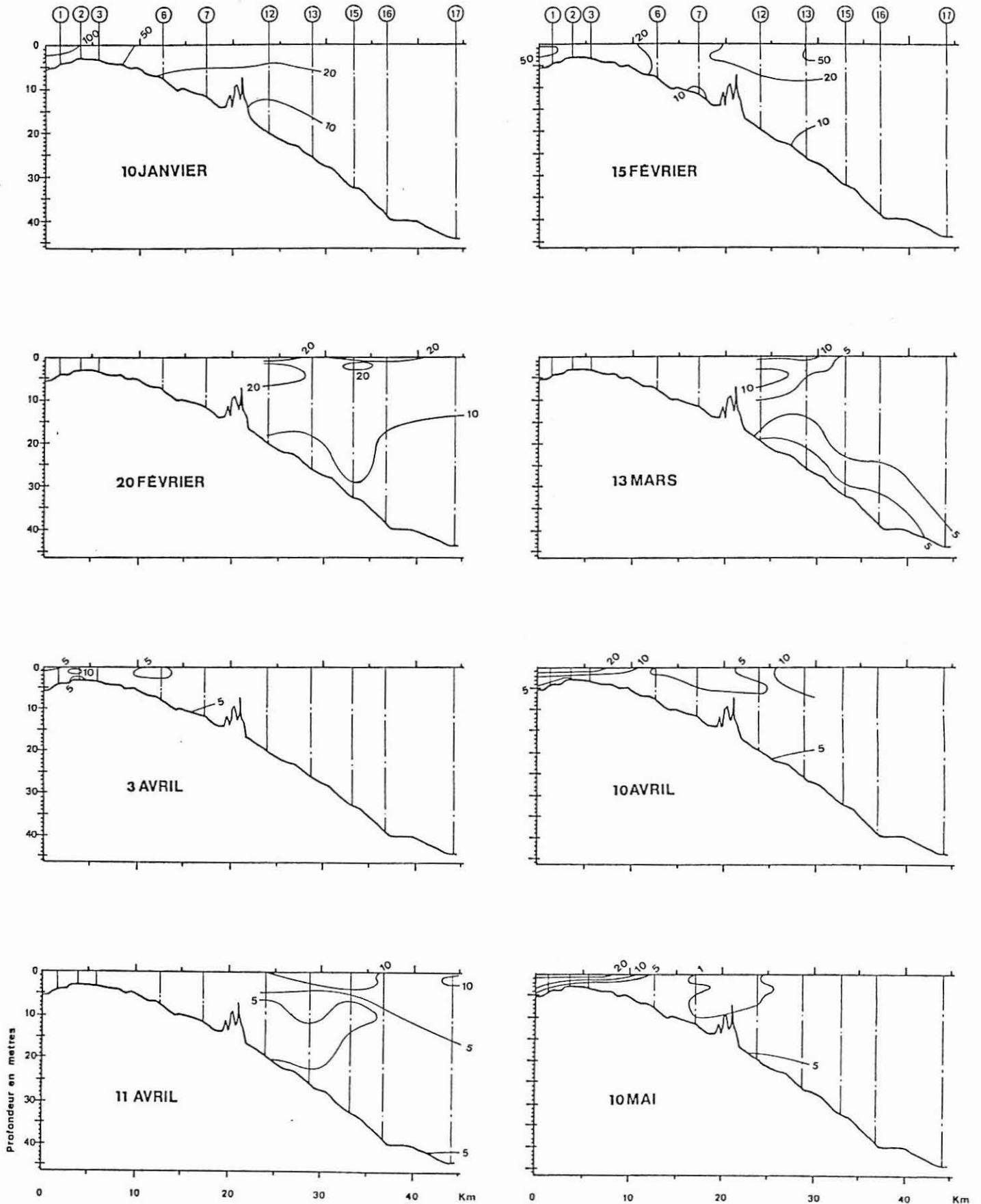


Fig. 32 a : Teneurs en silicates, exprimées en $\mu\text{mol.l}^{-1}$, le long de la radiale C (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

RADIALE C : SILICATES

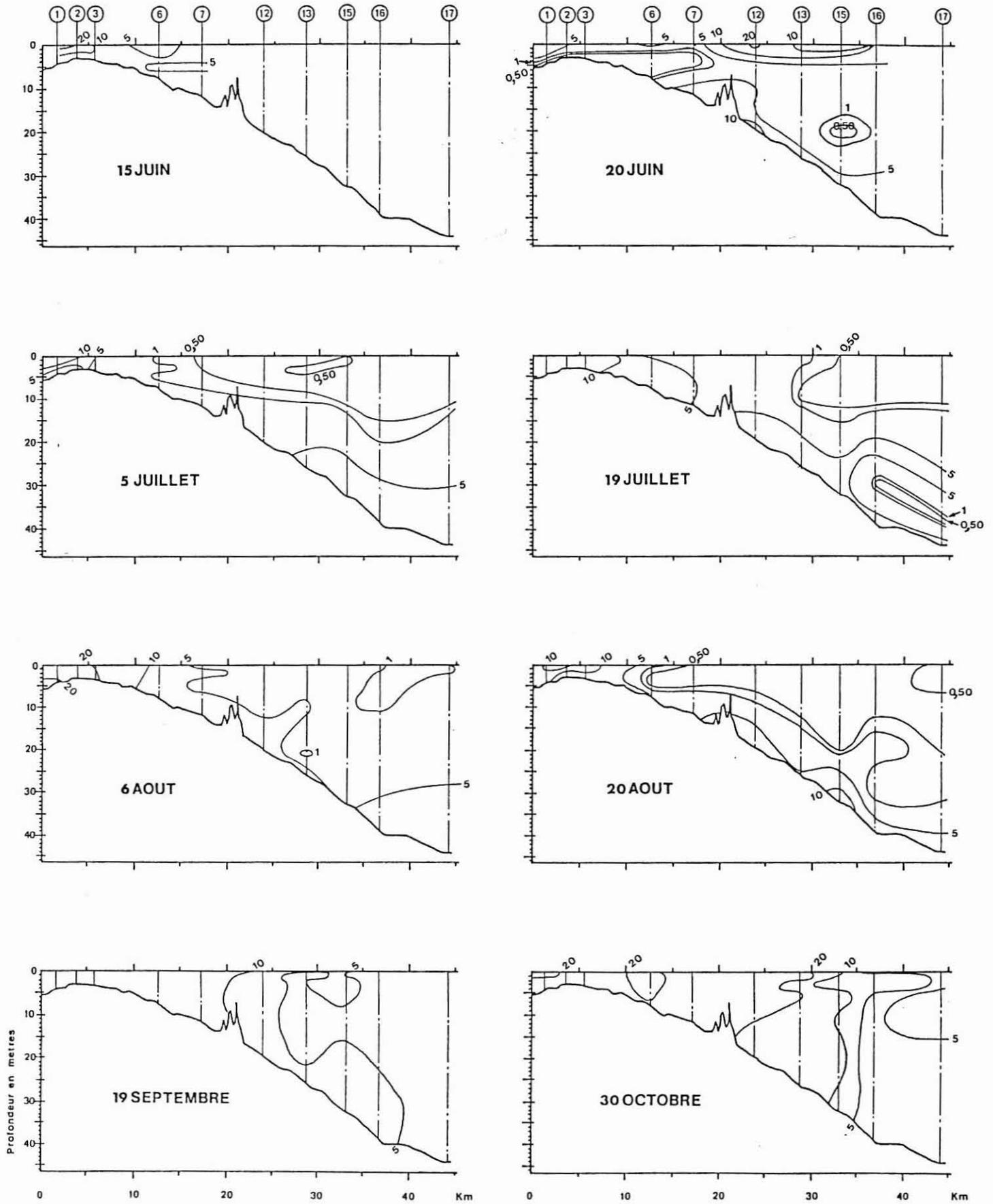


Fig. 32 b : Teneurs en silicates, exprimées en $\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$, le long de la radiale C (cf. fig. 11), lors des différentes campagnes.

