

UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

Faculté des Sciences et Techniques

LABORATOIRE D'Océanographie Physique

RAPPORT SCIENTIFIQUE

CONTRAT U.B.O. / IFREMER N° 84 / 7480

CIRCULATION DE MAREE DANS LE GOLFE NORMAND-BRETON

par

Abdellatif ORBI

Juin 86

F5

SOMMAIRE

Introduction

I. Bilan des connaissances

I.1. Présentation morphologique

I.1.1. Introduction

I.1.2. Le littoral

I.1.3. Les hauts fonds

I.2. Bilan des connaissances

I.2.1. Introduction

I.2.2. Apports d'eau douce

I.2.3. Marnage

I.2.4. Courant de marée

I.2.5. Front thermique

I.2.6. Circulation résiduelle eulérienne

I.3. Conclusion

II. Présentation des mesures et du modèle numérique

II.1. Présentation des mesures

II.1.1. Introduction

II.1.2. Mesures

II.1.2.1. Mesures eulériennes

II.1.2.2. Mesures lagrangiennes

II.2. Présentation du modèle numérique

- II.2.1. Schéma numérique
- II.2.2. Dimension géographique. Maillages
- II.2.3. Paramètres numériques
- II.2.4. Condition initiale et aux limites
- II.2.5. Niveau moyen
- II.2.6. Validation

III. Etude dynamique de la marée dans le G.N.B.

III.1. Présentation des résultats de mesures

- III.1.1. Introduction
- III.1.2. Présentation des résultats de mesures de courant

III.2. Comparaison entre mesures et résultats du modèle

- III.2.1. Comparaison des niveaux de marée
- III.2.2. Comparaison des courants
- III.2.3. Conclusion

III.3. Etude de courant de marée dans le G.N.B.

- III.3.1. Caractéristiques du courant de marée dans le G.N.B.
- III.3.2. Directions et maxima de courant pour une marée de vive eau

III.4. Etude théorique

- III.4.1. Introduction
- III.4.2. Canal avec un mur de réflexion à fond plat
- III.4.3. Canal avec un cap et à fond plat
- III.4.4. Canal avec un cap et à fond non plat

IV Circulation résiduelle

IV.1. Introduction

IV.2. Circulation résiduelle - définitions

IV.3. Sensibilité du modèle aux paramètres de réglage
en résiduel

IV.3.1. Sensibilité du modèle (en résiduel)

IV.3.2. validation du schéma eulérien

IV.4. Courant résiduel eulérien en surface et au fond

IV.5. Circulations résiduelles lagrangiennes

IV.5.1. Résultats du modèle

IV.5.2. Comparaison avec les flotteurs Argos

IV.6. Schéma de circulation résiduelle lagrangienne

IV.7. Circulation résiduelle au voisinage du front

V. Circulation résiduelle de marée - Mécanismes de Génération

V.1. Introduction

V.2. Equation de la vortacité

V.2.1. Equation de vortacité

V.2.2. Cas schématique (profondeurs constantes)

V.3. Tourbillons résiduels eulériens

V.3.1. Tourbillons résiduels induits par un cap

V.3.2. Structures induites par les hauts fonds et les îles

V.4. Tourbillons résiduels lagrangiens

Conclusion

ANNEXE I Cartes de courant de marée
- Marée de vive eau moyenne -

ANNEXE II Cartes de courant de marée
- Marée moyenne -

ANNEXE III Cartes de courant de marée
- Marée de morte eau -

ANNEXE IV Trajectoires des masses pour une marée de vive eau moyenne

ANNEXE V Observations de vent à Granville.

Bibliographie

Introduction

Le golfe Normand-Breton, zone située entre la Manche Est, la Manche Ouest et le continent, est le siège d'une activité humaine intense et diversifiée : conchyliculture, pêche, extraction d'agregats, rejets industriels (La Hague et Flamanville), tourisme, activités portuaires...

Par ailleurs de nombreux projets d'aménagements concernant cette zone sont à l'étude depuis ces dernières années : usine marémotrice, schéma d'aménagement conchylicole et aquacole, insularité du Mont Saint-Michel, Parc naturel de Chausey...

La gestion de cet espace littoral demande une maîtrise des connaissances de phénomènes naturels.

C'est pour cette raison qu'une étude globale des processus physiques, sédimentologiques et biologiques du G.N.B. a été entreprise depuis 1982 par l'IFREMER en association avec plusieurs laboratoires.

Dans le cadre de l'océanographie physique, notre contribution se limite à l'étude de la circulation de marée et essentiellement à la circulation résiduelle de marée car si la physique a été l'une des disciplines les mieux étudiées dans le golfe depuis les années 50, les mouvements résiduels ont été très peu appréhendés et le devenir des masses d'eau, si important pour la biologie, reste par conséquent très mal connu.

Les outils que nous allons utiliser pour mener ce travail sont:

- Un modèle numérique bidimensionnel,
- Des mesures,
- La théorie.

Pour permettre une meilleur compréhension des mécanismes en jeu dans cette zone, le modèle numérique sera le support essentiel de ce travail.

Le choix d'un modèle bidimensionnel découle du fait que la circulation dans la Manche est essentiellement barotrope. Ainsi le modèle numérique sera exploité dans un premier temps pour tirer des informations essentielles en ce qui concerne la circulation au cours d'une marée. Il sera par la suite utilisé en résiduelles. Si les mesures (lagrangiennes ou eulériennes) à elles seules ne peuvent donner une approche globale de la circulation résiduelle dans le G.N.B., elles sont indispensables pour la validation des résultats du modèle numérique.

Pour ce qui concerne les études de certains phénomènes locaux qui ne peuvent être reproduits par les modèles bidimensionnels (comme la circulation dans la zone frontale située entre Jersey et Guernesey), les mesures seront utilisées pour compléter des résultats du modèle.

Nous tenterons également dans ce travail de cerner les mécanismes essentiels qui conditionnent la circulation dans le G.N.B. en s'appuyant :

- sur l'étude de l'équation de vorticité, en ce qui concerne la circulation résiduelle ;
- sur un modèle schématique de la Manche en ce qui concerne la circulation instantanée.

CHAPITRE I

=====

BILAN DES CONNAISSANCES

I-1 PRESENTATION MORPHOLOGIQUE

I-1-1 Introduction

I-1-2 Le littoral

I-1-3 Les hauts fonds

I-2 BILAN DES CONNAISSANCES

I-2-1 Introduction

I-2-2 Apports d'eau douce

I-2-3 Marnage

I-2-4 Courant de marée

I-2-5 Front thermique

I-2-6 Circulation résiduelle eulérienne

I-3 CONCLUSION

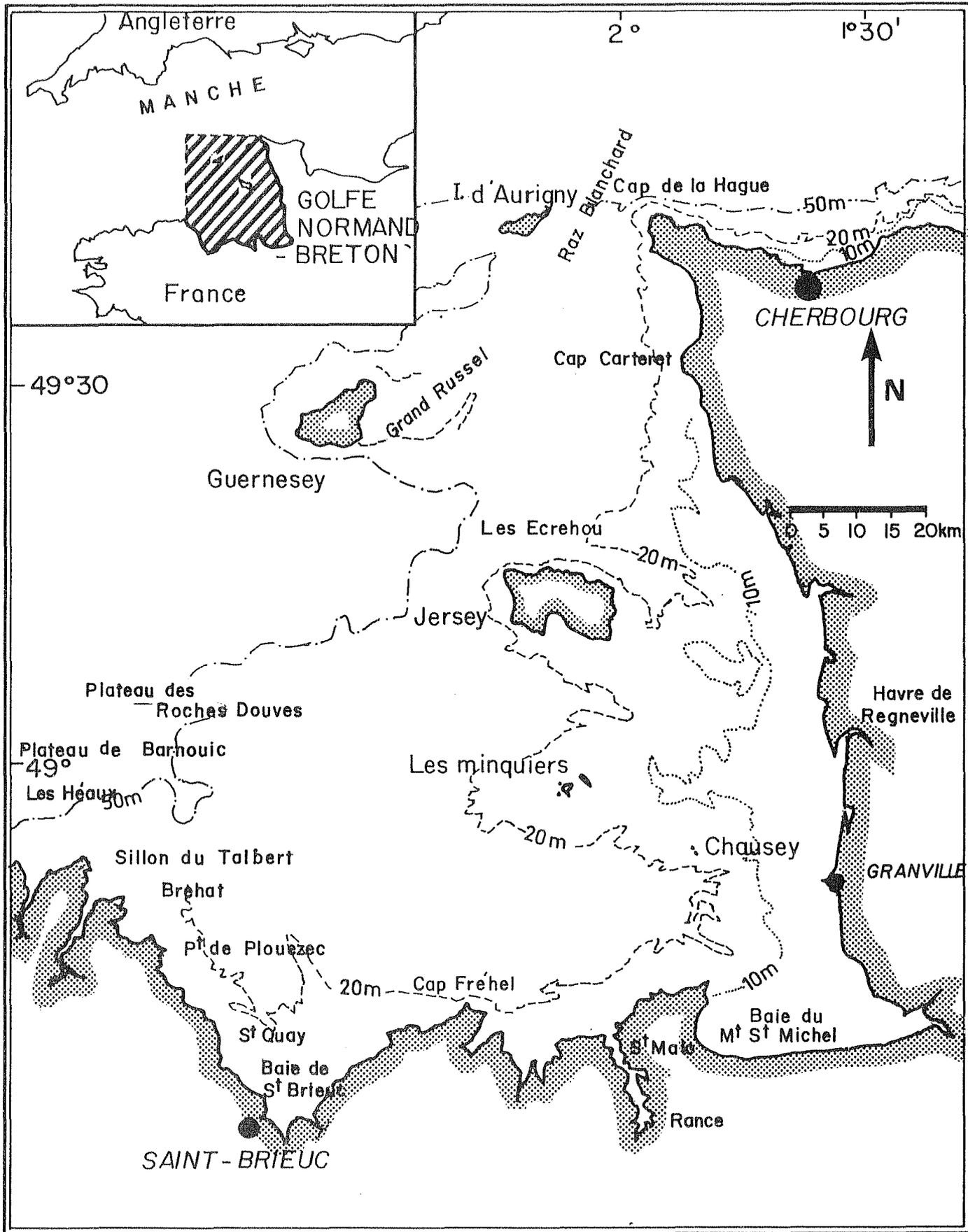


FIGURE 1

I-1 PRESENTATION MORPHOLOGIQUE DE LA ZONE (Figure 1)

I-1-1 INTRODUCTION

Le premier but de ce paragraphe est de donner une image succincte de la morphologie de cette zone, afin de bien situer, ultérieurement, les zones où influent un cap ou un haut fond sur la circulation.

Le deuxième but est de mettre en évidence l'apport d'un modèle régional pour l'étude de la circulation dans une zone aussi tourmentée que le Golfe Normand-Breton.

Cette description morphologique est largement inspirée des travaux des spécialistes reproduits dans le "livre blanc" sur le G.N.B. (CNEXO, juin 1982).

I-1-2 LE LITTORAL

Le Golfe Normand-Breton est limité par Bréhat à l'Ouest et le Cap de la Hague au Nord.

Le littoral de ce Golfe, long de 450 km, est bien connu pour ses caps élevés, ses estrans découvrants à perte de vue, ses polders, ses cordons dunaires et ses havres.

a) Du Cap de la Hague au Cap de Carteret :

Cette partie de Littoral, long de 80 km, se présente en une succession de caps et d'anses sableuses bordées de massifs dunaires.

b) Du Cap de Carteret à la Pointe de Champeaux :

De Carteret à 10 km au sud de Granville, cette côte sableuse se distingue par la présence de nombreux "havres"...

"Ces havres sont des "marais maritimes" caractérisés par la présence d'une slikke dénudée submergée par toutes les mers de vive eau : leur rôle d'estuaires est généralement limité et la majeure partie de l'eau qui passe dans le chenal est celle du remplissage et de la vidange

par la marée" (in BCEOM : Etudes des effets économiques de la mer contre le littoral, Vol. 2).

c) Baie du Mont Saint-Michel

A partir de Cancale jusqu'à la pointe de Champeaux, s'ouvre cette baie, en voie de comblement.

Cet estran, plat et vaste, est parcouru de chenaux divaguants, alimentés notamment par les rivières Sée et Sélune.

d) De Cancale aux Heaux de Bréhat :

Le littoral se déroule en une succession de :

- baies étroites, comme celles de l'Arguenon, ou de la Fresnay ;
- falaises ;
- le large estran de la baie de Saint-Brieuc ;
- le sillon de Talbert qui protège l'extrémité Ouest de ce littoral en faisant face à la houle de N.W.

I-1-3 LES HAUTS FONDS

Les hauts fonds, très nombreux, jouent un rôle très important dans le Golfe Normand-Breton.

- D'abord, leurs actions sont considérables sur la propagation de la houle venant du large ;
- Conditionnent la circulation.

Ces hauts fonds sont regroupés en deux ensembles :

- suivant l'isobathe 20 mètres, on trouve les plateaux des Minquiers, Chausey, Ecrehou et Jersey.
- suivant l'isobathe 50 mètres, on trouve également les îlots des Roches-Douvres, Barnouic, Guernesey, Sercq, Casquets et Aurigny.

B - BILAN DES CONNAISSANCES

I-2-1 INTRODUCTION

Du fait de sa particularité géographique, le Golfe Normand-Breton a fait l'objet de travaux, tant du côté français qu'anglais.

De plus, les divers projets d'usines marémotrices, celui de Chausey en particulier, ont suscité de nombreuses mesures et la mise en oeuvre de modèles réduits physiques de grande envergure.

a) Modèle physique

Outre les modèles de détails réalisés pour des études d'aménagements côtiers, on compte 3 modèles physiques englobant le Golfe Normand-Breton :

- Un modèle de la Manche au 1/50 000 en plan construit par le L.N.H. en 1954 ;
- Un modèle du Golfe Normand-Breton au 1/2 500 000 en plan réalisé également par le L.N.H. à partir de 1957 ;
- Un modèle identique au premier posé sur la plaque tournante de l'I.M.G.

b) Mesures

Dans le cadre des études menées de 1953 à 1959 en vue de la construction de l'usine marémotrice des Iles Chausey, plusieurs campagnes de mesures ont eu lieu.

Nous citons ici :

- Les campagnes de mesures de courant réalisées par E.D.F. en 1957 - 1958 - 1959.
- D'autres mesures en mer (réalisées par E.D.F. et le S.H.O.M.) groupées essentiellement en deux campagnes, l'une en 1953-1954, l'autre en 1957-1959. Ces campagnes ont permis l'étude des variations du niveau marin dans cette zone grâce à des marégraphes autonomes.

Signalons également les mesures effectuées par SAGER en 1969.

c) Modèles numériques bidimensionnels

On compte actuellement plusieurs modèles de la Manche englobant le Golfe Normand-Breton :

- Modèle, réalisé par PINGREE et al., (1977), d'une maille de 5 milles nautiques (1 mille nautique = 1 852 m).
- Modèle réalisé par LOMER (1978), d'une maille de 7.1 km.
- Celui réalisé par FORNORINO et LE PROVOST (1982) d'une maille de 10 km.
- Plus récemment, PINGREE (1985c), a réalisé un modèle, dont la dimension de la maille est de 5 km.

Toutefois, il faut signaler que les deux modèles réalisés par PINGREE ont été exploités uniquement pour une onde M_2 et son harmonique M_4 .

Dans le but d'étudier avec précision les courants de marée au voisinage du site "Cotentin centre" envisagé par la construction d'une centrale marémotrice, le L.N.H. a développé un modèle 2D dont la maille est très fine le long de la côte du Cotentin et aux abords des îles Chausey (PECHON et al., 1986).

1-2-2 APPORTS D'EAU DOUCE

Les apports d'eau douce par les rivières qui se déversent dans les Golfe Normand-Breton, sont relativement peu élevés.

A titre indicatif, on peut citer les débits moyens annuels de la Sée : $8 \text{ m}^3/\text{s}$, de la Sélune : 15 à $20 \text{ m}^3/\text{s}$ et du Couesnon : $11 \text{ m}^3/\text{s}$ (d'après LOARER, Communication personnelle).

1-2-3 MARNAGE

L'étude de toutes les composantes significatives du spectre de la marée dans la Manche a été réalisée sur le modèle physique tournant de l'I.M.G.. Ces composantes ont été obtenues en faisant l'hypothèse de l'onde dominante (LE PROVOST, 1974) : dans le spectre de la marée, il existe une onde d'amplitude nettement supérieure (c'est le cas de l'onde M_2 dans la Manche) et, par conséquent, la propagation de cette onde n'est pas influencée par la présence des autres ondes du spectre.

Inversement, pour les ondes secondaires (par exemple : N_2' , S_2' , etc.) leur étude ne peut se faire qu'en les superposant à l'onde dominante.

Cette approche a permis d'établir un Atlas de 26 composantes significatives du spectre de la marée (CHABERT D'HIERES et LE PROVOST, 1979) et donc de prédire la dénivellation de la marée en un point quelconque de la Manche.

Ces 26 composantes sont répertoriées dans le tableau (1).

L'analyse du spectre de la marée dans la Manche a été faite également sur modèles numériques (ceux de PINGREE et FORNERINO). Si la distribution de l'onde M_2 dans la Manche est globalement bien reproduite, les autres ondes semi-diurnes, et notamment S_2 , (la deuxième onde par ordre d'importance après M_2 dans la Manche) sont très amorties surtout en Manche Est et dans le G.N.B.

D'après PINGREE et al (1981) cet amortissement est dû probablement à l'utilisation d'une loi quadratique pour le frottement.

En ce qui concerne la génération d'ondes non linéaires par chaque terme des équations de Navier-Stokes, LE PROVOST (1974) a effectué un calcul analytique dont les résultats sont répertoriés dans le tableau 2.

Ainsi l'onde M_4 (harmonique de l'onde M_2) est engendrée par la non linéarité de M_2 due aux termes d'advection et aux termes de divergence dans l'équation de la continuité.

Par contre, l'onde M_6 est engendrée par les termes de frottement au fond.

L'auteur signale que des ondes secondaires contribuent à la génération de cette onde.

PINGREE et MADDOK (1978a) ont étudié la génération de l'onde M_4 mais à l'aide d'un modèle numérique de la Manche (maille = 5 milles nautiques) en utilisant les dénivellations dues à l'onde M_2 comme conditions aux limites ouvertes. Les résultats obtenus par ces auteurs (Figures 2 A et B) montrent que :

- l'effet de frottement au fond est très faible ;
- l'effet du terme de divergence (dans l'équation de la continuité) est important ;

	ONDE	VITESSE ANGULAIRE (degré / heure)
DIURNE	O_1	13.943 0356
	P_1	14.958 931
	Q_1	15.041 0686
SEMI-DIURNE ASTRONOMIQUE	$2N_2$	27.895 354 8
	μ_2	27.968 208 4
	N_2	28.439 729 5
	ν_2	28.512 583 1
	M_2	28.984 104 2
	L_2	29.528 478 9
	T_2	29.958 933 3
	S_2	30.000 000 0
	K_2	30.082 137 3
SEMI-DIURNE NON LUNAIRE	MNS_2	27.423 833 7
	$2MK_2$	27.886 071 2
	$2MS_2$	27.968 208 4
	$3MSN_2$	28.512 583 1
	SNM_2	29.455 625 3
	$2MN_2$	29.528 478 9
	MSN_2	30.544 374 7
	$2SM_2$	31.015 895 8
QUART-DIURNE	MN_4	57.423 833 7
	M_4	57.968 208 4
	MS_4	58.984 104 2
SIXIEME DIURNE	$2MN_6$	86.407 938 0
	M_6	86.952 312 7
	$2MS_6$	87.968 208 4

TABLEAU 1

Origin	Shallow waters advection	Friction
$A_{M_2}^2$	* Mean sea level * $M_4 (2\omega_2)$	* $M_6 (3\omega_1)$ * $M_{10} (5\omega_1)$ *
$A_{M_2} A_{S_2}$	* $MS_0 (\omega_2 - \omega_1)$ mixed with MS_f * $MS_4 (\omega_2 + \omega_1)$	* $2 MS_2 (2\omega_1 - \omega_2)$ mixed with M_2 * $2 MS_6 (2\omega_1 + \omega_2)$ * $4 MS_6 (4\omega_1 - \omega_2)$ *
$A_{M_2} A_{N_2}$	* $MN_0 (\omega_3 - \omega_1)$ mixed with M_m * $MN_4 (\omega_1 + \omega_3)$	* $2 MN_2 (2\omega_1 - \omega_3)$ mixed with L_2 * $2 MN_6 (2\omega_1 + \omega_3)$ *
$A_{M_2} A_{K_2}$	* $MK_0 (\omega_4 - \omega_1)$ * $MK_4 (\omega_4 + \omega_1)$	* $2 MK_2 (2\omega_1 - \omega_4)$ mixed with $2 N_2$ * $2 NK_6 (2\omega_1 + \omega_4)$ *
⋮	⋮	⋮
$A_{S_2}^2$	* Mean sea level * $S_4 (2\omega_2)$	* complementary contribution to $M_6 (3\omega_1), M_{10} (5\omega_1), \dots$ * $2 SM_2, 2 SM_6 (2\omega_2 \pm \omega_1)$ * $3 M_2 S_2 (3\omega_1 - 2\omega_2)$ *
$A_{N_2}^2$	* Mean sea level * $N_4 (2\omega_3)$	* complementary contribution to $M_6 (3\omega_1), M_{10} (5\omega_1), \dots$ * $2 NM_2, 2 NM_6 (2\omega_2 \pm \omega_1)$ *
⋮	⋮	⋮
$A_{S_2} A_{N_2}$	* $SN_0 (\omega_2 - \omega_3)$ mixed with MS_{tm} * $SN_4 (\omega_2 + \omega_3)$	* $MSN_2 (\omega_1 + \omega_2 - \omega_3)$ * $MNS_2 (\omega_1 - \omega_2 + \omega_3)$ * $MSN_6 (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$
$A_{S_2} A_{K_2}$	* $SK_0 (\omega_2 - \omega_4)$ * $SK_4 (\omega_2 + \omega_4)$	* $MSK_2 (\omega_1 + \omega_2 - \omega_4)$ * $MKS_2 (\omega_1 - \omega_2 + \omega_4)$ * $MSK_6 (\omega_1 + \omega_2 + \omega_4)$ *
.....

TABLEAU 2 : Origine des diverses composantes Non-Linéaires du spectre de la marée.

(D'après LE PROVOST, 1974)

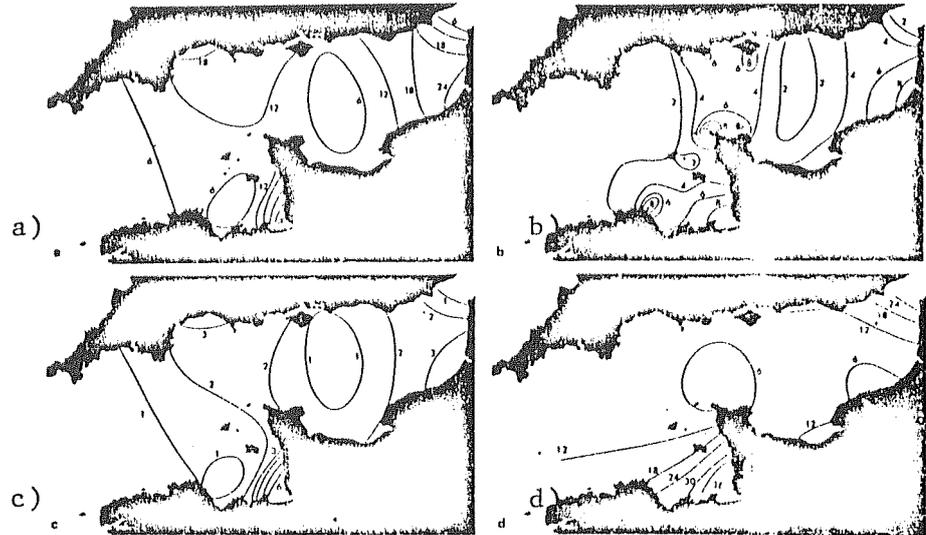


Figure 2 A. (a) Amplitude (cm) de M_4 générée par $\nabla \cdot EU$.
 (b) Amplitude (cm) de M_4 générée par $U \cdot \nabla U$
 (c) Amplitude (cm) de M_4 générée par le frottement $\frac{C}{H+E} U|U|$
 (d) Amplitude (cm) de M_4 due à l'introduction M_4 aux limites
 d'après PINGREE et MADDOCK (1978 a)

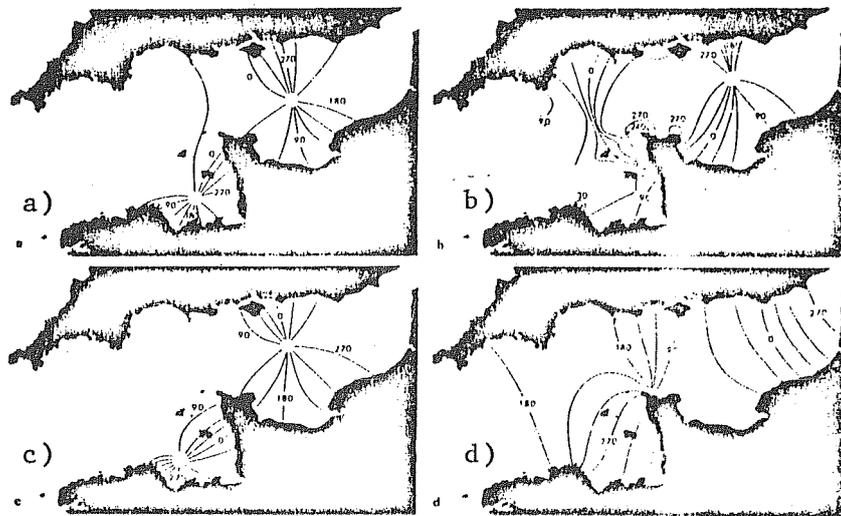


Figure 2 B. les phases correspondent aux amplitudes de la fig. 2 A
 d'après PINGREE et MADDOCK (1978 a)

- les effets des termes d'advection ont une importance locale surtout aux endroits où le courant est très intense (Raz Blanchard, Bréhat, etc...).

Dans le cas où on ne tient pas compte des termes d'advection, les lignes iso-phase (Figure 2 BC) montrent l'existence d'un point amphidromique (l'amplitude est toujours nulle) au Nord de Saint-Brieuc.

La distribution de M_4 dans la Manche en tenant compte de tous les termes non linéaires montre :

- Une propagation apparente de l'onde M_4 (dans le Golfe Normand-breton) autour d'un point situé à l'Ouest de Guernesey (Figure 3).

Cette propagation s'effectue au Nord de ce point dans le sens Est-Ouest et dans le sens contraire au Sud.

- L'existence d'un point amphidromique à l'Ouest de Guernesey. La figure (3) présente également une comparaison entre les résultats de différents modèles de la Manche (modèle physique tournant de l'I.M.G., modèles mathématiques).

Dans l'ensemble de la Manche, nous observons une bonne concordance entre les trois modèles.

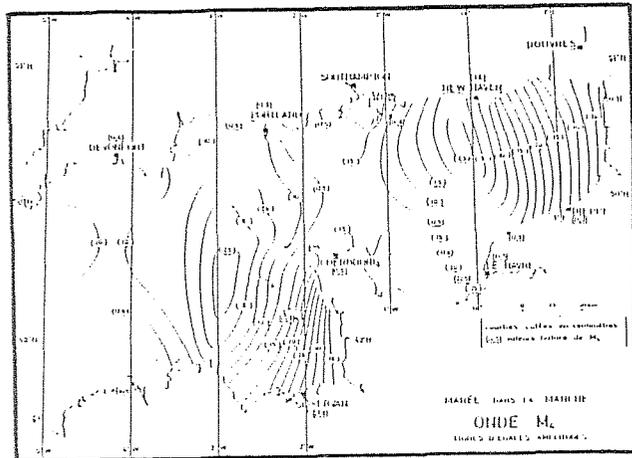
Par contre, dans le Golfe Normand-Breton, nous remarquons :

- Le modèle de PINGREE et MADDOK donne des amplitudes élevées par rapport aux autres modèles (45 cm au fond du Golfe)
- Le modèle de FORNERINO et LE PROVOST donne un point amphidromique décalé à l'Ouest par rapport aux autres modèles.

Ces différences s'expliquent par la dimension de la maille (des modèles mathématiques) élevée par rapport aux variations topographiques de cette zone (Cf. au 1er paragraphe).

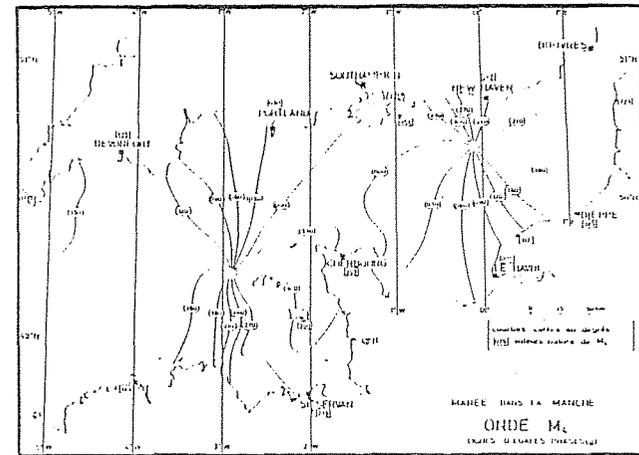
Compte tenu des processus non linéaires qui contrôlent la circulation résiduelle, un modèle numérique qui reproduit bien l'onde M_4 (vu l'importance des termes non linéaires dans la génération de cette dernière) a plus de chance de donner une approche correcte de la circulation résiduelle.

La propagation de la marée réelle dans le Golfe Normand-Breton a été étudiée par BONNEFILLE (1976) à l'aide des résultats de marégraphes posés en plusieurs endroits du Golfe (Figure 4).



MODELE PHYSIQUE DE LA MANCHE

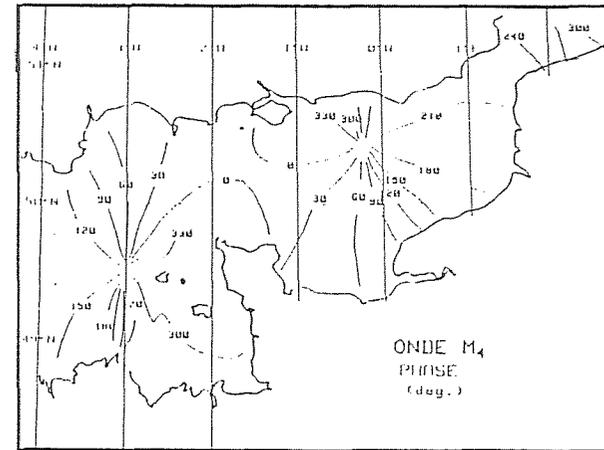
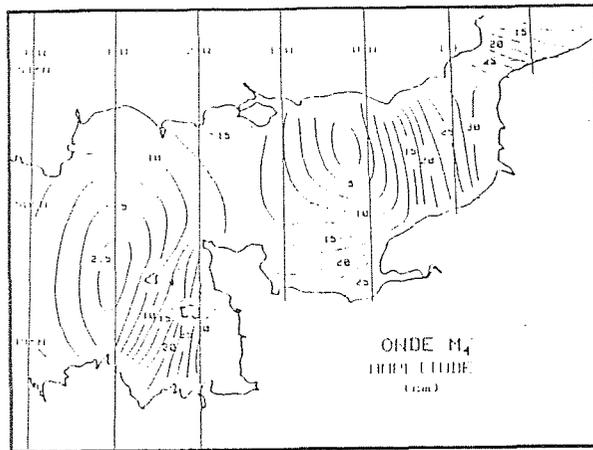
d'après
CHABERT D'HIERES et LE PROVOST
1978



MODELE NUMERIQUE DE MAILLE

de 10 Km

d'après FORNERINO
1982



MODELE NUMERIQUE DE MAILLE
DE 5 MILLES NAUTIQUES

d'après PINGREE et MADDOCK
1978

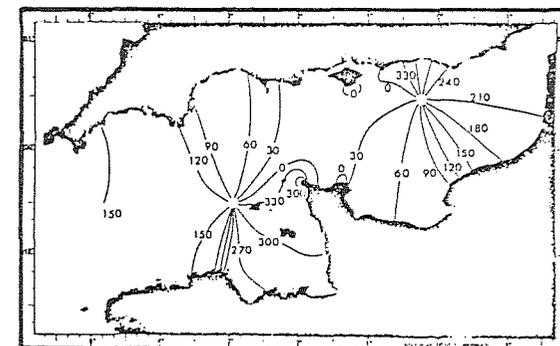
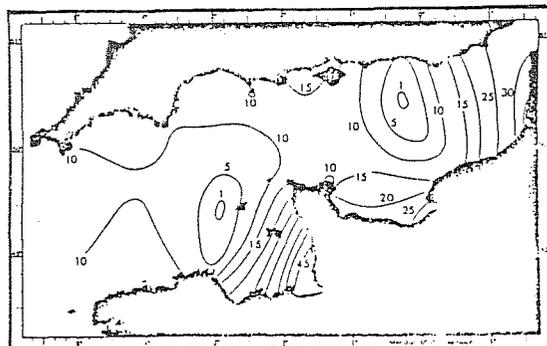


FIG. 3

Ces études nous ont permis de dégager quelques éléments sur la propagation de la marée :

- La quasi-simultanéité des pleines mer de Bréhat et de Granville est entraînée par la présence d'une onde stationnaire résultant de la réflexion de l'onde de marée sur le Cotentin.

- La dissymétrie de la propagation de la marée entre un secteur Nord de Jersey où la marée se propage lentement du Sud Ouest vers le Nord et un secteur Sud où la marée est presque en phase (il y a un déphasage de 15 mn entre la Pleine Mer à St MALO et la Pleine Mer à St HELIER).

En ce qui concerne la variation du niveau marin, nous observons (Figure 4) la diminution de l'amplitude de la marée au large de la Hague par rapport au reste du Golfe Normand-Breton.

Cette diminution est due au rôle joué par les termes advectifs autour de la péninsule du Cotentin en présence d'un courant très fort.

PINGREE et MADDOK (1978a), posent,

$$E_{M4} = E_{OM4} \cos(2\sigma t - g_{M4})$$

E_{M4} : dénivellation du niveau marin due à l'onde M_4

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \text{ où } T \text{ est la période de l'onde } M_2$$

g_{M4} = phase de l'onde M_4

E_{OM4} = amplitude de l'onde M_4

et constatent d'autre part que le courant, au voisinage du Cap de la Hague est maximum 4 heures avant la Pleine Mer à DOUVRES (g_{m2} est égale à 330° par rapport au passage de la lune au méridien de GREENWICH). A partir de ces résultats la phase du courant au niveau de LA HAGUE est environ 210° . D'où

$$\sigma t = 210^\circ$$

$$-1 = \cos(420^\circ - g_{M4})$$

$$\text{donc } 180^\circ = 420^\circ - g_{M4}$$

i.e $g_{M4} = 240^\circ$ ce qui est observé dans la figure (2 Bb).

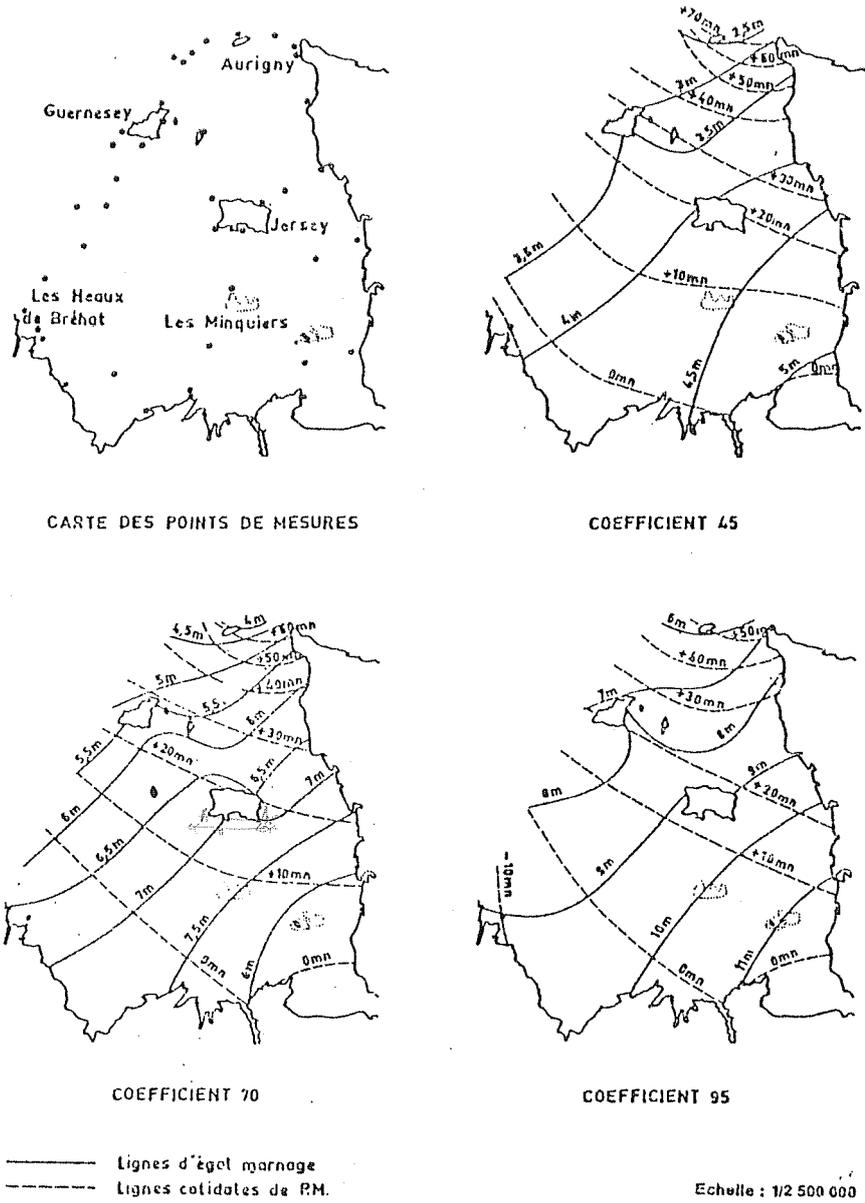


FIGURE 4
 MESURES DE MAREE DANS LE GOLFE NORMAND-BRETON
 (d'après les campagnes S.E.U.M. de 1957 à 1959)

I-2-4 COURANT DE MAREE

La circulation globale d'une zone est considérée généralement comme la somme de deux circulations :

- une circulation à courte échelle de temps due essentiellement à la marée et au vent
- une circulation résiduelle (longue échelle de temps) qui est le "résidu" résultant des effets de la marée, du vent, des gradients de densité et de leurs interactions.

Si à l'échelle régionale les courants de marée sont très bien connus grâce aux divers modèles et aux nombreuses mesures cités avant, l'effet du vent sur la circulation a été très peu appréhendé. Nous signalons qu'une étude récente intégrant les effets météorologiques a été entreprise par LE HIR (1986). (Cf. paragraphe I-2-6)

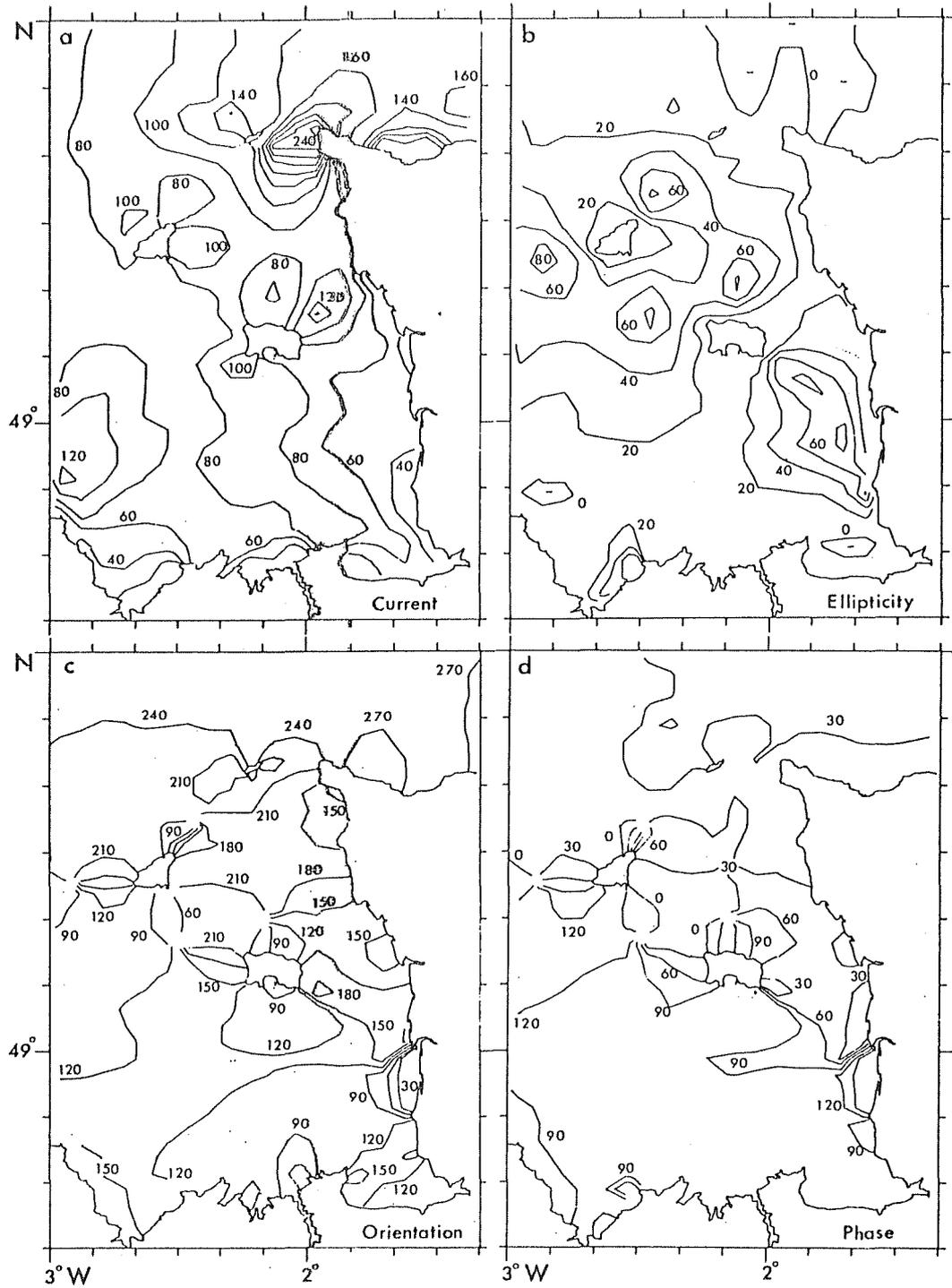
Les premières cartes de courants instantanés pour 3 coefficients de la marée (95 - 70 - 45) ont été établies par le L.N.H. grâce aux campagnes de mesures d'E.D.F. en 1957 - 1958 - 1959.

Les cartes (une carte sera reproduite dans le chapitre 3) montrent l'intensité du courant dans le golfe Normand-Breton où elle peut atteindre, pour une marée de vive eau moyenne :

- 4,2 m/s dans le Raz Blanchard
- 2,2 m/s entre Sercq et Herm
- 2 m/s à Bréhat
- 2,5 m/s à la pointe Nord-Est de Jersey
- 2 m/s au voisinage des Minquiers

Les résultats des modèles numériques de la Manche, pour une marée moyenne (onde M_2), font apparaître, dans le G.N.B., l'existence de plusieurs points de convergence des lignes isovaleurs de phase et de directions du courant maximum. Ces points correspondent à des zones où la rose de courant est pratiquement circulaire. Ces points se situent (Figure 5) :

- à l'Ouest de Guernesey,
- au Sud de Guernesey et à l'Ouest de Jersey,
- au Nord de Guernesey,
- au milieu de la zone située entre Regneville et Jersey.



The M_2 tidal ellipse properties: (a) semi-major axis (cm s^{-1}); (b) ratio (%) of minor to major axis of the ellipse (+ clockwise, - anticlockwise); (c) orientation of the major axis ($^\circ$); (d) the phase of the tidal current (g°).

D'après PINGREE ET AL, 1985c

FIGURE N° 5

Par contre les mesures de SAGER (1968) indiquent l'existence d'une seule zone située au Nord-Est de Guernesey.

Nous constatons que, malgré la différence des dimensions de la maille des deux modèles (5 km et 10 km), la majorité des zones où convergent les lignes isovaleurs de phase sont situées à proximité des îles Anglo-Normandes.

En ce qui concerne les maxima des courants d'une marée moyenne, le modèle de FORNERINO donne des valeurs relativement faibles par rapport aux mesures et aux résultats de PINGREE. Néanmoins les deux modèles indiquent des courants très intenses dans le Raz-Blanchard et au niveau des Roches Douvres.

De plus, le modèle de FORNERINO a été utilisé pour dresser une collection de cartes de constantes harmoniques des courants de marée, ce qui permet de prédire le courant dans n'importe quel point de la Manche et pour des périodes quelconques.

La figure 6 montre le champ de courant, simulé par le modèle régional 2D du L.N.H., pour une marée de vive eau moyenne.

I-2-5 FRONT THERMIQUE

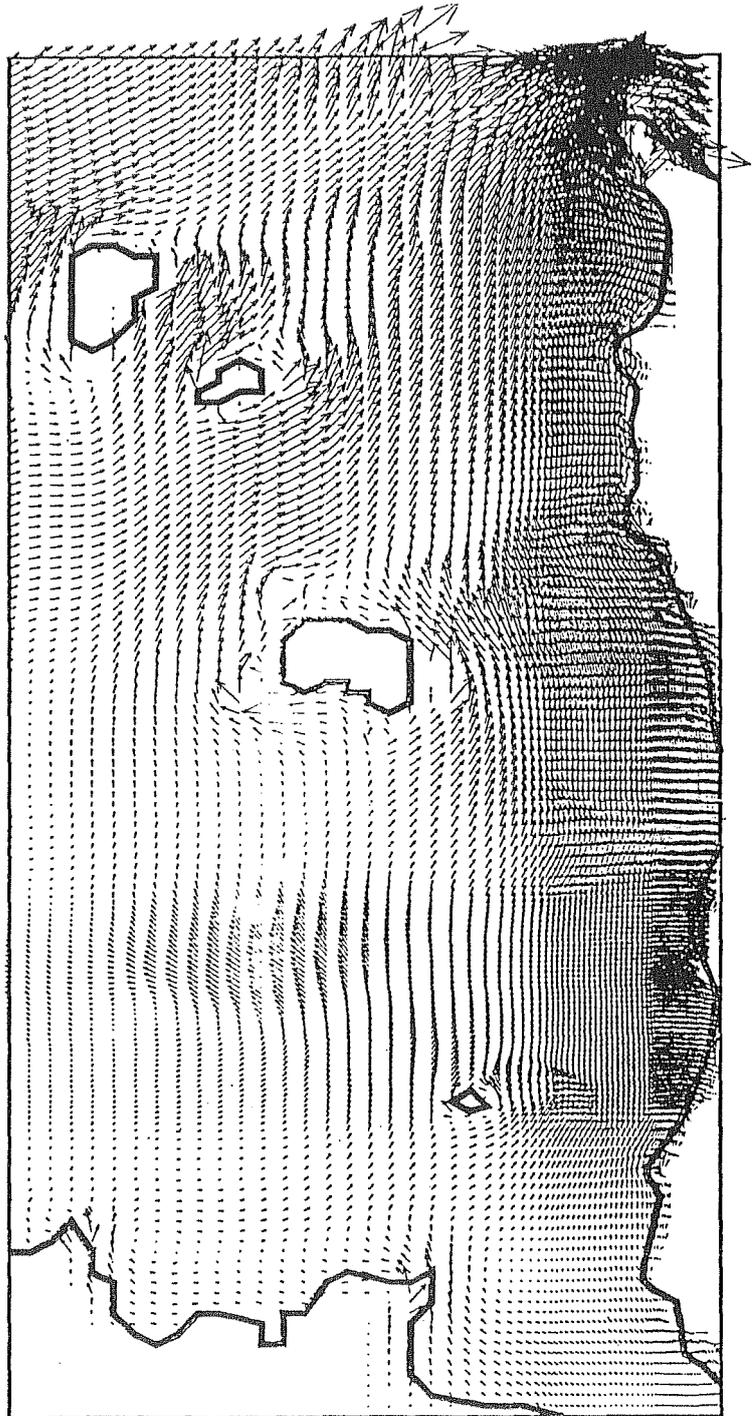
Comme nous venons de voir dans le paragraphe précédent, le Golfe Normand-Breton se caractérise par un courant très intense.

Le calcul effectué par PINGREE en utilisant comme critère de formation d'un front thermique une valeur critique de $S = \text{Log}_{10} \frac{H}{U^3}$ ($^{\circ}$) comprise entre 1.5 et 2, montre que dans le Golfe Normand-Breton, le courant de marée est capable d'homogénéiser la colonne d'eau.

Le paramètre S représente la fraction de l'énergie cinétique turbulente, fournie par le frottement du courant de marée sur le fond, utilisée pour augmenter l'énergie potentielle de la colonne d'eau. Signalons que ce paramètre a été obtenu en négligeant les effets d'advection.

($^{\circ}$) : H : Hauteur de la colonne d'eau

U : Vitesse moyenne sur la verticale du courant pour une marée de vive eau



2 m/s
→
0 8 km

Pleine mer a SAINT MALO
OUEST COTENTIN



DER

LNH

Figure 6

En fait, la plupart des photos satellites prises dans cette zone ainsi que les observations in-situ entreprises par divers auteurs et, notamment par PINGREE et al., (1974) montrent l'existence d'un front thermique entre Jersey et Guernesey.

La description ci-dessous, de ce front, est tirée essentiellement des travaux de PINGREE et al., (1974, 1985c).

La figure (7) montre les déplacements du front au cours de la marée.

Sa position est facilement identifiable par tous les déchets qui flottent à sa surface. La structure thermique de ce front dépend également du coefficient de marée. Une coupe de température à travers le front montre que ce dernier est bien marqué par une marée de vive-eau, mais moins étendu qu'en morte-eau (Figure 7).

La structure verticale de la température montre que :

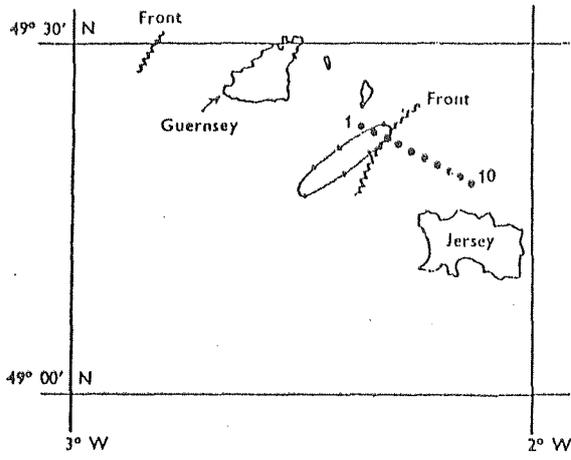
- du côté de Guernesey, la température est plutôt constante, ce qui caractérise un phénomène de mélange (Figure 8)
- du côté de Jersey, le profil de température présente un gradient entre la surface et le fond. On remarque également des petites structures instables en forme de dents de scie.

Le courant de densité au voisinage immédiat de ce front est dirigé vers ce dernier. Ce phénomène de convergence a été mis en évidence par PINGREE et al., (1974) grâce à 3 bouées placées respectivement sur le front et de part et d'autre de celui-ci.

Le développement de ce front est dû à la convergence de différentes masses d'eau de densités différentes.

Les masses d'eau moins dense qui convergent vers le front ont les caractéristiques de celles existant entre JERSEY et le COTENTIN où l'existence de nombreux hauts fonds provoquent une augmentation de la température (été).

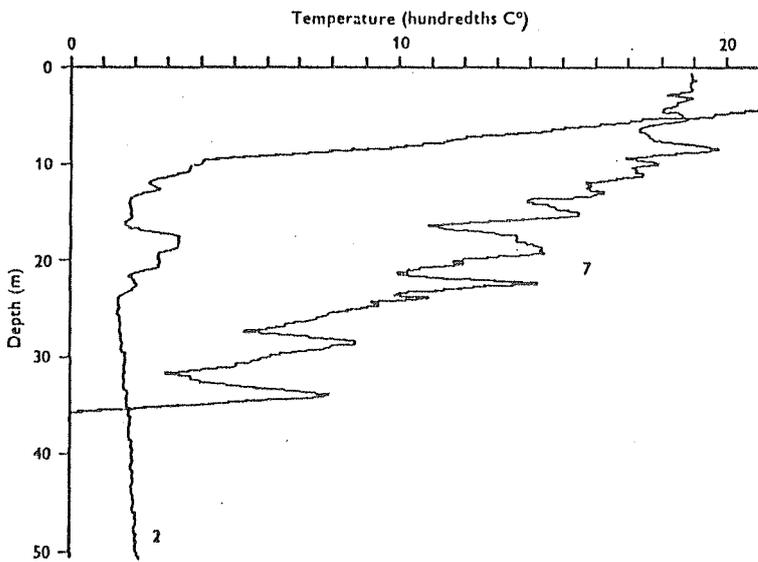
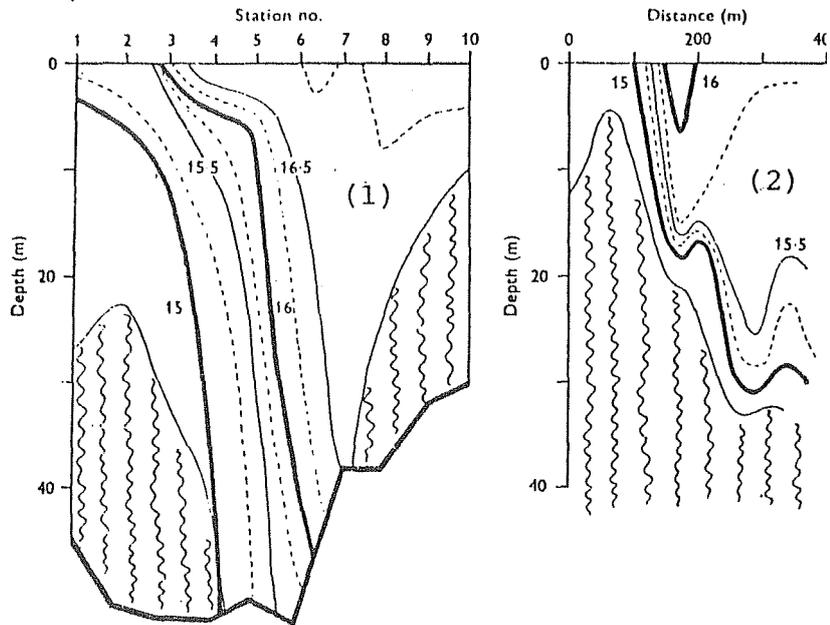
Par contre, les masses d'eau plus denses évoluent entre JERSEY et GUERNESEY. Ainsi les variations saisonnières provoquent cette différence de densité.



POSITION DU FRONT AU COURS DE LA MAREE

COUPE DE TEMPERATURE
A TRAVERS LE FRONT

- 1) le 24/7/73 (morte eau)
- 2) le 01/8/73 (vive eau)



PROFIL DE TEMPERATURES
AUX STATIONS 2 ET 7

d'après PINGREE et AL, 1974

FIGURE 7

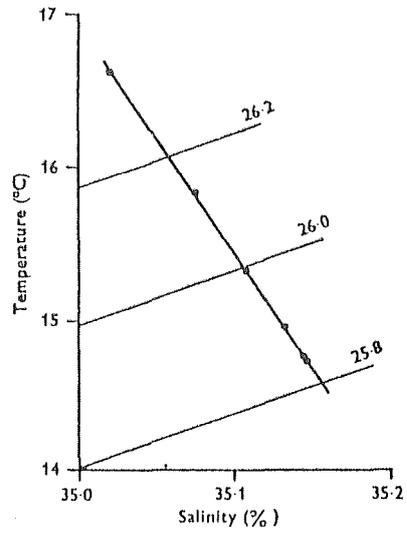
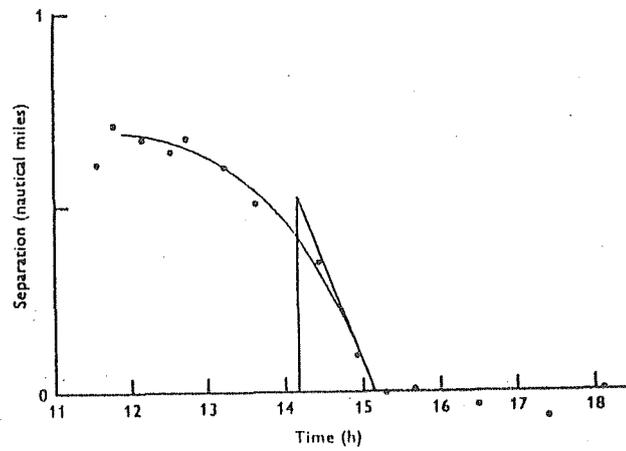


DIAGRAMME T - S



DIFFERENCE EN MILLES NAUTIQUES
ENTRE DEUX BOUEES PLACES DE CHAQUE COTE DU FRONT

d'après PINGREE et AL, 1974

I-2-6 CIRCULATION RESIDUELLE EULERIENNE

Nous allons, dans ce paragraphe, nous limiter à donner les schémas de circulations résiduelles obtenues jusqu'à présent à l'aide de différents modèles numériques de la Manche.

Une étude sur les mécanismes de génération de courants résiduels et surtout sur l'origine des structures tourbillonnaires observées sera développée dans le dernier chapitre.

En plus des deux modèles numériques de la Manche cités précédemment LOMER (1978) a établi à l'échelle de la Manche, un modèle de circulation résiduelle de marée.

La figure (9) présente les différents schémas de circulation résiduelle eulérienne de marée obtenus par les 3 modèles numériques.

Dans le G.N.B., nous constatons que globalement les trois schémas proposés par ces modèles sont différents. Les modèles de FORNERINO et de LOMER donnent une circulation résiduelle de marée dirigée vers la baie du Mont Saint Michel. Les résultats sont contradictoires avec l'ensablement de ce site. Par contre, les trois modèles donnent un tourbillon cyclonique au large du Cap de la Hague. Les tourbillons, calculés par le modèle de PINGREE, ont une dimension plus faible par rapport à ceux calculés par le modèle de FORNERINO.

Des travaux, concernant la circulation résiduelle due à des vents permanents, à l'échelle du plateau continental entourant la Grande Bretagne, ont été entrepris par PINGREE et al., (1980) à l'aide d'un modèle 2D de maille 5' en latitude et 10' en longitude. Pour avoir la résiduelle due au vent, ces auteurs intègrent les résultats sur un cycle de marée et retranchent la résiduelle de marée. Les résultats obtenus dans le G.N.B. font état d'un courant résiduel de l'ordre de 5 cm/s pour des vents permanents Sud-Ouest et Sud-Est d'intensité de 10 m/s. Pour ces deux vents typiques, le G.N.B. se remplit par l'Ouest et se vide par le Nord, exception faite de la Baie de Saint Brieuc, qui se vide par l'Ouest dans le cas d'un vent SE. Pour un vent SE (10 m/s), le courant résiduel se limite essentiellement très près de la côte.

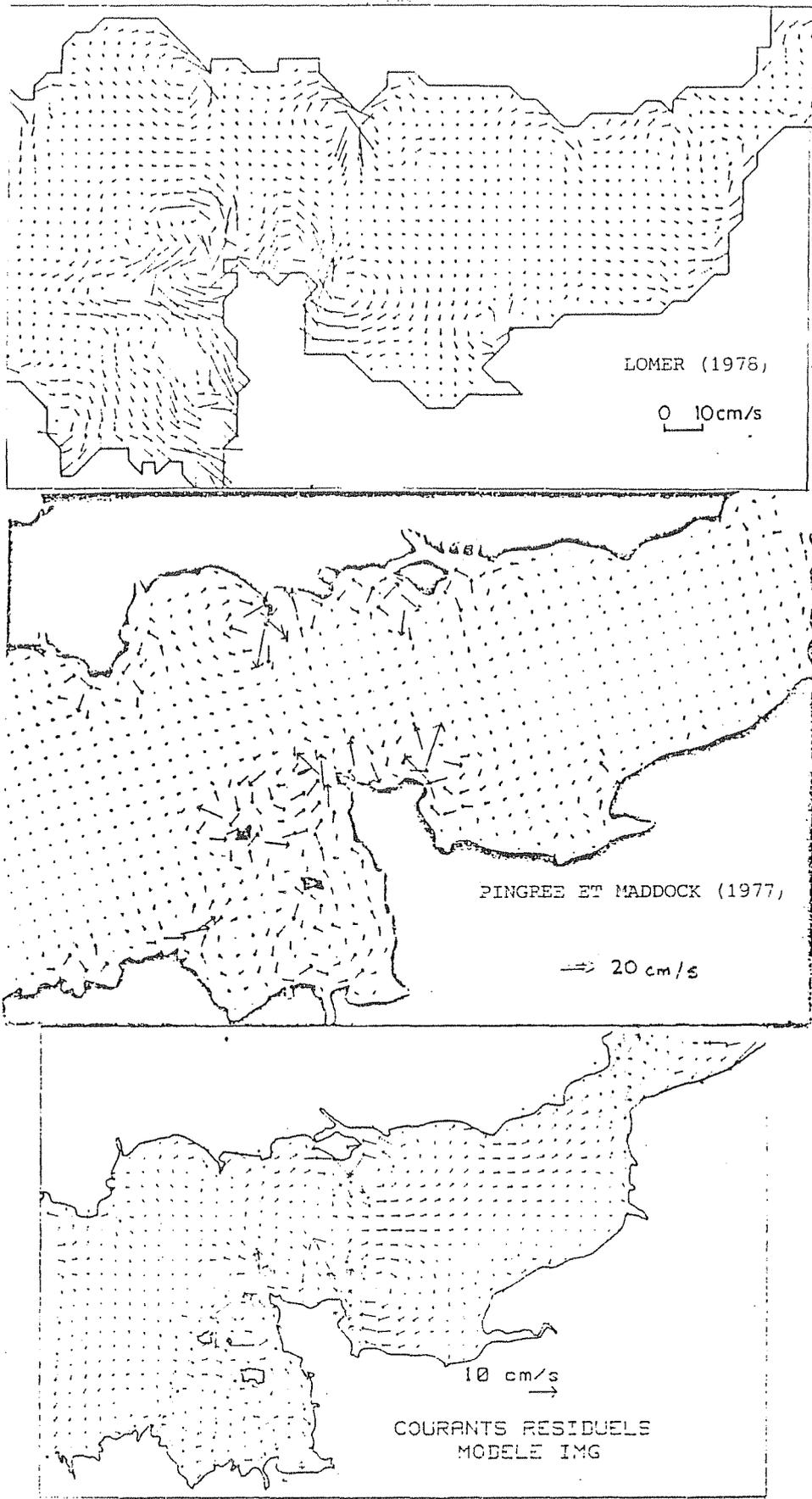


FIGURE 9

courants résiduels eulériens trouvés par
différents modèles numériques
(D'après FORNERINO - 1983)

La variation du niveau moyen engendrée par ces vents, est, dans le cas :

- d'un vent SE (10 m/s), nulle ;
- d'un vent SW (10 m/s), variable entre 5 cm (près de la côte) et 2,5 cm dans le reste du G.N.B.

Plus récemment et à l'échelle du G.N.B., LE HIR (1986) a effectué une simulation de 5 vents-types (Nord, Est, Sud, Ouest et Sud-Ouest) en tenant compte de l'interaction avec la marée.

La figure 10 montre simultanément les courants et les débits générés par un vent permanent d'Ouest de 15 m/s.

Dans le cas où l'auteur ne tient pas compte de l'interaction avec la marée, on constate que :

- il n'y a pas de transport global concernant l'ensemble du golfe, mais une série de circulations cellulaires ;

- le facteur dominant est la bathymétrie car là où les profondeurs sont faibles les courants sont importants et dans le sens du vent tandis que les débits sont faibles.

Dans le cas où on tient compte de l'interaction avec la marée, on constate l'amortissement spectaculaire induite par la marée (l'auteur a utilisé une marée de coefficient moyen).

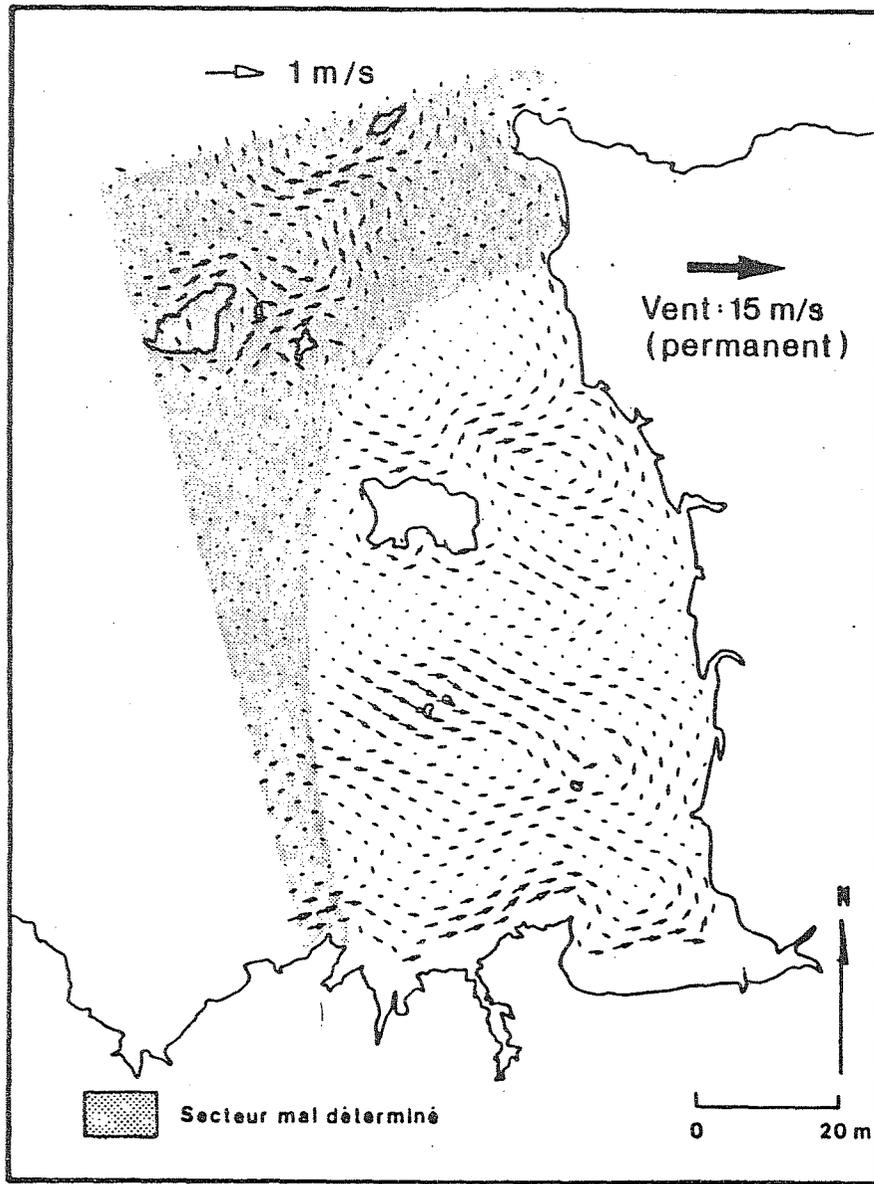
I-3 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons donné quelques éléments qui nous paraissent les plus importants, pour comprendre la dynamique de cette région.

Comme nous l'avons souligné avant, les nombreux travaux effectués avaient pour but une étude globale de la Manche ce qui justifie l'utilisation des mailles de dimensions très grandes par rapport aux variations topographiques de cette zone très accidentée.

SANS INTERACTION AVEC LA MAREE

COURANTS MOYENS



INTERACTION AVEC UNE MAREE MOYENNE

COURANTS MOYENS

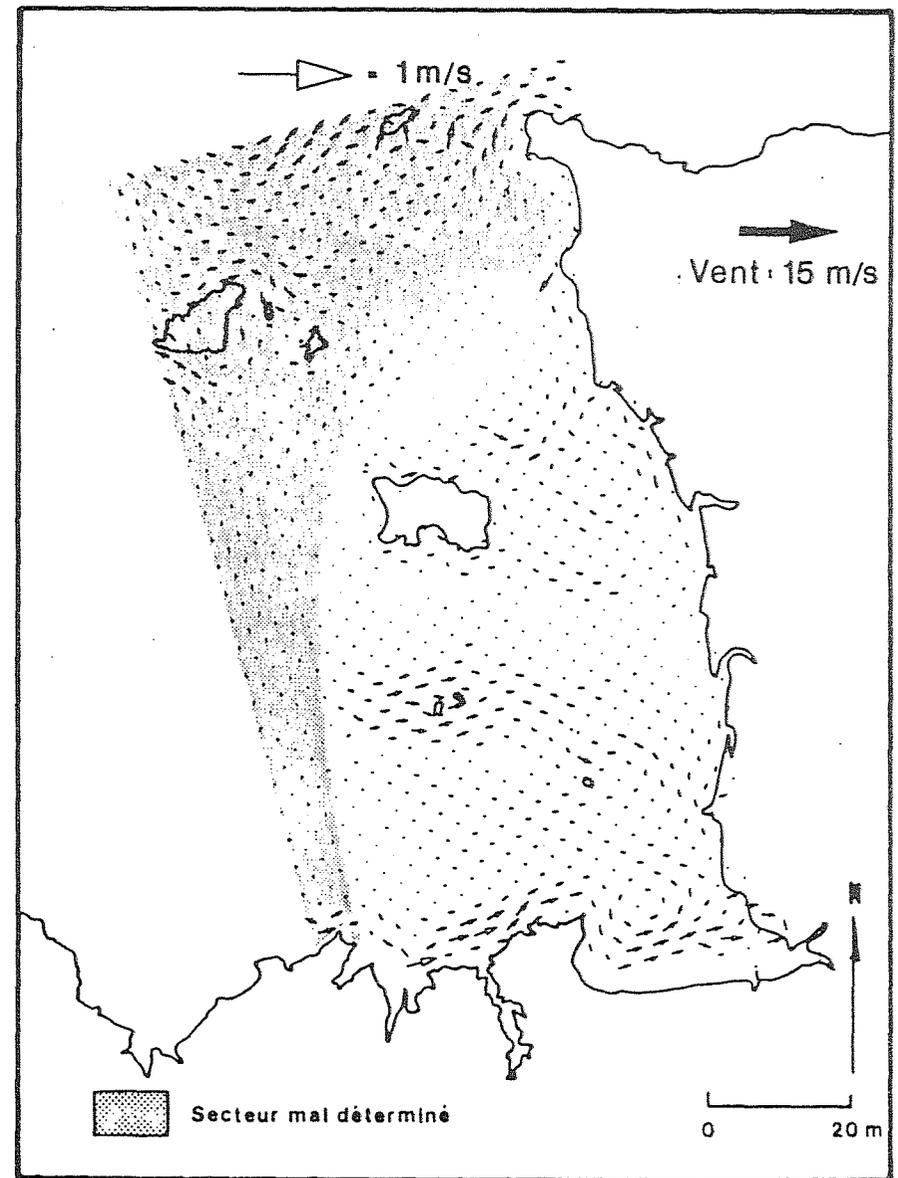


Figure 10 : D'après IFREMER 1986.

Par contre le modèle du L.N.H. a une dimension relativement fine par rapport aux variations topographiques mais ne couvre que les deux tiers de la superficie du G.N.B.

Dans la baie de Saint-Brieuc (partie non intégrée par ce modèle), la connaissance de la dynamique de marée est nécessaire pour comprendre certains phénomènes biologiques qui s'y produisent comme la marée verte (concentration des ulves dans certains endroits particuliers) et l'évolution du recrutement des coquilles Saint-Jacques.

Un autre endroit non représenté par ce modèle est Guernesey. L'effet de cet île sur la circulation peut être très intéressant à appréhender.

Ce modèle utilise également des conditions aux limites très proches des îles et du cap de la Hague, où il est difficile d'acquérir des données fiables.

Nous avons constaté que jusqu'à présent, tous les modèles de la Manche (exception faite des derniers travaux de PINGREE et al., (1985b) concernant les îles Anglo-Normandes, que nous allons reproduire au chapitre 4) ont été exploitée pour reproduire la circulation résiduelle eulérienne.

Or quand on s'intéresse au devenir des masses d'eau, c'est la circulation résiduelle lagrangienne qui est recherchée.

L'importance des gradients horizontaux de vitesse dans des zones comme le G.N.B. signifie que la dérive de Stokes n'est plus négligeable et, par conséquent, on peut s'attendre à trouver une circulation résiduelle lagrangienne différente de la circulation eulérienne.

Les études ainsi effectuées montrent la nécessité d'un modèle régional du Golfe Normand-Breton de maille très fine. Le fait que les modèles numériques (dont nous avons cité les résultats) simulent mal les ondes semi-diurnes (à part l'onde M_2), le choix d'une source de conditions aux limites à un modèle régional se porte naturellement sur le modèle physique de l'I.M.G..

CHAPITRE II

=====

PRESENTATION DES MESURES

ET DU MODELE NUMERIQUE

II-1 PRESENTATION DES MESURES

II-1-1 Introduction

II-1-2 Mesures

II-1-2-1 Mesures Eulériennes

II-1-2-2 Mesures Lagrangiennes

II-2 PRESENTATION DU MODELE NUMERIQUE

II-2-1 Schéma numérique

II-2-2 Dimension géographique - Maillages

II-2-3 Paramètres numériques

II-2-4 Condition initiale et aux limites

II-2-5 Niveau moyen

II-2-6 Validation

II-1 PRESENTATION DES MESURES

II-1-1 INTRODUCTION

Notre travail consistait essentiellement à adapter un modèle bi-dimensionnel (déjà existant au laboratoire) et à l'exploiter pour l'étude de la dynamique du Golfe Normand-Breton. Les résultats de notre travail d'exploitation des mesures effectuées en mer se limitent à :

- l'étalonnage du modèle et sa validation ;
- un apport d'informations sur certains phénomènes physiques comme la structure verticale du courant et les effets des gradients de densité sur la circulation ;
- la confrontation des mesures et résultats du modèle en courants résiduels.

II-1-2 MESURES

Une étude globale des processus physiques, sédimentologiques et biologiques du Golfe Normand-Breton a été entreprise depuis 1982 par l'I.F.R.E.M.E.R. en association avec plusieurs laboratoires.

Parmi les nombreux travaux effectués, nous avons participé, avec l'I.F.R.E.M.E.R., à l'organisation de 4 campagnes de mesures de longue durée. Lors de ces campagnes, nous avons procédé à :

- des mesures, au point fixe, de températures, pression au fond et de courants en surface et au fond (1983-1984).
- des lâchés de flotteurs munis de balises ARGOS (1984).

II-1-2-1 Mesures eulériennes (ou au point fixe - Figure 11)

A. CAMPAGNE DE MESURES

a) Campagne de mesures de 1982 (Eté)

C'était la première campagne de mesures réalisées et organisées par l'I.F.R.E.M.E.R. dans le Golfe Normand-Breton. Elle comportait 5 points de mesures situés sur les radiales JERSEY-FREHEL et JERSEY COTENTIN. 4 des 5 points comportaient des appareils de mesures en surface et au fond.

b) Campagne de mesures de 1983 (Eté)

Grâce à la collaboration entre notre laboratoire et l'I.F.R.E.M.E.R., cette campagne a été composée de 8 mouillages pendant 3 mois et s'est déroulée entre Juin et Septembre. 6 de ces mouillages (7 - 6 - 2 - 9 - 5 - 10) comportaient des mesures à 2 niveaux de courants et de températures (surface et au fond).

c) Campagne de mesure de 1984 (Eté)

Elle comprenait 3 points de mesures (également à 2 niveaux) et s'est déroulée entre Mars et Juillet. Ces mesures ont été dépouillées et tracées mais, par manque de temps, nous ne les avons pas incorporées dans notre travail.

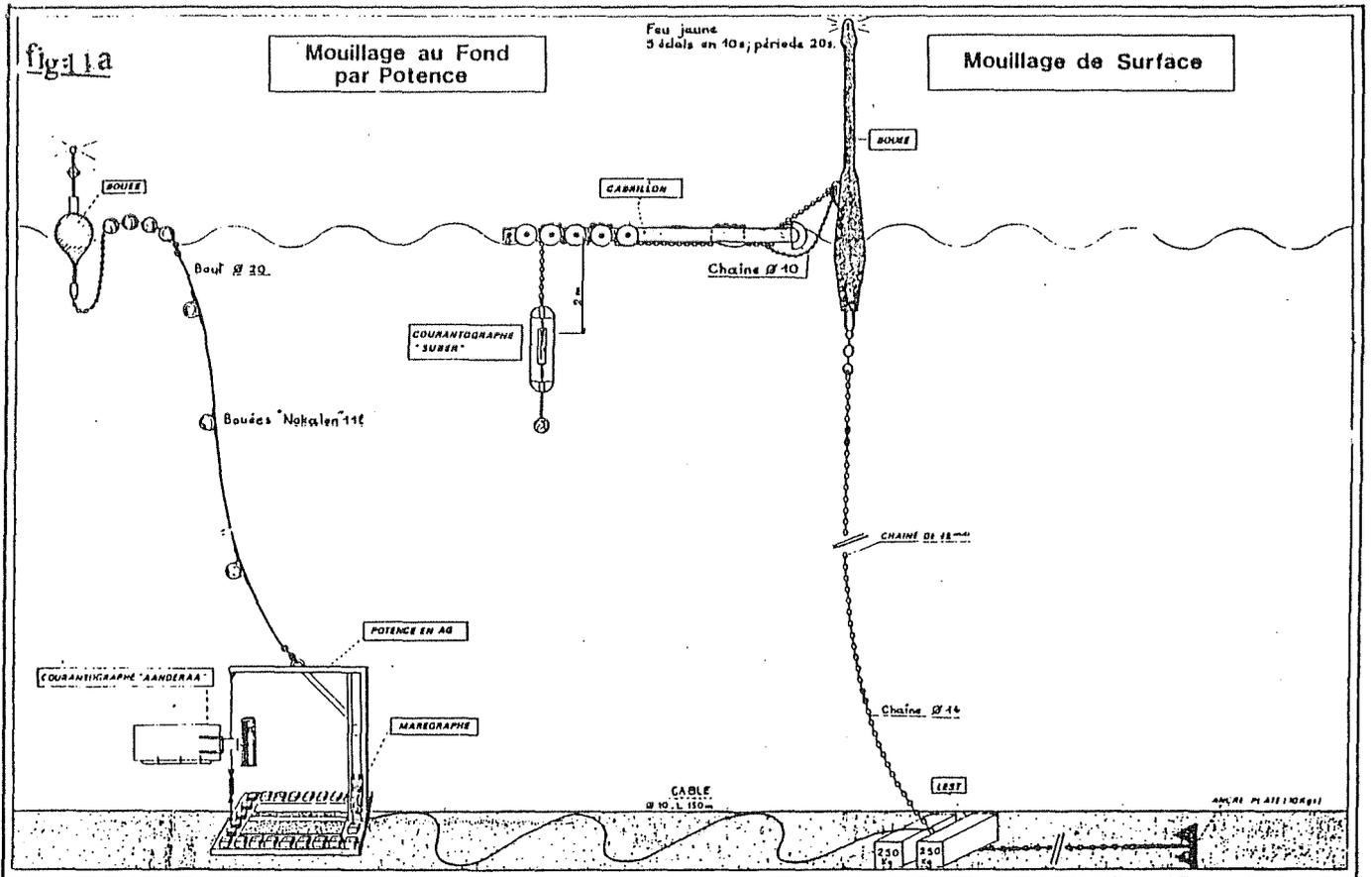
B. DESCRIPTION DES MOUILLAGES (Figures 11a et b)

Les appareils, posés au fond, (un courantographe Aanderaa et, éventuellement, un marégraphe) sont maintenus à une immersion constante (1.5 à 2 m) grâce à une potence.

