

MK

COMMUNAUTE URBAINE DE BREST
DEPARTEMENT HYGIENE ET SALUBRITE
Service PRODUCTION-EPURATION

IFREMER
DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT
ET DES RECHERCHES OCEANIQUES

**AMELIORATION DE LA SALUBRITE
DES EAUX CONCHYLICOLES
DE L'ESTUAIRE DE L'ELORN
ET DU NORD DE LA RADE DE BREST**

ETUDE DU MILIEU MARIN

P.LEHIR, M.BRETON, J.L'YAVANG



IFREMER
 Centre de BREST
 S.D.P.
 B.P. 70
 29263 PLOUZANE
 Tél. : 98.22.40.40
 Télex 940 627

DIRECTION ENVIRONNEMENT
 ET RECHERCHES OCEANIQUES

DEPARTEMENT ENVIRONNEMENT LITTORAL

AUTEUR(S) : LE HIR Pierre BRETON Marguerite L'YAVANC Jacky		dessins JP ANNEZO secrétariat D GUILLERM	CODE : N° <u>DERO-87.09.EL</u>
TITRE AMELIORATION DE LA SALUBRITE DES EAUX CONCHYLICOLES DE L'ESTUAIRE DE L'ELORN ET DU NORD DE LA RADE DE BREST. Etude du milieu marin		Date : Mai 1987 Tirage nb : 24 Nb pages : 137 Nb figures : 85 + annexe Nb photos : -	
CONTRAT (intitulé) N° <u>852215011</u> DERO/EL	COMMUNAUTE URBAINE DE BREST	DIFFUSION Libre <input type="checkbox"/> Restreinte <input checked="" type="checkbox"/> Confidentielle <input type="checkbox"/>	
<p><u>RESUME</u> Afin de préciser les rejets où il est préférable d'intervenir pour réduire les contaminations des secteurs conchylicoles de l'Elorn et du Nord de la rade de Brest, un calcul de dilution de chacun des rejets a été mené à l'aide d'un modèle mathématique. Après une description des courants de marée calculés dans tout le secteur d'étude, des figures de dilution sont présentées. L'impact de chaque rejet se déduit facilement.</p> <p><u>ABSTRACT</u> In order to reduce the pollution of shellfishing areas in the Elorn estuary and the north of the rade of Brest, a dilution calculation has been achieved for each discharge by the means of a mathematical model. After a brief description of calculated tidal currents, dilution patterns are presented.</p>			
Mots-clés : Modèle mathématique, dilution, bidimensionnel, rade de Brest, rejet urbain, estuaire, impact			
Key words : Mathematical modelling, dilution, two-dimensional, rade of Brest, urban discharge, estuary, impact.			



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

S O M M A I R E

I. Présentation de l'étude.....	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Présentation de la zone d'étude.....	5
II. Méthodologie - Description des outils.....	9
II.1. Modèle de courant en rade de Brest.....	9
II.2. Modèle de dilution d'un contaminant en rade.....	12
II.3. Modèle de l'estuaire de l'Elorn.....	15
II.4. Modèle de dilution d'un contaminant dans l'estuaire de l'Elorn.....	21
II.5. Intégration des modèles.....	22
II.6. Sorties graphiques.....	23
III. Les courants en rade de Brest et dans l'Elorn.....	24
III.1. Les courants calculés dans le nord de la rade de Brest	24
III.1.1. Description générale.....	24
III.1.2. Validation des courants calculés par le modèle	38
III.1.3. Courants résiduels.....	43
III.1.4. Effets du vent.....	46
III.2. La circulation dans l'estuaire de l'Elorn.....	49
III.2.1. Propagation de la marée.....	50
III.2.2. Courants de marée.....	52
III.2.3. Circulation résiduelle.....	57
IV. Dilution des effluents.....	62
IV.1. Réglage des modèles - Validation par les mesures.....	62
IV.1.1. Modèle de dilution en rade.....	62
IV.1.2. Modèle de dilution dans l'estuaire de l'Elorn..	66
IV.2. Inventaire des scénarii de rejets envisagés.....	66
IV.2.1. Rejets pris en compte.....	69
IV.2.2. Zones sensibles.....	70
IV.2.3. Inventaire des scénarii.....	70
IV.3. Dilution du rejet Maison Blanche.....	70
IV.4. Dilution du rejet rade-abri.....	73
IV.5. Dilution du rejet Z.I.P.....	77
IV.6. Dilution du rejet Moulin Blanc.....	77
IV.7. Dilution du rejet Kerhuon.....	88
IV.8. Dilution du rejet de La Forest.....	94
IV.9. Dilution du rejet Landerneau.....	96
IV.10. Autres simulations.....	99

V. Base de données pour l'évaluation de l'impact des rejets.....	106
V.1. Avertissements.....	106
V.1.1. Coefficient de dispersion.....	106
V.1.2. Choix du scénario.....	108
V.1.3. Incertitude sur les circulations résiduelles....	108
V.1.4. Contamination par les remises en suspension.....	110
V.2. Exemple d'interprétation des résultats.....	111
V.2.1. Rappel des flux de rejets.....	111
V.2.2. Evaluation des impacts respectifs des principaux rejets, dans le cas vive eau/effluent conservatif	112
VI. Conclusion.....	134

Références bibliographiques.

Annexes.

I - PRESENTATION DE L'ETUDE

I.1. - INTRODUCTION

Dans le cadre du programme d'amélioration de la salubrité des eaux conchylicoles de l'estuaire de l'Elorn et du nord de la rade de Brest, la Communauté Urbaine de Brest (maître d'ouvrage) et la Direction Départementale de l'Équipement du Finistère (maître d'oeuvre) ont décidé de confier à l'IFREMER l'étude du devenir des effluents dans le milieu marin. Parallèlement, la société "SAUNIER Eau et Environnement" a été chargée de l'évaluation des apports provenant du milieu terrestre.

Le problème posé

Les mesures de germes-test effectuées sur des eaux prélevées devant la plage du Moulin Blanc, dans le Nord-Est de la Rade de Brest, et dans l'Elorn, à proximité des exploitations conchylicoles, présentent des concentrations importantes excédant les normes en vigueur. Ces résultats sont confirmés par les analyses de la chair des coquillages : ainsi la zone exploitée de l'Elorn est insalubre et nécessite une épuration des moules en bassin avant leur introduction dans le circuit commercial.

Les sources de pollution bactérienne sont principalement les rejets des stations d'épuration, la rivière Elorn en amont de l'estuaire et les ruisseaux secondaires qui parfois drainent des terrains agricoles, mais surtout servent d'émissaires de certains secteurs urbains mal branchés sur le réseau d'assainissement ou même de "trop plein" de ce réseau.

L'objectif de l'étude étant une réhabilitation sanitaire des zones conchylicoles, le problème posé est :

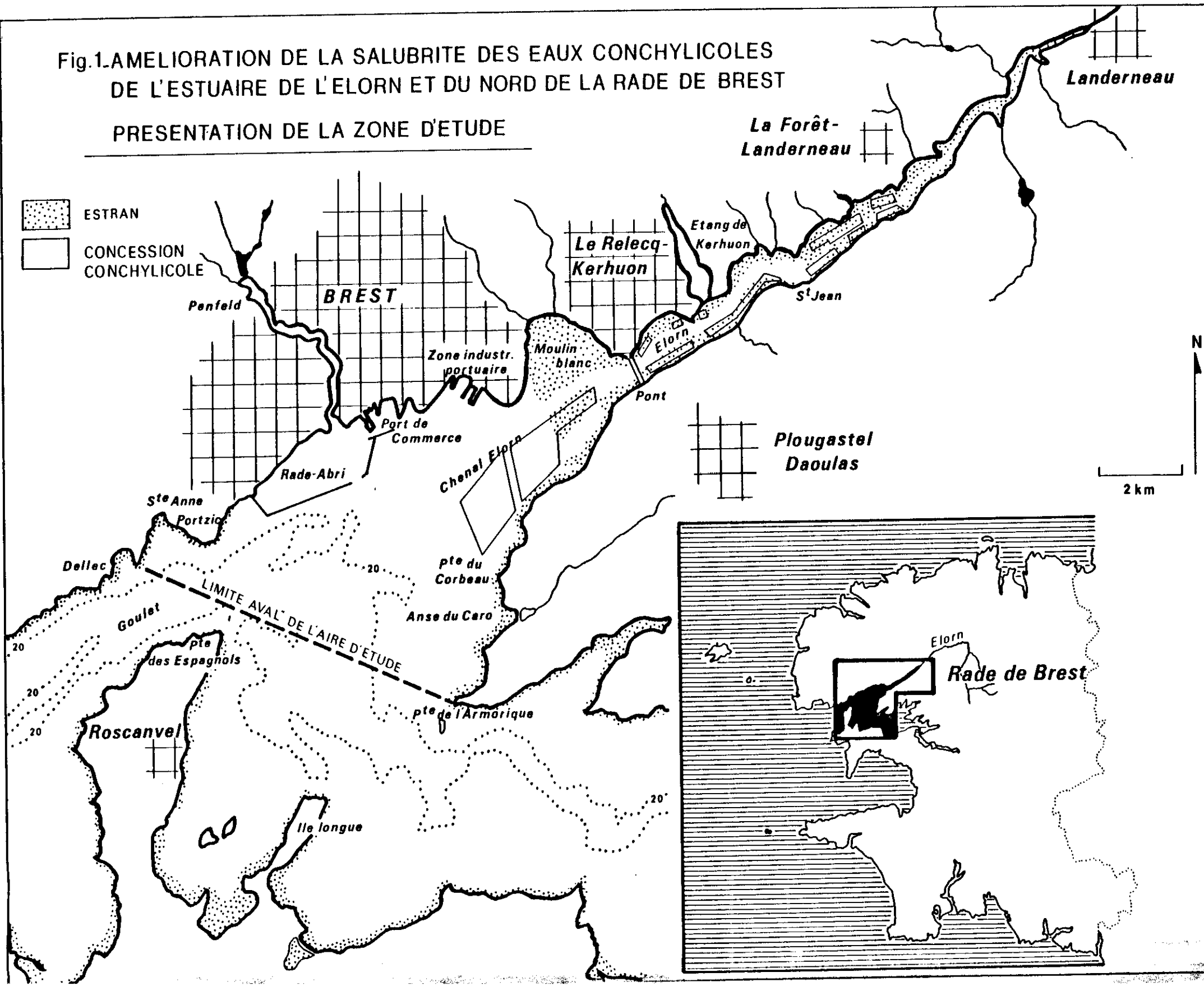
Compte tenu des dilutions subies par les rejets et des mécanismes inhérents au milieu marin (sédimentation/remise en suspension, dégradation/croissance/adsorption des bactéries) quels sont les rejets où il faut intervenir prioritairement (par une réduction des contaminations ou par une modulation des flux au cours du temps) pour réduire les concentrations bactériennes dans l'ensemble des concessions conchylicoles ?

La démarche proposée

Compte tenu de l'état de l'art en ce qui concerne les mécanismes d'adsorption des bactéries sur le matériel particulaire et plus généralement sur les conditions de survie ou de croissance de ces bactéries, il n'est pas possible de déterminer précisément les concentrations bactériennes au droit des zones sensibles.

Fig.1. L'AMELIORATION DE LA SALUBRITE DES EAUX CONCHYLICOLES
DE L'ESTUAIRE DE L'ELORN ET DU NORD DE LA RADE DE BREST

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE



Mais puisque d'une part les abattements de concentration liés à la dilution "physique" sont très importants, que d'autre part l'objectif est de hiérarchiser les sources de contamination plutôt que de connaître les vraies concentrations, on se propose de représenter les comportements des bactéries par des lois simples et communément utilisées : des champs de concentration seront calculés, correspondant à plusieurs "intensités" de ces lois simples et aux mécanismes mieux connus de convection et de dispersion par les courants. Les résultats ainsi obtenus doivent alors être amendés de façon à prendre en compte - de manière qualitative - les phénomènes d'adsorption sur les suspensions et les mécanismes probables de dépôt/remise en suspension/transport de ces particules.

C'est donc ce travail qui est exposé dans le présent rapport : on y trouve successivement une présentation de la méthode utilisée pour la modélisation des dilutions de rejet, une synthèse sur l'hydrodynamique du secteur étudié et les résultats en termes de dilution concernant les principaux rejets, avec application aux concentrations bactériennes pour certains comportements-type des bactéries. Compte tenu des incertitudes sur les quantités rejetées et surtout des probabilités de variation ultérieure de ces flux, tous les résultats sont présentés relativement à un rejet "unité". Il est alors possible de comparer l'impact des différents rejets en affectant ceux-ci de poids correspondant aux flux évalués dans le cadre de l'étude du milieu terrestre. Ce travail fera l'objet d'une phase ultérieure du programme.

I.2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

L'aire de l'étude fixée par le maître d'oeuvre comprend l'estuaire de l'Elorn et la partie Nord de la Rade de BREST. Elle est délimitée par la ville de LANDERNEAU (Pont du Rohan) à l'amont, et une ligne joignant la Pointe du Dellec à la Pointe de l'Armorique à l'aval (figure 1).

Les concessions conchylicoles, qui représentent donc les "zones sensibles", sont cartographiées sur la figure 37.

On peut aisément distinguer deux secteurs dans l'aire d'étude :

- L'estuaire de l'Elorn, de Landerneau au Pont de Plougastel, de configuration linéaire et caractérisé par de larges estrans. Cet estuaire a une longueur approximative de 13 km et une largeur moyenne à pleine mer variant de 50m(amont) à 1 000 m (aval). L'apport en eau douce en provenance d'un bassin versant d'environ 400 km² est très faible. Le débit moyen est de l'ordre de 5 m³/s avec des pointes à 12 m³/s (cf. figure 2 et L'YAVANC, 1984).

- Le nord de la rade de Brest, secteur "bidimensionnel" horizontal limité par le goulet qui offre une communication avec le large et la section "Ile Longue - Pointe de l'Armorique" qui permet l'échange avec la moitié Sud de la Rade.

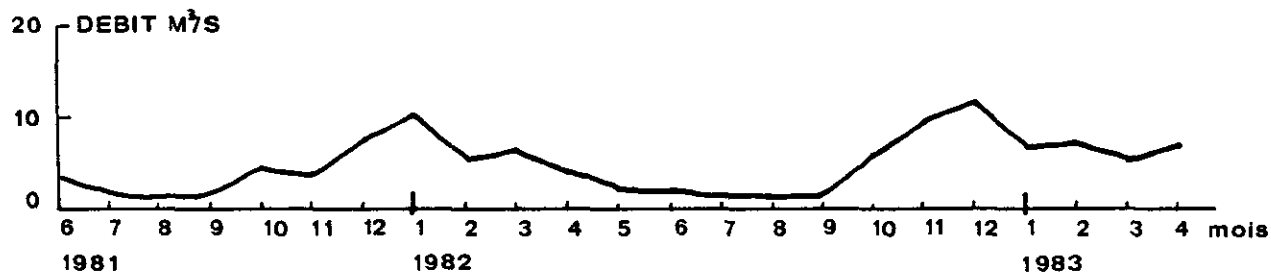


Fig.2 EVOLUTION MENSUELLE DU DEBIT DE L'ELORN
(données du Service Hydrologique centralisateur, Nantes)

Hydrodynamique

Les principales sources de circulation sont la marée, caractérisée par un marnage de 6,1 m en vive eau moyenne, et secondairement le vent. Cependant, lorsque l'Elorn est en crue, les apports d'eau douce peuvent induire des gradients de densité susceptibles de modifier la circulation, en particulier dans le chenal de l'Elorn.

Structures verticales

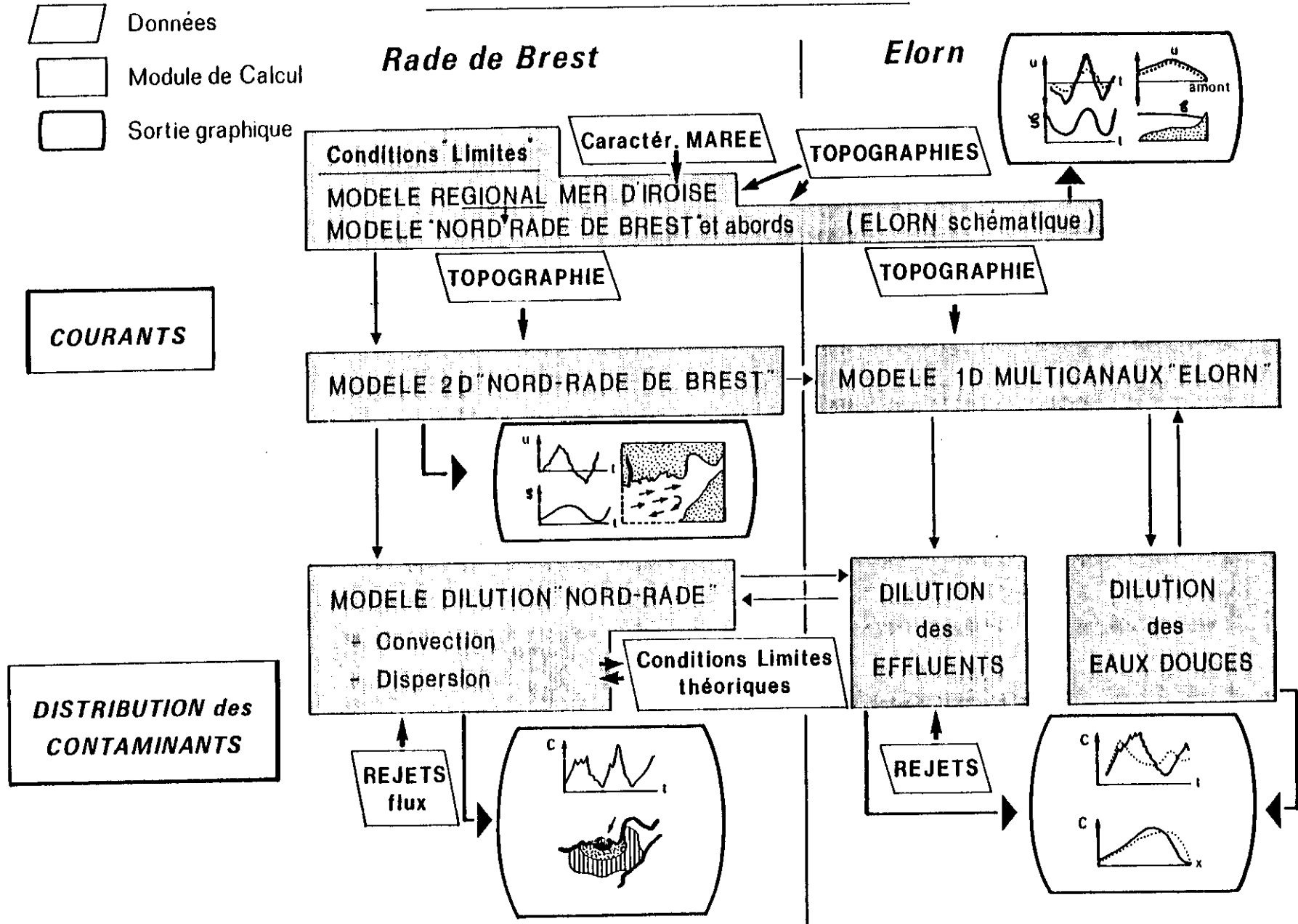
Le courant de marée, à peu près uniforme selon la verticale (sauf près du fond où se fait sentir le frottement sur la paroi), est caractérisé par une forte turbulence : il a donc tendance à favoriser le mélange vertical, particulièrement en vive eau. Au contraire, le vent agissant surtout par une tension à la surface de l'eau, le courant qu'il induit est a priori tridimensionnel : en fait les faibles profondeurs de la zone concernée ne permettent pas de véritable recirculation en profondeur, sauf peut-être au niveau du chenal de l'Elorn ou vers l'ouest (pour des profondeurs de l'ordre de 15-20 m). Enfin les éventuels gradients de densité sont susceptibles d'induire une circulation inversée en surface et au fond, phénomène classique en estuaire, mais seulement dans les secteurs les plus profonds, soit ici dans le chenal de l'Elorn en amont du pont de Plougastel.

Il en résulte que les répartitions verticales des concentrations doivent être relativement uniformes, sauf vers l'amont dans les zones encore profondes : c'est aussi ce qui ressort des nombreux prélèvements effectués pour l'étude de la Capacité d'Acceptation du Milieu Marin en rade de Brest (CNEOX, 1983) où il est rapporté qu'en amont du polder de la zone industrielle portuaire la stratification est plus marquée en morte-eau qu'en vive-eau tandis qu'en aval la tendance paraît inversée. D'autre part, de forts gradients ont été mis en évidence surtout très près des points de rejet.

Fig.3

Modèles : ELORN - RADE de BREST

ORGANISATION DES CALCULS



II - METHODOLOGIE - DESCRIPTION DES OUTILS

Pour le calcul de dilution des effluents dans l'aire d'étude, un logiciel intégrant plusieurs modèles a été créé (cf. fig. 3). Ce logiciel fonctionne selon le schéma suivant :

- 1 - Calcul des courants en rade et dans l'estuaire,
- 2 - Calcul des champs de concentrations d'un contaminant rejeté en 1 ou plusieurs points.

En raison de la configuration du site et de la distinction de deux secteurs, les calculs sont menés séparément pour l'Elorn et pour la rade. Toutefois la limite commune près du pont de Plougastel impose des couplages entre les modèles.

II.1. MODELE DE COURANT EN RADE DE BREST

Présentation du modèle

Le courant de marée étant barotrope et les profondeurs relativement faibles pour permettre des inversions selon la verticale du courant induit par le vent, il a paru raisonnable de schématiser la circulation en rade à l'aide d'un modèle bidimensionnel horizontal fournissant un courant "moyen sur la verticale". Les équations de Saint Venant, résolues par ce genre de modèle, sont désormais classiques : elles résultent d'une intégration selon la verticale des équations fondamentales de l'hydrodynamique (équations de Navier-Stokes) avec hypothèse de pression hydrostatique. Elles décrivent :

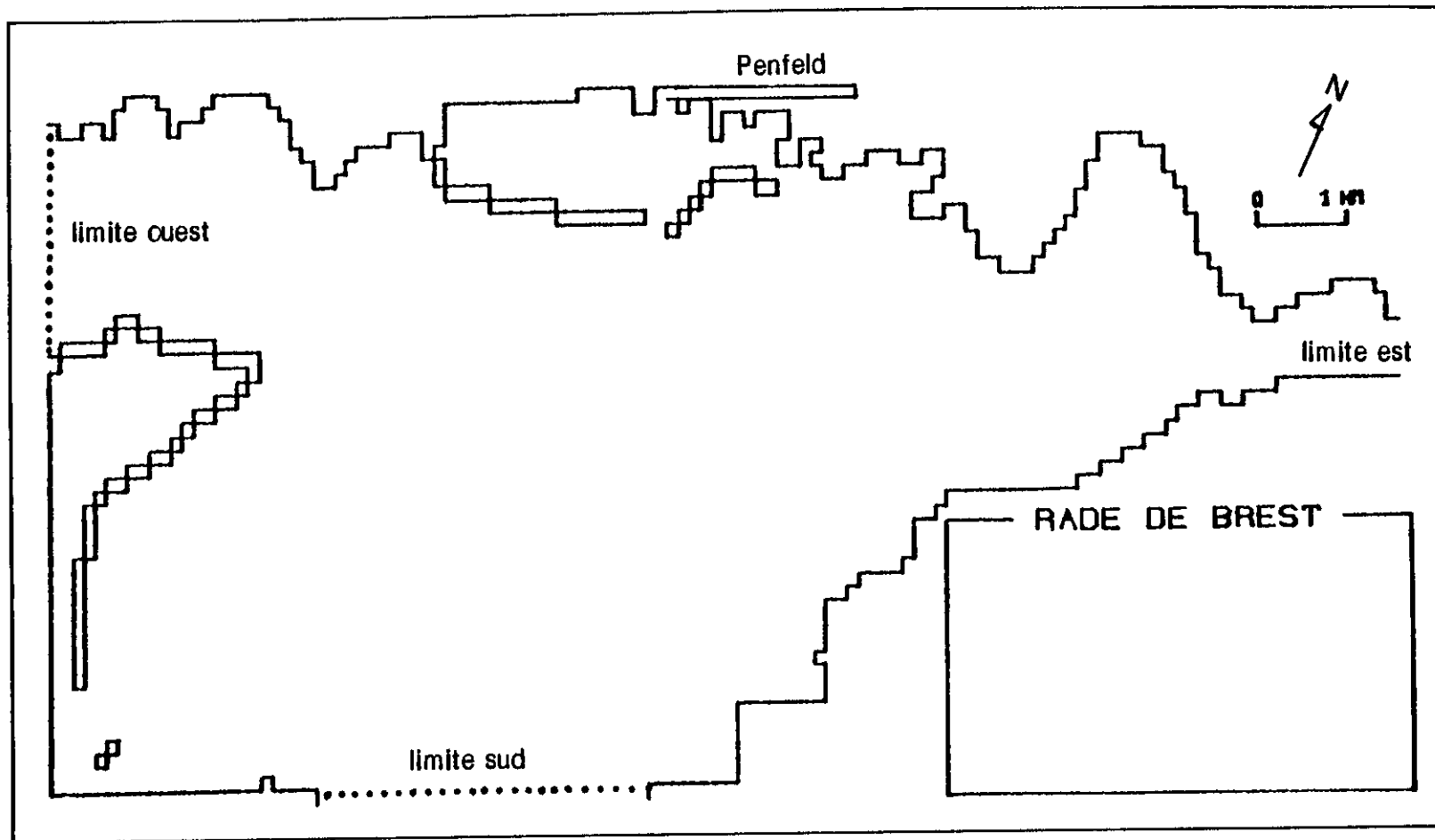
- La conservation de la masse d'eau,
- l'équilibre entre accélérations du fluide et forces en présence, à savoir : la pente de la surface, le frottement (sur le fond ou par viscosité) et la force de Coriolis. La tension superficielle induite par le vent peut y être ajoutée.

Le modèle, écrit par SALOMON (1981 et 1987), résout ces équations non linéaires selon un schéma en différences finies implicite aux directions alternées. La version utilisée ici calcule les composantes de vitesse aux noeuds de 2 grilles décalées, précisément là où sont fournies les cotes du fond (donc la topographie de l'aire d'étude). Une telle procédure permet un traitement automatique des zones découvrantes (par exemple le secteur du Moulin Blanc ou le sud de la rade abri).

Caractéristiques du modèle : implantation et maillage

Le choix des limites est imposé par l'utilisation ultérieure des courants calculés pour le transport des effluents : considérant qu'une masse d'eau quittant la rade par

Fig.4 MODELE DE LA RADE DE BREST - IMPLANTATION DU MAILLAGE



l'ouest ne peut revenir que fortement diluée, le goulet constitue une limite "naturelle". De même la ligne rejoignant l'Ile Longue et la pointe de l'Armorique semble une limite sud correcte dans la mesure où tout élément en provenance du nord-est de la rade et se dirigeant vers le sud n'est susceptible de pénétrer à nouveau dans la zone couverte par le modèle qu'en direction du goulet, donc en dehors de l'aire d'étude (ceci est dû au tourbillon central de la rade, observé maintes fois). La frontière orientale est choisie sur l'Elorn au lieu désigné "Le Passage" : ceci permet un chevauchement des modèles Rade et Elorn.

Les mailles de calcul sont des carrés de 125 m de côté : cette définition est juste suffisante pour décrire les gradients de vitesse de part et d'autre du chenal de l'Elorn, près de la rade abri, ou dans le Moulin Blanc : mais elle conduit à une matrice importante (124 x 55) et des temps de calcul assez longs. Le maillage ainsi défini est représenté en figure 4.

N.B. : 1. pour l'étude de la Capacité d'Acceptation du Milieu Marin, le modèle de courant à haute définition ne s'étendait que jusqu'à la rade-abri : la prise en compte de rejets plus à l'ouest nous a conduits à repousser les limites de la zone d'investigation.

2. Dans le souci de réduire les dimensions des matrices de calcul, la configuration de la baie de Roscanvel a été modifiée, le fond de la baie au sud-ouest étant remplacé par un bassin de même volume oscillant situé "dans" la presqu'île de Roscanvel. Il en est de même pour l'estuaire de la Penfeld, dont le cours a été orienté selon l'axe SW-NE du modèle. Ces dispositions ne modifient pas les courants dans l'aire d'étude.

Conditions aux limites :

Pour décrire le courant au centre du modèle et en particulier entre les limites Ouest et Sud, il est nécessaire de connaître précisément les déphasages entre les niveaux de la surface en ces limites. A cette fin, deux modèles bidimensionnels emboîtés couvrant l'ensemble de la mer d'Iroise ont été exploités, les seules données nécessaires étant des variations de niveaux très au large. Pour la condition limite Est, on utilise la hauteur d'eau calculée par le modèle de grande emprise dans lequel l'estuaire de l'Elorn est schématisé grossièrement. Pour de plus amples détails sur les caractéristiques de ces modèles de définition des conditions limite, se reporter à l'étude de la Capacité d'Acceptation du Milieu Marin (CNEOXO, 1983).

Paramétrage

Les paramètres nécessaires pour le réglage du modèle sont le coefficient de frottement sur le fond et la viscosité.

- Le frottement est du type "Strickler" avec un coefficient variant théoriquement avec la rugosité du fond. En fait la comparaison entre résultats du modèle et mesures de courant nous a conduit à adopter une variation linéaire par segments du coefficient entre le goulet et l'Elorn, comprise entre 33 u S.I. à l'Ouest et 18 u. S.I. à l'Est, l'augmentation du frottement à l'Est entraînant des vitesses plus proches de la réalité (cf. § III-1).

- La viscosité ($10 \text{ m}^2/\text{s}$) a été choisie dans les limites de stabilité du modèle de façon à reproduire le plus fidèlement possible les gradients de vitesse près des bords et donc les éventuels contre-courants. Il faut noter qu'un terme de compensation de la viscosité numérique induite par l'advection a été ajouté à l'équation du mouvement : cette procédure permet de réduire la viscosité minimum à introduire dans le modèle et d'obtenir des champs de courant non "lissés". Ainsi un meilleur respect des gradients de vitesse près du chenal de l'Elorn peut être observé par rapport aux simulations effectuées pour l'étude de la Capacité d'Acceptation du Milieu Marin.

II.2 - MODELE DE DILUTION D'UN CONTAMINANT EN RADE

Nous avons rappelé en I-2 que la structure verticale des concentrations était peu stratifiée en rade de Brest, sauf très près des rejets. La justification physique est une moindre densité des effluents par rapport à l'eau de mer : ces effluents vont donc remonter en surface avant de se mélanger en profondeur grâce aux courants. La première phase est courte dans une mer peu profonde comme la rade et conduit à une dilution équivalente à celle qui donnerait une source déplacée de quelques dizaines de mètres (cf. CNEOX, 1983, § II-3-1). Il est donc raisonnable de négliger cette phase.

En ce qui concerne la deuxième phase, les processus simultanés de dispersion horizontale et de mélange vertical sont complexes à simuler et exigent en principe un outil tridimensionnel. Pour schématiser, on peut considérer que la dilution de l'effluent se fait sur une couche de surface bien délimitée, ou au contraire de manière homogène sur la hauteur d'eau, le cas réel de la rade de Brest étant probablement intermédiaire. Dans le cadre de l'étude de la Capacité d'Acceptation du Milieu Marin, le premier schéma a été traité (CNEOX, 1983) ; ici on se propose de traiter le second, à l'aide d'un modèle d'advection-dispersion, et de comparer les résultats après validation.

Construction du modèle d'advection-dispersion

La concentration C d'un contaminant en milieu bidimensionnel répond à l'équation suivante (appelée "équation d'advection-dispersion") :

$$\underbrace{\frac{\partial C}{\partial t}}_{\text{Variation de concentration}} + \underbrace{\vec{V} \cdot \vec{\text{grad}} C}_{\text{advection ou transport par le courant}} - \underbrace{\text{div}(\bar{K} \vec{\text{grad}} C)}_{\text{dispersion}} = \underbrace{S + P}_{\text{termes "source" ou "puits" relatifs à des processus non physiques}} \quad (1)$$

L'Equation (1) est résolue par une méthode à "pas fractionnaires" en 3 étapes :

l'advection : $\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\text{grad}} C = 0$

la dispersion : $\frac{\partial C}{\partial t} - \frac{1}{H} \text{div}(\bar{K} \cdot H \cdot \vec{\text{grad}} C) = 0$

les processus "biochimiques" ou "sédimentologiques" $\frac{\partial C}{\partial t} = S + P$

. L'advection est résolue par une méthode de "caractéristiques" (on "remonte" des trajectoires à chaque pas de calcul) en fonction du courant \vec{V} calculé par le modèle bidimensionnel décrit au § II-1, à l'aide du code de calcul "BICAR" développé par EDF-LNH (cf. ESPOSITO, 1981).

L'intérêt d'une telle méthode est de réduire la diffusion numérique induite par la schématisation des termes d'advection. On peut rappeler que pour l'étude de la Capacité d'Acceptation du Milieu Marin, ce phénomène parasite avait été éliminé en décomposant le rejet en rejets élémentaires dont on suivait les centres de gravité : mais dans ce cas la convection différentielle au sein d'une tâche élémentaire était abusivement négligée.

. La dispersion est résolue par une méthode de différences finies de type "A.D.I." (implicite en directions alternées). Le coefficient de dispersion K est isotrope et varie en fonction du courant et de la hauteur d'eau (cf. formulation classique de Elder).

$$\text{On a } K = \begin{vmatrix} K & 0 \\ 0 & K \end{vmatrix}, \quad K = K_0 \cdot H^{5/6} |\vec{V}|, \quad \text{avec } K_0 = 0,6.$$

. Les processus biochimiques sont traités de manière explicite et réduits dans notre étude à une décroissance de type $\partial C / \partial t = -\lambda C$, $\lambda = \text{Cte}$.

A priori cette loi de décroissance représente mal l'ensemble des processus biologiques que subissent les bactéries : mais en l'état actuel de la science, c'est encore la seule manière de les prendre en compte. Pour l'étude de la Capacité d'Acceptation du Milieu Marin en rade de Brest, une comparaison entre numérations bactériennes d'échantillons prélevés in situ et calculs de concentration théorique sans dégradation, a conduit à une grande dispersion des taux de décroissance, avec des valeurs très élevées pour les stations proches des rejets et des valeurs relativement faibles ailleurs : exprimés en "T90", temps au bout duquel 90 % des bactéries ont disparu, les résultats étaient respectivement de quelques heures et de 2 à 3 jours (avec bien entendu une large dispersion due à l'imprécision des comptages). Une telle différence provient de ce qu'en champ proche les bactéries sont soumises à mortalité et disparition par adsorption sur les suspensions qui sédimentent, tandis que plus loin elles se dégradent moins vite et peuvent même se développer ; elles peuvent aussi réapparaître lors des remises en suspensions provoquées par des coups de vent ou des marées de vive eau.

Pour tenir compte de ces difficultés, nous nous proposons de tester plusieurs taux de dégradation et de pondérer les résultats en fonction des cas les plus probables.

Caractéristiques du modèle

Le nombre de mailles et leur espacement sont les mêmes que pour le modèle de courant mais les noeuds de calcul sont décalés d'un demi-pas par rapport aux points de calcul des composantes de vitesse : la résolution de l'étape advection exige donc l'évaluation du courant \vec{V} par interpolation, ce qui induit un léger lissage du courant. Le pas de temps est 10 minutes.

Conditions aux limites

Pour calculer le champ de concentration à l'intérieur de la zone d'étude, il faut connaître la concentration sur les limites ouvertes, lorsque le courant entre dans ce secteur d'étude.

Limite sud : lorsque le courant entre en rade-nord par le sud (jusant), il se dirige vers le goulet (cf. chap. III) : vis à vis de la contamination des zones sensibles de l'est de la rade, il n'y a donc aucun inconvénient à négliger l'apport par la limite sud en y imposant une concentration nulle en jusant. Cependant les concentrations calculées au sud est du modèle et près de la rive sud du goulet seront erronées.

Limite ouest : les effluents quittant le secteur modélisé par l'ouest en fin de jusant sont susceptibles de remonter assez loin en amont au cours du flot suivant. c'est pourquoi une condition rentrante est imposée par une formulation analytique de la concentration : il est supposé qu'au cours du flot, la concentration diminue de manière sinusoidale depuis la valeur calculée en fin de jusant jusqu'à une valeur nulle.

Limite est : un recouvrement du modèle de la rade et du modèle de l'Elorn décrit aux § II-3 et II-4 permet une continuité des flux de concentrations transitant par la limite amont du modèle Rade et la limite aval du modèle Elorn.

II.3. - MODELE DE L'ESTUAIRE DE L'ELORN

La schématisation de l'estuaire de l'Elorn pose problème dans la mesure où les variations de hauteur d'eau entre le chenal et l'estran entraînent des écarts de vitesse transversaux tandis que l'occurrence de stratifications suggère une distinction surface/fond et donc un calcul selon la dimension verticale, tout au moins le long du chenal. La mise au point d'un modèle tridimensionnel en zone découvrante étant délicate, nous avons choisi de développer un modèle **unidimensionnel multicanaux** avec possibilité de calculer ponctuellement la structure verticale des vitesses. Ce modèle ayant été créé spécialement dans le cadre de cette étude, nous allons l'examiner plus en détail.

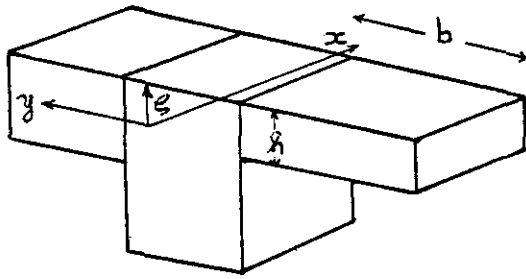
Mise en équation du problème

Hypothèses de base :

1. On suppose la pression hydrostatique.
2. La propagation de la marée est supposée simultanée d'une rive à l'autre de l'estuaire : à un instant donné, la cote de la surface libre (ou surélévation) est donc la même sur une section transversale de l'estuaire.
3. Les accélérations transversales sont négligées ; ainsi les circulations secondaires liées aux effets de méandre ne sont pas prises en compte. De même la force de Coriolis est négligée.
4. Les variations de densité sont prises en compte seulement dans les termes de pression.

Enfin, l'intérêt de la distinction des canaux réside dans l'obtention de courants différents au centre et sur les côtés à cause de l'effet plus ou moins grand du frottement sur le fond.

Notations : L'estuaire est schématisé par des canaux parallèles (indice j) découpés en cellules (i, j) où i représente le numéro de section.



x, y : Coordonnées longitudinale et transversale
 $b(x,y), h(x,y)$: largeur et hauteur d'eau de la cellule (i,j)
 $U(x,y)$: débit longitudinal, par unité de largeur
 $V(x,y)$: débit transversal entre deux cellules d'une même section.
 $\rho(x,y)$: densité de l'eau de la cellule (i,j)
 $\xi(x)$: surélévation dans la section i
 $S(x,y)$: salinité " " "
 g : accélération de la pesanteur.

On écrit successivement les équations suivantes :

- conservation de la masse d'eau contenue dans toutes les cellules d'une même section :

La variation de volume des cellules compense la somme des flux entrant ou sortant dans l'ensemble de ces cellules :

$$\sum_j b_j \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_j b_j U_j \right) = 0 \quad (2)$$

- conservation de la quantité de mouvement

c'est l'équilibre :

$$\underbrace{b \frac{\partial U}{\partial t}}_{\text{accélération}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[b U \frac{U}{h} \right]}_{\text{advection}} + \underbrace{\delta \left(V \frac{U}{h} \right)}_{\text{gradient de pression}} + \underbrace{g h b \frac{\partial \xi}{\partial x}}_{\text{pente de surface}} + \underbrace{g \frac{h^2 b}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}}_{\text{gradient de densité}} - \underbrace{(\tau_{xy} + \tau_{xd}) b}_{\text{frottement au fond et en surface}}$$

$$\underbrace{- \frac{\partial}{\partial x} \left[b N_x \frac{\partial (U/h)}{\partial x} \right]}_{\text{dispersion longitudinale}} - \underbrace{\delta \left[N_y h \frac{\partial (U/h)}{\partial y} \right]}_{\text{dispersion transversale}} = 0 \quad (3)$$

dispersion longitudinale

dispersion transversale

- continuité locale

La variation de volume d'une cellule compense la somme des flux entrant ou sortant dans cette cellule :

$$- b \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} b U + \delta(V) = 0 \quad (4)$$

- densité de l'eau (équation d'état)
(les variations de température sont négligeables)

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha S), \text{ avec } \alpha = 0.0008 \text{ et } \rho_0 = 1\,000 \text{ kg/m}^3 \quad (5)$$

- conservation du sel :

C'est une équation d'advection-dispersion analogue à celle présentée en § II-2 :

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} (b h S)}_{\text{Variation}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} (b U S)}_{\text{advection}} + \delta(V S) - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} (b h K_x \frac{\partial S}{\partial x})}_{\text{dispersion}} - \delta(h K_y \frac{\partial S}{\partial y}) = 0 \quad (6)$$

Schéma de résolution

Le système écrit précédemment comprend 5 équations à 5 inconnues (ξ , U , V , ρ et S) à résoudre en chaque cellule. La méthode de calcul utilisée est un schéma aux différences finies à grilles décalées dans l'espace et dans le temps (les surélévations et salinités sont calculées entre deux instants de calcul des débits et en des noeuds intermédiaires). Le schéma est explicite pour l'hydrodynamique et implicite pour le calcul des salinités. Enfin le maillage peut-être graduellement variable.

L'écriture du système à résoudre en différences finies est donnée dans l'annexe 1. Pour plus de détails sur la méthode de résolution et l'effet de certains termes, voir aussi CAILLUET et LE MASSON, 1986.

Paramétrisation

* Le frottement sur le fond est paramétré en fonction de la vitesse par une loi de type "Strickler" (cf. § II-1) :

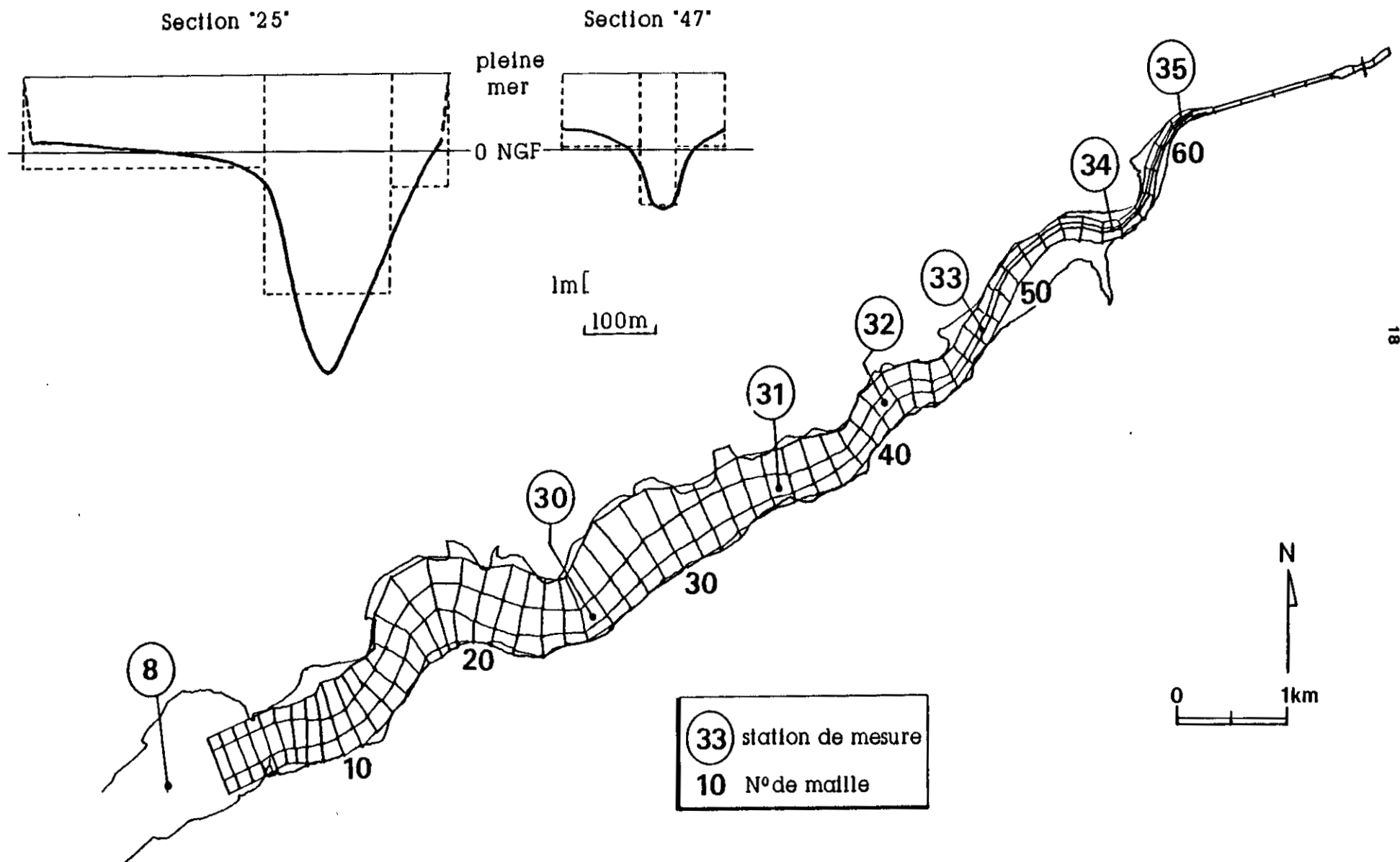
$$\vec{\tau}_f = -g \vec{U} |\vec{U}| / (k^2 h^{7/3})$$

Ce coefficient de frottement k est le principal paramètre de réglage du modèle avec la "viscosité" (coefficients de dispersion transversal et longitudinal). Ils ont été ajustés sommairement pour obtenir des vitesses calculées conformes aux quelques mesures disponibles (cf. ch. III).

Ainsi on a choisi : $k = 50$ u.S.I.
 $N_x = 10 \text{ m}^2/\text{s}$
 $N_y = 5 \text{ m}^2/\text{s}$

Fig.5 MODELE 'ELORN': IMPLANTATION DU MAILLAGE

exemples de profils en travers



* Le frottement en surface permet la prise en compte du vent. Pour s'accorder à la modélisation unidimensionnelle, il faut supposer que la tension exercée par le vent reste parallèle à l'axe de l'estuaire, ce qui est réaliste si l'on s'intéresse aux cas extrêmes et/ou défavorables dans l'Elorn (vent de sud-ouest en particulier). On prend la formulation classique :

$$\tau_s = 1,8 \cdot 10^{-6} W|W| \text{ où } W \text{ est la vitesse du vent.}$$

* En ce qui concerne la distribution des salinités, les paramètres sont les coefficients d'échange longitudinal (K_x) et transversal (K_y), le calage étant obtenu par comparaison avec des mesures réparties dans l'estuaire). Les formulations du type "Elder" faisant intervenir la hauteur d'eau et la vitesse (cf. § II-2) ont été essayées, mais furent sans intérêt compte tenu de la nécessité de prendre $K_x \geq 10 \text{ m}^2/\text{s}$ pour des raisons de stabilité du calcul numérique. Ainsi on a retenu $K_x = 10 \text{ m}^2/\text{s}$ et $K_y = 5$ ou $0 \text{ m}^2/\text{s}$.

Implantation du modèle.

Avec un profil en travers caractérisé par un chenal compris entre 2 banquettes de vase découvrant à basse mer, l'estuaire de l'Elorn se prête relativement bien à une schématisation par 3 canaux (cf. Fig. 5).

La largeur et la profondeur des canaux sont variables de telle sorte que la forme générale des sections soit respectée; ainsi on cherche à placer la limite entre deux canaux au droit d'une rupture de la pente transversale du fond. Pratiquement cela n'est pas toujours possible dans la mesure où il faut conserver un caractère progressif à la variation des dimensions de maille. Pour la même raison, les méandres de l'estuaire ont été légèrement redressés de façon à ne pas trop faire varier les longueurs des mailles.

La longueur moyenne des mailles est 200 m, ce qui permet une description assez fine de l'estuaire.

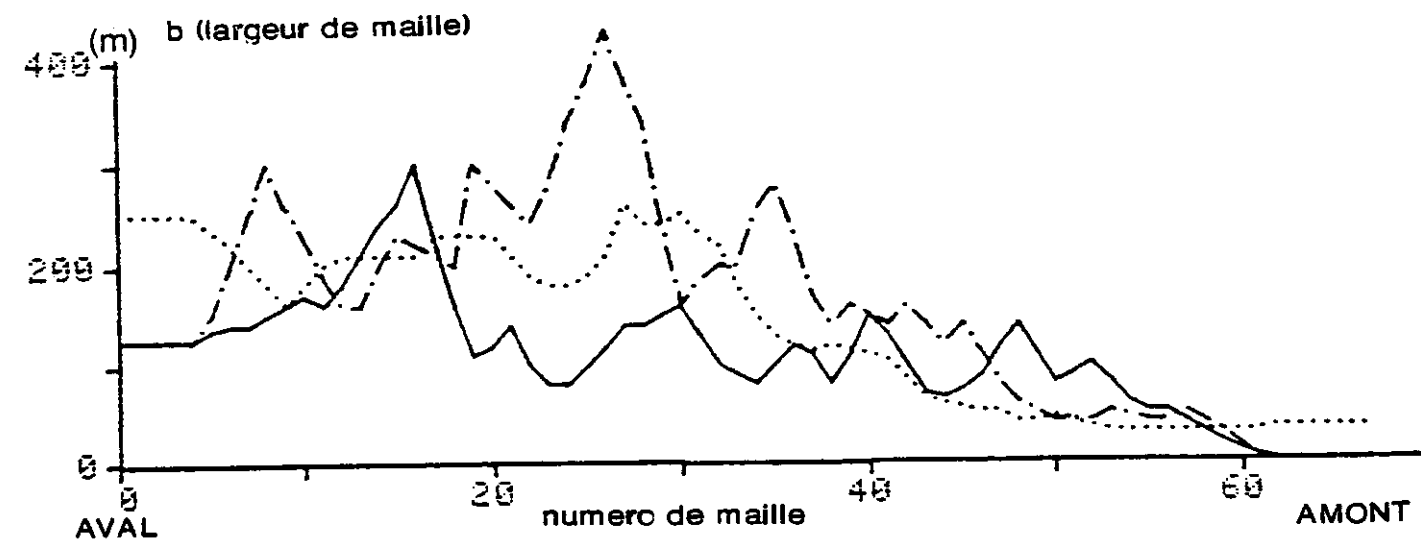
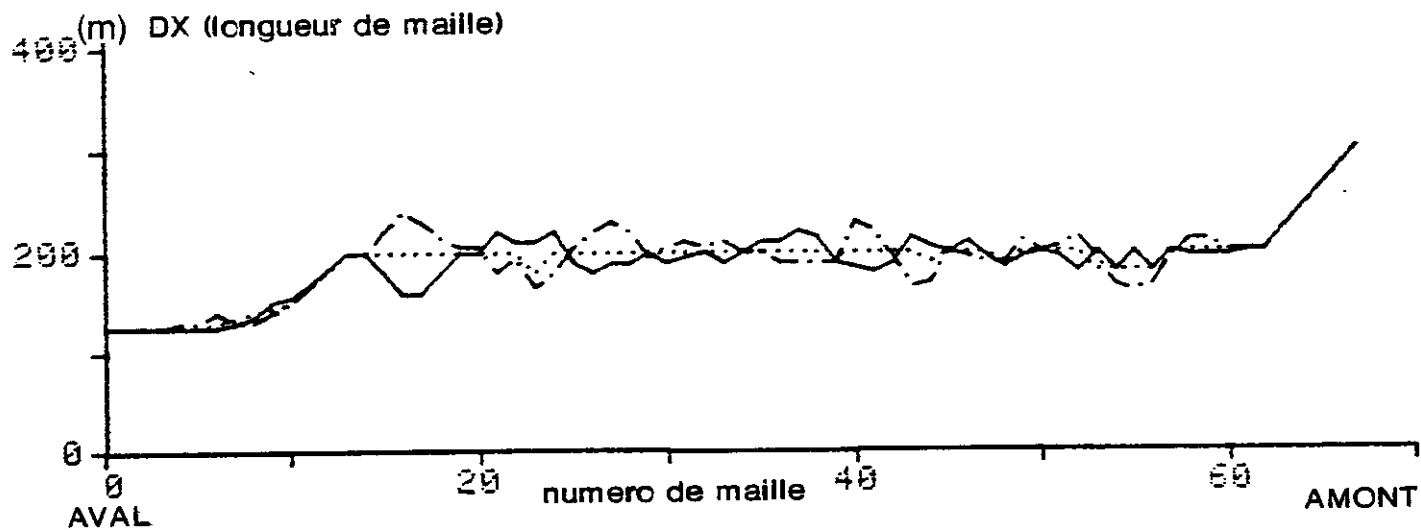
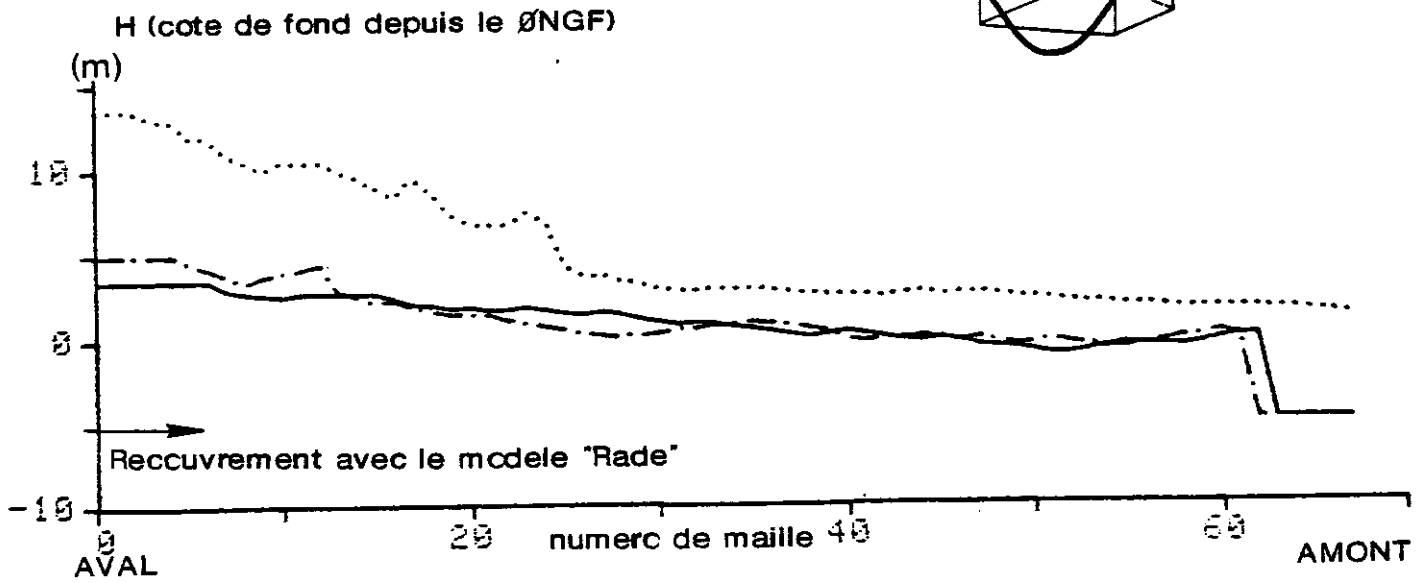
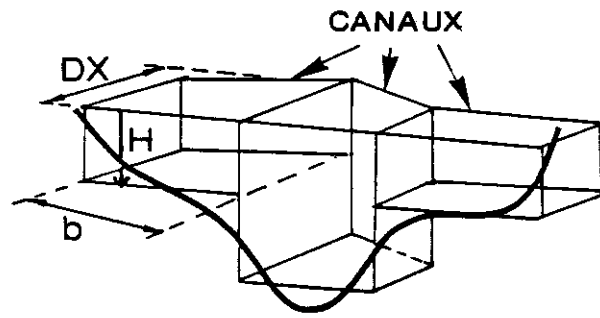
Avec une limite aval située au lieu dit "le Passage", le modèle comprend 68 mailles jusqu'à sa limite amont matérialisée par le pont de Rohan à Landerneau. Pour assurer une continuité entre les modèles "Rade" et "Elorn", le maillage de ce dernier varie en aval jusqu'à la valeur 125 m (= pas d'espace du modèle Rade), ce qui permet un recouvrement des deux modèles. Dans la direction transversale, il y a coïncidence entre les canaux latéraux et les "lignes" d'ordonnées respectives 33 et 36 du modèle "Rade" tandis que le canal central se prolonge en rade par la réunion des "lignes" 34 et 35.

Afin de constituer un fichier des profondeurs de précision suffisante pour la résolution du modèle, une campagne de levés bathymétriques a été organisée en automne 1983 (L'YAVANC, 1984) : simultanément aux sondages effectués depuis une embarcation légère, la marée a été mesurée en 4 points de l'estuaire à l'aide de marégraphes enregistreurs. 2 cartes ont été produites : une

Fig.6

Modèle ELORN: Caractéristiques géométriques du mouillage

— rive sud
 chenal central
 - - - rive nord



carte topographique où les cotes du fond sont rapportées à une référence horizontale (c'est ce qu'il faut introduire en entrée dans le modèle) et une carte bathymétrie où les cotes du fond sont rapportées au "zéro marin" (niveau des plus basses mers). Un exemplaire de cette carte est fournie en annexe au présent rapport.

Les caractéristiques géométriques des canaux, d'aval en amont, sont précisées par la figure 6.

Conditions aux limites

La condition limite amont est la donnée du débit de la rivière. En aval, la hauteur d'eau doit être connue à tout instant. Pour le calcul des salinités, il faut se donner la salinité aval pendant le flot. La formulation analytique suivante, caractérisée par une remontée rapide vers la salinité de pleine mer, a été testée avec succès :

$$S = \frac{1}{2}(S_J + S_{PM}) - \frac{1}{2}(S_{PM} - S_J) \cos(0.021 \sqrt{t})$$

où S_J est la salinité calculée en fin de jusant
et S_{PM} est une donnée réaliste de salinité à pleine mer.

Calcul de la structure verticale des vitesses

En écrivant la différence entre l'équation de conservation locale de la quantité de mouvement et l'équation de conservation intégrée sur la hauteur d'eau [équation (3)], il est possible de calculer la structure verticale de l'écoulement (LE HIR, 1980). Cette technique permet de mettre en évidence l'effet d'un gradient horizontal de densité ainsi que celui d'un vent exerçant une tension en surface. Toutefois les gradients verticaux ainsi calculés sont dépendants d'un paramètre mal connu : la viscosité verticale. Aussi les résultats devront-ils être considérés comme qualitatifs.

II.4. - MODELE DE DILUTION D'UN CONTAMINANT DANS L'ESTUAIRE DE L'ELORN

L'équation d'advection-dispersion à résoudre pour évaluer la dilution d'un contaminant est analogue à l'équation de conservation du sel (6), aux termes source ou puits et aux conditions limite près.

Dans le cadre d'une utilisation isolée du modèle Elorn, on choisira une condition limite aval analogue à celle utilisée pour le sel, avec une valeur nulle à pleine mer. Sinon, c'est une concentration déduite du flux calculé par le modèle rade qui sera introduite au cours du flot.

Enfin une loi de dégradation du type $\partial c/\partial t = -\lambda C$, déjà envisagée pour le calcul des dilutions en rade, peut être incluse dans le modèle Elorn.

II.5. - INTEGRATION DES MODELES

La figure 3 montre comment les calculs s'organisent en vue de la détermination des dilutions. On peut schématiquement distinguer deux étapes découplées.

1. Calcul des courants :

Cette étape est morcelée en calculs successifs, non couplés entre eux :

- Mise en oeuvre du modèle "Mer d'Iroise" pour obtention des conditions limite du modèle Rade de Brest et abords.

- Mise en oeuvre du modèle "Rade de Brest et abords" pour obtention des conditions limite du modèle Rade-Nord.

- Mise en oeuvre du modèle "Rade-Nord" et "stockage" des champs de courant toutes les 10'.

- Mise en oeuvre du modèle "Elorn" avec calcul simultané des hauteurs d'eau/vitesses et de la distribution des salinités pour la prise en compte des gradients de densité. Stockage des champs de courant et des niveaux toutes les 10'. Le calcul de la structure verticale ou la prise en compte des effets de densité sont des options du programme.

Les deux derniers modèles peuvent être couplés de façon à ajuster la condition limite (C.L.) amont du modèle Rade à la C.L. aval du modèle Elorn. Compte tenu du schéma de résolution implicite du modèle Rade, le couplage ne peut se faire que grâce à un chevauchement des 2 modèles sur quelques mailles. Un tel couplage a été réalisé pour la simulation du vent.

2. Calcul des concentrations d'effluent

Connaissant à tout instant le champ des vitesses, on calcule par les modèles d'advection dispersion "Rade" et "Elorn" le champ de concentration relatif à une ou plusieurs sources. Les flux relatifs aux sources peuvent varier à chaque pas de temps (= 10') ; ils sont instantanément répartis dans le volume d'une maille.

Le couplage des modèles est indispensable si l'on souhaite représenter le transfert de l'Elorn vers la rade et réciproquement. Puisque dans le calcul dynamique seule la continuité de la surface libre est assurée, et que donc celle des débits ne l'est pas nécessairement, le couplage des modèles de dilution comporte l'écriture de la continuité des flux au détriment parfois de celle des concentrations.

Pour économiser du temps de calcul, le logiciel de dilution permet de calculer simultanément trois champs de concentration.

Enfin, on peut citer l'existence d'une version du logiciel calculant simultanément courant et concentrations dans l'Elorn, sans couplage avec le modèle Rade : cette version est économique dans les cas où l'interaction avec la rade n'est pas primordiale (ex : effet de variation au cours de la marée du régime d'un rejet amont).

II.6. - SORTIES GRAPHIQUES

Un logiciel d'illustrations graphiques des résultats a été développé et adapté aux modèles Rade et Elorn. On distingue :

En rade de Brest:

- dessins de champ de courant (instantané ou résiduel),
- dessins de champ de concentration,
- tracés de "point fixe" (i.e. variation au cours du temps d'une grandeur évaluée en un même point) pour la surélévation, le courant, les concentrations de plusieurs effluents.

Pour l'estuaire de l'Elorn :

- Des points fixes de courant, hauteur d'eau et/ou concentration simultanément pour les trois canaux d'une même section.
- Des "profils" longitudinaux présentant l'évolution de l'aval vers l'amont, pour les 3 canaux, de paramètres tels que niveau d'eau, vitesses et concentrations.

Remarque importante :

L'équation d'advection-dispersion qui régit la distribution d'un effluent a une forme linéaire, même avec un terme de dégradation tel que formulé au § II-2. Il en résulte une proportionnalité entre les concentrations calculées et les flux de rejets introduits. Cela a deux conséquences bénéfiques :

- Il suffit de réaliser un calcul de dilution relatif à un rejet unité pour déduire la concentration de tout effluent rejeté en continu, quelqu'en soit le flux.

- En présentant les concentrations selon une échelle logarithmique, un simple décalage d'unité permet de lire instantanément la concentration en un point ou à un instant donné, pour un débit de rejet quelconque. Il sera largement tiré parti de cette possibilité pour interpréter les résultats des simulations en termes de flux admissibles.

III - LES COURANTS EN RADE DE BREST ET DANS L'ELORN

Ce chapitre présente les courants calculés ainsi qu'une comparaison avec les mesures après éventuel réglage des modèles par ajustement des paramètres cités au chapitre II.

III.1. - LES COURANTS CALCULES DANS LE NORD DE LA RADE DE BREST

III.1.1. Description générale

Les figures 7 à 18 présentent une succession horaire de 12 champs de courant simulés en marée de vive eau (précisément, la marée du 13 juin 1980, coefficient 94).

* On observe sur la figure 7 qu'à basse mer (BM), les courants sont faibles : l'étalement de courant est en phase avec celle de la marée. En effet, à Brest, l'onde marée est quasi-stationnaire, les courants correspondant à un remplissage ou une vidange de la rade.

Sur cette même figure, des contre-courants côtiers sont mis en évidence dans le goulet : il s'agit en fait d'une avance de phase des courants près des rives (le flot a déjà commencé). Cette avance de phase liée à une moindre inertie devant le terme moteur que représente la pente de la surface libre (onde marée) est induite par un ralentissement des vitesses près des bords : il s'agit d'un phénomène analogue à l'avance du courant de fond sur celui de surface observé au moment des renverses et provoqué par le frottement sur le fond (LE HIR, 1980).

On note aussi la persistance du jusant dans le chenal de l'Elorn : c'est l'effet du retard de l'onde marée vers l'amont, sensible à BM au moment où les hauteurs d'eau sont faibles (cf. § III-2).

Enfin dans le centre de la rade, on observe deux tourbillons : disposés autour d'un flux en provenance du sud de la rade, ces tourbillons sont provoqués par frottement latéral en baie de Roscanvel d'une part et dans l'anse du Caro d'autre part.

Toutes ces structures sont remarquablement en accord avec les mesures en nature et sur modèle physique présentées en figure 7b.

* Les figures 8 à 12 mettent en évidence la progression du flot dans la rade, le maximum de courant ayant lieu à mi-marée dans le goulet. On note successivement :

- La création d'un tourbillon à l'abri de la pointe des Espagnols par frottement latéral ; par la suite ce tourbillon s'étend et se déplace vers le centre de la Rade.

Fig. 7

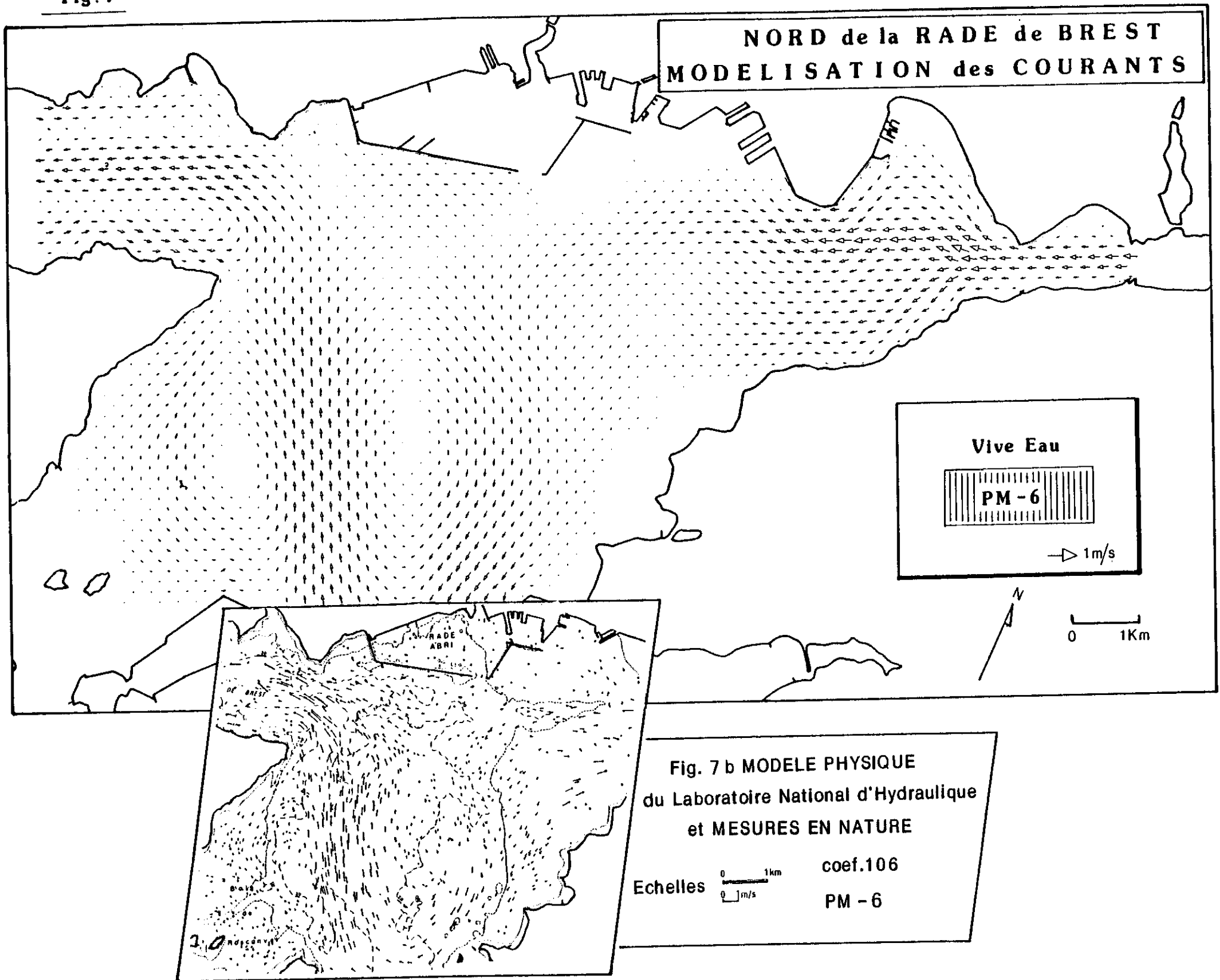


Fig. 8

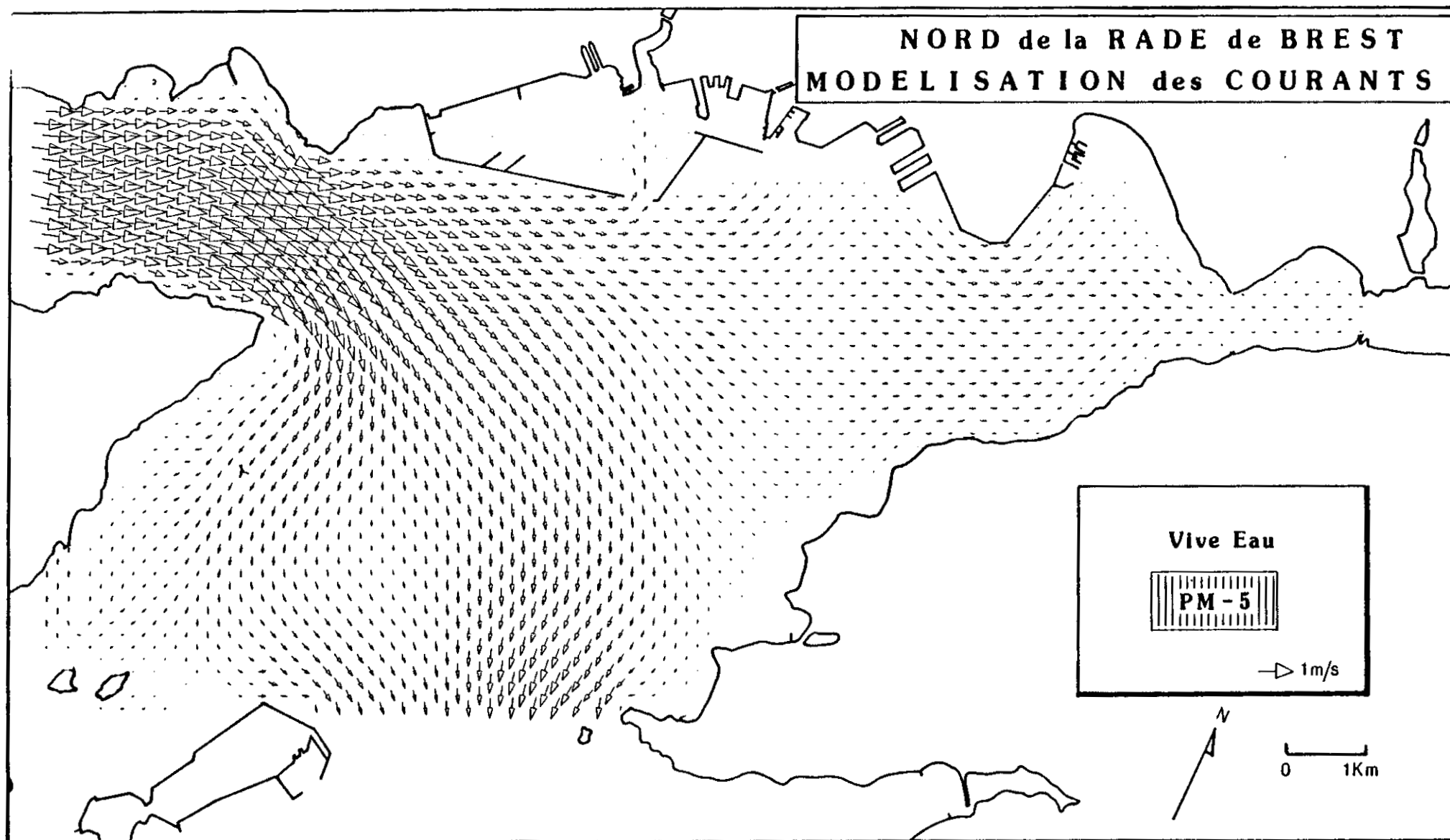


Fig. 9

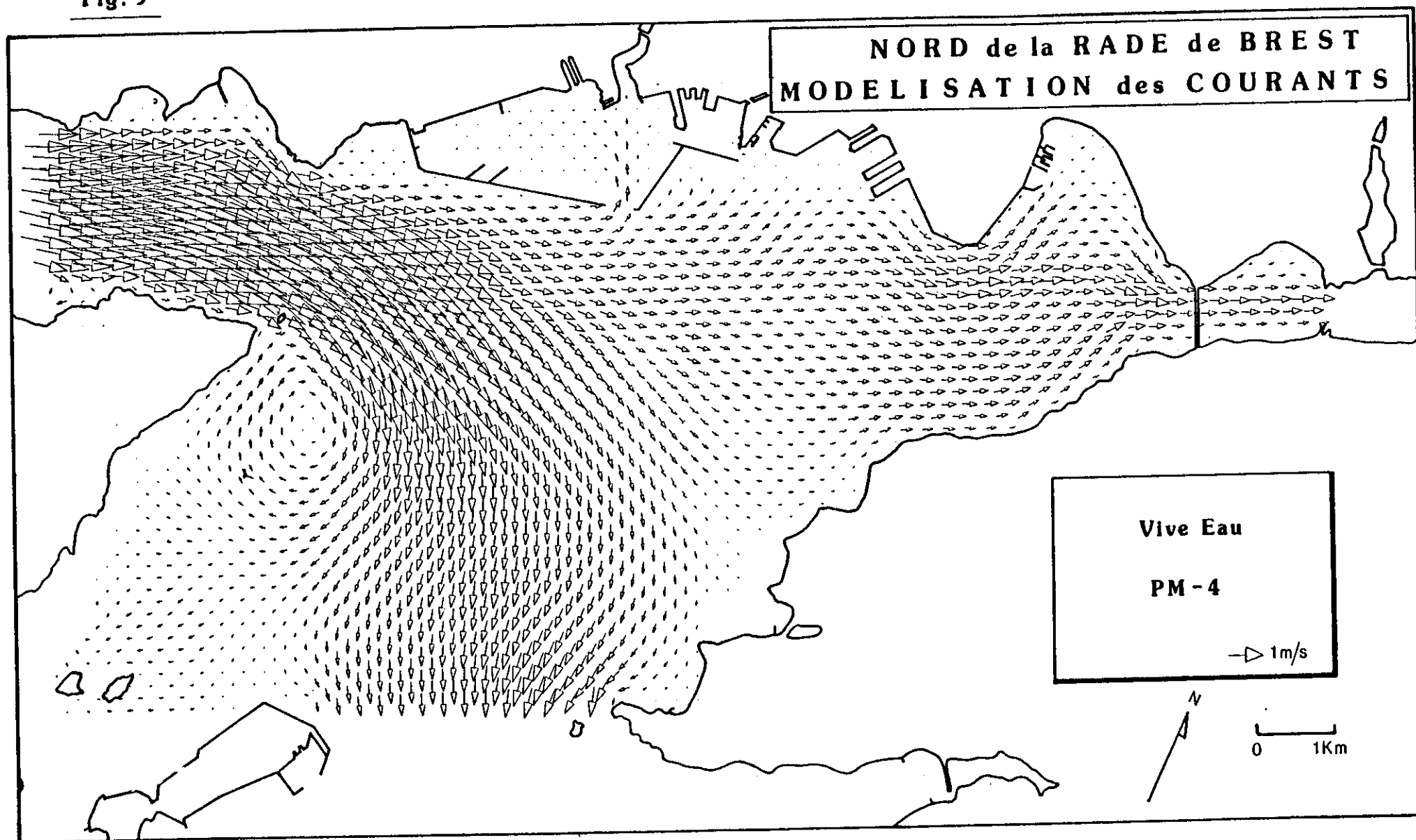


Fig.10

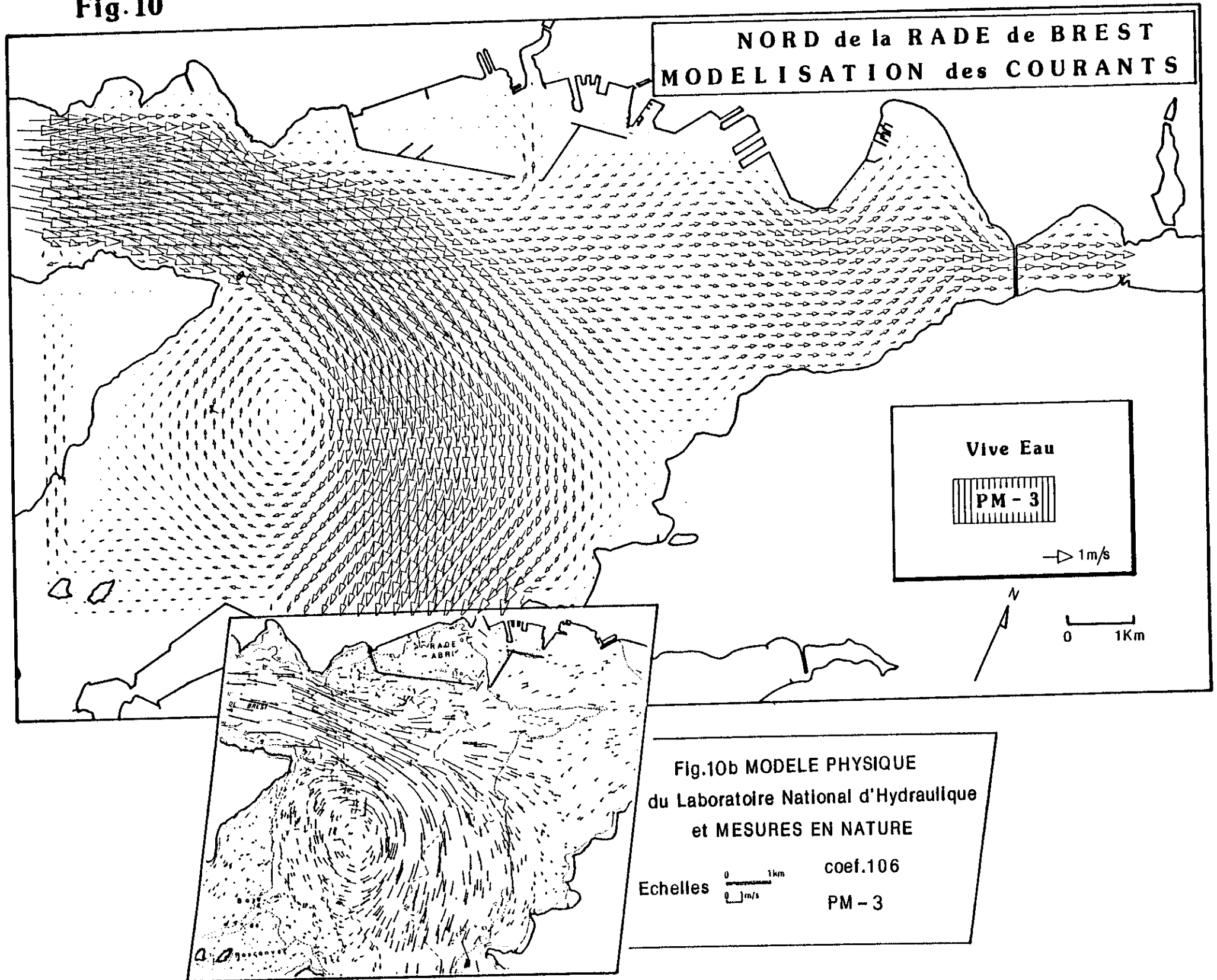


Fig. 11

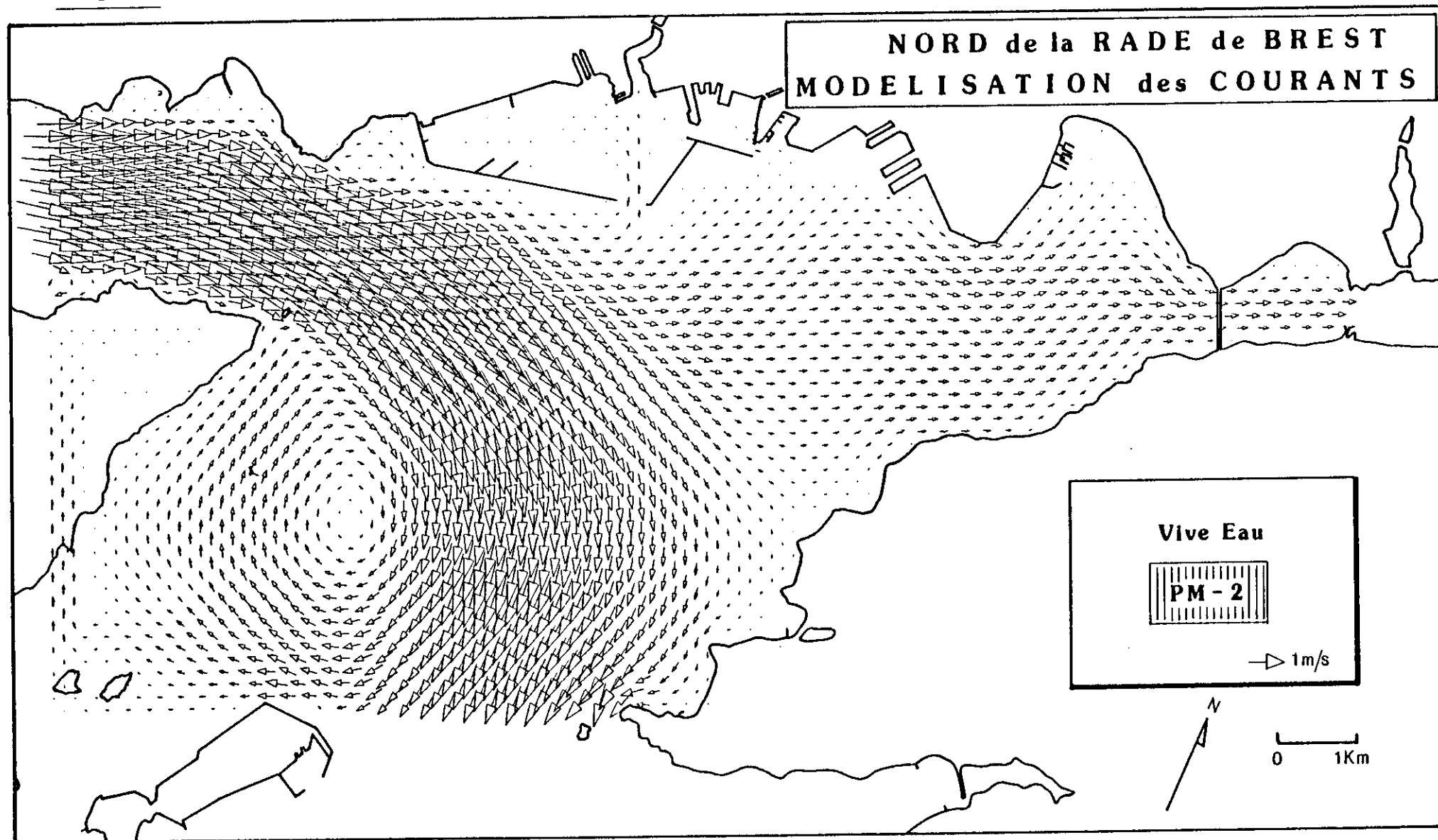
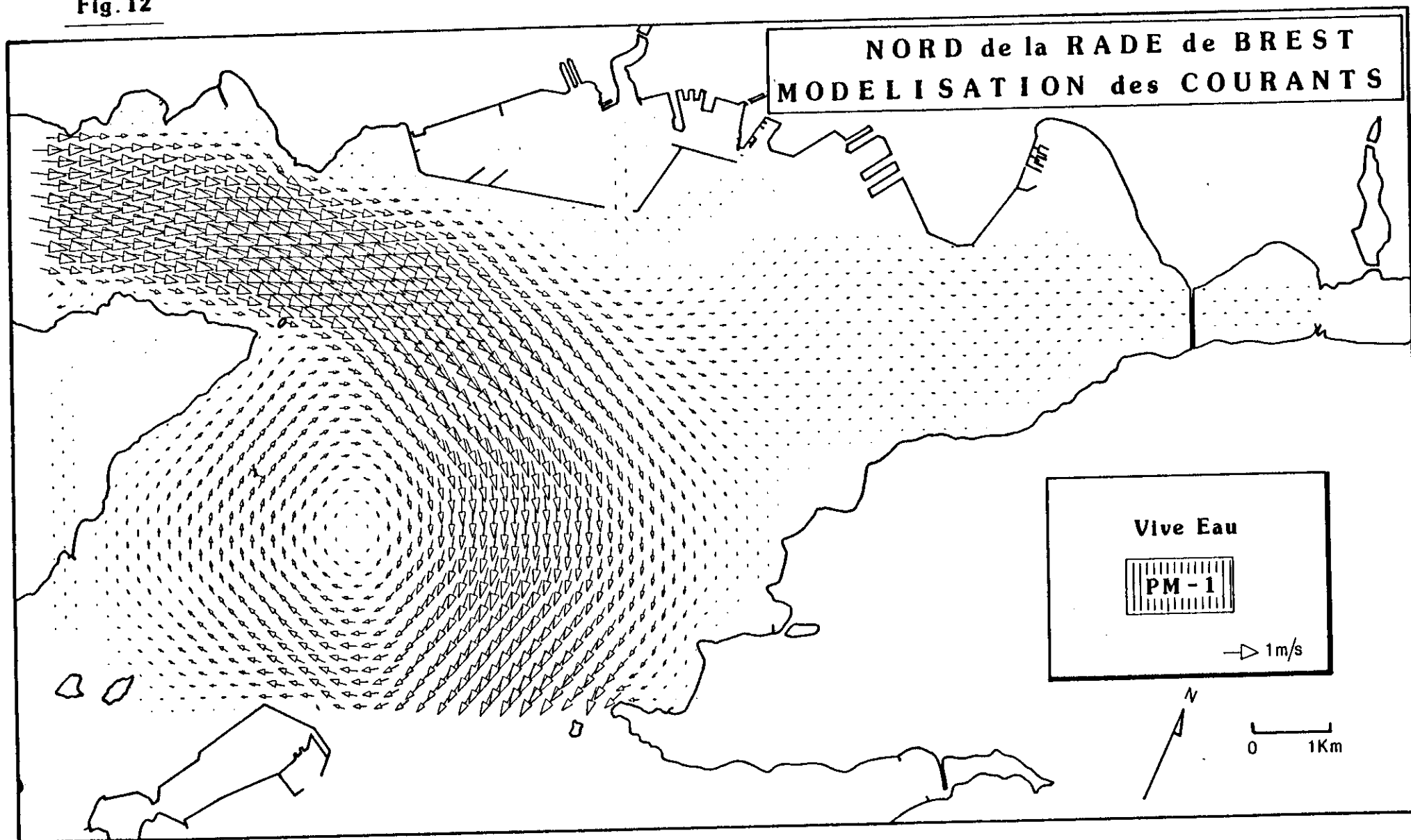


Fig. 12



- Une zone de calme relatif autour de la pointe du Corbeau, qui correspond à la séparation des flux dirigés vers l'Elorn ou vers le sud de la rade : ceci pourrait avoir des conséquences négatives sur le devenir d'un éventuel rejet à la pointe du Corbeau.

- L'existence de petits tourbillons côtiers dans les baies de la rive nord de la rade (en particulier dans l'anse de Maison Blanche) à partir de PM-4 (4 heures avant pleine mer), ainsi qu'un contre-courant côtier au sud de la digue de la Rade-abri vers PM-1 : ces structures peuvent jouer un rôle essentiel pour la dispersion locale des effluents ...

- Une augmentation des vitesses dans le chenal de l'Elorn, due à la fois à la réduction globale des sections de la rade depuis l'ouest vers l'est et aux faibles hauteurs d'eau de part et d'autre du chenal, où par conséquent le frottement sur le fond est prépondérant et ralentit l'écoulement.

- Des vitesses faibles dans l'anse du Moulin Blanc ainsi que devant les formes de radoub de la zone industrielle portuaire (Z.I.P), c'est à dire devant l'exutoire de la station d'épuration de la Z.I.P. Ces vitesses faibles liées à la configuration "en cul de sac" des deux sites ne sont pas favorables à une bonne dilution des rejets. Paradoxalement, les effluents issus de la Penfeld seront plus rapidement transportés en Rade puisqu'il existe un courant sud-nord assez important correspondant à la vidange de la Penfeld et de la rade abri.

- Une heure avant P.M., le courant reste fort dans le goulet (> 1 m/s) alors qu'il n'y a pratiquement plus de circulation vers l'Elorn : le flot pénètre essentiellement en rade sud et le tourbillon central reste fort.

Pour toute cette période de flot, il y a encore une nette similitude entre les courants calculés par notre modèle et les mesures in situ ou sur maquette (fig. 10b).

* L'étale de pleine mer (fig. 13 a et b) est caractérisée par la persistance du tourbillon central et du contre courant ouest devant la rade abri, ainsi que l'apparition de contre-courants le long des rives Nord et Sud du goulet révélant à nouveau l'avance de phase du courant près des bords.

* La période de jusant (fig. 14 à 18) est moins "tourmentée" car les côtes présentent moins d'obstacles au courant sous forme d'"épis" propices au développement de tourbillons. On note :

- l'absence de tourbillon central et corrélativement l'extension vers l'ouest de la zone de calme observée en flot devant la pointe du Corbeau,

- la création d'un petit tourbillon au nord de la pointe des Espagnols (sur 500 m seulement),

Fig. 13

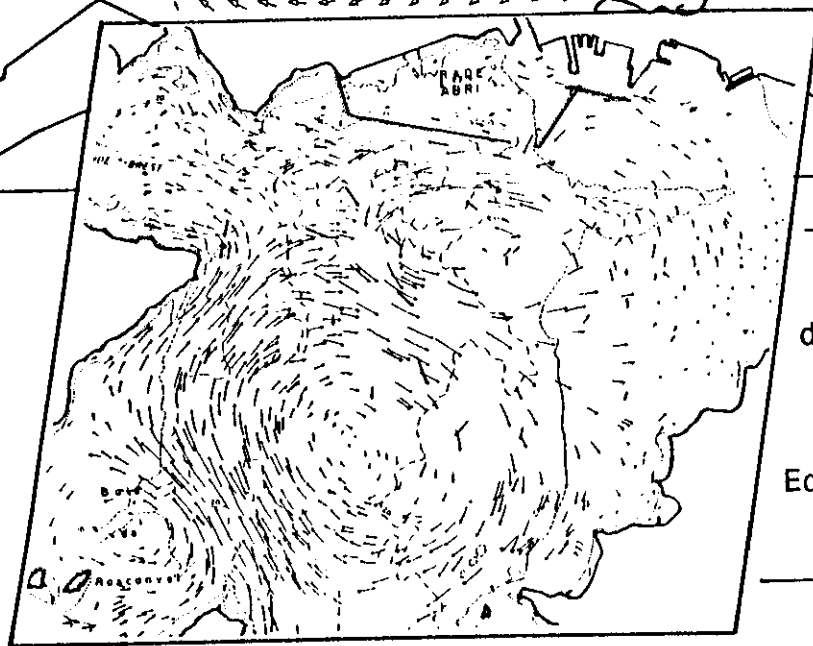
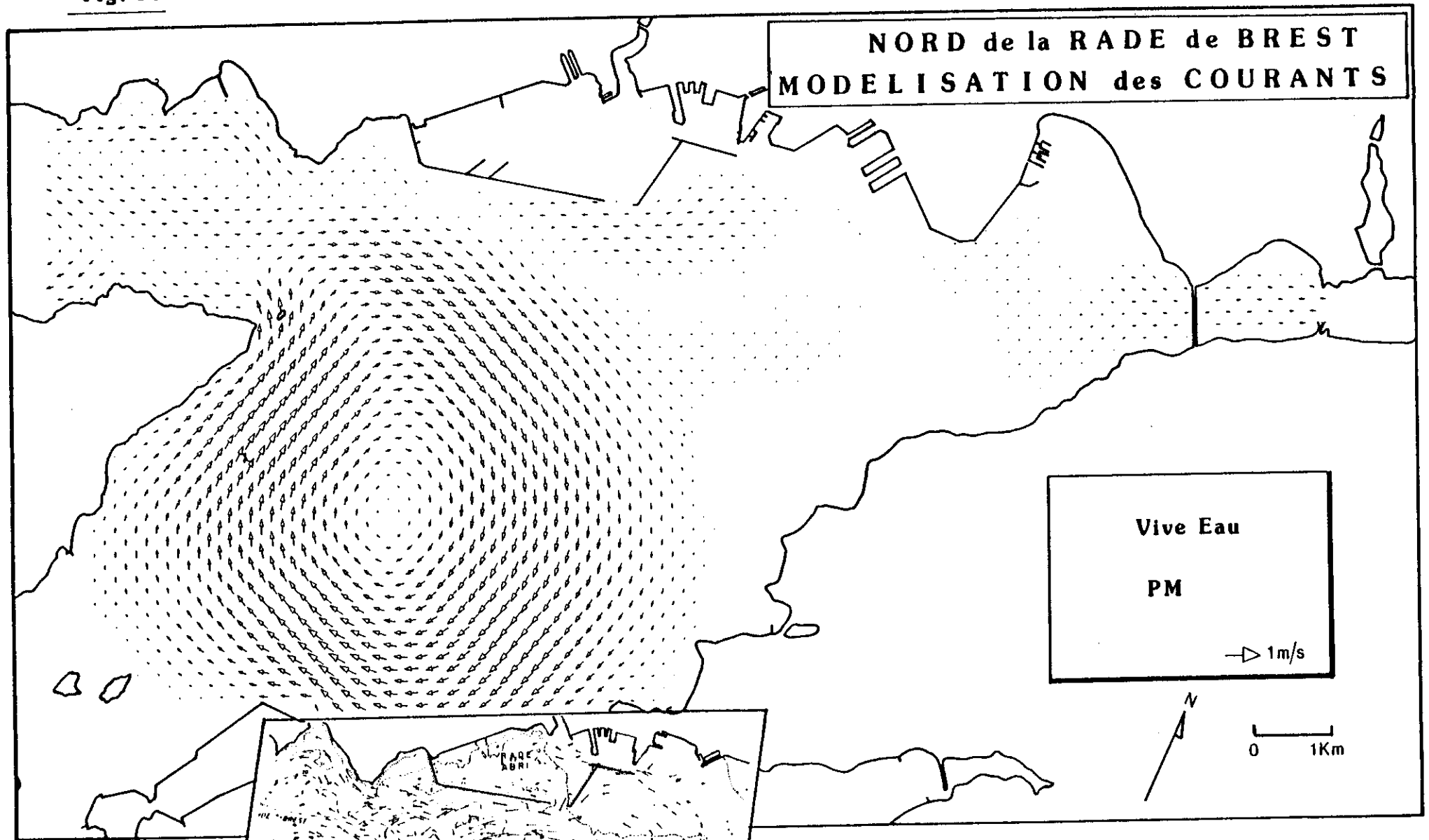


Fig.13b MODELE PHYSIQUE
du Laboratoire National d'Hydraulique
et MESURES EN NATURE

Echelles 0 1km
0 1m/s

coef.106
PM

Fig. 14

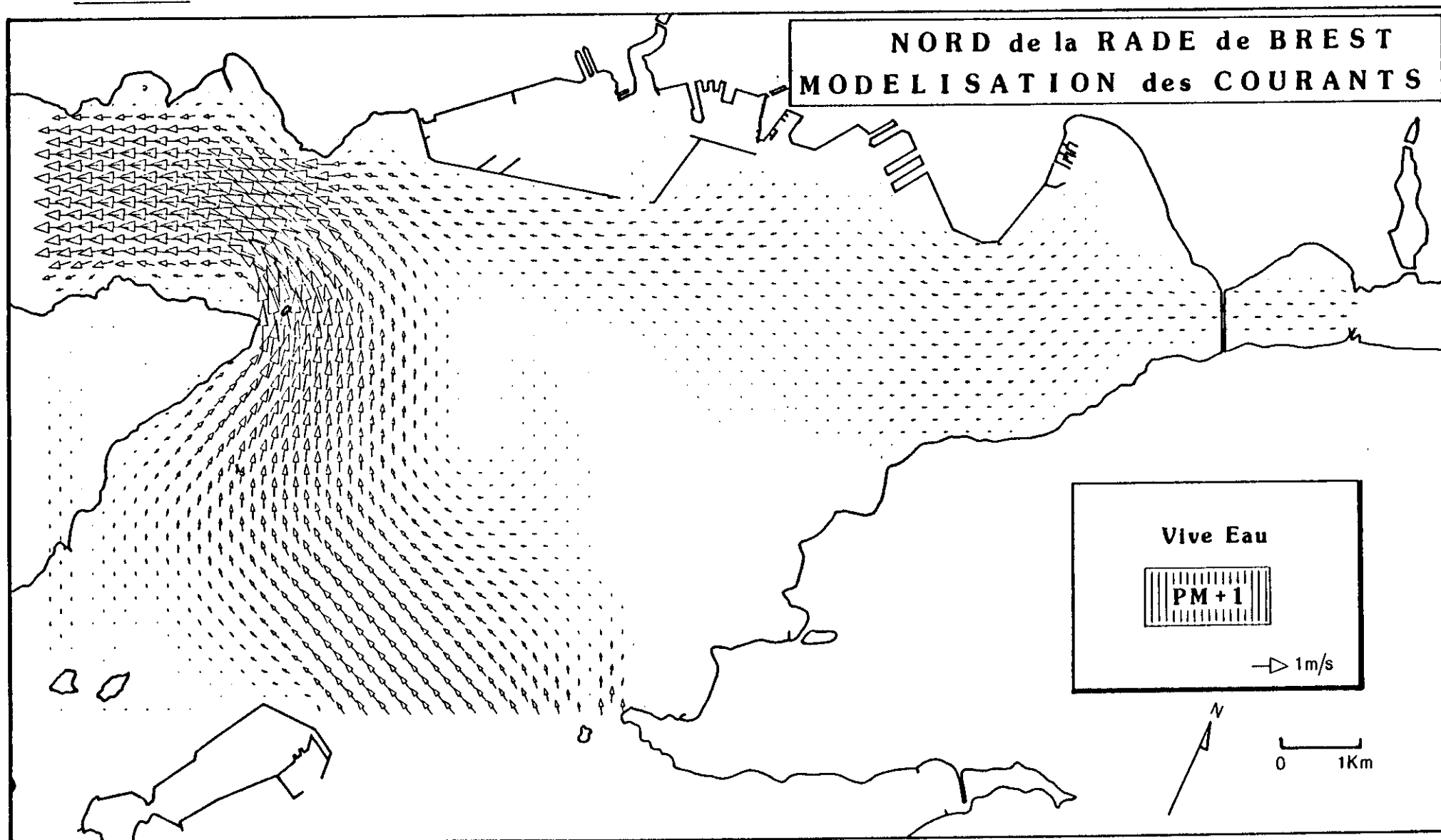


Fig. 15

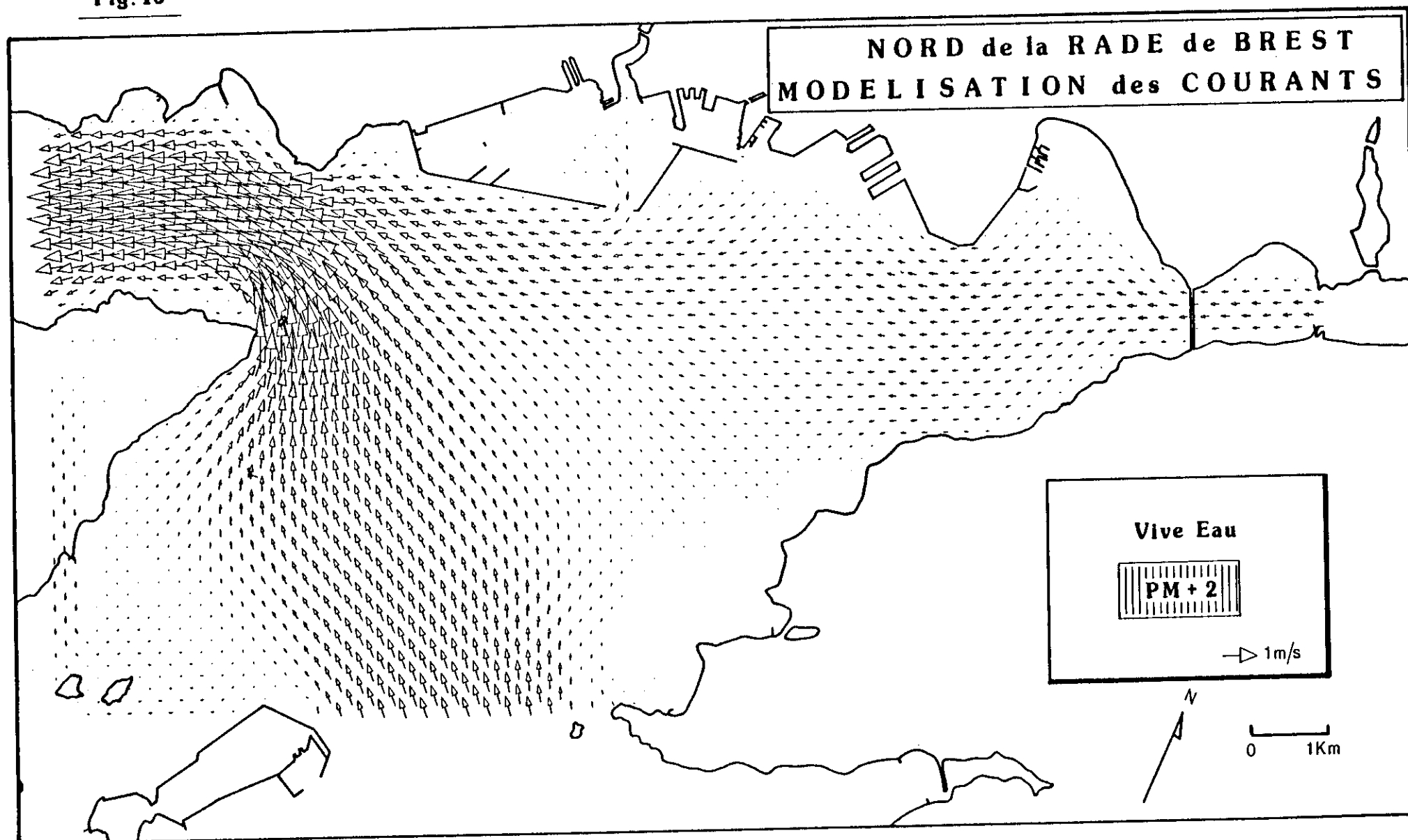


Fig. 16

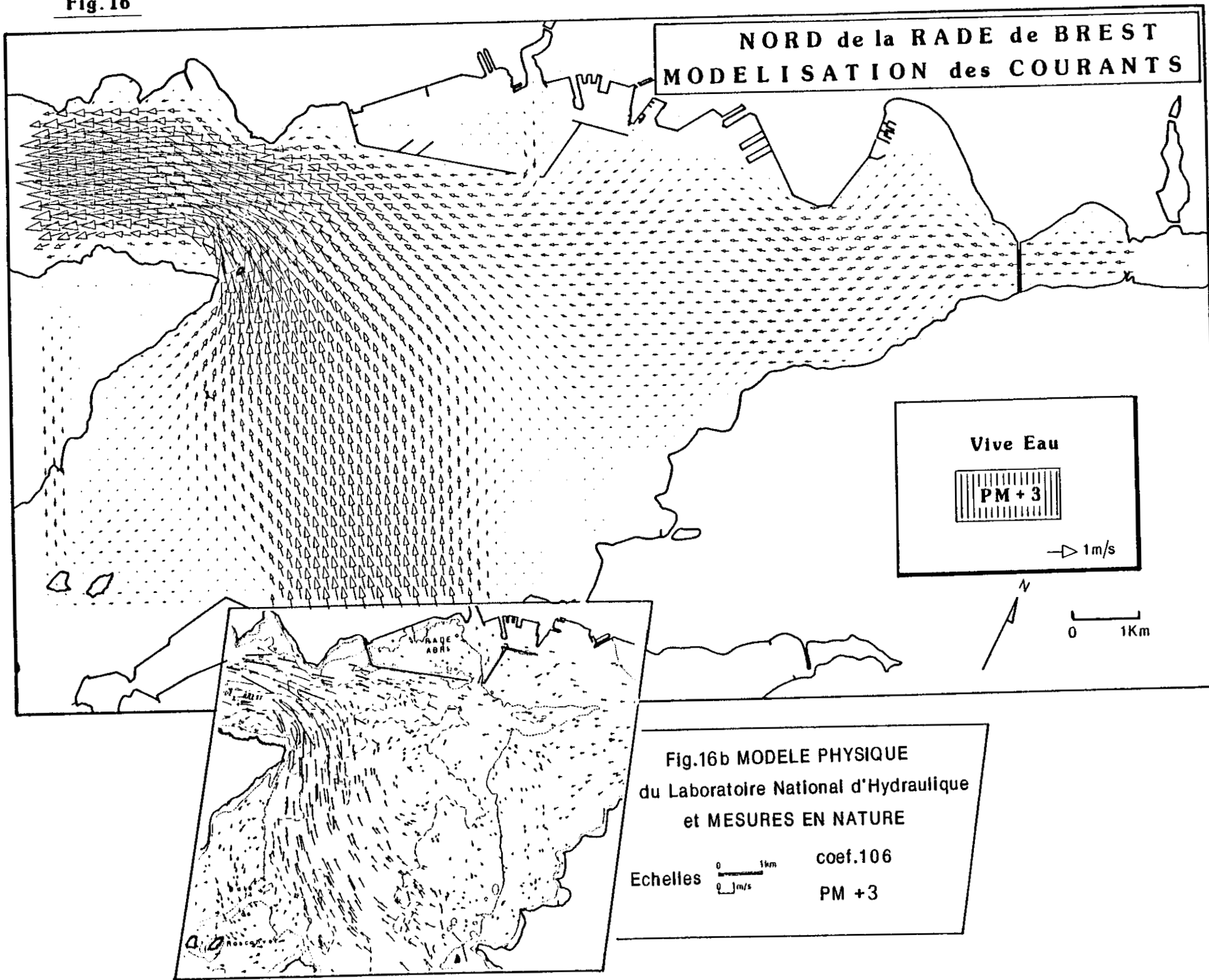
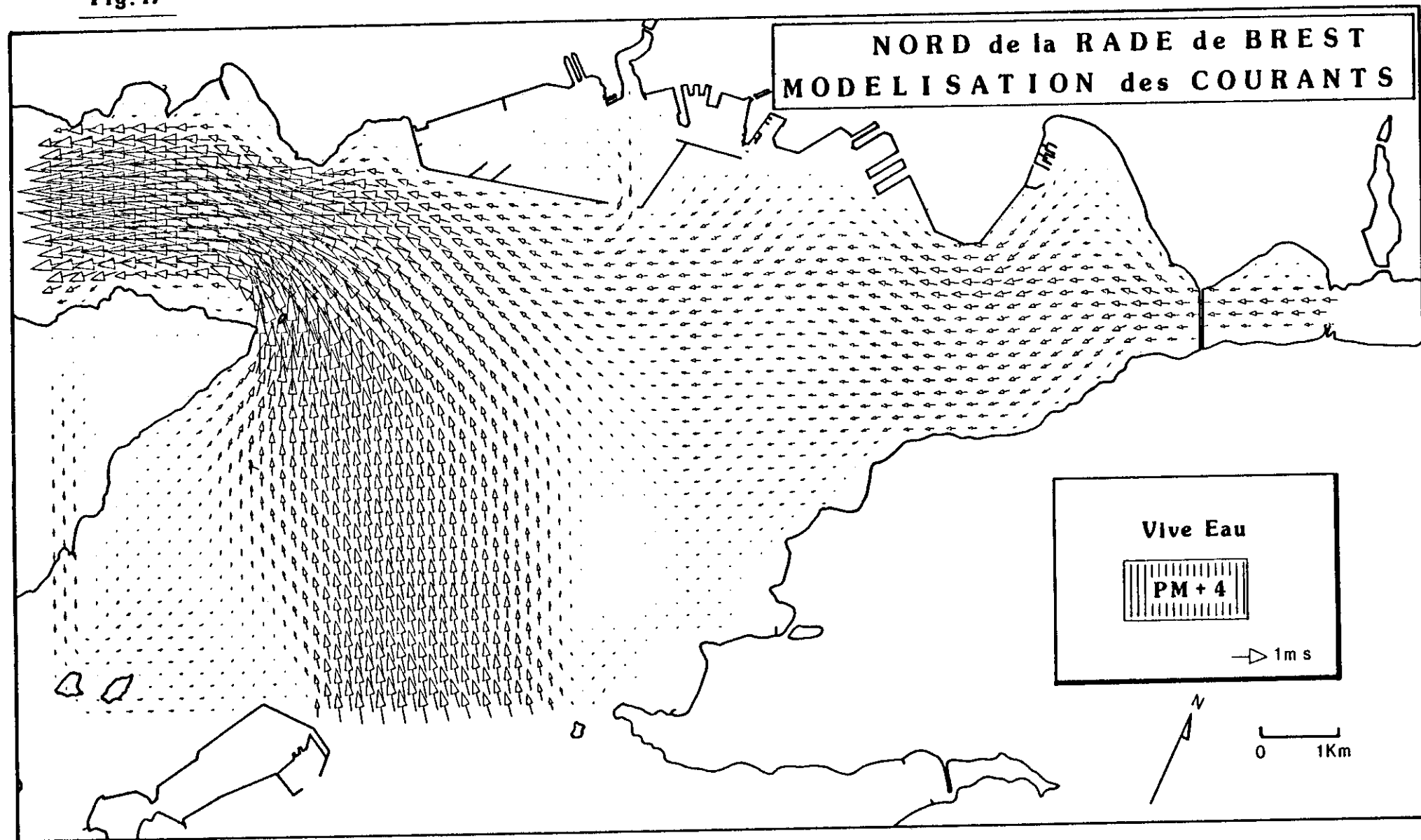


Fig. 17



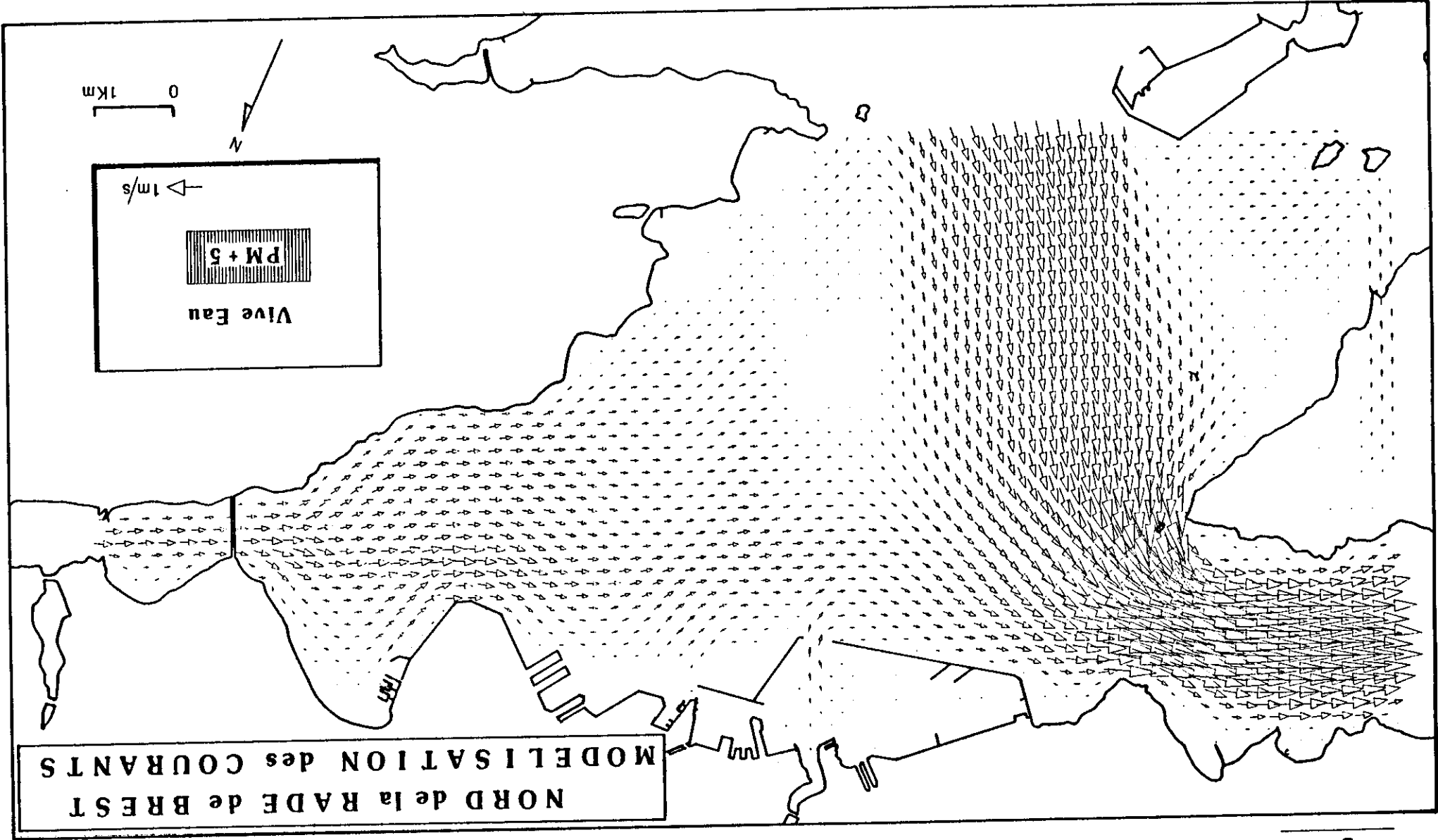


Fig. 18

- des gradients de vitesse importants, en particulier dans la moitié Est de la zone d'étude, avec encore de très faibles vitesses de part et d'autre du terre-plein de la Z.I.P.

Ces résultats sont très cohérents avec les mesures nature mais les courants observés sur modèle physique révèlent quelques autres structures tourbillonnaires (Fig. 16 b).

En règle générale, la déformation du champ de vitesse au cours de la marée est donc fort bien décrite par le modèle. En particulier, grâce aux corrections effectuées sur la diffusion numérique, les tourbillons sont correctement simulés.

Du point de vue quantitatif, il sera plus facile de comparer modèle et mesure en quelques points tests (cf. § III-2).