Dès avril, les teneurs en silicates décroissent dans les zones de la baie les moins soumises aux influences de la Vilaine, vraisemblablement du fait d'une importante consommation par les diatomées. La chute des teneurs s'accroît en juin dans les eaux superficielles et il apparaît un gradient surface-fond qui persistera durant la période estivale.

Les eaux profondes restent riches en silicates peut être du fait d'une plus faible assimilation par les diatomées d'une part, mais également surtout, par suite d'une redissolution de la silice particulaire et colloïdale d'autre part ; ce dernier processus s'effectue très certainement, en grande partie, à partir des frustules des diatomées mortes tombées sur le fond (OFFICER et RYTHER, 1980).

Enfin, en automne et hiver, les apports telluriques permettent en grande partie, la reconstitution du stock de silicates appauvri lors des pullulations des diatomées durant l'été.

h) Oxygène dissous (fig. 33 et 34)

L'oxygénation de l'eau évolue en fonction de l'activité photosynthétique du milieu qui produit de l'oxygène et de la respiration des organismes qui en consomment.

L'oxygénation est également régie par les échanges à l'interface air-eau qui sont favorisés par certains facteurs hydroclimatiques : vent, houle, courant...

Les figures 33 et 34 décrivent, durant l'année 1984, les variations des concentrations et des pourcentages de saturation en oxygène, à 1 m et au fond pour les 16 stations des radiales A, B et C.

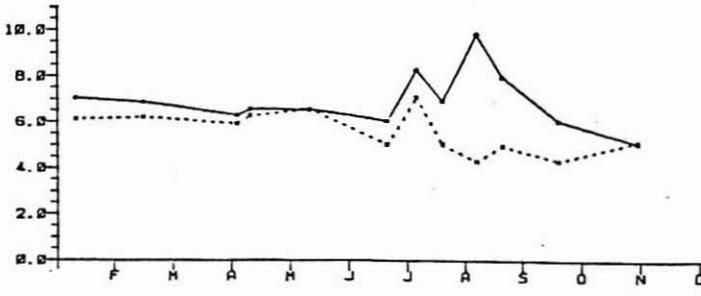
Pour les eaux superficielles, dont l'oxygénation est fortement liée aux échanges air-eau ainsi qu'à l'activité photosynthétique, on note généralement l'existence de pics correspondant aux efflorescences printanière et estivale.

L'oxygénation des eaux de fond des stations peu profondes (1 à 7) est très proche de celle des eaux superficielles ; par contre, pour les autres stations, plus profondes, l'oxygénation des eaux de fond est plus faible que celle des eaux de surface. De façon globale, il y a une décroissance progressive de l'oxygénation des eaux de fond jusqu'aux mois de juillet et août, puis une lente remontée de cette oxygénation jusqu'au mois de novembre où les valeurs des concentrations en oxygène dissous sont très voisines en surface et au fond.

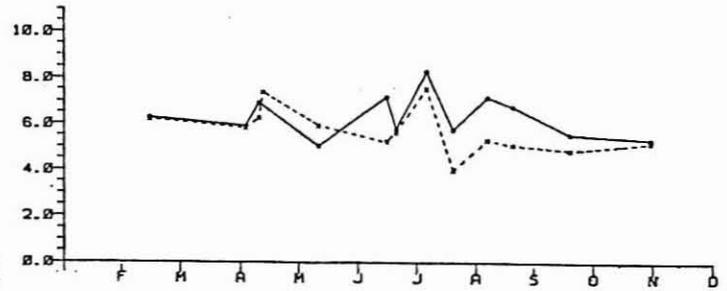
La chute estivale de l'oxygénation des eaux de fond aux stations profondes a été marquée par des teneurs comprises entre 2 et 3 ml/l, ce qui correspond à des taux de saturation oscillant entre 40 et 50 %. Elle est vraisemblablement le résultat d'une intense activité bactérienne pour dégrader l'importante quantité de matière organique détritique déposée lors de l'efflorescence à diatomées.

Toutefois, cette chute modeste n'était pas de nature à entraîner des conditions d'anoxie comparables à celles de juillet 1982.