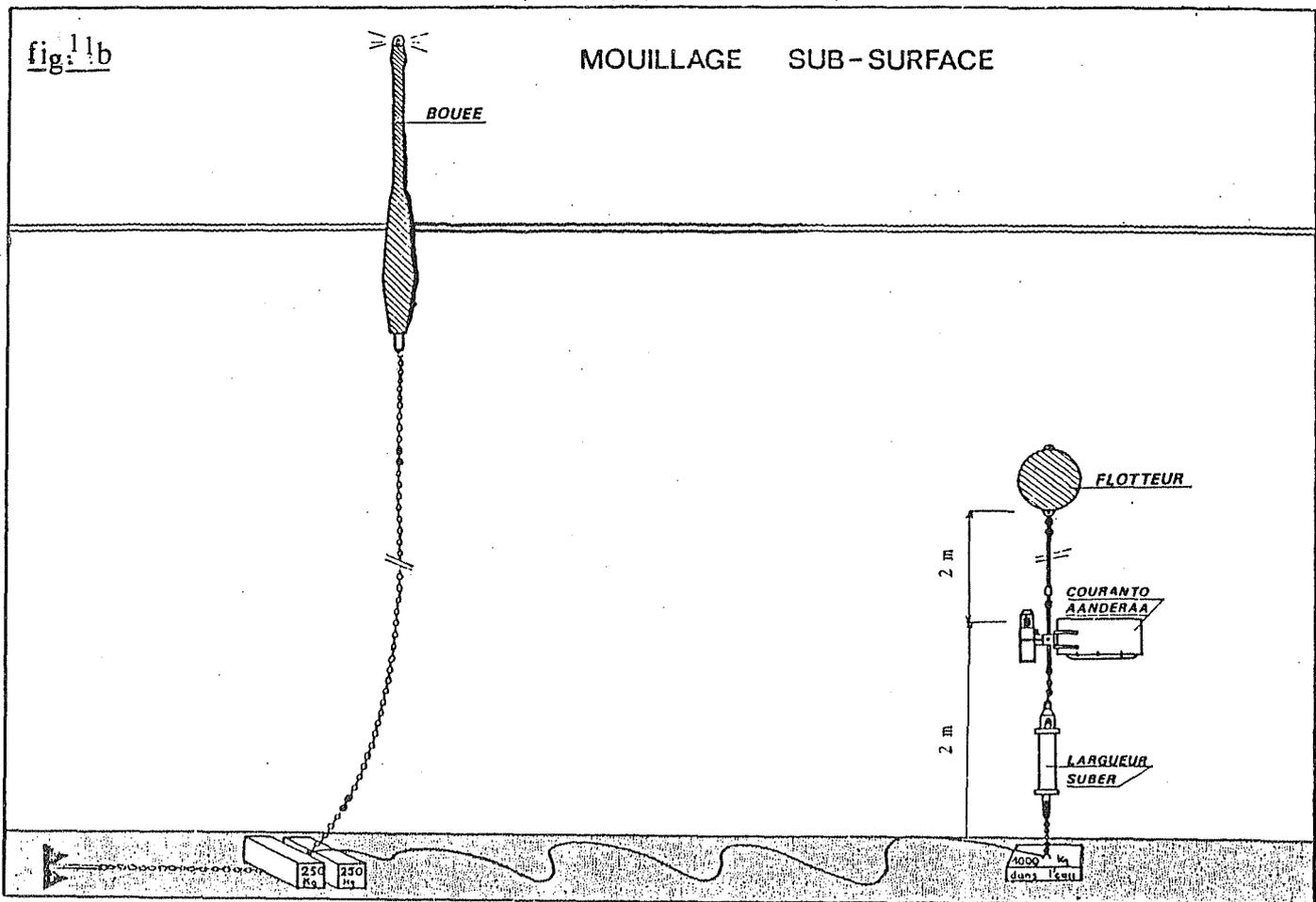
Les mesures en surface sont données par des courantographes suspendus à une flottabilité reliée à la bouée par un cabrillon mobile.

Pour ces mesures de courant en surface, nous avons choisi des courantographes Suber qui moyennent chaque composante sur la période d'échantillonnage (en général cette période était de 10 mn sauf au point 6 au fond où elle était d'une 1/2 heure).

Les appareils de mesures en sub-surface sont maintenus à une distance constante du fond grâce à un volume de flottabilité qui tend ainsi la ligne de mouillage. Un largueur acoustique est incorporé à cette ligne, ce qui permet une localisation et une récupération plus aisée.



(d'après KERDREUX et L'YAVANC , 1985)



(d'après KERDREUX et L'YAVANC , 1985)

C. RENDEMENTS

La campagne de mesure 1982 comportait plusieurs mesures défectueuses. Par contre, la campagne 1984 a fourni des mesures de très bonne qualité. En ce qui concerne la campagne 1983, comme on peut le constater sur le tableau (3), plusieurs enregistrements présentent des trous et certains appareils n'ont pas fonctionné. C'est le cas de tous les courantographes du point 9 et du point 7 fond.

Ce faible rendement (environ 45 %) s'explique d'abord par plusieurs abordages et chalutages des appareils malgré la diffusion dans certains ports d'affiches indiquant les positions de mouillages.

Plusieurs rotors étaient bloqués par les algues ou déboîtés.

Lors des dépouillements, nous avons constaté des inversions de courant :

- au point 6 où le courantographe de surface indiquait une direction opposée ;
- au point 5 où il y a eu également inversion du courant pendant 7 jours.

II-1-2-2 Mesures Lagranziennes

Ces mesures avaient pour but de faire une approche globale de la dynamique du Golfe Normand-Breton et essentiellement connaître les excursions des masses d'eau sur une longue période et les confronter aux résultats du modèle.

Nous avons également, lors de ces campagnes :

- comparé la dérive de la masse d'eau de surface par rapport à la masse d'eau en profondeur ;
- recherché les gradients de vitesse éventuels sur une distance inférieure au mille nautique.

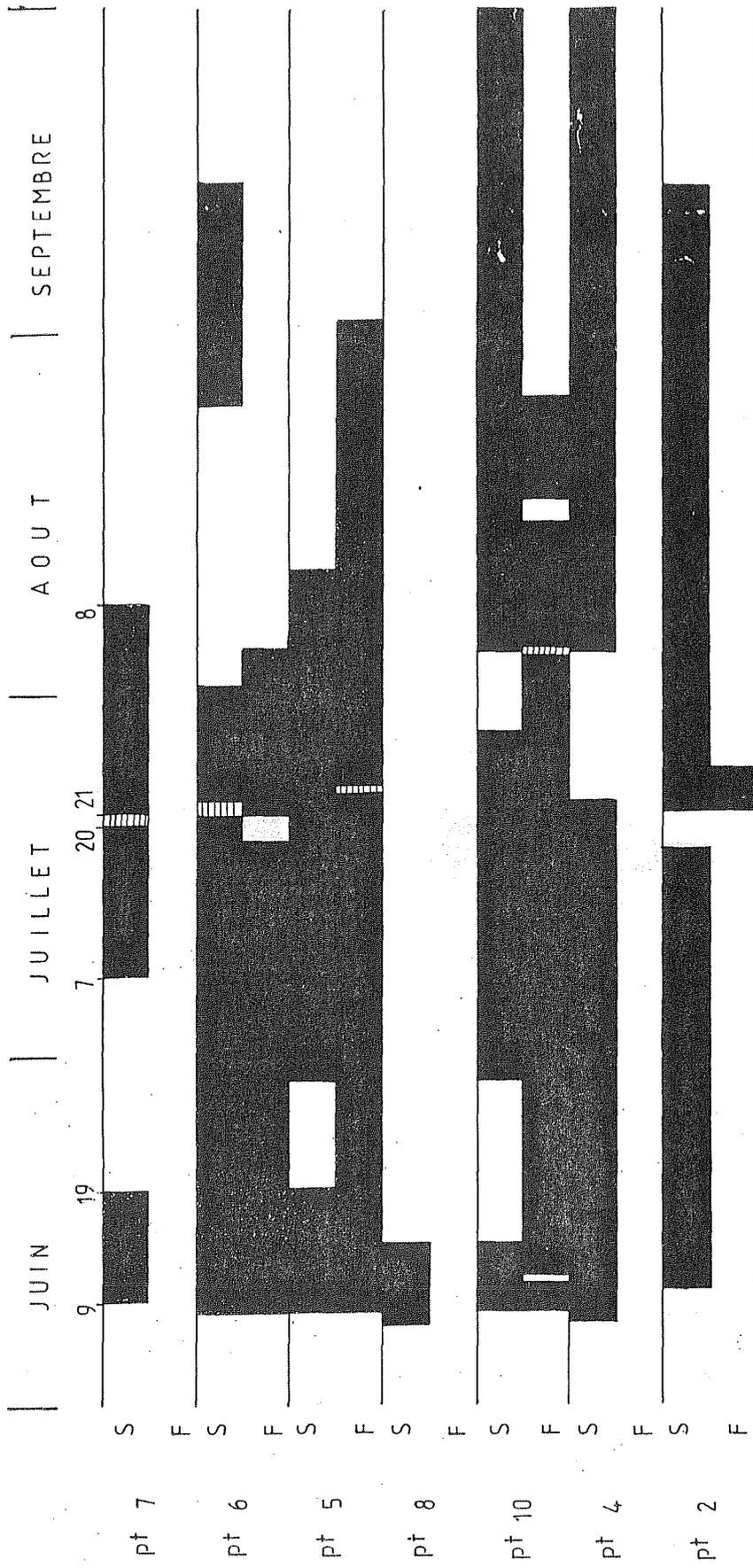


TABLEAU : 3

A. SYSTEME ARGOS

a) Principe d'Argos

Argos est un système permettant de localiser les plates-formes mobiles (bateau, bouées dérivantes) et de collecter des données en provenance de plates-formes fixes ou mobiles. Ces plates-formes sont simplement émettrices et fonctionnent donc indépendamment du satellite (TIROS - N). De ce fait, seules les mesures de fréquences permettent la localisation. L'orbite polaire du satellite permet le survol de l'ensemble de la Terre en 12 heures et la période de cette orbite est de 101 mn : c'est le temps nécessaire au satellite pour faire le tour de la Terre.

En moyenne, le système permet environ 6 localisations par jour (voir plus loin).

b) Description de la chaîne (voir Figure 12)

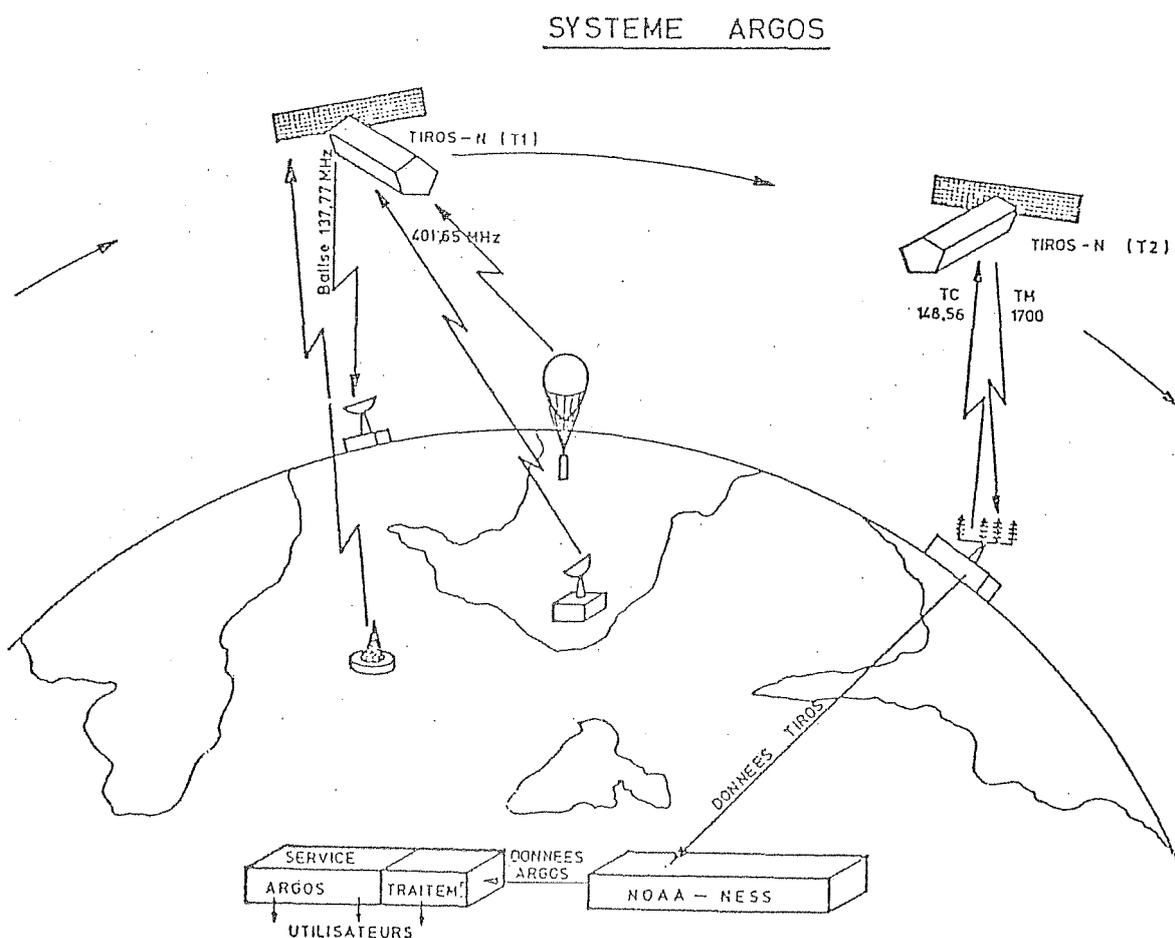


FIGURE 12

B. DESCRIPTION DES BOUEES DERIVANTES

Les bouées dérivantes, dans lesquelles sont enfermées des balises Argos, sont entraînées par une drogue (ou ancre flottante) pouvant être suspendues à différentes profondeurs.

En général, la drogue est composée d'une bâche tendue entre 2 barres d'acier où la barre inférieure sert de lest.

Nous avons utilisé, par manque d'études comparatives, 2 sortes de liaisons drogue-bouée.

a) Liaison directe (Figure 13a)

Sur ce système de liaison, la drogue est amarrée directement sur le flotteur Argos par l'intermédiaire d'un collier.

Avantages :

- prix réduit et facilité de mise en oeuvre ;
- pas de prise au vent de la liaison.

Inconvénients : Etant donné l'inertie de la drogue et la faible flottabilité de la bouée dérivante, cette dernière a tendance à plonger avec la houle. Il faut noter que les signaux des balises Argos ne peuvent être captés si celle-ci est immergée, même par faible profondeur.

b) Liaison avec drogue déportée (Figure 13b)

La bouée est maintenue à une distance de 3 m par une succession de petits flotteurs.

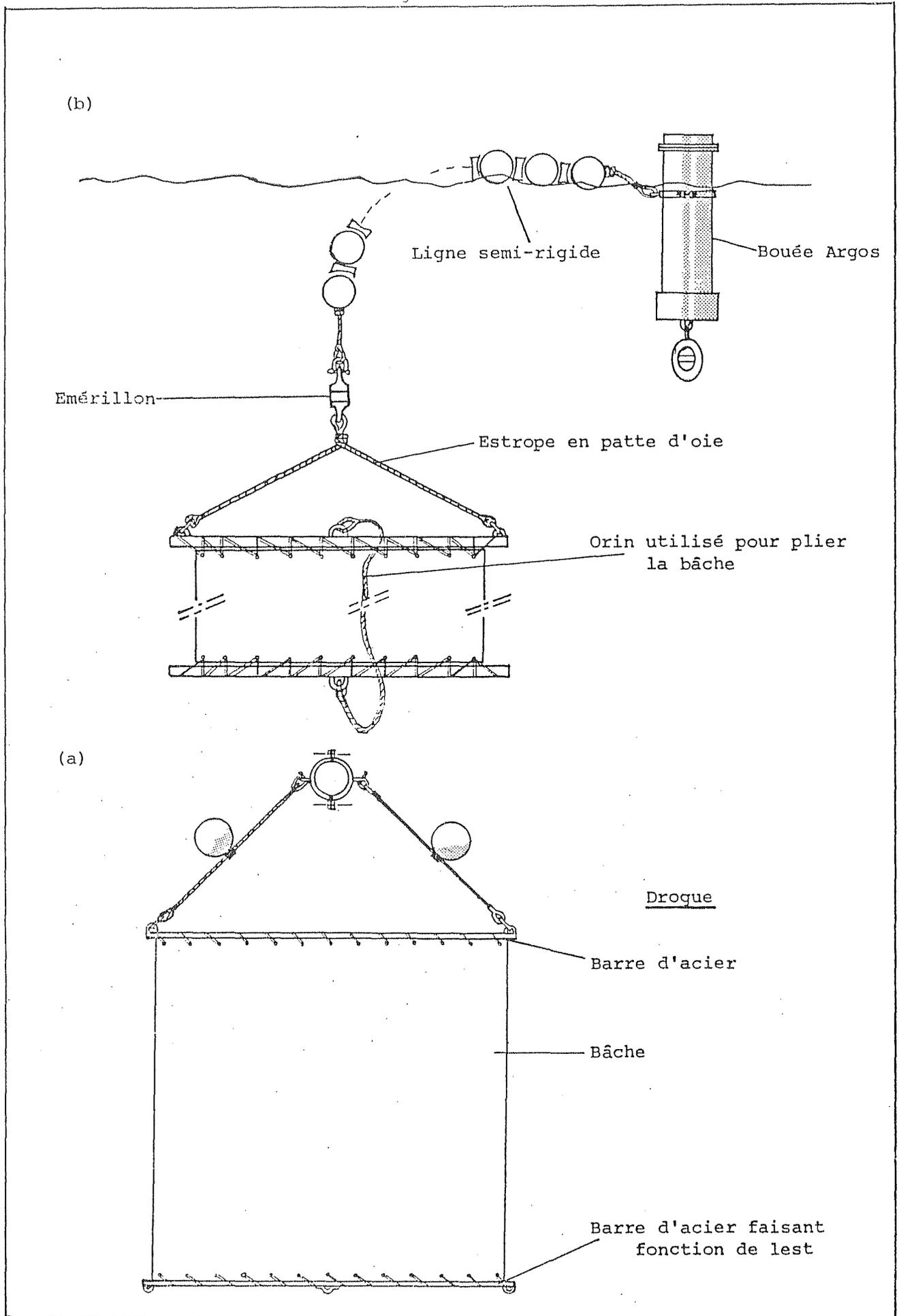
Avantages :

- Amortir les effets de la houle (les mouvements verticaux de la drogue peuvent modifier les déplacements de l'ensemble par rapport au courant).
- Cette liaison évite de répercuter sur le flotteur Argos les mouvements de la drogue.

Inconvénients :

- Prise au vent de la liaison non négligeable ;
- Prix de revient relativement élevé ;
- Danger pour la navigation.

Figure 13

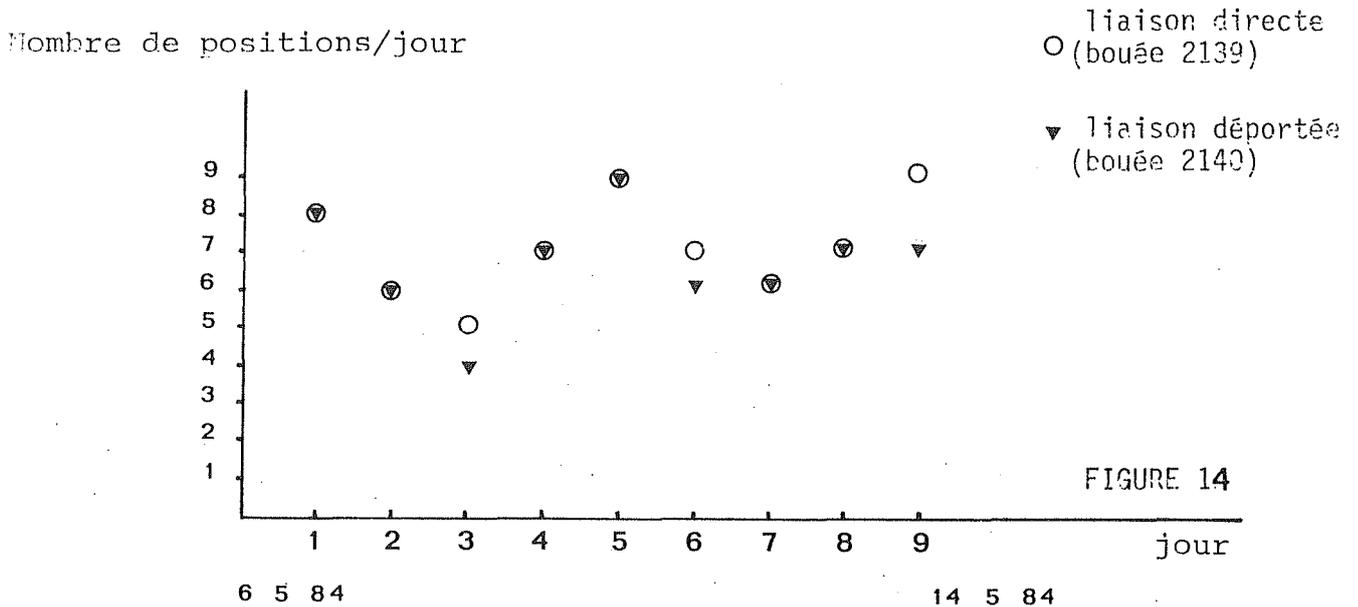


(d'après J.P GIRARDOT et AL, 1985)

c) Comparaison entre les deux liaisons drogue-bouée

Le but de ce paragraphe n'est pas de donner une comparaison détaillée entre les différentes liaisons drogue-bouée (un rapport sur ce sujet va être publié par l'I.F.R.E.M.E.R.).

Une première comparaison de comportement drogue-bouée (Figure 14) montre que, dans ce cas particulier, le nombre de positions par jour reçues par le système Argos est légèrement supérieur dans le cas de la liaison directe.



En conclusion et sous réserve d'une étude détaillée sur le comportement de chaque liaison en présence de la houle, nous donnons une préférence à la liaison directe.

C. PRECISION DE POSITIONNEMENT

a) Bouée de référence

Pour connaître la précision du système de positionnement Argos dans le Golfe Normand-Breton, nous avons placé une bouée en un point fixe (phare du Cap Fréhel) pendant 46 jours.

Le nombre des localisations varie de 2 à 12 positions par jour, et il n'y a aucune localisation entre 21 h et 2 h.

Nous remarquons également (Figure 15) que la précision de la position donnée par le système Argos est d'abord fonction de l'heure et que l'erreur se situe sur un rayon maximum de "2 Km".

b) Conclusion

La bouée de référence ne nous donne que la limite inférieure de l'erreur car cette bouée de référence n'est pas assujettie à :

- l'effet de la houle sur le système bouée-drogue,
- aux vagues qui peuvent altérer la mesure de fréquence.

A partir de ces renseignements, il est illusoire de vouloir étudier, à partir des lâchés de flotteurs, des phénomènes physiques très fins.

Seules les circulations à moyenne échelle de temps sont reproduites avec une erreur spatiale de 2 Km.

Cette erreur spatiale constitue certes un handicap pour la précision des résultats obtenus mais n'altère pas l'idée générale de la circulation lagrangienne, obtenue à partir de ces mesures, sur une période de plusieurs jours.

D. PROGRAMME DES LACHERS

Nous avons répercuté dans le tableau (4) un résumé sur les différentes liaisons bouée-drogue ainsi que l'heure du lâché des flotteurs, la position géographique et la profondeur de la drogue.

Le choix de l'heure des lâchés a été fixé pour que les flotteurs restent le plus longtemps possible dans le Golfe Normand-Breton.

Dans notre cas où les bouées dérivait sans assistance, nous ne pouvions utiliser des immersions de drogue au-delà de 15 m à cause de bancs découvrants et des faibles profondeurs de certains endroits.

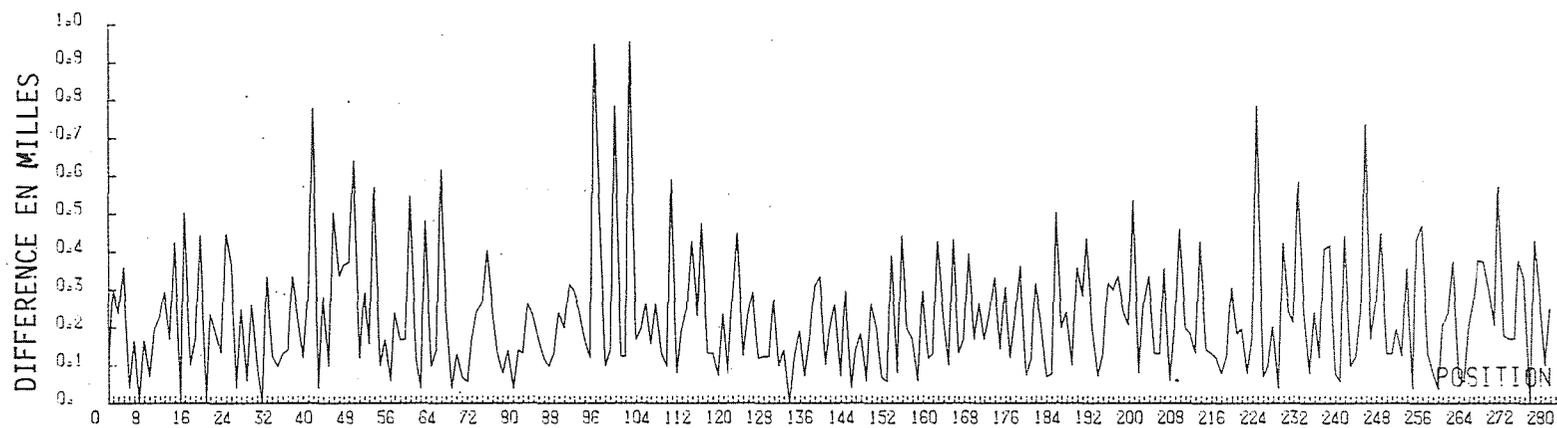


FIG.15 : DIFFERENCE ENTRE LA POSITION REELLE ET LES POSITIONS FOURNIEES PAR LE SYSTEME ARGOS

N° de la bouée	Date de la mise à l'eau	dimension et		position du lacher		profondeur	périodes dans l'eau
		Nature de drogue	récupération par et date	Position de récupération nord	ouest		
2136	7/5/84 7 H 38 (TU)	sans drogue	pêcheur 14/5/84 à 3 H	48° 59,2 48° 42	1° 48 2° 30	surface	7 jours en mai
2137	3/5/84 16 H (TU)	2,5 x 2,5 . drogue déportée	pêcheur 11/5/84 à 16 H 56	48° 49 48° 33	2° 26.9 2° 44	surface 2 m 50	8 jours en mai
2138	6/5/84 8 H 50 (TU)	2.5 x 2.5 liaison directe	pêcheur 23/6/84	49° 15 48° 56	2° 38.4 1° 55	surface 2 m 50	47 jours Mai-juin
2139	6/5/84 8 H 47 (TU)	2.5 x 2.5 liaison directe	pêcheur 29/5/84 à 8 H 25	49° 15 49° 01	2° 38 2° 42	surface 2 m 50	23 jours en mai
2140	4/5/84 à 14 H (TU)	drogue déportée	pêcheur 22/5/84	49° 10 49° 04	1° 47 1° 52	surface 2 m 50	18 jours en mai
4108	23/3/84 6 H 59 (TU)	3.5 x 2 liaison directe	pêcheur			surface 2 m 50	en mars
4109	23/3/84 8 H 30 (TU)	3.5 x 2 liaison directe	pêcheur			surface 2 m 50	en mars
2136	11/5/84 17 H 17 (TU)	1.5 x 1.5 liaison directe	disparue 29/6/84 5 H 30	48° 50.76 disparue	2° 45.72 disparue	surface 2 m	
2137	29/5/84 18 H 32 (TU)	1.5 x 1.5 liaison directe	échouée 1/6/84	44° 13 49° 20.1	1° 45 1° 45.6	surface 2 m	3 jours fin mai début juin
4109	3/5/84 à 16 H (TU)	liaison directe	pêcheur 3ème semaine de mai	48° 49.25 panne du système Argos	2° 26.9	mi-surface 15 m	3 jours effectif en mai

T A B L E A U N° 4

II-2 PRESENTATION DU MODELE NUMERIQUE

Nous allons aborder ce sujet succinctement, car ce modèle a été largement appliqué à diverses zones (Baie de Seine ; Estuaires de la Loire et de la Gironde ; la zone de Belle Ile et Noirmoutier et la Rade de Brest...).

Il a été également largement expliqué par Salomon en 1980, lors de sa mise en oeuvre pour l'étude de l'estuaire de la Seine !

Les équations relatives au type du modèle que nous avons adapté au Golfe Normand-Breton et après intégration sur la verticale des Equations de Saint Venant et en supposant la densité constante.

inertie temporelle	advection	coriolis	pression	frottement	vent	viscosité
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
(1, 2) $\frac{\partial V}{\partial t}$	+ $V \nabla V$	+ $2\Omega \Delta V$	= $-g \nabla \xi$	- $\frac{kV V }{H}$	- $\frac{\tau_s}{\rho H}$	+ $\epsilon \Delta V$

$$(3) \quad \frac{\partial \xi}{\partial t} + \nabla(HV) = 0$$

$$(4) \quad \tau_{sx} = -\rho_a c_d (U - u) \sqrt{(U - u)^2 + (V - v)^2} \quad : \text{tension du vent suivant l'axe x}$$

$$(4') \quad \tau_{sy} = -\rho_a c_d (V - v) \sqrt{(U - u)^2 + (V - v)^2} \quad : \text{tension du vent suivant l'axe y}$$

ρ : densité de l'eau

V : vecteur vitesse intégré sur la verticale

Ω : vitesse angulaire de la rotation terrestre

ξ : cote de la surface libre

ρ_a : densité de l'air

H : hauteur totale de la colonne d'eau

c_d : coefficient de frottement de surface

k : coefficient de frottement de fond pris sous la forme :

$$k = \frac{g}{C^2} \quad \text{où } C \text{ est le coefficient de Chezy.}$$

La distribution de la vitesse horizontale sur la colonne d'eau est prise sous forme d'un profil logarithmique.

$$U(Z) = \frac{U^*}{K} \text{Log} \frac{Z}{Z_0} \quad (5)$$

K : constante de Karmann

Z_0 : épaisseur de rugosité du fond

U^* : vitesse de frottement définie par :

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$$

En remplaçant cette dernière expression de U^* en (5) et en l'intégrant sur toute la colonne d'eau, nous obtenons :

$$C = \frac{\sqrt{g}}{K} \text{Log} \frac{H}{eZ_0}$$

II-2-1 SCHEMA NUMERIQUE

Ce modèle numérique utilise un schéma implicite en directions alternées (A.D.I.) introduit pour la première fois par PEACEMAN et RACHFORD (1955).

La grille de calcul utilisée pour résoudre numériquement les équations (1), (2) et (3) se caractérise par le décalage des points de calcul du niveau d'eau : ξ et les composantes U et V de la vitesse, ceci pour améliorer l'approximation différentielle par des différences finies centrées (Figure 16) (sauf le terme de divergence - qui figure dans l'équation de la continuité - qui n'est pas centré dans le temps).

Outre ce décalage dans l'espace, le schéma introduit également un décalage dans le temps des composantes U et V de la vitesse qui sont calculées alternativement tous des demis pas de temps.

En ce qui concerne la stabilité de ce schéma appliqué aux équations linéarisées LEENDERTSE montre qu'il est inconditionnellement stable.

Dans le cas des équations non linéaires, LEENDERTSE (1970) a effectué un calcul approché fondé sur le fait que des oscillations apparaissent principalement par les termes d'advection et sont partiellement

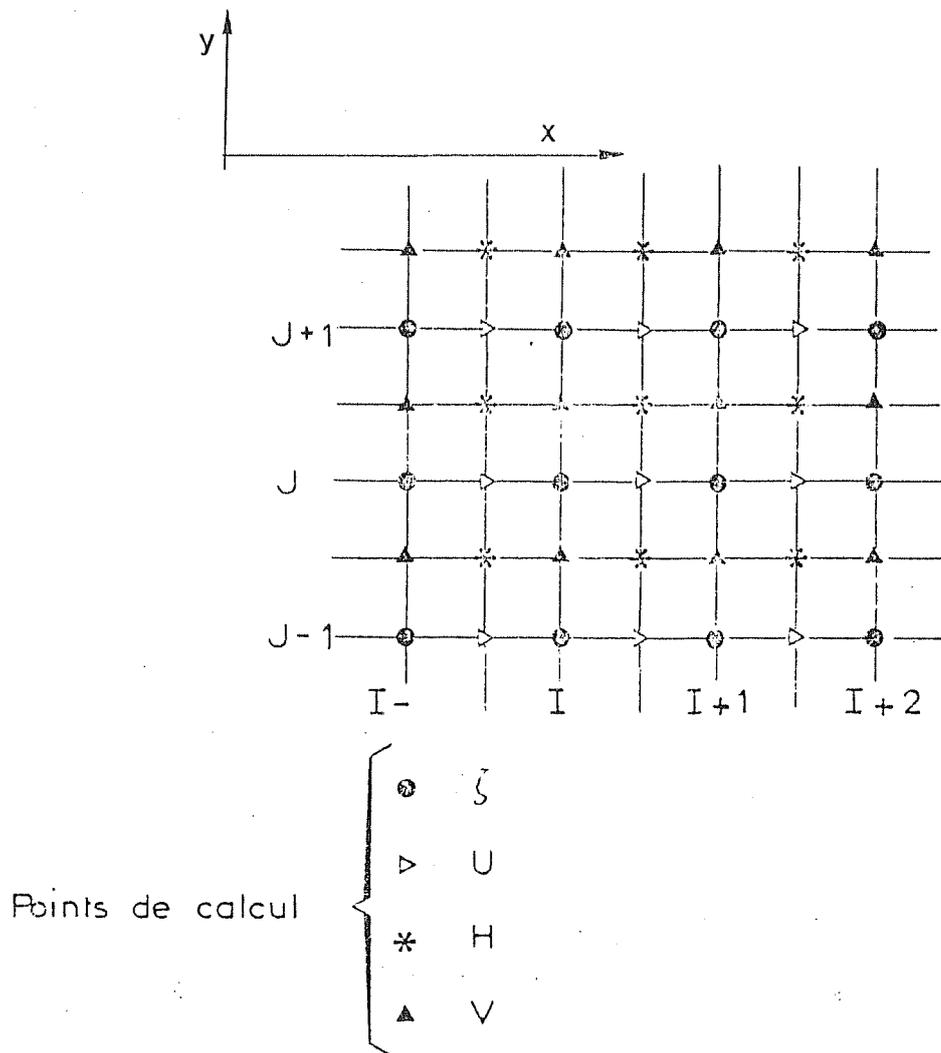


Figure 16 : Détail de la grille utilisée pour la résolution numérique

(IN SALOMON ET AL, 1981)

dissipées par les termes de frottement. Il donne la condition de stabilité suivante :

$$\Delta t < 2g \frac{(\Delta x)^2}{C^2 H V}$$

Condition qui ne peut être qu'indicative compte tenu des approximations faites.

II-2-2 DIMENSION GEOGRAPHIQUE - MAILLAGES

Le choix de la dimension de la maille résulte d'un compromis entre la nature des informations que nous voulions extraire du modèle en tenant bien compte de la particularité de la zone et du temps de calcul sur ordinateur.

En effet, notre premier souci était de prendre une maille de dimension telle que toutes les îles qui jalonnent le Golfe Normand-Breton soient représentées et assez fine pour rendre compte d'une topographie tourmentée comme c'est le cas dans cette zone.

Compte tenu de ces remarques, nous avons adopté une maille carrée de 1 mille nautique (1 852 m).

Ainsi, le Golfe Normand-Breton est représenté par une grille de 82 x 59 mailles.

II-2-3 PARAMETRE NUMERIQUE

Une fois le pas d'espace fixé, nous avons utilisé la condition de stabilité ci-dessus pour déterminer le pas de temps.

L'endroit le plus critique du Golfe Normand-Breton est le secteur du Raz-Blanchard où le courant peut atteindre 5 m/s.

Soit, pour un coefficient de rugosité $Z_0 = 0.2$ cm (valeur généralement prise pour la Manche et la Mer Celtique ; PINGREE 1980) et une profondeur de 40 m, le pas de temps Δt doit être inférieur à 68 s.

Pour la commodité des dépouillements, nous avons pris $t = 60$ s ce qui permet de stocker les résultats toutes les 10 mn.

La valeur de viscosité réelle est d'environ $10 \text{ m}^2/\text{s}$.

L'analyse numérique montre que le schéma induit une pseudo-viscosité qui, en 1ère approximation, vaut : $\frac{gA \Delta t}{\pi}$ (A : Amplitude de la marée.).

Cet effet (indésirable) purement numérique ayant été équilibré, le modèle fonctionne avec une viscosité réelle d'environ $10 \text{ m}^2/\text{s}$.

II-2-4 CONDITION INITIALE ET AUX LIMITES

La condition initiale est le repos. Pour être plus proche de cette condition, nous avons fixé l'instant de départ au voisinage de la basse-mer et au moment de la renverse du courant.

Après un essai, le temps de mise en régime correspond à deux périodes de la marée (12 h 25).

Sur la frontière ouverte, nous avons imposé les dénivellations dues uniquement à la marée, étant donné qu'elles sont mieux connues que les vitesses.

En chaque point de la limite ouverte de la zone, nous avons :

$$\xi(M, t) = \xi_0(M, t) + \sum_{i=1}^N A_{mi} \cos(\omega_i t - \phi_{mi})$$

$\xi_0(M, t)$ est le niveau moyen au point M.

ω_i , A_{mi} et ϕ_{mi} sont respectivement la pulsation, l'amplitude et la phase de l'harmonique i au point M.

Les valeurs des amplitudes et phases de différentes harmoniques sont tirées des résultats du modèle physique tournant de l'I.M.G. (Atlas des composantes harmoniques, CHABERT D'HIERES, LE PROVOST, 1979).

Les harmoniques prises en compte dans le calcul des dénivellations sont : les ondes significatives d'origines astronomiques et par ordre d'amplitude décroissantes :

- diurnes : K_1, O_1, P_1
- semi-diurnes : $M_2, S_2, N_2, K_2, 2, \mu_2, L_2, 2N_2, T_2$

Les ondes d'origine non linéaires :

- semi-diurnes : $2MS_2$, SNM_2 , $2MN_2$, MSN_2 , $2MK_2$, MNS_2 , $3MSN_2$, $2SM_2$
- quart-diurnes : M_4 , MS_4 , MN_4
- sixième-diurnes : M_6 , $2MS_6$, $2MN_6$

Certaines de ces ondes se superposent aux ondes d'origine astronomique venant de l'Océan, qui ont des corrections nodales différentes :

$2MS_6$ à μ_2 , $2MN_2$ à L_2 , $3MSN_2$ à ν_2

La précision de ces niveaux est de 15 à 20 cm loin des côtes et plus près des côtes (CHABERT D'HIERES et al., 1979).

II-2-5 NIVEAU MOYEN

La détermination des niveaux instantanés le long des limites ouvertes nécessite la connaissance, le long de cette frontière, de la cote du niveau moyen (M) par rapport au plan de référence horizontal.

La figure (17) montre une variation du niveau moyen (pour un coefficient 95) très importante (15 cm) au niveau de Brehat qui coïncide avec notre frontière ouverte Ouest et également au niveau de Cherbourg qui représente notre limite Est.

Effectivement, ces zones se caractérisent par des courants très intenses qui entraînent un abaissement de la pression et, par conséquent, un abaissement du niveau moyen.

La distorsion de l'échelle horizontale et verticale du modèle physique (surtout près des côtes et des hauts fonds) rendent ces données non fiables.

C'est pour cette raison que nous avons pris, pour la suite de notre travail, un niveau moyen constant qui correspond au niveau de mi-marée à SAINT MALO.

Pour tester l'influence de cette hypothèse sur le courant résiduel, les essais réalisés sur le modèle pour le même coefficient montrent que la variation du niveau moyen n'influe que sur les premières mailles au voisinage de la limite ouverte et sur la zone des ROCHES DOUVRES. (Cf. chapitre IV).

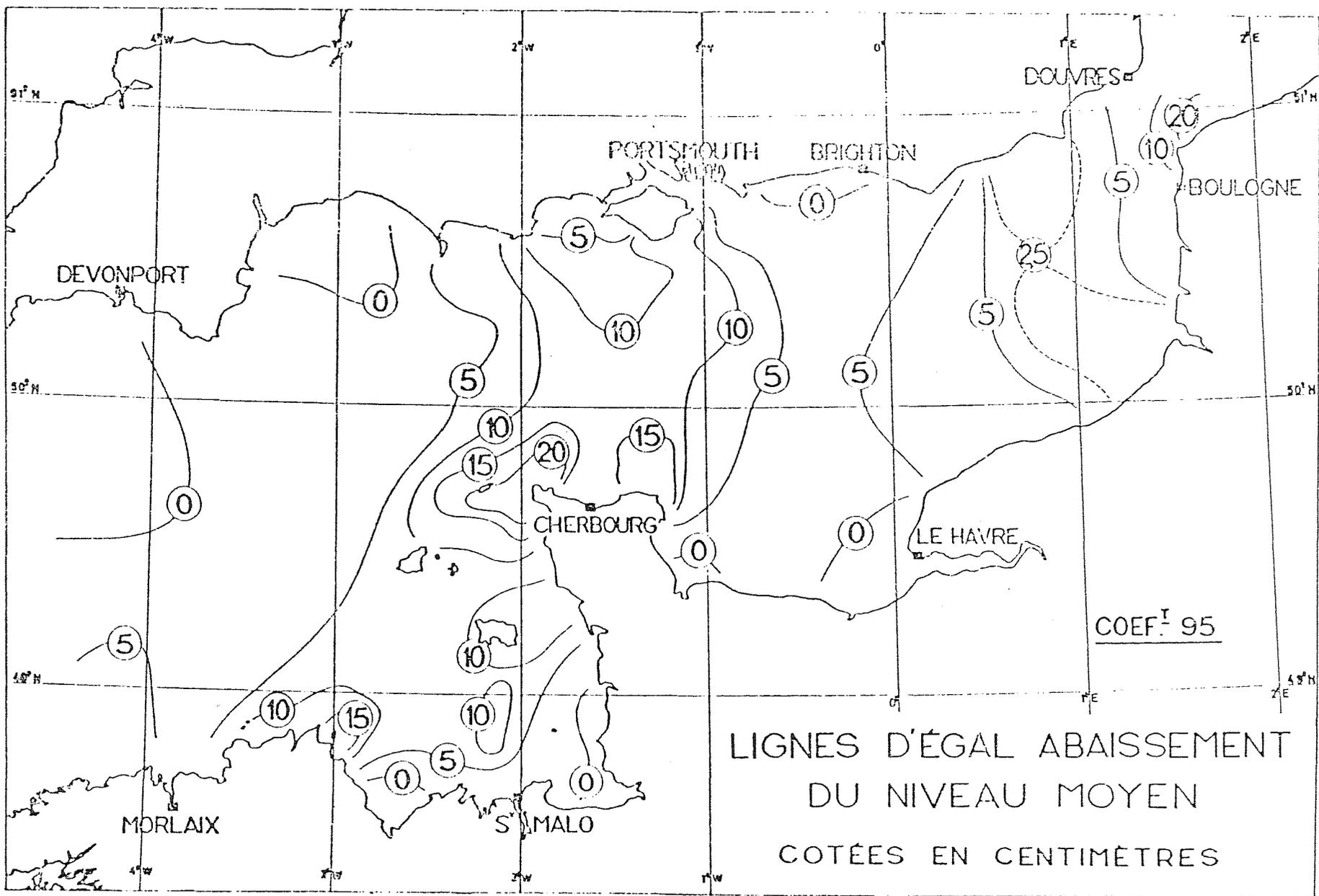


Figure 17 d'après G. CHABERT D'HERES et C. LEPROVOST 1970

II-2-6 VALIDATION

Le réglage du modèle par rapport aux mesures in-situ est nécessaire à cause de la paramétrisation de certains phénomènes physiques comme le frottement de fond.

Comme nous l'avons signalé précédemment, le coefficient de Chezy est pris sous la forme :

$$C = 7.83 (\text{Log } H/eZ_0)$$

Ce coefficient dépend de la rugosité au fond qui est elle-même tributaire de la nature, et des irrégularités de forme, du fond.

En toute rigueur, et comme le montre la carte de répartition de sédiments superficiels dans le Golfe Normand-Breton, le coefficient Z_0 n'est pas constant.

Pour ne pas charger le modèle et pour faciliter le réglage à l'aide d'un seul coefficient au lieu de 4 838 coefficients, nous avons préféré prendre un Z_0 constant.

Après les essais effectués pour une marée réelle de vive eau moyenne, la valeur de Z_0 a été fixée à 0.7 cm au lieu de 0.2 cm.

Nous signalons que le réglage du modèle a été effectué uniquement pour une marée de vive eau moyenne et qu'aucun réglage n'a été fait pour la marée moyenne présentée également dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

=====

ETUDE DYNAMIQUE DE LA MAREE DANS LE GOLFE NORMAND BRETON

III-1 PRESENTATION DES RESULTATS DE MESURES

III-1-1 Introduction

III-1-2 Présentation des résultats de mesures de courant

III-2 COMPARAISON ENTRE MESURES ET RESULTATS DU MODELE

III-2-1 Comparaison des niveaux de marée

III-2-2 Comparaison des courants

III-2-3 Conclusion

III-3 ETUDE DE COURANT DE MAREE DANS LE G.N.B.

III-3-1 Caractéristiques du courant de marée dans le G.N.B.

III-3-2 Directions et maxima de courant pour une marée de
vive eau.

III-4 ETUDE THEORIQUE

III-4-1 Introduction

III-4-2 Canal avec un mur de réflexion à fond plat

III-4-3 Canal avec un cap et à fond plat

III-4-4 Canal avec un cap et à fond non plat

POSITION DES MOUILLAGES

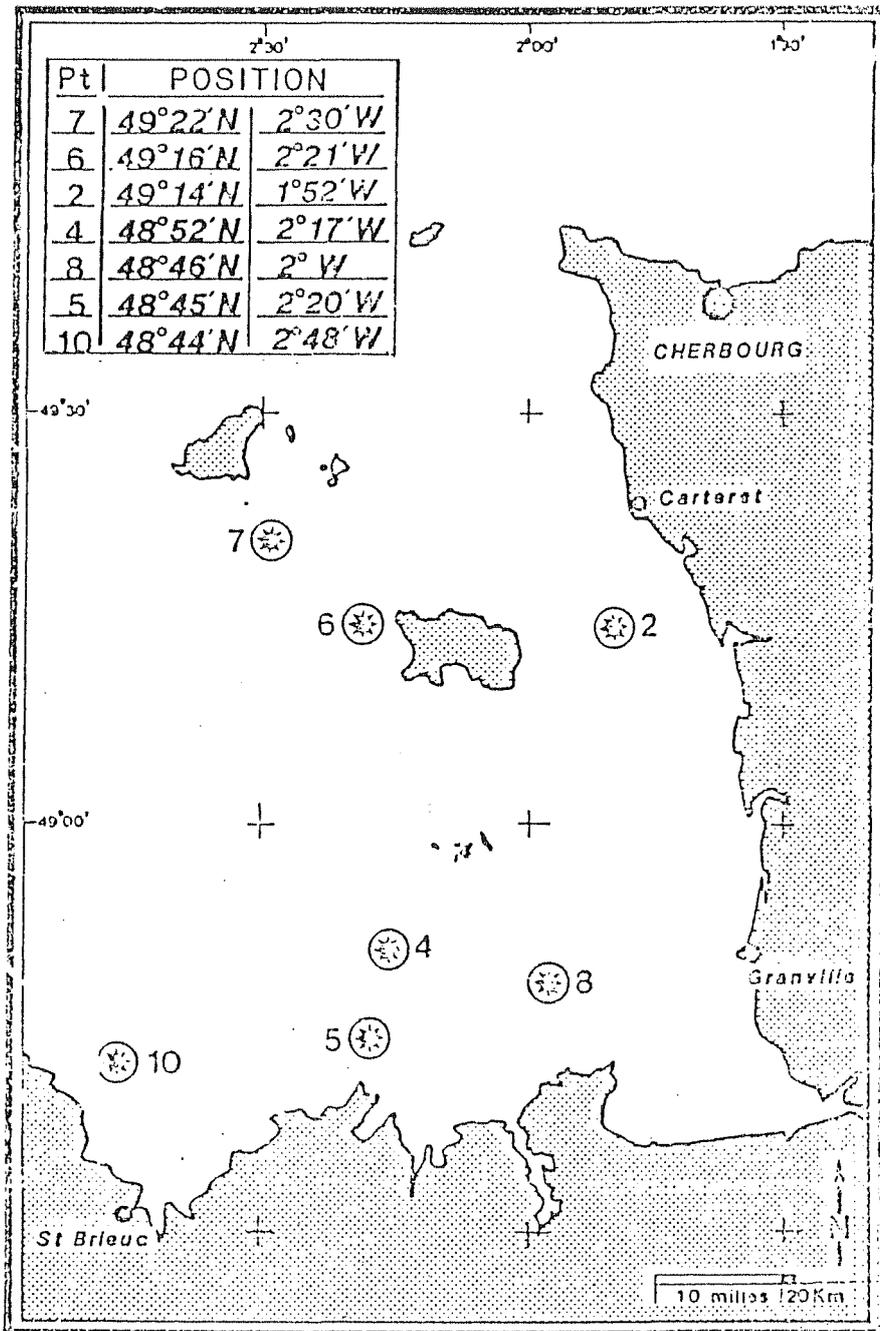


FIGURE 18

III-1 PRESENTATION DES RESULTATS DES MESURES

III-1-1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons donner quelques éléments sur le courant mesuré en certains points du golfe, avant de les confronter avec les résultats issus du modèle.

Cette présentation des mesures est introduite ici pour permettre d'avoir une idée assez générale à partir d'enregistrements de longues durées.

Par contre, la confrontation entre modèle et mesures n'est effectuée que pour 2 coefficients de la marée (95 - 70). Ceci est dû à la contrainte du support informatique.

III-1-2 PRESENTATION DES RESULTATS DE MESURES DE COURANT

a) Mesures eulériennes

Les mesures de courant ont été effectuées à 3 m de la surface et à 1.6 m de fond.

Dans ce paragraphe, nous n'allons présenter que les mesures effectuées lors de la campagne 1983 (ETE).

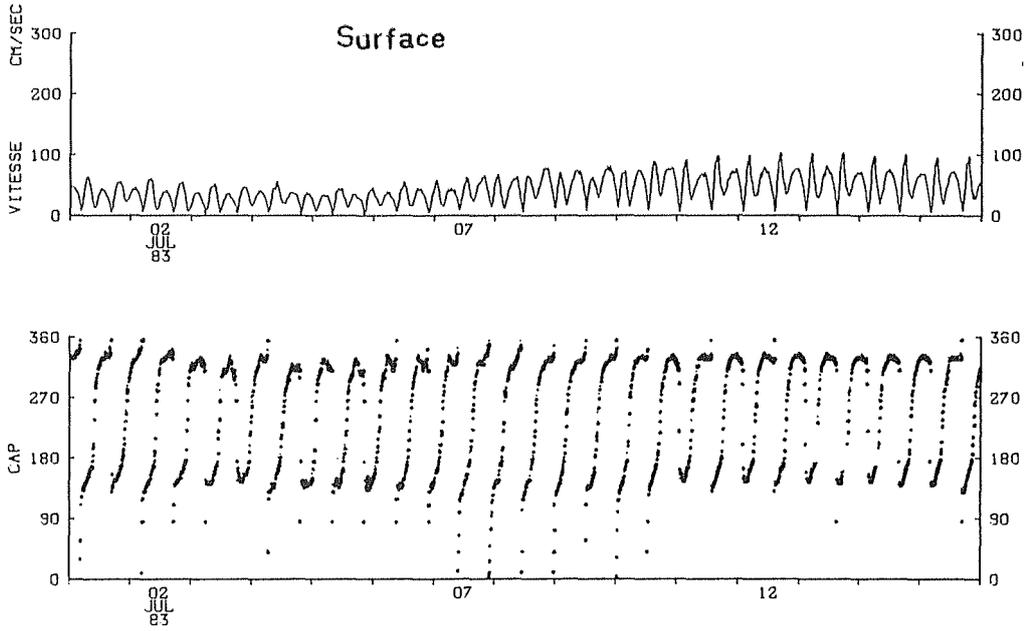
a,1) point 10

Ce point se situe dans la baie de Saint Brieuc (Figure 18)

Les figures (19a et b) montrent que le courant au fond, à la différence du courant en surface, a la même intensité maximale au flot (L'écoulement des masses d'eau est dirigé vers le fond du G.N.B.) et au jusant. Par contre le jusant dure plus longtemps que le flot. Le gradient, entre courant en surface et celui du fond, est plus prononcé en vive eau qu'en morte eau. Par contre les deux courants sont en phase.

fig.17a

NB83-S166-AW
3 H

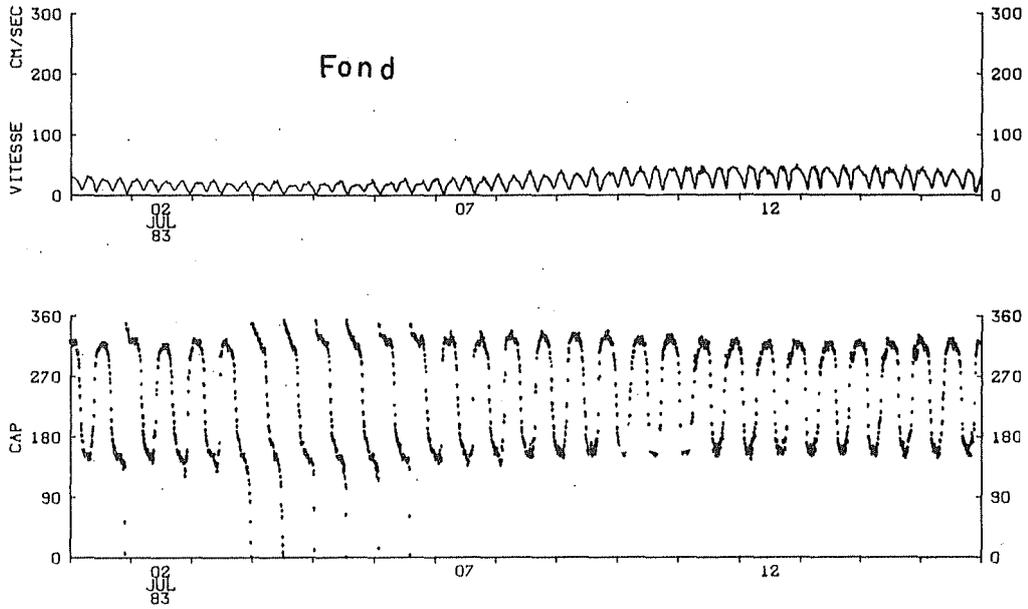


NB83-S166-AW
3 H

Point 10

fig : 17b

NB83-5741-1C
23 H



NB83-5741-1C
23 H

Figure : 19

POINT 10 - FOND

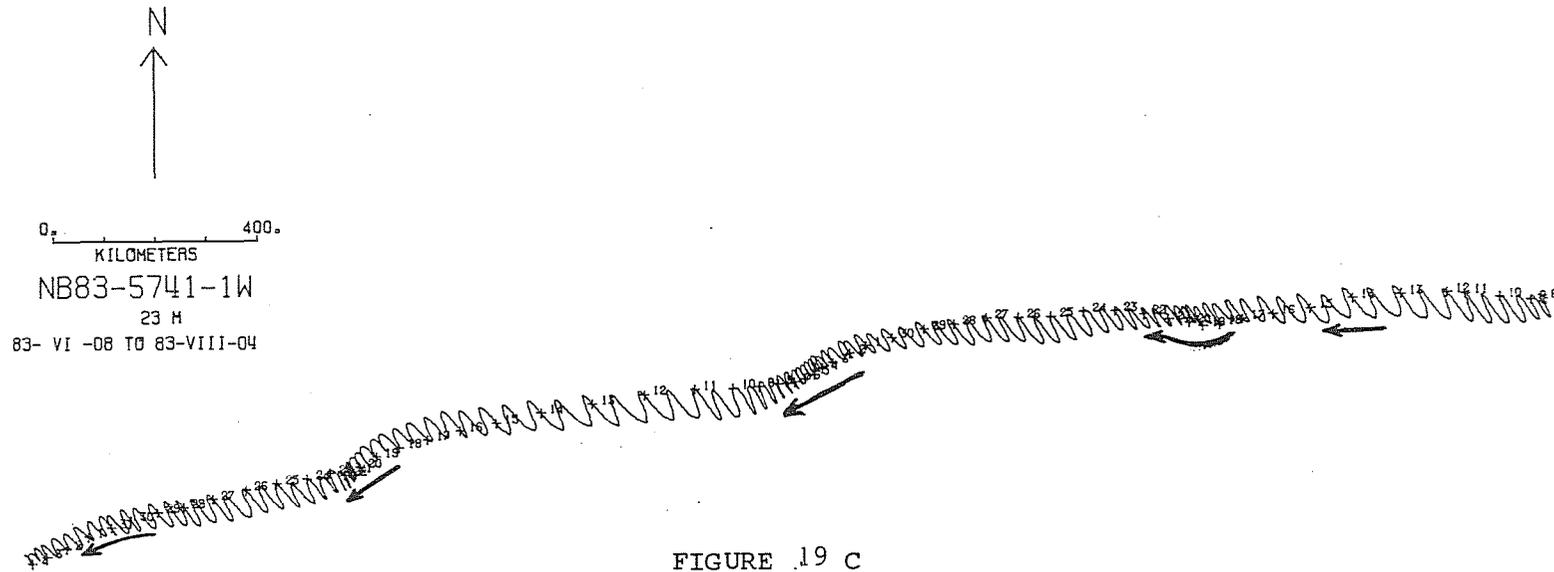


FIGURE 19 c

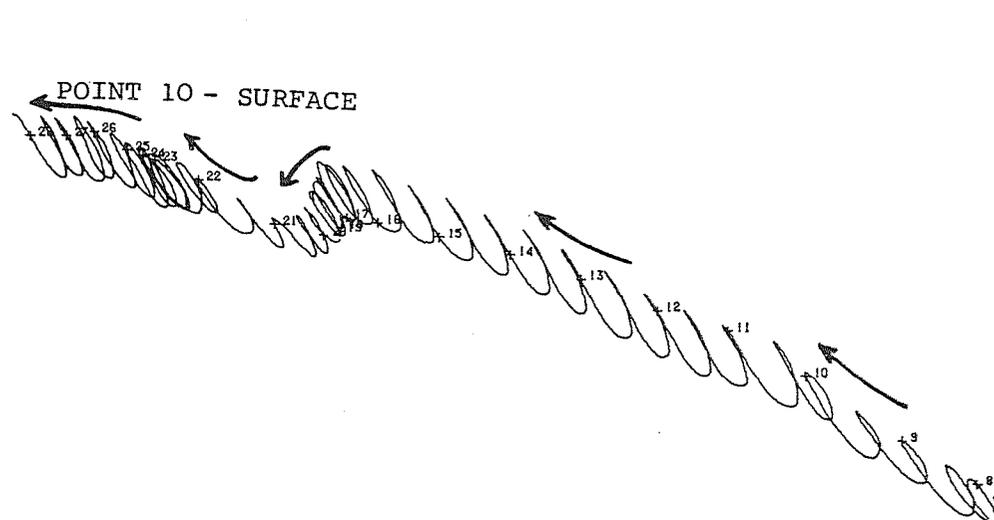


FIGURE 19 d

L'analyse spectrale des enregistrements de courant en surface et au fond (Figures 20 et 21) montre que l'essentiel de l'énergie se trouve dans les périodes semi-diurnes et quart-diurnes.

A la différence du courant au fond, le courant en surface présente un pic significatif aux périodes sixième-diurnes. La rotation du vecteur vitesse est dans le sens négatif (anticyclonique).

Les enregistrements de température, en surface et au fond, montrent que ce point est situé dans une zone homogène (Figure 22).

a,2) point 5

Ce point se situe au nord du Cap Fréhel (Figure 18). En ce point, nous constatons la dissymétrie entre l'intensité du courant au flot et au jusant en surface et au fond (Figures 23a et b). En ce point également il n'y a pas de déphasage entre le courant en surface et au fond.

A la différence du point 10, le courant au fond est plus intense et, par conséquent, le frottement au fond est plus important en ce point.

L'analyse spectrale des enregistrements de courant au fond (Figure 24) montre que l'essentiel de l'énergie se trouve dans les périodes semi-diurnes et quart diurnes. Nous constatons également des pics significatifs aux périodes diurnes et sixième diurnes.

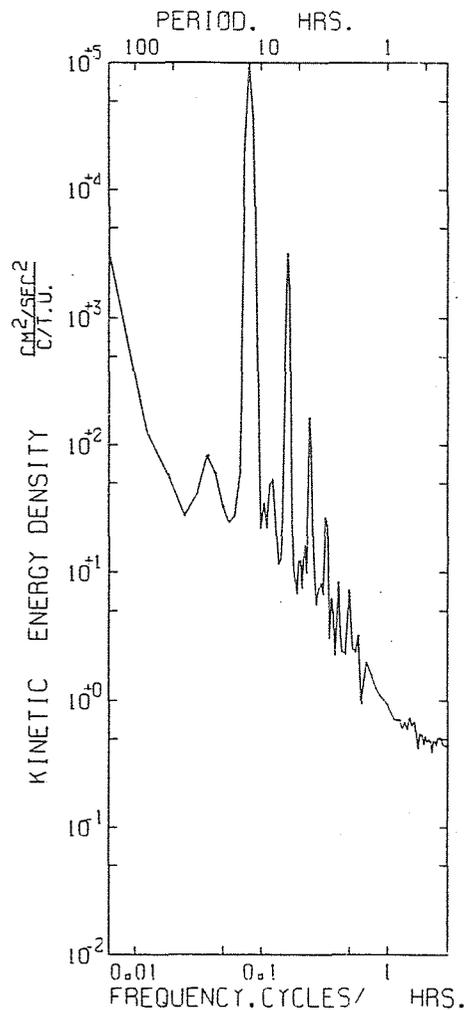
Nous signalons que les enregistrements de courant en surface sont courts pour permettre une analyse significative, détaillée. En ce point, la rotation du vecteur est dans le sens positif (cyclonique).

a,3) point 2

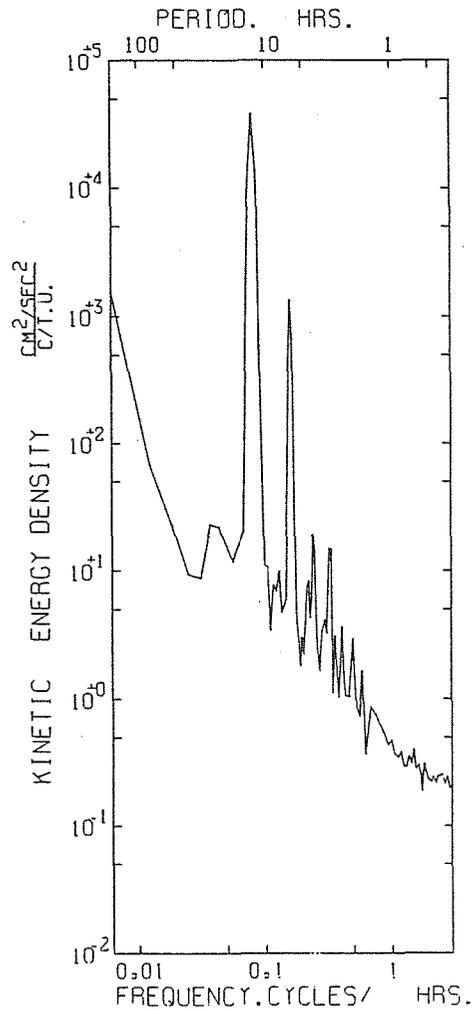
Ce point est situé entre Jersey et le Cotentin (Figure 18).

En ce point, nous constatons la non dissymétrie entre l'intensité maximale du courant au flot et celle au jusant.

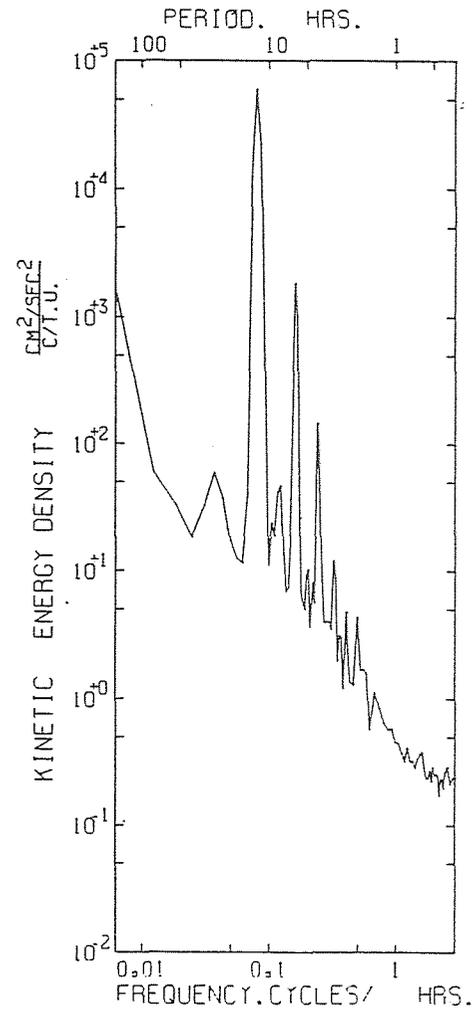
La figure (25), présentant l'analyse spectrale du courant en surface, fait apparaître que les pics les plus importants se trouvent aux périodes semi-diurnes et quart-diurnes.



TOTAL SPECTRUM
 NB83-S164-AW COMP. EST
 NB83-S164-AW COMP. NORD
 3 METERS
 83-VIII-04 TO 83-IX-27
 3 PIECES WITH 486 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
24+10+85



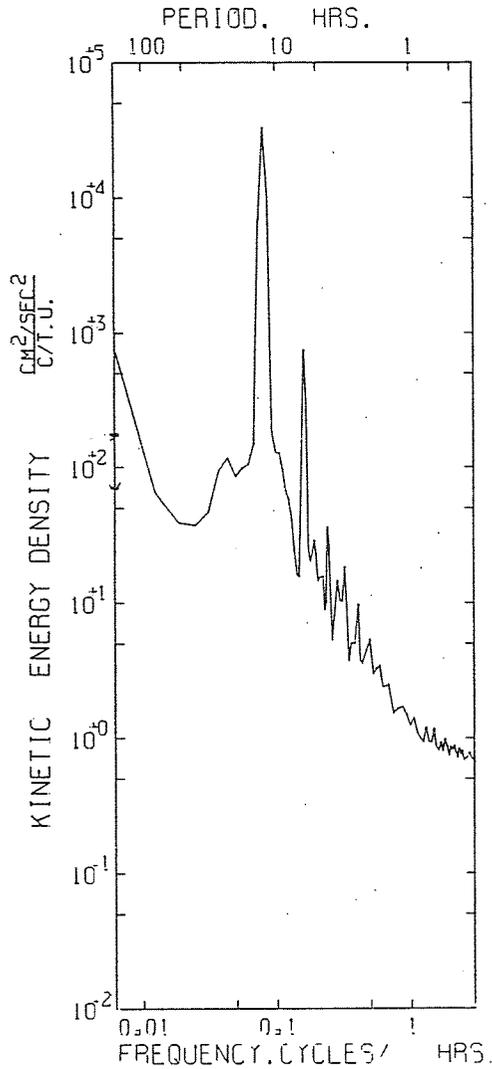
CLOCKWISE SPECTRUM
 NB83-S164-AW COMP. EST
 NB83-S164-AW COMP. NORD
 3 METERS
 83-VIII-04 TO 83-IX-27
 3 PIECES WITH 486 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
24+10+85



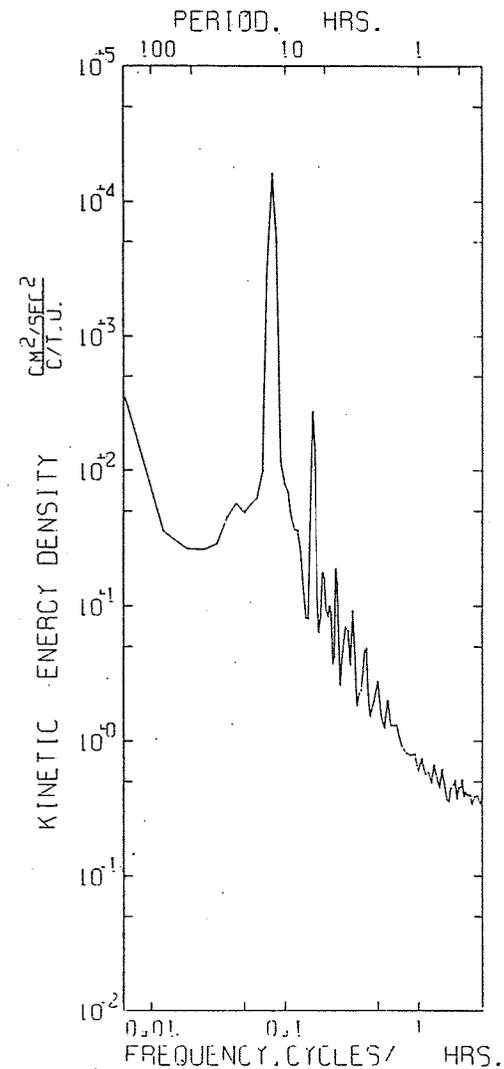
ANTI-CLOCKWISE SPECTRUM
 NB83-S164-AW COMP. EST
 NB83-S164-AW COMP. NORD
 3 METERS
 83-VIII-04 TO 83-IX-27
 3 PIECES WITH 486 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
24+10+85

POINT 10 (SURFACE)

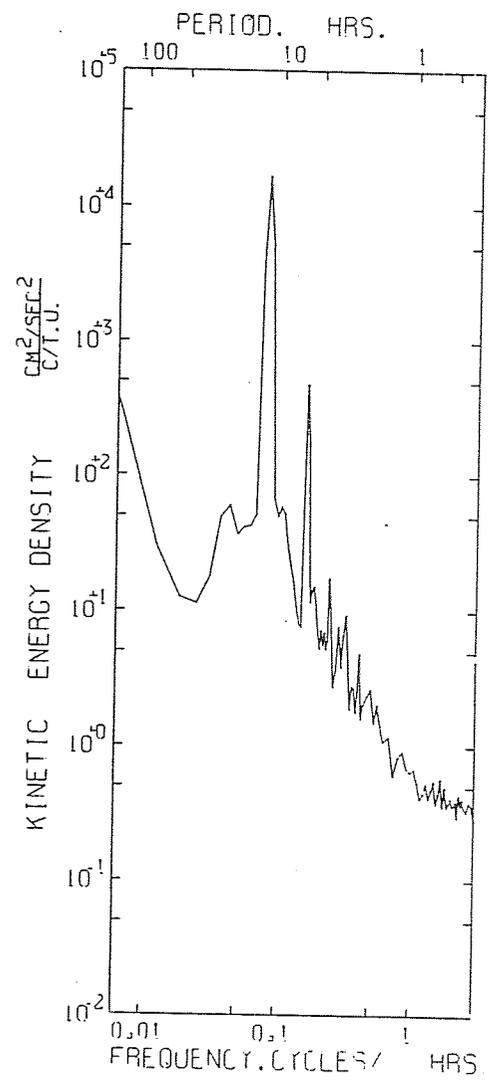
FIGURE N° 20



TOTAL SPECTRUM
 NB83-5741-1C COMP. EST
 NB83-5741-1C COMP. NORD
 24 METERS
 83-VI-08 TO 83-VIII-01
 8 PIECES WITH 486 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
 10-09-65



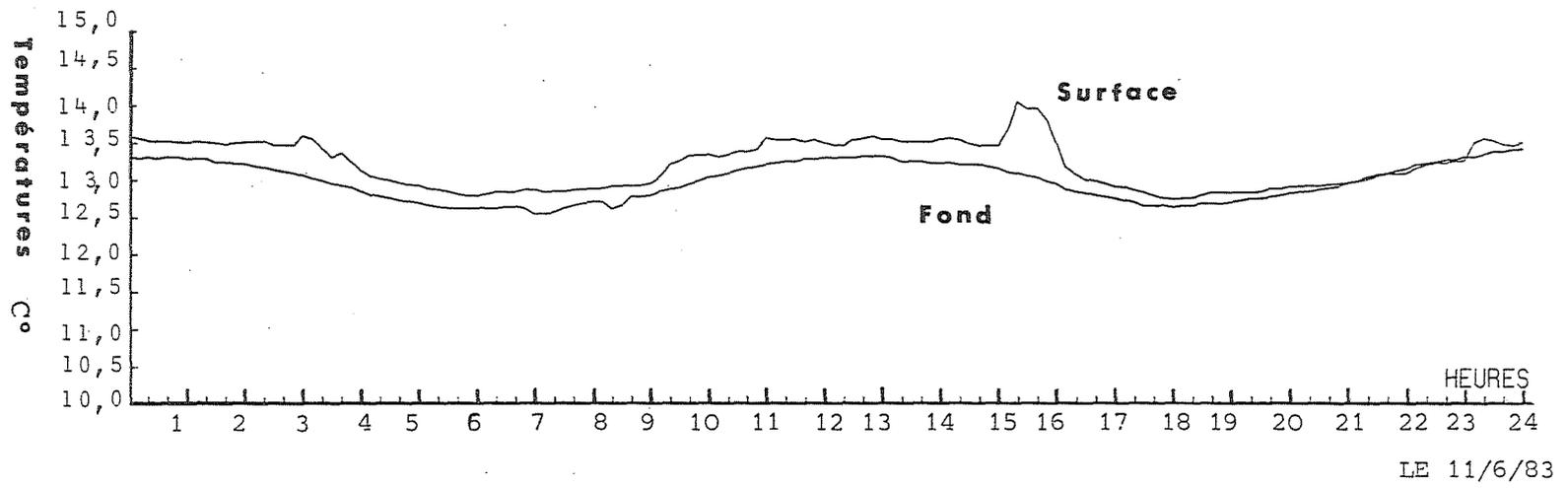
CLOCKWISE SPECTRUM
 NB83-5741-1C COMP. EST
 NB83-5741-1C COMP. NORD
 24 METERS
 83-VI-08 TO 83-VIII-01
 8 PIECES WITH 486 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
 10-09-65



ANTI-CLOCKWISE SPECTRUM
 NB83-5741-1C COMP. EST
 NB83-5741-1C COMP. NORD
 24 METERS
 83-VI-08 TO 83-VIII-01
 8 PIECES WITH 486 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
 10-09-65

POINT 10 (FOND)

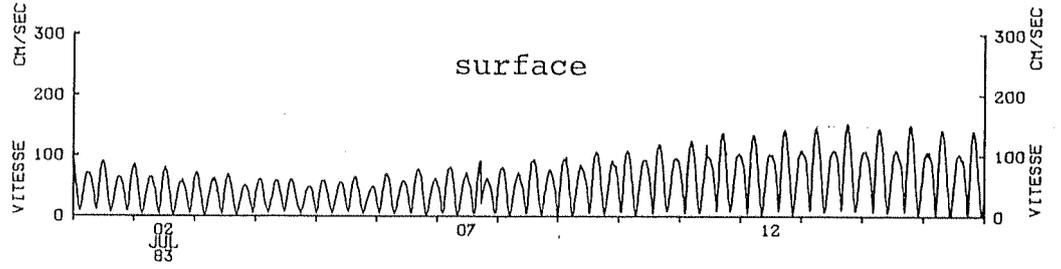
FIGURE N° 21



TEMPERATURE AU POINT 10 -SURFACE et FOND-

FIGURE N° 22

NB83-SU95-5W
3 H



NB83-SU95-5W
3 H

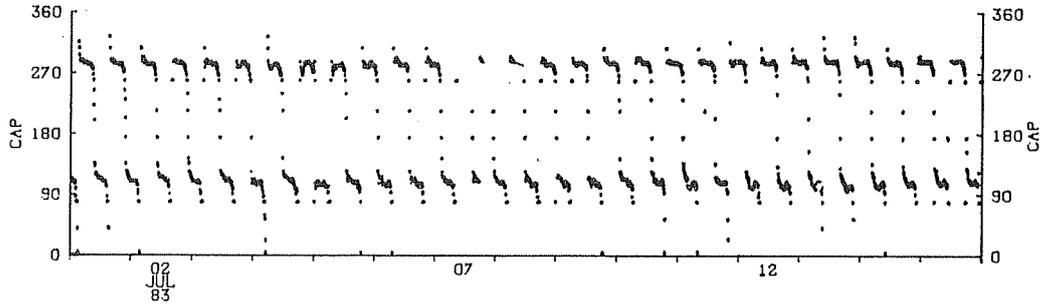
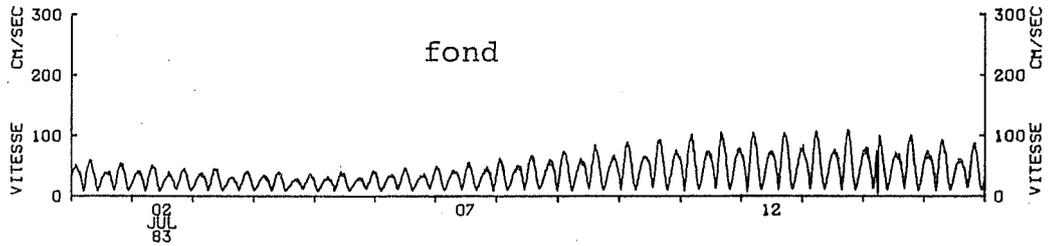


FIGURE N° 23 a
P O I N T 5

NB83-3946-1W
29 H



NB83-3946-1W
29 H

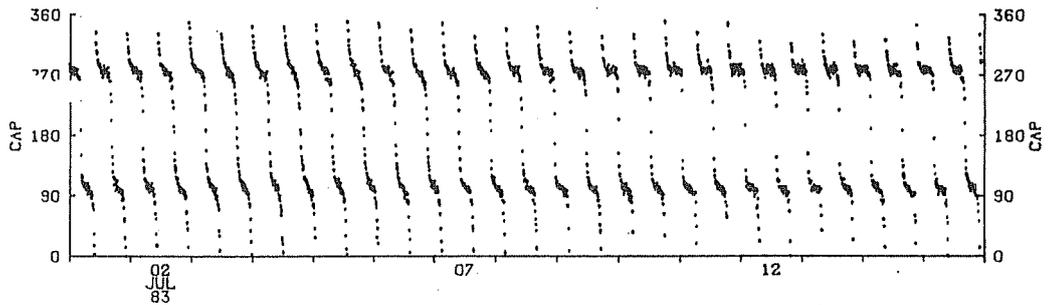
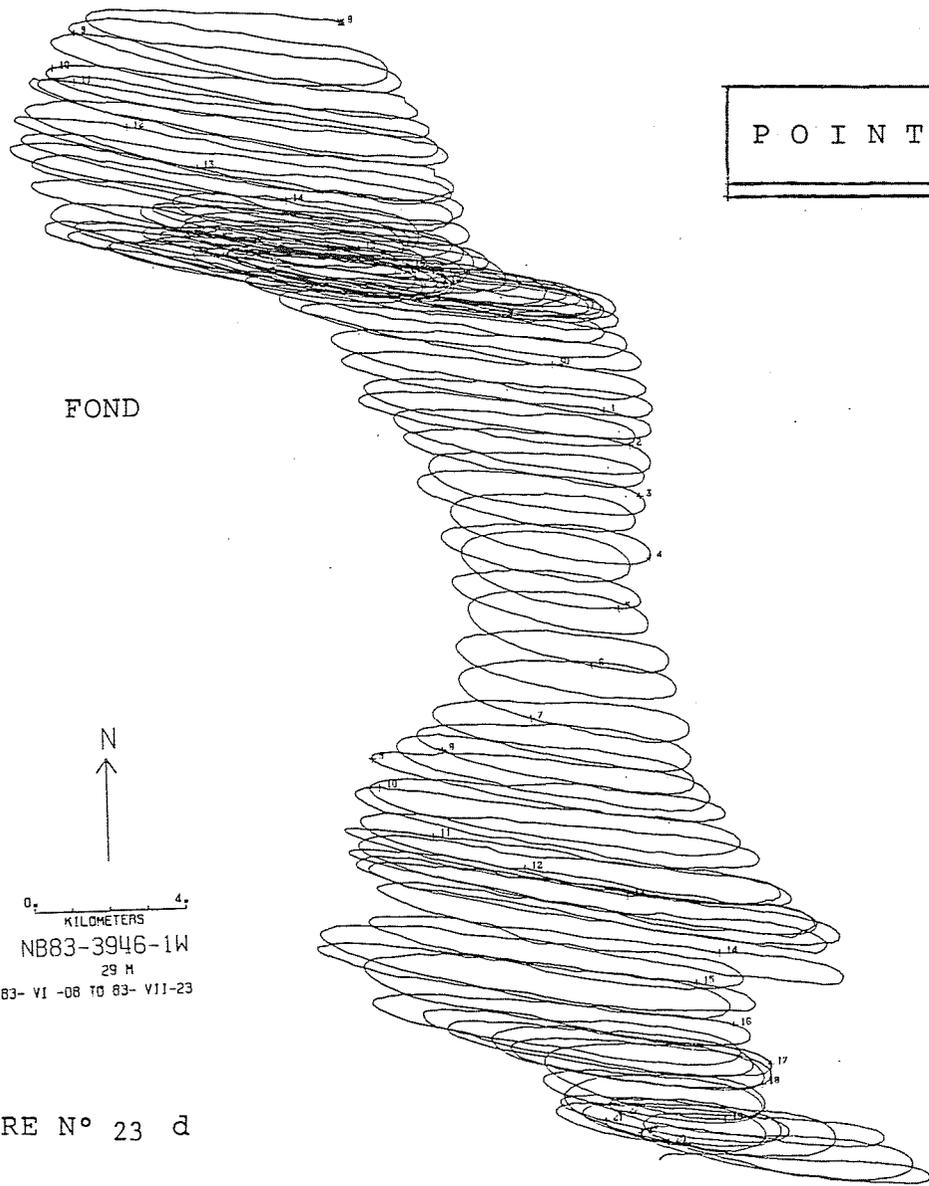