Nous ne présentons pas les résultats analogues obtenus en morte eau : les champs de courant ont sensiblement la même allure, mais avec une nette régression des structures tourbillonnaires.

III.1.2. Validation des courants calculés par le modèle. Comparaison avec les mesures

Ne disposant pas d'enregistrements simultanés de hauteur d'eau en différents points de la rade, nous n'avons pas validé le modèle en ce qui concerne les calculs de niveaux : de toute façon la comparaison sur les courants est plus pertinente, d'autant plus que l'on s'intéresse au transport des masses d'eau. Toutefois nous illustrons la propagation de l'onde marée en rade-nord par la figure 19 : on observe un retard d'environ 1/2 heure entre le lieu-dit "Le Passage" dans l'Elorn et l'extrémité Est du goulet (ce résultat est dû au modèle "rade de Brest et abords" puisque les points d'observations sont près des limites du modèle "rade-nord").

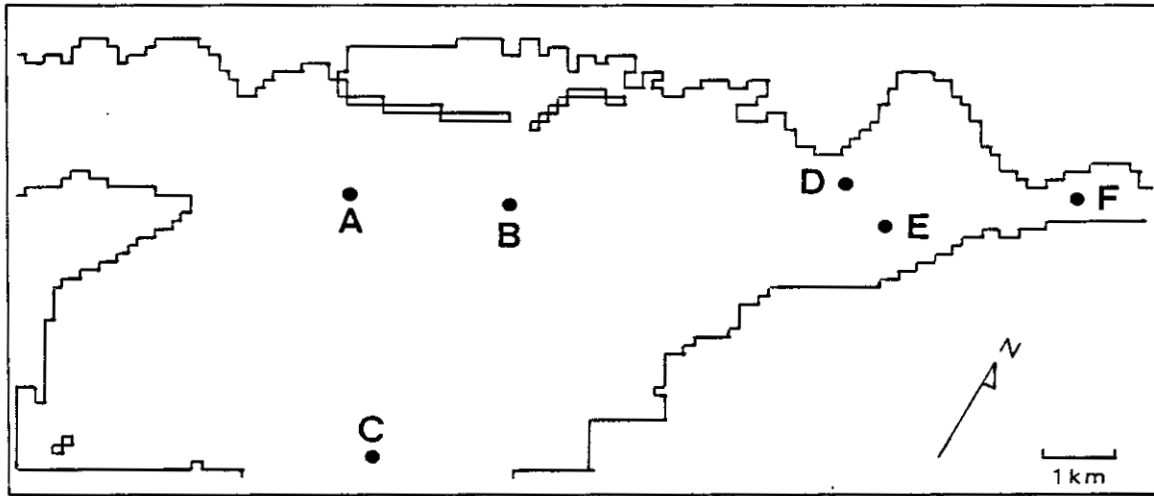
Il existe de nombreuses mesures de courant en rade : la plupart sont de courtes durées et ont été réalisées en surface par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM). Elles sont rassemblées dans le fascicule n° 555 (SHOM, 1974). D'autres mesures effectuées par IFREMER distinguent le courant de surface et celui de fond. Il serait fastidieux et sans intérêt de présenter l'inventaire complet des mesures de courant : 6 points de mesure en vive eau ont été sélectionnés et présentés avec les résultats du calcul (fig. 20).

On note une suprématie des vitesses de flot devant celles de jusant pour l'ensemble des points, qui sont représentatifs de la zone [en dehors du secteur sud-ouest].

Au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'est, la dissymétrie flot/jusant se caractérise par une renverse de flot brutale et une durée plus longue du jusant : il s'agit d'un

Fig.19 SIMULATION DE LA MAREE EN RADE DE BREST

— Points de Mesures (Niveaux, Courants calculés ou observés)



— Propagation de la Marée calculée : Position de la Surface libre
Vive Eau (Coef. 95)

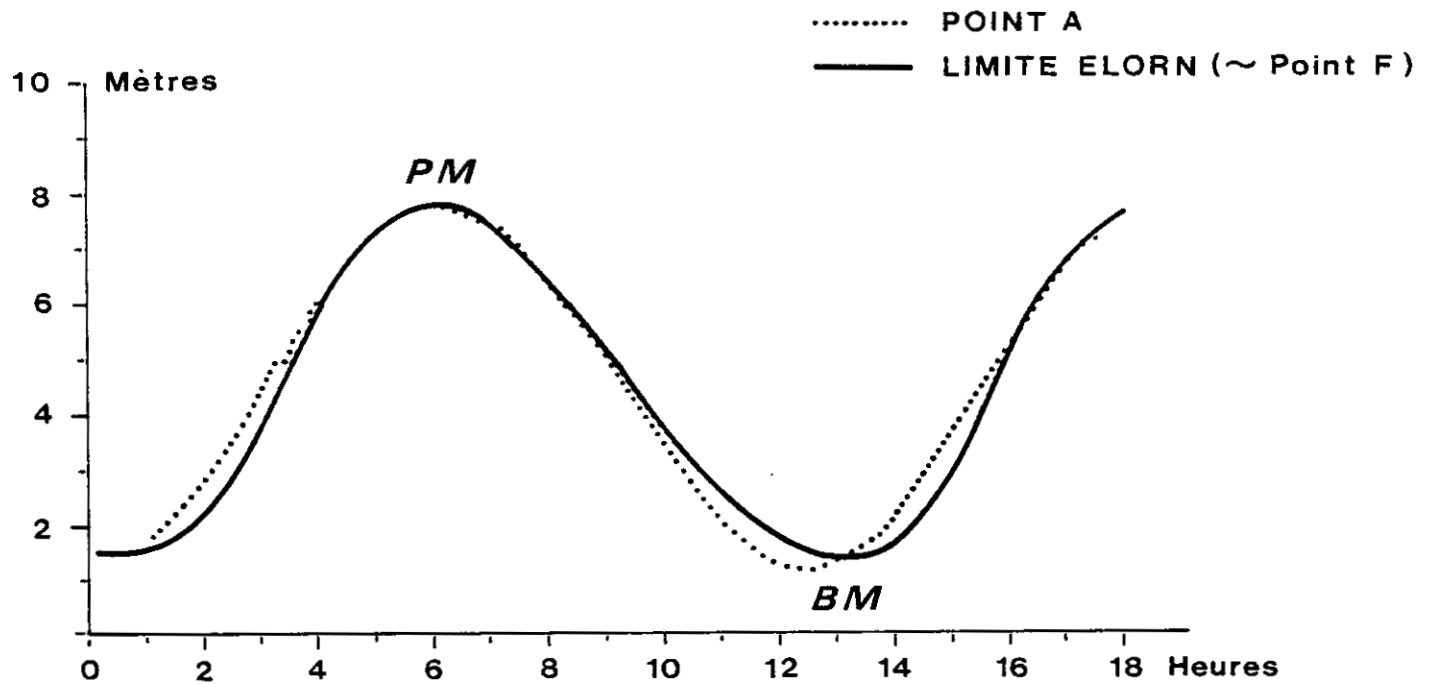


Fig. 20 COMPARAISON ENTRE COURANTS CALCULES ET COURANTS MESURES

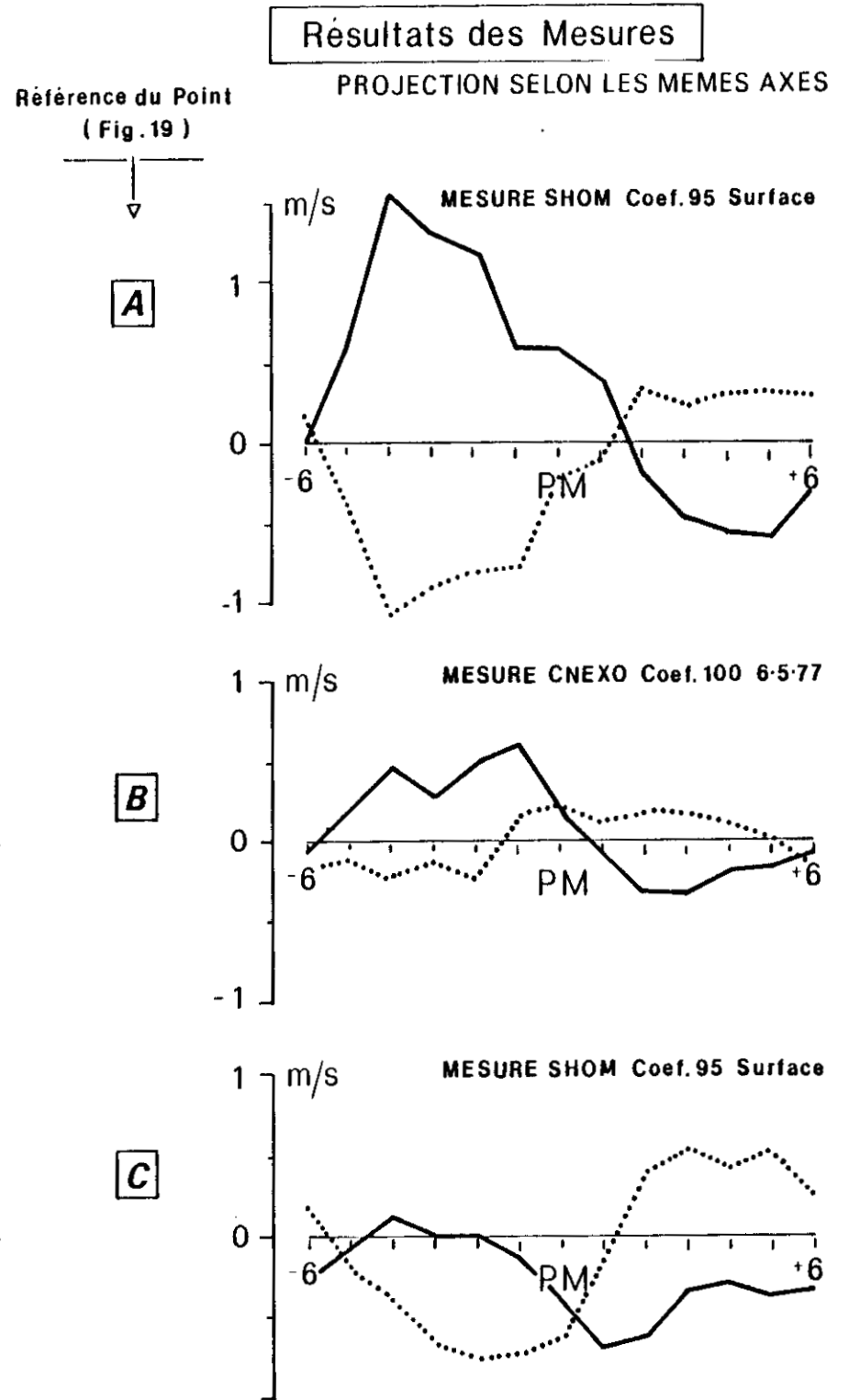
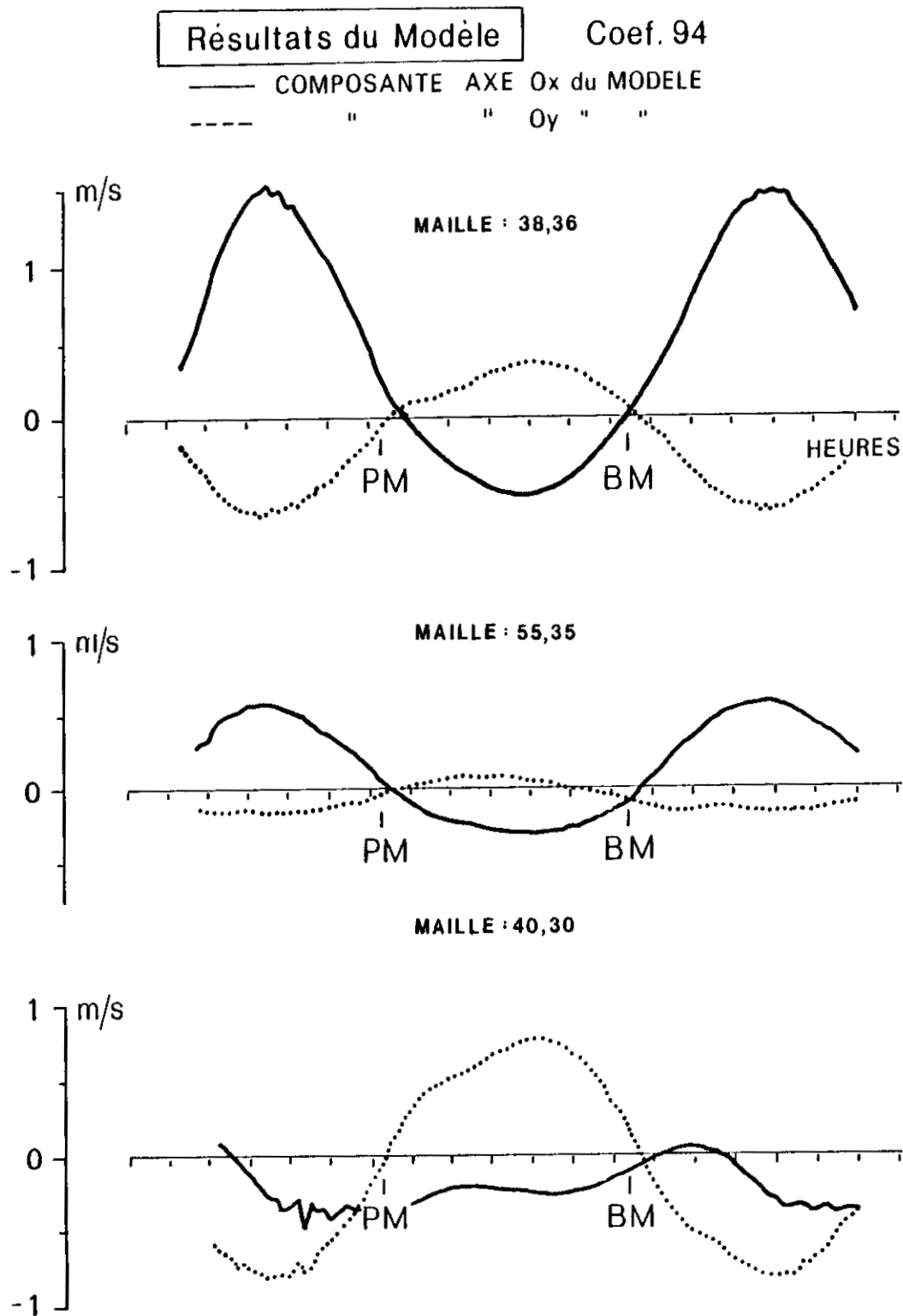


Fig. 20. COMPARAISON ENTRE COURANTS CALCULES ET COURANTS MESURES

(suite)

Résultats du Modèle

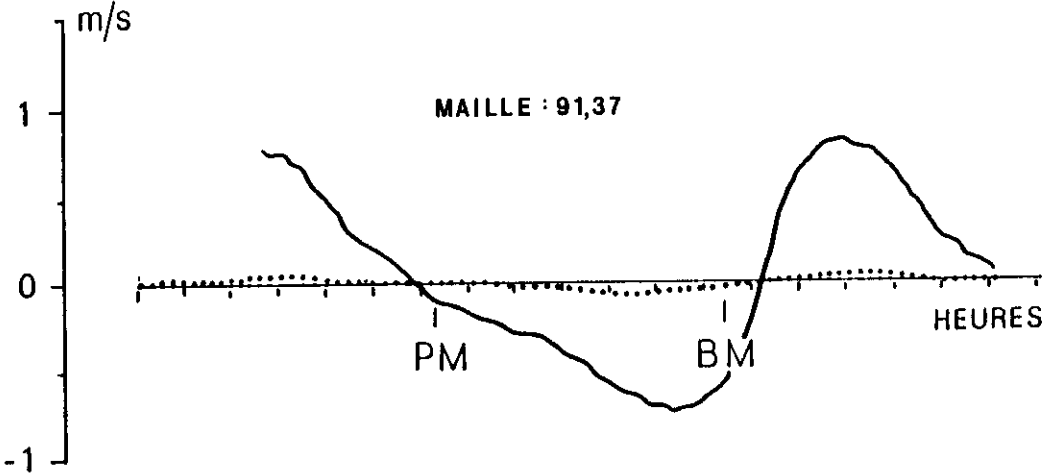
Coef. 94

— COMPOSANTE AXE Ox du MODELE
 - - - " " Oy " "

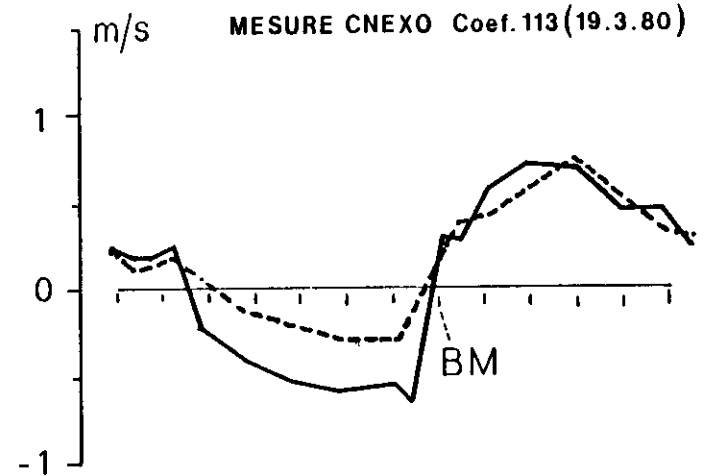
Résultats des Mesures

— SURFACE
 - - - FOND

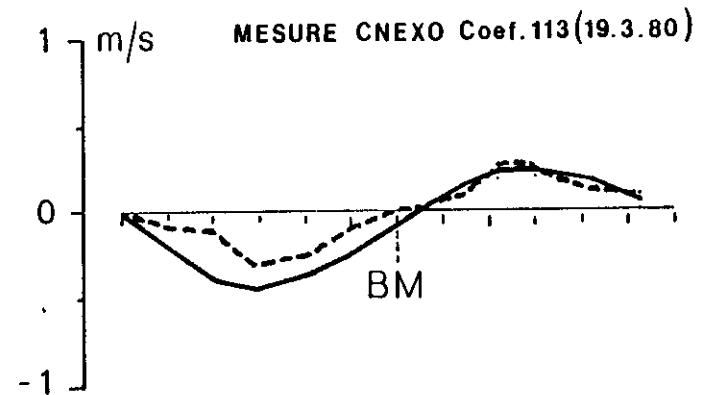
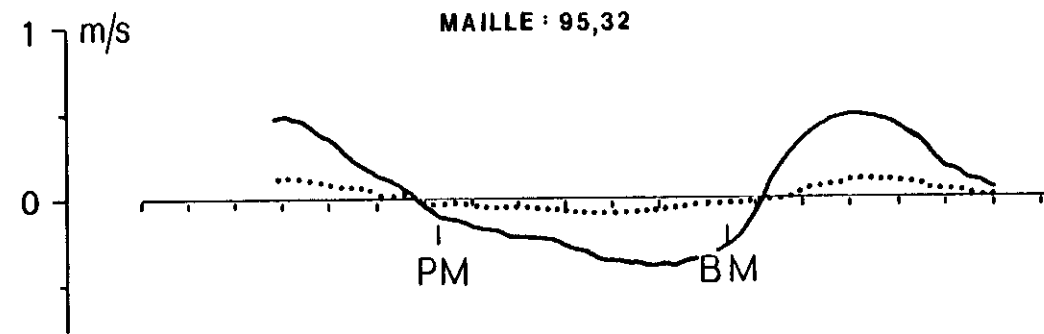
Référence du Point
 (Fig. 19)



D



E



F

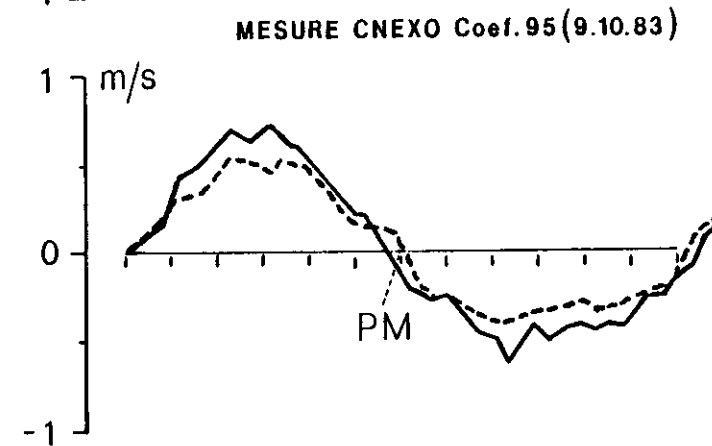
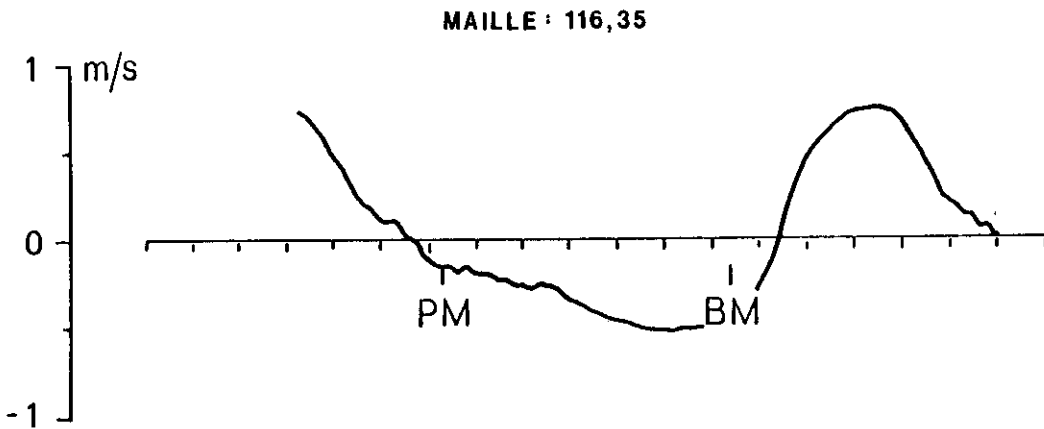
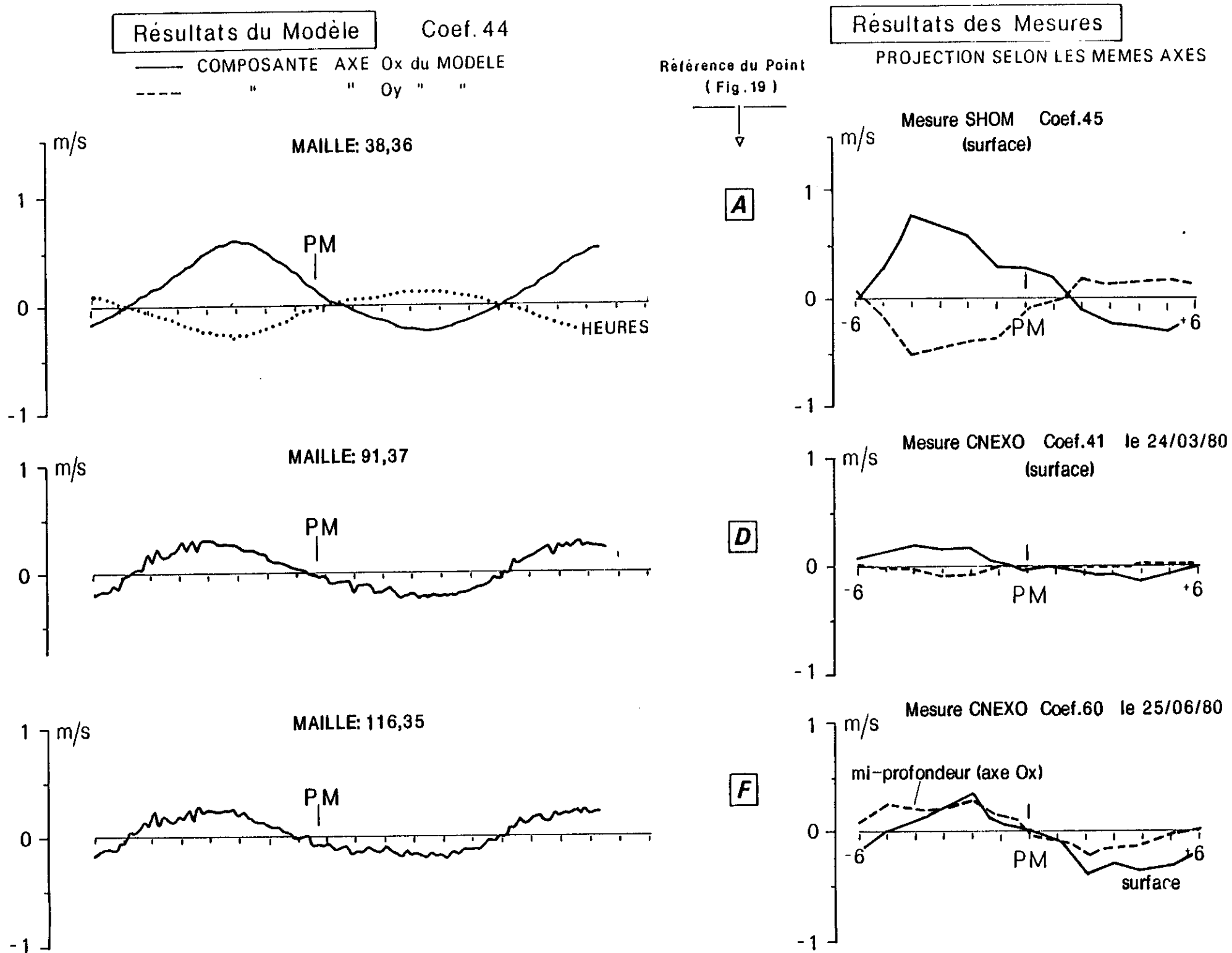


Fig. 21 COMPARAISON ENTRE COURANTS CALCULES ET COURANTS MESURES



phénomène classique en estuaire qui sera commenté au § III-2. Les intensités des vitesses sont compatibles entre elles, avec cependant des vitesses calculées légèrement plus fortes à l'est de la zone. Enfin la mesure au point A indique un courant orienté plus au sud que le modèle.

L'examen simultané des courants calculés aux points D et E, très proches l'un de l'autre, montre que le modèle est capable de reproduire des gradients de vitesse importants entre le chenal de l'Elorn et les bancs de Keraliou adjacents (et cela, grâce aux faibles diffusions parasites). Ces gradients dont l'importance pour le transfert des effluents a déjà été soulignée, sont conformes à ceux mesurés (on note quelques "anomalies" entre le courant mesuré au fond et celui mesuré en surface : il s'agit probablement d'un effet du vent).

En morte eau la comparaison entre modèle et mesures est aussi bonne (fig. 21). Des oscillations, qui apparaissent dans le modèle dans le secteur amont, ont également été observées sur des enregistrements en continu réalisés dans l'Elorn : ce phénomène sera discuté ultérieurement.

III.1.3. Courants résiduels

La circulation résiduelle, c'est-à-dire le transport résultant des masses d'eau en une ou plusieurs marées, constitue un facteur essentiel pour la répartition des contaminants. Le meilleur moyen pour l'appréhender consiste à simuler des trajectoires de masses d'eau et à déterminer leur déplacements moyens. Mais la présentation exhaustive des résultats nécessite de nombreux calculs avec distinction des heures de départ, ce qui serait un peu redondant avec les cartes de dilution des effluents qui seront présentées au chapitre IV. Une vision plus synthétique (mais incomplète) des courants résiduels consiste à produire la carte des courants résiduels "eulériens" (moyennes des vitesses en des points fixes) (cf. Fig. 22) ou mieux celle des "vitesses résiduelles de transport" obtenues en divisant les débits moyens ponctuels ($= \int_t \int_H u dz dt$) par les hauteurs d'eau moyennes (fig. 23). Ces vitesses de transport sont effectivement représentatives d'un transport moyen de masses d'eau, dans la mesure où elles résultent d'un bilan à travers une colonne d'eau.

Les deux épures, qui sont très semblables, mettent clairement en évidence le tourbillon résiduel du centre de la rade, avec des vitesses de l'ordre de 30 cm/s, voire plus au sud de la pointe des Espagnols. On imagine donc l'effet de ce tourbillon sur le devenir des effluents en rade de Brest.

Par ailleurs on observe des courants résiduels opposés au centre et sur la rive sud du goulet, ainsi que des cellules tourbillonnaires sur la rive nord (par exemple le tourbillon anticyclonique devant l'anse de Ste Anne du Portzic, qui limitera la contamination de la plage par les effluents venant de l'est, tels que ceux rejetés à "Maison Blanche"). Le transport résiduel

Fig. 22

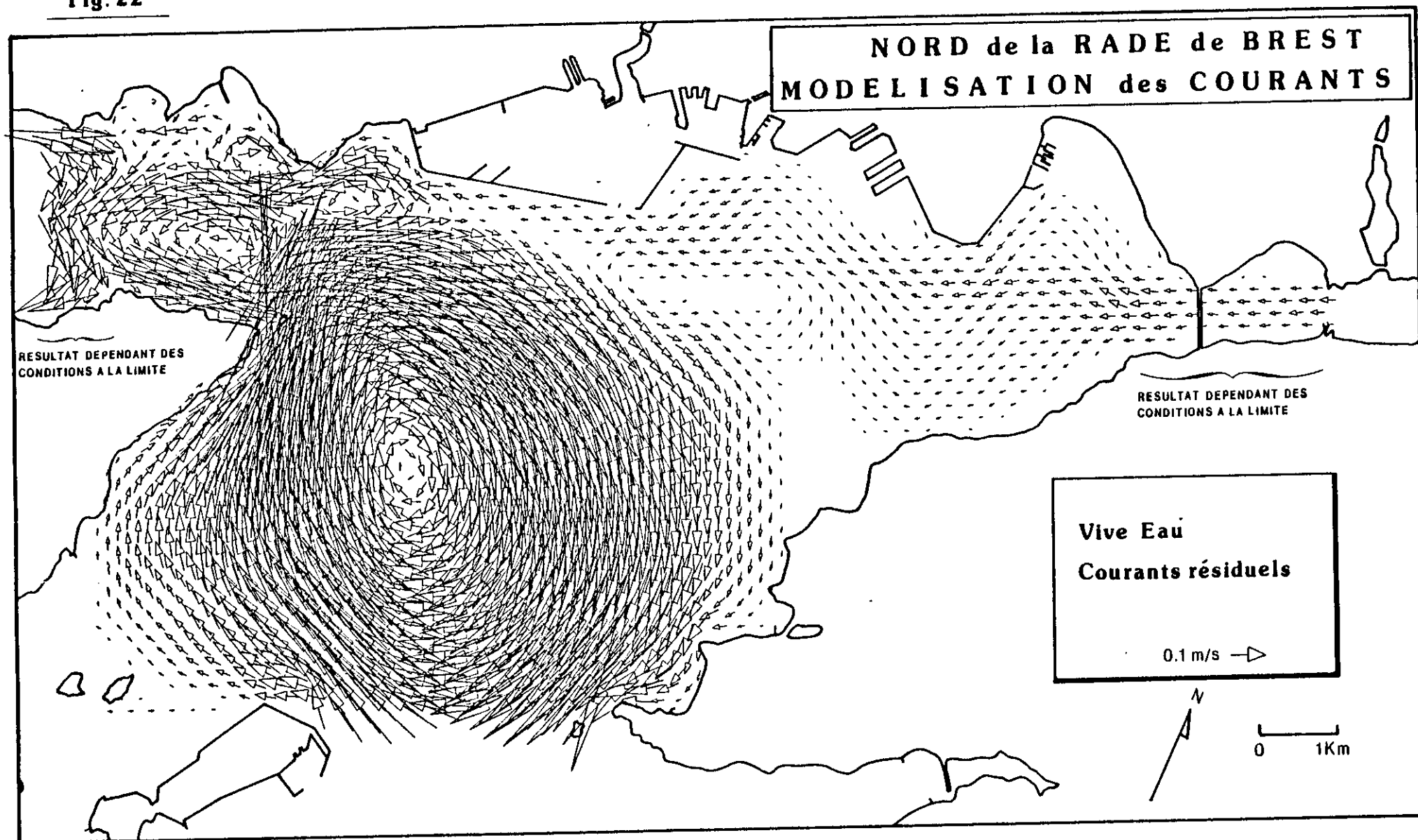
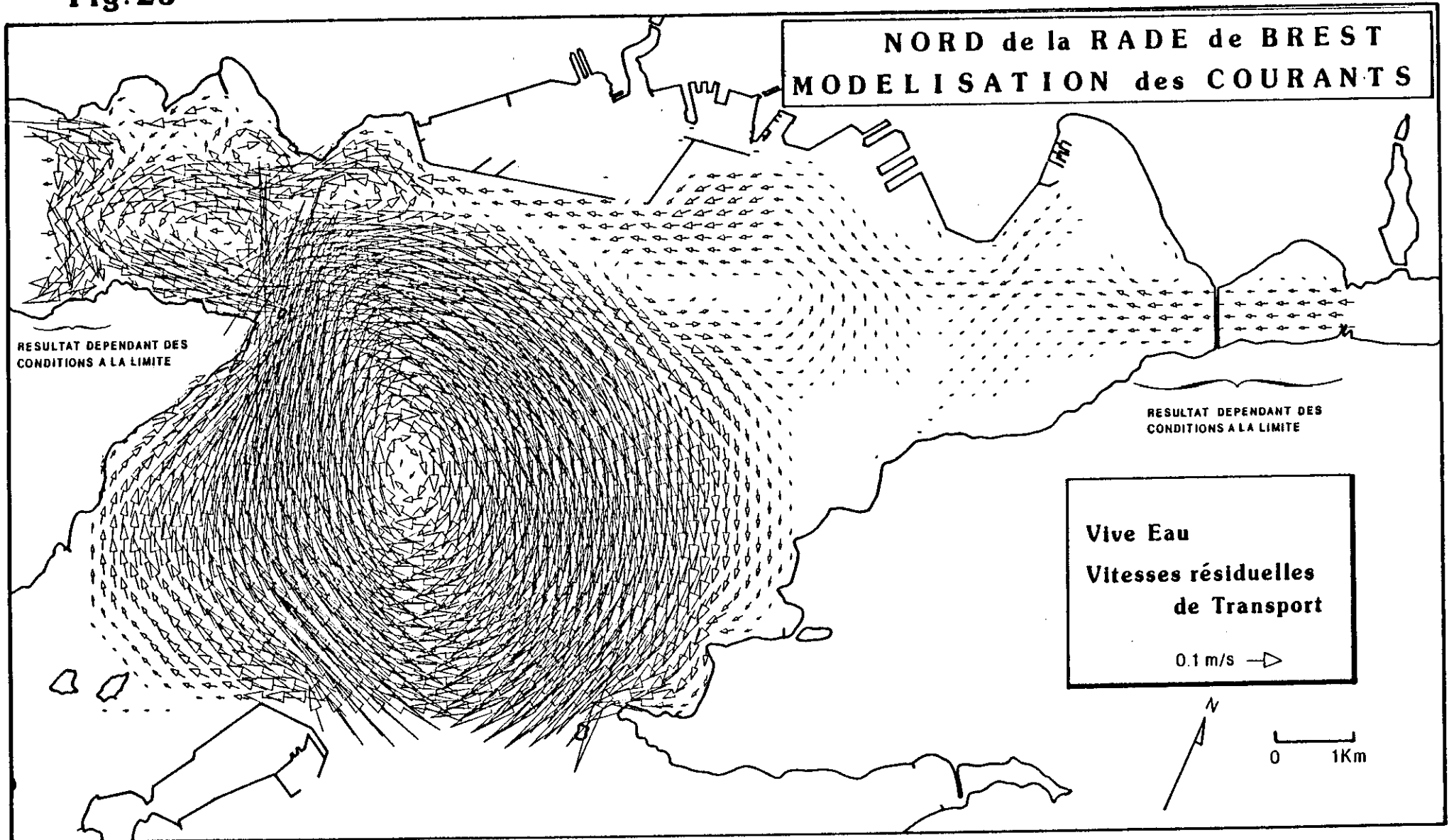


Fig. 23



littoral vers l'ouest devant le port de commerce, la rade abri et jusqu'à la pointe du Portzic est également très important : il permet une moindre contamination du secteur amont par les rejets de Brest.

On note aussi sans surprise l'absence de courants résiduels devant la pointe du Corbeau.

Enfin la figure 23 révèle un transport vers l'aval sur toute la section de l'estuaire de l'Elorn, qui signifie que ce dernier se "vide" ! La vitesse résiduelle de transport calculée à cet endroit, heureusement très faible (~ 3 cm/s), est donc erronée, sans doute parce que la condition limite amont est exprimée en niveaux et non en débits.

N.B. : Seules les résiduelles de vive eau ont été présentées. En morte eau, les structures seraient les mêmes, mais nettement moins prononcées.

III.1.4. Effets du vent

Afin de caractériser qualitativement l'effet d'un vent, deux simulations ont été réalisées avec le modèle bidimensionnel, pour des vents-type permanents de 10 m/s (force 5 Beaufort) orientés selon l'axe Ox du modèle. Il s'agit des vents a priori les plus perturbateurs de la circulation dans la zone amont, le vent de sud-ouest (correspondant au secteur dominant) étant en plus le cas défavorable.

Pour ces simulations, les modèles Rade et Elorn ont été couplés, levant ainsi l'indétermination sur la condition limite amont. En ce qui concerne les limites aval, on a supposé que le vent ne modifiait pas le niveau moyen de la surface libre dans le goulet et entre l'île Longue et l'île Ronde.

En raison de l'expression quadratique du frottement en fonction du courant, l'entraînement des masses d'eau par le vent est d'autant plus amorti que le courant de marée est important. En conséquence, l'effet maximal du vent est obtenu en situation de morte eau.

Les figures 24 et 25 représentent les vitesses résiduelles de transport obtenues respectivement pour un vent de nord-est et un vent de sud-ouest. On observe :

- par vent de N-E, un entraînement vers l'aval des masses d'eau dans le Moulin Blanc, dans le chenal de l'Elorn et sur le banc de Keraliou, avec des vitesses de l'ordre de 5 cm/s. L'entraînement est plus sensible dans les zones peu profondes devant la presqu'île de Plougastel. Par continuité, un courant de "retour" est généré dans le chenal de l'Elorn au sud du port de commerce,

Fig. 24

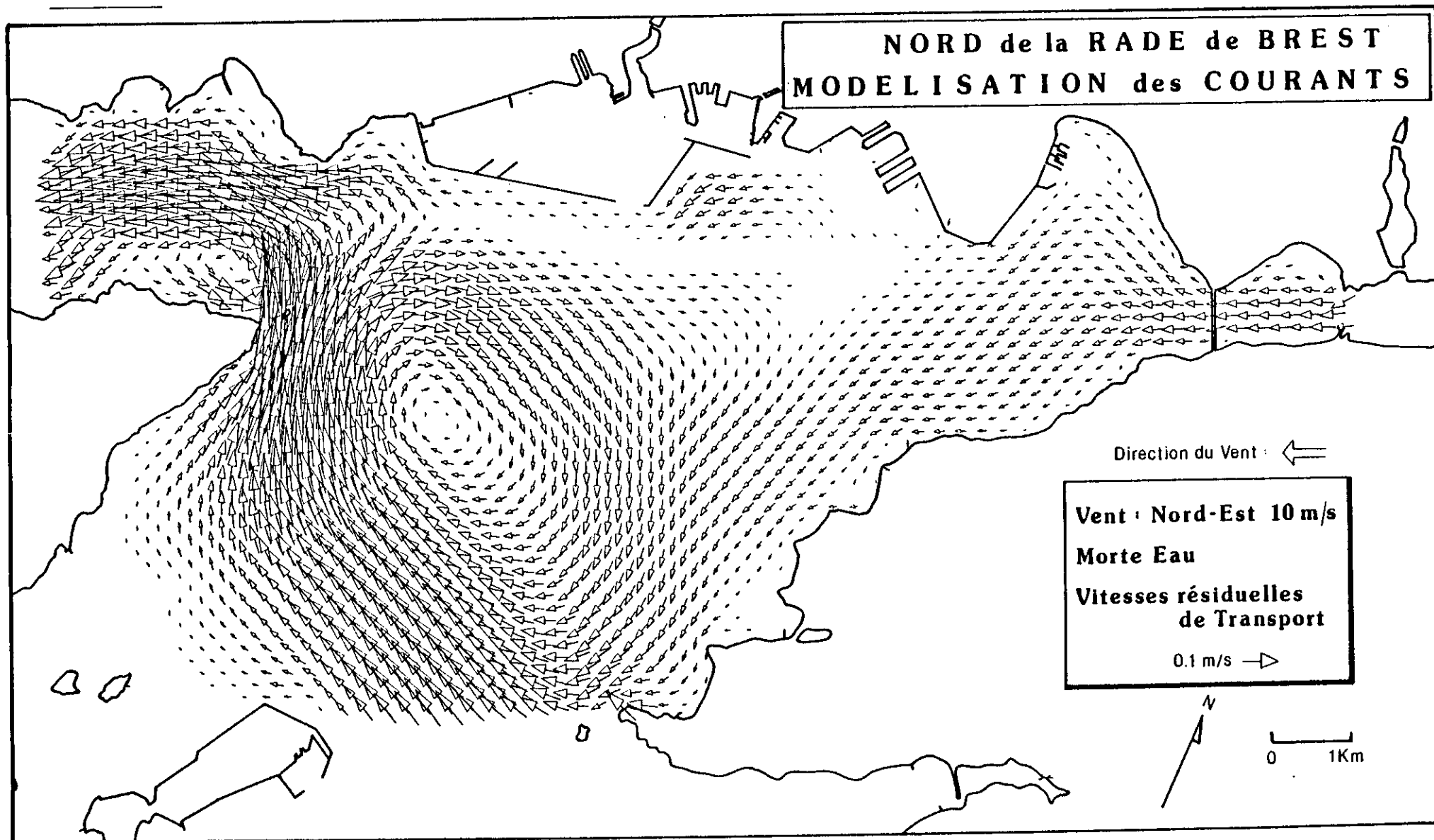
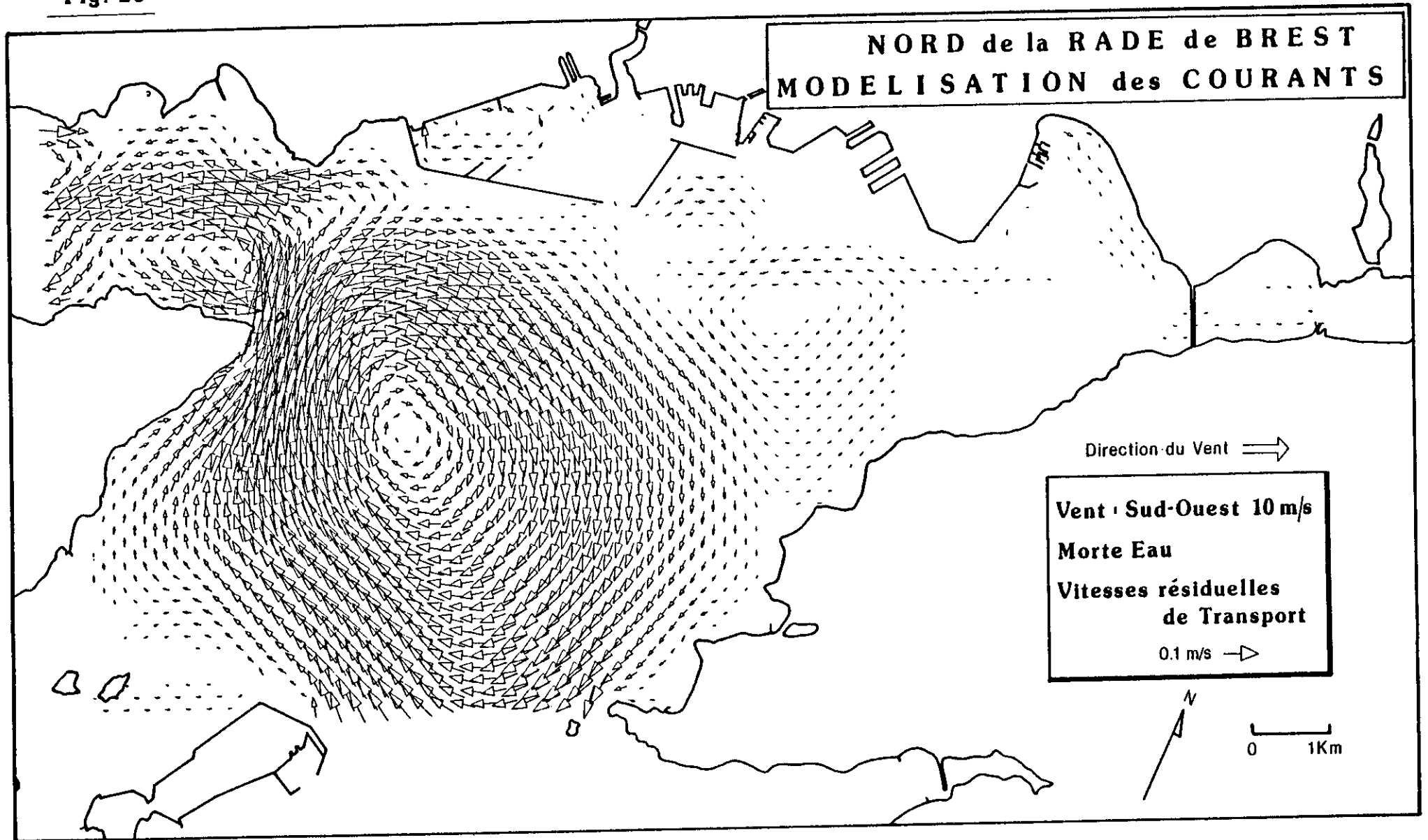
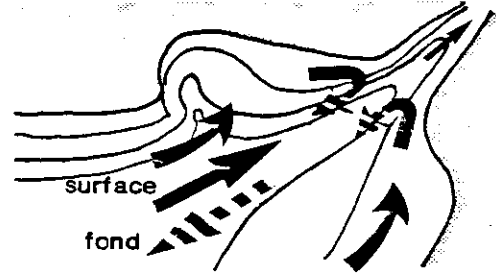


Fig. 25



- par vent de S-O, l'entraînement vers le S-E des masses d'eau du Moulin Blanc ainsi qu'un entraînement vers le N-E devant la presqu'île de Plougastel. Cet effet est sans doute sous-estimé par la simulation, car en compétition avec une résiduelle de marée opposée.

Bien évidemment, ces résultats sont des effets moyens sur la tranche d'eau : en réalité, l'entraînement en surface est plus intense et dans le sens du vent tandis qu'au fond, quand les profondeurs sont importantes, des courants de retour peuvent exister. Schématiquement, l'effet du vent de Sud-Ouest dans le secteur amont de la rade peut être représenté de la manière ci-contre .



III.2. LA CIRCULATION DANS L'ESTUAIRE DE L'ELORN

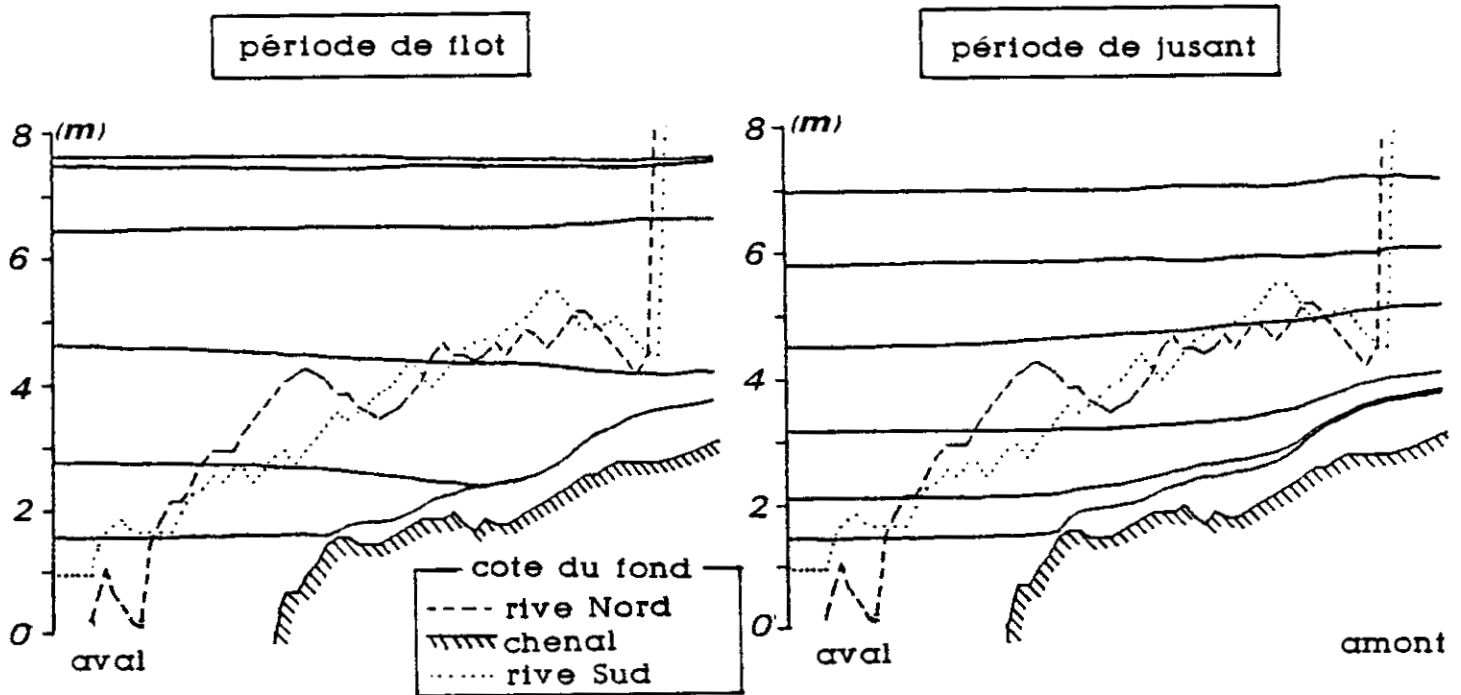
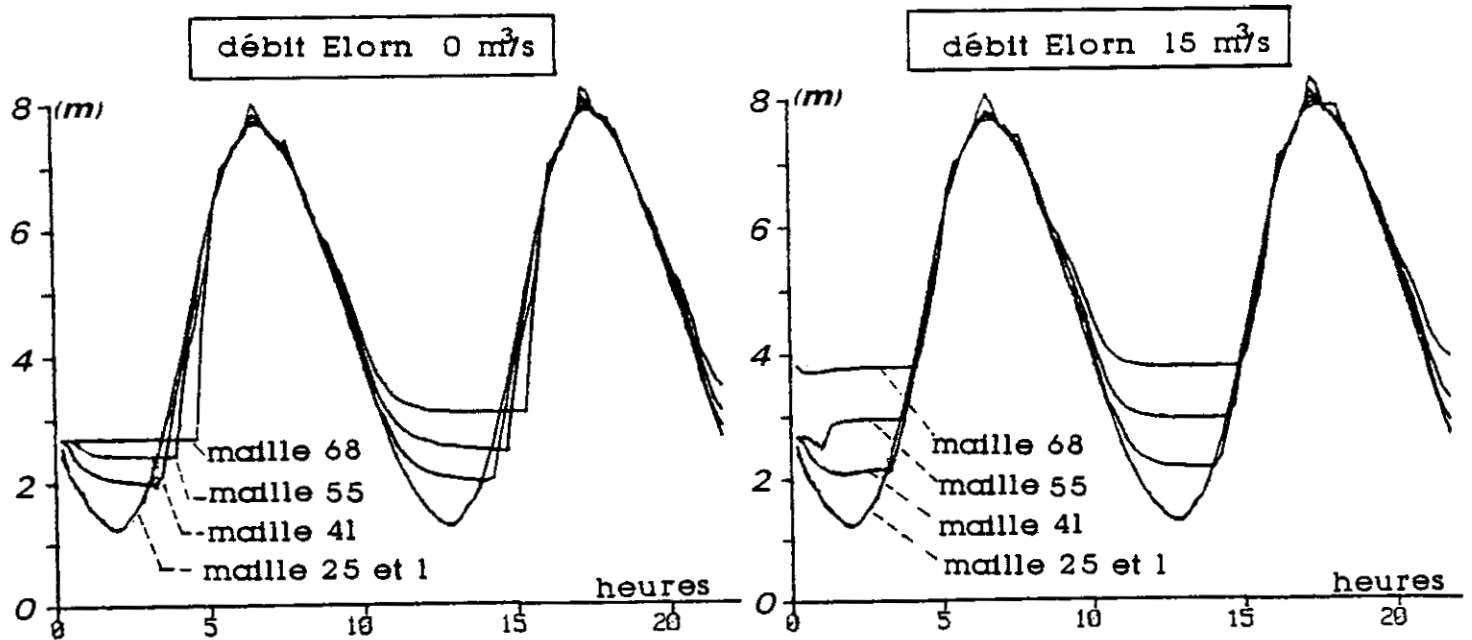
La propagation de la marée dans l'Elorn a fait l'objet de mesures de hauteurs d'eau et de vitesses en plusieurs points de l'estuaire (L'YAVANC, 1984) qui ont permis de valider les résultats du modèle présentés ci-après (voir aussi CAILLUET et LE MASSON, 1986).

III.2.1. Propagation de la marée

On observe (fig 26-a) des pentes relativement importantes de la surface libre, en particulier au début du flot (de l'ordre de 0,3 m en 3 000 m), ce qui matérialise le raidissement du front de l'onde marée à ce moment (voir ci-dessous). En amont, la hauteur d'eau à basse mer dans le chenal reste supérieure à un minimum : il s'agit de l'écoulement du débit fluvial, imposé ici à 15 m³/s. Pour un débit nul, l'ensemble des 3 canaux découvre sur les 2/3 de l'estuaire !

La figure 26-b montre la déformation de la courbe de marée, d'aval en amont : cette courbe n'est pas modifiée jusqu'au milieu de l'estuaire (\sim maille 30) et garde une allure sinusoidale. Plus en amont, la dissymétrie flot/jusant s'accroît, avec un retard de la marée au moment de la basse mer. Ce phénomène, classique en estuaire, résulte des différences de vitesse de propagation de la marée en fonction de la hauteur d'eau : la célérité des ondes de surface étant \sqrt{gH} (H : hauteur d'eau), il y a ralentissement de l'onde marée par petits fonds. Lors de la renverse de flot, il y a rattrapage du retard amont au fur et à mesure que le niveau monte : cela se traduit par le "raidissement" de l'onde et une augmentation du courant. Une autre conséquence est aussi la moindre durée du flot par rapport au jusant.

Fig. 26 MODELE "ELORN": PROPAGATION DE LA MAREE DANS L'ESTUAIRE

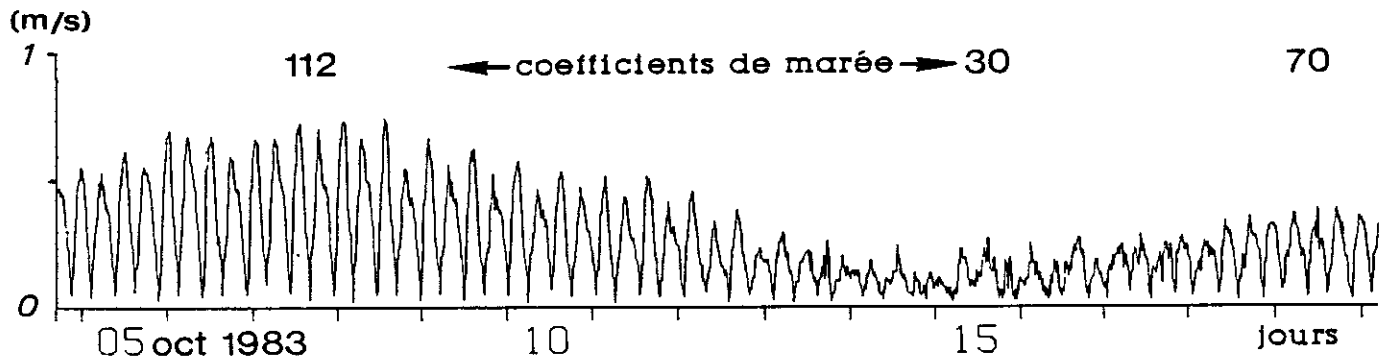
a) évolution horaire de la surface libre pendant une marée de vive eau (debit de la riviere: $15 \text{ m}^3/\text{s}$)

b) variation du niveau en plusieurs sections de l'estuaire

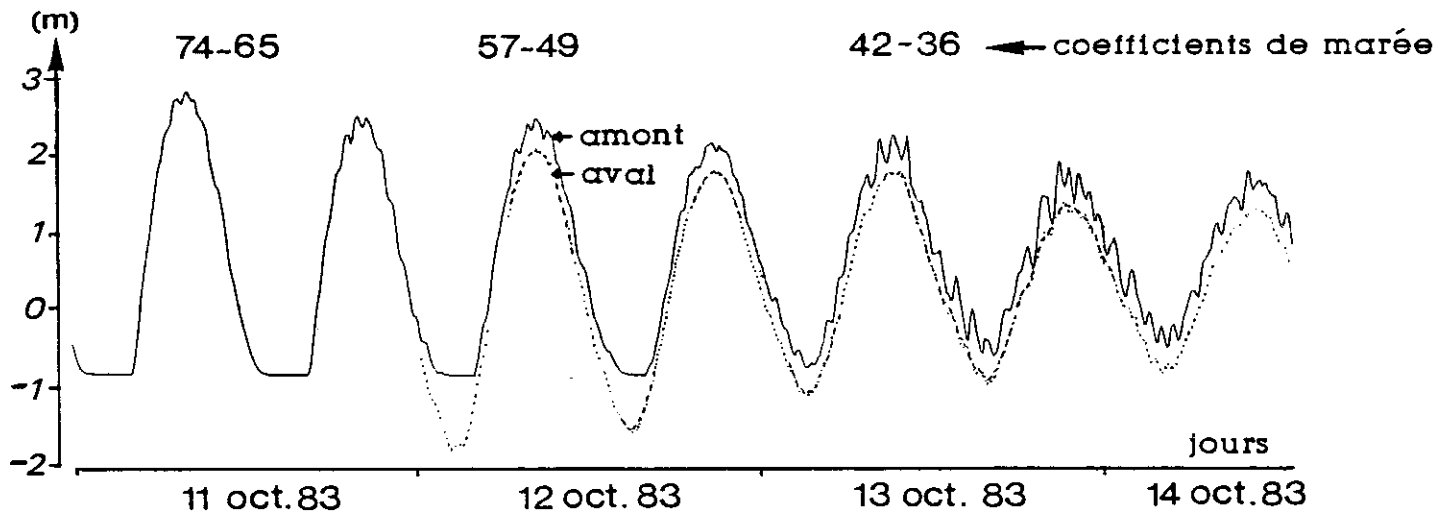
Observation de seiches

On remarque sur la figure 26.b des oscillations du plan d'eau à pleine mer, qui s'amplifient vers l'amont. Ce phénomène, déjà mis en évidence en morte eau par le modèle rade, a été confirmé par des mesures en continu de courant à la station 8 (i.e. en aval de l'estuaire) et surtout par des enregistrements de marée en plusieurs points de l'estuaire (figure 27).

Fig. 27 ESTUAIRE DE L'ELORN: OBSERVATIONS D'OSCILLATIONS EN MORTE EAU



a) intensité du courant mesurée en surface à la station 8 (position en fig.5)



b) hauteurs d'eau mesurées en amont et en aval de l'estuaire

L'amplitude des oscillations à Landerneau (Elorn amont) est impressionnante : de l'ordre de 0,5 m à PM de morte eau, avec une période d'1 heure. Il s'agit d'une seiche, l'estuaire fonctionnant comme un résonateur "quart d'onde", avec ventre de niveau (noeud de vitesse) à Landerneau et noeud de niveau (ventre de vitesse) en "aval". Un rapide calcul permet une évaluation de la longueur L du bassin de résonance :

$$\begin{array}{l} \text{célérité des ondes : } C = \sqrt{gH}, \text{ avec } H \sim 3 \text{ m} \\ \text{période de résonance : } T = 3 \text{ 600''} \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} \rightarrow \\ \rightarrow \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \lambda = C.T \simeq 20 \text{ km} \\ L = \lambda/4 = 5 \text{ km} \end{array}$$

C'est approximativement la longueur du tronçon de l'estuaire situé en amont d'une rupture de la pente du fond dans le chenal (cf. figure 26.a).

L'existence de la seiche en morte eau seulement est troublante. Deux explications physiques peuvent être avancées :

- le frottement sur le fond étant une fonction quadratique de la vitesse, l'amortissement des oscillations est plus important en vive eau qu'en morte eau.

- le phénomène de seiche est favorisé lorsque les caractéristiques géométriques du bassin varient peu : en particulier la hauteur d'eau à laquelle la célérité des ondes est liée. En vive eau, la surface libre se déplace plus vite ce qui entraîne une dispersion des célérités, donc des périodes propres et par conséquent réduit les probabilités de résonance.

Ce type de seiche a semble-t-il été reconstitué par le modèle "Rade de Brest et abords" (cf. résultat au point F (figure 21), qui dépend de la condition limite amont issue du modèle de grande emprise). Toutefois le modèle de l'estuaire de l'Elorn produit des oscillations de périodes diverses et même en vive eau (cf. fig. 26b). Cela est dû à la schématisation en boîtes juxtaposées (les canaux en particulier) qui favorisent la genèse des seiches. Le phénomène reconstitué par le modèle a donc une signification et une vraisemblance physique, mais avec des caractéristiques (période, amplitude) influencées par le maillage.

Par souci de concision, nous ne présentons pas les résultats du modèle en morte eau, qui sont très analogues à ceux de la vive eau, avec une amplitude moindre.

III.2.2. Courants de marée

Les figures 28, 29 et 30 montrent l'évolution du courant de marée en vive eau pour 5 points répartis dans l'estuaire. Les vitesses en aval ne sont pas représentées car la répartition des débits entre les canaux est influencée par les hypothèses faites sur les conditions à la limite aval (cf. CAILLUET et LE MASSON, 1986). C'est d'ailleurs l'une des raisons pour lesquelles un recouvrement des modèles "rade" et "Elorn" a été nécessaire.

Fig. 28 MODELE "ELORN": EVOLUTION DES VITESSES ET DE LA MAREE VIVE EAU (coef.95). DEBIT DE LA RIVIERE: 0 m³/s

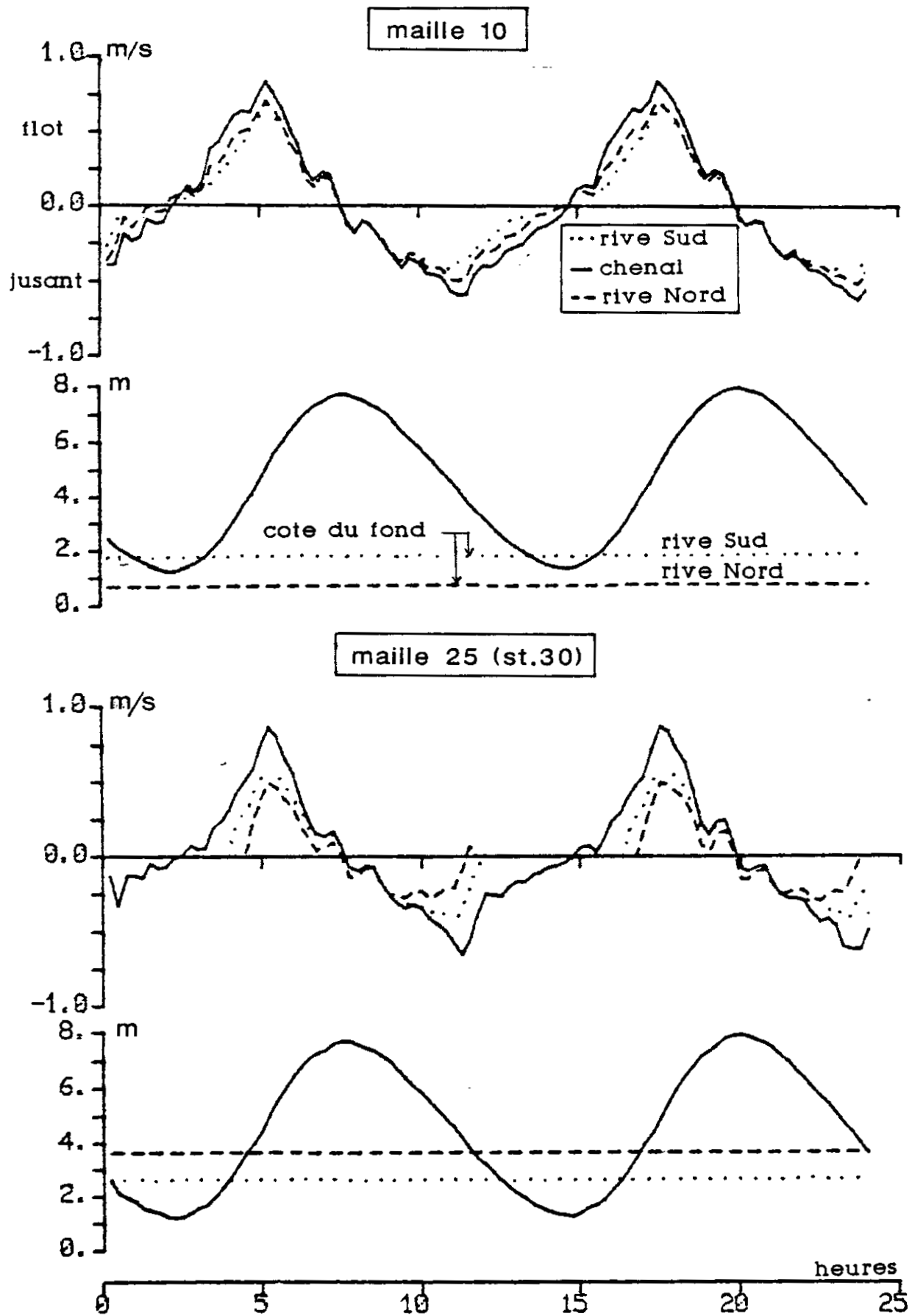


Fig. 29 MODELE 'ELORN': VITESSES CALCULEES EN MAILLE 41 (st.32).
VIVE EAU (coef.95). COMPARAISON AVEC LES MESURES

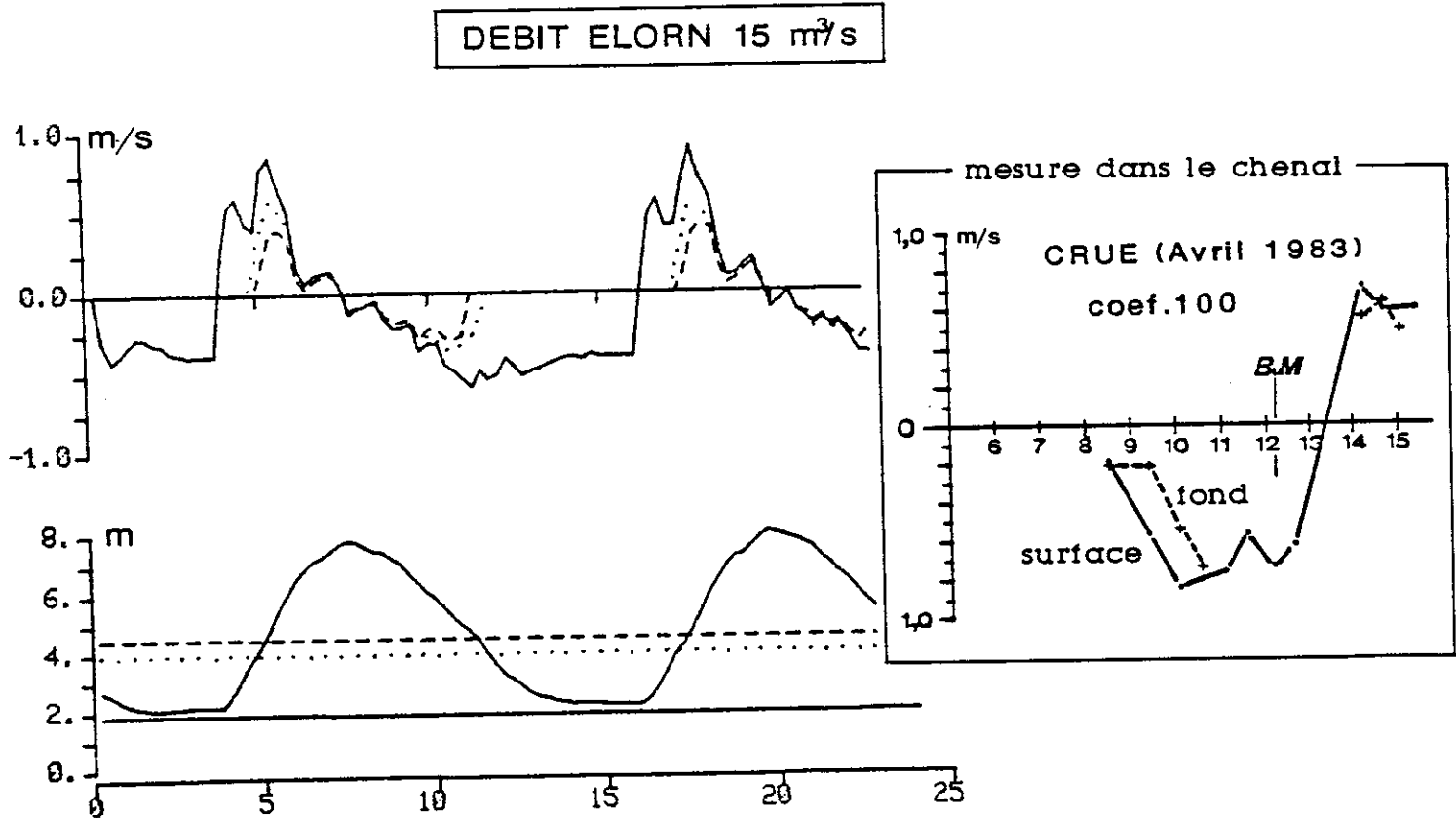
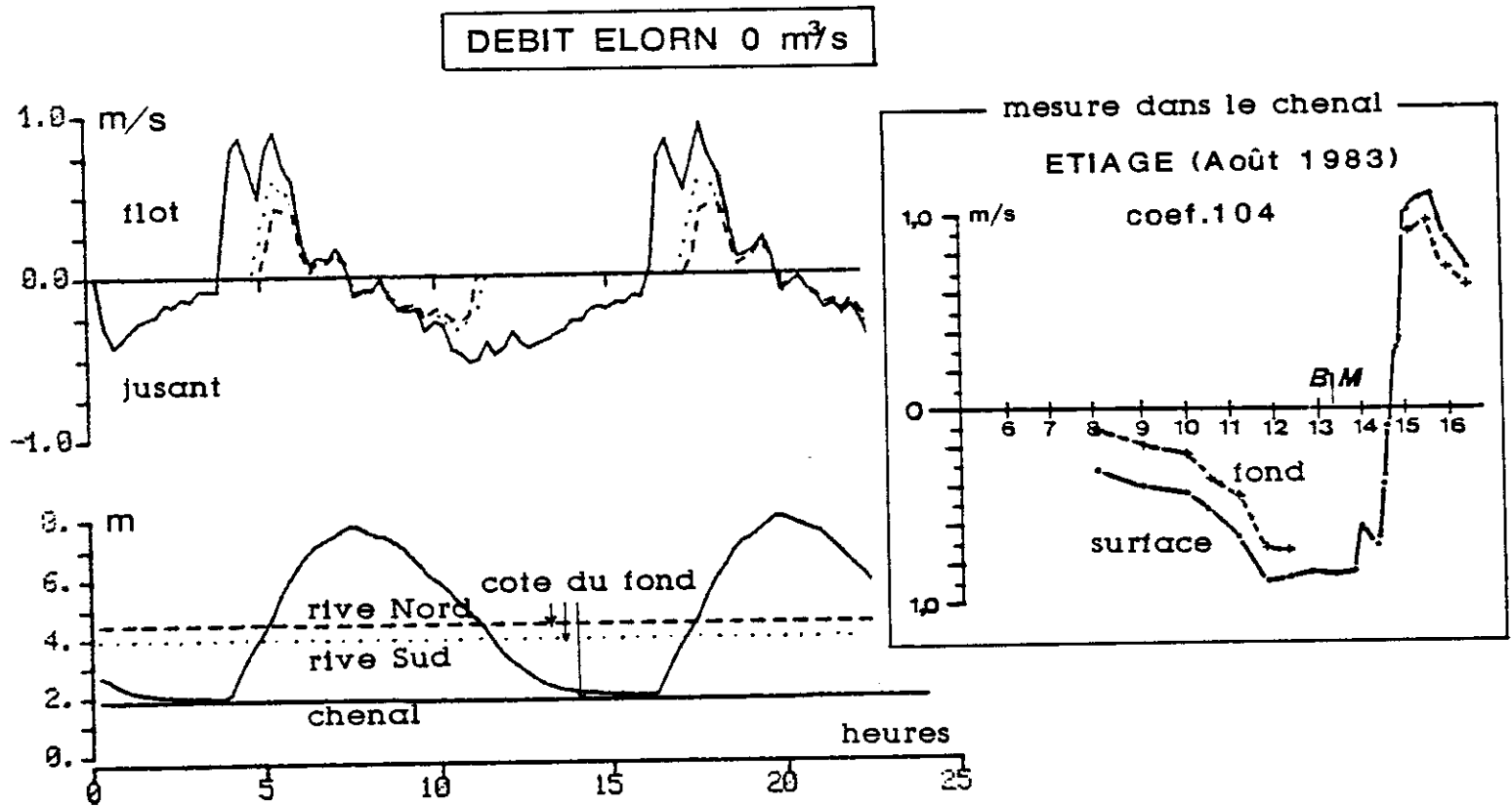
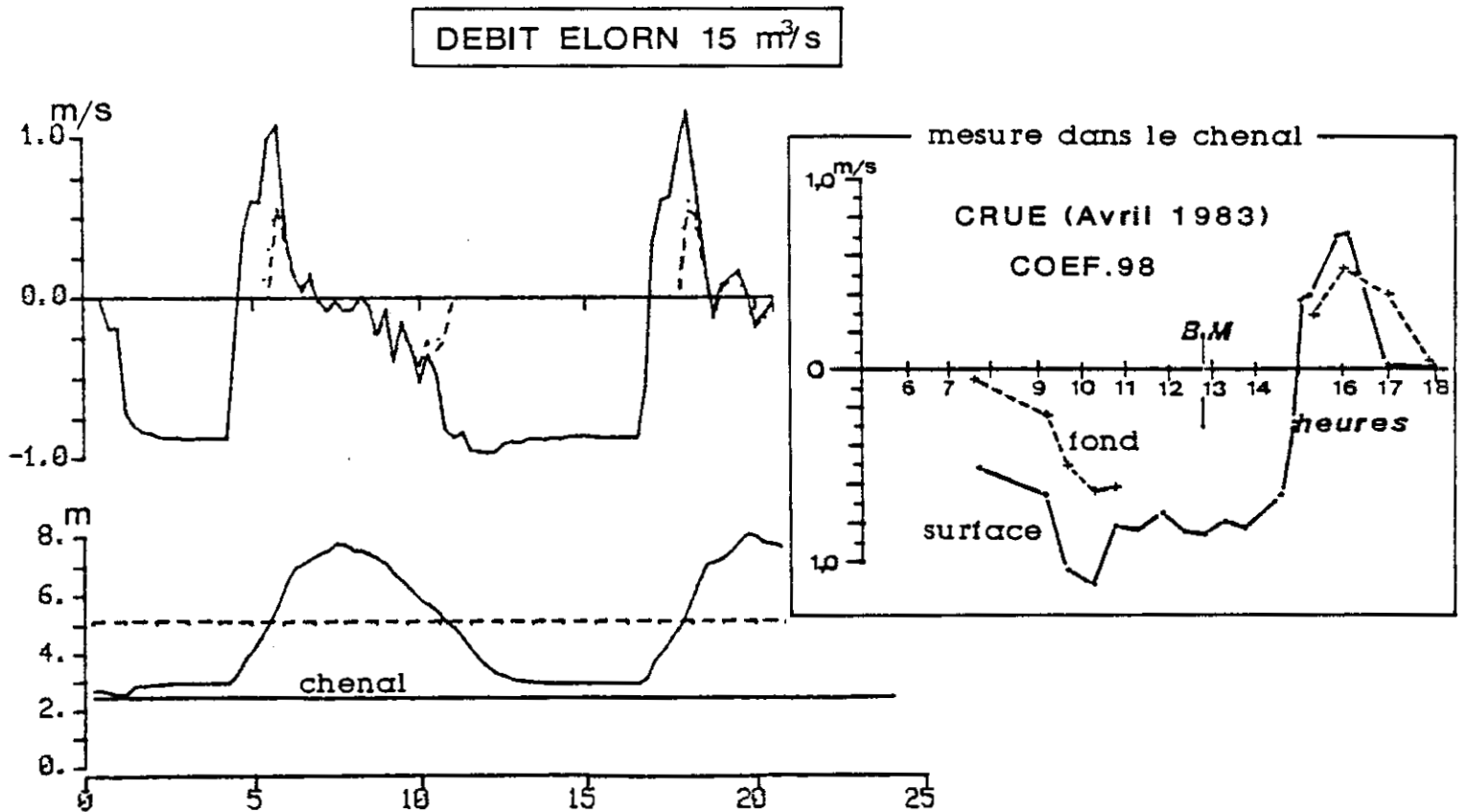
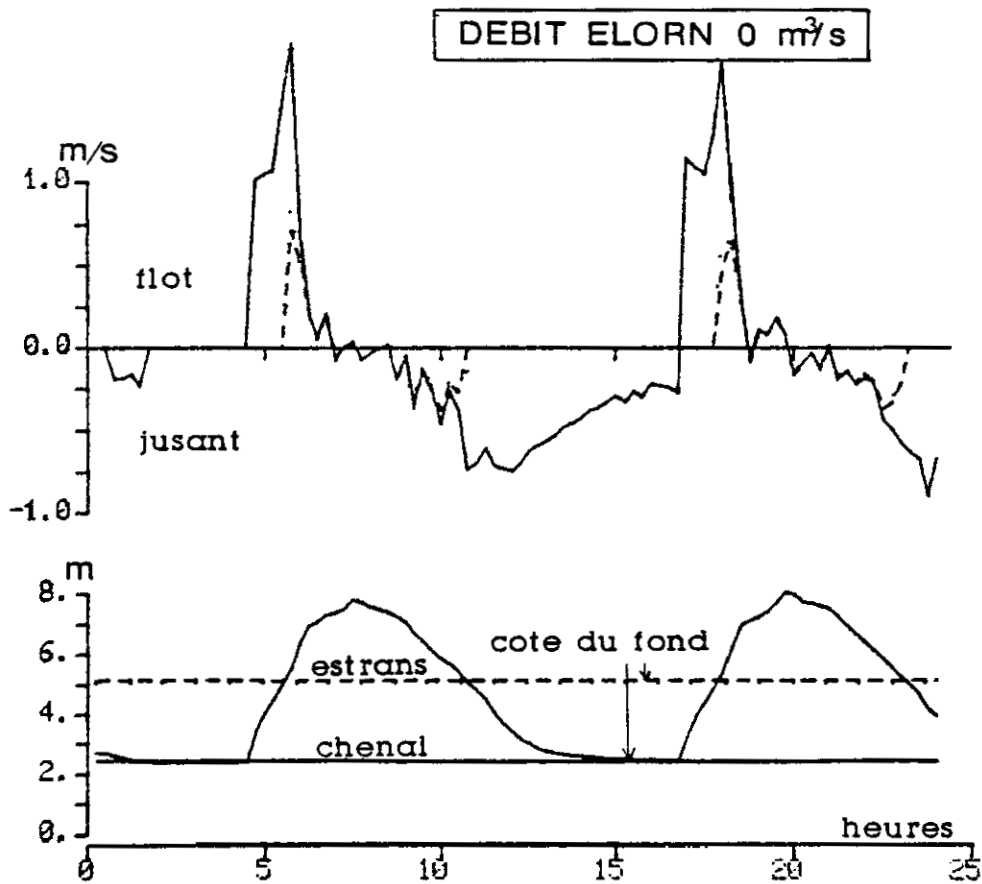


Fig. 30 MODELE 'ELORN': VITESSES CALCULEES EN MAILLE 55 (st.34)
VIVE EAU (coef.95). COMPARAISON AVEC LES MESURES



Si l'évolution des vitesses en maille 10 est régulière et symétrique en flot et en jusant (fig. 28), il en va différemment lorsqu'on progresse vers l'amont : le raidissement de l'onde marée entraîne une renverse de flot brutale suivie d'une pointe de vitesse très marquée. En maille 41, donc vers le milieu de l'estuaire, apparaît une double pointe de flot : le ralentissement intermédiaire coïncide avec la mise en eau des canaux latéraux qui entraîne une meilleure répartition des débits. Ce phénomène, qui existe probablement dans la nature lorsque l'estran a une pente très faible, est ici amplifié par la discrétisation trop schématique du maillage.

En ce qui concerne la répartition transversale des vitesses, on observe un ralentissement sur les côtés où les vitesses maximales sont les 2/3 environ de celles du chenal. C'est l'effet prépondérant du frottement sur le fond qui agit sur une colonne d'eau moins haute, donc avec plus d'efficacité. Notons cependant que les différences calculées sont qualitativement justes mais quantitativement liées aux coefficients de frottement sur le fond et d'échange transversal de quantité de mouvement, qui ont été ajustés approximativement. Naturellement, ce phénomène a beaucoup d'importance pour la répartition des effluents dans l'estuaire.

Enfin, l'effet du débit d'eau douce, négligeable jusqu'en maille 25, est manifeste en amont (mailles 41 et 55), tant sur le niveau de la surface que sur les vitesses : en particulier la fin de jusant est marquée par un régime quasi permanent comparable à celui d'une rivière.

La comparaison avec les mesures montre un relatif accord en phase et en intensité, d'autant plus que les mesures sont ponctuelles dans le temps et dans l'espace. Elles sont faites au droit du chenal, là où les vitesses sont maximales. Par ailleurs, ces mesures présentent une variabilité pas toujours très cohérente (ainsi à la station 32, le courant de surface en jusant est plus fort en période d'étiage qu'en période de crue).

III.2.3. Circulation résiduelle

La circulation résiduelle dans l'estuaire en vive eau peut être schématisée par les trajectoires de la figure 31.

On constate tout d'abord l'extension du cheminement des masses d'eau pendant une marée : environ 6 km, soit la moitié de l'estuaire : dès lors on comprend l'importance que peut avoir l'instant de rejet par rapport à la marée, vis à vis des concentrations en certaines zones sensibles internes à l'estuaire. Une particule quittant la station d'épuration de Landerneau (maille 64) à PM atteint en crue le pK 4 km (maille 25) à BM mais elle n'atteint pas la hauteur de La Forest en étiage. Une autre quittant la station de La Forest (maille 41) à PM descend l'estuaire jusqu'à la "Pyrotechnie de St Nicolas" (~ maille 13).

Les déplacements résiduels sont relativement faibles et varient selon le débit amont de la rivière : ils sont quasiment nuls en étiage tandis que pour un débit de $15 \text{ m}^3/\text{s}$, ils passent de 1,5 km dans la partie amont à 200-300 m plus en aval (en valeur moyenne selon la verticale).

Fig.31: MODELE 'ELORN'. SIMULATION DE TRAJECTOIRES DANS LE CHENAL

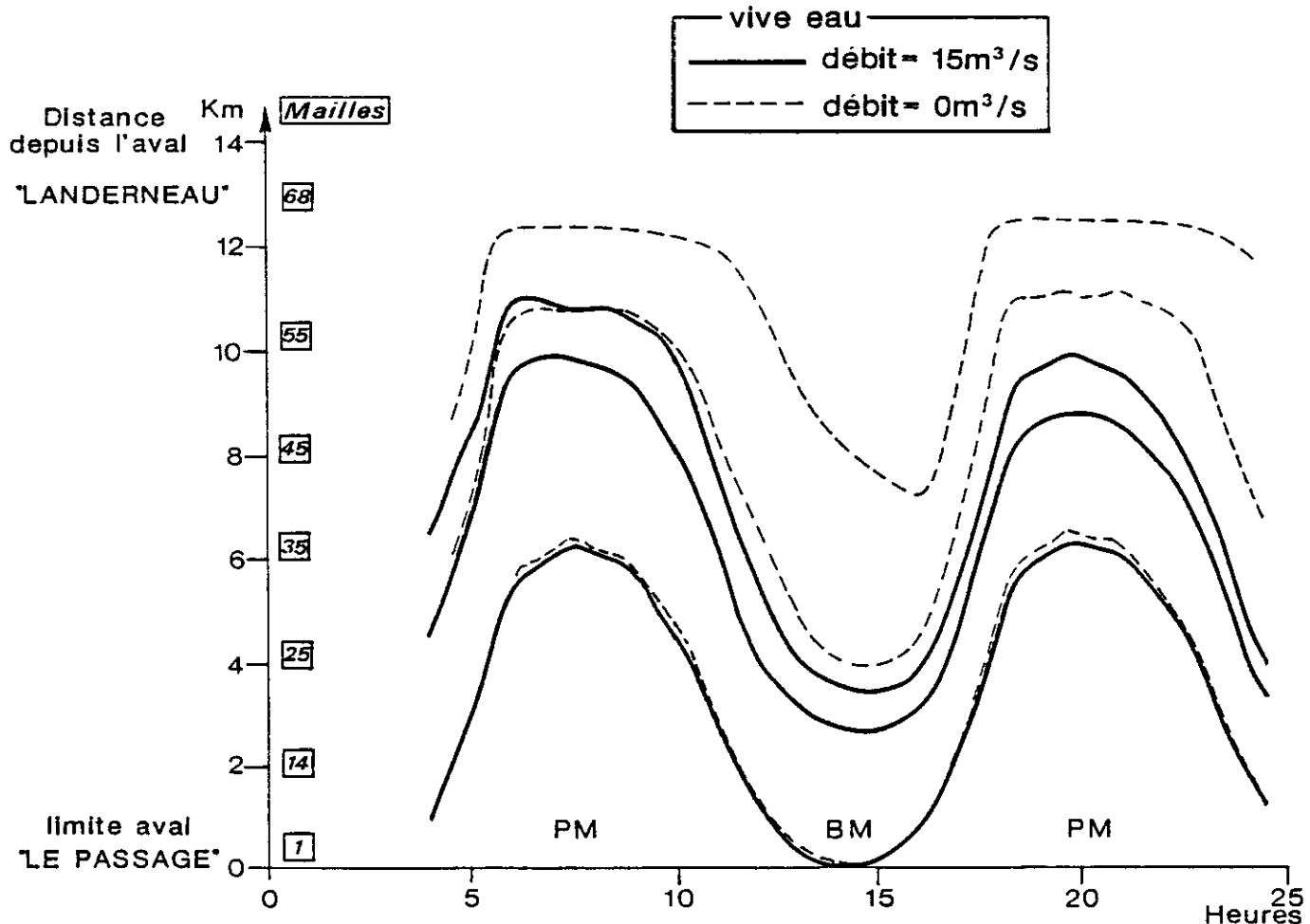
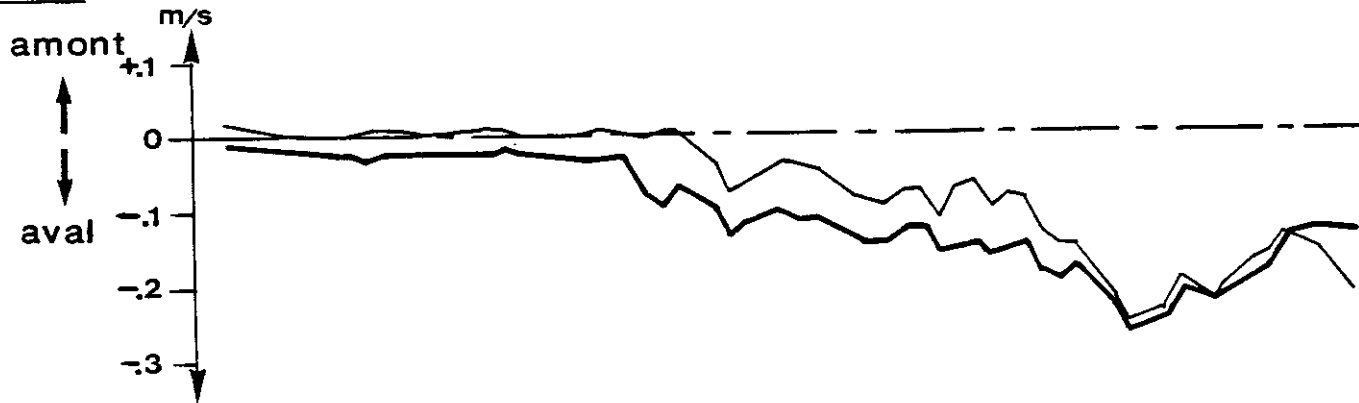


Fig.32 MODELE 'ELORN':

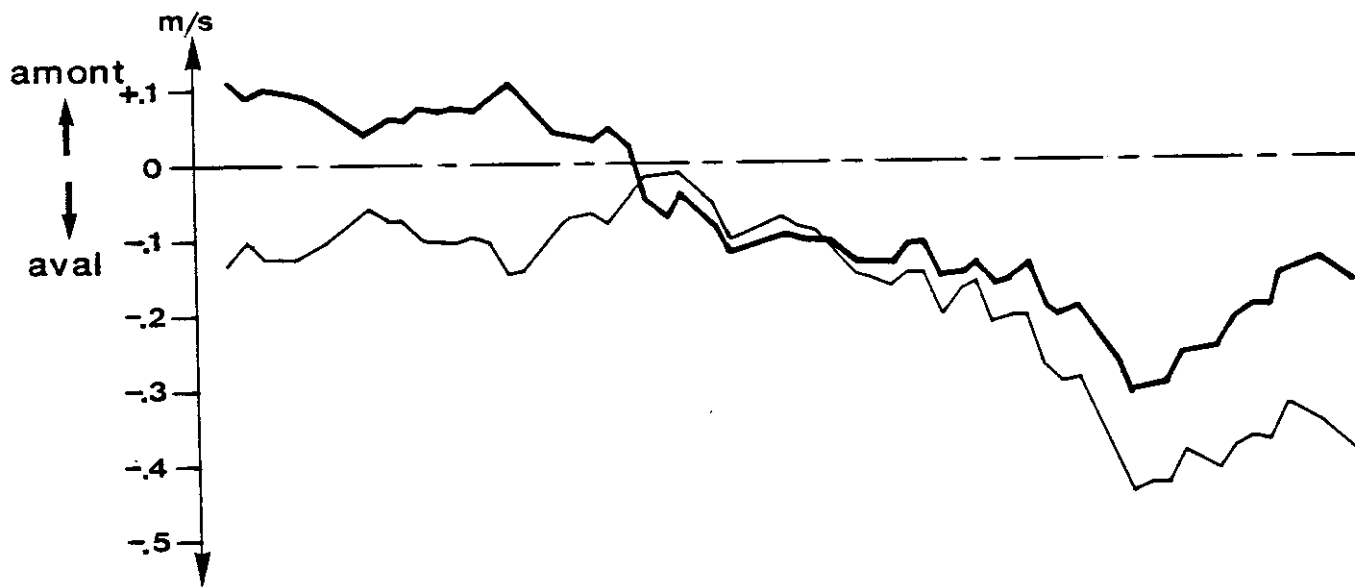
CALCUL DE COURANTS RESIDUELS DANS LE CANAL CENTRAL

— Surface
— Fond

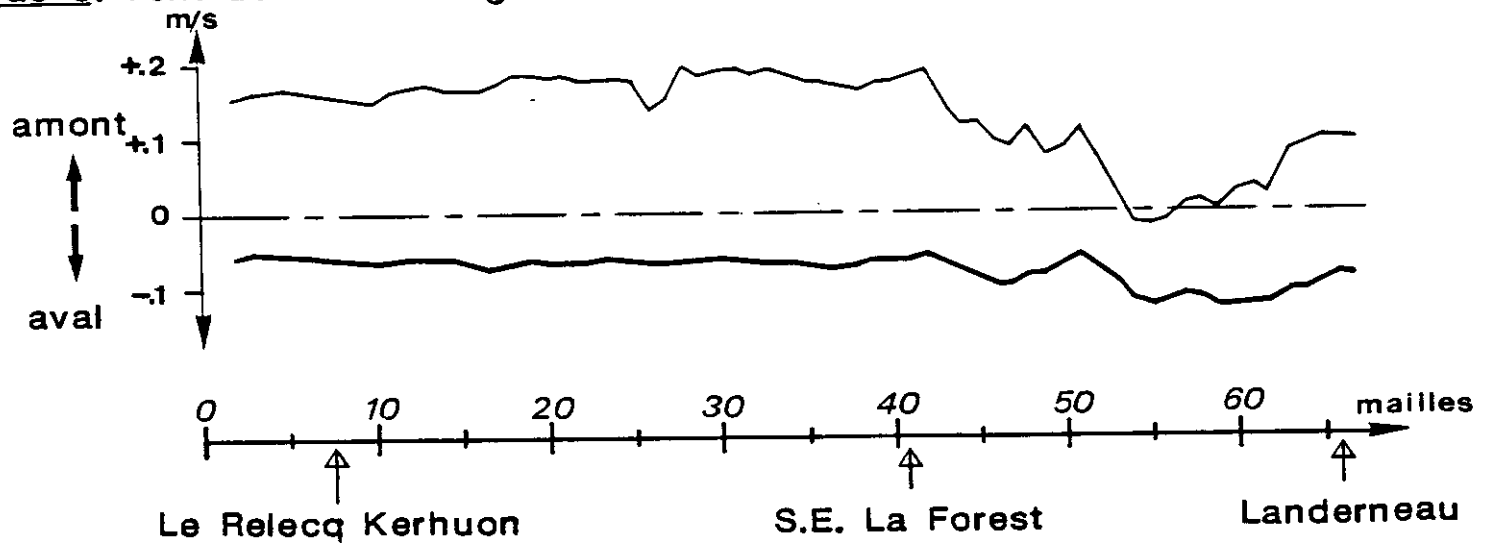
- Cas 1: Débit ELORN $5\text{m}^3/\text{s}$ "Effets de gradient de densité négligés"



- Cas 2: Débit ELORN $15\text{m}^3/\text{s}$ "Avec effets de gradient horizontal de densité"



- Cas 3: Vent de 10m/s dirigé vers l'amont. Débit ELORN $5\text{m}^3/\text{s}$



En conséquence, on peut s'attendre à un temps de résidence assez long des masses d'eau dans l'Elorn. Ce résultat est à nuancer car en période de fort débit les gradients de densité entraînent une circulation plus forte vers l'aval en surface et peut-être inversée vers l'amont au fond (voir ci-dessous, "structure verticale").

Structure verticale

Le courant instantané étant principalement lié à la marée, donc barotrope, le calcul de la structure verticale des courants a été exploité en valeurs résiduelles. Ainsi la figure 32 présente les vitesses résiduelles eulériennes en surface et au fond, obtenues d'aval en amont pour 3 simulations caractéristiques.

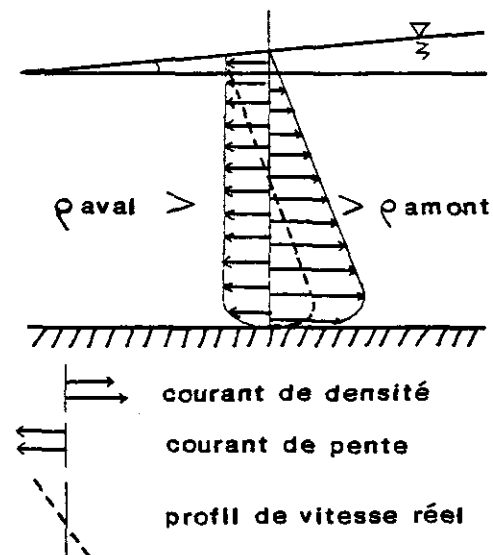
Simulation n° 1 : vive eau, débit d'étiage ($5 \text{ m}^3/\text{s}$) ; pas de calcul de salinité, donc effets liés aux gradients de densité négligés ; pas de vent.

La décroissance du courant résiduel vers l'aval est confirmée (elle est simplement liée à l'accroissement des sections !). On observe sur le fond une résiduelle de jusant supérieure à celle de surface, alors que le courant instantané y est plus faible : il s'agit probablement d'un effet du frottement quadratique sur le fond qui s'avère plus efficace sur la pointe de flot que sur le courant de jusant moins intense.

Enfin un calcul de courants moyens dans les canaux latéraux (non représentés sur la figure) a donné des valeurs résiduelles très faibles.

Simulation n° 2 : Vive eau, débit de crue ($15 \text{ m}^3/\text{s}$) ; calcul de la répartition longitudinale des salinités dans l'estuaire ; prise en compte des gradients horizontaux de densité dans la conservation de quantité de mouvement ; pas de vent.

On observe naturellement une augmentation des vitesses résiduelles "de jusant" en amont, mais surtout une inversion des courants de surface et de fond dans le tronçon aval : c'est le schéma classique en estuaire où la salinité supérieure en aval entraîne un gradient de pression amont/aval maximum au fond. Il en découle un courant dirigé vers l'amont près du fond. L'équilibre dynamique, qui suppose un débit résiduel pratiquement nul (au débit près de la rivière), s'établit grâce à une pente de la surface qui entraîne un



Circulation de densité en estuaire

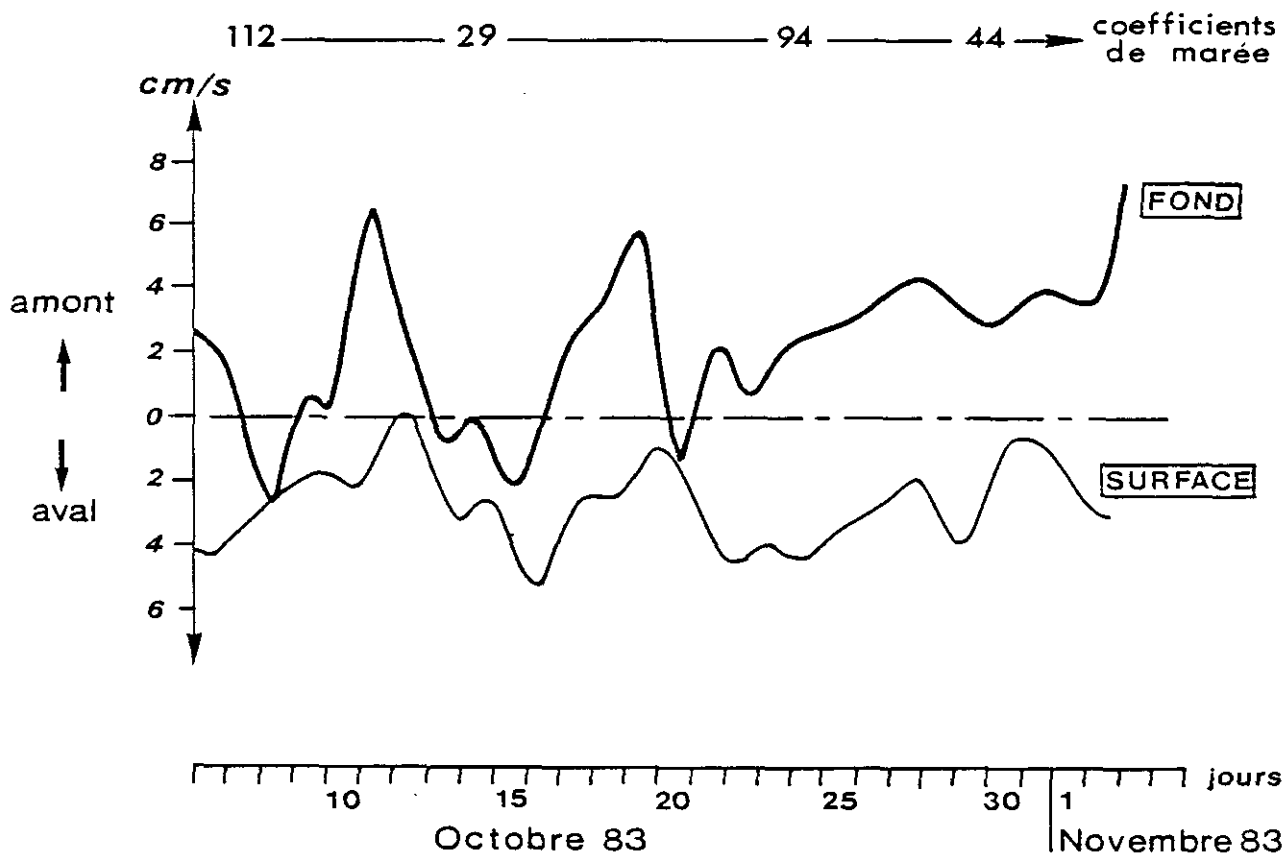
courant barotrope (i.e uniforme sur la verticale) dirigé vers l'aval.

Les effets de densité croissent avec la hauteur d'eau, c'est pourquoi ils se produisent principalement en aval, lorsque le gradient de salinité y est maximum, c'est à dire autour de la basse mer (cf. § IV-2 et L'YAVANC, 1984). Les vitesses ainsi calculées (~ 10 cm/s en surface et au fond), qui sont liées au coefficient d'échange vertical imposé lors du calcul, sont compatibles avec les mesures : celles-ci, effectuées un peu en aval de la limite du modèle (où les gradients de densité sont moindres), pour un débit faible, à la station 8, sont reproduites en figure 33.

Fig.33:

COURANT RESIDUEL MESURE A LA STATION 8 -DEBIT FAIBLE ($2\text{m}^3/\text{s}$)

Composante parallèle à l'axe de l'estuaire



Enfin, le calcul de la structure verticale fournit une position du "point nodal" caractérisé par une inversion des vitesses résiduelles près du fond : il s'agit des mailles 25-27 (pour une vive eau et un débit de $15 \text{ m}^3/\text{s}$), à peu près là où se produit une rupture de la pente du fond.

N.B. : - Un tel calcul ne tient pas compte d'éventuelles stratifications observées en crue, même en vive eau (L'YAVANC, 1984) : dans ce cas la structure verticale des vitesses est accentuée.

- Le courant de surface dirigé vers l'aval est induit par la pente de la surface libre ; comme celle-ci est à peu près la même dans le chenal et sur les rives (et supposée identique par le modèle), on obtient pour les canaux latéraux un courant résiduel vers l'aval, et sur toute la hauteur d'eau puisque celle-ci reste faible. Le phénomène peut avoir de l'importance pour le transport des effluents.
- Il faut rappeler que toutes ces observations ou calculs de courants inversés en surface et au fond n'existent qu'en valeur résiduelle : le courant instantané (dû à la marée barotrope) demeure quasi uniforme sur la verticale.

Simulation n° 3 : débit d'étiage ($5 \text{ m}^3/\text{s}$) ; gradients de densité négligés ; vent permanent de 10 m/s dirigé le long de l'estuaire vers l'amont (vent de secteur sud-ouest, fréquent dans la région de Brest, et a priori défavorable pour l'expulsion des effluents de l'Elorn).

L'entraînement par le vent en surface atteint 20 cm/s (en fait sur une faible épaisseur) tandis que le courant de retour au fond serait de l'ordre de 5 cm/s : mais de telles valeurs n'ont pu être vérifiées par des mesures. Enfin l'"anomalie" constatée autour de la maille 55 résulte peut être du rétrécissement que subit l'estuaire à ce niveau : des phénomènes de convection non linéaire entre les canaux latéraux, le canal central en surface et le canal central au fond, mal reproduits par le calcul, doivent s'y produire.

Conclusion :

La circulation résiduelle de marée dans l'estuaire de l'Elorn est faible, le courant résiduel est donc dépendant des facteurs météorologiques et surtout des effets de densité entraînés par les apports d'eau douce. Néanmoins l'excursion des masses d'eau au cours de la marée étant grande vis à vis de la longueur de l'estuaire, les effets de mélange et de transport direct vers la rade de Brest sont susceptibles de jouer un rôle plus important que les déplacements résiduels vis à vis de la distribution des effluents de l'Elorn et de leur devenir.

IV - DILUTION DES EFFLUENTS

IV.1 Réglage des modèles - validation par les mesures

L'exploitation des modèles doit être réalisée pour les rejets bactériens, mais leur validation par comparaison avec des mesures bactériologiques in situ n'est pas envisageable : la méconnaissance des comportements des bactéries en mer, les fluctuations des flux rejetés et l'imprécision des comptages eux-mêmes rendent illusoire toute similitude entre les résultats "lissés" des modèles et ceux "quasi aléatoires" des mesures. La validation des calculs est donc effectuée par comparaison avec la mesure d'un paramètre conservatif : c'est réellement le cas de la salinité, qui est le meilleur traceur de l'Elorn, mais pas des rejets en rade. En ce qui concerne les rejets urbains, l'ammonium (NH_4^+) en situation hivernale constitue un traceur relativement correct.

IV.1.1. Modèle de dilution en rade

Le calcul du courant ayant été vérifié au § III.1, la composante "advection" du mécanisme de répartition des effluents est déjà calée. En ce qui concerne la dispersion, le choix d'une formulation de type "Elder" (cf. § II-2) pour le coefficient de dispersion ne laisse pas de possibilité de réglage. Le modèle est-il réaliste pour autant ? Les figures 34 et 35 présentent la comparaison mesure/modèle respectivement à basse mer et pleine mer, pour les conditions décrites ci-après.

Paramètre mesuré in situ : NH_4^+ .

Date des mesures : 20 et 22 novembre 1980. Vive eau.
Prélèvements à basse mer et pleine mer, en surface (au fond, les concentrations sont moindres).

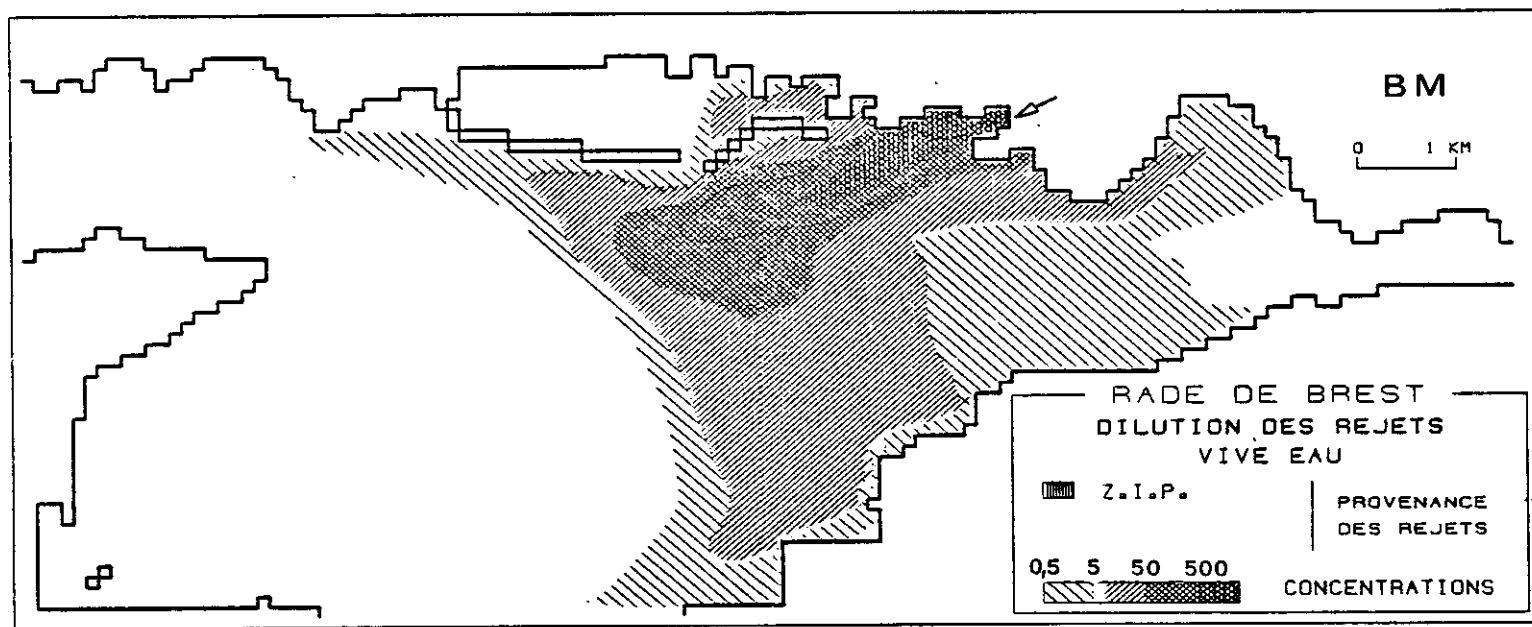
Flux approximatifs des principaux rejets :

- Zone Industrielle Portuaire : $0.22 \text{ m}^3/\text{s}$ à concentration $2.10^6 \mu\text{mole}/\text{m}^3$ soit un flux de $4.5 \cdot 10^5 \mu\text{mole}/\text{s}$.
- En ce qui concerne les rejets de la rade abri et de Maison Blanche, à l'ouest de la zone d'étude, leurs flux d'ammonium sont évalués à 1,5 fois celui de la Z.I.P. (§ IV.2).
- De même, l'Elorn aurait un flux égal au 1/3 de la Z.I.P. tandis que les ruisseaux du Moulin Blanc, au coeur de la zone concernée, n'en représenteraient que 1 %.

Par conséquent, on peut raisonnablement considérer que le rejet Z.I.P. est responsable pour environ 50 % des concentrations observées sur les figures 34b et 35b, tout au moins celles qui sont supérieures au seuil commun à toute la rade de Brest.

Pour la simulation, seul un flux de $5.10^5 \mu\text{mole}/\text{s}$ de NH_4^+ à l'émissaire de la Z.I.P. a été pris en compte. D'autre part les résultats présentés correspondent à un régime stationnaire, aux fluctuations de marée près.

