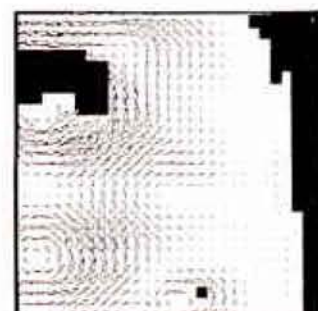
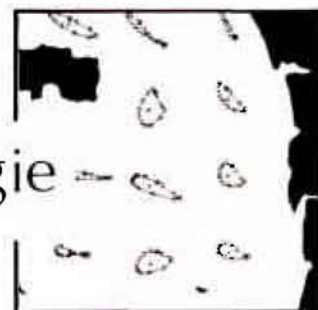
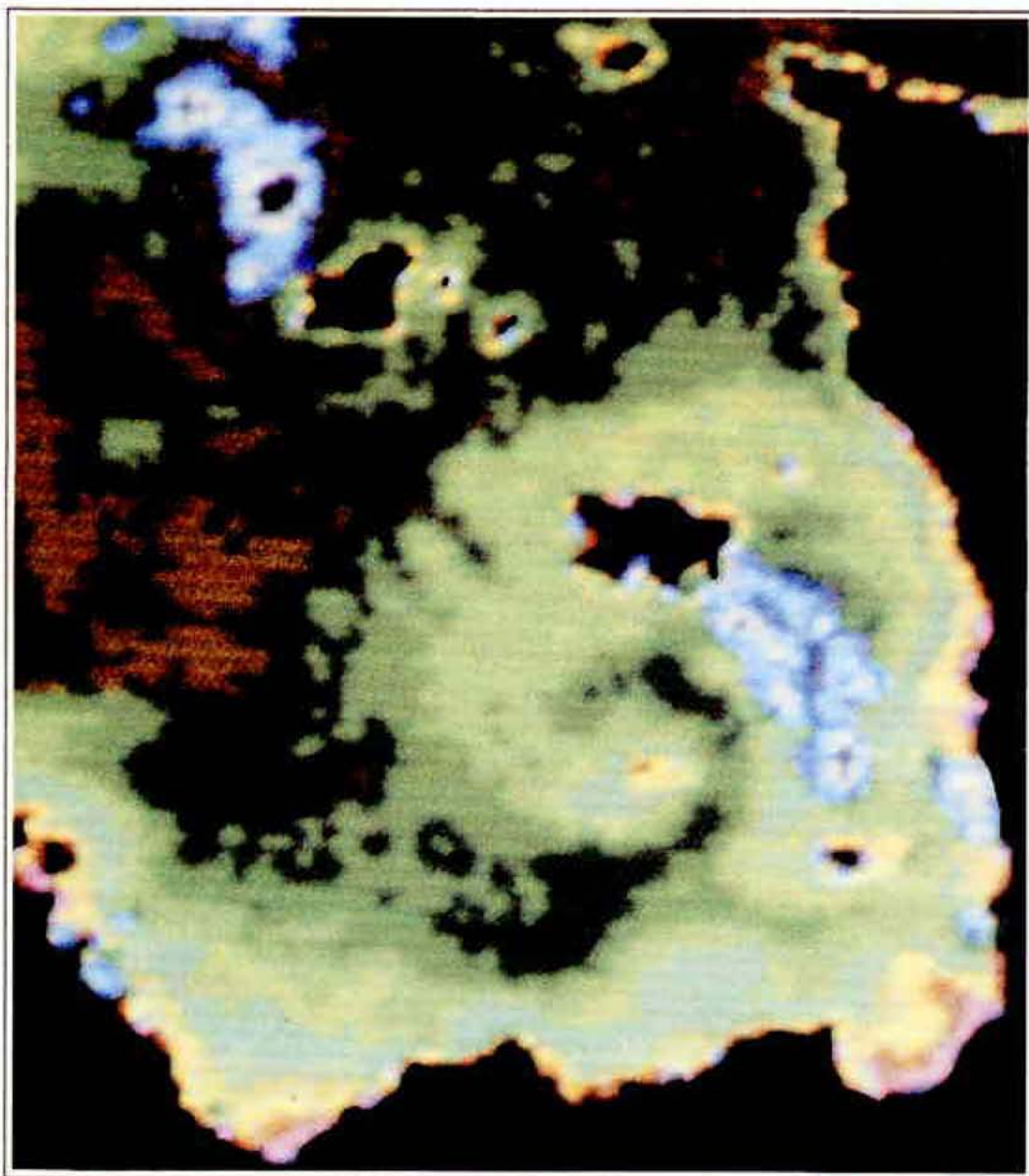