FIGURE N° 23 b
P O I N T 5

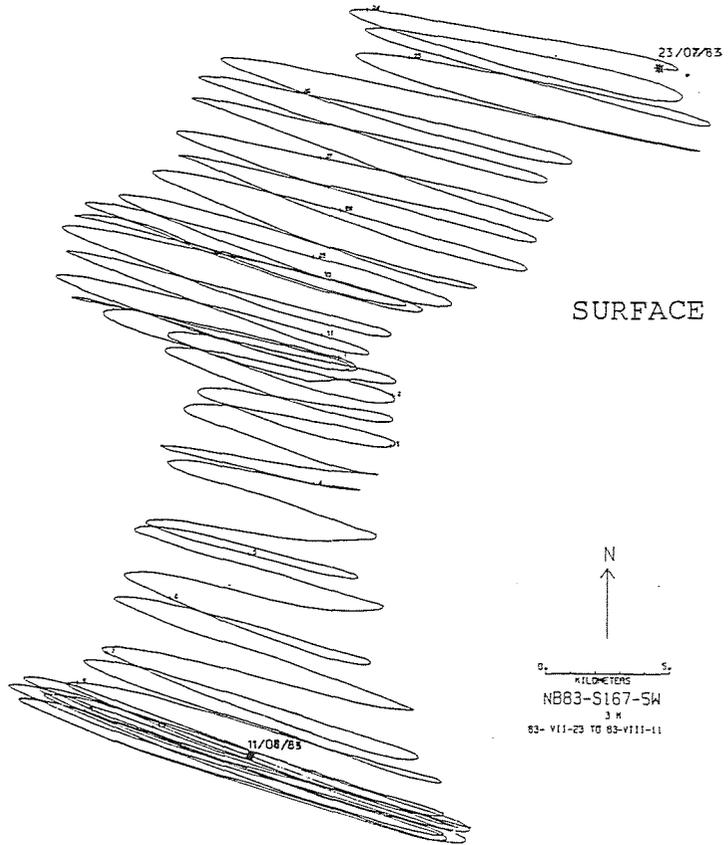


P O I N T 5

FOND

N
↑
0 4
KILOMETERS
NB83-3946-1W
29 H
83- VI -08 TO 83- VII-23

FIGURE N° 23 d

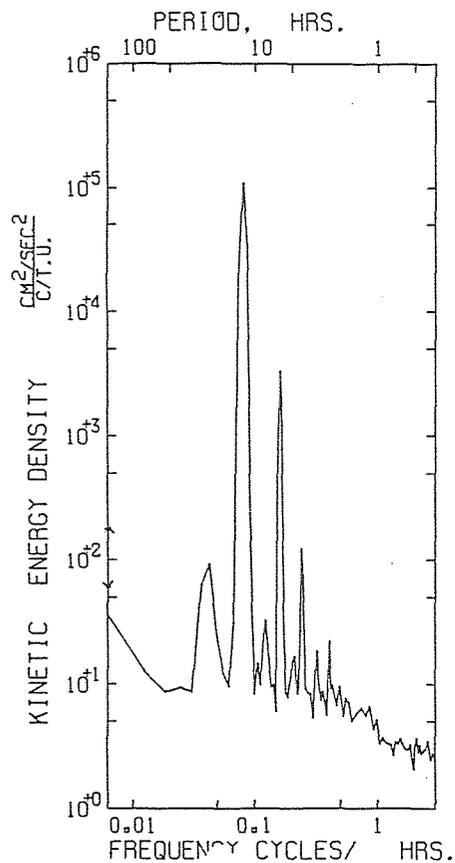


SURFACE

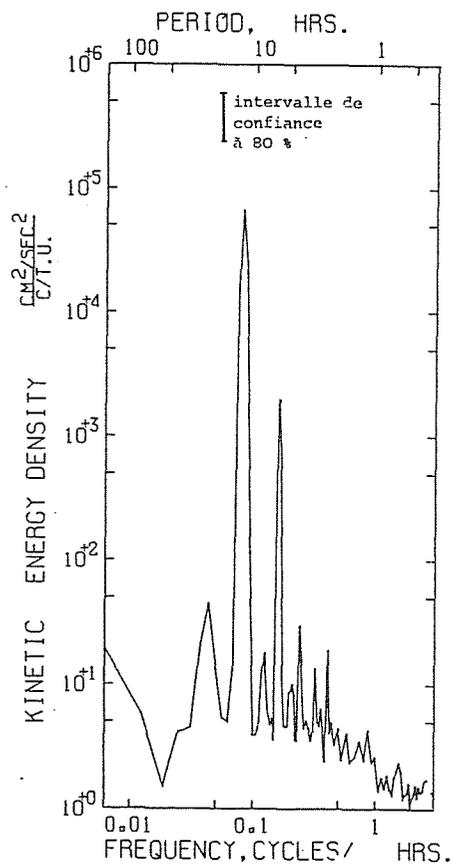
N
↑
0 5
KILOMETERS
NB83-S167-5W
3 H
83- VII-23 TO 83-VIII-11

FIGURE N° 23 c

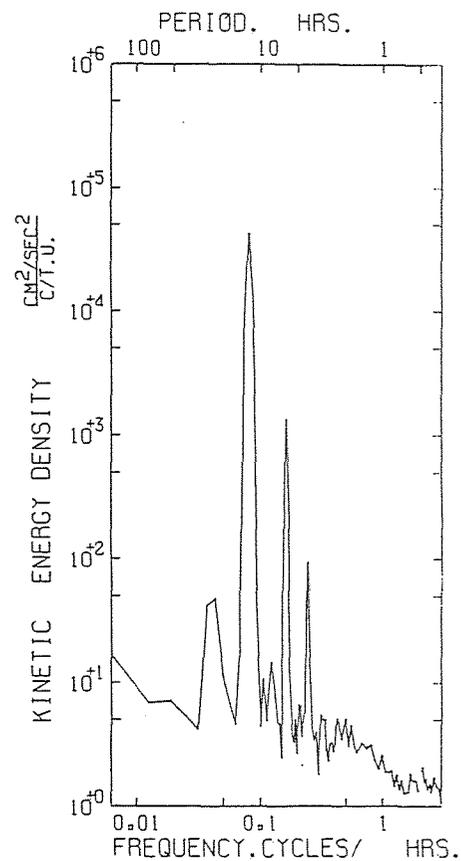
POINT 5 (FOND)



TOTAL SPECTRUM
 NB83-3946-1W COMP. EST
 NB83-3946-1W COMP. NORD
 30 METERS
 83-VI-08 TO 83-VII-18
 6 PIECES WITH 486 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
09-09-85



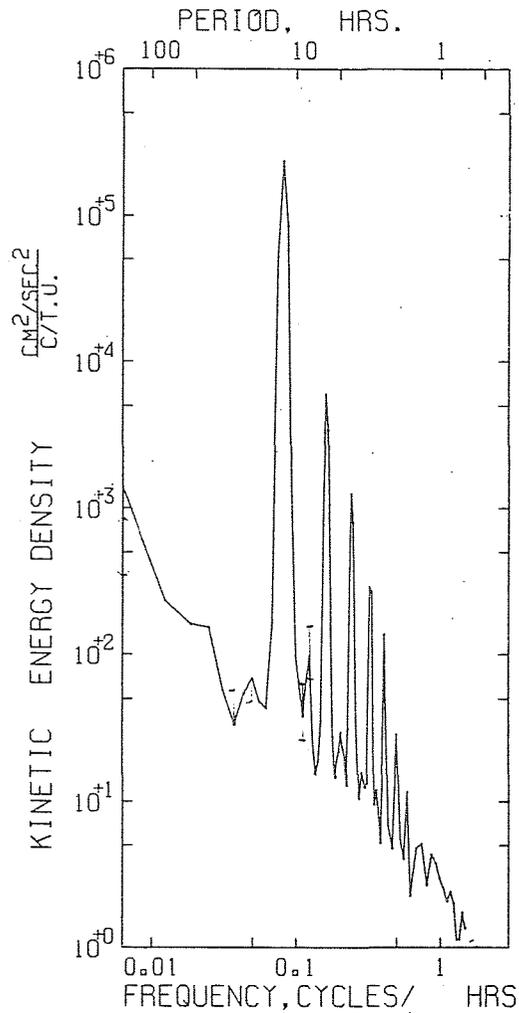
ANTI-CLOCKWISE SPECTRUM
 NB83-3946-1W COMP. EST
 NB83-3946-1W COMP. NORD
 30 METERS
 83-VI-08 TO 83-VII-18
 6 PIECES WITH 486 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
09-09-85



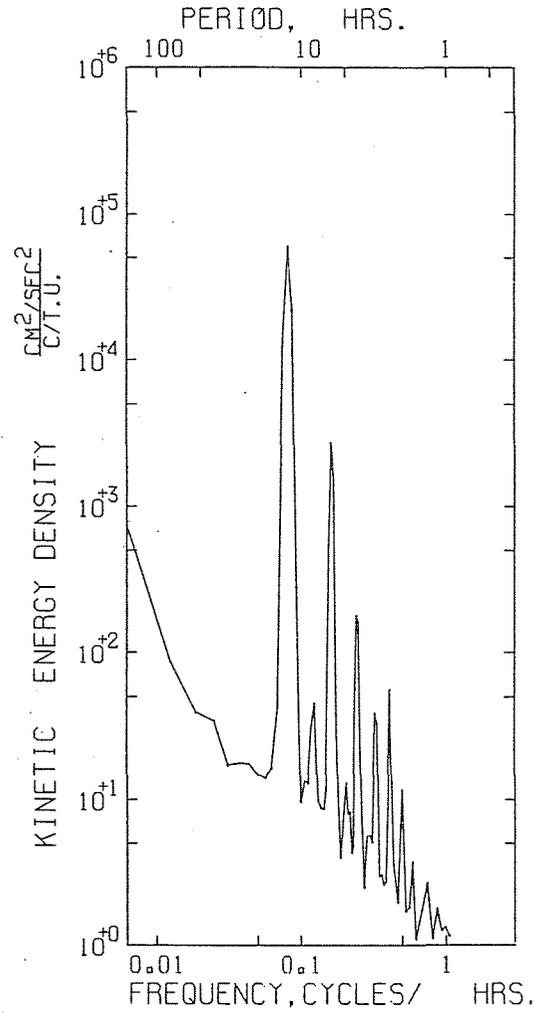
CLOCKWISE SPECTRUM
 NB83-3946-1W COMP. EST
 NB83-3946-1W COMP. NORD
 30 METERS
 83-VI-08 TO 83-VII-18
 6 PIECES WITH 486 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
09-09-85

FIGURE N° 24

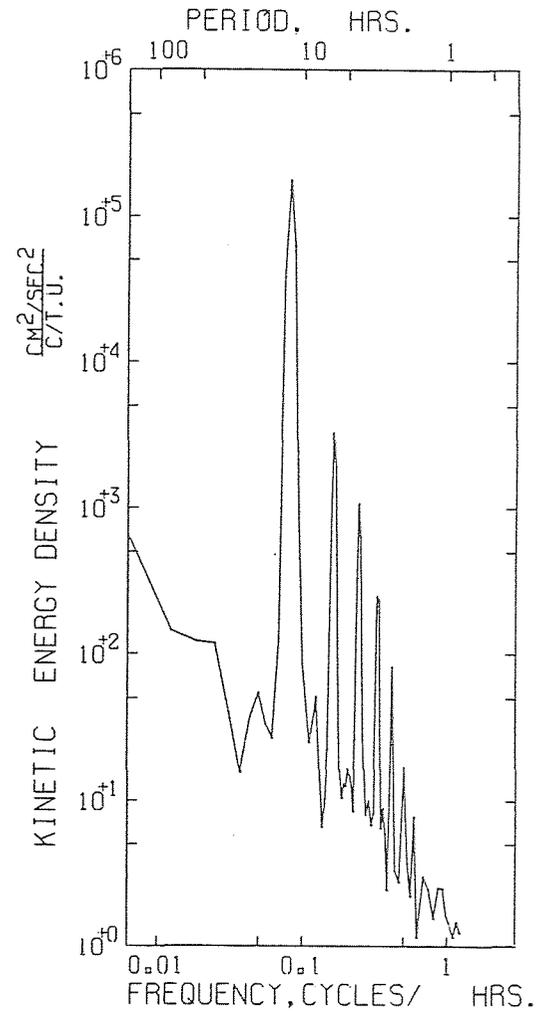
POINT 2 (SURFACE)



TOTAL SPECTRUM
 NB83-S188-2W COMP. EST
 NB83-S188-2W COMP. NORD
 3 METERS
 83-VII-21 TO 83-IX-13
 8 PIECES WITH 486 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
09-09-85



CLOCKWISE SPECTRUM
 NB83-S188-2W COMP. EST
 NB83-S188-2W COMP. NORD
 3 METERS
 83-VII-21 TO 83-IX-13
 8 PIECES WITH 486 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
09-09-85



ANTI-CLOCKWISE SPECTRUM
 NB83-S188-2W COMP. EST
 NB83-S188-2W COMP. NORD
 3 METERS
 83-VII-21 TO 83-IX-13
 8 PIECES WITH 486 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
09-09-85

FIGURE N° 25

Nous constatons également des pics moins importants que les premiers mais significatifs aux périodes diurnes, tiers-diurnes, huitième-diurnes et dixième-diurnes.

Le fait remarquable est la présence en ce point d'ondes tiers-diurnes. Ceci reste à confirmer en faisant une analyse harmonique très fine. L'hodographe intégré montre que la rotation du vecteur vitesse est dans le sens positif (cyclonique).

a,4) point 6

Ce point se situe au nord-est de Jersey (Figure 18)

L'analyse spectrale au point 6, en surface et au fond, (Figures 26 et 27) montre la même importance, en surface, des deux groupes d'ondes qui constituent les périodes quart-diurnes et sixième-diurnes. C'est le seul point où nous constatons un déphasage important entre le courant de surface et au fond. L'intensité maximale de courant au fond est de l'ordre de 0.7 m/s en vive eau, par contre celle en surface est de l'ordre de 1 m/s.

a,5) point 7

Ce point se situe au sud-ouest de Guernesey (Figure 18).

Le courant en surface présente une dissymétrie entre le flot et le jusant. La vitesse maximale au flot est de l'ordre de 1.20 m/s en surface et en vive eau (Figure 28).

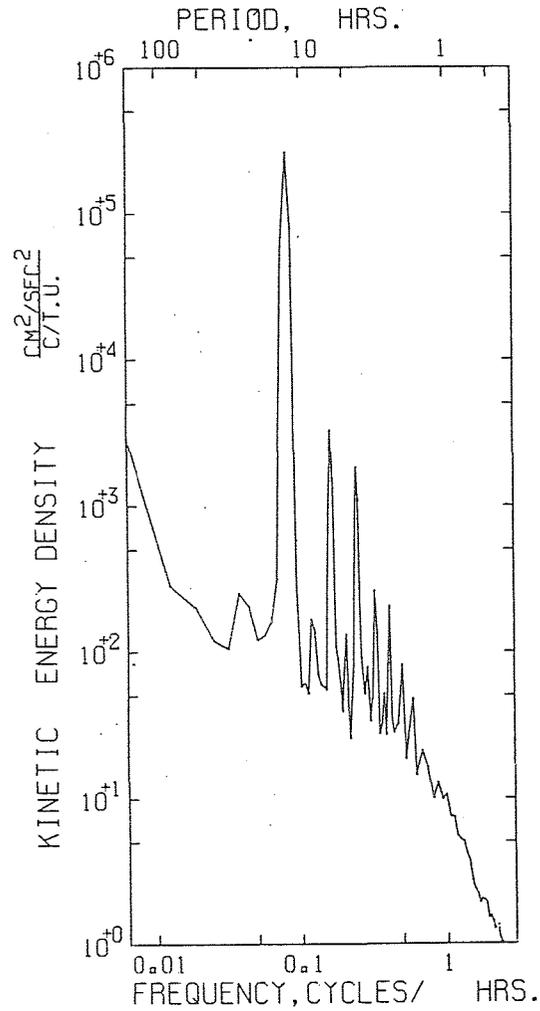
b) Mesures lagrangiennes

Pour pallier au manque d'enregistrements de courant intermédiaire entre la surface et le fond, nous avons procédé à des lâchers de deux flotteurs au large du Cap Fréhel où la profondeur est de 30 mètres en moyenne par rapport au zéro des cartes marines.

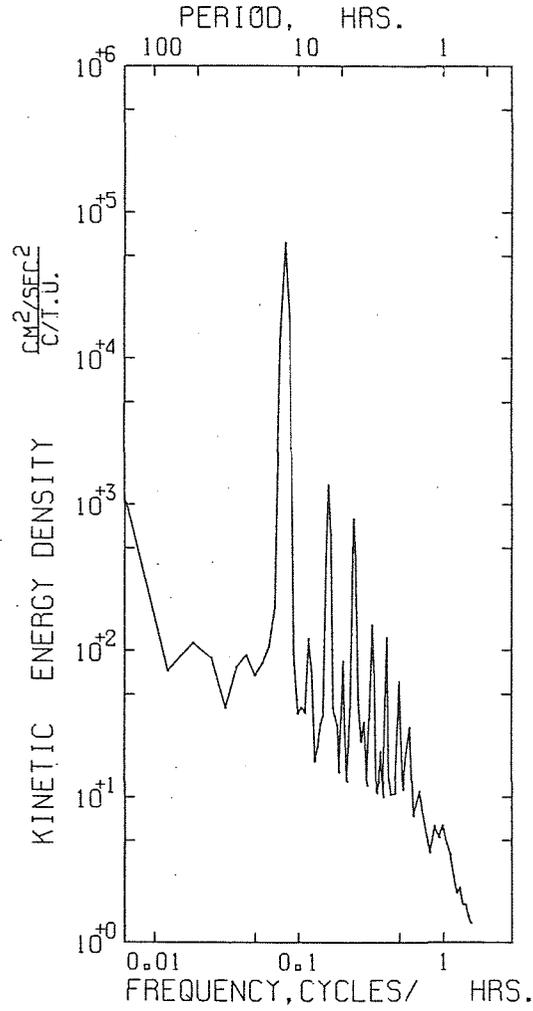
L'un des deux flotteurs était drogué à 2.5 m de la surface, l'autre à 15 m de la surface.

Les trajectoires des deux bouées sont quasiment identiques (compte tenu de l'erreur de positionnement du système Argos) jusqu'au 4 mai 1983 à

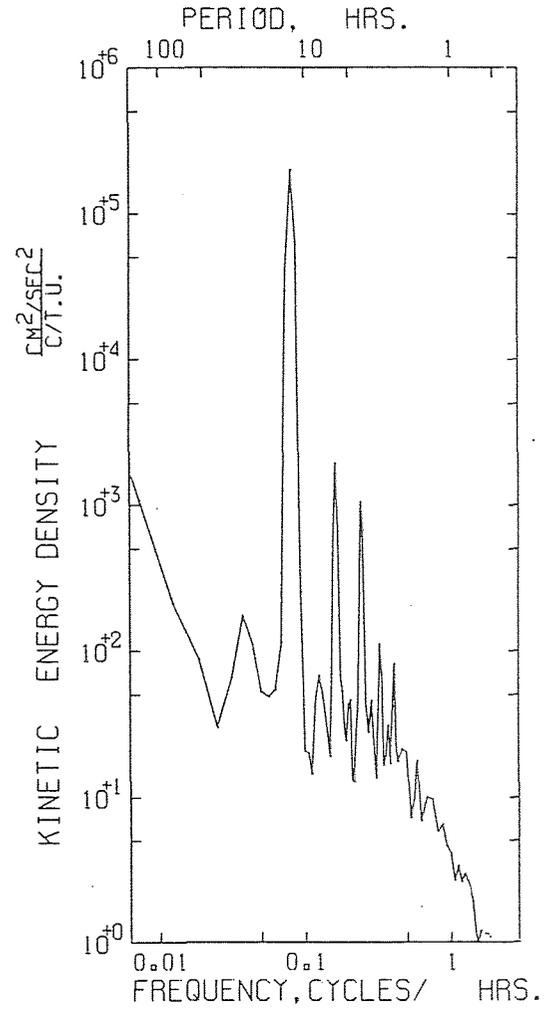
POINT 6 (SURFACE)



TOTAL SPECTRUM
 NB83-S127-6W COMP. EST
 NB83-S127-6W COMP. NORD
 2 METERS
 83-VI-08 TO 83-VII-19
 6 PIECES WITH 486 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
 10*09*85



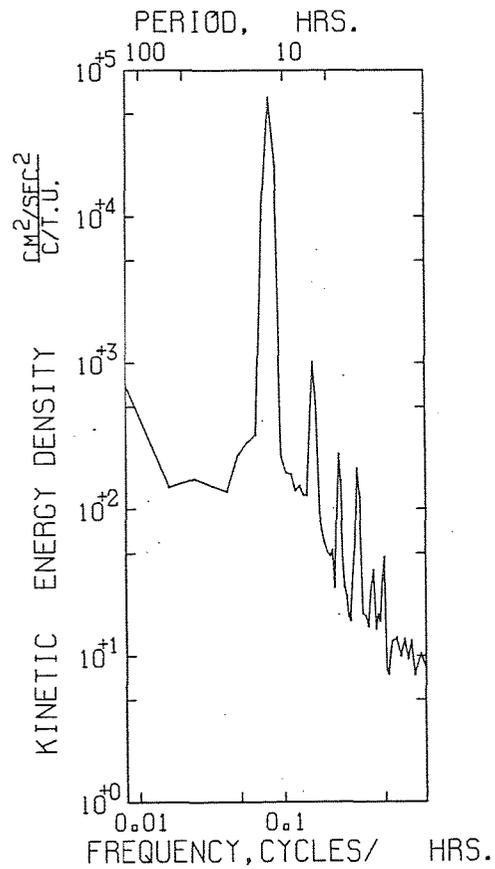
CLOCKWISE SPECTRUM
 NB83-S127-6W COMP. EST
 NB83-S127-6W COMP. NORD
 2 METERS
 83-VI-08 TO 83-VII-19
 6 PIECES WITH 486 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
 10*09*85



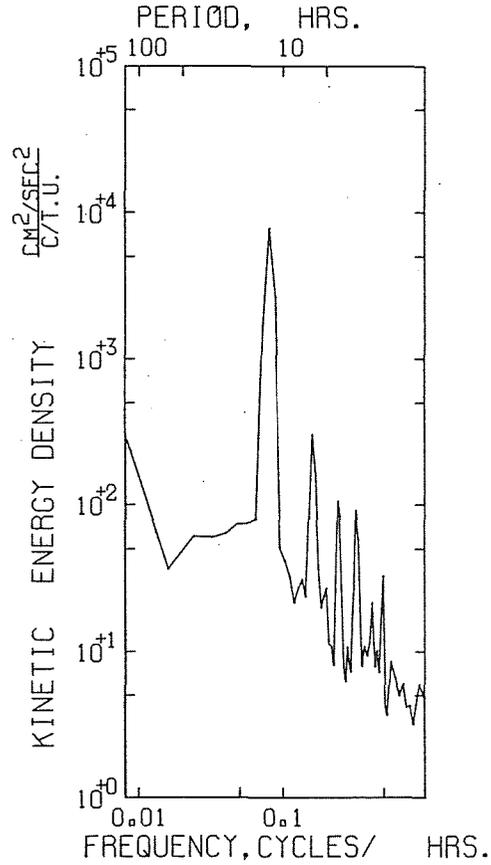
ANTI-CLOCKWISE SPECTRUM
 NB83-S127-6W COMP. EST
 NB83-S127-6W COMP. NORD
 2 METERS
 83-VI-08 TO 83-VII-19
 6 PIECES WITH 486 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
 10*09*85

FIGURE N° 24

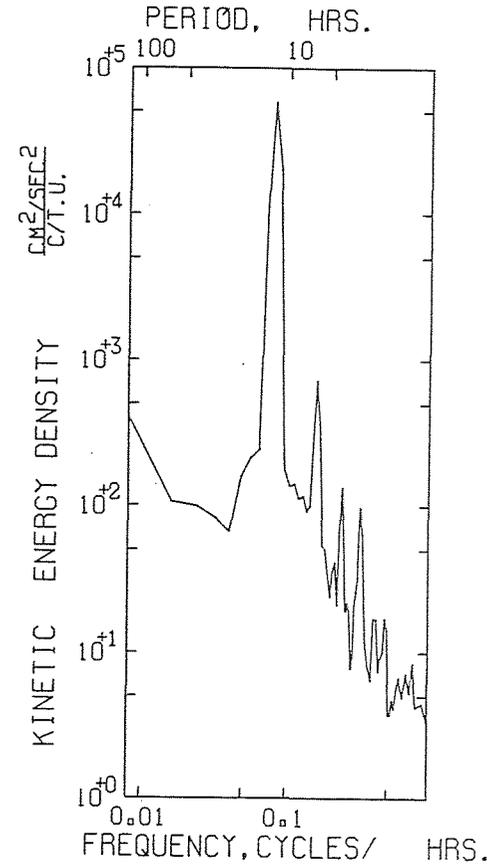
POINT 6 (FOND)



TOTAL SPECTRUM
 NB83-S13026C COMP. EST
 NB83-S13026C COMP. NORD
 35 METERS
 83-VII-21 TO 83-VIII-31
 8 PIECES WITH 125 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
24*10*65



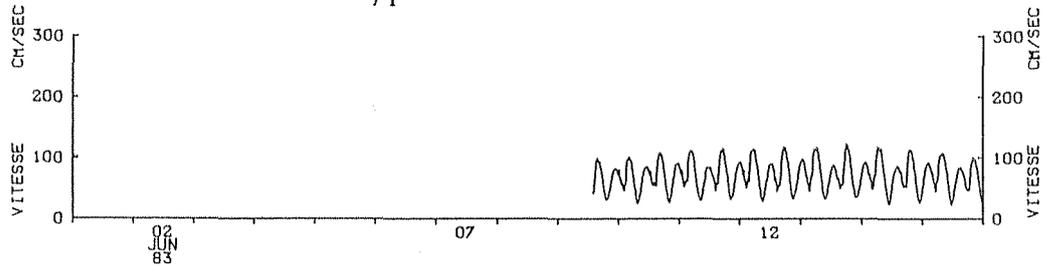
CLOCKWISE SPECTRUM
 NB83-S13026C COMP. EST
 NB83-S13026C COMP. NORD
 35 METERS
 83-VII-21 TO 83-VIII-31
 8 PIECES WITH 125 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
24*10*65



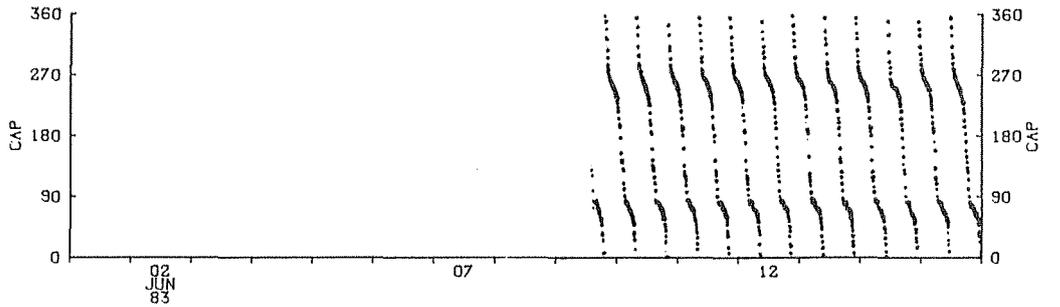
ANTI-CLOCKWISE SPECTRUM
 NB83-S13026C COMP. EST
 NB83-S13026C COMP. NORD
 35 METERS
 83-VII-21 TO 83-VIII-31
 8 PIECES WITH 125 ESTIMATES
 PER PIECE. AVERAGED OVER
 1 ADJACENT FREQUENCY BANDS
24*10*65

FIGURE N° 27

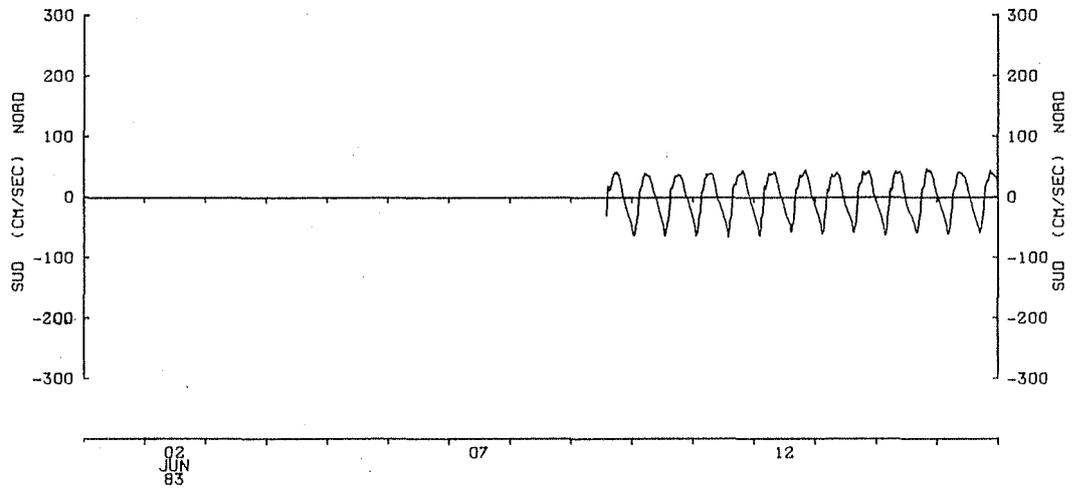
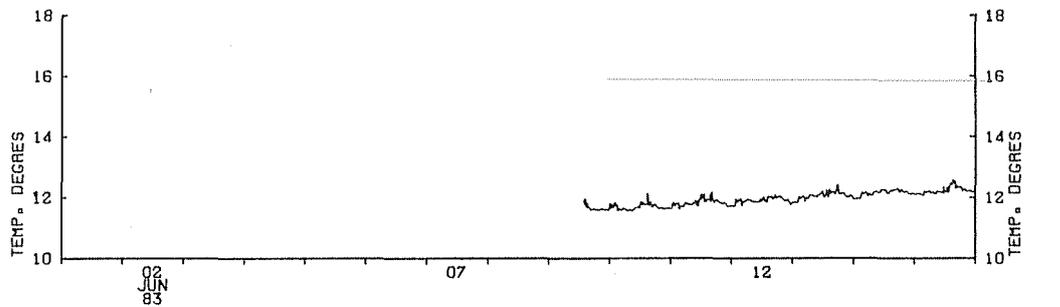
NB83-S164-7W
3 M



NB83-S164-7W
3 M



NB83-S164-7W
3 M



NB83-S164-7W
3 M

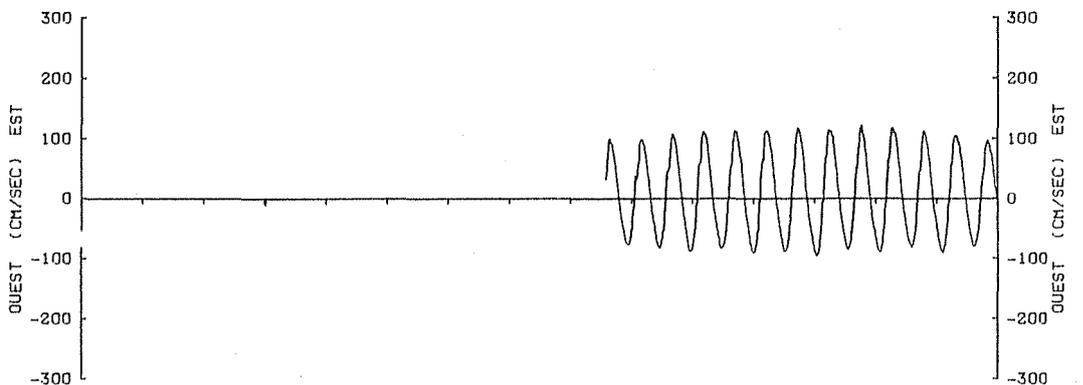


FIGURE N° 28
POINT 7 - SURFACE

20 h 35 T.U. où nous constatons une différence importante (2 milles nautiques) (voir Figure 29).

Cette différence s'explique par un vent de sud, d'intensité variable de 11 m/s à 15 m/s, qui commence à souffler sur la zone à 17 h T.U (04 mai 1983).

Nous signalons que la bouée droguée à 15 m a échoué sur les hauts fonds, très nombreux au voisinage du Cap d'Erquy.

c) Conclusion

Les mesures montrent que l'intensité du courant de marée, dans cette zone, varie très peu sur la verticale, sauf près du fond. Par contre sa phase ne subit aucune modification sauf au point 6 (du moins dans les endroits où nous possédons les mesures).

L'analyse spectrale nous a permis d'avoir une idée globale sur la décomposition du spectre de courant en différents points du Golfe Normand Breton.

Il ressort de ces analyses que :

- les ondes dominantes sont les ondes semi-diurnes,
- l'importance des ondes quart-diurnes dans tous les points de mesures,
- la génération d'ondes de hautes fréquences (sixième-diurne, huitième-diurne, etc...) dans les zones où la topographie est tourmentée.

En ce qui concerne le sillage des îles, le courant au point 12, situé au Sud-Est de Jersey, subit une oscillation de période égale à 1 heure environ quand le courant porte au Sud-Est. Cette oscillation est observée en surface et au fond. Ceci montre que le sillage de l'île affecte toute la colonne d'eau (Figure 30).

Ces résultats montrent que le courant est barotrope (sauf au voisinage du point 6), ce qui justifie l'utilisation d'un modèle bidimensionnel.

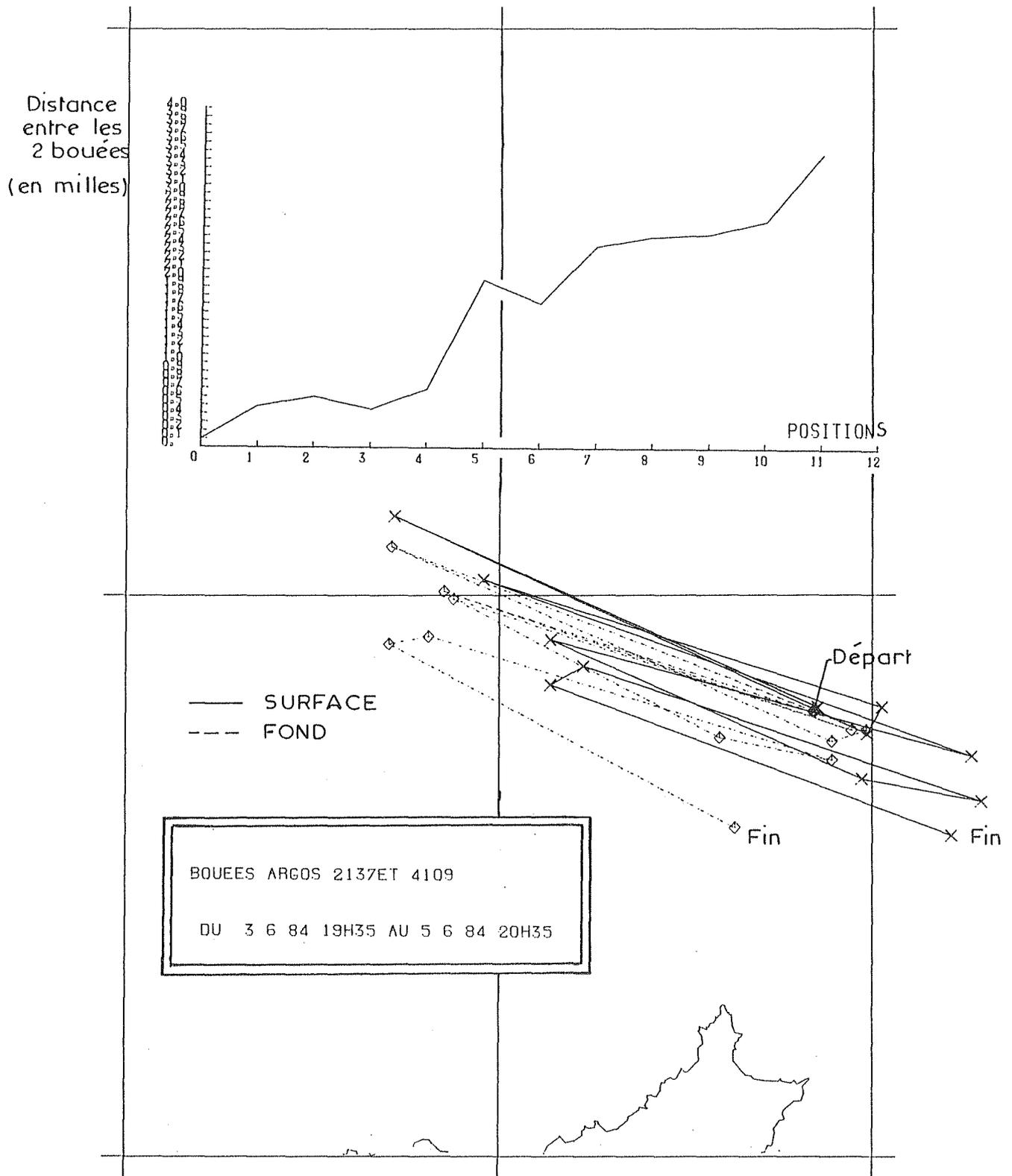
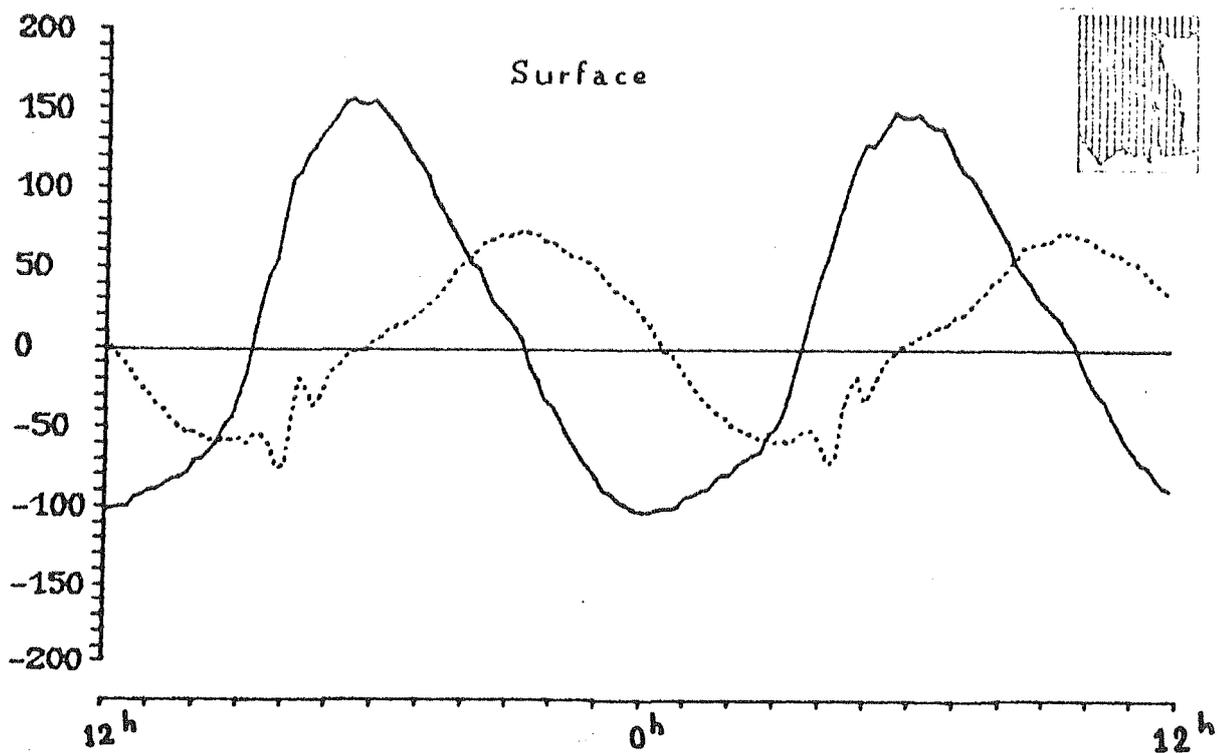
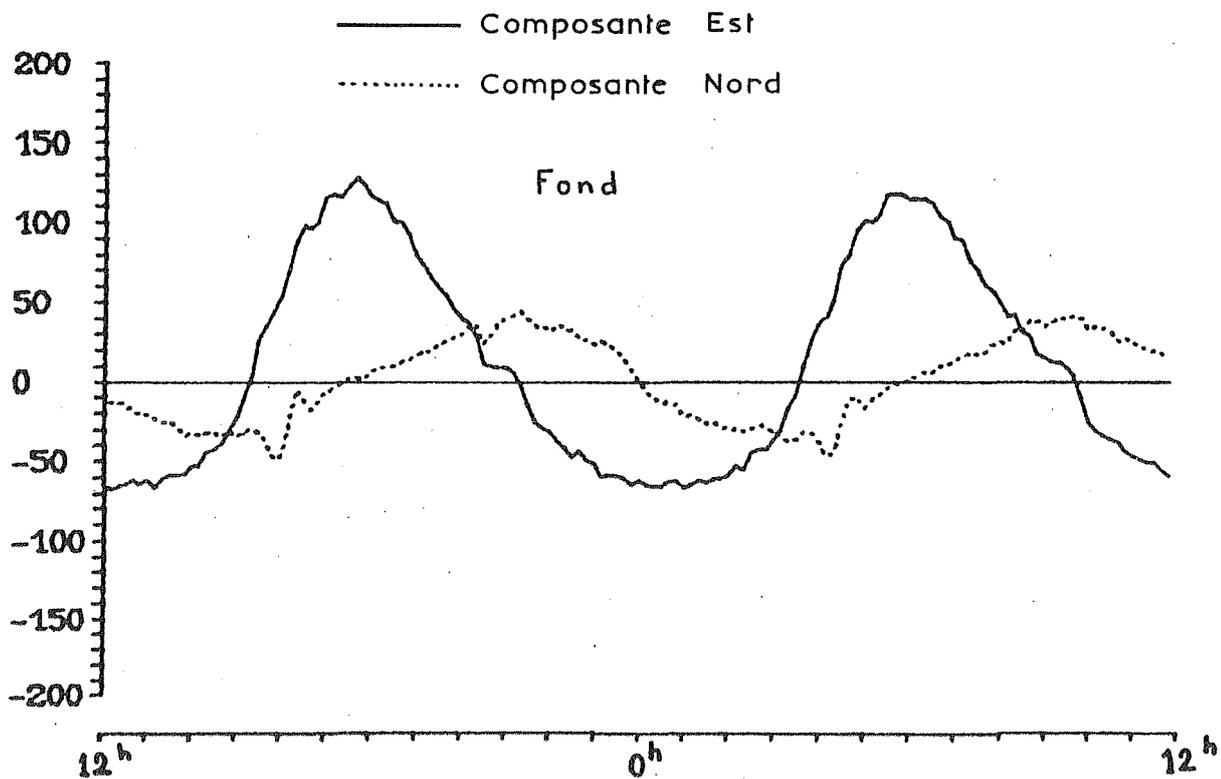


FIGURE N° 29



Le 18 / 4 / 84



Le 18 / 4 / 84

19 / 4 / 84

FIGURE N° 30

III-2 COMPARAISON ENTRE MESURES ET RESULTATS DU MODELE

La simulation des courants et hauteurs d'eau par le modèle numérique a été faite pour les marées réelles suivantes :

- le 11-06-1983 (Coefficient 93)
- le 16-07-1983 (Coefficient 72)

L'intensité du vent pendant ces périodes était faible (inférieure ou égale à 5 m/s).

D'autre part, les résultats ont été comparés aux hauteurs dans deux ports (SAINT MALO et SAINT HELIER à JERSEY) et aux mesures de courants en plusieurs points du Golfe Normand-Breton.

* Limite de la comparaison

La différence essentielle, entre modèle et mesures, est le fait que le modèle ne reproduit que des phénomènes moyens sur la hauteur d'eau dont l'échelle spatiale (horizontale) est supérieure à la dimension de la maille.

Par contre, les appareils de mesures reproduisent des phénomènes spécifiques à l'endroit où ils sont placés.

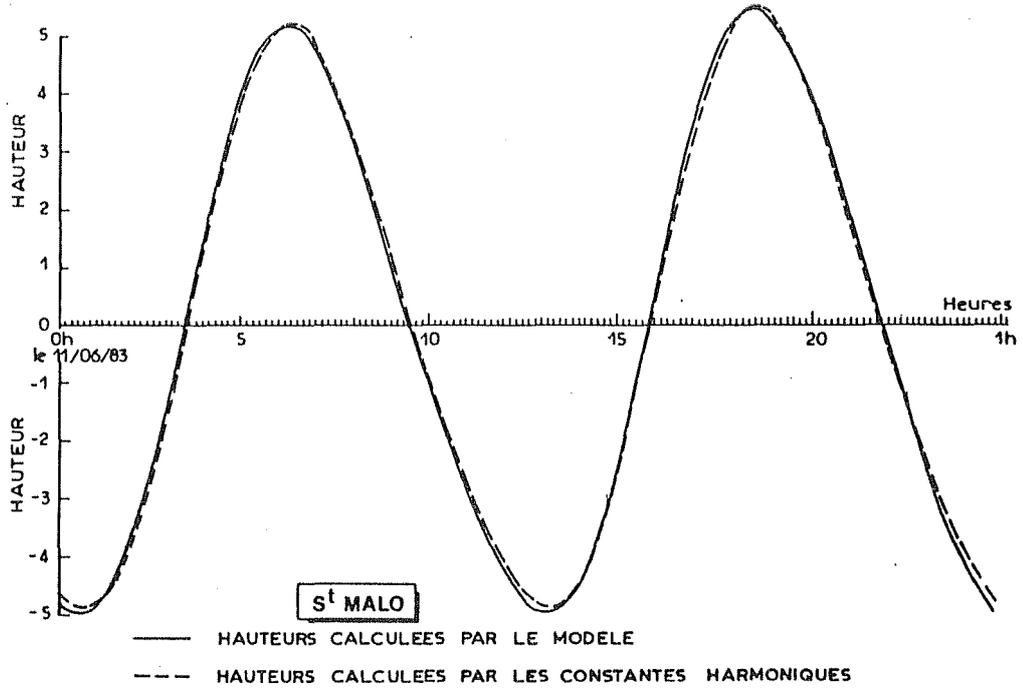
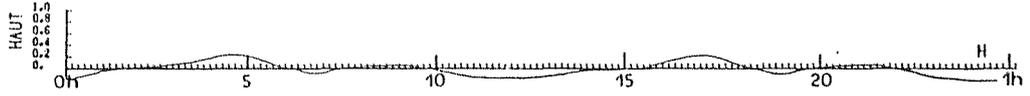
D'autres raisons, mais d'ordre différent, peuvent fausser la comparaison :

- Le modèle ne tient pas compte de l'effet du vent, il faudra donc veiller à établir les comparaisons pour des situations météorologiques calmes.
- Le modèle ne présente pas fidèlement les zones découvrantes.
- L'imprécision inhérente aux appareils de mesures : les courantographes donnent une imprécision de 7° sur le cap et de 10 cm/s sur l'intensité.

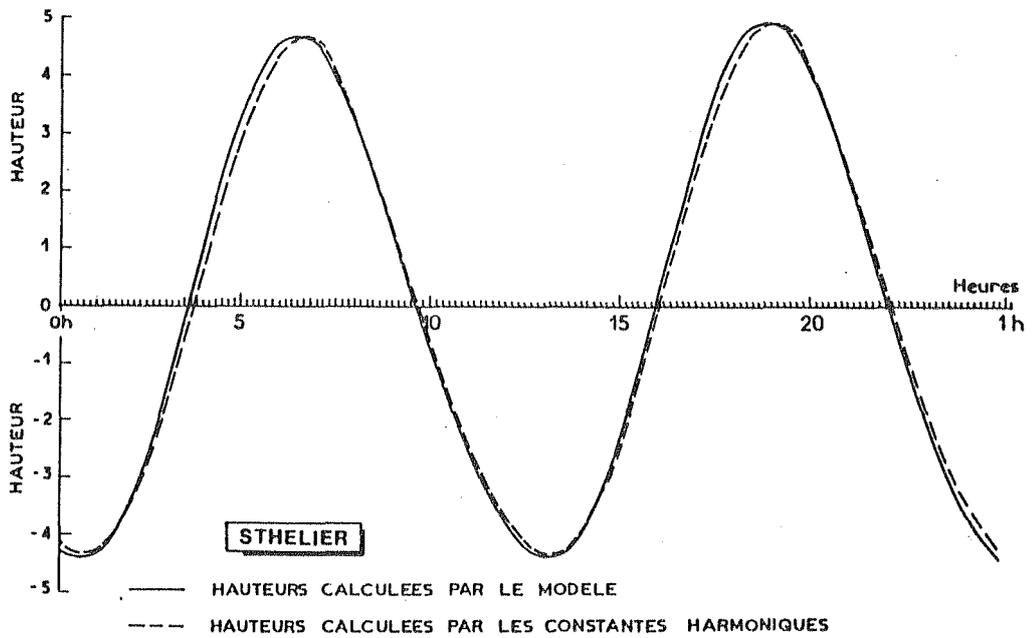
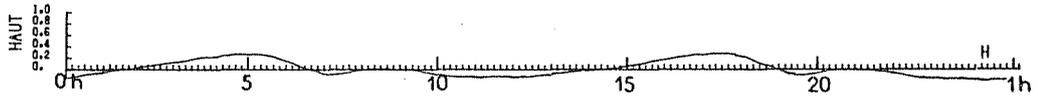
III-2-1 COMPARAISON DES NIVEAUX DE MAREE (Figures 31 et 32)

Globalement, l'erreur relative commise sur les hauteurs est de 2%. Cette erreur est due essentiellement au léger déphasage dans le temps qui

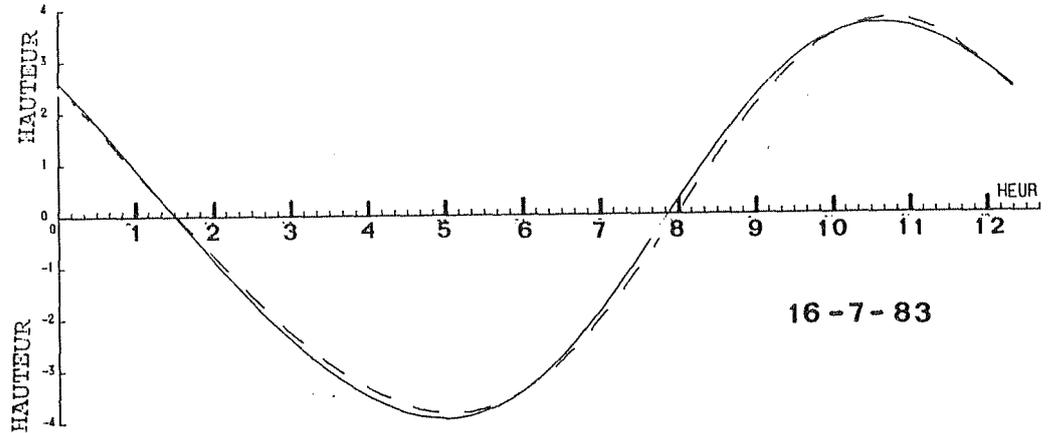
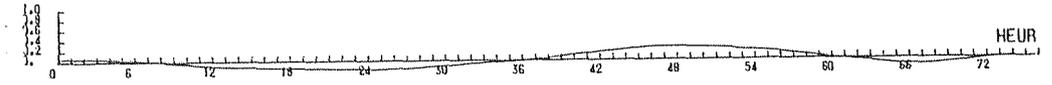
HAUT.PRE.-HAUT.MOD. COEF. 93



HAUT.PRE.-HAUT.MOD.

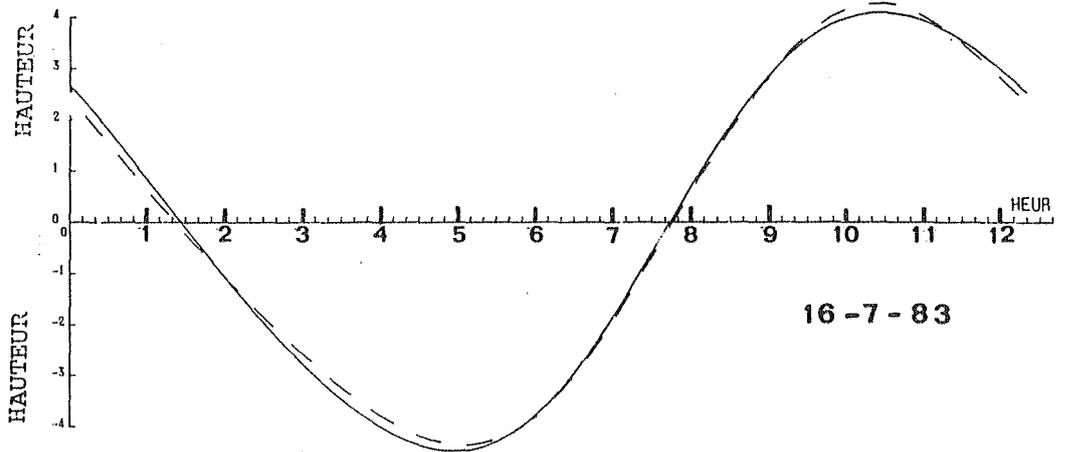


HAUT.PRE.-HAUT.MOD. COEF. 72



St HELIER

HAUT.PRE.-HAUT.MOD.



St MALO

— HAUTEURS CALCULEES PAR LE MODELE
 - - - HAUTEURS CALCULEES PAR LES CONSTANTES HARMONIQUES

FIGURE N° 32

se produit au moment de basse mer et qui persiste jusqu'à la pleine mer suivante.

Ce décalage dans le temps peut être expliqué, dans le cas de SAINT MALO, par le fait que la propagation de la marée n'est pas exactement simulée, compte tenu de la schématisation de la bathymétrie près des MINQUIERS.

Par contre à SAINT HELLIER, nous ne possédons pas certaines constantes harmoniques mesurées (MNS_2 , μ_2 , $2MS_2$ et N_2). Pour un souci de cohérence, nous avons pris les valeurs de ces ondes issues du modèle physique tournant de la Manche.

III-2-2 COMPARAISON DES COURANTS

a) aux points 10 et 5 et pour une marée de vive eau

(Figures 33 et 34)

La comparaison entre les résultats du modèle et les mesures montre un accord remarquable.

Toutefois, les mesures de courant au point 5 montrent une diminution brusque et très forte de la composante Nord-Sud en flot et en jusant également.

Sur d'autres enregistrements au fond de ce même point, nous n'observons pas cette diminution.

L'erreur relative maximum, en ne tenant pas compte de ces oscillations est de 6 %.

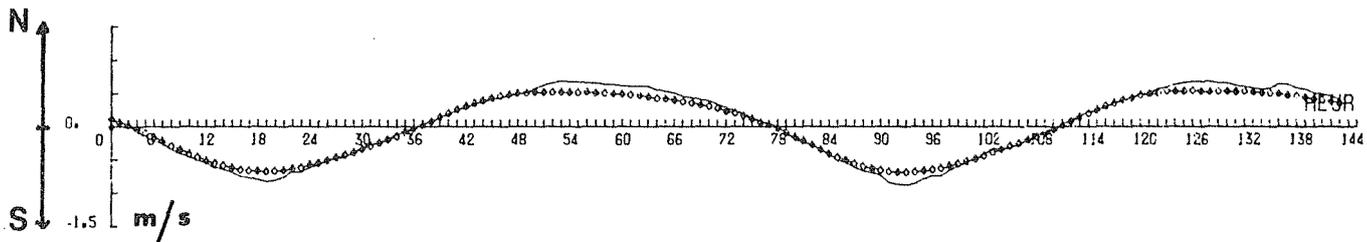
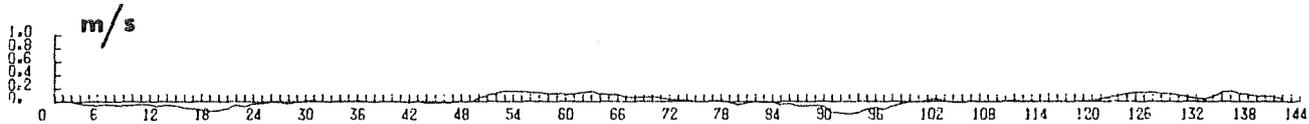
b) au point 2 et pour une marée de vive eau et une marée moyenne

Marée moyenne (Figure 35)

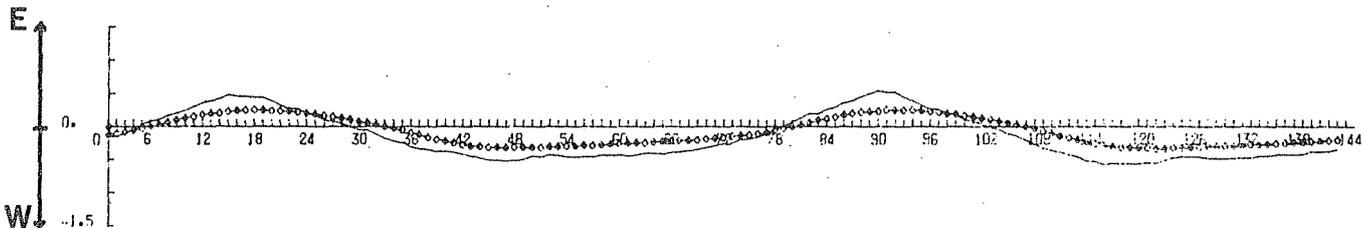
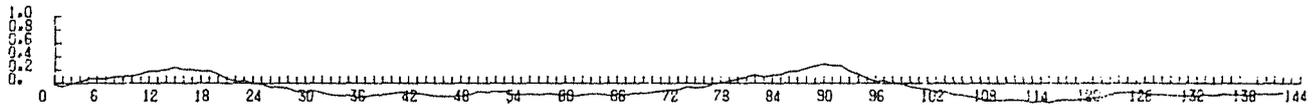
L'accord est remarquable entre le courant mesuré et celui calculé par le modèle.

L'erreur relative maximum sur l'intensité est de 16 %.

POINT 10



COMPOSANTE NORD-SUD



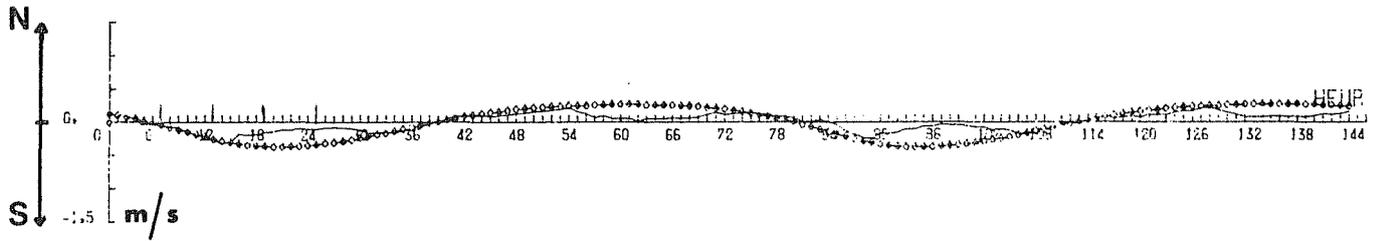
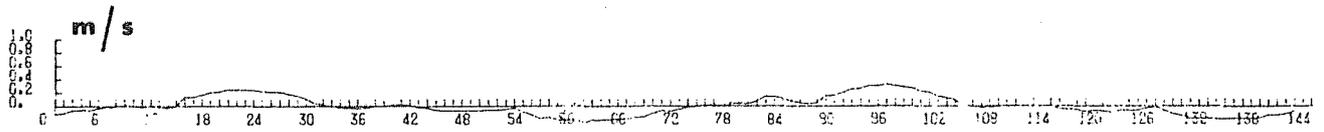
COMPOSANTE EST-OUEST DU COURANT

heure : 1 mm = 10 mn

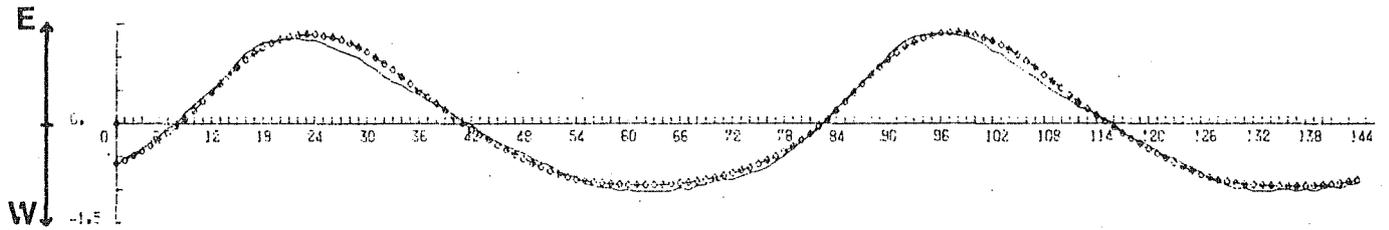
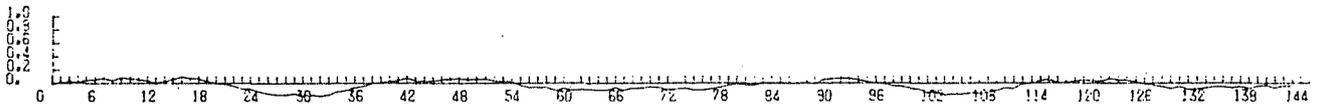
COEF 93

FIGURE N° 33

P O I N T 5



COMPOSANTE NORD-SUD



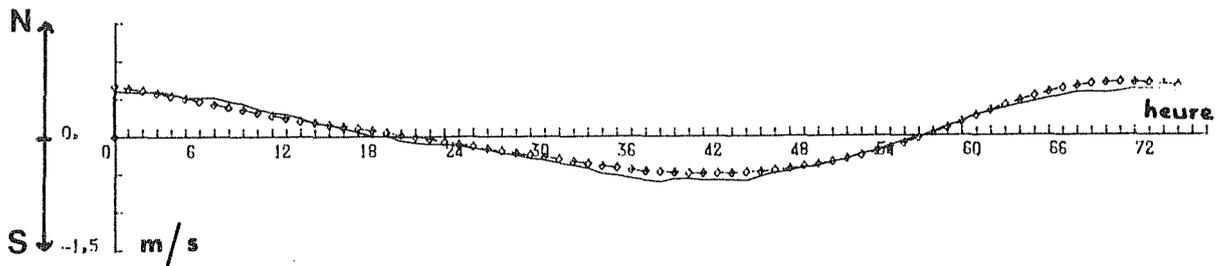
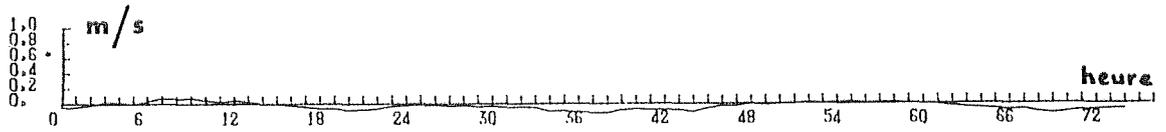
COMPOSANTE EST-OUEST DU COURANT

heure : 1 mm = 10 mn

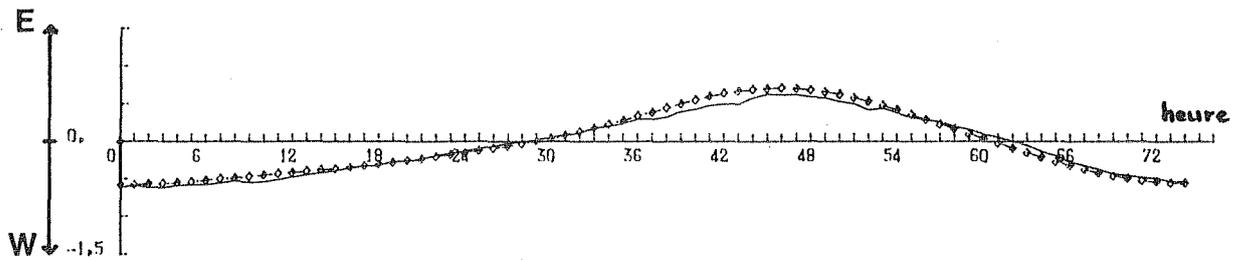
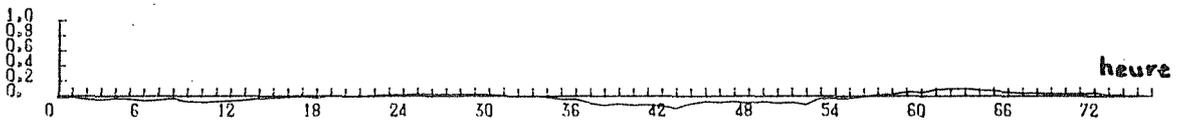
COEF 93

FIGURE N° 34

POINT 2



COMPOSANTE NORD-SUD



COMPOSANTE EST-OUEST DU COURANT

heure : 2 mm = 10 mn

COEF 72

Marée de vive eau (Figure 36)

Par contre, pour cette marée, la comparaison est moins bonne à cause du déphasage très important.

c) aux points 6 et 7 (Figures 37 et 38)

Pour ces points placés de chaque côté de la zone où évolue le front (Cf. Chapitre I), le résidu (différence entre courant calculé et celui mesuré en surface) pour une marée de vive eau moyenne est :

- dans le cas du point 6, est Nord-Ouest
- dans le cas du point 7, dirigé vers le Sud.

Nous constatons également que ce résidu est nul de P.M. + 1 à P.M. + 3 (P.M. de SAINT MALO).

Nous avons présenté en figure 39 l'évolution simultanée des températures aux points 7 (surface), 2 (surface) et 6 (surface et fond).

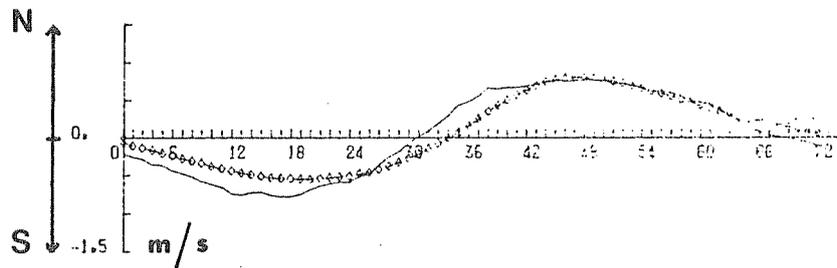
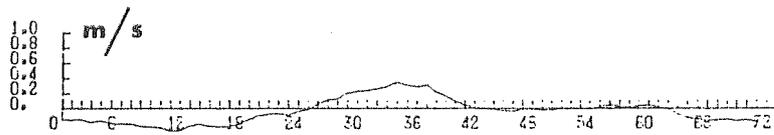
Les températures en 2 et 7 varient peu au cours de la marée et sont représentatives de deux masses distinctes : l'eau "Manche Ouest" d'une part (zone froide en été) et l'eau "Cotentin" d'autre part, plus chaude. Les températures de ces deux points enveloppent la température au point 6 (surface et fond). Ce résultat est conforme à la description faite par PINGREE et al (1974) (cf. chap. I).

L'évolution de la température au point 6 (surface et fond) met en évidence le passage du front. En effet, le "premier" passage du front se produit à P.M. + 1 (Il s'agit de la pleine mer à Saint-Malo). A partir de cette heure marée jusqu'à P.M. + 3, le point 6 se situe en zone homogène. Ce résultat montre que le résidu observé est dû, dans une large mesure aux courants de densité.

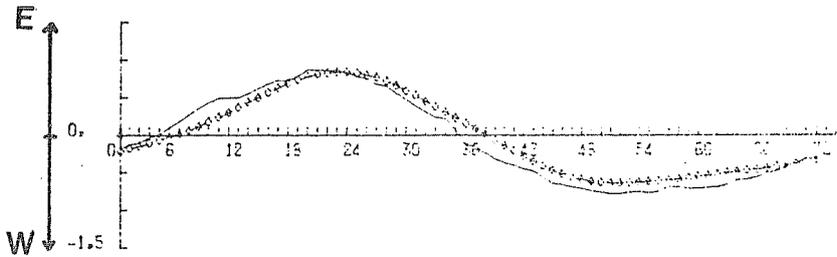
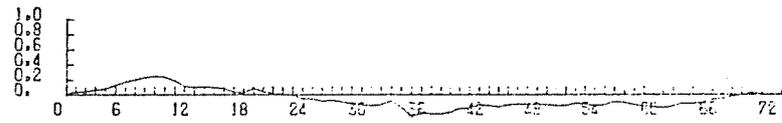
Pour le reste de la marée, le résidu atteint son maximum au voisinage de P.M. - 1. C'est à cette heure marée que le gradient entre la surface et le fond est maximum. Ce qui signifie que le point 6 à P.M. - 1 se situe près du front.

L'image satellite prise en situation de vive eau (coef 90) à P.M. - 42 mn montre que le front est au voisinage du point 6 (présenté par un rond) et son orientation est Nord-Est.

POINT 2



COMPOSANTE NORD-SUD



COMPOSANTE EST-OUEST DU COURANT
heure : 1 mm = 10 mn

COEF 93

POINT 6

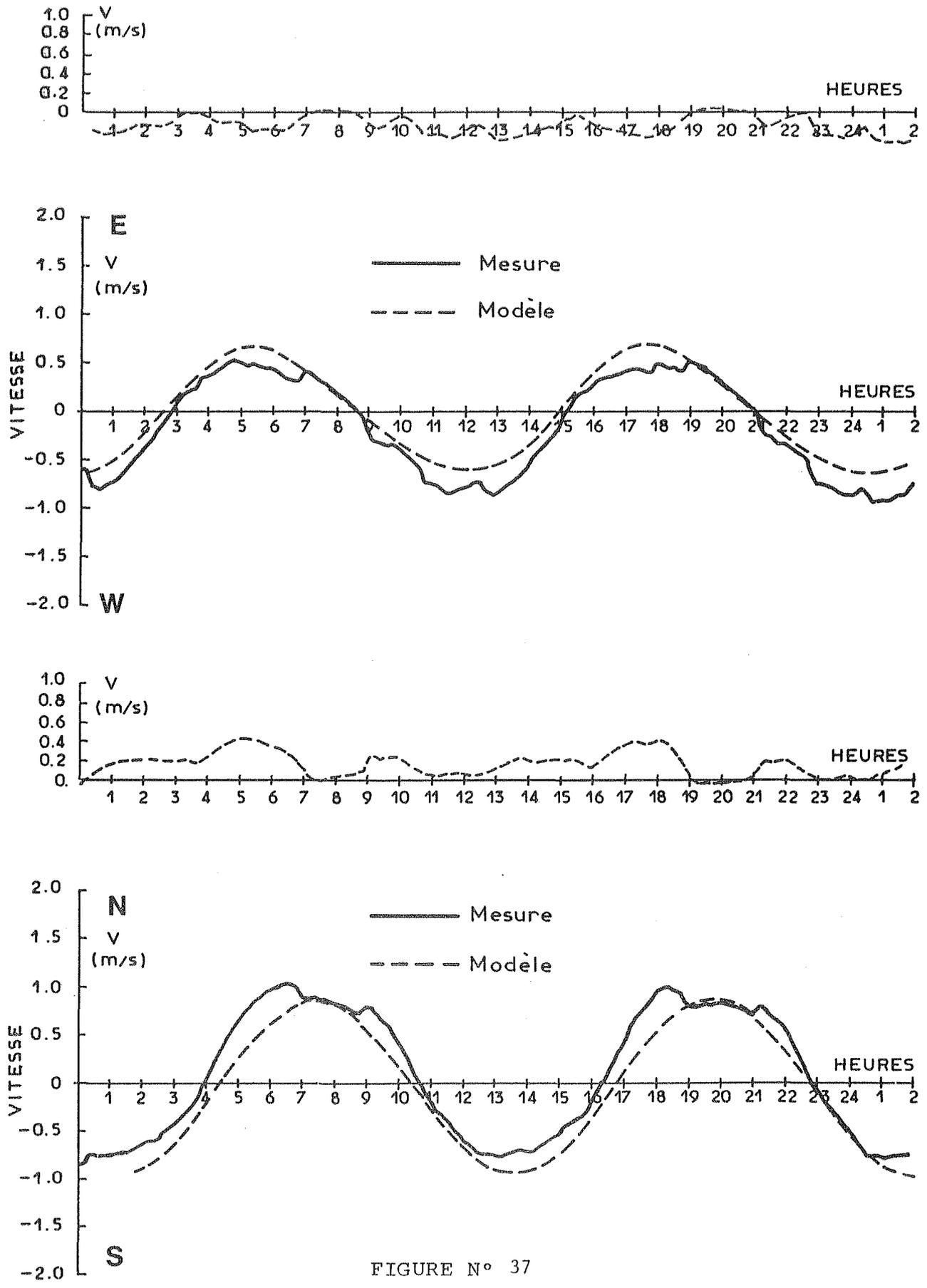
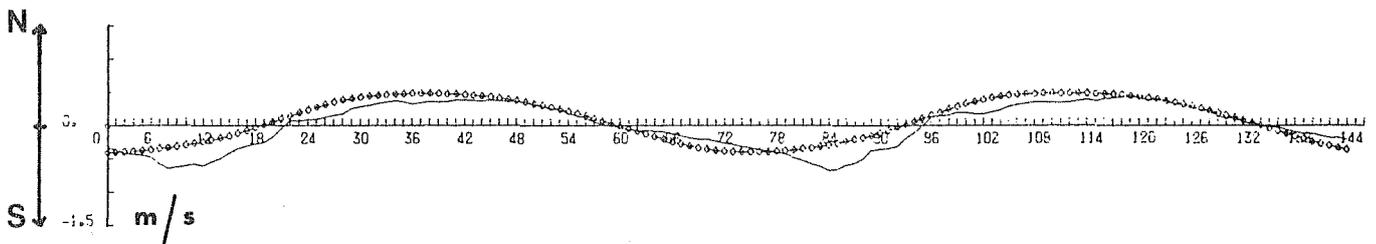
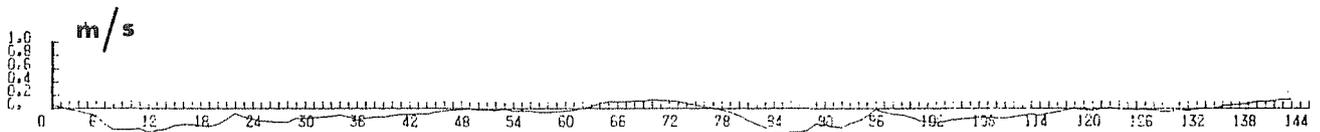
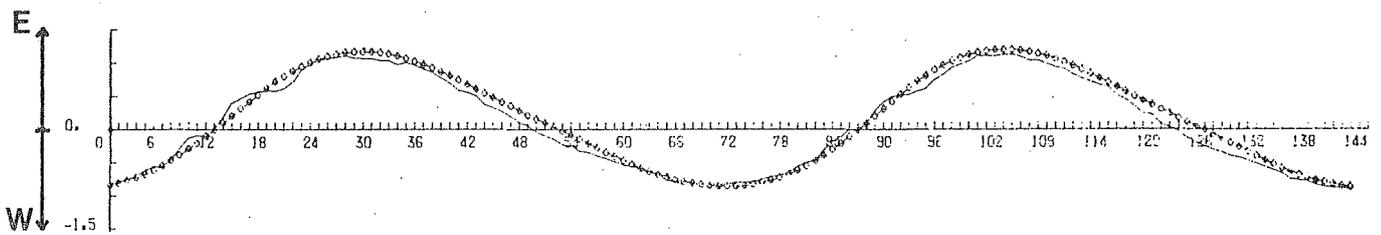
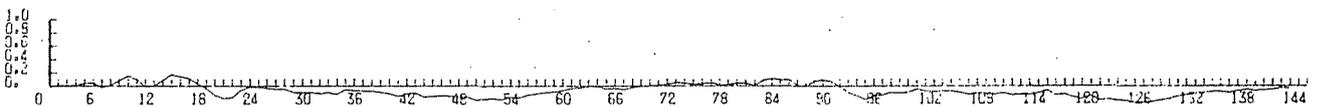


FIGURE N° 37

POINT 7



COMPOSANTE NORD-SUD



COMPOSANTE EST-OUEST DU COURANT

heure : 1 mm = 10 mn

COEF 93

FIGURE N° 38

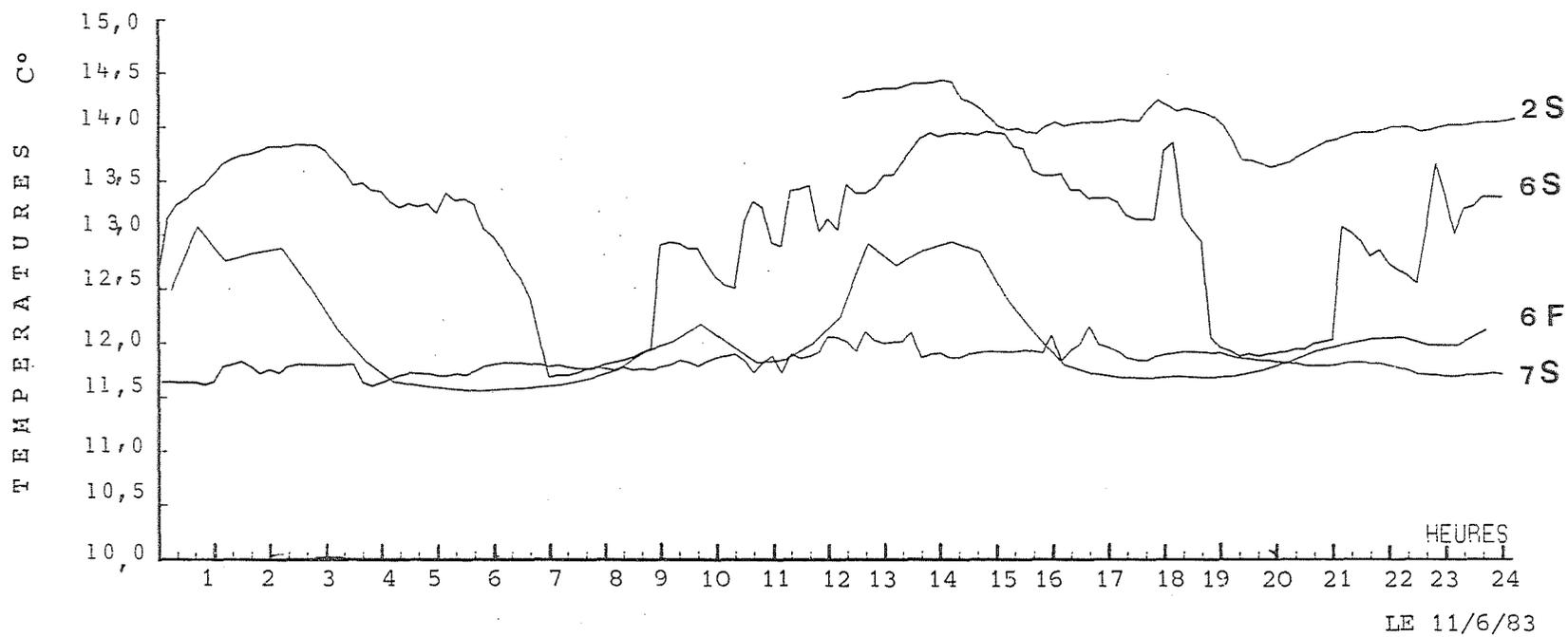


FIGURE N° 39

A partir des enregistrements de courant, nous avons estimé la composante Nord-Sud du courant de densité à 25 cm/s. Par contre, le résidu maximal obtenu dans la direction Nord-Sud atteint 40 cm/s. Cette surestimation est due au déphasage provoqué par le courant de densité.

La figure (40), présentant l'orientation du courant et son intensité au cours de la marée, montre bien la rotation que subit le courant en présence du front. La rotation du courant est cyclonique sauf entre P.M. et P.M. + 1 où elle devient anticyclonique.

Pour la composante Est-Ouest, le courant mesuré et celui calculé ne présente aucun déphasage. Le résidu est de l'ordre de 20 cm/s à P.M. et son maximum est 30 cm/s à la basse mer de SAINT MALO. C'est à cette heure marée que nous constatons une augmentation de la température au fond. Cette augmentation n'est pas due au mélange, car aucune diminution de la température en surface n'est observée, mais plutôt due au "passage du front" au fond.