Fig.34 COMPARAISON ENTRE CONCENTRATIONS EN AMMONIUM
CALCULEES PAR MODELE ET MESUREES IN SITU. BASSE MER . VIVE EAU



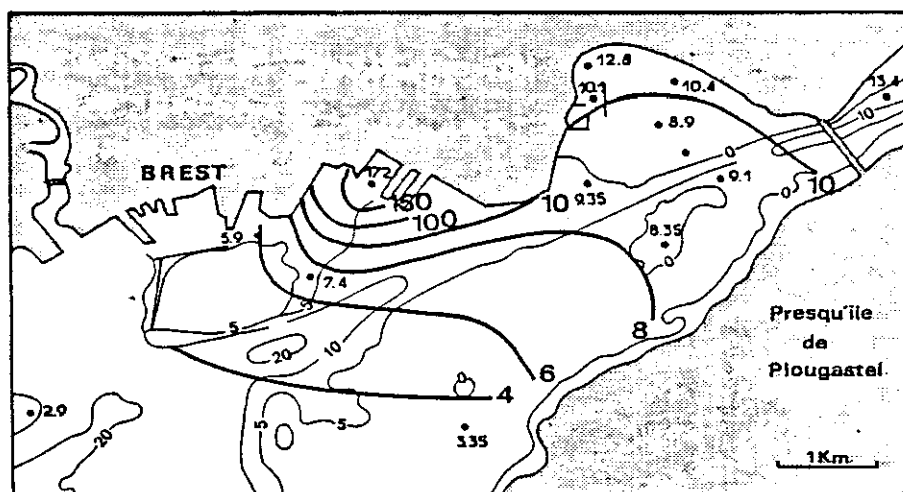
LOGICIEL BIDIMENSIONNEL IFREMER-DERO/EL

CONVECTION: PROGRAMME BICAR DEVELOPPE PAR EDF-LNH

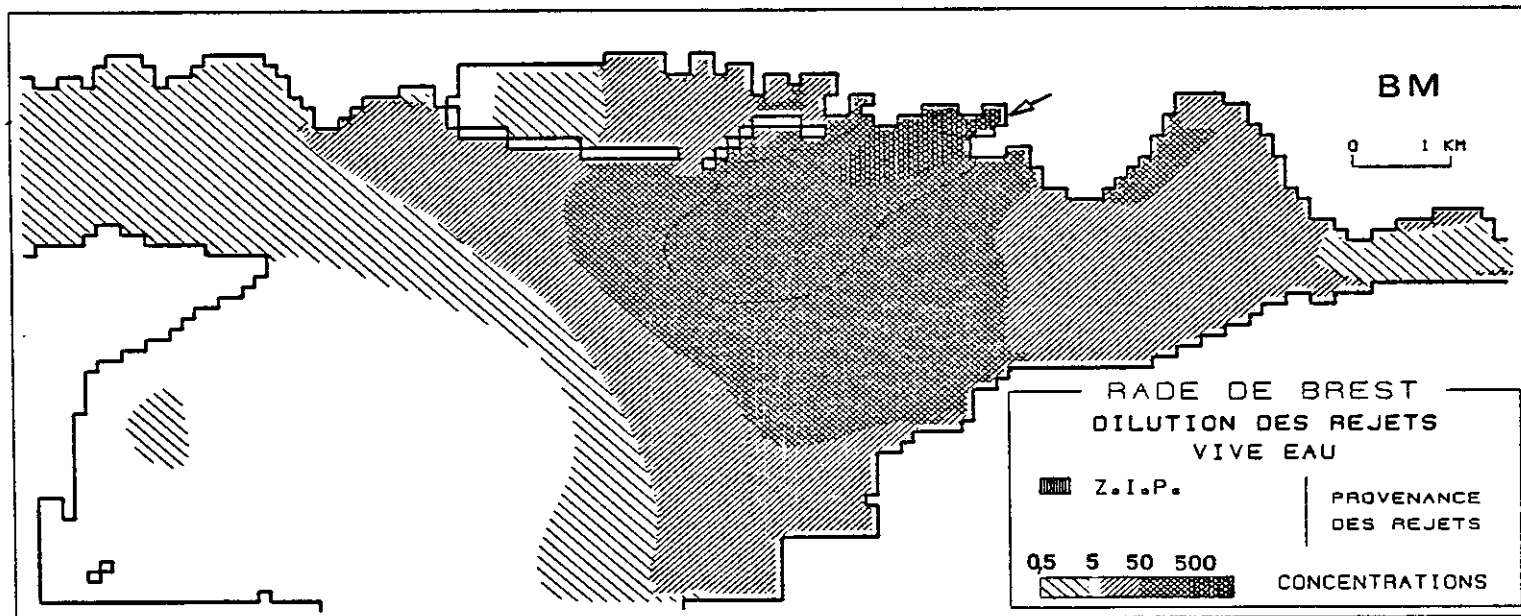
▲ calcul avec un coefficient
a de dispersion de type "Elder"

mesures des 20-22 novembre
1980 - surface ($\mu\text{mole/l}$)

▶ b



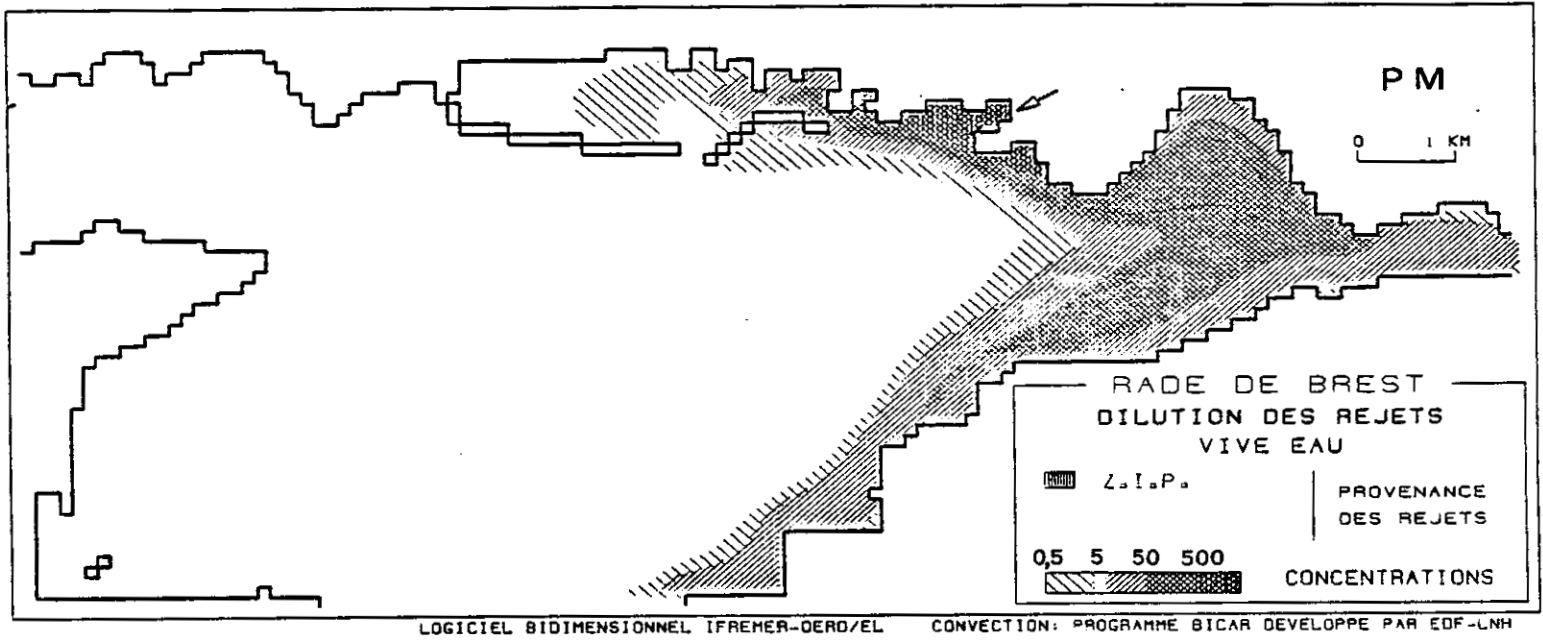
c ▼ calcul avec un coefficient
de dispersion X20



LOGICIEL BIDIMENSIONNEL IFREMER-DERO/EL

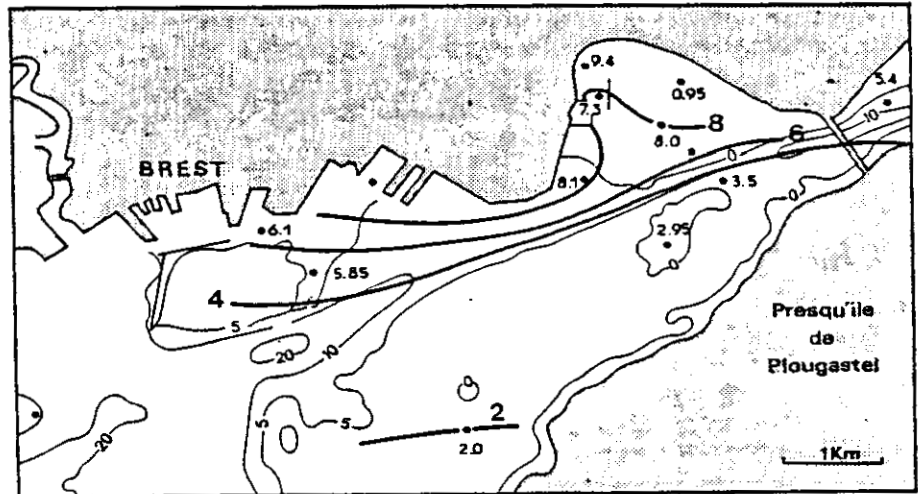
CONVECTION: PROGRAMME BICAR DEVELOPPE PAR EDF-LNH

Fig.35 COMPARAISON ENTRE CONCENTRATIONS EN AMMONIUM
CALCULEES PAR MODELE ET MESUREES IN SITU. PLEINE MER . VIVE EAU

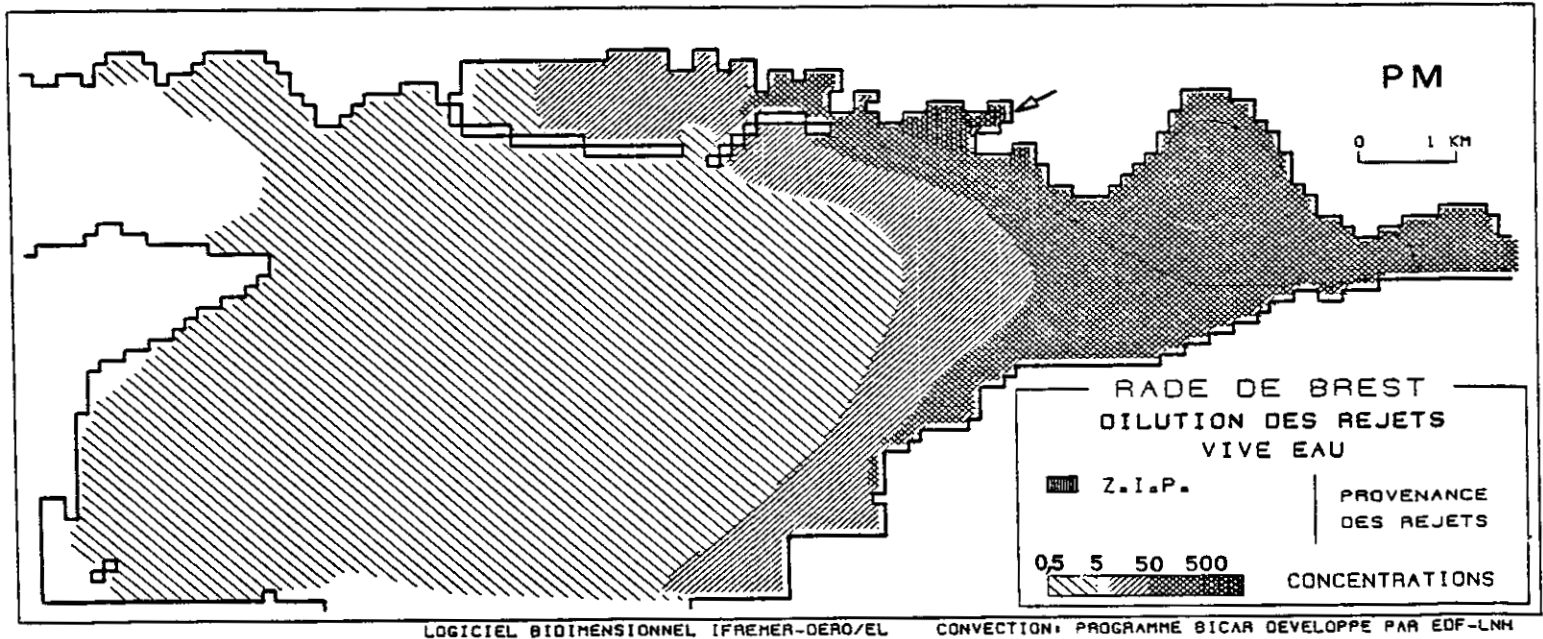


▲ calcul avec un coefficient
a de dispersion de type "Elder"

mesures des 20-22 novembre
1980 - surface ($\mu\text{mole/l}$) b



c calcul avec un coefficient
▼ de dispersion X20



L'allure des schémas de dilution et leurs variations au cours de la marée sont analogues à celles des mesures. On peut relever les différences suivantes :

- Les gradients de concentration obtenus par modèle sont nettement plus élevés qu'en nature : en raison d'une sous estimation possible de la dispersion simulée, les calculs ont été refaits avec un coefficient de dispersion vingt fois plus grand (mais encore proportionnel à HU). Les nouveaux résultats, à BM et PM, sont présentés sur les figures 34c et 35c respectivement. On constate que les panaches ont gardé la même allure, mais que le mélange est fortement accru dans la nouvelle simulation : les gradients sont réduits, et les concentrations largement réévaluées dans les secteurs éloignés du rejet.

Cependant, il n'y a pas accord avec les mesures en nature qui montrent des concentrations plus élevées à partir de quelques kilomètres du rejet : il s'agit en fait du "bruit de fond" de la rade - ou plus généralement des eaux côtières - caractérisé par des concentrations de 0,1 à 1 $\mu\text{mole/l}$. Cette quantité d'ammonium, qui fluctue avec les saisons, provient d'autres sources plus lointaines - même hors de la rade - mais surtout de la reminéralisation de la matière organique dissoute ou particulaire présente dans toute la rade : ces sources diffuses ne sont pas représentées dans le modèle. En fait, en dehors de la zone proche de la Z.I.P., l'ion NH_4^+ n'est pas un bon traceur du rejet qui a été simulé : c'est pourtant le meilleur ...

En ce qui concerne la zone vraiment contaminée par le rejet, les gradients obtenus pour un grand facteur de dispersion sont proches de ceux mesurés.

- Près du rejet de la Z.I.P., les concentrations calculées sont 2 à 3 fois supérieures à celles mesurées. Or un bilan de masse sur l'ensemble du secteur modélisé montre que le calcul "perd" environ 10 % de la masse rejetée à chaque marée, soit un peu plus du tiers après 8 marées (temps nécessaire pour atteindre le régime stationnaire). Pourtant, globalement dans la zone couverte par le modèle, les concentrations calculées sont supérieures. Par conséquent, le décalage mesure/modèle provient soit d'une mauvaise estimation des flux à la période des mesures, soit d'une "disparition naturelle" de l'ammonium, soit, pour ce qui concerne les fortes concentrations près du rejet, d'une sous-estimation des courants dans le secteur.

Conclusion :

La validation par les mesures du modèle de dilution en rade n'est pas vraiment réalisable. Toutefois les structures calculées sont conformes aux observations. De plus la dispersion semble sous estimée par le modèle : les résultats obtenus avec un coefficient élevé seraient plus corrects.

Dans la suite, les calculs seront généralement menés avec le coefficient "minimum" (i.e selon la formule d'Elder) de façon à mieux visualiser les formes successives des panaches et à mettre en évidence certains phénomènes de cisaillement par les courants. Une option pour une forte dispersion sera discutée lors de la présentation des résultats d'impact dans les zones sensibles.

IV.1.2. Modèle de dilution dans l'estuaire de l'Elorn

La validation du modèle d'advection/dispersion dans l'estuaire de l'Elorn a été effectuée en simulant la dilution de la rivière Elorn par la distribution des salinités. Les conditions de simulation furent les suivantes : vive eau (coefficient 95), débit amont $15 \text{ m}^3/\text{s}$; elles sont proches des conditions naturelles des mesures du 15 février 1983.

La comparaison entre nature et modèle est satisfaisante (fig. 36), compte tenu de la moyenne verticale qu'il faut effectuer sur les mesures. On observe en particulier que le gradient de densité n'est pas très étendu (de l'ordre de 5 km) mais que son déplacement au cours de la marée est important.

N.B. : Partant d'une situation initiale caractérisée par des concentrations nulles, le régime quasi-stationnaire a été atteint au bout d'une dizaine de marées répétées. Ce temps assez long est compatible avec les faibles vitesses résiduelles calculées (cf. § III.2.3.). En conséquence, il sera nécessaire de poursuivre pendant une durée équivalente les simulations des rejets conservatifs pour déterminer les concentrations, en particulier en aval de l'estuaire

IV.2. INVENTAIRE DES SCENARIOS DE REJETS ENVISAGES

La définition d'un scénario de simulation comprend les éléments suivants :

- localisation du rejet,
- caractérisation du flux : continu ou variable (la référence de temps physiquement significative étant l'heure marée),
- intensité de la marée : on a retenu deux coefficients représentatifs : vive eau et morte eau moyenne,
- le débit amont de l'Elorn. En fait les variations de débit ayant un caractère aléatoire, on a seulement considéré une situation de débit moyen ($5 \text{ m}^3/\text{s}$),
- l'intensité du mélange turbulent, par le choix du coefficient de dispersion,

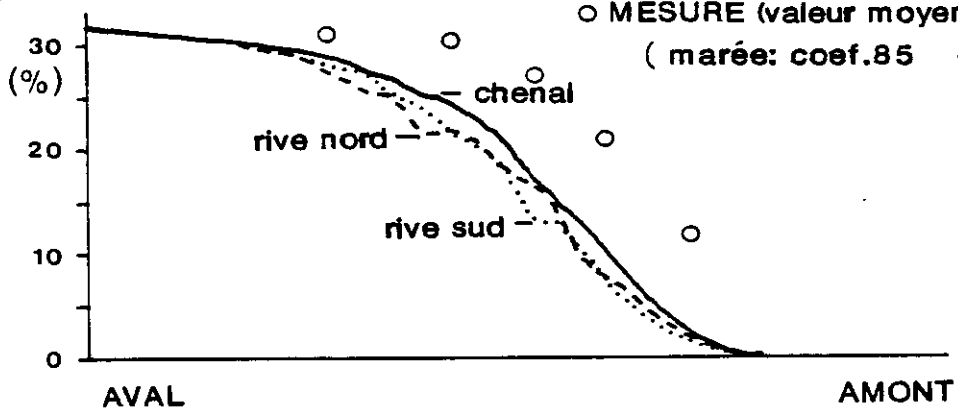
Fig.36 ESTUAIRE DE L'ELORN
COMPARAISON ENTRE SALINITES CALCULEES ET MESUREES

MODELE

(10ème marée calculée)

○ MESURE (valeur moyenne sur la verticale)
(marée: coef.85 débit: 12m³/s)

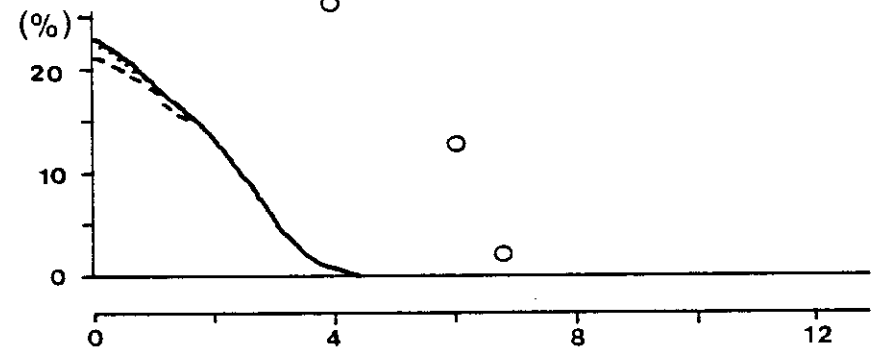
PM



marée: coef.95

débit: 15m³/s

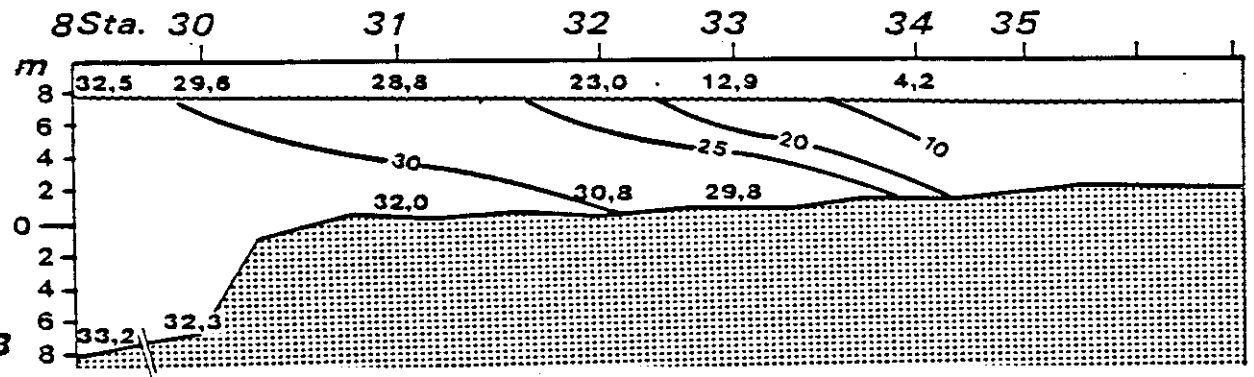
BM



MESURE

(in L'YAVANC, 1984)

PM



Le 15 Fév. 1983

Coef. : 85-85

Débit: 12 m³/s

BM

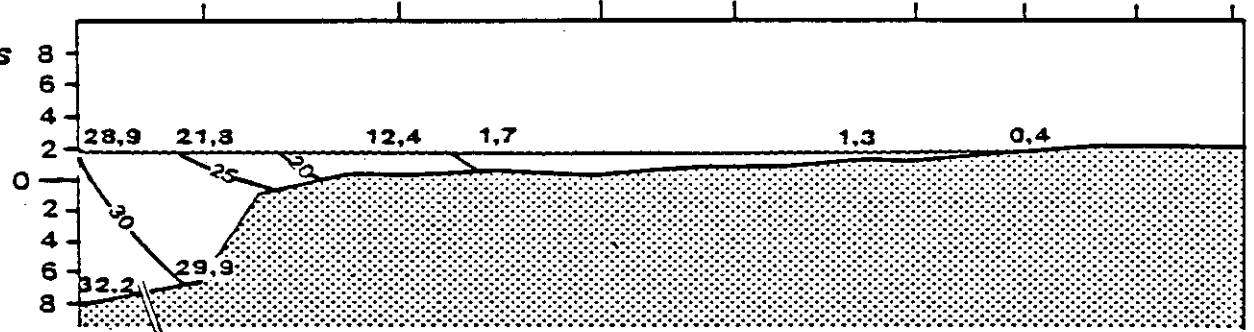
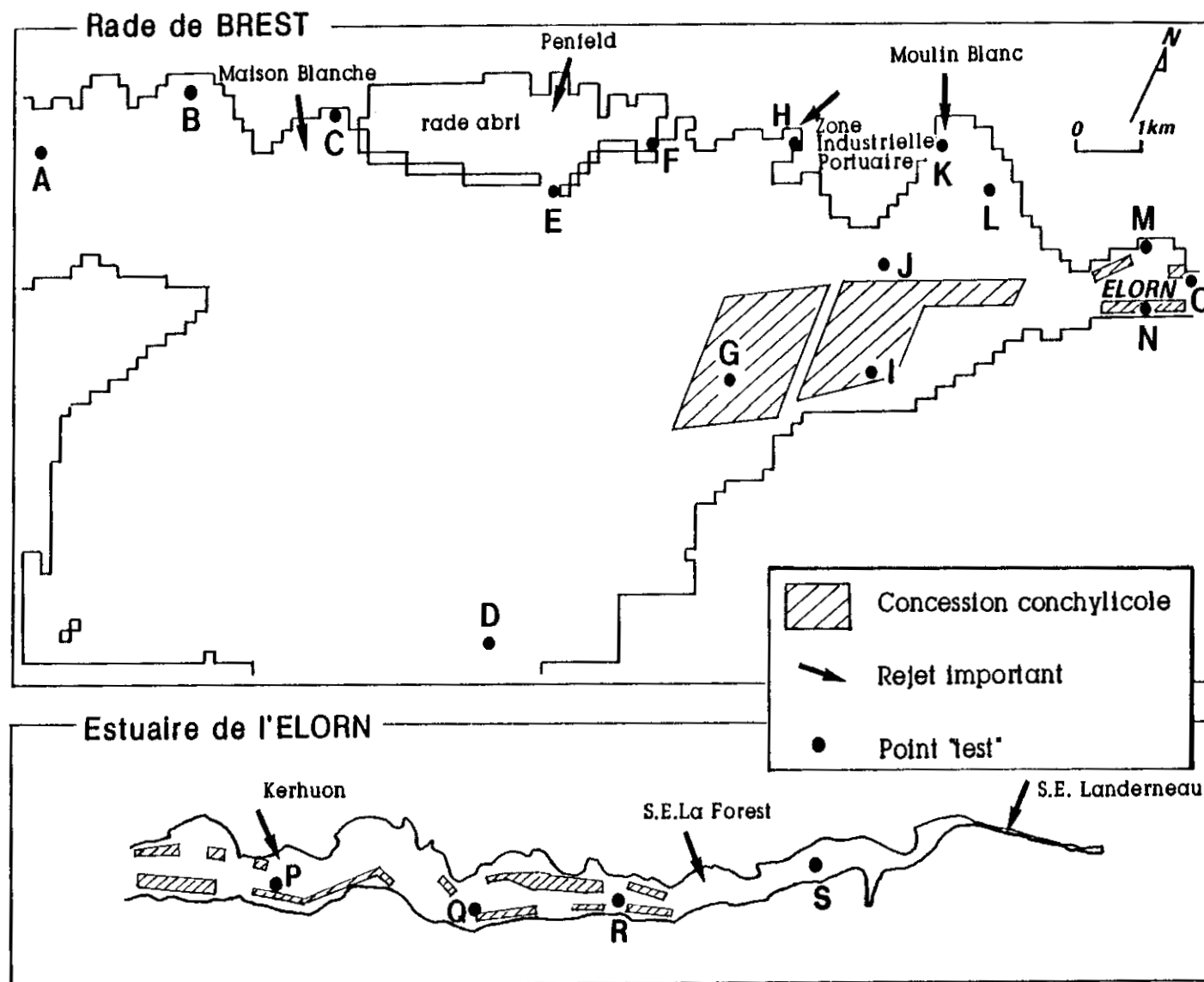


Fig. 37 DETERMINATION DES SECTEURS SENSIBLES AUX CONTAMINATIONS
 POSITION DES POINTS "TEST"



- le comportement propre de l'effluent : conservatif ou dégradable selon une loi de "mortalité" simple. Deux gammes de " T_{90} " ont été retenues : 4 h et 15 h.

La première valeur correspond à une donnée fréquemment rencontrée dans la littérature, mais la seconde se rapproche mieux des évaluations qui avaient été faites pour l'étude de la Capacité d'Acceptation du Milieu Marin en Rade de Brest (cf. § II-2).

En fait avec un T_{90} de 4 h les panaches de concentration sont limités aux champs proches des rejets (1 à 2 kilomètres) et dans ce cas la possibilité d'impact d'une zone sensible est simplement liée à la proximité du rejet.

Le 2ème cas ($T_{90} = 15$ h) retiendra donc beaucoup plus l'attention.

N.B. : Il est rappelé que les concentrations calculées par le modèle sont proportionnelles au flux de "contaminant" injecté. Chaque rejet simulé a donc été affecté d'un flux identique (soit $10^7/s$ pour les simulations présentées sous forme de cartes de répartition).

IV.2.1. Rejets pris en compte

L'inventaire détaillé des rejets présents dans le secteur d'étude a permis de sélectionner les suivants, retenus pour l'importance de leurs débits ou pour la proximité des zones sensibles (cf. Fig. 37 et SAUNIER, 1986).

- Rejet "Maison Blanche" : c'est le rejet, par émissaire sous marin de 600 m de long, d'une station d'épuration de 60 000 équivalent habitants (E.H.),

- rejet "Rade Abri" : il s'agit en fait de plusieurs rejets aboutissant à l'estuaire de la Penfeld, qui est en contact avec la rade par la rade abri (avec en particulier le rejet de la station d'épuration de Brest II - 50 000 E.H.),

- rejet "Z.I.P." : rejet de la station d'épuration de la Zone Industrielle Portuaire (85 000 E.H.),

- rejet du "Moulin Blanc" : matérialisé principalement par deux exutoires naturels (le ruisseau du Vallon au nord-ouest, et celui du Costour, à l'est). Une implantation unique de ces deux rejets a été retenue : il s'agit du Vallon, considéré comme plus important,

- rejet "Kerhuon" : il désigne le débouché, dans l'estuaire de l'Elorn, de l'étang du Kerhuon qui constitue actuellement l'exutoire d'une partie de la commune du Relecq-Kerhuon.

- rejet "La Forest" : il correspond au rejet de la station d'épuration de la Forest-Landerneau, de faible débit mais placé près des parcs.

- rejet S.E. Landerneau : situé à l'exutoire de la station d'épuration de Landerneau (55 000 E.H.) ce rejet représente aussi l'ensemble des autres rejets de Landerneau et du secteur amont de la ville, dont l'Elorn est le vecteur unique.

IV.2.2. Zones sensibles

La figure 37 reprend l'ensemble des secteurs sensibles à une éventuelle contamination d'origine fécale ou par excès de sels nutritifs :

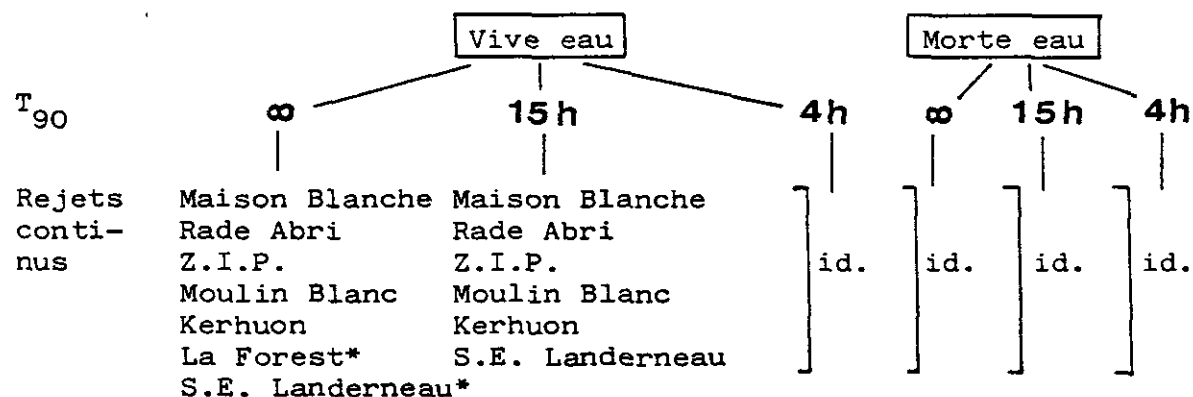
Il s'agit des

- plages de Ste Anne du Portzic et du Moulin Blanc,
- zones faisant ou pouvant faire l'objet d'une concession conchylicole, situées essentiellement sur les bancs de Kéraliou, au nord de la presqu'île de Plougastel, et dans l'estuaire de l'Elorn, en aval du bourg de la Forest.

Des points test ont donc été choisis au coeur de ces zones sensibles : c'est en chacun de ces points que seront comparés les impacts des rejets sélectionnés précédemment.

IV.2.3. Inventaire des scénarios

Le tableau suivant récapitule les divers scénarios des simulations qui ont été effectuées :



* pour ces rejets, l'effet d'un flux discontinu, présentant une pointe à divers instants de la marée, a été testé.

IV.3. DILUTION DU REJET MAISON BLANCHE

La dilution du rejet Maison Blanche est représentée par son panache à 6 moments de la marée (fig. 38 et 39).

Fig.38 DILUTION DU REJET 'MAISON BLANCHE' VIVE EAU

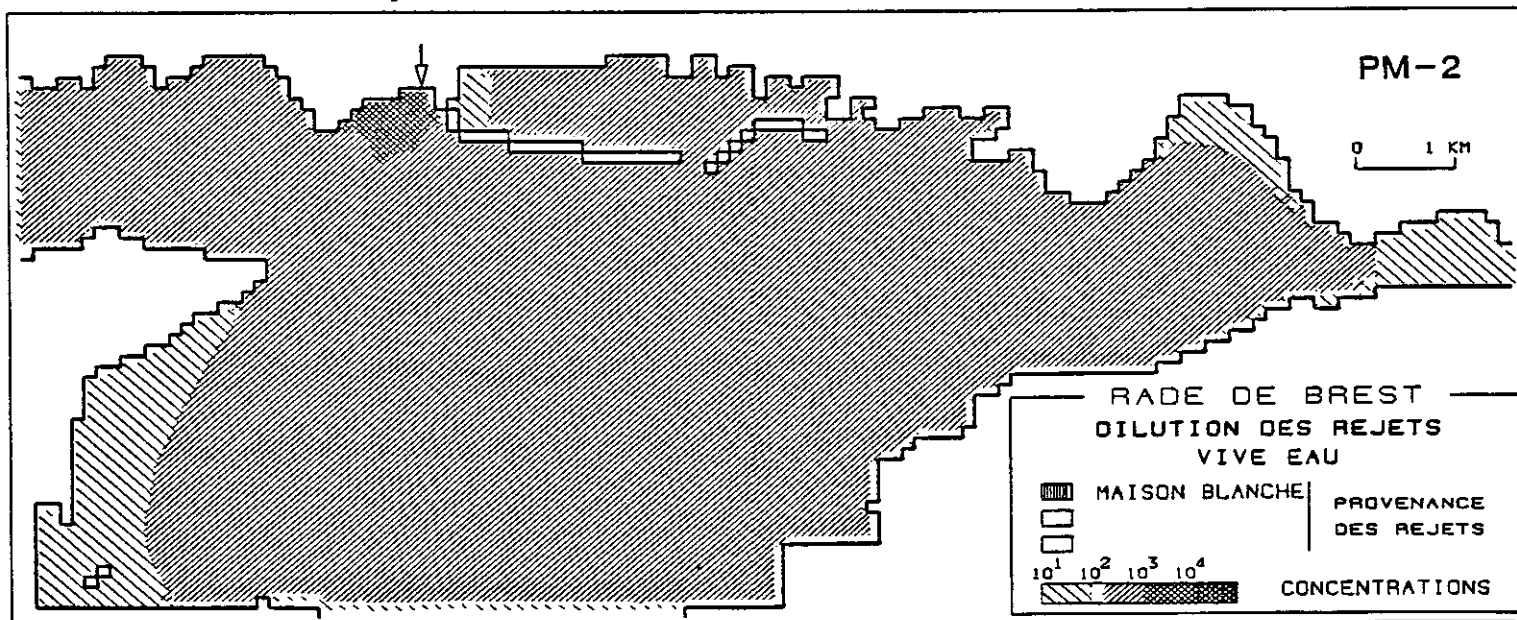
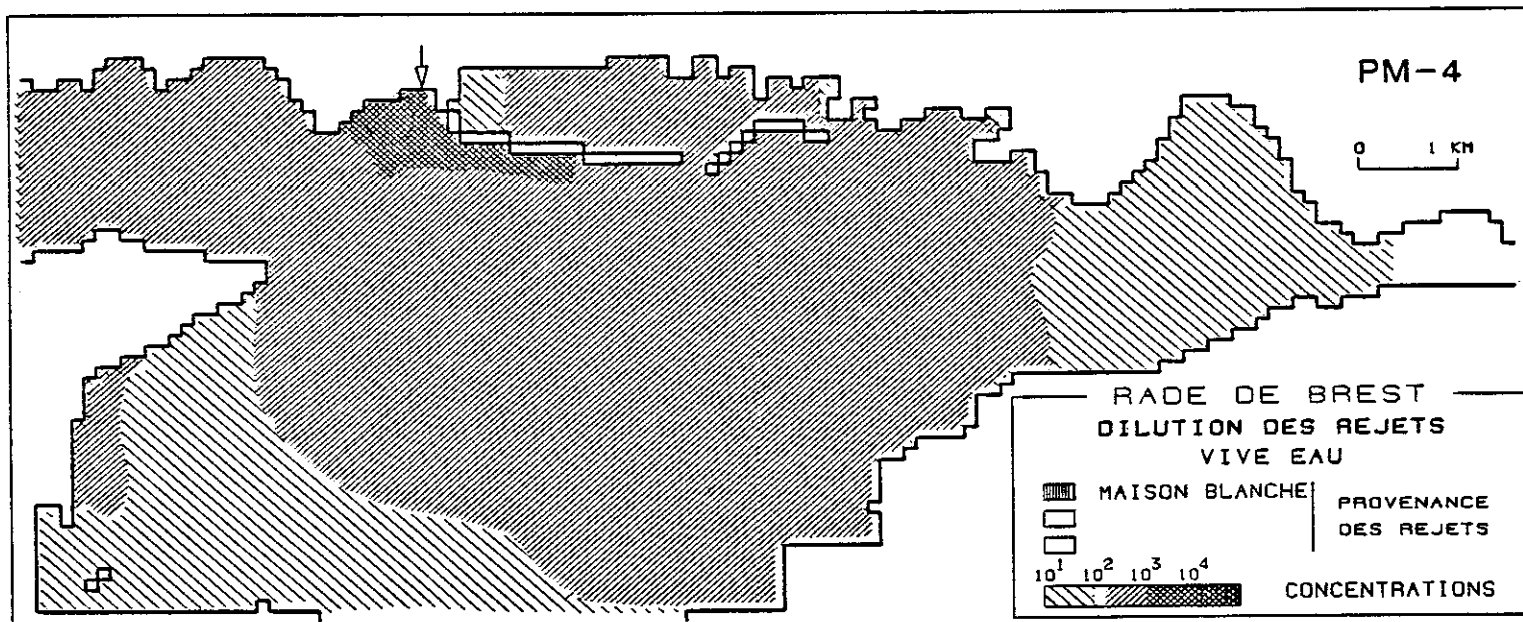
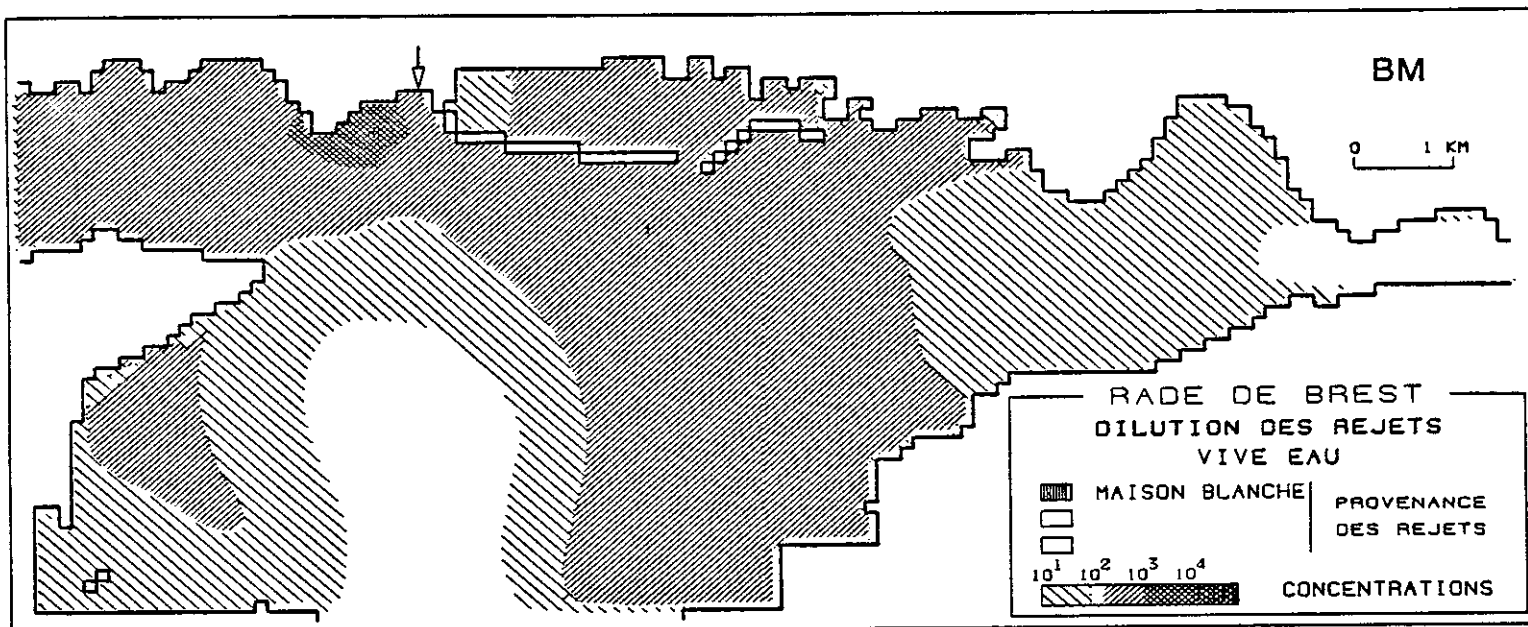
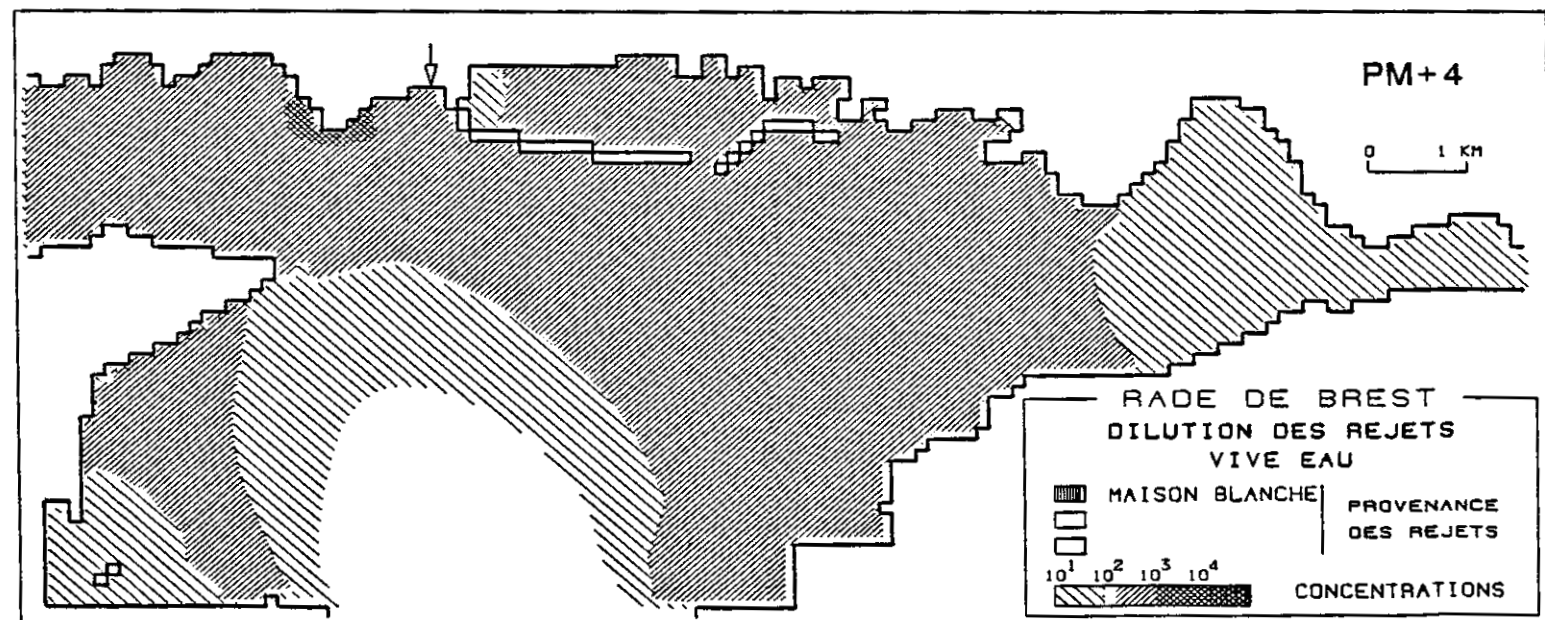
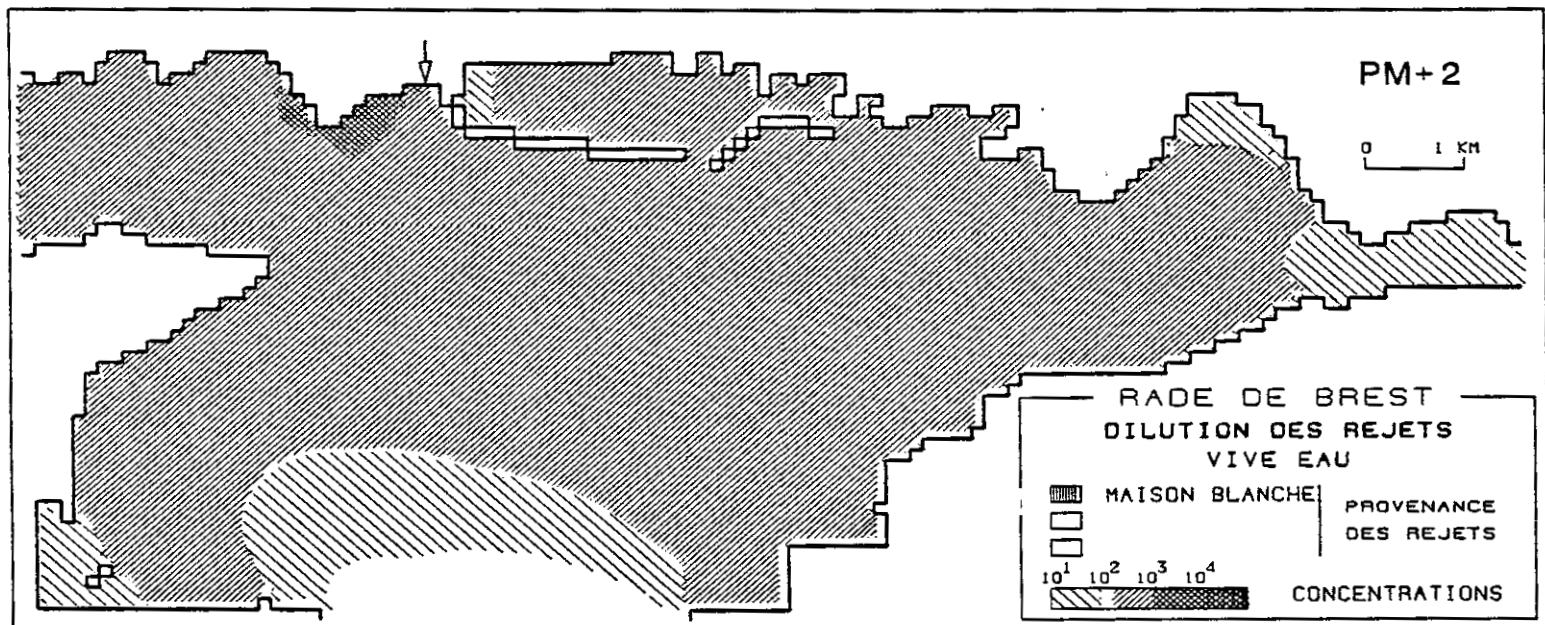
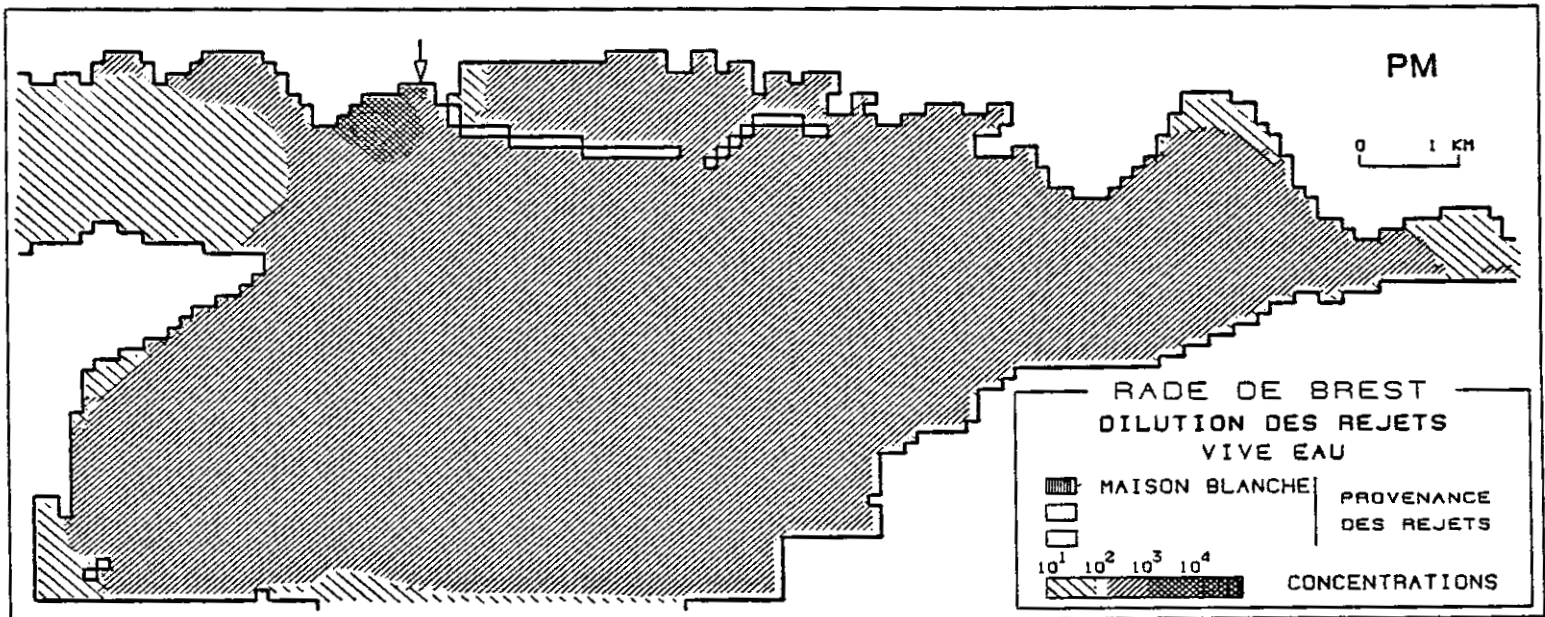


Fig.39 DILUTION DU REJET 'MAISON BLANCHE' VIVE EAU



On observe d'abord l'étalement du panache avec une forte dilution à proximité du rejet, liés au courant très important du goulet. On remarque une contamination de l'anse de Ste Anne au cours du jusant, avec un particulier des fortes concentrations au nord de la pointe du Portzic, probablement rendues persistantes par les contre-courants.

Enfin on note l'infléchissement vers le sud du panache de flot, induit par le tourbillon central de la rade, ce qui évite la contamination du secteur "Elorn aval".

En morte eau, bien évidemment, le rejet Maison Blanche n'atteint pas le secteur conchylicole.

N.B. : Le rejet de Maison Blanche par émissaire sous-marin n'a été traité que dans le cas de grande diffusion. Naturellement cela renforce l'impression d'étalement des panaches.

Pour les autres rejets, les panaches équivalents sont seulement fournis à PM et BM, tandis que la progression au cours de la marée est visionnée à partir d'un calcul à faible dispersion.

IV.4. DILUTION DU REJET RADE ABRI

La dilution du rejet se fait à partir de l'embouchure de la Penfeld. Les figures 40 et 41 montrent que :

- à BM, le panache est "collé" le long de la digue sud de la rade abri et s'étend très loin vers le goulet. Une autre branche, plus étalée, se dirige vers le sud (effet du tourbillon central),

- pendant le flot, alors qu'aucun effluent ne sort de la rade abri, le panache est transporté vers l'est en transitant préférentiellement par le chenal de l'Elorn,

- à PM, on observe une tache isolée plus concentrée au milieu de l'anse du Moulin Blanc, l'eau étant mieux renouvelée plus à l'ouest. De plus on remarque des concentrations assez fortes dans les zones peu profondes et à faible circulation au nord de la presqu'île de Plougastel,

- pendant le jusant, il y a transport vers l'ouest et le sud de ces effluents "anciens" et apparition du rejet par la passe sud de la rade abri. On note que la passe est participe très peu à l'évacuation des rejets de la Penfeld : c'est aussi ce que des mesures in situ ont montré, le courant y étant dirigé vers l'intérieur pendant les 3/4 de la marée.

En morte eau, la simulation indique des allures de panaches très comparables à celles de vive eau, mais plus "ramassées" (fig. 42).

Fig.40 DILUTION DU REJET 'RADE ABRI' VIVE EAU

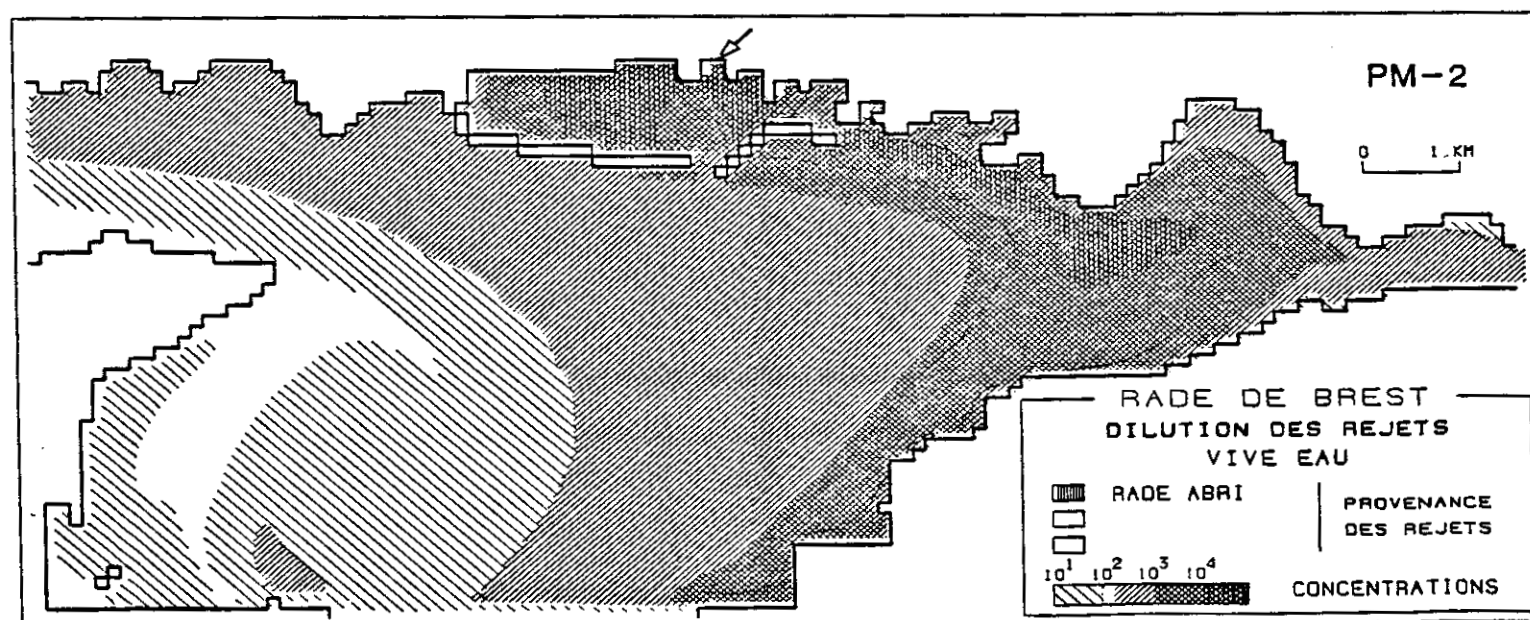
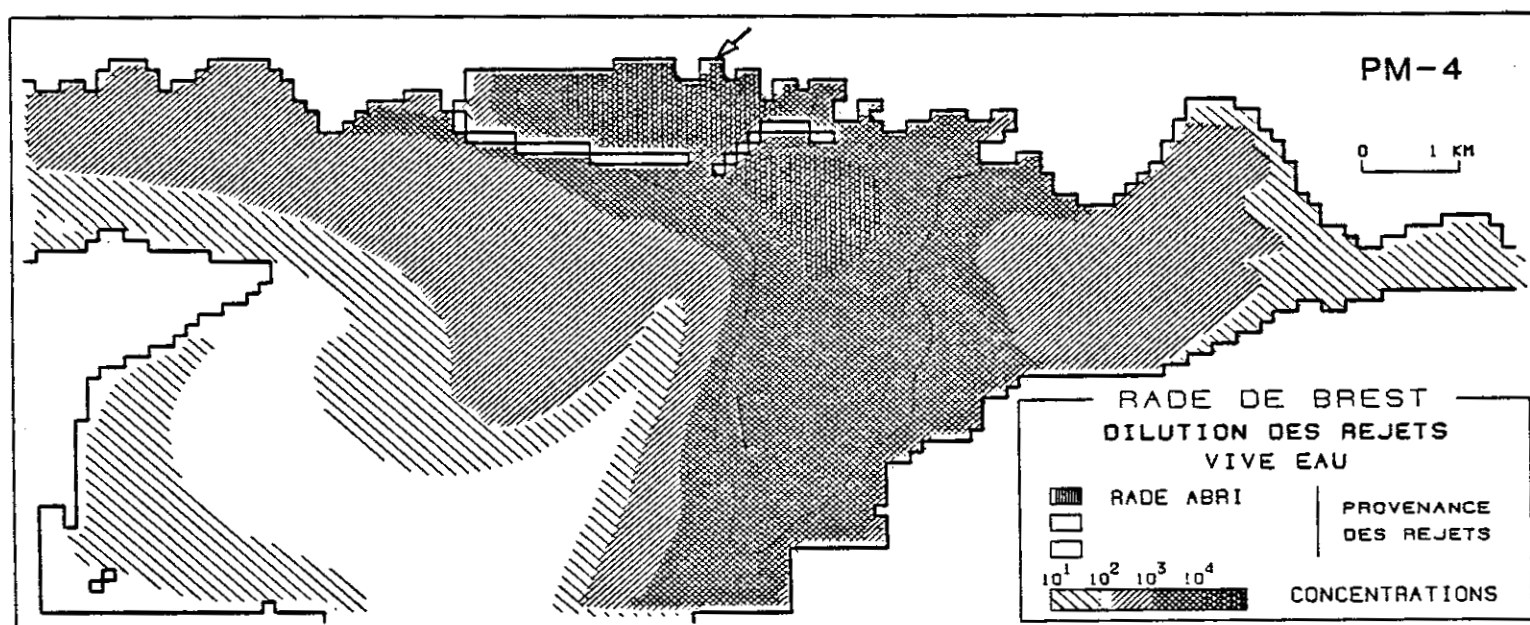
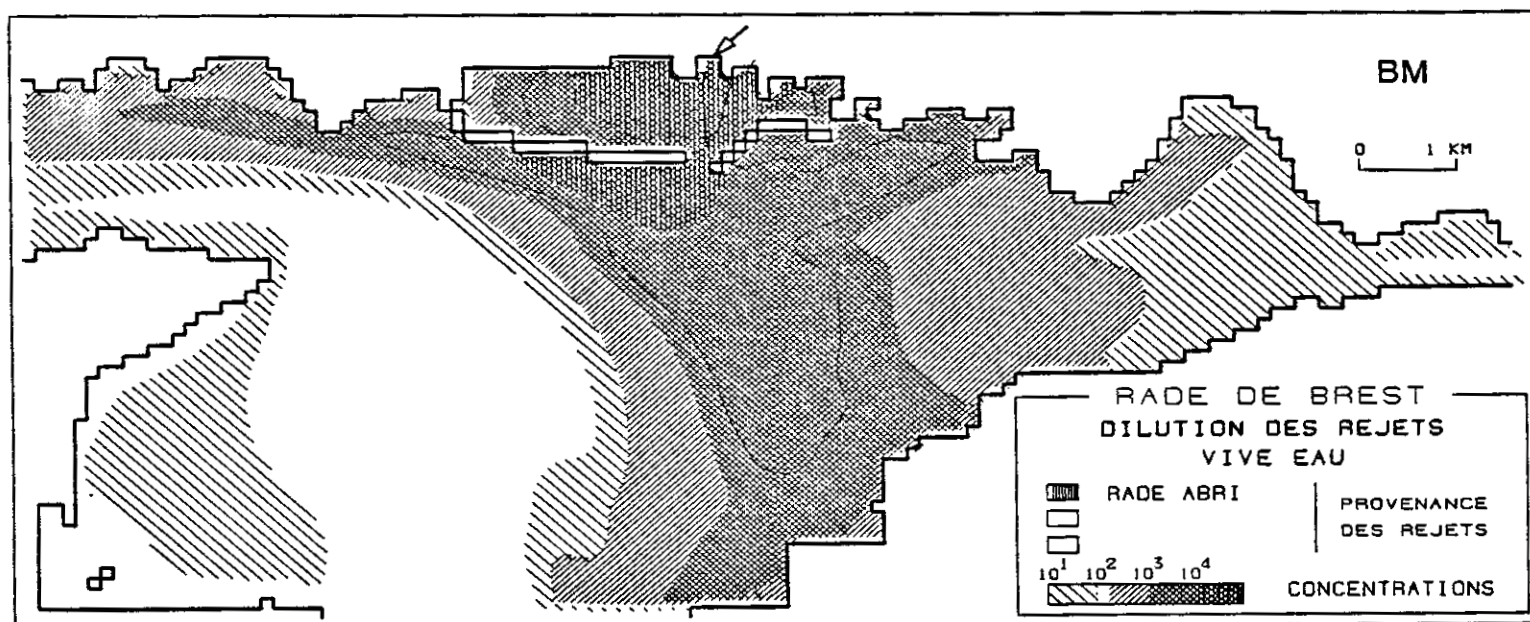


Fig.41 DILUTION DU REJET 'RADE ABRI' VIVE EAU

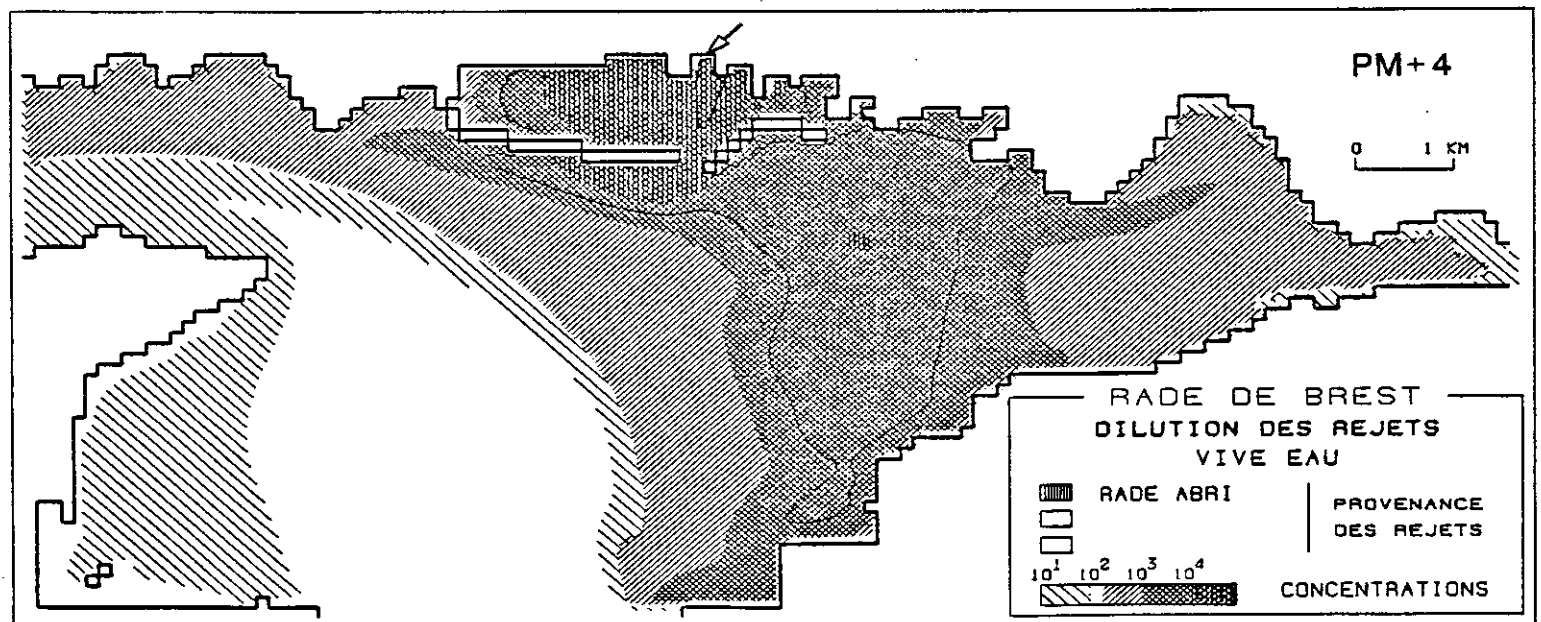
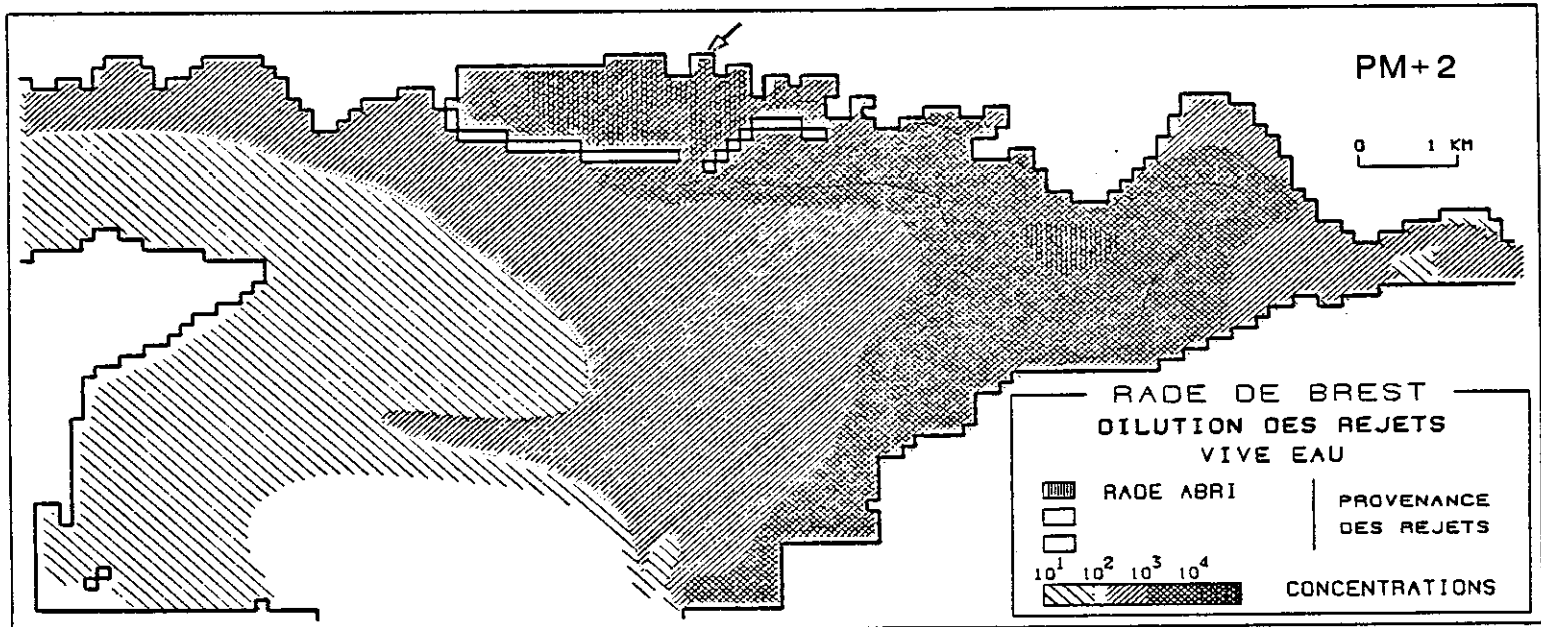
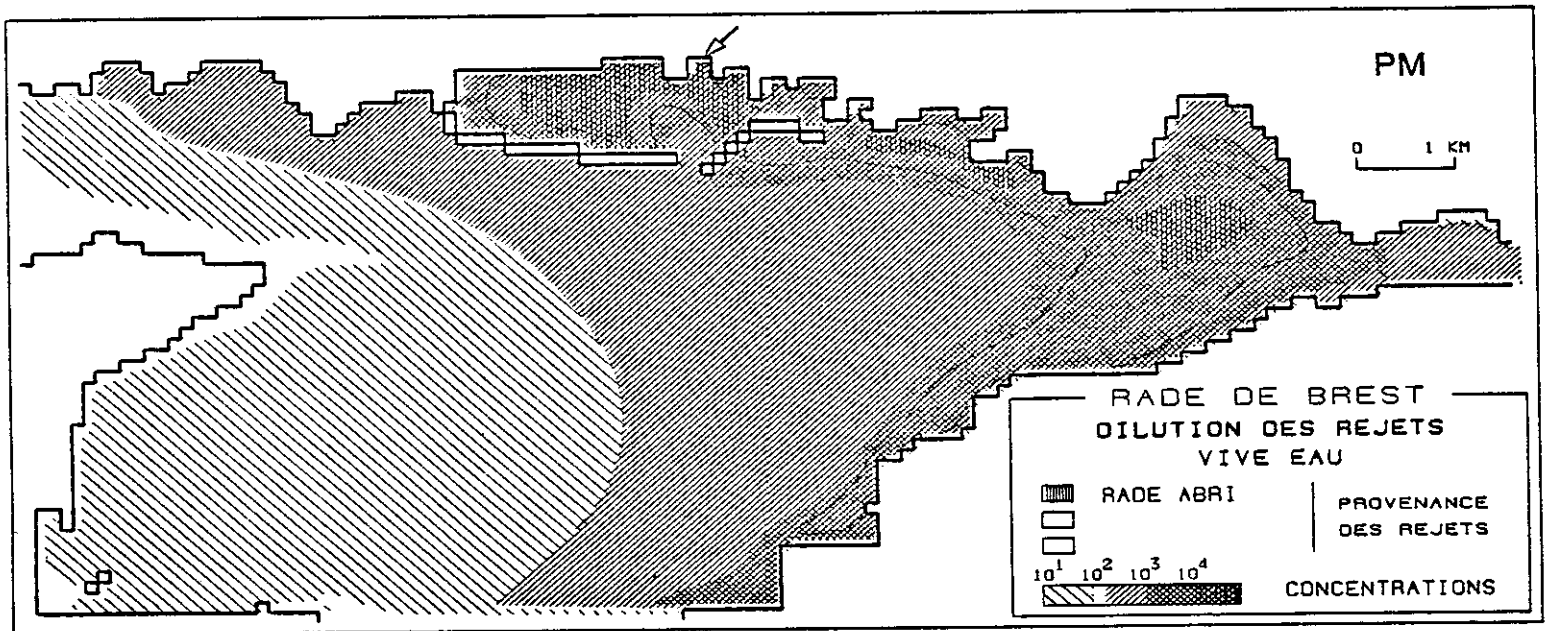
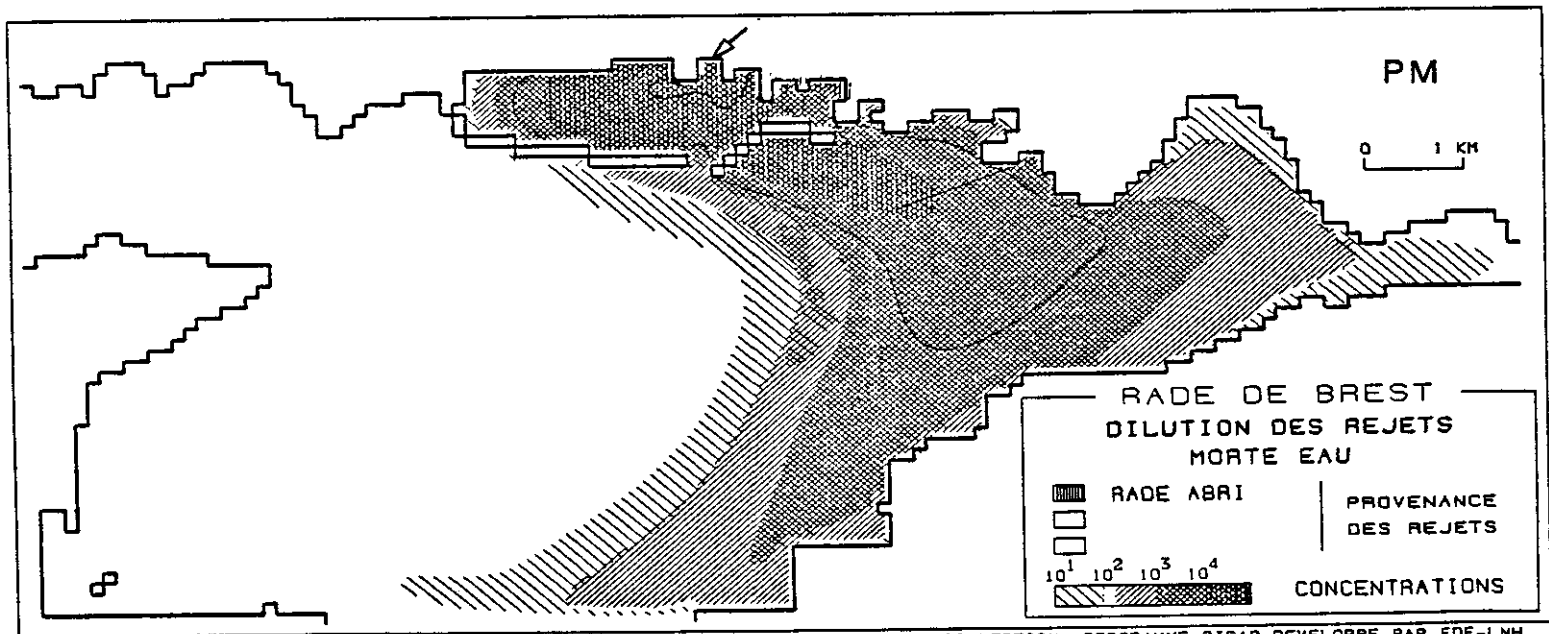
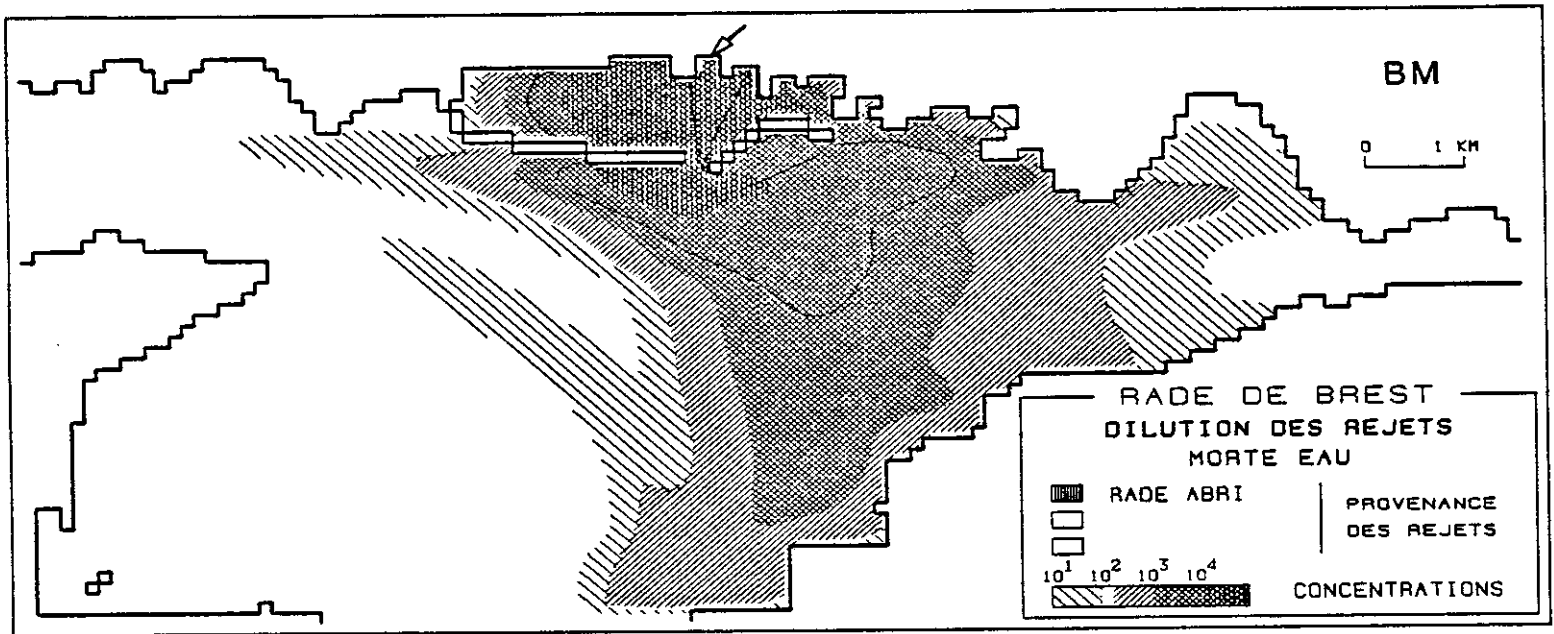


Fig.42 DILUTION DU REJET "RADE ABRI" MORTE EAU



IV.5. DILUTION DU REJET Z.I.P.

L'analogie entre les panaches de dilution de la Z.I.P. et ceux de rade abri, tant en vive eau (fig. 43 et 44) qu'en morte eau (fig. 45) est frappante. Ainsi, on retrouve une contamination du Moulin Blanc au moment de la pleine mer.

Mais les concentrations maximum atteignant le centre du Moulin Blanc sont plus faibles que pour le rejet Rade Abri, pourtant situé plus loin : c'est parce que sitôt évacué par la passe sud, le rejet Rade Abri est confronté à un courant violent qui suit l'axe goulet/Elorn et le transporte rapidement vers le Moulin Blanc. Au contraire, le rejet de la Z.I.P. a lieu dans un secteur assez profond, puisque dragué pour l'accès aux bateaux des quais et formes de radoub, et relativement calme, car à l'écart du chenal de l'Elorn. Les effluents qui s'en éloignent mettront donc plus de temps à dépasser le nouveau terre-plein.

Par ailleurs on remarque une évacuation préférentielle des eaux de ce rejet par la limite sud, le long de la presqu'île de Plougastel.

A titre de comparaison, les schémas de dilution obtenus à PM et BM avec un coefficient de dispersion élevé sont présentés en figure 46 : les formes restent identiques à celles des figures 43 et 44, mais les concentrations en des points "éloignés" (comme le Moulin Blanc) deviennent supérieures. On peut aussi comparer ces panaches à ceux obtenus dans les mêmes conditions pour le rejet Maison Blanche (fig. 38-39) : l'étalement de ce premier rejet reste spectaculaire : cependant les concentrations qu'il induit dans l'Elorn ou le Moulin Blanc sont mineures devant celles venant de la Rade Abri ou de la Z.I.P.

Enfin la figure 47 montre ce que deviennent les panaches de dilution du rejet Z.I.P., en vive eau, si l'effluent se dégrade avec un T90 de 15 heures : la réduction de concentration est considérable. Mais le Moulin Blanc reste une zone "accessible" par le rejet au moment de la pleine mer (avec une réduction de 2 "unités log" (\approx facteur 100) par rapport aux concentrations d'un effluent conservatif).

IV.6. DILUTION DU REJET MOULIN BLANC

Les formes prises par le panache du rejet du Vallon du Stangalarc'h sont particulièrement complexes.

- A BM, les fortes concentrations sont à l'ouest du rejet, de part et d'autre du nouveau terre plein de la Z.I.P.

- Au cours du flot, l'ensemble se déplace vers l'est mais une partie des effluents s'évacue vers le sud le long de la presqu'île de Plougastel.

Fig.43 DILUTION DU REJET 'Z.I.P.' VIVE EAU

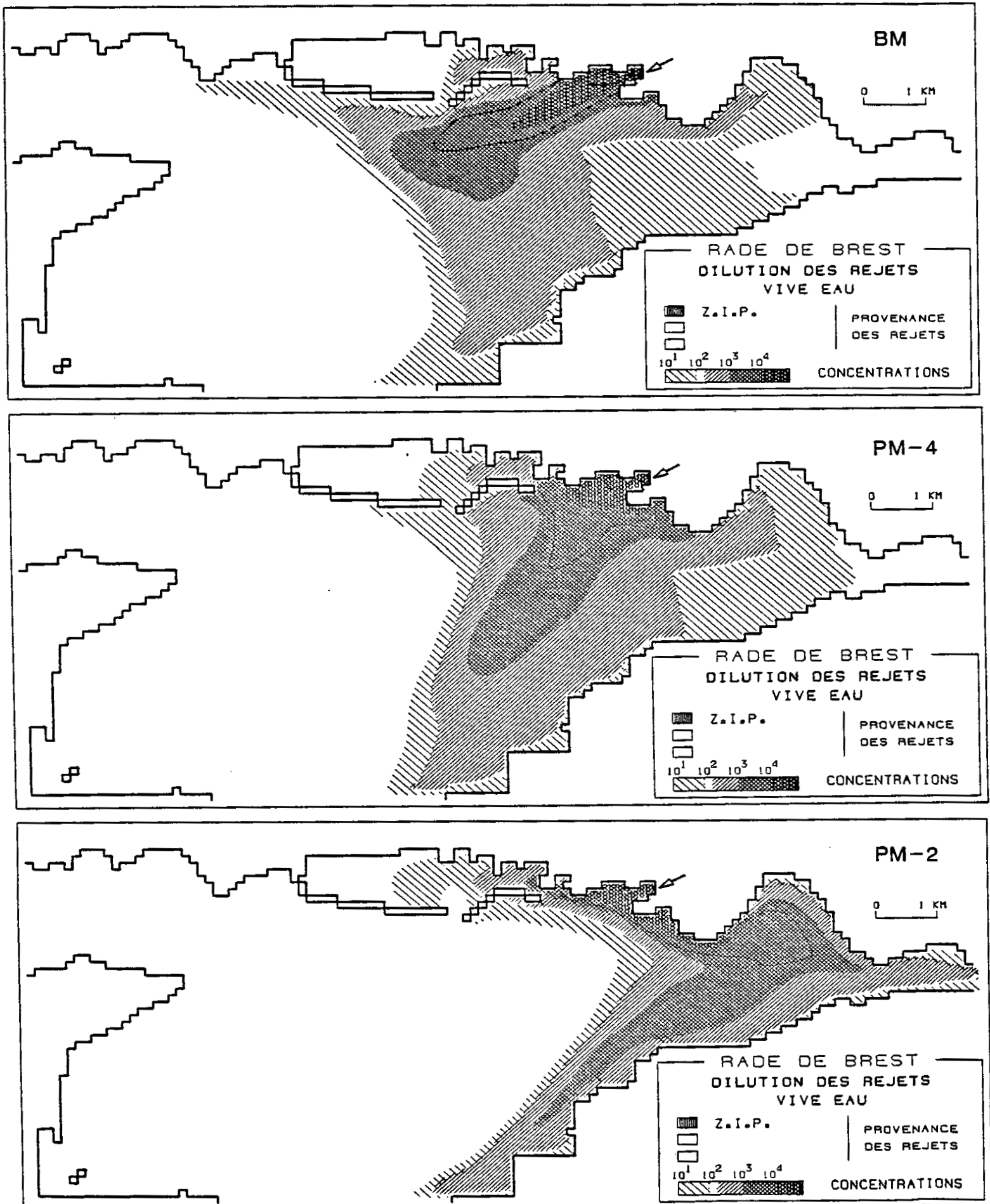


Fig.44 DILUTION DU REJET "Z.I.P." VIVE EAU

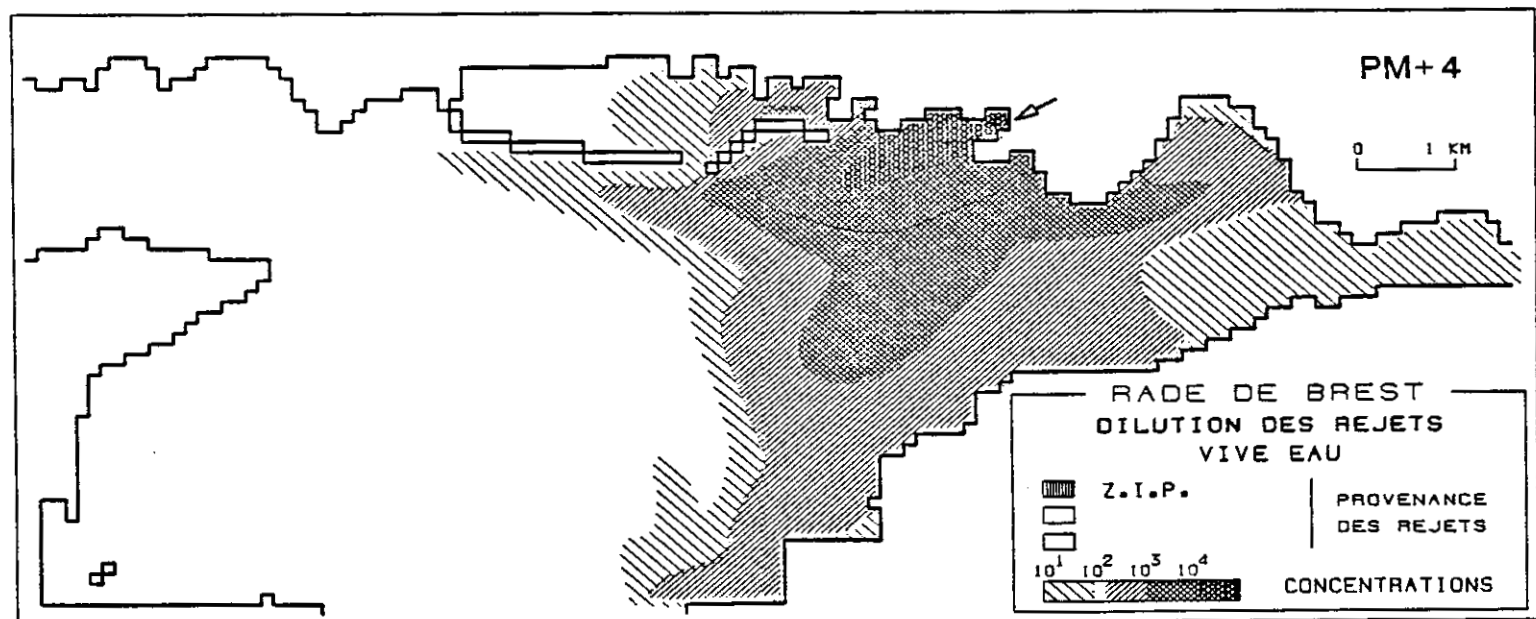
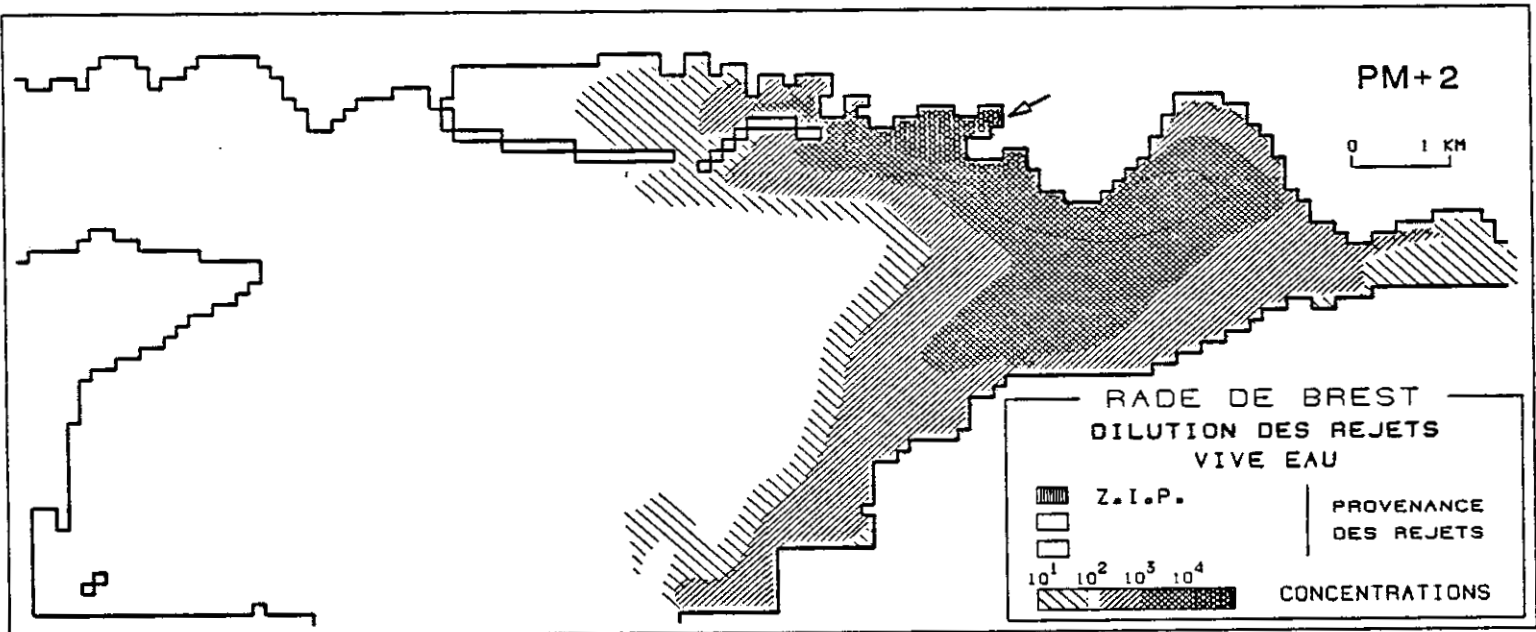
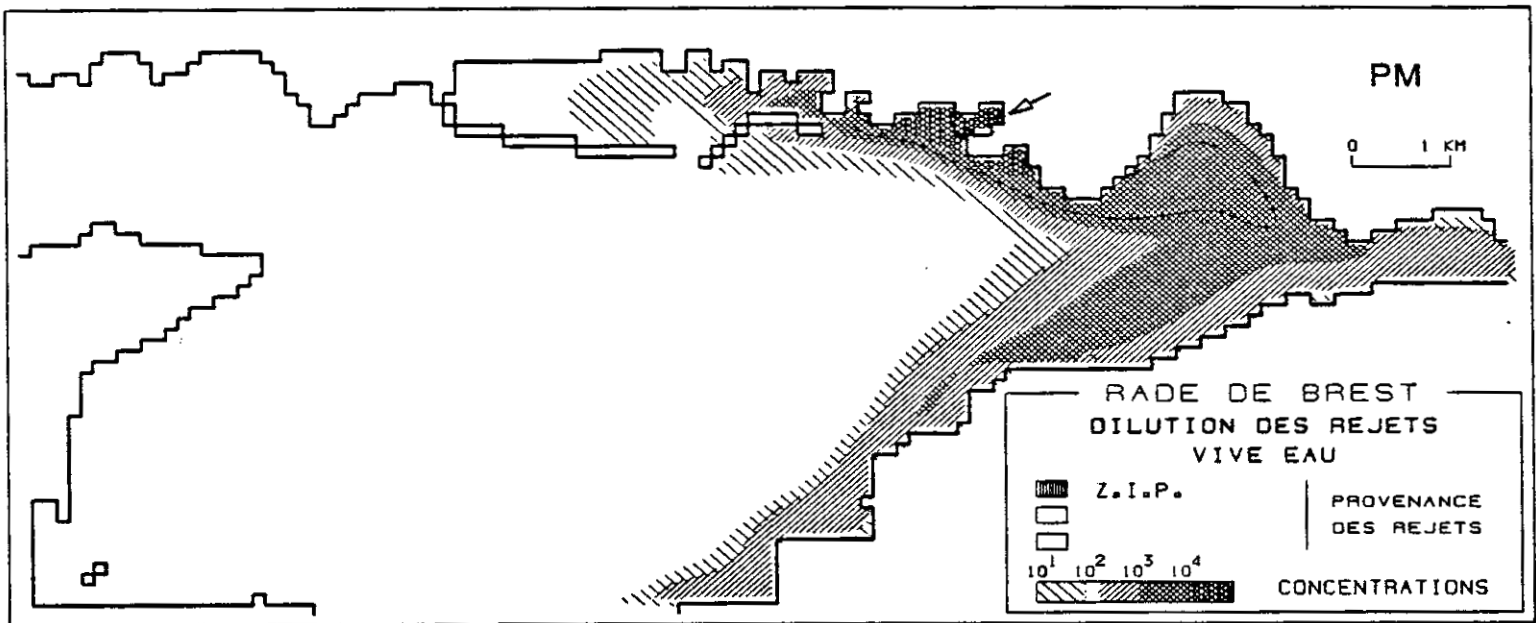


Fig.45 DILUTION DU REJET 'Z.I.P.' MORTE EAU

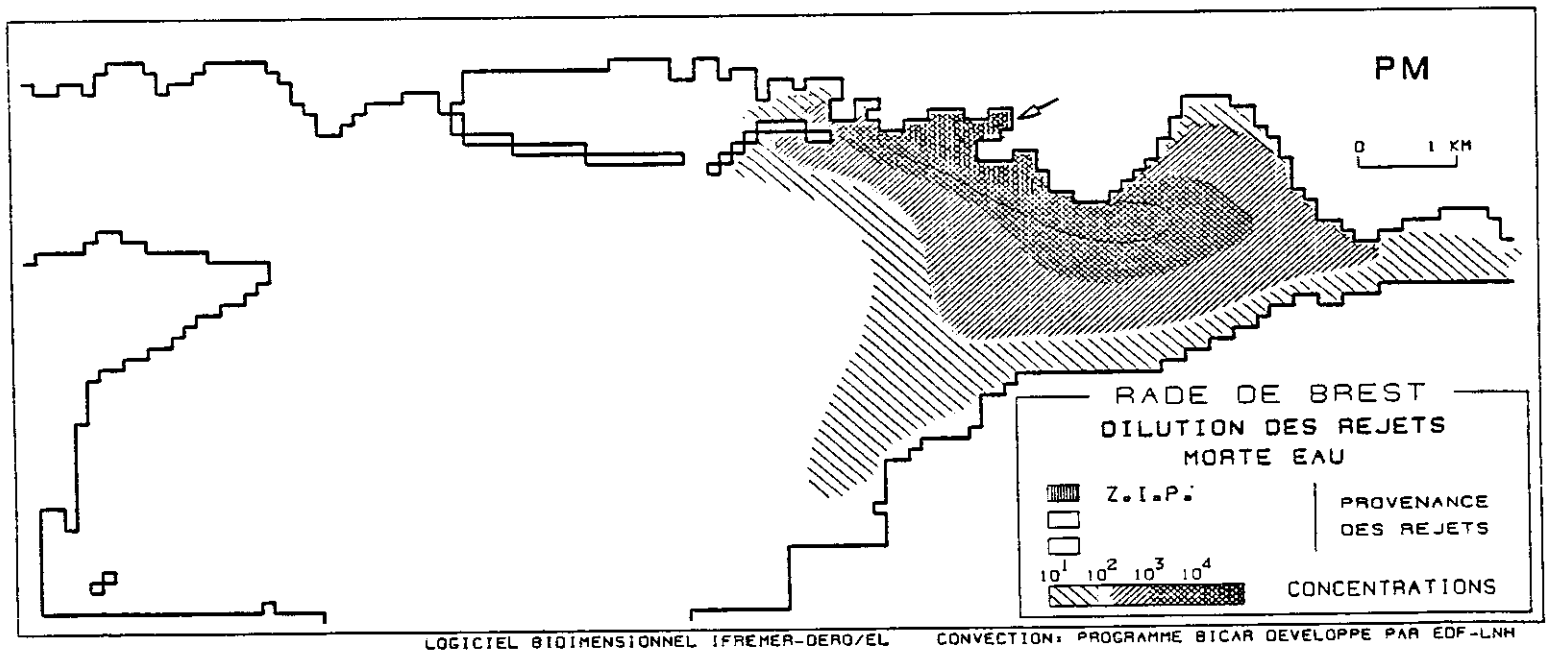
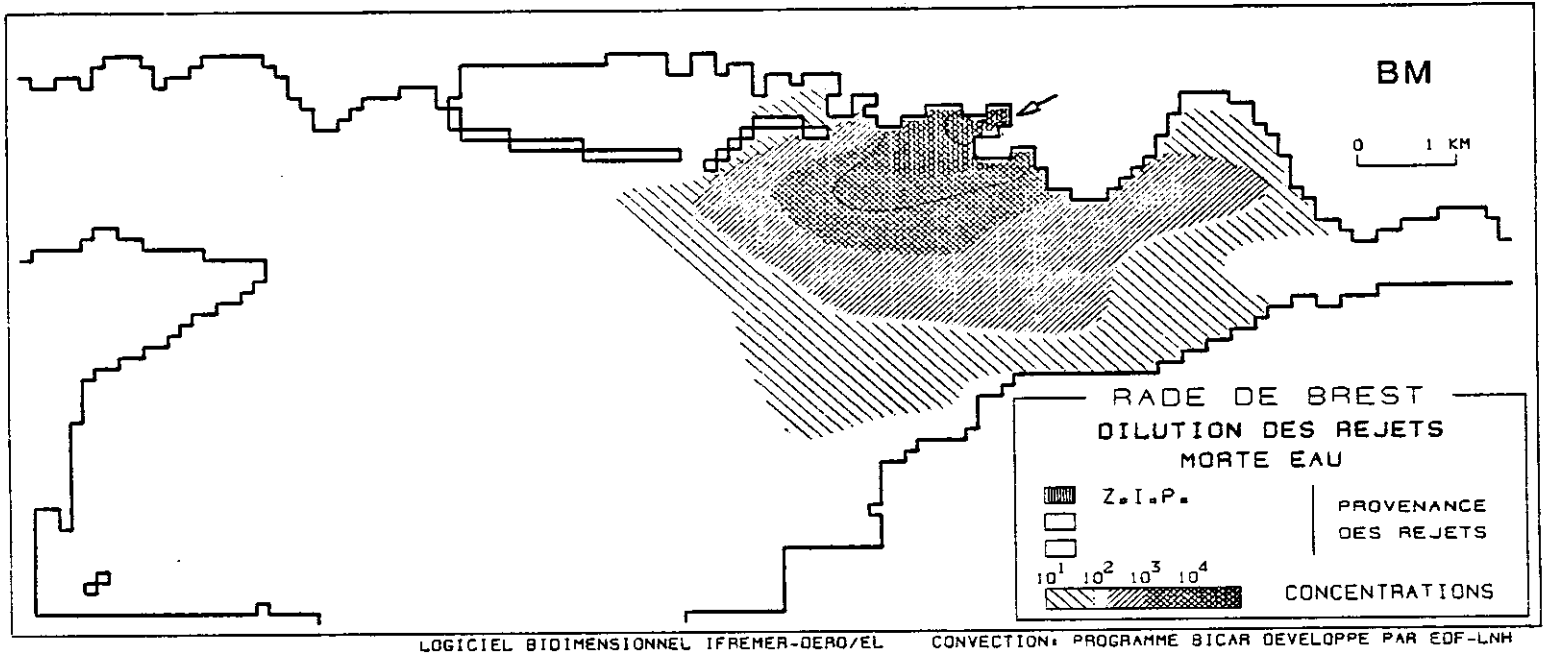


Fig.46 DILUTION DU REJET "Z.I.P." VIVE EAU
dispersion multipliée par 20

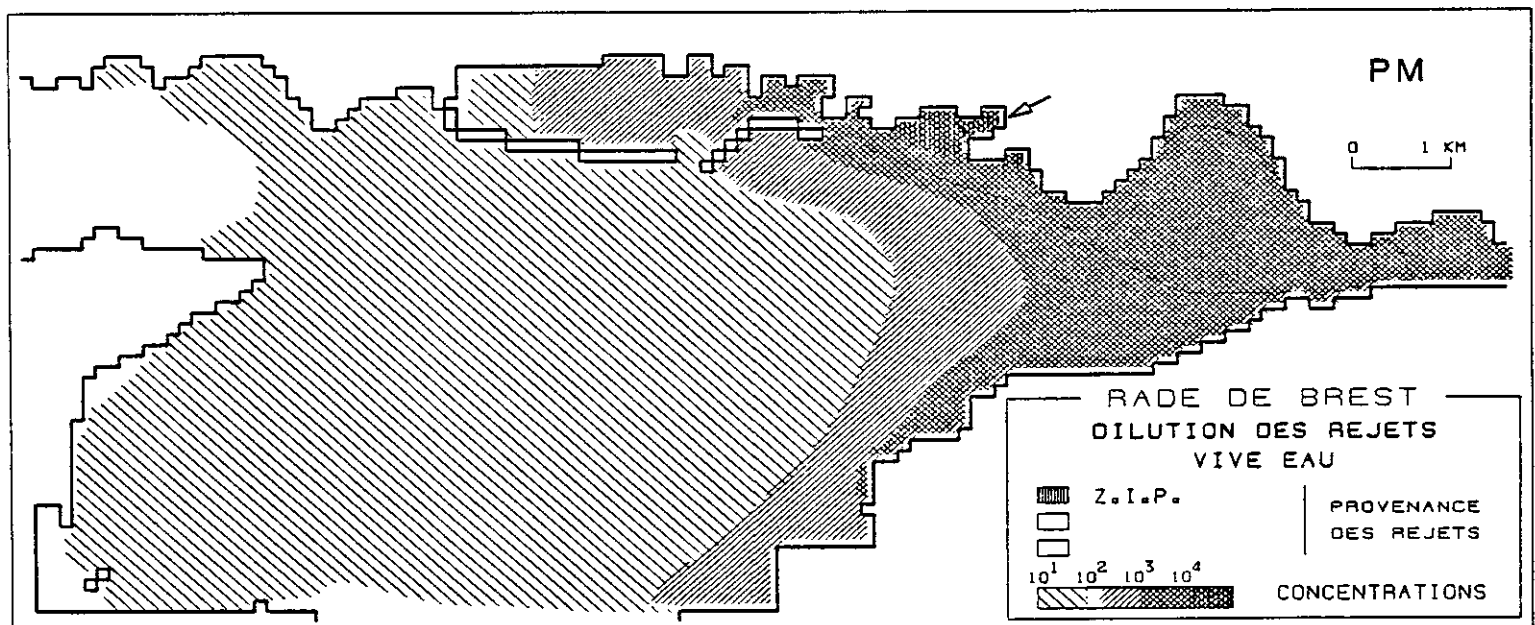
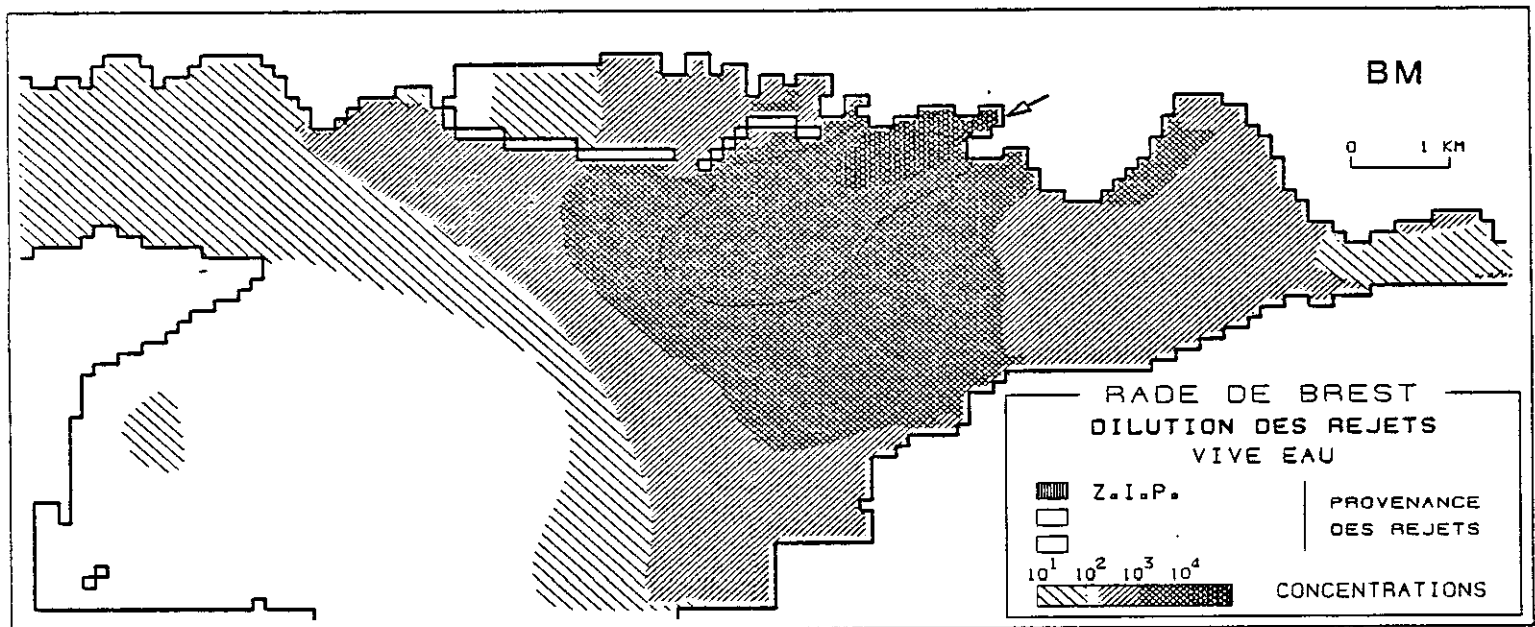


Fig.47 DILUTION DU REJET "Z.I.P." VIVE EAU
effluent dégradable (T90 = 15 heures)

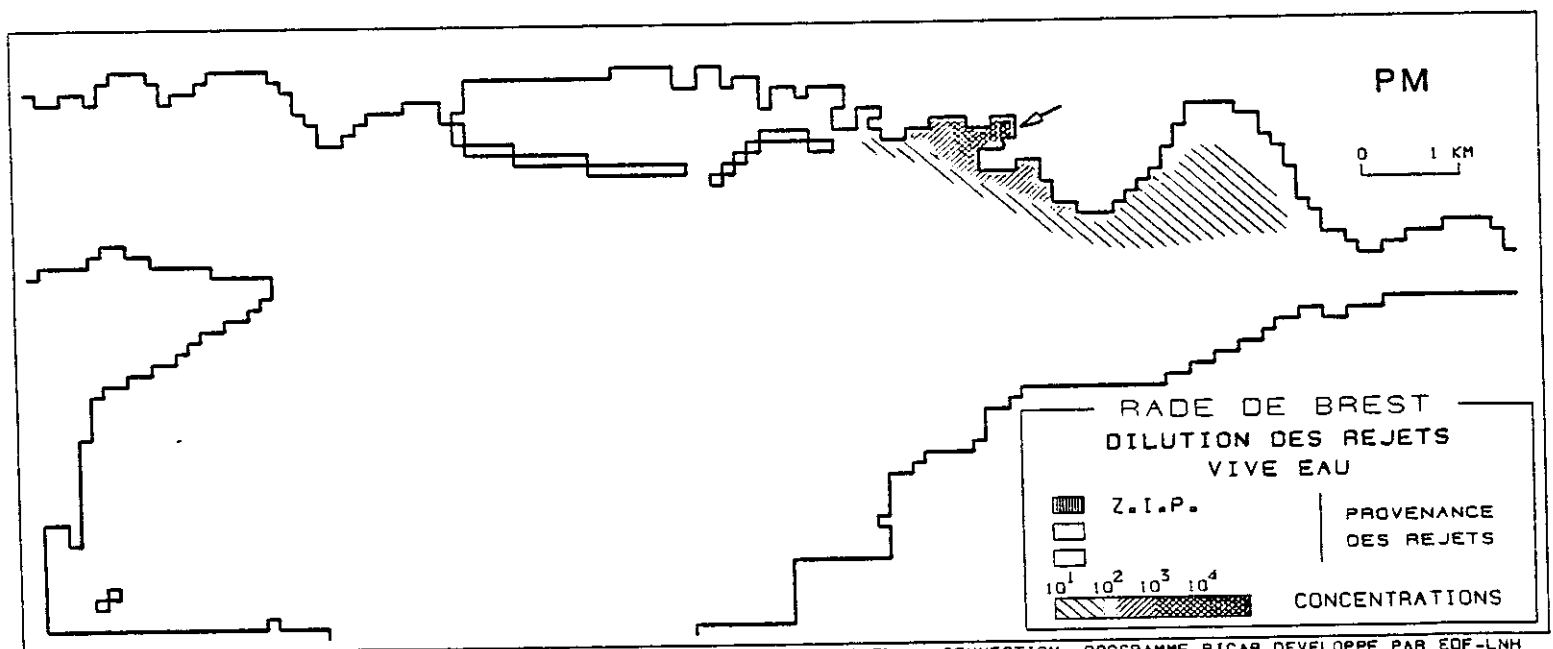
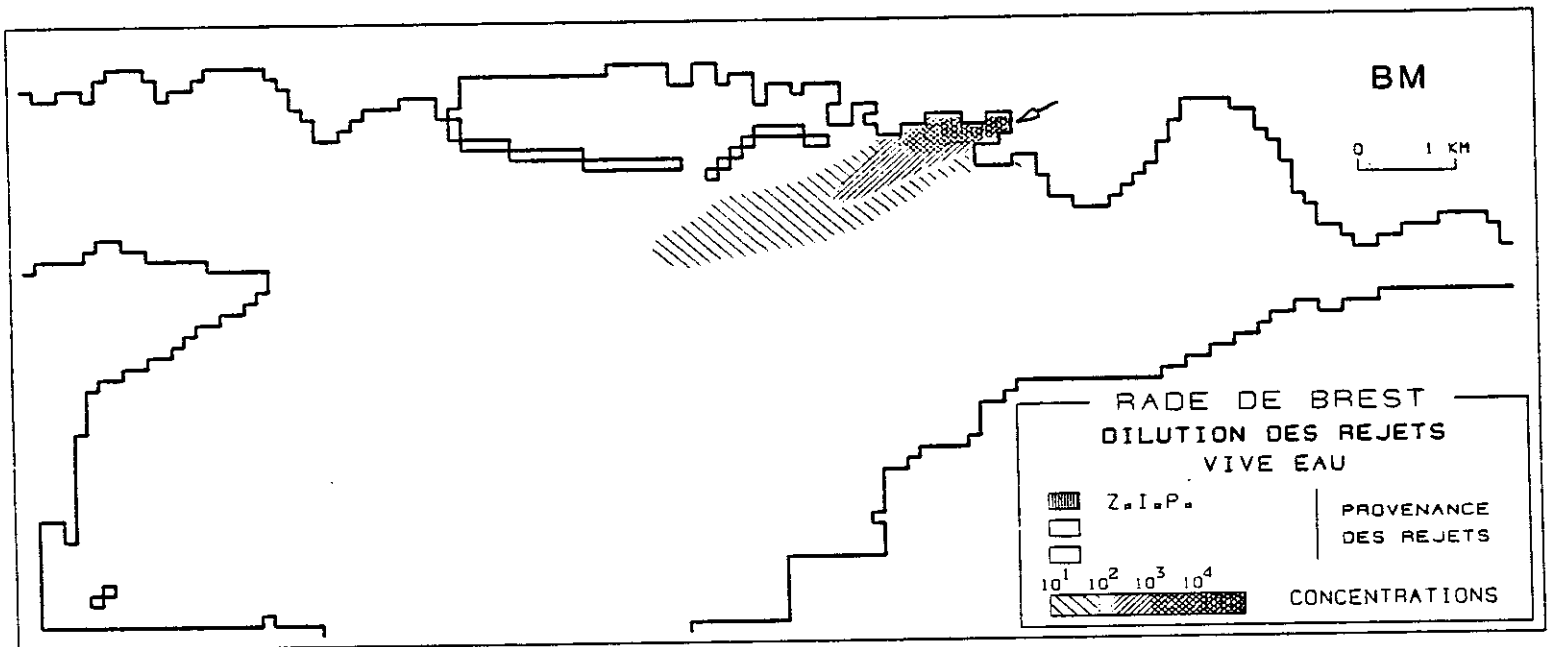


Fig.48 DILUTION DU REJET "MOULIN BLANC" VIVE EAU

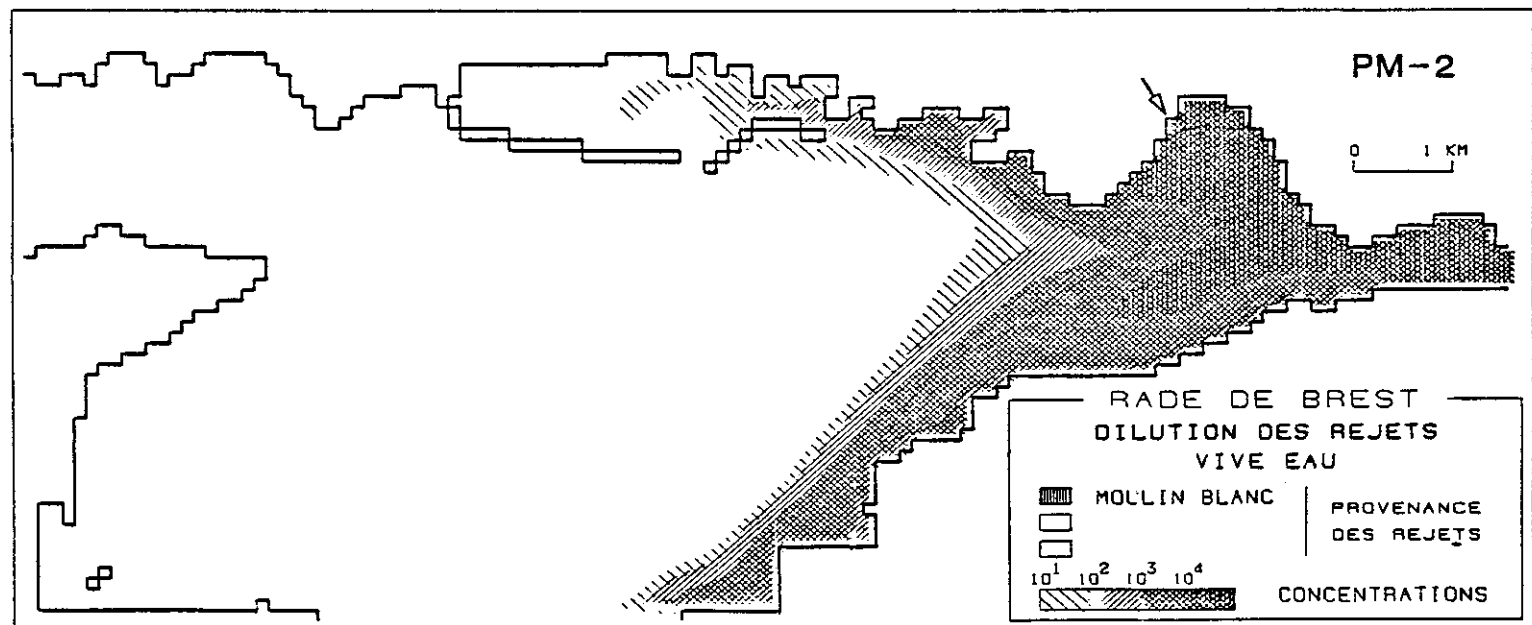
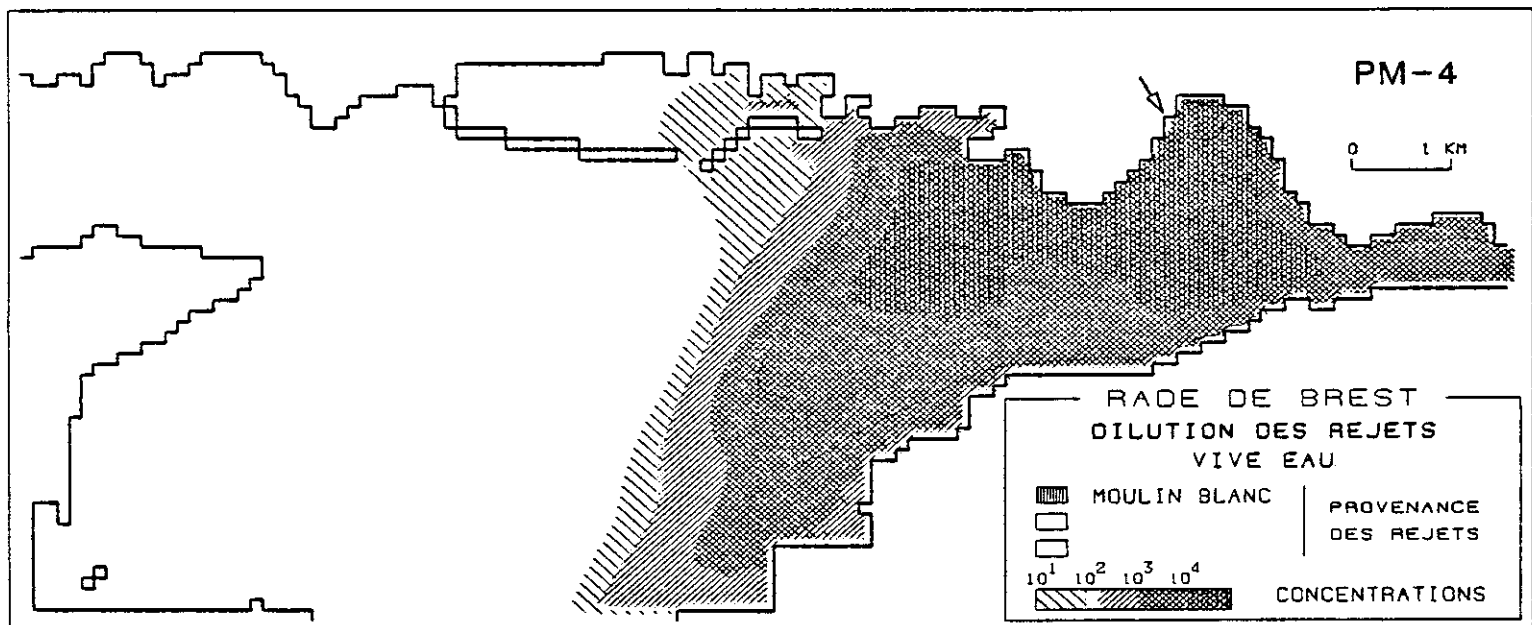
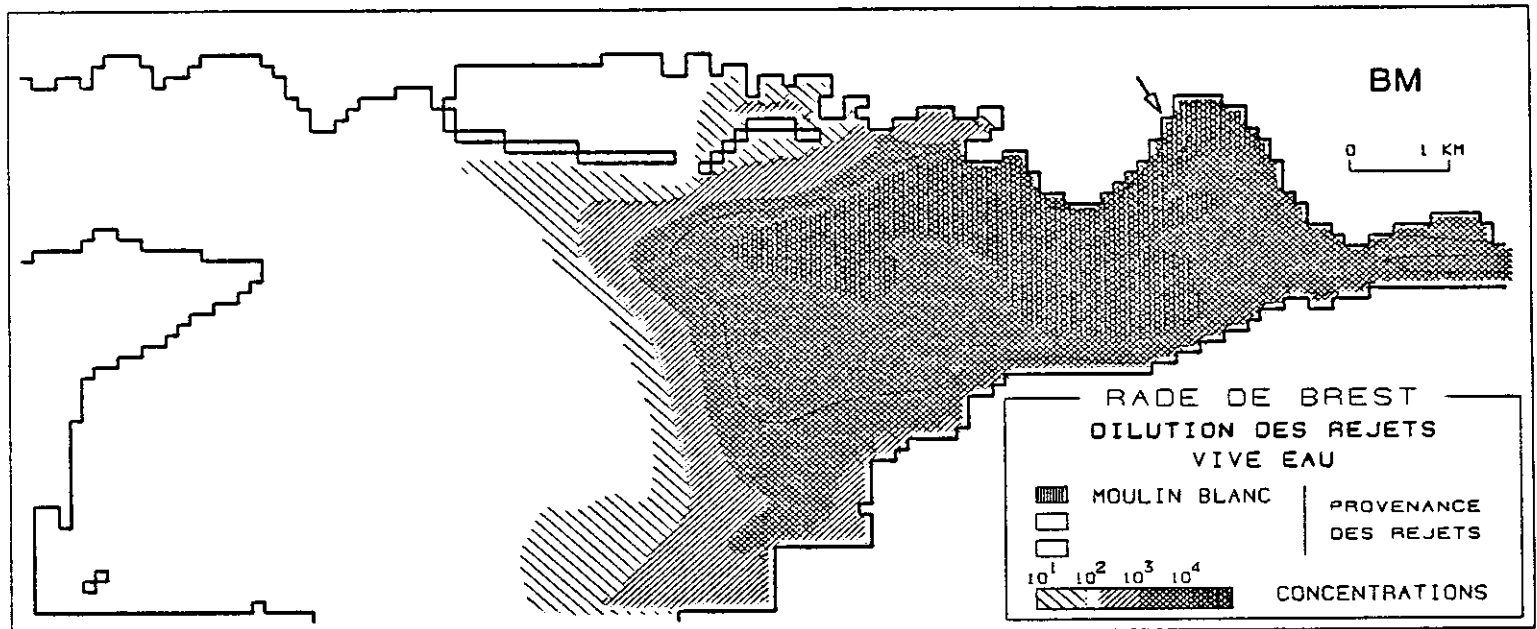
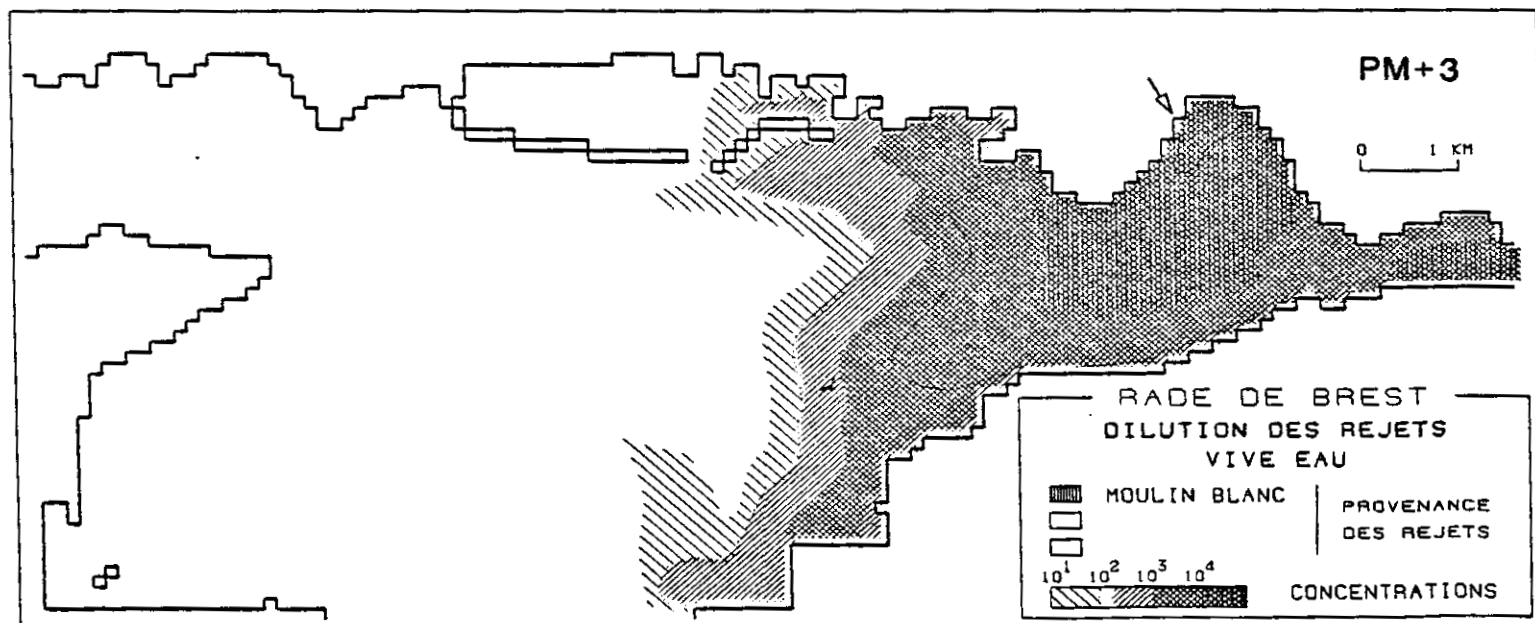
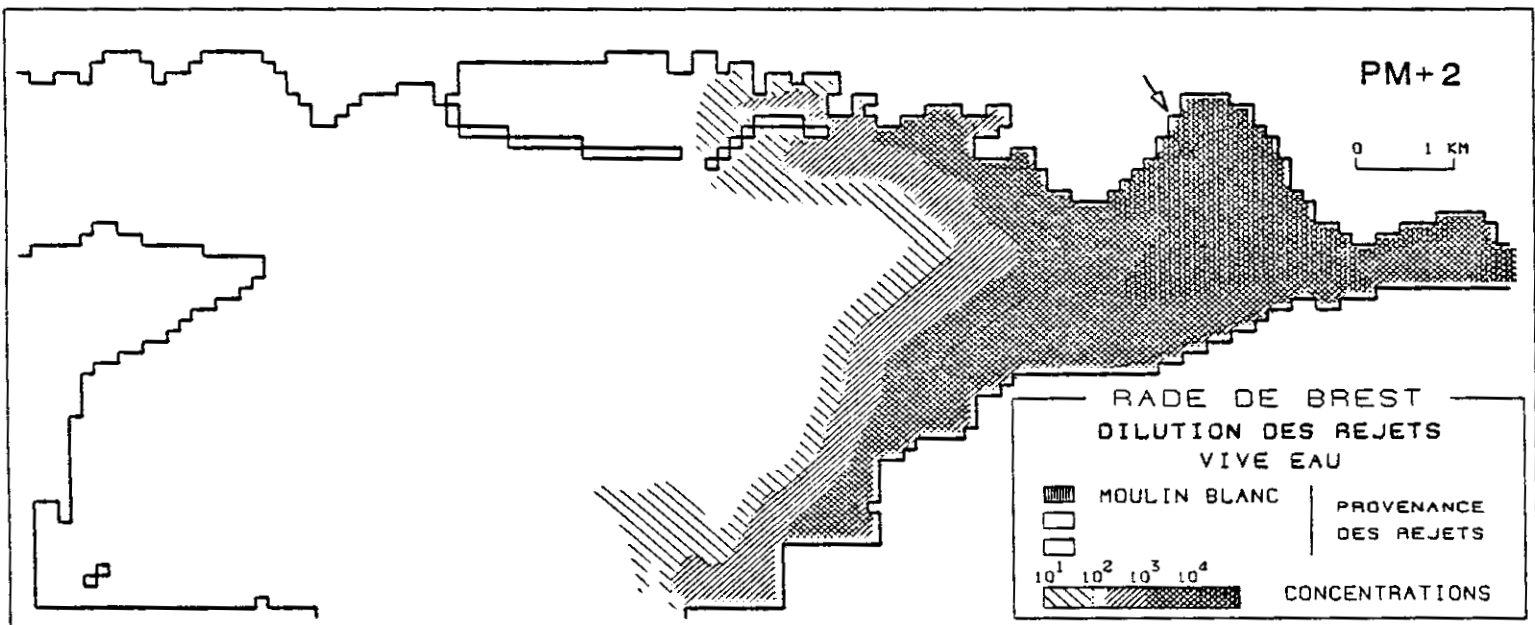
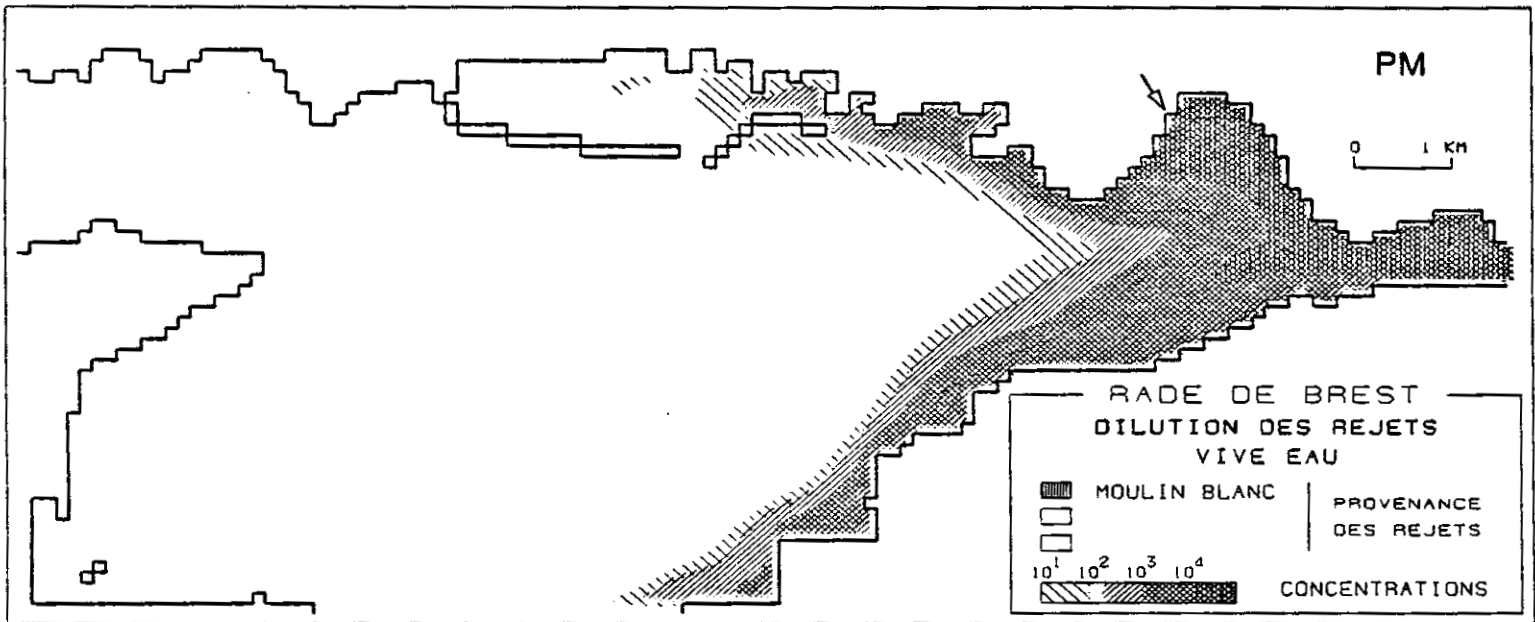


Fig.49 DILUTION DU REJET 'MOULIN BLANC' VIVE EAU



- En fin de flot et à PM, on observe un meilleur renouvellement de l'eau dans le chenal de l'Elorn, et un blocage d'une partie du panache dans la zone portuaire.