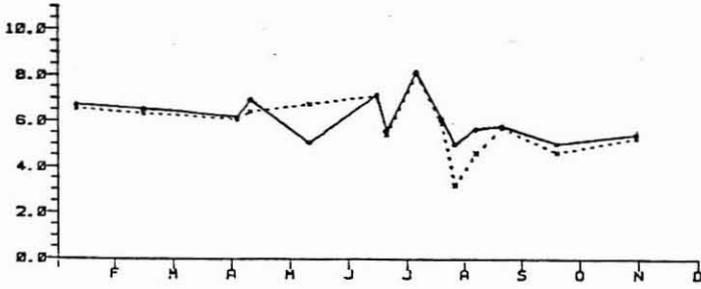
ml.l⁻¹



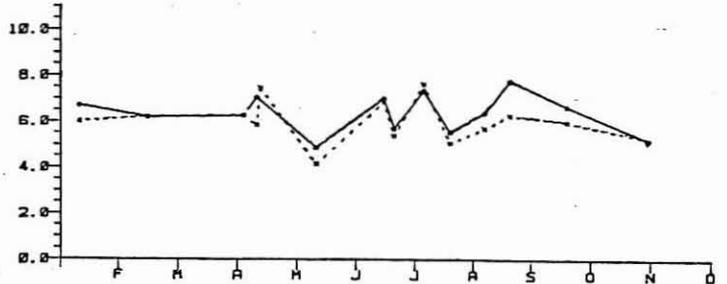
STATION 1



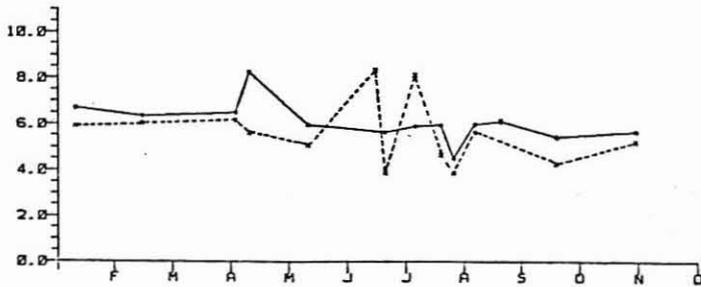
STATION 2



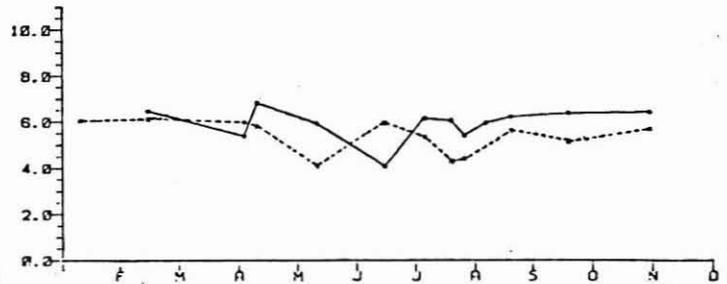
STATION 3



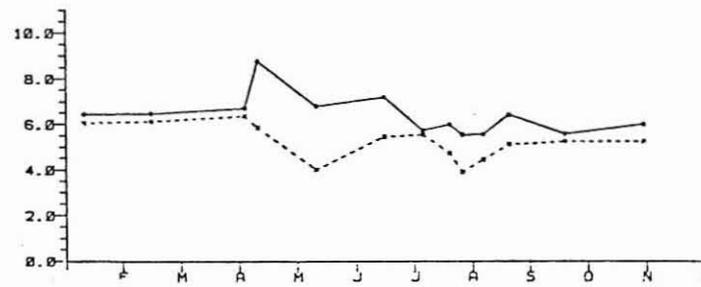
STATION 4



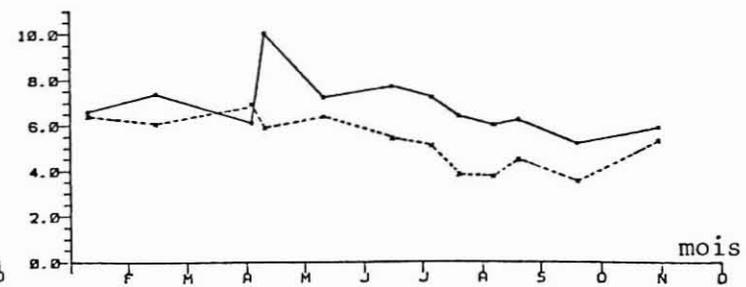
STATION 5



STATION 6



STATION 7

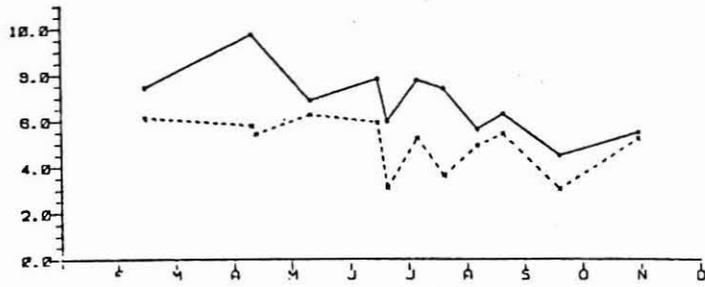


STATION 8

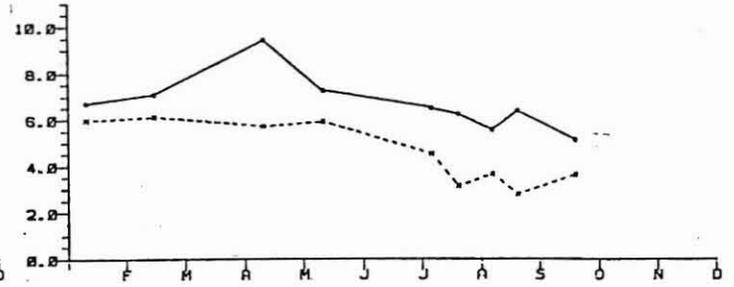
Fig. 33 a : Evolution annuelle des teneurs en oxygène, en ml.l⁻¹, à 1 m (—), au fond (---) pour les différentes stations d'étude.