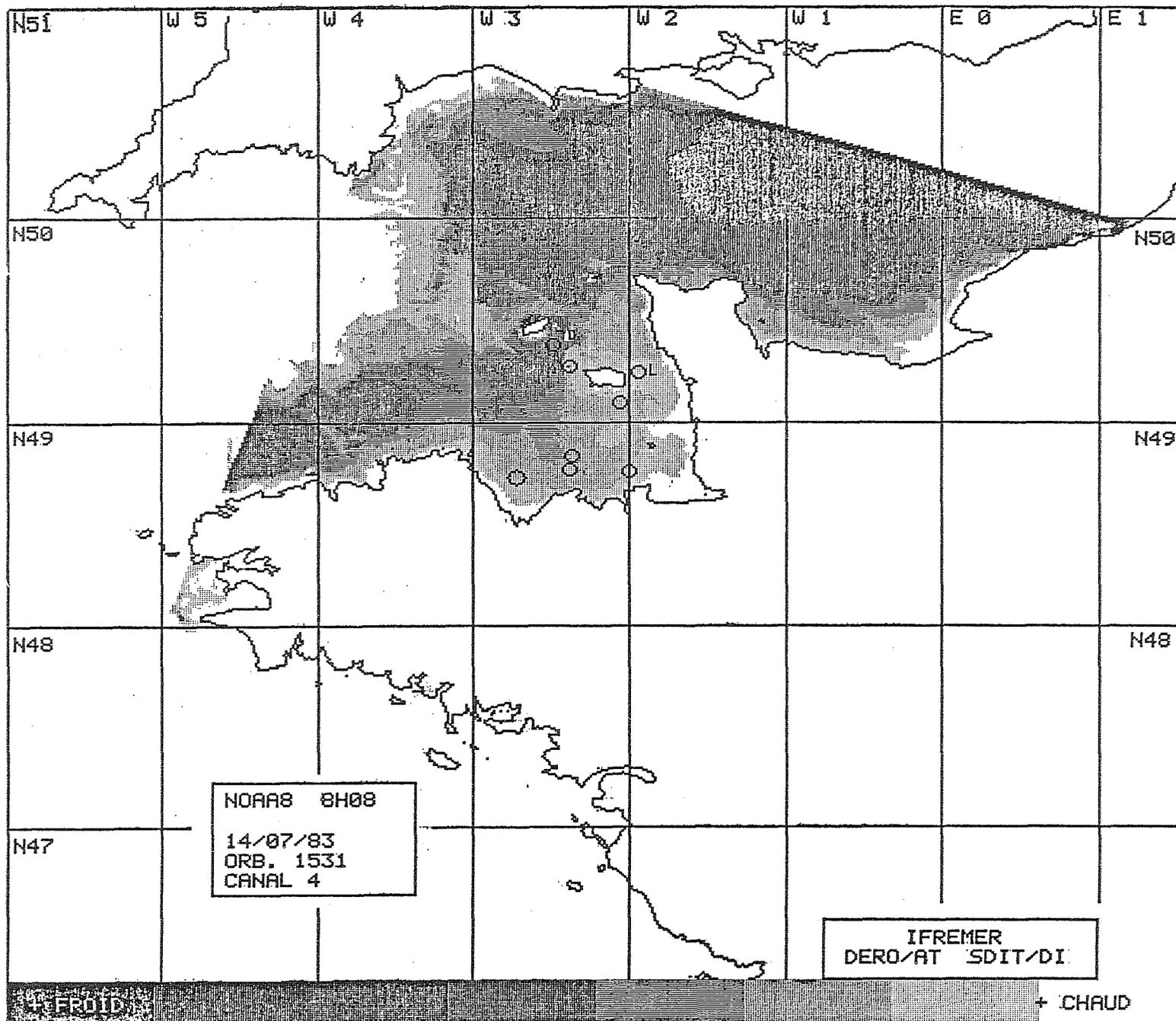
Le résidu obtenu montre la présence d'un courant parallèle au front et d'un courant de convergence. Signalons que PINGREE et al., évaluent ce courant à 25 cm/s (PINGREE et al., 1974). Deux théories schématiques sur l'équilibre du front seront présentées au Chapitre IV.

En ce qui concerne le point 7, le résidu est nettement plus faible qu'au point précédent. On remarque des petites oscillations du courant quand il porte au Sud.

III-2-3 CONCLUSION

Globalement, nous avons obtenu un accord convenable entre les mesures in-situ et des résultats ponctuels du modèle.

Une comparaison de l'allure générale des courants issus du modèle et ceux mesurés, par le L.N.H., montrent un accord remarquable.



ROSES DE COURANT AU POINT 6

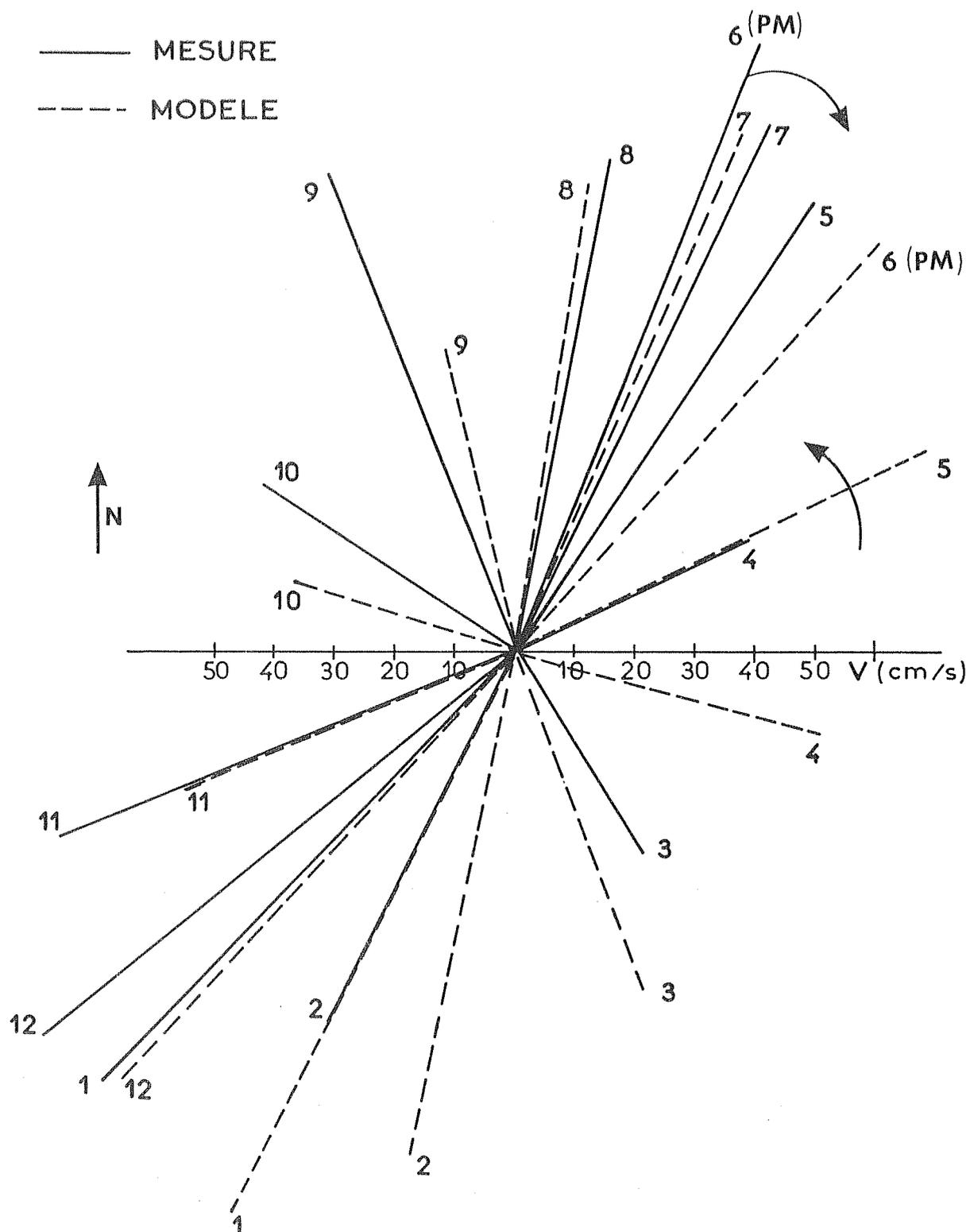


FIGURE N° 40

Les deux schémas (Figure 41) présentent les courants à P.M. à SAINT MALO et pour une marée de vive eau moyenne montrent l'existence d'un tourbillon instantané à l'Ouest de la baie de SAINT BRIEUC ; d'un deuxième mais de sens contraire, autour des MINQUIERS.

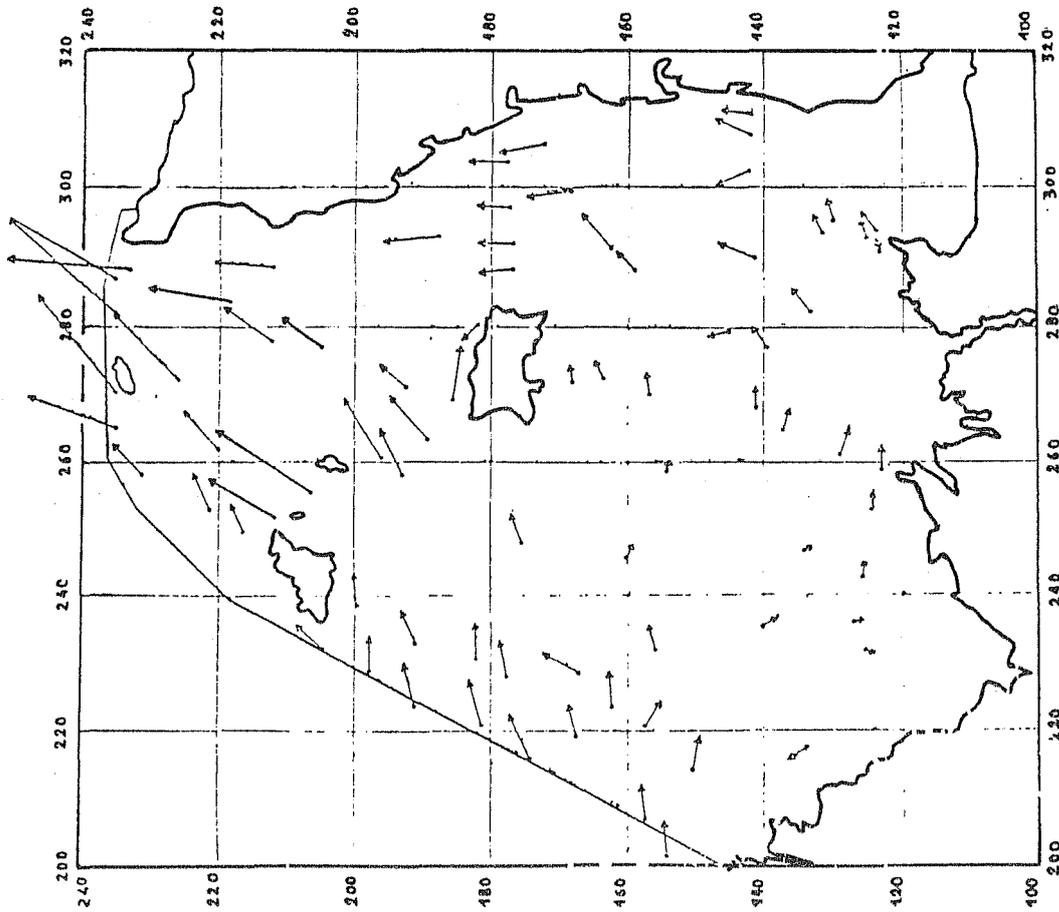
Les deux cartes montrent également un courant très fort dans LE GRAND RUSSEL et dans LE RAZ BLANCHARD.

Nous pensons que ces résultats peuvent être plus affinés en améliorant les conditions aux limites :

- soit en déplaçant la limite Ouest du modèle vers l'Ouest de la zone à cause de la présence de Bréhat et des hauts fonds qui posent des problèmes liés à la distorsion entre les échelles verticales et horizontales et la présence, également à proximité de la limite actuelle, d'un point amphidromique de l'onde M_4 (Cf. Chapitre I) ;
- soit en utilisant des conditions issues d'un modèle numérique de la Manche capable de reproduire correctement tout le spectre de la marée.

L'introduction dans le modèle de bancs découvrants permet d'améliorer les résultats, surtout au niveau de ces bancs.

P.M. A SAINT - MALO

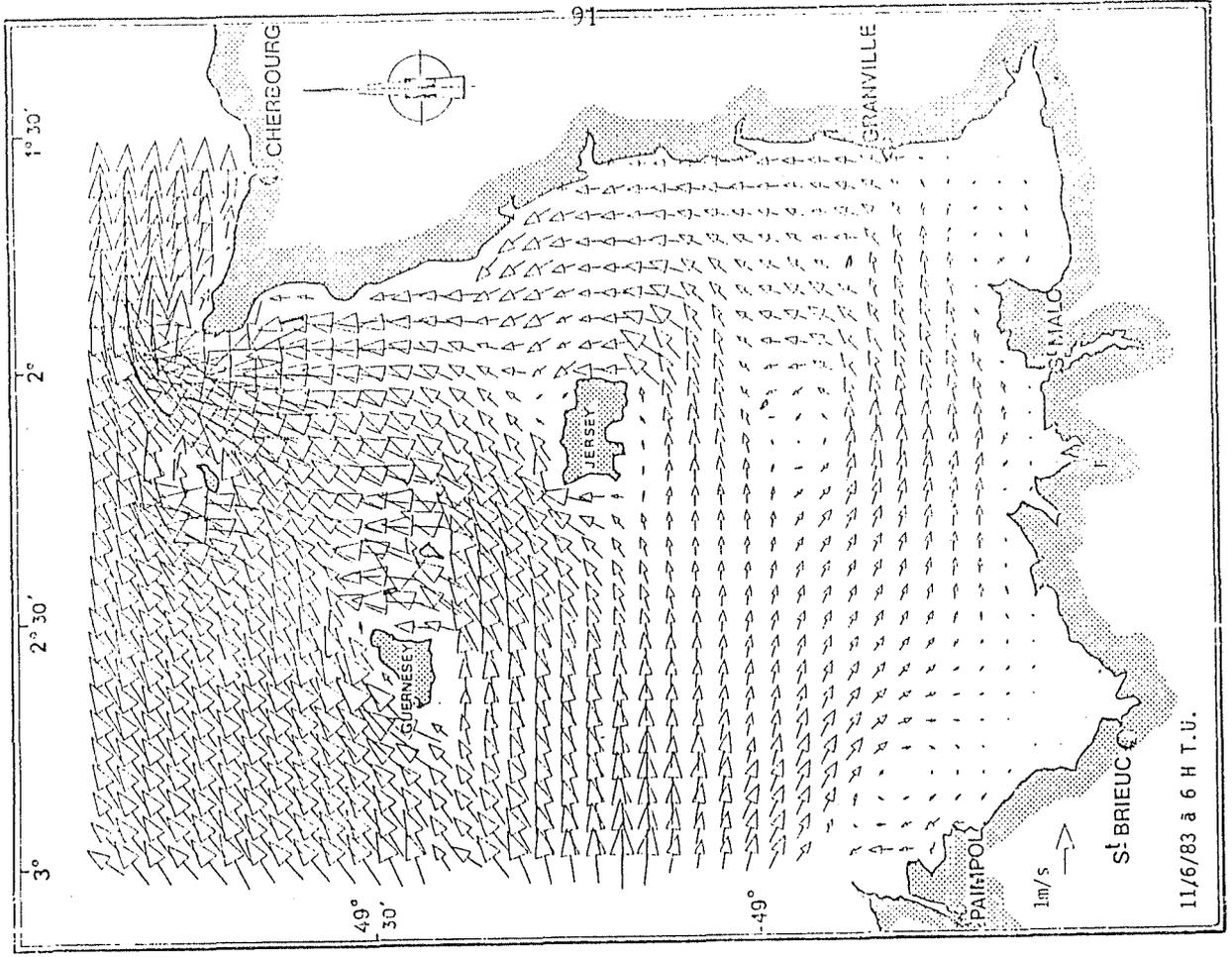


COEF. 95

d'après L.H.H.

1m/s

P.M. A SAINT - MALO
Coefficient 93



11/6/83 à 6 H T.U.

FIGURE N° 41

III-3 ETUDE DE COURANT DE MAREE DANS LE GOLFE NORMAND-BRETON

III-3-1 CARACTERISTIQUES DU COURANT DE MAREE DANS LE G.N.B.

En général, les courants dans ce golfe sont caractérisés par une dissymétrie entre le "flot" (i.e. écoulement vers le fond du golfe) et le "jusant". Le flot dure moins longtemps, mais avec une intensité plus élevée que le jusant.

La rotation du courant au cours de la marée s'effectue dans le sens cyclonique (sens positif).

Au fond du golfe (au niveau de la côte bretonne) le courant devient quasiment alternatif ainsi qu'au nord du G.N.B. Par contre, dans certains endroits (ouest et nord-est de Guernesey, nord du cap de la Hague et au nord des Iles Chausey) les roses de courant présentent 3 maxima au lieu de deux.

Ces mêmes caractéristiques se retrouvent pour les coefficients 72 et 45 mais avec une intensité plus faible (Figures 42, 43 et 44).

L'écoulement dans cette zone est décrite de la façon suivante (voir cartes de courant instantané en annexe 1).

- * De P.M. - 5 à P.M. - 3 (les heures sont ramenées à la P.M. de SAINT MALO). Le flot est généralisé dans tout le G.N.B. avec une intensité plus forte au nord de Jersey qu'au sud de cette zone.
- * A P.M. - 3, la renverse se produit au nord de Flamanville, par contre le flot est toujours présent au sud de cette zone et son intensité a augmenté.
- * De P.M. - 3 à P.M. - 1, le flot et le jusant sont respectivement présents au sud de Jersey et au nord de cette zone.
- * De P.M. - 1 à P.M. le fond du golfe continue à se remplir par l'Ouest.
- * De P.M. à P.M. + 4, le jusant s'établit dans tout le G.N.B.
- * A partir de P.M. + 4, le G.N.B. est divisé entre une zone au nord de Jersey où le flot est présent et la zone sud qui se vide par l'Ouest.

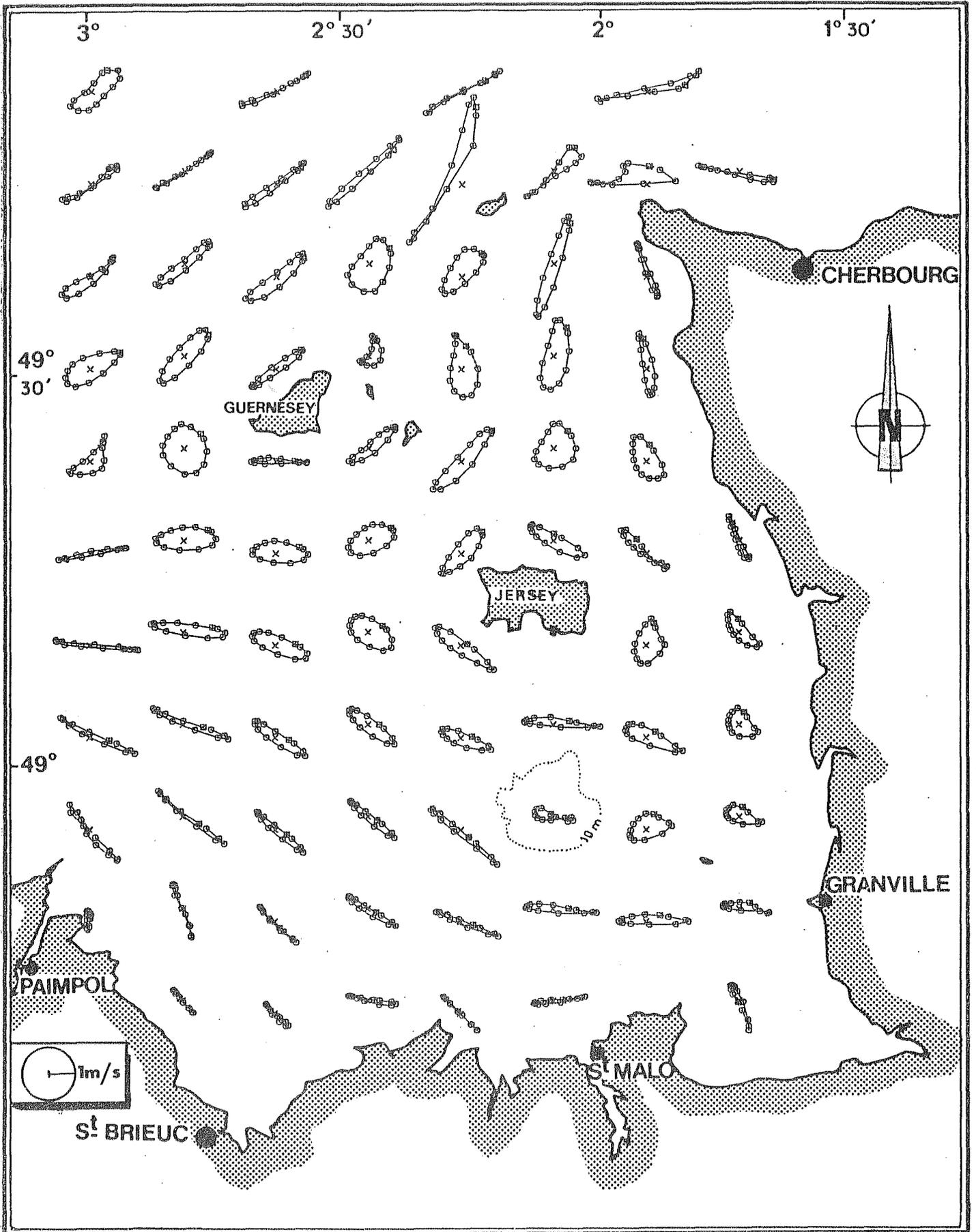


FIGURE N° 42

ROSES DU COURANT COEF. 93



ROSES DU COURANT COEF. 72

FIGURE N° 43



ROSES DU COURANT COEF. 45

FIGURE N° 44

III-3-2 DIRECTIONS ET MAXIMA DE COURANT POUR UNE MAREE DE VIVE
EAU MOYENNE

Au niveau du Raz Blanchard et près du Cap de la Hague, la vitesse est de 3,75 m/s et dirigée vers le nord. Par contre, dès qu'on s'éloigne du Cap de la Hague, en direction d'Aurigny, la vitesse maximale diminue jusqu'à la valeur de 3 m/s et la direction devient sud-ouest. Près d'Aurigny, la vitesse maximale augmente de 0,25 m/s par rapport au centre du Raz Blanchard mais garde la direction sud-ouest (Figure 45).

Ceci montre l'existence de gradients horizontaux de vitesse très importants dus à la présence du Cap de la Hague et à Aurigny.

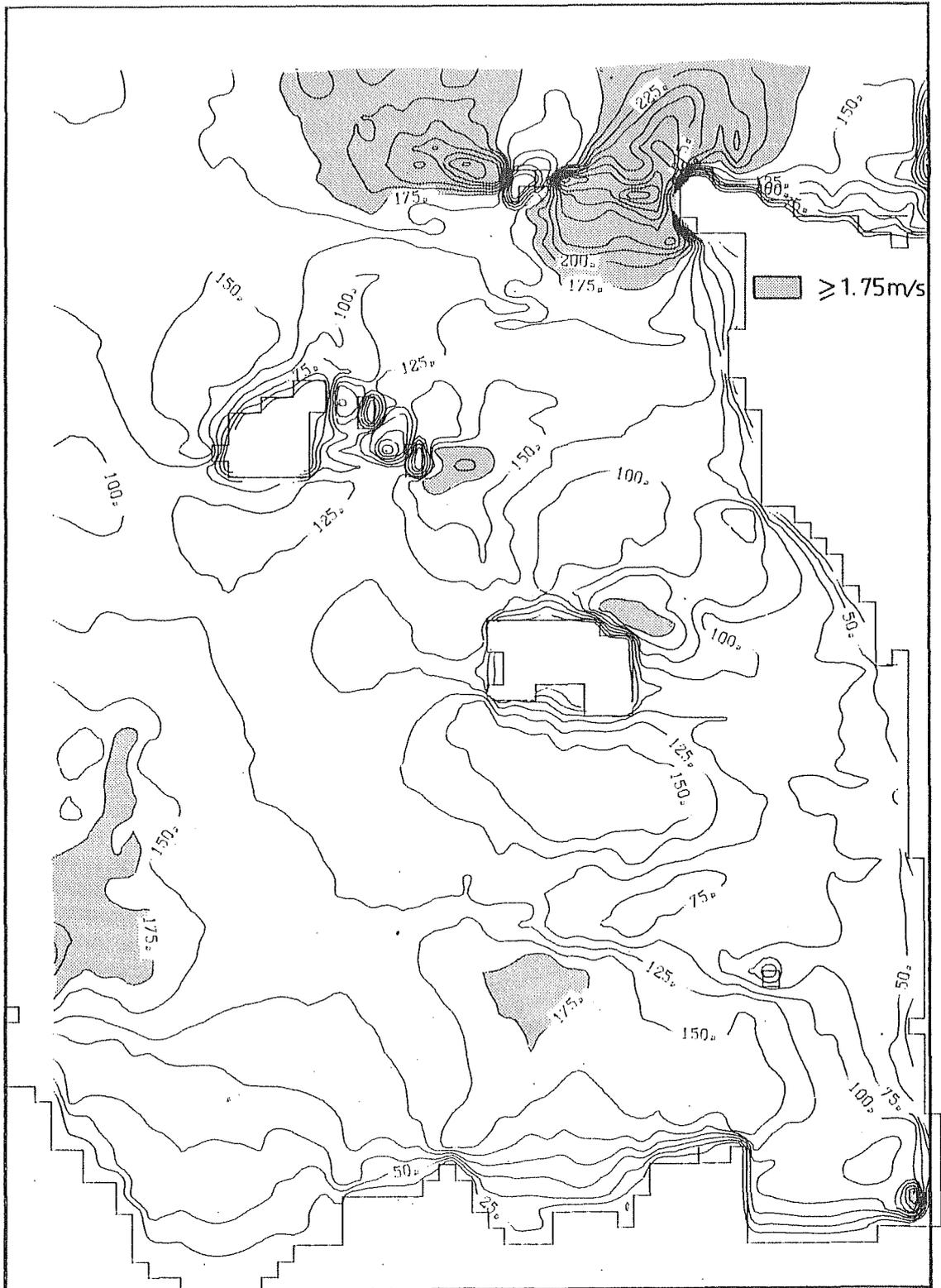
D'autres endroits où les maxima de vitesse sont très importants et où les gradients horizontaux sont également plus accentués :

- A la pointe nord-est de Jersey où elle est de 1.75 m/s dirigée vers le sud-est ;

- Au voisinage des Minquiers et à Bréhat où les maxima de vitesse sont de 1.75 m/s et dirigés vers le nord-est également ;

- Entre Sercq et Herm où la présence de ces deux îlots fait que la vitesse est quasiment alternative sur un axe nord-est, sud-ouest avec une intensité maximale, dans un sens comme dans l'autre, de 2.4 m/s.

Globalement, les gradients horizontaux sont importants aux endroits où la topographie est tourmentée par la présence de hauts fonds ou des caps.



LIGNES ISO-VALEURS DU COURANT MAXIMUM COEF. 93

FIGURE N° 45

III-4 ETUDE THEORIQUE

III-4-1 INTRODUCTION

Plusieurs auteurs (Cf. Chapitre I) ont étudié l'influence de certains termes des équations de NAVIER-STOKES (termes d'advection et de frottement) dans la Manche.

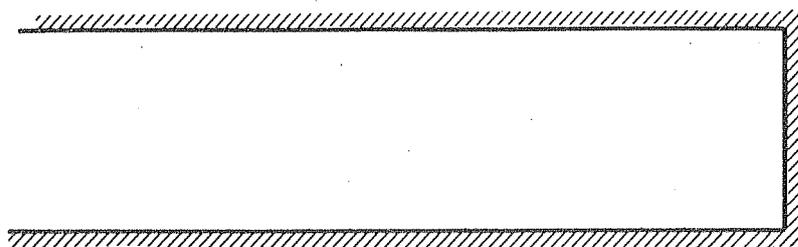
Par contre, d'autres questions restent posées comme l'influence de la force de coriolis et également l'influence du Cap de Cotentin sur la circulation de marée dans le Golfe Normand-Breton (rose du courant) et par conséquent sur la circulation résiduelle. (cf. chapitre V)

Pour répondre à ces questions et devant l'impossibilité de faire cette étude avec le modèle régional du G.N.B. (à cause des conditions aux limites ouvertes qui entourent le Golfe). Nous avons adapté un modèle (même caractéristique que le modèle régional) sur un cas très simple : un canal, avec un cap au milieu, fermé à son extrémité Est.

Ce cas schématise d'une façon grossière la Manche.

Nous avons, dans un premier temps, testé le modèle sur un cas simple (un canal fermé à son extrémité Est) dont on connaît la solution analytique (sans frottement)) (TAYLOR, 1920)

III-4-2 CANAL AVEC UN MUR DE REFLEXION A FOND PLAT



$L = 1\ 200$ km : longueur

$l = 200$ km : largeur

$x = y = 10$ km

$H = 73$ m

frottement $= 2 \cdot 10^{-3}$

La longueur du canal ainsi que les profondeurs ont été choisies de telle sorte que L correspond à une longueur d'onde de M_2 .

Les conditions aux limites, amplitude et phase des dénivellations des ondes M_2 et M_4 , ont été fixées arbitrairement.

Sur toute la limite ouverte, l'amplitude de M_2 a été fixée à 4 m et celle de M_4 à 15 cm. Les phases de M_2 et M_4 ont été fixées à 90° , ceci pour avoir à l'instant $t = 0$ des dénivellations nulles.

A - RESULTATS

a) Dénivellations

Conformément aux études faites par TAYLOR, l'analyse harmonique des dénivellations montre l'existence d'un point amphidromique pour l'onde M_2 à $L/4$ du mur de réflexion. (Figure 46)

Ce point amphidromique se caractérise par une amplitude nulle et par la convergence des lignes équiphasés (Figure 47).

Nous remarquons également que ce point amphidromique est décalé par rapport au centre du canal.

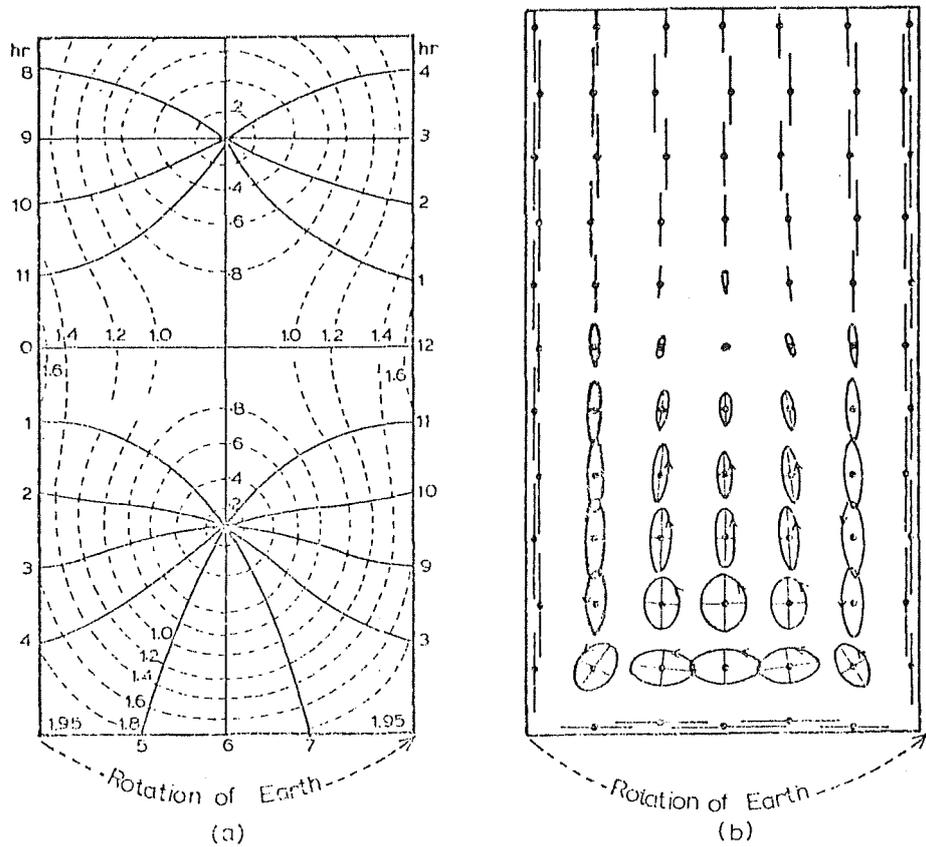
Cette position obtenue est correcte en raison des amortissements exercés par le frottement de fond et qui a tendance à déplacer le point amphidromique vers le Nord (HENDERSHOTT et al, (1971) - LE PROVOST et al, (1984)).

b) Courant

Les roses de courant obtenues montrent que le courant est alternatif dans le canal sauf au voisinage du mur de réflexion où les roses sont arrondies.

La rotation du courant est dans le sens cyclonique (sens positif).

Par contre, à l'entrée du canal, le résultat obtenu est nettement moins bon. Ceci est dû à nos conditions aux limites arbitraires. De plus, nous avons imposé une dénivellation constante à l'entrée du canal, ce qui est incompatible avec la force de coriolis.

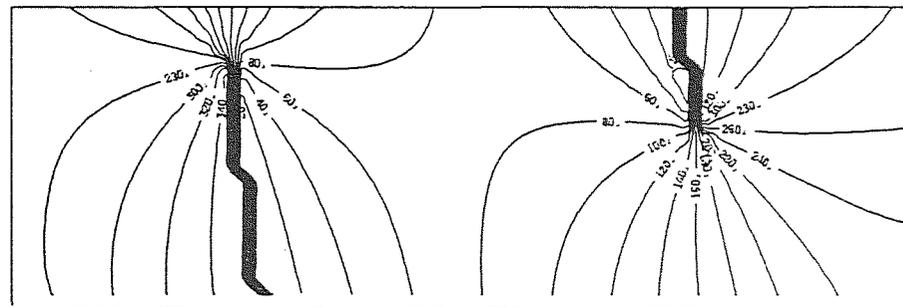
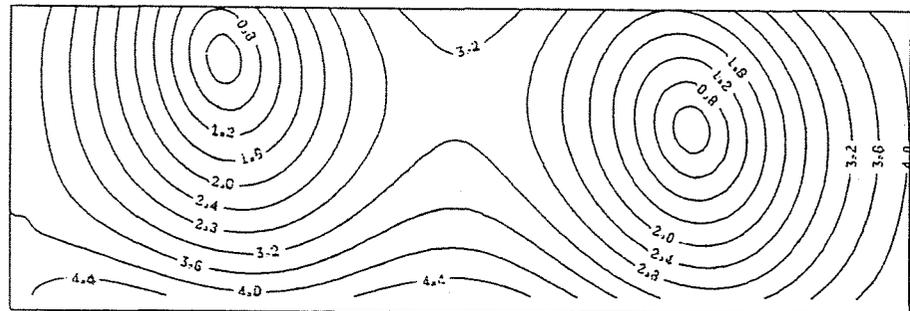


— Reflection of a Kelvin wave in a rectangular bay: closed at the lower end, on the diagram. (a) Distribution of cotidal lines and corange lines (broken lines); (b) corresponding current diagrams. From Taylor (1920)

FIGURE N° 46

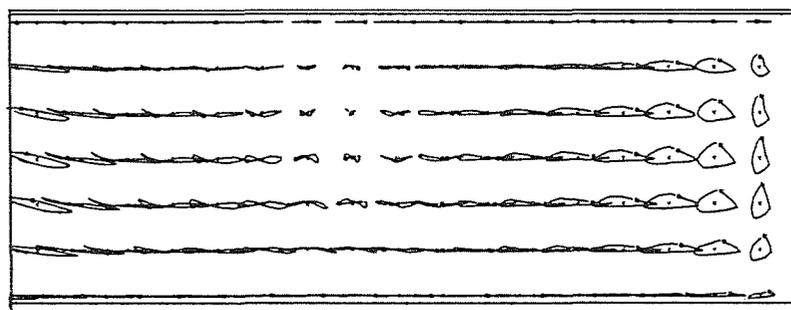
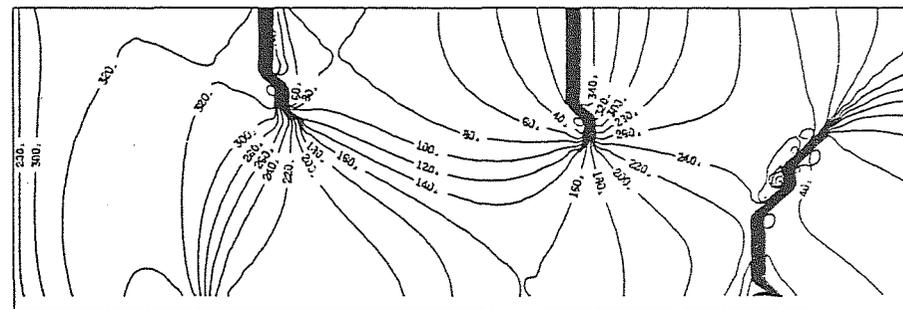
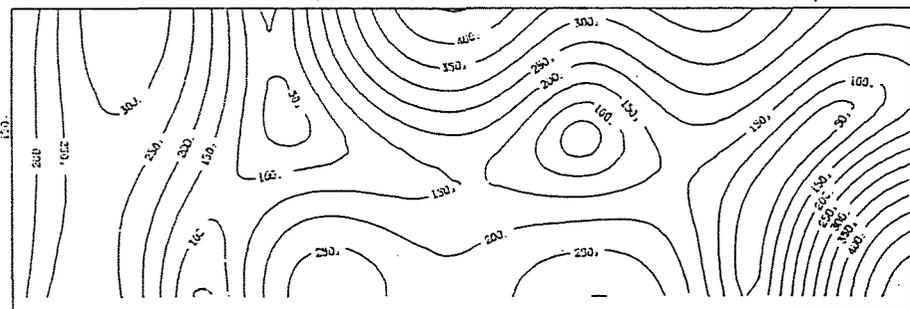
ligne d'égale amplitude de l'onde M_2 (en mètres)

PHASE M_2 (en degrés)



ligne d'égale amplitude de l'onde M_4 (en mm)

PHASE M_4 (en degrés)



roses du courant ($M_2 + M_4$)

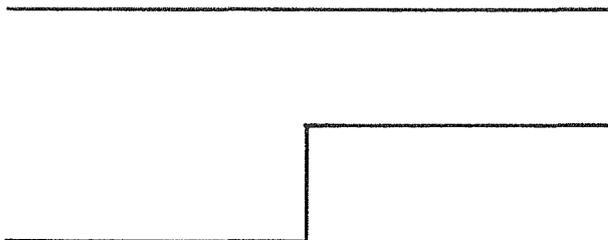
FIGURE N° 47

c) Conclusion

Les résultats obtenus, sur la moitié Est du canal de longueur $L/2$ du mur de réflexion, sont corrects.

Par contre, à l'entrée du canal, les résultats sont moins cohérents pour les raisons indiquées ci-dessus.

Ce test nous a permis ainsi, pour nous affranchir des conditions aux limites, de rallonger notre canal, avec un cap, d'une demi longueur d'onde.

III-4-3 CANAL AVEC UN CAP ET A FOND PLAT

$$L = 600 \text{ km}$$

$$l = 200 \text{ km}$$

$$x = y = 10 \text{ km}$$

$$H = 73 \text{ m}$$

$$\text{Frottement} = 2 \cdot 10^{-3}$$

a) Sans force de coriolis (Figure 48)

Les roses de courant tournent dans le sens cyclonique au voisinage du Cap. Pour le reste du domaine, le courant est alternatif et les roses sont aplaties.

L'amplitude du courant est très forte au niveau de la pointe du Cap. L'effet du Cap est de créer une courbure de lignes de même amplitude de l'onde M_2 .

b) Avec force de coriolis (Figure 49)

Les lignes d'égalles amplitudes et de phases montrent "un point amphidromique virtuel" sur la côte Nord. La position de ce point est en accord avec les cartes de l'onde M_2 établies par CHABERT D'HIERES et al., sur la plaque tournante de GRENOBLE (Figure 50).

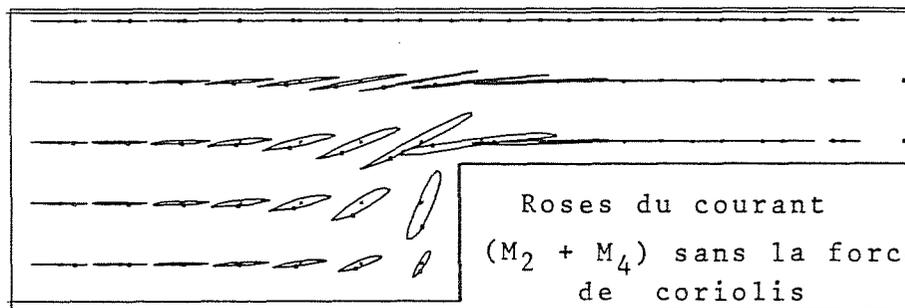
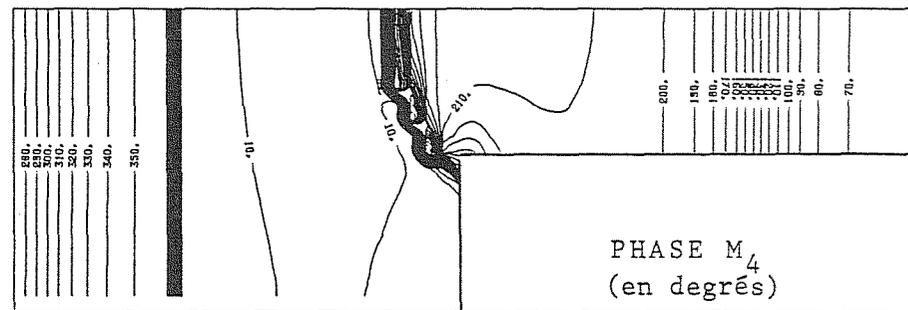
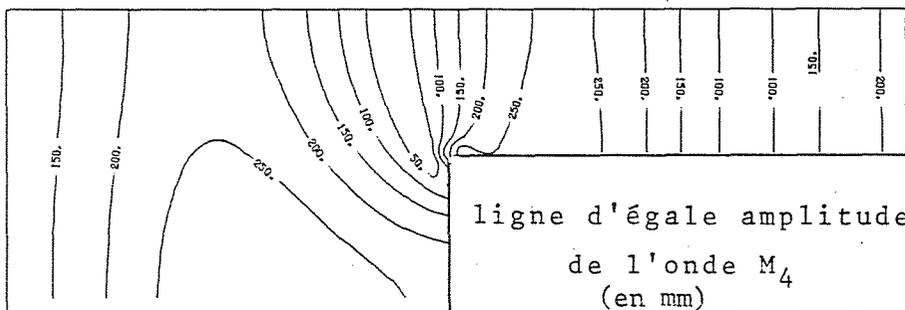
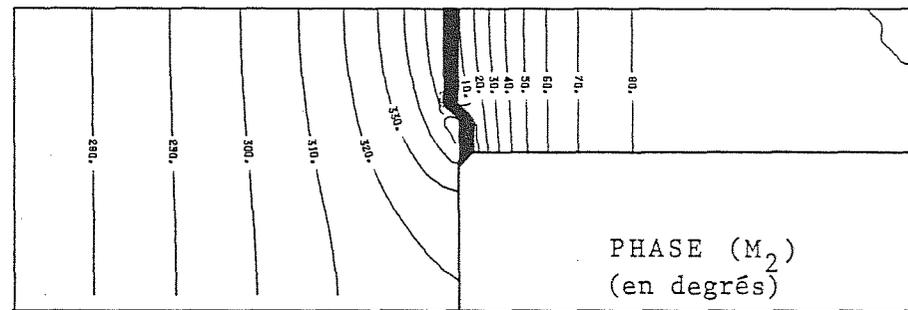
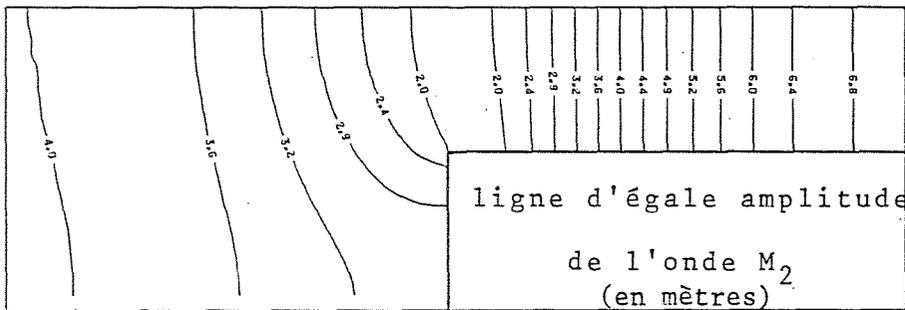
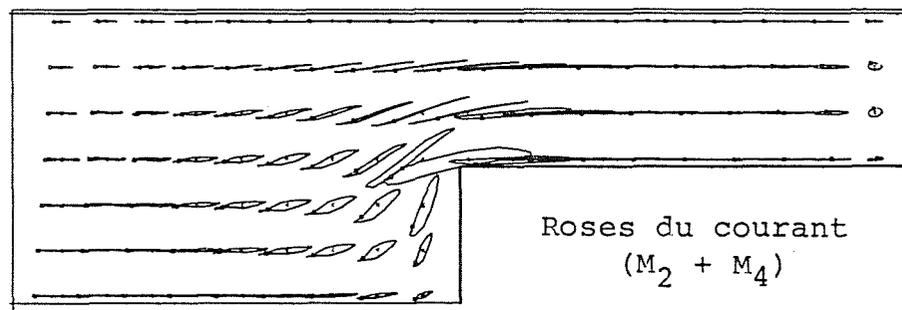
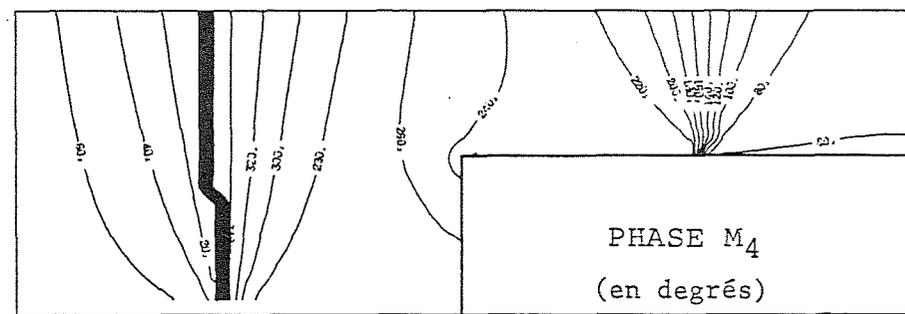
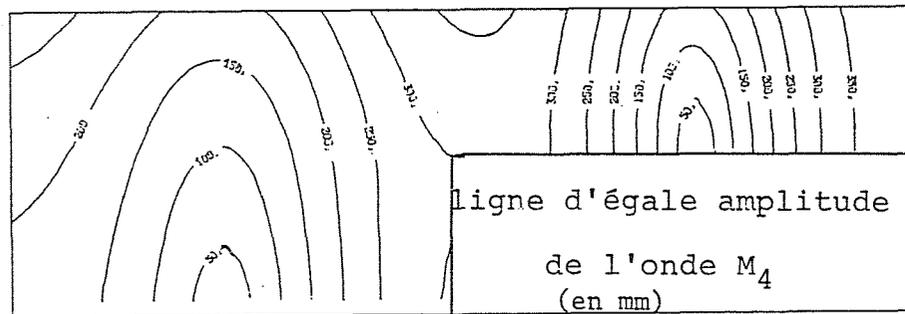
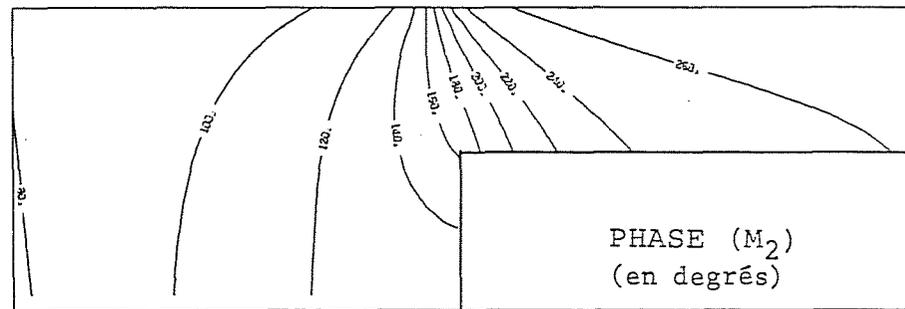
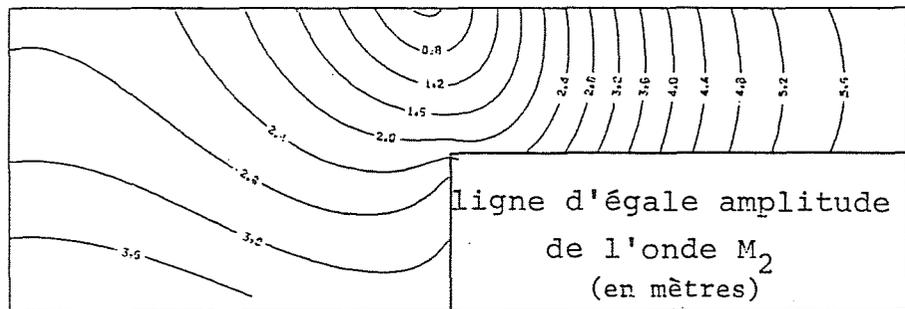


FIGURE N° 48



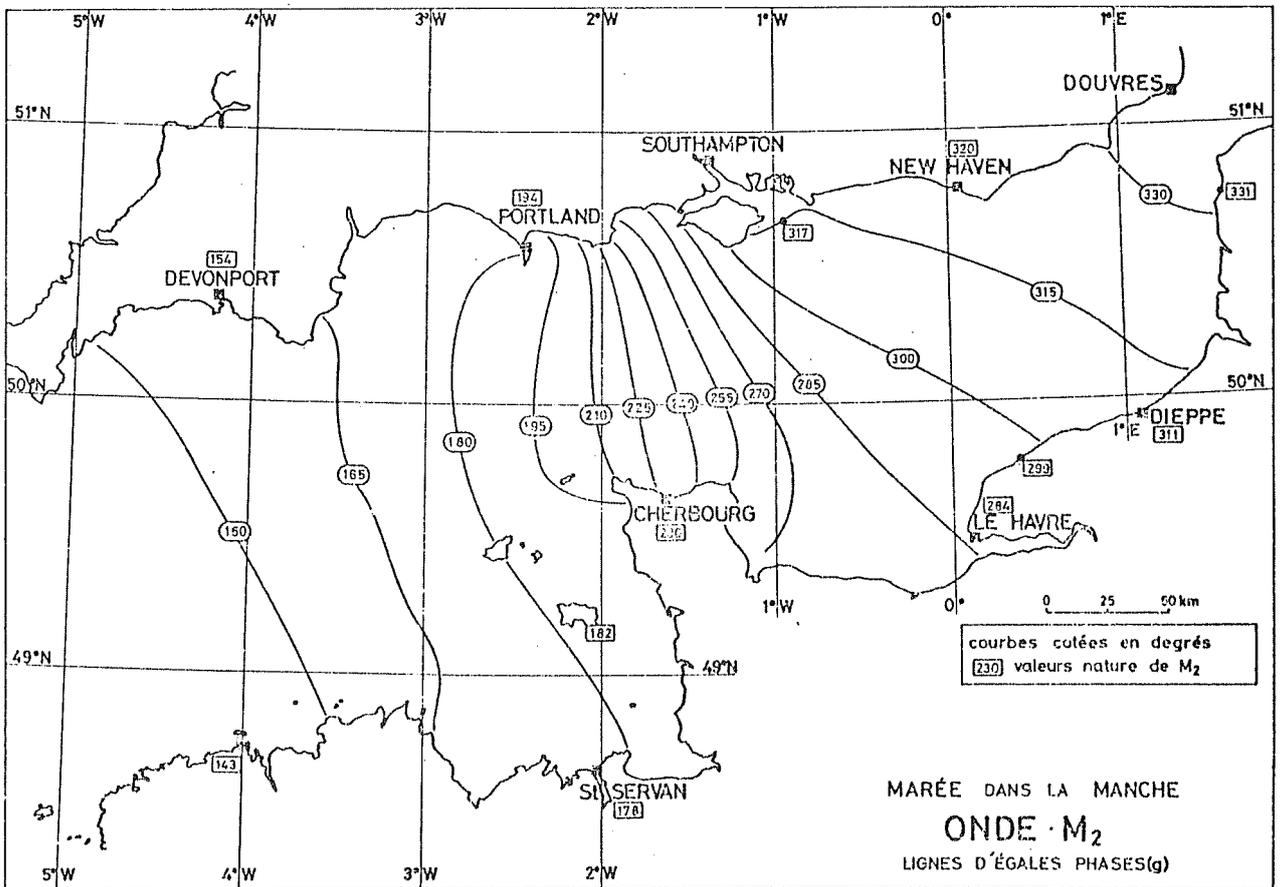
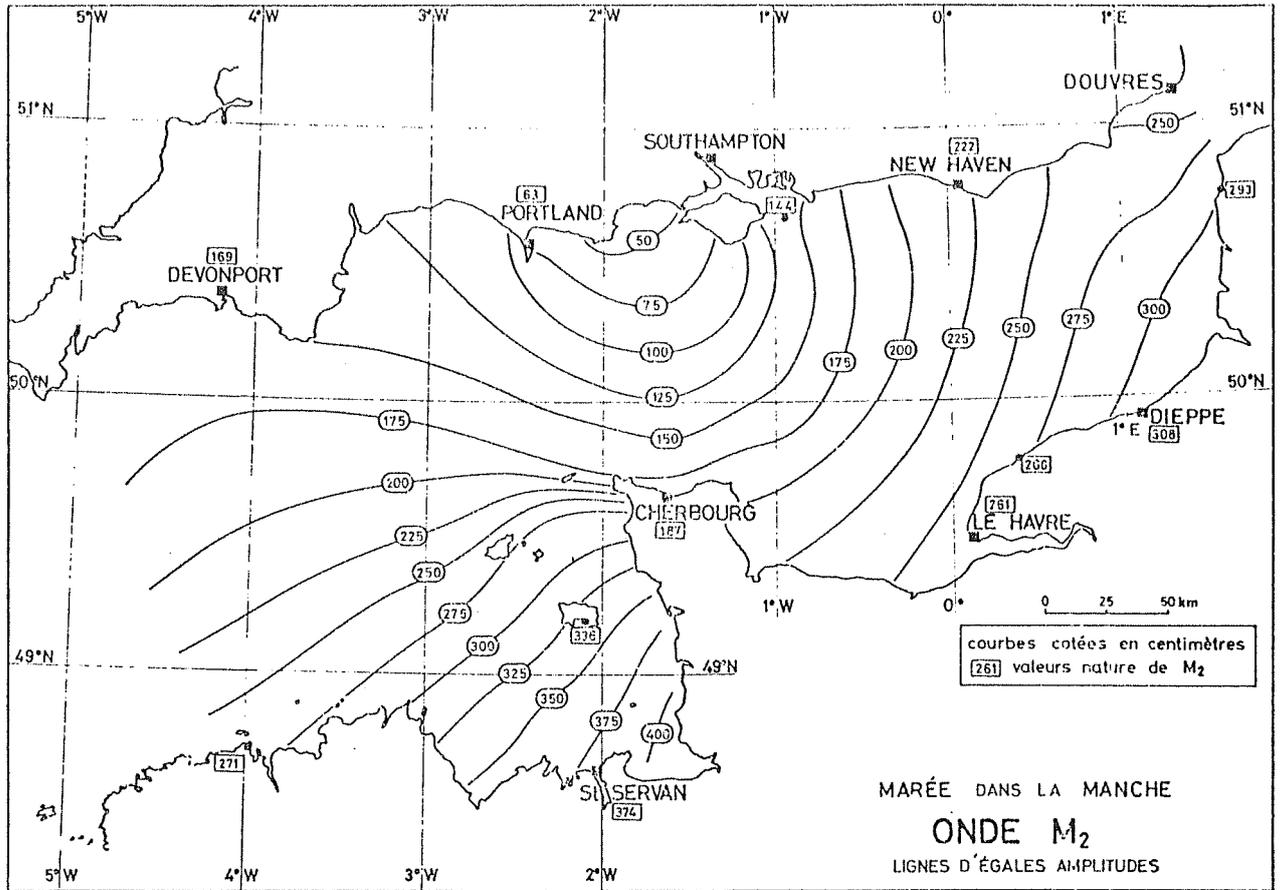
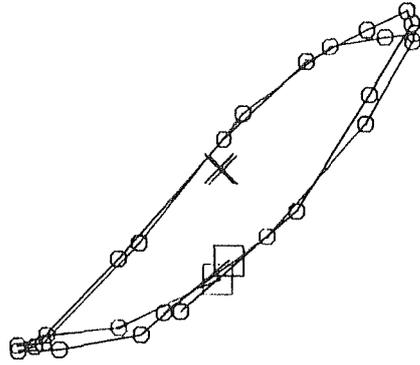
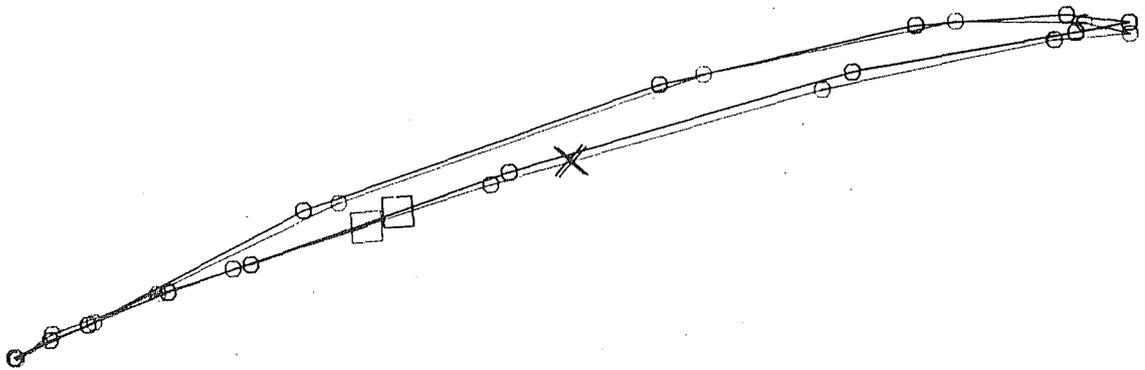


FIGURE 50
 (D'après CHABERT D'HIERES et AL, 1979)

La comparaison entre les roses de courant obtenues avec et sans la force de coriolis montre que l'ellipticité reste inchangée. (Voir schémas ci-dessous)



POINT 26 9



POINT 31 12

III-4-4 CANAL AVEC UN CAP ET A FOND NON PLAT (Figure 51)

L'effet de diminuer la profondeur au niveau du cap décale légèrement le point amphidromique au sud de sa position.

Nous constatons également une augmentation de l'amplitude de M_2 au fond de ce golfe et la diminution de l'amplitude de cette dernière au voisinage du mur de réflexion. (5.2 m au lieu de 5.6)

Les roses de courant sont déformées et le courant est plus important que dans le cas d'un fond plat. Par contre, le courant est moins important que dans le cas précédent au niveau de la pointe.

La déformation des roses de courant est due aux termes de frottement et d'advection qui deviennent plus importants que dans le cas d'un fond plat.

D'après les études effectuées sur la Manche qui montrent que la génération de l'onde M_4 est en grande partie due aux termes d'advection (Cf. Chapitre I).

La comparaison entre l'amplitude des dénivellations de M_4 pour les 2 cas montre une augmentation de l'amplitude de M_4 due à la diminution de la profondeur ce qui provoque le déplacement du point amphidromique de cette onde vers l'EST. Ce test explique bien le décalage du point amphidromique entre les résultats de FORNERINO et de PINGREE. (cf au 1er chapitre)

A l'inverse de l'onde M_2 , l'amplitude de M_4 au voisinage du mur de réflexion augmente dans le cas d'un fond non plat.

En résumé ces tests montrent que la gyration cyclonique du courant est due essentiellement aux réflexions de l'onde de marée générée par la bathymétrie et le cotentin.

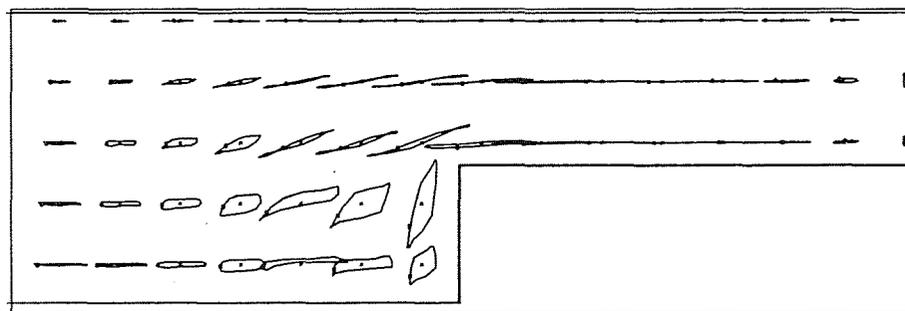
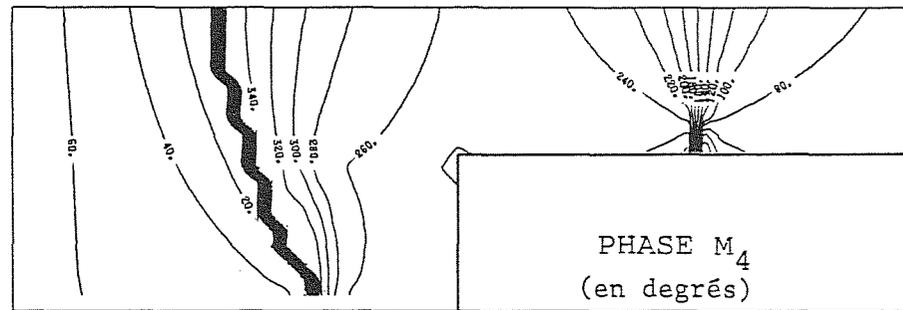
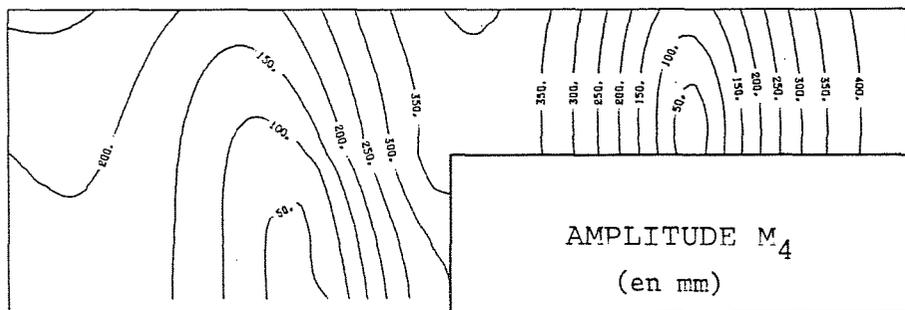
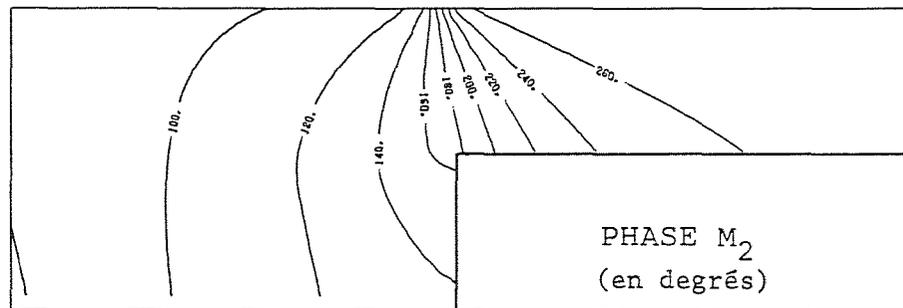
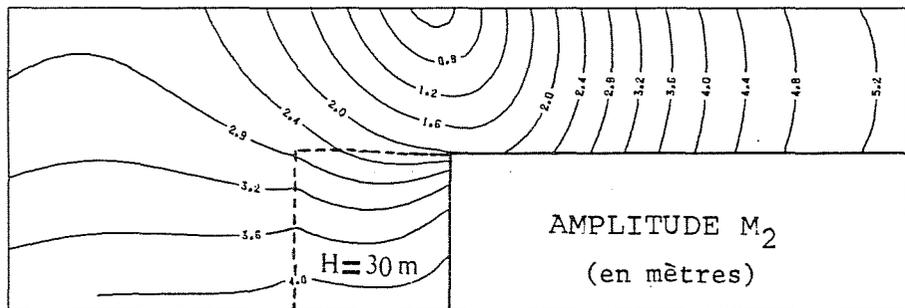


FIGURE N° 51

C H A P I T R E I V

=====

C I R C U L A T I O N R E S I D U E L L E

IV-1 INTRODUCTION

IV-2 CIRCULATION RESIDUELLE - DEFINITIONS

IV-3 SENSIBILITE DU MODELE AUX PARAMETRES DE REGLAGE EN RESIDUEL

IV-3-1 Sensibilité du modèle (en résiduel)

IV-3-2 Validation du schéma eulérien

IV-4 COURANT RESIDUEL EULERIEN EN SURFACE ET AU FOND

IV-5 CIRCULATION RESIDUELLES LAGRANGIENNES

IV-5-1 Résultats du modèle

IV-5-2 Comparaison avec les flotteurs Argos

IV-6 SCHEMA DE CIRCULATION LAGRANGIENNES

IV-7 CIRCULATION RESIDUELLE AU VOISINAGE DU FRONT

IV-1 INTRODUCTION

La connaissance des phénomènes de transport dans des zones côtières sensibles (du point de vue biologique, ou/et à grands trafics maritimes) est devenue depuis un certain temps nécessaire.

Or, le transport moyen (sel, chaleur, sédiments, polluants, etc.) est contrôlé par le "courant moyen" appelé le plus souvent "courant résiduel".

Cette circulation est très faible devant la circulation instantanée et, par conséquent, très difficile à approcher avec les mesures ou les modèles numériques.

Dans certaines zones où le courant de marée est faible, le bruit numérique des appareils de mesures est de même ordre de grandeur que la circulation résiduelle.

Par contre, les modèles numériques proposent des schémas numériques qui sont souvent tributaires des paramètres de réglage (comme le frottement et la viscosité), des conditions aux limites utilisées, et la méconnaissance des variations du niveau moyen.

Conscients des limites de chaque méthode d'approche de cette circulation, nous nous sommes appuyés, pour mener ce travail, sur :

- des mesures eulériennes et lagrangiennes,
- des observations effectuées par le C.E.A. sur les déchets radioactifs rejetés à la Hague,
- des photos satellites,
- les résultats obtenus par le modèle numérique du G.N.B.

IV-2 CIRCULATION RESIDUELLE - DEFINITIONS

En général, la circulation instantanée se décompose en :

$$\begin{aligned}
 \text{CIRCULATION} & & & \text{circulation due à la marée,} \\
 \text{INSTANTANEE} & = & + & \text{circulation due au vent,} \\
 & & + & \text{circulation due aux gradients de densité} \\
 & & + & \text{les interactions non linéaires entre} \\
 & & & \text{ces trois sources de circulations}
 \end{aligned}$$

Comme nous l'avons déjà signalé au 3ème Chapitre, le courant de marée est asymétrique, c'est-à-dire que nous pouvons décomposer le courant en un terme périodique et un terme apériodique.

$$\begin{aligned}
 \text{CIRCULATION DUE} & = & \text{circulation} \\
 \text{A LA MAREE} & & \text{oscillatoire} + \text{circulation} \\
 & & \text{périodique de} \quad \text{résiduelle} \\
 & & \text{période T}
 \end{aligned}$$

Cette déformation du courant de marée est due aux effets non linéaires :

- effet du frottement,
- effets de termes d'advection (les termes non linéaires dans l'équation de la continuité et du mouvement).

Ces effets provoquent un transfert de vorticité des fréquences des ondes qui composent le spectre de la marée à la fréquence nulle.

La période T est définie de telle façon qu'elle permet de filtrer toutes les composantes périodiques du courant de marée.

Le courant résiduel est, soit un courant résiduel eulérien (ce que donne un courantomètre quand on se place en un point fixe), soit un courant résiduel lagrangien (quand on suit les déplacements d'une masse d'eau) dont la connaissance est très importante quand on s'intéresse aux "devenirs des masses d'eau".

La relation qui existe entre le courant résiduel lagrangien et eulérien est de la forme :

$$\text{LAGRANGE} = \text{EULER} + \text{DERIVE DE STOKES} \quad (1)$$

Cette dérive correspond aux effets de gradients de vitesse dans le sens de l'écoulement.

Soit une colonne d'eau présente à X_0 à l'instant t_0 , cette particule va se déplacer pendant la période T avec une vitesse instantanée (à l'instant t) approximativement égale à :

$$\bar{u} + \left(\int_{t_0}^t \bar{u} dt' \right) \nabla \bar{u} \quad \bar{u} = \text{la vitesse moyenne sur toute la colonne d'eau.}$$

Le courant résiduel lagrangien va s'écrire :

$$U_1 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (\bar{u} dt' \cdot \nabla \bar{u}) dt$$

$$U_1 = u_c + \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left[\int_{t_0}^t \bar{u} dt' \cdot \nabla \bar{u} \right] dt$$

u_c : le courant résiduel eulérien.

DOOLY (1974, in Johns 1983), RAMSTER et DURANCE (1978, in Johns 1983) montrent que l'équation (1) est inadéquate quand les gradients de vitesse sont importants. Ce qui est le cas dans le G.N.B.

De plus, cette équation n'est valable que quand la vitesse instantanée (non intégrée sur la verticale) est indépendante de la hauteur de la colonne d'eau.

Pour le calcul du courant résiduel de marée dans le G.N.B. nous nous sommes limités à une période $T = 12 \text{ H } 25$ qui correspond à la période de l'onde M_2 , vu son importance dans la Manche (Cf. Chapitre I).

IV-3 SENSIBILITE DU MODELE AUX PARAMETRES DE REGLAGE EN RESIDUEL

IV-3-1 SENSIBILITE DU MODELE (EN RESIDUEL)

Comme nous l'avons souligné dans le premier paragraphe, les schémas de circulation résiduelle proposés par les modèles numériques dépendent de plusieurs paramètres.

Nous avons regroupé ces paramètres en deux classes :

La première classe est constituée par :

- le frottement au fond,
- la viscosité.

Le choix des valeurs de ces paramètres est fixé arbitrairement pour assurer la stabilité du modèle. Mais a priori, il est difficile de justifier l'utilisation de telle valeur ou telle autre.

Nous allons justifier ces valeurs a posteriori en les comparant aux résultats de mesures.

La deuxième classe est constituée par :

- le niveau moyen

La méconnaissance actuelle des variations du niveau moyen, d'une façon précise, incite à prendre un niveau moyen constant sur toute la zone (Cf. Chapitre II).

Pour tester le schéma de circulation résiduelle eulérienne obtenu avec niveau moyen constant, nous avons varié les niveaux moyens aux limites ouvertes. Les niveaux moyens que nous avons utilisés sont ceux fournis par le modèle physique de l'I.M.G. pour un coefficient de marée égal à 95 (Cf. Chapitre II).

Les résultats de ce test (Figures 52 et 53) montrent qu'à l'intérieur du Golfe, le courant résiduel eulérien reste inchangé ; par contre, au voisinage de la limite Nord et Ouest, les deux schémas obtenus sont différents. Nous constatons également une différence entre les deux circulations au niveau des ROCHES DOUVRES. Donc, pour la suite de ce travail, nous avons préféré garder un niveau moyen constant, et en mettant



FIGURE 52

CIRCULATION RESIDUELLE EULERIENNE OBTENUE AVEC
UN NIVEAU MOYEN VARIABLE

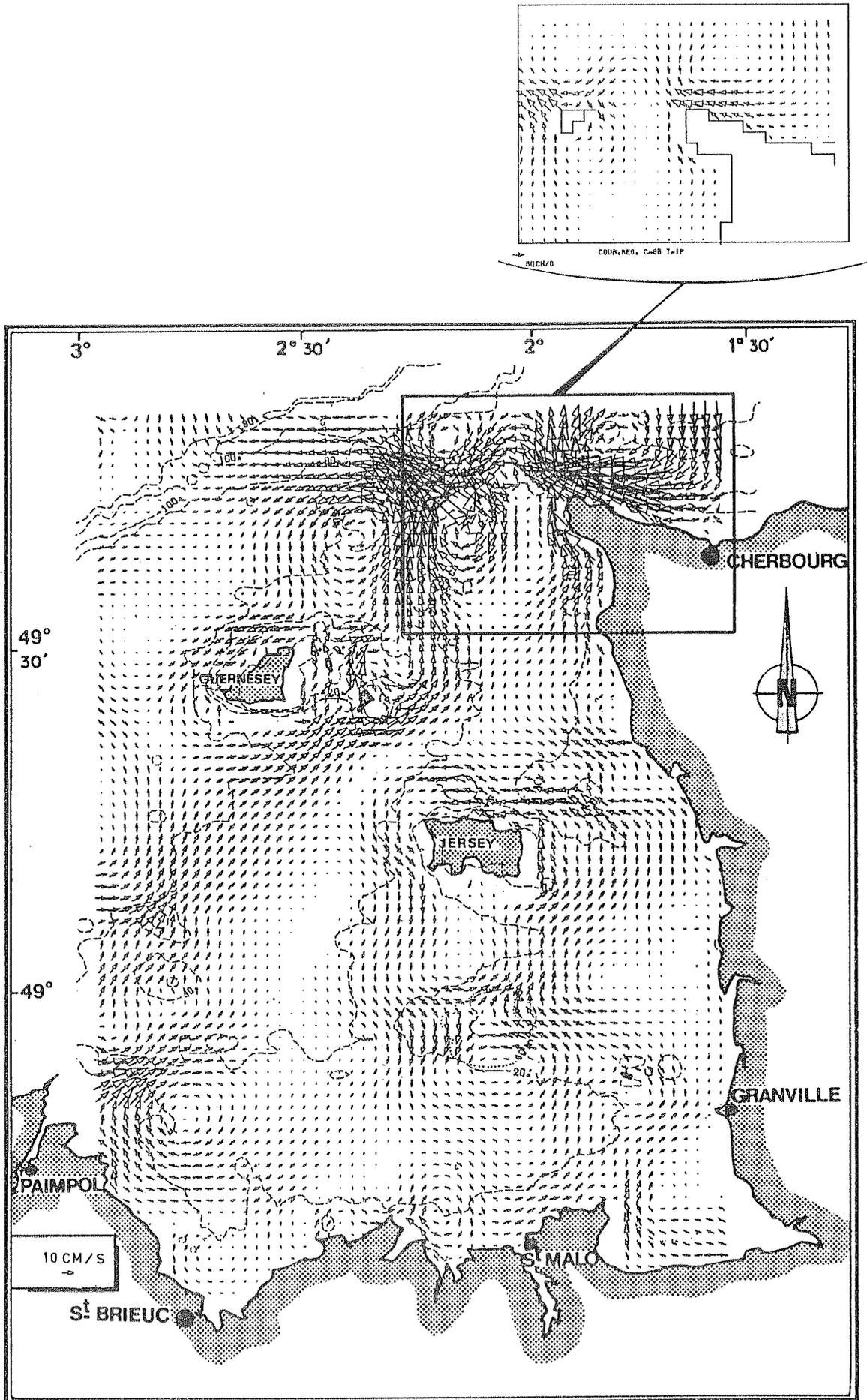


FIGURE 53
 Circulation résiduelle eulérienne obtenue avec
 un niveau moyen constant

le lecteur en garde que le courant résiduel ainsi obtenu dans ces endroits est tributaire de la condition imposée sur les niveaux moyens aux limites.

IV-3-2 VALIDATION DU SCHEMA EULERIEN

La carte des courants résiduels mesurés est obtenue en moyennant le courant sur toute la période de mesure (en moyenne égale à un mois) (Figure 54). Par contre, le courant résiduel calculé par le modèle est obtenu en intégrant les vitesses instantanées d'une marée de vive eau sur 12 h 25 mn (Figure 53).

Les deux schémas montrent les mêmes tendances de circulation résiduelle et donnent les mêmes ordres de grandeurs (10 cm/s).

Ainsi, entre JERSEY et le COTENTIN, les deux schémas montrent d'abord qu'à l'Ouest de cette zone, la circulation est Nord-Est et devient Nord-Ouest au Nord de cette zone.

Au Sud-Ouest des Minquiers les deux circulations obtenues sont concordantes pour indiquer un courant résiduel Sud-Ouest.

A l'Ouest de SAINT BRIEUC, le courant résiduel, obtenu par les mesures et par le modèle, est Ouest.

Par contre, une zone échappe à cette règle, c'est la zone entre JERSEY et GUERNESEY où les résultats du modèle ne correspondent pas aux résultats des mesures.

Cette différence est due en grande partie aux courants de densité que le modèle ne reproduit pas.

Cette comparaison ne peut être que qualitative car le courant résiduel mesuré dépend du coefficient de la marée, des effets du vent et de la fiabilité des appareils de mesure (Comme dans le cas du point 8 où les résultats de mesures sont contradictoires).

Mais, vu l'importance du courant de marée dans cette zone, on peut affirmer que les structures observées sont imputables aux courants de marée.

Vitesses résiduelles moyennes observées

MESURES DE 83 ET 82(+)

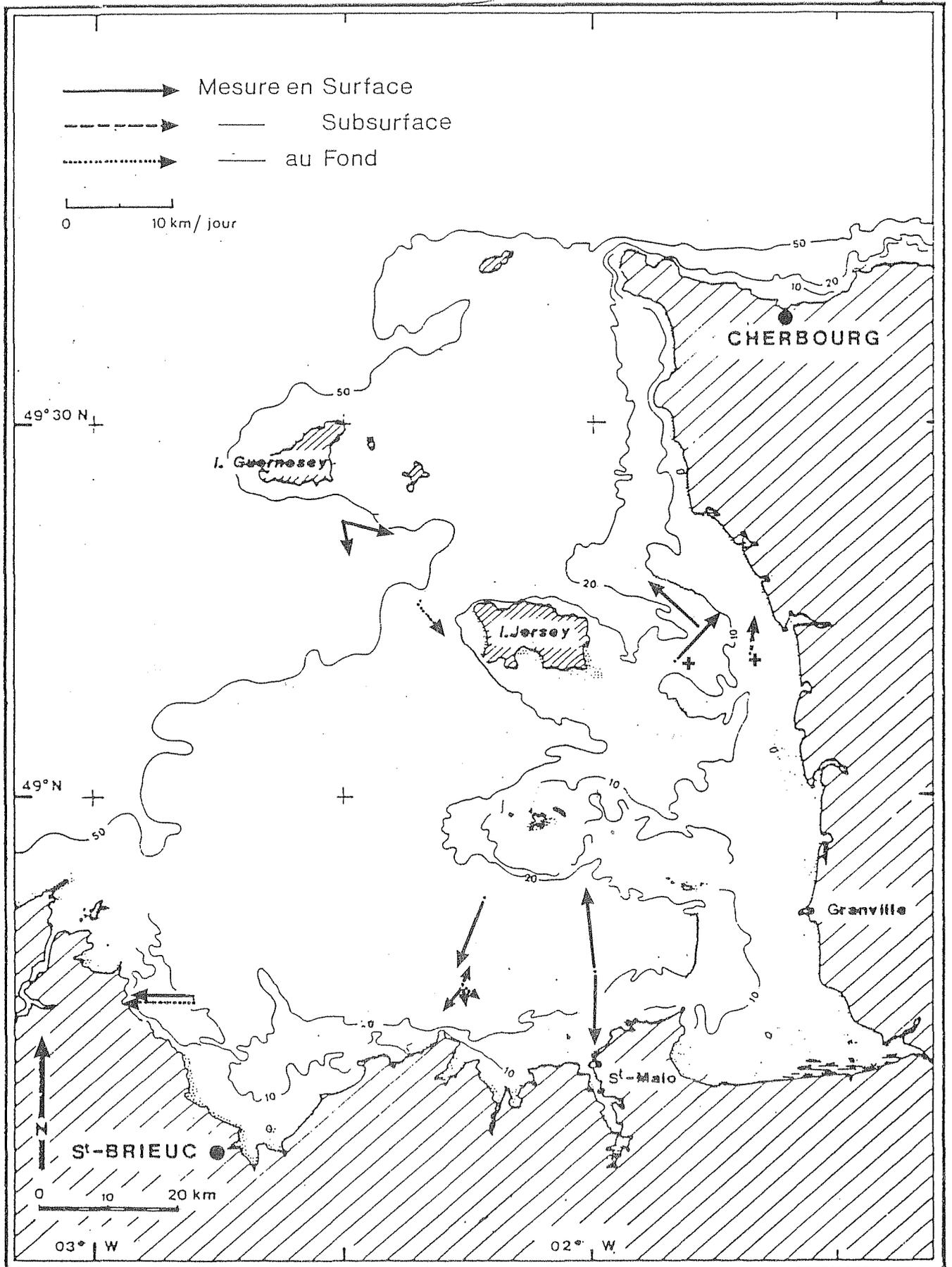


FIGURE 54

IV-4 COURANT RESIDUEL EULERIEN EN SURFACE ET AU FOND

La carte (Figure 54) montre que :

- Au point 10, le courant résiduel est identique en surface et au fond ;
- Au point 5, les courants résiduels observés en surface sont différents de ceux observés au fond.