- Au cours du jusant une "anomalie" apparaît dans l'estuaire de l'Elorn : l'anse de Kerhuon voit la concentration diminuer puis augmenter à nouveau jusqu'au minimum de B.M. Le phénomène est tout à fait évident sur la figure 50 ci-dessous qui montre l'évolution pendant 24 heures, aux points P et Q, des concentrations en provenance du Moulin Blanc (position des points : fig. 37).

Fig.50 MODELES ELORN/Rade de BREST

DILUTION DU REJET "MOULIN BLANC"

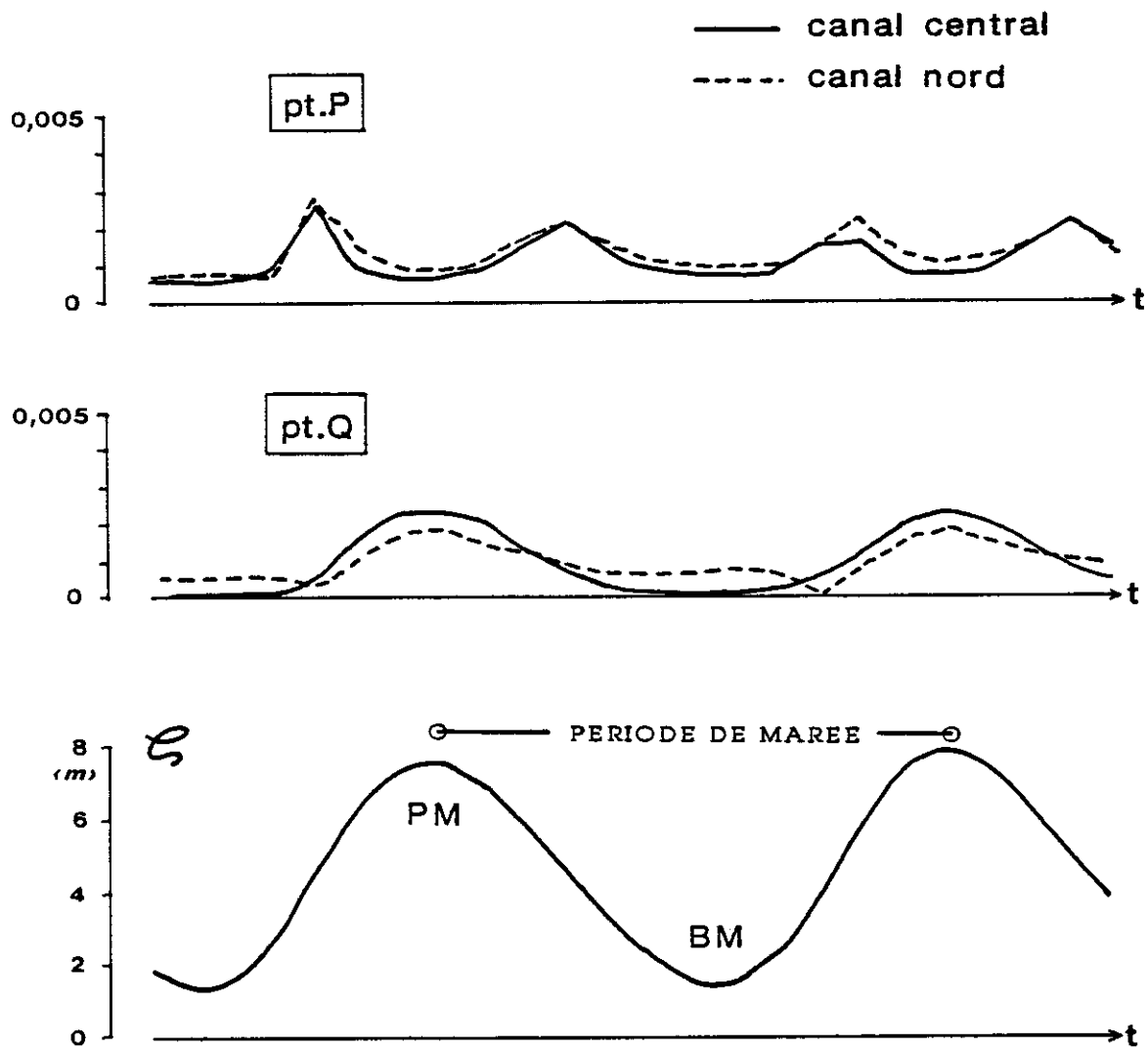


Fig.51 DILUTION DU REJET "MOULIN BLANC" MORTE EAU

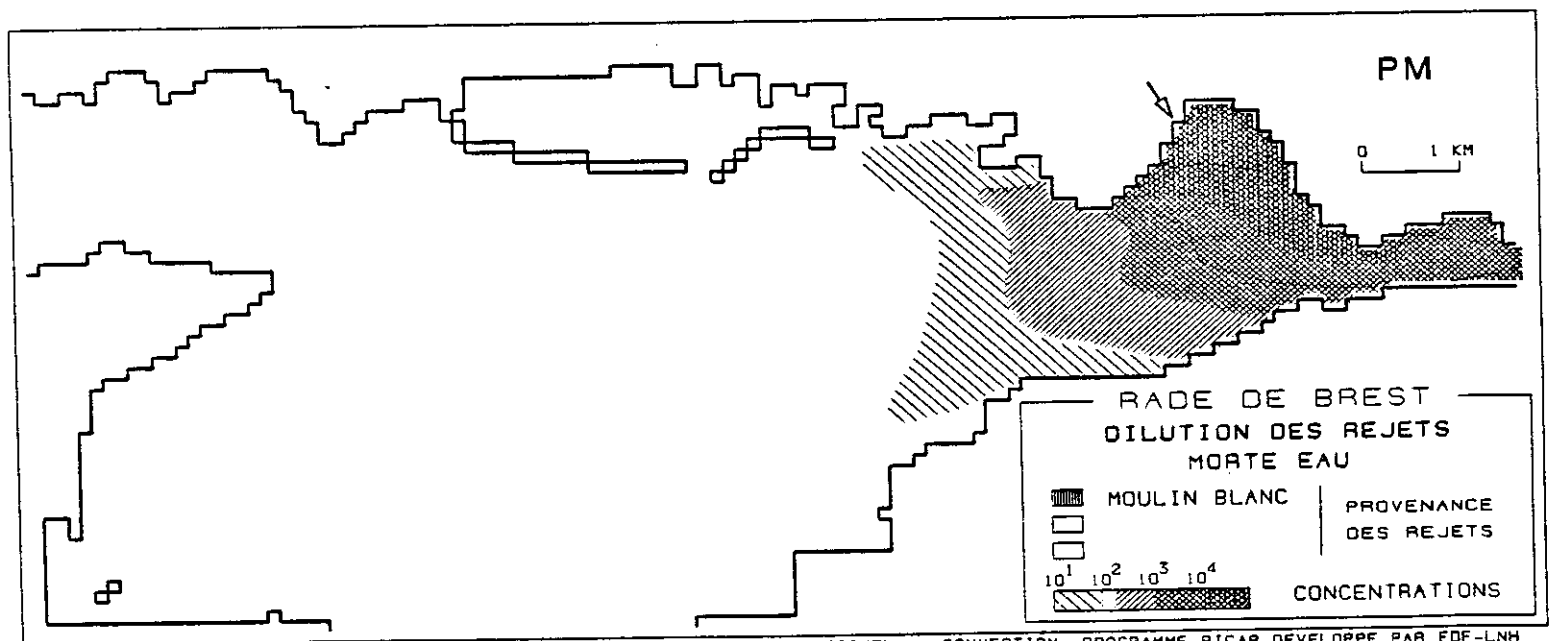
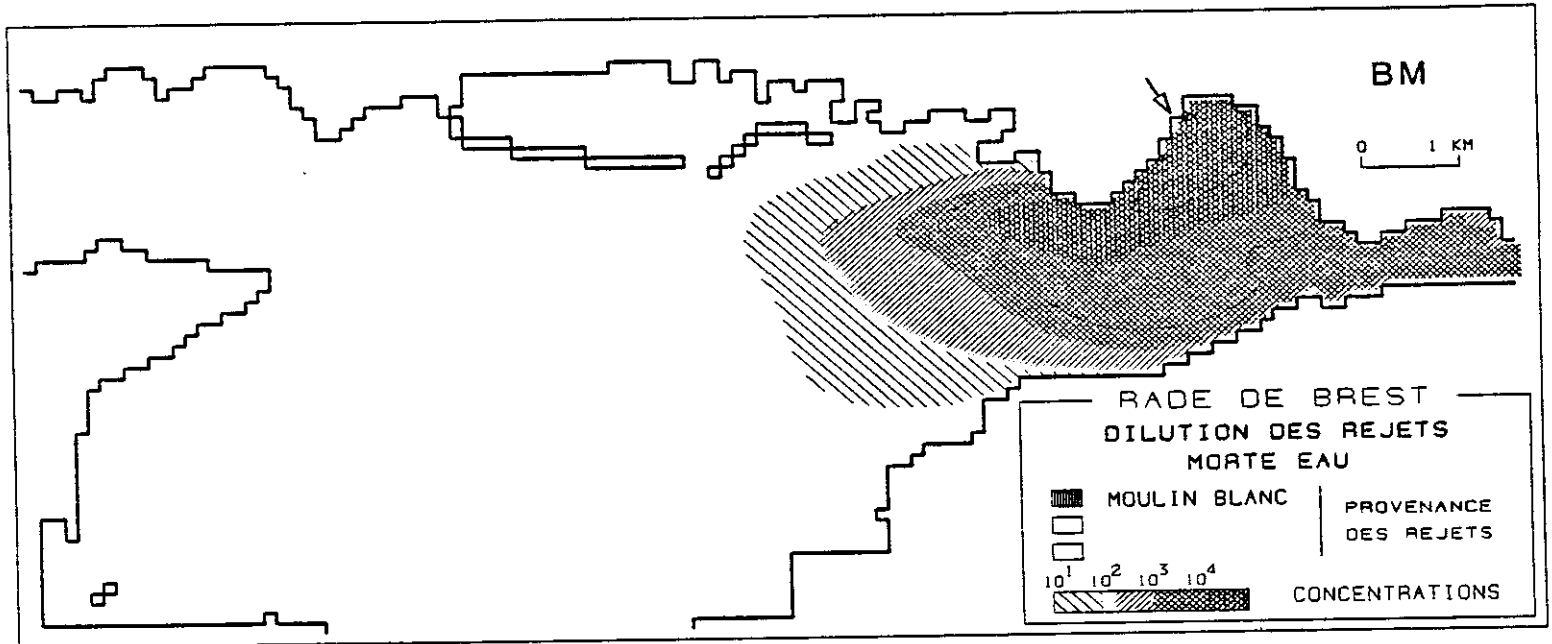
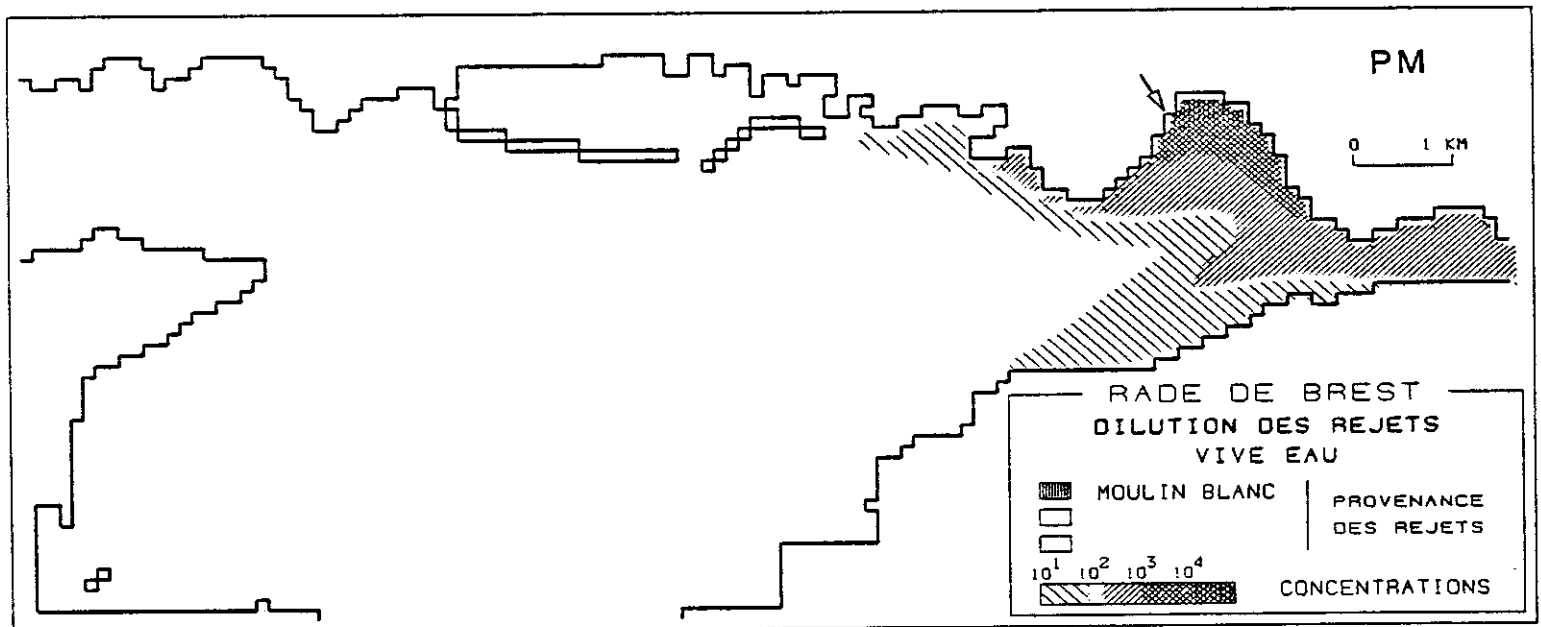
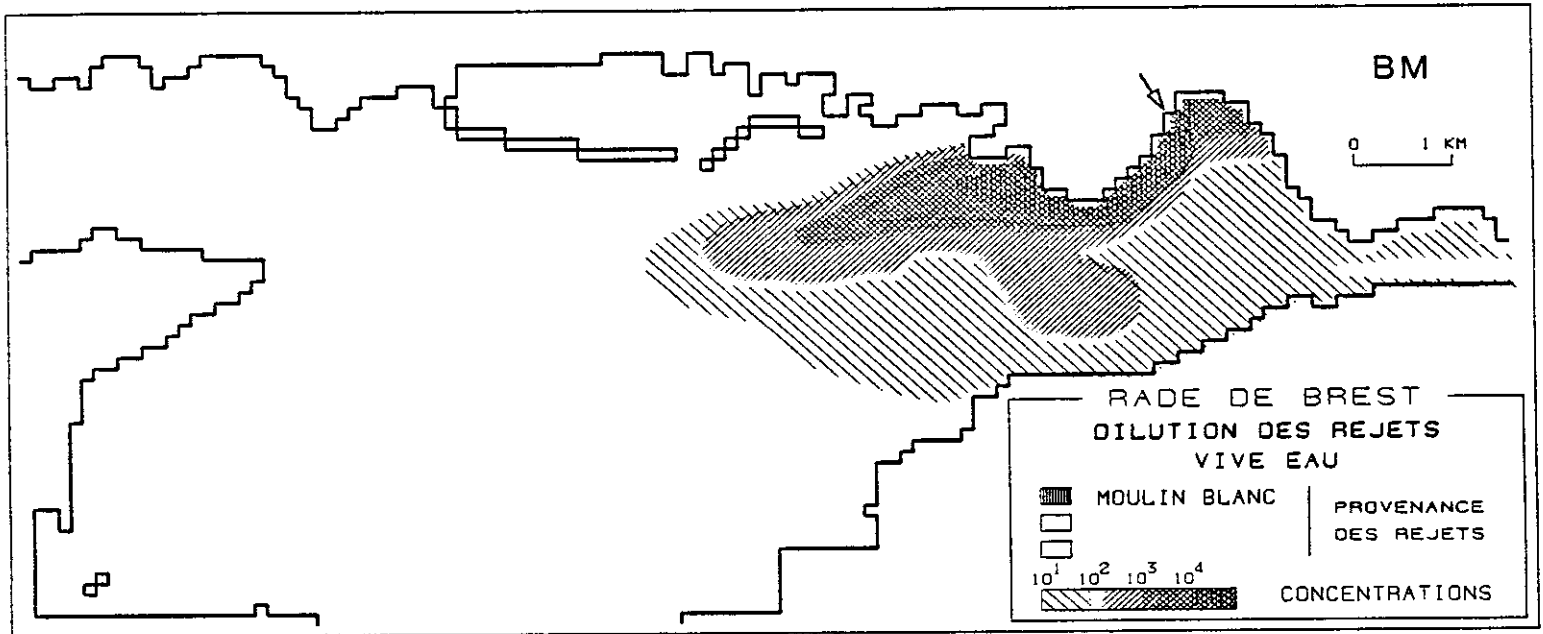


Fig.52 DILUTION DU REJET 'MOULIN BLANC' VIVE EAU
effluent dégradable (T90 = 15 heures)



A mi-flot, le point P voit passer une pointe de concentration qui arrive tout juste en Q à PM. Puis ce maximum de concentration redescend l'estuaire et provoque à nouveau une pointe en P pendant le jusant. Ce maximum à mi-flot provient du rejet du Moulin Blanc qui a eu lieu à BM, dans très peu de hauteur d'eau, donc sous forme concentrée. Ensuite, malgré la continuité du flux rejeté et du courant de flot, la hauteur d'eau au point de rejet augmente et les concentrations diminuent (mais si le panache devait rester préférentiellement en surface, le phénomène serait moins marqué).

Enfin, on remarque que si la concentration est maximale en rive Nord au point P (i.e du côté du rejet), en Q c'est le contraire, car la "pointe" n'a pas eu le temps de transiter jusque là par la rive Nord, les courants y étant plus faibles.

Ainsi le modèle met en évidence des phénomènes difficiles à prévoir et dont l'origine physique est très simple.

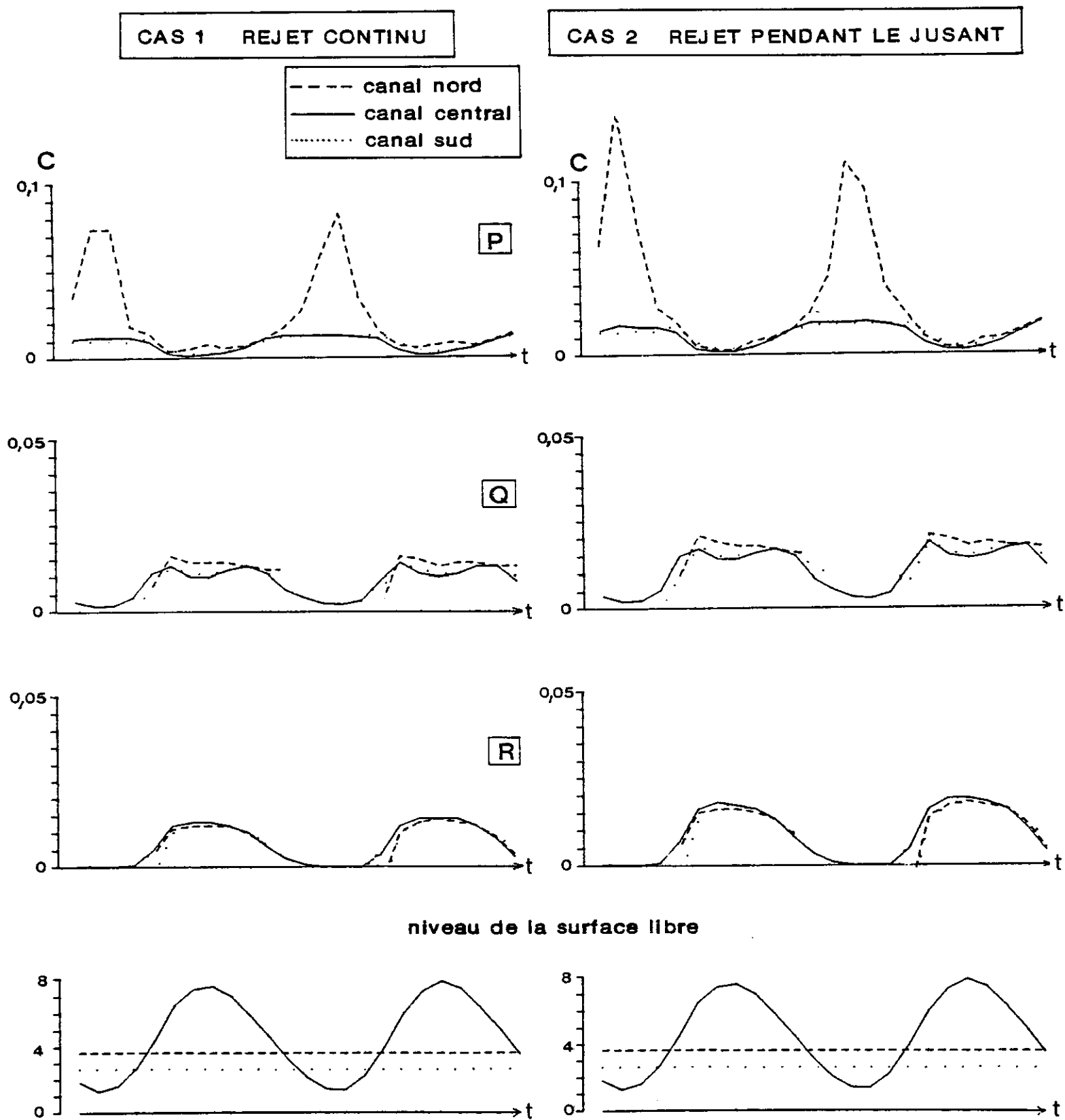
Pas de surprise, en ce qui concerne la dilution du rejet Moulin Blanc en morte eau, où l'on n'observe plus qu'un balancement est/ouest du panache entre flot et jusant (fig. 51). A PM, l'effet de stockage de fortes concentrations sur la rive nord de la commune de Plougastel n'existe plus, le gradient de vitesse au sud du chenal de l'Elorn étant considérablement réduit. On remarquera aussi le confinement du panache dans l'angle nord-est de l'aire d'étude, donc l'apparente faiblesse de l'évacuation des effluents par les limites sud ou ouest. On en déduit qu'en morte eau le régime d'équilibre n'est probablement pas atteint, malgré une durée de simulation de l'ordre de 5 jours.

En figure 52 sont présentés les panaches de PM et BM de vive eau pour un effluent dégradable ($T_{90} = 15$ h). Les secteurs les plus contaminés sont alors les zones accessibles de la première marée, et plus particulièrement le littoral nord (plage du Moulin Blanc et terre plein de la Z.I.P.). Sur les bancs de Keraliou ou dans l'Elorn, l'abattement de concentration représente près de 2 "unités log".

IV.7. DILUTION DU REJET KERHUON

Avant d'examiner la dilution du rejet Kerhuon en rade, il est intéressant de rechercher l'effet de stockage de l'effluent par l'étang de Kerhuon. La figure 53 permet la comparaison entre les concentrations aux points P, Q et R pour un rejet continu (cas 1) ou pour un rejet pendant le jusant seulement (cas 2). Ce dernier entraîne des concentrations supérieures en amont au

Fig.53 MODELE ELORN - DILUTION DU REJET "KERHUON" VIVE EAU



La non-périodicité observée en 'P' provient du faible échantillonnage des valeurs de C

Fig.54 DILUTION DU REJET "KERHUON" VIVE EAU

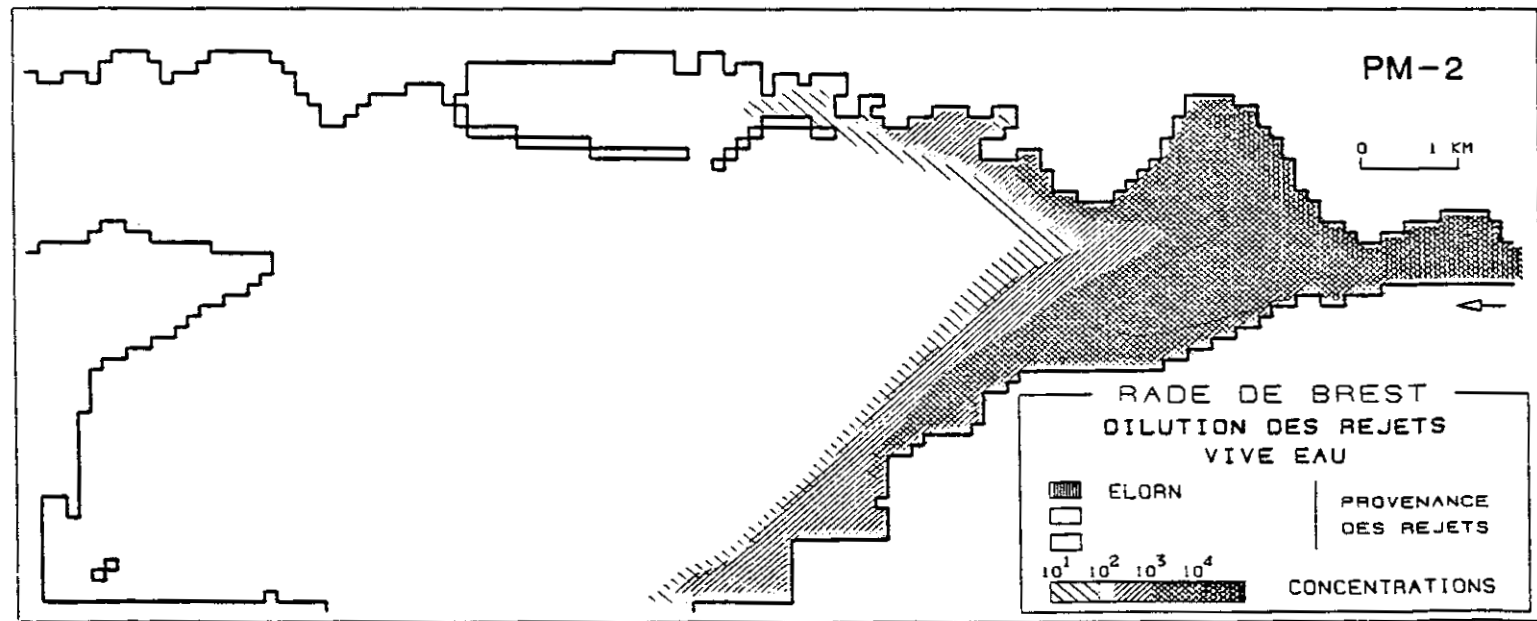
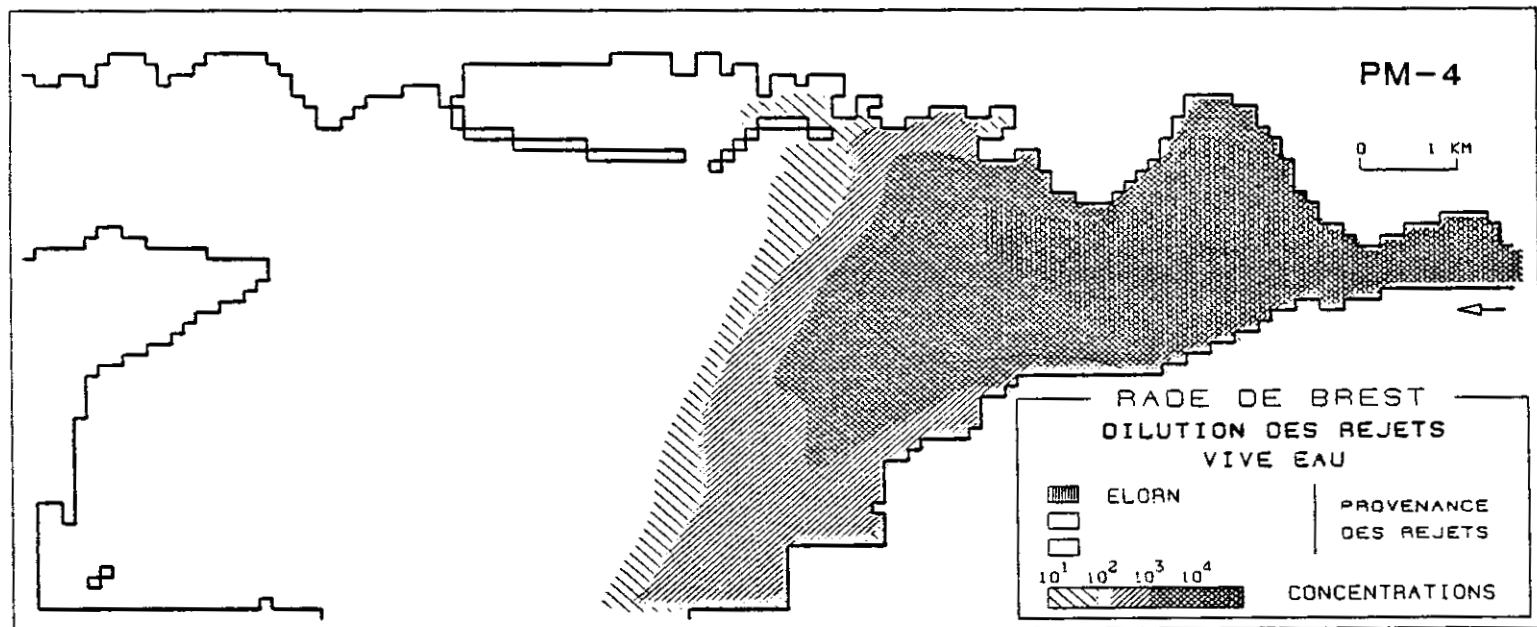
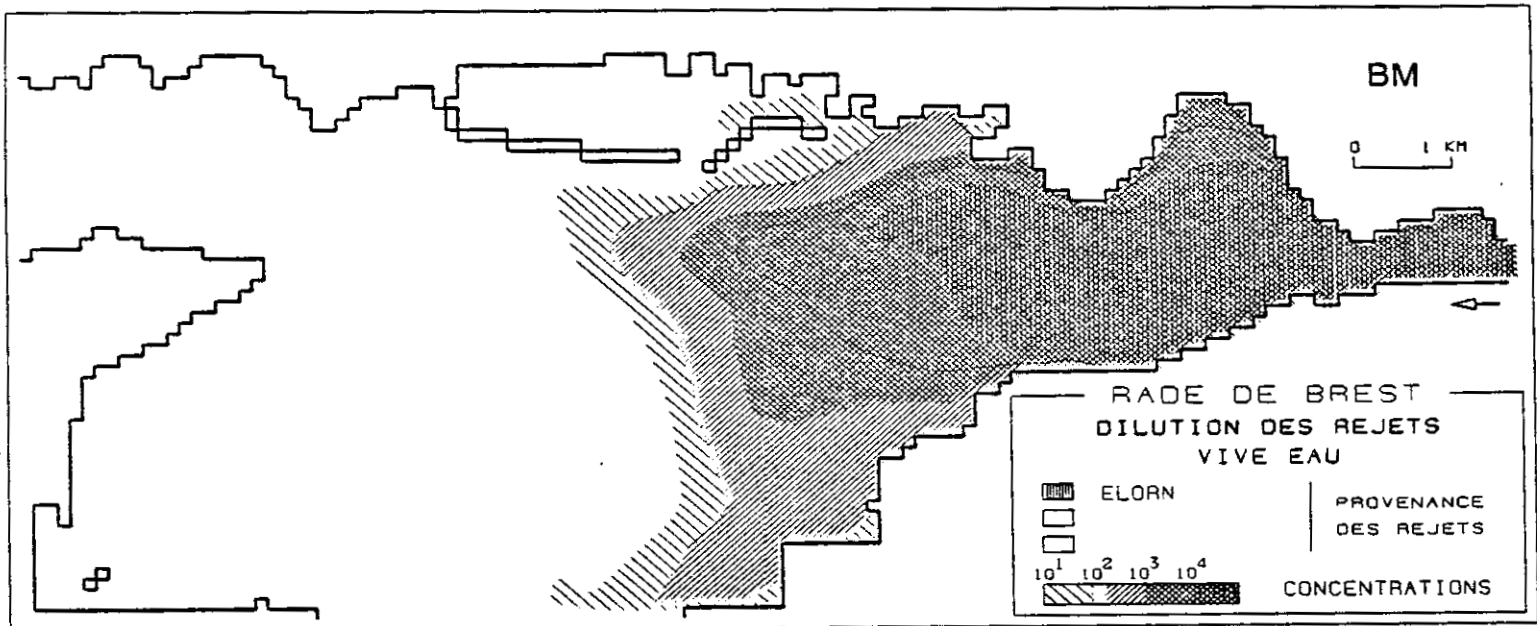


Fig.55 DILUTION DU REJET "KERHUON" VIVE EAU

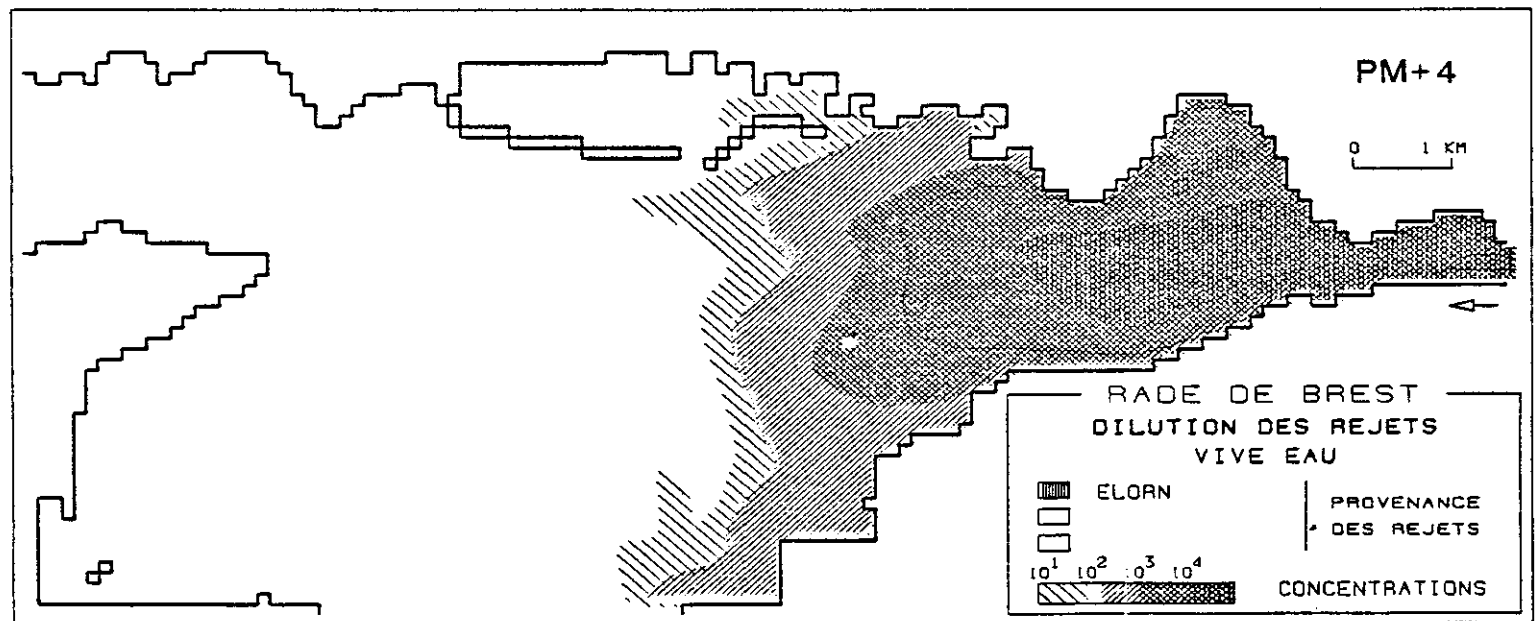
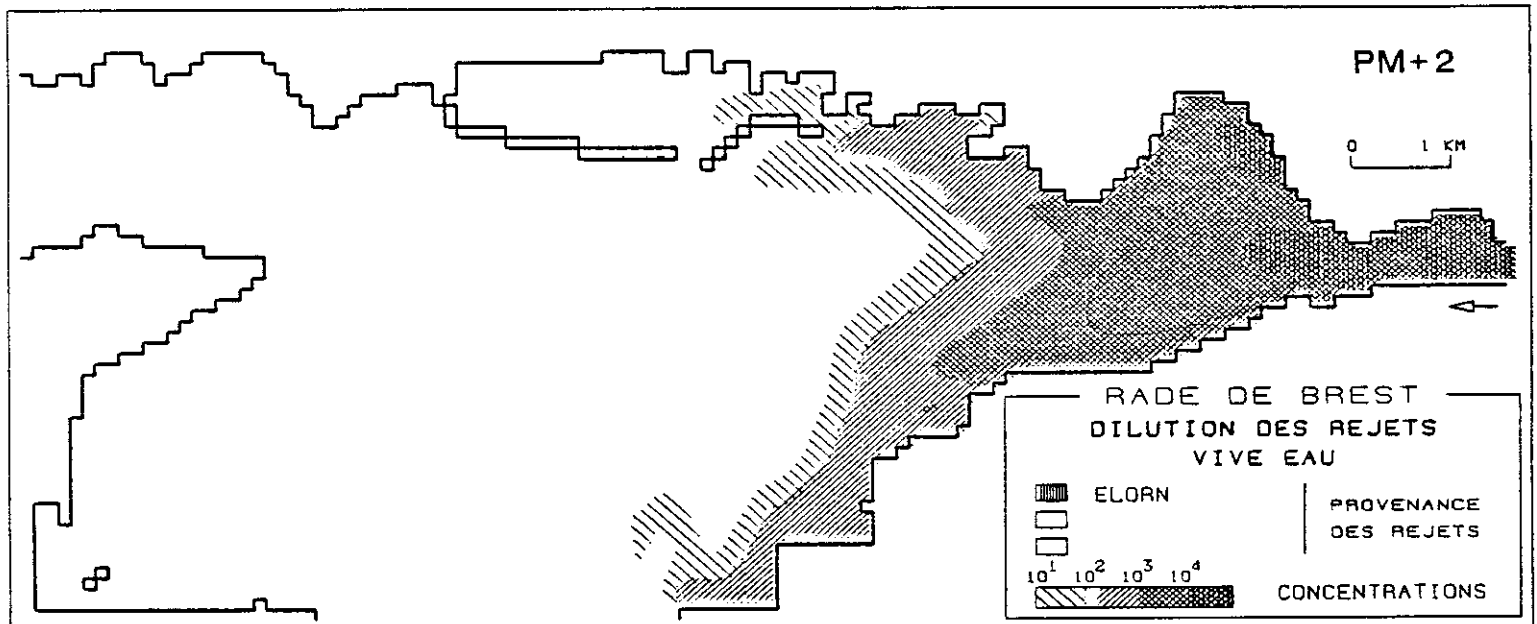
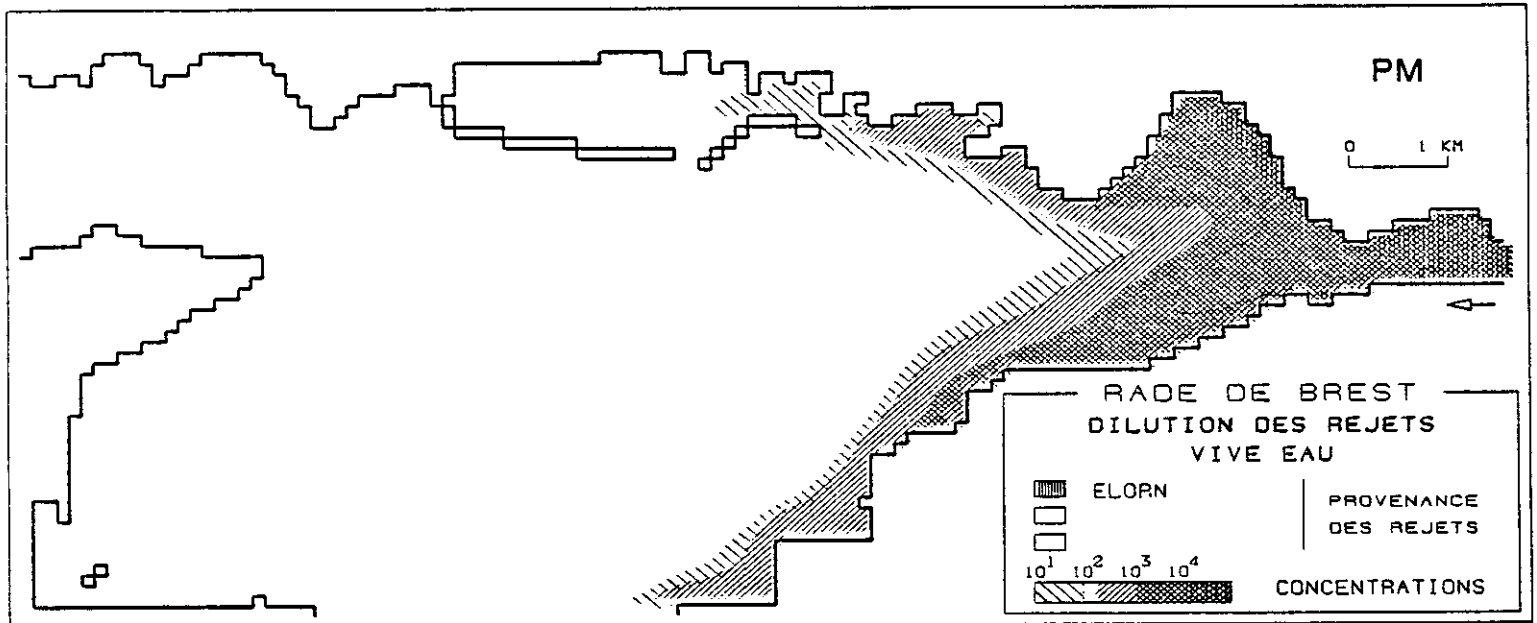


Fig.56 DILUTION DU REJET "KERHUON" MORTE EAU

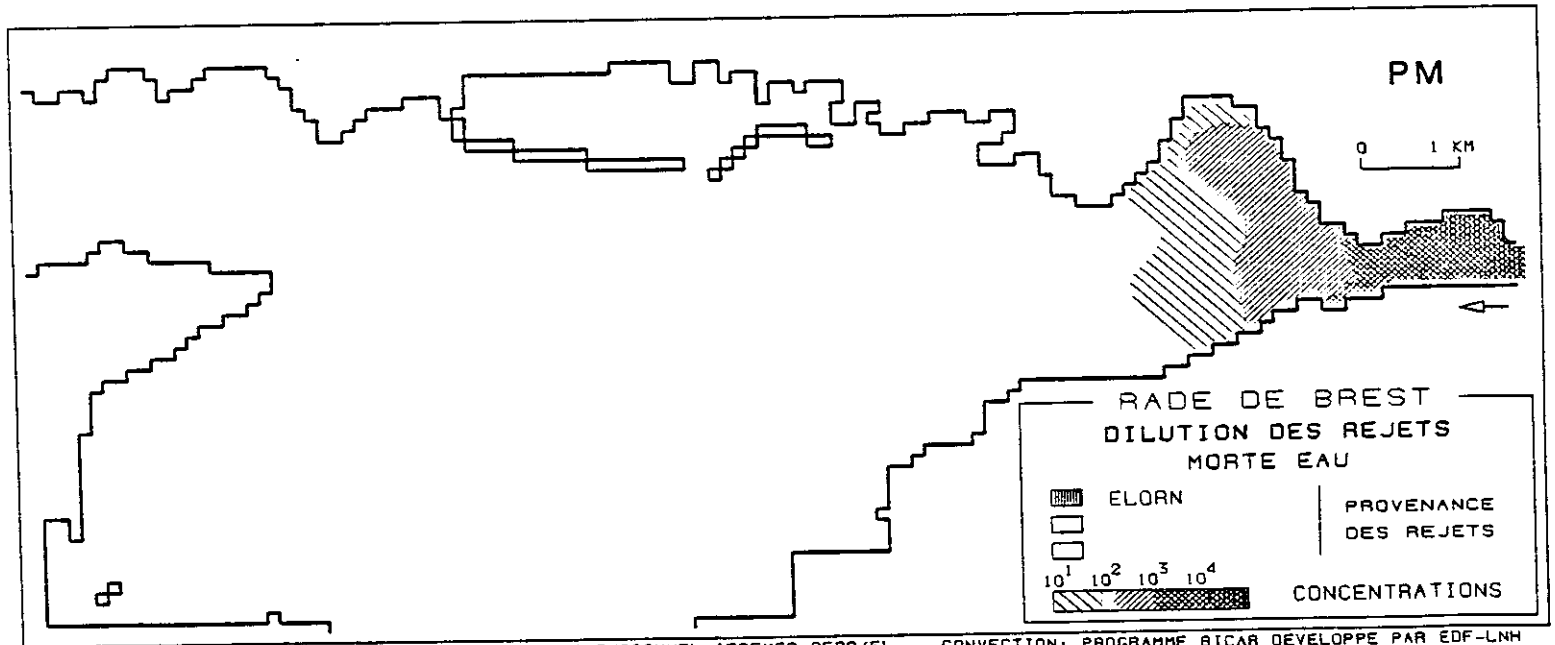
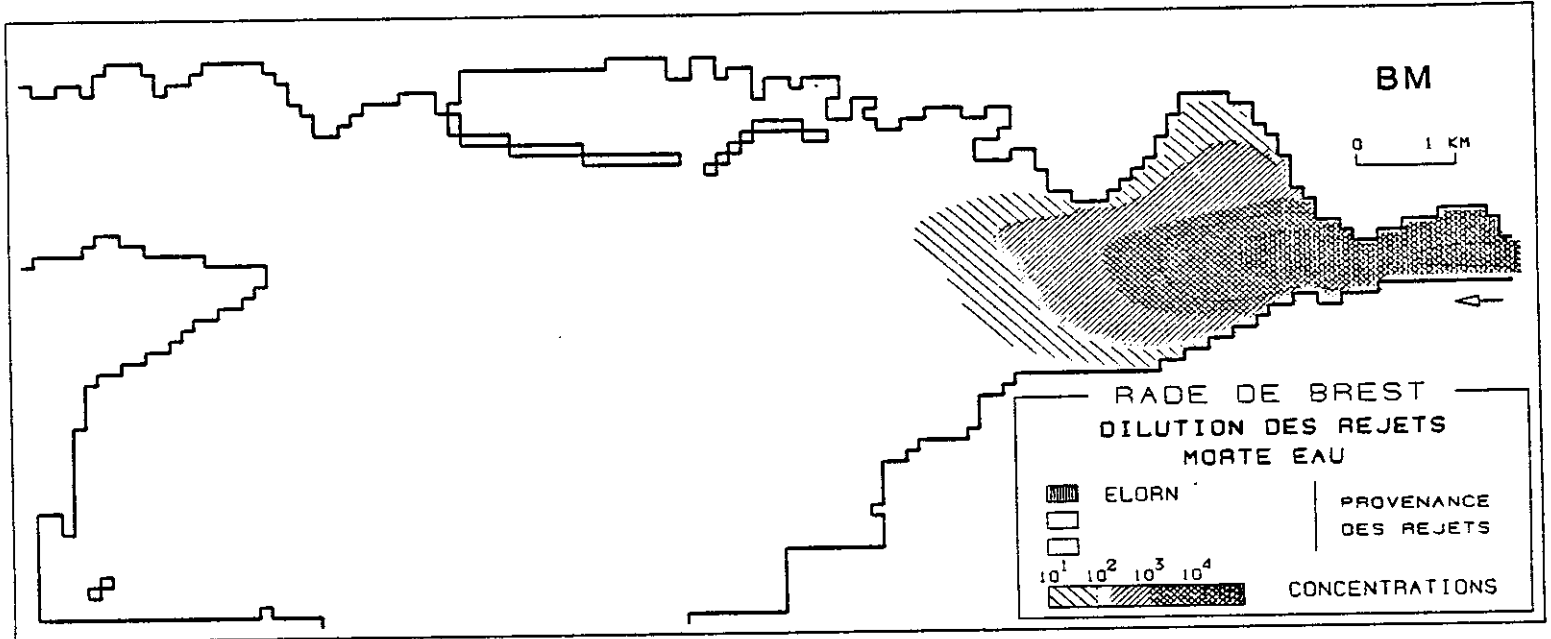
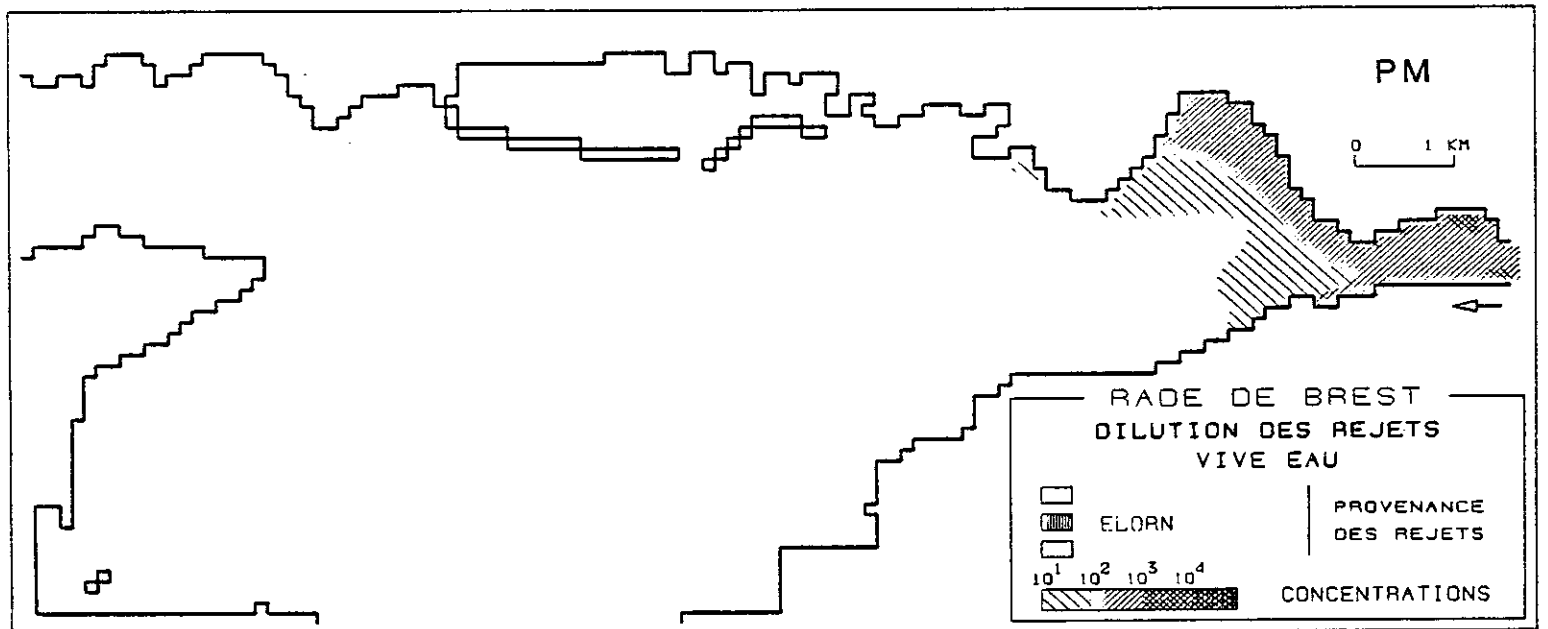
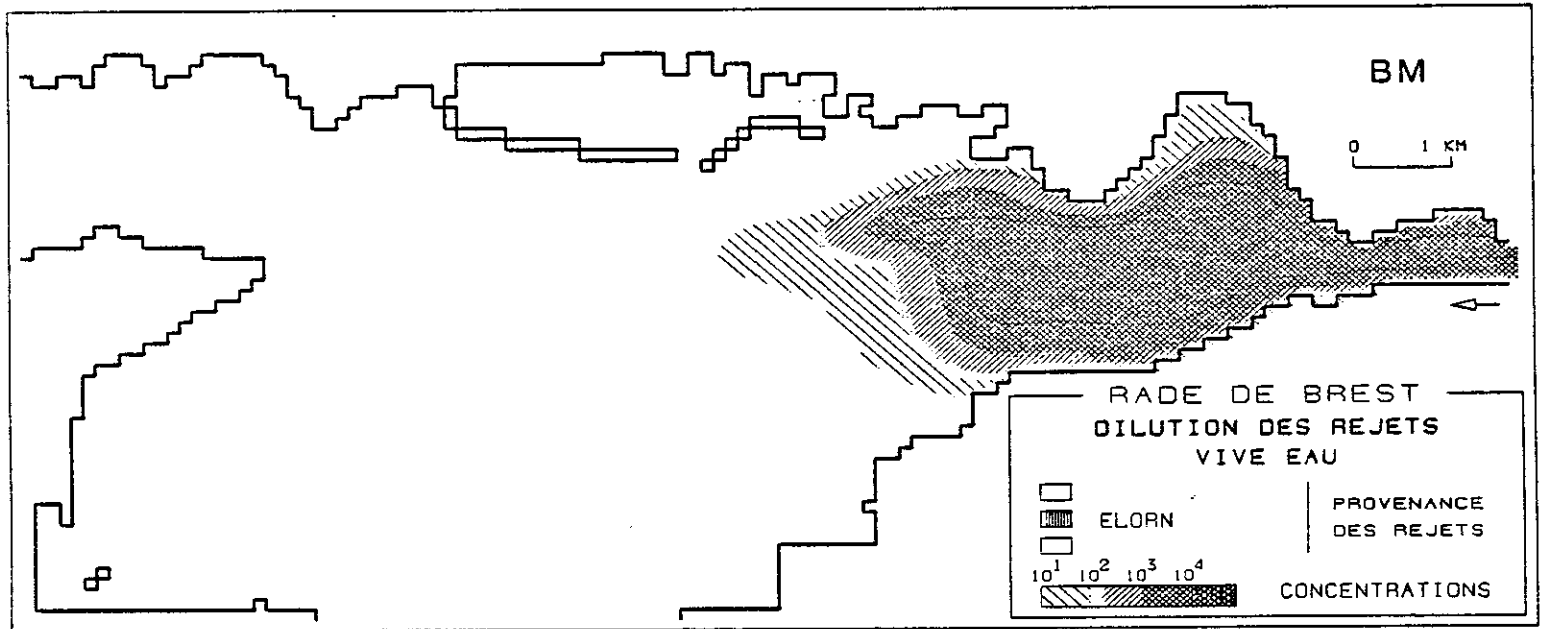


Fig.57 DILUTION DU REJET "KERHUON" VIVE EAU
effluent dégradable (T90 = 15 heures)



moment de la pleine mer (point R) ou au cours du flot ou du jusant (point Q), qui correspondent aux quantités rejetées juste avant le flot, donc à BM, dans très peu d'eau. Néanmoins les évolutions de concentration sont très semblables dans les deux cas. En particulier, vers la limite aval (point P), la concentration dans le canal central ne change qu'autour de la basse mer, au moment où les débits sont faibles. Schématiquement, au cours du jusant, les flux de contaminants évacués vers la rade sont équivalents dans les deux cas. On peut donc, sans commettre une grande erreur, "ignorer" l'effet de stockage de l'étang lorsqu'on s'intéresse au devenir, en rade de Brest, de l'effluent provenant du Kerhuon.

Les figures 54 et 55 montrent une grande extension du panache de l'Elorn à BM, avec un écoulement préférentiel dans le chenal et devant le littoral de Plougastel. Surtout, on observe en fin de flot et à PM un piégeage des effluents dans l'anse du Moulin Blanc, avec des concentrations assez élevées : on retrouve donc un mécanisme de contamination potentielle de la plage du Moulin Blanc par les eaux de l'Elorn, phénomène déjà pressenti lors de l'étude de Capacité d'Acceptation du Milieu Marin en rade de Brest.

En morte eau (fig. 56) où la remarque sur la non stationnarité des résultats faite à propos du rejet du Moulin Blanc reste vraie, le mécanisme de piégeage dans le Moulin Blanc est certainement moins marqué.

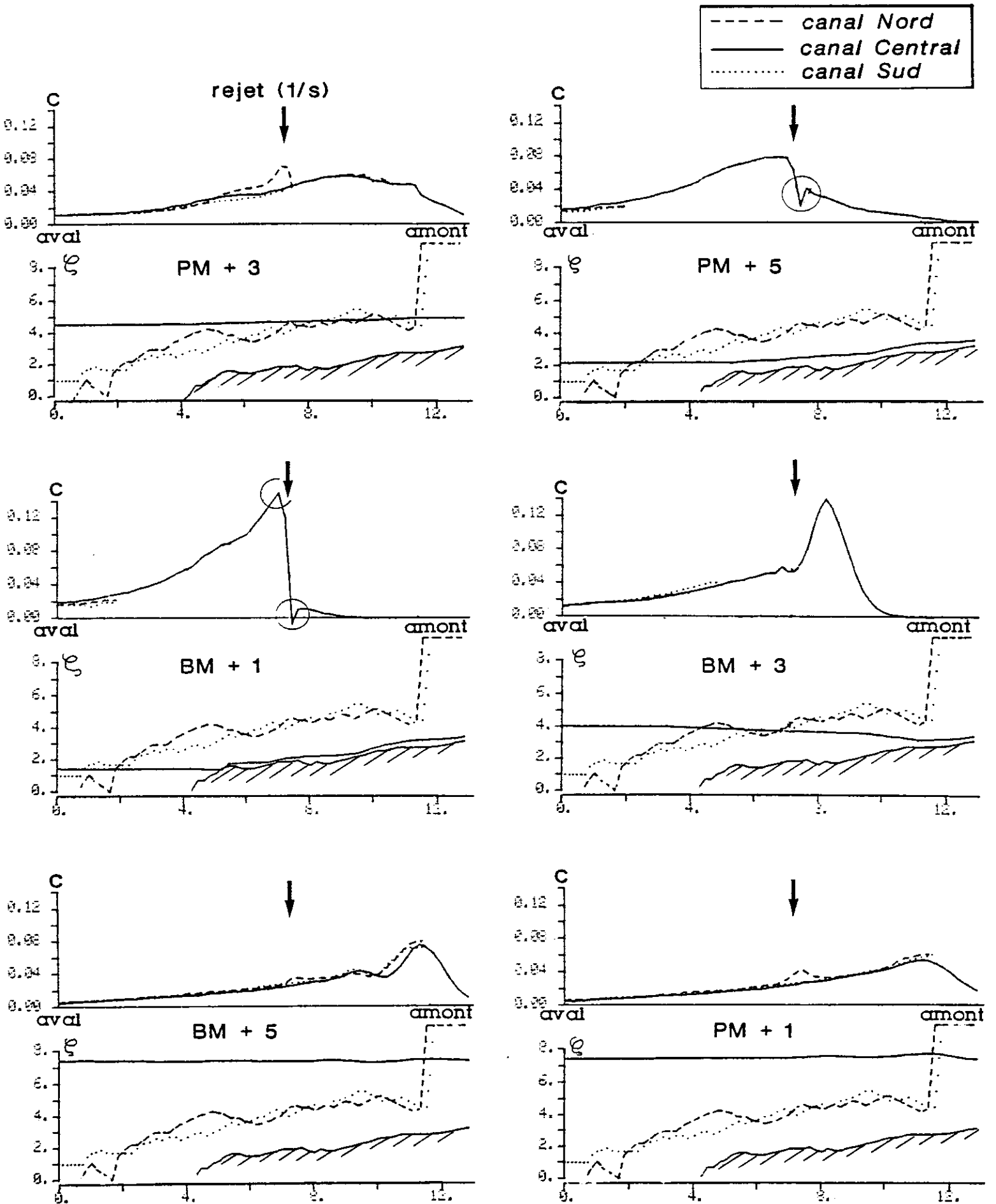
En ce qui concerne la simulation avec dégradation ($T_{90} = 15$ h) on observe dans le N-E de la Rade une chute de 2 "unités log" sur les concentrations à PM, mais à BM cet abattement est nettement plus faible, car les effluents rejetés sont directement transportés en aval de l'Elorn (Figure 57).

IV.8. DILUTION DU REJET DE LA FOREST

Nous n'étudierons pas le devenir en rade des effluents de ce rejet, car situés entre ceux de Kerhuon et de Landerneau, ils ne présenteraient pas de disposition originale.

La répartition longitudinale des concentrations dans l'estuaire est reproduite en figure 58. A mi-jusant (PM + 3), il reste de l'eau sur la rive nord c'est donc dans le canal correspondant que l'effluent de la station d'épuration de la Forest s'écoule. 2 heures plus tard (PM + 5), l'estran est découvert, le rejet se fait directement dans le canal central, avec étalement vers l'aval compte tenu du courant de jusant. A BM + 1, la concentration est maximale, car la hauteur d'eau très faible. Ce maximum de concentration est ensuite transporté en amont pendant le flot (BM + 3), ce qui entraîne le paradoxe suivant : la concentration n'est pas maximum au droit du rejet, alors que celui-ci est continu. En fin de flot (BM + 5) on note la mise en eau du canal nord, et vers l'amont une concentration supérieure sur les cotés liée à un courant moindre. Enfin à PM + 1 la concentration devant le rejet augmente, malgré une hauteur d'eau semblable : c'est l'effet de réduction des vitesses.

Fig.58 MODELE ELORN -DILUTION DU REJET DE LA FOREST-



○ valeurs incorrectes induites par des oscillations numériques

Pour ce rejet de la Forest, l'effet d'une variation du débit a été recherché et est visualisé par la figure 59. Par souci de simplification, seules les concentrations calculées dans le canal central, après 5 jours de simulation, sont représentées. L'état stationnaire n'est pas encore atteint, particulièrement en aval, mais on peut supposer ne pas en être trop éloigné pour que les différences observées d'un scénario à l'autre soient significatives.

Les rejets "en pointe" sont caractérisés par une répartition gaussienne du flux au cours du temps, l'écart-type valant une demi-heure. Naturellement, le flux total au cours de la marée ne varie pas selon le scénario.

Un optimum (i.e. concentrations minimales) se dégage pour le rejet massif à mi-flot car ce régime réalise la combinaison des deux avantages suivants : pas de rejet à basse mer, qui serait trop concentré dans le champ proche de l'exutoire ; transit dans l'estuaire amont avant descente vers les secteurs conchylicoles. Toutefois, il faut vérifier que les concentrations amont n'atteignent pas une valeur trop forte au moment de la renverse. En effet dans ce secteur les remises en suspensions peuvent être importantes ; il faut donc limiter le nombre de bactéries susceptibles d'être adsorbées puis sédimentées à cet endroit. En fait, la figure 59 montre qu'en amont du point de rejet, les concentrations induites par le rejet massif à mi-flot ne sont pas très élevées (attention : les concentrations aux points "R" et "S", obtenues autour de la basse mer, sont suspectes car liées à des oscillations numériques).

N.B. : Nous avons fait un test de sensibilité à la position de l'exutoire : chenal ou estran nord. Les différences sont minimales dans le cas du rejet continu et suspectes dans le cas du rejet en pointe, car parfois la pointe se produit au moment du découverture ou de la mise en eau de l'estran. C'est pourquoi l'effet de pointe mis en évidence en figure 59 est présenté pour un rejet dans le chenal.

IV.9. DILUTION DU REJET LANDERNEAU

La dilution dans l'Elorn du rejet de la station d'épuration de Landerneau est représentée par la figure 60. Les niveaux de contamination au droit des parcs (points Q) sont sensiblement équivalents à ceux induits par le rejet de la Forest. Par contre, les concentrations en amont sont nettement supérieures, en raison des faibles volumes de dilution. A titre de comparaison avec les résultats obtenus en rade, une concentration de 0,1 sur les figures 58, 59 ou 60 est équivalente à une concentration 10^6 sur les cartes de répartition en rade ! (rappelons que pour une meilleure lisibilité de ces cartes, le flux "unité" considéré était 10^7 s^{-1} ; alors que sur les représentations en points fixes, il vaut 1 s^{-1}). On voit donc l'effet considérable de la dilution par étalement "bidimensionnel" et non "filaire".

Fig.59 MODELE ELORN - DILUTION du REJET de la S.E. LA FOREST -
(rejet dans le chenal)

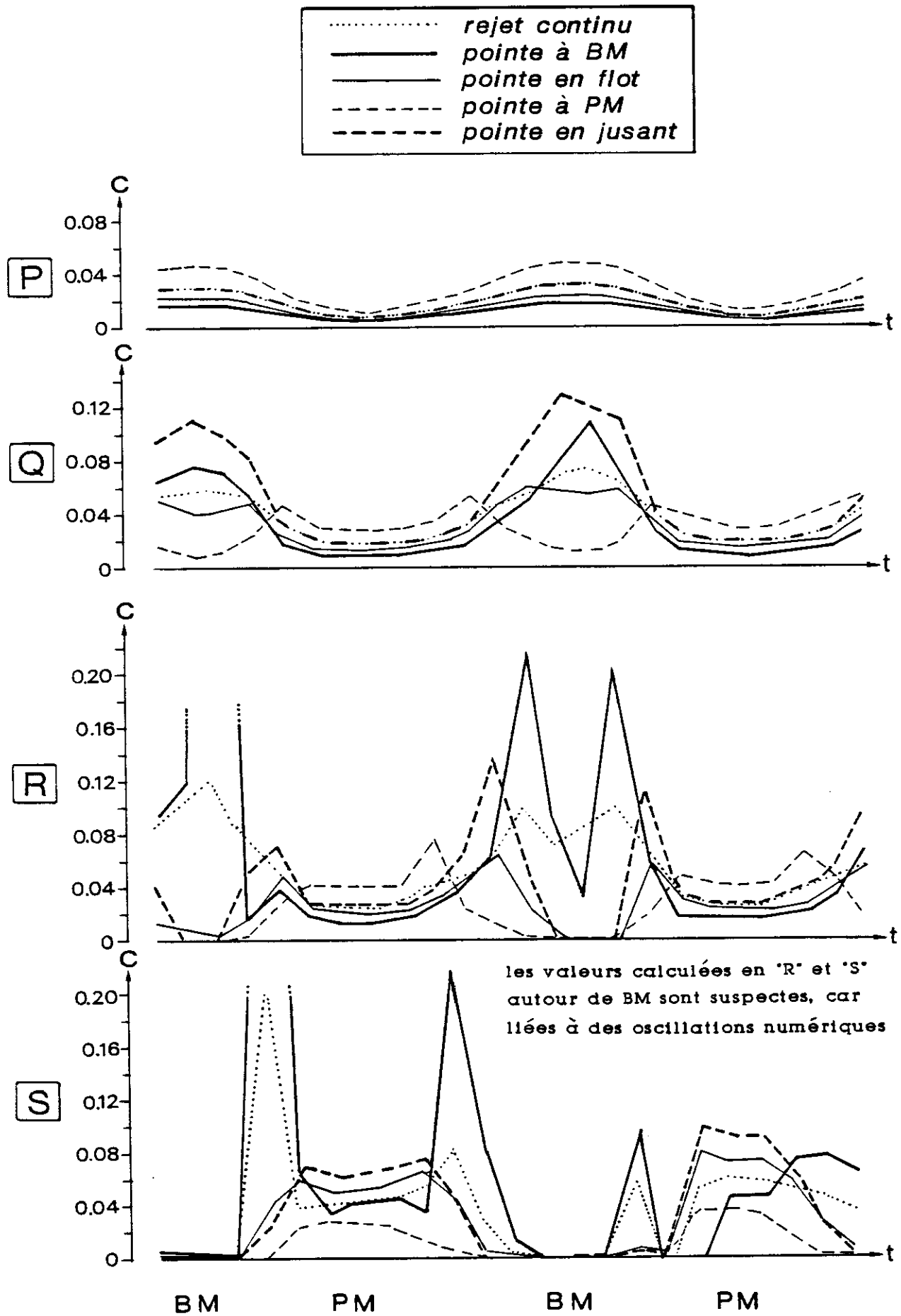
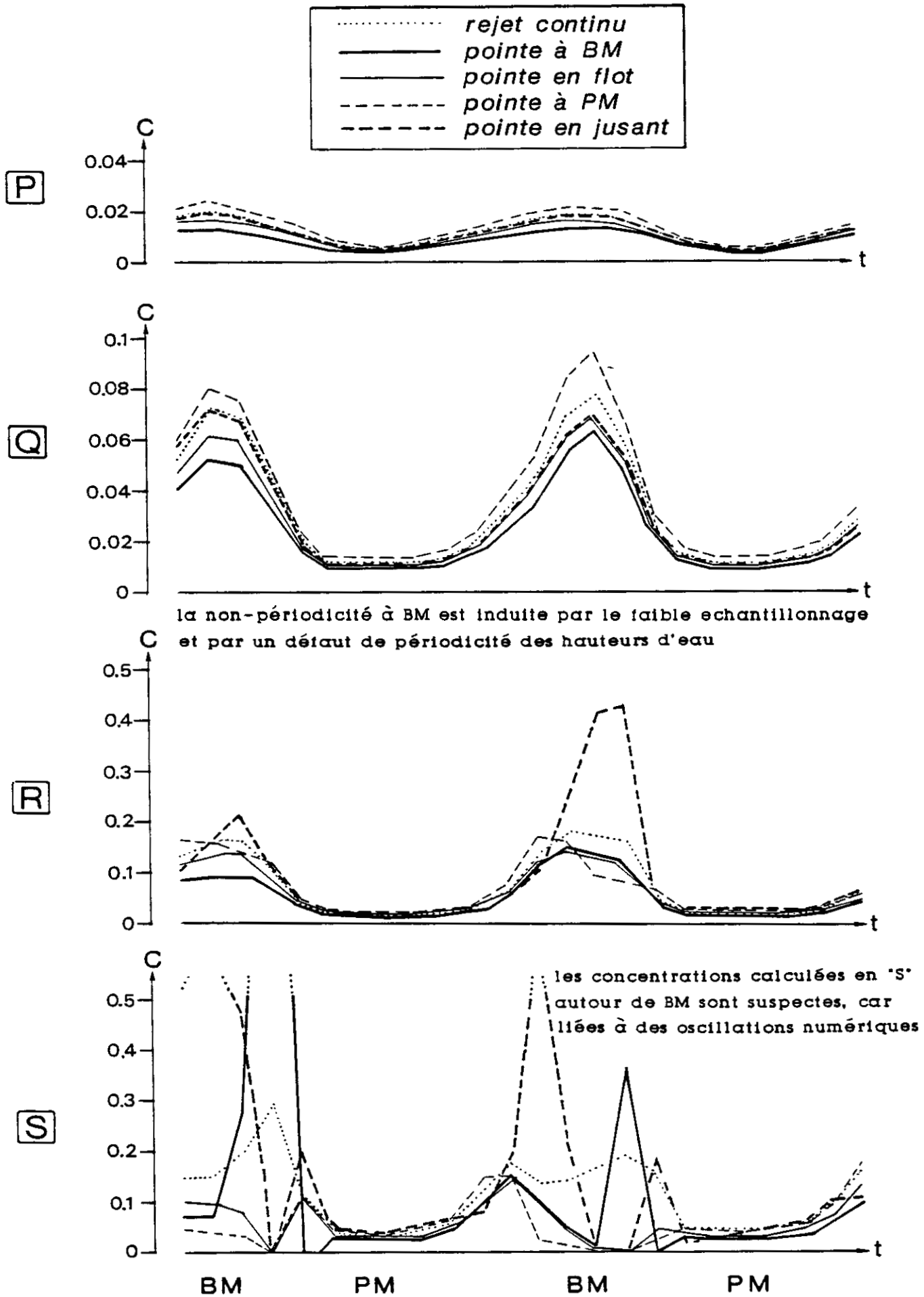


Fig.60 MODELE ELORN -DILUTION du REJET de la S.E. LANDERNEAU -



En ce qui concerne l'optimum de régime de rejet, la figure 60 indique une préférence pour le rejet massif à basse mer ou en flot.

La raison est analogue à celle invoquée pour le rejet de la Forest : il faut retarder l'arrivée sur les zones sensibles de l'effluent rejeté. Si de plus on cherche à éviter des fortes concentrations en amont, pour limiter la contamination du sédiment, le rejet à mi-flot semble meilleur. Ces conclusions sont d'autant plus vraies que l'effluent considéré est dégradable : il faut alors réduire les concentrations en amont et surtout éviter un transport rapide vers les zones sensibles.

Le devenir en rade de ce rejet très "amont" est visualisé par la figure 61. On retrouve des structures tout à fait semblables à celles du panache provenant de Kerhuon, avec des concentrations inférieures d'environ une "unité log". En particulier, la contamination du Moulin Blanc à PM est bien mise en évidence.

IV.10. AUTRES SIMULATIONS

Nous regroupons ici quelques commentaires concernant deux types de scénarios, de moindre importance parce que caractérisés par des abattements rapides de concentration.

- Dilution des rejets en morte eau, avec dégradation ($T_{90} = 15$ h). Dans ce cas on remarque que les rejets situés à l'ouest du Terre-plein de la Z.I.P. ne contaminent pas le secteur sensible (fig. 62) tandis que l'impact des rejets Moulin Blanc et Kerhuon reste faible et localisé (fig. 63 et 64).

- Dilution des rejets en vive eau, avec dégradation rapide ($T_{90} = 4$ h) (fig. 65 et 66). Les mêmes remarques que précédemment peuvent être faites. On note aussi une nette différence entre les panaches de PM, qui sont très confinés, et ceux de BM qui s'étendent relativement loin vers l'ouest en raison du fort coefficient de marée.

- Dilution des rejets en morte eau, avec dégradation rapide ($T_{90} = 4$ h). Les résultats correspondants ne sont pas présentés : il est évident que dans ce scénario les panaches ne concernent que les champs proches des rejets (1 à 2 km).

Fig.61 DILUTION DU REJET 'LANDERNEAU' VIVE EAU

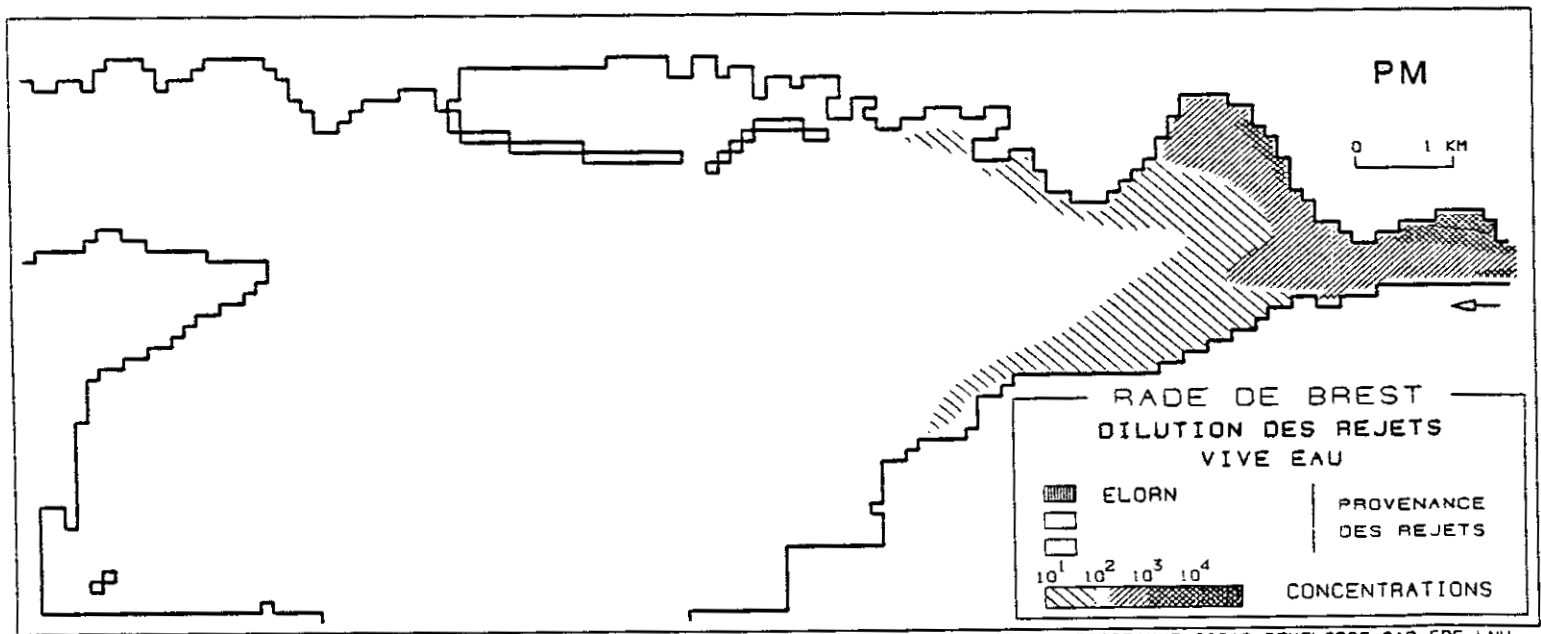
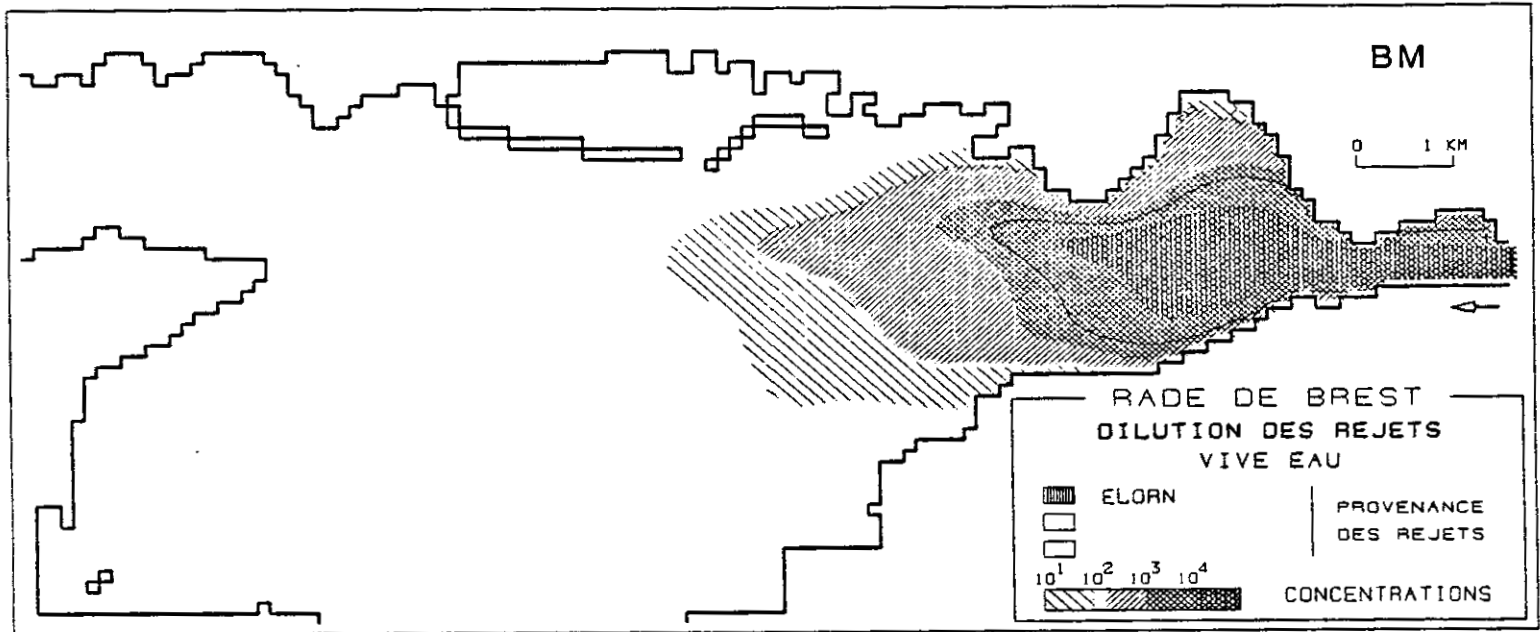


Fig.62 DILUTION DES REJETS DE BREST MORTE EAU
 effluent dégradable (T90 = 15 heures)

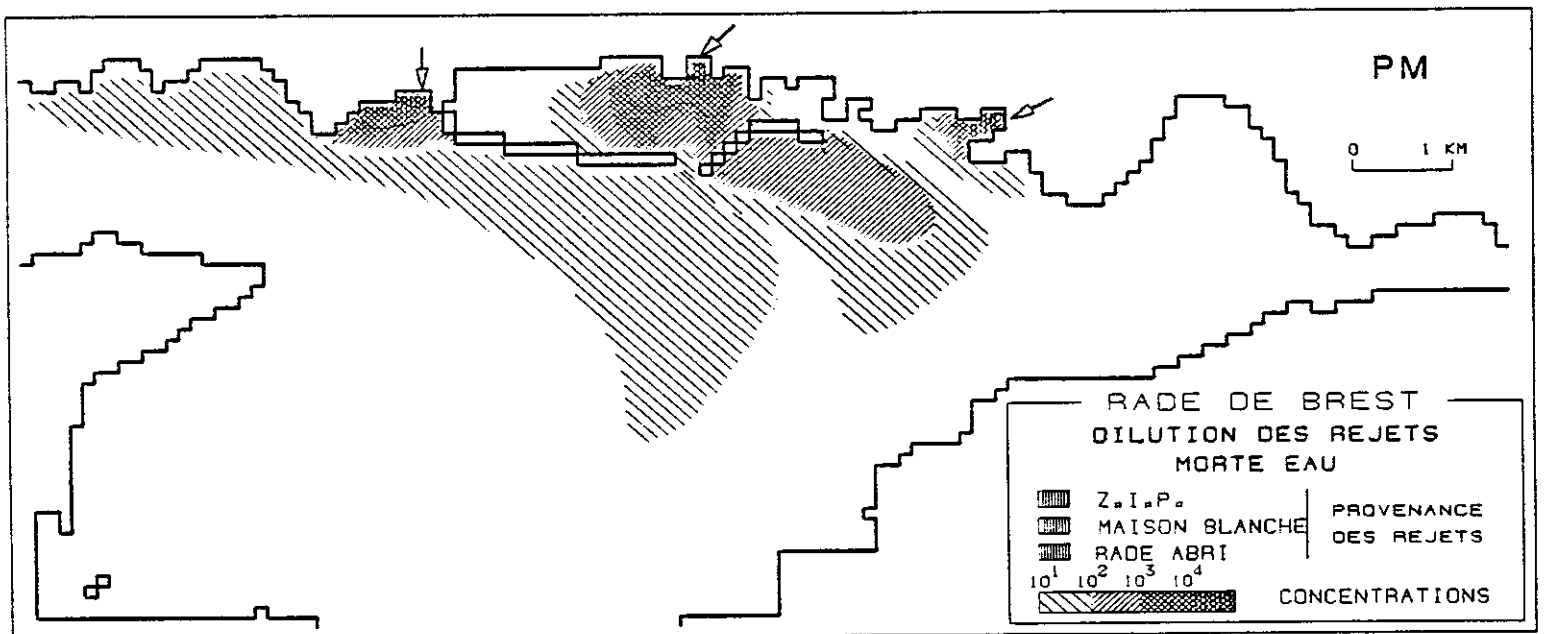
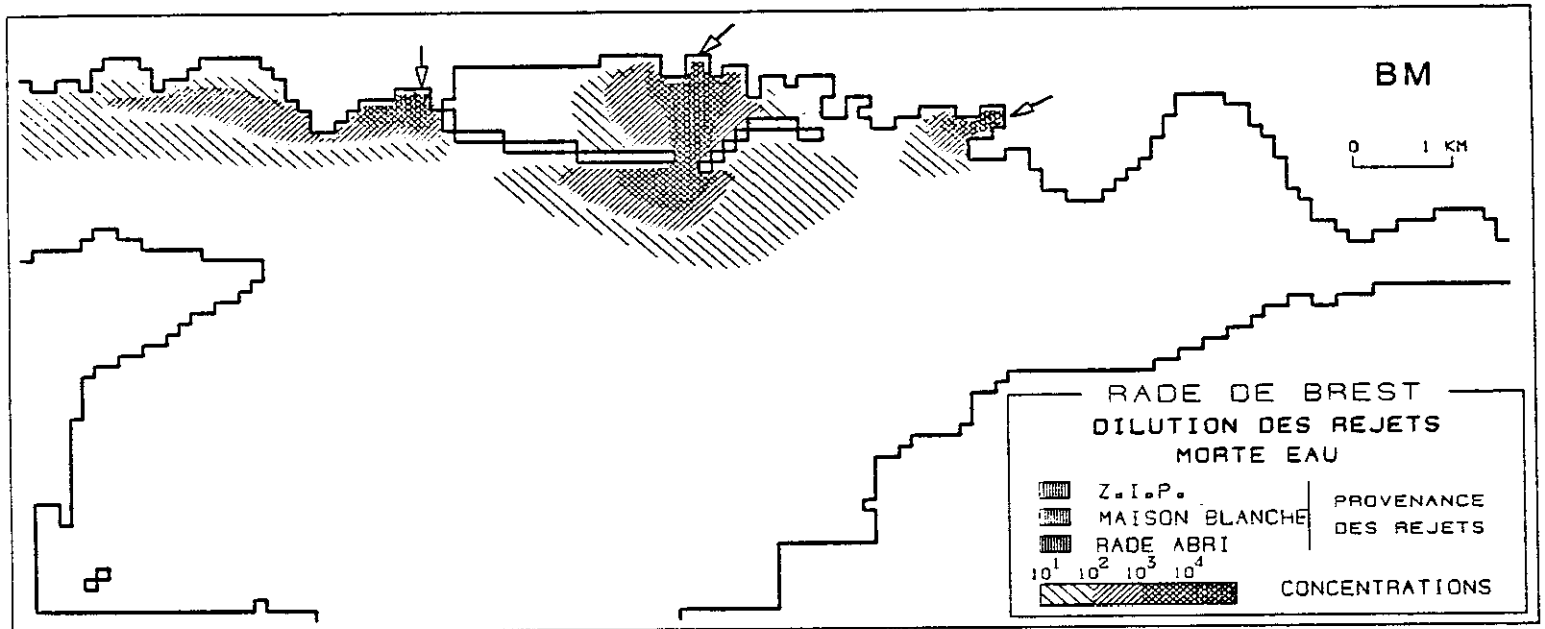


Fig.63 DILUTION DU REJET 'MOULIN BLANC' MORTE EAU
 effluent dégradable (T90 = 15 heures)

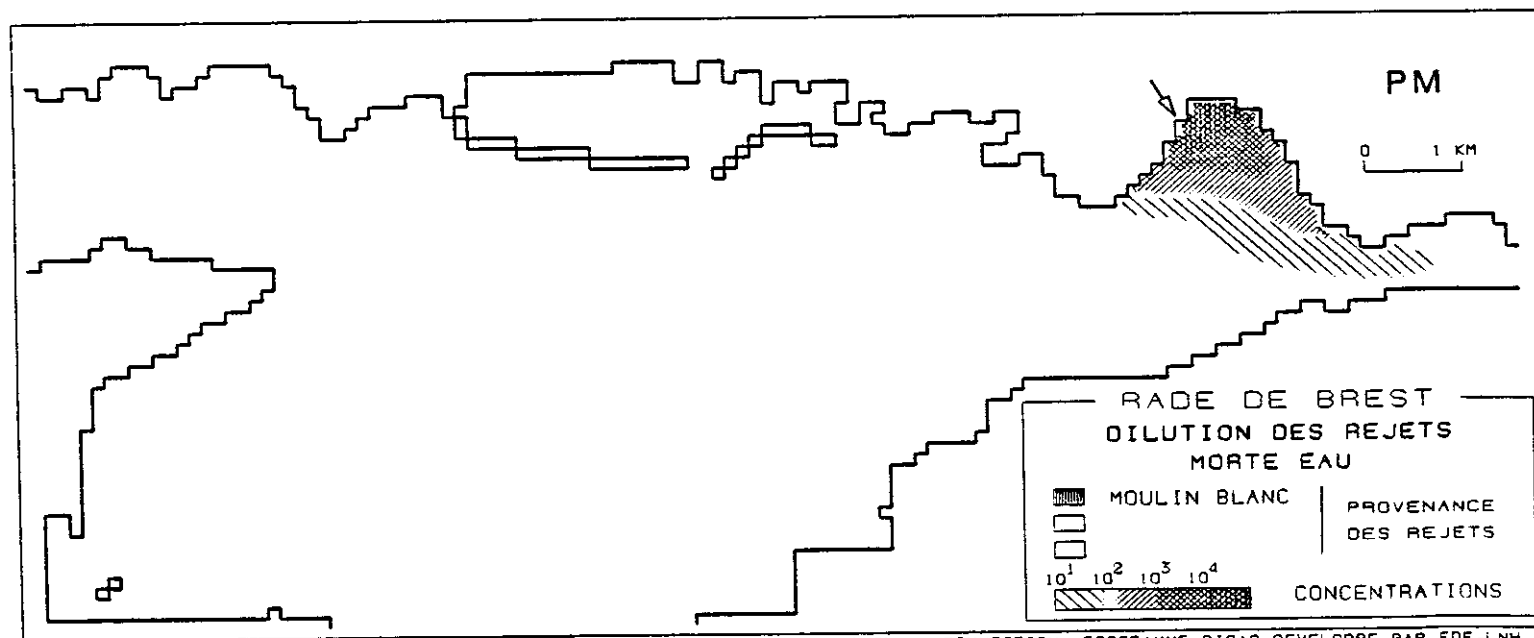
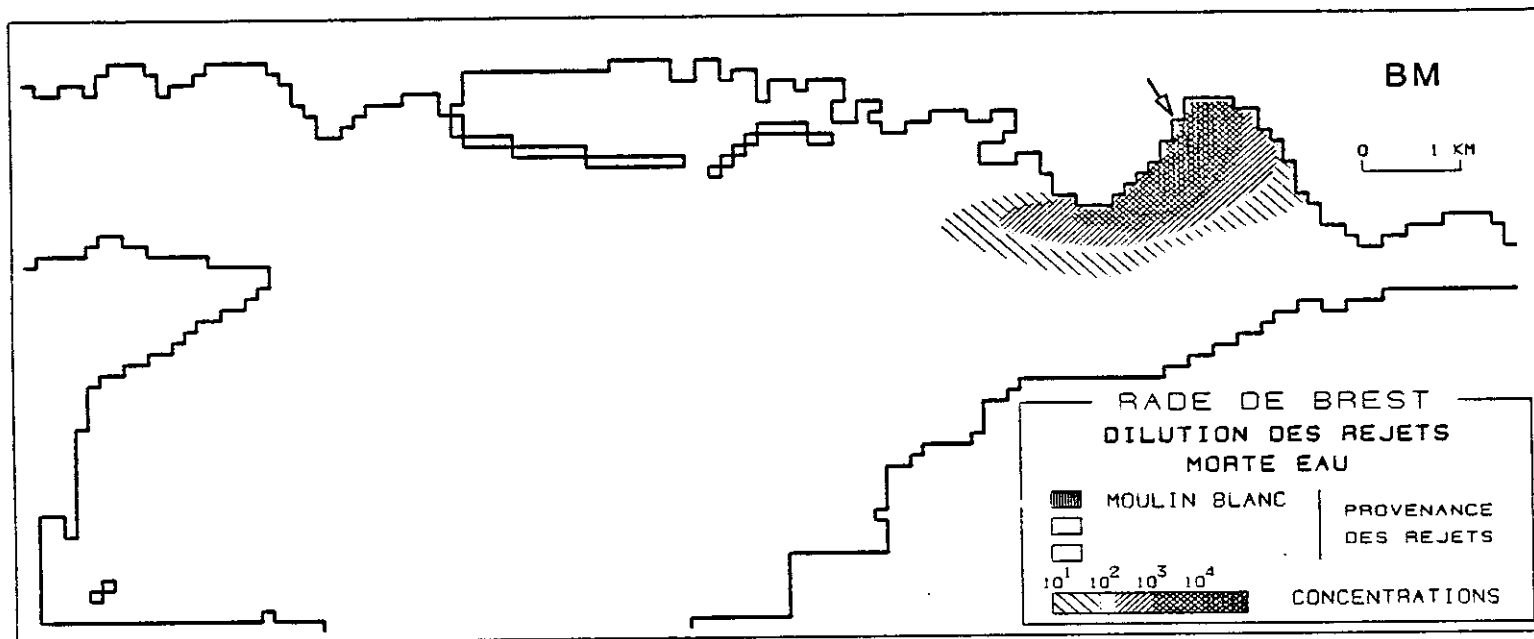


Fig.64 DILUTION DU REJET 'KERHUON' MORTE EAU
 effluent dégradable (T90 = 15 heures)

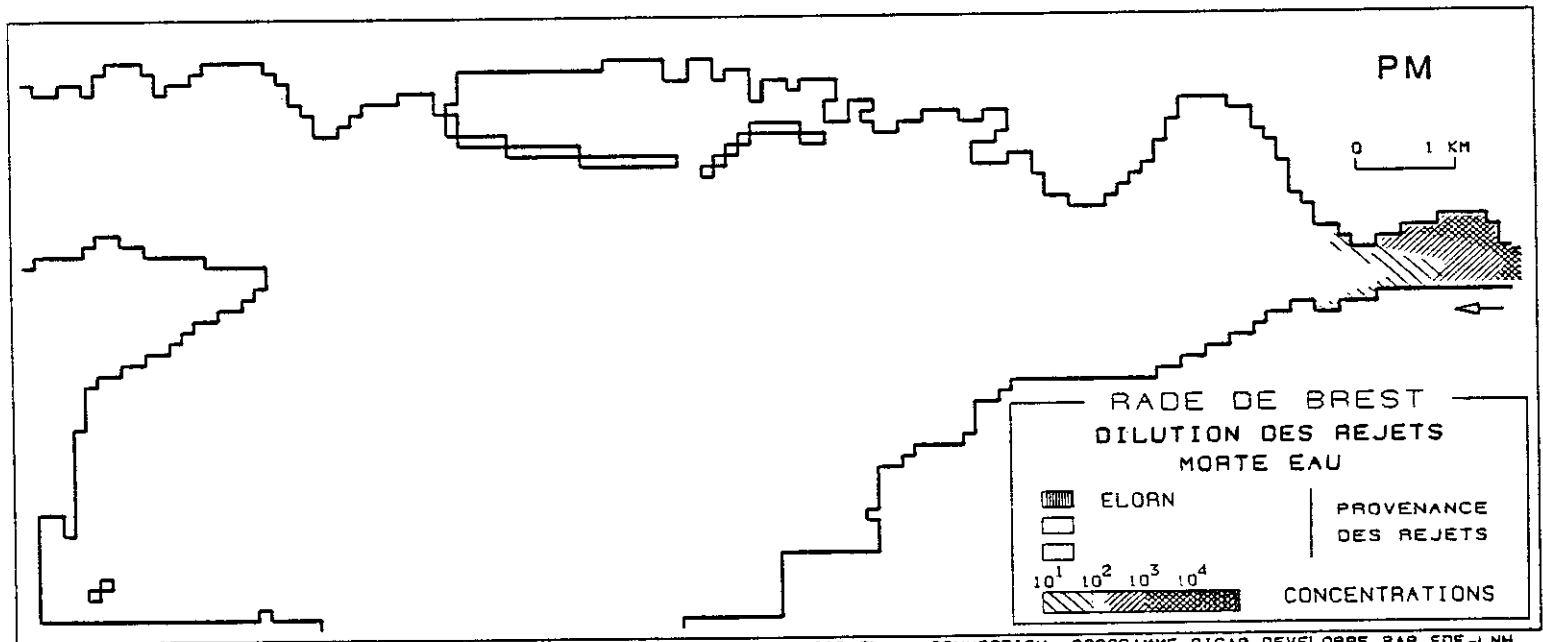
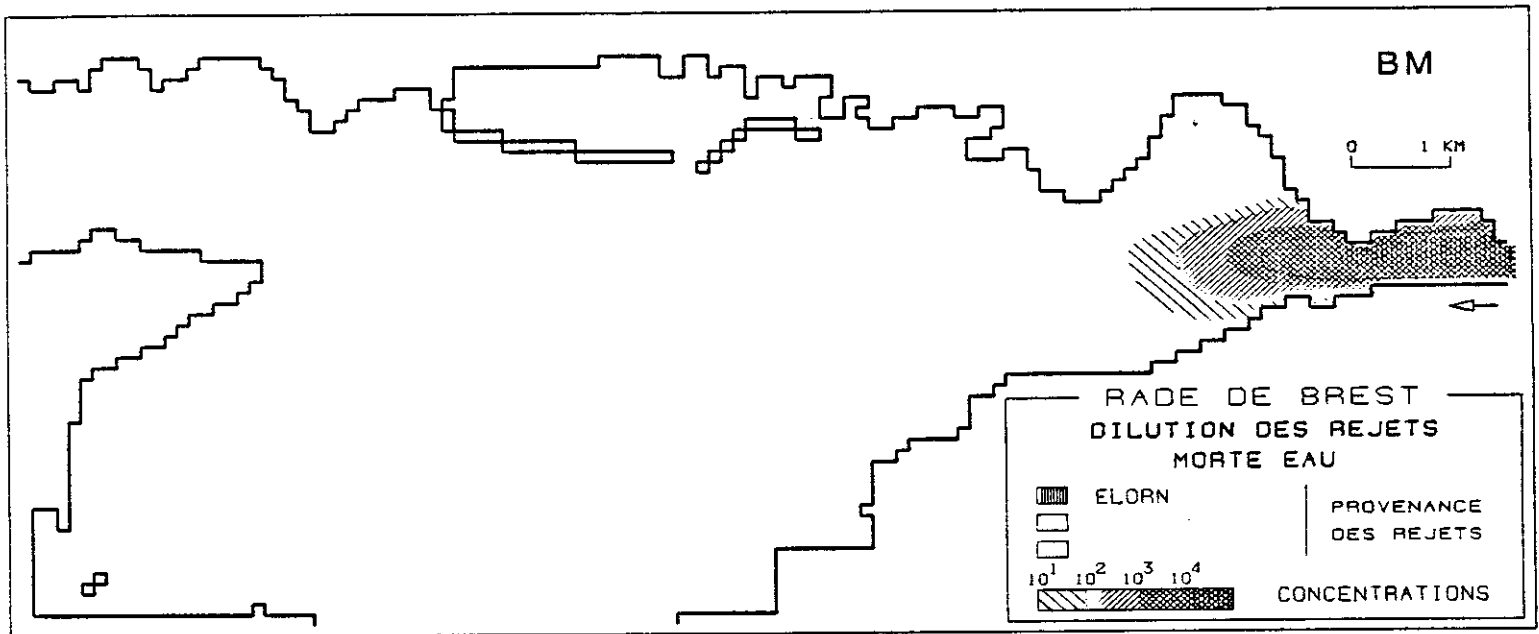


Fig.65 DILUTION DES REJETS DE BREST VIVE EAU
effluent dégradable (T90 = 4 heures)

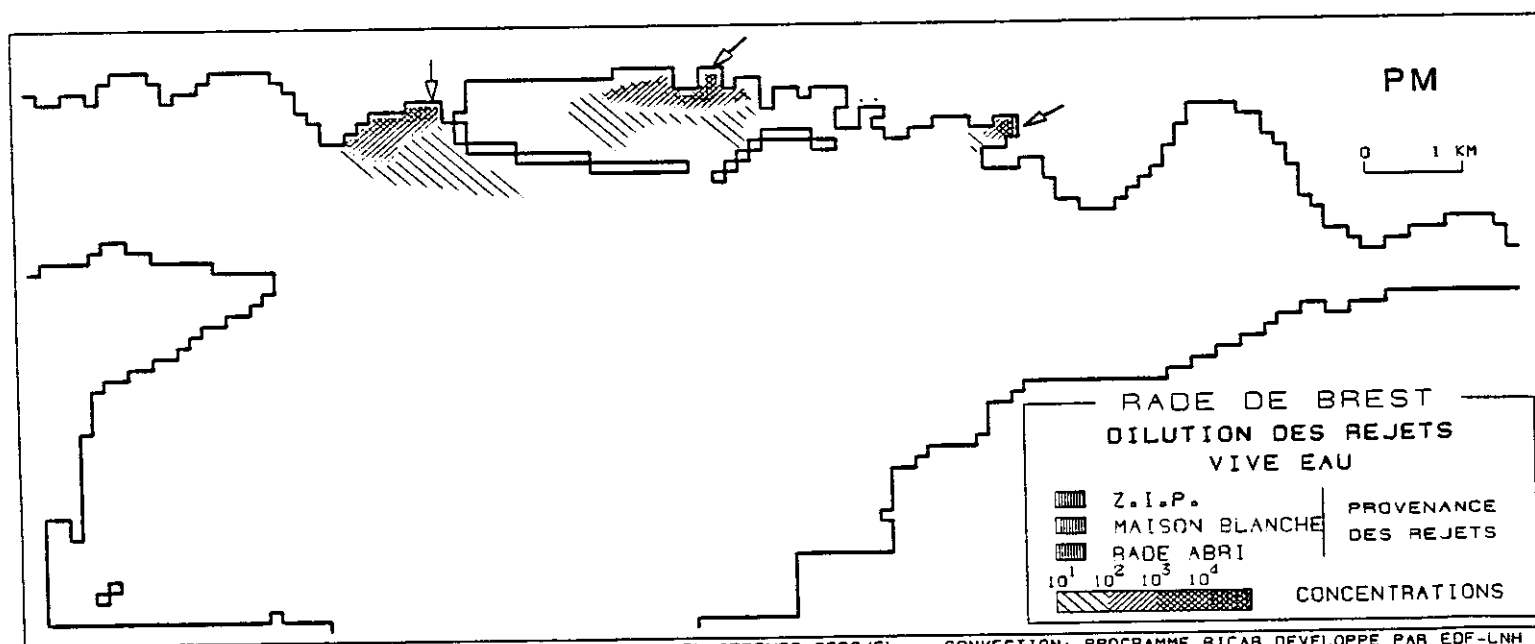
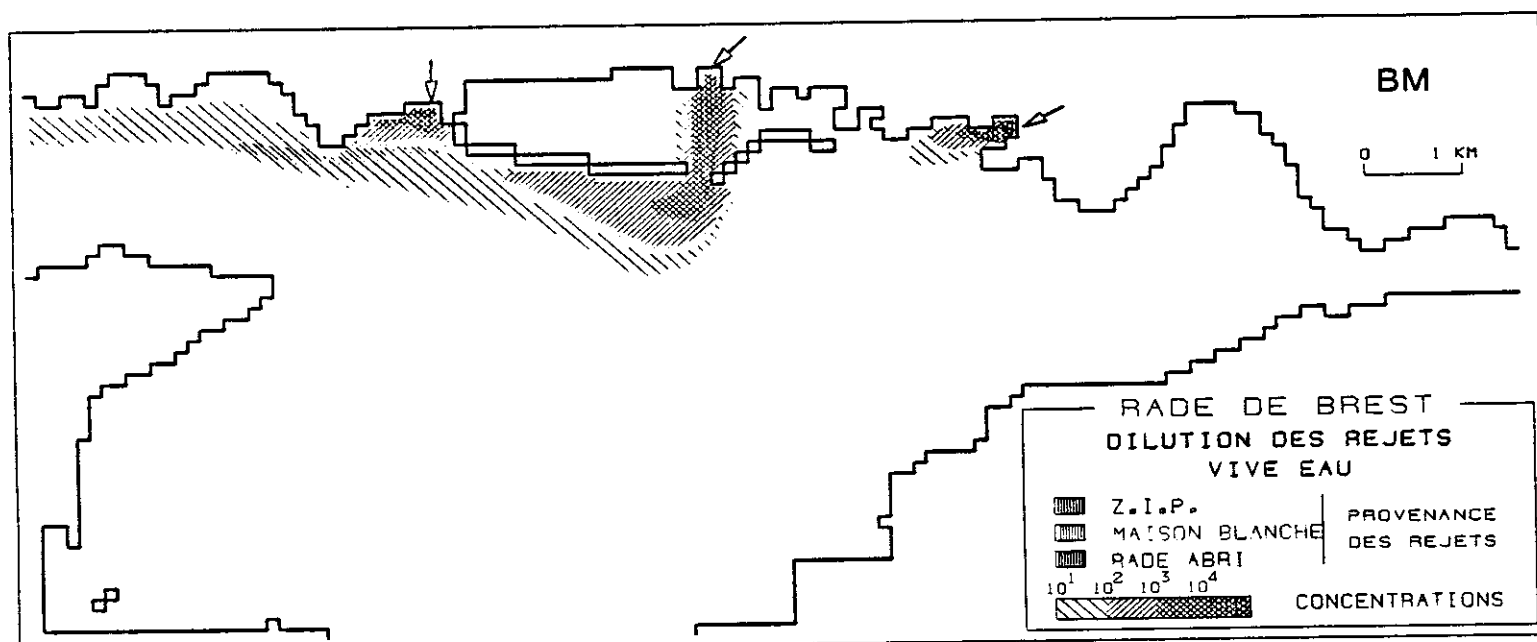
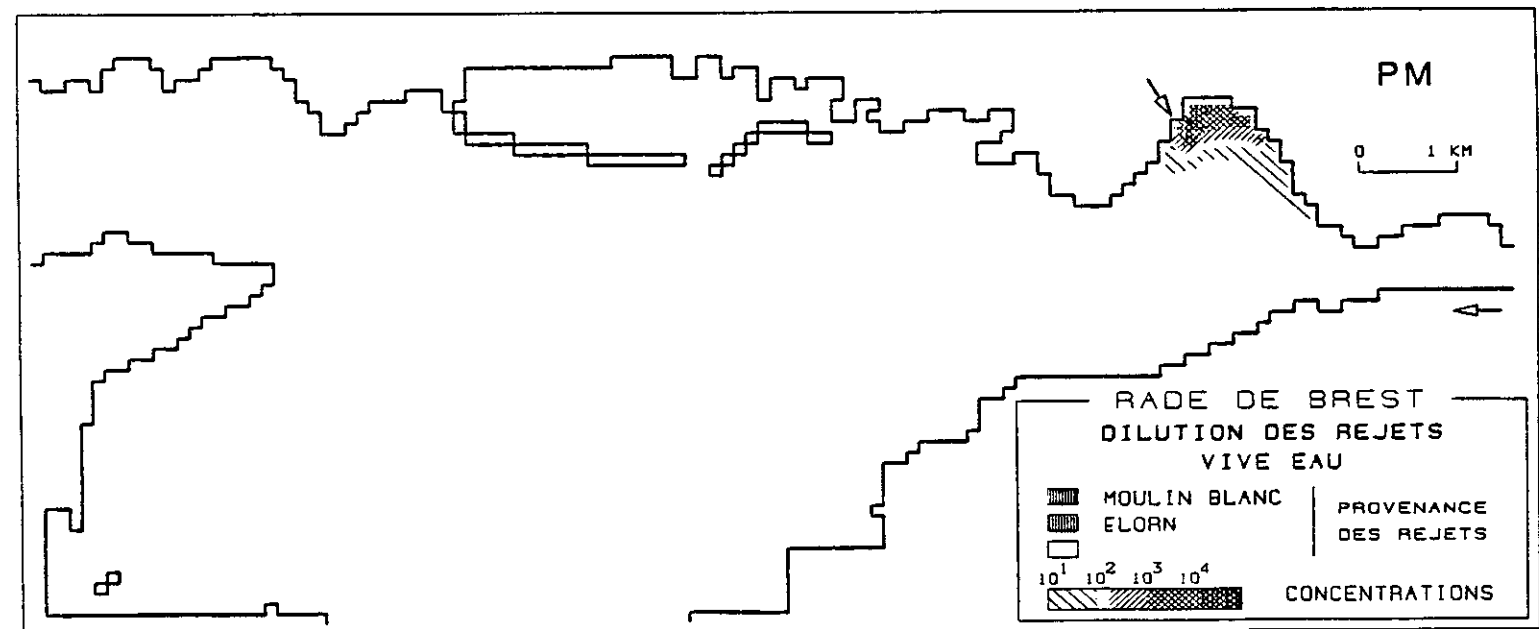
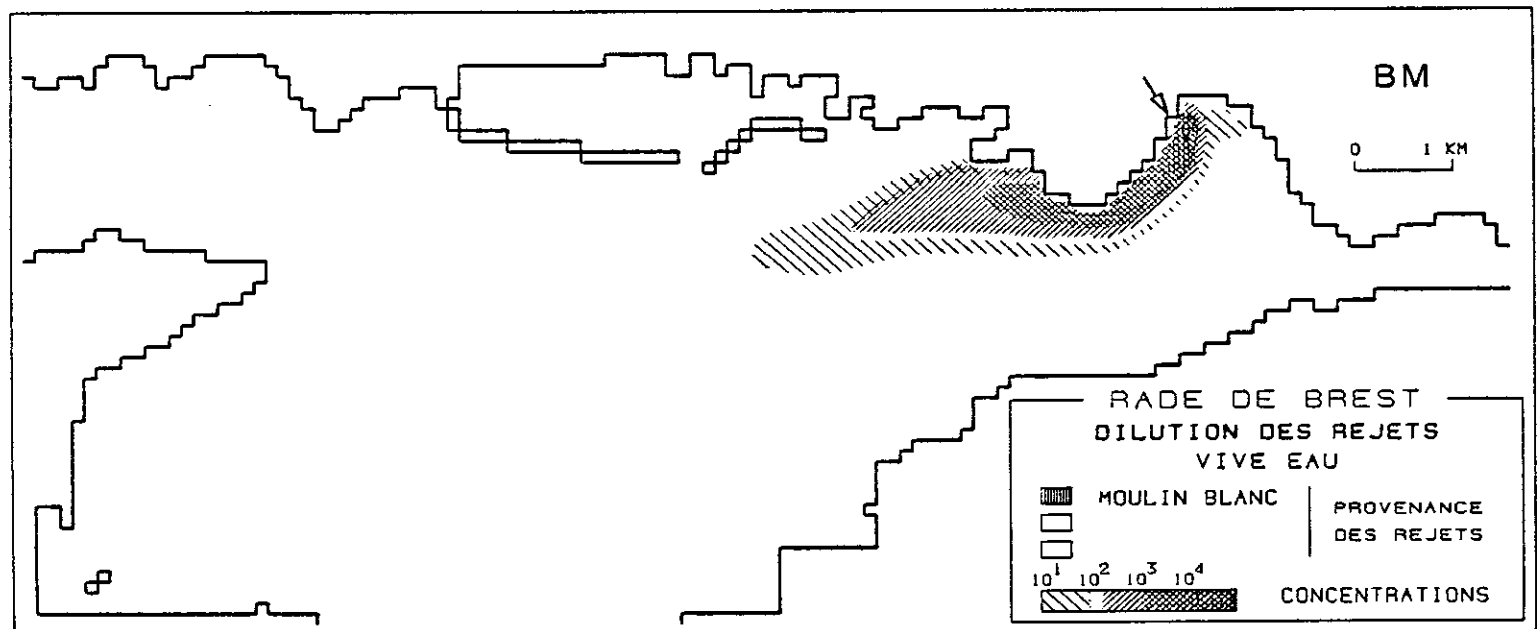
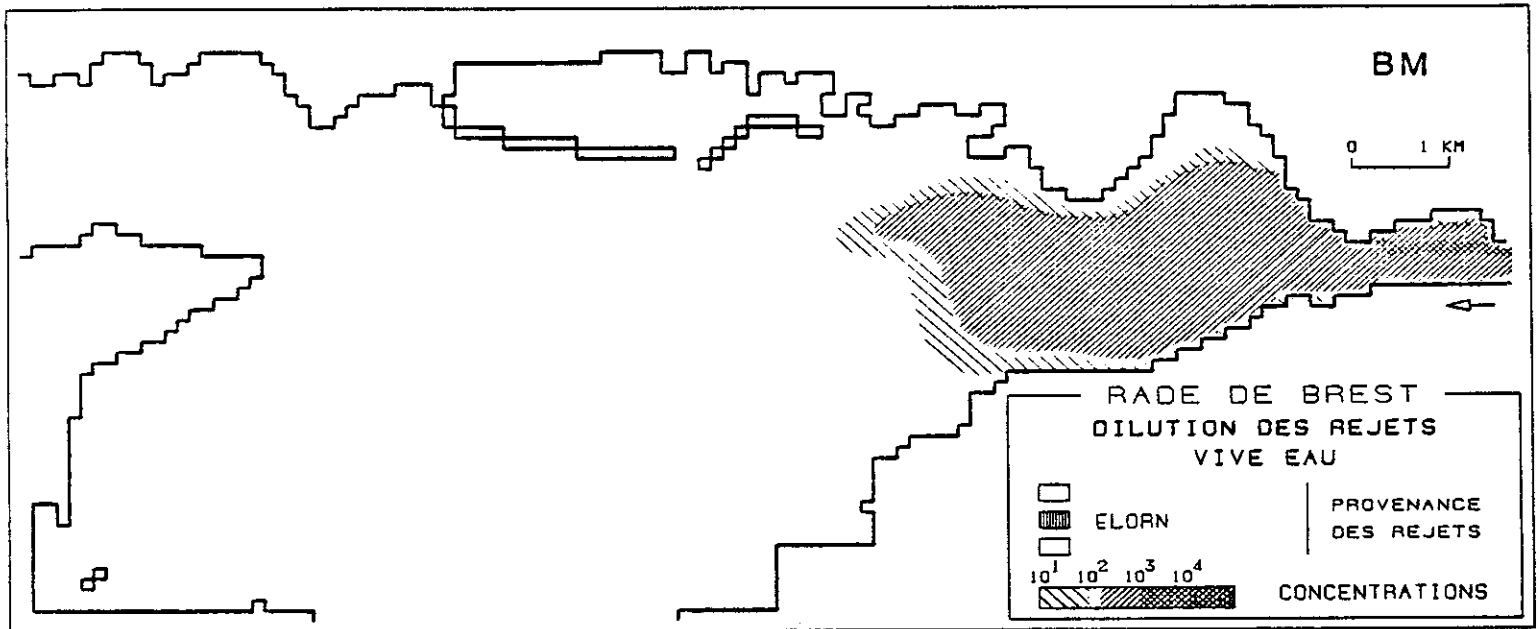


Fig.66 DILUTION DES REJETS "MOULIN BLANC" ET "KERHUON" VIVE EAU
effluent dégradable (T90 = 4 heures)



V - BASE DE DONNEES POUR L'EVALUATION DE L'IMPACT DES REJETS

Il s'agit ici de présenter les nombreux résultats obtenus pour les divers scénarios de rejet et surtout de donner quelques clés pour leur interprétation. En effet, l'impact des 7 rejets est représenté par l'évolution au cours du temps des concentrations en 19 points test pour 4 ou 5 conditions de rejet!