ml.l⁻¹

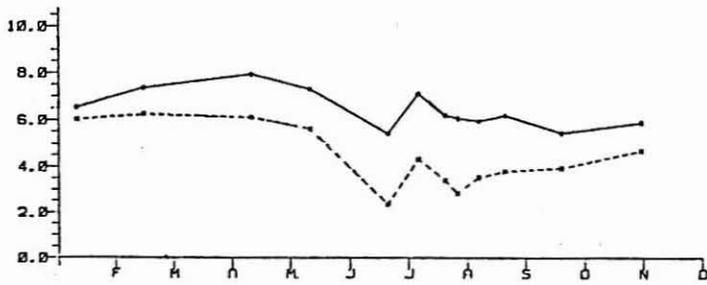
55



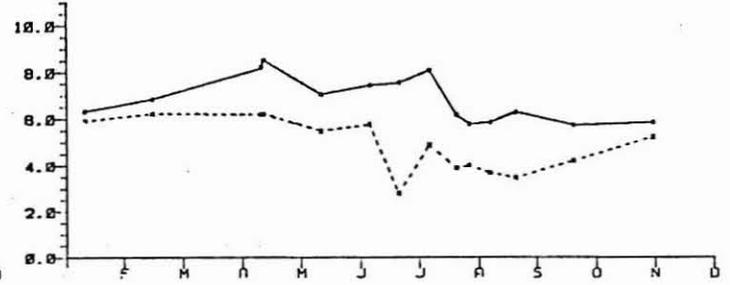
STATION 9



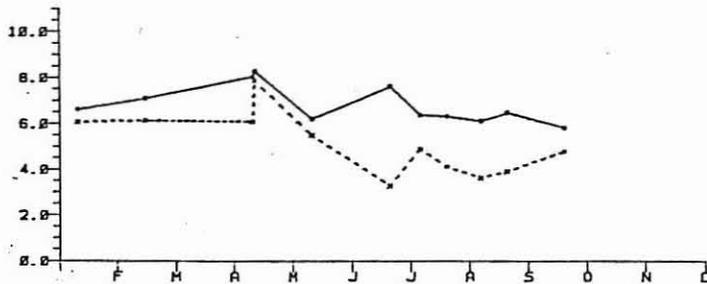
STATION 10



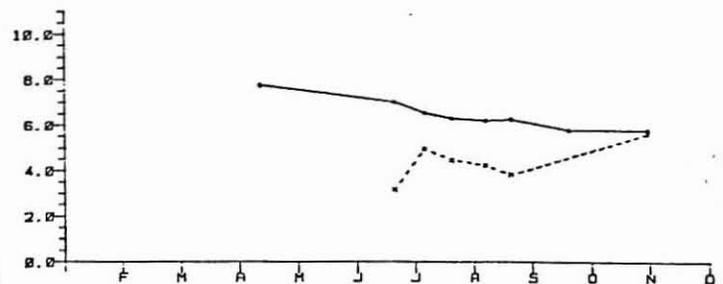
STATION 11



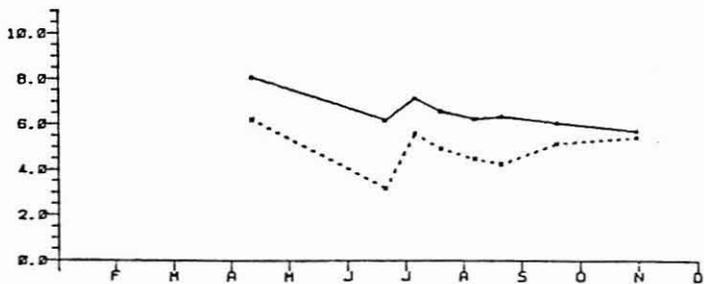
STATION 12



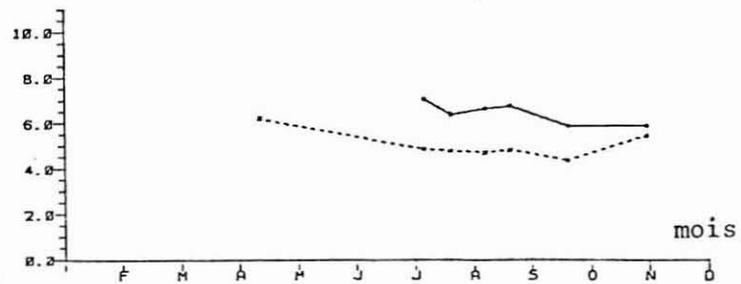
STATION 13



STATION 15



STATION 16

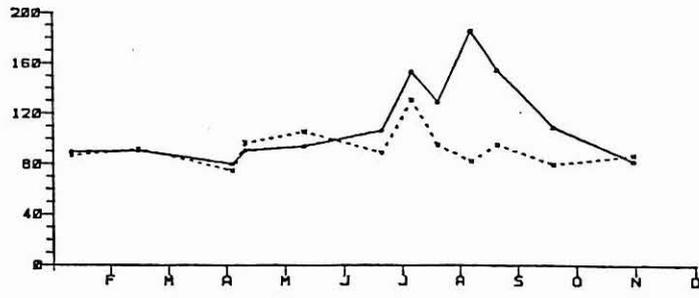


STATION 17

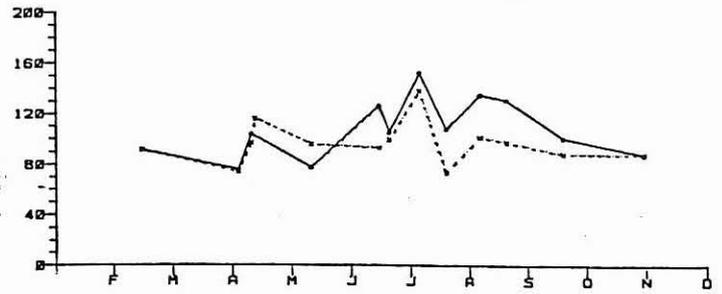
Fig. 33b: Evolution annuelle des teneurs en oxygène, en ml.l⁻¹, à 1 m (—), au fond (.....) pour les différentes stations d'étude.