Ces deux points se situent respectivement dans la Baie de SAINT BRIEUC et au large du CAP FREHEL (Point 10 et 5 - Figure 18).

Pour cette comparaison, et pour mettre en évidence les effets du vent, nous avons filtré toutes les composantes du spectre de courant dont la période est inférieure à 24 heures (Filtre de DEMERLIAC, 1973).

Si le modèle, au point 5, montre une circulation résiduelle très faible (zone où la circulation résiduelle est nulle au large du CAP FREHEL les mesures (Figure 55), en surface et au fond, montrent également un courant résiduel très faible, mais de direction variable. Cette variation est probablement due aux effets du Cap qui sont différents suivant les cycles de marée (morte eau - vive eau).

Par contre, au point 10, les amplitudes du courant résiduel en surface et au fond sont de l'ordre de 10 cm/s. (Figure 56).

Nous observons que le courant résiduel, en surface et au fond, varie en fonction des coefficients de marée (cycles morte eau - vive eau).

Pour une marée de vive eau (10 Août 83, Coef. = 104, vent faible), les courants résiduels sont, respectivement, en surface et au fond, 20 et 15.7 cm/s.

Pour une marée de morte eau (5 Août 83, Coef. = 52, vent faible), les courants résiduels en surface et au fond sont de l'ordre de 5 cm/s.

La direction du courant résiduel est essentiellement Ouest.

En ce qui concerne l'effet du vent, nous constatons qu'il n'affecte que le courant résiduel en surface. Or pour un vent de 7 m/s et $f = 10^{-4}$ le calcul théorique donne une couche d'Ekman de l'ordre de 10 m.

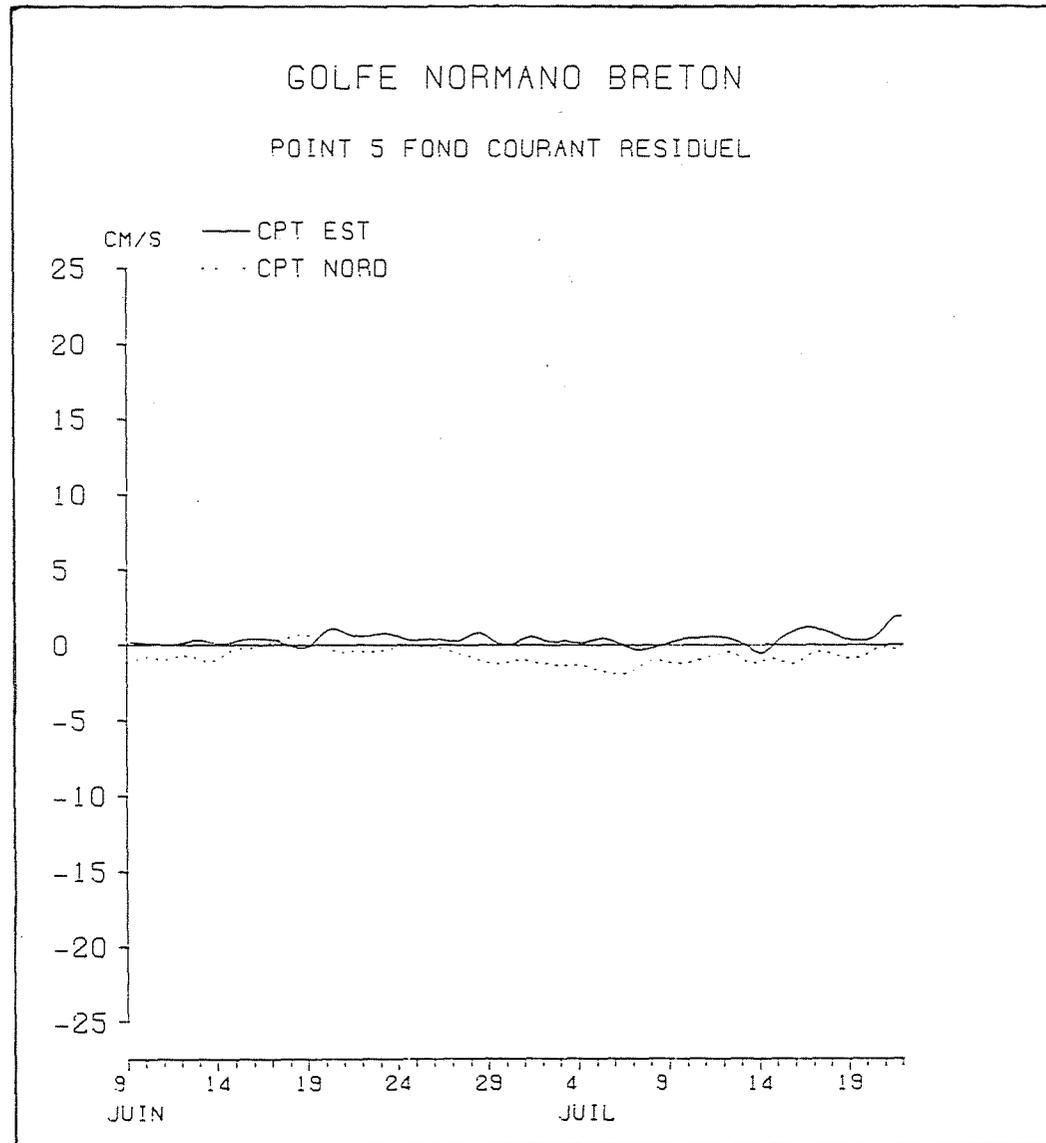
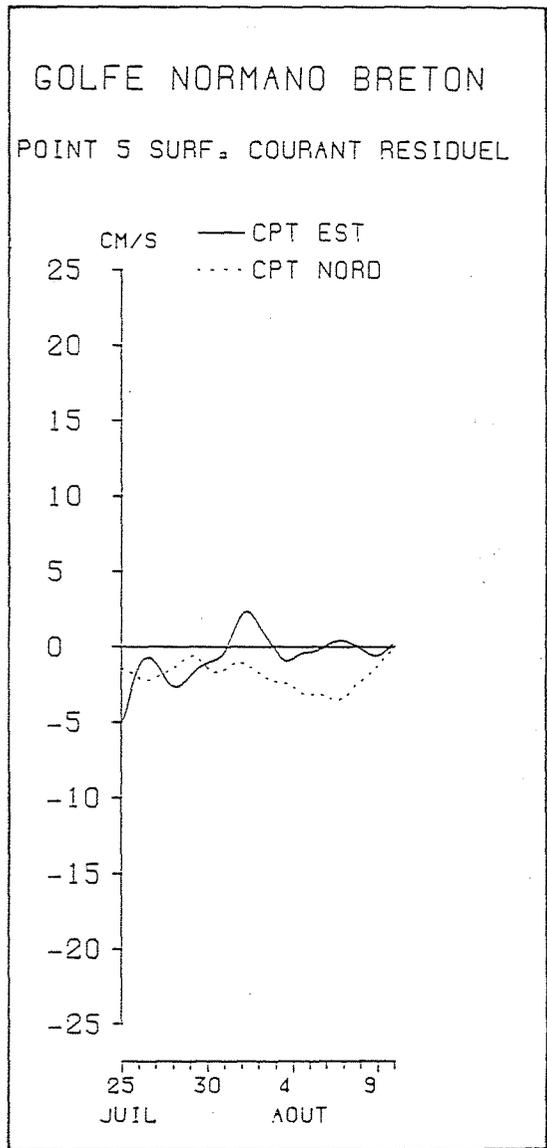
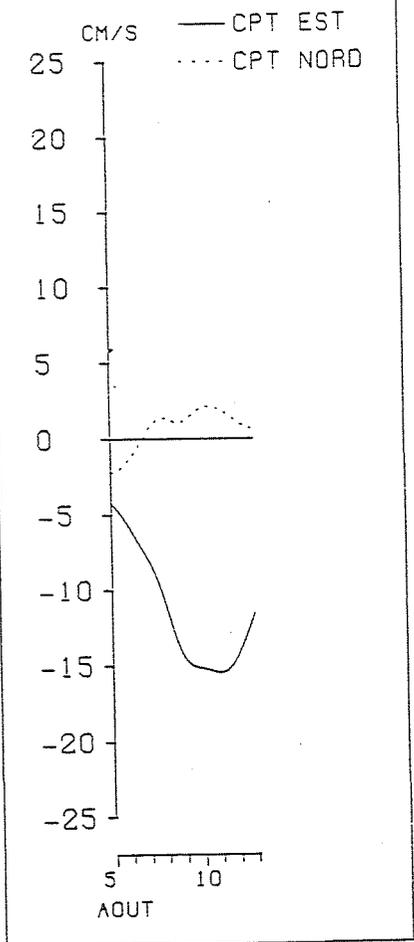


FIGURE 55

GOLFE NORMANO BRETON
POINT 10 FOND COURANT RESIDUEL



GOLFE NORMANO BRETON
POINT 10 SURF. COURANT RESIDUEL

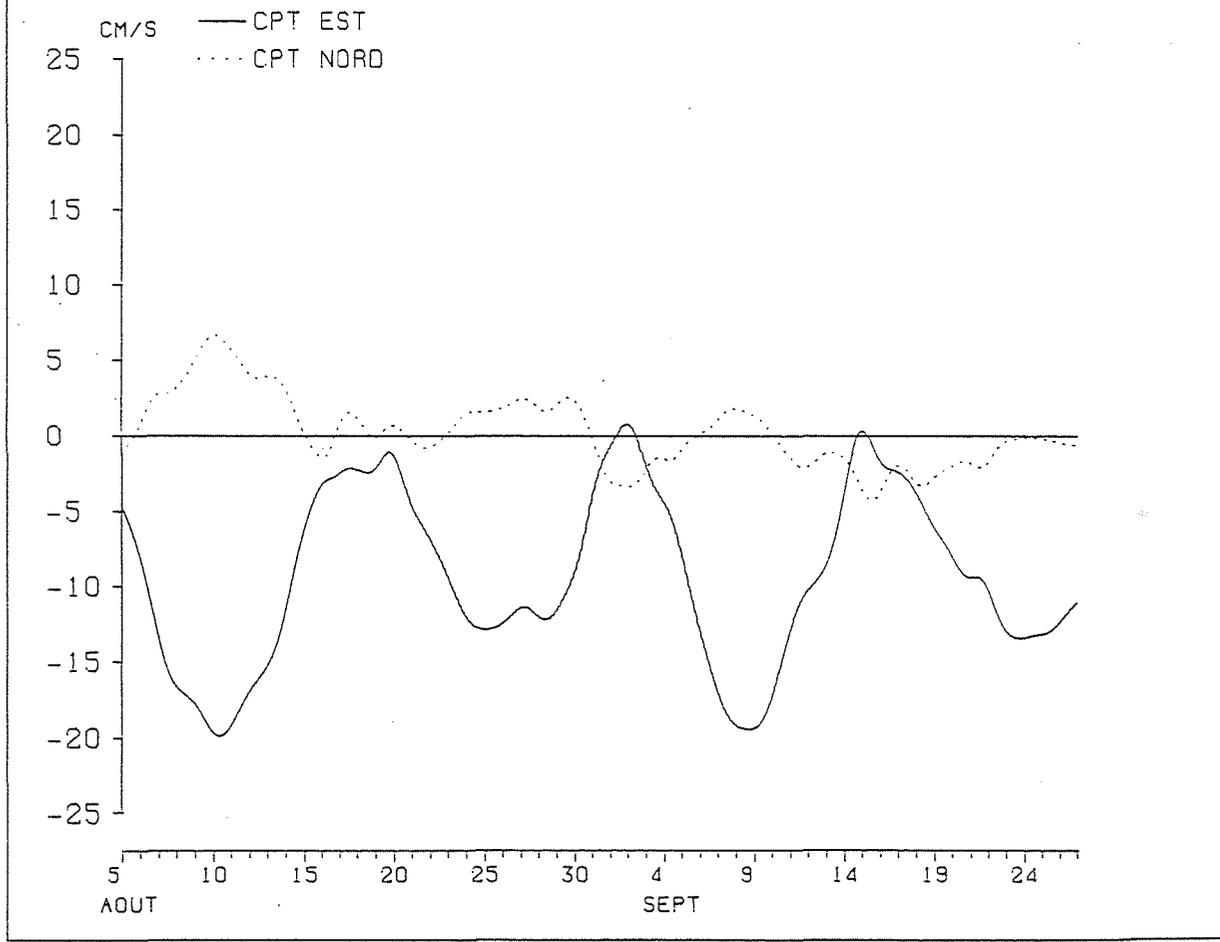


FIGURE 56

L'effet du vent, par un changement significatif de la direction du courant résiduel, est net en morte eau.

Par contre, en vive eau, l'effet du vent est soit de diminuer, soit d'augmenter légèrement l'amplitude du courant résiduel de marée.

Ainsi, la perturbation observée sur le courant résiduel en surface les 19, 20 et 21 Août correspond à des vents de 9, 13 et 10 m/s et qui portent vers le Nord-Est. L'effet de ce vent est d'augmenter la composante Nord du courant résiduel et de diminuer sa composante Ouest.

Le premier changement significatif de la direction du courant résiduel est observé pendant la période du 1er au 5 septembre. Le vent, pendant cette durée, avait une intensité supérieure à 10 m/s et était de direction variable (l'intensité du vent ainsi que sa direction est présentées en annexe V). En conclusion et à partir de ces deux exemples, l'effet du vent sera très important et essentiellement en morte eau.

IV-5 CIRCULATIONS RESIDUELLES LAGRANGIENNES

IV-5-1 RESULTATS DU MODELE

Le courant résiduel lagrangien est obtenu en divisant le déplacement, effectué par une particule d'eau pendant le temps $t_0 + T$, par la période $T = 12 \text{ h } 25 \text{ mn}$.

La vitesse lagrangienne, ainsi obtenue, dépend de l'heure t_0 (l'heure de départ).

La figure (57) résume les déplacements de particules à des heures marée différentes.

Nous constatons que les déplacements sont très faibles au voisinage de la Côte Bretonne et une partie de la côte du Cotentin, au sud de Carteret.

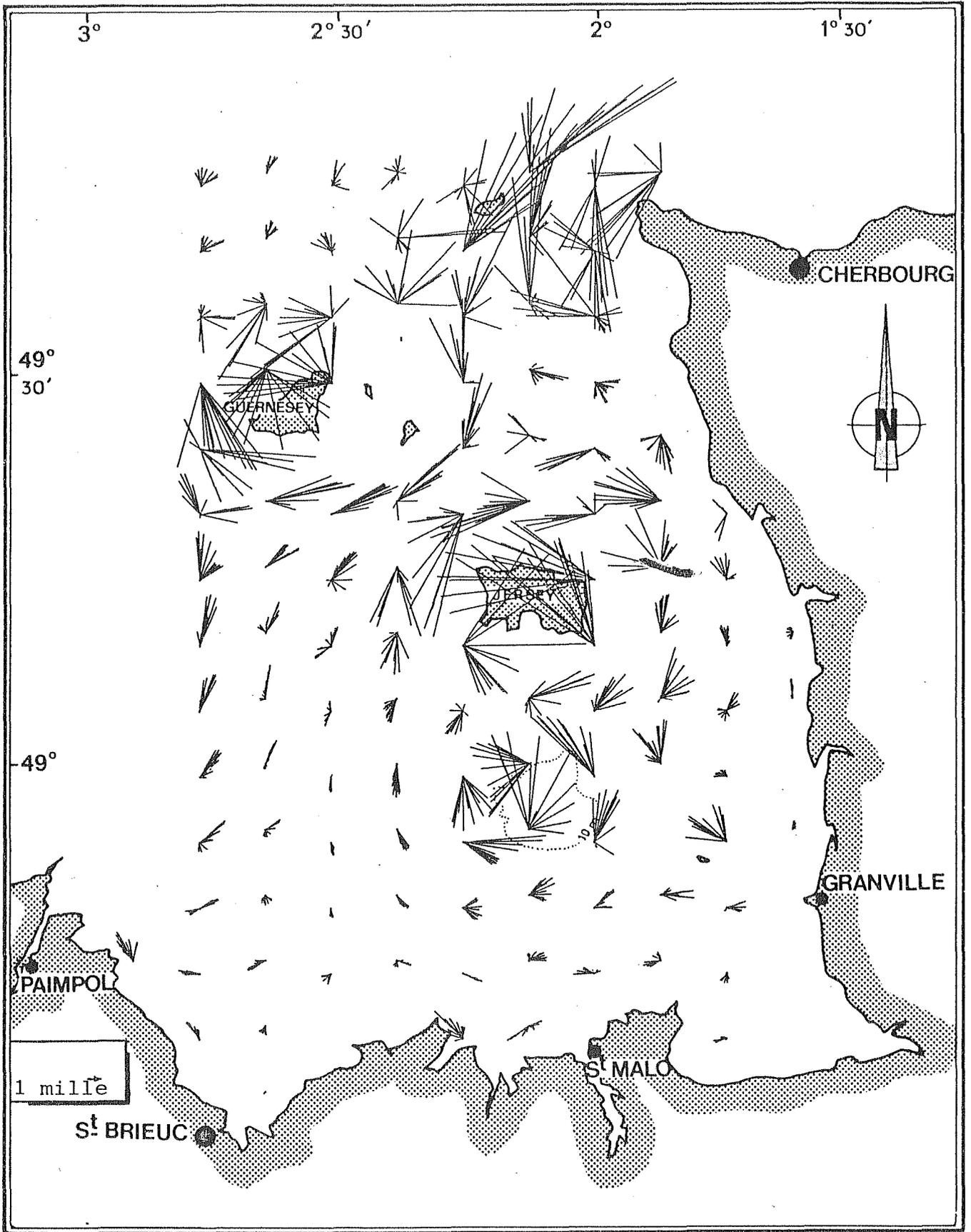
Par contre, au niveau des Minquiers, autour des îles et dans le Raz Blanchard, les déplacements sont très grands, relativement au reste de la zone.

L'excursion d'une particule lâchée à P.M. à SAINT MALO au cours d'une marée de vive eau est de :

- 25 km au nord de Jersey,
- 7,4 km au voisinage des Côtes Bretonnes,
- 14 km au sud de JERSEY.

Les excursions des particules "lâchées" à chaque heure marée sont présentées en annexe 3.

En Raz Blanchard, l'excursion des masses d'eau peut atteindre 30 km.



DEPLACEMENT A CHAQUE HEURE DE LA MAREE

FIGURE 57

Ce résultat montre que les excursions des masses d'eau, au cours de la marée, sont supérieures ou égales aux variations topographiques de la côte.

L'excursion d'une particule au voisinage de JERSEY, est de l'ordre d'une vingtaine de kilomètres. Le rayon équivalent de JERSEY est de l'ordre de 7 km.

Les déplacements des particules autour des îles reviennent rarement à leurs points de départ et contournent les îles toujours dans le sens positif.

IV-5-2 COMPARAISON AVEC LES FLOTTEURS ARGOS

Le programme global des lâchers, ainsi que les positions sont indiquées au DEUXIEME CHAPITRE (TABLEAU 4). Nous signalons que ce programme concerne uniquement la zone Sud de JERSEY. Aucun lâcher n'a été effectué au Nord de cette zone.

Globalement, nous avons constaté qu'aucune bouée n'a quitté le G.N.B :

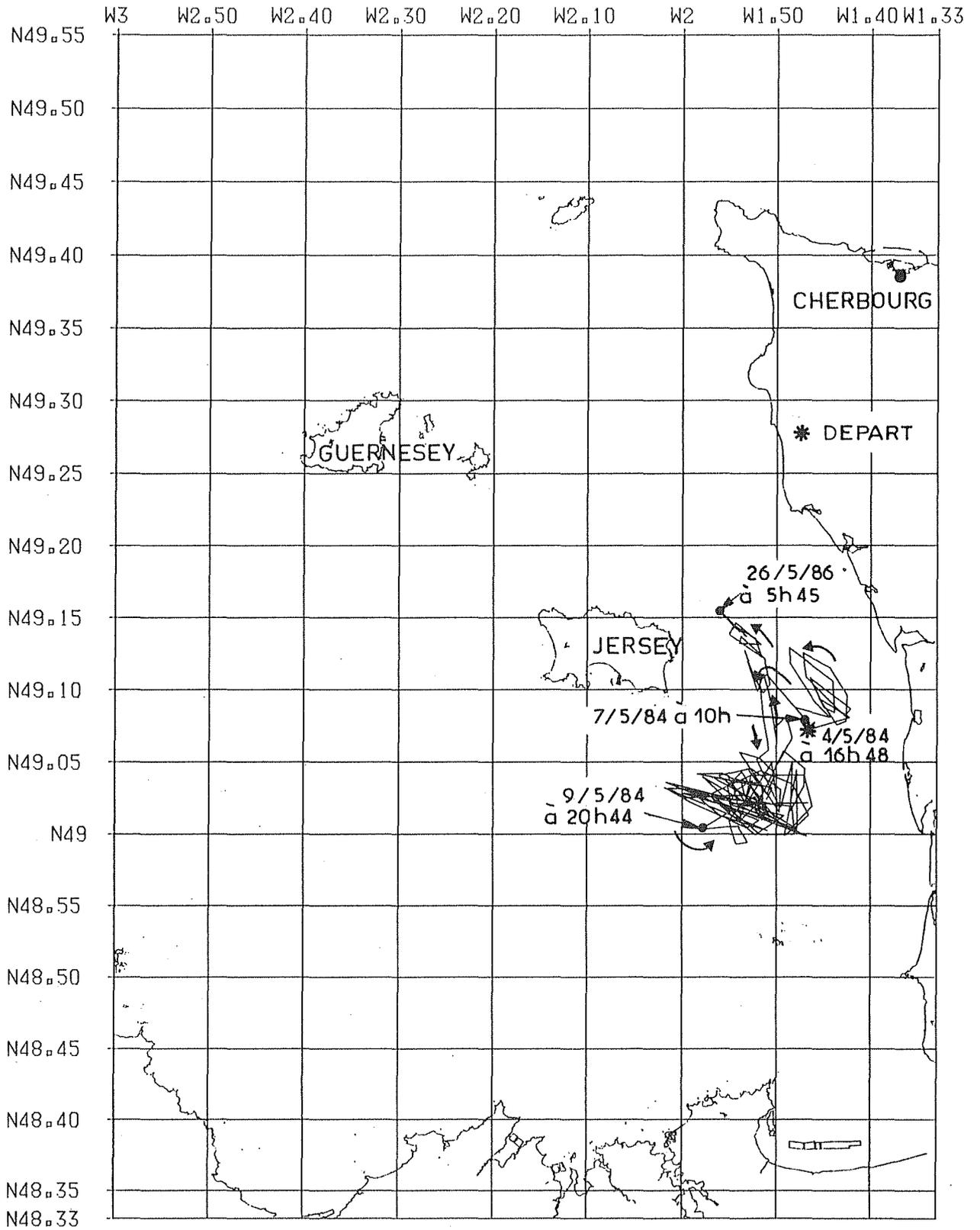
Toutes les bouées étaient, soit récupérées par des pêcheurs, soit échouées sur les hauts fonds ou sur la côte.

Les trajectoires des bouées ont mis en évidence la circulation résiduelle suivante :

- Près de la côte, située à mi-chemin entre le havre de ST GERMAIN SUR AY et havre de REGNEVILLE, la bouée est restée dans cette zone pendant 18 jours pour être finalement récupérée par un pêcheur dans la zone située au milieu, entre JERSEY et le COTENTIN (Figure 58).

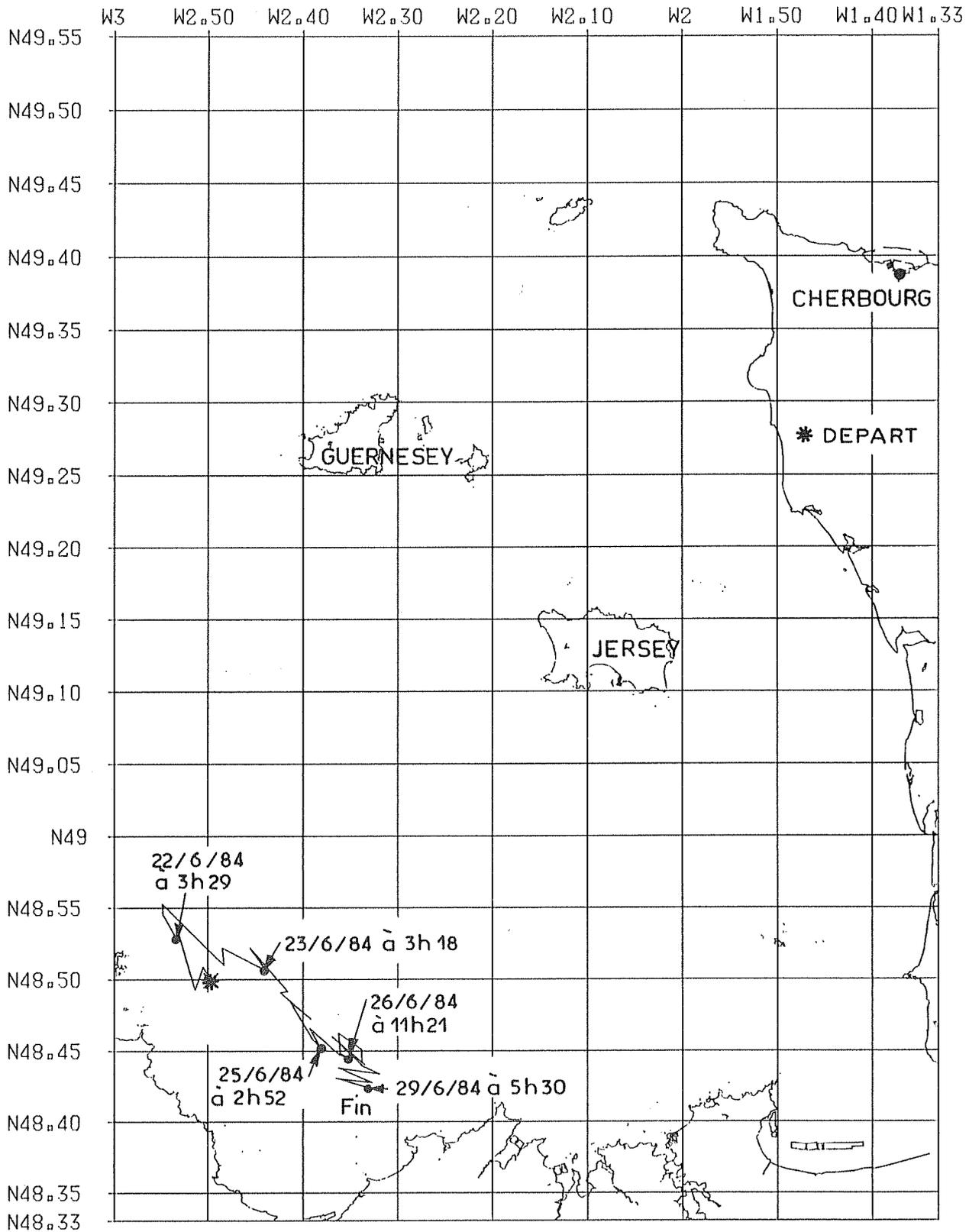
Ce résultat confirme que la circulation résiduelle est faible dans cette zone. Signalons que pendant cette période le vent était faible.

- Une bouée lâchée au large de la Baie de SAINT BRIEUC (Figure 59) a parcouru la baie en 8 jours dans le sens Sud-Est, ce qui correspond à une résiduelle de 2 cm/s. Le modèle, pour un coefficient 93, donne une résiduelle très faible dans cette zone. On remarque sur cette figure que la bouée a tourné dans le sens anticyclonique entre le 22 et le 23 Juin, date à laquelle un vent très fort NW (voir Annexe V) a poussé cette bouée vers l'Est de la Baie (morte eau). Ceci confirme les résultats eulériens



BOUEE ARGOS 2140

FIGURE N° 58



BOUEE ARGOS 2136 (34 POSITIONS)

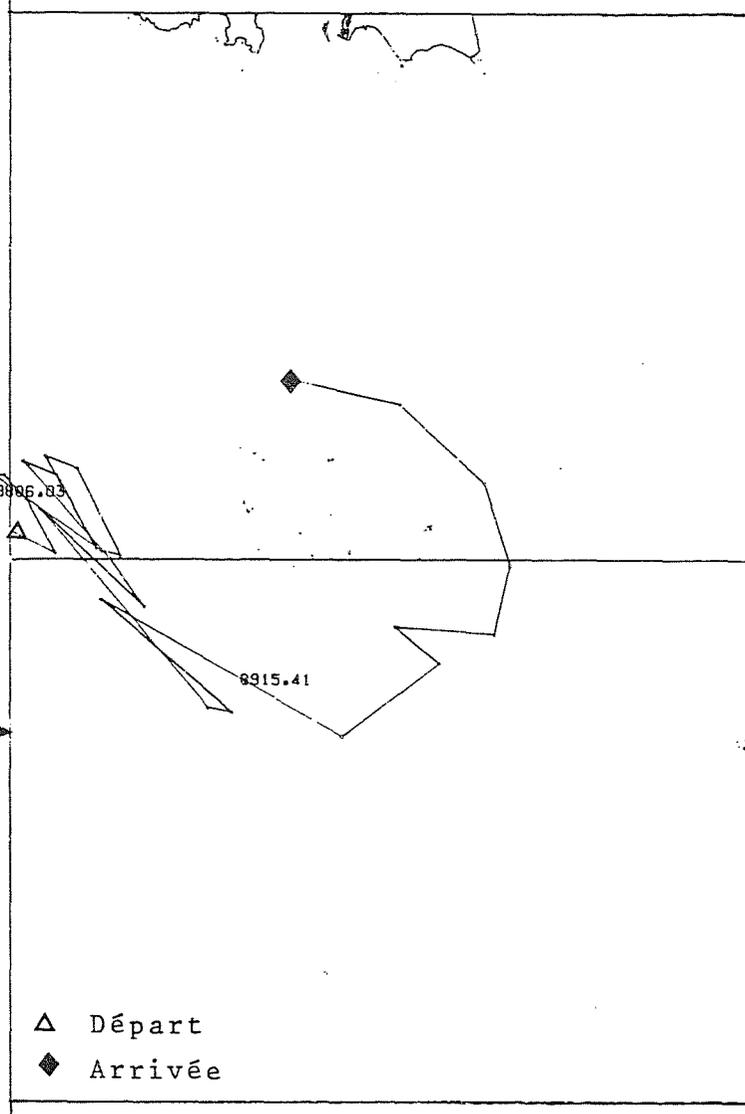
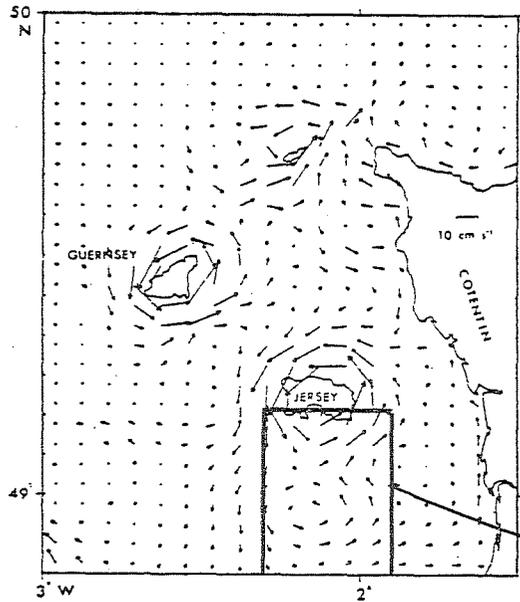
FIGURE N° 59

présentés dans le paragraphe IV-4 qui montrent que l'effet du vent devient très important en présence d'une marée de morte eau.

Le modèle fait apparaître une circulation cyclonique autour des îles et des hauts fonds (exception faite de la baie de SAINT BRIEUC, où la circulation résiduelle est anticyclonique). Les mesures montrent également cette circulation autour des MINQUIERS (Figure 60).

Cette comparaison montre que le modèle reproduit bien les grands traits de la circulation résiduelle (du moins dans la zone de comparaison).

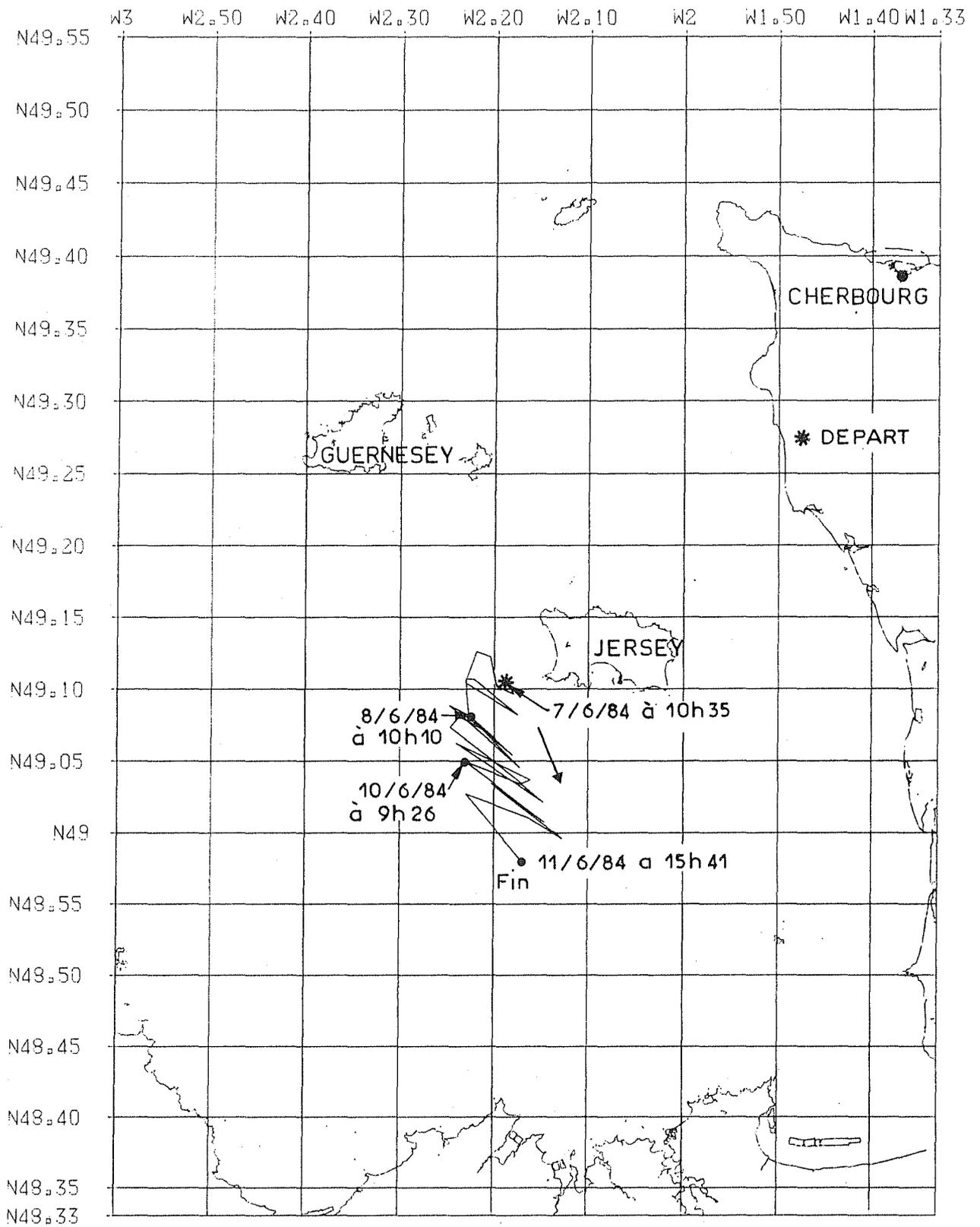
En ce qui concerne l'intensité du courant résiduel lagrangien, le calcul, (Figure 61), conduit à une valeur de 10.4 cm/s et qui correspond à la valeur indiquée par le modèle.



Lagrangian tidal residuals in the Channel Isles region showing anticlockwise residuals around Guernsey and Jersey.

D'après (PINGREE et AL, 1985)

BOUEE ARGOS 4109



BOUEE ARGOS 2138 (32 POSITIONS)

FIGURE N° 61

IV-6 SCHEMA DE CIRCULATION RESIDUELLE LAGRANGIENNE

Les schémas de la circulation lagrangienne que nous avons proposé jusqu'à présent dépendent de l'heure marée.

Le but, dans ce paragraphe, est de proposer un schéma de circulation résiduelle lagrangienne indépendant de l'heure marée.

Pour s'affranchir de l'heure marée, nous avons utilisé les coordonnées de MICHE. C'est à dire, qu'au lieu de porter la vitesse résiduelle au point de départ, nous l'avons mis au centre de gravité de la trajectoire.

Les résultats ainsi obtenus sont portés sur la figure (62).

Nous constatons que les schémas obtenus donnent les mêmes tendances de circulation résiduelle. Par contre, l'intensité du courant résiduel varie d'une heure de départ à l'autre, surtout près des hauts fonds et des îles.

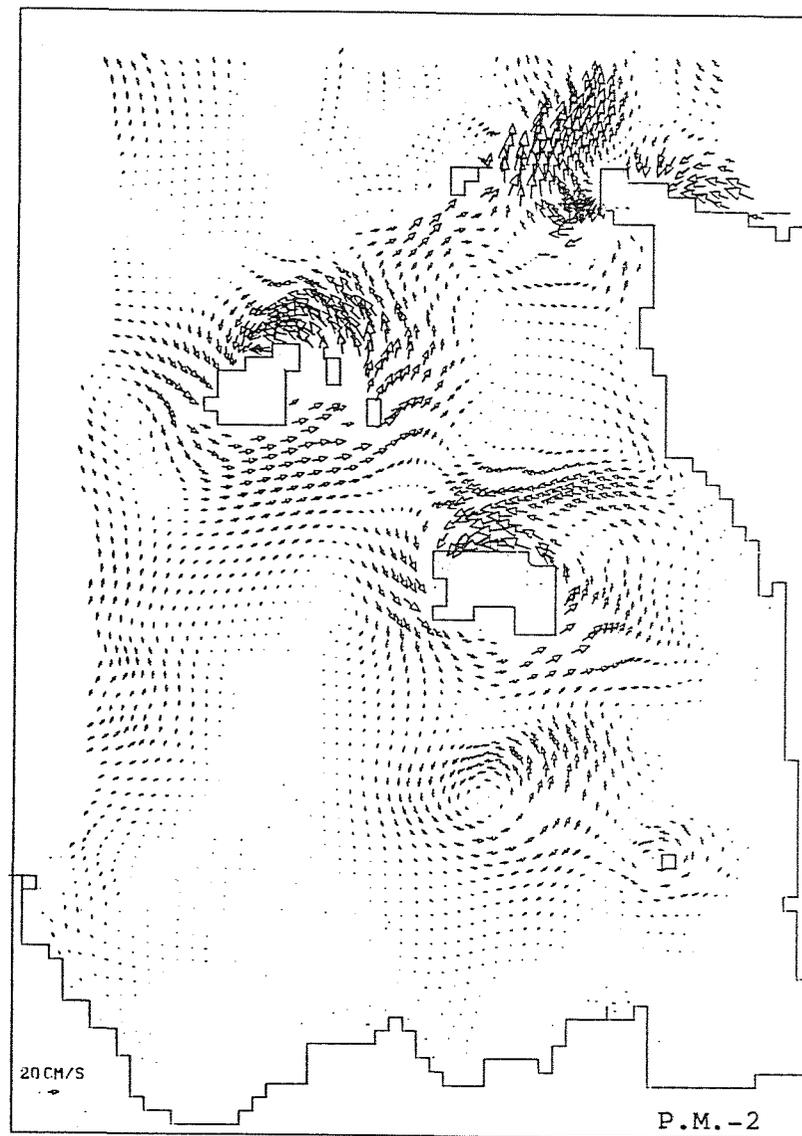
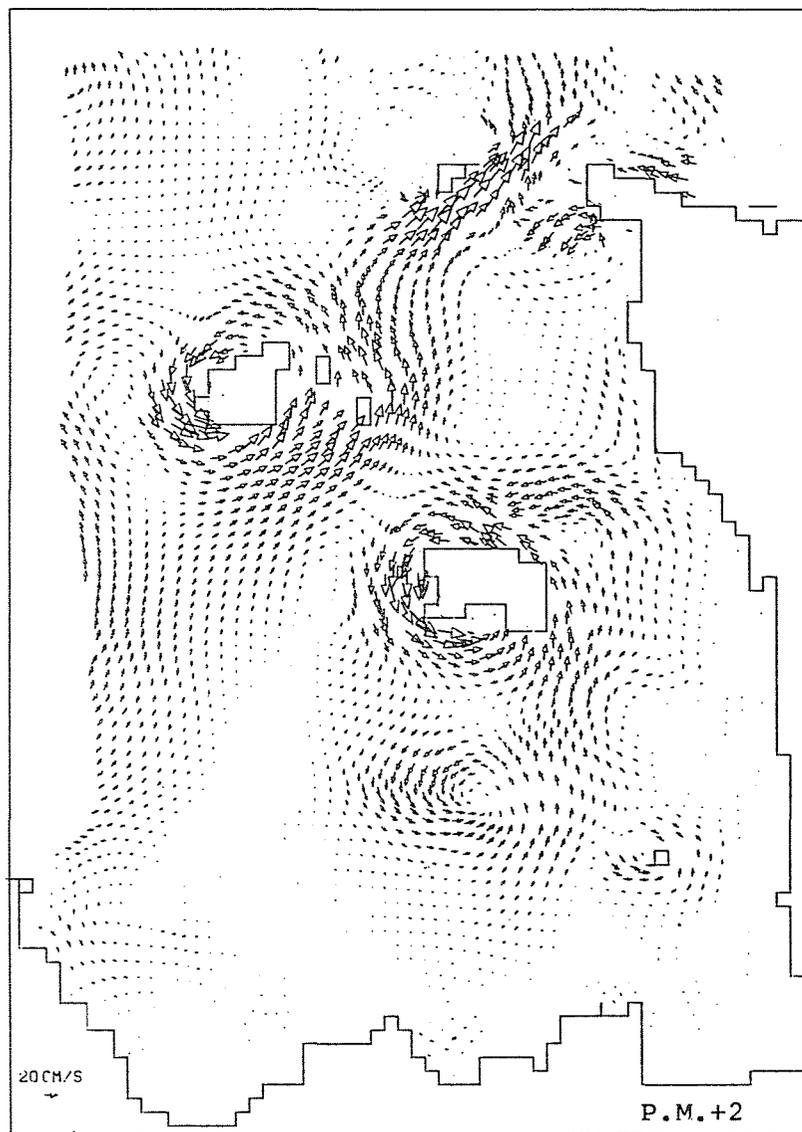
Pour s'affranchir de cette variation d'intensité, nous avons moyenné les courants résiduels obtenus pour chaque heure sur la période de la marée ($T = 12 \text{ h } 24$).

Cette variation d'intensité est probablement due aux ondes diurnes que nous ne filtrons pas en moyennant sur $12 \text{ h } 24$.

Le résultat est porté sur la figure (63).

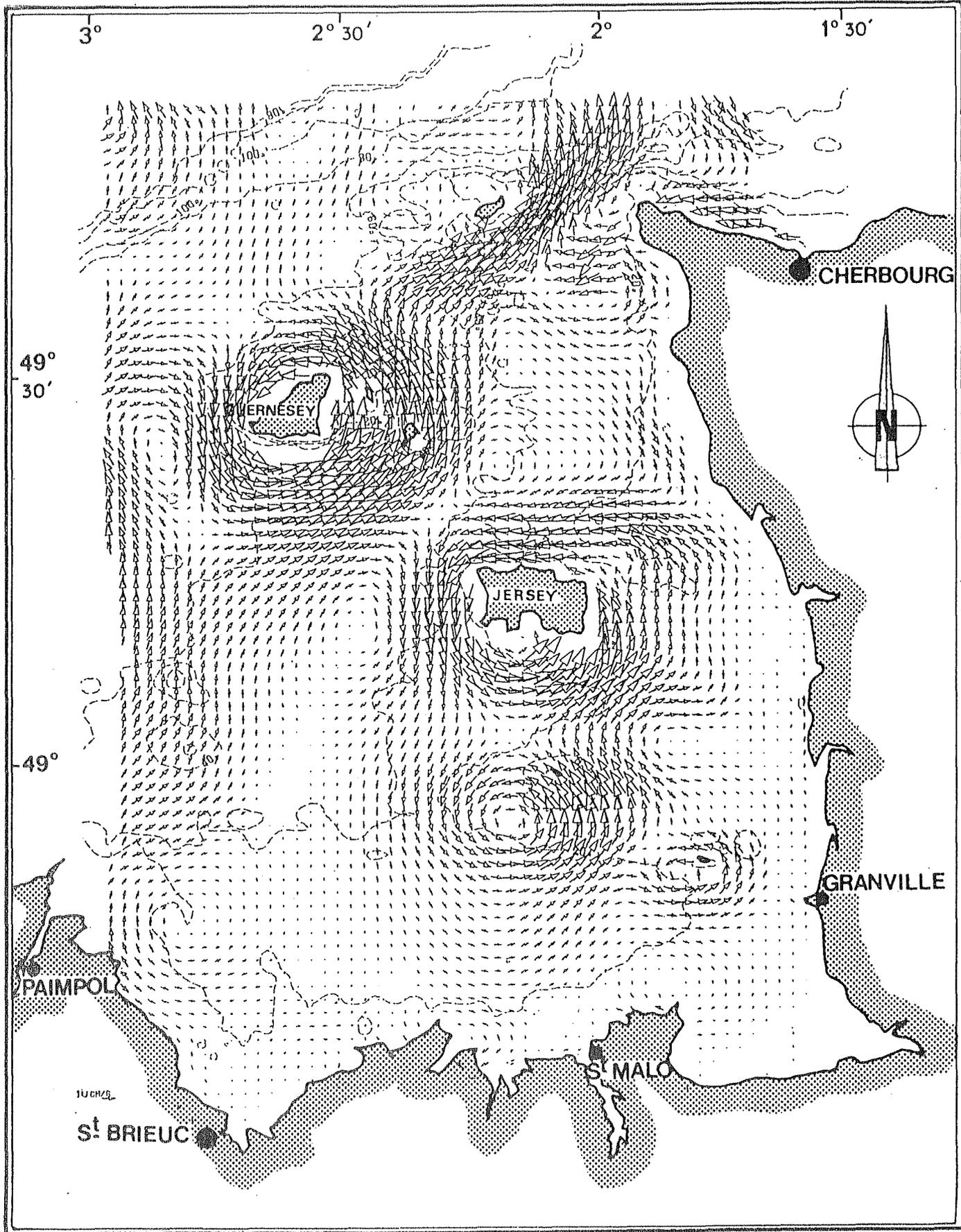
Un autre lâcher a été effectué à l'Ouest de JERSEY (position : $49^{\circ} 15\text{N}$ et $2^{\circ} 38\text{W}$). Cette bouée est la seule qui soit restée pendant 38 jours dans la zone alors que, pendant cette période, le vent était faible (inférieur à 10 m/s) (Figure 64)

Après être restée assez longtemps dans la même zone, cette bouée s'est dirigée vers la corne Sud-Ouest de JERSEY pour suivre, ensuite, une direction Sud-Ouest. Une fois arrivée au large du CAP FREHEL, elle prend une direction Nord-Est, passant entre CHAUSY et LES MINQUIERS.



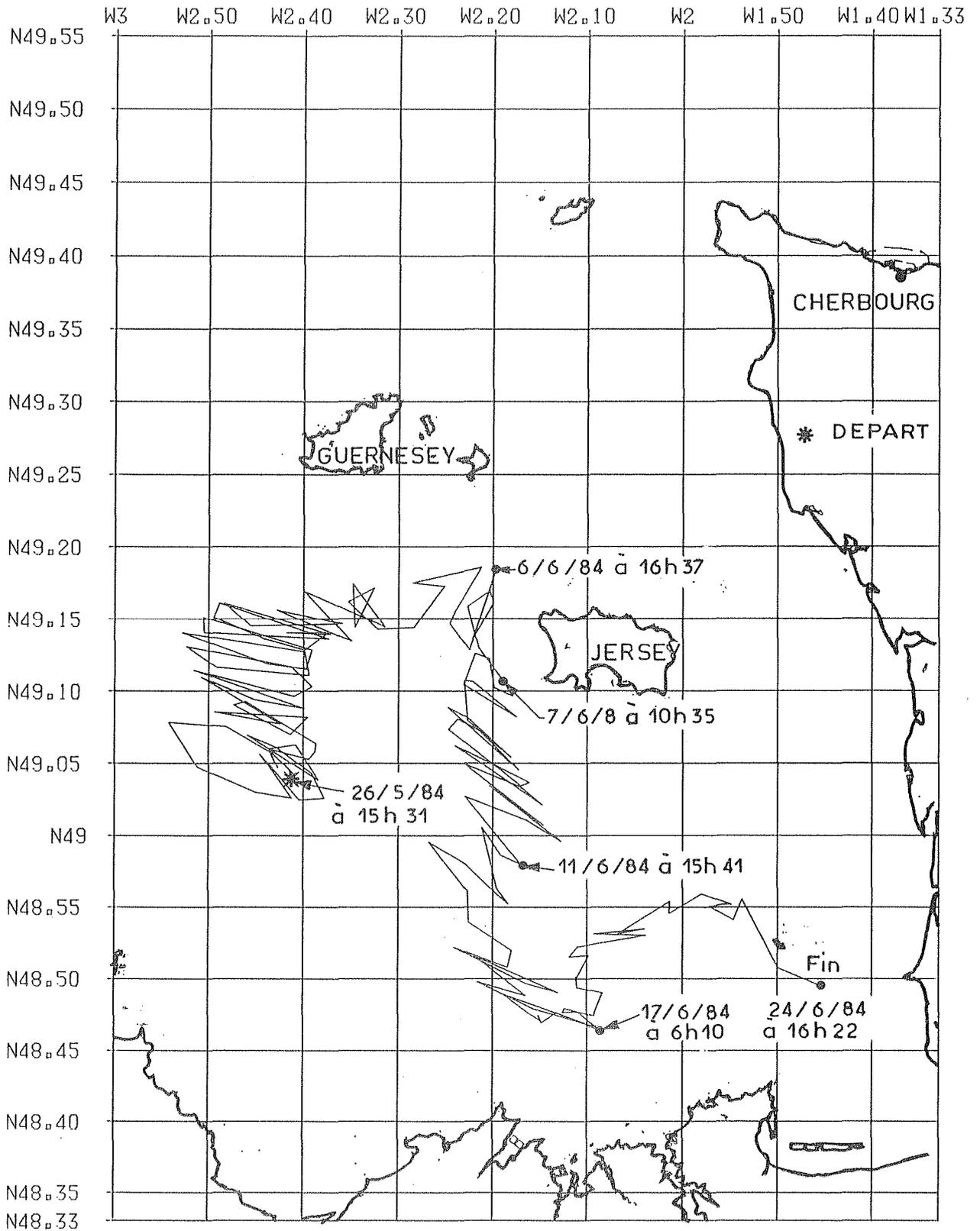
VITESSE RESIDUELLE LAGRANGIENNE AFFECTEE AU CENTRE DE GRAVITE DE LA TRAJECTOIRE

FIGURE N° 62



CIRCULATION RESIDUELLE LAGRANGIENNE (Coef. 92)

FIGURE 63



BOUEE ARGOS 2138 (32 POSITIONS)

FIGURE N° 64

Le modèle reproduit exactement les mêmes tendances de la circulation résiduelle.

Une comparaison avec la carte (Figure 60) du courant résiduel lagrangien obtenue par PINGREE et al., (1985b) montre une concordance entre les deux cartes. Nous retrouvons également cette circulation cyclonique autour des îles et des hauts fonds.

Les deux modèles proposent des intensités de l'ordre de 20 cm/s autour des îles et des hauts fonds.

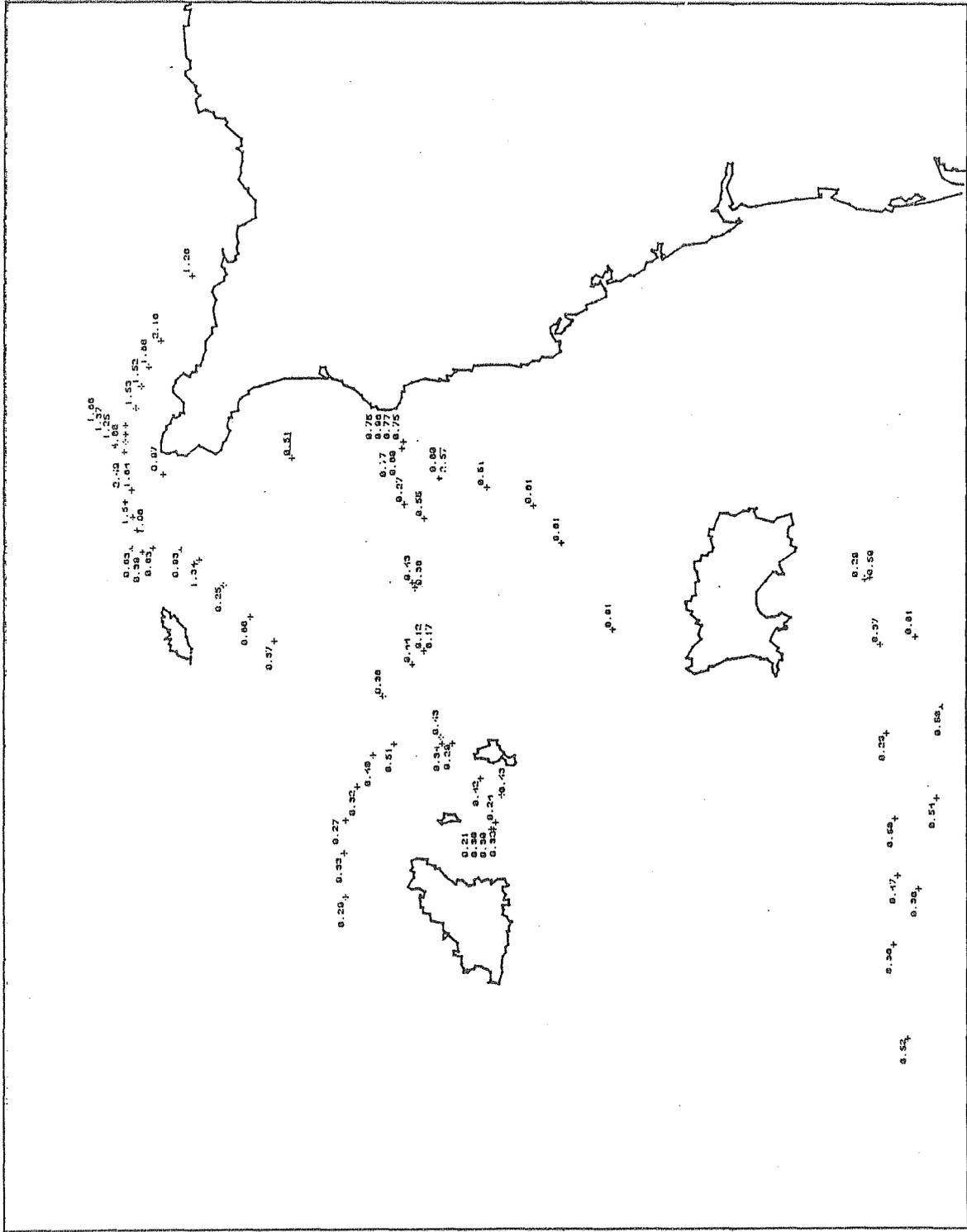
Nous constatons que toutes les caractéristiques décrites dans le paragraphe précédent se retrouvent sur cette figure.

Nous constatons également une ligne diagonale passant entre JERSEY et GUERNESEY qui se caractérise par un courant résiduel très faible.

Les cartes qui nous ont été fournies par le C.E.A. de la HAGUE (Figure 65) montrent les concentrations de radio-nucléotide ^{125}Sb (antimoine 125), élément soluble à plus de 99 % et qui constitue un marqueur idéal pour étudier les déplacements des masses d'eau. (GUEGUENIAT et al., 1981).

Signalons que les rejets de la Hague commencent, grâce à un bassin de stockage, à PM-2 (P.M. Dielette) et durent 3 heures. L'heure du départ est choisie de telle façon que les rejets partent vers la Manche Est.

Or ces cartes montrent la présence des traces de ces rejets à l'intérieur du G.N.B.. Par diffusion et dispersion, une partie de ces radionucléides va se retrouver au Sud du point de rejet. Une fois au sud et d'après notre schéma de circulation lagrangienne moyenne, ces radionucléides vont être piégés essentiellement dans la partie Est de la diagonale qui passe entre Guernesey et Jersey.



29/6/84

PLUTEUS

RADIONUCLIDE= ¹³⁵Sb

FIGURE N° 65

2°

290

3°

IV-7 CIRCULATION RESIDUELLE AU VOISINAGE DU FRONT

Le schéma de circulation lagrangienne de marée montre que cette circulation entretient ce front une fois formé. C'est la raison qui nous a poussés à nous intéresser à la circulation au voisinage du front et à essayer de comprendre comment ce front existe dans une zone où le courant est très fort.

En période estivale, les masses d'eau, existantes près du Cotentin se réchauffent à cause de la faible profondeur qui caractérise cette zone. Ces masses d'eau, une fois arrivées à l'Ouest de Jersey, vont rencontrer d'autres masses d'eau plus froides, et par conséquent plus denses, venant du large de Guernesey.

Conformément à ce schéma, nous pouvons donc nous attendre à une inversion de ce front en période hivernale.

L'examen des images satellites qui couvrent cette zone pendant l'année (C. VERCELLI, 1985) montre bien cette inversion. C'est-à-dire du côté du Cotentin, les eaux sont plus denses que celles venant du large de Guernesey.

Les périodes de transition se situent au printemps et en automne.

- Au printemps, la transition est située au mois d'avril où toute la zone est homogène.

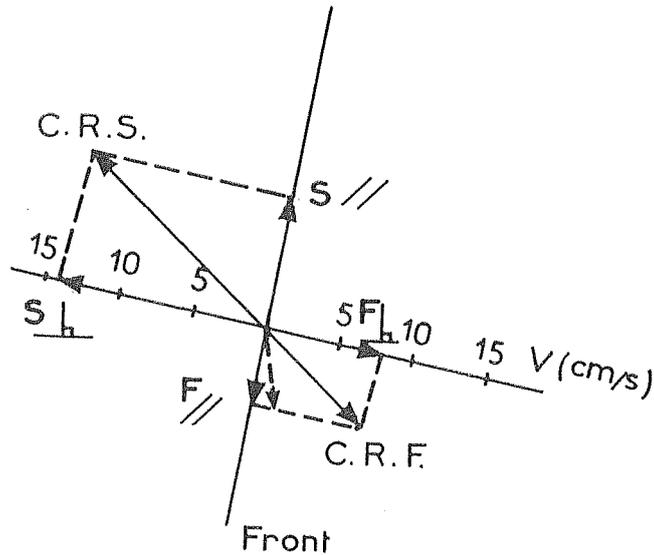
- En automne, la transition est moins nette, sur les images satellites à cause des nuages, et se situe vers le mois d'octobre.

Si le modèle explique bien la formation du front, il ne donne pas le courant résiduel dans cette zone en présence du front. Le courant résiduel eulérien calculé par le modèle en ce point est essentiellement Sud avec une intensité faible ($u = 0.5$ cm/s ; $v = - 5.7$ cm/s).

Par contre, le courant résiduel mesuré en surface est variable avec une intensité de l'ordre de 18 cm/s en vive eau.

Au fond le courant résiduel est opposé à celui de surface et a une intensité de l'ordre de 10 cm/s en vive eau.

$$u = 7.5 \text{ cm/s} ; v = - 6.5 \text{ cm/s}$$



C.R.S : courant résiduel en surface

C.R.F : courant résiduel au fond

----- : courant résiduel obtenu par le modèle

Comme nous l'avons souligné dans le chapitre III, le front se déplaçant par rapport au point 6, le courant de densité va être variable et va dépendre de la position du point 6 par rapport au front. Or, le courant résiduel obtenu est moyenné sur la marée.

Considérons une position moyenne du front par rapport au point 6, l'orientation du front est estimée à partir de l'image satellite à 10° par rapport au Nord (orientation Nord-Nord-Est).

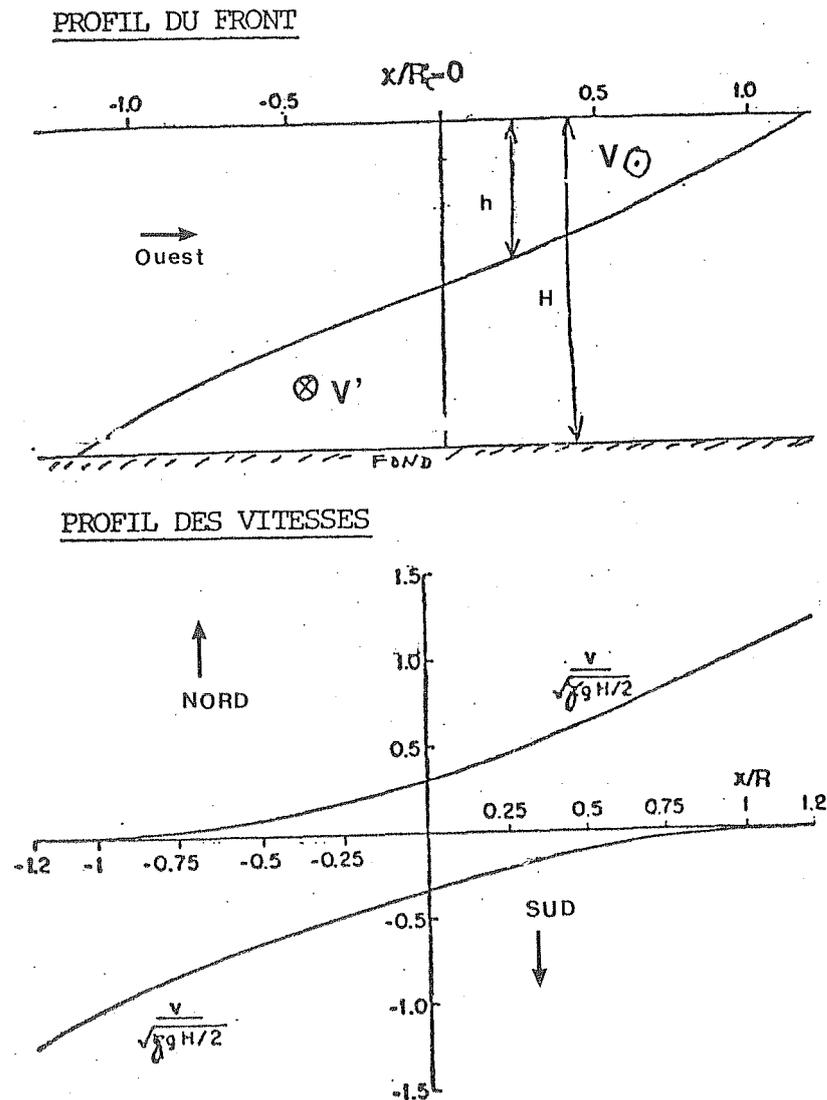
Nous avons reporté dans la figure ci-dessus l'orientation du front et les courants résiduels observés en surface (modèle et mesures) et au fond pour une situation de vive eau.

Les courants résiduels, parallèles et perpendiculaires au front, ne sont pas forcément les courants de densité car ils contiennent une part de résidu de la marée. Pour s'affranchir de ce dernier, nous avons supposé

que le modèle reproduit bien la résiduelle de marée (hypothèse qui n'est certes pas vraie à cause du bruit numérique). Dans ce cas les composantes (parallèles et perpendiculaires) du courant de densité en surface sont de l'ordre de 13 cm/s.

Au fond, nous obtenons uniquement une composante perpendiculaire au front de l'ordre de 8 cm/s.

Les résultats du calcul effectué par CSANADY (1982), en considérant l'équilibre géostrophique entre la pente (de la surface ou de l'interface) perpendiculaire au front et la force de Coriolis générée par un courant parallèle au front, sont montrés sur le schéma suivant.



d'après CSANADY

$$\text{avec } \frac{h}{H} = \frac{1}{2} \left| 1 - \frac{\text{sh } x/R_i}{\text{sh } a/R_i} \right|$$

R_i : le rayon interne de déformation

$$R_i = \frac{1}{f} \quad \gamma g \frac{H}{2} \quad \gamma = \frac{\Delta\rho}{\rho}$$

ρ est la densité

$2a$ est la largeur du front $2a = 2 (1.2 R_i)$

Dans notre cas,

$$\gamma = 4 \cdot 10^{-4}$$

$$H = 40 \text{ cm}$$

$$f = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

Ce qui donne $R_i = 2\,830 \text{ m}$

et $2a = 6\,800 \text{ m}$

Un calcul approché effectué entre le passage du front en surface et au fond (4 heures) donne une valeur de l'ordre de 5.8 km.

La valeur de la vitesse parallèle au front, calculée à partir des résultats de CSANADY, (en surface et très près du front ; $X/R_i = 1$) est de l'ordre de 25 cm/s.

Pour que notre interprétation sur les mesures soit cohérente, il faut que la position moyenne, du point 6, par rapport au front, soit de l'ordre de 707 m (de l'ordre de 1 km), et se situe dans la zone à faibles densités. Position qui nous paraît raisonnable.

En ce qui concerne le mouvement perpendiculaire au front, les équations dans les deux couches s'écrivent (dans le cas d'un équilibre entre les gradients de pression et les forces de frottement) (cette étude s'appuie sur les travaux d'OFFICER (1976), BOWDEN (1985) et BOWMAN et IVERSON (1978)) :

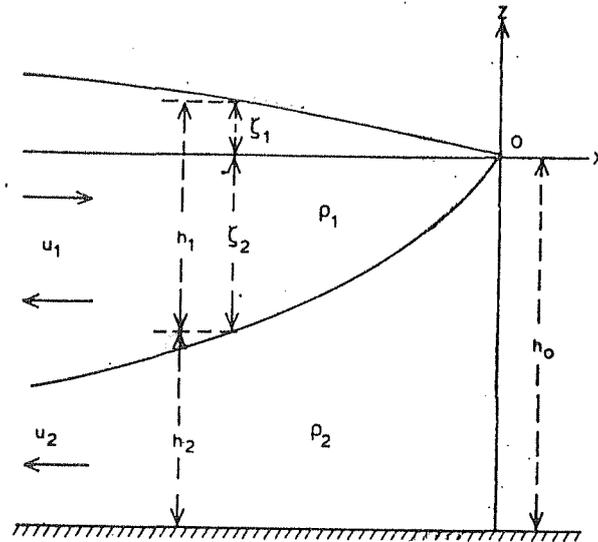
$$\frac{\partial P_1}{\partial x} = \rho_1 N_z \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2}$$

$$P_1 = \rho_1 g (\zeta_1 - z)$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial x} = \rho_2 N_z \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2}$$

$$P_2 = \rho_1 g (\zeta_1 - h_1) + \rho_2 g (h_1 - z)$$

En faisant l'hypothèse de l'équilibre hydrostatique, on a :



h_1 et h_2 sont respectivement la hauteur de la 1ère et 2ème couche et h_0 est la profondeur.

Les équations de la continuité dans les deux couches

$$\int_{-h_1}^0 u_1 dz = 0 \quad \text{et} \quad \int_{-h_0}^{-h_1} u_2 dz = q : \text{constante}$$

Ces équations sont obtenues en supposant $\zeta_1 \ll \zeta_2$ et dans les limites d'intégrations, on a supposé que $\zeta_1 = 0$ et $\zeta_2 = -h_1$ les conditions aux limites sont :

$$1) \text{ à } Z = 0 \quad \frac{\partial u_1}{\partial z} = 0$$

$$2) \text{ à } Z = -h_1 \quad u_1 = u_2$$

(assurant la continuité dans les 2 couches)

$$3) \text{ à } Z < -h_1 \quad u_2 = \text{constante}$$

$$4) \text{ à } Z = -h_1 \quad \rho_1 N_z \frac{\partial u_1}{\partial z} = k \rho_2 u_2^2 \quad \text{Loi de frottement}$$

La solution est :

$$u_1 = V_s \left(1 - 3 \frac{z^2}{h_1^2} \right)$$

$$u_2 = -2V_s$$

$$V_s = \frac{3}{2} \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{N_z}{k h_1}$$

La vitesse à la surface

$$\text{Le profil du front est } h_1^4 = \frac{36 N_z^2 x}{h \gamma} \quad \text{avec } \gamma = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}$$

Application du front Jersey-Guernesey

Dans le cas où le point 6 est situé à 707 m, $h_1 = 7$ m :

$$\gamma = 4 \cdot 10^{-4}$$

$$N_z = 10^{-3}$$

$$V_s = 7 \text{ cm/s}$$

$$k = 3 \cdot 10^{-3}$$

Cette valeur est moins grande que celle trouvée par les mesures (13 cm/s).

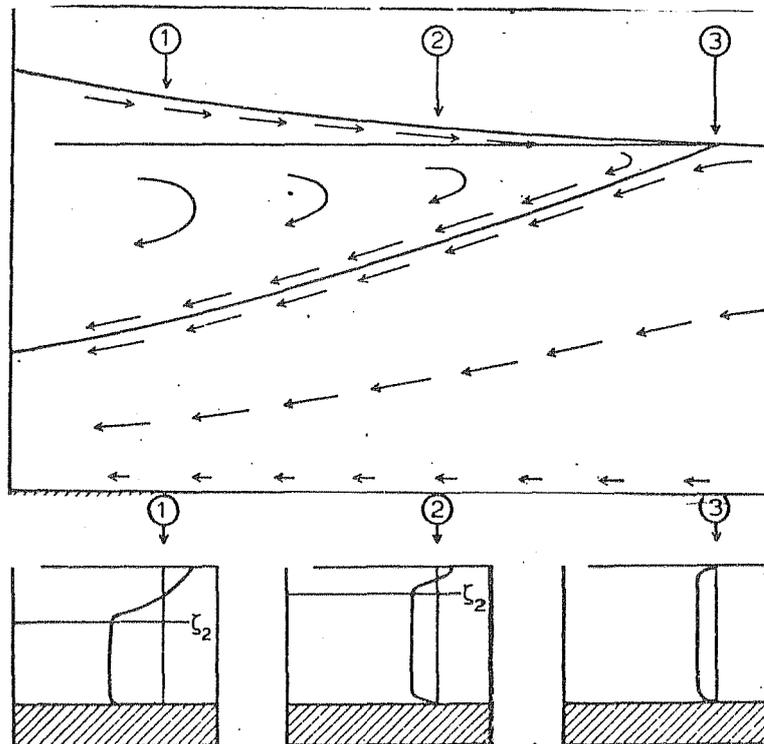


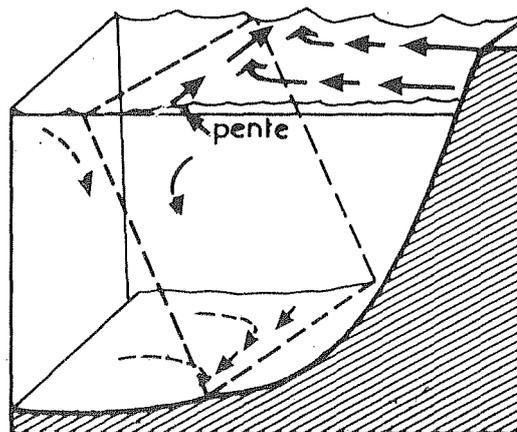
Schéma théorique de circulation dans une coupe perpendiculaire au front (d'après BOWMAN et IVERSON, 1978).

Ce calcul a été effectué en négligeant les termes d'advection. BOWMAN et al., (1978) montrent, en tenant compte de ces termes (voir schéma de la page précédente) que quand on s'éloigne du front cette vitesse augmente.

Le modèle de calcul de courant de convergence décrit dans ce paragraphe, a l'inconvénient de négliger la force de coriolis et d'imposer une propagation du front pour que la structure soit en équilibre.

En conclusion, il est bien évident que les calculs cités dans ce chapitre sont uniquement une approche théorique. Dans la réalité, les 3 mécanismes (frottement, coriolis et advection) se combinent pour assurer l'équilibre tel que le présente le schéma ci-dessous.

- gradient de pression par densité induisant une pente de la surface ;
- vitesse convergente vers le front en surface dans la couche "chaude", compensée par une vitesse opposée à l'interface (par continuité). Un tel gradient vertical de vitesse permet d'équilibrer le frottement turbulent ;
- déviation de ces vitesses convergentes ou divergentes vers la droite par la force de Coriolis, générant un courant parallèle au front. Equilibre partiel de la pente de la surface ou de l'interface avec ce courant.



L'apport permanent d'eau chaude (en été), grâce à la circulation cyclonique autour de Jersey, assure la stabilité de ce front.

CHAPITRE V

=====

CIRCULATION RESIDUELLE DE MAREE

MECANISME DE GENERATION

V-1 INTRODUCTION

V-2 EQUATION DE LA VORTICITE

2-1 Equation de vorticité

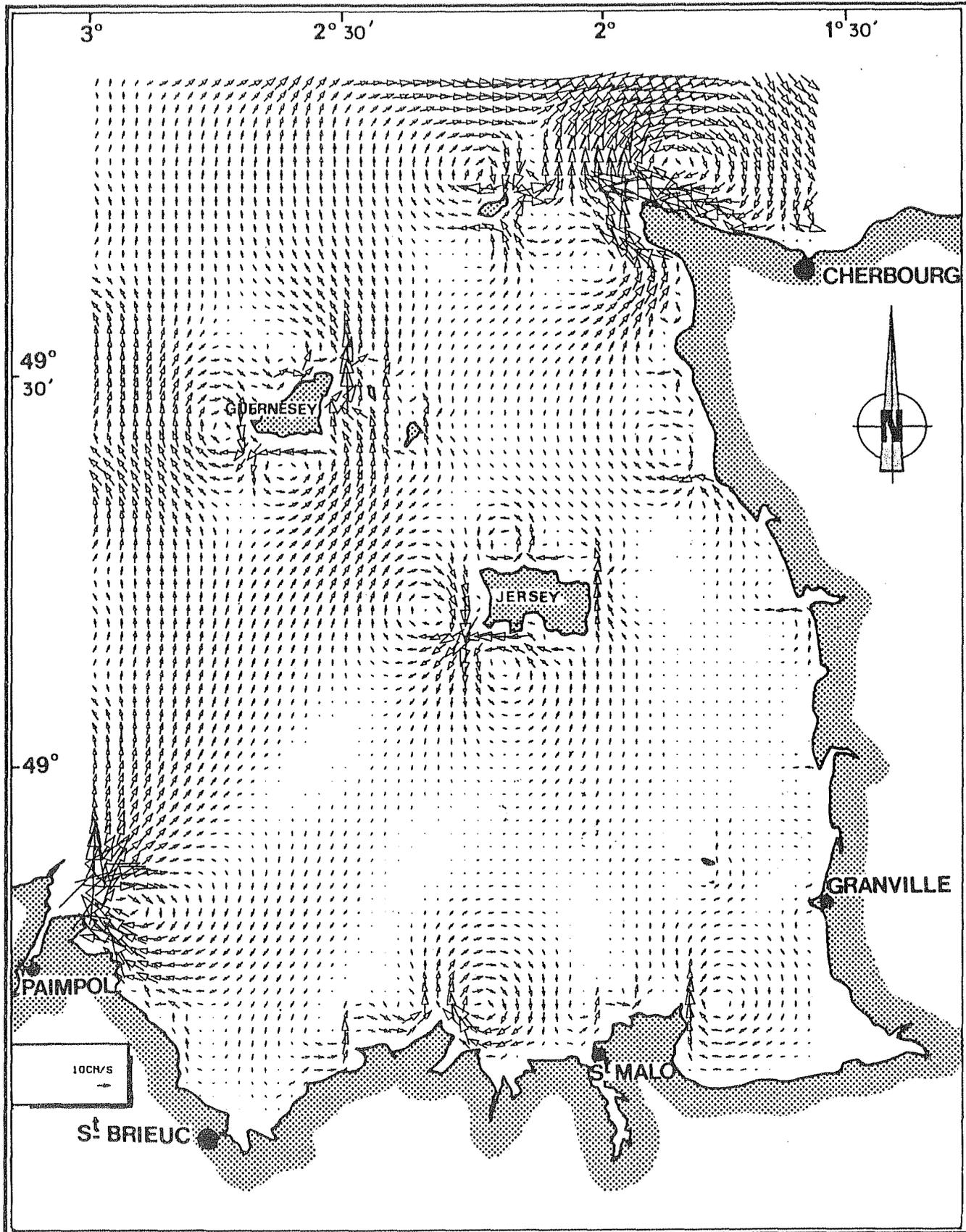
2-2 Cas schématique (profondeurs constantes)

V-3 TOURBILLONS RESIDUELS EULERIENS

3-1 Tourbillons résiduels induits par un cap

3-2 Structures induites par les hauts fonds et les iles

V-4 TOURBILLONS RESIDUELS LAGRANGIENS



CIRCULATION RESIDUELLE EULERIENNE DANS LE CAS D'UN FOND PLAT

FIGURE N° 66

V-1 INTRODUCTION

Les deux schémas de circulation résiduelle de marée (lagrangienne et eulérienne) obtenus mettent en évidence différentes structures tourbillonnaires.

Ces structures sont essentiellement générées dans les zones caractérisés par les accidents topographiques (Iles, hauts fonds et caps).

L'un des premiers tests, que nous avons effectué, était d'éliminer les hauts fonds en prenant une topographie constante dans tout le G.N.B. Les résultats de ce test (Figure 66) montrent que les structures résiduelles obtenues sur les hauts fonds (notamment sur les Minquiers) avec une topographie réelle ont disparu. Par contre, au niveau des îles et des caps, ces structures persistent mais subissent des modifications importantes.

Pour expliquer les mécanismes qui entrent en jeu dans la génération des tourbillons, nous allons nous appuyer sur les équations de vorticité relative.

V-2 EQUATION DE LA VORTICITE

V-2-1 EQUATION DE VORTICITE

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \underbrace{\nabla \cdot u \omega}_{B} + \underbrace{f \nabla \cdot u}_{C} = \underbrace{\left(\nabla \cdot \frac{\tau}{\rho H} \right)}_{D} \cdot k \quad (I)$$

ω : c'est la vorticité de la colonne d'eau

u : la vitesse intégrée sur la hauteur

τ : la tension au fond

k : vecteur unité selon l'axe verticale

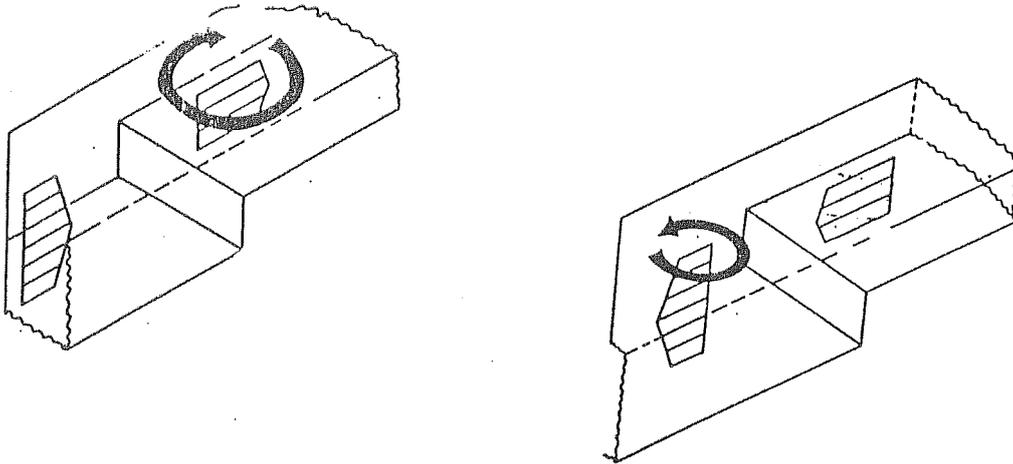
H : c'est la profondeur totale : $H = h + \xi$

ξ : c'est la dénivellation due à la marée

Le terme A correspond à la variation de la vorticité

Le terme B correspond au transport de vorticité

Le terme C correspond à la production de vorticité par la force de coriolis, lorsque la colonne d'eau s'allonge ou se rétrécit en présence d'une topographie.



Le terme D est lié au frottement sur le fond.

La loi de frottement utilisée est sous forme quadratique.

$$\tau = -\rho C_D |u| u$$

C_D : est un coefficient de frottement.

Dans le cas où C_D est constant, le terme D peut donc s'écrire :

$$\text{terme D} = - \frac{E}{h + \xi} \omega + u \nabla \frac{F}{h + \xi}$$

Le terme E correspond à la dissipation de la vorticité par frottement, cette dissipation est contrôlée par l'amplitude du courant de marée. Ce terme peut s'écrire également $-\frac{\omega}{T}$ où T correspondra à un temps caractéristique de l'amortissement.