V.1. Avertissements

Il faut tout d'abord rappeler la multiplicité des conclusions que l'on peut apporter concernant un rejet, selon la position de la zone sensible que l'on considère et les conditions hydrodynamiques et climatiques du moment. En effet, pour un débit rejeté identique, une réduction des concentrations dans le champ proche du rejet entraîne une augmentation dans le champ lointain et inversement. Le scénario critique pourra donc être différent selon que le point test sera ou non situé à faible distance du rejet. De la même façon, un vent défavorable pour un secteur parce qu'il y entraîne les effluents devient favorable en un point situé dans la direction opposée par rapport au rejet.

En général on se placera dans le "sens de la sécurité" en recherchant la condition pour laquelle l'impact d'un rejet donné sera maximal.

V.1.1. Coefficient de dispersion

Pour les rejets en rade les simulations de vive eau ont été réalisées avec deux coefficients de dispersion (cf. § IV.1), l'un tiré des lois établies par Elder mais conduisant à des panaches très concentrés, l'autre plus élevé donnant des dilutions apparemment plus conformes à la réalité.

La figure 67 fournit des exemples représentatifs des "distorsions" d'impact liées à la valeur du coefficient de dispersion. 3 observations :

- les variations de concentration liée à un même rejet sont lissées lorsque le coefficient croit,
- un rejet très proche est légèrement plus dilué pour une grande dispersion (ex. : rejet du Moulin Blanc au point K),
- surtout, une augmentation de la dispersion relève fortement les concentrations induites par les rejets éloignés.

Pour aller dans le sens de la sécurité, il est donc préférable de considérer la simulation à forte dispersion, sauf s'il s'agit d'une zone sensible très proche du rejet (de l'ordre de 1 km).

La simulation caractérisée par une forte dispersion n'a pourtant été réalisée qu'en vive eau et pour un effluent non dégradé. En effet, en ce qui concerne les autres conditions de rejet, un accroissement de la dispersion aurait pour conséquence de réduire les écarts entre vive eau et morte eau, ou bien entre

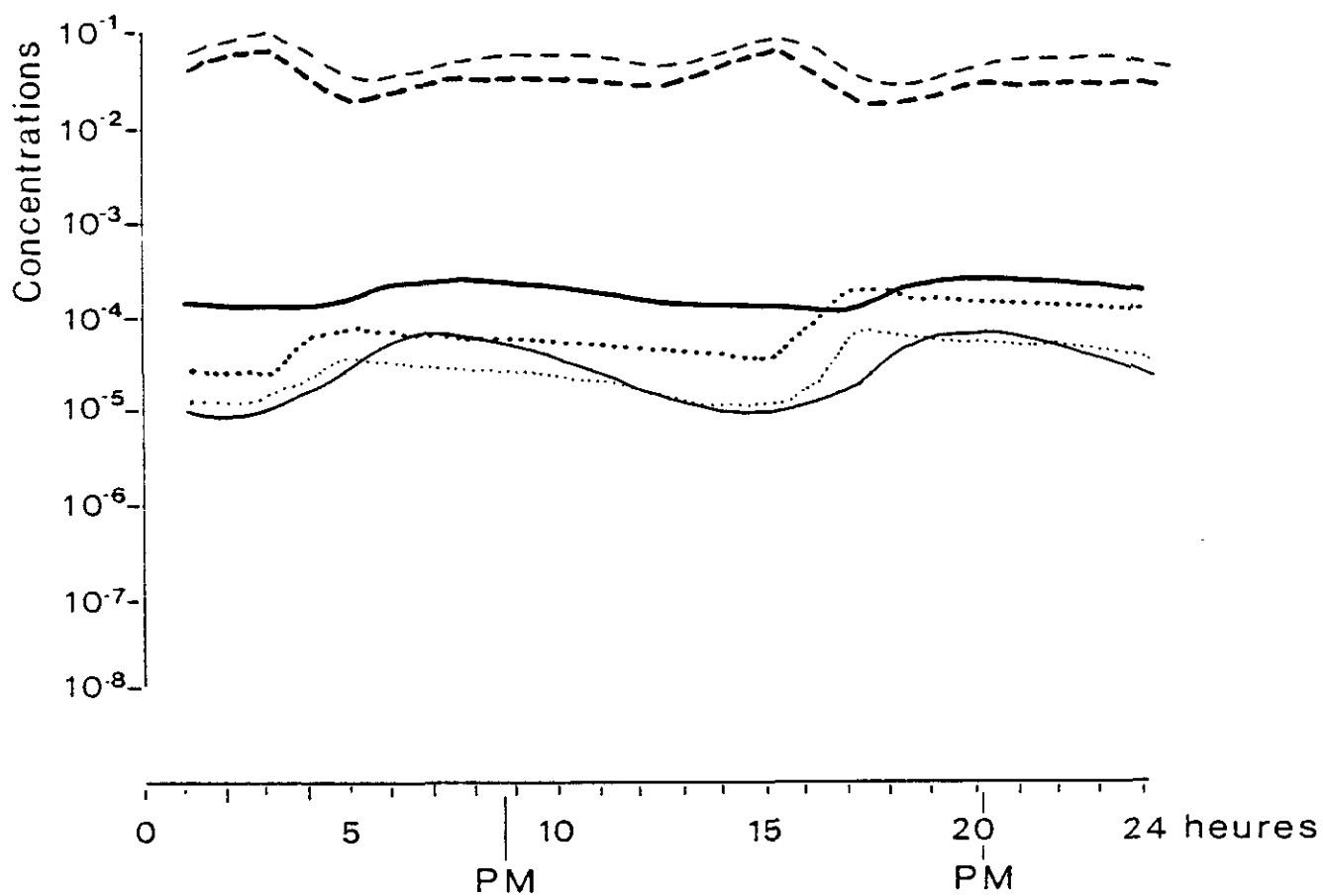
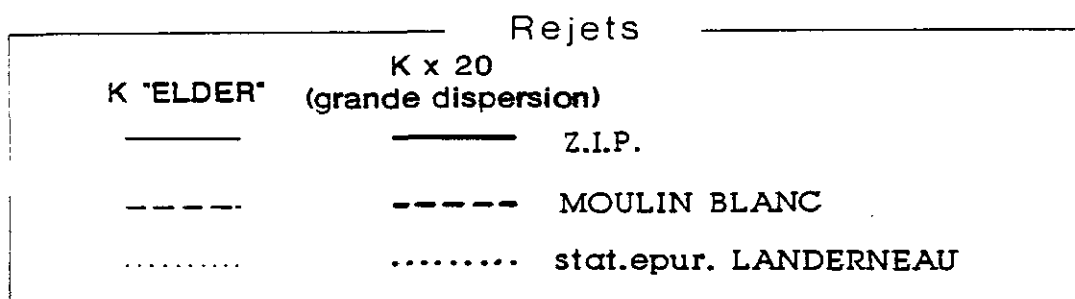
Fig. 67

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point K

Vive Eau

Dégradation : T 90 infini



forte ou faible dégradabilité. En effet la réduction du coefficient de marée entraîne un confinement des effluents près des rejets alors qu'une forte dispersion les en "écarter". De même la dégradabilité d'un constituant se traduit par une chute de la concentration en dehors du champ proche, ce que peut compenser une extension de ce dernier par augmentation de la dispersion.

En quelque sorte, les simulations correspondant à la morte eau ou à une dégradation des effluents, réalisées pour un faible coefficient de dispersion, constituent des situations extrêmes, par opposition à la simulation de vive eau et forte dispersion.

N.B. : les simulations du rejet de la S.E. de Maison Blanche, présentées plus loin, ne sont pas comparables pour l'effet du coefficient de dispersion. Le résultat relatif à la dispersion élevée correspond à un rejet implanté à l'extrémité aval de l'émissaire tandis que ceux relatifs à la faible dispersion ont été obtenus pour un rejet positionné à la côte, par erreur. C'est donc le premier scénario qui sera notre référence.

V.1.2. Choix du scénario

Le coefficient de marée

Le confinement des masses d'eau près du rejet en morte eau se traduit par des concentrations supérieures dans le champ proche et nettement inférieures ailleurs. Si donc le sens de la sécurité est recherché, les résultats en morte eau ne seront considérés qu'à faible distance des rejets.

La dégradabilité

Etant donnée la méconnaissance des processus de dégradation, la sécurité pousse à ne pas tenir compte des abattements de concentration qu'elle entraîne. Cependant lorsque l'on cherche à comparer l'impact d'un rejet important mais éloigné et celui d'un rejet plus proche à faible débit, la prise en compte d'une probable décroissance a pour conséquence de privilégier l'effet du dernier rejet.

VI.1.3. Incertitude sur les circulations résiduelles

Nous avons vu que le modèle de courant de la rade donnait une vitesse résiduelle de transport suspecte, 3 cm/s vers l'ouest en moyenne dans une section de l'estuaire aval ; soit une progression des masses d'eau de 2,5 km par jour environ. Ce déplacement résiduel entraîne une évacuation plus ou moins rapide - mais de toute façon à moyen ou long terme - des effluents qui arrivent dans le N-E de la rade. De ce temps de séjour dépend la concentration moyenne des contaminants, mais peu les pointes qui sont directement liées aux trajectoires des panaches pendant la marée. Il est d'ailleurs significatif que, lors des simulations, la non-stationarité du régime se traduise par une augmentation des faibles concentrations mais pas des maxima, tout au moins en valeurs relatives. Si donc on s'intéresse aux risques de contamination maximum, on peut considérer que l'imprécision sur

les résiduelles a peu de conséquence sur l'impact des rejets, sauf à grande distance, comme par exemple celui du rejet Maison Blanche dans le Moulin Blanc : mais dans ce cas les contaminations restent très faibles.

En ce qui concerne l'estuaire de l'Elorn, on a vu que la modification du courant résiduel pouvait provenir des effets de densité liés au débit de la rivière, et principalement en aval. La vitesse résiduelle de surface est alors dirigée vers l'aval avec des accroissements de vitesse allant de 20 cm/s en amont à 10 cm/s en aval pour un débit de crue, tandis qu'au fond du chenal un courant moyen vers l'amont s'établit à partir du 1/3 aval de l'estuaire. On peut en résumer les effets de la manière suivante :

- pour un rejet amont, il y a réduction de la concentration moyenne mais progression vers l'aval des maxima de BM, à raison de 3 km environ,
- pour un rejet en rade, on peut imaginer un transport des effluents vers l'Elorn par le fond du canal central puis une remontée vers la surface et ensuite une contamination des zones sensibles. En raison des plus faibles concentrations près du fond, nous négligeons ce phénomène.

Effet du vent

En général, un vent fort a une période de vie relativement courte. Soit par exemple à considérer le cas défavorable d'un vent de S-O atteignant 10 m/s pendant 20 h. On peut schématiquement considérer qu'en surface il repousse les effluents vers l'Elorn à une vitesse moyenne de 0,2 m/s (2 % de la vitesse du vent). En admettant que l'effet du vent se résume en surface à un transport unidimensionnel vers l'amont, les concentrations dans les secteurs sensibles de l'Elorn peuvent être assimilées à celles calculées plus en aval, en absence de vent, à une distance de 7 km (env. 10 heures x 0,2 m/s). Ainsi pour cet exemple, la concentration au point P provenant des rejets Maison Blanche, Rade abri ou Z.I.P. serait celle calculée par le modèle en J.

Pour le rejet du Moulin Blanc plus proche, il faudrait en outre appliquer un abattement dû à un étalement latéral du panache, la concentration d'origine étant celle calculée en L.

On peut alors appliquer la formule de dilution d'un rejet continu dans un courant uniforme où seule la dispersion transversale est prise en compte :

$$\frac{C}{C_0} = \frac{e^{-\eta^2/2(1+\xi)}}{\sqrt{1+\xi}} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \eta = y/\sigma_0 \\ \xi = 2 K_y x / U \sigma_0^2 \end{cases}$$

- où C_0 et σ_0 : concentration maximale et dimension caractéristique initiales du panache.
 x, y : coordonnées longitudinale et transversale.
 K_y : coefficient de dispersion.
 U : courant permanent

Application numérique compatible à notre cas d'étude :

$U = 0,2 \text{ m/s}$ $K_y : 5 \text{ m}^2/\text{s}$ $\sigma_0 = 200 \text{ m}$ $C_0 = \text{concentration}$ au point "L"		sur l'axe de la trajectoire ($y = 0$) $C/C_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,00125 x}}$
---	--	---

pour $x = 7\ 000 \text{ m}$ (distance parcourue entre L et P) ce qui correspond au transport maximal par le vent, $C/C_0 = 0,3$.

En ce qui concerne les rejets de l'Elorn, le même type de calcul peut être effectué : on obtient l'enveloppe des concentrations maxima dans l'estuaire en transportant dans le sens du vent, sur une distance analogue à celle obtenue en rade (i.e) de 7 km, le maximum de concentration obtenu lorsque le panache du rejet a pour dimension caractéristique la largeur de l'estuaire (car alors la dispersion transversale peut être négligée).

On voit que les effets du vent peuvent prendre beaucoup d'importance mais il faut insister sur leur caractère exceptionnel.

V.1.4. Contamination par les remises en suspension

Les conclusions qui peuvent être données sur l'impact relatif d'un rejet en considérant les seuls éléments dissous sont-elles susceptibles d'être remises en cause lorsque sont pris en compte d'éventuels relargages de contaminants par les sédiments en suspension ?

Il a été constaté que lors des tempêtes ou en vive eau, tandis que la houle ou les courants remettent en suspension des sédiments, le nombre de bactéries augmente, parfois de manière considérable (CNEOX, 1983).

Par ailleurs une étude portant sur l'observation de bactéries dans l'estuaire de l'Elorn a montré la part importante (> 80 %) des bactéries "liées", c'est-à-dire fixées sur du matériel particulaire, en général de la matière organique (POMMEPUY, 1983). En outre, en ce qui concerne les coliformes fécaux, l'adsorption semble indifférente aux teneurs en matière en suspension, la part des bactéries libres étant la même au niveau du rejet et dans l'estuaire.

En l'absence d'éléments plus précis sur le comportement des bactéries et sur le transport des sédiments, on peut seulement préconiser une décontamination des sédiments, en jouant sur deux tableaux :

- limiter les rejets de bactéries liées grâce à des décantations préalables,
- éviter de rejeter dans certains secteurs, aux moments où les teneurs en matière en suspension (M.E.S.) sont fortes.

Le problème est d'autant plus aigu que les concentrations en MES sont élevées. Compte tenu des disproportions entre les teneurs de la rade (pratiquement toujours inférieures à 50 mg/l - CNEXO, 1983) et celles de l'Elorn qui atteignent 1 500 mg/l en vive eau (L'YAVANC, 1984), les rejets les plus concernés sont ceux de l'estuaire de l'Elorn et plus particulièrement ceux de la Forest et de Landerneau.

Un examen de l'évolution longitudinale des M.E.S. au cours d'un cycle de marée de vive eau (L'YAVANC, 1984) montre un maximum de turbidité au niveau de La Forest en début de flot (PM-5). Or le test de sensibilité à l'instant de rejet de l'impact des effluents de La Forest et de Landerneau a montré une préférence pour les rejets à mi-flot (cf. § IV-8 et 9). Il y a donc compatibilité entre cet optimum relatif au "compartiment dissous" et les contraintes dues aux MES : on peut conseiller un rejet massif après la pointe de début de flot.

N.B. : En ce qui concerne le rejet du Moulin Blanc, qui affecte une zone de baignade où les teneurs en matière organique particulaire sont non négligeables à basse mer, on peut adopter l'une des attitudes suivantes :

- 1) Aménager une décantation des eaux du Vallon,
- 2) Eviter de rejeter au moment de la basse mer,
- 3) Les remises en suspension ayant lieu pendant les tempêtes, accepter une contamination du milieu à un moment de faible utilisation de la plage. (Le risque concernant les véliplanchistes étant par ailleurs très faible).

V.2. Exemple d'interprétation des résultats

Pour illustrer les possibilités d'exploitation des calculs de dilution, nous nous proposons de quantifier l'impact des principaux rejets dans le scénario de base (cf. § V-1) que constitue la simulation en vive eau des dilutions d'effluents conservatifs, avec des flux rejetés réalistes. Les autres scénarii ne seront pas discutés, mais les résultats correspondants sont présentés en annexe.

V.2.1. Rappel des flux de rejets

Les flux considérés sont les flux moyens de coliformes fécaux (CF), tels que proposés par le cabinet SAUNIER Eau et Environnement (1986) pour la période humide. Ils sont rappelés dans le tableau ci-après :

Rejet	flux en CF/heure	flux en "unités" **	facteur ***
S.E. Maison Blanche	$2,7 \cdot 10^{12}$	$7,5 \cdot 10^8$	$7,5 \cdot 10^4$
Rade Abri	$6 \cdot 10^{13}^*$ / $1,3 \cdot 10^{12}$	$1,7 \cdot 10^{10}$ / $3,6 \cdot 10^8$	$1,7 \cdot 10^6$ / $3,6 \cdot 10^4$
Z.I.P.	$5 \cdot 10^{12}$	$1,4 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^5$
Moulin Blanc	$1,5 \cdot 10^{11}$	$4,2 \cdot 10^7$	$4,2 \cdot 10^3$
Kerhuon	$5 \cdot 10^{12}$ * / 10^{12}	$1,4 \cdot 10^9$ / $2,8 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^5$ / $2,8 \cdot 10^4$
La Forest	$3,6 \cdot 10^{10}$	10^7	10^3
Landerneau	10^{12}	$2,8 \cdot 10^8$	$2,8 \cdot 10^4$

* Il s'agit probablement de flux exceptionnels, liés à de fortes pluies.

** Les simulations ont été réalisées pour un rejet "unité", i.e. 1/ seconde. Dans cette colonne est donc inscrit le facteur par lequel doivent être multipliées les concentrations (en /m³) pour tenir compte du flux réel.

*** Idem - Facteur à utiliser pour avoir la concentration en "/100 ml" (unité habituellement utilisée en bactériologie)..

Rappelons aussi que la norme concernant la contamination maximale des coquillages est schématiquement 300 CF/100 ml de chair. Si l'on admet un facteur de concentration par les filtreurs voisin de 30 (valeur fréquemment rencontrée dans la littérature), la norme dans l'eau devrait être 10 CF/100 ml : ce sera notre "nombre guide" pour les eaux conchylicoles. En ce qui concerne les eaux de baignade, le nombre guide est 100 CF/100 ml.

N.B. : La notion de concentration de polluants par les organismes filtreurs est extrêmement mal connue, voire contestable, tout particulièrement en ce qui concerne les bactéries. La comparaison entre concentrations dans l'eau et contamination dans les coquillages pour le secteur conchylicole de l'Elorn indique un rapport de 3 environ (cf. annexe 6). Cette valeur résulte de mesures trop peu nombreuses et trop déconnectées dans le temps pour qu'on puisse la proposer comme facteur de concentration locale. Cependant, on peut considérer que le choix d'un facteur 30, conforme à la "littérature", va dans le sens de la sécurité.

V.2.2. Evaluation des impacts respectifs des principaux rejets, dans le cas vive eau/effluent conservatif

Les figures 68 à 82 présentent l'évolution au cours de la marée des concentrations d'effluents relatifs aux principaux rejets, en 15 points test positionnés sur la figure 37. Nous allons discuter les résultats obtenus dans les zones les plus sensibles, en tenant compte des flux proposés au § V.2.1. (Il suffit de multiplier les concentrations par les facteurs du tableau. Pour faciliter cette opération, un transparent comportant le niveau des flux de chaque rejet est joint au rapport. Mode d'emploi : superposer le transparent à la figure de dilution en faisant coïncider concentration calculée du rejet et niveau du flux correspondant ; la concentration réelle est lue sur l'axe des ordonnées de la figure de dilution au niveau du flux de référence 10^0).

Point B (fig. 69) (anse et plage de Ste Anne)

On retrouve naturellement les effets dominants des rejets de Brest. Dans le cas général, c'est le rejet Maison Blanche qui contamine le plus, avec des pointes de l'ordre de 5 CF/100 ml. La norme correspondant aux eaux de baignade semble donc satisfaite. Dans le cas d'un rejet important de la rade abri dû à de fortes pluies, on obtient une concentration maximale de 40 CF/100 ml qui peut être considérée comme une limite acceptable.

Point C (fig. 70) (anse de Maison Blanche)

Ici le rejet de la station d'épuration, très proche, peut induire des concentrations de l'ordre de 10 CF/100 ml et celui de la rade abri environ 60 CF/100 ml en période de grande pluie.

Point F (fig. 73) (passe est de la rade abri)

On note qu'en ce point, pour un flux de rejet identique, l'influence du rejet de la Z.I.P. est plus forte que celle de la rade abri.

Point G (fig. 74) (zone de concession conchylicole).

En ce point les variations au cours de la marée sont grandes. Compte tenu des flux rejetés, c'est la Z.I.P. qui induit la concentration maximale, de l'ordre de 60 CF/100 ml, qui dépasse le nombre guide que l'on s'était fixé.

(N.B. : si le flux exceptionnel de 6.10^{13} CF/heure est retenu pour le rejet rade abri, la concentration induite en G est alors 400 CF/100 ml).

Point I (fig. 76) (secteur conchylicole de Kéraliou)

On observe nettement les évolutions inverses des concentrations au cours de la marée selon la position de la source : si celle-ci est à l'ouest (Maison Blanche, Rade Abri...)

le maximum est atteint à PM ; dans le cas contraire, le maximum a lieu à BM. Les taux maxima de contamination, ici encore provoqués par les rejets Z.I.P. et (exceptionnellement) Rade Abri, sont comparables à ceux du point G. Toutefois les teneurs élevées relatives au rejet de Landerneau montrent que, si dans ce scénario le rejet de Kerhuon avait été traité, il aurait induit de très fortes concentrations en I.

Point K (fig. 78) (à l'ouest de la plage du Moulin Blanc)

Ici bien sûr, le rejet du Vallon du Stangalarc'h domine, avec des concentrations de l'ordre de 300 CF/100 ml, donc supérieures au nombre guide des zones de baignade.

Point L (fig. 79) (à l'est de la plage du Moulin Blanc)

En ce point voisin du précédent, la compétition est vive entre les rejets du Moulin Blanc, de la Z.I.P., et ... de Landerneau, avec des concentrations maximales respectives de 15, 60 et 8 CF/100 ml. Pour ce scénario le rejet de Kerhuon n'a pas été traité : compte tenu de son flux important et de sa proximité - en comparaison avec le rejet Landerneau - il contribue pour une part importante à la contamination du Moulin Blanc (la figure A12 en annexe montre qu'avec une faible dispersion, la concentration induite en "L" par le rejet Kerhuon est environ 10 fois supérieure à celle du rejet Landerneau). Enfin si l'on attribue au rejet rade abri le flux correspondant aux fortes pluies, on obtient des concentrations comprises entre 100 et 200 CF/100 ml.

On retient donc que les concentrations dans le Moulin Blanc sont largement susceptibles de dépasser le nombre guide des zones de baignade, et que les rejets incriminés sont nombreux et d'un poids équivalent.

Points M (fig. 80) et N fig (81) (rives nord et sud de l'Elorn, entre le pont de Plougastel et "le Passage")

La comparaison entre les deux figures montre que les maxima de concentrations sont toujours supérieurs en N à ceux de M, quelle que soit la provenance de l'effluent : c'est probablement parce que les courants sont plus faibles au point M qui est ainsi "hors de portée" des concentrations plus fortes que voit le point N.

Point P (fig. 83) (en face du rejet de l'étang de Kerhuon)

Point Q (fig. 84) (au niveau de la Tourelle St Jean)

Point R (fig. 85) (amont du secteur conchylicole)

Sur les figure 83 à 85 la présentation des résultats est différente : l'échelle des concentrations est linéaire et les valeurs dans le chenal et sur les rives de l'Elorn sont données.

La concentration provenant de la rade abri est faible et ici le maximum induit en période de forte pluie (de l'ordre de 100 CF/100 ml au point P) est théorique car la permanence du flux de pointe qu'il sous-entend est irréaliste. Les maxima liés aux autres rejets sont donnés dans le tableau suivant :

Point Rejet	P	Q	R
Z.I.P.	28	21	faible
Moulin Blanc	9	6,3	2,5
Kerhuon Kerhuon (forte pluie)	4000 20000	560 2800	560 2800
La Forest (rejet continu)	20	70	120
Landerneau (Rejet continu)	120 *	2800	6000

Unité : CF/100 ml

* La concentration induite est probablement supérieure car en ce point le régime stationnaire n'est pas encore atteint.

Ces valeurs obtenues en attribuant aux bactéries un comportement conservatif sont du même ordre que les concentrations mesurées par la cellule anti-pollution de la DDE.

On observe le taux très élevé de la contamination dans l'Elorn, et le rôle majeur des rejets de Kerhuon et de Landerneau. Cependant on peut remarquer que les maxima sont en général atteints lors de la basse mer, peut être lorsque les parcs sont hors d'eau. Il est possible d'affiner les résultats en un point donné, en recherchant, sur les figures 83, 84 ou 85, la concentration maximale atteinte pendant la durée où le point considéré est en eau.

N.B. : Il paraît surprenant qu'au point Q (fig. 84) la dilution du rejet de Landerneau puisse être plus faible que celle du rejet de La Forest pourtant plus proche : c'est parce que le rejet de Landerneau a lieu dans une section de l'estuaire plus petite que celui de la Forest : il est alors plus concentré.

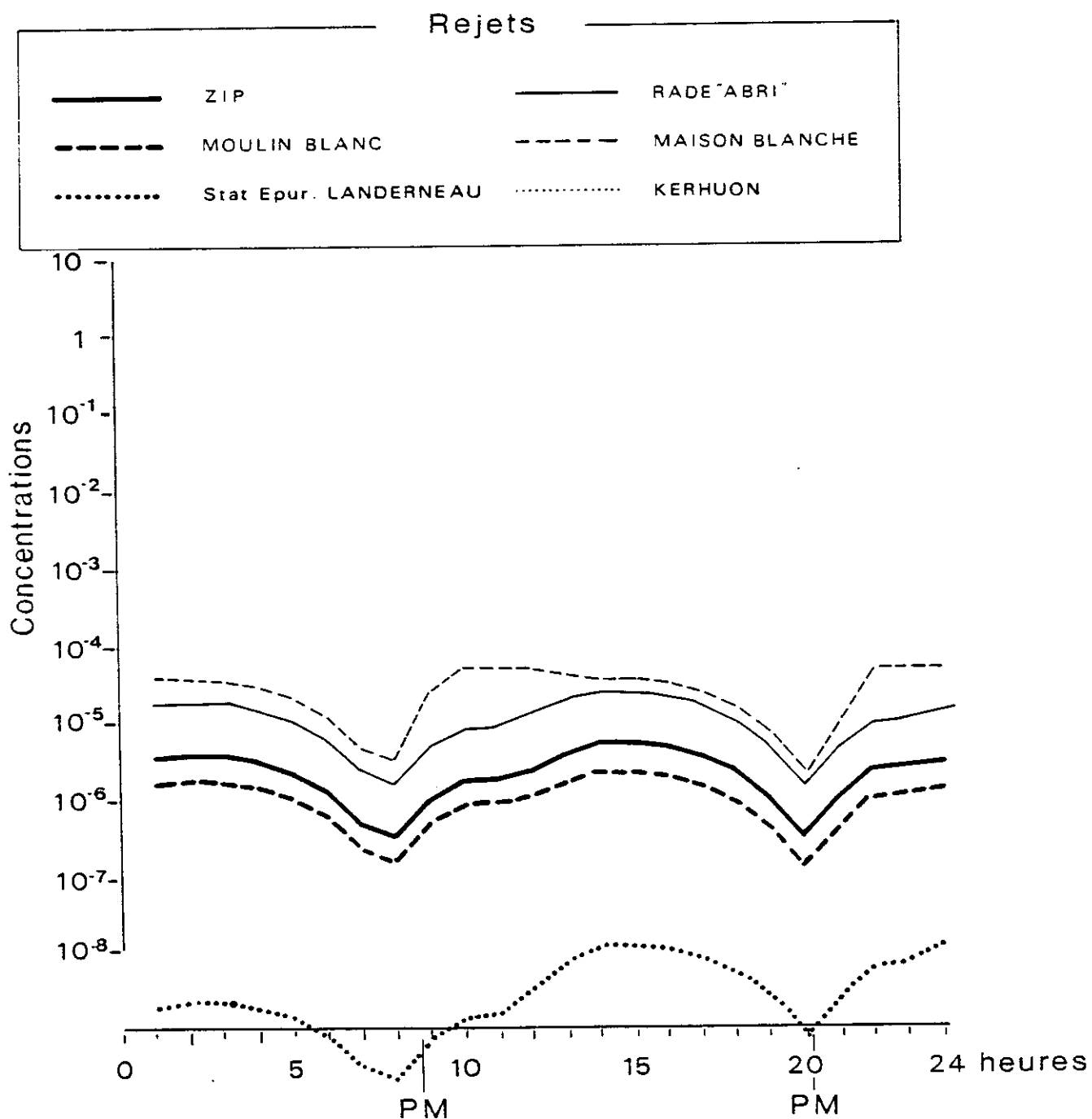
Fig. 68

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point A

Vive Eau

Dégradation : T 90 infini

Grande dispersion ($\times 20$)

pour le rejet de Landerneau, le régime stationnaire n'est pas encore atteint

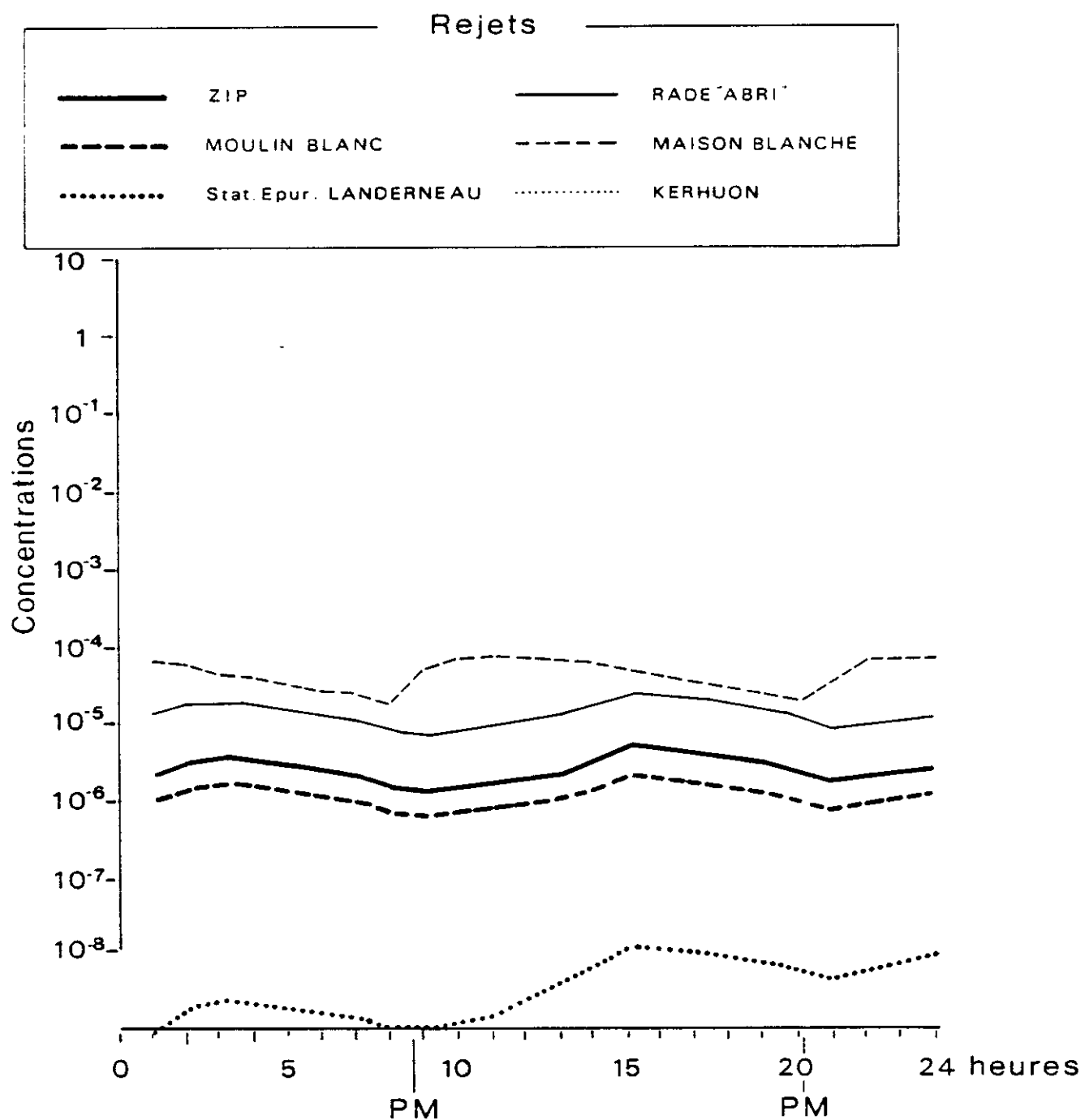
Fig. 69

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point B

Vive Eau

Dégradation : T 90 infini

Grande dispersion ($\times 20$)

pour le rejet de Landerneau, le régime stationnaire n'est pas encore atteint

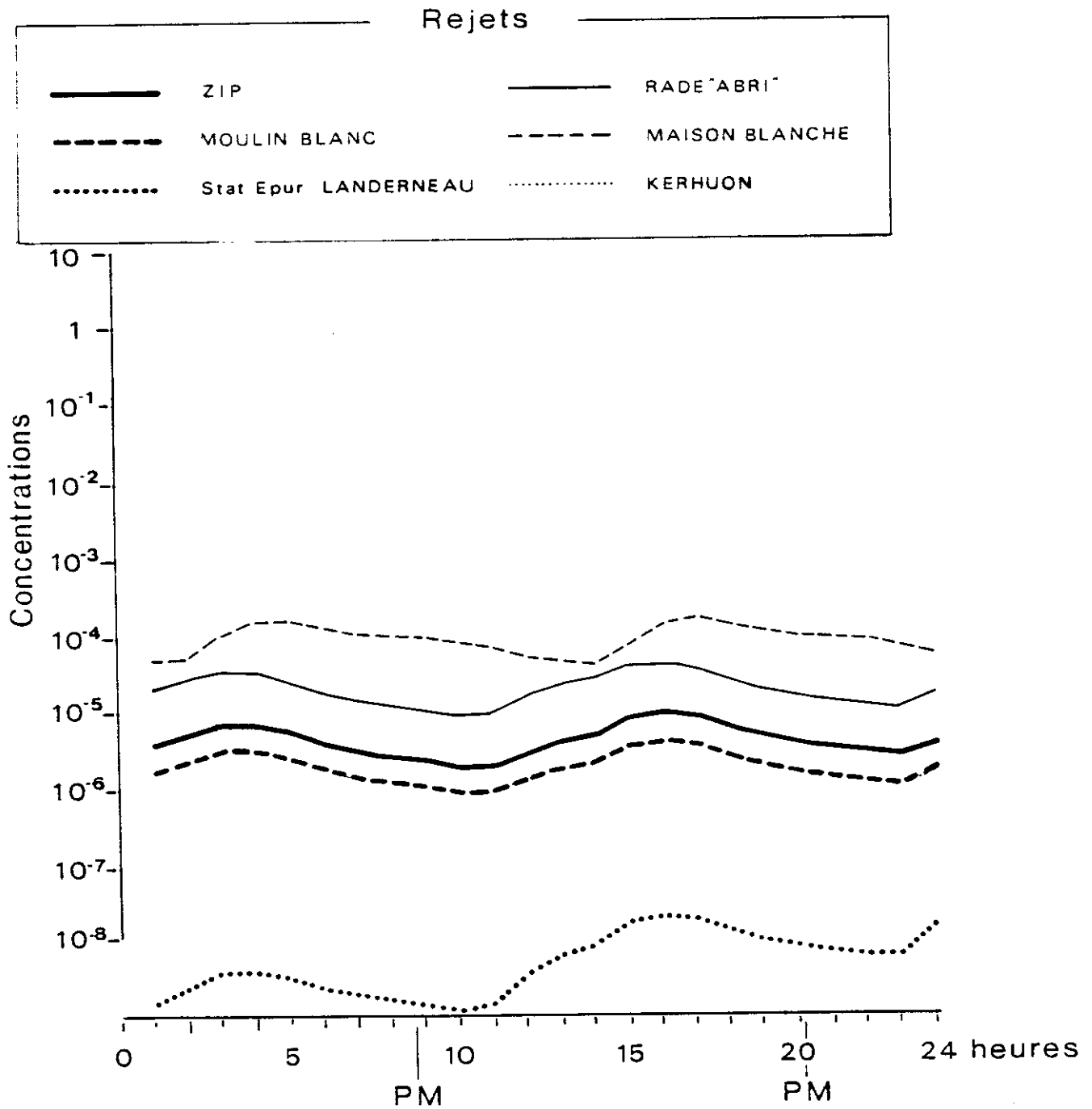
Fig. 70

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point C

Vive Eau

Dégradation : T 90 infini

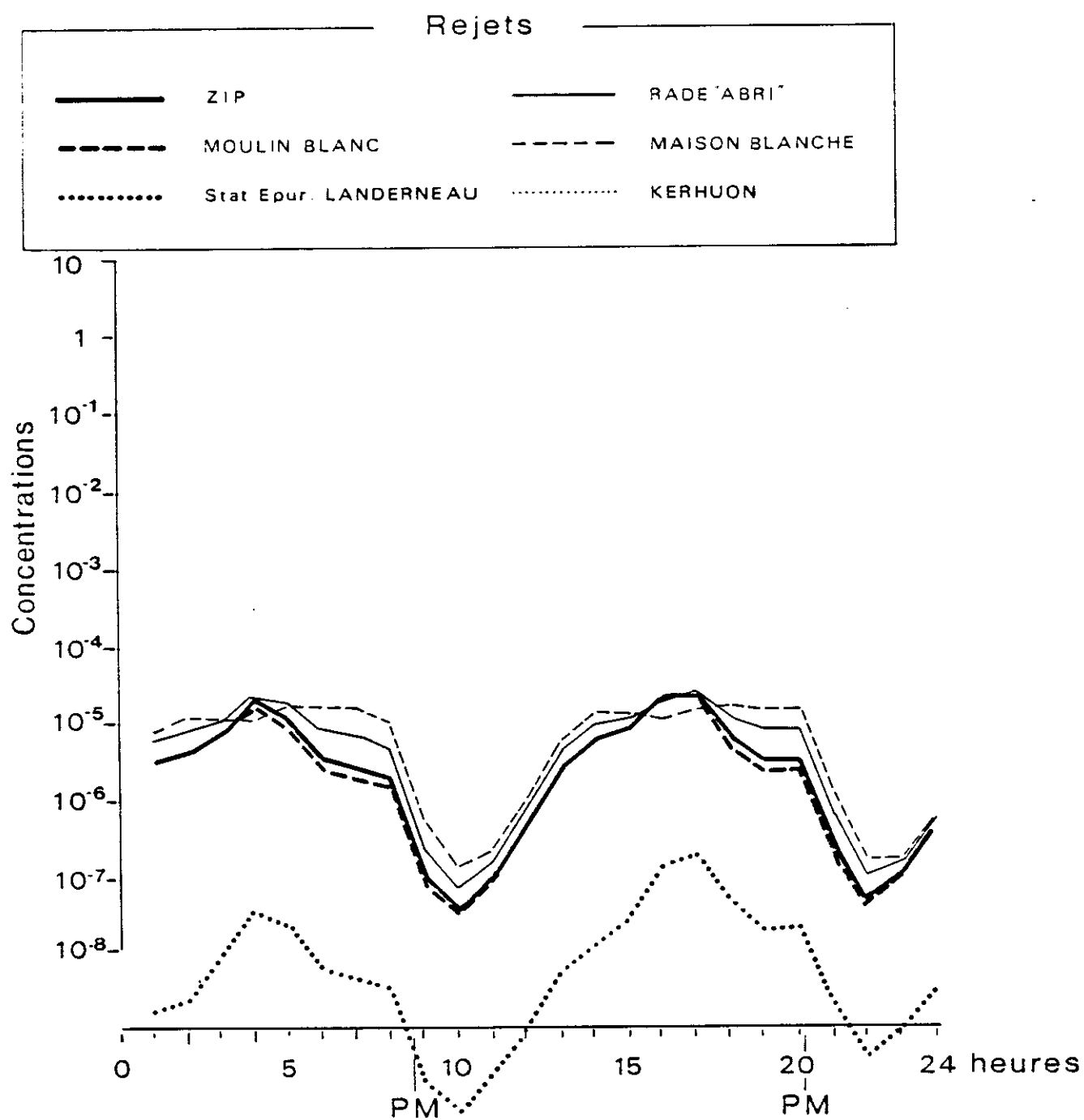
Grande dispersion ($\times 20$)

pour le rejet de Landerneau, le régime stationnaire n'est pas encore atteint

Fig. 71

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point D | Vive Eau
Dégradation : T 90 infini
Grande dispersion ($\times 20$)

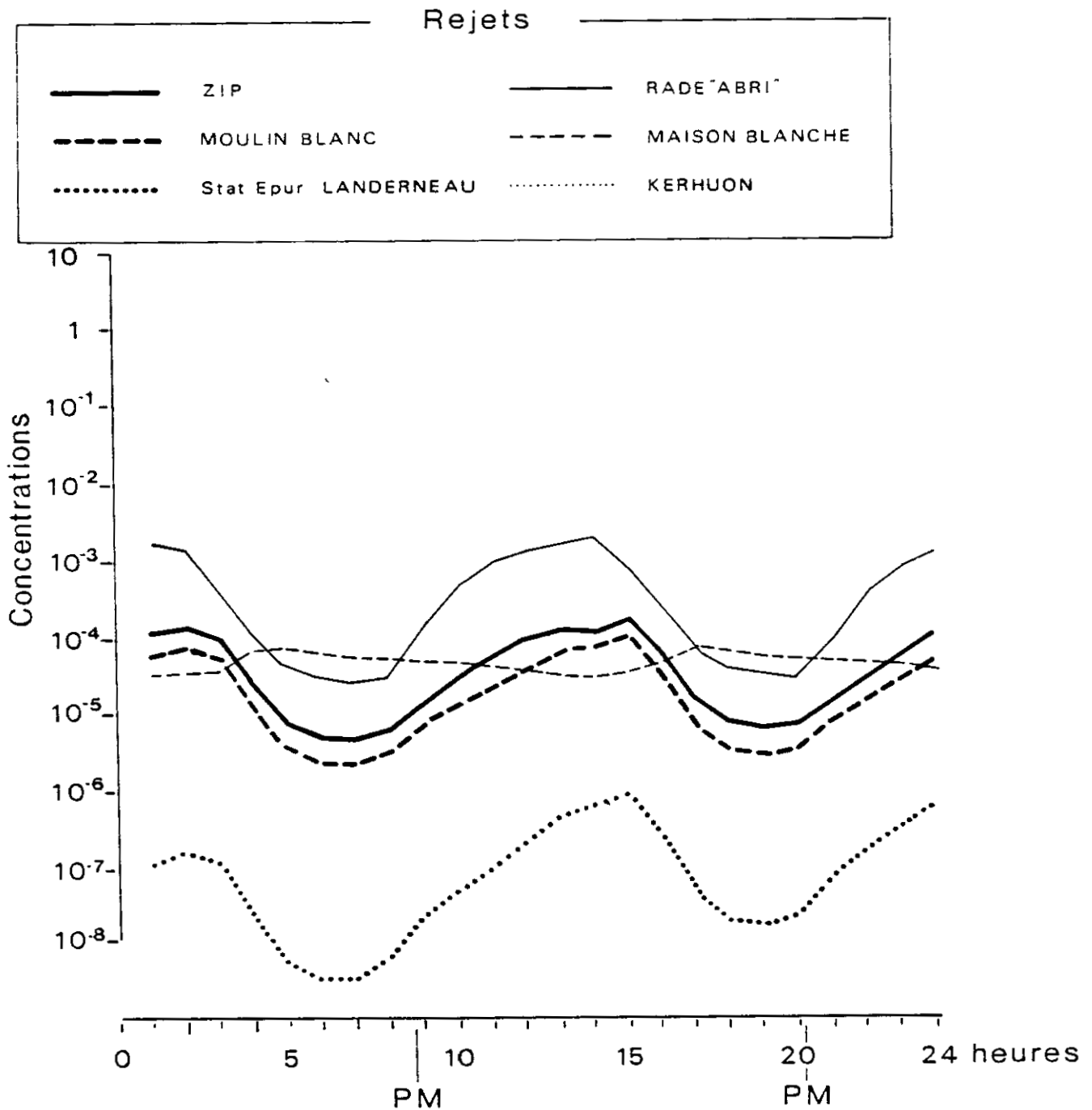


pour le rejet de Landerneau, le régime stationnaire n'est pas encore atteint

Fig. 72

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point E | Vive Eau
 | Dégradation : T 90 infini
 | Grande dispersion ($\times 20$)



pour le rejet de Landerneau, le régime stationnaire n'est pas encore atteint

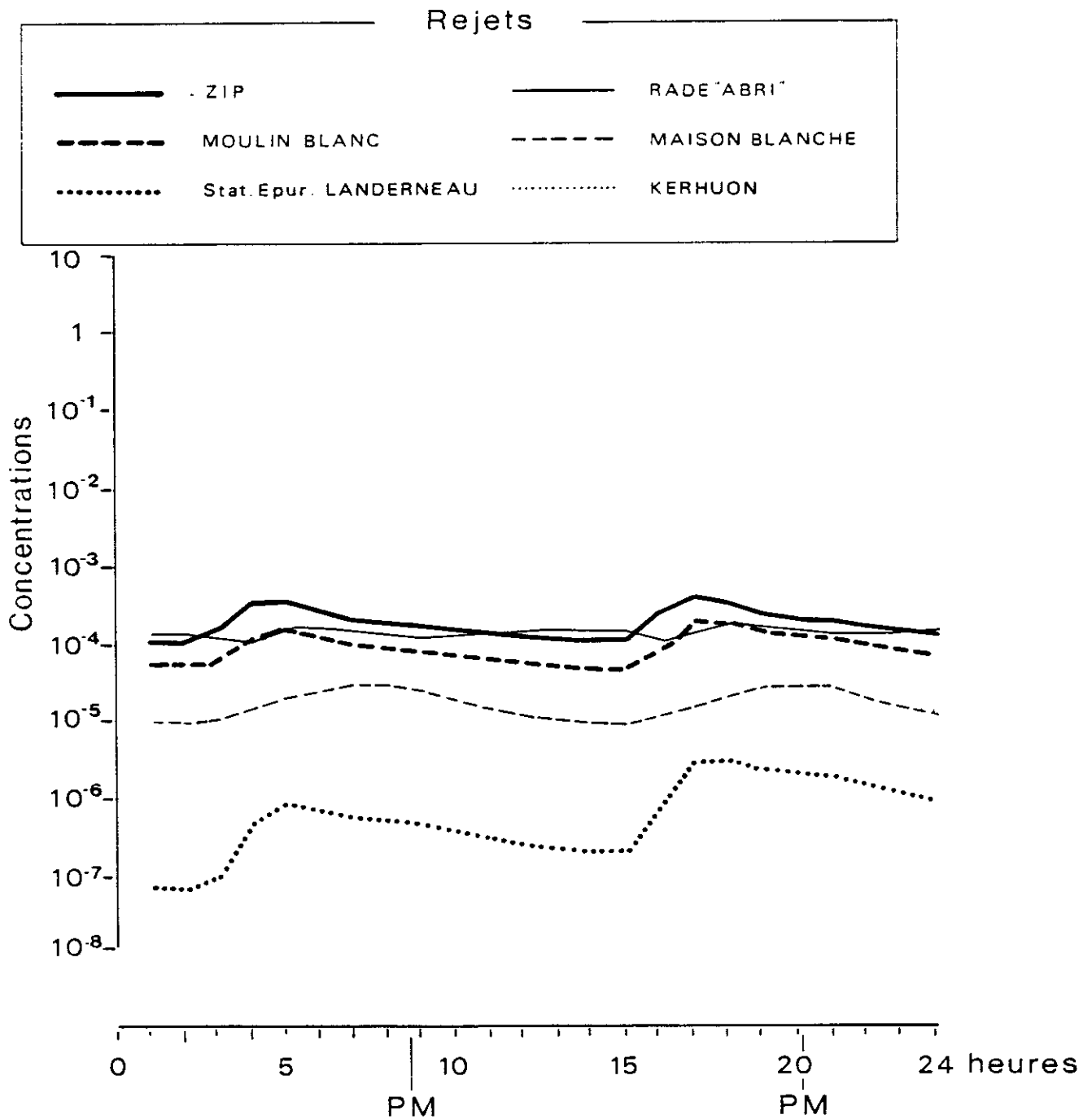
Fig. 73

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point F

Vive Eau

Dégradation : T 90 infini

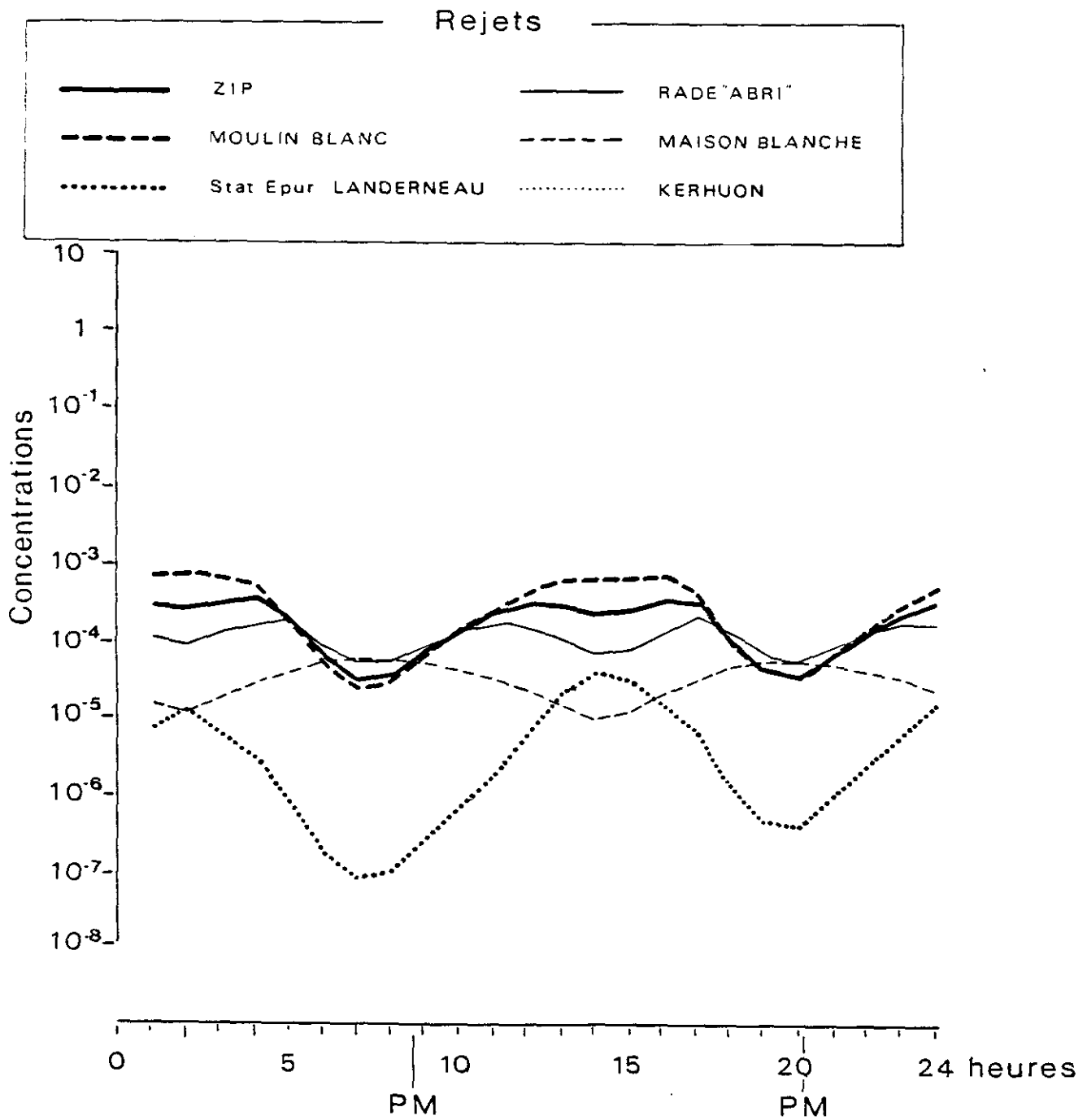
Grande dispersion ($\times 20$)

pour le rejet de Landerneau, le régime stationnaire n'est pas encore atteint

Fig. 74

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point G | Vive Eau
Dégradation : T 90 infini
Grande dispersion ($\times 20$)

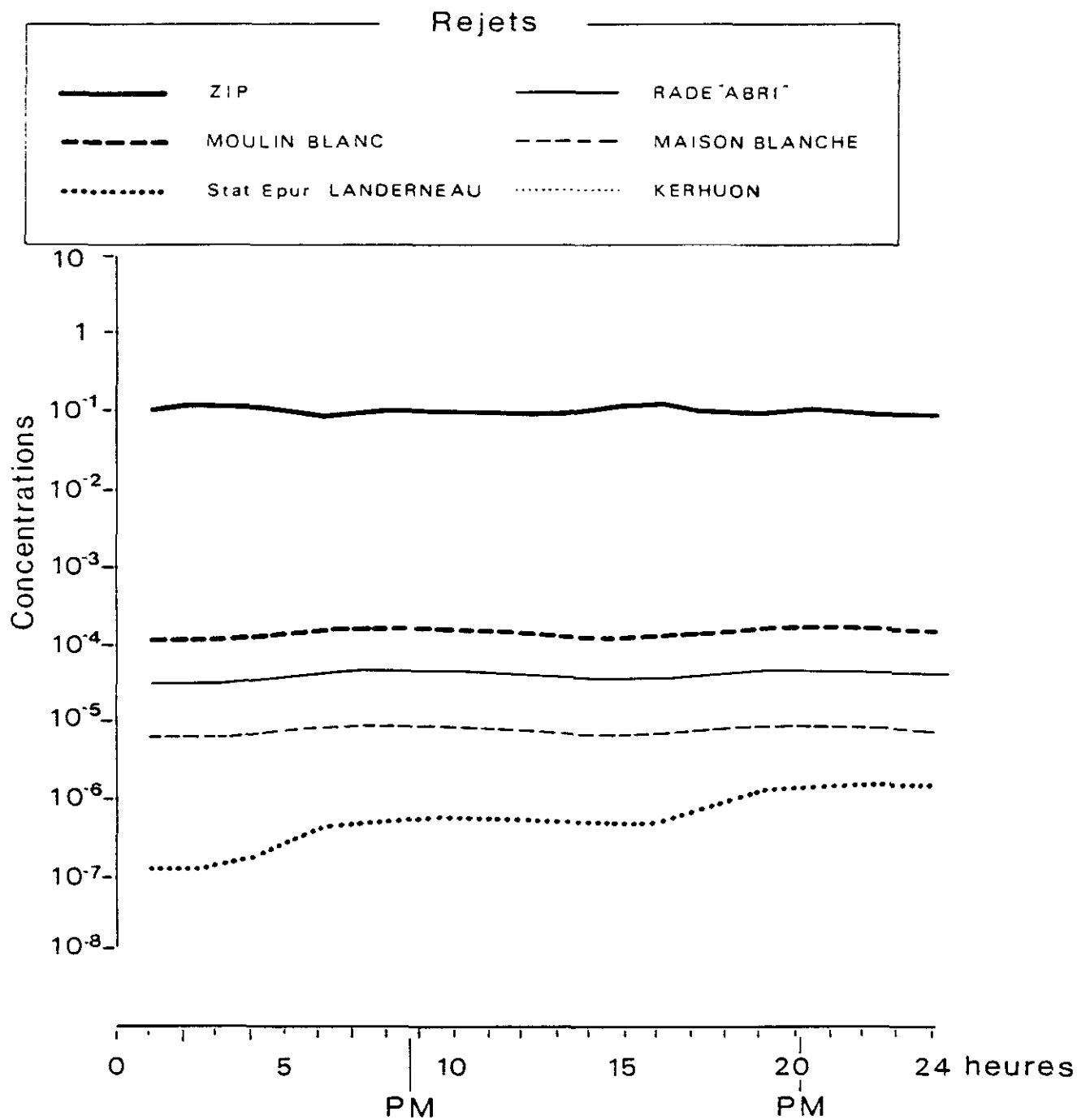


pour le rejet de Landerneau, le régime stationnaire n'est pas encore atteint

Fig. 75

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point H | Vive Eau
Dégradation : T 90 infini
Grande dispersion ($\times 20$)

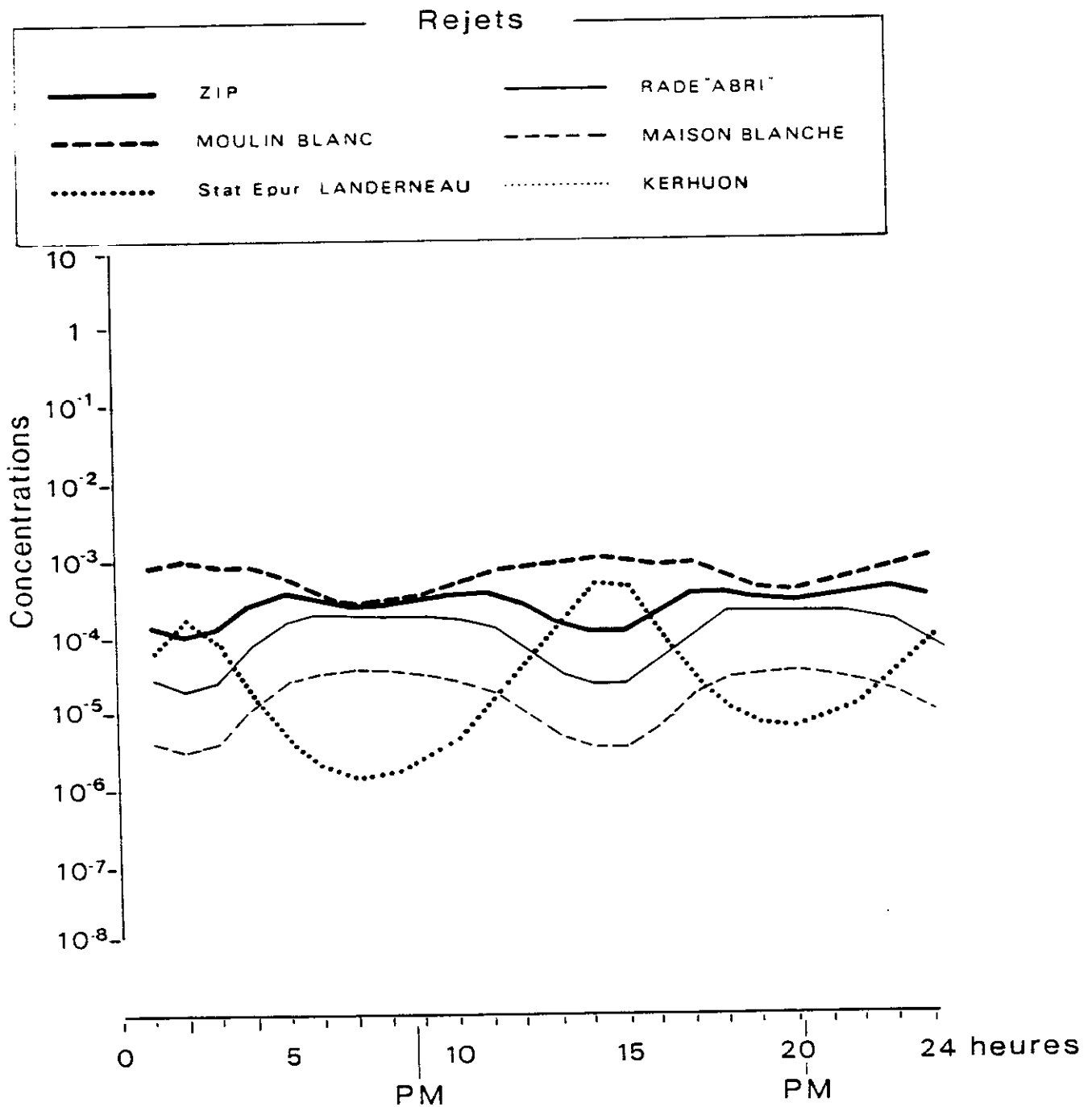


pour le rejet de Landerneau, le régime stationnaire n'est pas encore atteint

Fig. 76

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point I | Vive Eau
Dégradation : T 90 infini
Grande dispersion ($\times 20$)



pour le rejet de Landerneau, le régime stationnaire n'est pas encore atteint

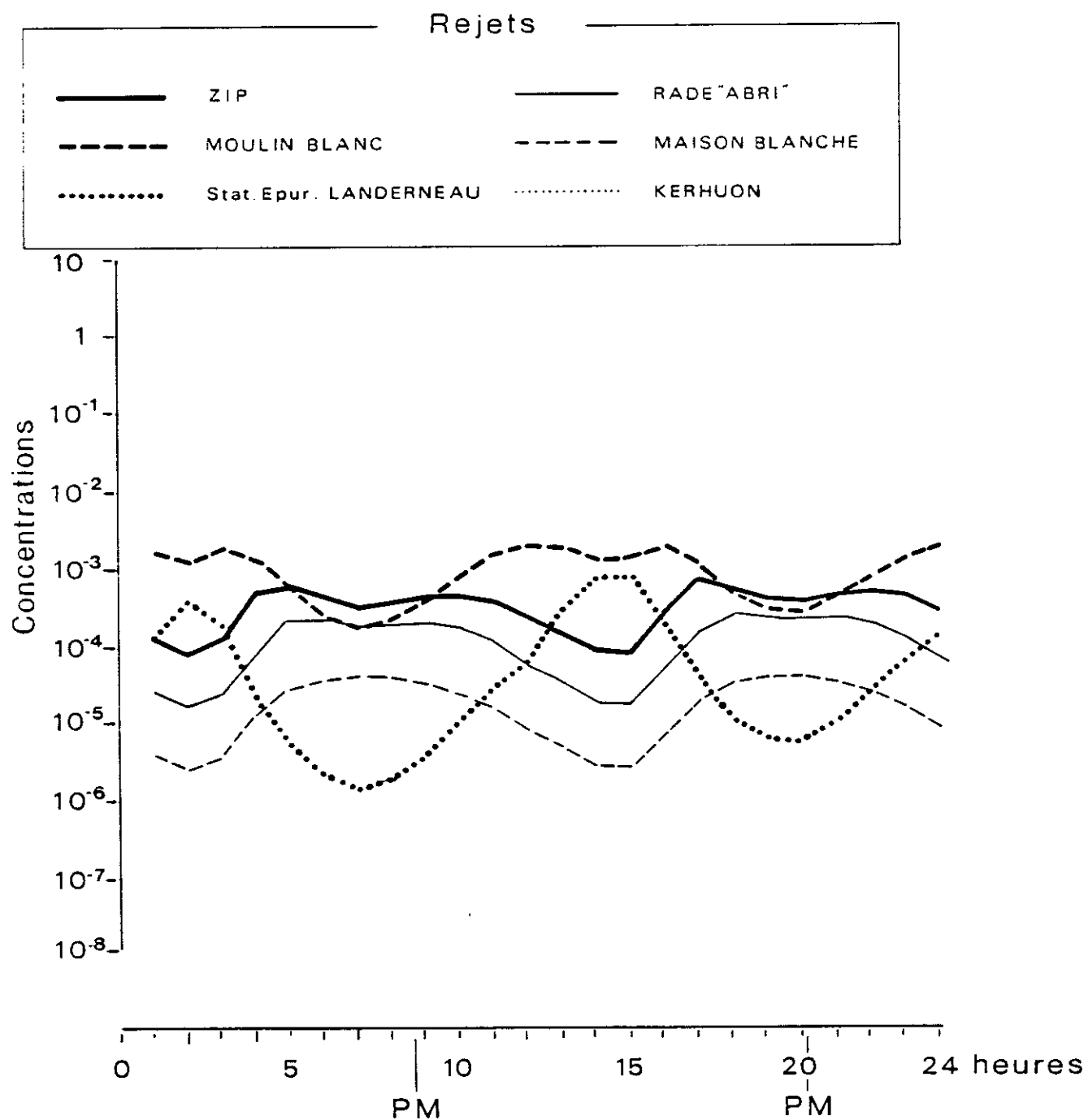
Fig. 77

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point J

Vive Eau

Dégradation : T 90 infini

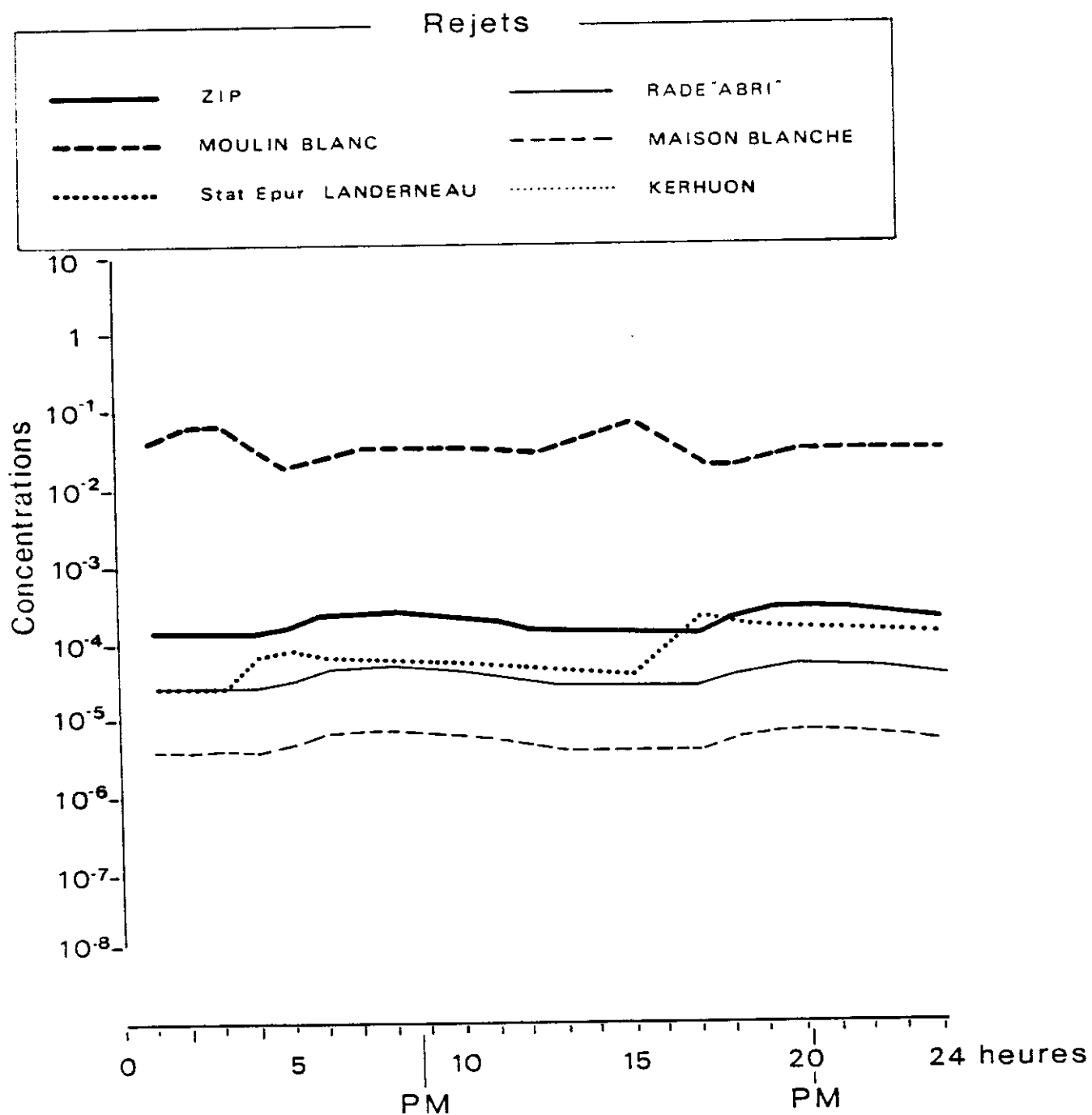
Grande dispersion ($\times 20$)

pour le rejet de Landerneau, le régime stationnaire n'est pas encore atteint

Fig. 78

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point K | Vive Eau
Dégradation : T 90 infini
Grande dispersion ($\times 20$)



pour le rejet de Landerneau, le régime stationnaire n'est pas encore atteint

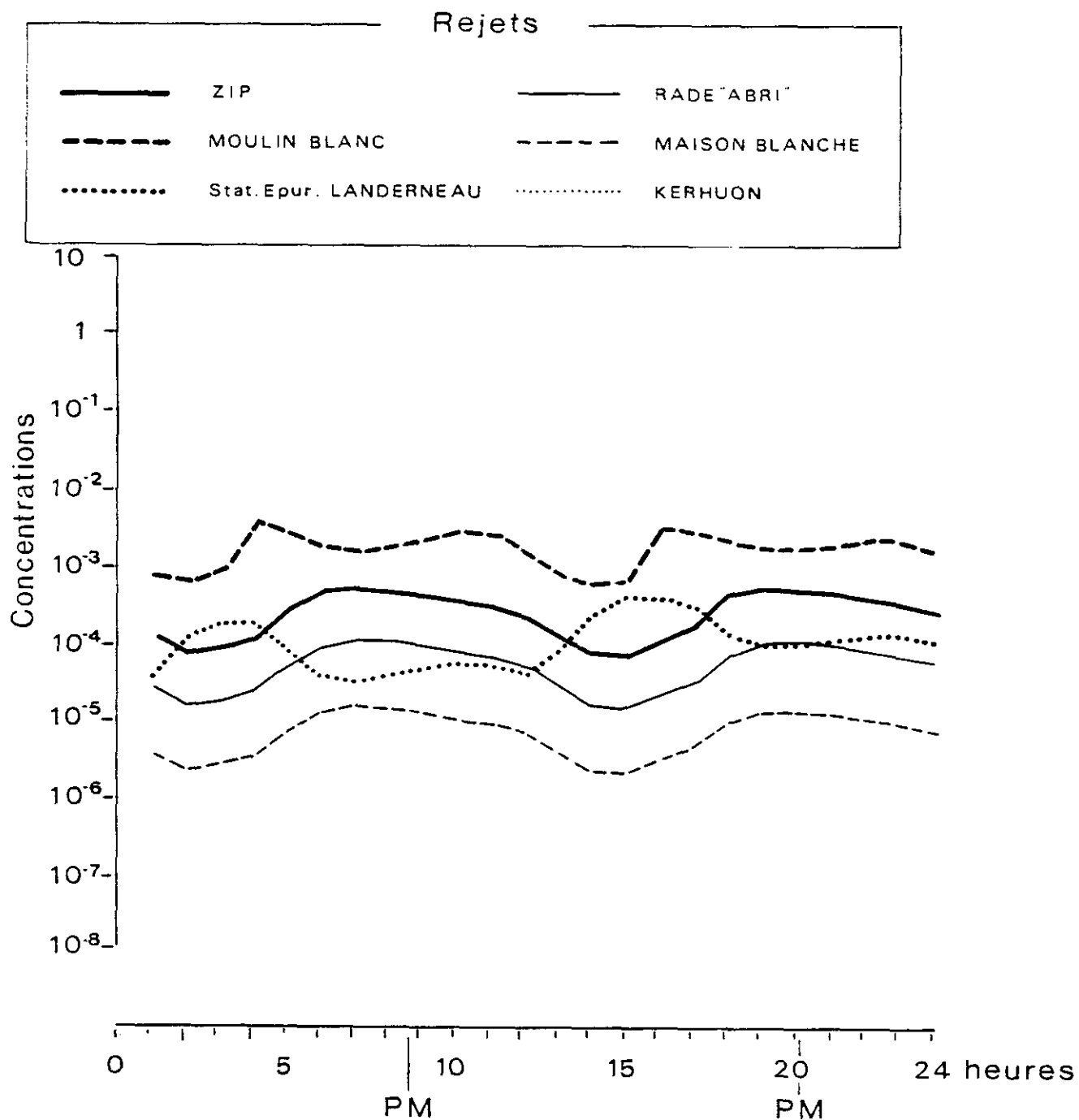
Fig. 79

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point L

Vive Eau

Dégradation : T 90 infini

Grande dispersion ($\times 20$)

pour le rejet de Landerneau, le régime stationnaire n'est pas encore atteint

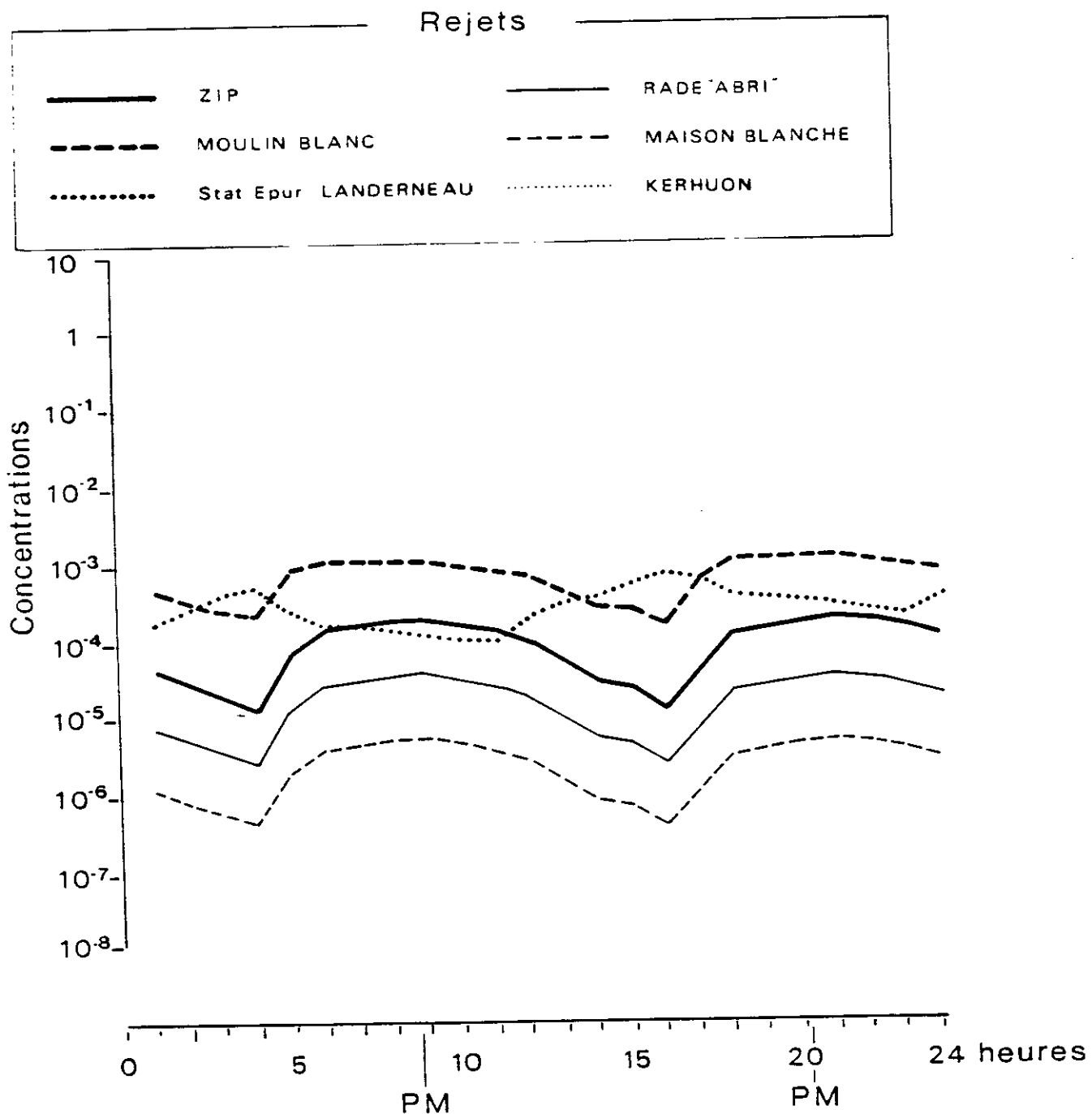
Fig. 80

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point M

Vive Eau

Dégradation : T 90 infini

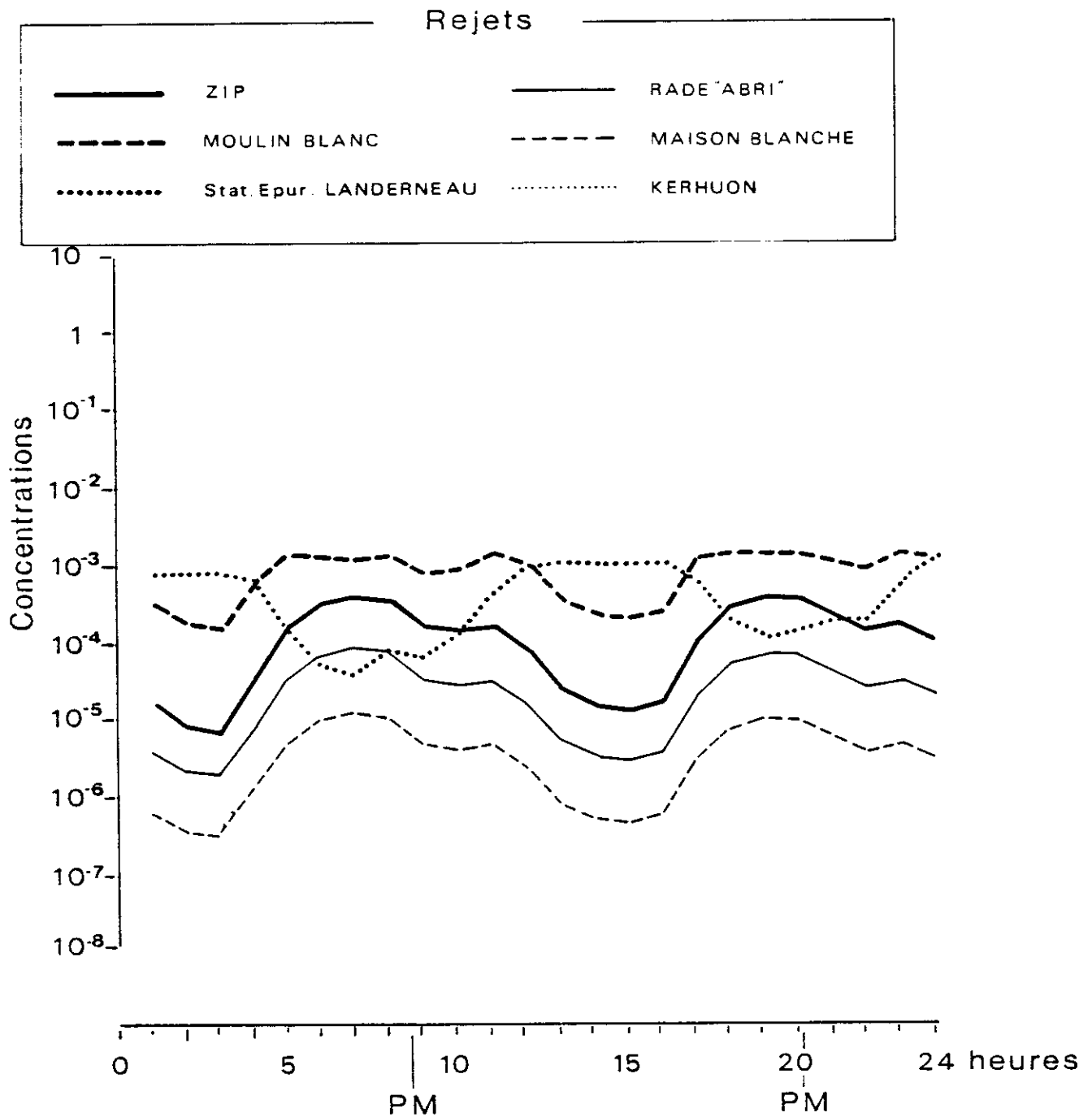
Grande dispersion ($\times 20$)

pour le rejet de Landerneau, le régime stationnaire n'est pas encore atteint

Fig. 81

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point N | Vive Eau
Dégradation : T 90 infini
Grande dispersion ($\times 20$)

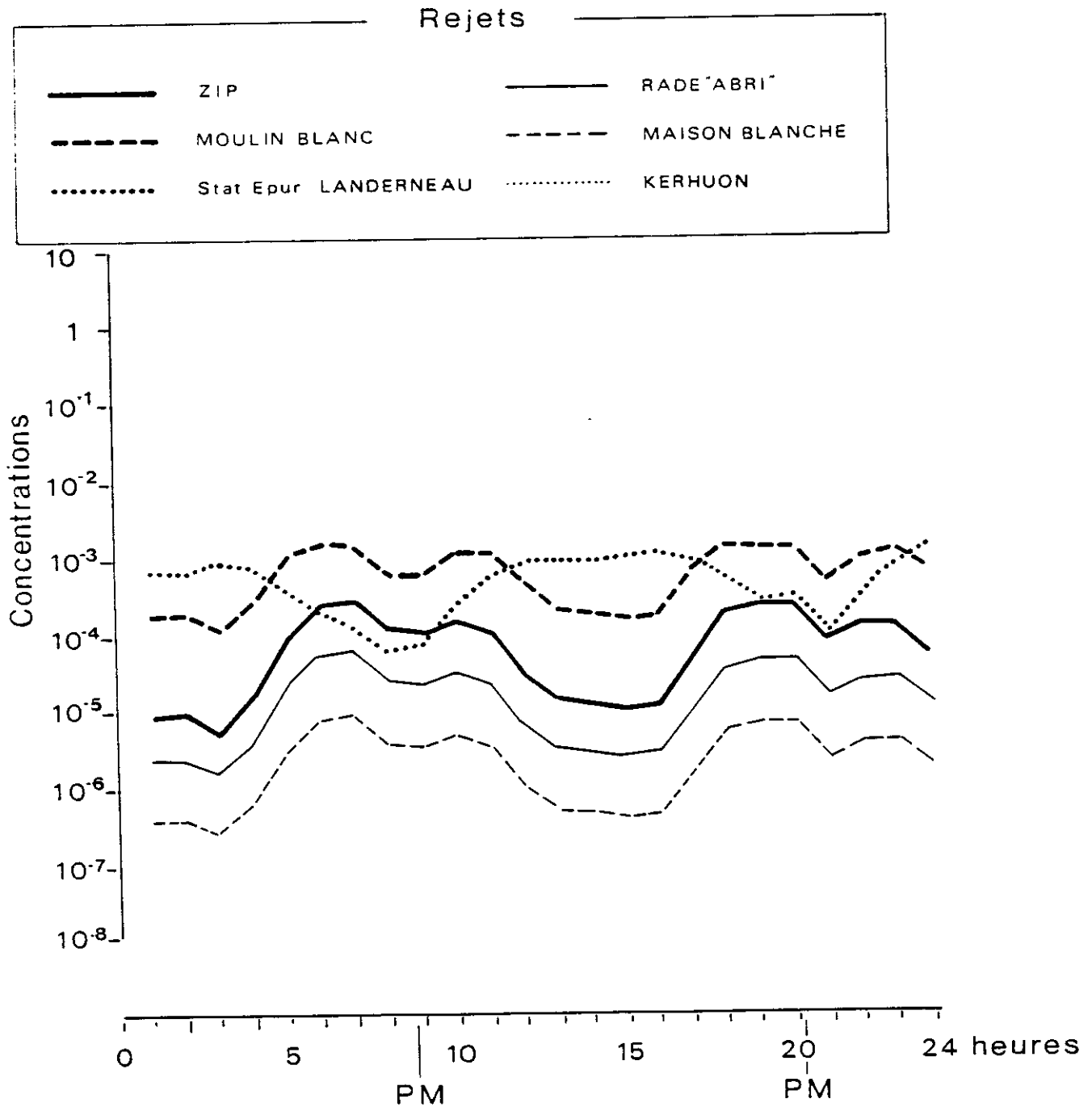


pour le rejet de Landerneau, le régime stationnaire n'est pas encore atteint

Fig. 82

RADE de BREST
Dilution des Rejets

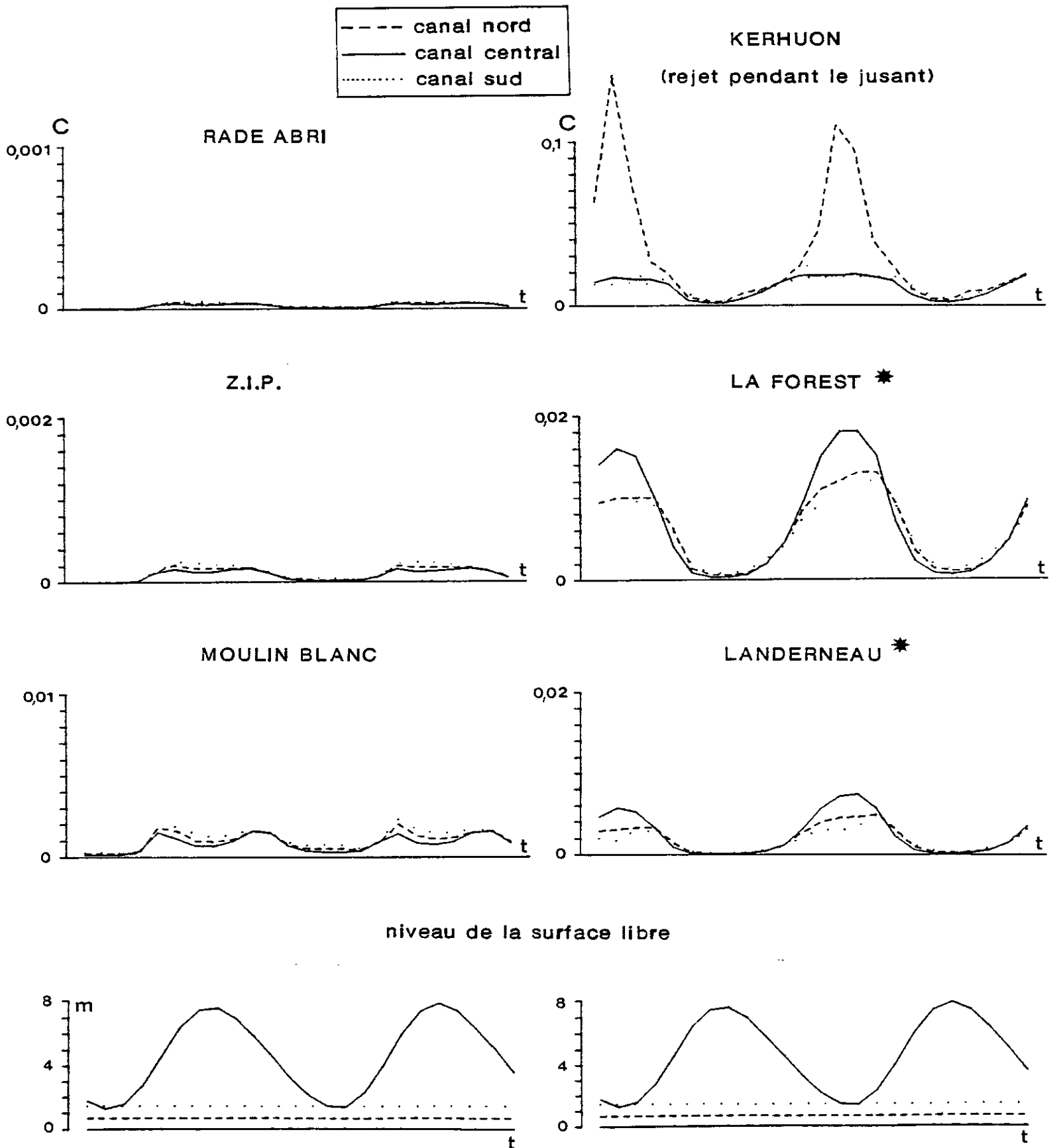
Point O | Vive Eau
Dégradation : T 90 infini
Grande dispersion ($\times 20$)



pour le rejet de Landerneau, le régime stationnaire n'est pas encore atteint

Fig.83 ESTUAIRE DE L'ELORN - DILUTION DES REJETS AU POINT "P"

VIVE EAU - PAS DE DEGRADATION - GRANDE DISPERSION



* pour ce rejet, le régime stationnaire n'est pas encore atteint

Fig.84 ESTUAIRE DE L'ELORN - DILUTION DES REJETS AU POINT 'Q'

VIVE EAU - PAS DE DEGRADATION - GRANDE DISPERSION

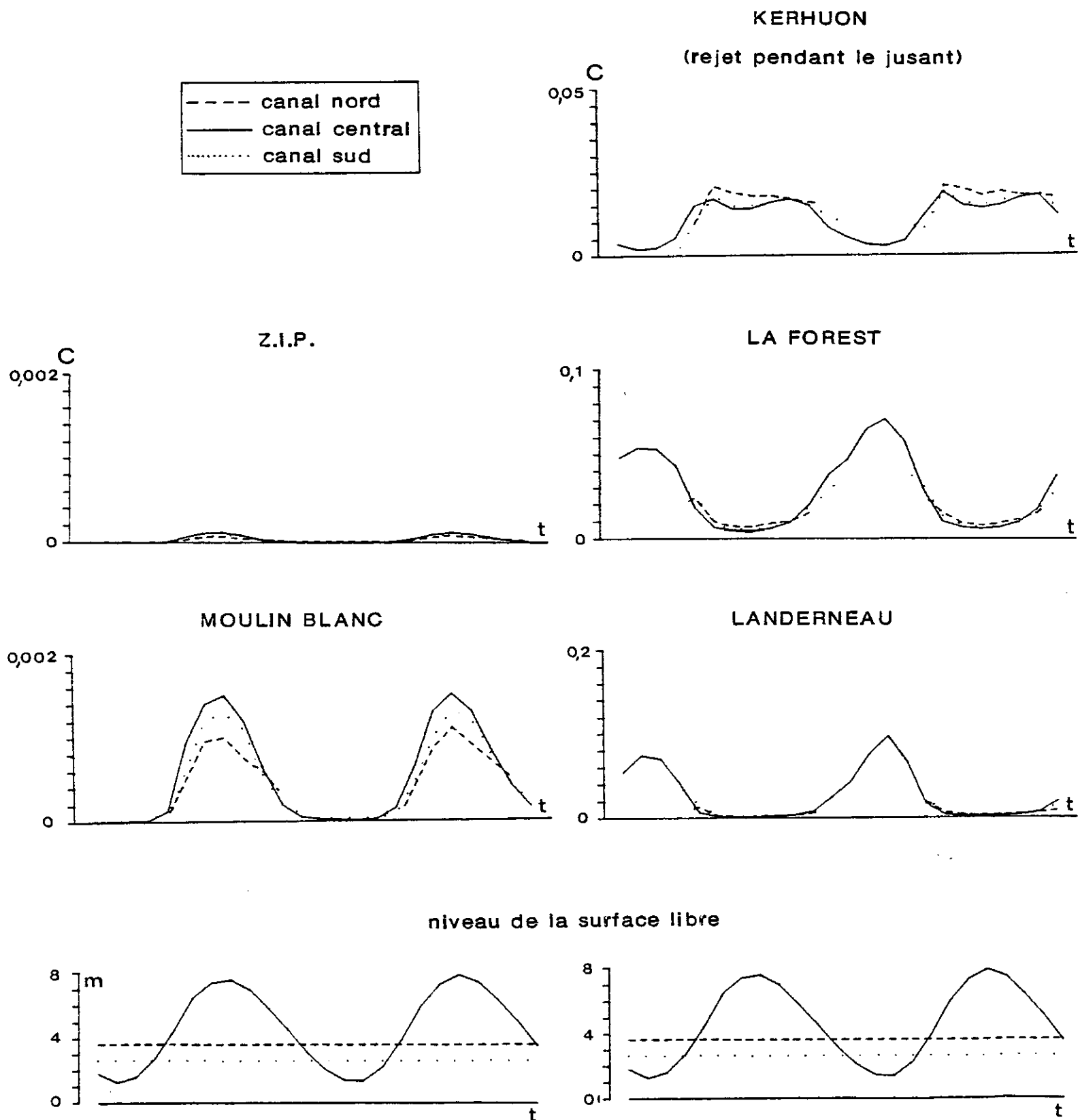
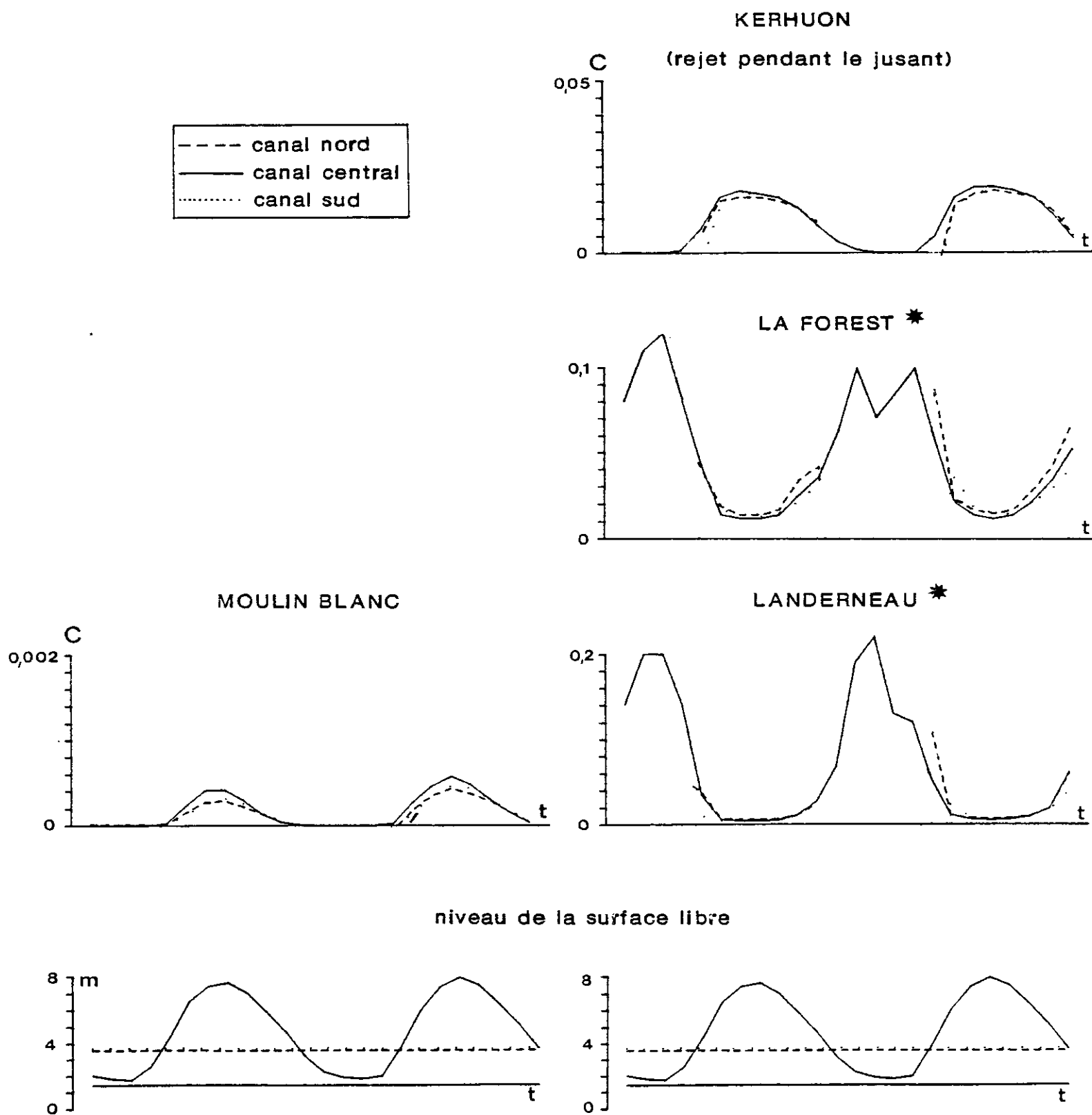


Fig.85 ESTUAIRE DE L'ELORN - DILUTION DES REJETS AU POINT "R"

VIVE EAU - PAS DE DEGRADATION - GRANDE DISPERSION



* valeurs suspectes autour de BM, car liées à des oscillations numériques

VI - CONCLUSION

La question posée concernant la réhabilitation des zones conchylicoles du nord de la rade de Brest et de l'estuaire de l'Elorn s'énonce simplement : sur quel rejet intervenir en priorité pour améliorer la qualité bactériologique des secteurs les plus sensibles ? En réalité le problème est complexe car l'impact d'un rejet varie d'un secteur à un autre et selon les conditions hydrodynamiques et climatologiques du moment.

Afin de fournir des éléments de réponse, nous avons opté pour un calcul par modèle mathématique des dilutions de chaque rejet, les contaminations totales résultant de la superposition des impacts respectifs de ces rejets. Ainsi le poids relatif de chacun des rejets a pu être mis en évidence. Cependant le calcul n'a pas tenu compte des transports différentiels entre la surface et le fond ni surtout de l'adsorption des contaminants sur le matériel particulaire et de leur devenir dans l'eau sous forme liée. Ces hypothèses ont été discutées et des éléments qualitatifs ont été donnés pour évaluer l'effet des phénomènes négligés sur les résultats annoncés. Concernant le transport particulaire, il faut retenir l'intérêt de limiter les flux de rejet dans les secteurs chargés en suspension, et de procéder à une décantation des effluents.

Plusieurs scénarii de rejet ont été envisagés, correspondant à diverses conditions de marée, à des comportements d'effluent différents (conservatifs ou dégradables) et à des régimes de rejet variables. Pour éviter de multiplier les résultats déjà très nombreux, les calculs ont été menés indépendamment des flux de rejet, les concentrations calculées étant proportionnelles à ces flux.

Afin de faciliter l'interprétation des résultats et leur utilisation future, des clés ont été données pour relier les scénarii entre eux et en sélectionner les plus pertinents, eu égard aux secteurs sensibles et aux rejets considérés. Ainsi le cas le plus critique semble être généralement la situation de vive eau pour un effluent conservatif : c'est donc celui que nous avons discuté, à titre d'exemple, en tenant compte des flux actuellement rejetés.

On retrouve par le calcul les très fortes concentrations observées pour les bactéries dans l'estuaire de l'Elorn et les teneurs assez élevées dans l'ensemble du secteur d'étude, en général voisines du "nombre guide" que l'on peut se fixer pour une eau de baignade ou pour une zone conchylicole. Plus précisément, on retient que :

- la plage du Moulin Blanc est contaminée à la fois par le rejet du Stangalarc'h, celui de la station d'épuration de la Z.I.P. ainsi que par les rejets de l'Elorn (Kerhuon et station d'épuration de Landerneau).

- le secteur conchylicole de Kéraliou est également contaminé par les rejets de Brest-centre (rade-abri/Z.I.P.) et par celui de Kerhuon

- dans l'estuaire de l'Elorn, les effets des rejets de Kerhuon et de Landerneau sont considérables, avec des teneurs induites de l'ordre de 10^3 largement supérieures aux normes en vigueur.

De ces résultats partiels on retient la forte influence - peu surprenante - du rejet de la station d'épuration de Landerneau et le rôle très important tenu par les effluents de l'étang de Kerhuon qui résultent pourtant de rejets parasites ou de trop-pleins. Bien entendu le rapport entre les concentrations calculées et les nombres guides que l'on se propose de respecter constitue, pour le rejet considéré, le taux d'abattement du flux qui est recherché.

En ce qui concerne la modulation des flux au cours de la marée dans l'estuaire de l'Elorn, une étude de sensibilité a montré l'intérêt de rejeter à mi-flot (à La Forest ou à Landerneau). Mais les différences sont relativement faibles et ne justifient peut être pas une surcharge des coûts d'exploitation des systèmes d'épuration. A noter cependant qu'un stockage partiel serait compatible avec une décantation, bénéfique pour réduire la part des bactéries liées dans les effluents.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

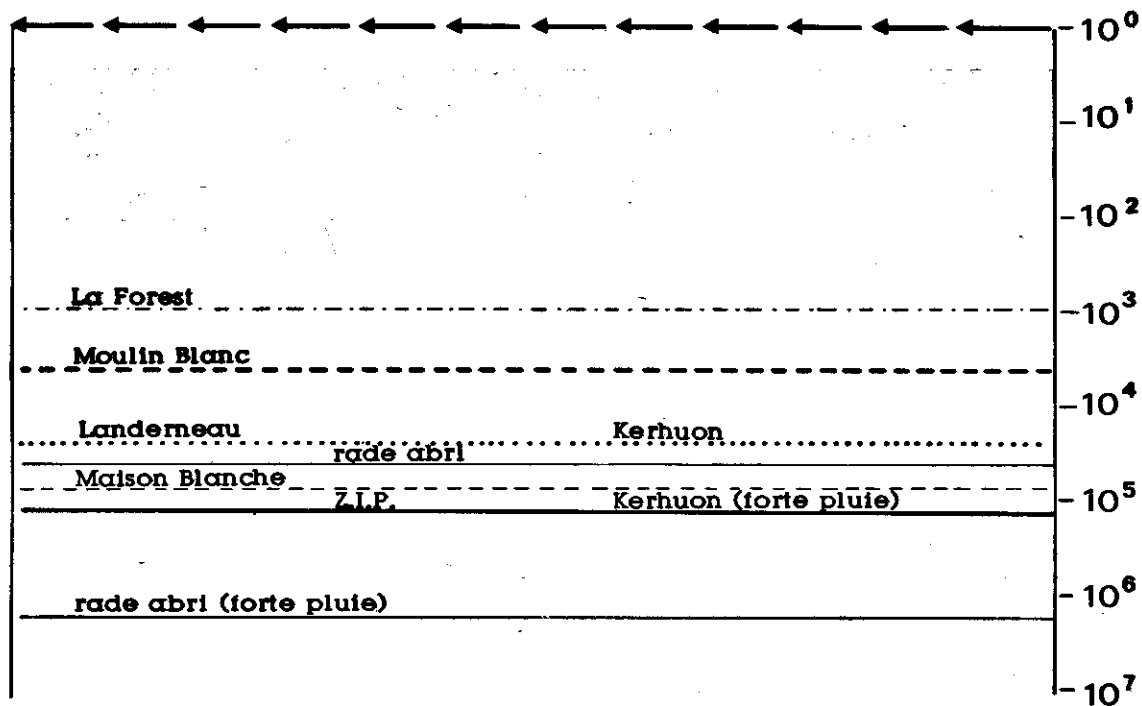
- CAILLUET P., LE MASSON J.C., 1986.
 "Contribution à la modélisation numérique des courants dans l'estuaire de l'Elorn". Rapport IFREMER-DERO/EL juin 1986.
- CNEXO, 1983.
 "Capacité d'acceptation du milieu marin en rade de Brest". Rapport de synthèse. Etude pour les Ministères de l'Environnement et de la Santé.
- DDE du Finistère, 1986.
 "Résultats des analyses effectuées dans l'Elorn". Listing édité par la cellule anti-pollution de la DDE du Finistère.
- ESPOSITO P., 1981.
 "Résolution bidimensionnelle des équations de transport par la méthode des caractéristiques". Rapport EDF : HE/41/81.16.
- HAUGUEL, 1976.
 "Courants de marée dans la Rade de Brest". Rapport LNH n° E42/76-35. Electricité de France.
- LE HIR P., 1980.
 "Calcul par modélisation numérique de la structure verticale des courants et application à la baie de Seine". Thèse de docteur ingénieur présentée le 17.12.1980 à l'Université de Bretagne Occidentale.
- L'YAVANC J., 1984.
 "Etude hydrologique de l'estuaire de l'Elorn". Rapport IFREMER DERO/EL.
- POMMEPUY M., 1983.
 "Evolution de la flore bactérienne de l'estuaire de l'Elorn". Rapport de DEA - Université de PARIS SUD (U.E.R. d'Hygiène et de Protection de l'Homme et de son Environnement) - Octobre 1983.
- SALOMON J.C., LE HIR P., 1981.
 "Etude de l'estuaire de la Seine : modélisation numérique des phénomènes physiques". Rapport du Laboratoire d'Océanographie Physique. Université de Bretagne Occidentale".
- SALOMON J.C., 1987.
 "Modèle courantologique bidimensionnel". Rapport IFREMER DERO/EL. à paraître.

SAUNIER EAU et ENVIRONNEMENT, 1986.

"Réhabilitation des zones conchylicoles de l'estuaire de l'Elorn et du nord de la Rade de Brest. Détermination des principaux rejets". Rapport provisoire de contrat pour la Communauté Urbaine de Brest.

SHOM, 1974.

"Courants de marée en Rade de Brest". Fascicule n° 555 du Service hydrographique et océanographique de la Marine. France.