% saturation

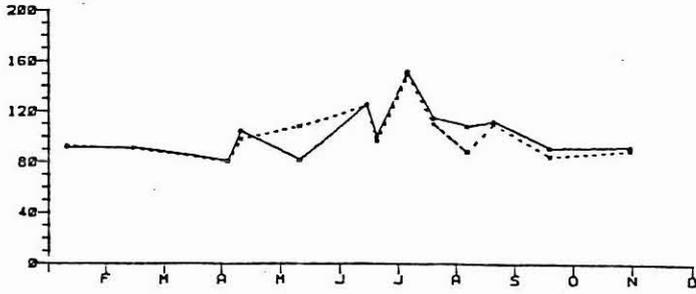
56



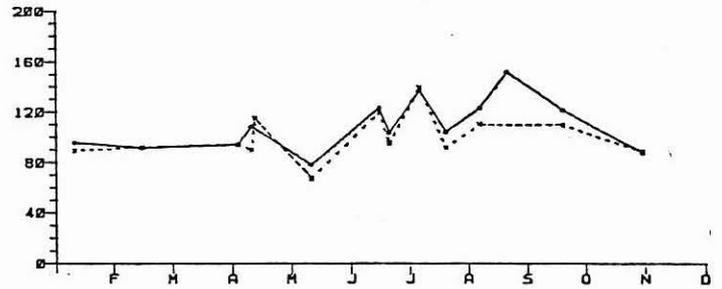
STATION 1



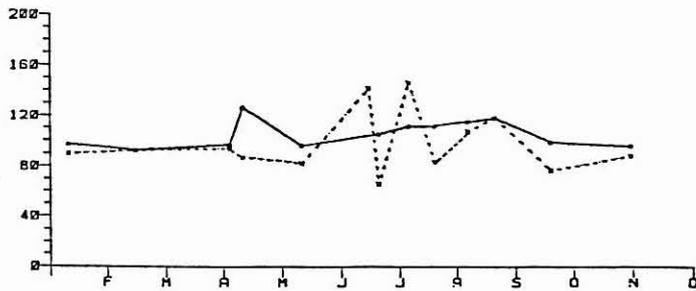
STATION 2



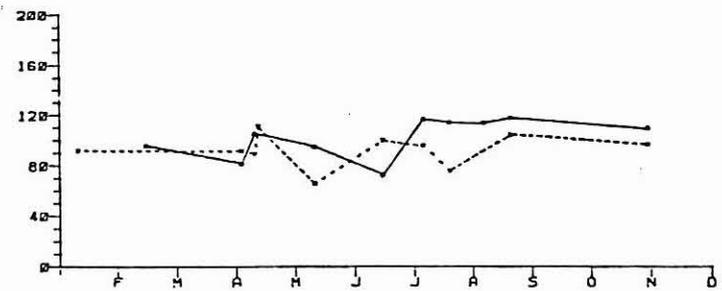
STATION 3



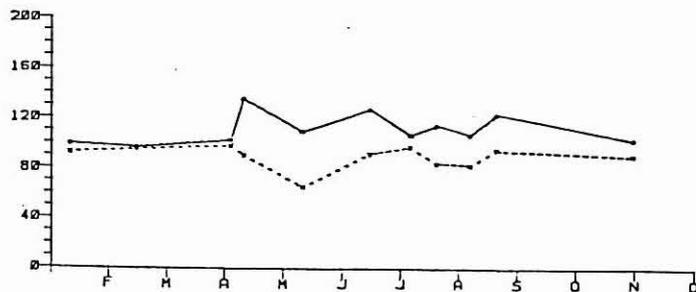
STATION 4



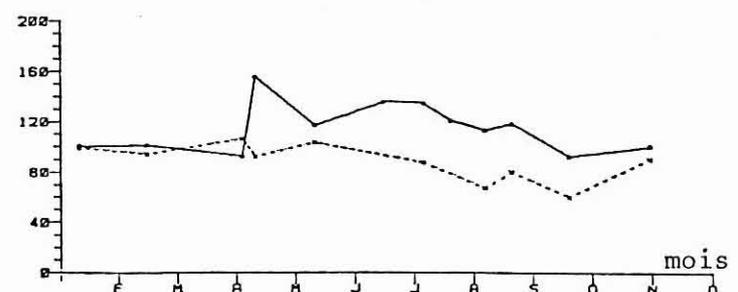
STATION 5



STATION 6

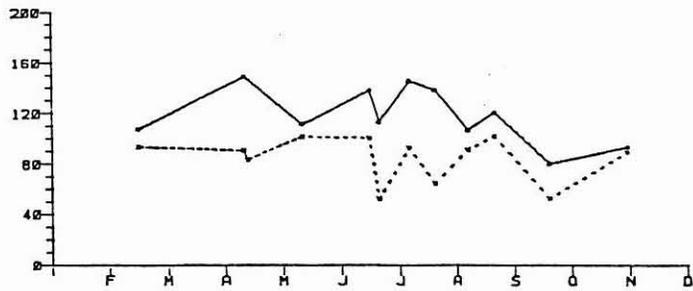


STATION 7

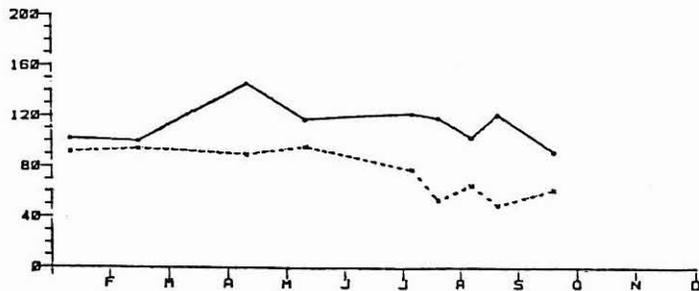


STATION 8

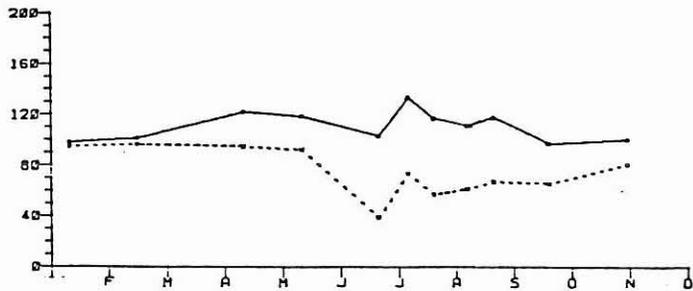
Fig. 34 a : Evolution annuelle des pourcentages de saturation en oxygène, à 1 m (—) et au fond (.....), pour les différentes stations d'étude.



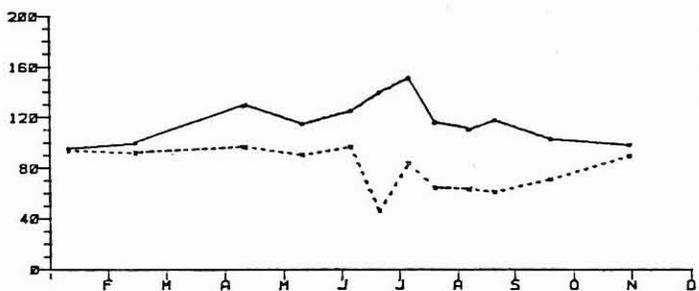
STATION 9



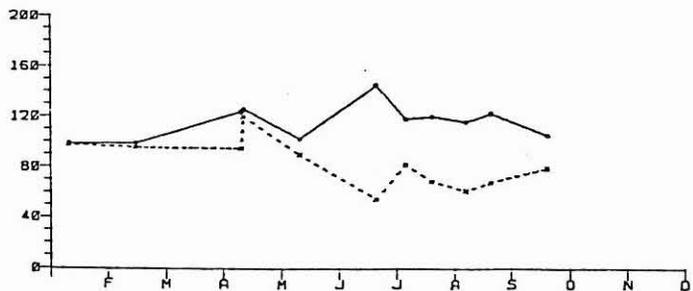
STATION 10



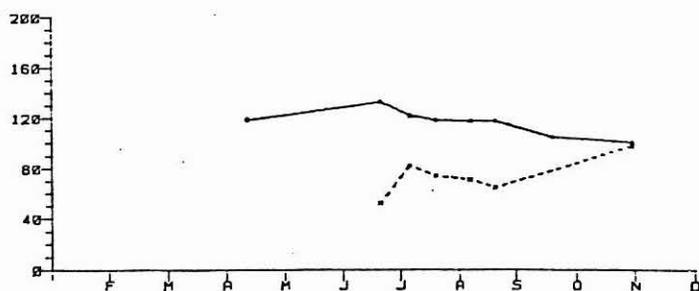
STATION 11



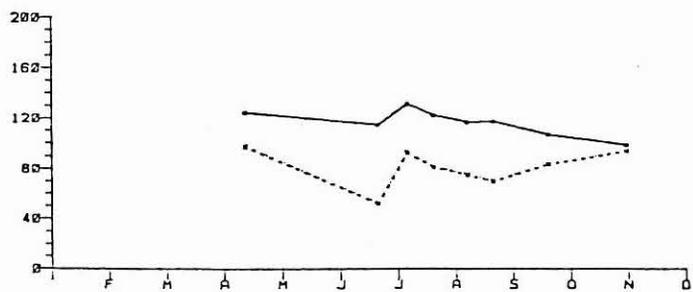
STATION 12



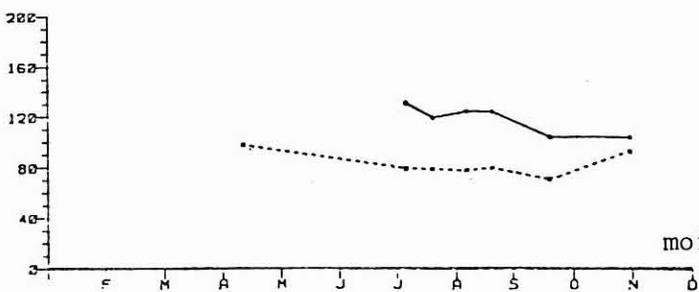
STATION 13



STATION 15



STATION 16



STATION 17

Fig. 34 b : Evolution annuelle des pourcentages de saturation en oxygène, à 1 m (—) et au fond (.....), pour les différentes stations d'étude.

mois

IV - CONCLUSIONS

L'analyse des facteurs hydroclimatiques, relevés en baie de Vilaine en 1984, montre que les proliférations phytoplanctoniques de printemps et d'été sont fortement favorisées par l'existence de conditions particulières de milieu.

1 - L'efflorescence à diatomées, notamment Skeletonema costatum (1), survenue début avril 1984 s'est traduite par d'importantes teneurs en chlorophylle a (de l'ordre de 10 mg/m^3) dans les 10 mètres superficiels de la baie de Vilaine, surtout en zone littorale. Cette intense activité photosynthétique s'est matérialisée, en outre, par un excédent de saturation en oxygène des eaux superficielles comparativement aux eaux de fond.