Pour un courant $u = 1 \text{ m/s}$; $C_D = 3 \times 10^{-2}$ et $h = 30 \text{ m}$

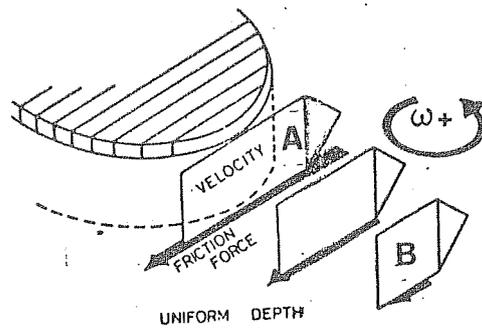
$$T = 10^4 \text{ s}$$

Le terme F correspond à la production de vorticité par frottement. Cette vorticité peut être positive ou négative.

$$\text{terme } F = \overbrace{\frac{C_D}{h + \xi} u \wedge \nabla |u|}^G - \overbrace{\frac{|u|}{(h + \xi)^2} u \wedge \nabla |C_D (h + \xi)|}^K$$

Le terme G correspond à la production de vorticité par frottement en présence d'un gradient de vitesse.

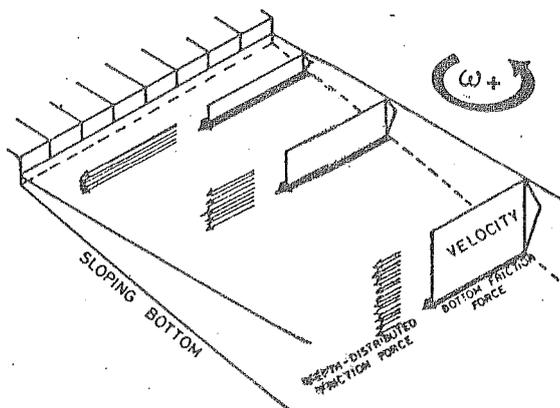
Ce mécanisme qui n'intervient que pour un frottement quadratique, est visualisé par le schéma ci-contre : le courant en A, plus rapide qu'en B, est fortement ralenti par frottement, ce qui crée une vorticité positive.



D'après ROBINSON, 1981

Le terme K correspond à la production de vorticité en présence d'un gradient de hauteur d'eau.

Ce mécanisme, dans le cas où C_D est constant, provient du fait qu'à une vitesse égale, le frottement sur le fond garde la même intensité, mais que sa distribution sur toute la colonne d'eau lui donne plus d'importance en zone peu profonde. La pente du fond perpendiculaire au courant, génère de la vorticité :



D'après ROBINSON, 1981

Nous signalons, que dans notre cas, le coefficient de frottement C_D n'est pas constant et dépend de la hauteur de la colonne d'eau (Cf. chapitre II), ce qui fait que ces deux mécanismes sont couplés.

V-3 TOURBILLONS RESIDUELS EULERIENS

Pour cette étude, nous nous sommes appuyés largement sur les travaux de PINGREE et al., (1985a), ZIMMERMAN (1981), ROBINSON (1981).

Les structures résiduelles observées dans le G.N.B. (Figure 67) résultent d'une production de vorticité par les mécanismes cités au 1er paragraphe.

Si on range ces structures par leurs sources respectives, on peut distinguer "deux types" de structure :

- tourbillons r sidueels induits par les caps ;
- tourbillons induits par les hauts fonds et les iles.

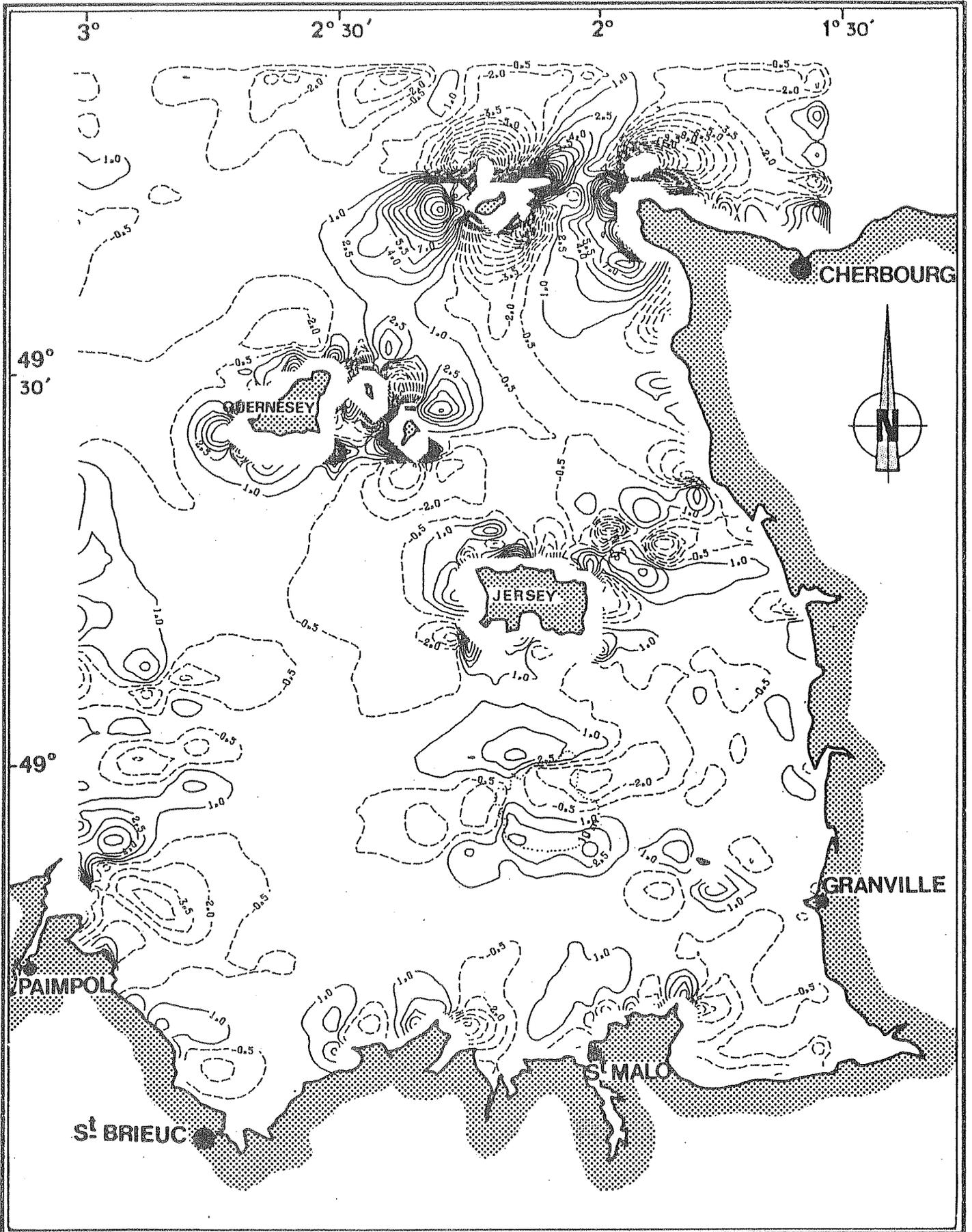
Nous constatons que les structures tourbillonnaires générées par les divers caps du G.N.B. sont identiques. Par contre, les structures observées au voisinage de Jersey, Guernesey et Chausey sont différentes de celles au niveau d'Auringy et des Minquiers.

V-3-1 TOURBILLONS RESIDUELS INDUITS PAR UN CAP

L'effet du cap sur la circulation r sidueelle se traduit par la présence d'une structure à deux tourbillons.

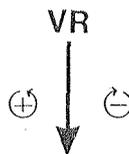
Ce phénomène a été largement étudié par plusieurs auteurs dont PINGREE (1978b) et PINGREE et al., (1979).

La génération de cette vorticité r sidueelle (dans le cas d'un cap en présence d'une topographie constante) est due à la séparation des lignes de courant entre flot et jusant. Un courant r sidueel important (VR) va être par conséquent généré. Par continuité, il y aura donc production d'une vorticité négative à l'Est de ce courant et une vorticité positive à l'Ouest.



VORTICITE RESIDUELLE ($\times 10^{-5}$)

FIGURE N° 67

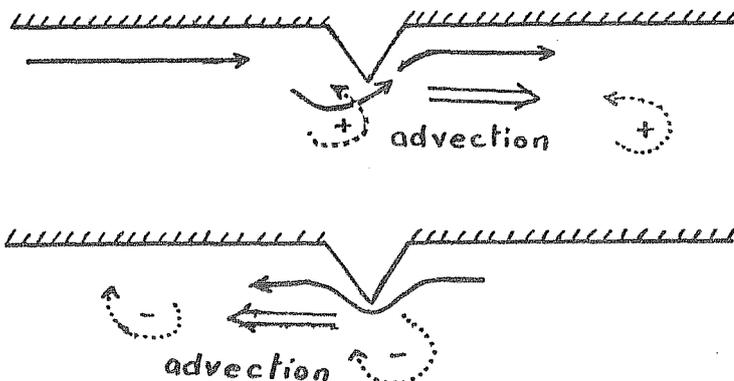


La taille de ces tourbillons calculés par modèles numériques nécessitent d'autres sources de production de vorticité que la séparation de ligne de courant (d'après J.S. ROBINSON, 1981). PINGREE et al., (1979) pense que cette amplification de ces tourbillons est due aux effets numériques.

D'autres mécanismes viennent se greffer à ce dernier :

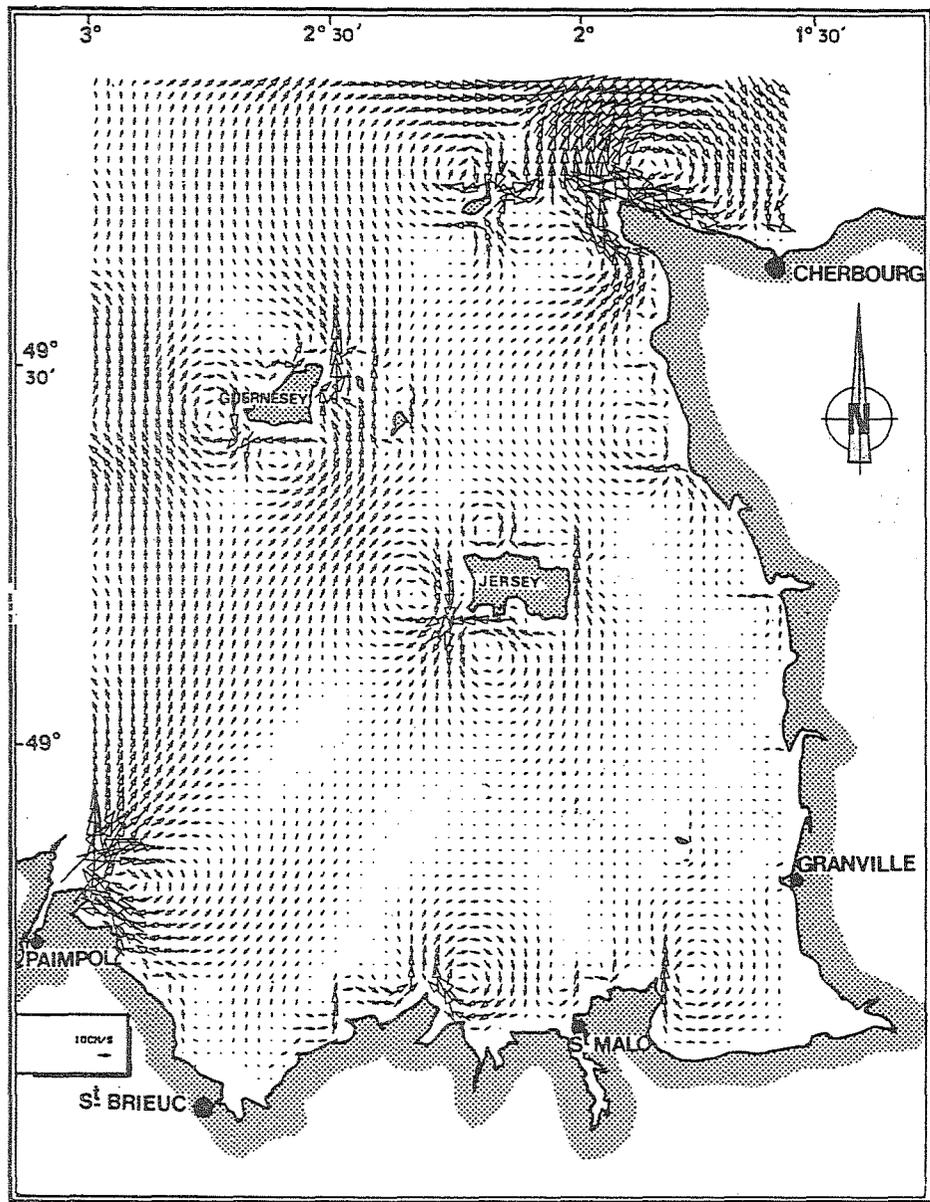
a) Un cap provoque une accélération locale de vitesse. Le terme G génère une vorticité positive quand le courant de marée porte dans un sens, (voir schéma ci-contre) qui est transporté dans le sens du courant. Le même phénomène se produit en sens opposé quand le courant s'inverse.

En principe, si le courant de marée ne présente aucune dissymétrie entre flot et jusant, aucune vorticité résiduelle nette ne devrait apparaître.



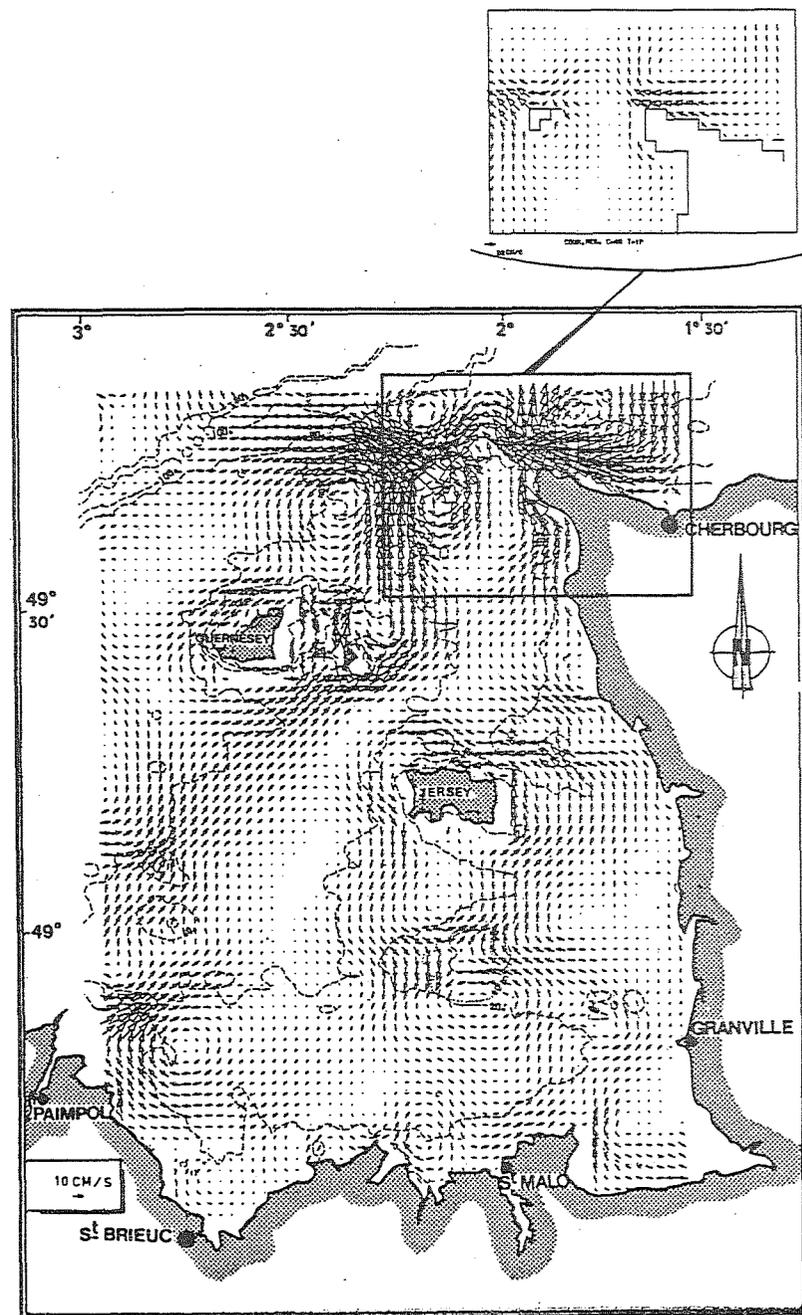
b) Près de la côte, la présence d'une pente de fond (terme K et C_D = constant) va engendrer une vorticité qui est transportée également parallèlement à la côte. Son effet résiduel est analogue à celui cité en a).

Pour évaluer l'influence du terme K , nous avons calculé la vorticité résiduelle dans le cas d'un fond plat. Cela se traduit par l'annulation de ce terme.



CIRCULATION RESIDUELLE EULERIENNE DANS LE CAS D'UN FOND PLAT

FIGURE N° 68



La comparaison du résultat de ce test avec la vorticité résiduelle obtenue dans le cas d'une topographie réelle, montre que l'influence du mécanisme K (qui correspond au terme K) est de diminuer la vorticité résiduelle négative et d'augmenter la vorticité positive. (Ce phénomène est évident à la pointe de Grouin, du cap Fréhel et de l'île de Bréhat mais il est moins net au cap de la Hague à cause de la présence d'Aurigny).

Cela signifie que le terme K produit une vorticité résiduelle positive à cause de la dissymétrie entre flot et jusant. La comparaison, des deux schémas de circulation (Figure 68), montre que le courant résiduel important formé dans le cas d'un fond plat devient faible dans le cas d'une topographie réelle. Cela signifie que la présence d'une pente de fond va contribuer à la diminution de cette séparation de lignes de courant qui engendrent un courant résiduel très important à la pointe du cap. Cette approche d'évaluation du terme K mérite quelques remarques. En imposant une topographie constante, nous avons modifié le courant de marée dans cette zone et diminué l'influence des termes advectifs qui jouent un rôle très important dans le transport de vorticité.

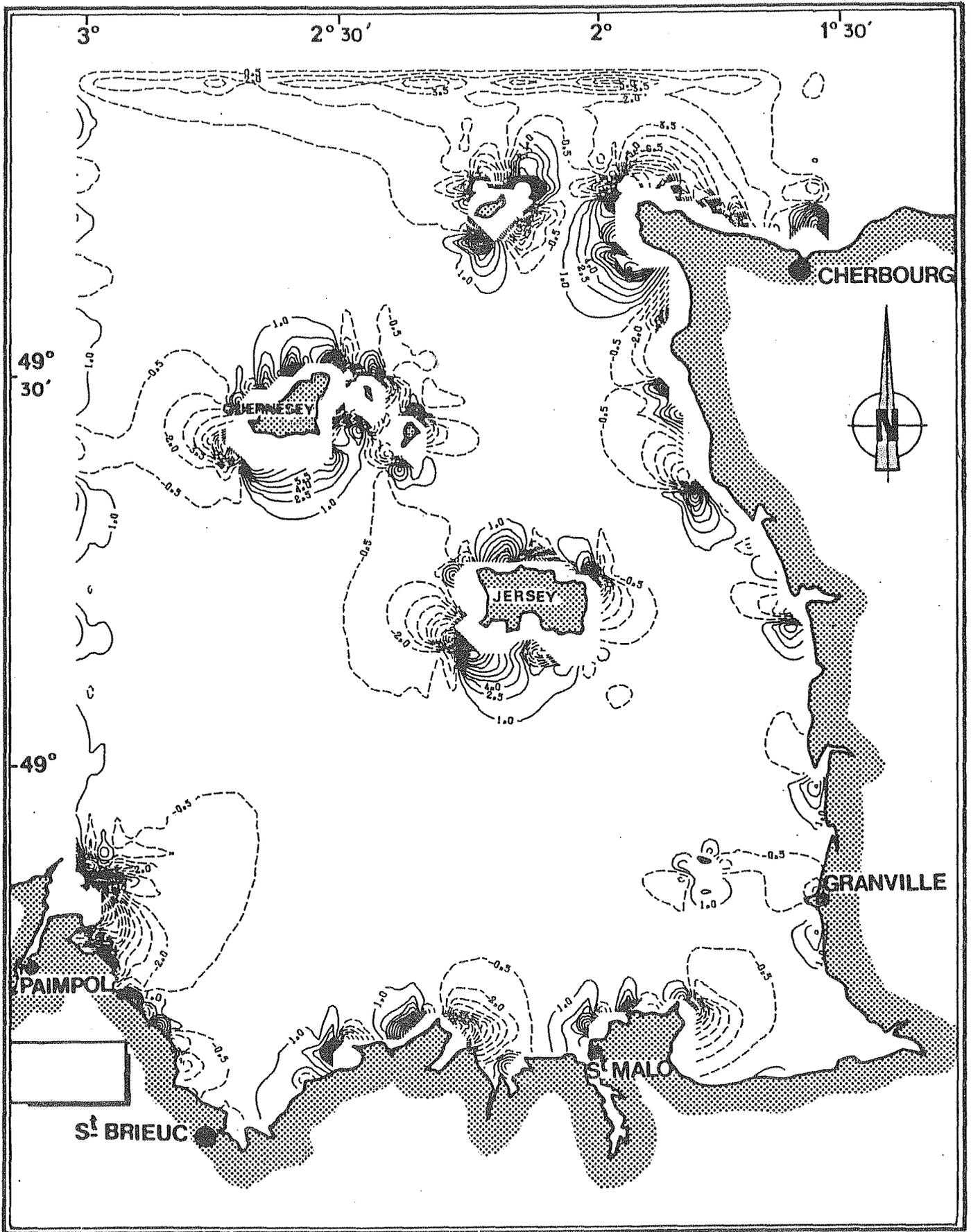
V-3-2 STRUCTURES INDUITES PAR LES HAUTS FONDS ET LES ILES

Si les structures engendrées par un cap ne changent pas fondamentalement d'un cap à l'autre, l'effet de l'île va dépendre essentiellement de la répartition du courant de marée en son voisinage.

La carte (40), présentant les roses de courant dans le G.N.B, montre que le courant au voisinage d'Aurigny et des Minquiers est essentiellement alternatif. Par contre au niveau des îles de Jersey, Guernesey et Chausey, le courant de marée est giratoire. Le test effectué dans le G.N.B (Figure 69) montre que la structure à 4 tourbillons observée autour d'Aurigny persiste. Par contre, nous obtenons des structures différentes autour des autres îles.

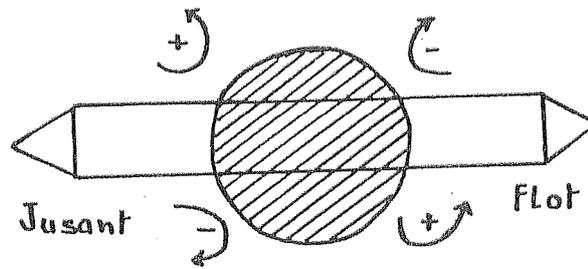
a) Structures à quatres tourbillons

Dans le cas où le courant est alternatif au voisinage de l'île, cette dernière peut être assimilée à deux caps accolés "dos à dos".



VORTICITE RESIDUELLE ($\times 10^{-5}$) DANS LE CAS D'UN FOND PLAT

FIGURE N° 69



Cette même structure est observée sur les Minquiers (haut fond). Dans ce cas, deux mécanismes de production de vorticité vont être en compétition : le mécanisme C (terme C) qui correspond à la production de vorticité par la force de coriolis, quand la masse d'eau passe sur le banc, et les divers mécanismes dus au frottement.

PINGREE et al., (1985a) montrent, dans le cas d'un banc parfaitement circulaire, que les effets de frottements sont dominants dans le cas où la rotation de courant est cyclonique (Figure 70). Ce qui est le cas dans le G.N.B.

b) Tourbillons autour des iles générés par un courant giratoire

Un test analogue à celui cité au-dessus a été effectué dans le cas d'une ile parfaitement circulaire de dimension de 20 km.

Les résultats (Figure 70) montrent une circulation résiduelle cyclonique dans le cas où la rotation du courant de marée est cyclonique. Ces résultats correspondent aux résultats de notre modèle.

Le mécanisme proposé par ces auteurs est le suivant :

La vorticité est créée par le frottement en présence d'un fond incliné (mécanisme K). Au cours du cycle de marée et compte tenu du retard de vorticité sur le courant, la vorticité négative, générée par le courant ouest, est maximum quand le courant est sud (rotation cyclonique de courant de marée) et par conséquent transport   vers le sud. Par contre, une vorticité positive est transportée vers la côte.

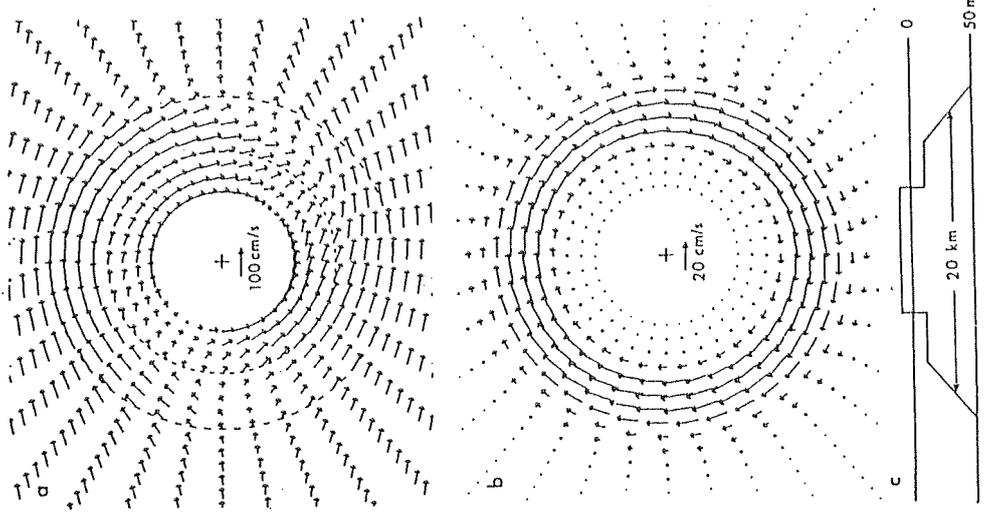
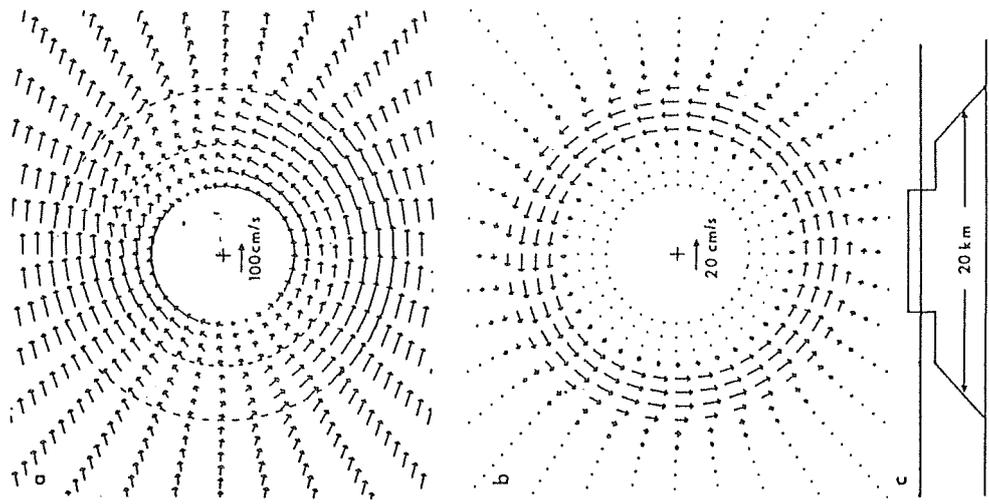
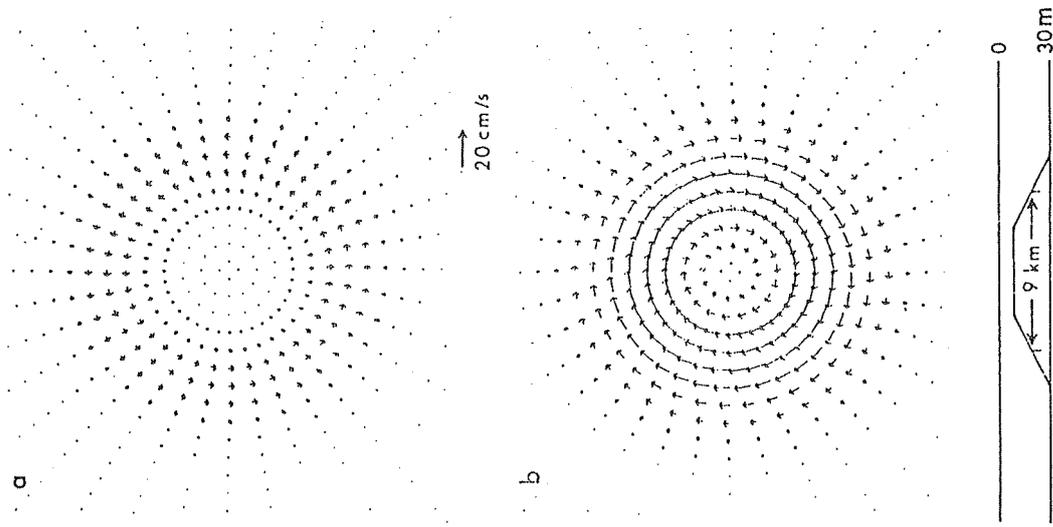
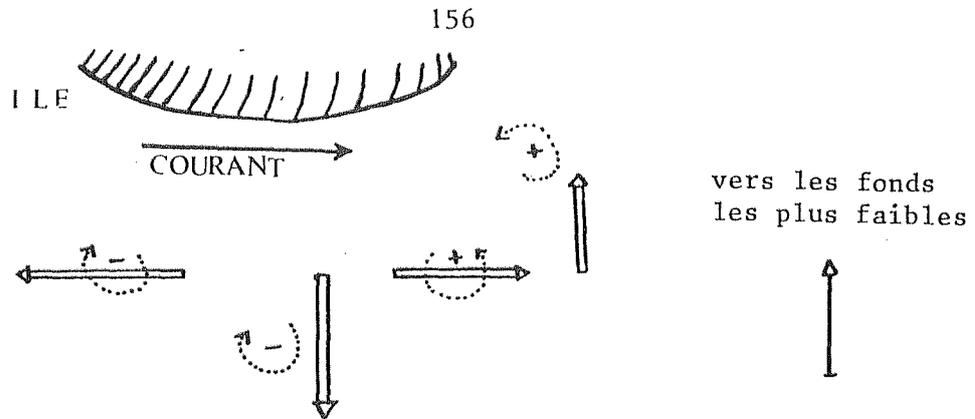


FIGURE 70 (D'APRES PINGREE ET AL, 1985a)



Ainsi sur tout le contour de l'île, la vorticité résiduelle sera donc positive.

La vorticité résiduelle calculée par le modèle autour de Jersey et Guernesey fait état de la présence de cette vorticité positive, mais on constate également la présence d'une vorticité négative surtout à l'Est et au Nord de Jersey où le fond est très accidenté.

En la présence de ces îles dans une topographie constante, nous constatons que la vorticité positive observée auparavant cède la place à des structures de type induit par un cap. Résultat qui confirme les études effectuées par PINGREE et al., (1985a).

V-4 TOURBILLONS RESIDUELS LAGRANGIENS

La description faite du schéma lagrangien fait état de la présence de tourbillons cycloniques autour des îles. Ces tourbillons résultent également du déphasage du courant de marée vu par une particule se déplaçant dans le voisinage de l'île et par conséquent parallèlement à la côte (PINGREE et al., 1985b). Ces derniers montrent pour une île schématisée en présence d'un courant sinusoïdal giratoire, que la dérive de Stokes est tangentielle à l'île et dirigée dans le sens de rotation du courant, avec une intensité maximale :

$$U_S = \frac{U^2_{\max}}{2a\omega}$$

Ainsi, autour de Jersey ou Guernesey (de rayon a de l'ordre 7 Km)

ω (la pulsation de la marée) = $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

$U_{\max} = 1,4 \text{ m/s}$

Ce qui nous donne $U_S = 1 \text{ m/s}$.



DERIVE DE STOKES

FIGURE N° 71

Il faut remarquer que la formule ci-dessus n'est valable que pour une île de grande dimension par rapport à l'excursion de marée. Ce qui n'est pas le cas autour de ces deux îles (cf. chapitre IV).

La figure (71), présentant "la dérive de stokes" (vitesse résiduelle lagrangienne - vitesse résiduelle eulérienne) pour un départ à P.M.+2, montre cette rotation cyclonique autour des îles avec une dérive de l'ordre de 30 cm/s près de ces dernières. A d'autres heures marée nous constatons la même rotation cyclonique sauf que la position des maxima de la "dérive" s'est déplacée par rapport aux îles. Ces figures ont tendance à faire croire que la dérive n'est pas tangentielle à l'île.

En fait, une particule qui au cours de la marée se déplaçant avec un courant de dérive tangentiel à l'île va faire apparaître un courant résiduel de stokes non tangentiel à l'île.

Conclusion et conséquences sur l'environnement

Si les moteurs de la circulation sont les gradients de densité, le vent, la marée, le rôle de cette dernière dans le Golfe Normand-Breton est prédominant. Ce golfe, très accidenté, est l'une des zones idéales pour étudier les effets de non linéarité de la marée.

Nous nous y sommes intéressés par la théorie, les mesures et la modélisation numérique.

L'exploitation d'un modèle 2D a permis d'abord la production de cartes horaires du courant de marée par trois coefficients types (95 -75-45) : elles constituent un complément au document similaire du SHOM dans la mesure où la densité des points est plus grande et uniforme.

En résumé, le courant dans le G.N.B. est alternatif au nord de Guernesey et dans tout le sud du golfe. Par contre il est giratoire cyclonique (sens contraire des aiguilles d'une montre) autour des îles anglo-normandes : cette rotation est liée à des réflexions de l'onde de marée engendrées par la bathymétrie.

Nous avons montré à l'aide d'un modèle numérique simplifié de la Manche qu'il ne s'agit pas de la classique giration du courant provoquée par la force de coriolis lorsqu'une onde de Kelvin se réfléchit dans un bassin fermé. Lorsque nous avons négligé la rotation de la terre, l'ellipticité et le sens de rotation ne changeaient pas. Donc c'est l'effet de la bathymétrie (avec effet de cap du Cotentin) qui a un rôle très important sur le sens de rotation et l'ellipticité des courants dans cette zone.

En ce qui concerne la circulation résiduelle, nous avons dans un premier temps reproduit la carte des courants résiduels eulériens uniquement dans le but :

- de valider le modèle en le confrontant avec les résultats des mesures aux points fixes ;
- de voir l'impact des variations du niveau moyen sur le schéma résiduel.

Ces tests nous ont permis de valider les résultats du modèle à l'intérieur du golfe. Par contre les zones, avoisinantes aux limites du modèle, sont tributaires des niveaux moyens imposés à la frontière ouverte du modèle.

Une fois les résultats du modèle validés, nous nous sommes surtout intéressés (en ce qui concerne le courant moyen) aux mécanismes de production de vorticité résiduelle. Ainsi une carte de vorticité résiduelle a été établie dans le G.N.B. et qui a permis de mettre en évidence

- * les effets des caps et des îles dans un courant alternatif.
- * les effets d'un courant giratoire abordant une variation topographique. Dans le cas où cette variation est isolée (  le ou haut fond). Il y a contribution d'une dérive circulaire.

Il est important de noter ici que ces structures résiduelles sont toutes induites par la configuration des fonds et qu'elles sont générées à l'intérieur du domaine d'étude.

Dans un deuxième temps nous nous sommes intéressés aux déplacements des masses d'eau. Nous avons constaté que les déplacements résiduels d'une particule issue d'un point fixe dépend de l'instant de lacher par rapport à la marée. Ce phénomène doit être pris en considération si l'on étudie le devenir en mer d'un rejet ponctuel.

Jusqu'à présent tous les chercheurs qui s'intéressent aux zones littorales par la modélisation, reproduisent soit des schémas de circulation résiduelle eulérienne (dont la signification physique est assez vague), soit des déplacements des masses d'eau à chaque heure de la marée.

Nous avons pour la première fois, adapté une technique qui nous a permis de nous affranchir du point et de l'heure du départ. Ainsi un schéma de circulation résiduelle lagrangienne de marée a pu être produit.

L'une des conséquences de la configuration des structures lagrangiennes, autour des îles anglo-normandes, est la présence d'un front entre Jersey et Guernesey.

A l'aide de quelques mesures et de deux modèles théoriques existant en littérature, nous avons fait une approche de la circulation induite par ce front et de son impact sur la circulation résiduelle. Devant la complexité de ce phénomène et le problème de fiabilité des deux appareils de mesure que nous possédions dans cette zone, une étude plus approfondie est souhaitable.

Conséquences sur l'environnement

Le schéma de circulation des masses d'eau (Figure I) montre

* Des structures tourbillonnaires autour des îles et de hauts fonds avec des vitesses de l'ordre de 30 cm/s (= 30 km/jour) autour de Jersey et Guernesey, 20 cm/s (= 20 km/jour) autour des Minquiers et 10 cm/s (= 10 km/jour) autour de Chausey.

Ces structures sont séparées souvent par des zones où les masses d'eau peuvent séjourner longtemps.

* Les caps génèrent des tourbillons latéraux caractérisés par des extensions de 10 à 20 km (ces extensions peuvent être surévaluées par le modèle à cause de la dimension de la maille et de la valeur de viscosité utilisées). Par contre les vitesses sont de l'ordre de 5 cm/s (= 5 km/jour) à l'Est du cap de Grouin et à l'Est du cap Fréhel (ce qui permet le renouvellement partiel des eaux dans la baie du Mont Saint-Michel) ; de l'ordre de 10 cm/s (= 10 km/jour) au Nord-Ouest de la baie de Saint-Brieuc.

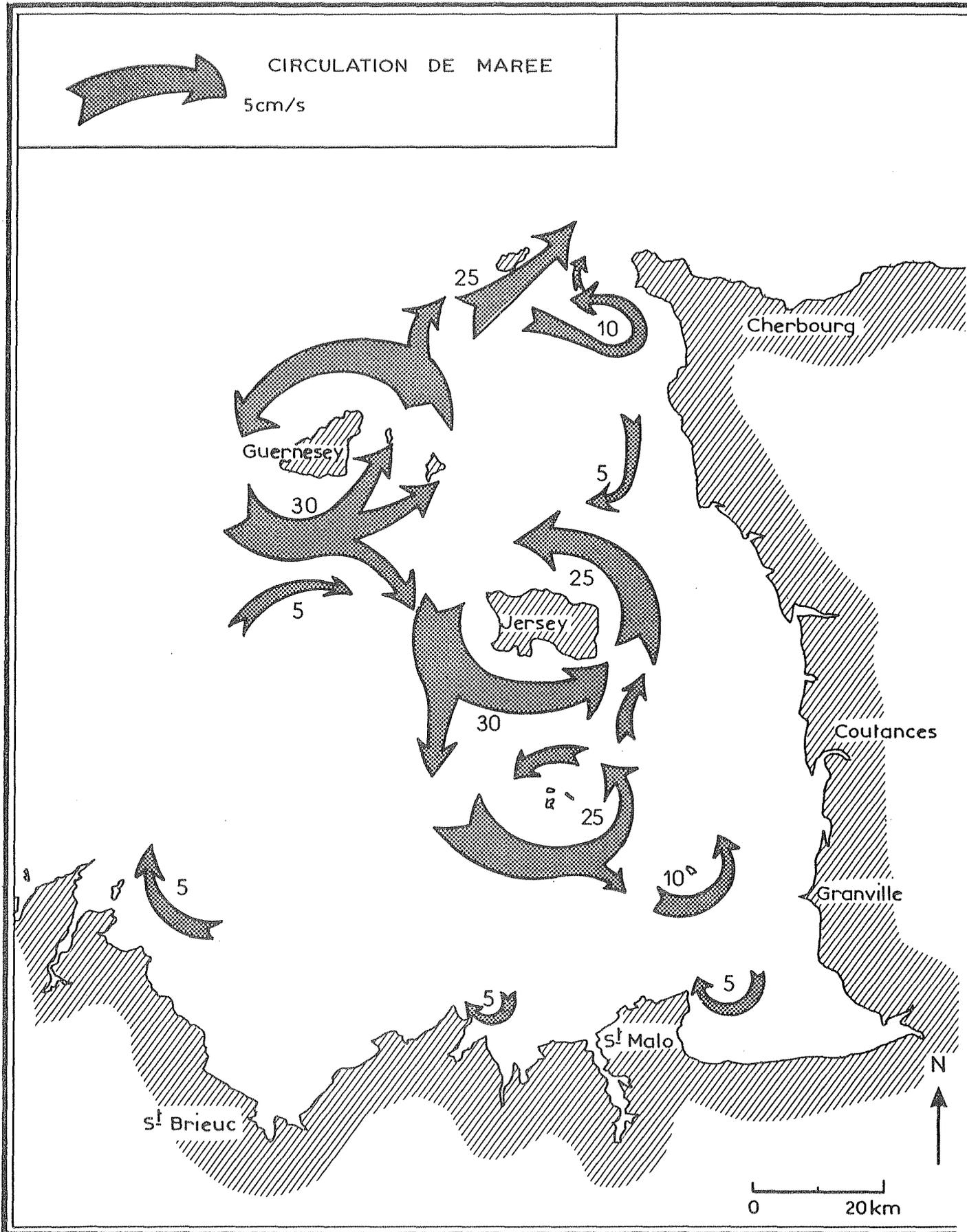


FIGURE: I

* Devant le littoral du Cotentin, les eaux dérivent vers le nord sur une bande de quelques kilomètres, avec une vitesse de 10 km/jour environ. Signalons que cette zone est très sensible aux effets du vent.

* Les échanges avec l'extérieur du golfe se font par le nord-nord-Ouest du G.N.B. et probablement par l'Ouest (vu la proximité de cette zone et des limites ouvertes) où une veine d'eau va alimenter la cellule tourbillonnaire autour de Guernesey, une deuxième va se diriger vers Jersey.

Il faut remarquer que ce schéma de circulation tient compte uniquement des effets de la marée et que le vent (comme le montrent certaines mesures) est susceptible de modifier ce schéma avec d'autant plus d'effet que le coefficient de marée est faible.

Bibliographie

- BONNEFILLE, 1976. Les réalisations d'Electricité de France concernant l'énergie marémotrice. Extrait de la Houille Blanche, N. 2, 1976.
- BOWDEN K.F., 1983. Physical oceanography of coastal waters. ELLIS HERWOOD series marine science, 302 p.
- BOWMAN M.J., IVERSON R.L., 1978. Estuarine and plume fronts. In oceanic fronts in coastal processes, ed. M.J. BOWMAN and W.E. ESAIAS, springen-verlag, Berlin, p. 87-104.
- Centre National pour l'Exploitation des Océans, 1982. Golfe Normand-Breton. Bilan des connaissances. Rapport CNEXO-COB-ELGMM juin 1982.
- CHABERT D'HIERES G., LE PROVOST C., 1978. Atlas des composantes harmoniques de la marée dans la Manche. Annales hydrographiques, vol. 6, Fasc. 3.
- CSANADY G.T., 1982. Circulation int the Coastal ocean. D. Reidel Publishing Compagny, 279 p.
- DEMERLIAC, 1973. Calcul du niveau moyen journalier de la mer. Rapport du Service Hydrographique de la Marine.
- FORNERINO M., 1982. Modélisation des courants de marée dans la Manche. Thèse de docteur-ingénieur Université Scientifique et Médicale de Grenoble, Grenoble.

- GARNIER A., 1985. Choix de méthodes d'évaluation de l'impact à longue distance de rejets radioactifs en milieu marin. *Oceanis*, Vol. 11, Fasc. 6, 1985, p. 59-626.
- GIRARDOT J.P., LANGLOIS G., MARIETTE V., MORIZUR P., 1985. Réalisation de lignes de mouillage au laboratoire d'océanographie physique de l'Université de Bretagne Occidentale. Rapport LOP-UBO (1985), 46 p.
- GUEGUENIAT P., LE HIR P., 1981. Données nouvelles sur la dispersion des radionucléides dans la Manche. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1981.
- IFREMER, 1986. Etude régionale intégrée du golfe Normand-Breton -Thème I - rapport de contrat pour la Commission des Communautés Européennes. 1986
- HENDERSHOTT M.C., SPERANZA A., 1971. Co-oscillating tides in long-narrow bays : the Taylor problem revisited. *Deep Seas Research*, Vol. 18, p. 959-980.
- JOHNS B., 1983. Physical oceanography of coastal and shelf Seas. Elsevier oceanography series. N. 35, 470 p.
- KERDREUX M., L'YAVANC J., 1983. Réalisation de mouillages côtiers pour mesures de courant. Rapport CNEXO-COB-ELGMM.
- LEENDERTSE J.J., GRITTON E.C., 1971. A water quality simulation model for well mixed estuaries. Vol. II, Computation procedures. R-708-NYC. The New-York city Rand Institute technical report, 53 p.
- LE HIR P., L'YAVANC J., 1985. Observations de courant en baie de Seine. Colloque baie de Seine, Caen 24-26 avril 1985.
- LE HIR P., SALOMON J.C., LE PROVOST C., CHABERT D'HIERES G., MAUVAIS J.L., 1985. Approche de la circulation résiduelle en baie de Seine, Caen 24-26 avril 1985.

- LE PROVOST C., 1974. Contribution à l'étude des marées dans les mers littorales. Application à la Manche. Thèse docteur es-sciences. Université scientifique et Médicale de Grenoble, Grenoble, 217 p.
- LE PROVOST C., VILLARET C., 1985. Etude de la modélisation des Circulations à l'échelle du plateau continental. Rapport interne 85/4. Institut de mécanique de Grenoble, Grenoble, 90 p.
- L.N.H. 1960-1961. Modèle réduit des îles Chausey : Les conditions naturelles du golfe de Saint-Malo, rapport N. 2 : Les mouvements du plan d'eau, rapport N. 3 : Les courants de marée. Rapport E.D.F. T. 163 (octobre 1960) et T. 169 (aout 1961).
- LOMER F., 1978. La dérive en mers à marée. Thèse de docteur-ingénieur Université P. et M. Curie, Paris VI.
- MARIETTE V., LE CANN B., 1985. Simulation of the formation of Ushant thermal front. Continental Shelf Research, Vol. 4, N. 6, p. 637-660.
- PECHON Ph., GEBEL M., 1986. Modélisation numérique des courants de marée dans le Golfe Normand-Breton. Rapport E.D.F. DER HE/42/86-11, 100 p.
- PINGREE R.D., FORSTER G.R., MORRISON G.K., 1974. Turbulent convergent tidal Fronts. Journal of the marine biological Association of the U.K. (1974) p. 469-479.
- PINGREE R.D., MADDOCK L., 1977. Tidal residuals in the English Channel. Journal of the marine biological Association of the U.K. (1977) 57, p. 339-354.

- PINGREE R.D., MADDOCK L., 1978a. The M4 tide in the English Channel derived from a non-linear numerical model of the M2 tide. Deep-Sea Research. Vol. 25, p. 53-63.
- PINGREE R.D., 1978b. The formation of the shambles and other banks by tidal stirring of the seas. Journal of the marine biological Association of the U.K. (1978) 58, p. 211-226.
- PINGREE R.D., MADDOCK L., 1979a. The tidal physics of headland flows and offshore tidal bank formation. Marine geology, 32 (1979), p. 269-289.
- PINGREE R.D., MADDOCK L., 1979b. Tidal flow around an island with a regularly sloping bottom topography. Journal of the marine biological Association of the U.K. (1979) 59, p. 699-710.
- PINGREE R.D., GRIFFITHS D.K., 1980. Currents driven by a steady uniform wind stress on the Shelf seas around the British Isles. Oceanologia Acta (1980). Vol. 3, N 2.
- PINGREE R.D., GRIFFITHS D.K., 1981. 52 tidal simulation on the North-West European shelf. Journal of the marine biological Association of the U.K. (1981) 61, p. 609-616.
- PINGREE R.D., MADDOCK L., 1985a. Rotary Currents and residual circulation around banks and islands. Deep Sea Research, Vol. 32, N 8, p. 929-947.
- PINGREE R.D., MADDOCK L., 1985b. Stokes, Euler and Lagrange aspects of residual tidal transports in the English Channel and the southern bight of the North Sea. Journal of the Marine biological Association of the U.K. (1985) 65, p. 969-982.

- PINGREE R.D., MARDEL G.T., MADDOCK L., 1985c. Tidal mixing in the channel Isles region derived from the results of remote sensing and mesurments at sea. Estuarine Coastal and shelf sciences (1985) 20,000.
- ROBINSON I.S., 1981. Tidal vorticity and residual circulation. Deep Sea Research, Vol. 28 A, N 1, p. 195-212.
- SAGER, 1968. Seehydrographischerdienstst der Deutschen Demokratische Republik. Atlas der Gezeitenstramre.
- SALOMON J.C., 1976. Modèle mathématique de la propagation de la marée en estuaire et des transports sableux associés. Application aux estuaires de la Loire et de la Seine. Thèse de docteur es-sciences physiques. Université de Bretagne Occidentale, Brest.
- SALOMON J.C., LE HIR P., 1981. Etude de l'estuaire de la Seine. Modélisation numérique des phénomènes physiques. Rapport LOP-UBO, Brest.
- SALOMON J.C., 1985. Courantologie calculée en baie de Seine. Colloque baie de Seine, Caen 24-26 avril 1985.
- SHOM, 1973. Courants de marée de Cherbourg à Paimpol. Iles anglo-normandes. Fascicule N. 553 du SHOM.
- TAYLOR G.I., 1920. Tidal oscillations in gulfs and rectangular basins. Proceeding of the London Mathematical society 20 (2) p. 148-182.
- VERCELLI C., 1985. Le Golfe Normand-Breton : Etude de la température de surface à l'aide de données satellitaires. Rapport IFREMER.

- ZIMMERMAN J.T.F., 1978. Dispersion by tide-induced residual Current vortices, Hydrodynamics of the Estuaries and Fjords, Edited by J.C.J. NIHOUL, p. 207-215.

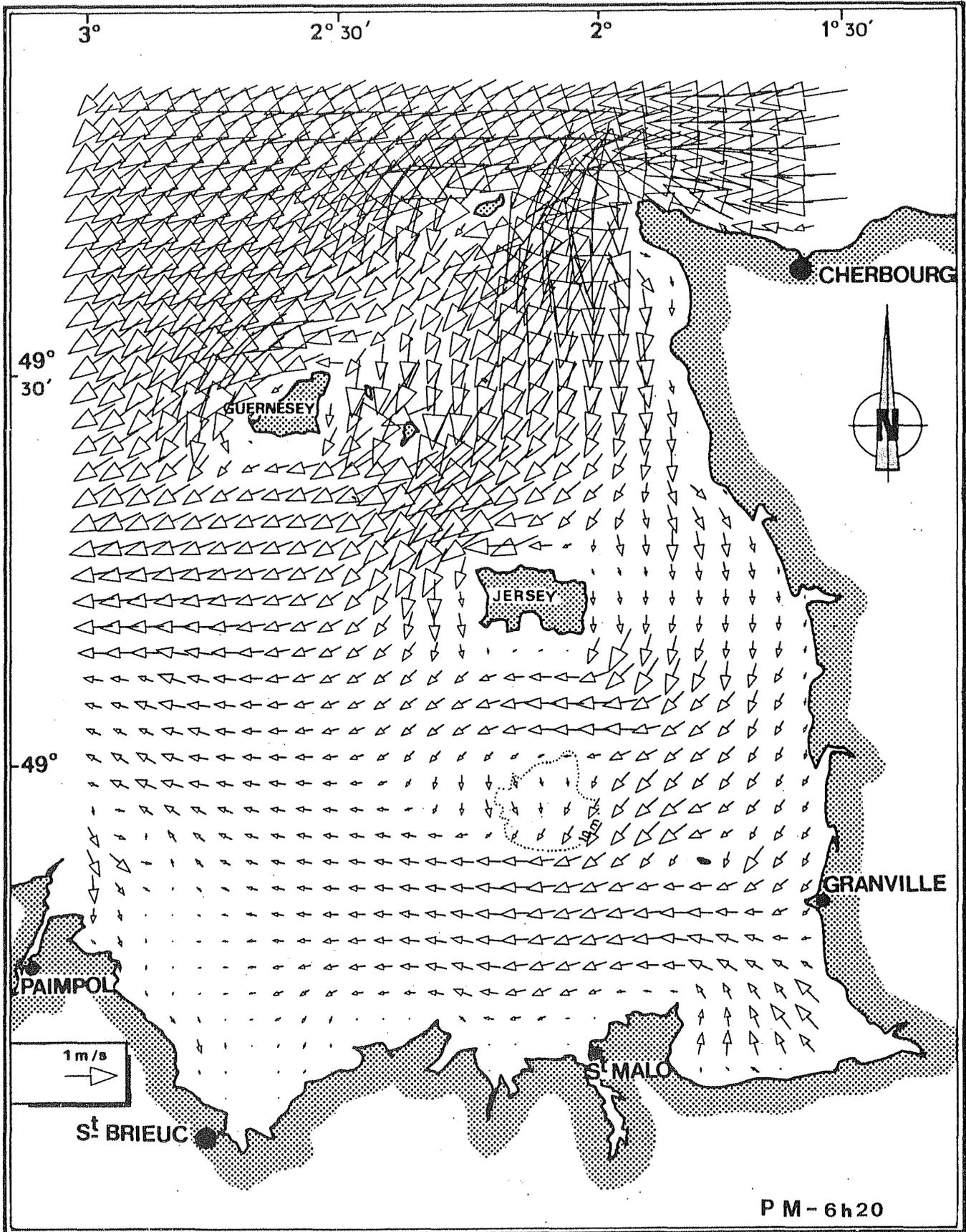
- ZIMMERMAN J.T.F., 1981. Dynamics, diffusion and geomorphological significances of tidal residual eddies. Nature, London 290, p. 549-556.

- A N N E X E I -

CARTES DE COURANTS DE MAREE

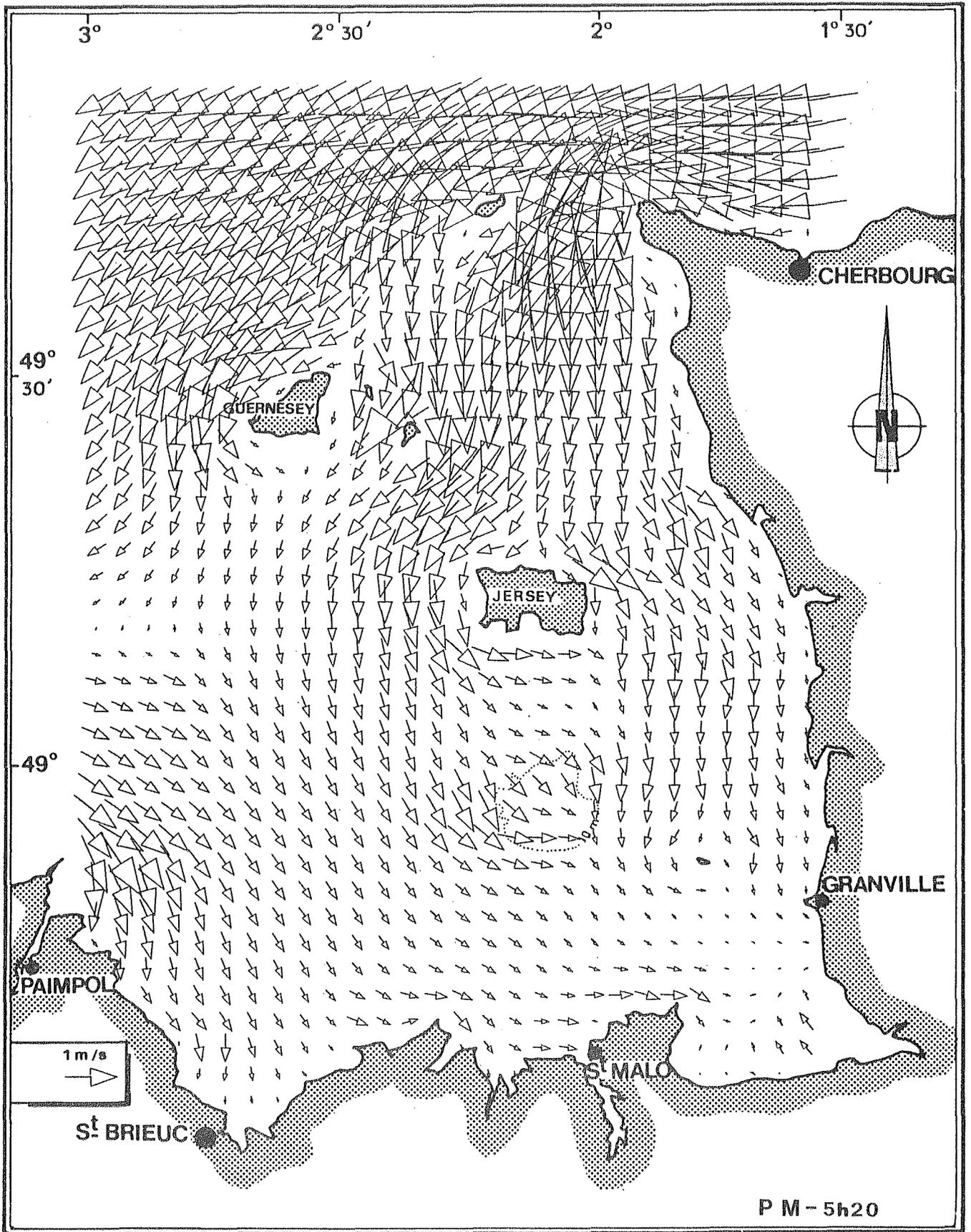
MAREE DE VIVE EAU MOYENNE

- LES HEURES SONT EN T.U.
- LES HEURES DE LA MAREE SONT DONNEES
PAR RAPPORT A LA PLEINE MER DE ST MALO

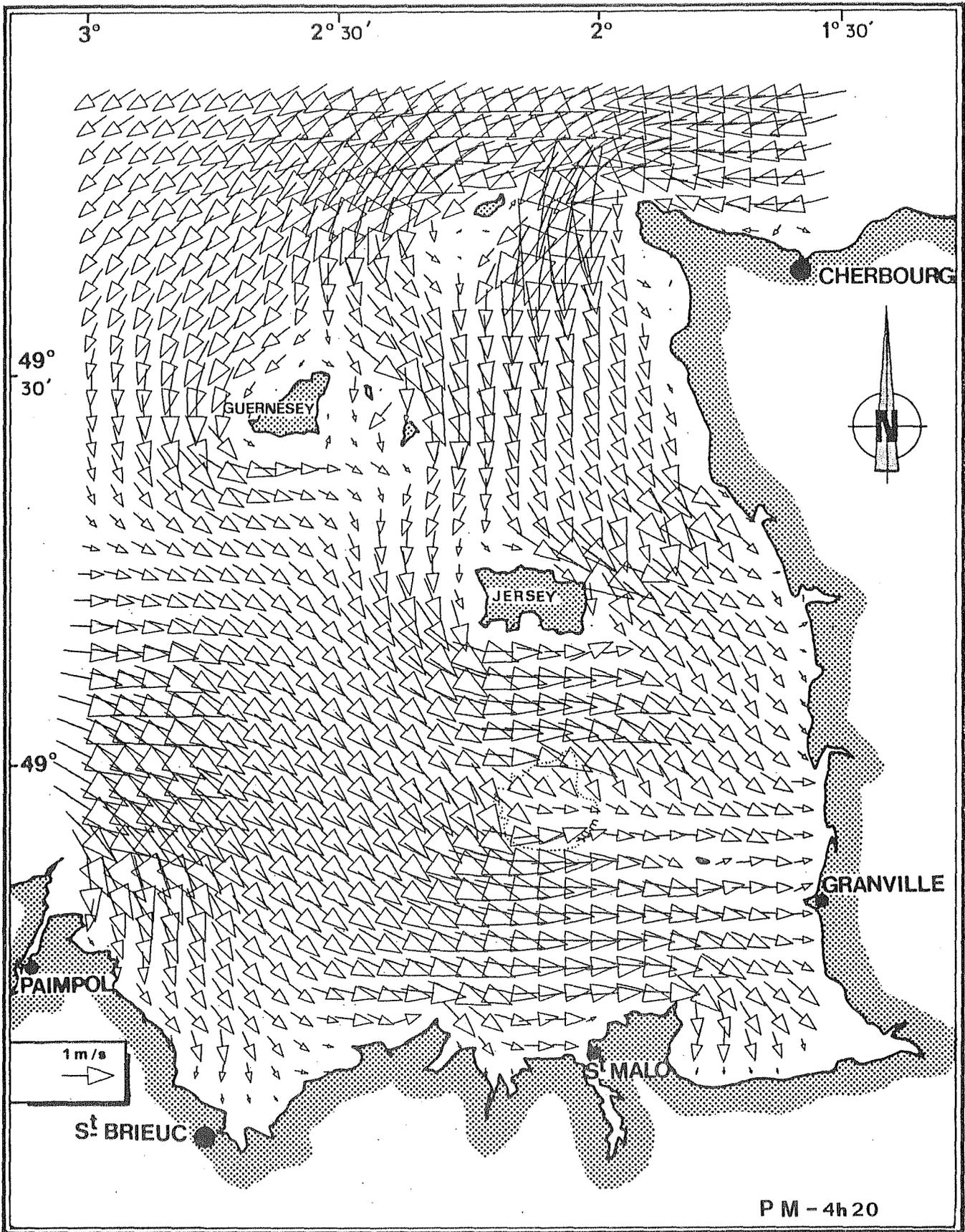


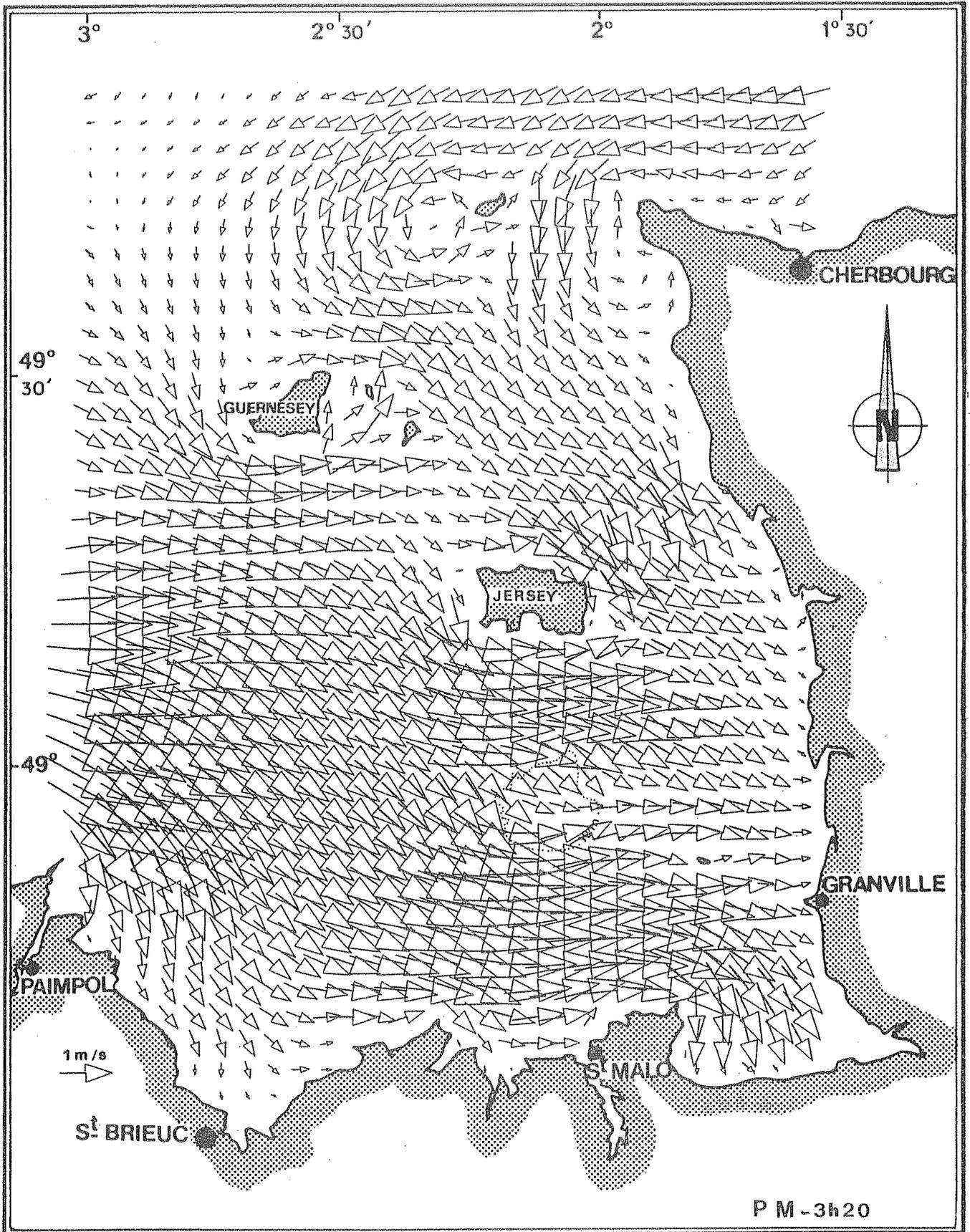
11-6-83 13 H T.U.

PM-6h20

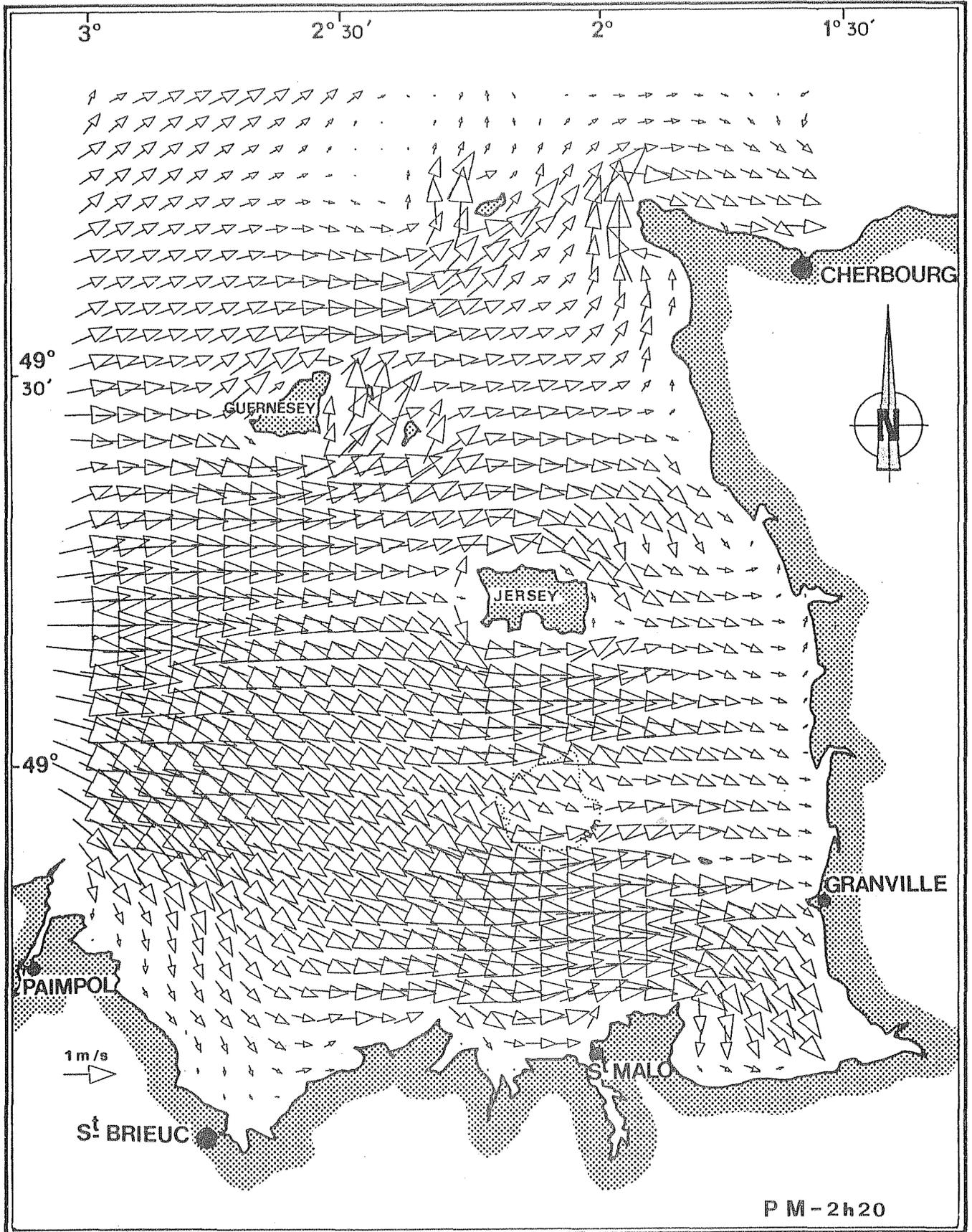


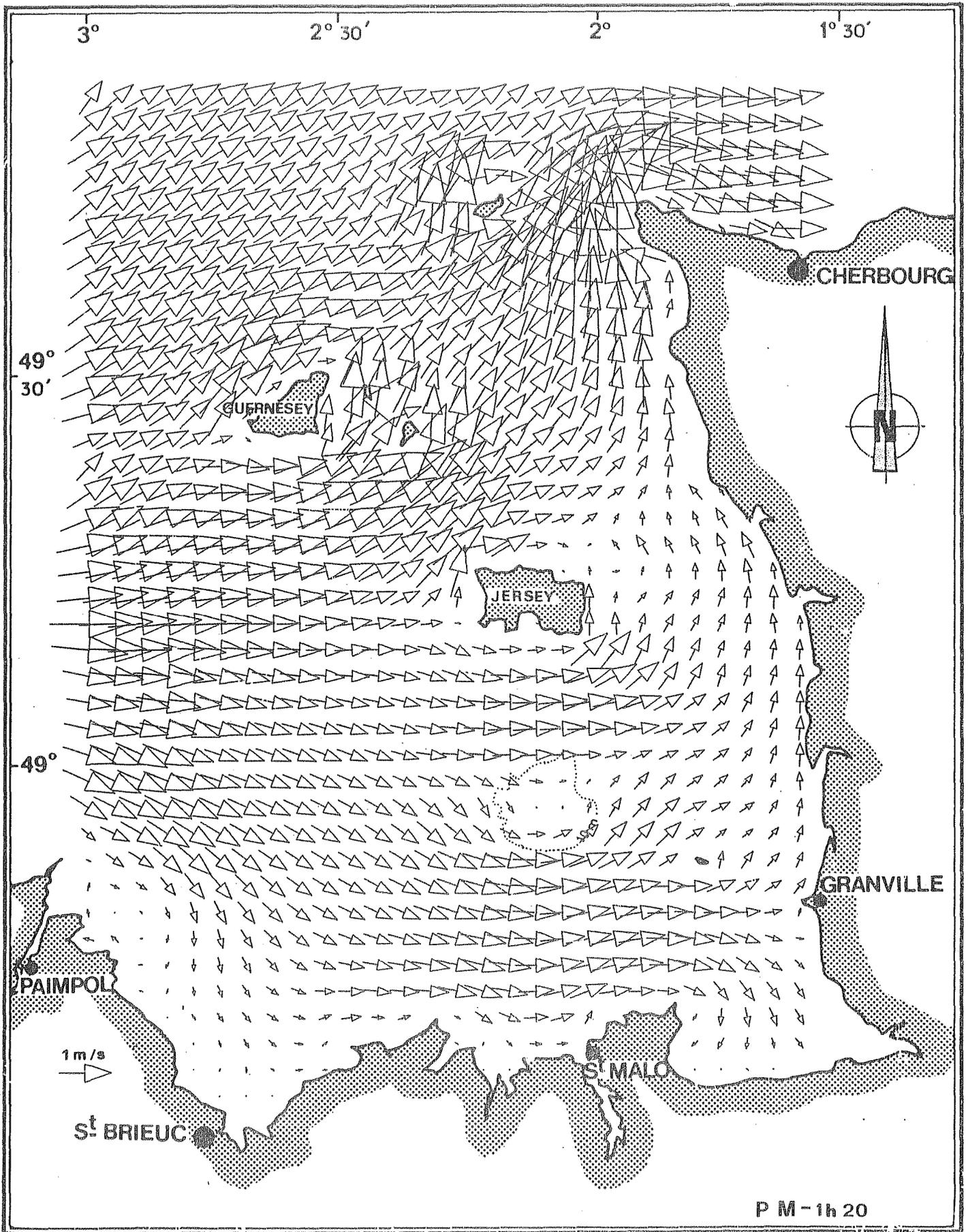
11-6-83 14 H T.U.

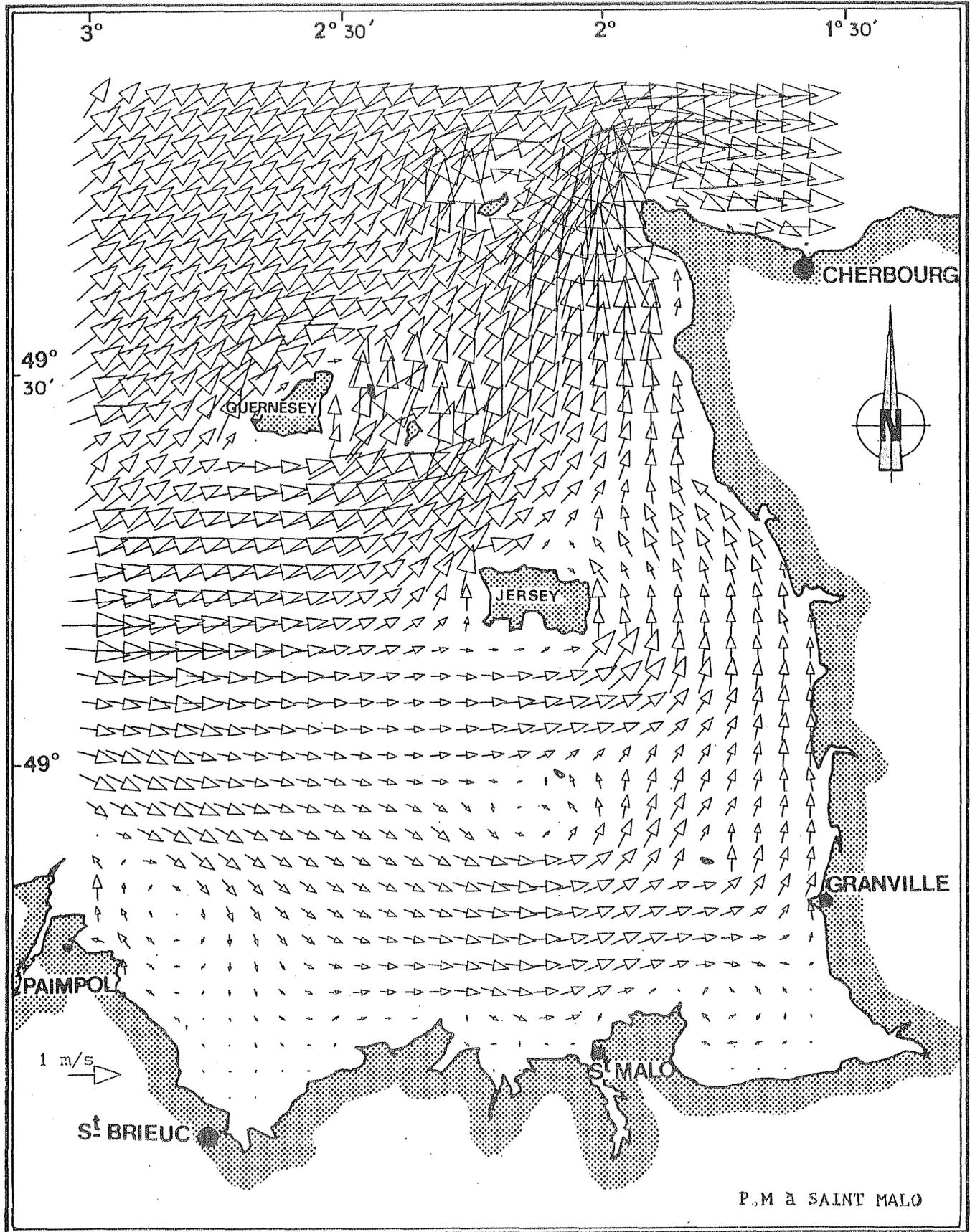




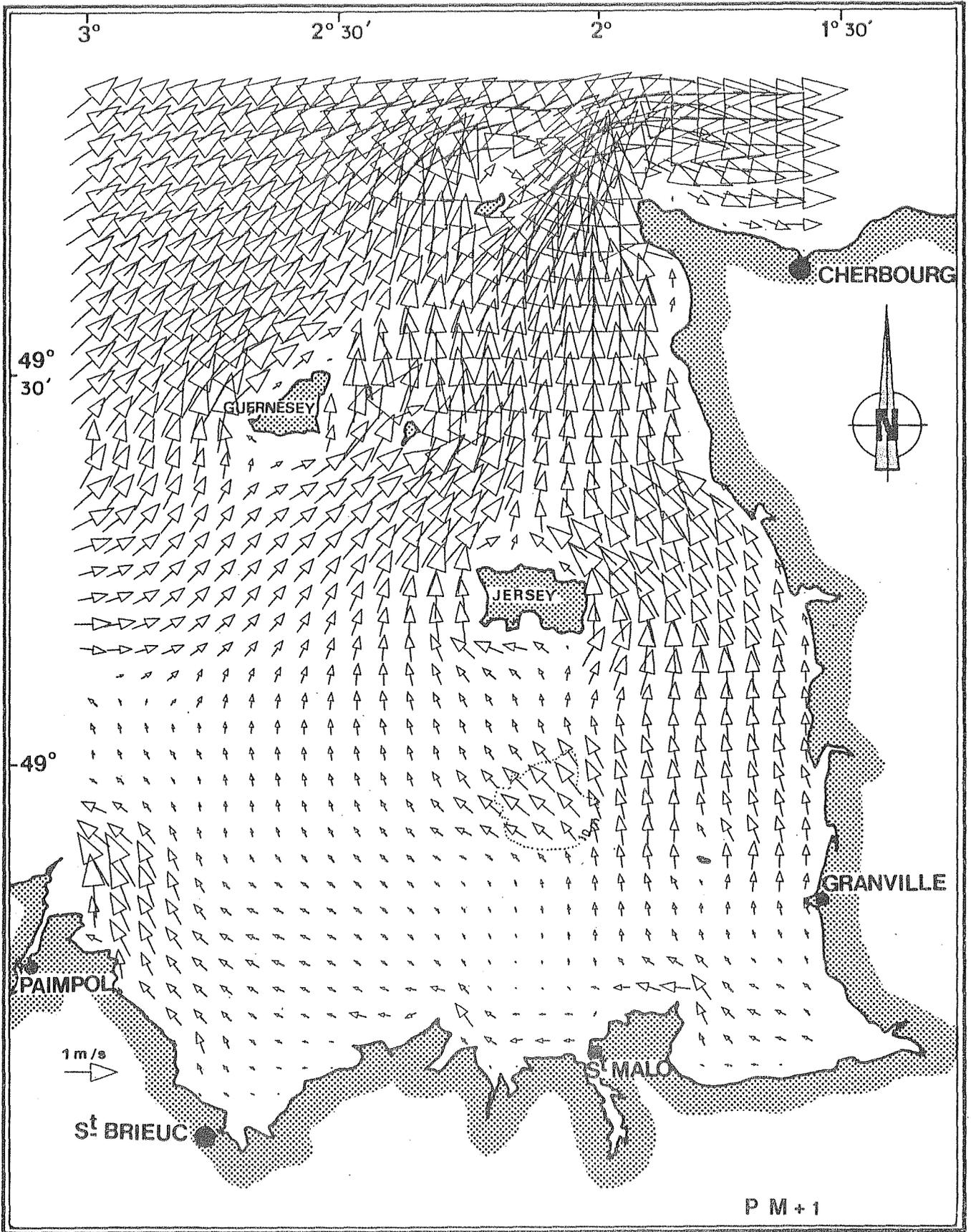
11-6-83 16H.T.U.