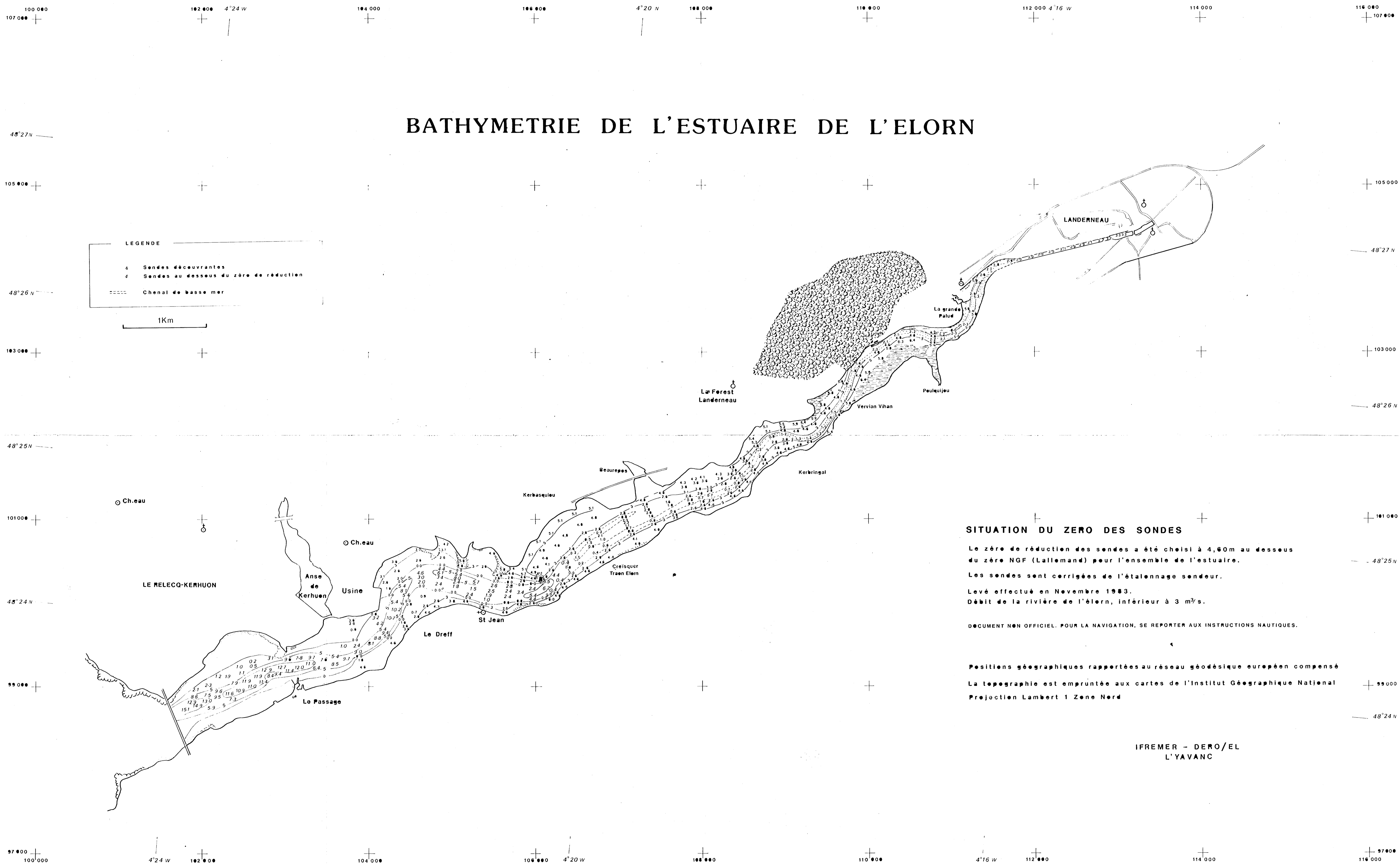


RADE DE BREST - ESTUAIRE DE L'ELORN

**FLUX MOYENS DES REJETS URBAINS
(coliformes fécaux)**

*facteurs multiplicatifs à appliquer aux concentrations
calculées par modèle mathématique*

BATHYMETRIE DE L'ESTUAIRE DE L'ELORN



LEGENDE

- ⊕ Sondes déceuvrantes
- ⊕ Sondes au dessous du zéro de réduction
- Chenal de basse mer

1Km

SITUATION DU ZERO DES SONDES

Le zéro de réduction des sondes a été choisi à 4,60m au dessous du zéro NGF (Lallemand) pour l'ensemble de l'estuaire.

Les sondes sont corrigées de l'étalonnage sondeur.

Levé effectué en Novembre 1983.

Débit de la rivière de l'Elorn, inférieur à 3 m³/s.

DOCUMENT NON OFFICIEL. POUR LA NAVIGATION, SE REPORTER AUX INSTRUCTIONS NAUTIQUES.

Positions géographiques rapportées au réseau géodésique européen compensé

La topographie est empruntée aux cartes de l'Institut Géographique National
Projection Lambert 1 Zone Nord

IFREMER - DERO/EL
L'YAVANC

ANNEXES

ANNEXE 1

MODELE MATHEMATIQUE UNIDIMENSIONNEL
MULTICANAUX DE L'ESTUAIRE DE L'ELORN

DISCRETISATION DES EQUATIONS

Notations

U_{ji} : courant en (I, J) : c'est un débit

ξ_i : surélévation en I ($\forall J$)

H_{ji} : cote du fond en (I, J)

C_{ji} : concentration en (I, J)

V_i : débit transversal (écrit seulement pour 3 canaux :

$V+$: débit de $j = 2$ vers $j = 3$

$V-$: " $j = 1$ vers $j = 2$)

b_{ji} : largeur de la maille (I, J)

Δx_{ji} : longueur de la maille

S_{ji} : salinité en (I, J)

ρ : densité (ρ_0 : densité de l'eau douce)

g : accélération de la pesanteur

W : vitesse du vent

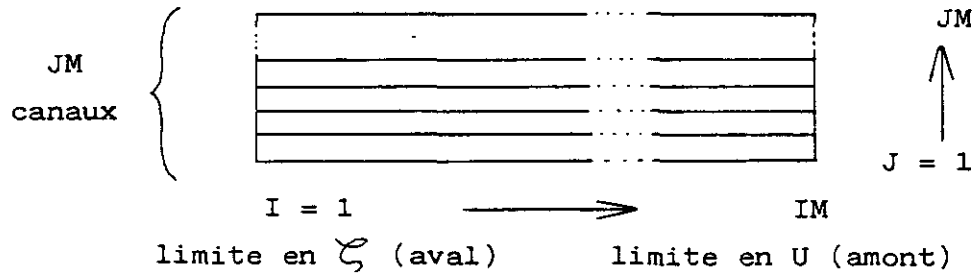
θ : angle entre l'axe longitudinal du domaine et le vent

DL, DT : coefficient de diffusion longitudinale, transversale
(pour U)

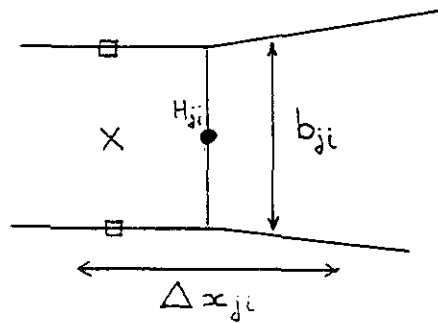
KL, KT : " " de dispersion " " "
(pour C)

DEFINITION DU MAILLAGE

* Implantation



* détail de la grille
autour du noeud (I, J)



- points de calcul de U
- x " " ζ, S ou C
- \square " " V

Les équations qui suivent décrivent l'évolution des variables de t à t' , pendant ΔT : les variables sont notés "" à t' .

Equation de conservation de la quantité de mouvement

C'est en chaque noeud (i, j), l'équilibre : progression temporelle + advection longitudinale + advection transversale + pente + densité + frottement + diffusion (longitudinale et transversale) = 0, avec :

* progression temporelle :
$$b_{ji} \frac{U'_{ji} - U_{ji}}{\Delta t}$$

* advection longitudinale :

$$\frac{b_{ji} + b_{j,i+1}}{2 \Delta x_{ji}} \cdot \frac{U_{j,i+1} \cdot U'_{ji}}{\max\left[\frac{H_{ji} + H_{j,i+1}}{2} + \xi'_{i+1}, 0.01\right]} - \frac{b_{ji} + b_{j,i-1}}{2 \Delta x_{ji}} \cdot \frac{U_{j,i-1} \cdot U'_{ji}}{\max\left[\frac{H_{j,i-1} + H_{ji}}{2} + \xi'_i, 0.01\right]}$$

* advection transversale : (on suppose JM = 3)

Cas j = 1 si $H_{ji} + \frac{1}{2}(\xi'_i + \xi'_{i+1}) < \varepsilon$ ou $b_{ji} < 0,5m$ terme nul

sinon
$$ADT(1,i) = \frac{V_{-i} + V_{-i+1}}{2 \Delta x_{ji} [H_{ji} + \frac{1}{2}(\xi'_i + \xi'_{i+1})]} \times \begin{cases} U_{ji} & \text{si } V_{-i} > 0 \\ U_{j,i+1} & \text{si } V_{-i} < 0 \end{cases}$$

Cas j = 3 si $H_{ji} + \frac{1}{2}(\xi'_i + \xi'_{i+1}) < \varepsilon$ ou $b_{ji} < 0,5m$ terme nul

sinon
$$ADT(3,i) = -\frac{V_{+i} + V_{+i+1}}{2 \Delta x_{ji} [H_{ji} + \frac{1}{2}(\xi'_i + \xi'_{i+1})]} \times \begin{cases} U_{ji} & \text{si } V_{+i} < 0 \\ U_{j,i-1} & \text{si } V_{+i} > 0 \end{cases}$$

Cas j = 2
$$ADT(j,i) = -\frac{1}{\Delta x_{ji}} [ADT(3,i) \cdot \Delta x_{3i} + ADT(1,i) \cdot \Delta x_{1i}]$$

* pente :

$$g b_{ji} \left(H_{ji} + \frac{\xi'_i + \xi'_{i+1}}{2} \right) \cdot \frac{\xi'_{i+1} - \xi'_i}{\Delta x_{ji}}$$

* terme de densité :

$$\alpha \frac{g b_{ji} \left(H_{ji} + \frac{\xi'_i + \xi'_{i+1}}{2} \right)^2}{2} \frac{S_{j,i+1} - S_{j,i-1}}{\Delta x_{ji} + \frac{1}{2}(\Delta x_{j,i-1} + \Delta x_{j,i+1})}$$

où α provient de l'équation d'état :

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha S)$$

* frottement sur le fond : $g b_{ji} \frac{|U_{ji}| \cdot U_{ji}}{k^2 \left(H_{ji} + \frac{\zeta_i + \zeta_{i+1}}{2} \right)^2 R_H^{0.33}}$

où $R_H = \left[H_{ji} + \frac{\zeta_i + \zeta_{i+1}}{2} \right] \cdot \frac{b_{ji}}{b_{ji} + \begin{cases} 0 & \text{si } j \neq 1 \text{ ou JM} \\ H_{ji} + \frac{\zeta_i + \zeta_{i+1}}{2} & \text{si } j = 1 \text{ ou JM} \end{cases}}$
 k : coef. Strickler

en surface $- b_{ji} \cdot 1,8 \cdot 10^{-6} W^2 \cos \theta$

* diffusion longitudinale

$$- \frac{D_L}{\Delta x_{ji}} [A_{i+1} - A_i]$$

où $A_i = \frac{b_{ji} + b_{j,i-1}}{2} \left(\frac{H_{j,i-1} + H_{ji}}{2} + \zeta_i \right) \left(\frac{U_{ji}}{H_{ji} + \zeta_i} - \frac{U_{j,i-1}}{H_{j,i-1} + \zeta_i} \right) \frac{1}{\frac{1}{2} (\Delta x_{ji} + \Delta x_{j,i-1})}$

* diffusion transversale

cas général : $j \neq 1$ ou JM

$$- D_T [B_{j+1} - B_j]$$

où $B_j = \frac{\min \left(H_{j-1,i} + \frac{\zeta_{i+1} + \zeta_i}{2}, H_{ji} + \frac{\zeta_{i+1} + \zeta_i}{2} \right)}{\frac{1}{2} (b_{j-1,i} + b_{ji})} \left(\frac{U_{ji}}{H_{ji} + \frac{\zeta_{i+1} + \zeta_i}{2}} - \frac{U_{j-1,i}}{H_{j-1,i} + \frac{\zeta_{i+1} + \zeta_i}{2}} \right)$

ou 0 si dénominateur $\leq 0,1$

ou 0 si dénominateur $\leq 0,1$

Cas $j = 1$ $- D_T B_{j+1}$

Cas $j = JM$ $D_T B_j$

Equation de continuité (globale pour la section i)

$$\text{soit } \Sigma_1 = \sum_j \left(\frac{b_{ji} + b_{j i-1}}{2} \cdot \frac{\Delta x_{ji} + \Delta x_{j i-1}}{2} \right)$$

$$\text{et } \Sigma_2 = \sum_j (b_{ji} U_{ji} - b_{j i-1} U_{j i-1})$$

$$\text{l'équation s'écrit : } \frac{\xi'_i - \xi_i}{\Delta t} + \frac{\Sigma_2}{\Sigma_1} = 0$$

Equation de continuité locale

Ecrire dans le cas JM = 3. C'est la conservation de la masse dans la maille (1, i) ou (3, i)

. Canal 1

$$\frac{\xi'_i - \xi_i}{\Delta t} \left(\frac{b_{1i} + b_{1 i-1}}{2} \right) + \frac{b_{1i} U_{1i} - b_{1 i-1} U_{1 i-1}}{\frac{1}{2} (\Delta x_{1i} + \Delta x_{1 i-1})} + V_{-i} = 0$$

. Canal 3

$$\frac{\xi'_i - \xi_i}{\Delta t} \left(\frac{b_{3i} + b_{3 i-1}}{2} \right) + \frac{b_{3i} U_{3i} - b_{3 i-1} U_{3 i-1}}{\frac{1}{2} (\Delta x_{3i} + \Delta x_{3 i-1})} - V_{+i} = 0$$

Equation de conservation d'un contaminant dissout

C'est en chaque noeud (i, j) l'équilibre :

accroissement temporel + convection (longitudinale et transversale) + dispersion (longitudinale et transversale) = 0

* accroissement temporel:

$$\frac{1}{\Delta t} \cdot \left(\frac{\Delta x_{ji} + \Delta x_{j i-1}}{2} \right) \left(\frac{b_{ji} + b_{j i-1}}{2} \right) \left[\left(\frac{H_{ji} + H_{j i-1}}{2} + \xi'_i \right) C'_{ji} - \left(\frac{H_{ji} + H_{j i-1}}{2} + \xi_i \right) C_{ji} \right]$$

* convection longitudinale :

$$U_{ji} b_{ji} \left(\frac{C_{ji} + C'_{ji} + C_{j,i+1} + C'_{j,i+1}}{4} \right) - U_{j,i-1} b_{j,i-1} \left(\frac{C_{j,i-1} + C'_{j,i-1} + C_{ji} + C'_{ji}}{4} \right)$$

* convection transversale :

écrite de manière "décentrée amont" (comme pour U) dans le cas JM = 3

$$\text{si } j = 1 \quad \text{CONVT} (1, I) = V_{-i} \times \begin{cases} C1i & \text{si } V-i > 0 \\ C2i & \text{si } V-i < 0 \end{cases}$$

$$\text{si } j = 3 \quad \text{CONVT} (3, I) = - V_{+i} \times \begin{cases} C3i & \text{si } V+i < 0 \\ C2i & \text{si } V+i > 0 \end{cases}$$

$$\text{si } j = 2 \quad \text{CONVT} (2, I) = - (\text{CONVT} (1, I) + \text{CONVT} (3, I))$$

* dispersion longitudinale :

$$\frac{k_L b_{ji}}{\Delta x_{ji}} \cdot \left(H_{ji} + \frac{\xi'_i + \xi'_{i+1}}{2} \right) \cdot (C'_{ji} - C'_{j,i+1}) + \frac{k_L b_{j,i-1}}{\Delta x_{j,i-1}} \cdot \left(H_{j,i-1} + \frac{\xi'_i + \xi'_{i-1}}{2} \right) \cdot (C'_{ji} - C'_{j,i-1})$$

* dispersion transversale :

cas général $j \neq 1$ ou JM

$$- K_T (E_{j+1} - E_j)$$

$$\text{où } E_j = \frac{C_{ji} - C_{j,i-1}}{\frac{1}{4} (b_{ji} + b_{j,i-1} + b_{j,i+1} + b_{j,i-1})} \cdot \left[\xi_i + \min \left(\frac{H_{ji} + H_{j,i-1}}{2}, \frac{H_{j,i+1} + H_{j,i-1}}{2} \right) \right] \\ \times \min \left(\frac{\Delta x_{ji} + \Delta x_{j,i-1}}{2}, \frac{\Delta x_{j,i+1} + \Delta x_{j,i-1}}{2} \right)$$

$$\text{cas } j = 1 \quad - K_T \cdot E_{j+1}$$

$$\text{cas } j = \text{JM} \quad K_T \cdot E_j$$

ANNEXE 2

Calcul de dilution des rejets

Scénario de simulation n° 2

VIVE EAU
T90 infini

coefficient de dispersion de type "Elder isotrope" ($K_y = K_x$)

Les résultats aux points P, Q et R, voisins de ceux obtenus dans le scénario n° 1 ne sont pas présentés.

Le régime stationnaire n'est pas encore atteint pour le rejet de Landerneau.

Fig. A1

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point A

Vive Eau

Dégradation : T 90 infini

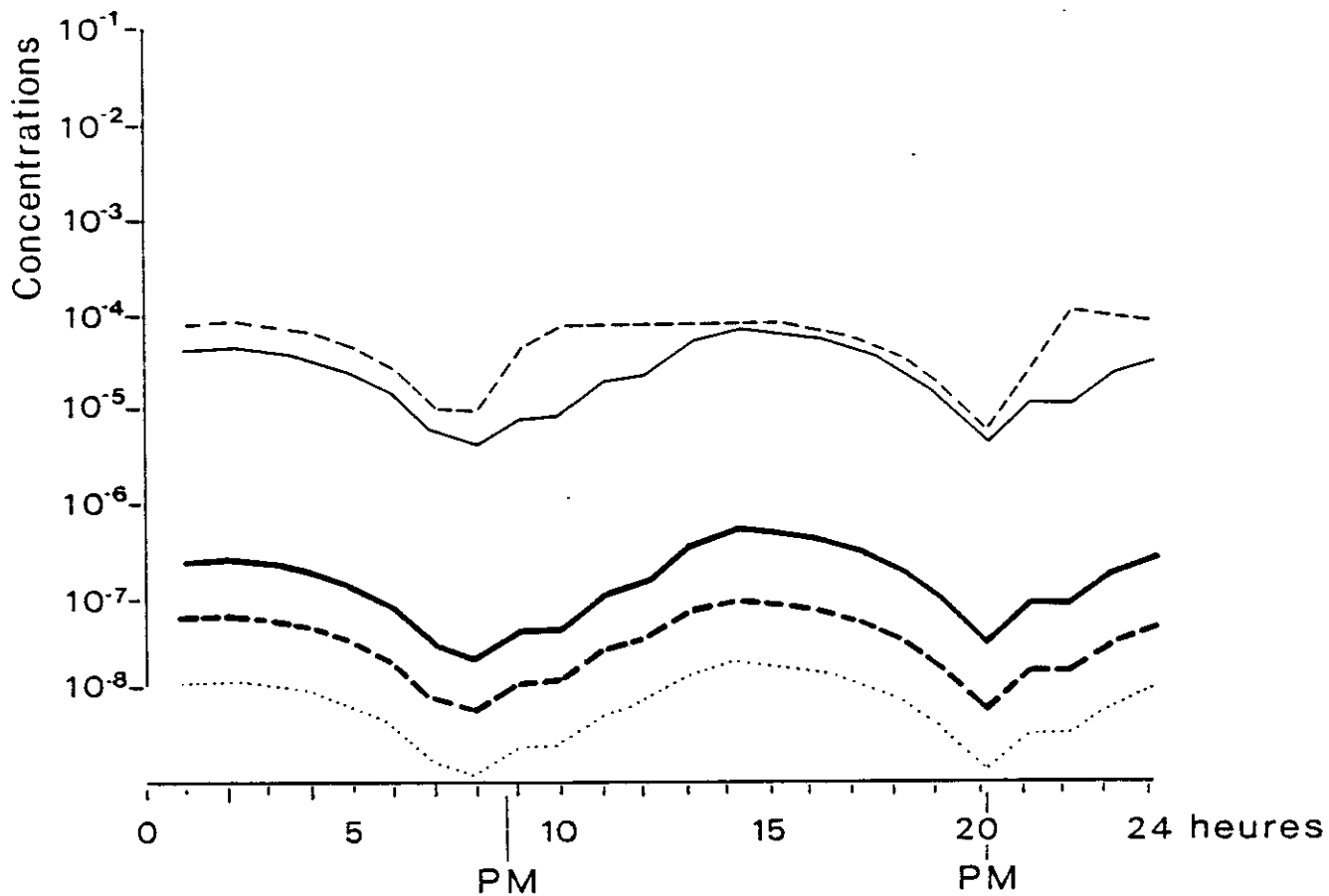
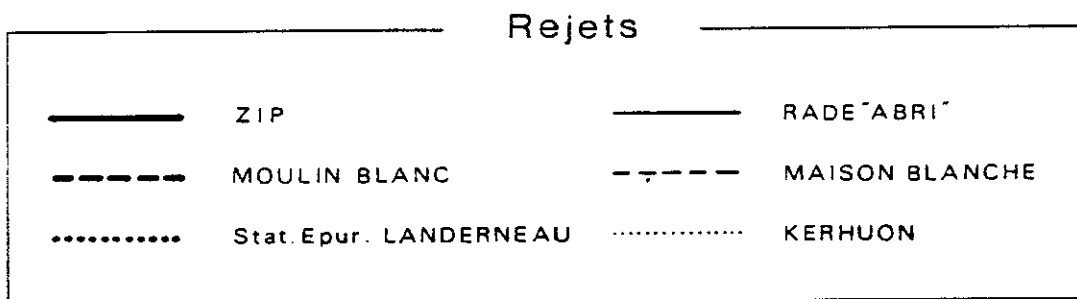


Fig. A2

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point B

Vive Eau

Dégradation : T 90 infini

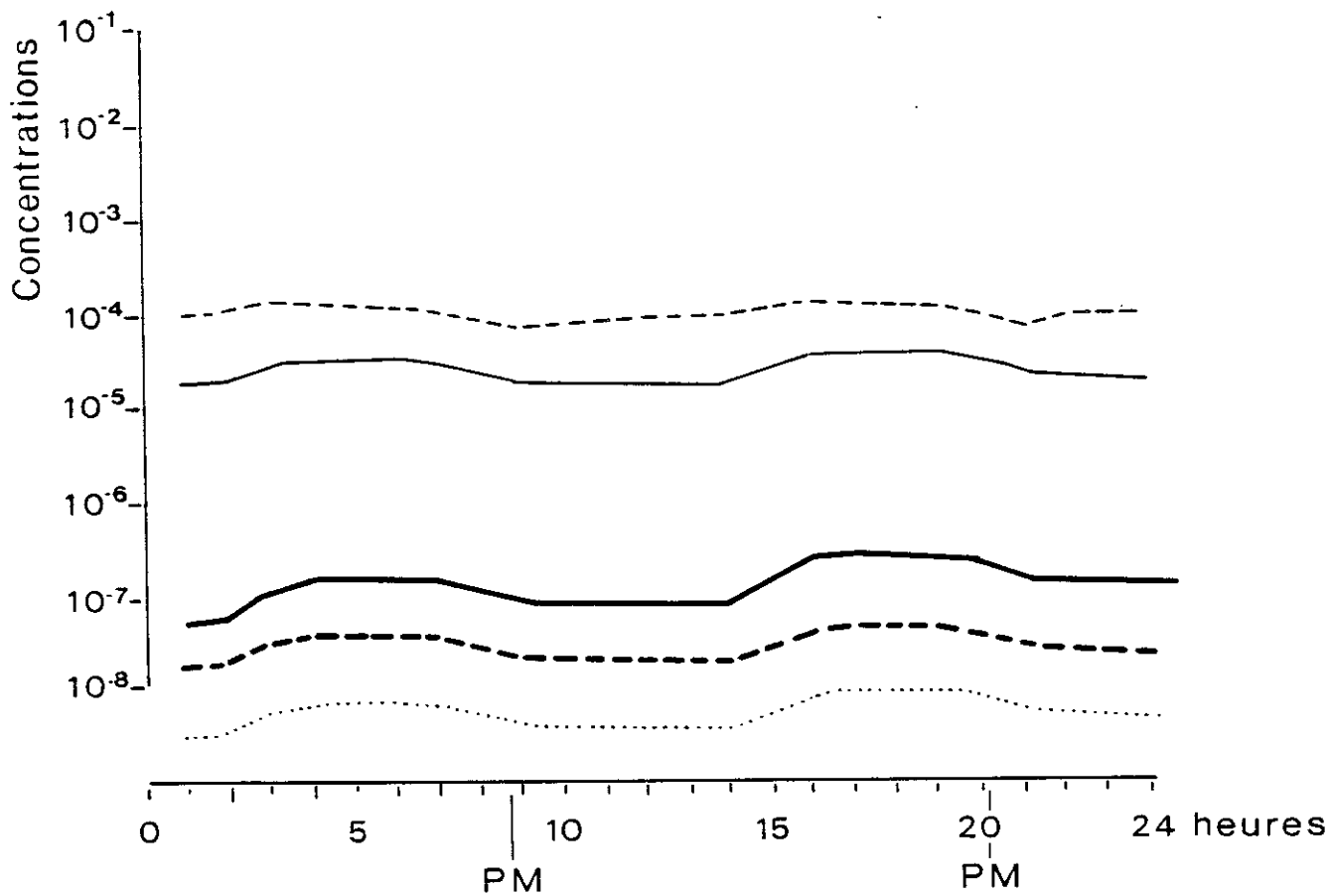
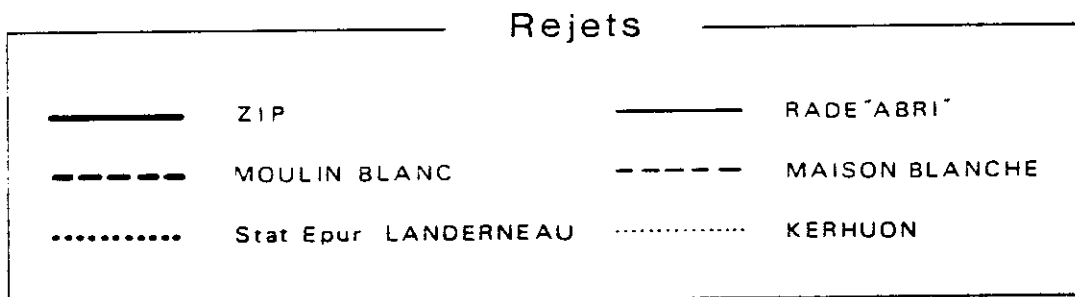


Fig. A3

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point C

Vive Eau

Dégradation : T 90 infini

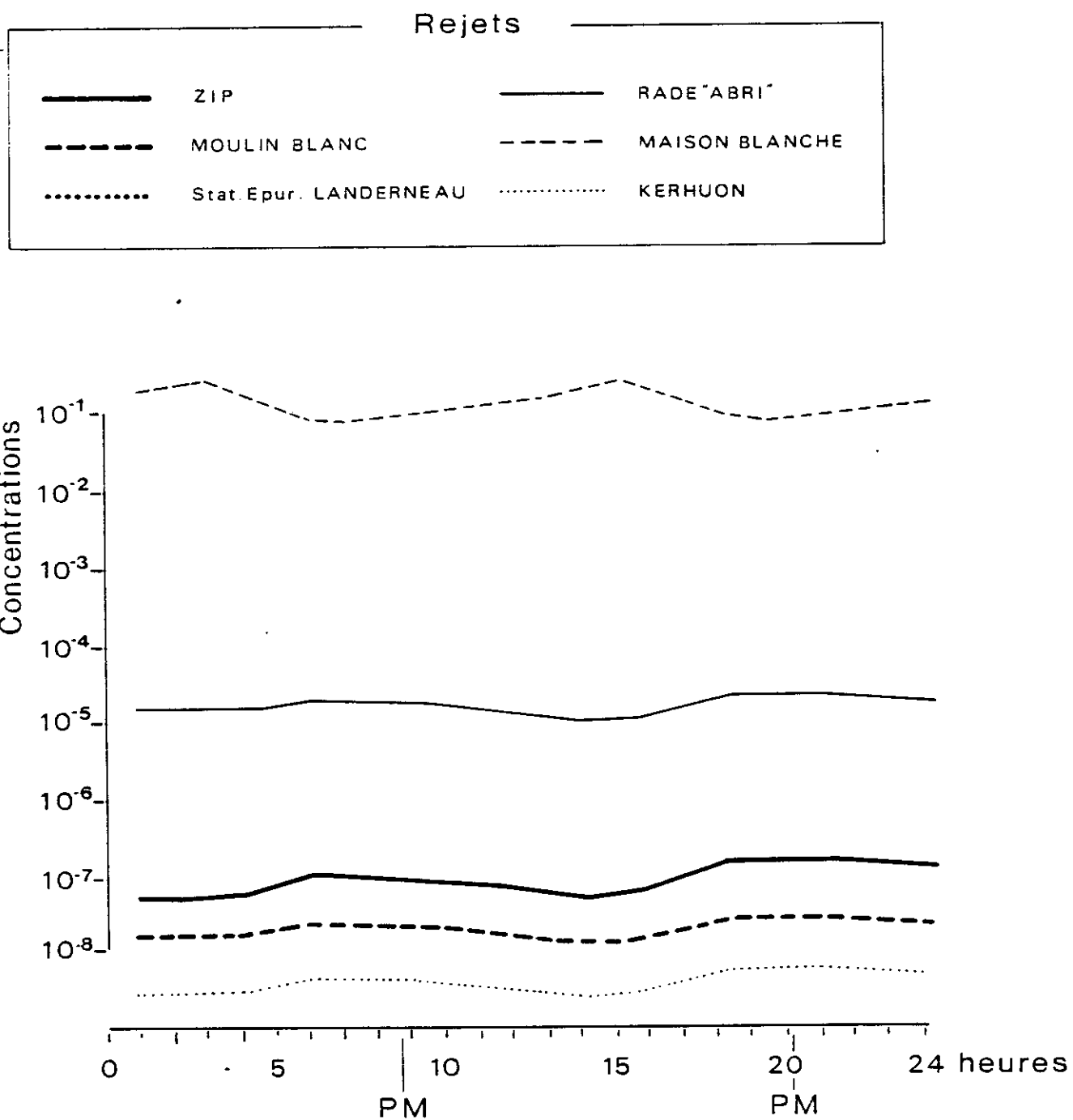


Fig. A4

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point D | Vive Eau
Dégradation : T 90 infini

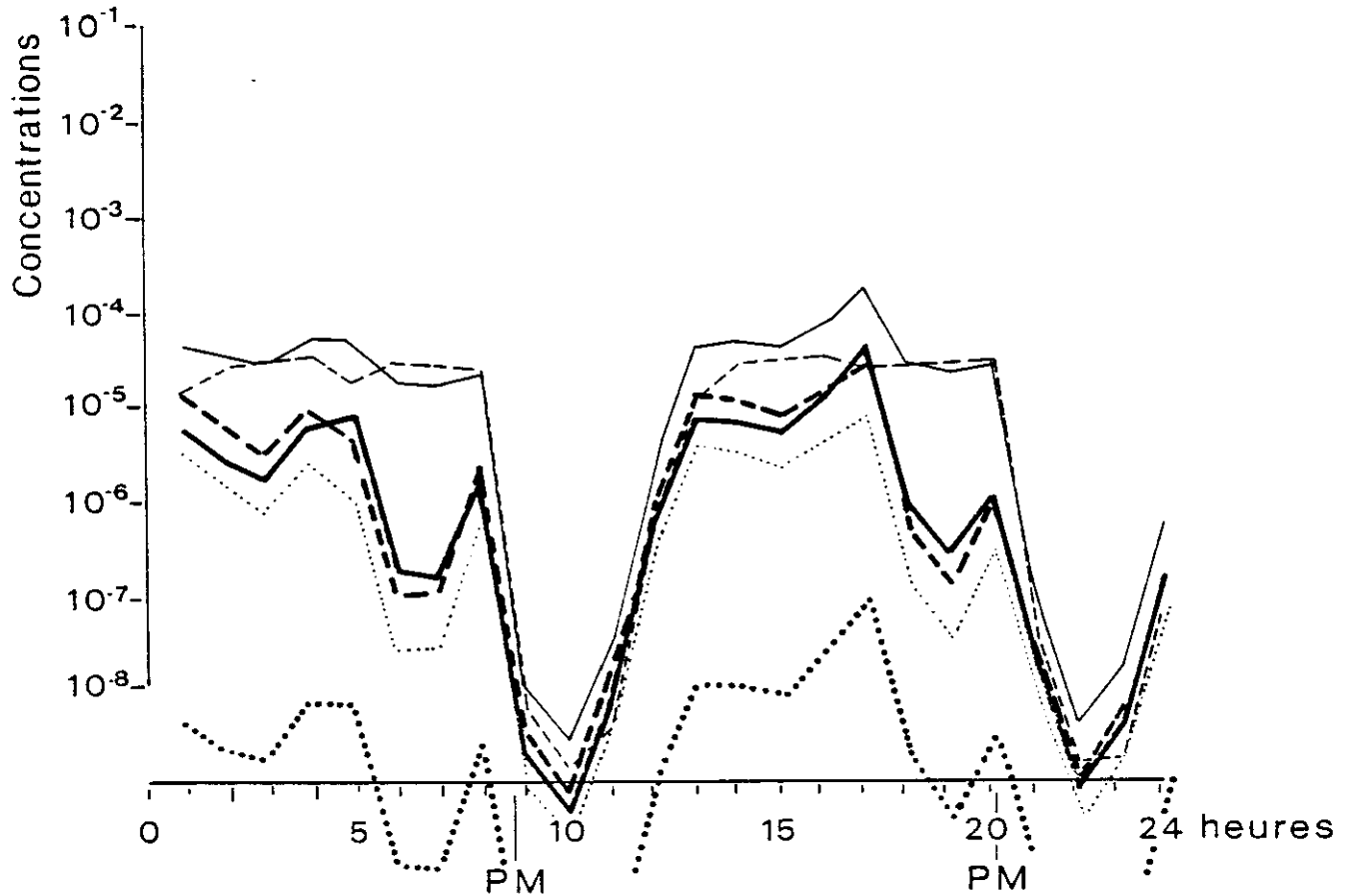
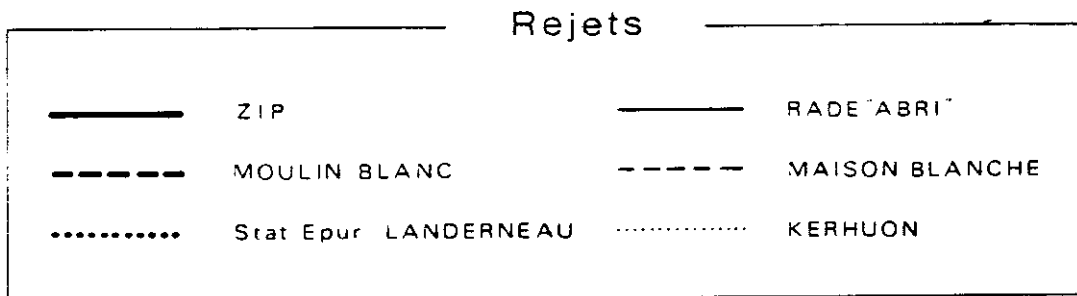


Fig. A5

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point E | Vive Eau
Dégradation : T 90 infini

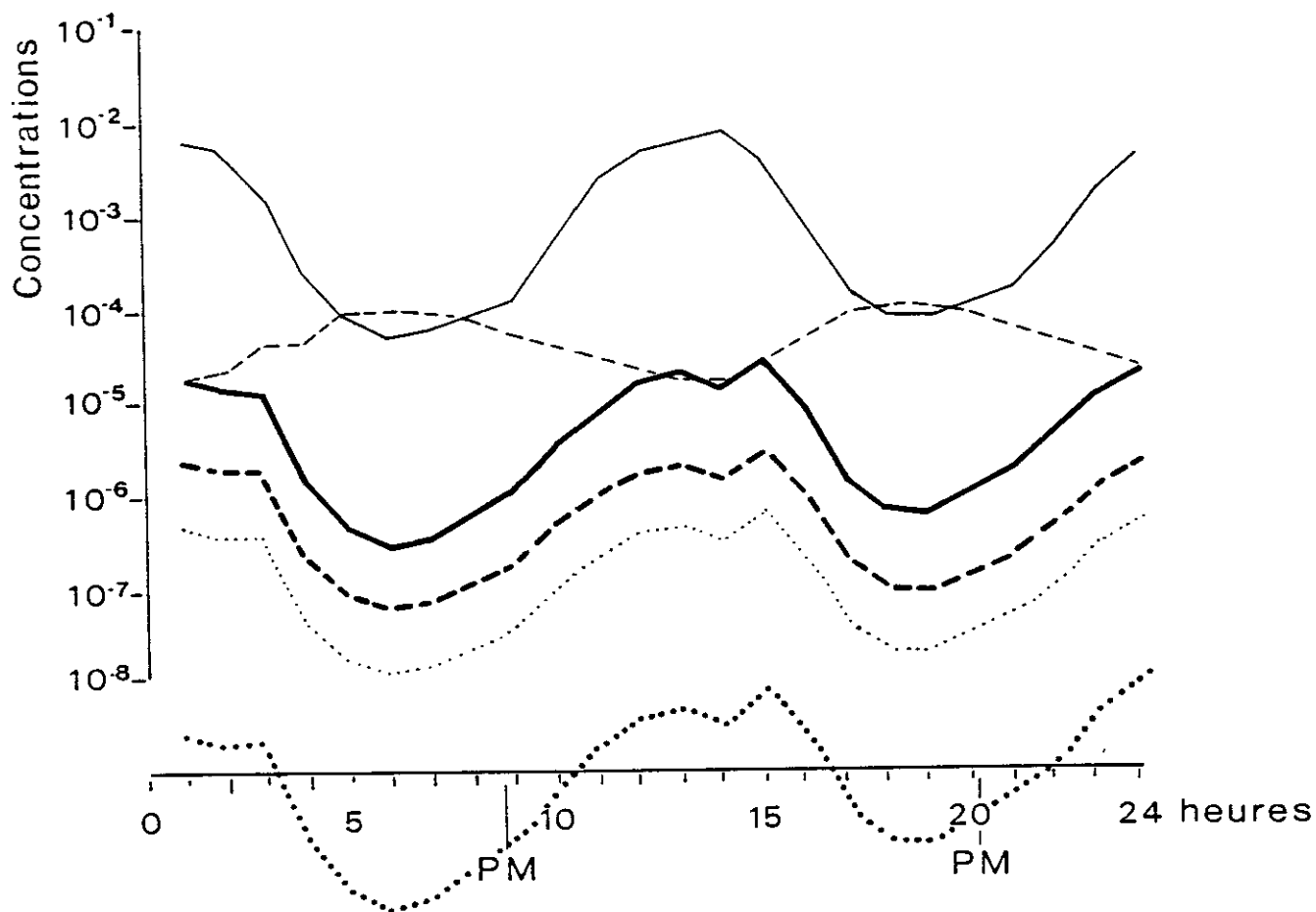
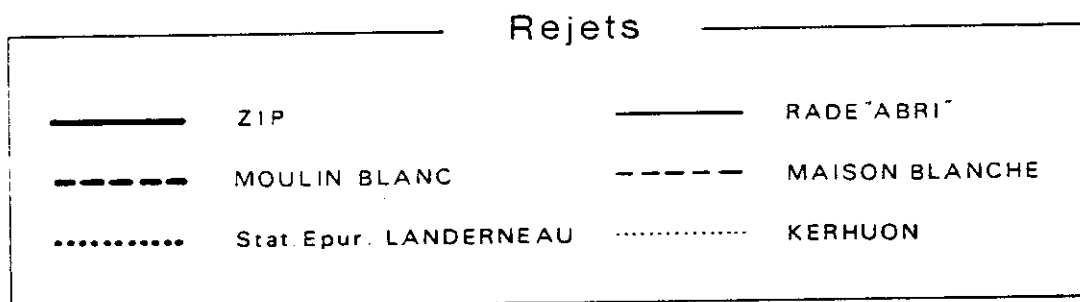


Fig. A6

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point F

Vive Eau

Dégradation : T 90 infini

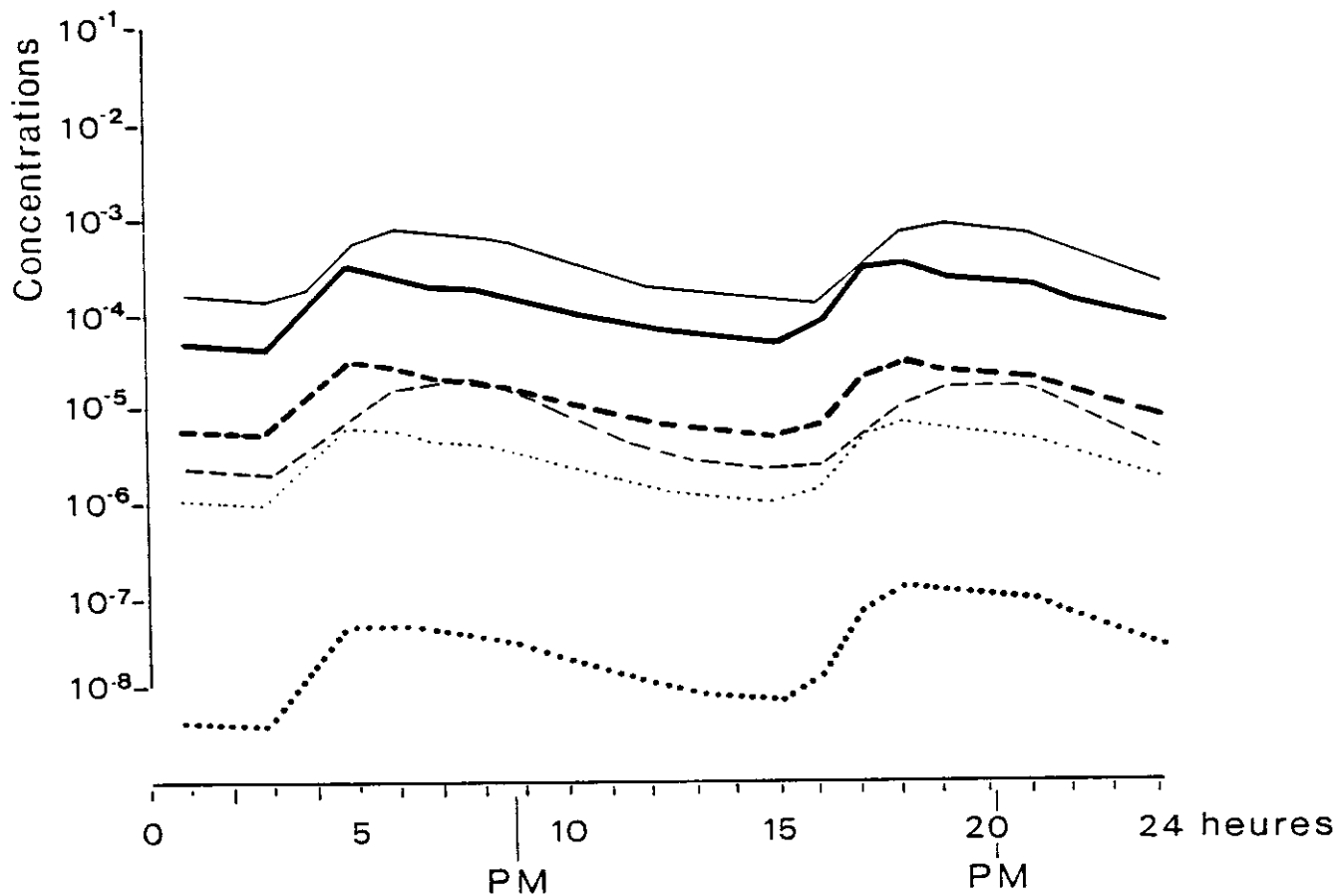
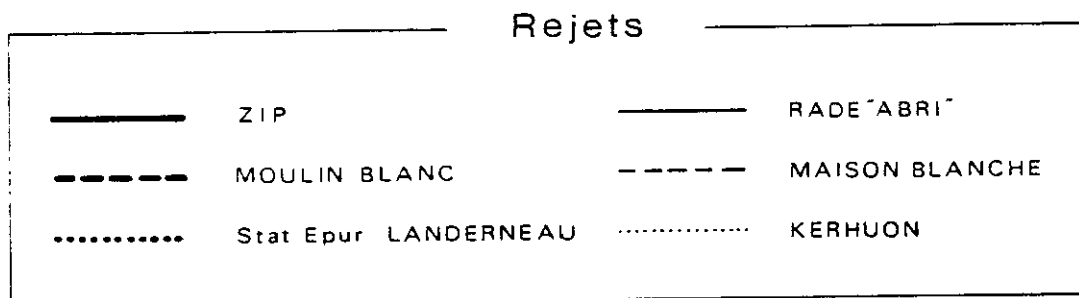


Fig. A7

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point G | Vive Eau
Dégradation : T 90 infini

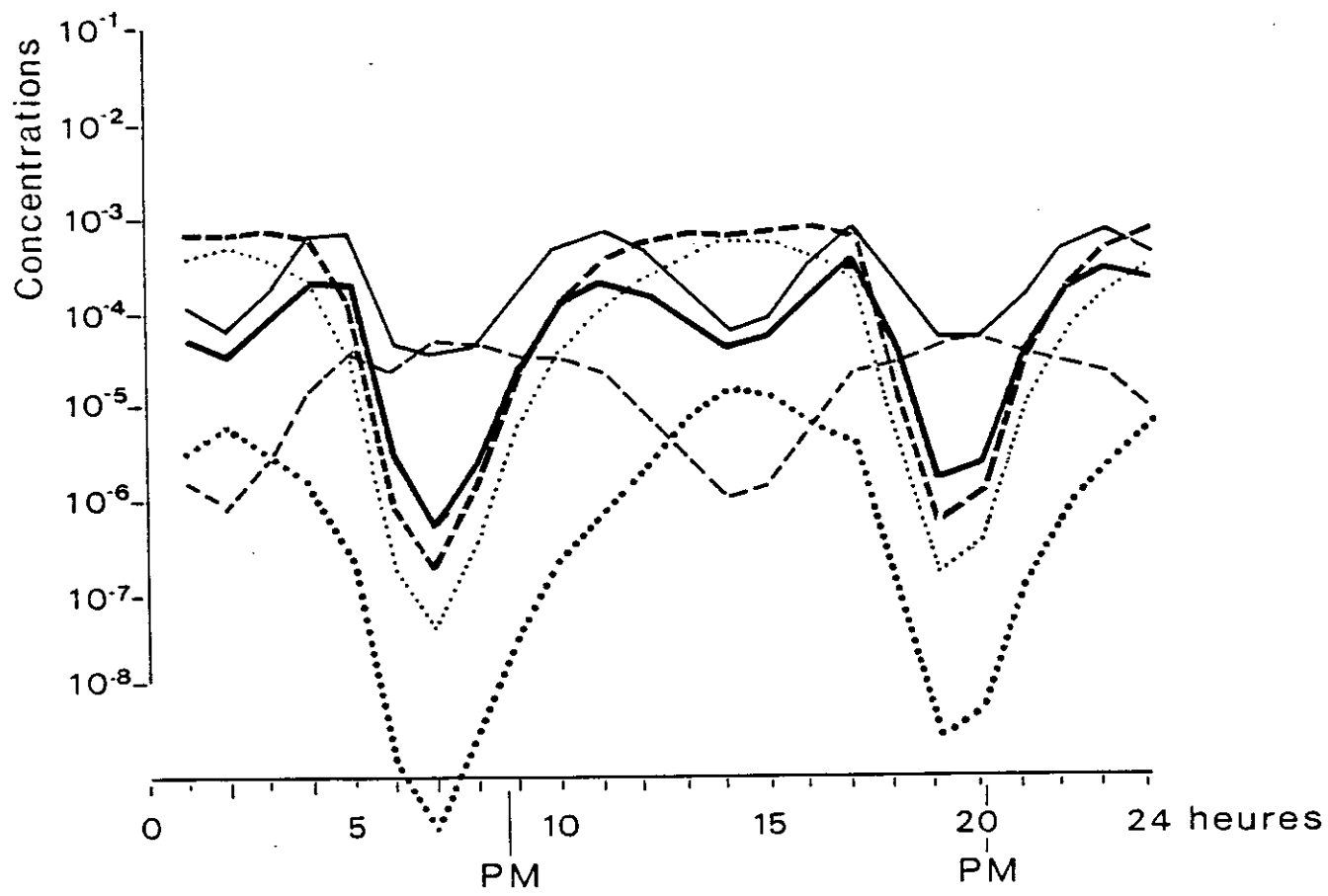
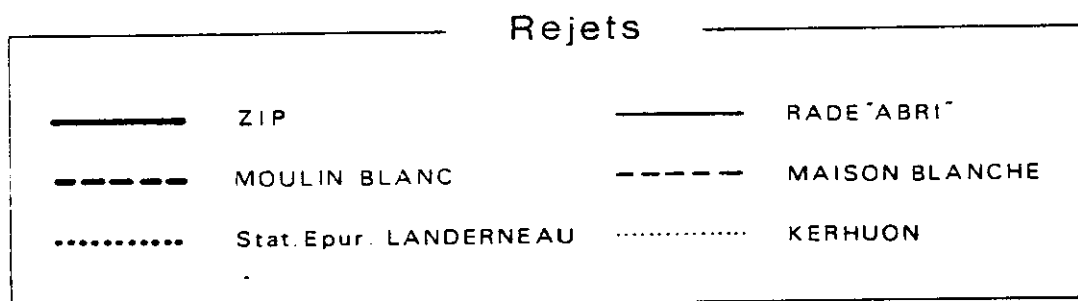


Fig. A8

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point H

Vive Eau

Dégradation : T 90 infini

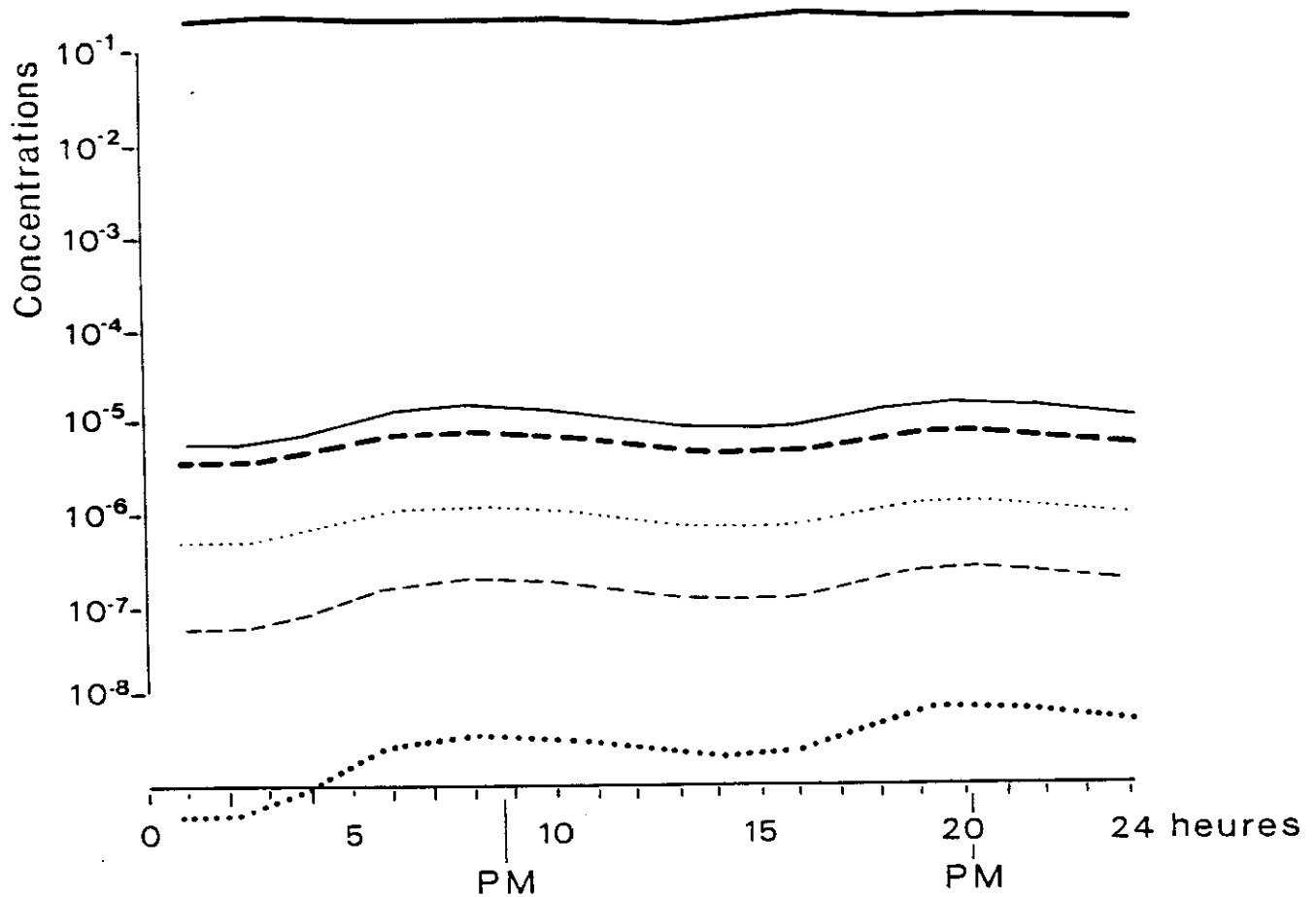
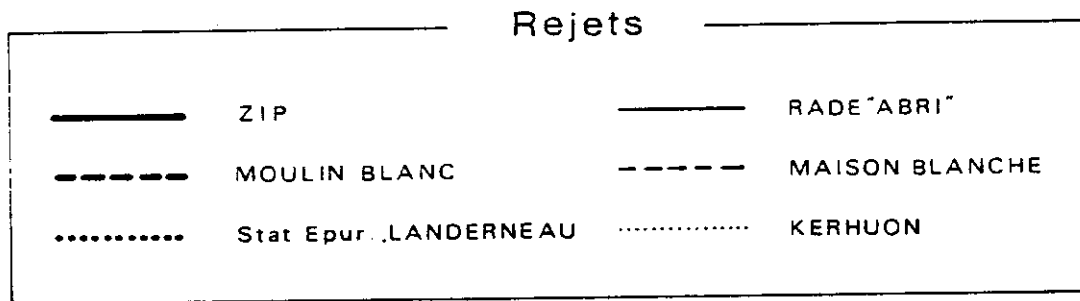


Fig. A9

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point 1 | Vive Eau
Dégradation : T 90 infini

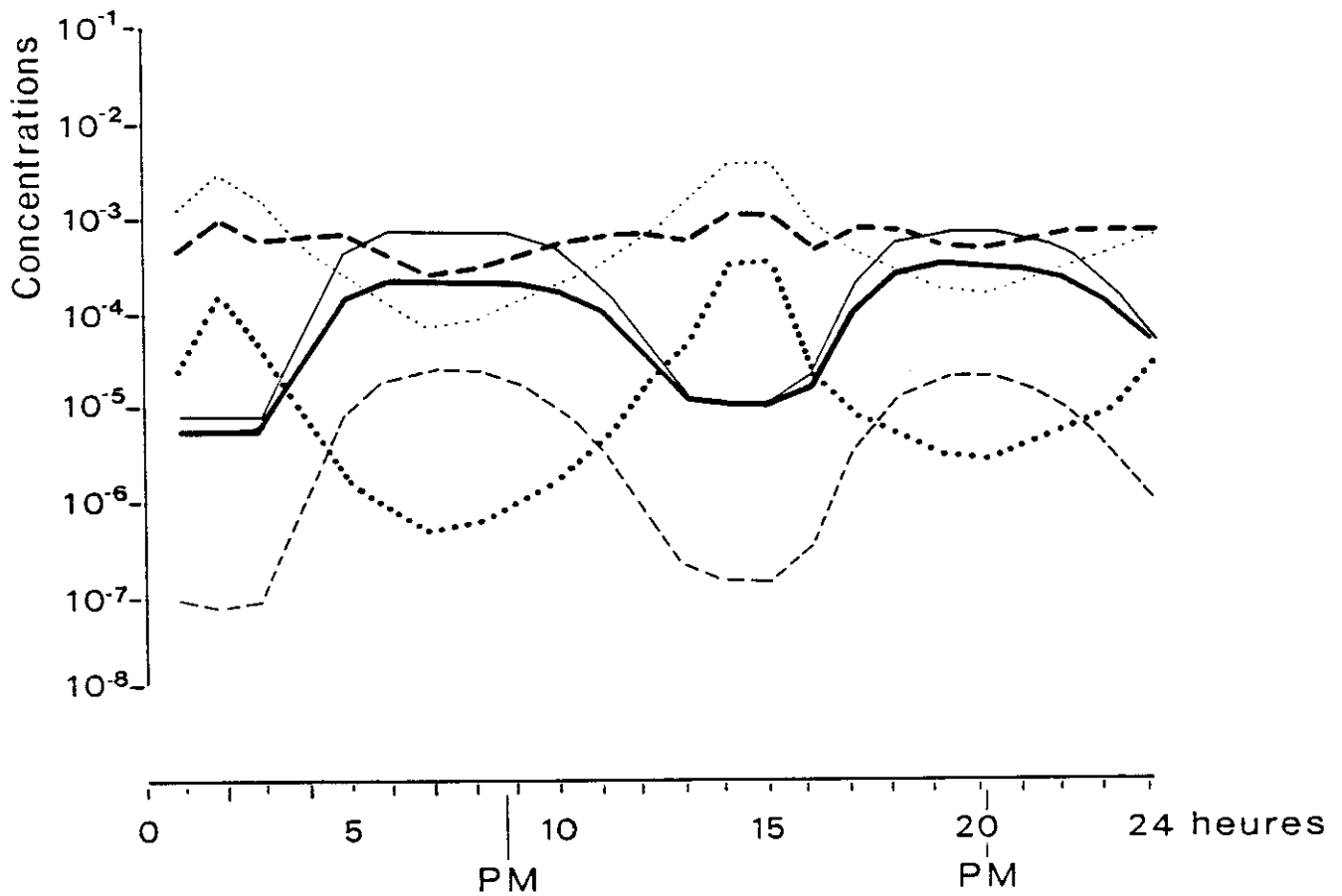
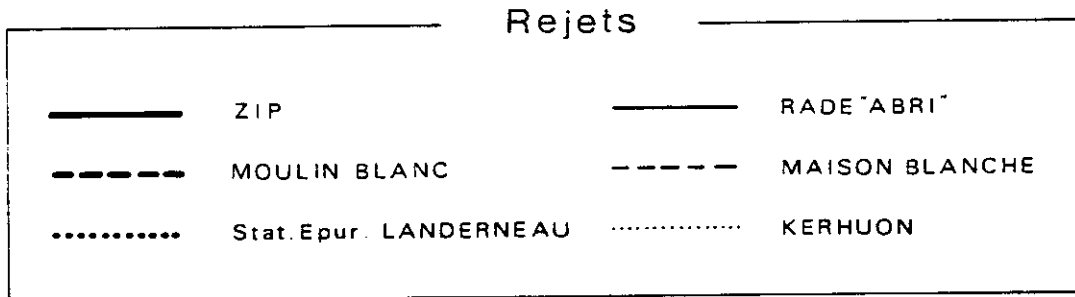


Fig. A10

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point J

Vive Eau

Dégradation : T 90 infini

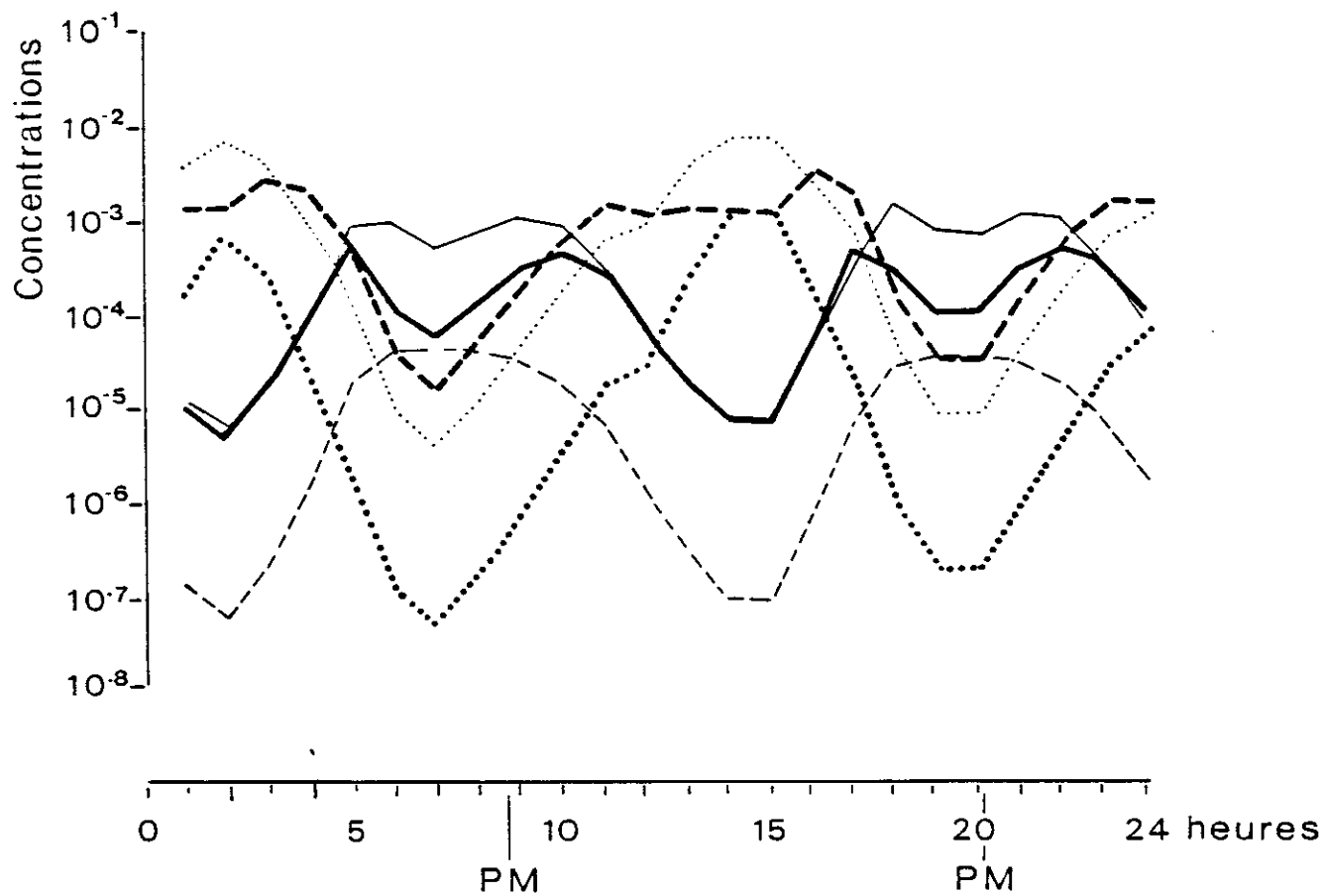
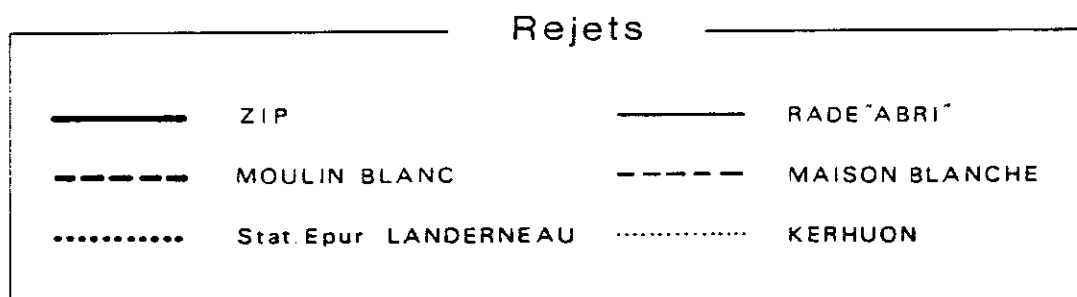


Fig. A11

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point K

Vive Eau

Dégradation : T 90 infini

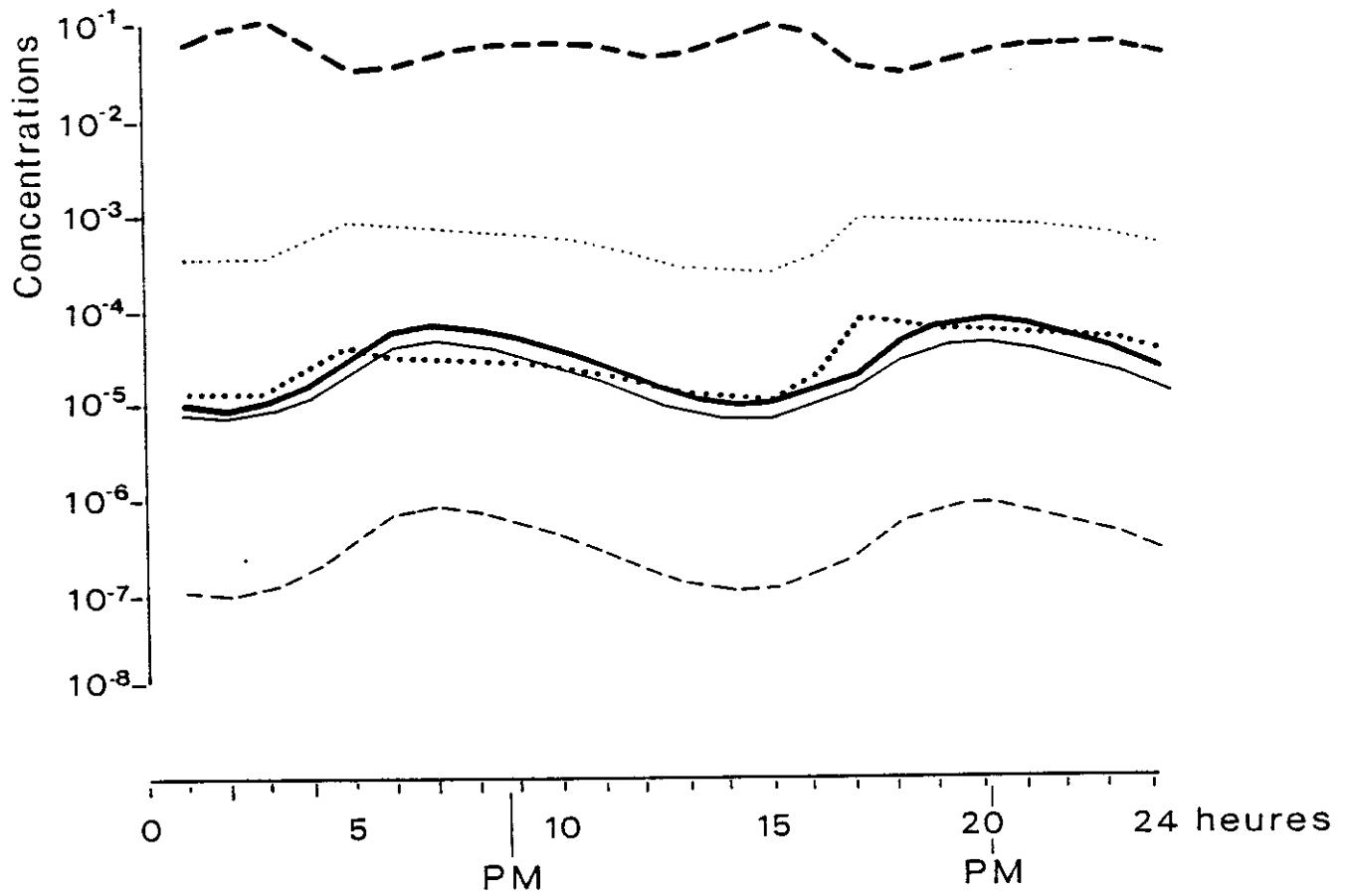
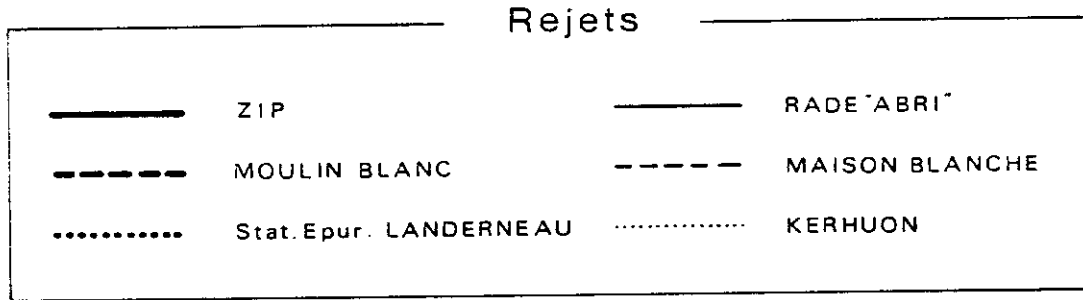


Fig. A12

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point L | Vive Eau
Dégradation : T 90 infini

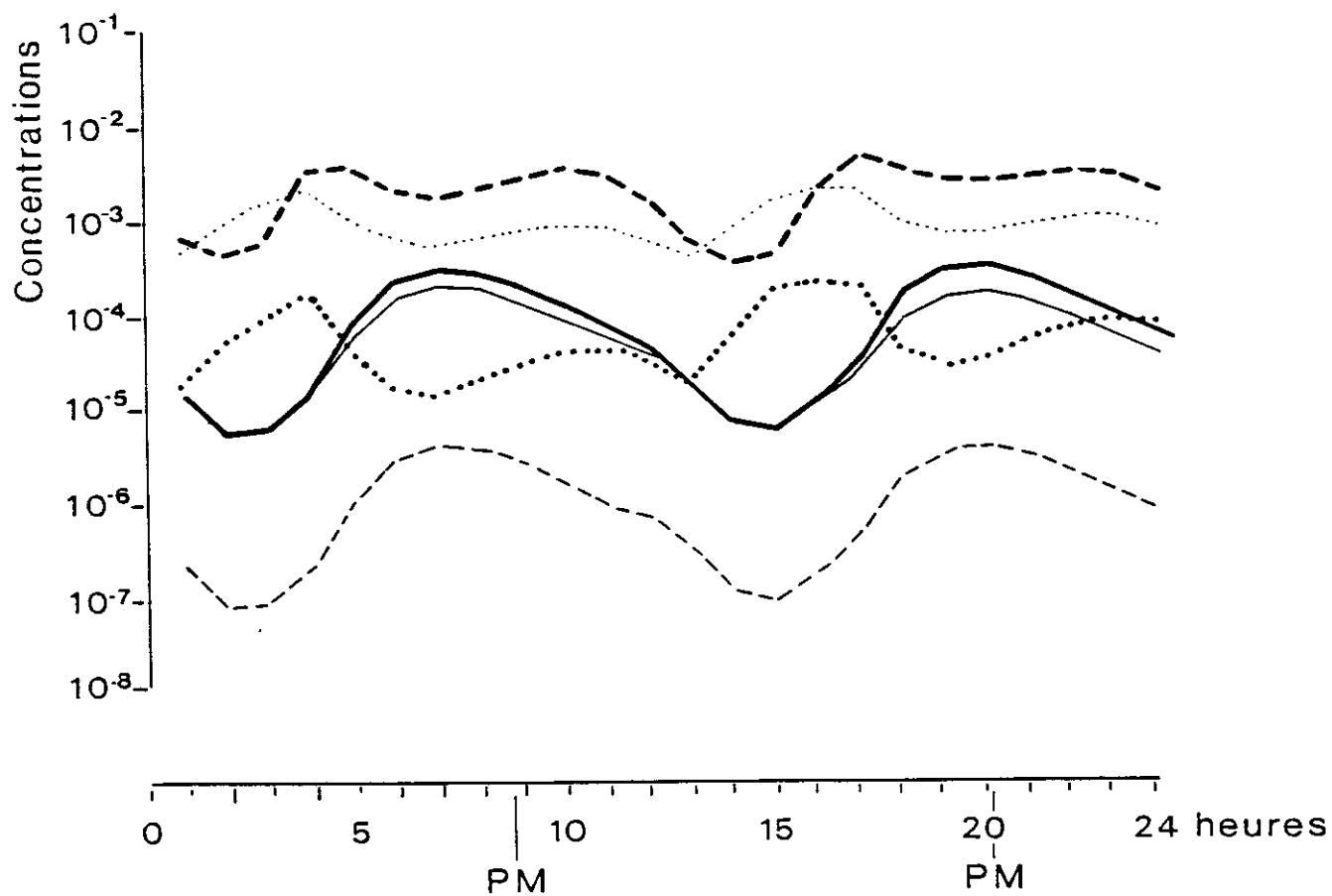


Fig. A13

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point M | Vive Eau
Dégradation : T 90 infini

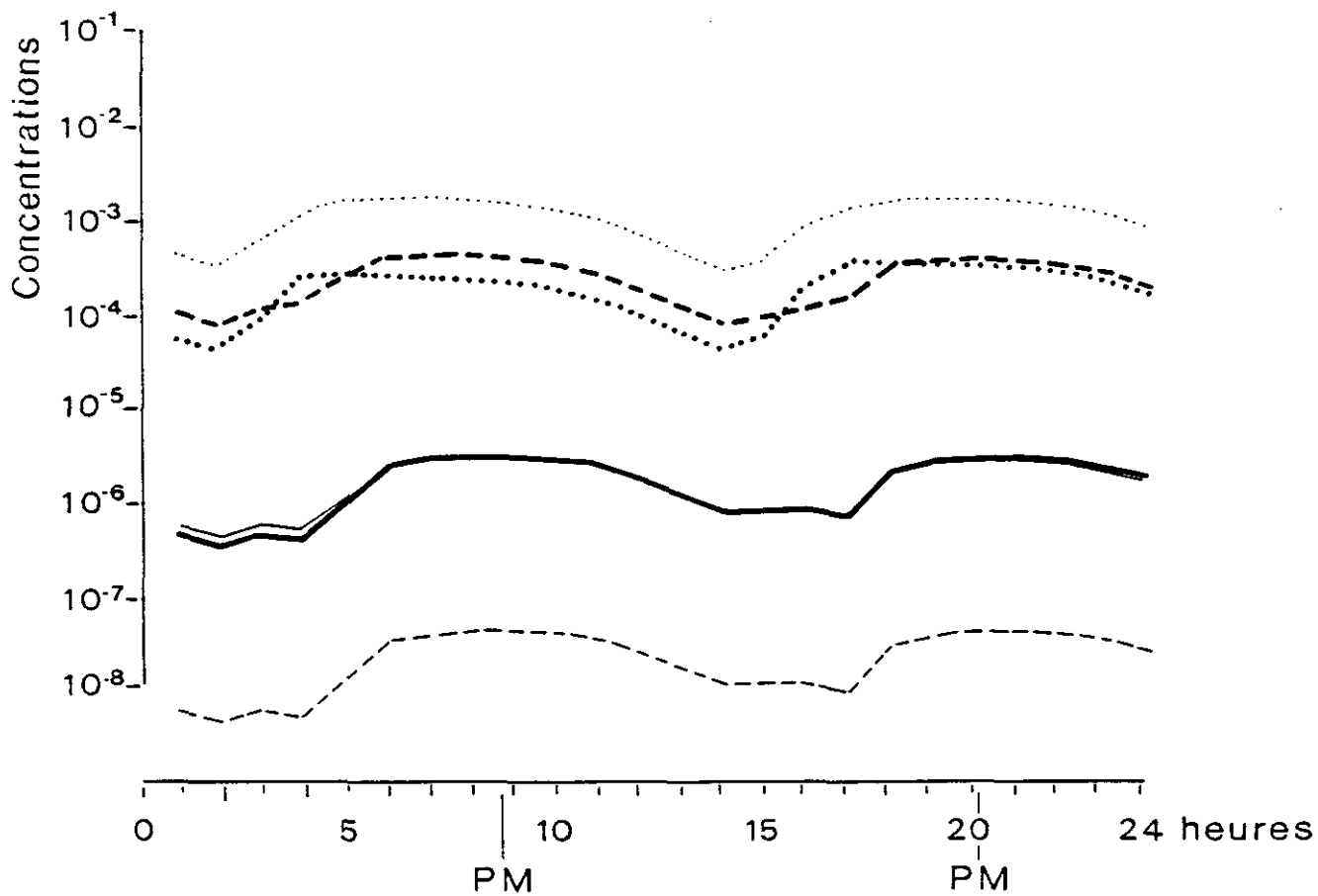
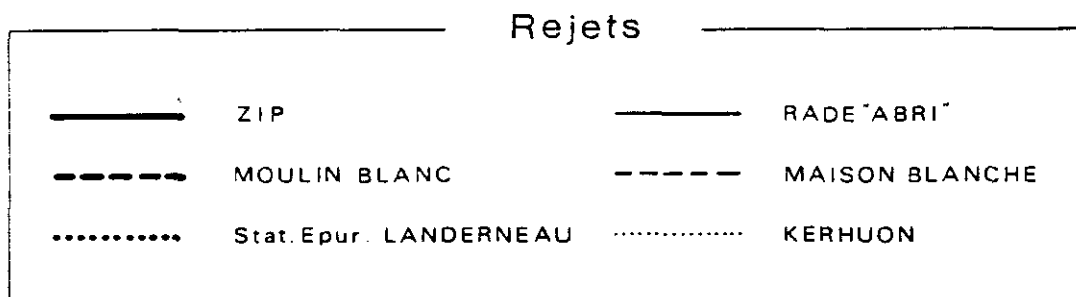


Fig. A14

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point N | Vive Eau
Dégradation : T 90 infini

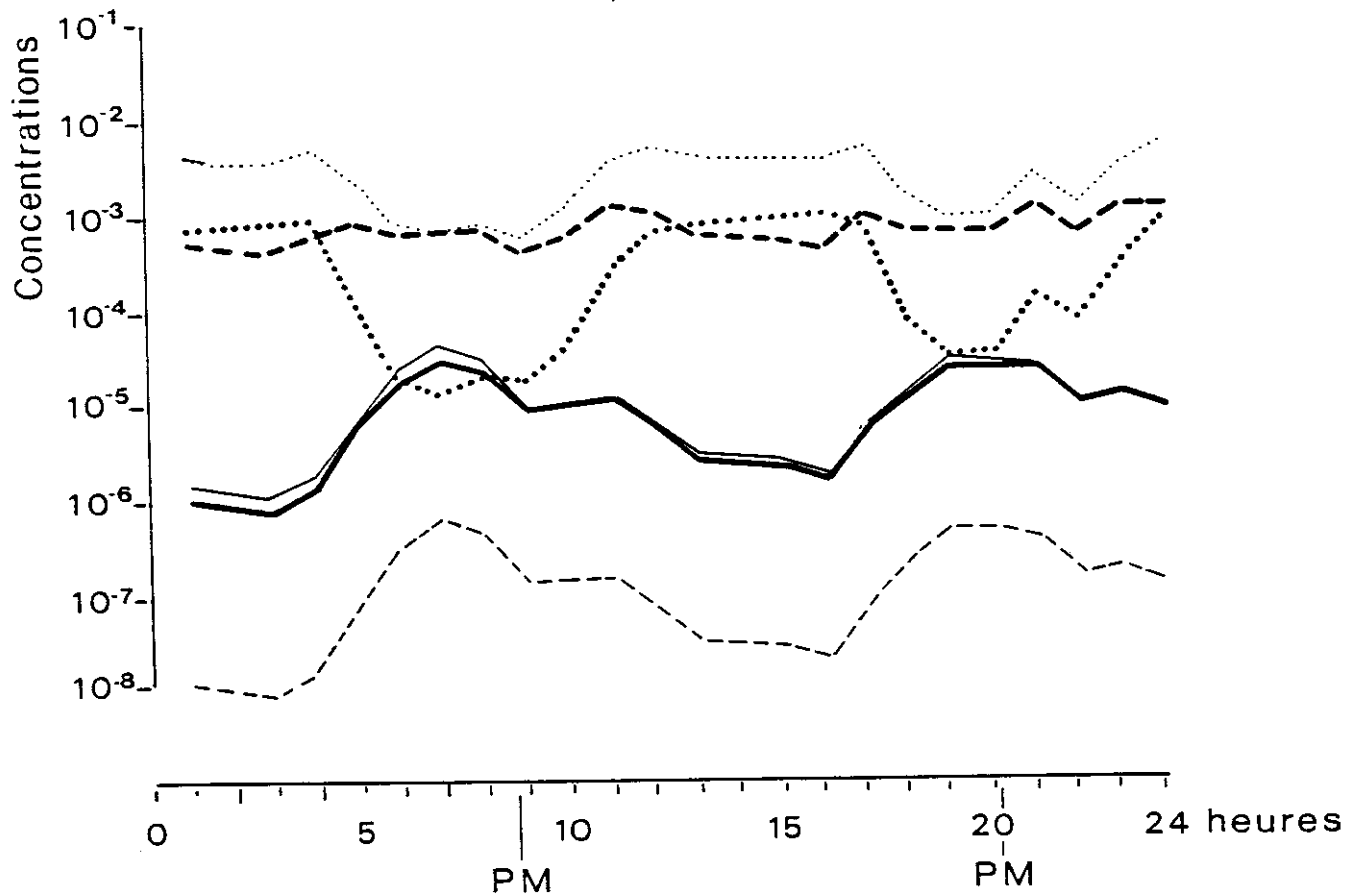
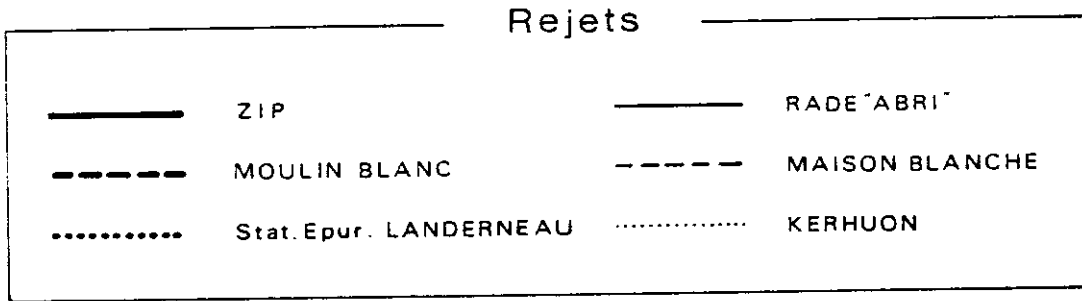
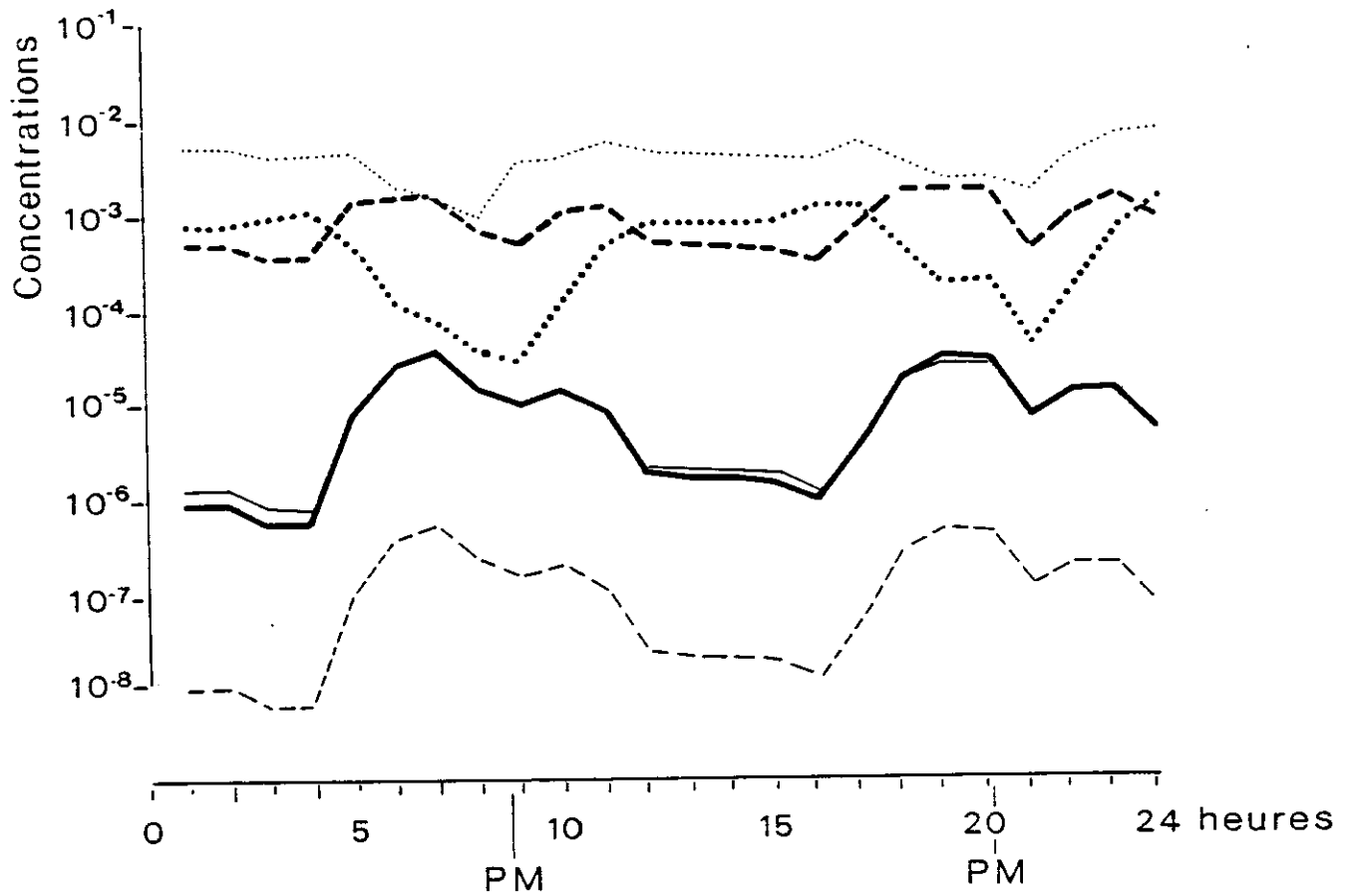
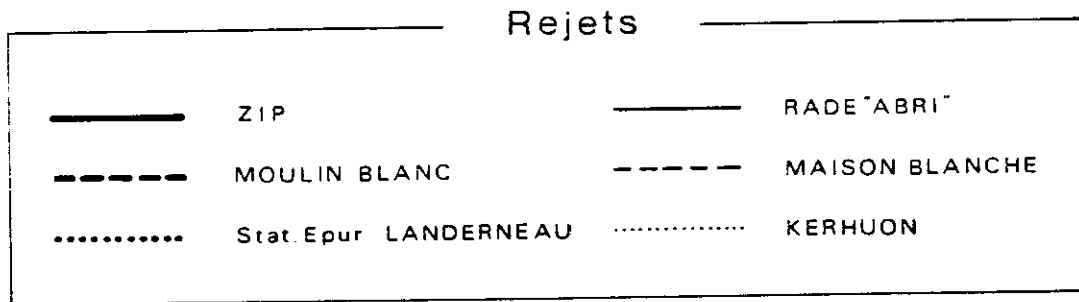


Fig. A15

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point O | Vive Eau
Dégradation : T 90 infini



ANNEXE 3

Calcul de dilution des rejets

Scénario de simulation n° 3

MORTE EAU
T90 infini

coefficient de dispersion de type "Elder isotrope" ($K_y = K_x$)

Pour l'ensemble des rejets, le régime stationnaire n'est pas encore atteint.

Fig. A16

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point A | Morte Eau
Dégradaation : T 90 infini

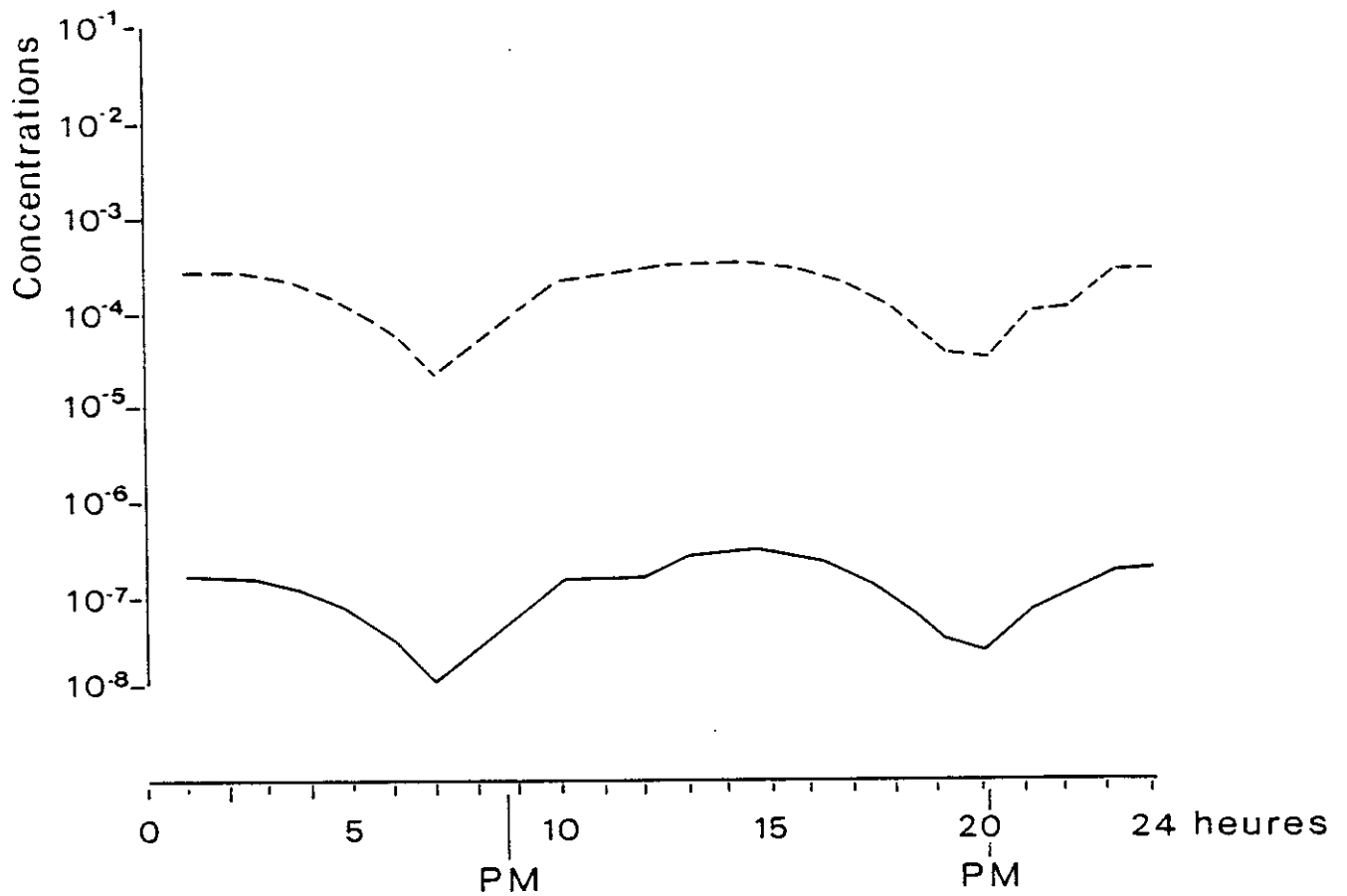
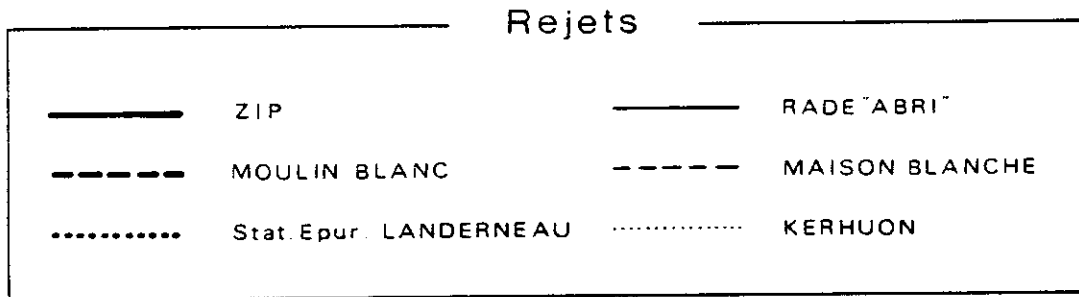


Fig. A17

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point B | Morte Eau
Dégradation : T 90 infini

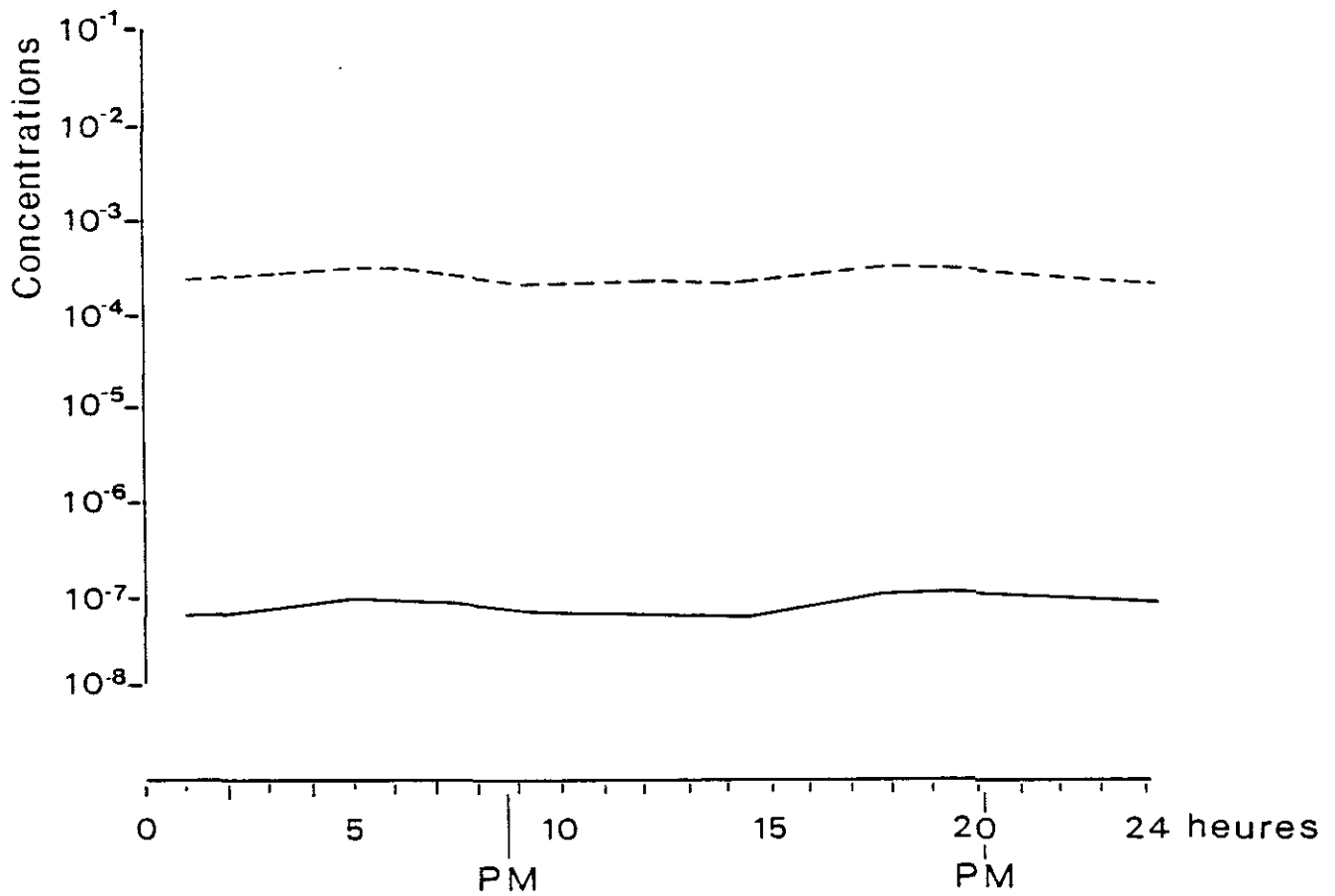
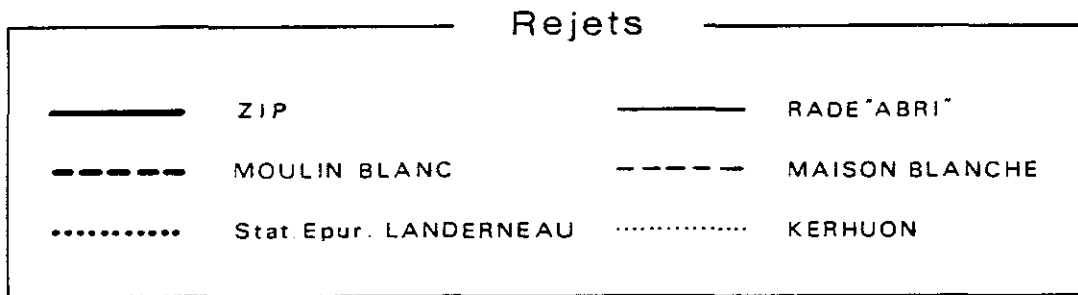


Fig. A18

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point C | Morte Eau
Dégradation : T 90 infini

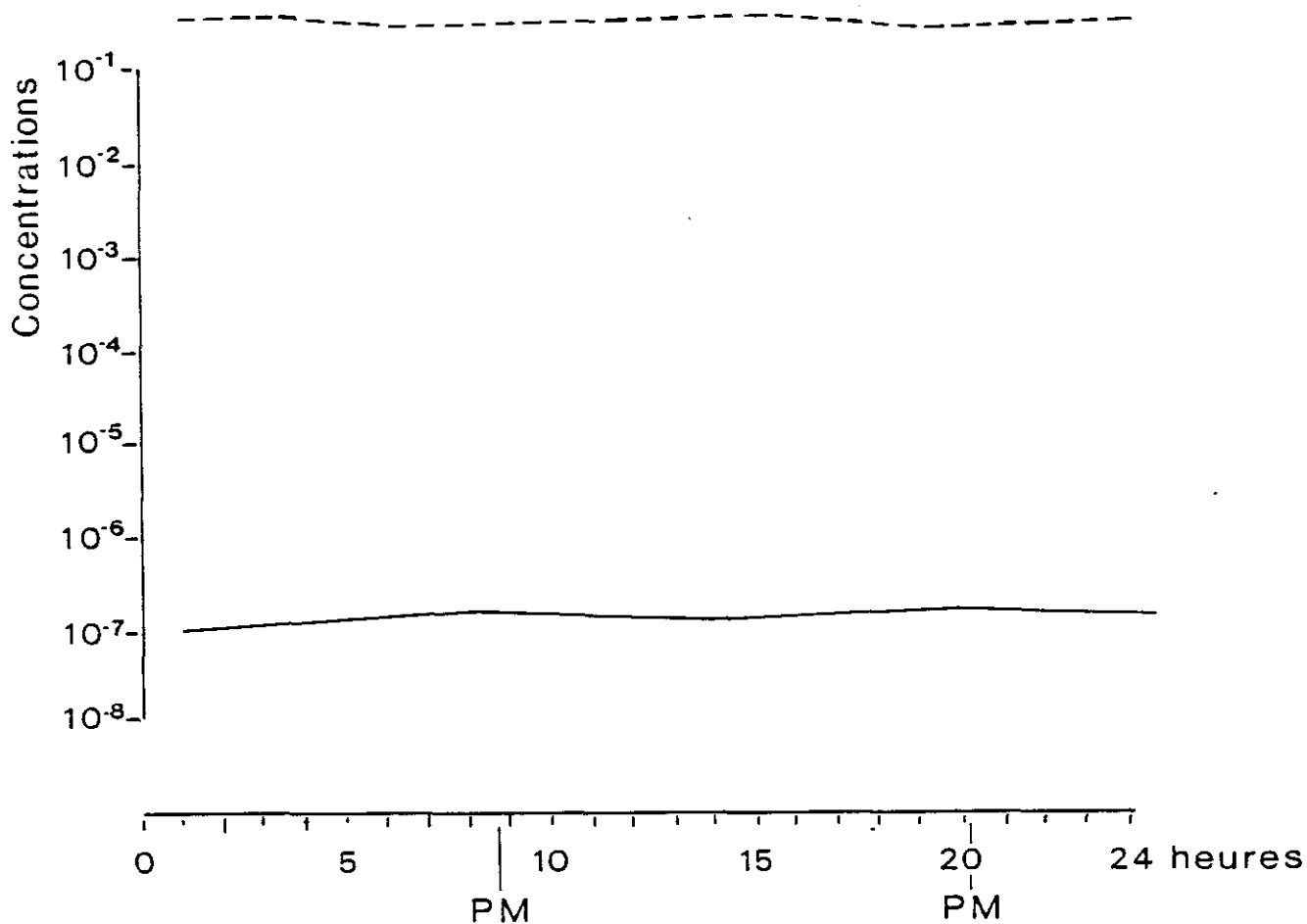
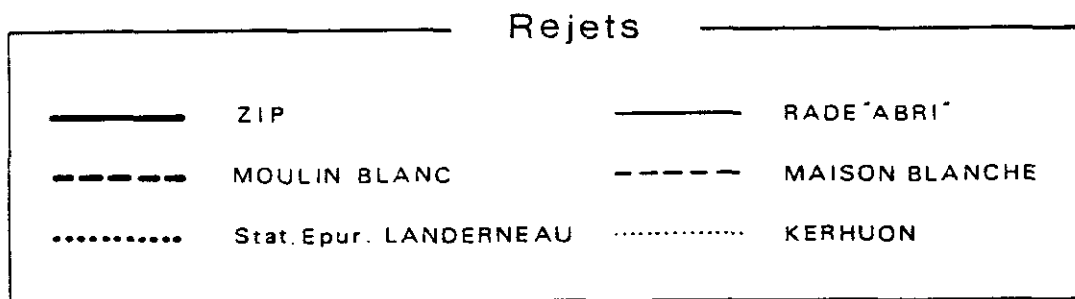


Fig. A19

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point D | Morte Eau
Dégradation : T 90 infini

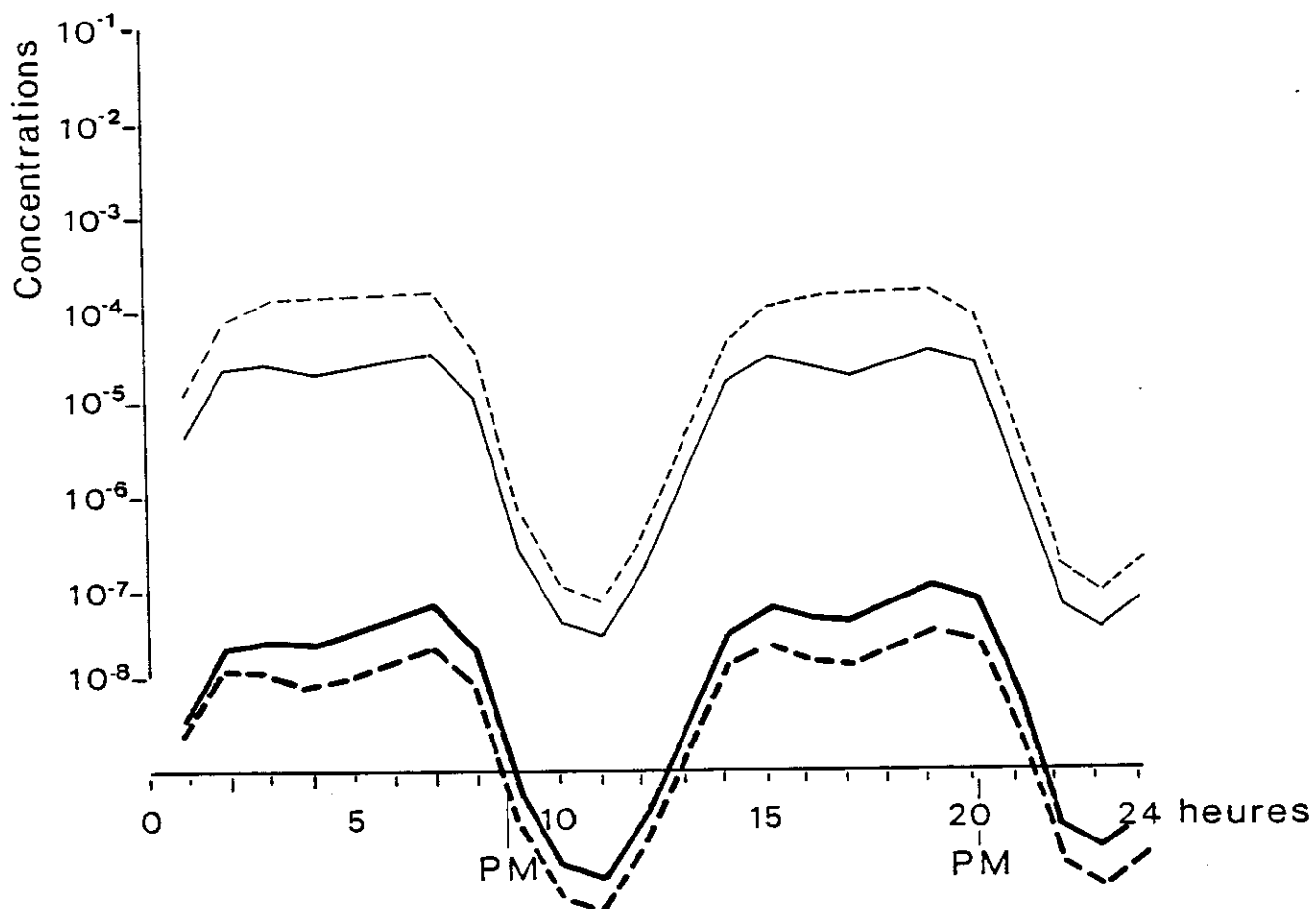
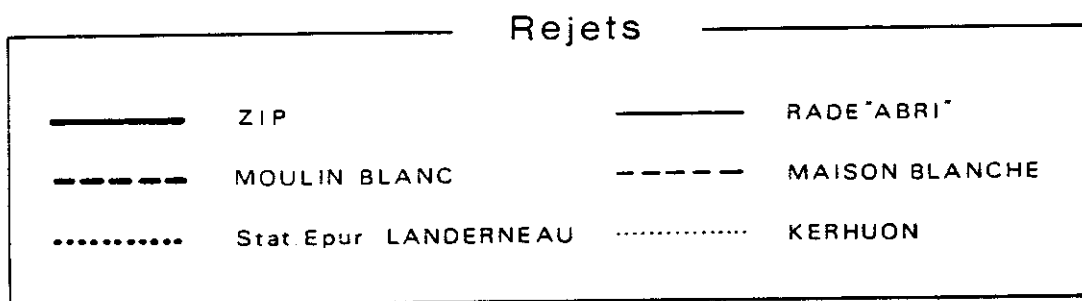


Fig. A20

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point E | Morte Eau
Dégradaation : T 90 infini

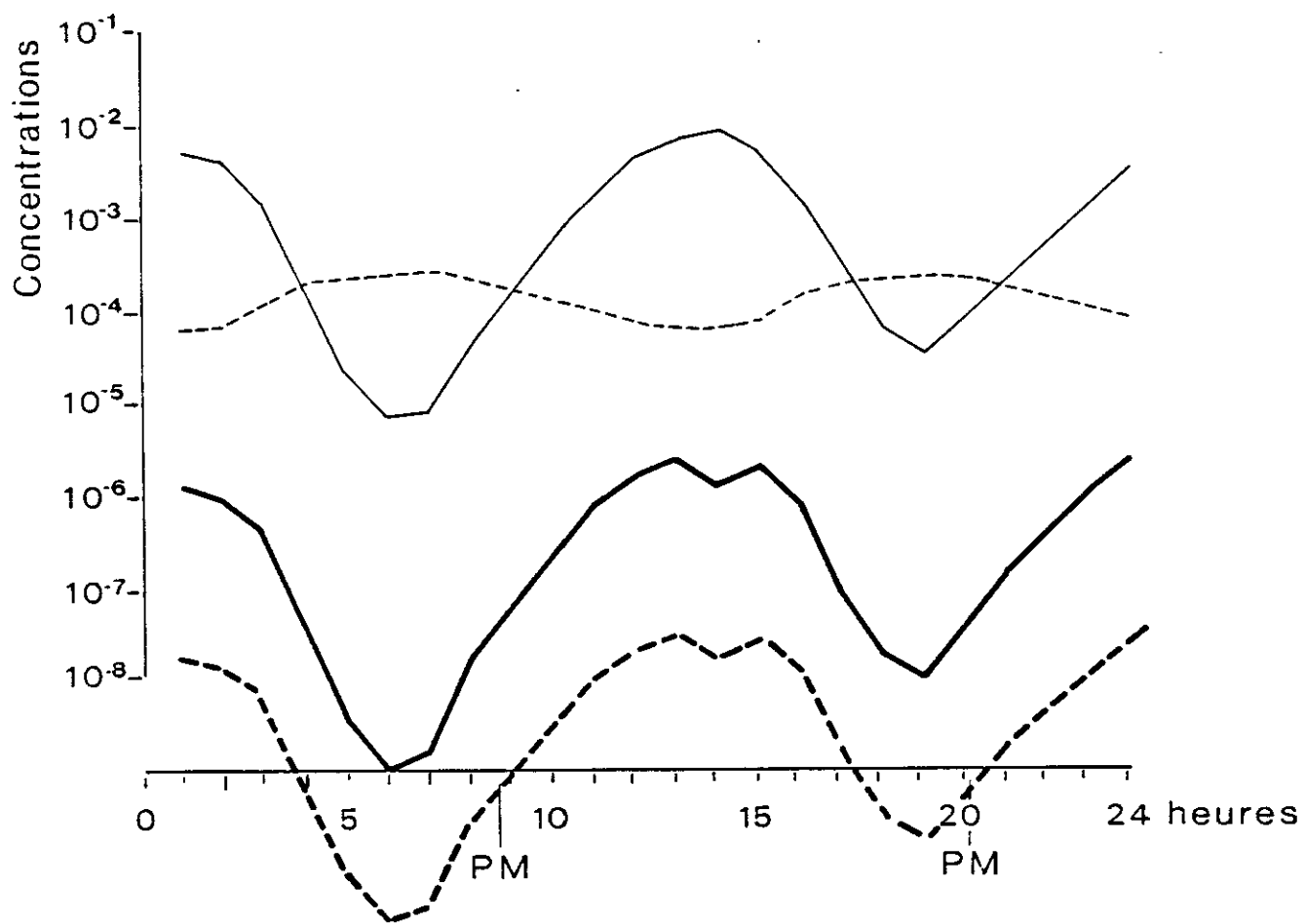
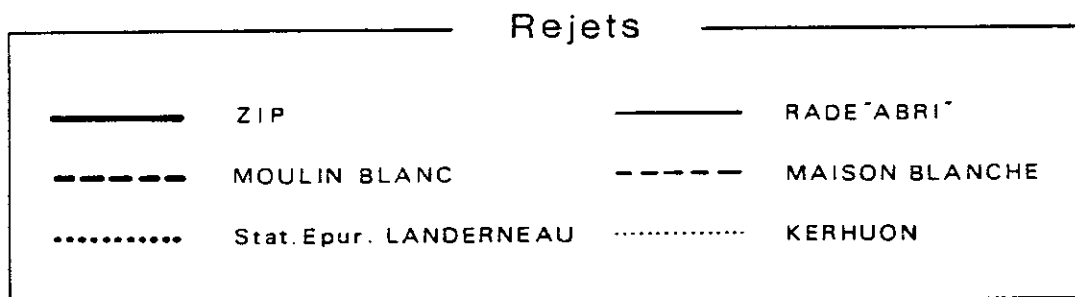


Fig. A21

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point F | Morte Eau
Dégradation : T 90 infini

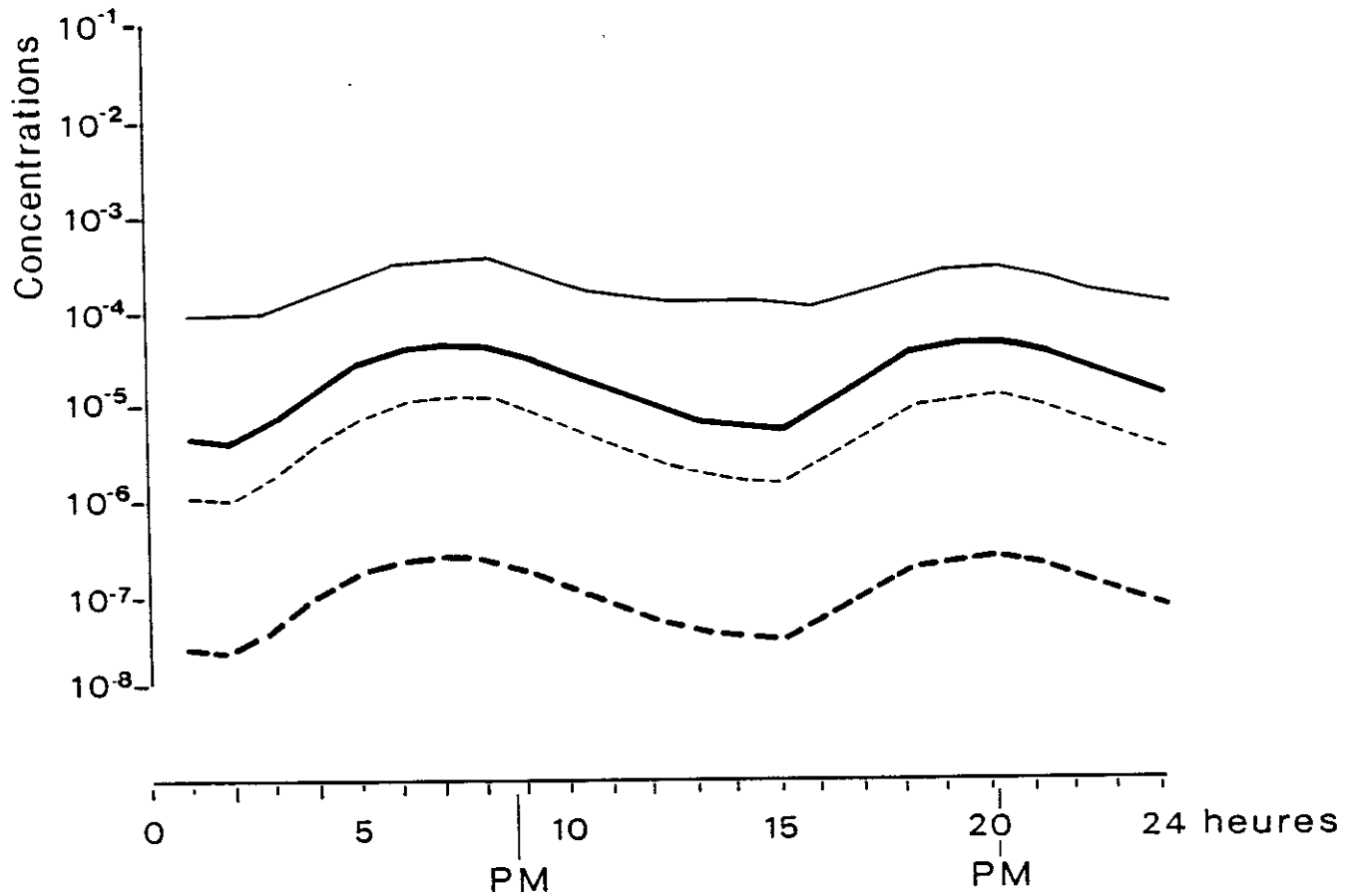
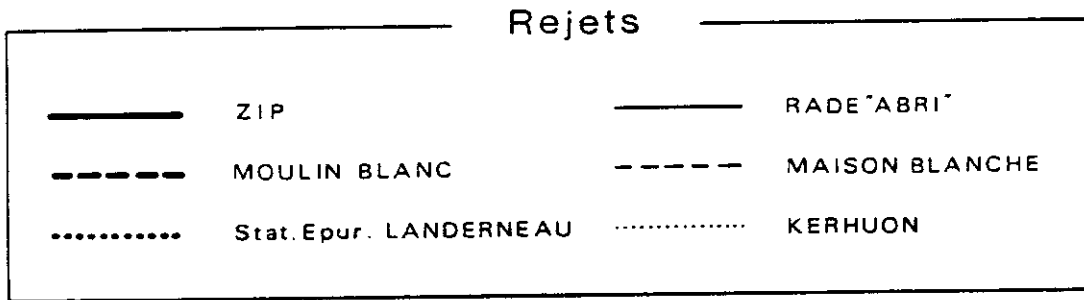