Cette prolifération phytoplanctonique printanière est un phénomène annuel qui se produit dès que la température de l'eau de mer approche de 10°C et que la durée d'ensoleillement devient suffisante, c'est à dire en mars-avril. Souvent, cette multiplication affecte une tranche d'eau importante et passe inaperçue. Mais, parfois, certains facteurs climatiques particuliers peuvent concourir à l'établissement de conditions de milieu susceptibles de déterminer un développement phytoplanctonique exceptionnel dans les eaux superficielles : en fonction de la nature et de la densité de l'espèce en question, l'eau de mer peut alors prendre des couleurs très variées allant du jaune ocre au rouge minium en passant par tous les tons de brun-rouille ; on attribue le nom d'eau colorée à ce phénomène : l'eau marron à diatomée Skeletonema costatum du début d'avril en est un exemple.

Cet évènement printanier spectaculaire est induit et favorisé par la conjugaison de facteurs climatiques dont :

- la forte pluviosité de mars, en particulier durant la dernière décade, qui a drainé vers la baie de grandes quantités de sels nutritifs d'origine tellurique ;
- le régime des vents en mars-avril qui a été peu favorable au mélange des eaux côtières enrichies et dessalées avec les eaux océaniques plus pauvres et salées ;
- l'état de la mer (belle ou peu agitée pendant tout le mois d'avril) et la période de mortes-eaux (coefficients 39 les 9 et 10 avril) qui ont assuré une certaine stabilité des masses d'eau ;

 (1) Espèces dominantes : Skeletonema costatum, Thalassiosira rotula et T. levanderi.

Densités cellulaires :

- 308 000 cellules/litre le 3 avril,
- 792 000 cellules/litre le 10 avril,
- 2 322 000 cellules/litre le 12 avril,
- 21 000 cellules/litre le 18 avril

dans l'estuaire externe de la Vilaine (déterminations de P. LASSUS).

- l'insolation excédentaire en mars et surtout en avril, qui était de nature à accélérer l'activité photosynthétique du plancton ;
- le début d'échauffement de l'air courant avril : les températures extrêmes dépassent les normales dès le 11 pour atteindre des valeurs records au cours de la dernière décade.

Mais les facteurs hydrologiques, qui sont étroitement liés aux variations des paramètres climatiques, ont également contribué au développement de ce bloom printanier, notamment :

- l'abondance des nitrates, phosphates et silicates, relevée durant tout l'hiver et le début du printemps, et due en grande partie aux apports telluriques, qui a permis le développement excessif du phytoplancton lorsque les autres conditions climatiques sont devenues favorables (vents faibles, mer calme, période de mortes-eaux, insolation prolongée...). CLEMENT et BOUSQUET (1985) relèvent une dissymétrie entre une période printanière (mars à mai) avec des flux élevés en phosphore (3,4 t/j), azote (51,5 t/j) et silice (29 t/j) et une période estivale (juin à octobre) avec des flux plus faibles soit 0,66 t/j de phosphore, 6,5 t/j d'azote et 4 t/j de silice ;
- la dessalure importante, observée en avril grâce à l'extension des eaux de la Vilaine dans la frange littorale de la baie et de celles de la Loire en crue dans la partie périphérique, qui a été propice à la formation d'une stratification haline au moment où l'on enregistrait une élévation sensible de la température aux alentours de 10°C, presque uniformément dans toute la couche d'eau.

Cette prolifération printanière des diatomées a été stoppée par la période de vives-eaux et la constance des vents de terre pendant les deux dernières décades d'avril qui ont facilité le mélange des eaux côtières avec les eaux océaniques, mettant ainsi un terme au phénomène d'eaux colorées à un moment où les températures de l'air atteignaient des valeurs records. La chute brutale des températures de l'air pendant tout le mois de mai a également contribué à ralentir la vitesse de croissance du phytoplancton, mais le gradient large-estuaire de chlorophylle a persisté.

En fait, ces proliférations printanières n'intéressent que les couches d'eau superficielles qui, localement et rapidement, peuvent se réchauffer et ainsi l'agitation de la mer sous l'effet des grandes marées et des vents suffit pour casser le phénomène. Enfin, rappelons que ces multiplications abondantes du phytoplancton, à une saison où les eaux sont aux environs de 10°C, ne présentent pas de risque d'asphyxie pour le milieu.

2 - De la même façon, la floraison estivale à petites diatomées (1) a pu se développer, avec des concentrations en chlorophylle a oscillant entre 5 et 10 mg/m³, dans le secteur de la Baule-le Croisic vers le 10 juin, puis dans toute la baie de Vilaine la semaine suivante, grâce à la convergence de conditions climatiques particulières dont :

- l'exceptionnelle pluviosité du mois de mai qui a donné naissance à un milieu fortement enrichi en sels nutritifs transportés lors du lessivage des sols principalement agricoles ;
- l'échauffement important de l'air, constaté du 8 au 23 juin qui s'est répercuté assez rapidement aux eaux superficielles au sein desquelles une activité photosynthétique optimale s'est développée ;
- la dominance des vents calmes et faibles, à partir de juin et tout au long de l'été, qui était de nature à maintenir dans la zone côtière les eaux superficielles dessalées et enrichies par les apports de la Vilaine ;
- l'excédent record d'insolation enregistré lors de la période juin-juillet, qui s'est concrétisé par un échauffement des eaux favorables au déclenchement d'une efflorescence phytoplanctonique ;
- la mer ridée (21 %) et essentiellement belle (78 %) observée lors de la seconde décennie de juin, qui a été propice à la multiplication abondante du phytoplancton au sein d'eaux superficielles stables ;
- l'amplitude des marées qui a été particulièrement faible en juin, on est passé d'une morte-eau de coefficient 57 le 6 juin à une vive-eau de faible intensité (coefficient 86 les 13 et 14 juin) pour s'acheminer ensuite vers la morte-eau de coefficient 43 les 21 et 22 juin.

A côté des facteurs climatiques, les paramètres hydrologiques, largement tributaires de ces derniers, ont également joué un rôle essentiel dans la multiplication excessive du phytoplancton ; parmi eux :

- les teneurs particulièrement élevées en nitrates, phosphates et silicates, mesurées dans le milieu jusqu'au 25 juin, qui étaient consécutives aux fortes précipitations du mois de mai ;
- la nette stratification thermique qui résultait d'un échauffement important des eaux superficielles ; jusqu'à 22°C le 20 juin tandis que la température des eaux de fond oscillait entre 13 et 14°C ;

 (1) Espèces dominantes : Chaetoceros curvisetus, C. didymus, Rhizosolenia delicatula et Nitzschia seriata.

Densités cellulaires :

1 206 000 à 1 944 000 cellules/litre le 15 juin,
 1 846 000 à 2 562 000 cellules/litre le 20 juin,
 383 000 à 1 392 000 cellules/litre le 5 juillet
 dans l'estuaire de la Vilaine (déterminations de P. LASSUS).

- la dessalure des eaux superficielles, observée dans la baie de Vilaine après les fortes pluies de mai et la stabilité des masses d'eau, courant juin, qu'a concuru à individualiser une stratification haline marquée ;

- enfin, il faut remarquer que l'oxygénation des eaux qui a été très importante, lors de la floraison de juin, a ensuite chuté brutalement pour atteindre des valeurs nettement inférieures à la saturation au niveau du fond, alors qu'elle se maintenait en surface. Cette régression est vraisemblablement due à un accroissement de l'activité bactérienne pour dégrader les grandes quantités de matières organiques se déposant sur le fond pendant le bloom phytoplanctonique. Si les conditions hydrologiques relatives au mois de juillet étaient demeurées favorables à la multiplication des diatomées, la désoxygénation des eaux profondes se serait poursuivie et l'on aurait pu redouter des mortalités d'animaux benthiques, comme en juillet 1982.