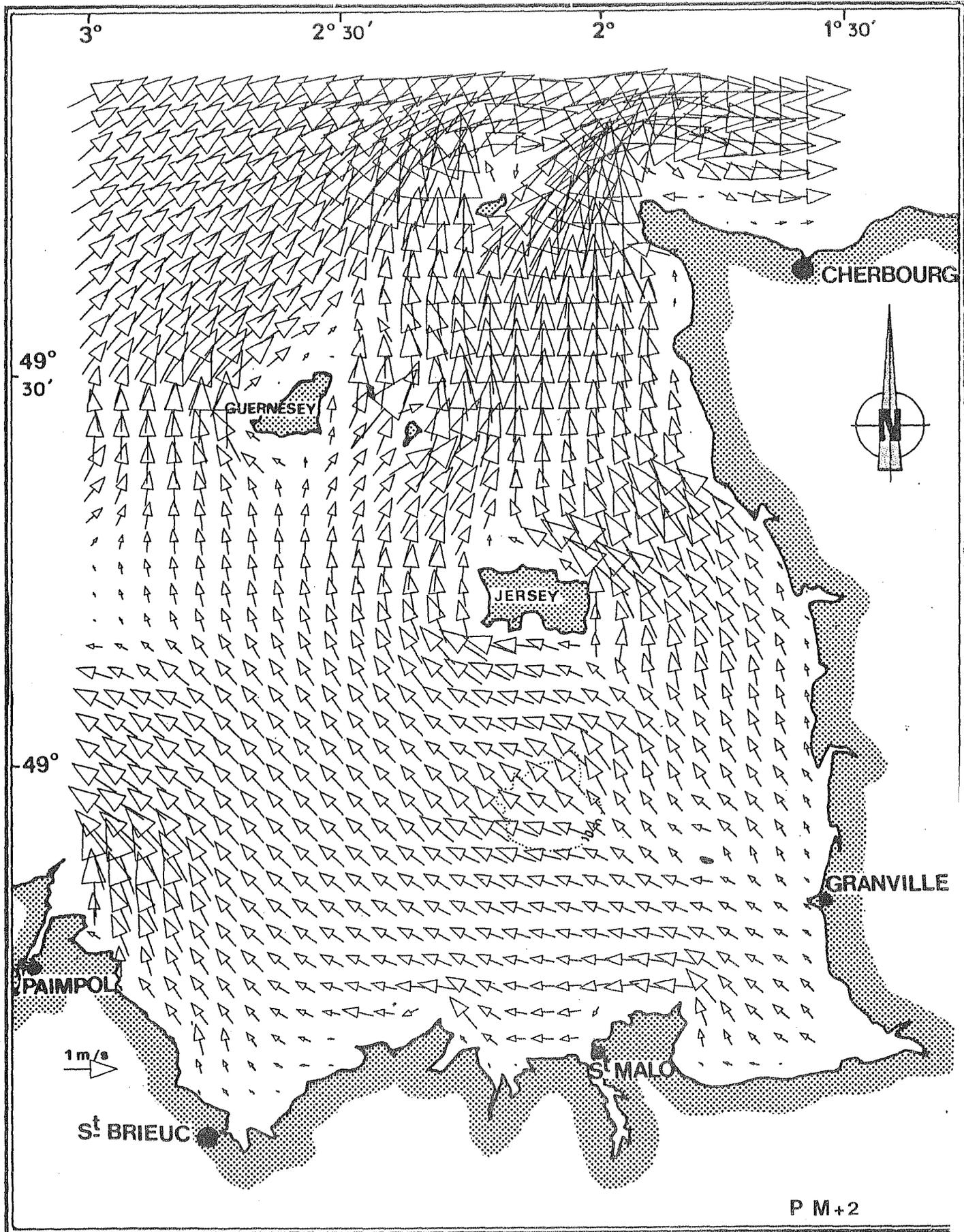




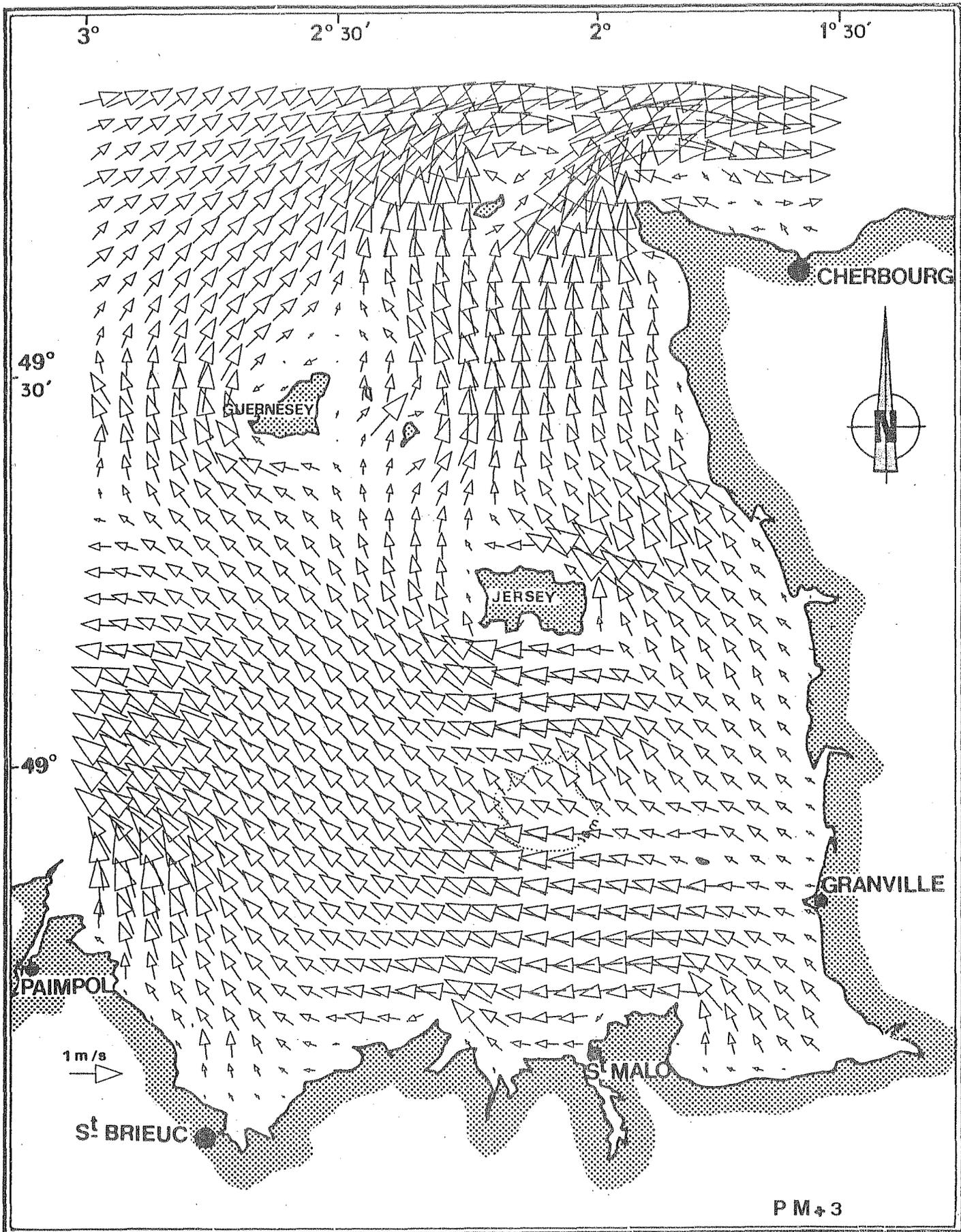


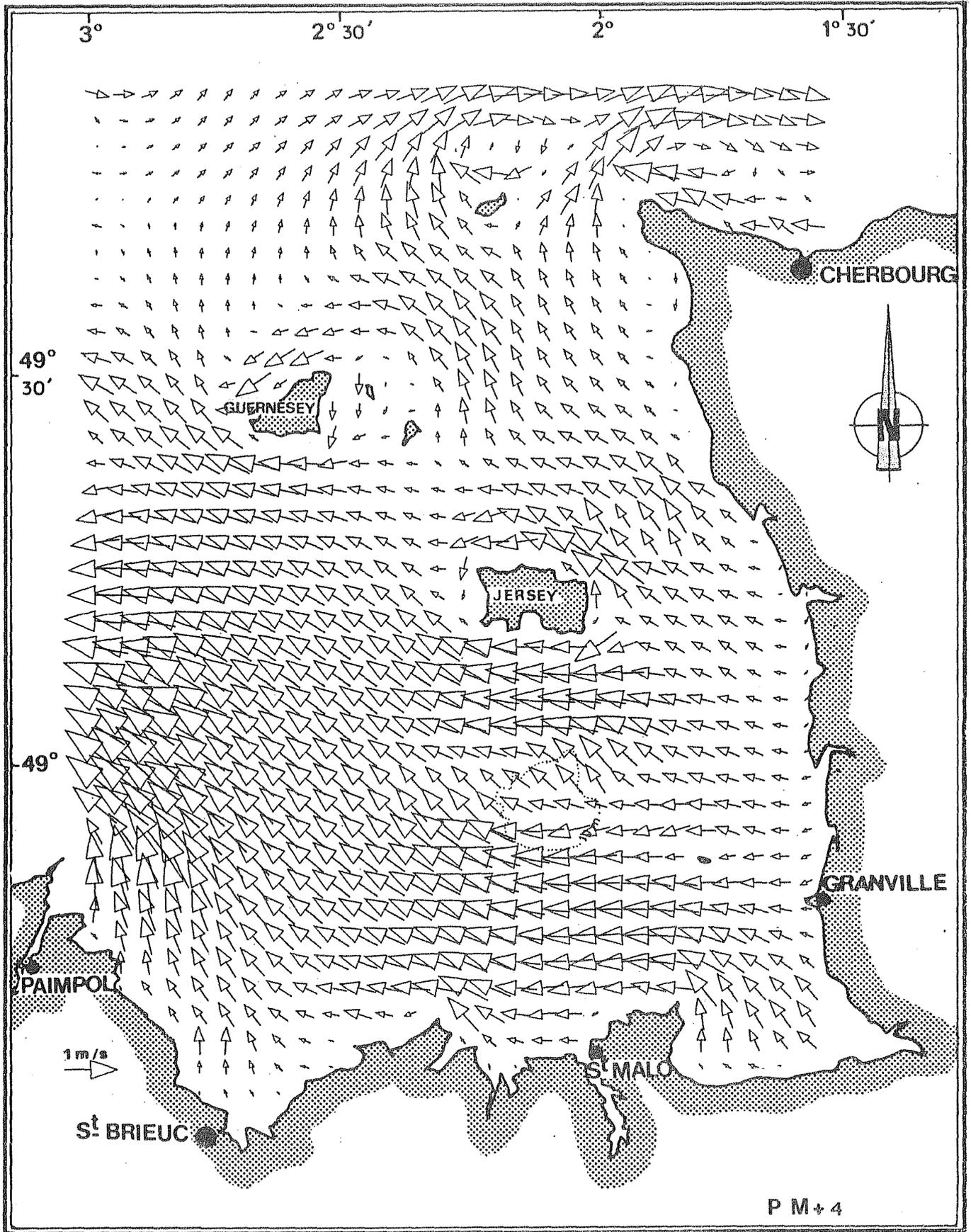
P.M à SAINT MALO

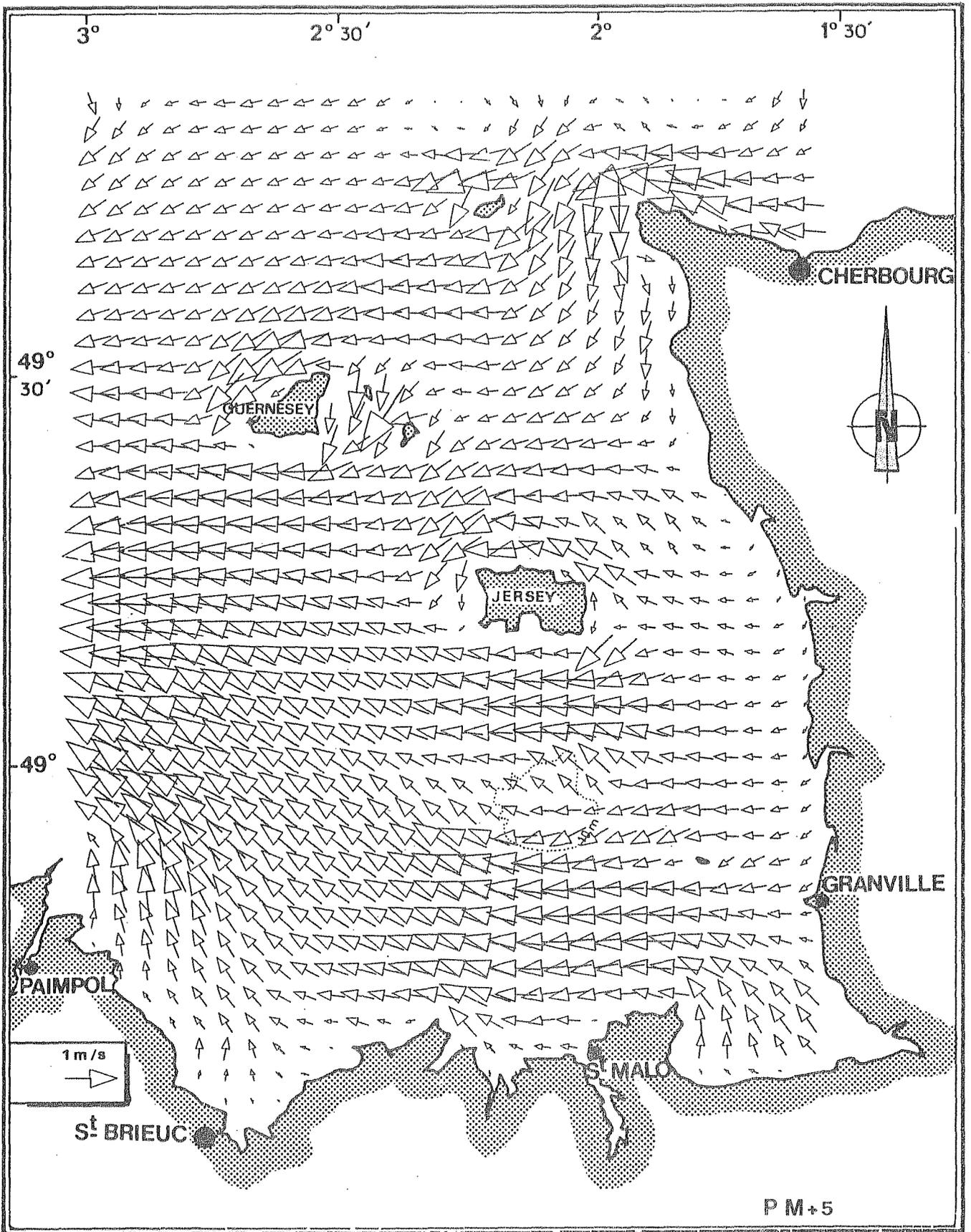


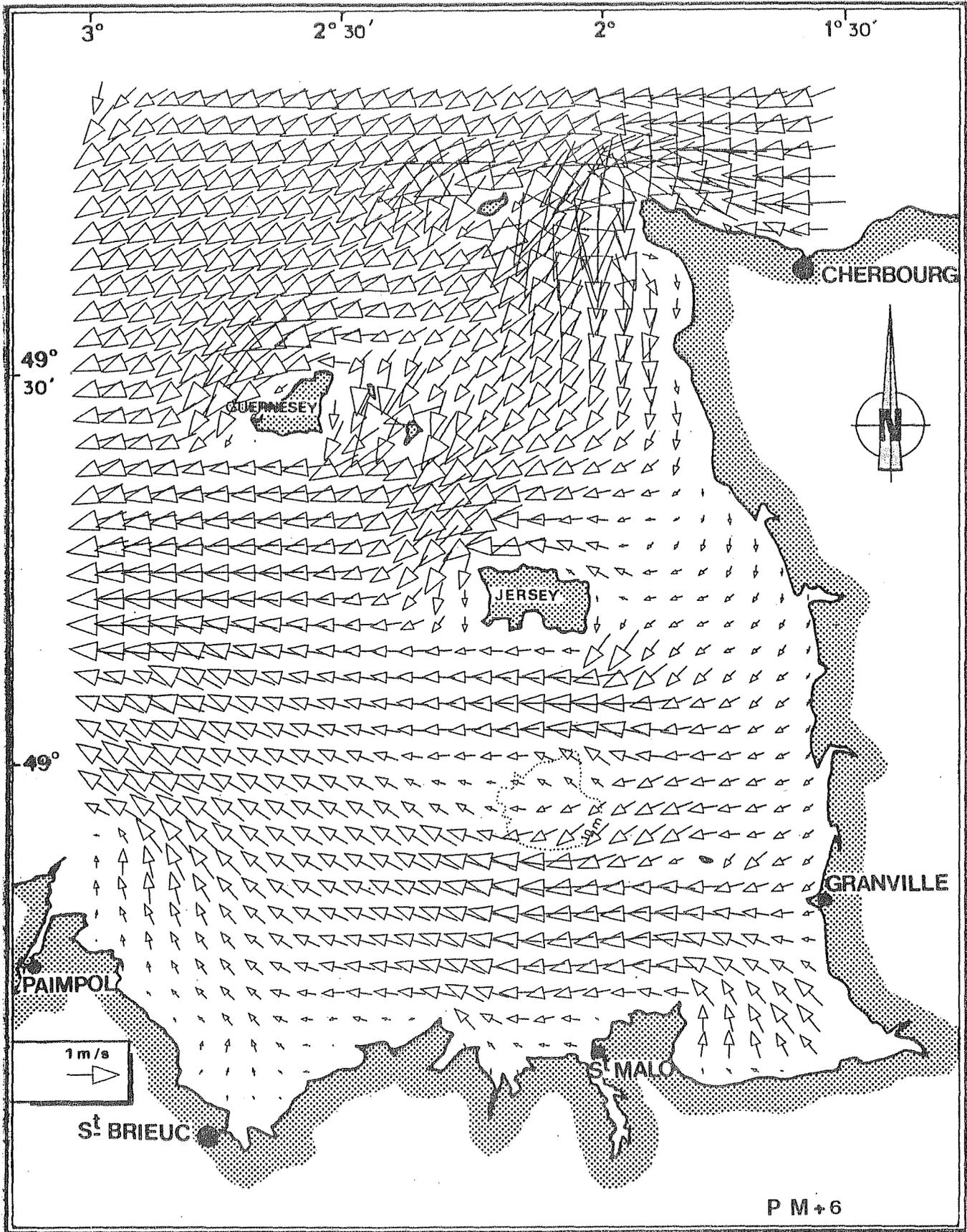


P M+2









11-6-83 12 H T.U.

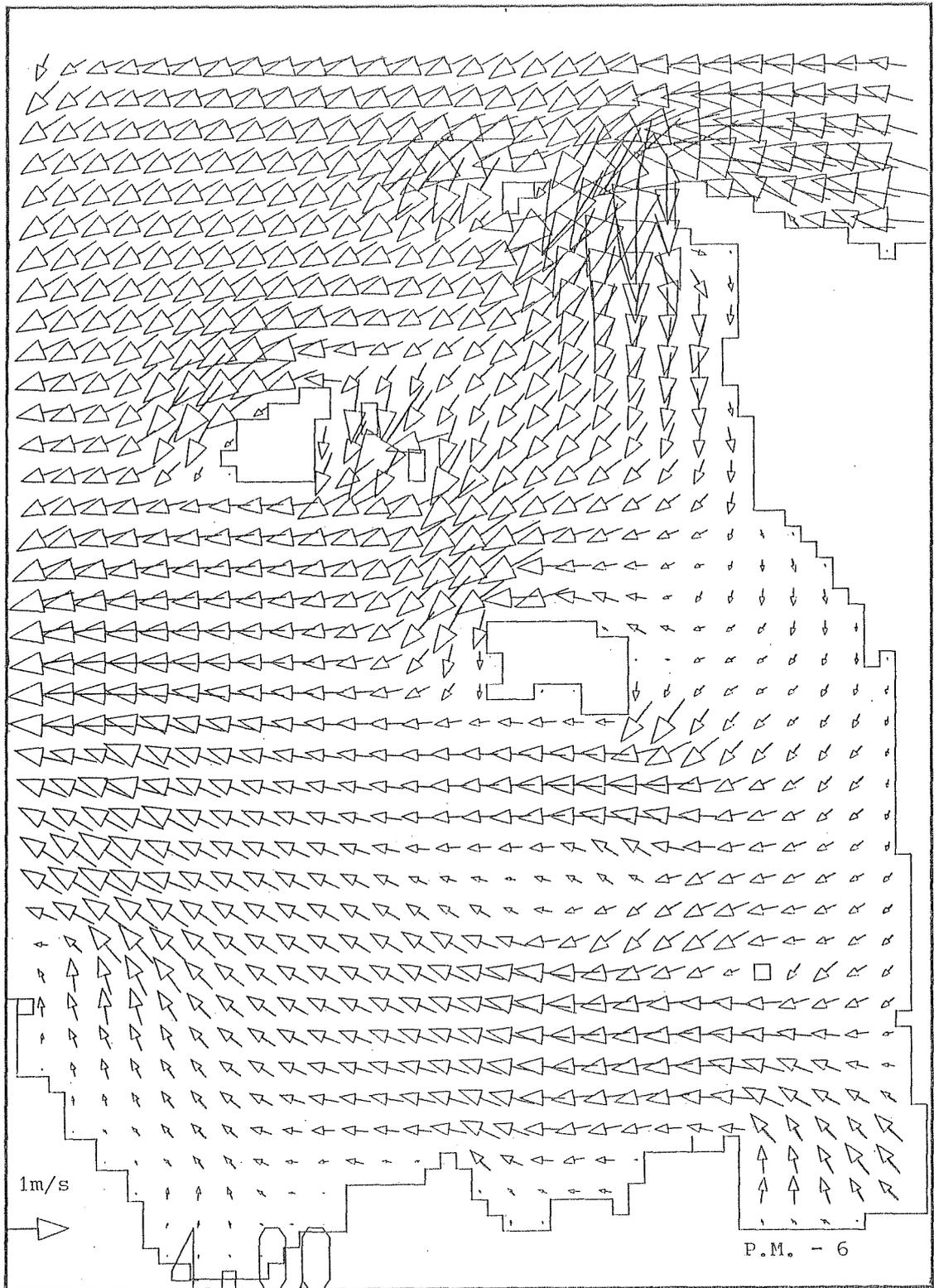
P M + 6

- ANNEXE II -

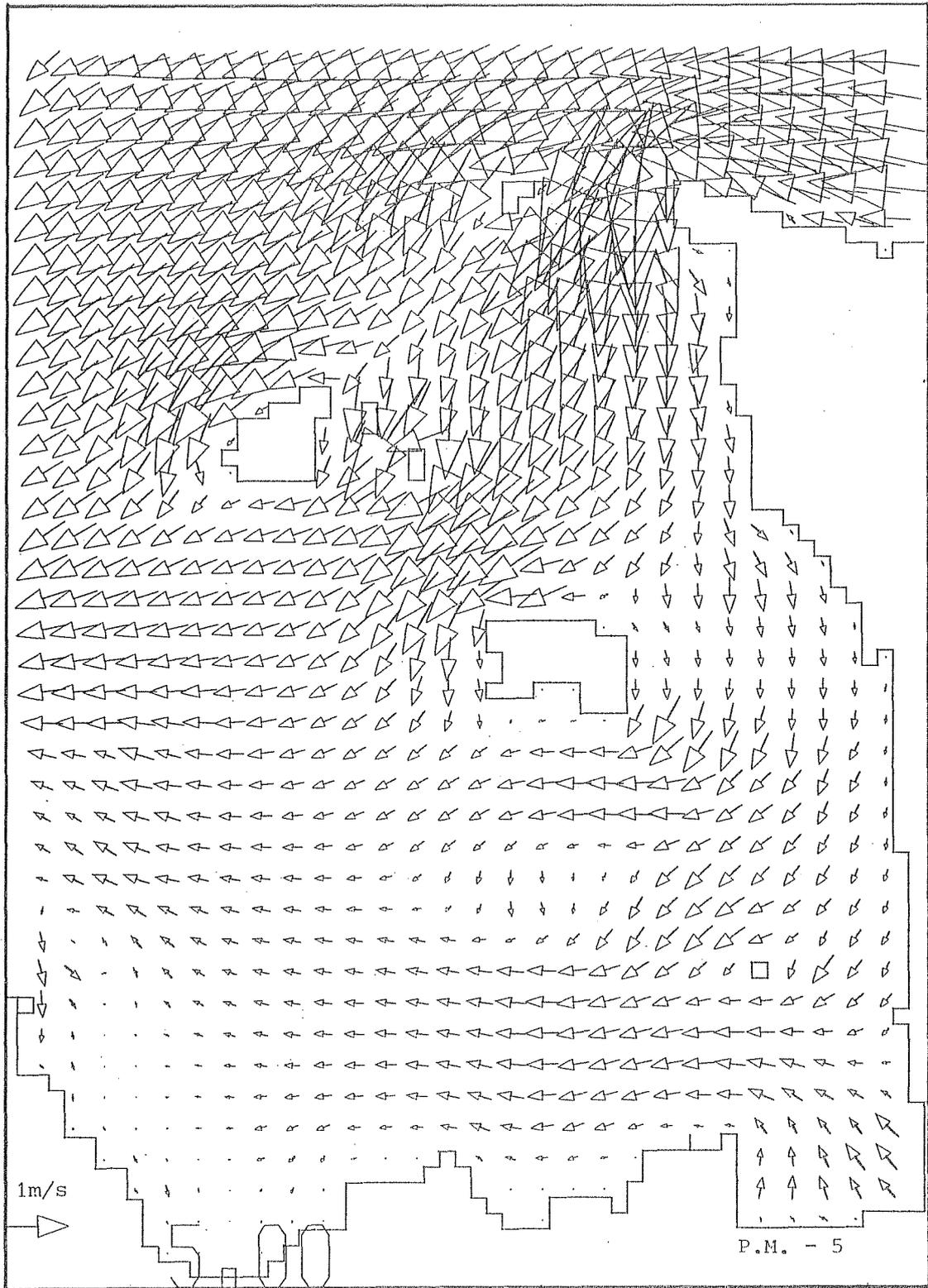
CARTES DE COURANTS DE MAREE

- MAREE MOYENNE -

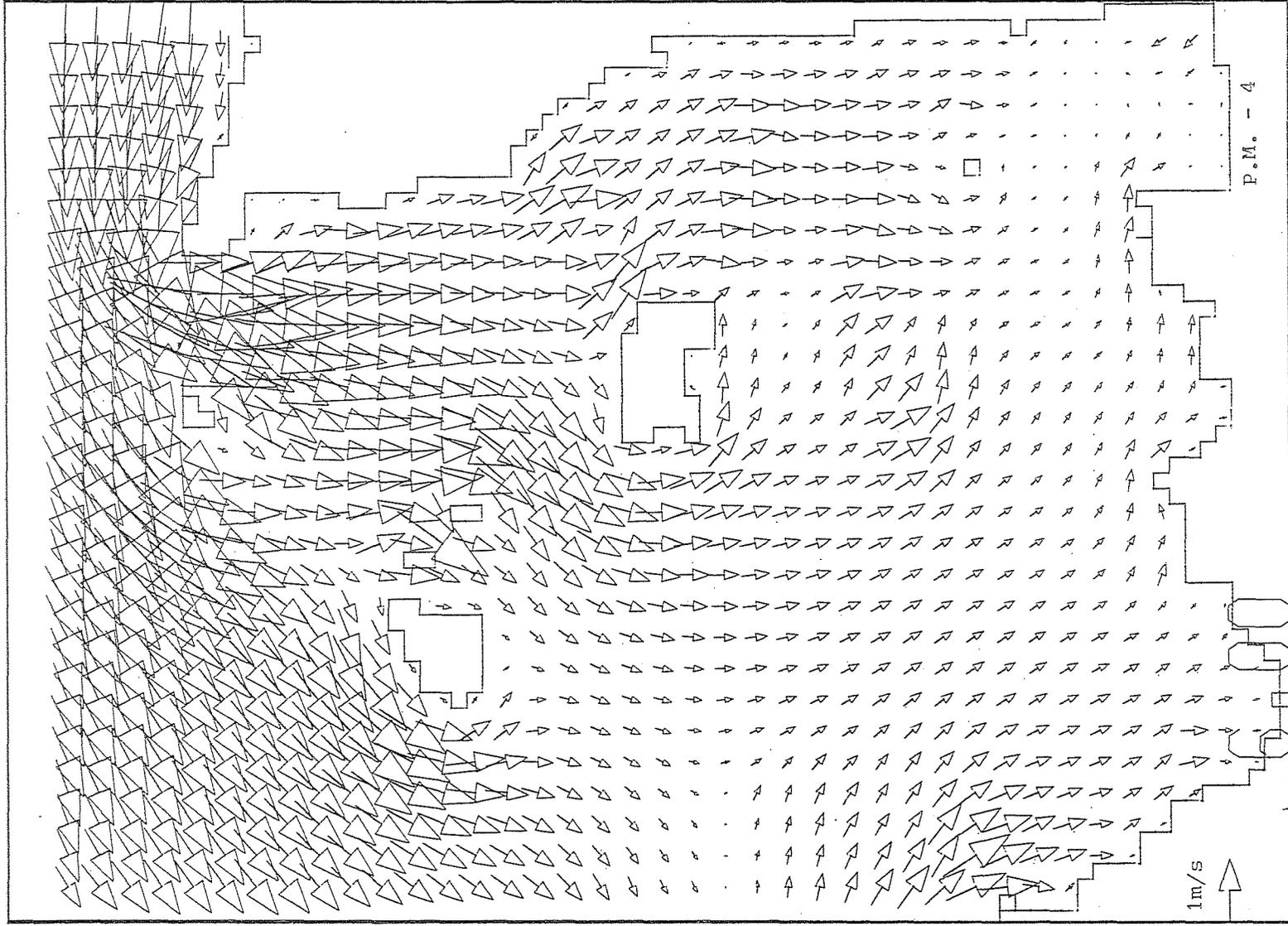
- o LES HEURES SONT EN T.U.
- o LES HEURES DE LA MAREE SONT DONNEES
PAR RAPPORT A LA PLEINE MER DE ST MALO



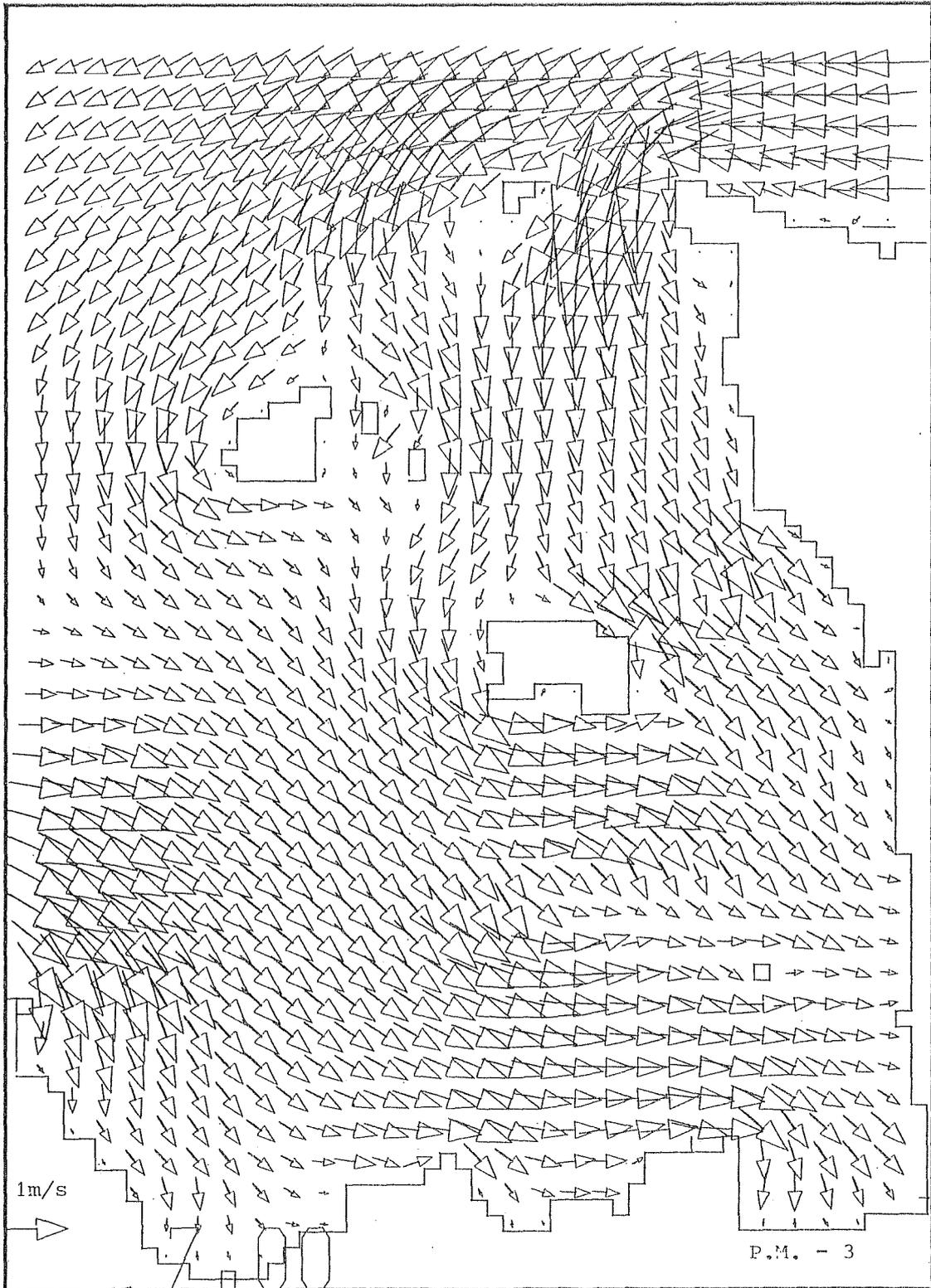
16/7/83 à 4 H T.U.



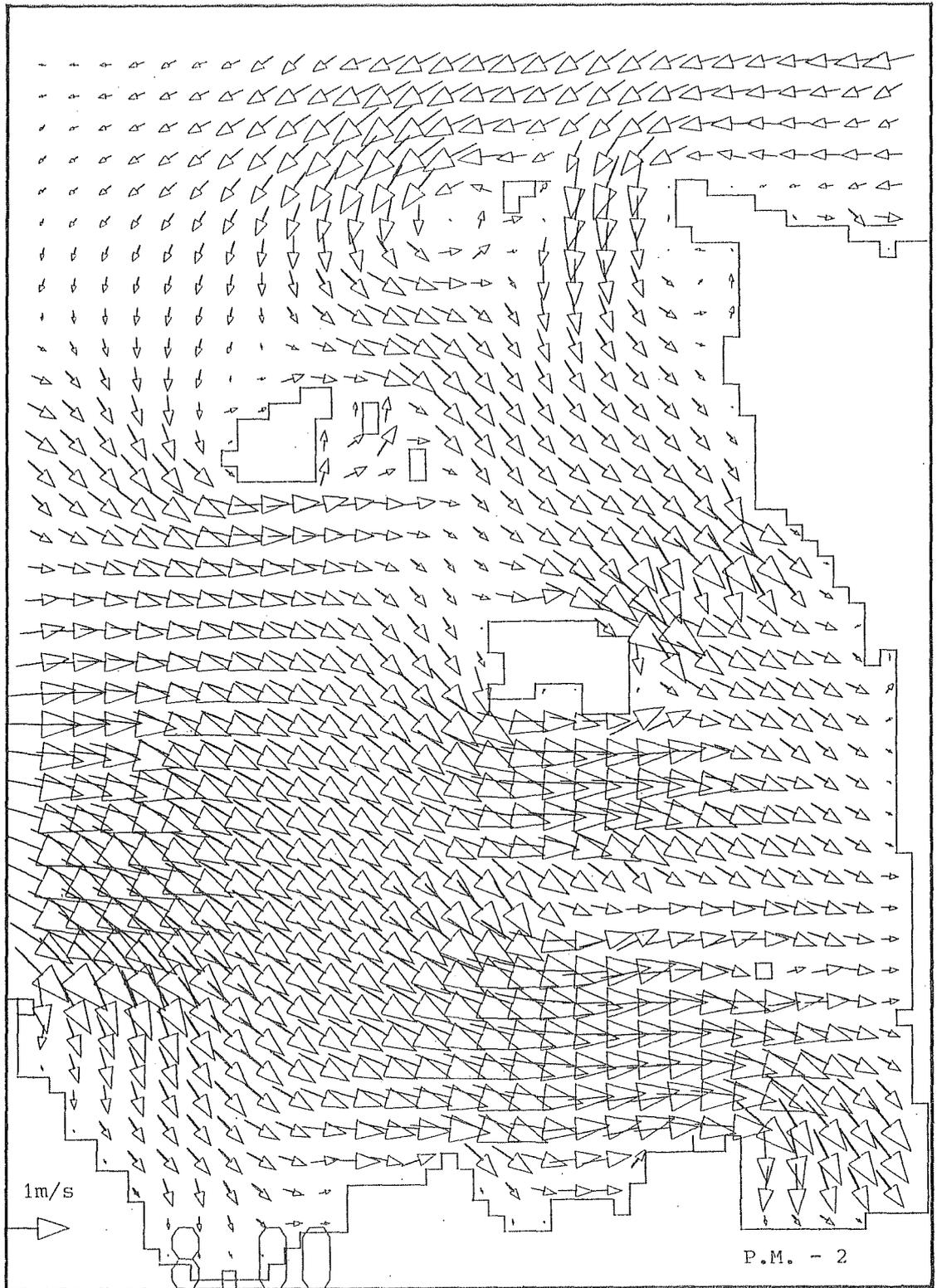
16/7/83 à 5 H T.U.



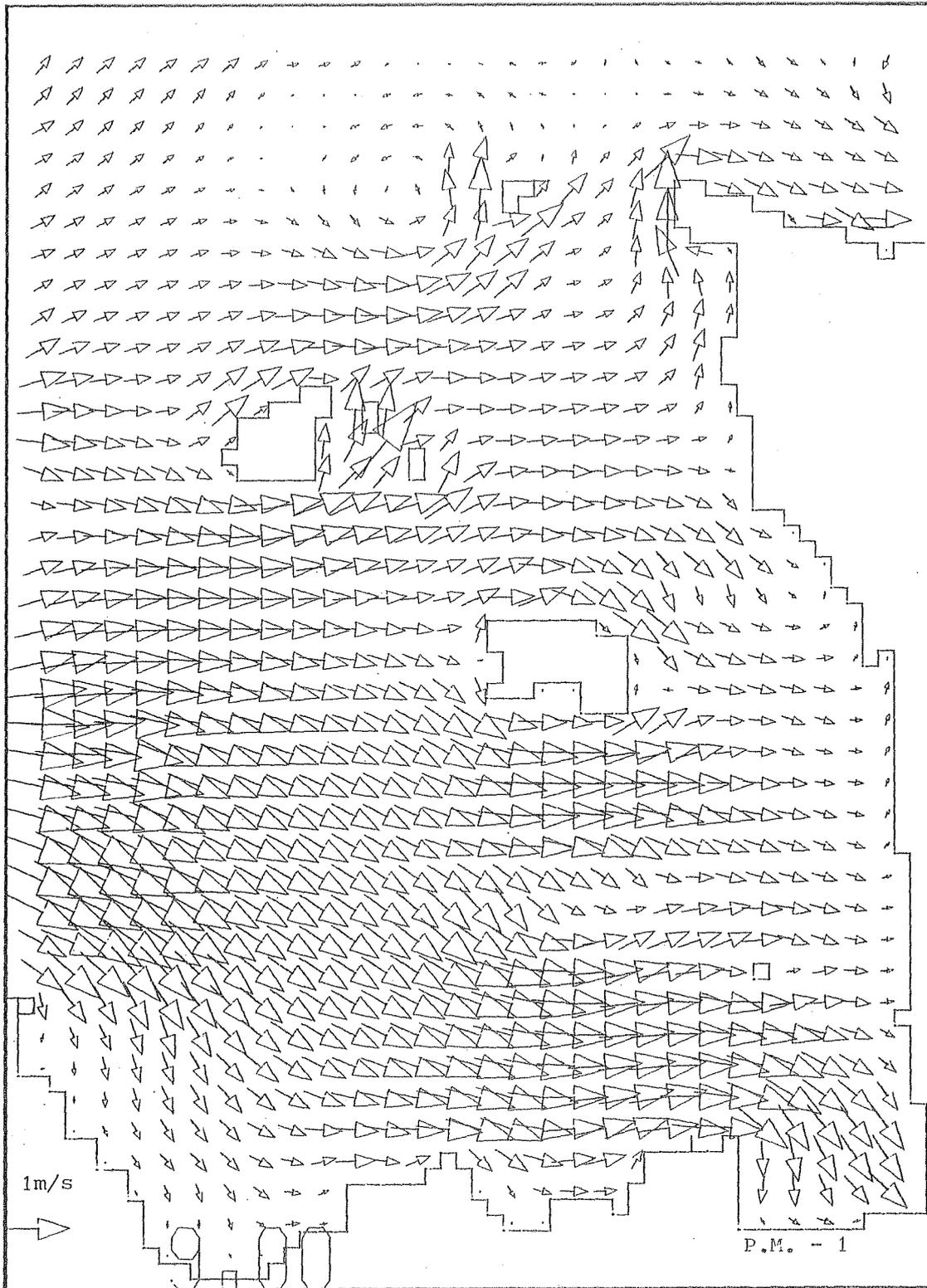
16/7/83 à 6 H T.U.



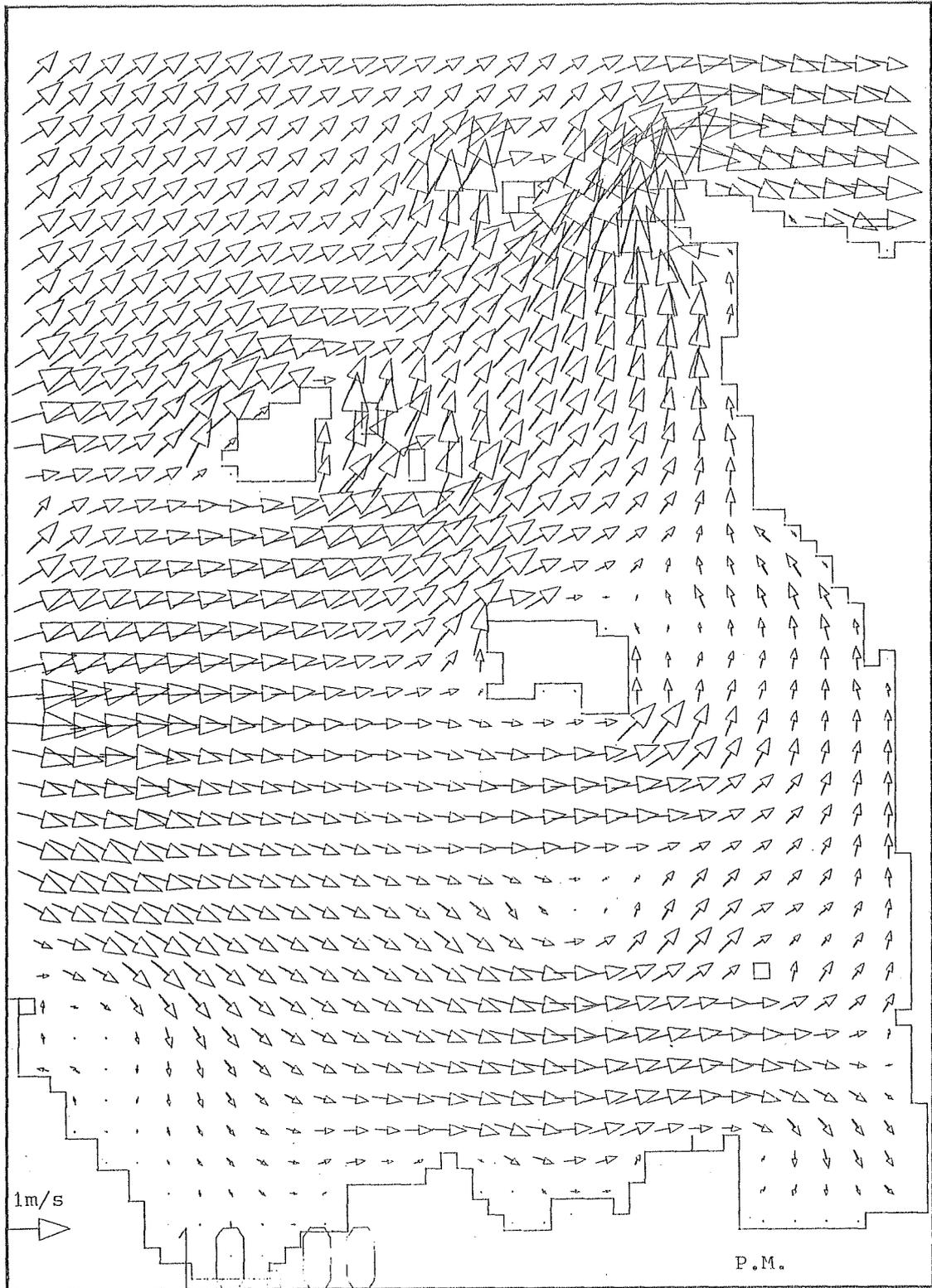
16/7/83 à 7 H T.U.



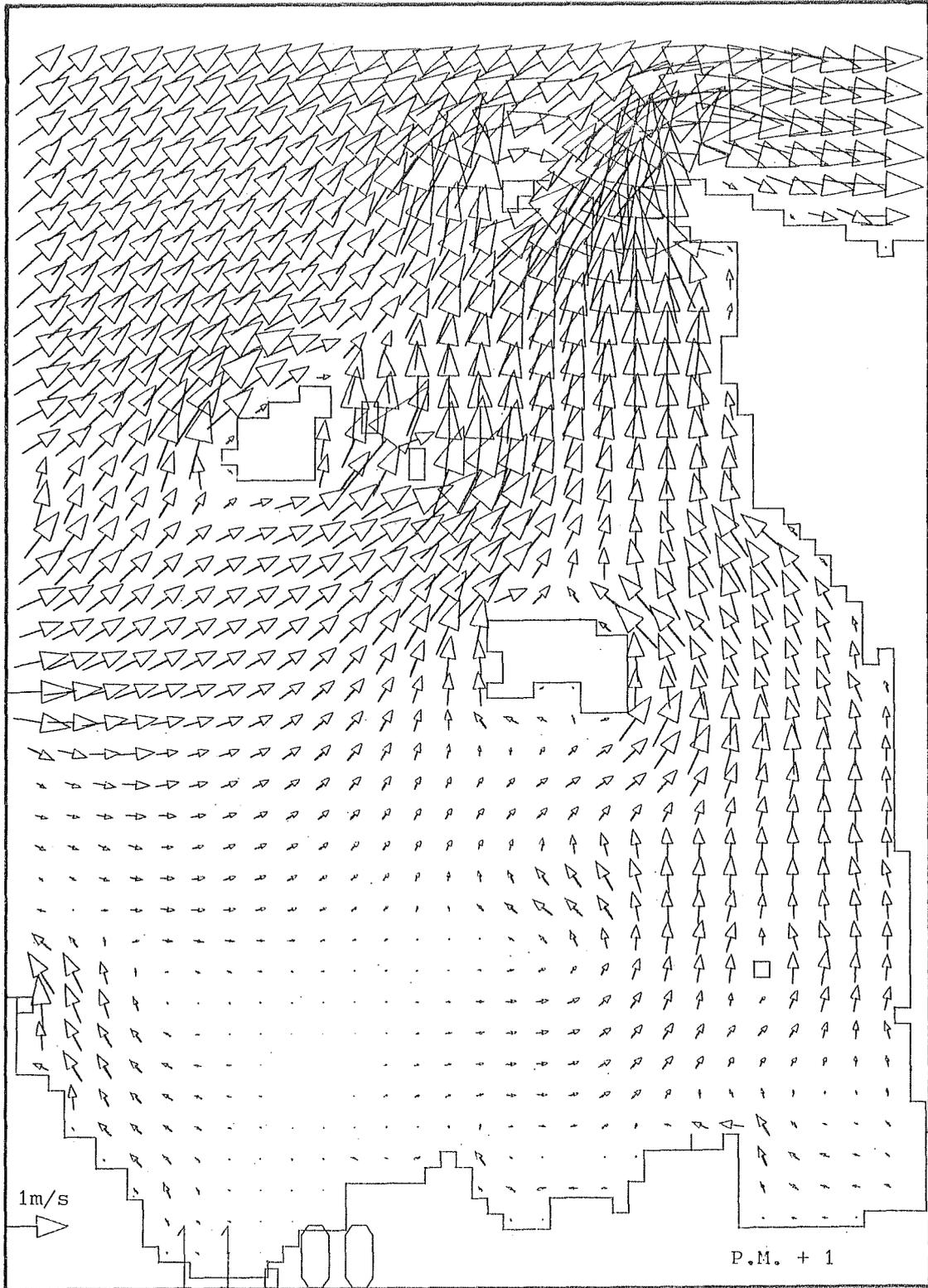
16/7/83 à 8 H T.U.



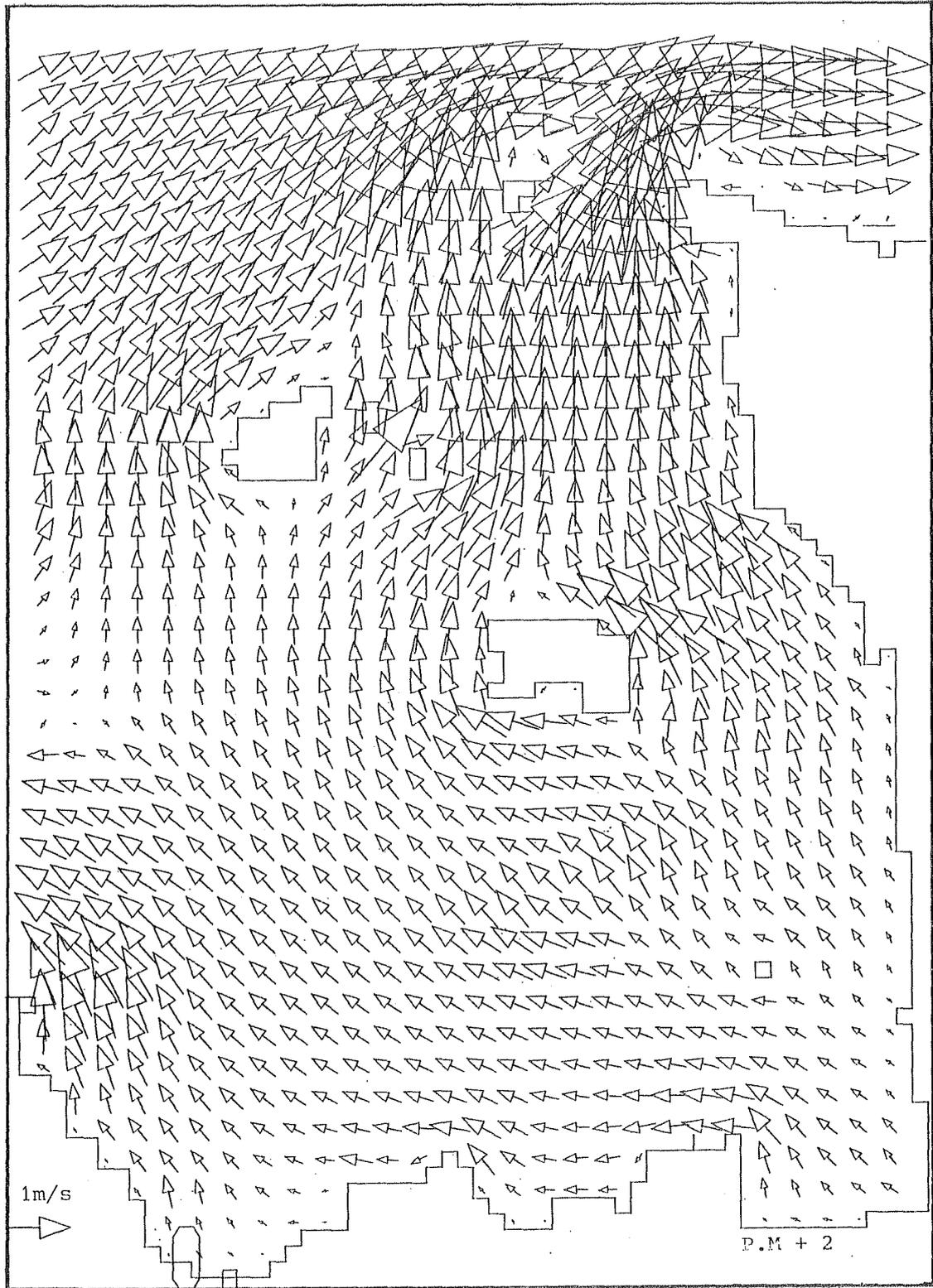
16/7/83 à 9 H T.U.



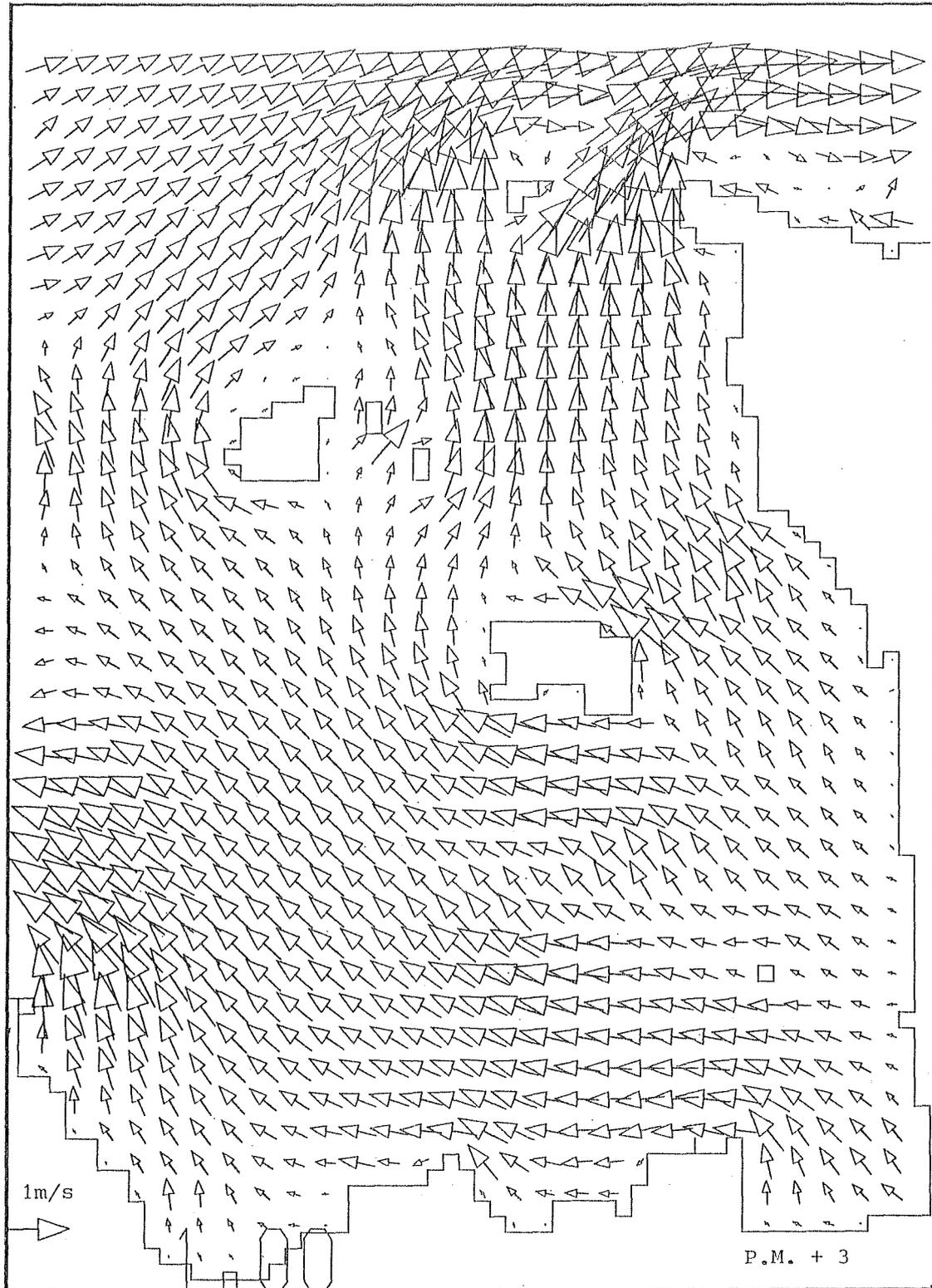
16/7/83 à 10 H T.U.



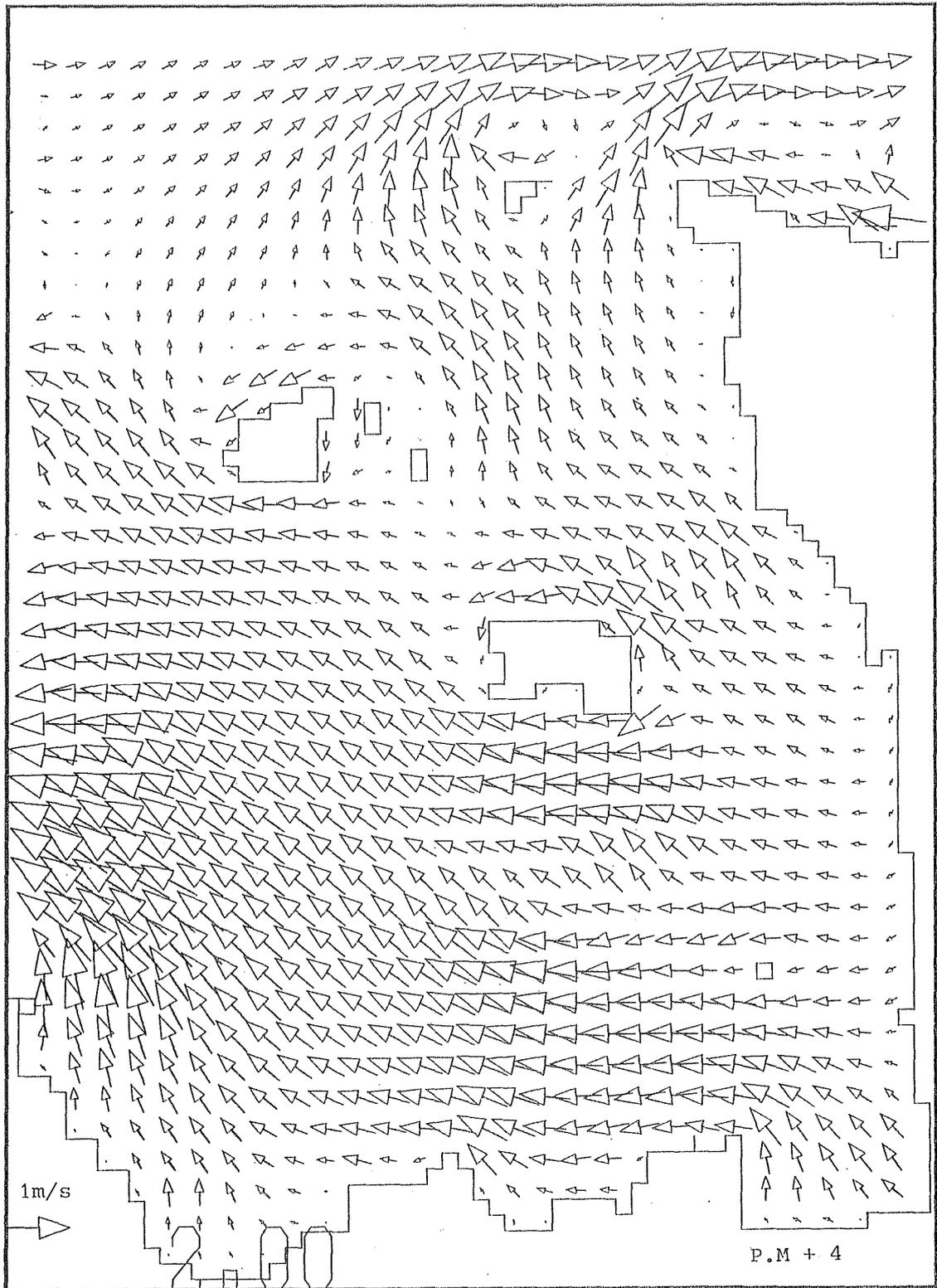
16/7/83 à 11 H T.U.



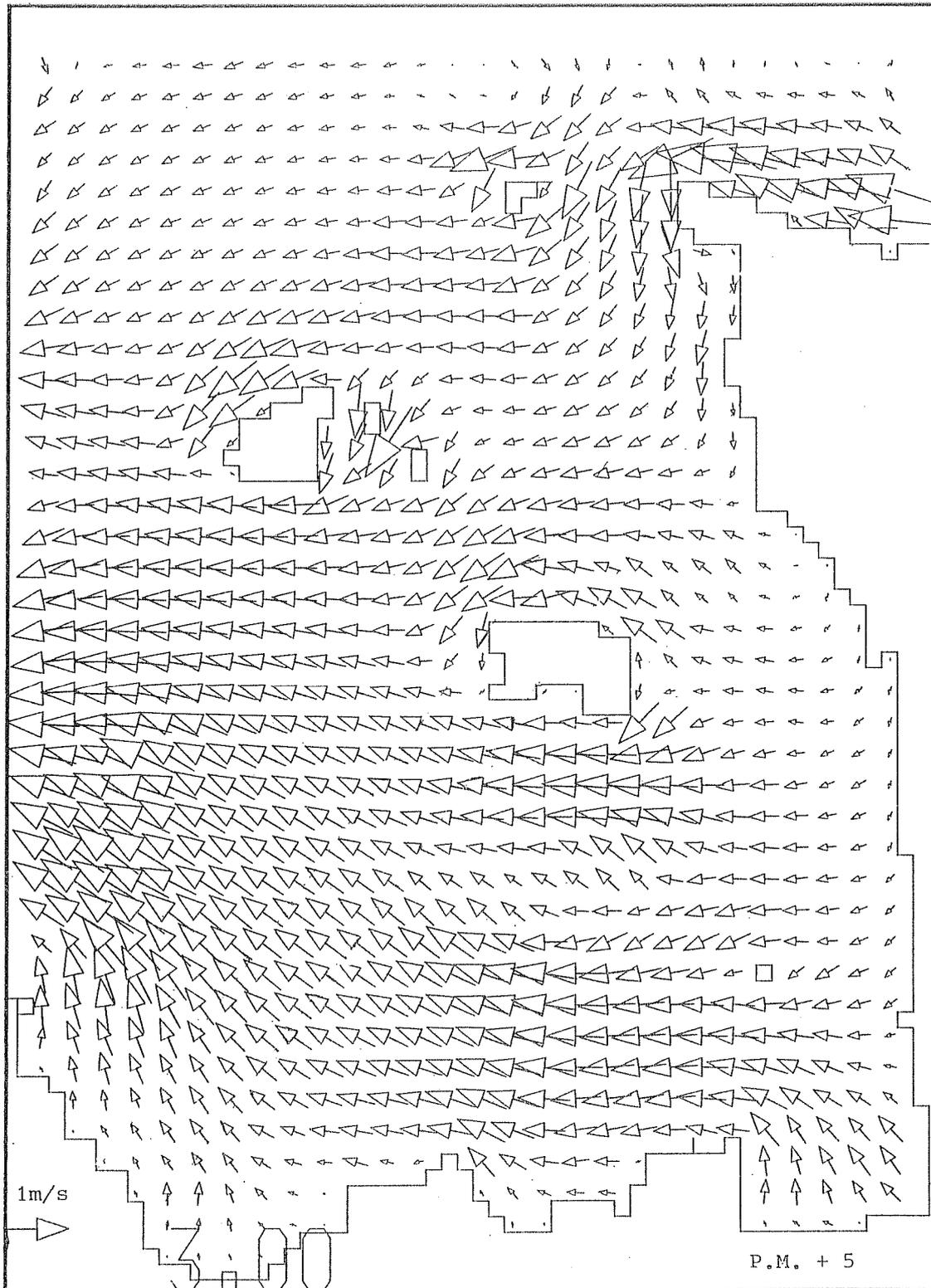
16/7/83 à 0 H T.U.



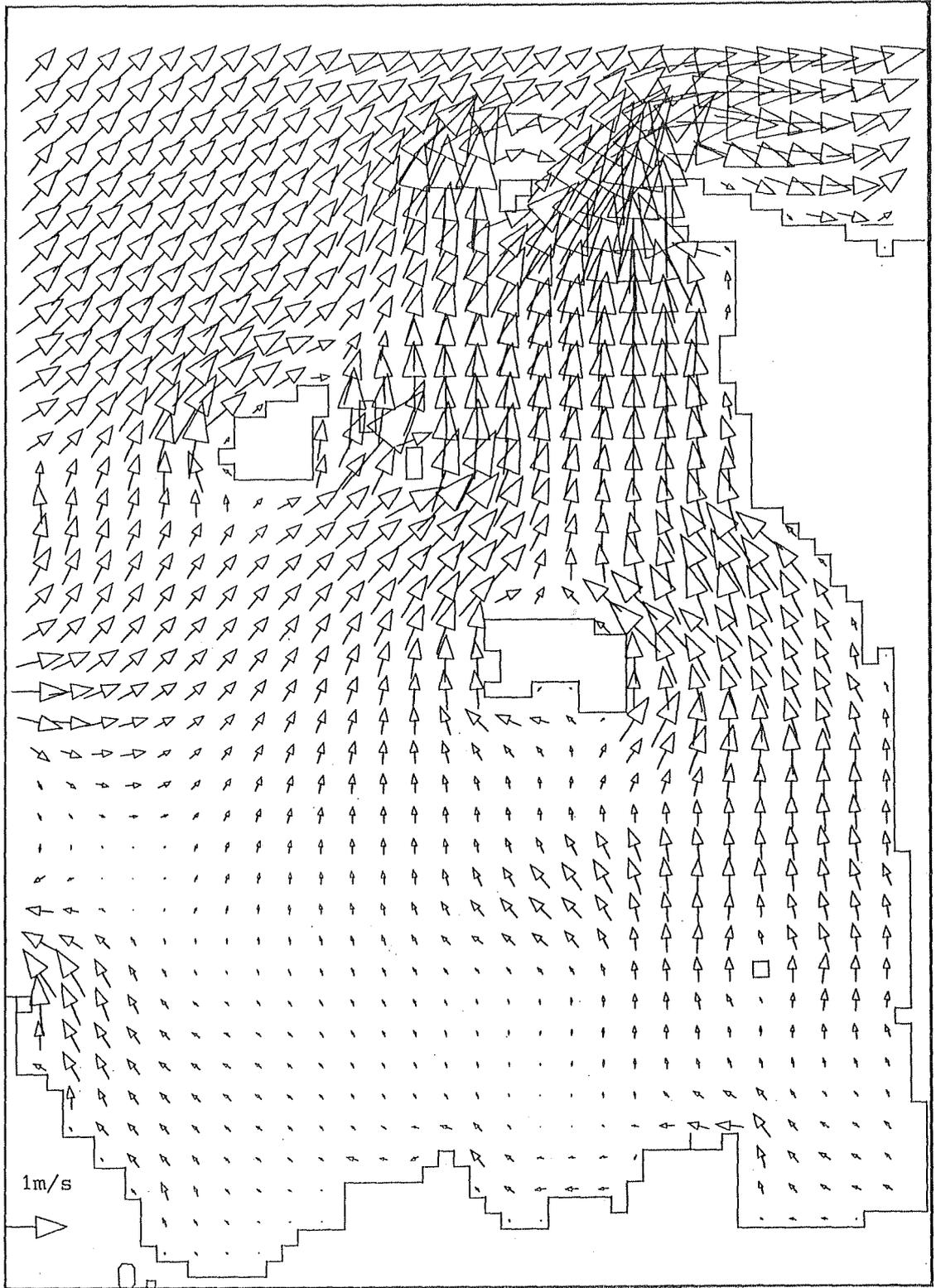
16/7/83 à 1 H.T.U.



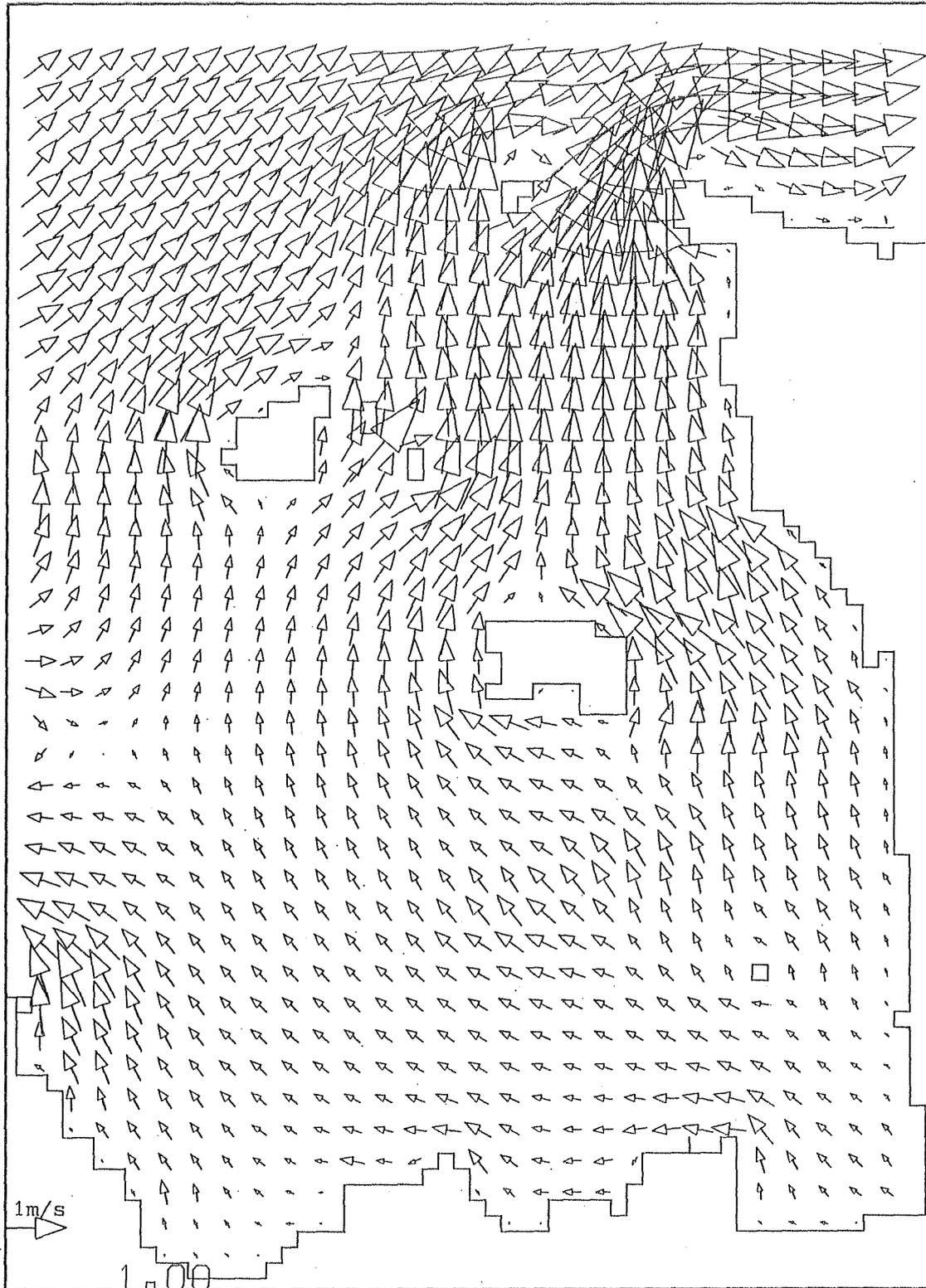
16/7/83 à 2 H T.U.



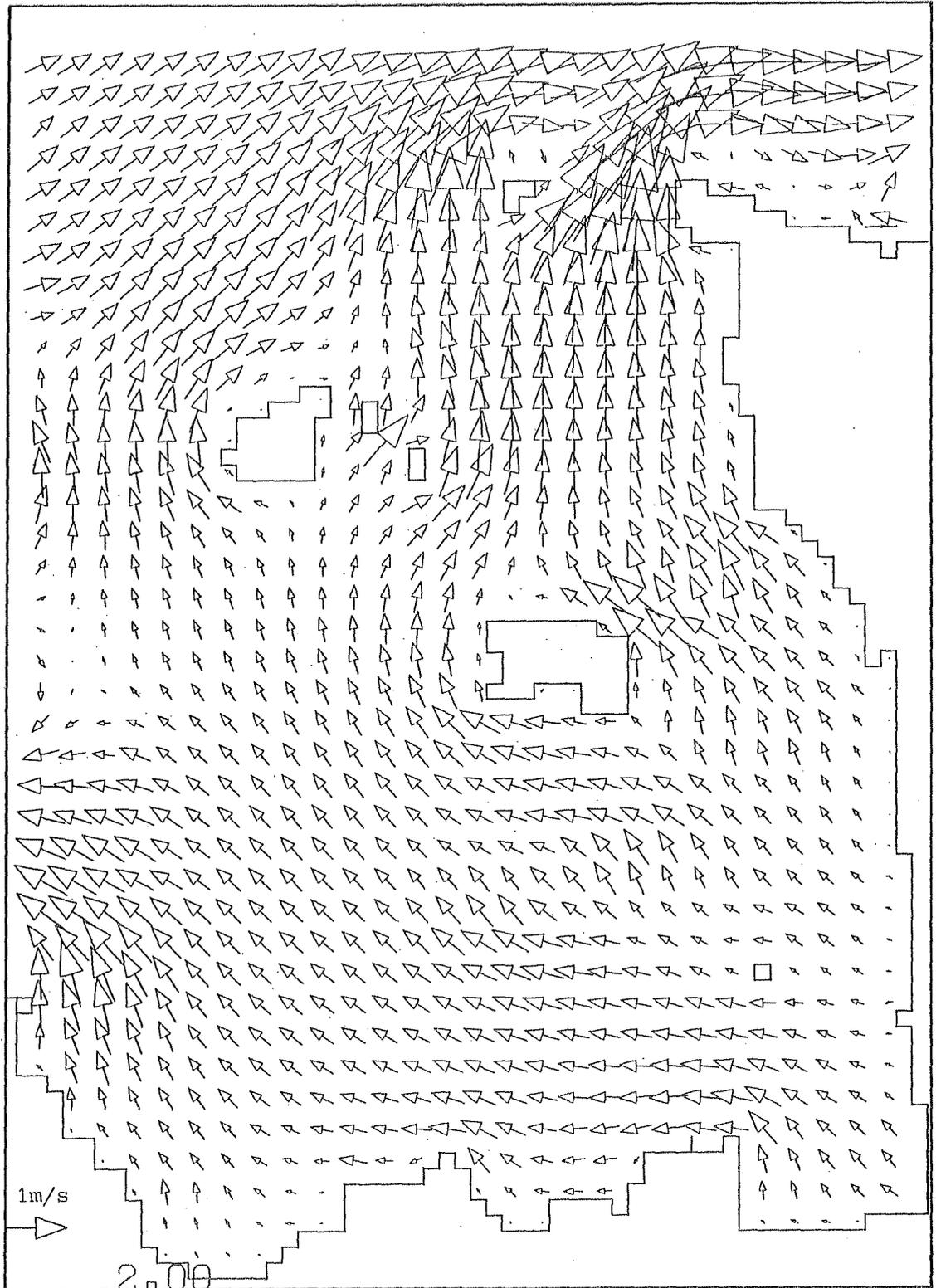
16/7/83 à 3 H T.U.



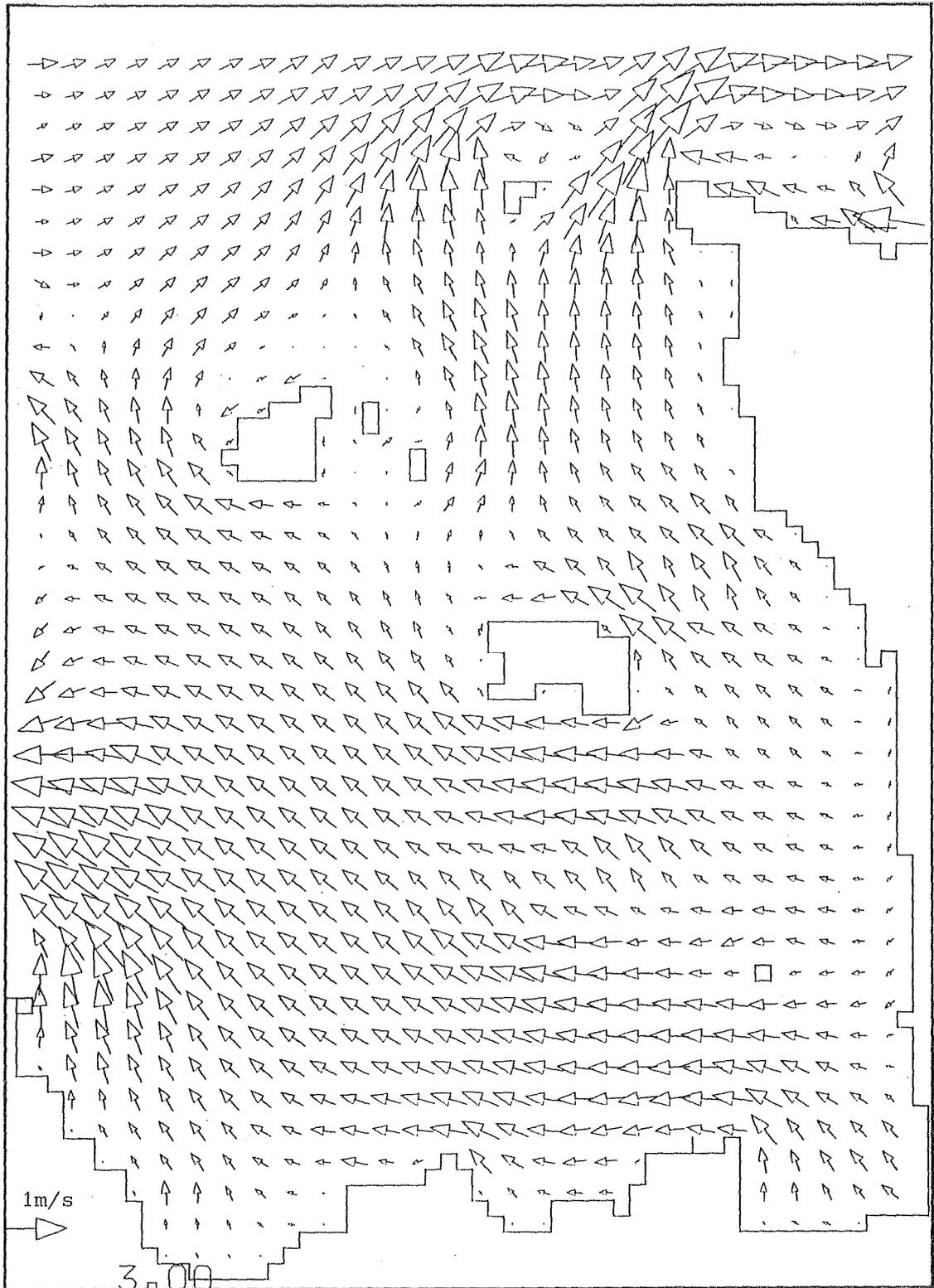
16/8/83 à 0 H T.U.



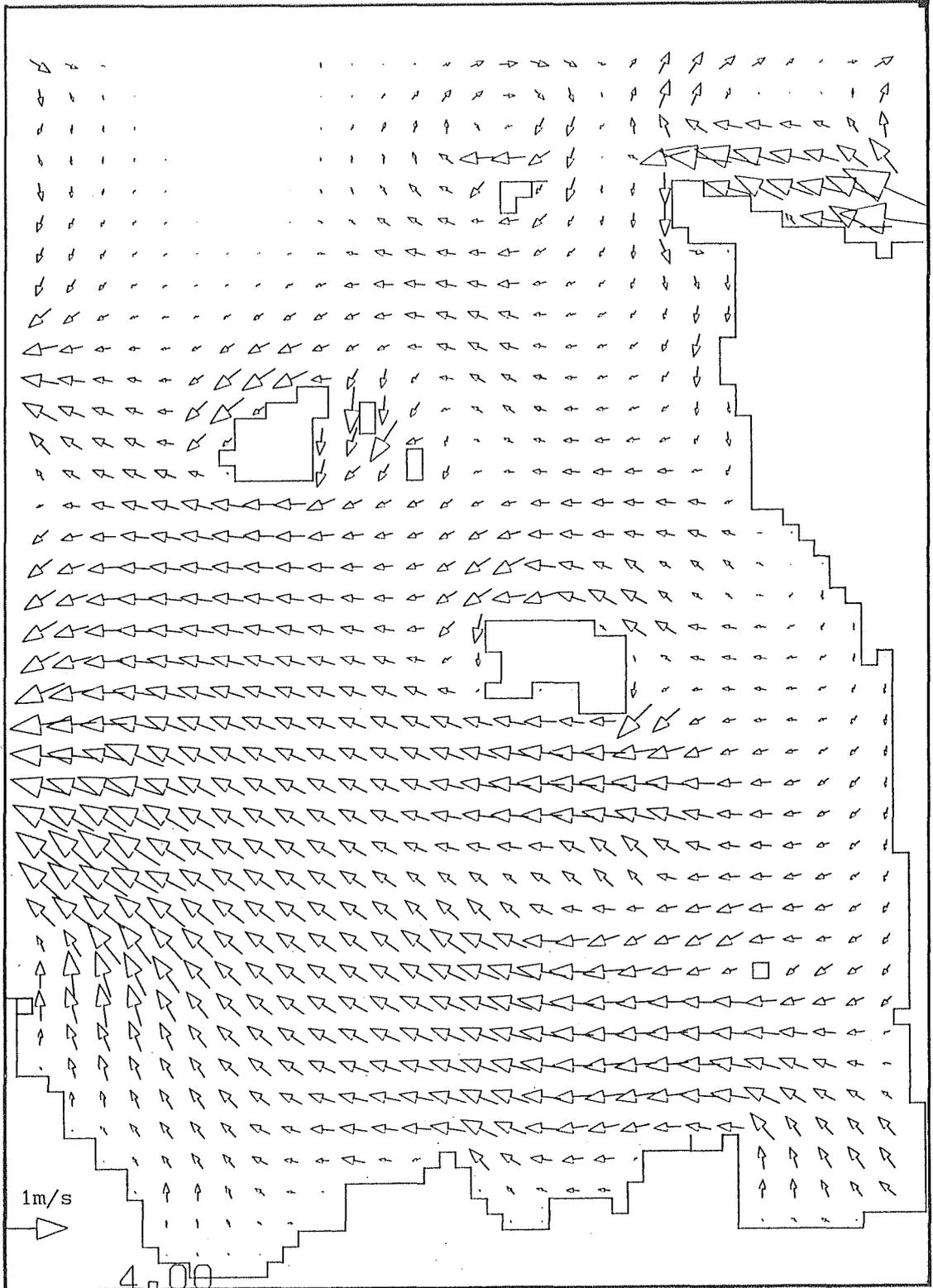
16/8/83 à 1 H T.U.