Fig. A23

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point H | Morte Eau
Dégradation : T 90 infini

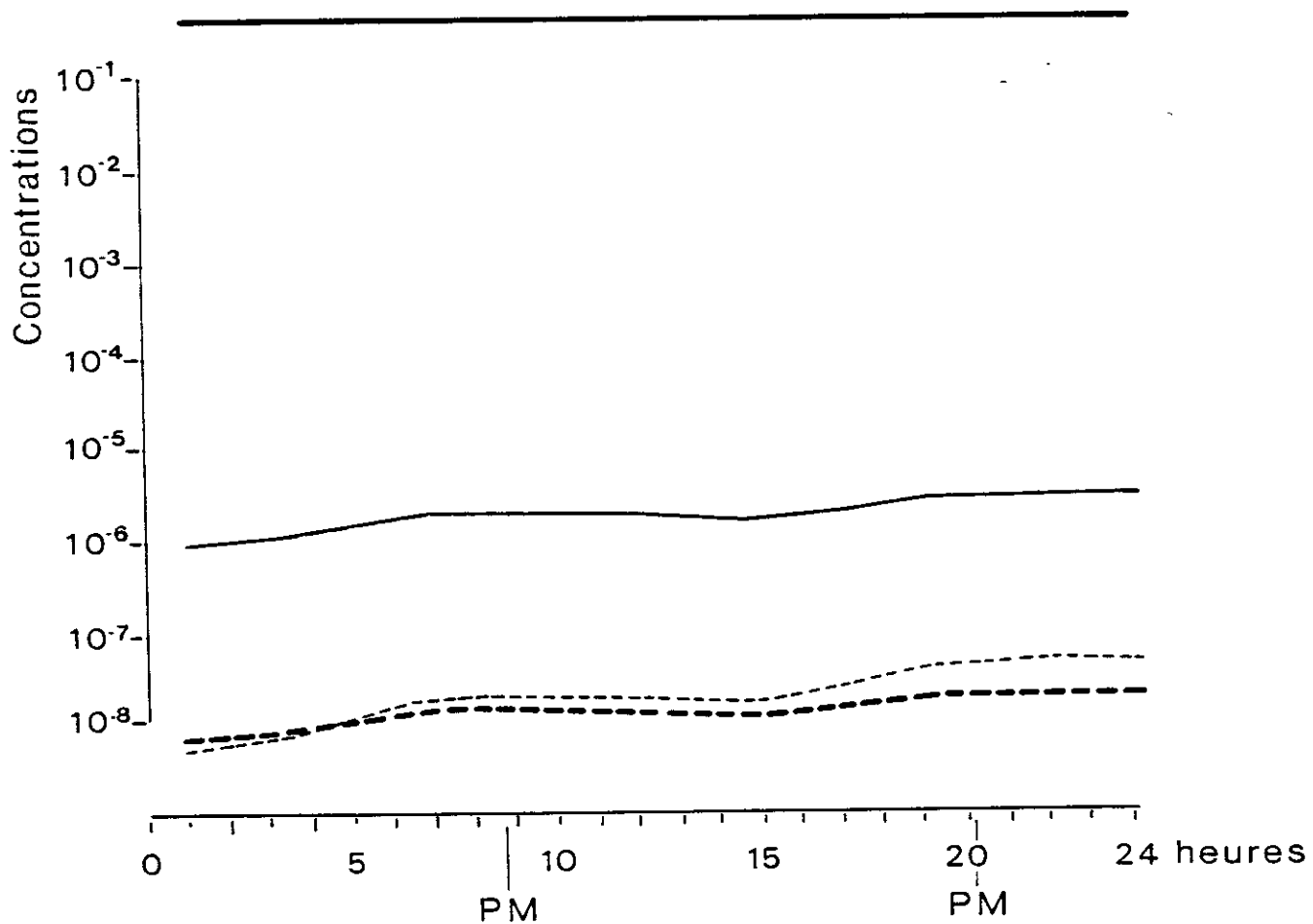
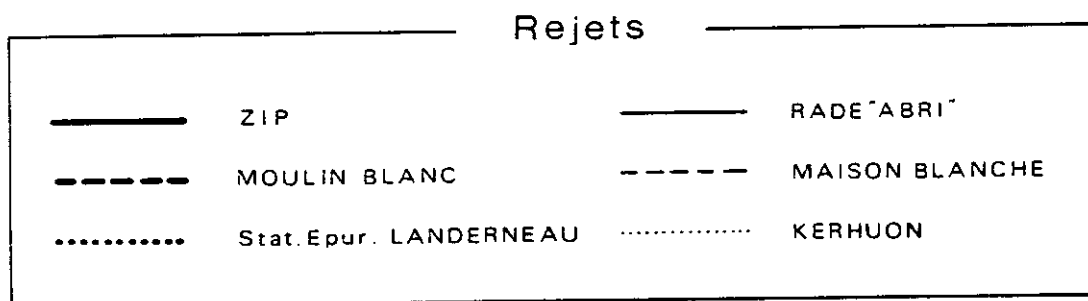


Fig. A24

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point 1

Morte Eau

Dégradation : T 90 infini

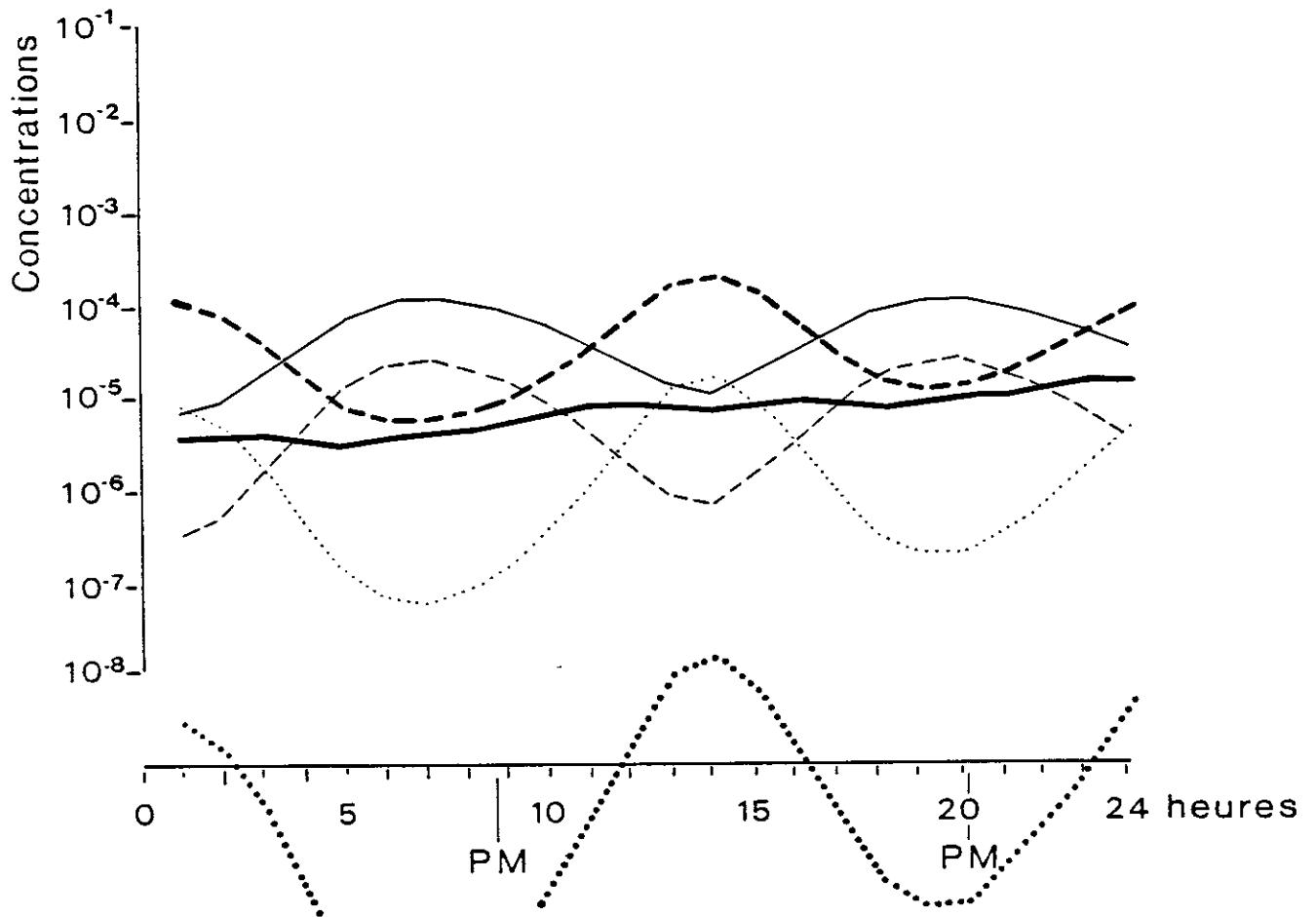
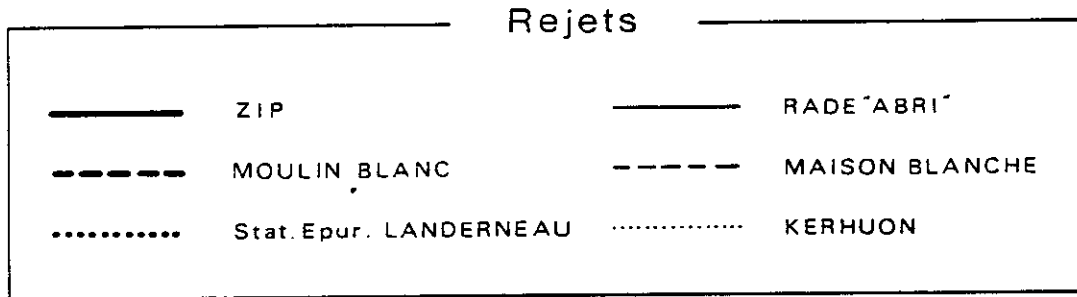


Fig. A25

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point J | Morte Eau
Dégradation : T 90 infini

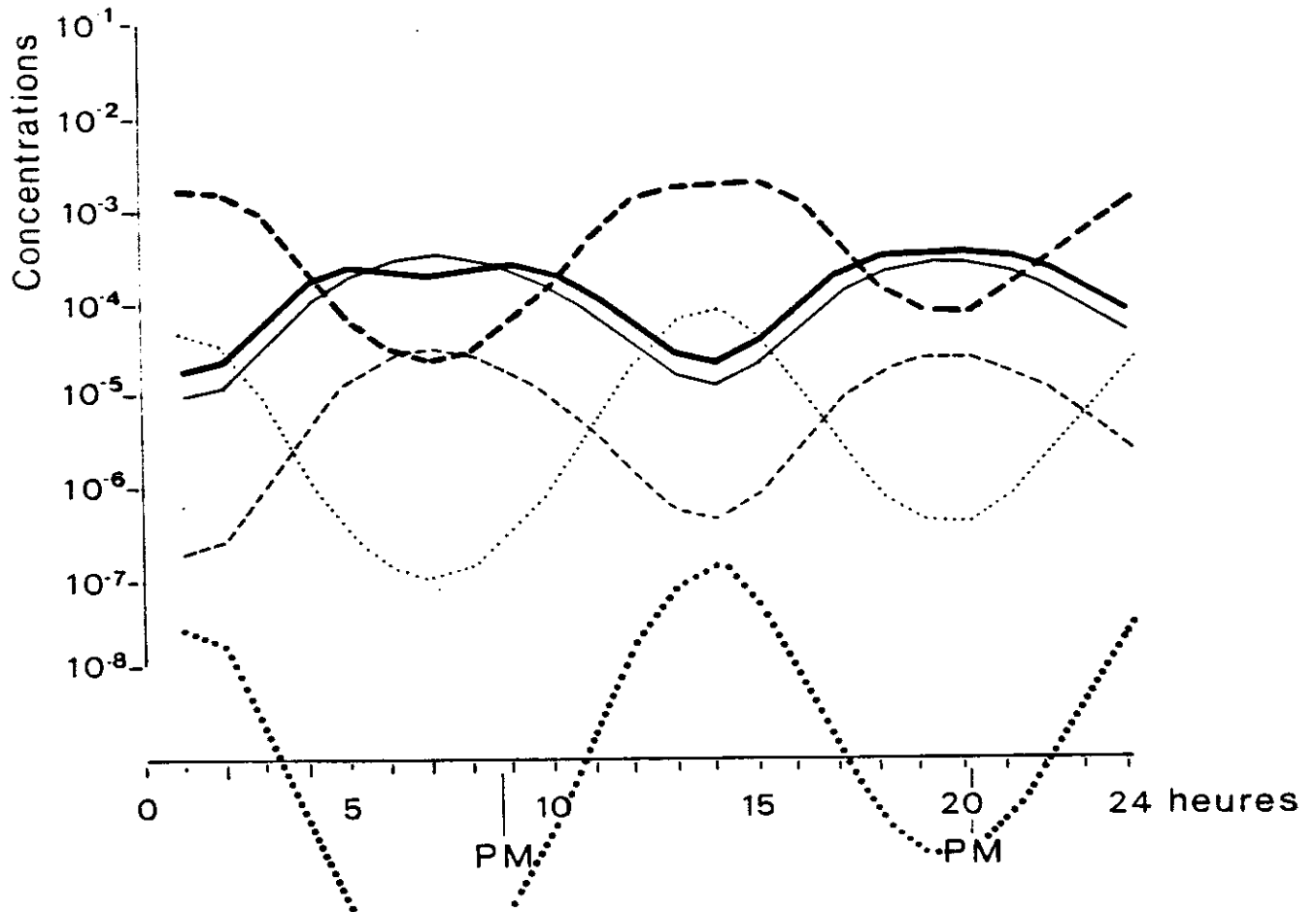
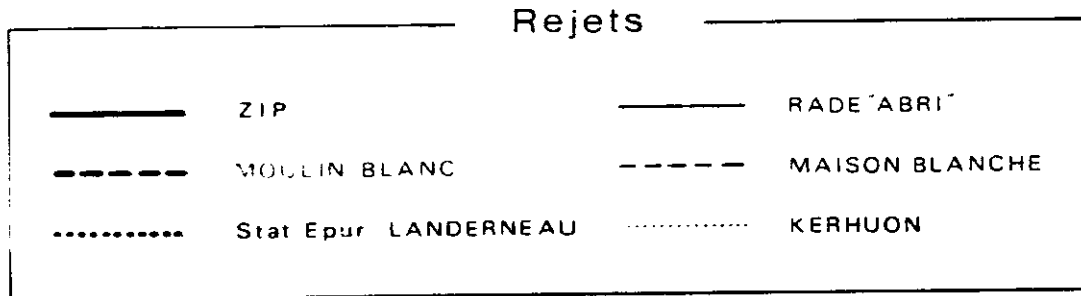


Fig. A26

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point K | Morte Eau
Dégradaation : T 90 infini

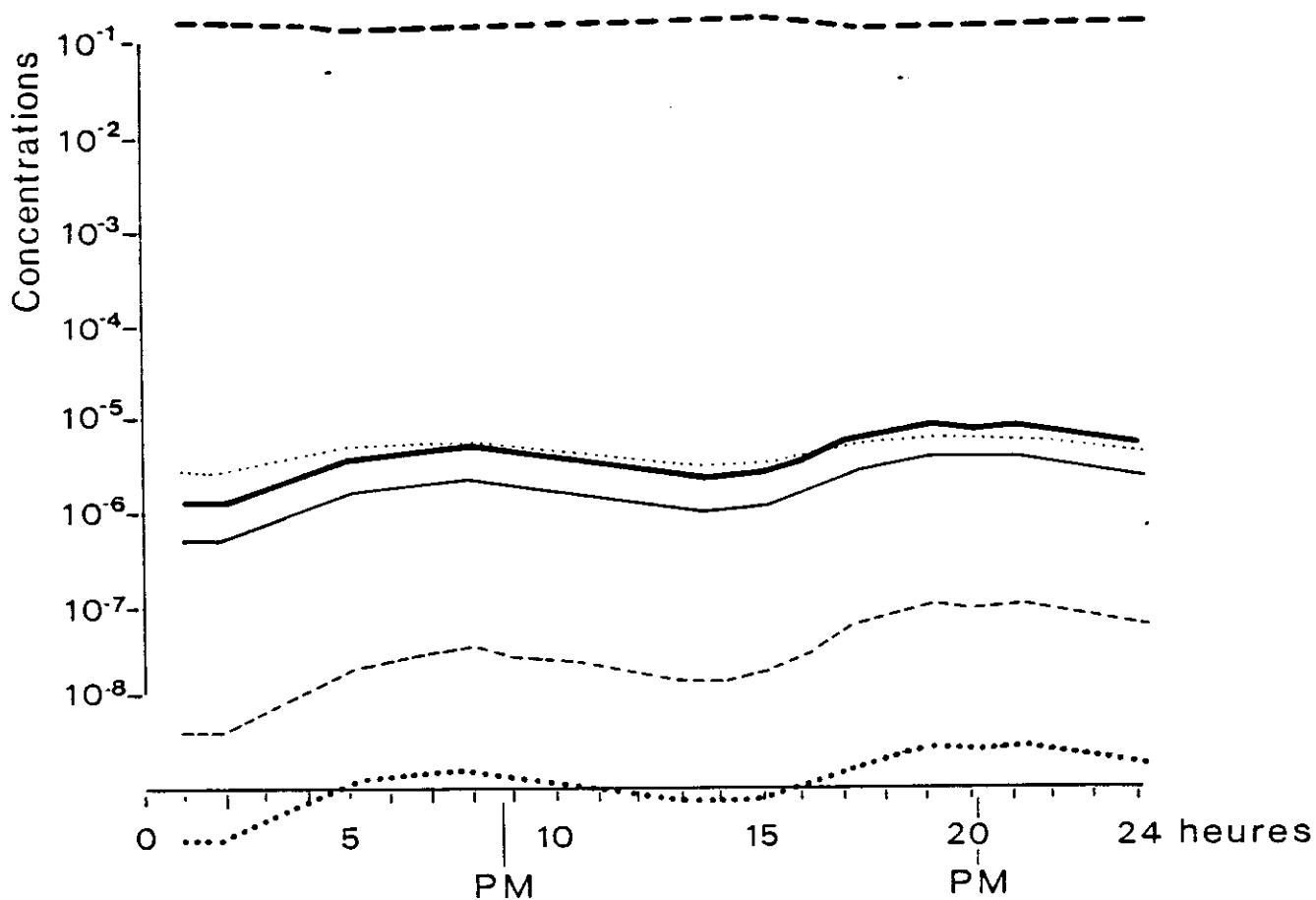
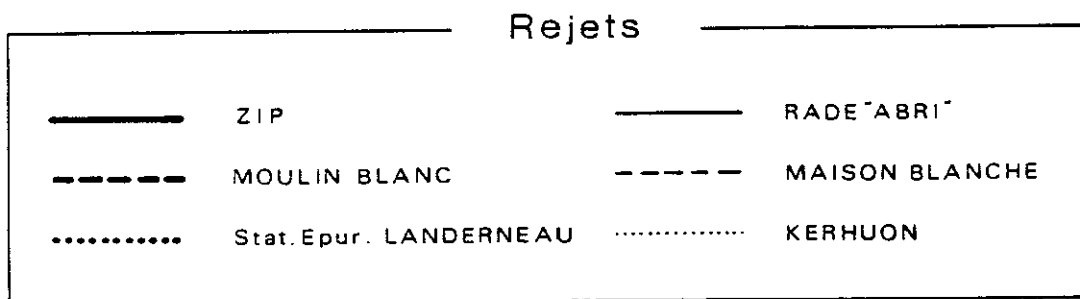


Fig. A27

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point L | Morte Eau
Dégradation : T 90 infini

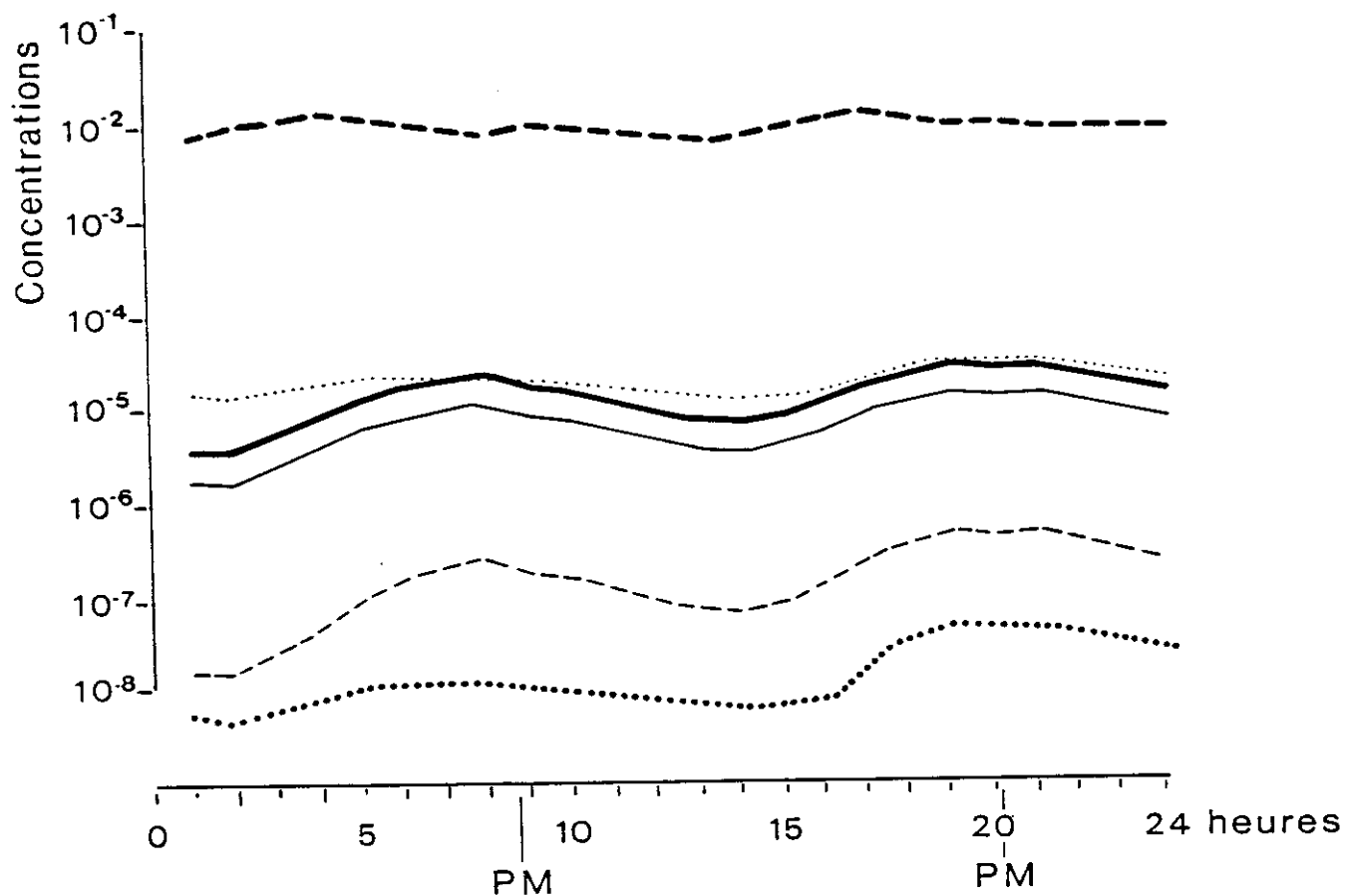
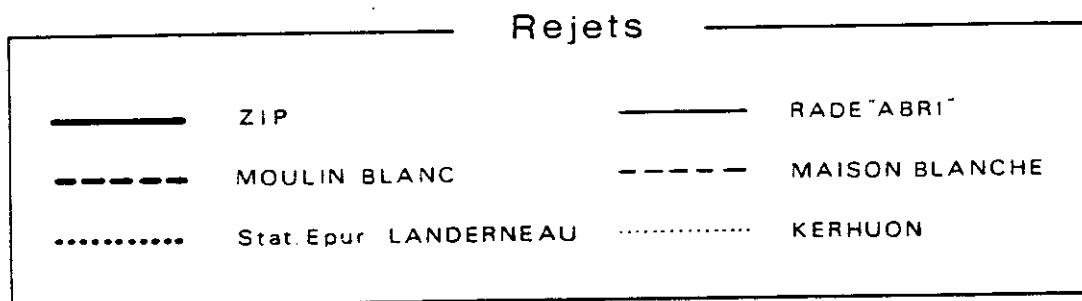


Fig. A28

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point M | Morte Eau
Dégradation : T 90 infini

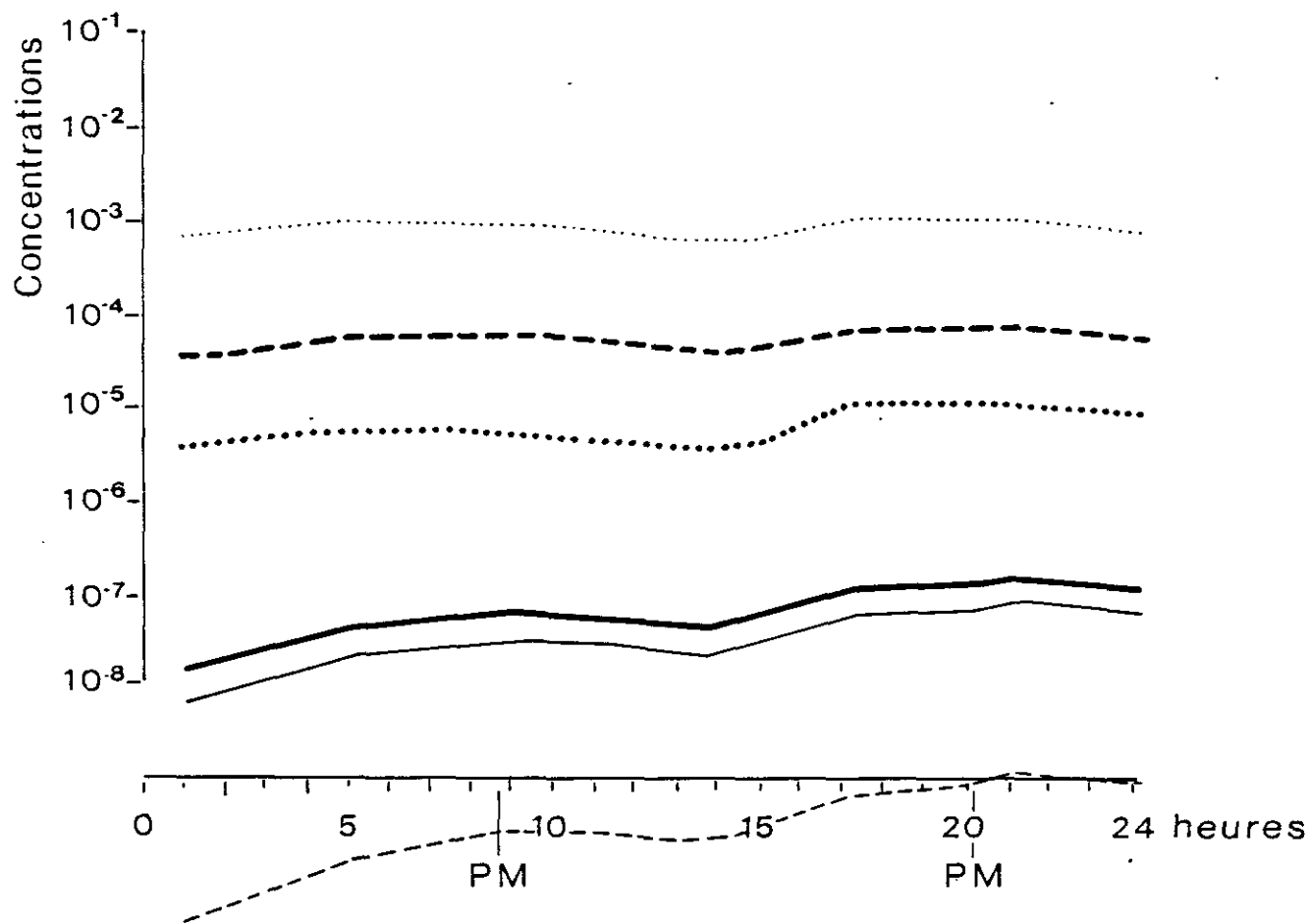
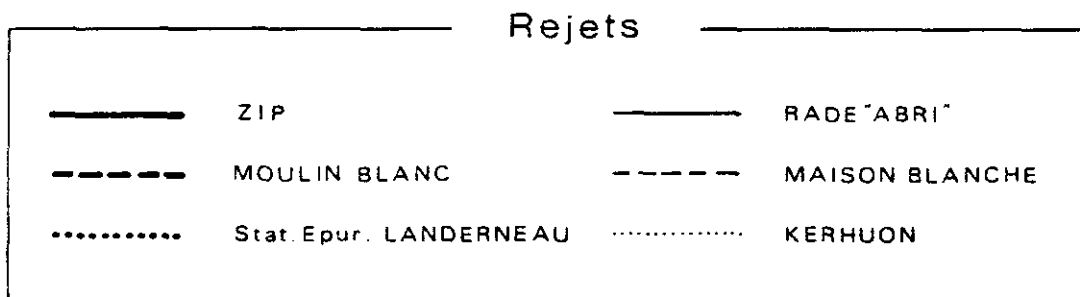


Fig. A29

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point N | Morte Eau
Dégradation : T 90 infini

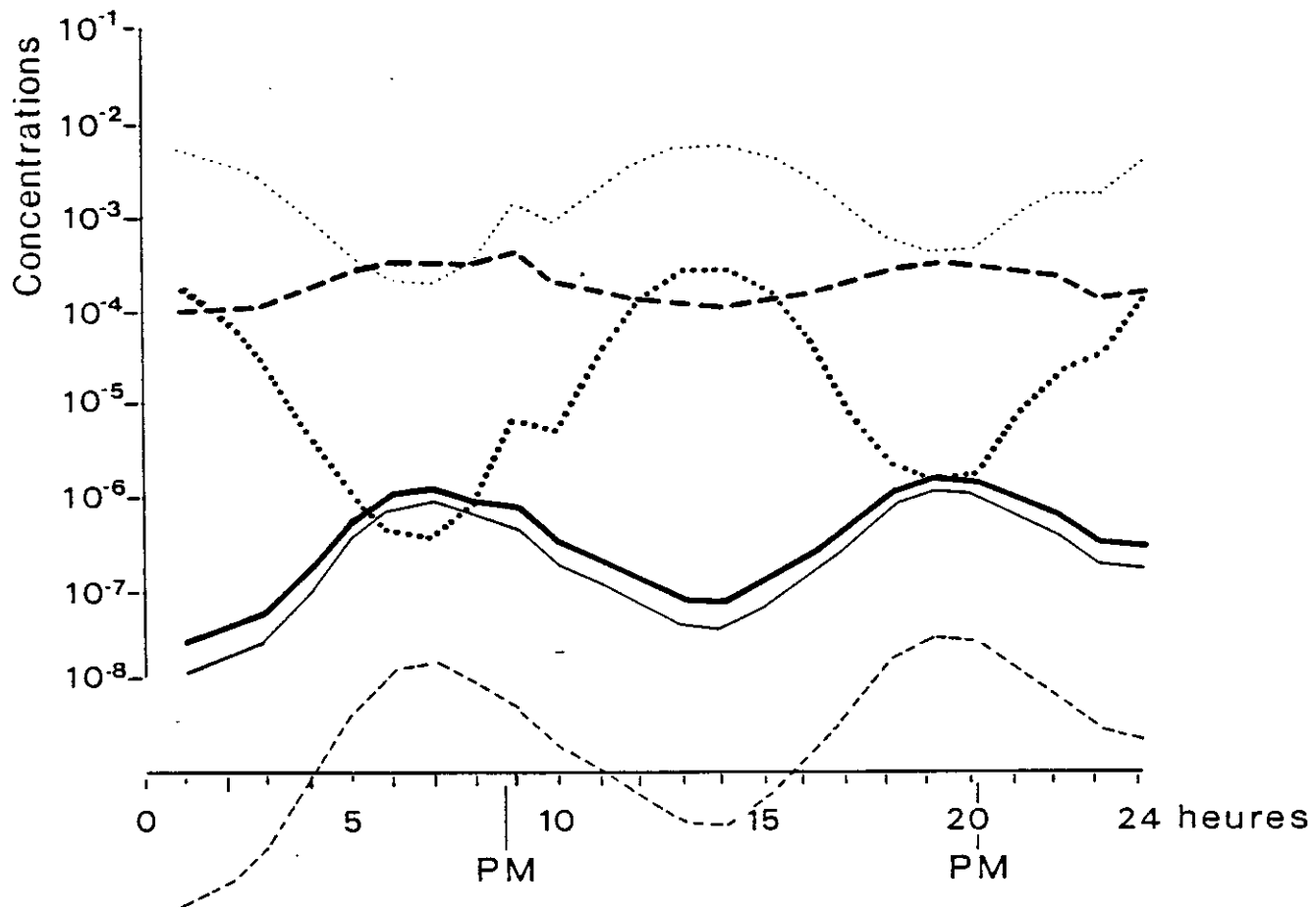
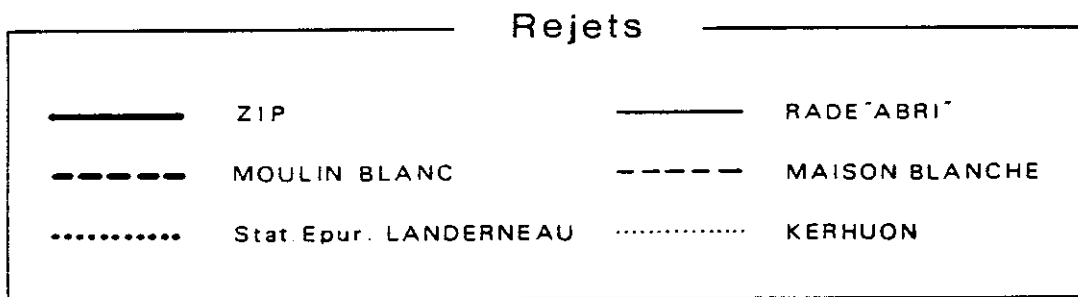


Fig. A30

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point O | Morte Eau
Dégradation : T 90 infini

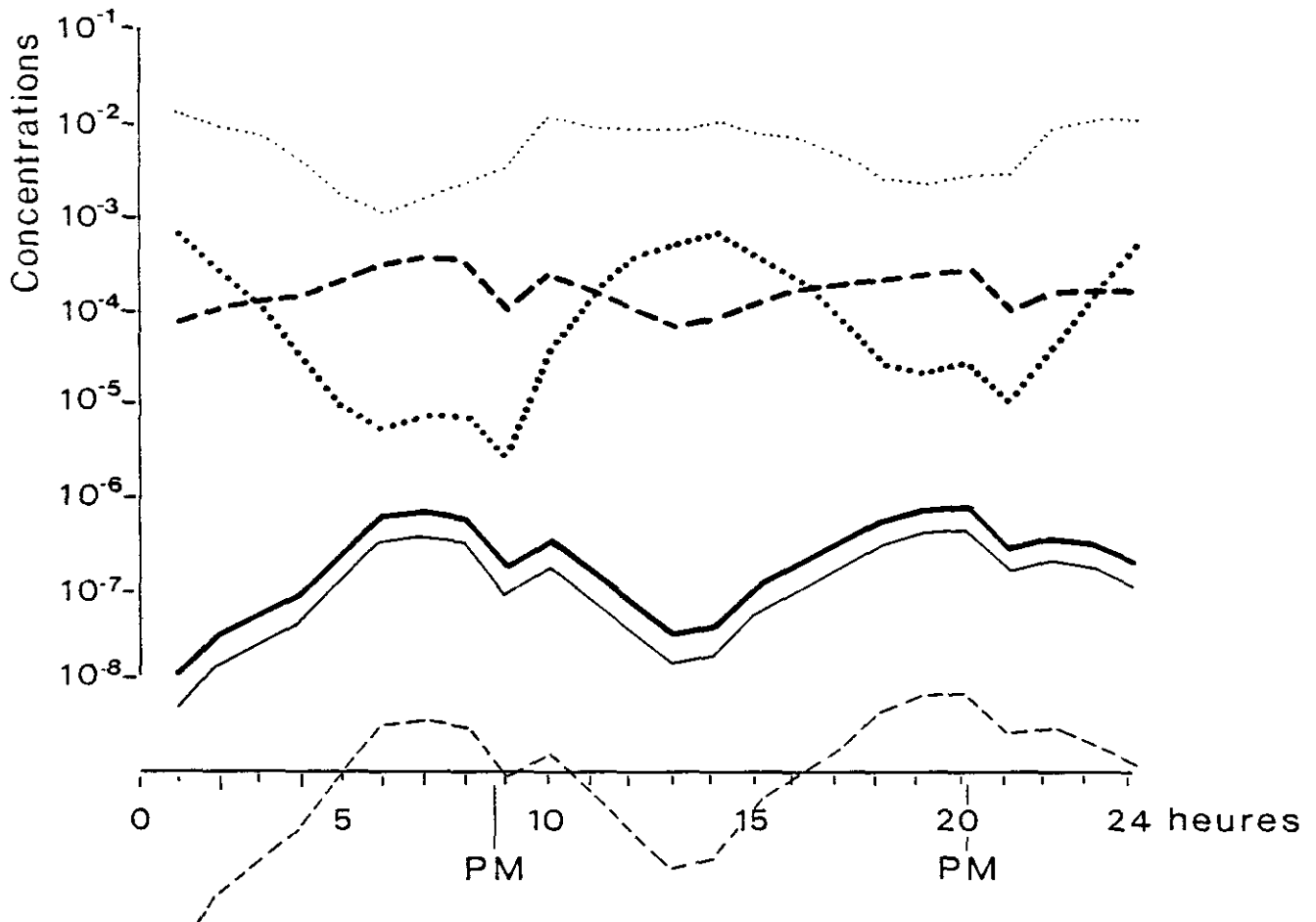
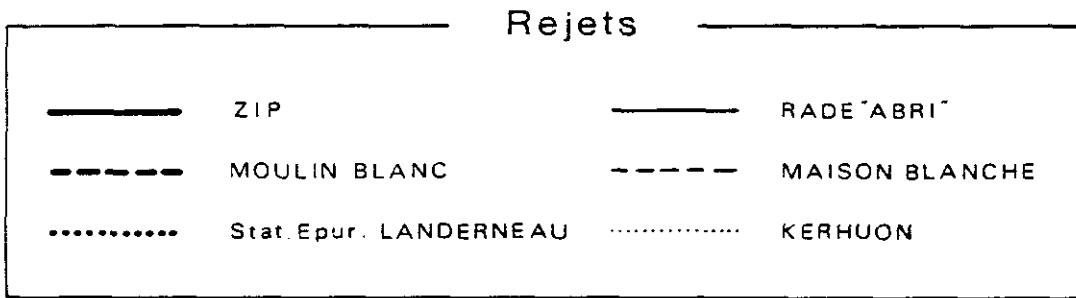


Fig.A31 ESTUAIRE DE L'ELORN - DILUTION DES REJETS AU POINT 'P'

MORTE EAU - PAS DE DEGRADATION

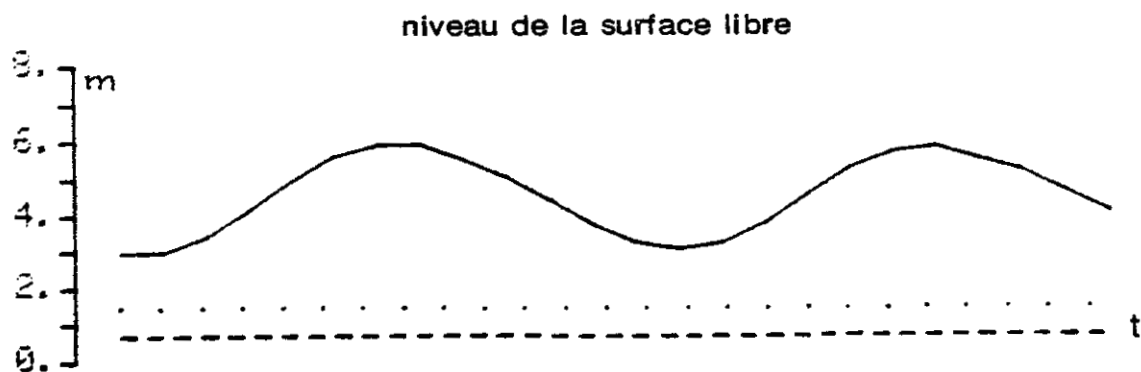
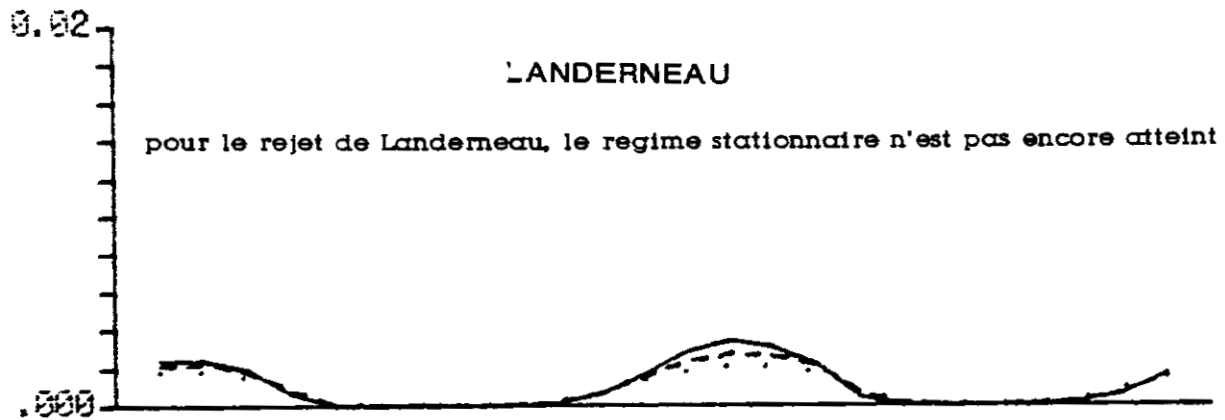
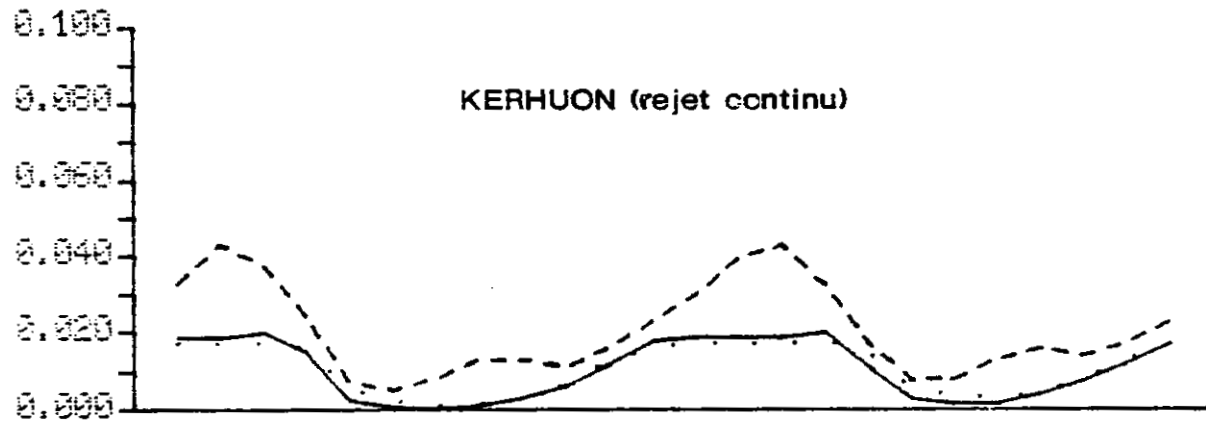
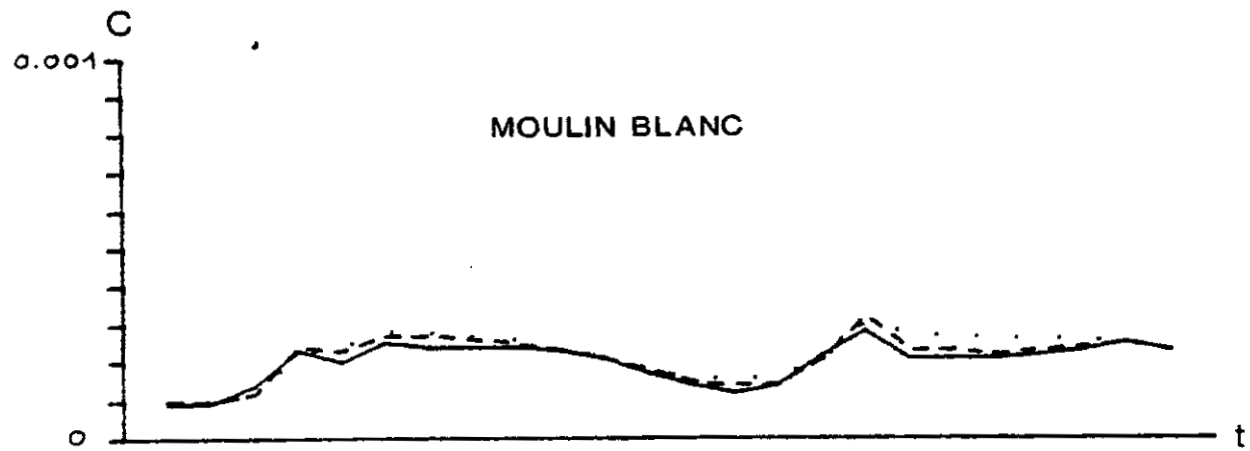


Fig.A32 ESTUAIRE DE L'ELORN - DILUTION DES REJETS AU POINT 'Q'

MORTE EAU - PAS DE DEGRADATION

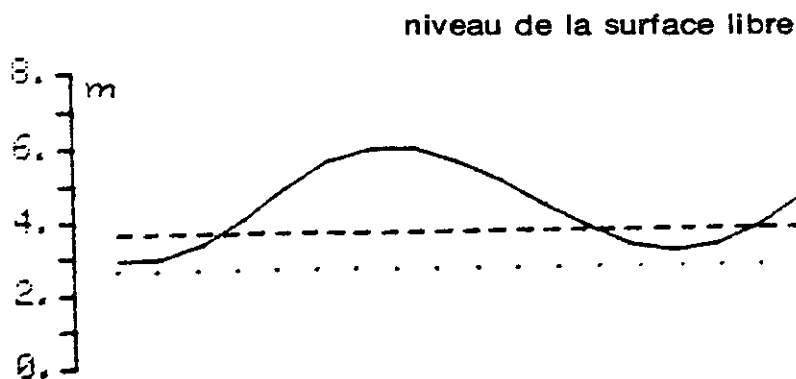
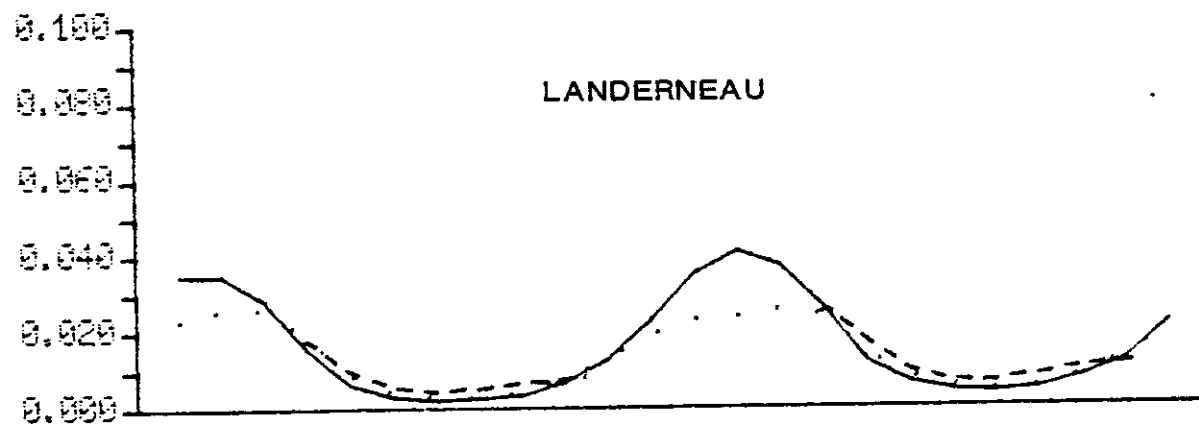
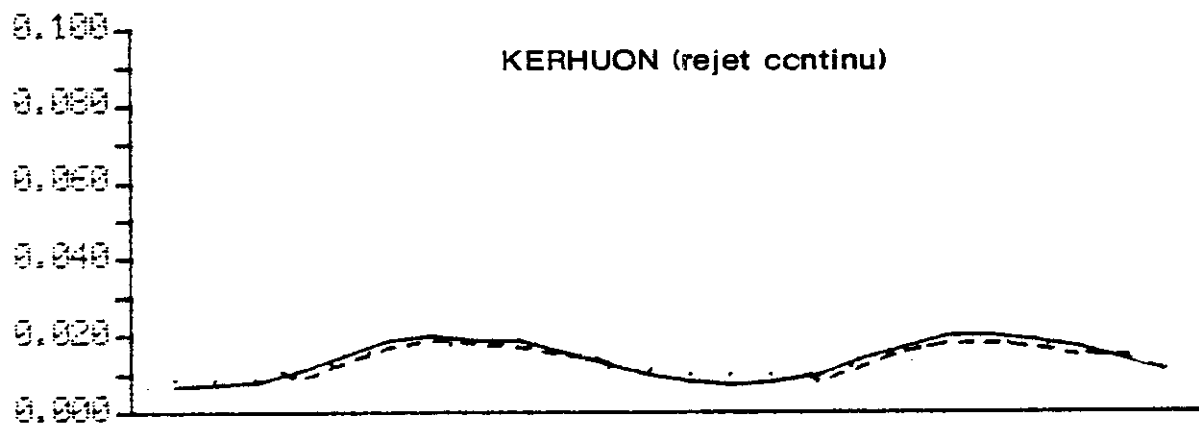
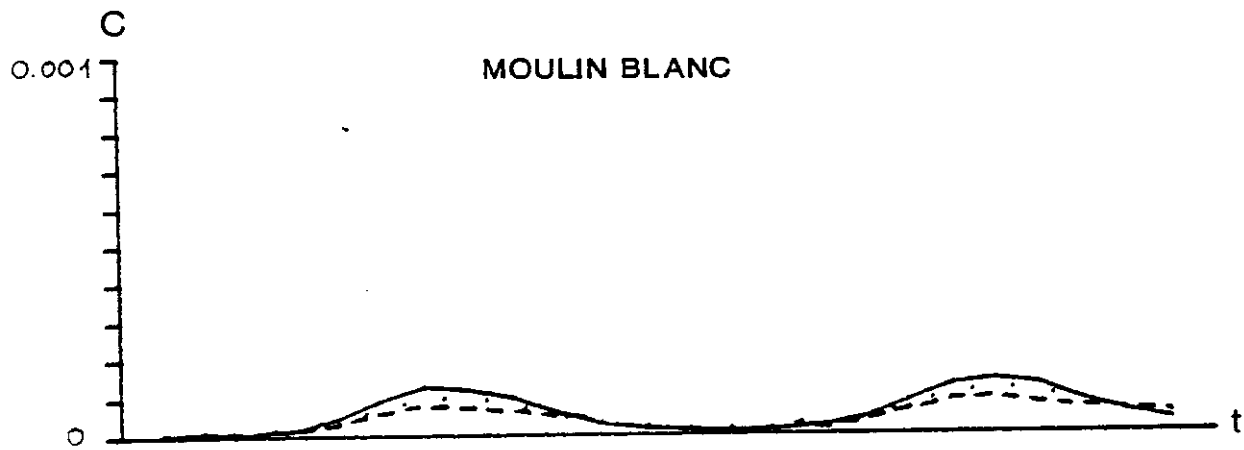
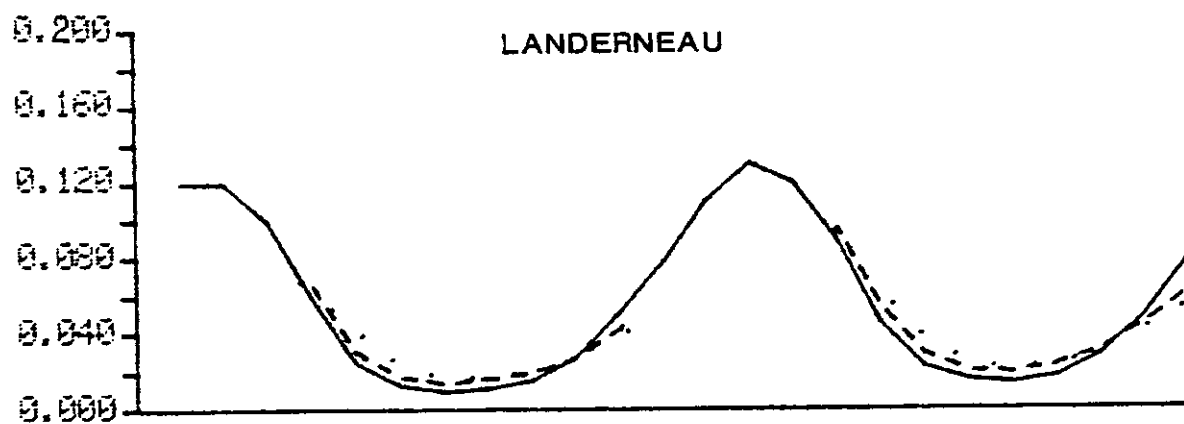
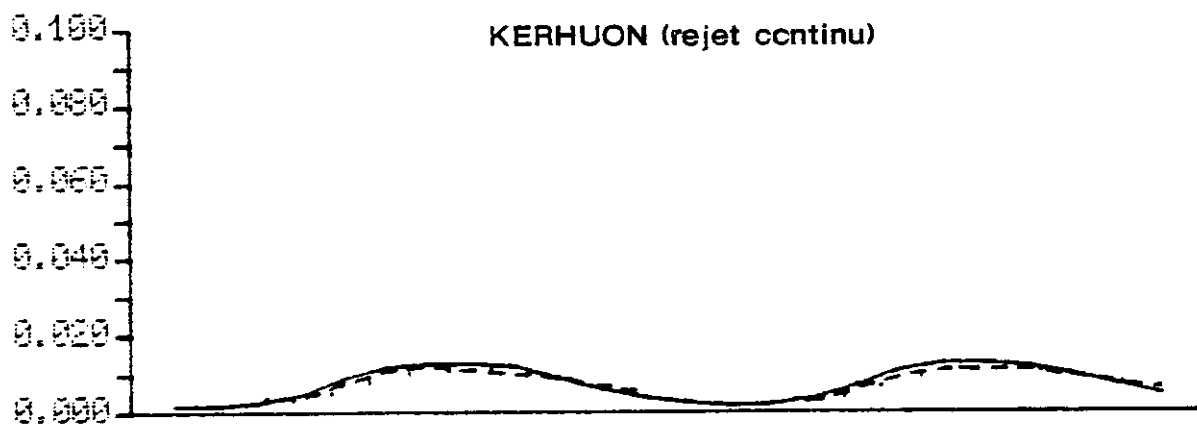
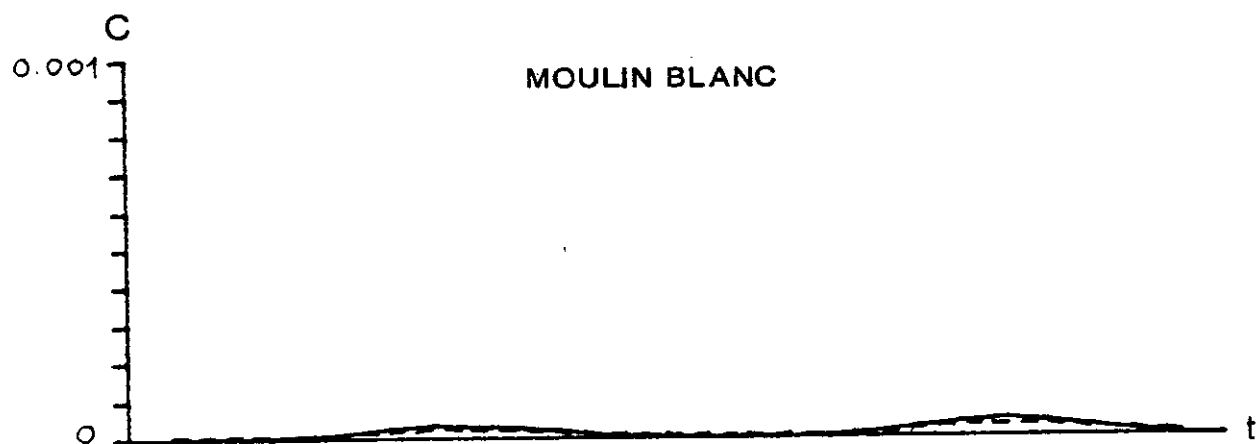
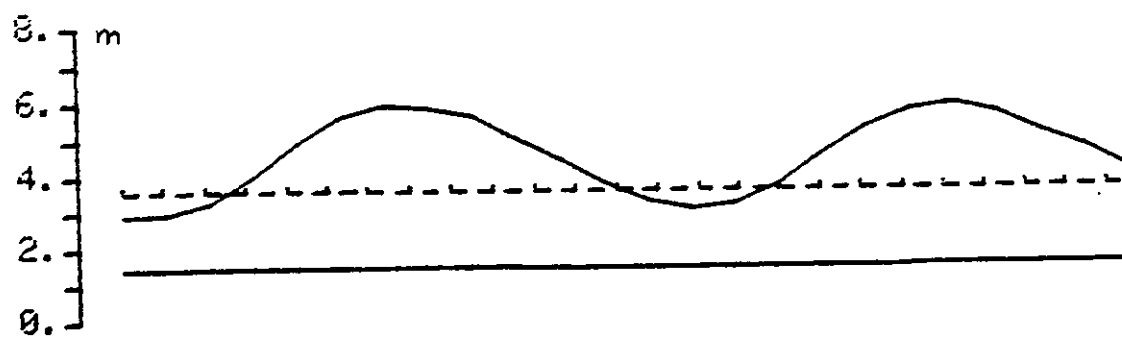


Fig.A33 ESTUAIRE DE L'ELORN - DILUTION DES REJETS AU POINT 'R'

MORTE EAU - PAS DE DEGRADATION



niveau de la surface libre



ANNEXE 4

Calcul de dilution des rejets

Scénario de simulation n° 4

VIVE EAU
T90 = 15 h

coefficient de dispersion de type "Elder isotrope" ($K_y = K_x$)

Fig. A34

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point A | Vive Eau
Dégradation : T 90 = 15 h.

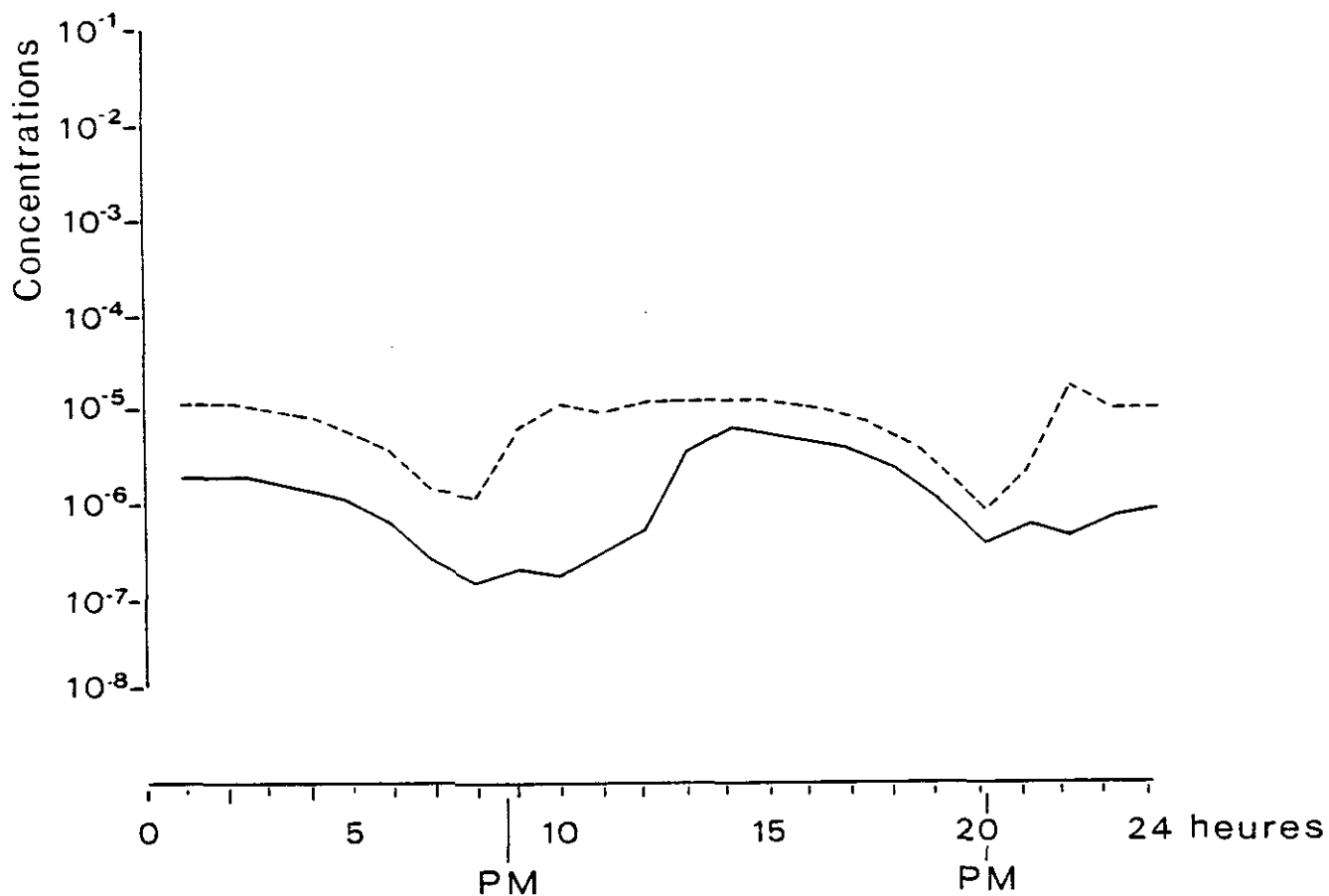
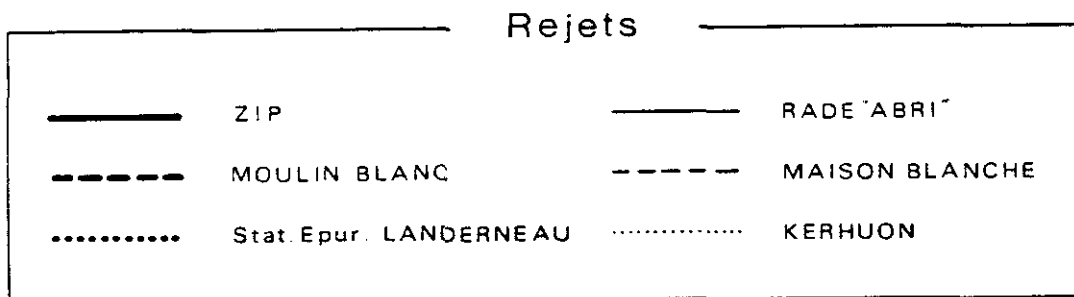


Fig. A35

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point B

Vive Eau

Dégradation : T 90 = 15 h.

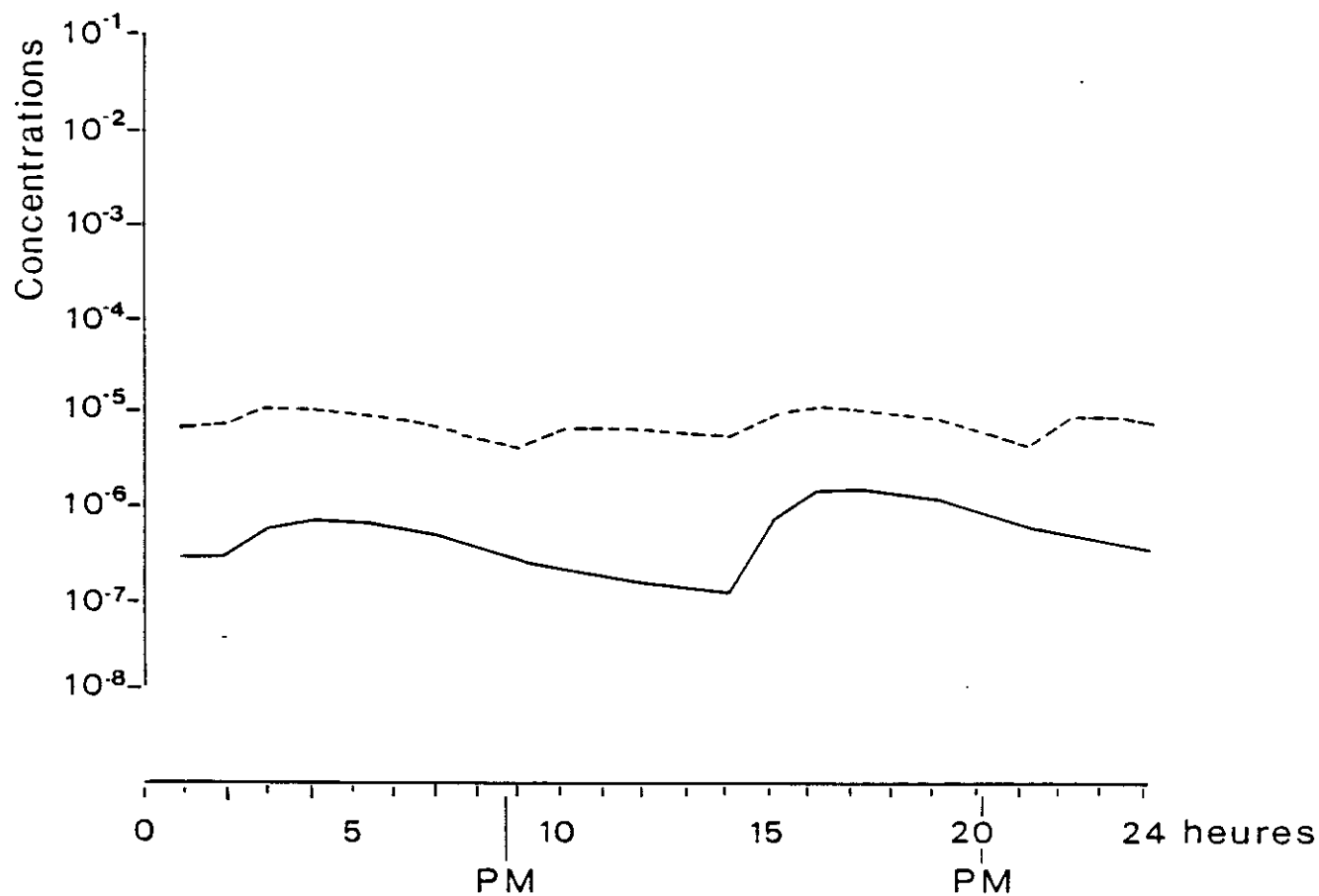
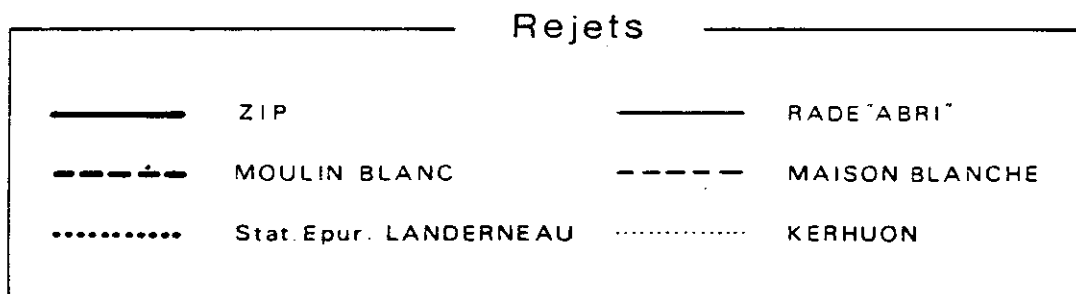


Fig. A36

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point C | Vive Eau
Dégradation : T 90 = 15 h.

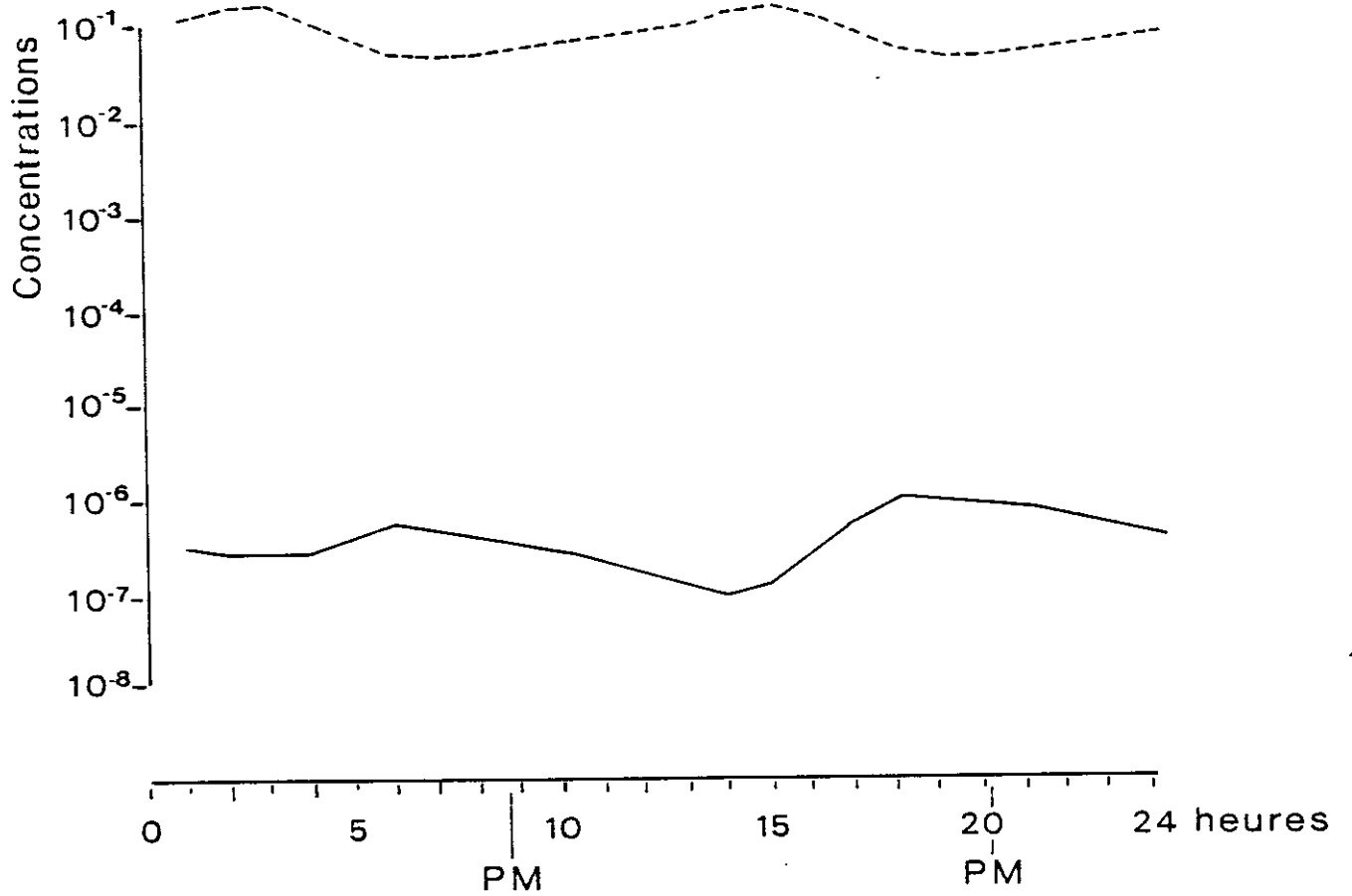
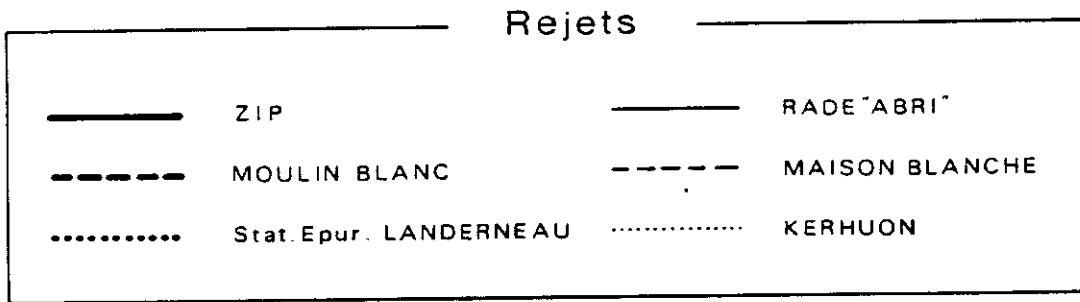


Fig. A37

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point D

Vive Eau

Dégradation : T 90 = 15 h.

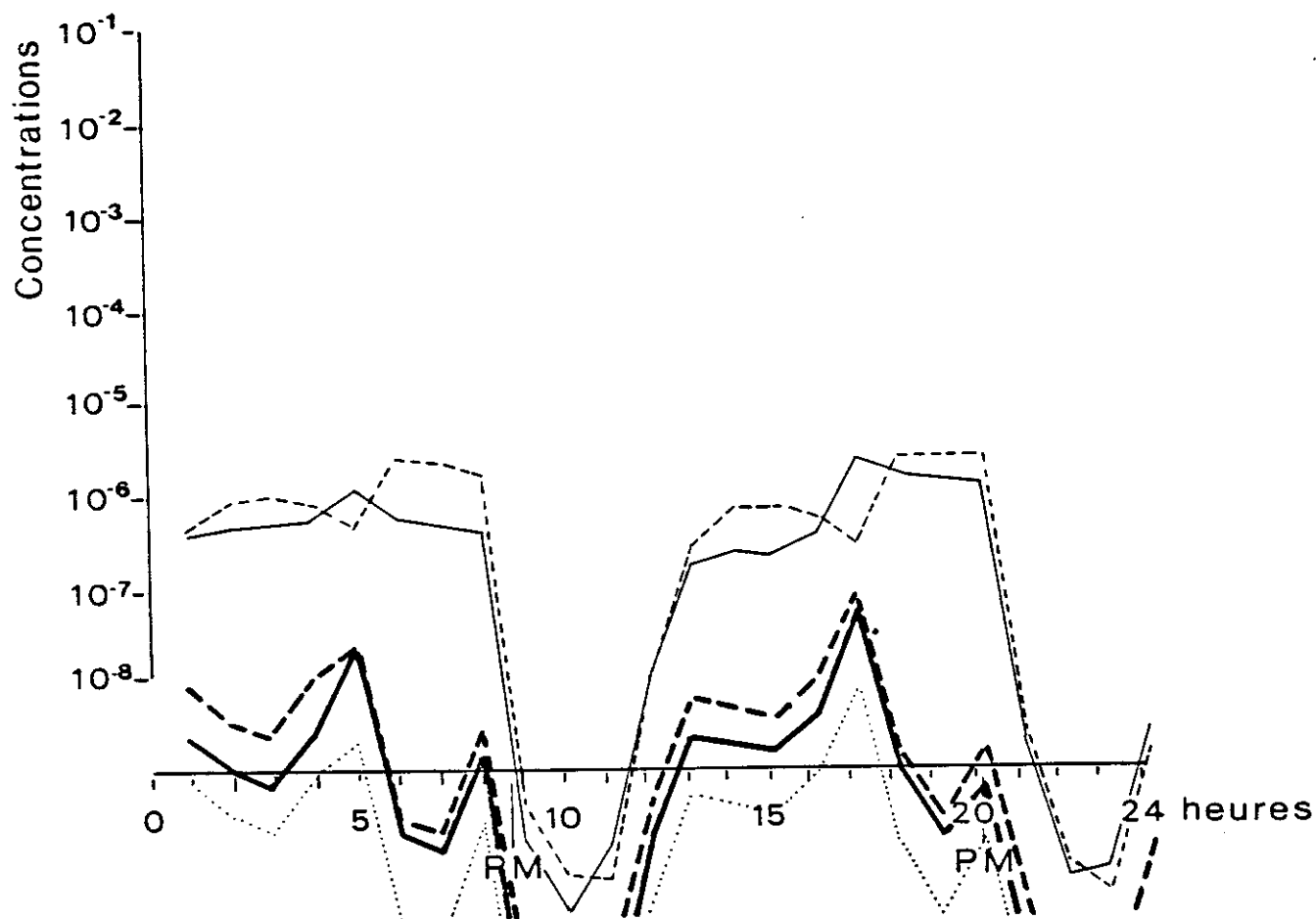
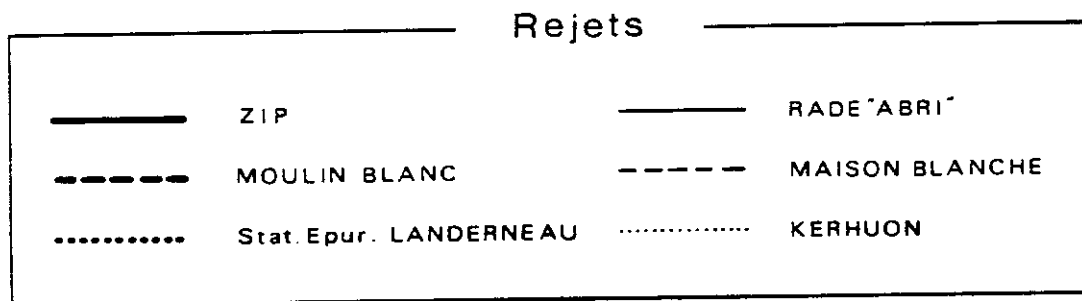


Fig. A38

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point E

Vive Eau

Dégradation : T 90 = 15 h.

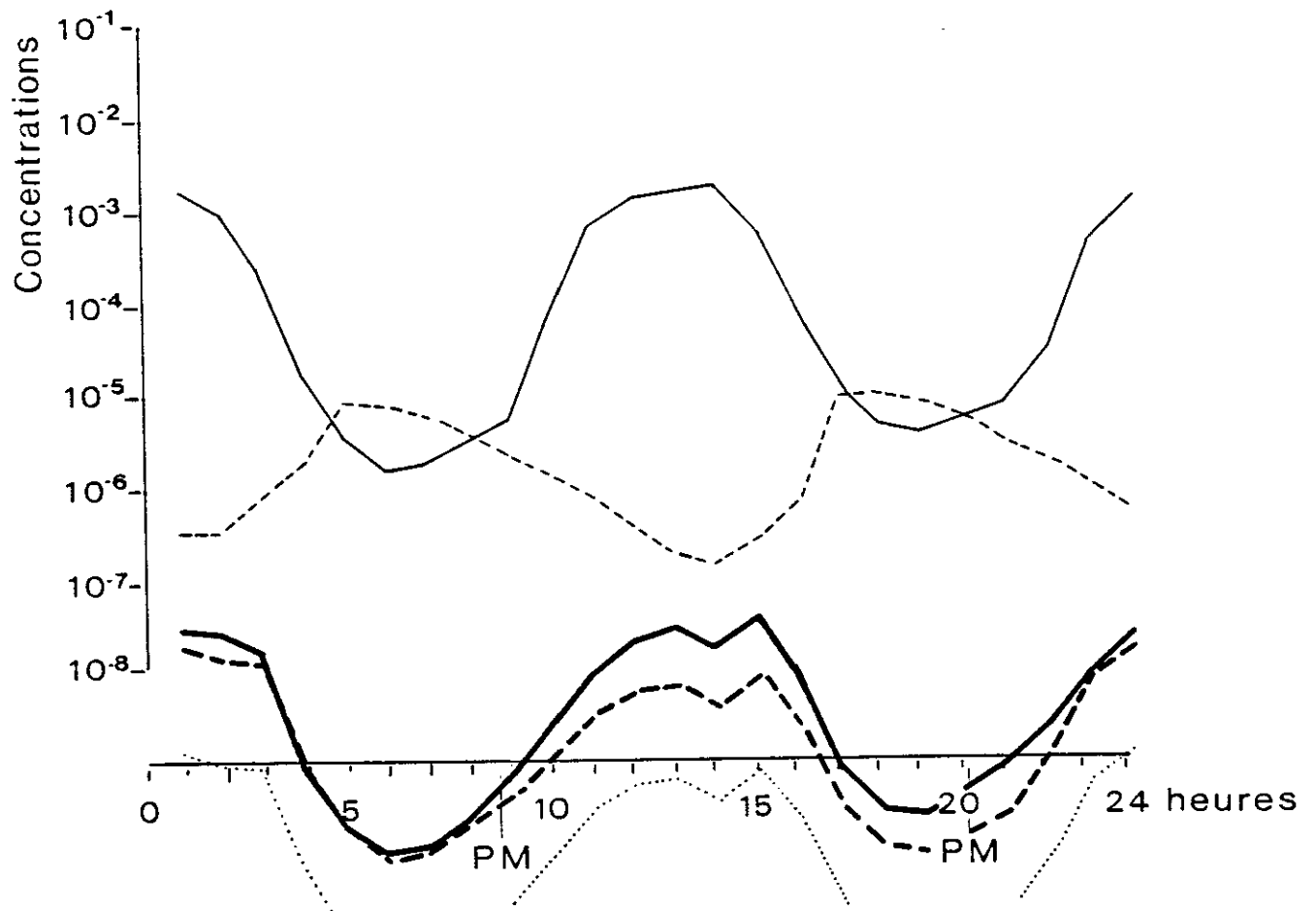
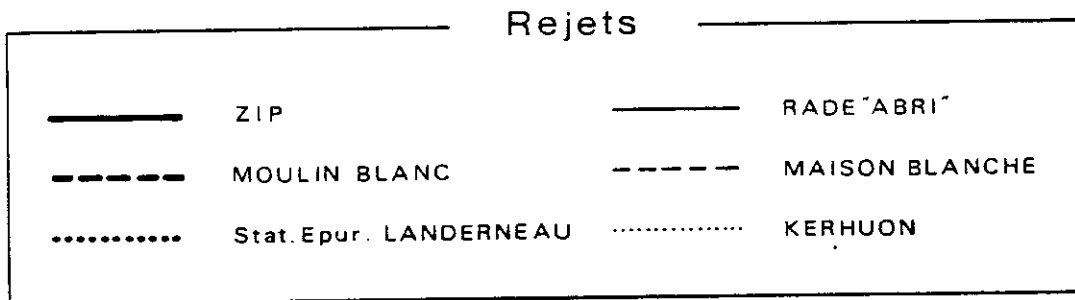


Fig. A39

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point F | Vive Eau
Dégradation : T 90 = 15 h.

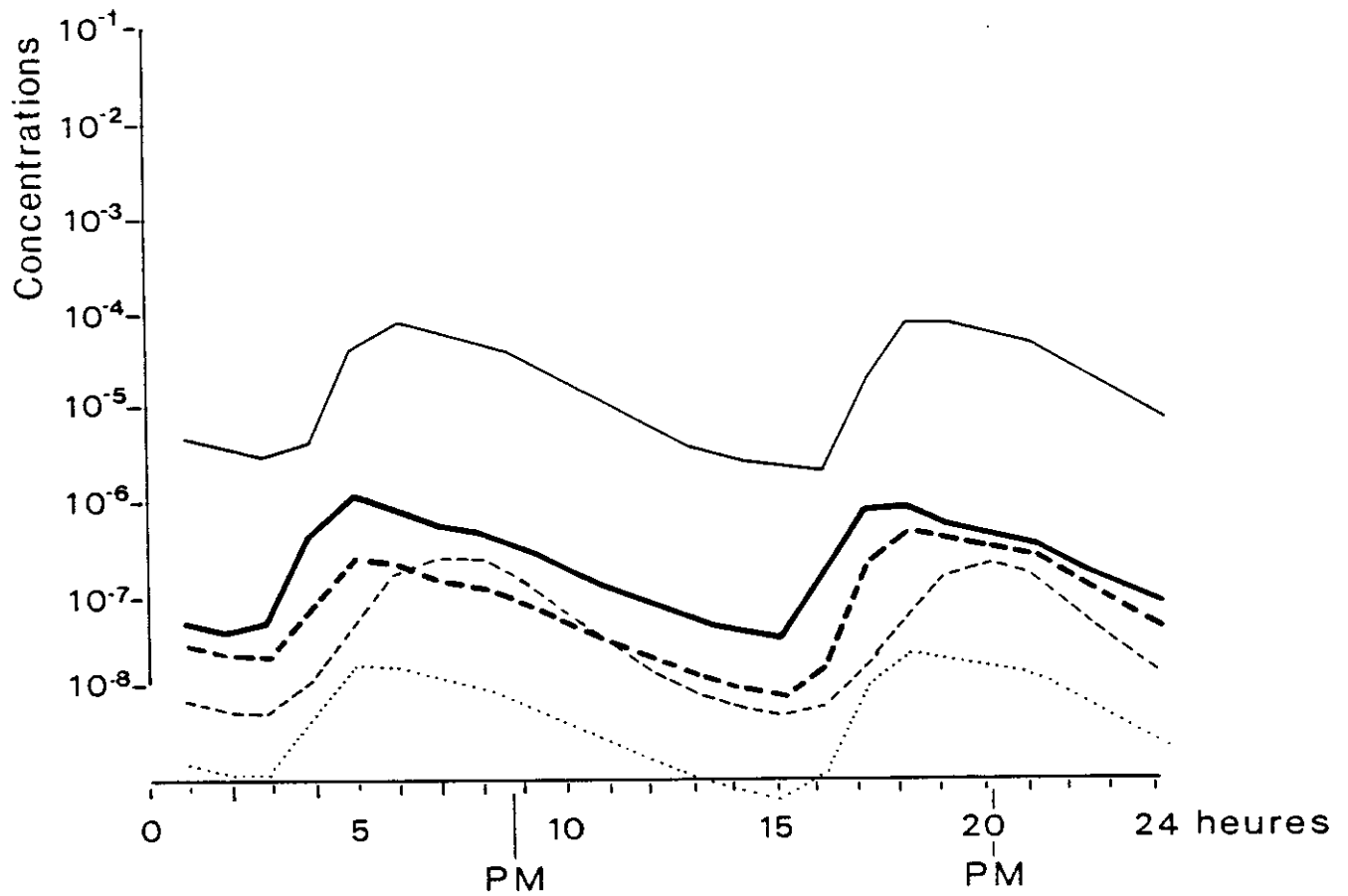
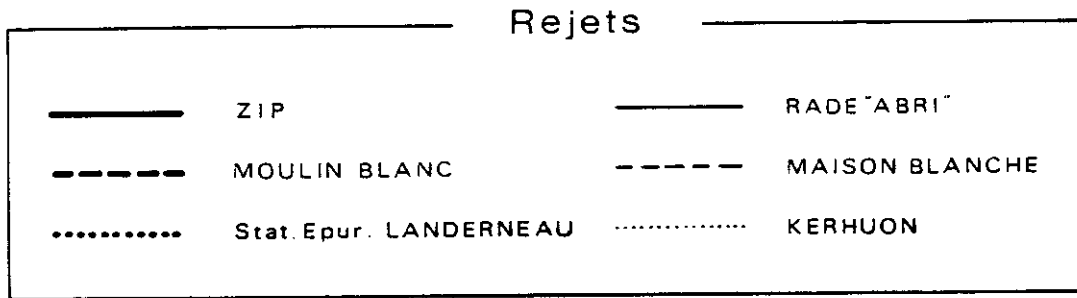


Fig. A40

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point G

Vive Eau

Dégradation : T 90 = 15 h.

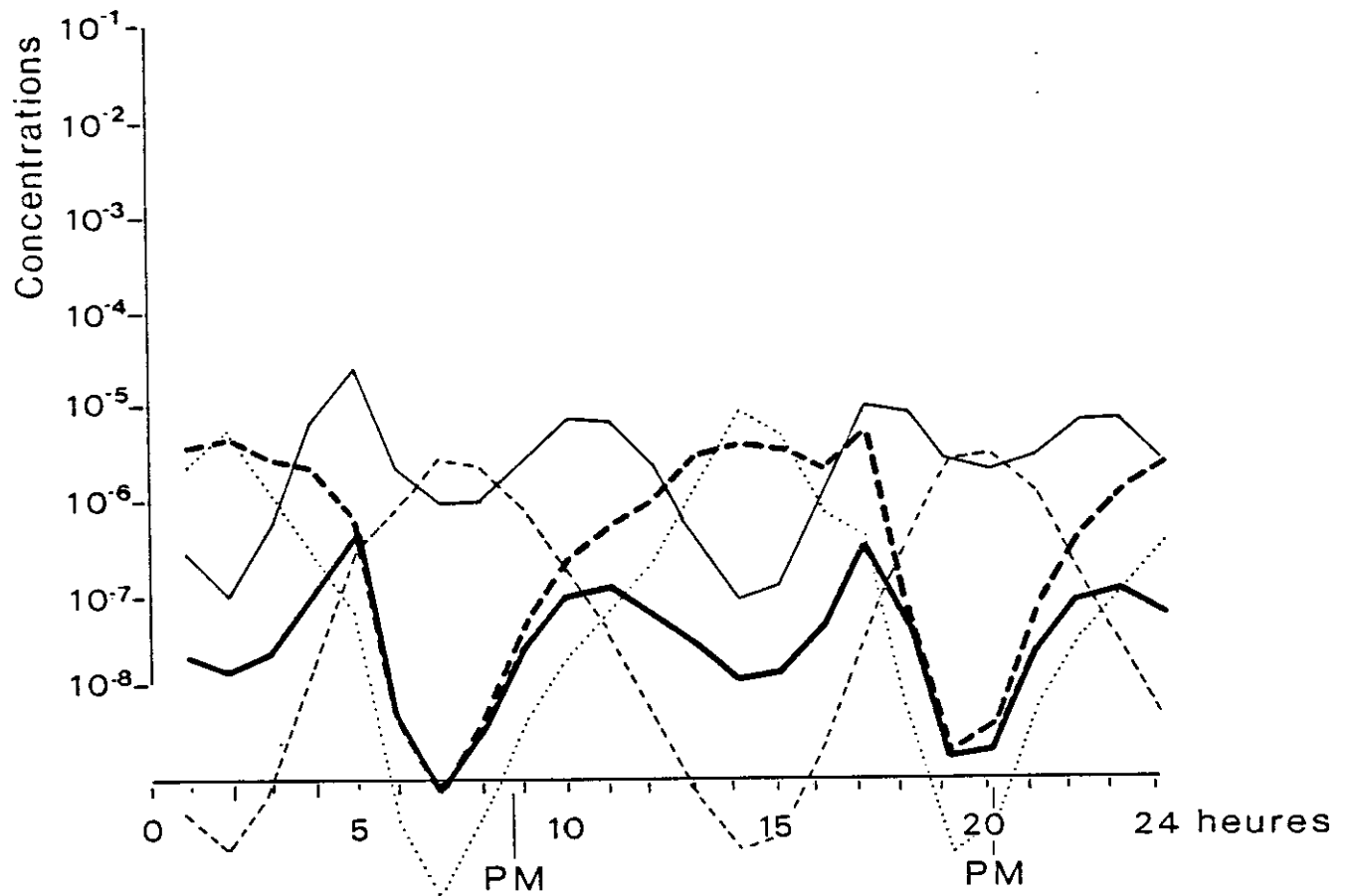
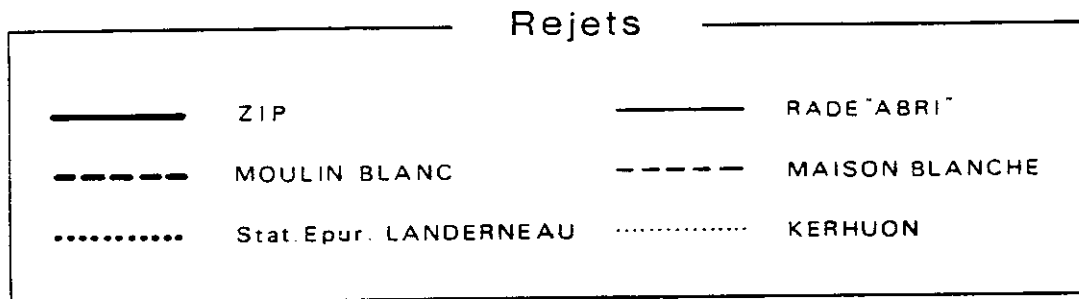


Fig. A41

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point H

Vive Eau

Dégradation : T 90 = 15 h.

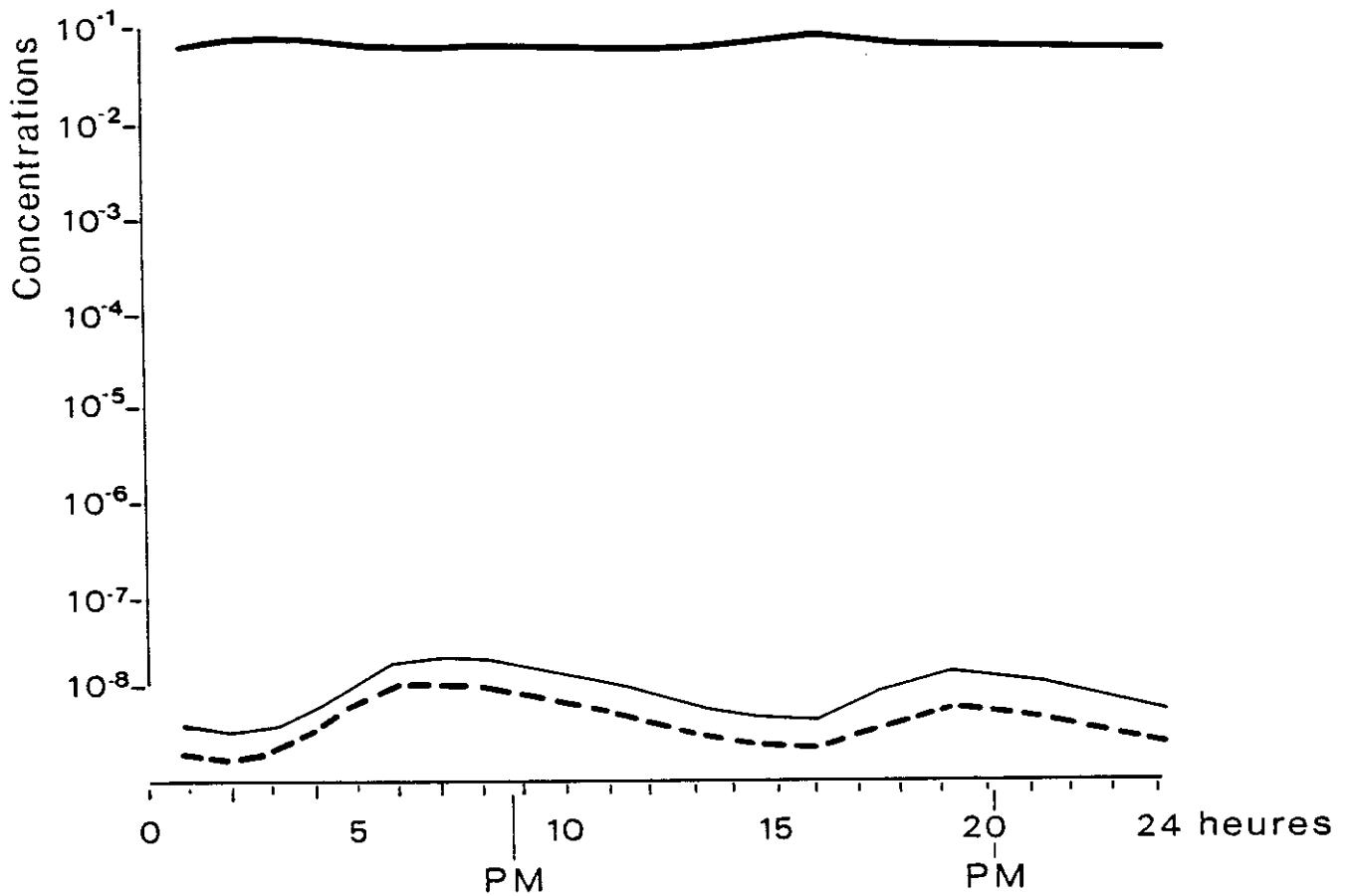
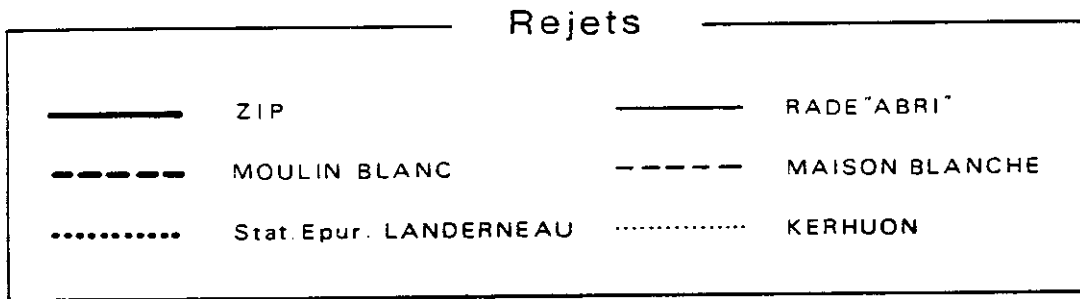


Fig. A42

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point 1 | Vive Eau
Dégradation : T 90 = 15 h.

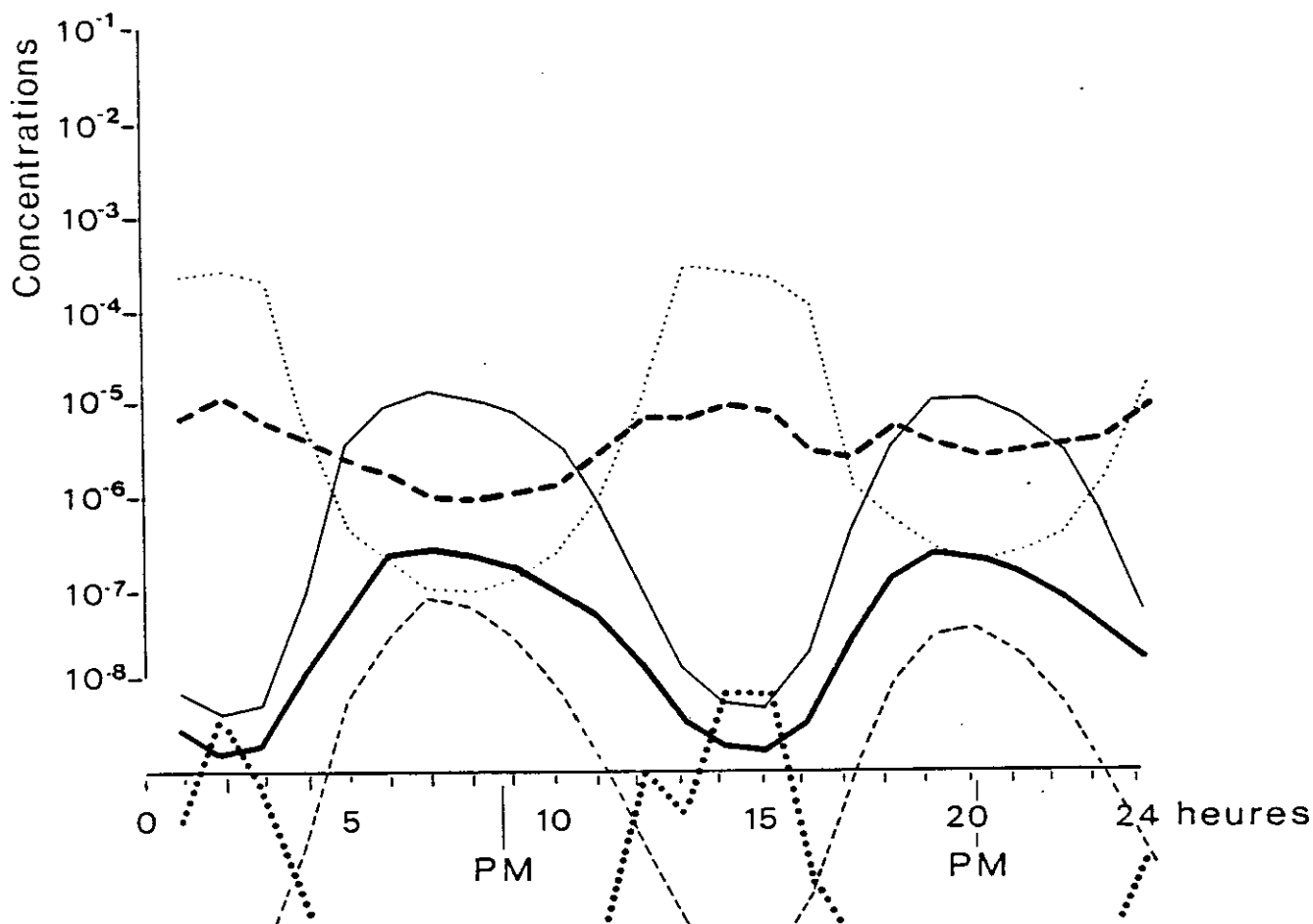
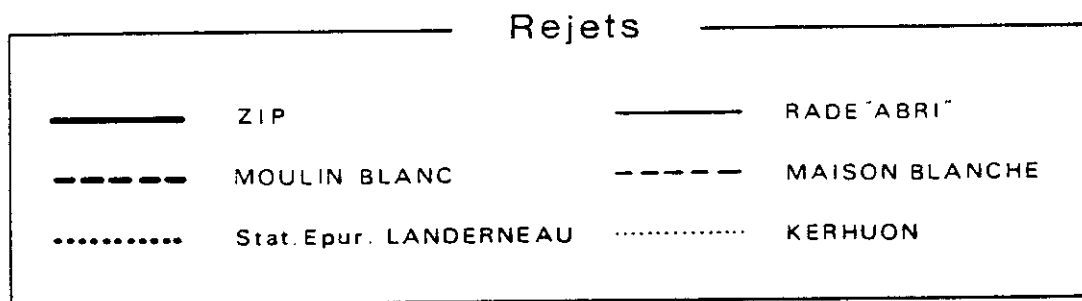


Fig. A43

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point J | Vive Eau
Dégradation : T 90 = 15 h.

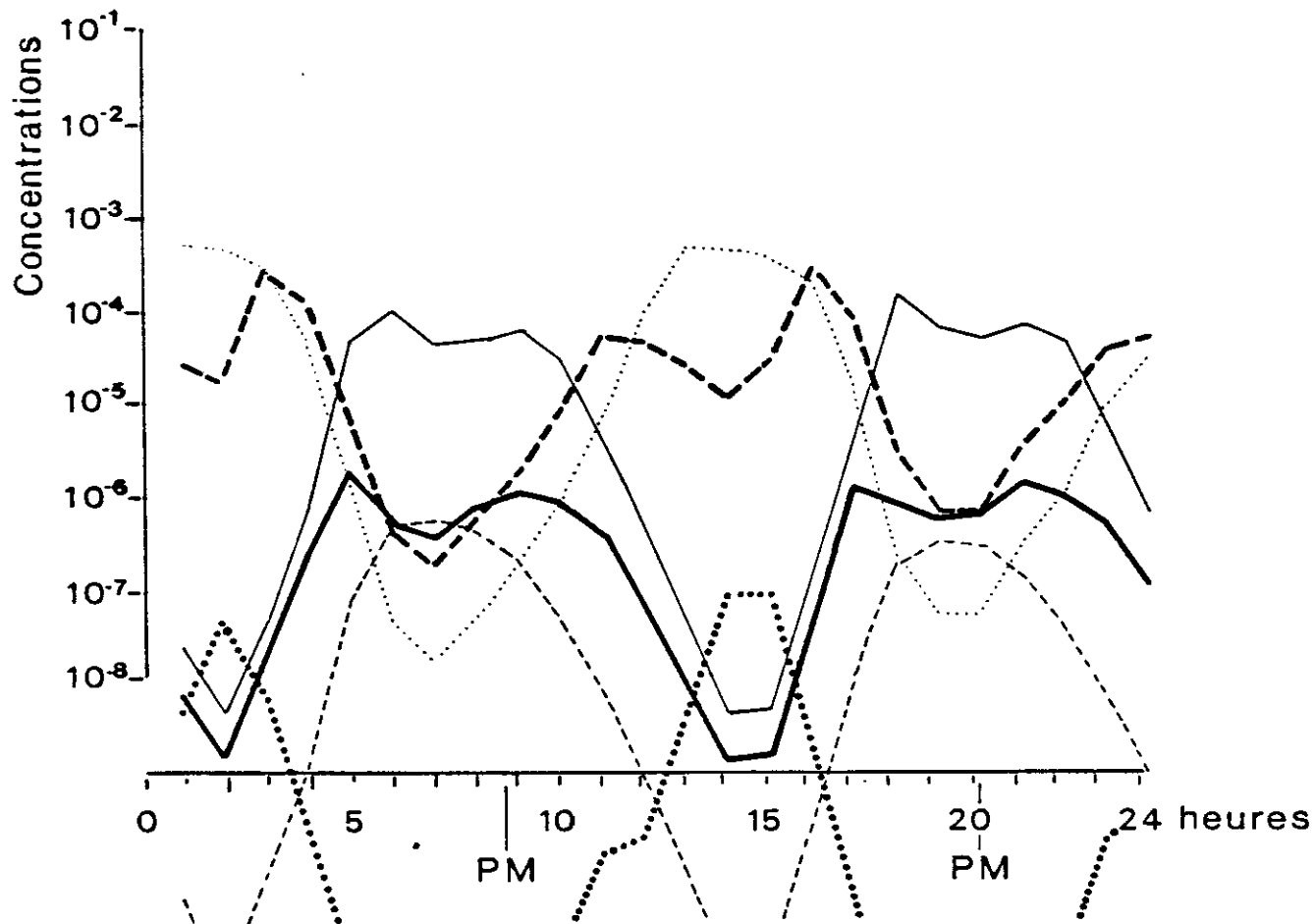
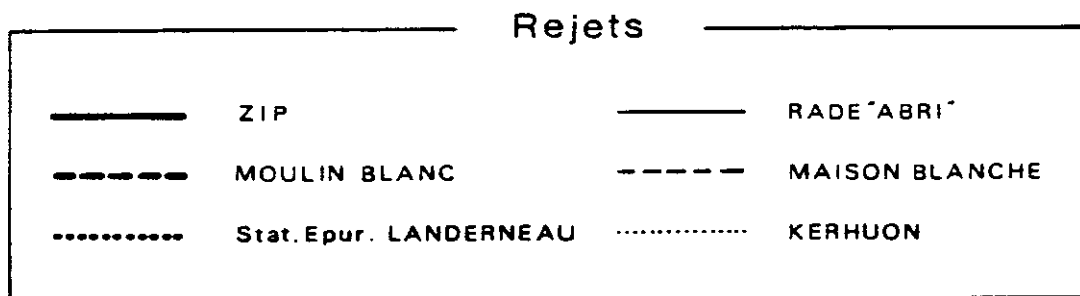


Fig. A44

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point K | Vive Eau
Dégradation : T 90 = 15 h.

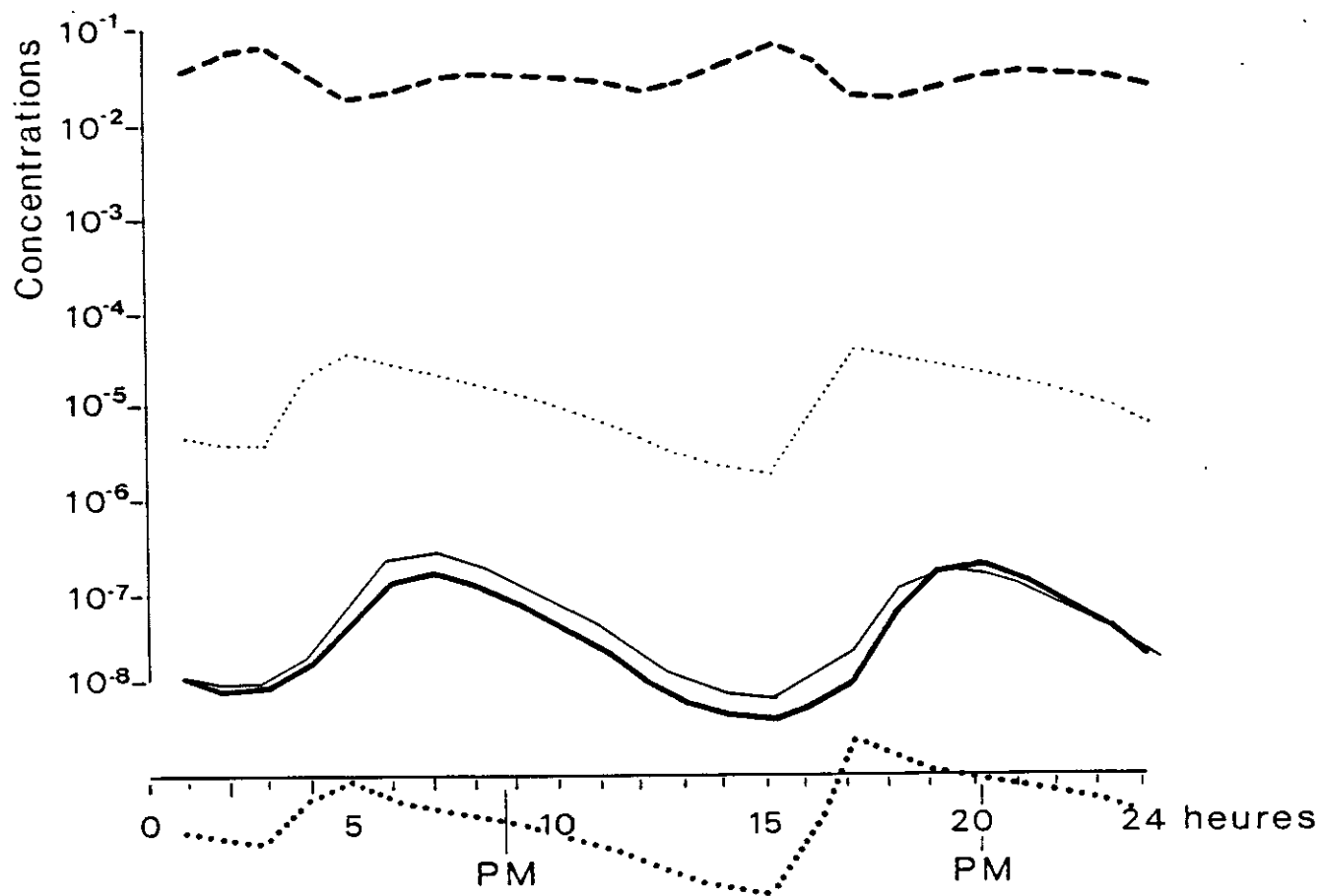
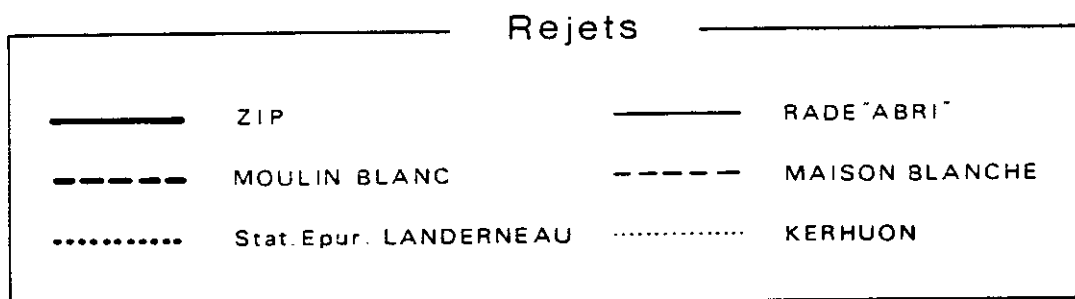


Fig. A45

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point L

Vive Eau

Dégradation : T 90 = 15 h.