Par ailleurs, il convient de souligner que, lorsque le milieu se trouve épuisé en sels nutritifs, fin juin-début juillet, les densités de diatomées régressent sensiblement et ce sont les dinoflagellés, notamment Dinophysis acuminata, qui, du fait de leurs exigences moindres et de leur relative mobilité, envahissent le milieu sans toutefois atteindre des densités capables de colorer l'eau de mer. Toutefois, cette espèce toxique, par la substance diarrhéique produite, signalée en baie de Vilaine dès le 25 juin, n'a été dangereuse pour les consommateurs de moules qu'à partir du 7 juillet ; en effet, les tests biologiques ont conduit les autorités préfectorales à prendre des mesures d'interdiction de pêche et commercialisation des moules, dans les secteurs contaminés, entre le 7 et le 13 juillet.

En ce qui concerne l'écologie de Dinophysis acuminata, un certain nombre de questions restent posées tant que sa culture ne sera pas maîtrisée mais, auparavant, une étude exhaustive "in situ" axée sur le développement de cette espèce pourrait permettre d'appréhender ses conditions de développement dont la connaissance est indispensable pour la réussite de telle culture, et de déterminer la part de responsabilité d'éventuelles substances stimulantes secrétées par les diatomées dans les manifestations d'eaux colorées à dinoflagellés.

En résumé, la floraison printanière des diatomées, observée en baie de Vilaine, est un processus universel qui se développe dès que la température de l'eau de mer atteint 10°C alors que le stock de sels nutritifs a été reconstitué surtout par les apports telluriques hivernaux. Dans certaines conditions climatiques, ce développement peut être amplifié par une exceptionnelle multiplication de la diatomée Skeletonema costatum colorant ainsi les eaux superficielles en marron. Mais à cette période de l'année les conditions météorologiques rendent ce phénomène fugace si bien que le stock de sels nutritifs ne chute pas jusqu'à atteindre des valeurs très faibles.

Cependant QUEGUINIER et al. (1985) ont trouvé, pour des prélèvements d'eau réalisés en mars 1985, que le phosphore constituait un facteur limitant potentiel de la production primaire. Les teneurs en phosphates de leurs échantillons (0,5 et 0,7 $\mu\text{mol.l}^{-1}$) sont très supérieures à celles que nous avons rencontrées dans le même secteur tout au long du printemps 1984

(0,05 à 0,30 $\mu\text{mol.l}^{-1}$) qui permettront néanmoins le développement du bloom à petites diatomées du début juin. Il nous faut donc admettre que le stock de phosphore amené dans le milieu, et estimé à 3,4 t/j de mars à mai par CLEMENT et BOUSQUET (1985), est consommé rapidement dès son arrivée dans la baie.

Par la suite, le bloom de début d'été à petites diatomées, favorisé par l'existence de conditions climatiques particulièrement propices, conduit à un épuisement des stocks de nitrates, phosphates et silicates dans presque toute la baie. Cet épuisement est corroboré par les travaux de TREGUER et QUEGUINER (non publiés), selon lesquels phosphates, nitrates et silicates représentent les facteurs limitants de la croissance phytoplanctonique dans les eaux de surface, cependant que seuls les phosphates et les nitrates le sont dans les eaux de fond, lors des prélèvements réalisés en juillet 1984. C'est essentiellement cet épuisement des réserves de sels nutritifs qui a limité le développement des diatomées au détriment des dinoflagellés ; ces derniers plus tolérants et mobiles parviennent à coloniser le milieu sans pour autant engendrer des eaux colorées.

Quant aux influences respectives de la Vilaine et de la Loire sur la physico-chimie de la baie, il apparaît que les eaux de la Vilaine enrichissent et dessalent le fond et le côté nord de la baie tandis que celles de la Loire en crue ont des effets sur la périphérie de la baie, principalement aux abords de l'île de Hoëdic. Mais lors de certaines conditions météorologiques (vents de secteur sud) il est probable que des eaux dessalées par les apports de la Loire parviennent jusqu'aux environs de la rivière de Pénerf.

Enfin, il convient de souligner que les écosystèmes de la baie de Vilaine en étant très vulnérables vis à vis des effets néfastes des eaux colorées peuvent courir deux risques majeurs :

- un risque d'anoxie des eaux du fond par suite d'une consommation accrue d'oxygène pour les dégradations bactériennes à des périodes où une stratification thermique et/ou haline vient freiner les échanges avec l'atmosphère ; ce fut vraisemblablement le cas en juillet 1982. Par contre, en 1983, 1984 et 1985, la chute de l'oxygénation s'est arrêtée alors que les eaux du fond étaient entre 40 et 50 % de saturation : ce phénomène d'hypoxie estivale des eaux du fond semble chronique dans la baie (MAGGI, 1984 ; MERCERON, 1985). Ce processus de désoxygénation est d'autant plus grave que le caractère relativement abrité de ce secteur et les lâchers d'eaux douce tendent à y maintenir une structure hydrologique stratifié en salinité et en température.

- un risque de développement du dinoflagellé Dinophysis acuminata responsable des troubles diarrhéiques chez les consommateurs de moules en 1983 et 1984. Dans les deux cas, l'espèce a été abondante en été, juste après le bloom de diatomées qui avait appauvri le milieu en sels nutritifs, mais en 1985, ce dinoflagellé était présent dans l'eau, dès le mois de mai, et durant toute la période estivale, à des concentrations insuffisantes pour rendre les coquillages filtreurs toxiques.

En l'occurrence, parmi les remèdes à apporter à ces maux, il serait souhaitable d'agir pour limiter l'établissement d'une stratification haline, en effet, une meilleure gestion des lâchers d'eau du barrage

d'Arzal devrait permettre un mélange optimal des eaux douces riches en éléments nutritifs avec les eaux marines. Ainsi, l'automatisation de l'ouverture des vannes du barrage qui est en cours de réalisation pourrait apporter une amélioration notable à la situation présente où les lâchers se font empiriquement.

Des actions peuvent également être suggérées pour réduire les flux de sels nutritifs de la Vilaine. En ce qui concerne les phosphates, essentiellement d'origine urbaine, la ville de Rennes envisage déjà une déphosphatation de ses effluents mais la redissolution des grandes quantités de phosphates, piégés dans les sédiments du lit du fleuve et de la baie, devrait freiner l'effet d'un tel traitement. Pour ce qui est des nitrates, surtout d'origine agricole, il s'agit d'un problème de pollution diffuse qui n'aura de solution qu'à travers une évolution des mentalités conduisant les agriculteurs à mieux utiliser les engrais, surtout en quantités compatibles avec l'optimisation de leur rendement. Une prise de conscience du monde agricole est en cours mais cette évolution est lente et les effets attendus tarderont à se manifester. Quant aux silicates, leur origine est entièrement liée à la nature géologique du bassin de la Vilaine mais ils ne constituent pas un paramètre inquiétant.