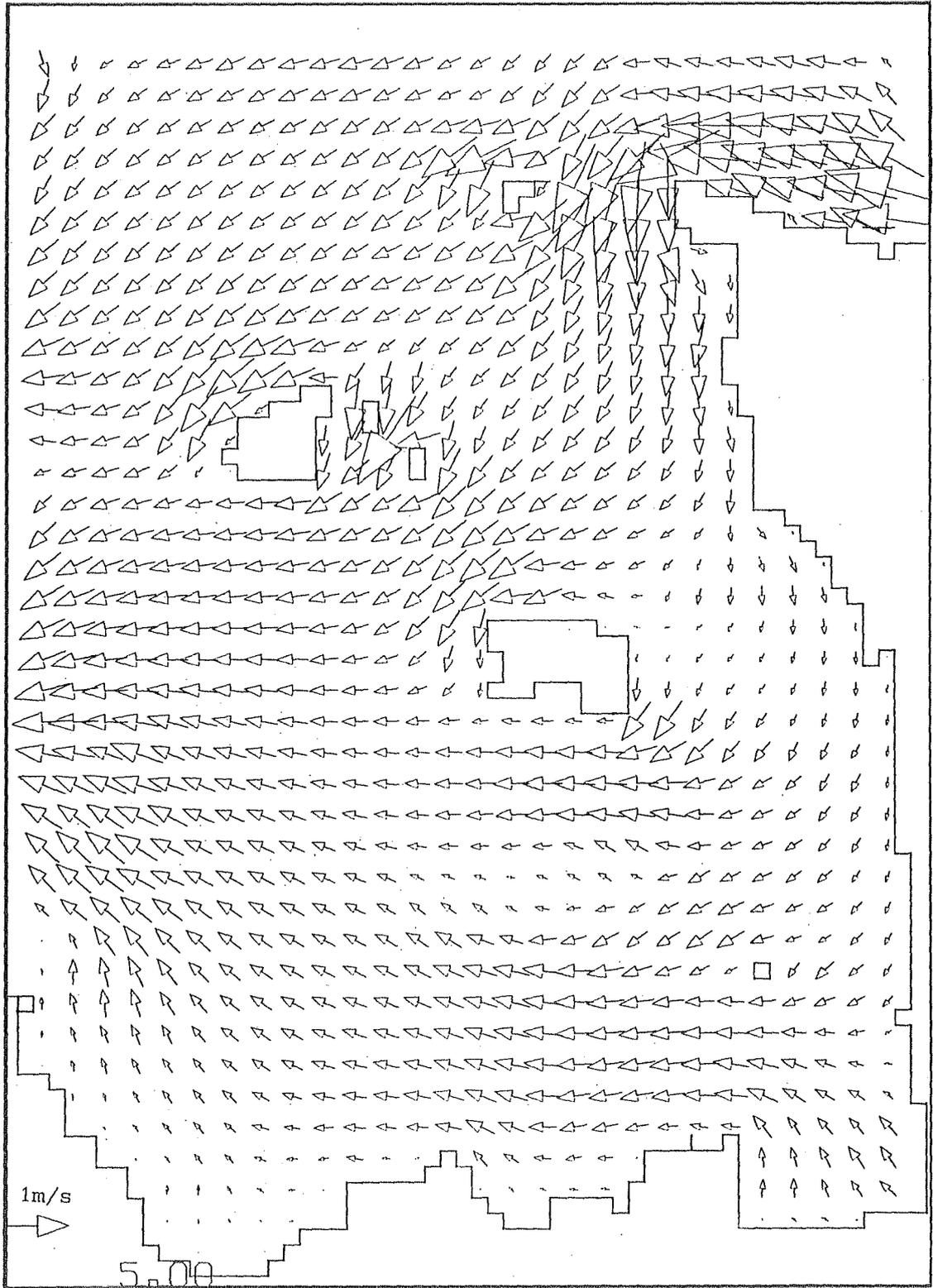
16/8/83 à 2 H T.U.



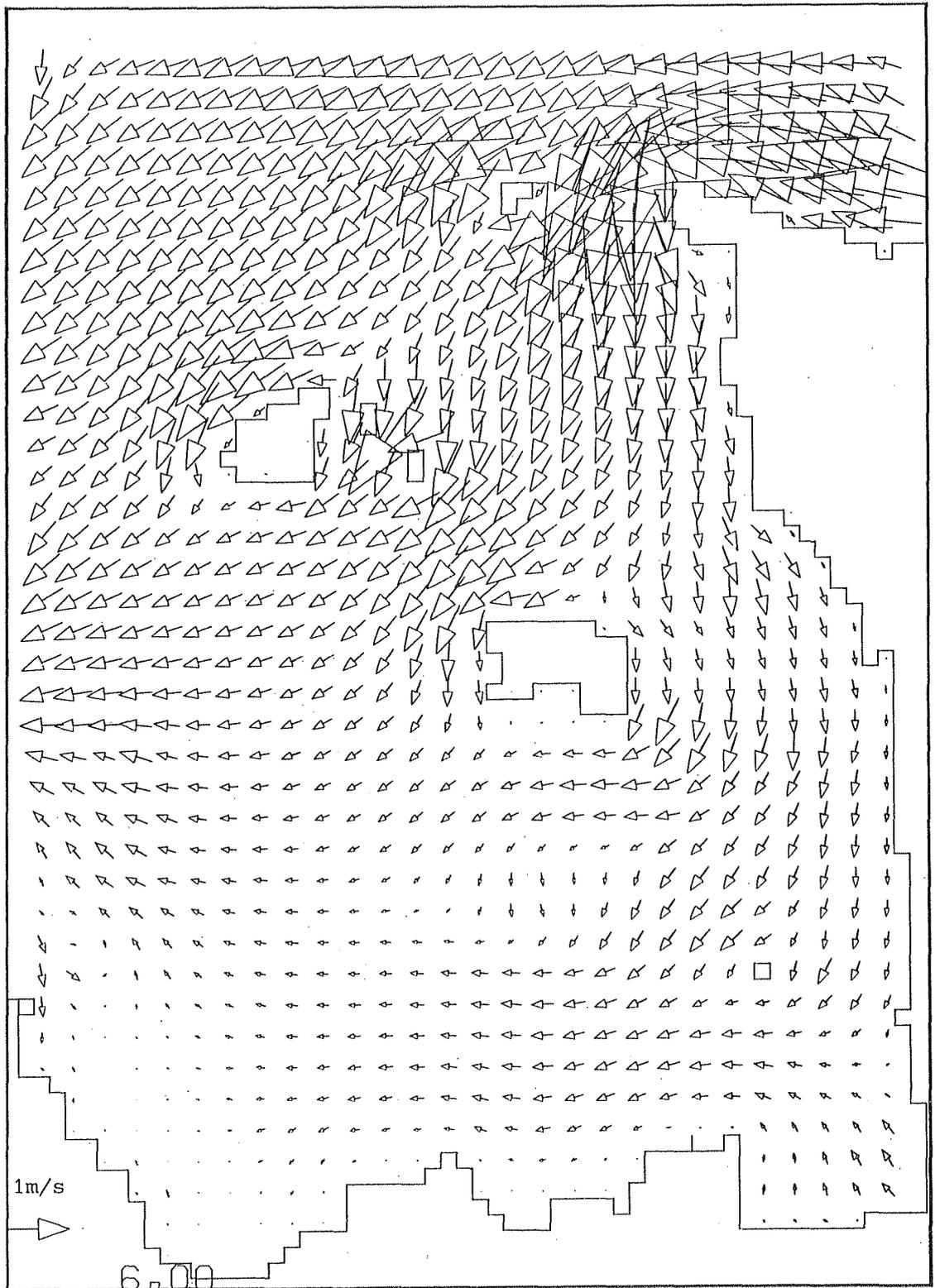
16/8/83 à 3 H T.U.



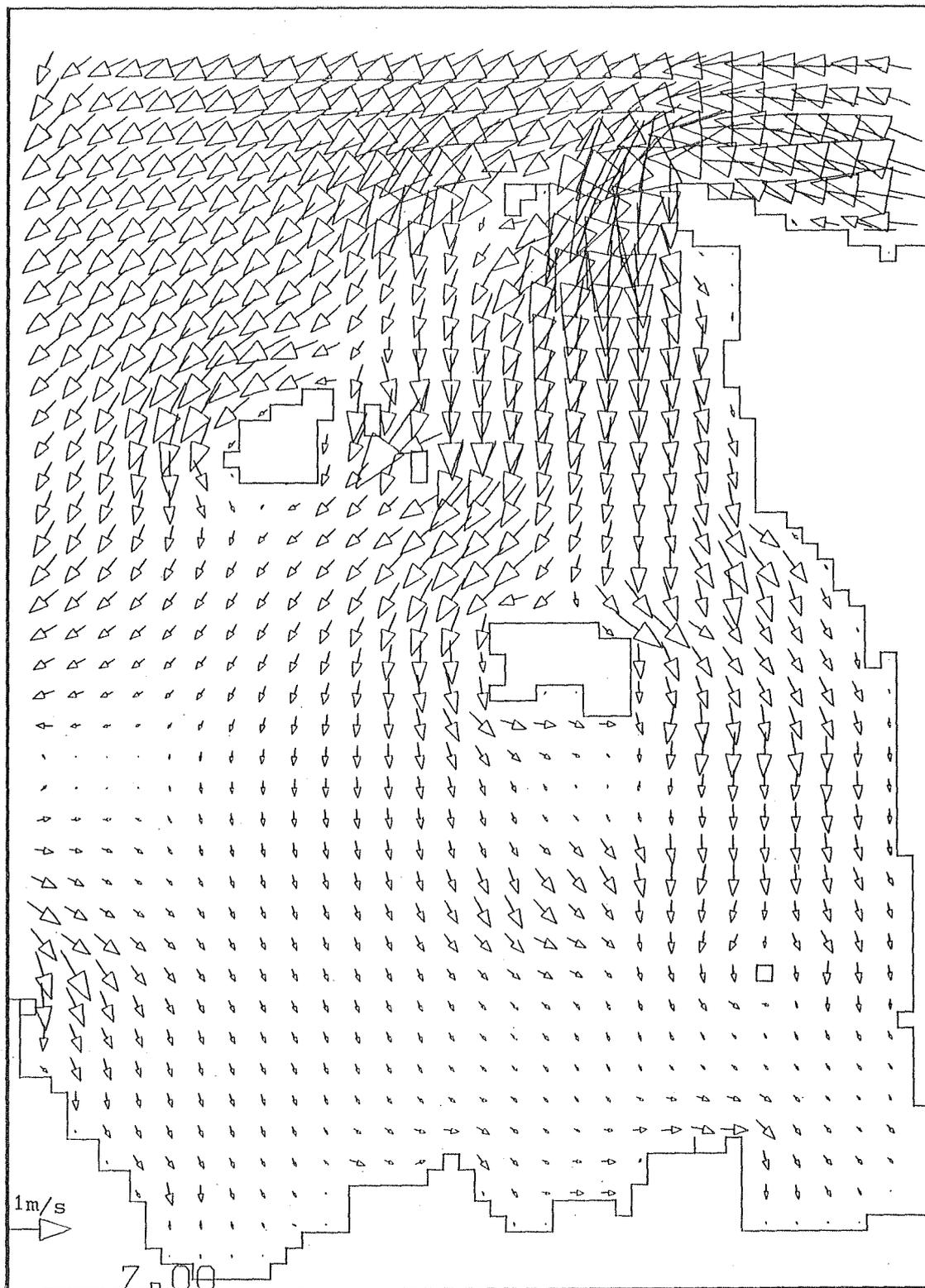
16/8/83 à 4 H T.U.



16/8/83 à 5 H T.U.

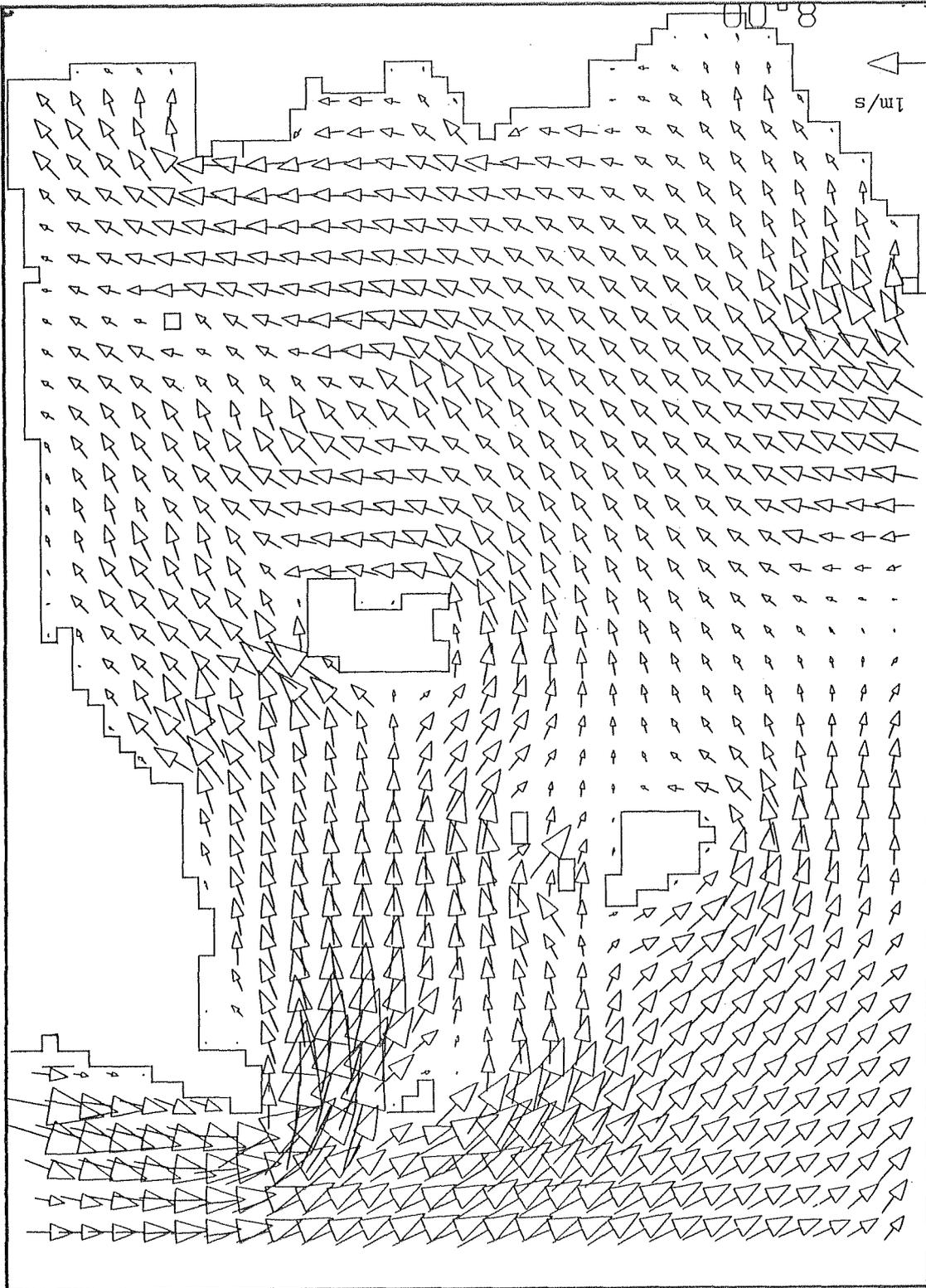


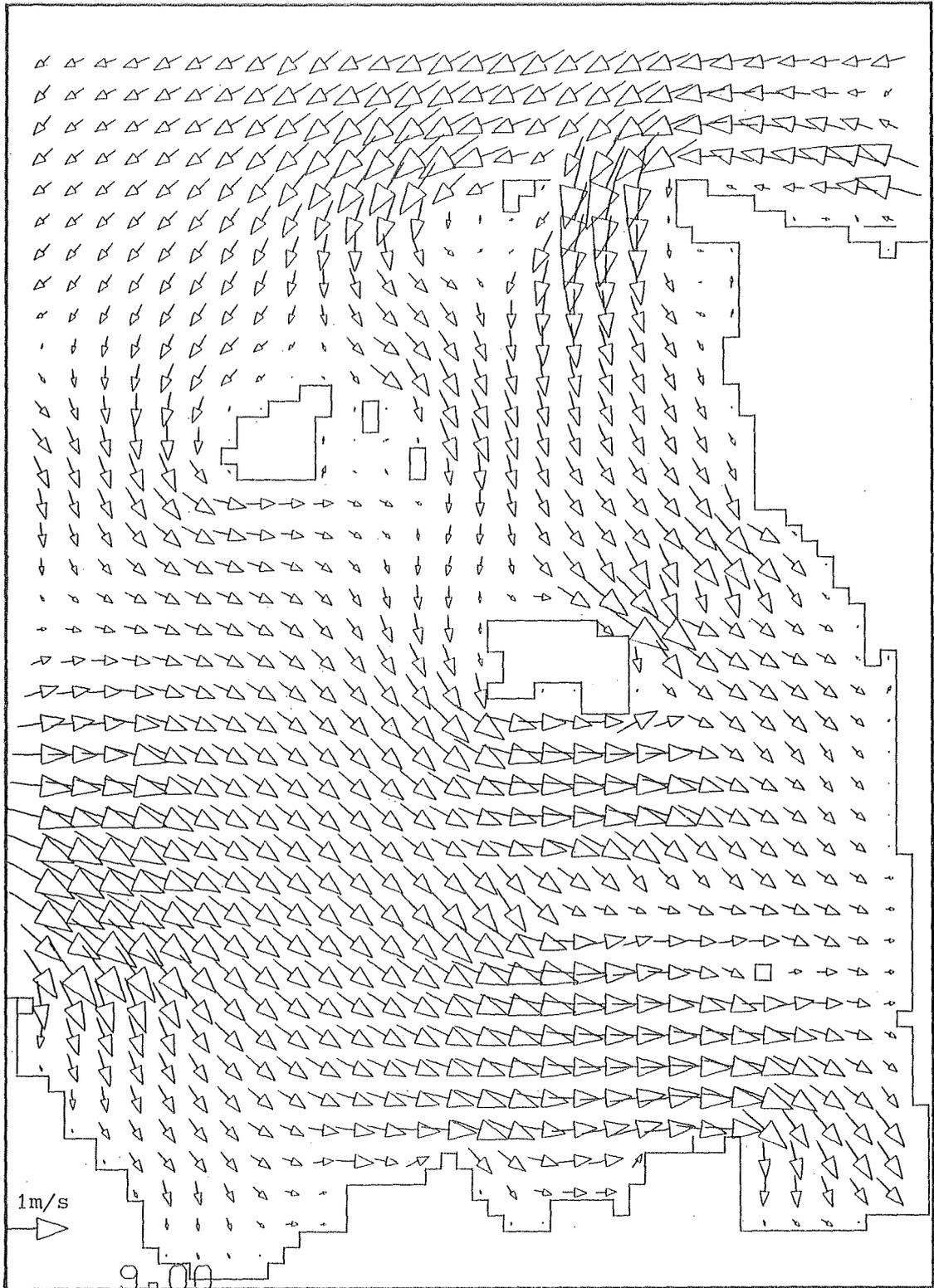
16/8/83 à 6H T.U.



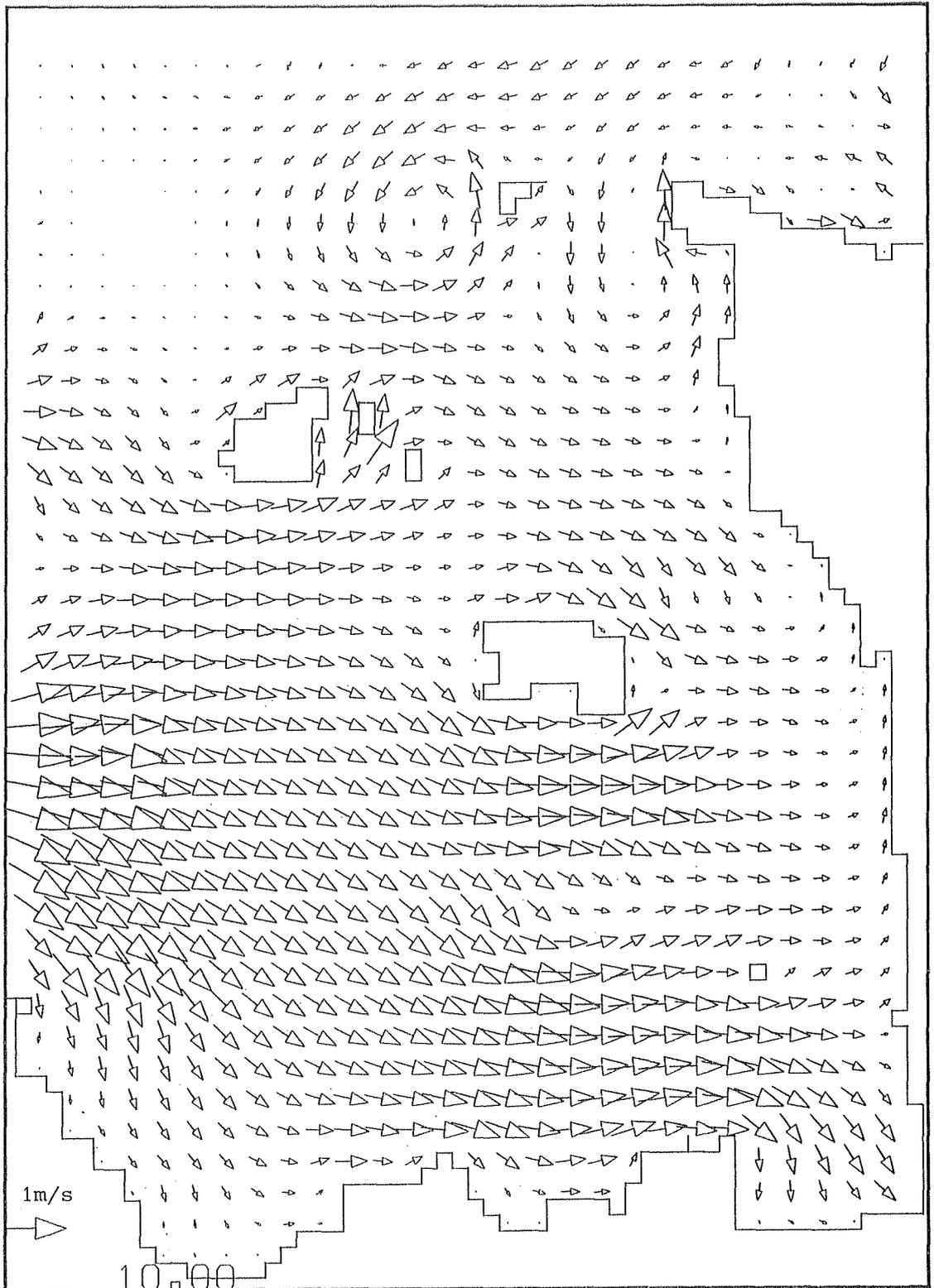
16/8/83 à 7 H T.U.

16/8/83 à 8 H T.U.

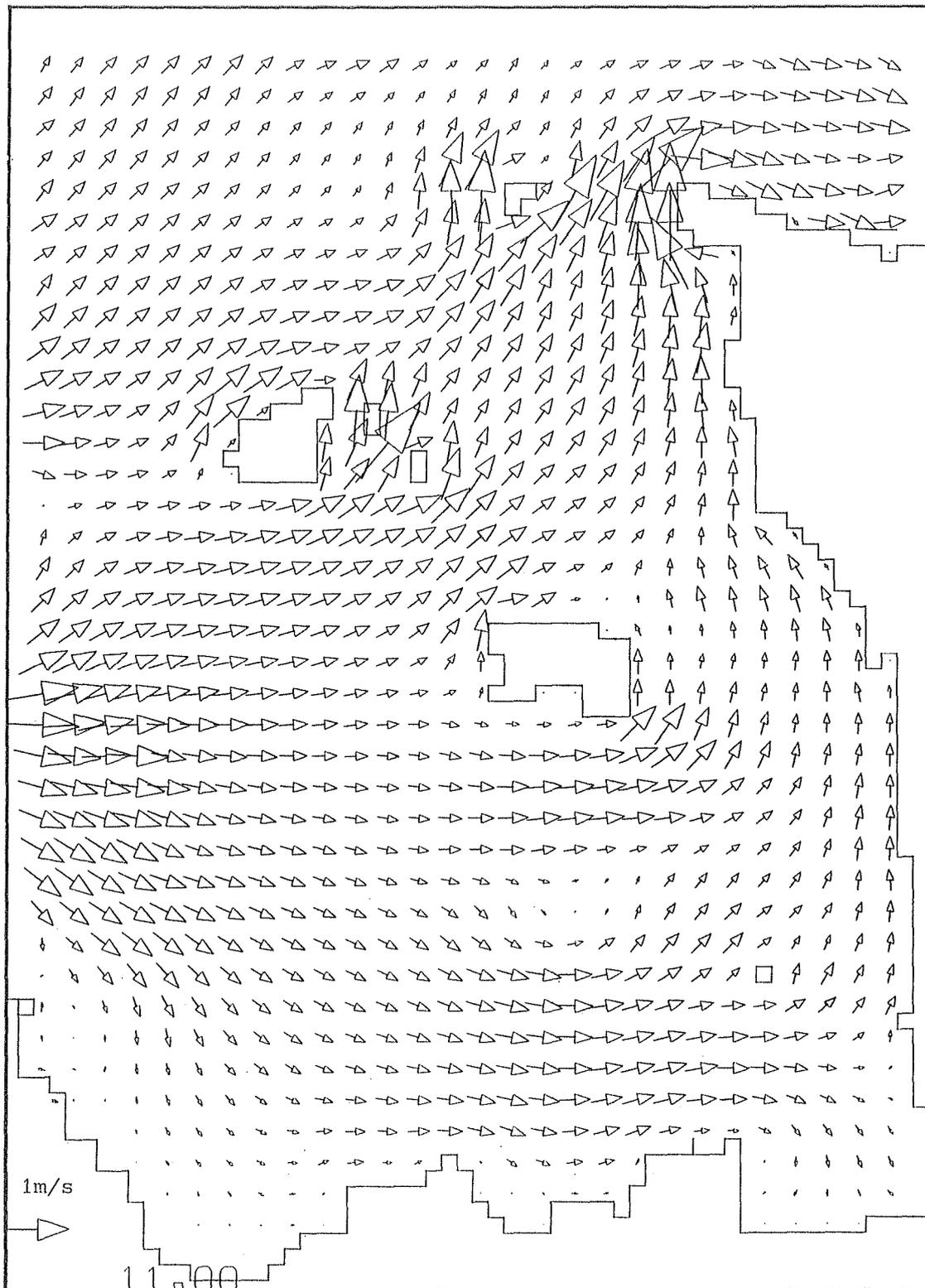




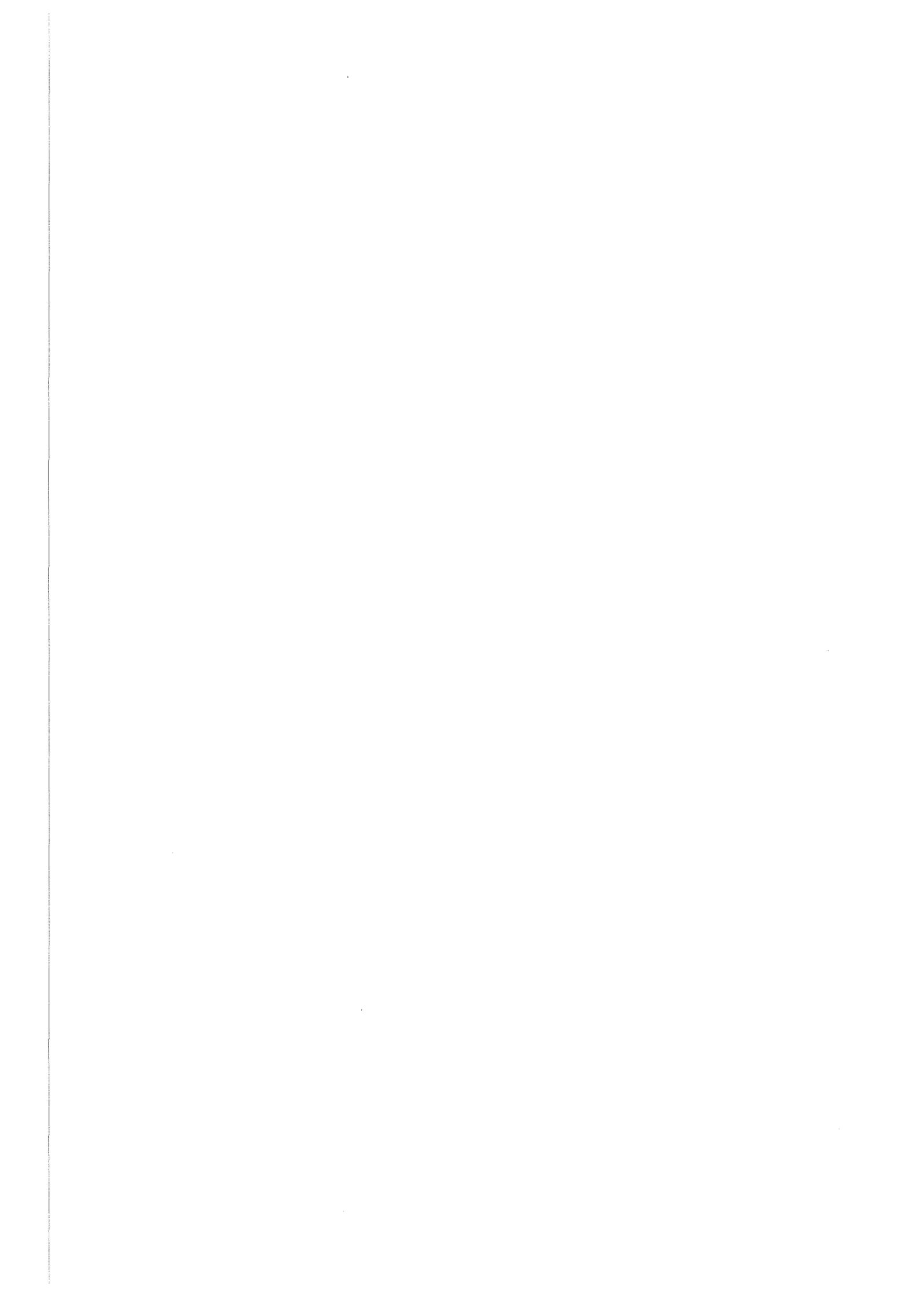
16/8/83 à 9 H T.U.



16/8/83 à 10 H T.U.



16/8/83 à 11 H T.U.

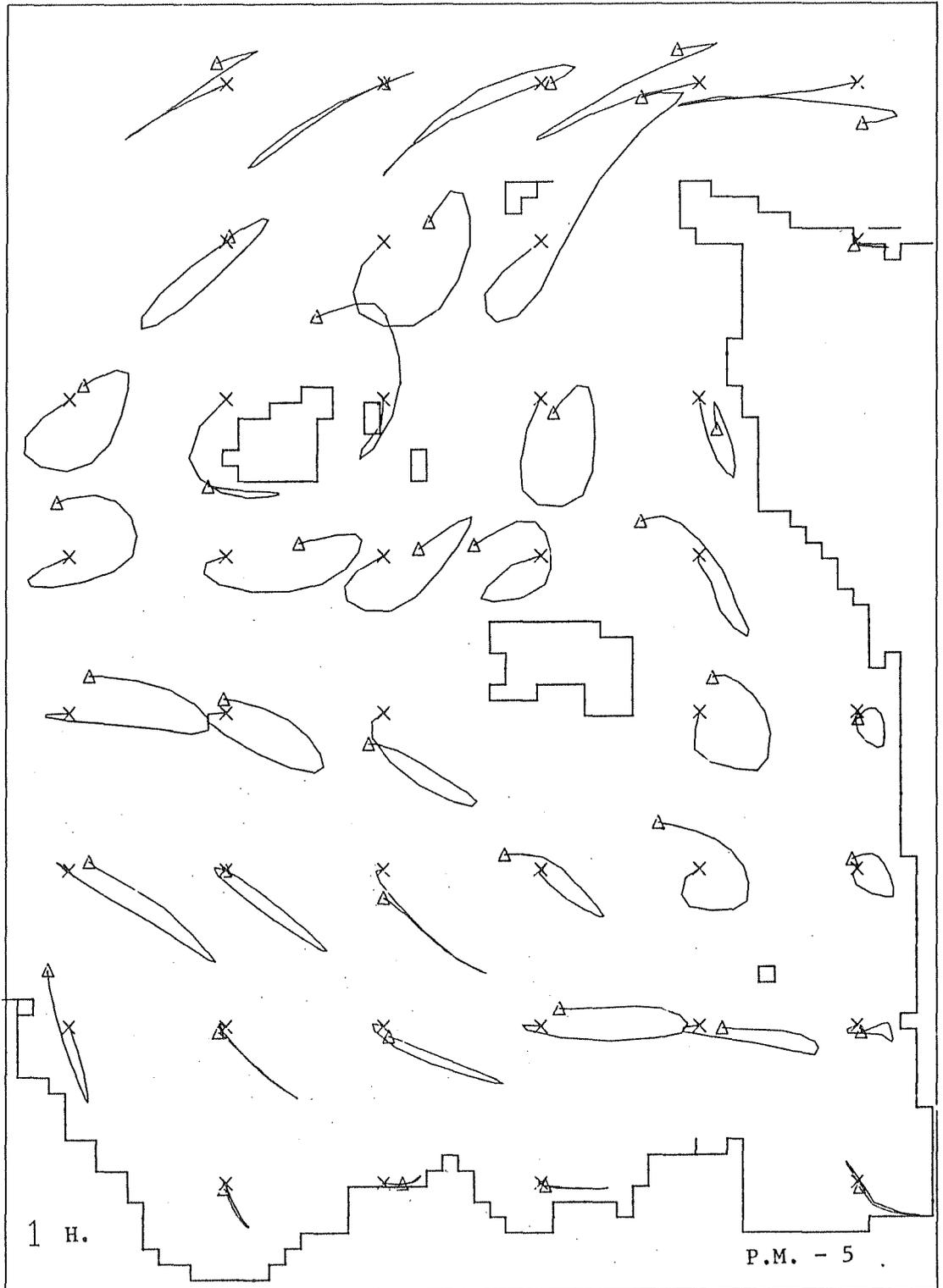


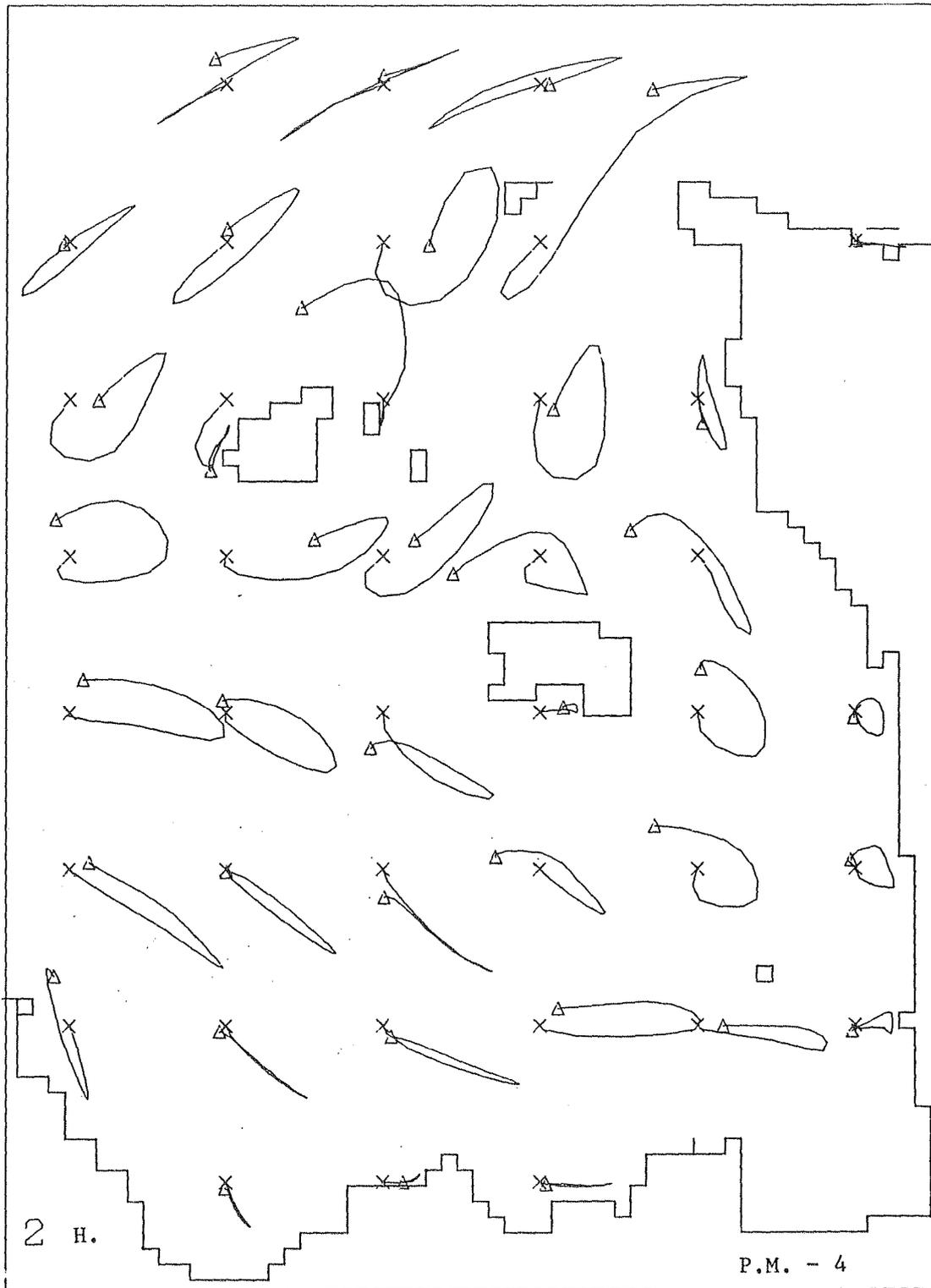
- A N N E X E I V -

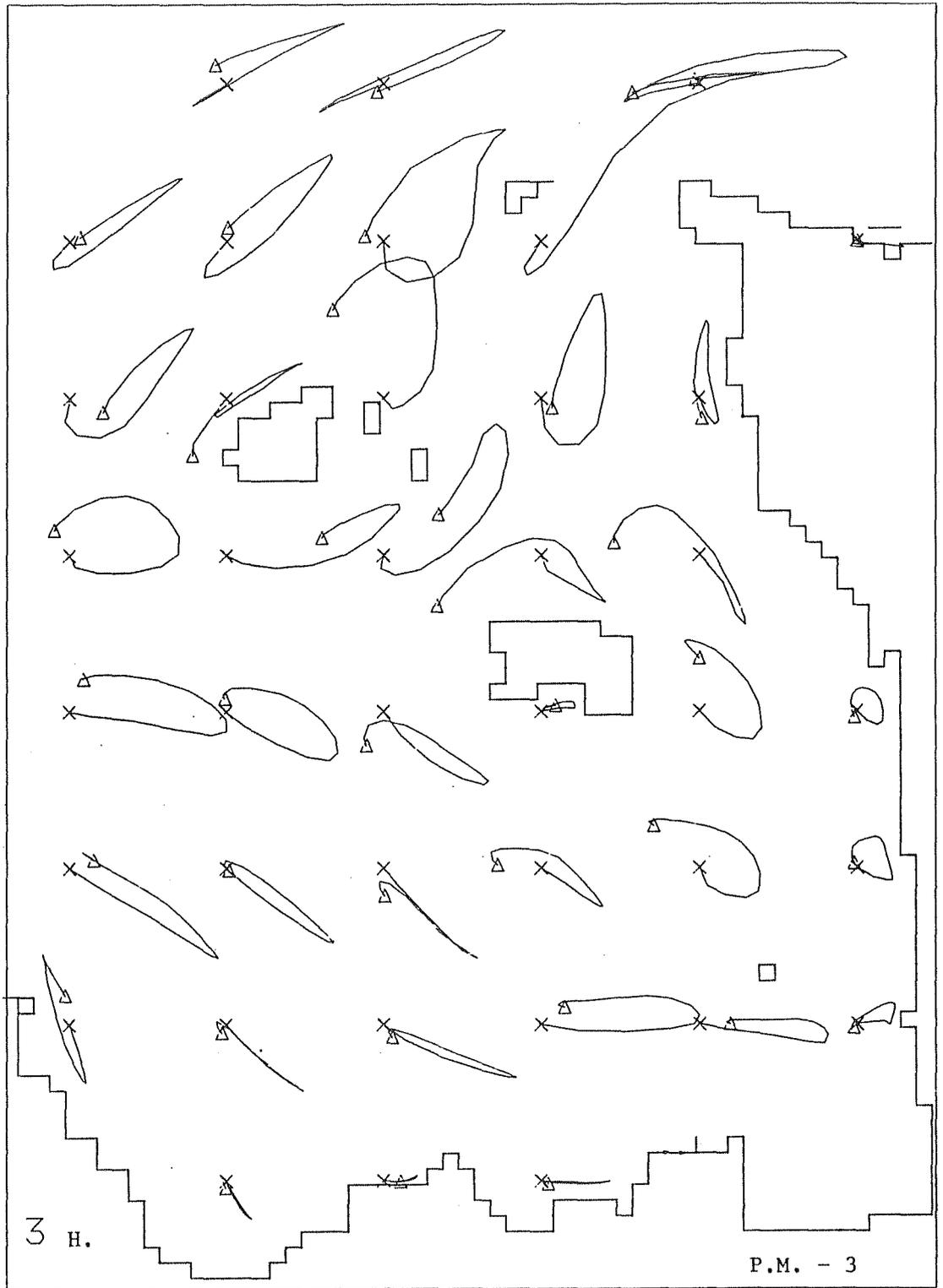
TRAJECTOIRES DES MASSES D'EAU

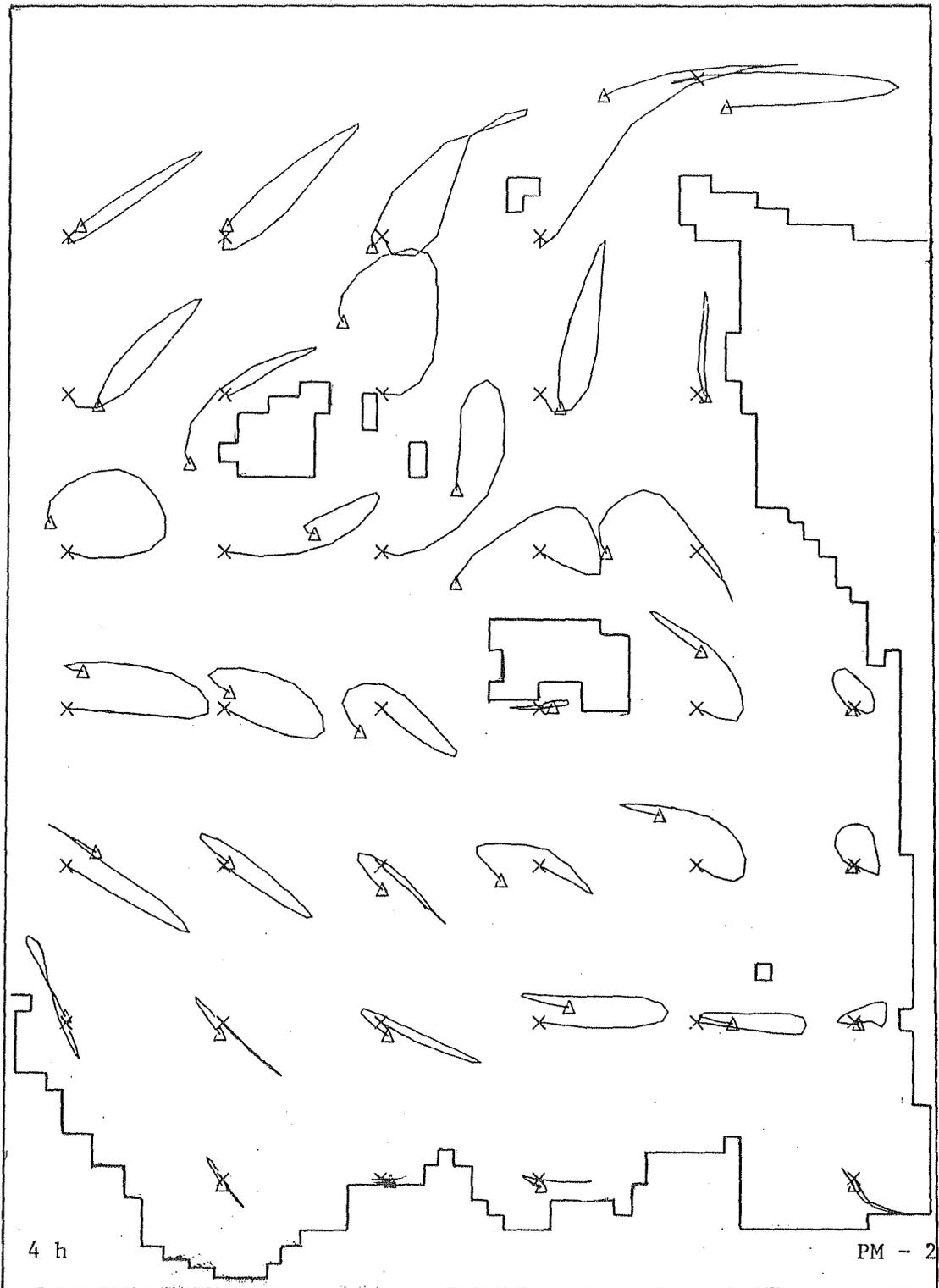
POUR UNE MAREE DE VIVE EAU MOYENNE

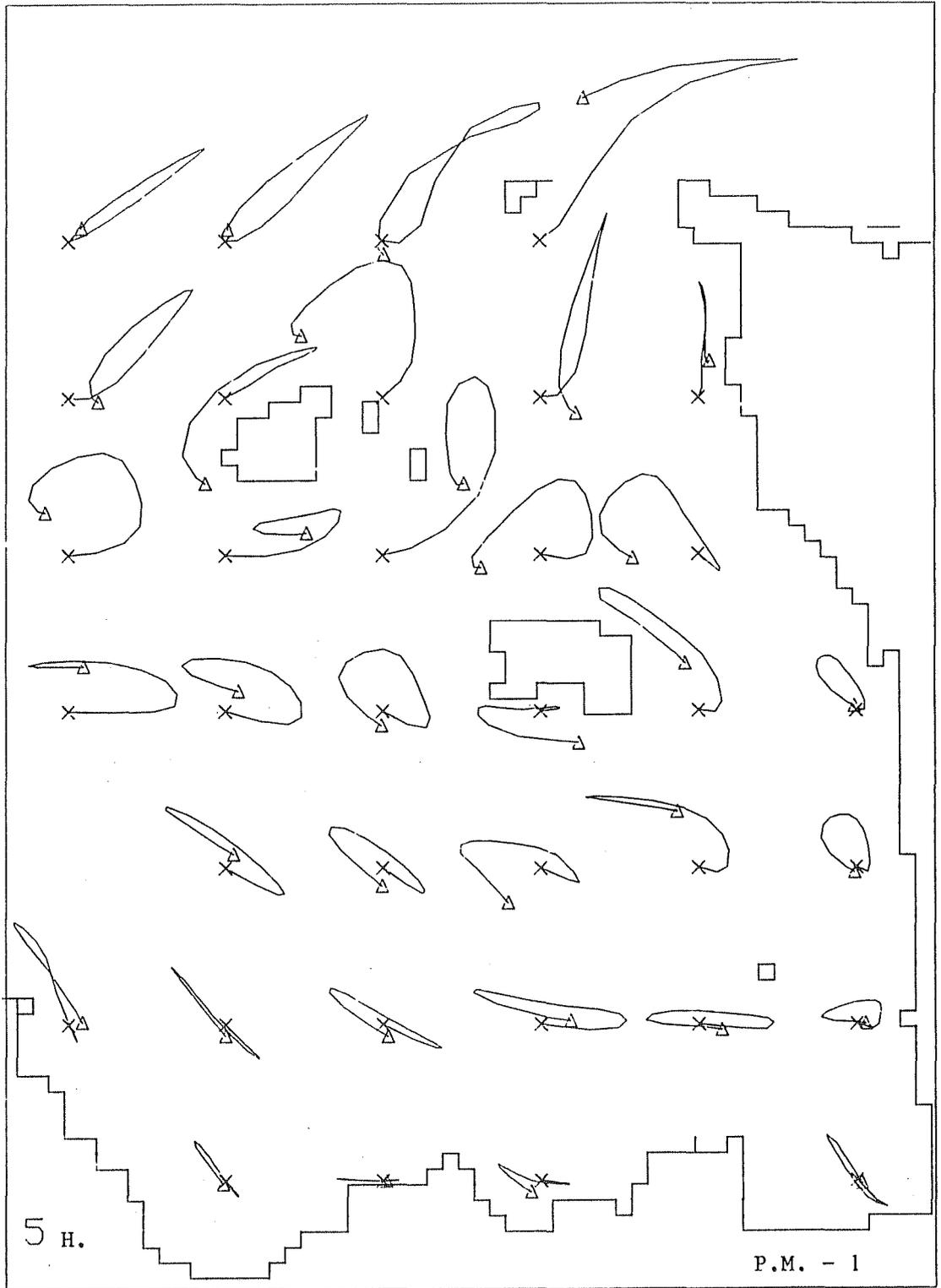
- x point de départ
- Δ point d'arrivée
- o les heures sont en T.U.
- o les heures de la marée sont données
par rapport à la pleine mer de St Malo



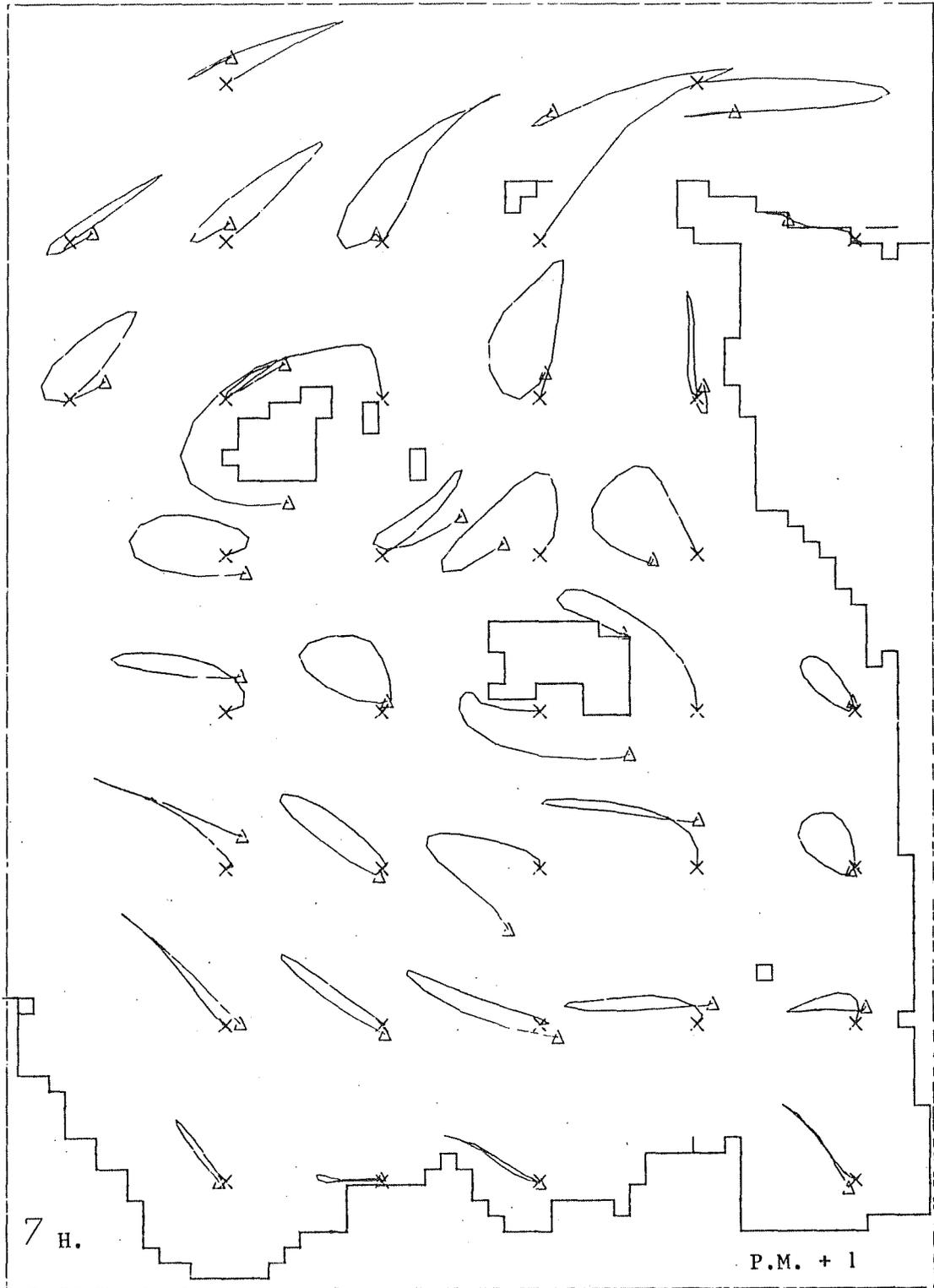


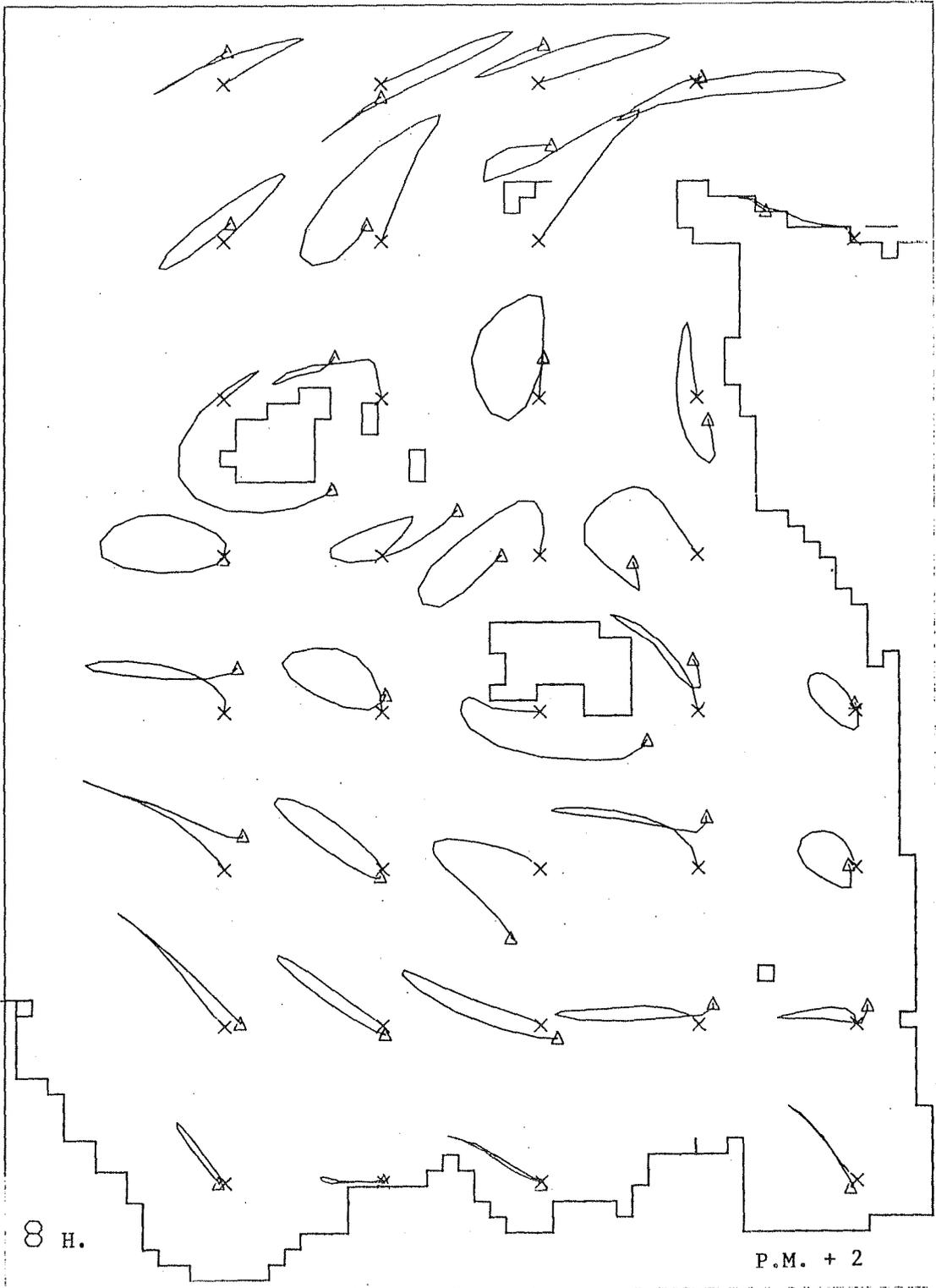


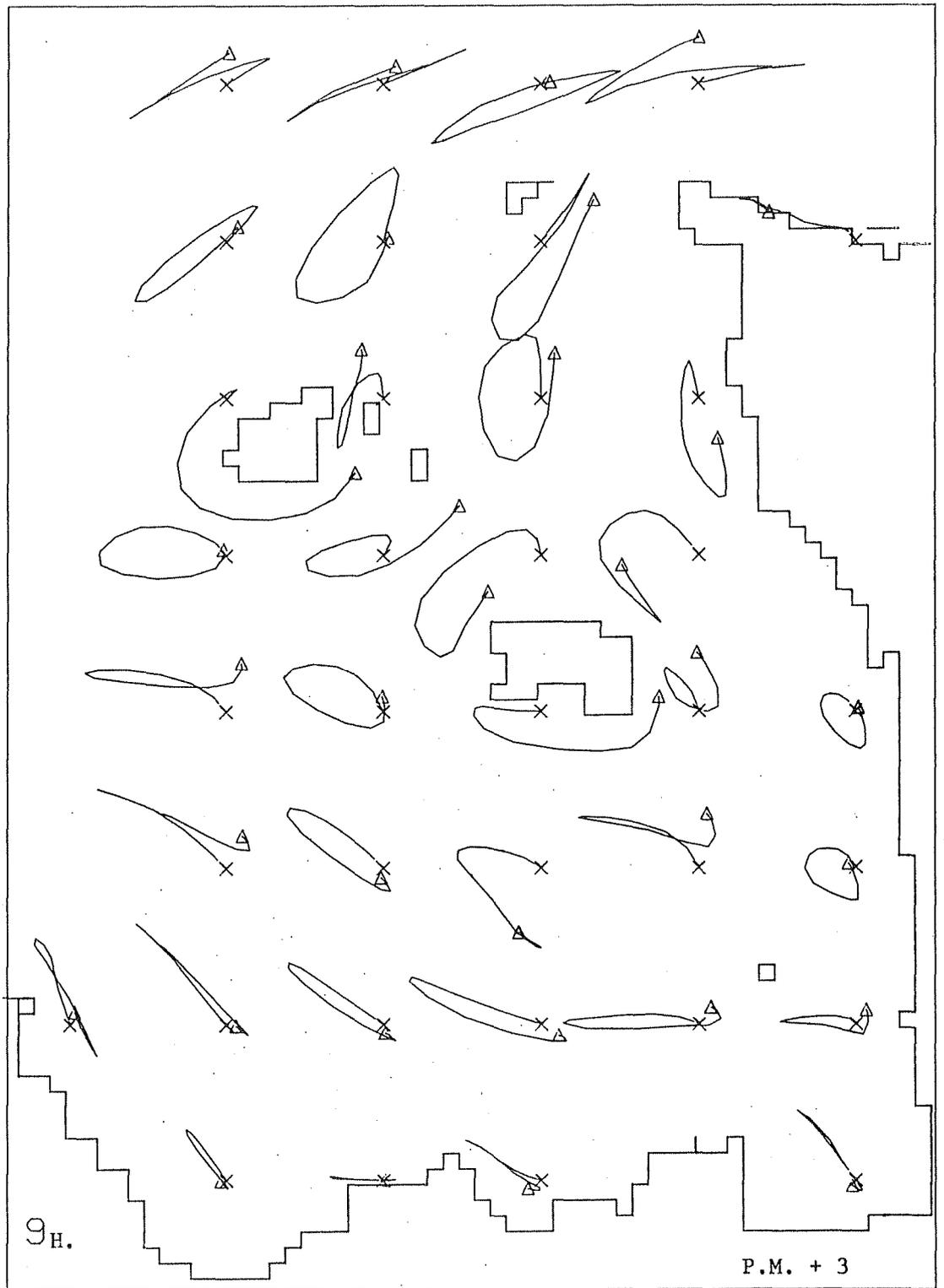






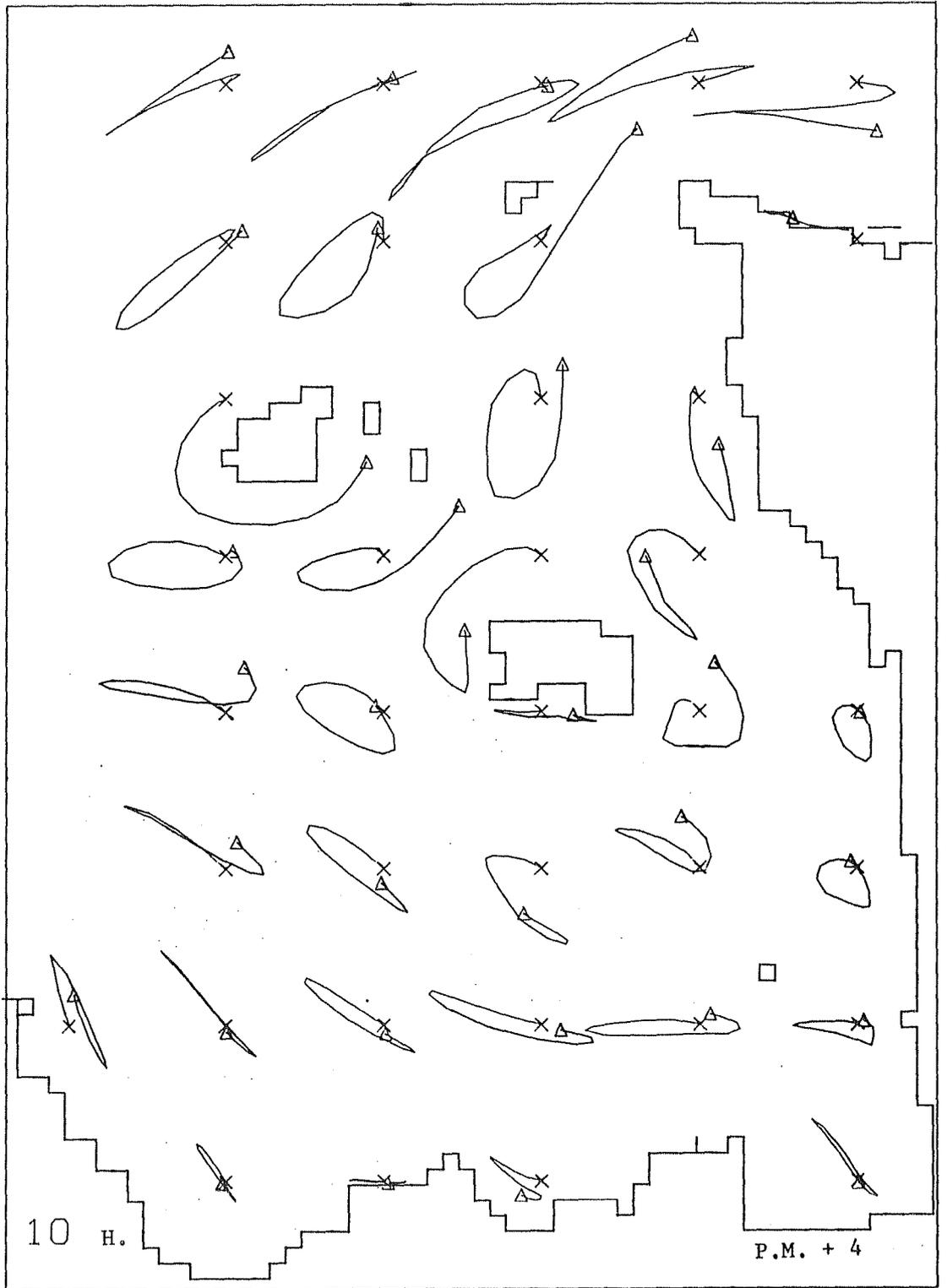


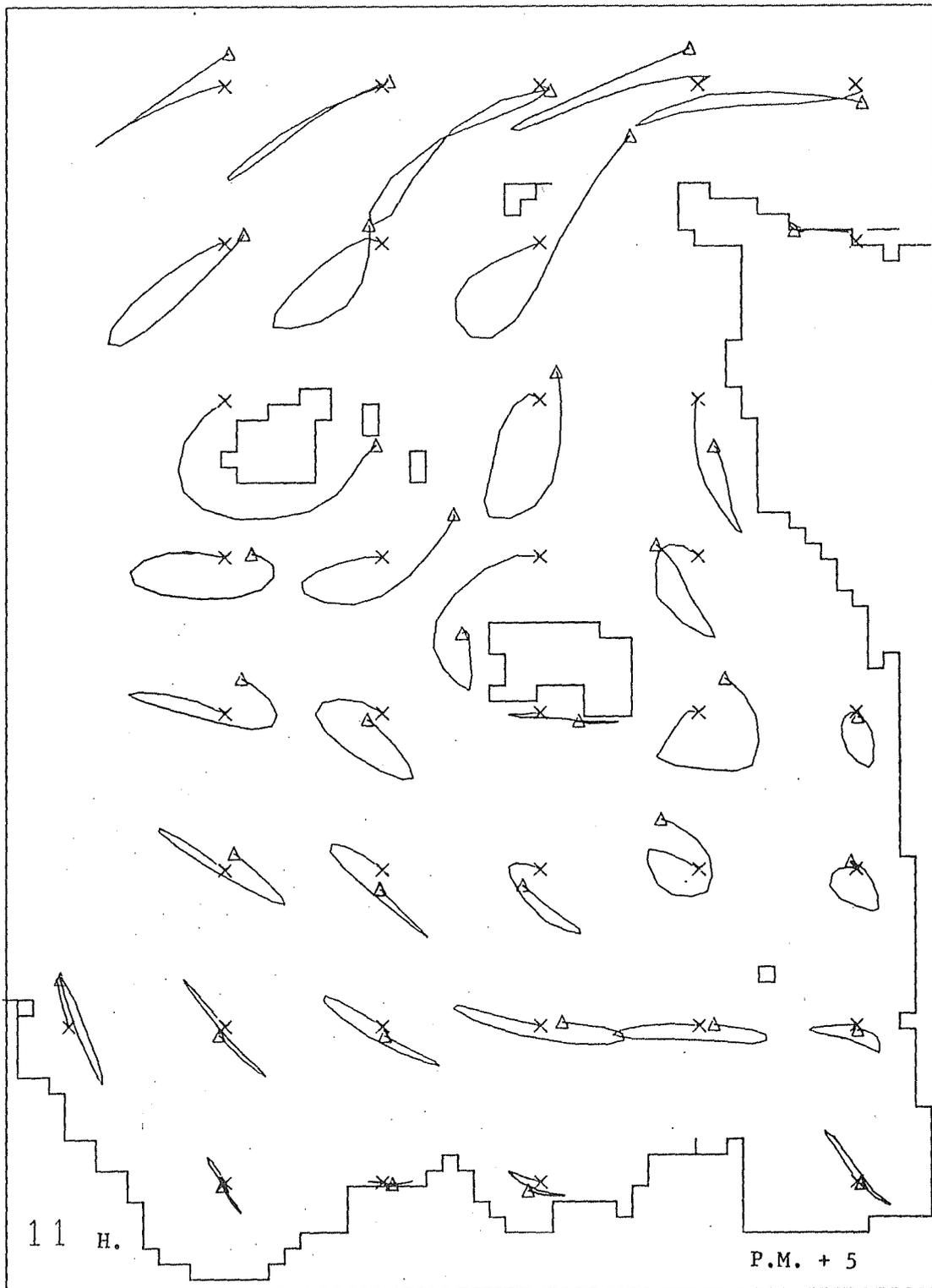


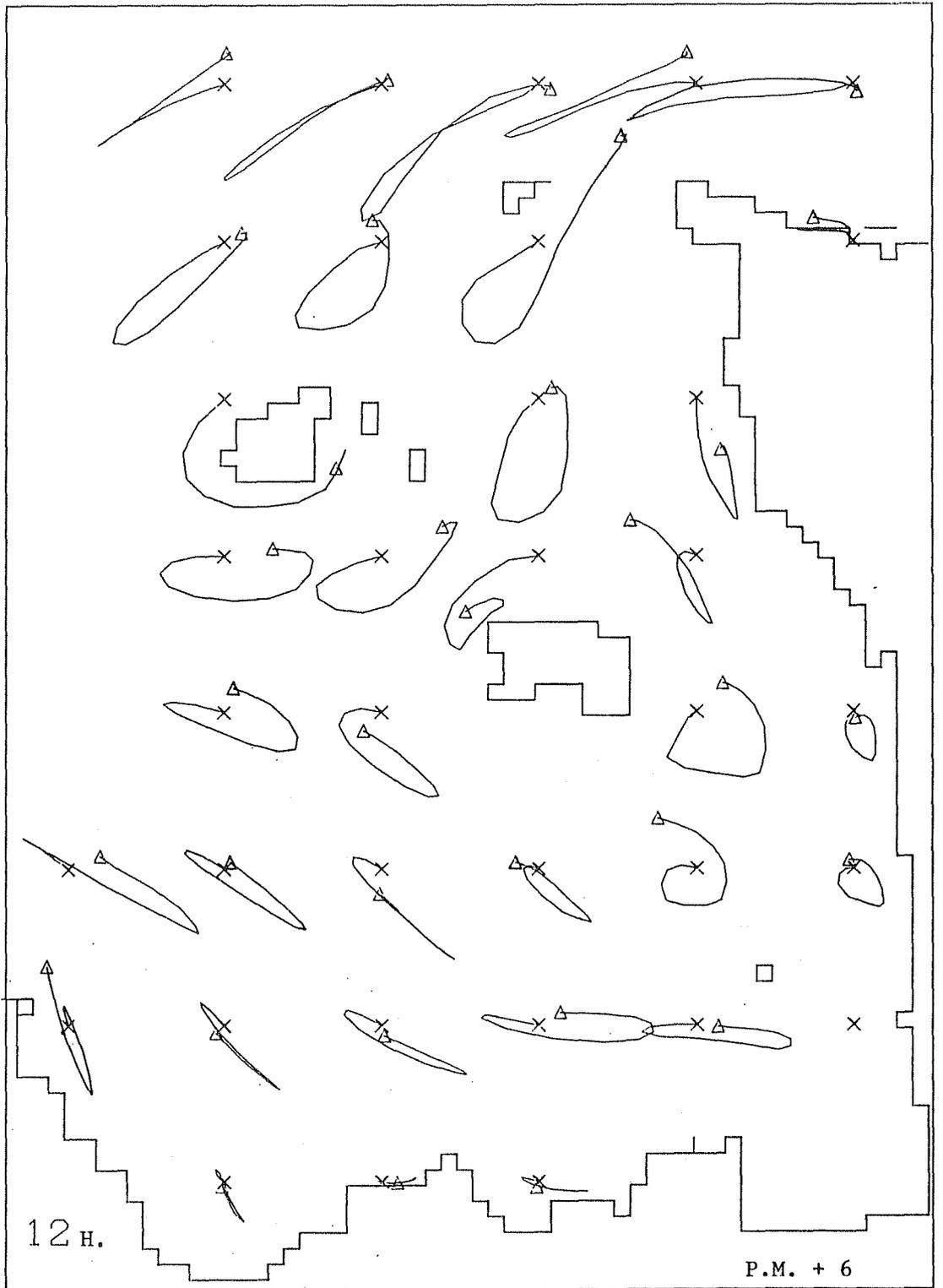


9H.

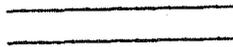
P.M. + 3







- A N N E X E V -

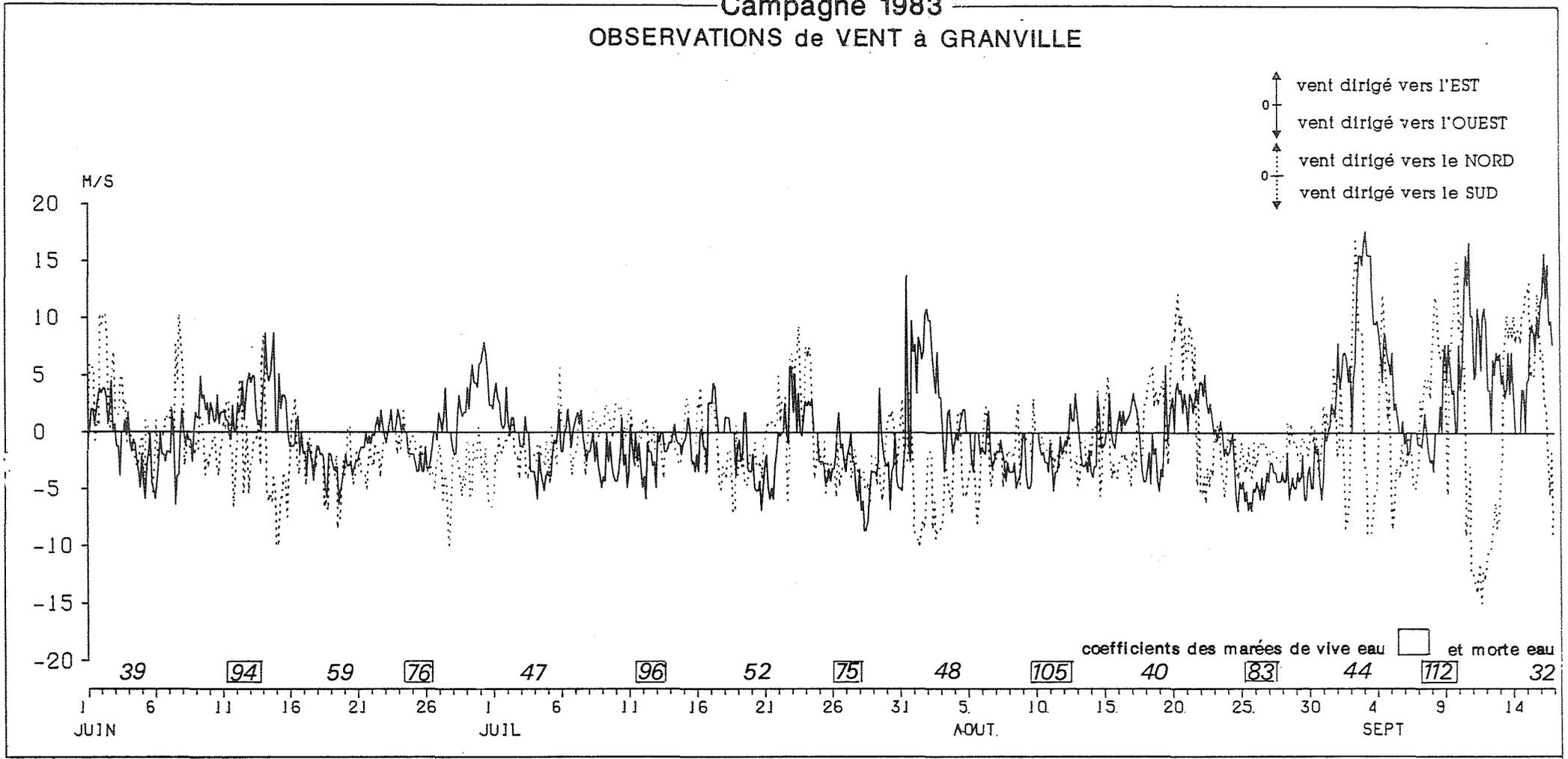


OBSERVATIONS DE VENT A GRANVILLE.

GOLFE NORMANO BRETON

Campagne 1983

OBSERVATIONS de VENT à GRANVILLE

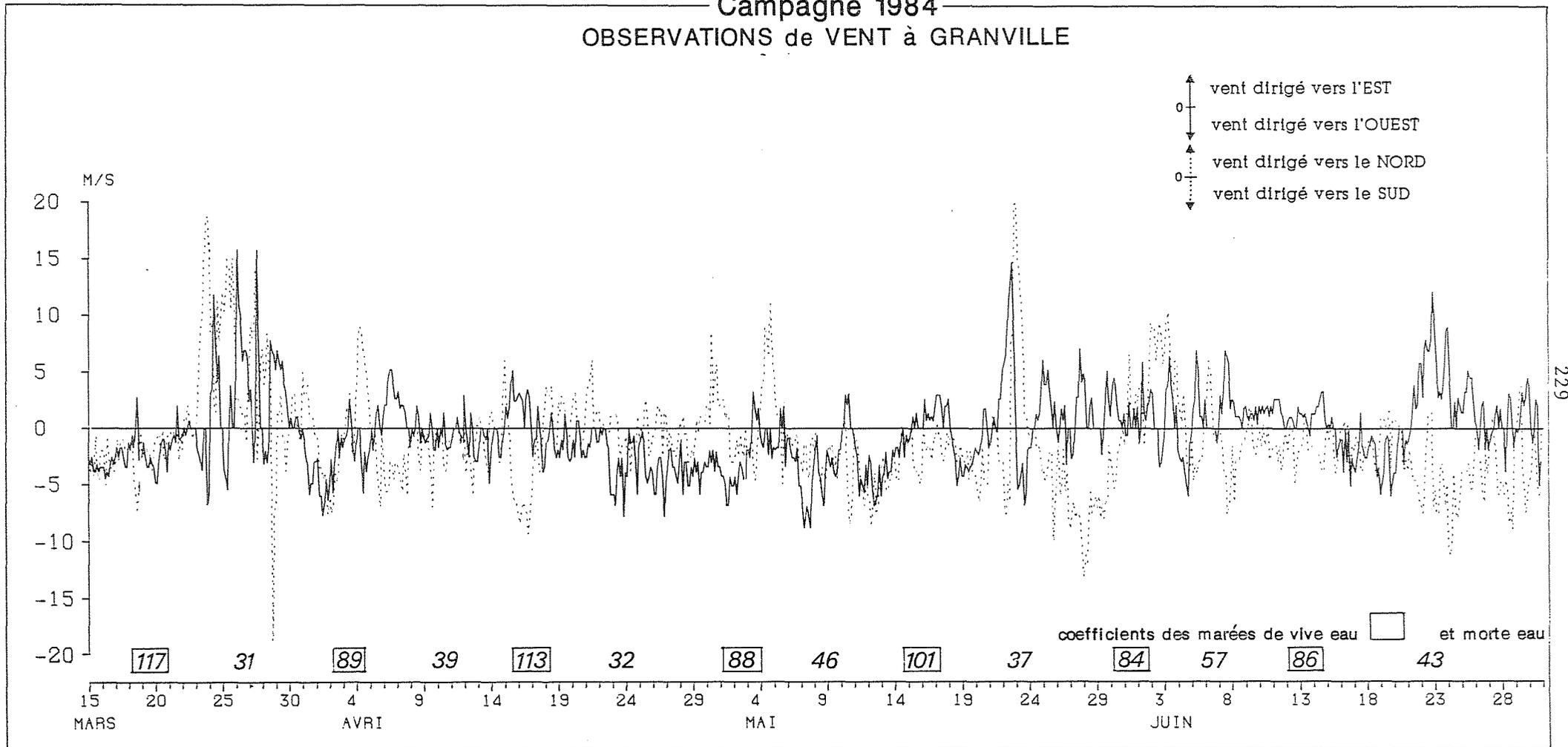


228

Données du Service de Climatologie Marine -MÉTÉOROLOGIE NATIONALE-

GOLFE NORMANO BRETON

Campagne 1984 OBSERVATIONS de VENT à GRANVILLE



229