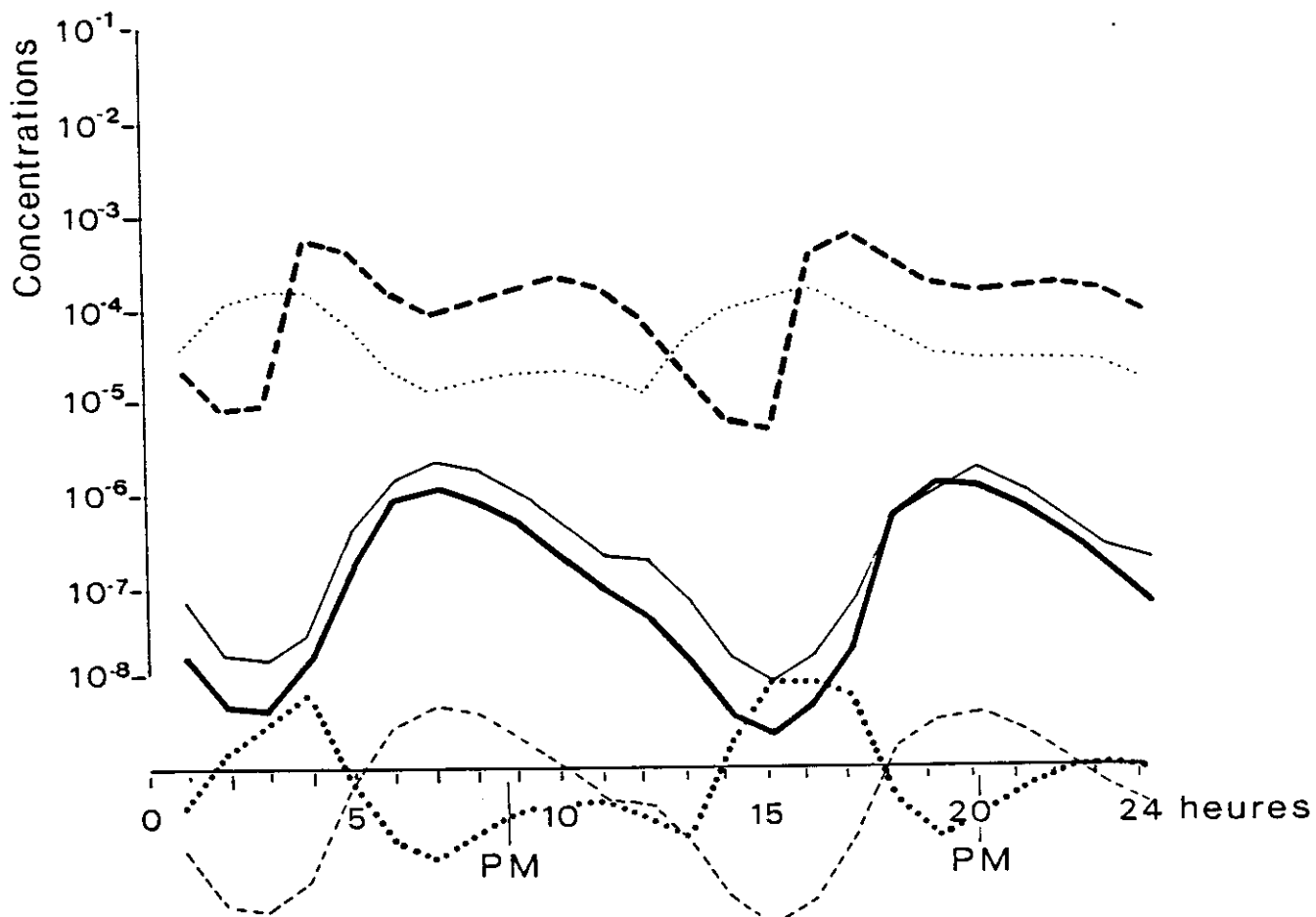
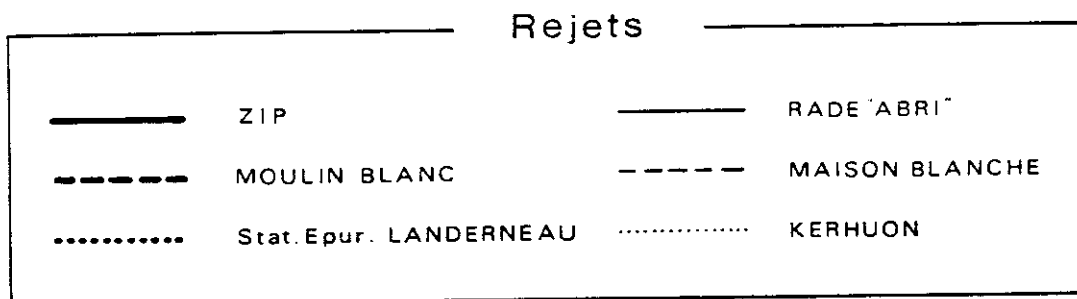


Fig. A46

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point M | Vive Eau
Dégradation : T 90 = 15 h.

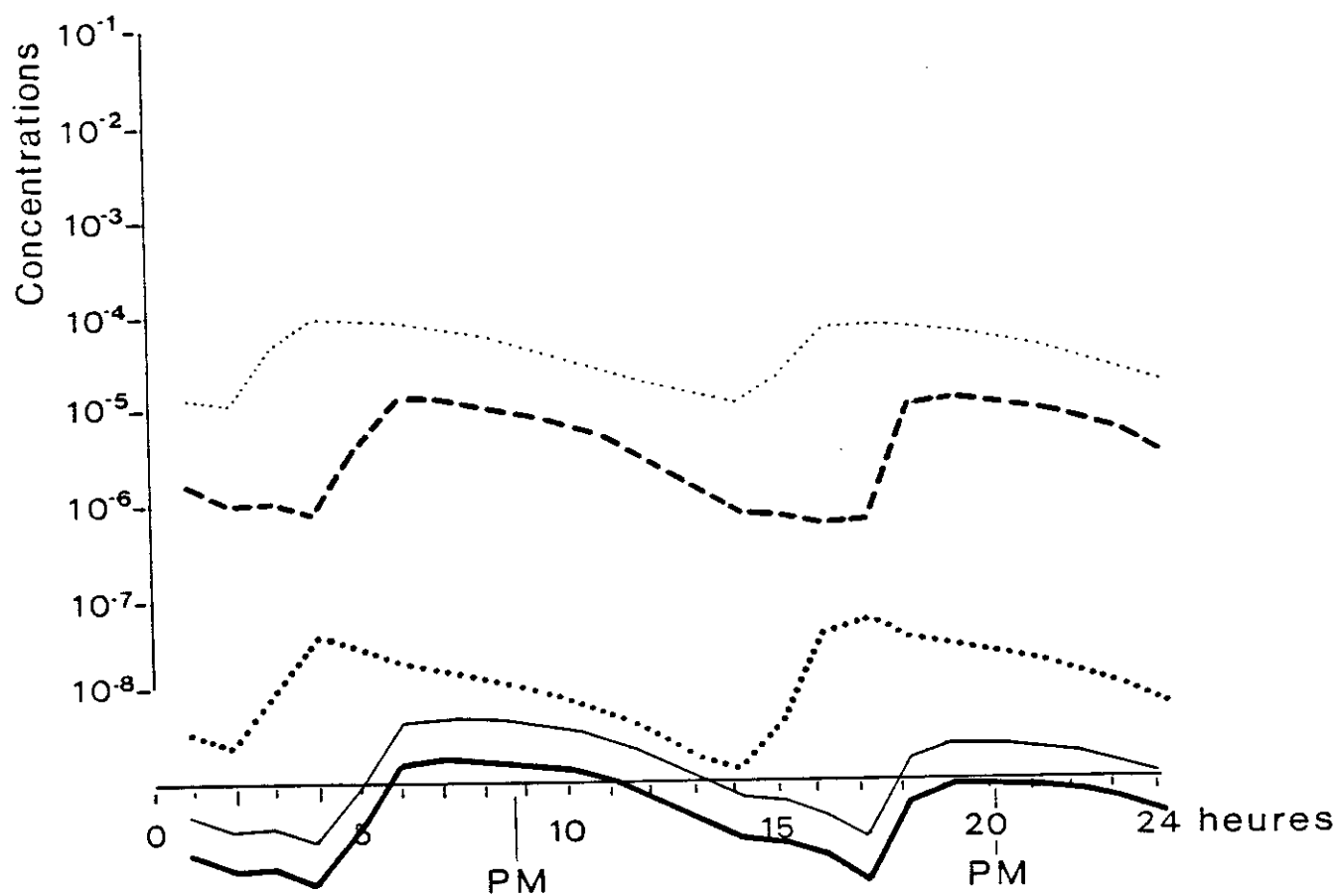
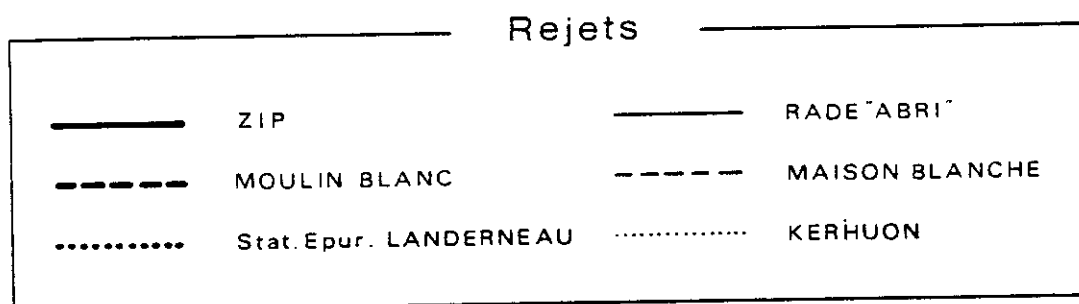


Fig. A47

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point N | Vive Eau
Dégradation : T 90 = 15 h.

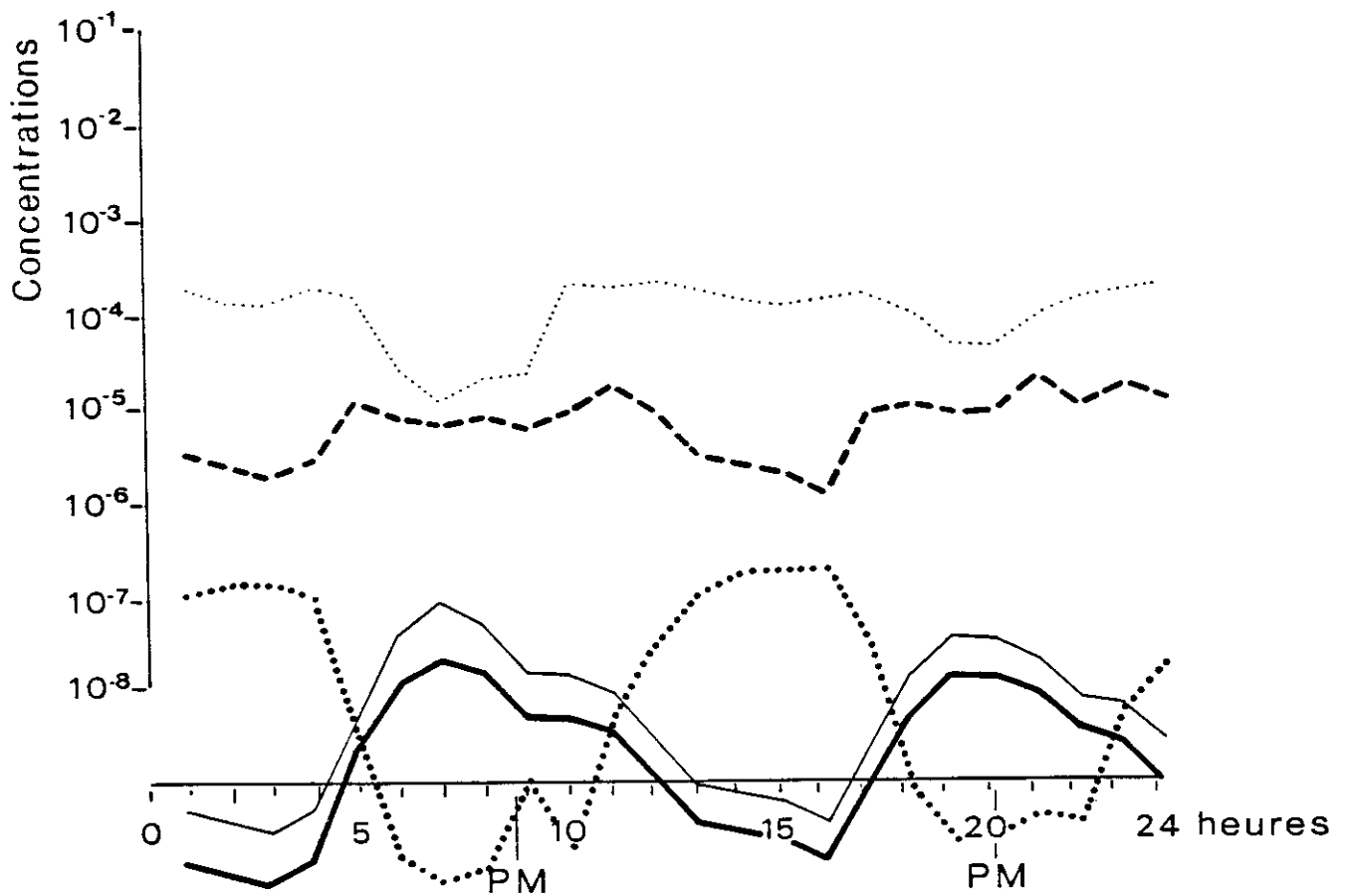
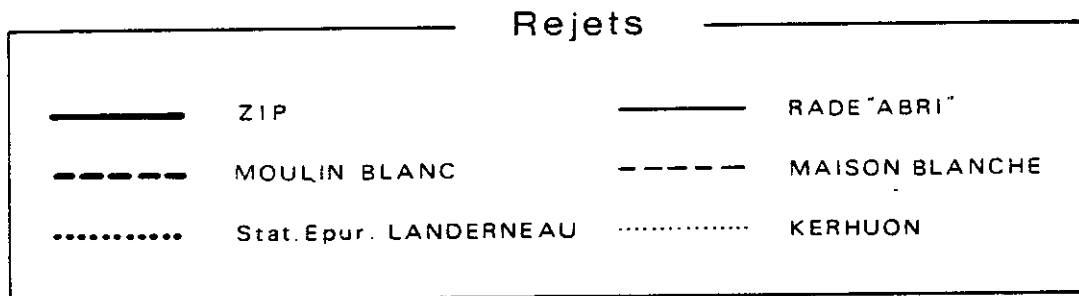


Fig. A48

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point O | Vive Eau
Dégradation : T 90 = 15 h.

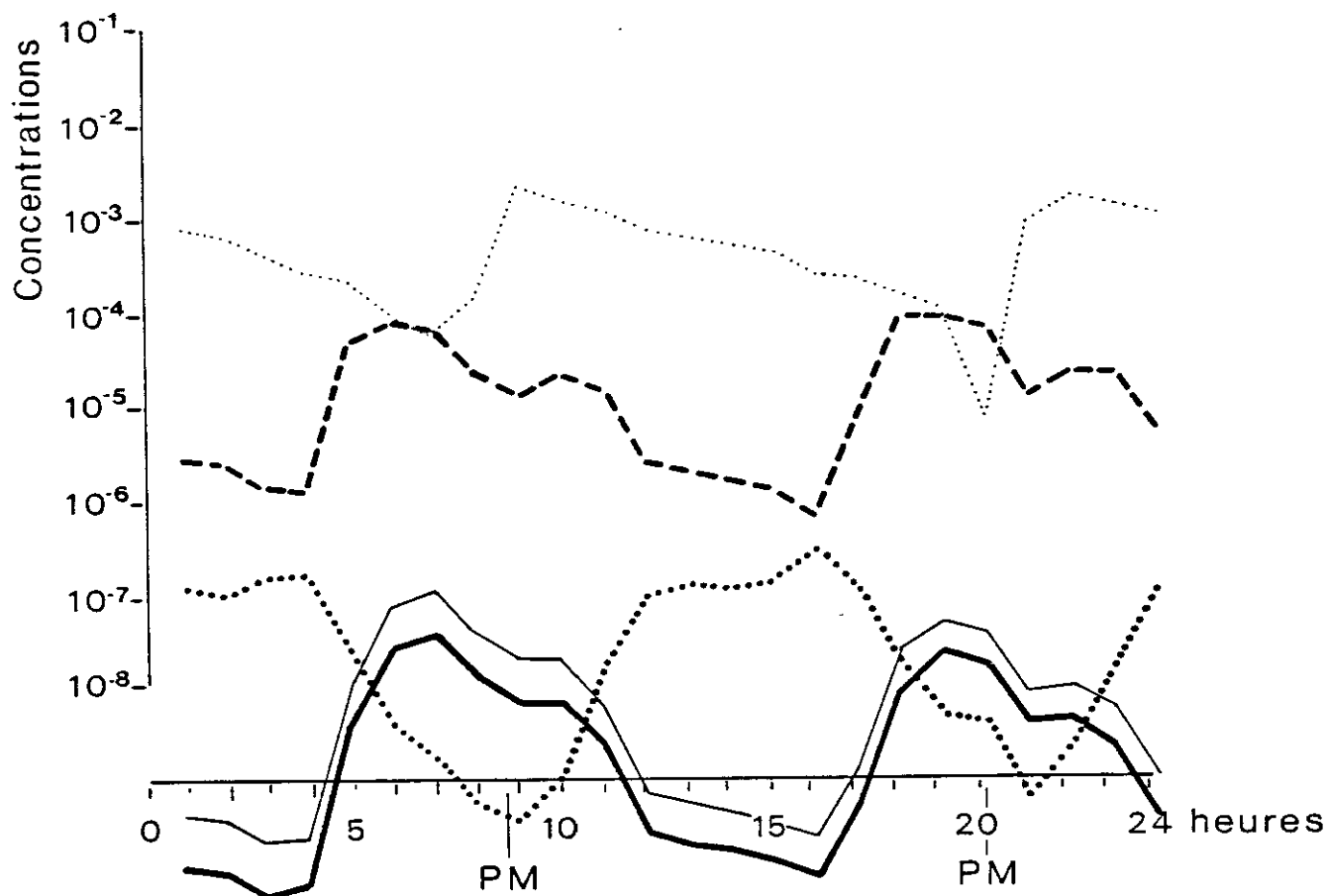
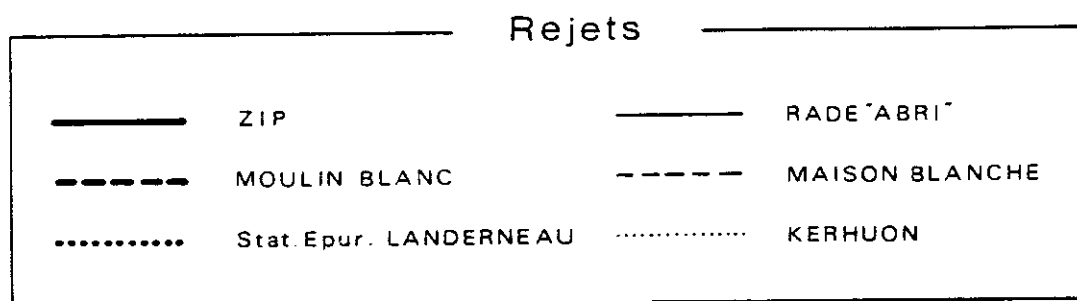


Fig.A49 ESTUAIRE DE L'ELORN - DILUTION DES REJETS AU POINT 'P'

VIVE EAU - DEGRADATION: T90 = 15 HEURES

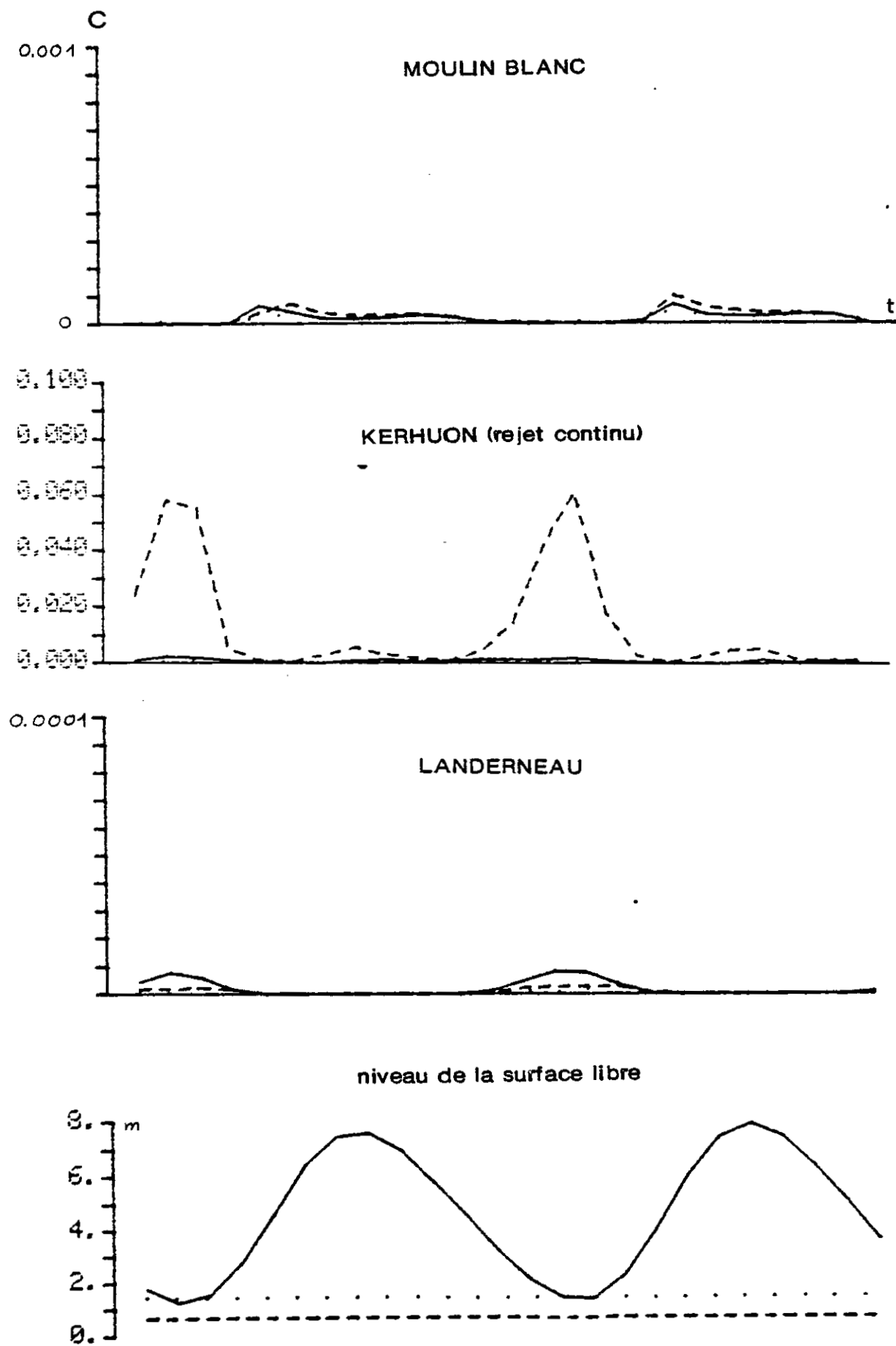


Fig.A50 ESTUAIRE DE L'ELORN - DILUTION DES REJETS AU POINT 'Q'

VIVE EAU - DEGRADATION: T90 = 15 HEURES

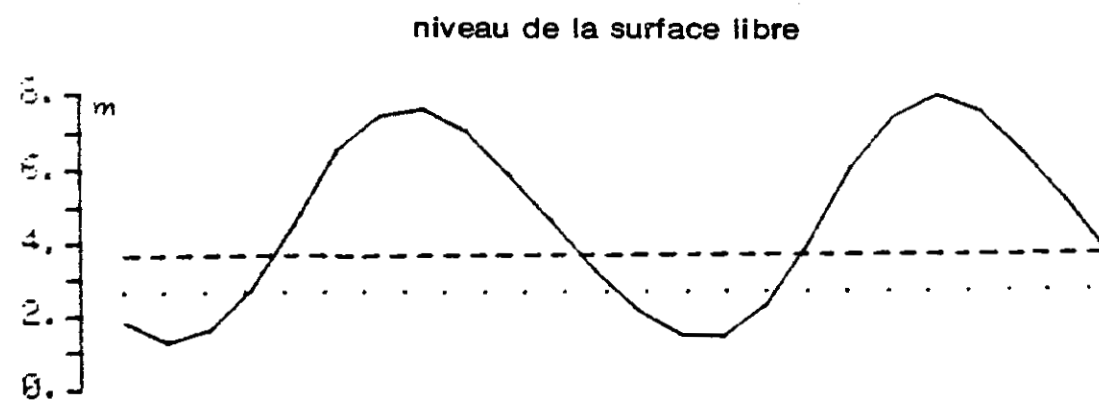
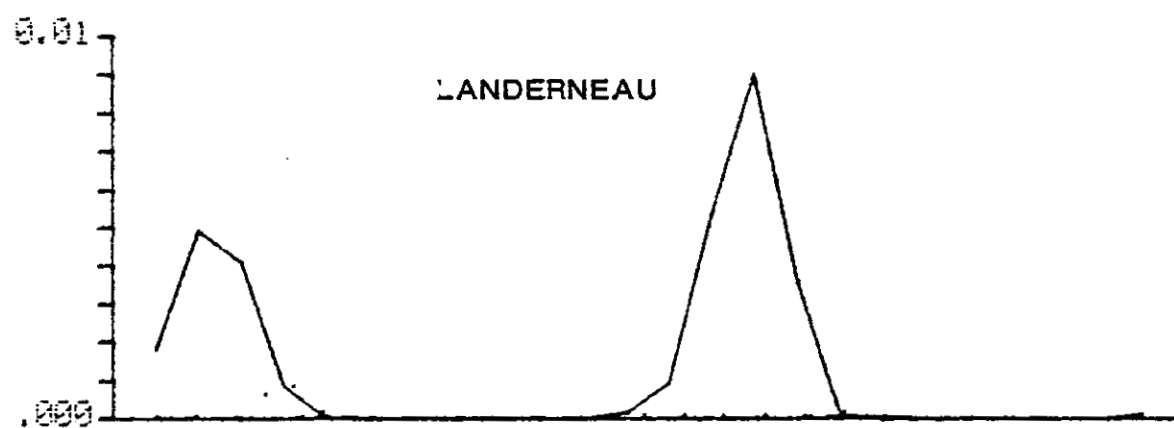
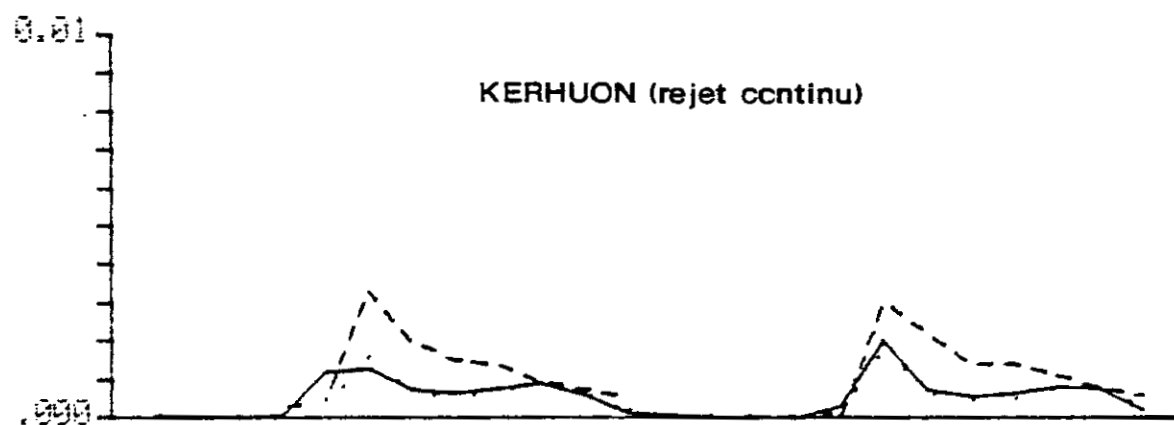
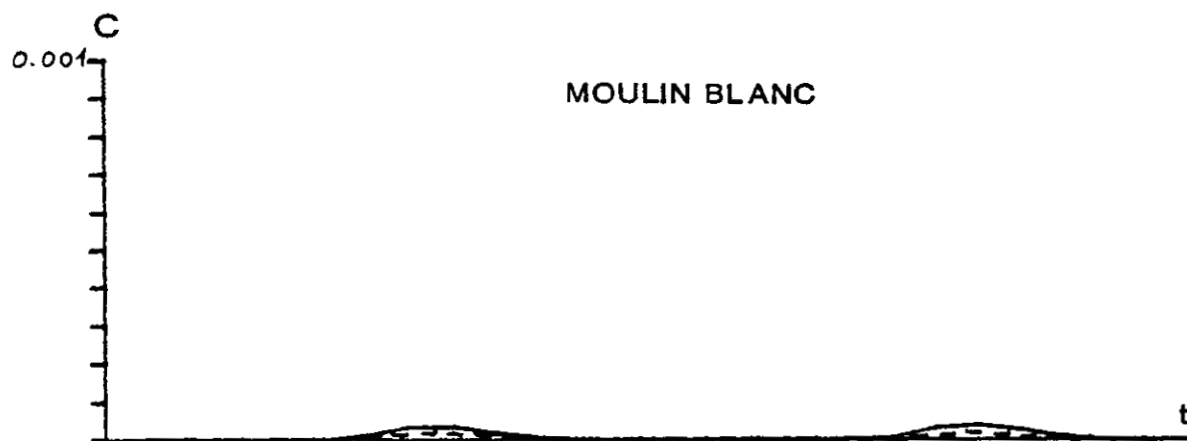
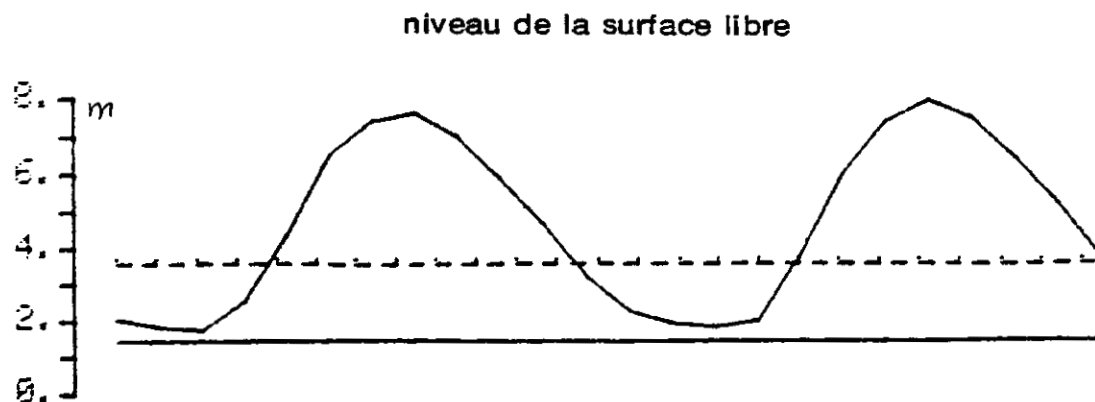
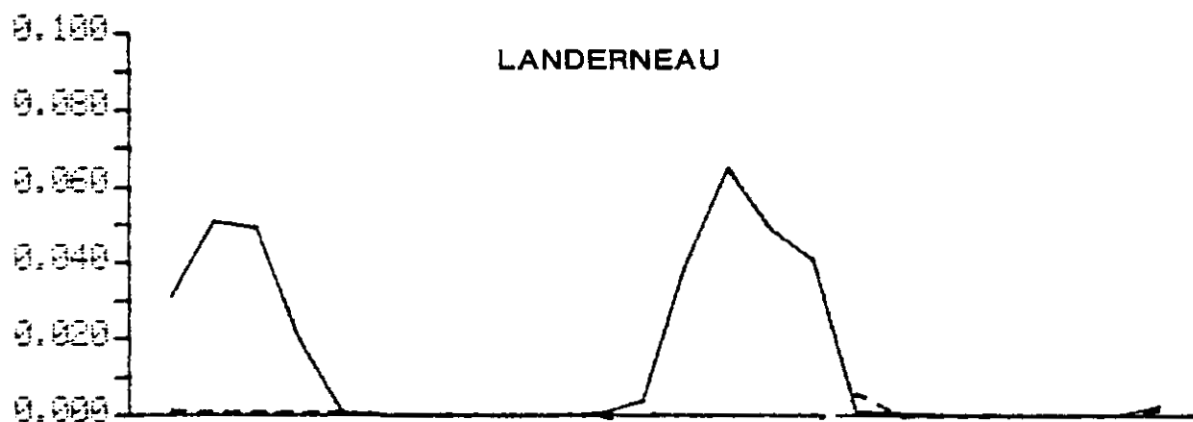
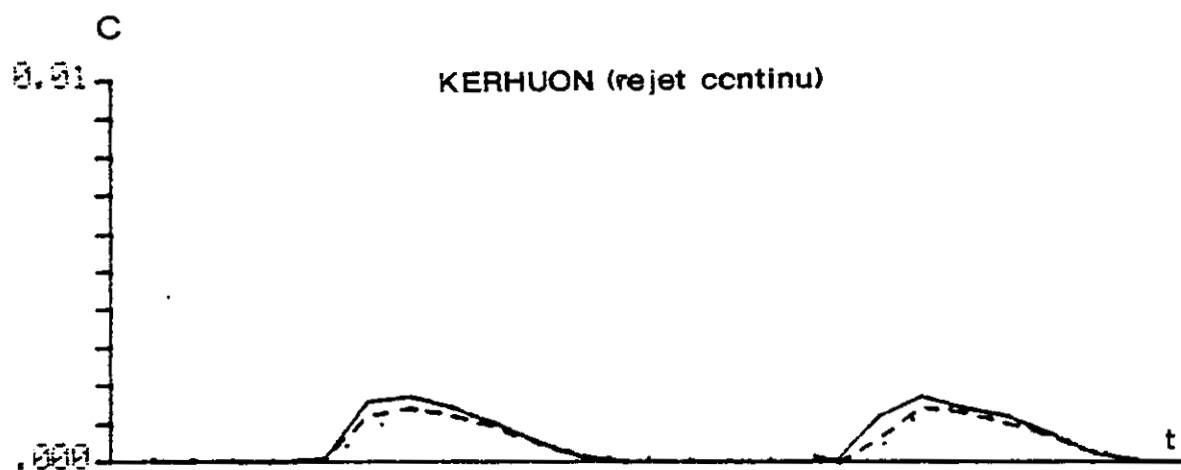


Fig.A57 ESTUAIRE DE L'ELORN - DILUTION DES REJETS AU POINT 'R'

VIVE EAU - DEGRADATION: T90 - 15 HEURES



ANNEXE 5

Calcul de dilution des rejets

Scénario de simulation n° 5

MORTE EAU
T90 = 15 h

coefficient de dispersion de type "Elder isotrope" ($K_y = K_x$)

Les dilutions aux points A, D et H ne sont pas présentées.

Fig. A52

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point B | Morte Eau
Dégradation : T 90 = 15 h.

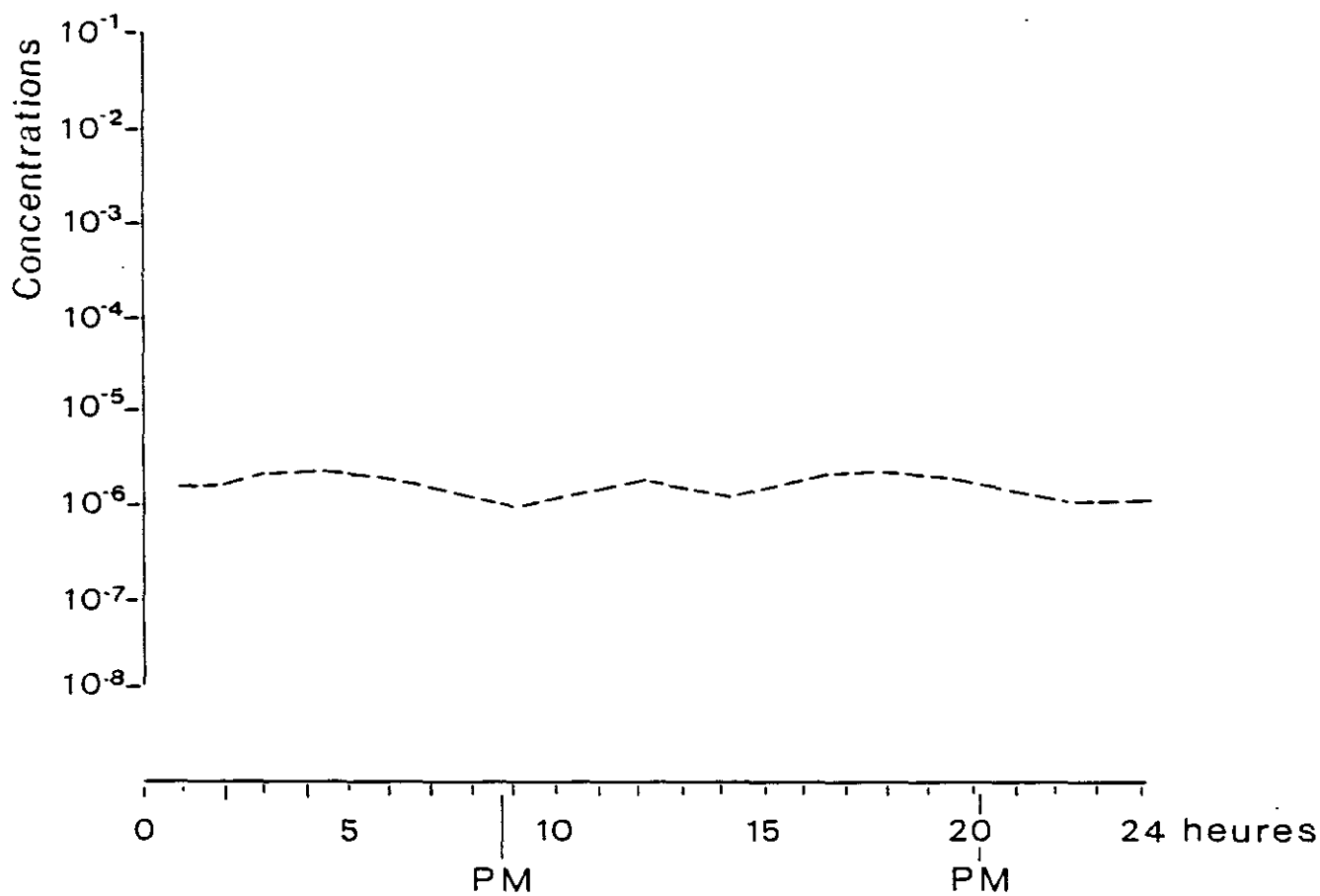
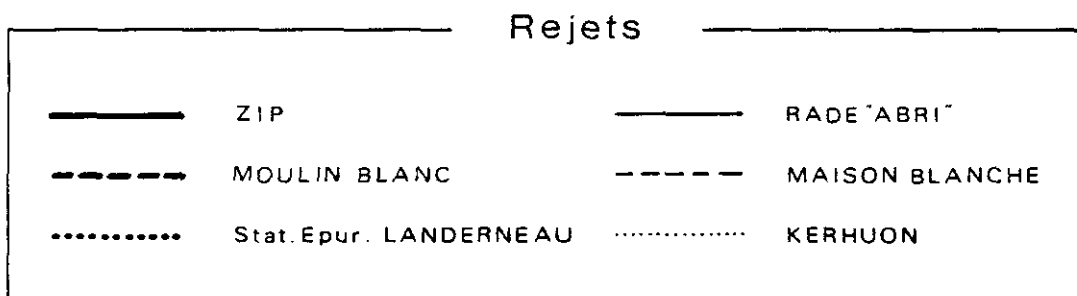


Fig. A53

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point C | Morte Eau
Dégradation : T 90 = 15 h.

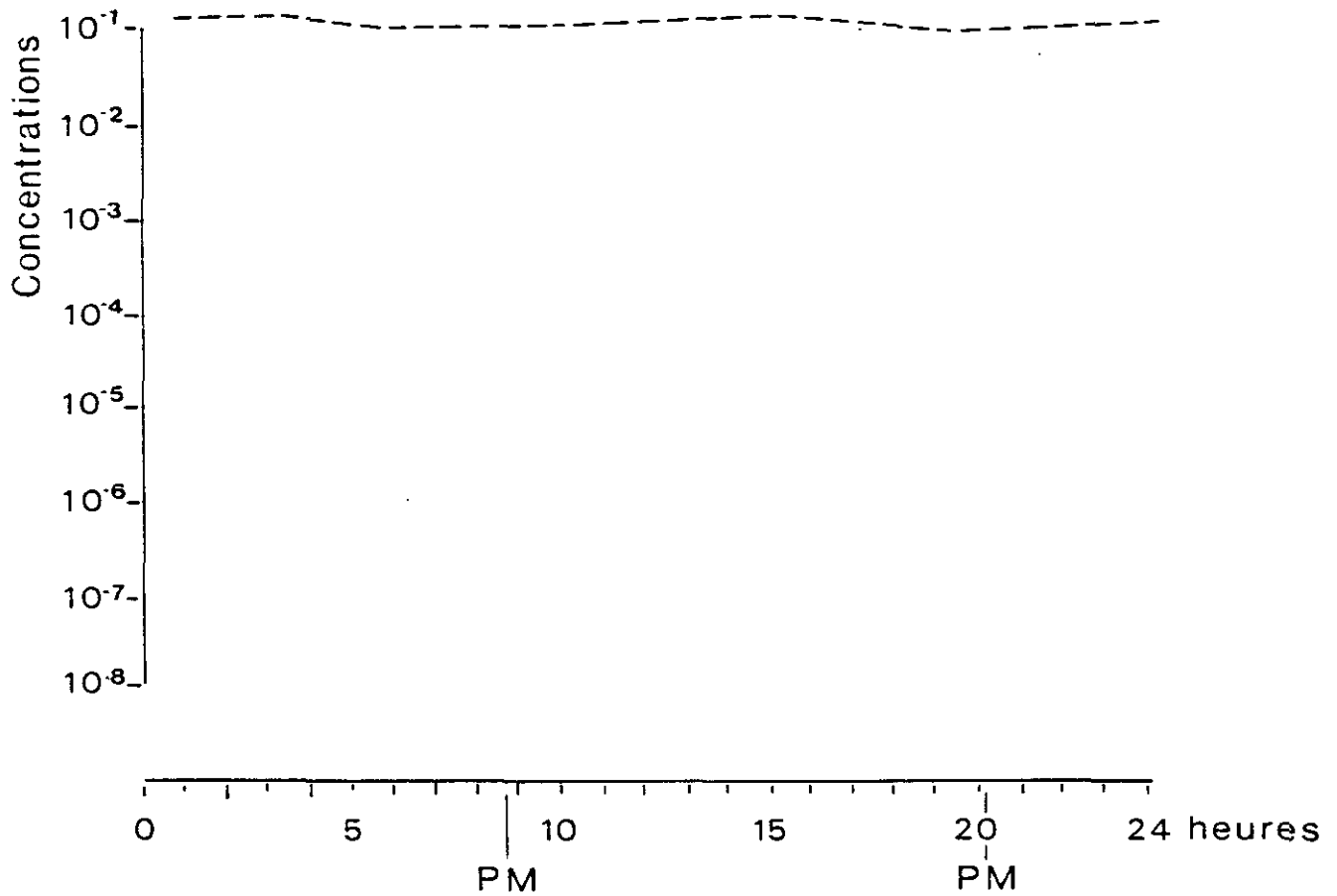
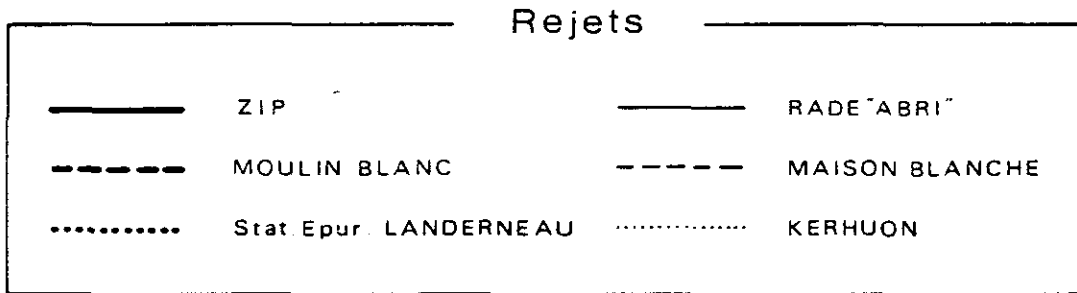


Fig. A54

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point E

Morte Eau

Dégradation : T 90 = 15 h.

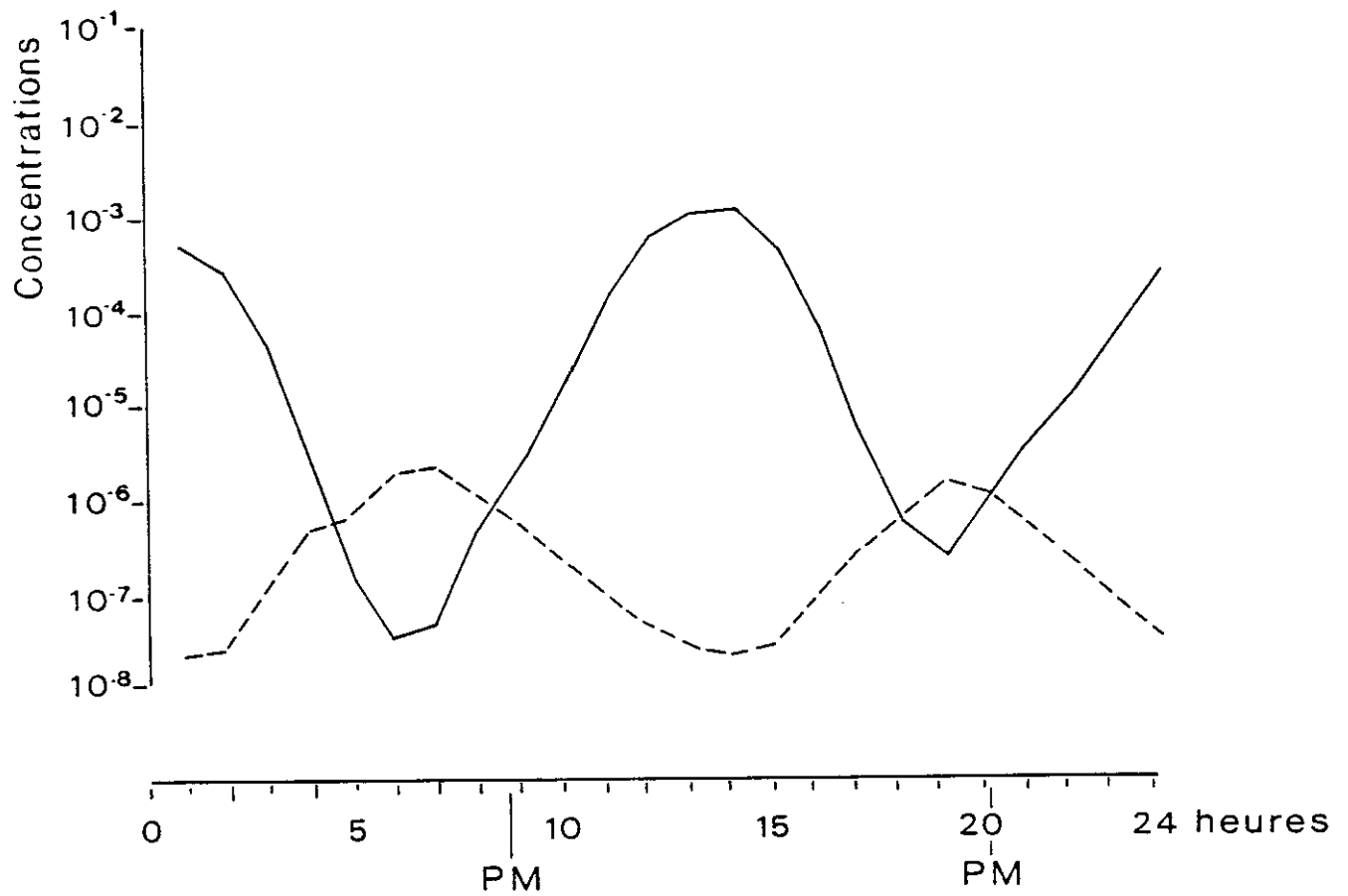
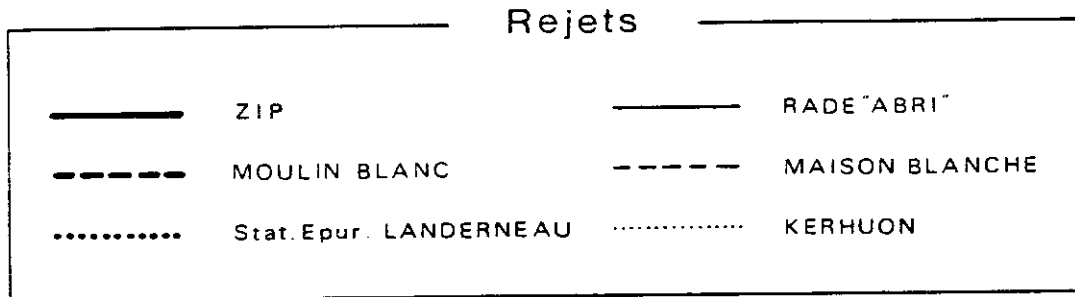


Fig. A55

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point F | Morte Eau
Dégradation : T 90 = 15 h.

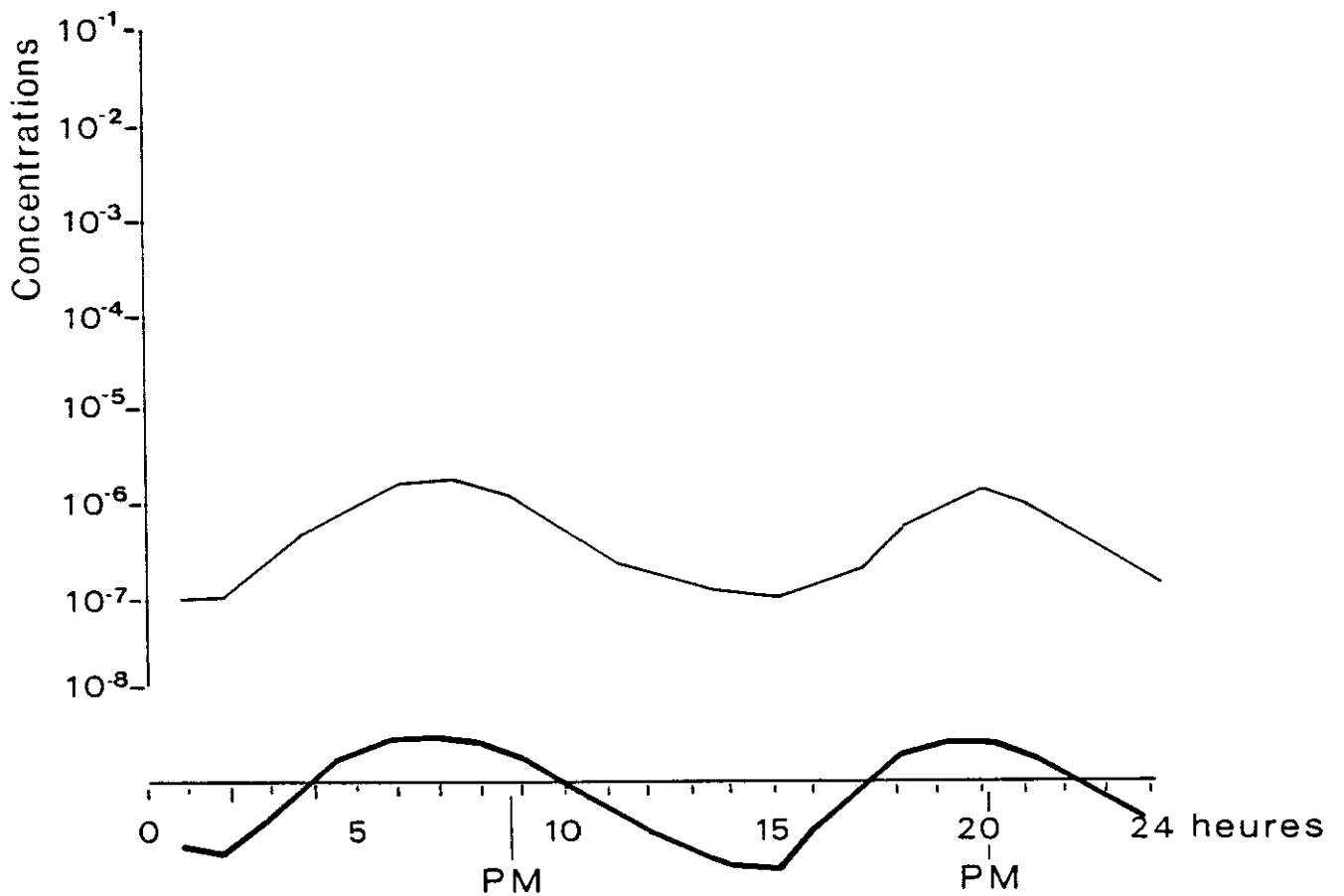
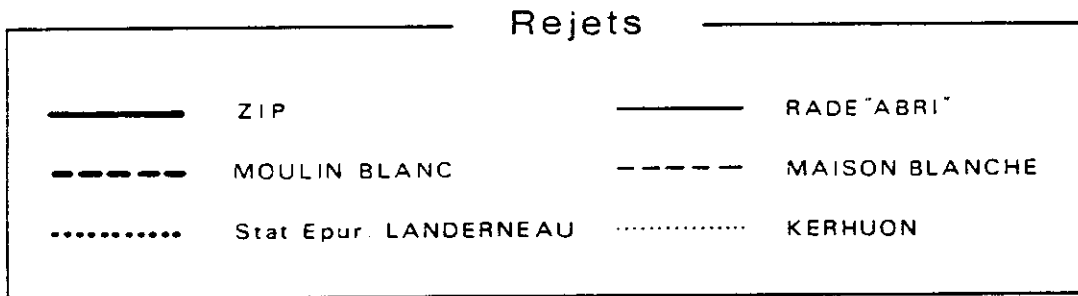


Fig. A56

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point G

Morte Eau

Dégradation : T 90 = 15 h.

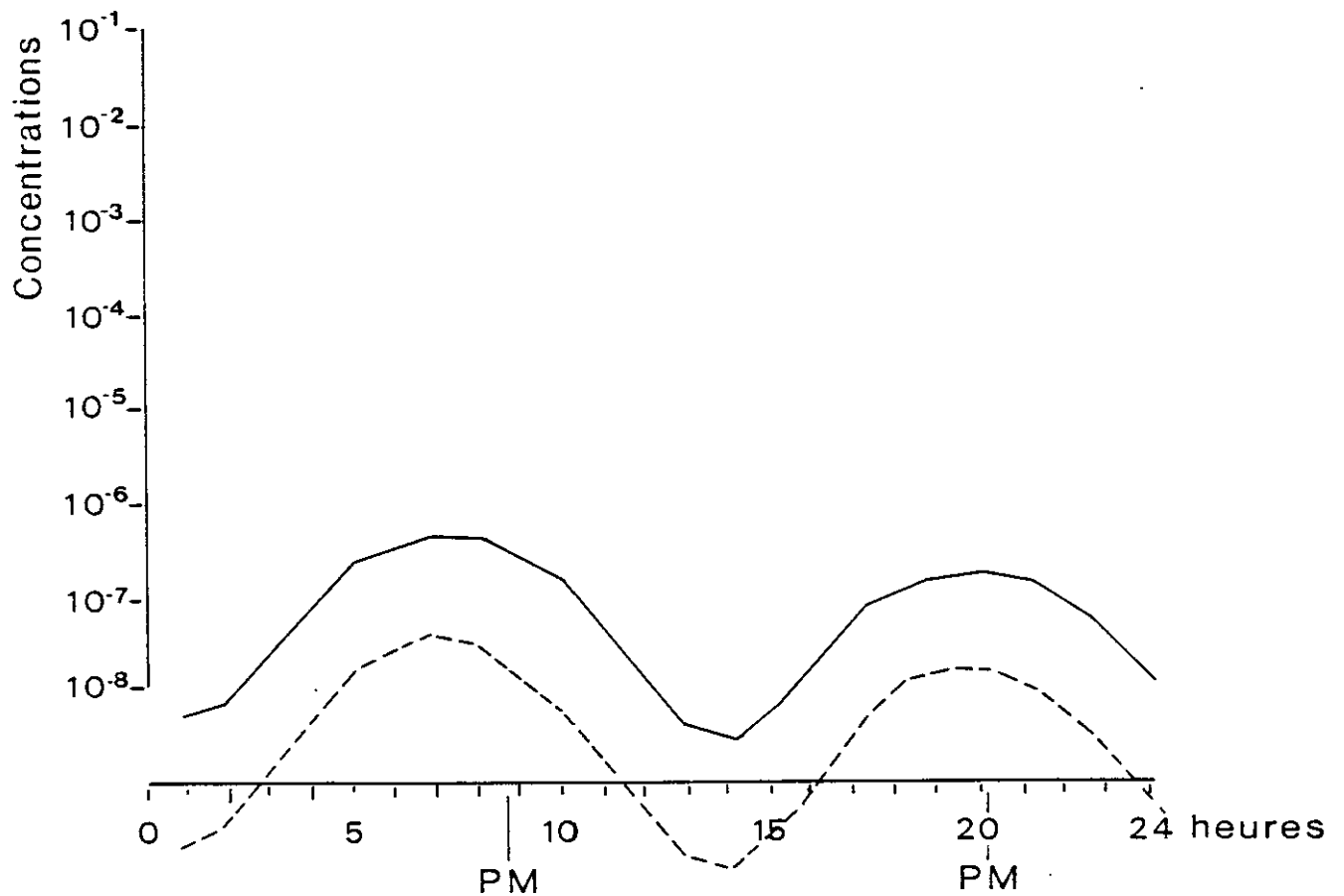
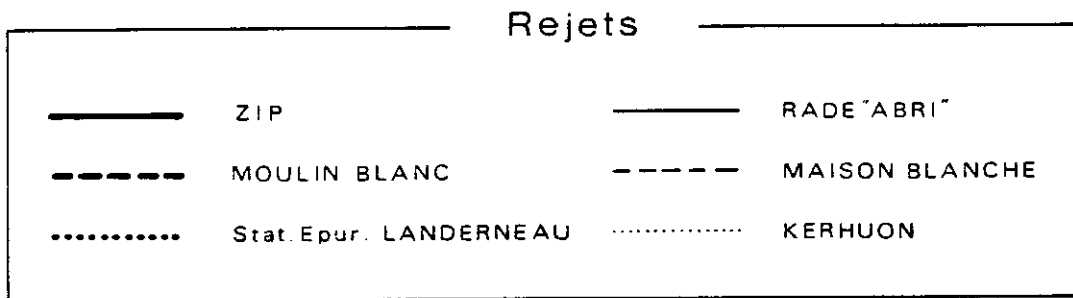


Fig. A57

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point 1

Morte Eau

Dégradation : T 90 = 15 h.

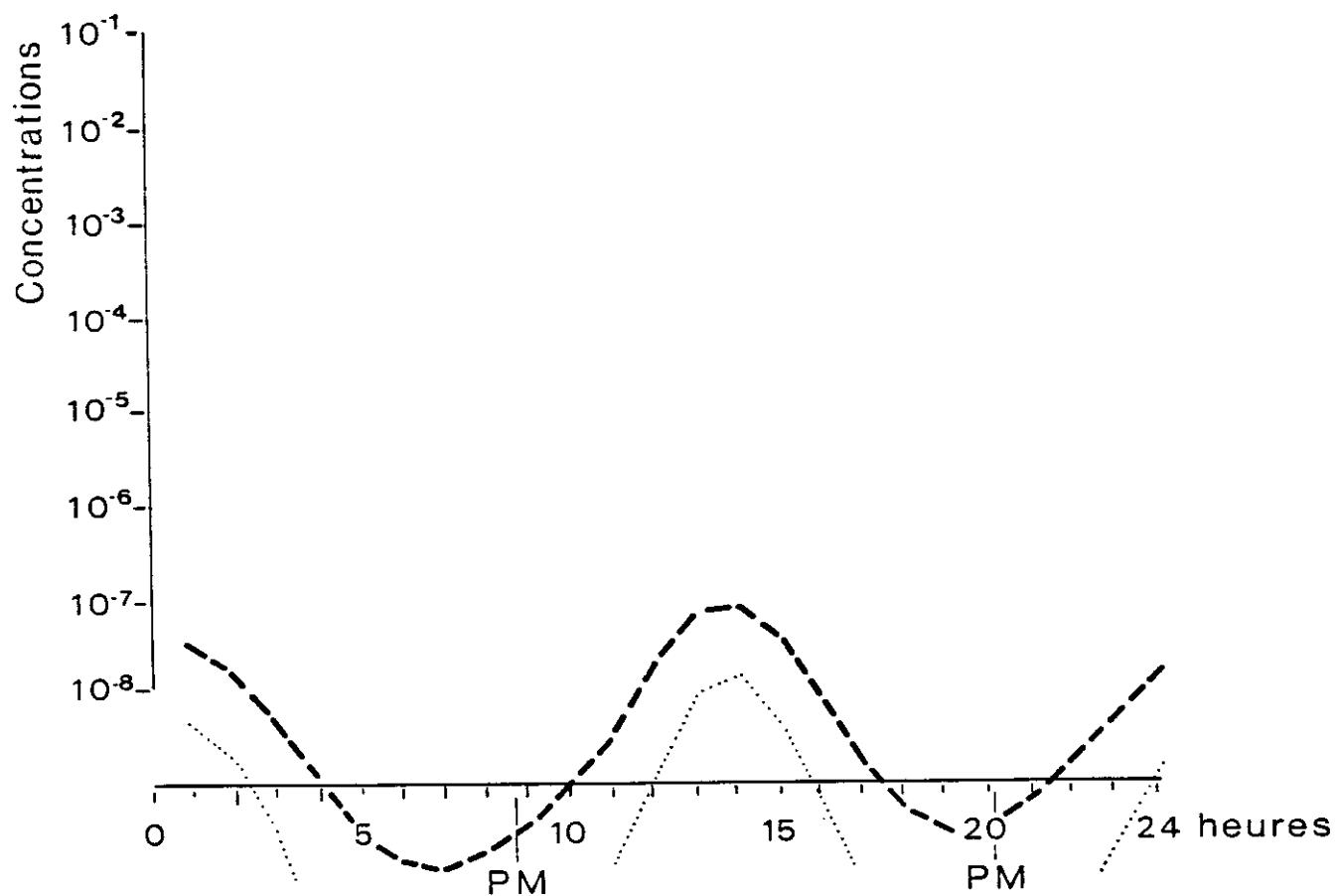
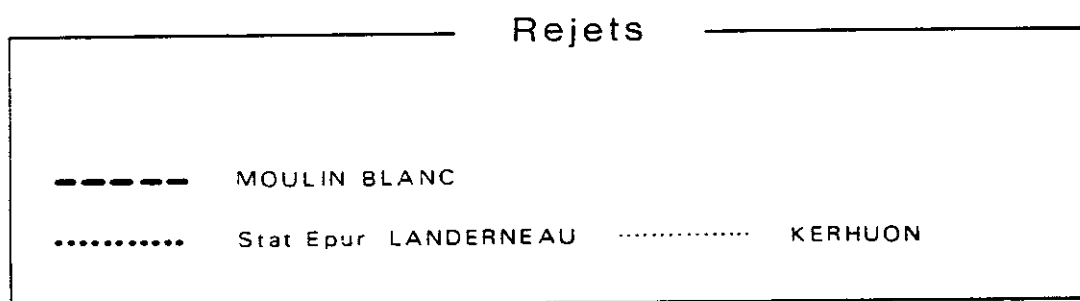


Fig. A58

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point J

Morte Eau

Dégradation : $T_{90} = 15$ h.

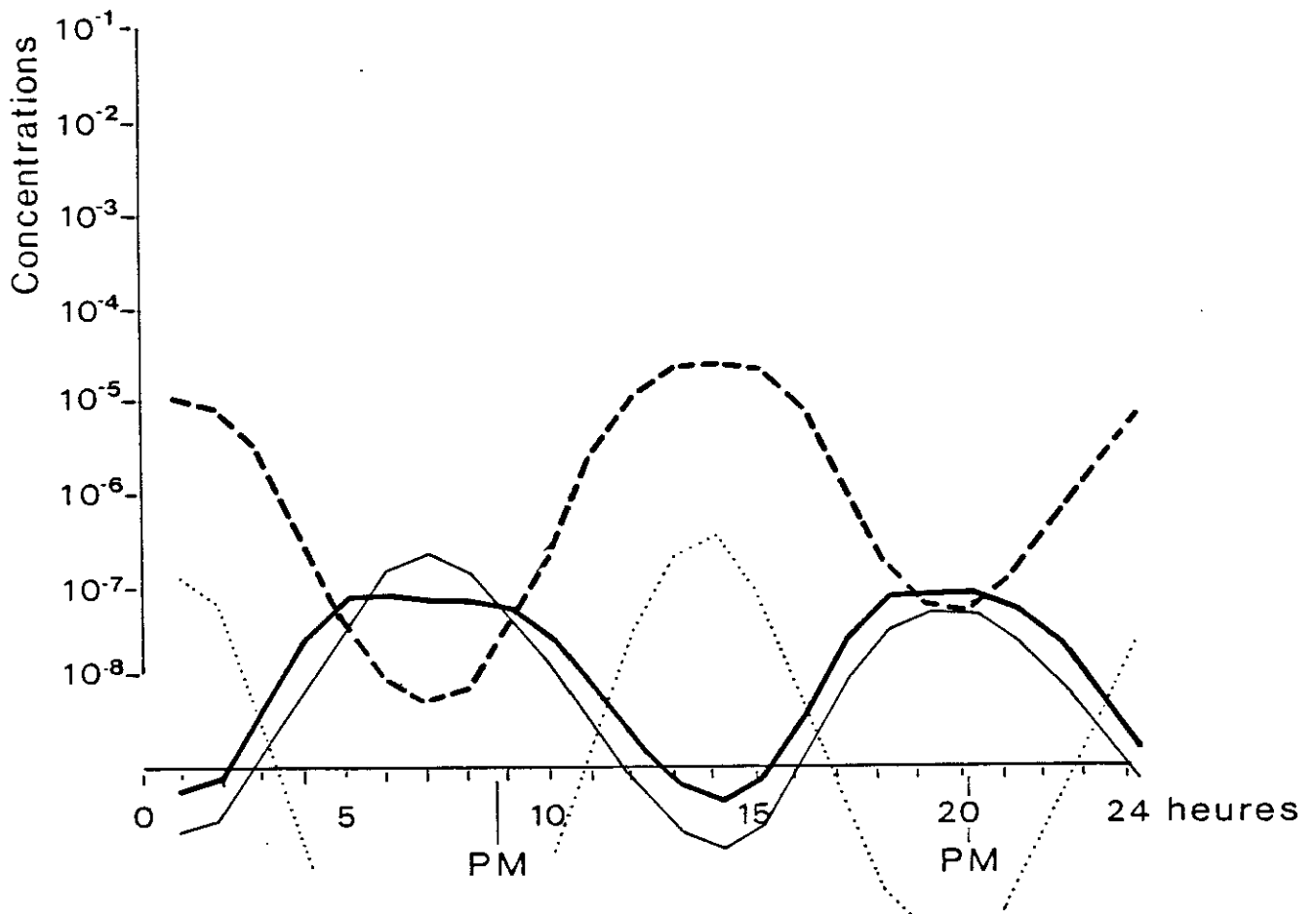
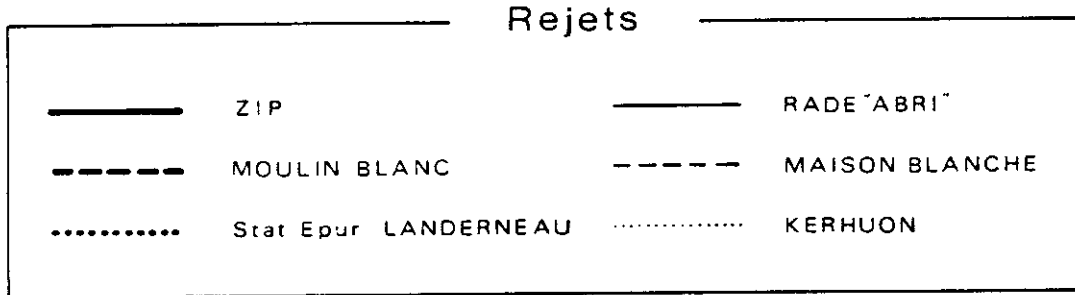


Fig. A59

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point K

Morte Eau

Dégradation : T 90 = 15 h.

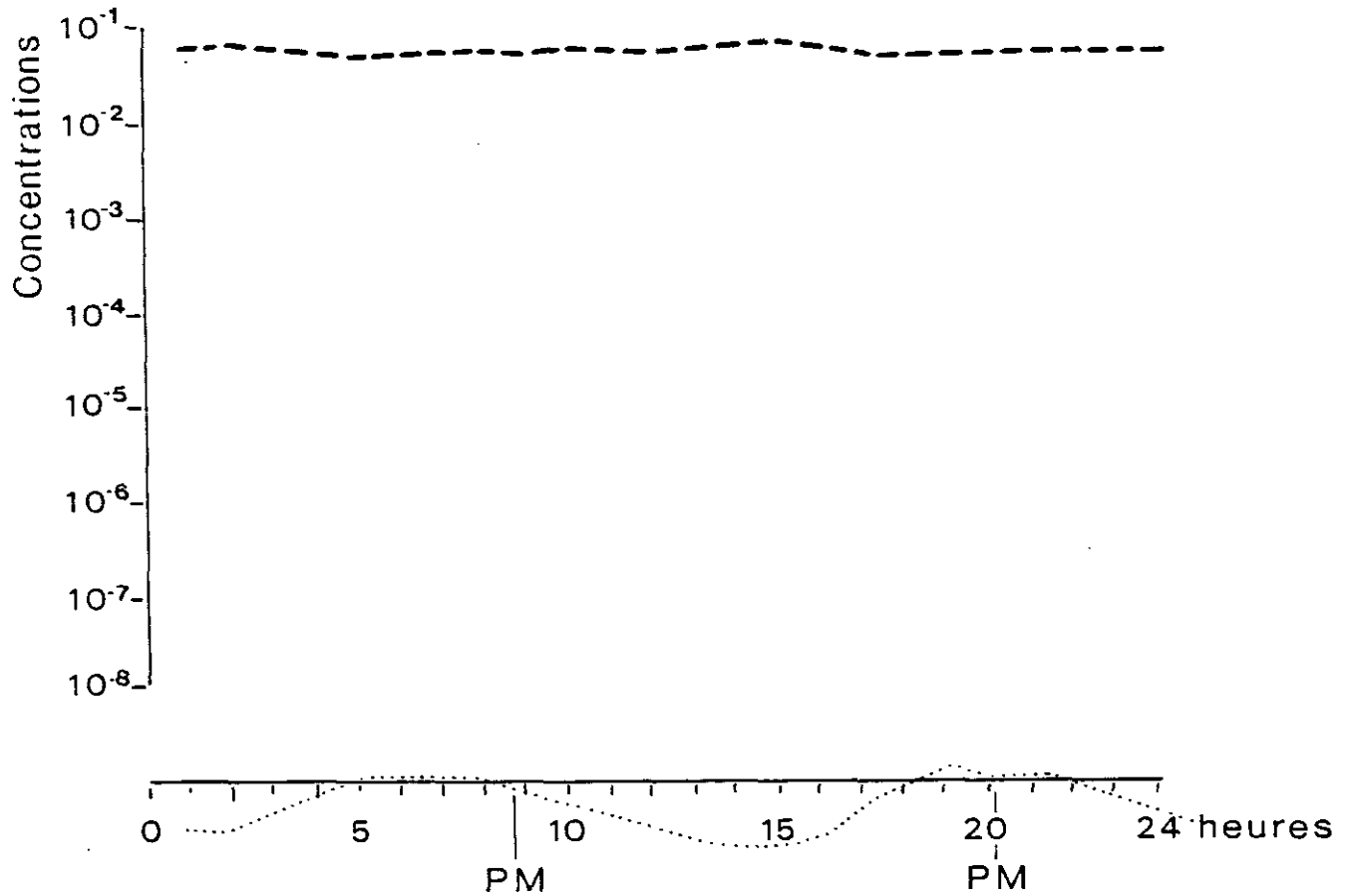
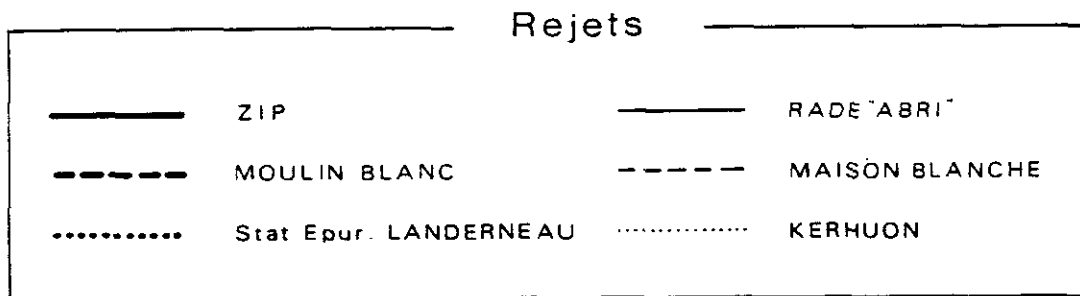


Fig. A60

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point L | Morte Eau
Dégradation : T 90 = 15 h.

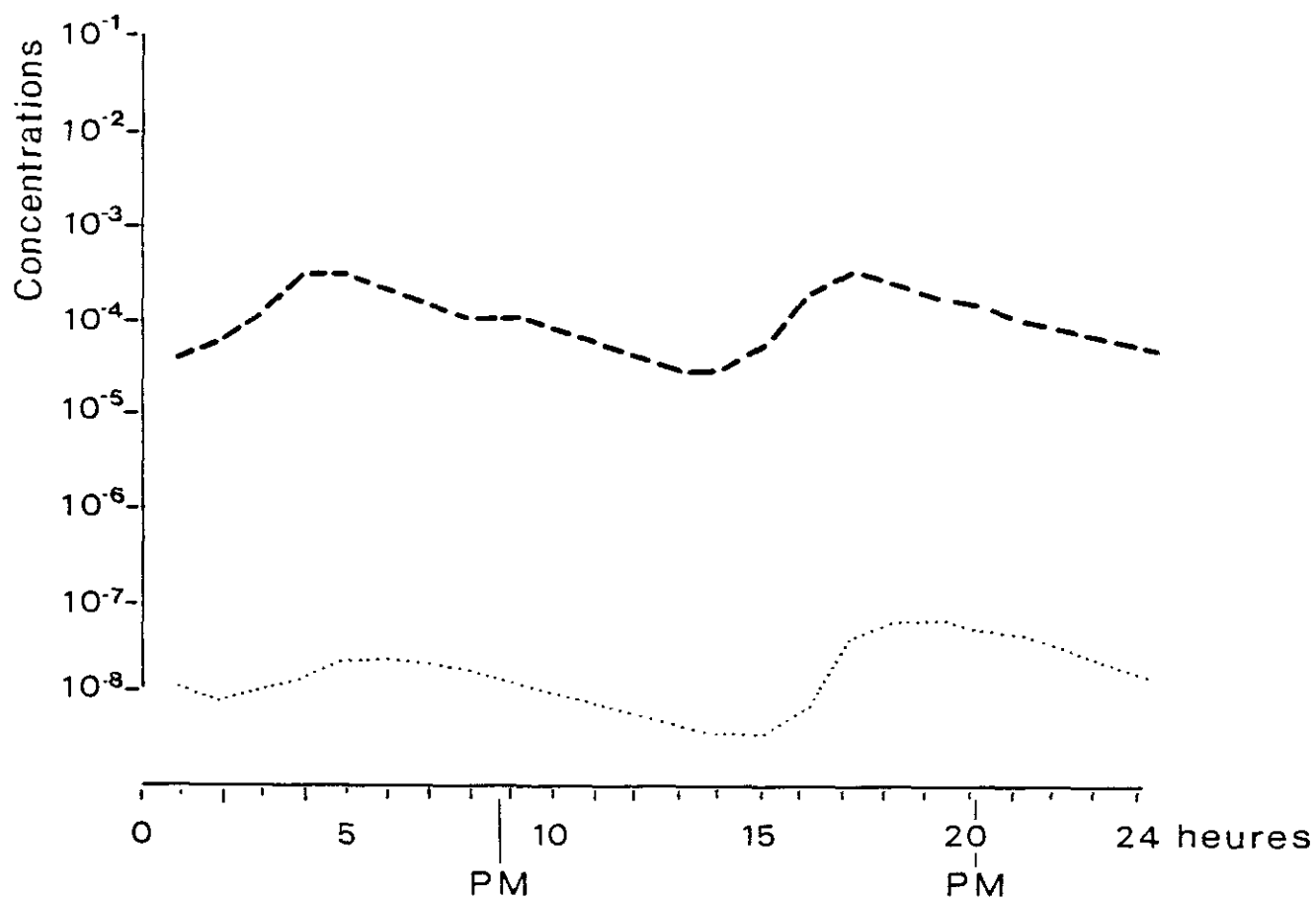
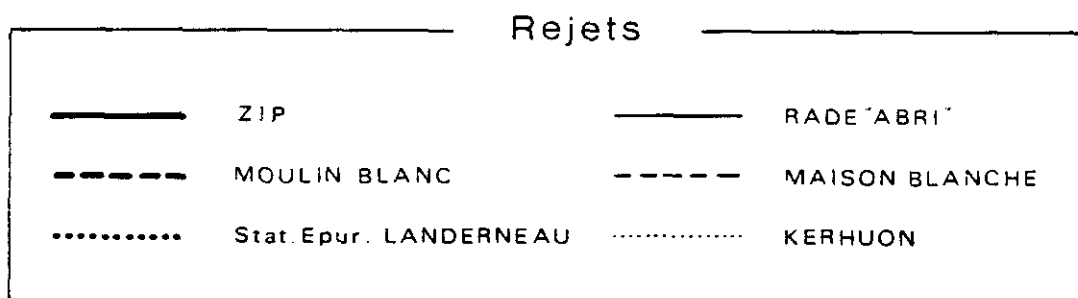


Fig. A61

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point M | Morte Eau
Dégradation : T 90 = 15 h.

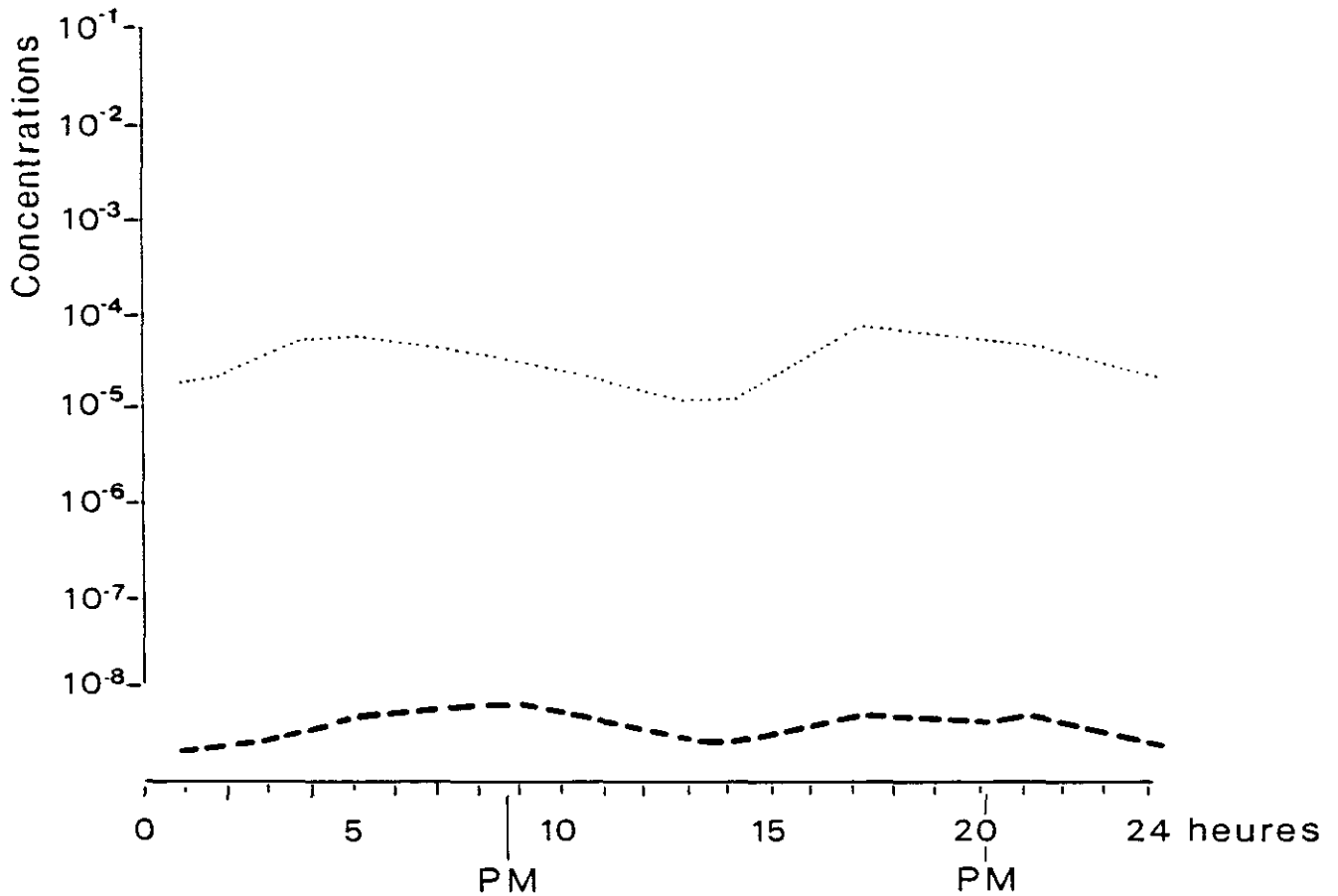
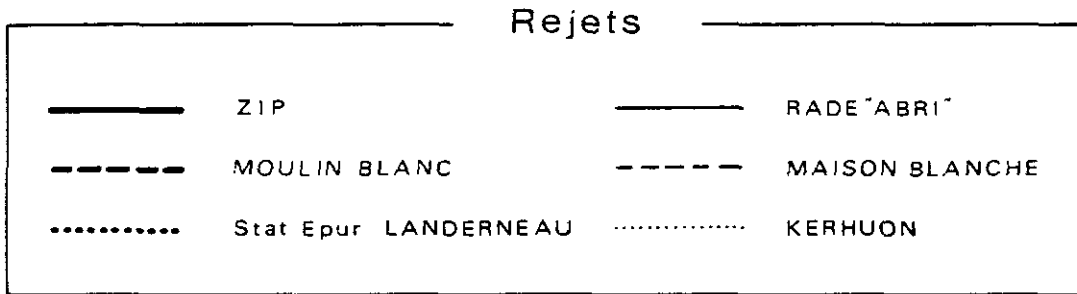


Fig. A62

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point N

Morte Eau

Dégradation : T 90 = 15 h.

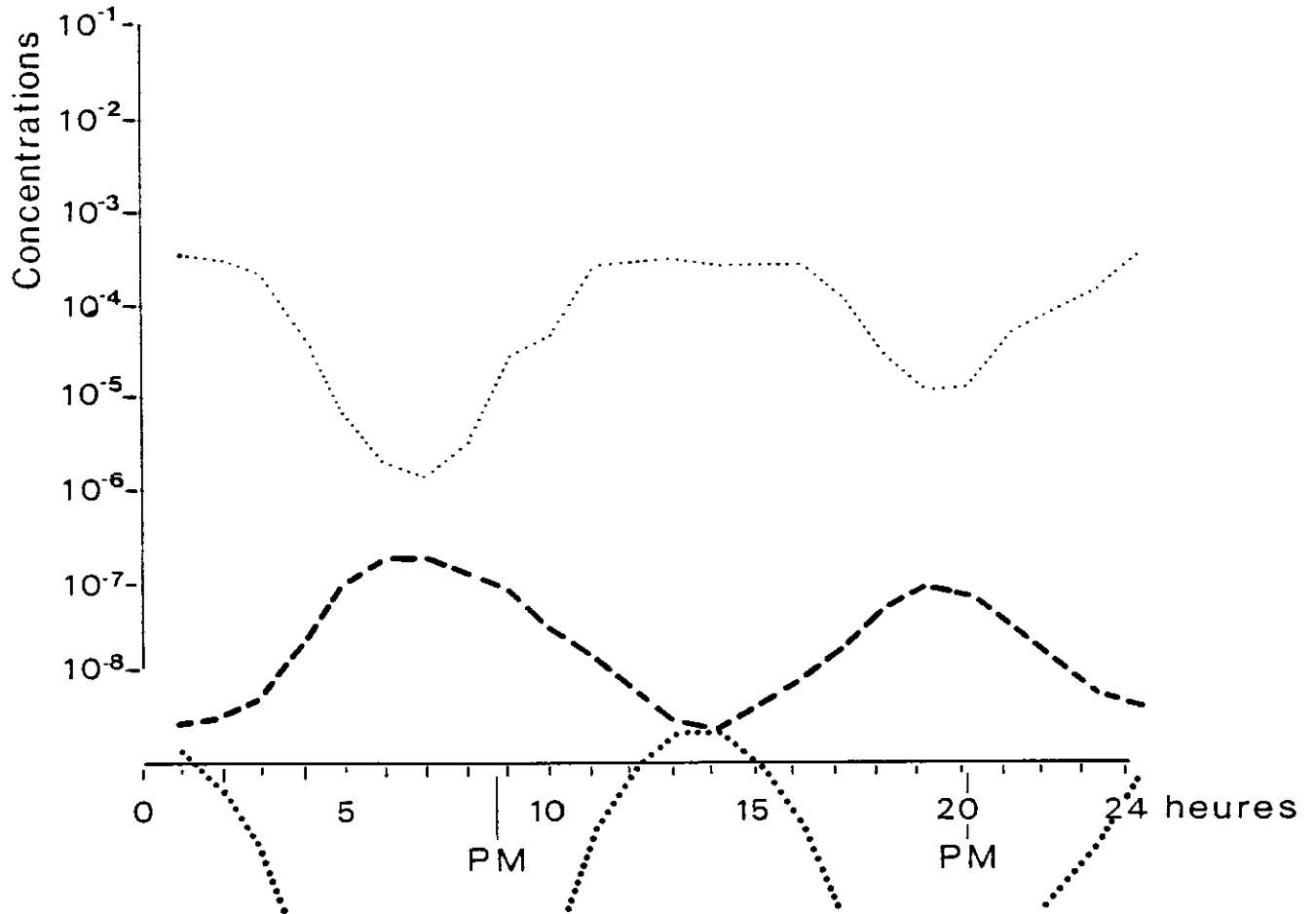
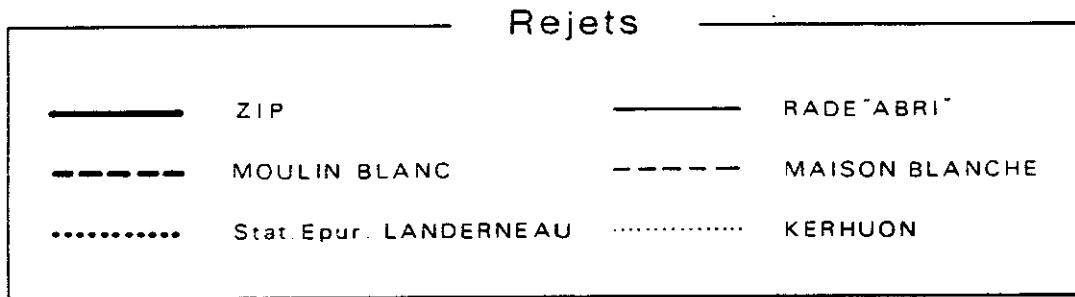


Fig. A63

RADE de BREST
Dilution des Rejets

Point O

Morte Eau

Dégradation : T 90 = 15 h.

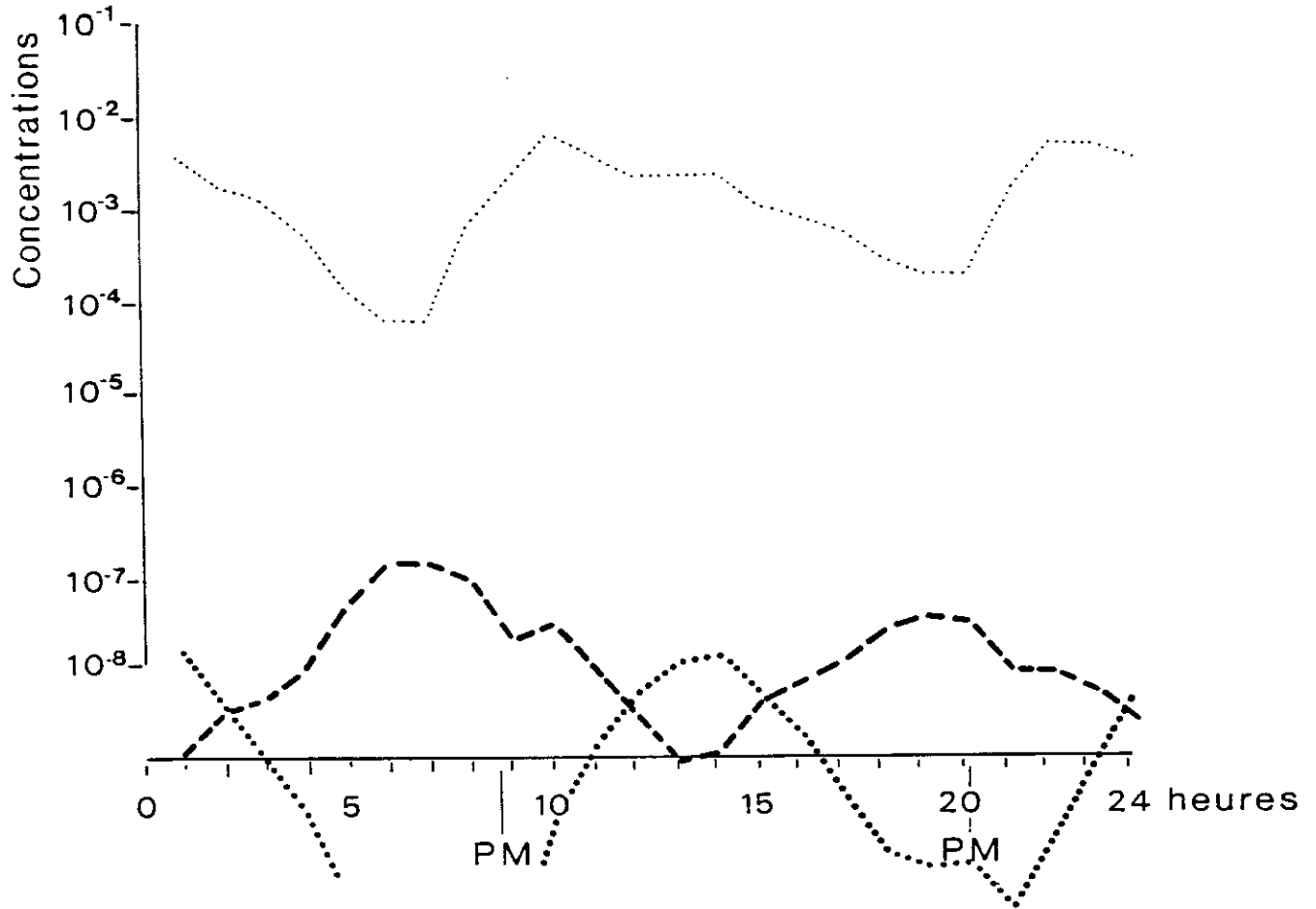
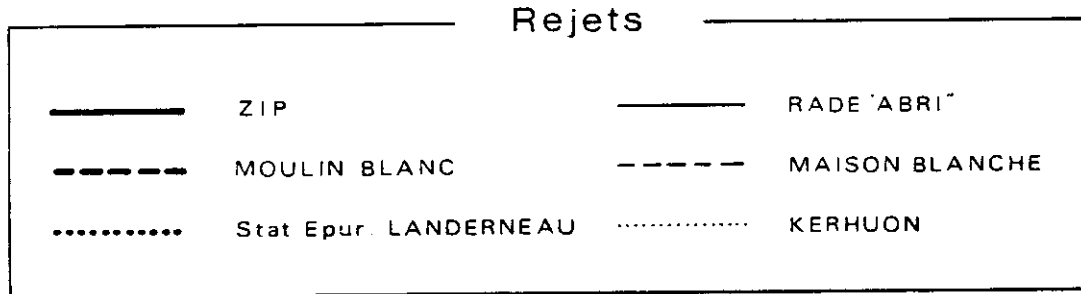
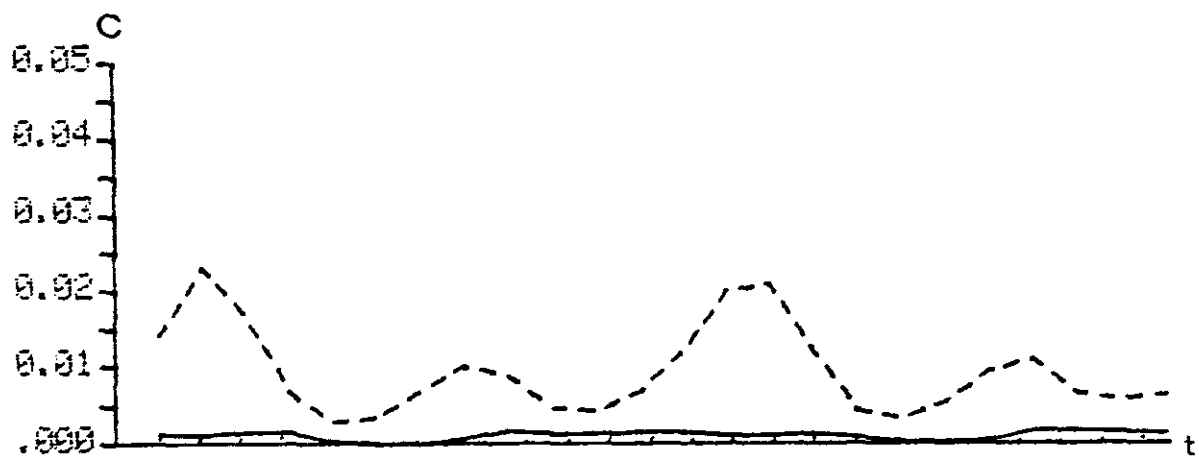


Fig.A64 ESTUAIRE DE L'ELORN - DILUTION DES REJETS AU POINT "P"

MORTE EAU - DEGRADATION: T90 = 15 heures

KERHUON (rejet continu)



niveau de la surface libre

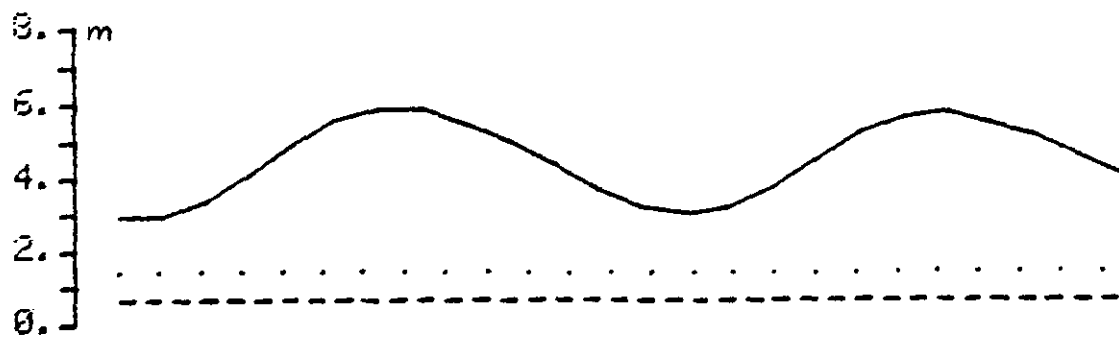


Fig.A65 ESTUAIRE DE L'ELORN - DILUTION DES REJETS AU POINT 'Q'

MORTE EAU - DEGRADATION: T90 = 15 heures

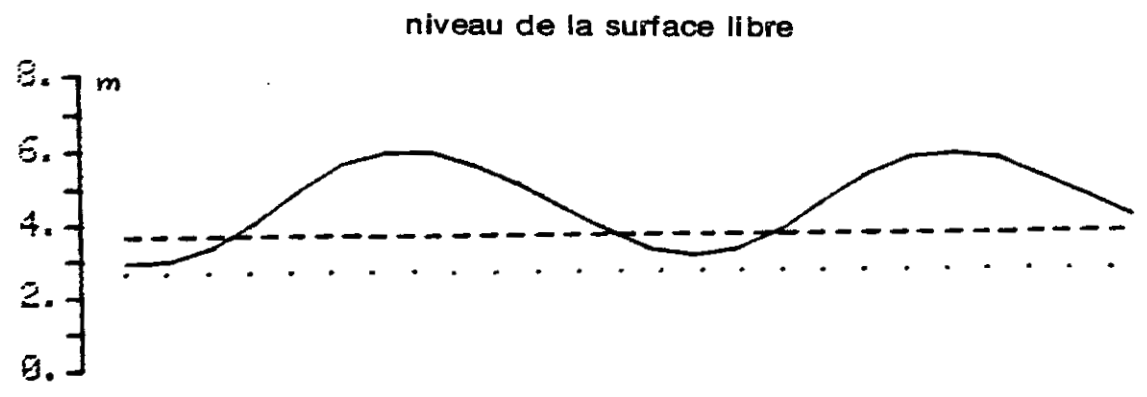
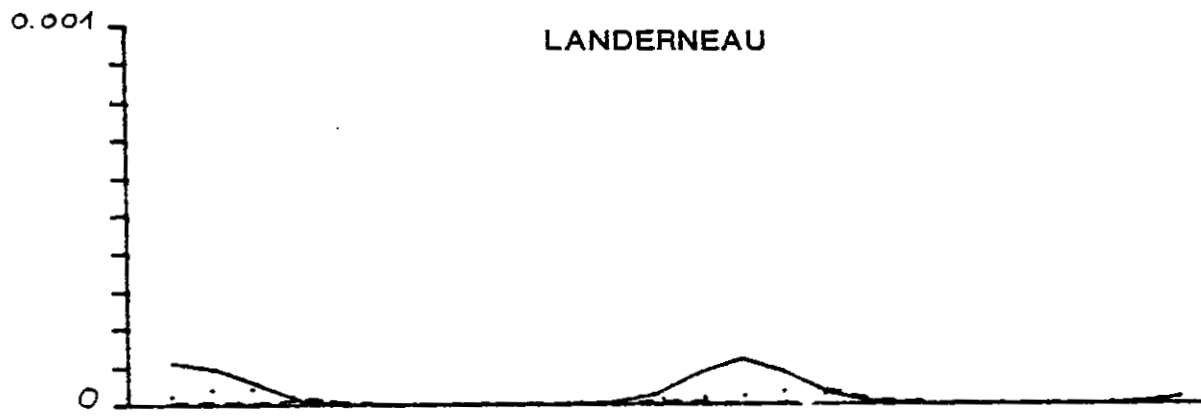
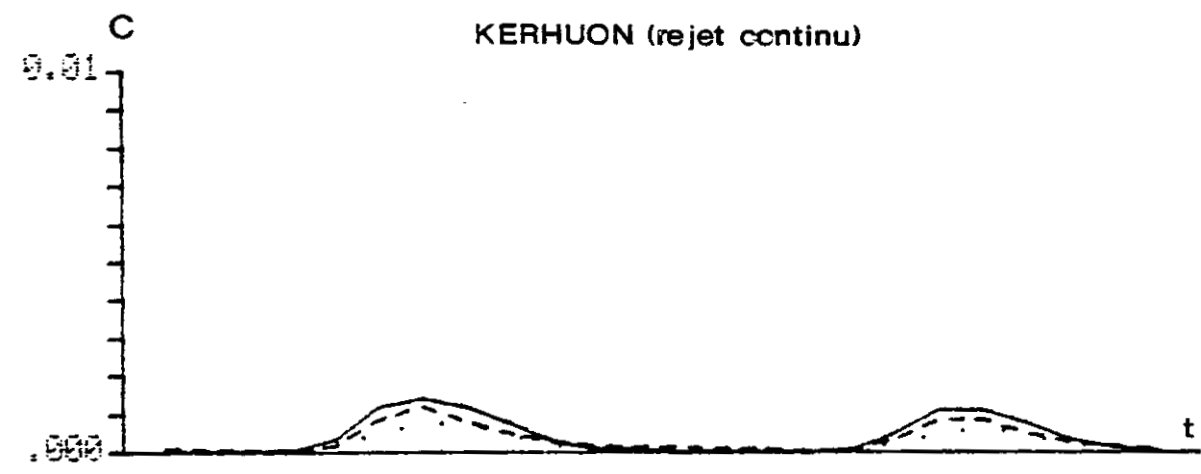
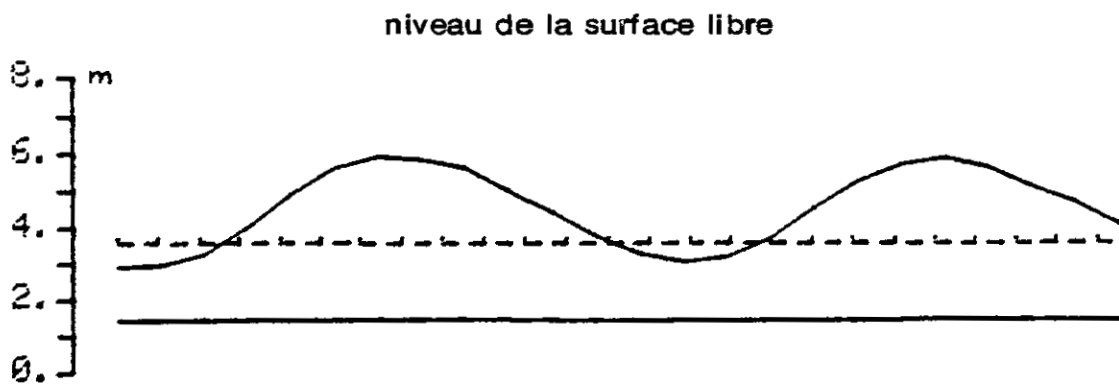
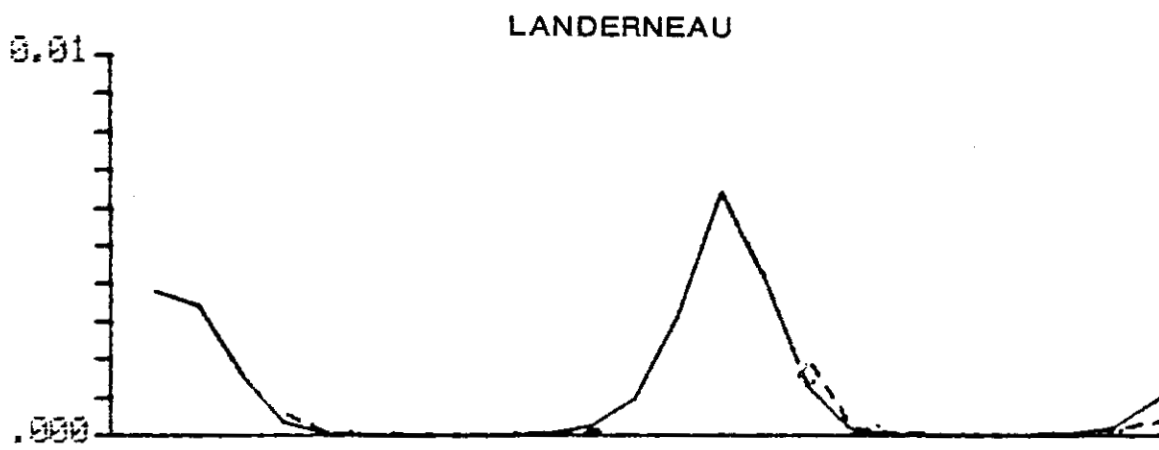
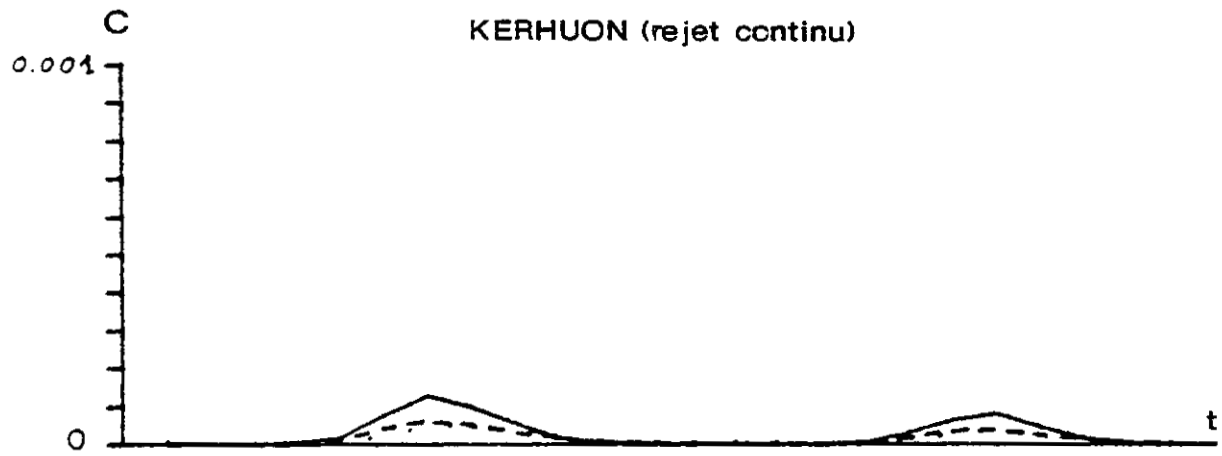


Fig.A66 ESTUAIRE DE L'ELORN - DILUTION DES REJETS AU POINT 'R'

MORTE EAU - DEGRADATION: T90 = 15 heures



ANNEXE 6

**COMPARAISON ENTRE CONTAMINATIONS BACTERIENNES
DANS L'EAU ET DANS LES COQUILLAGES**

Depuis 1980, la DDE du Finistère (Cellule Anti-pollution) a effectué un suivi de la qualité bactériologique des eaux de l'estuaire de l'Elorn, comportant des prélèvements en quelques points de la zone conchylicole concernée (points "DDE" 13, 14, 16 et 17).

Parallèlement, la station IFREMER de Concarneau (Laboratoire de Contrôle et Suivi des Ressources et de leur Utilisation) a réalisé en 1986 et 1987 un suivi de la contamination bactériologique des coquillages (huîtres, moules) à l'aide de mesures de concentrations en coliformes de la chair des mollusques (cf. figure).

Il serait vain et dangereux d'interpréter les résultats en termes de "loi de concentration" des bactéries par les coquillages, ce pour quoi les mesures n'ont pas été faites. En effet :

- les prélèvements dans la chair de coquillage portent sur les années 86 et 87 seulement, et montrent une variabilité relativement importante. Cependant, on note que les contaminations des différentes espèces (huîtres creuses ou plates, palourdes et moules) sont du même ordre et différent peu selon le type d'installation (bassin, parc, estran) (cf. figure),

- les mesures dans l'eau sont effectuées à différents moments de la marée (généralement plus proches de la pleine mer) en des points différents de ceux des coquillages, et de 1980 à 1987. Elles indiquent elles aussi une très grande variabilité, d'ailleurs tout à fait prévisible.

Néanmoins, nous avons comparé les moyennes géométriques globales des mesures, chaque moyenne portant sur une trentaine de valeurs de concentrations en coliformes fécaux. Les résultats sont les suivants :

Zone "621" : Entre La Forest-Landerneau et la Tourelle St Jean (ou pointe St Yves)

Contamination des moules : $\overline{\log C} = 2,99$

soit $\hat{C} = 977$ où \hat{C} signifie moyenne géométrique de C

à comparer aux résultats dans l'eau

- à la Forest (point DDE 13) : $\hat{C} = 1\ 732$

- et à la pointe St Yves (point DDE 14) : $\hat{C} = 310$

Zone "622" : Entre la Tourelle St Jean et le Pont de Plougastel

Contamination des huîtres en 1986 : $\hat{C} = 324$

en 1986 et 1987 : $\hat{C} = 225$

COQUILLAGES DE L'ESTUAIRE DE L'ELORN

RESULTATS DES ANALYSES BACTERIOLOGIQUES

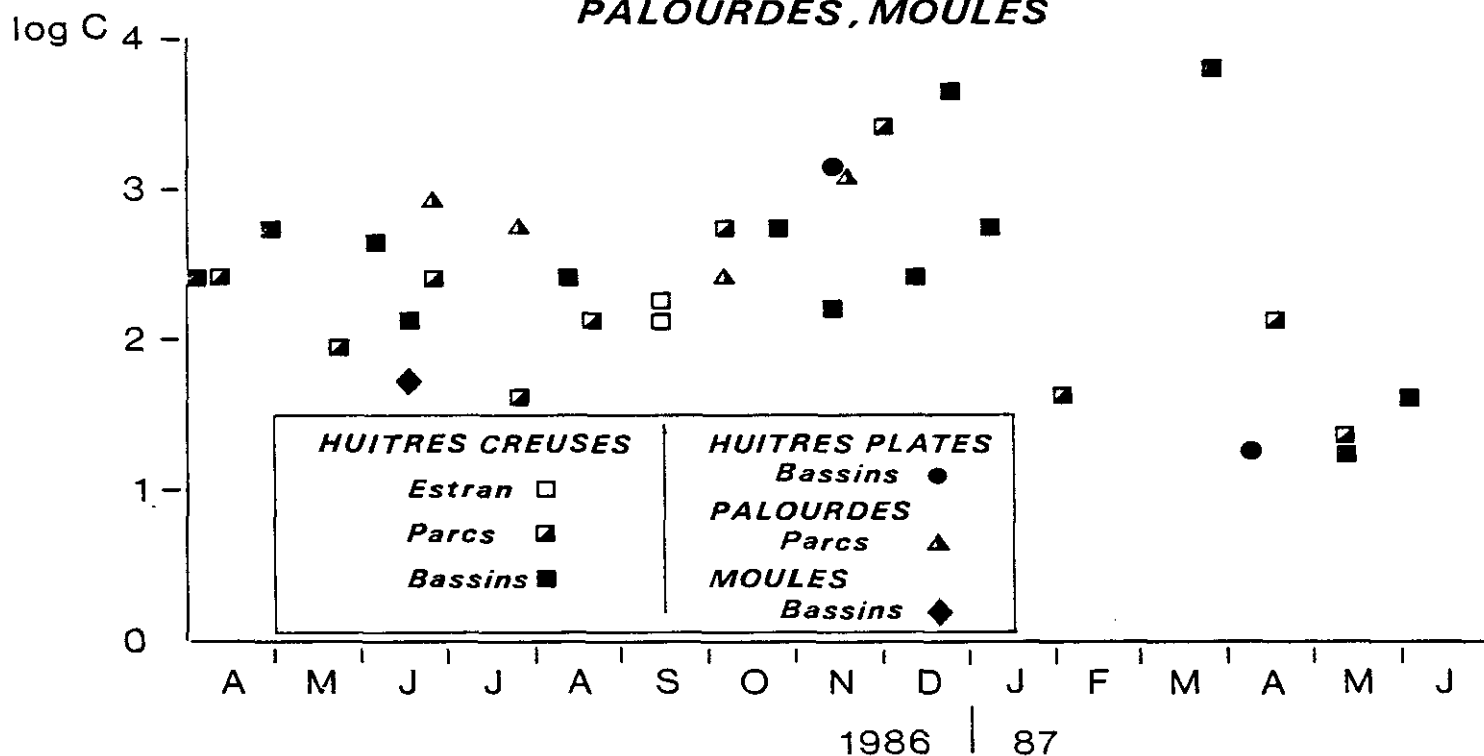
prélèvements répartis entre avril 1986 et juin 1987

C=nb. Coli. fécaux / 100 ml chair

Données fournies par le Laboratoire CSRU
de la Station IFREMER de Concarneau

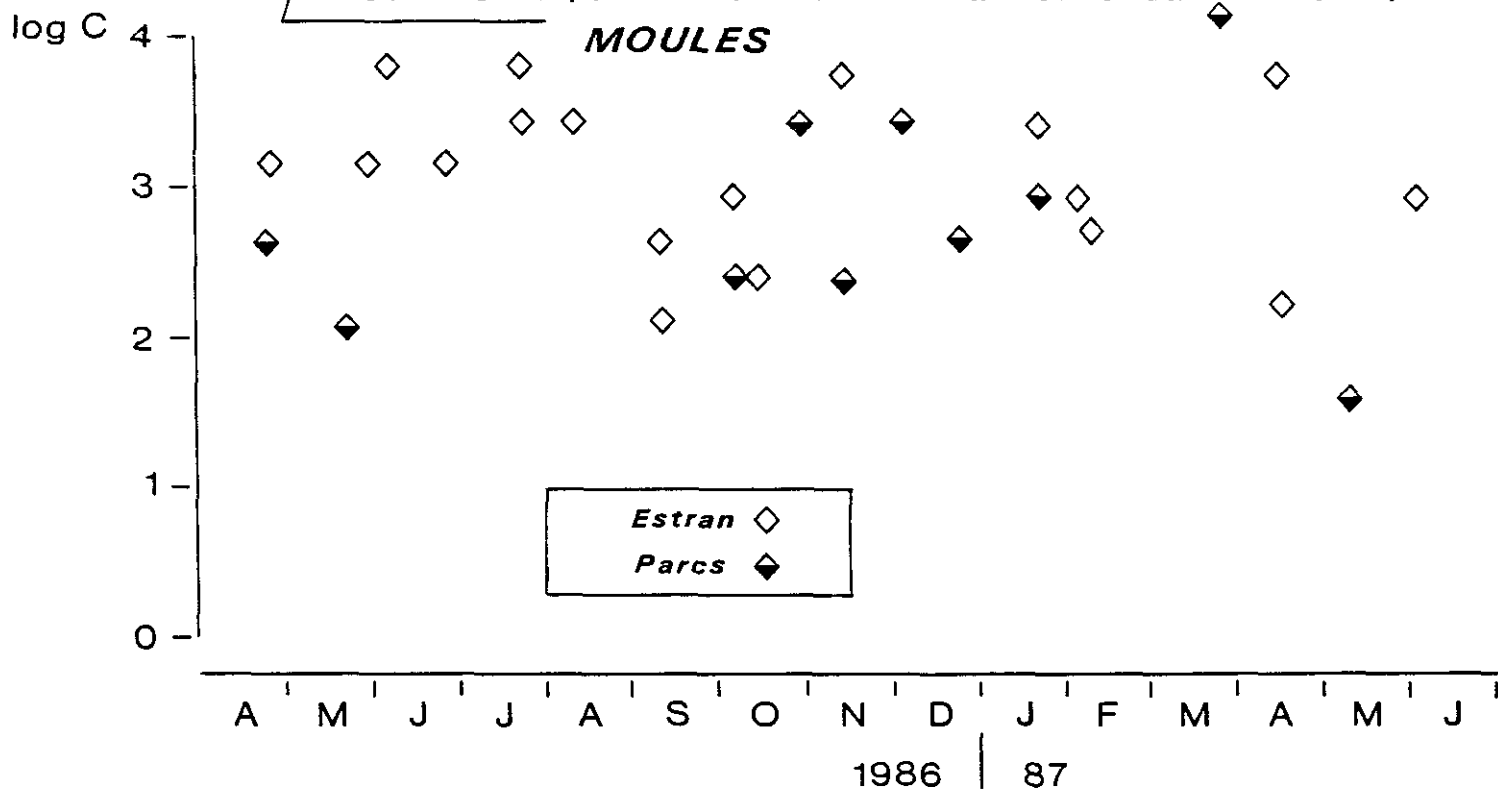
Zone 622 (pte St Jean ↔ Pont de Plougastel)

HUITRES creuses et plates,
PALOURDES, MOULES



Zone 621 (pte St Jean ↔ La Forêt-Landerneau)

MOULES



à comparer aux résultats dans l'eau

- dans l'anse de Kerhuon (point DDE 16) :
 $\hat{C} = 152$

- et au niveau du Pont de Plougastel (point DDE 17) :

$$\hat{C} = 98$$

Si l'on admet que les secteurs conchylicoles amont sont plus proches de la pointe St Yves que de la Forest, on observe une relative concordance des résultats qui conduisent à un éventuel "facteur de concentration" compris entre 2 et 3, ce qui est très peu en comparaison avec la valeur habituellement retenue (facteur de 30).

Sources : Mesures dans l'eau : Cellule anti-pollution, DDE du Finistère.
Mesures dans les coquillages : CSRU, Centre IFREMER de Concarneau.