Toutefois, dans de nombreuses années, lorsque tous les problèmes d'eutrophisation de la Vilaine auront été réglés, la production primaire de la baie se trouvera vraisemblablement diminuée, ce qui se répercutera directement sur la production secondaire et en particulier sur la croissance des coquillages (moules et huîtres surtout) qui font l'objet d'une exploitation intense. Afin de préserver la qualité des coquillages commercialisés, il faudra éviter une multiplication des surfaces de parcs exploitées.

Par contre, dans l'immédiat, on ne pourra rien faire contre les conditions climatiques et lorsque, à un printemps très pluvieux, succédera un début d'été très chaud avec une mer calme ou peu agitée, il y aura toujours un développement phytoplanctonique susceptible de colorer l'eau de mer. Et, dans certaines conditions que l'on appréhende encore mal, parfois le dinoflagellé Dinophysis acuminata induira des troubles diarrhéiques aux consommateurs de moules. Mais là, la prévention prime et le réseau de surveillance mis en place par l'IFREMER depuis 1983 est le meilleur garant de la santé publique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALZIEU (C.), LASSUS (P.), MAGGI (P.), POGGI (R.) et RAVOUX (G.), 1983.- Contamination des coquillages des côtes bretonnes et normandes par une algue unicellulaire toxique (Dinophysis acuminata). Rapport technique I.S.T.P.M., n° 4, 33 p.
- ANDRESEN LEITAO (M.), LASSUS (P.), MAGGI (P.), LE BAUT (C.), CHAUVIN (J.) et TRUQUET (P.), 1983.- Phytoplancton des zones mytilicoles de la baie de Vilaine et intoxication par les coquillages.- Rev. Trav. Inst. Pêches Marit., 46 (3), p. 233-262.
- BENDSCHNEIDER (K.) and ROBINSON (R.J.), 1952.- A new spectrophotometric method for the determination of nitrite in sea water.- J. Mar. Res. 11, 87-96.
- CLEMENT (J.C.) et BOUSQUET (F.), 1985.- Estimation des flux de nutriments et de matières organiques rejetées par la Vilaine dans le Mor-Bras.- Cahiers du Mor-Bras, n° 9, 83 p.
- FANNING (K.A.), PILSON (M.E.Q.), 1973.- On the spectrophotometric determination of dissolved silica in natural waters.- Anal. Chem., 45, 136-140.
- GRIMANDI (G.), MAGGI (P.) et CORMIER (M.), 1983.- Phytoplancton des zones mytilicoles de la baie de Vilaine et intoxication par les coquillages : analyses bactériologiques.- Rev. Trav. Inst. Pêches Marit., 46 (3), 263-266.
- LASSUS (P.), MARCAILLOU-LE BAUT (C.) et MAGGI (P.), 1984.- Analyse des conditions ayant provoqué une efflorescence de Dinophysis acuminata en baie de Vilaine (été 1983 - France).- C.I.E.M./C 4, Special meeting.
- LORENZEN (C.J.), 1966.- A method for the continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration.- Deep-Sea Res., 13, p. 223-227.
- MAGGI (P.), 1982.- Les mortalités massives de poissons en baie de Vilaine (juillet 1982).- Rapport I.S.T.P.M., 16 août 1982, 19 p.
- MAGGI (P.), 1983.- Alerte "Eaux brunes des 17 et 18 mars 1983". Premiers résultats des analyses effectuées.- Rapport à diffusion restreinte n° 1, mars 1983, 13 p.
- MAGGI (P.), 1984.- Conditions hydroclimatiques et apparitions d'eaux colorées, en baie de Vilaine, durant l'été 1983.- Bull. Soc. Sc. Nat. Ouest de la France, Nouvelle Série, 6 (1), 43-56.
- MAGGI (P.), MASTOURI (A.) et SOULARD (L.), 1984.- Suivi des facteurs climatiques, susceptibles de jouer un rôle dans les apparitions d'eaux colorées, en baie de Vilaine, durant l'année 1984.- Rapport à diffusion restreinte n° 36, décembre 1984, 29 p.

- MAGGI (P.), MASTOURI (A.) et SOULARD (L.), 1985.- Analyse des facteurs climatiques susceptibles de jouer un rôle dans les apparitions d'eaux colorées, en baie de Vilaine, durant l'année 1982.- Rapport IFREMER, DERO-85.01-MR, 28 p.
- MAGGI (P.), SOULARD (L.), TRUQUET (I.) et CHAUVIN (J.), 1984.- Facteurs hydroclimatiques et apparitions d'eaux colorées, en baie de Vilaine, durant l'année 1983.- Rapport technique, I.S.T.P.M., n° 8, novembre 1984, 45 p.
- MASTOURI (A.), 1986.- Contribution à l'étude des conditions hydroclimatiques favorables aux apparitions d'eaux colorées, en baie de Vilaine, durant l'année 1984.- Thèse Docteur-Ingénieur E.N.S.A. Rennes, 137 p.
- MERCERON (1985).- Impact du barrage d'Arzal sur la qualité des eaux de l'estuaire et de la baie de Vilaine.- Rapport IFREMER, DERO-85.06-EL, 31 p.
- MURPHY (J.) and RILEY (J.P.), 1962.- A modified single solution method for the determination of phosphate in naturel waters.- Anal. Chim. Acta 27, 31-36.
- OFFICER (C.B.) and RYTHER (J.H.), 1981.- Impact of nutrient enrichment on water uses.-Estuaries and nutrients.- Edited by Bruce J. Neilson and L. Eugence Cronin, p. 247-261.
- PARSONS (T.R.), STEPHENS (K.) and STRICKLAND (J.D.H.), 1961.- On the chemical composition of eleven species of marine phytoplankton.- J. Fish. Res. Bd. Can. 18 (6), p. 1001-1025.
- QUEGUINER (B.), TREGUER (P.), HAFSAOUI (M.) et MASSON (A.), 1985.- Mise en évidence des facteurs limitant la production de phytoplancton dans le Mor-Bras (Bretagne méridionale).- Cahiers du Mor-Bras, n° 8, 25 p.
- STRICKLAND (J.D.H.) and PARSONS (T.R.), 1972.- A pratical handbook of sea water analysis.- Bull. Fish. Res. Bd. Can. 167, 311 p.
- TREGUER (P.) et LE CORRE (P.), 1975.- Manuel d'analyse des sels nutritifs dans l'eau de mer.- Utilisation de l'autoanalyser II, Technicon R. U.B.O., Lab. d'Océanologie Chimique, 110 p.
- WOOD (E.D.), ARMSTRONG (F.A.J.) and RICHARDS (F.A.), 1967.- Determination of nitrate in sea water by cadmium copper reduction to nitrite.- J. Mar. Biol. Ass. U.K. 47, 23-31.
- YENTSCH (C.S.) et MENZEL (D.W.), 1963.- A method for the determination of phytoplankton chlorophyll. Deep-Sea Res., 10, 221-231.