GOLFE NORMANO-BRETON

Etude Régionale Intégrée

1. Présentation de l'Etude, Hydrodynamique et Sédimentologie



En couverture:

Température superficielle du Golfe Normano-Breton,
le 16 avril 1984

NOTER :

- le gradient thermique existant entre les eaux en cours de réchauffement du fond du golfe (couleurs claires) et les eaux plus froides de la Manche (couleurs sombres), gradient particulièrement marqué entre Jersey et Guernesey (front) ;
- la pénétration des eaux de la Manche dans le Golfe par le S-O ;
- la circulation cyclonique, très apparente autour des Minquiers. (Observation : les taches bleutées correspondent à des nuages).

Image NOAA 7 du 16.04.1984 (15h06)

Traitement IFREMER DIIDLS - DEROIAT (C.VERCELLI)

**ETUDE REGIONALE INTEGREE
DU GOLFE NORMANO - BRETON**

THEME I

PRESENTATION DE L'ETUDE

CADRE PHYSIQUE :

HYDRODYNAMIQUE

ET SEDIMENTOLOGIE

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

DIRECTION ENVIRONNEMENT
 ET RECHERCHES OCEANIQUES

DEPARTEMENT ENVIRONNEMENT LITTORAL

AUTEUR(S) : LE HIR P., P. BASSOULLET, E. ERARD M. BLANCHARD, D. HAMON, A.M. JEGOU & IRIEC		CODE : N° <u>DERO-86-27-EL</u>
TITRE : ETUDE REGIONALE INTEGREE DU GOLFE NORMANO-BRETON, [Présentation de l'étude 6 VOLS : I - Cadre physique : Hydrodynamique et Sédimentologie II - Milieu pélagique III - Benthos subtidal IV - Estrans et zones humides V - Aspects socio-économiques et juridiques VI - Etude particulière : Baie du Mont St-Michel		Date : Juillet 1986 Tirage nb :
CONTRAT (intitulé) N° <u>CEE-ENV 842 F</u>	Nb pages (I) 4 + 265 ; (II) 8 + 143 ; (III) 10 + 180 ; (IV) 10 + 182 + 1 c. (V) 9 + 277 ; (VI) 5 + 303	DIFFUSION Libre <input type="checkbox"/> Restreinte <input type="checkbox"/> Confidentielle <input type="checkbox"/>

RESUME Ce rapport en 6 volumes est le résultat d'une étude pluridisciplinaire (6 thèmes correspondant aux volumes du rapport), réalisée sur un secteur géographique bien délimité, présentant des caractéristiques physiques et biologiques particulières (très fort marnage, grande hétérogénéité des fonds, forte production biologique à base de mollusques filtreurs ...), et siège d'activités humaines importantes et diversifiées (essentiellement basées sur l'exploitation des ressources du milieu). L'étude fait suite à un Livre Blanc établi en 1982, synthétise les données existantes, et les complète par des travaux originaux sur la connaissance des mécanismes naturels, en particulier de ceux qui ont une relation directe ou indirecte avec les activités humaines (processus dynamiques et sédimentologie, production biologique des divers compartiments de l'écosystème ...). Elle aborde également les aspects socio-économiques et juridiques particuliers à cette région.

Programme IFREMER avec la participation de nombreux collaborateurs extérieurs, dont l'IRIEC pour l'étude de la baie du Mont St Michel ; cofinancé par l'IFREMER et la CEE (Contrat ENV. 842 F pour les années 1984-85).

Mots-clés Manche Ouest, Iles Anglo-Normandes, Mont St Michel, zone côtière, Manche, Ille & Vilaine, Côtes du Nord, Hydrodynamisme, sédimentologie, Pelagos, Benthos, Estrans & Zones Humides, Modélisation, Economie, Droit, Pêche, Conchyliculture, Extraction Granulats, Tourisme, Trafic maritime, Usine marémotrice, Protection Environnement.

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



ETUDE REGIONALE INTEGREE DU GOLFE NORMANO-BRETON

- PRESENTATION DE L'ETUDE

CADRE PHYSIQUE : HYDRODYNAMIQUE

ET SEDIMENTOLOGIE

THEME I

- MILIEU PELAGIQUE

THEME II

- BENTHOS SUBTIDAL

THEME III

- ESTRANS ET ZONES HUMIDES

THEME IV

- ASPECTS SOCIO-ECONOMIQUES

ET JURIDIQUES

THEME V

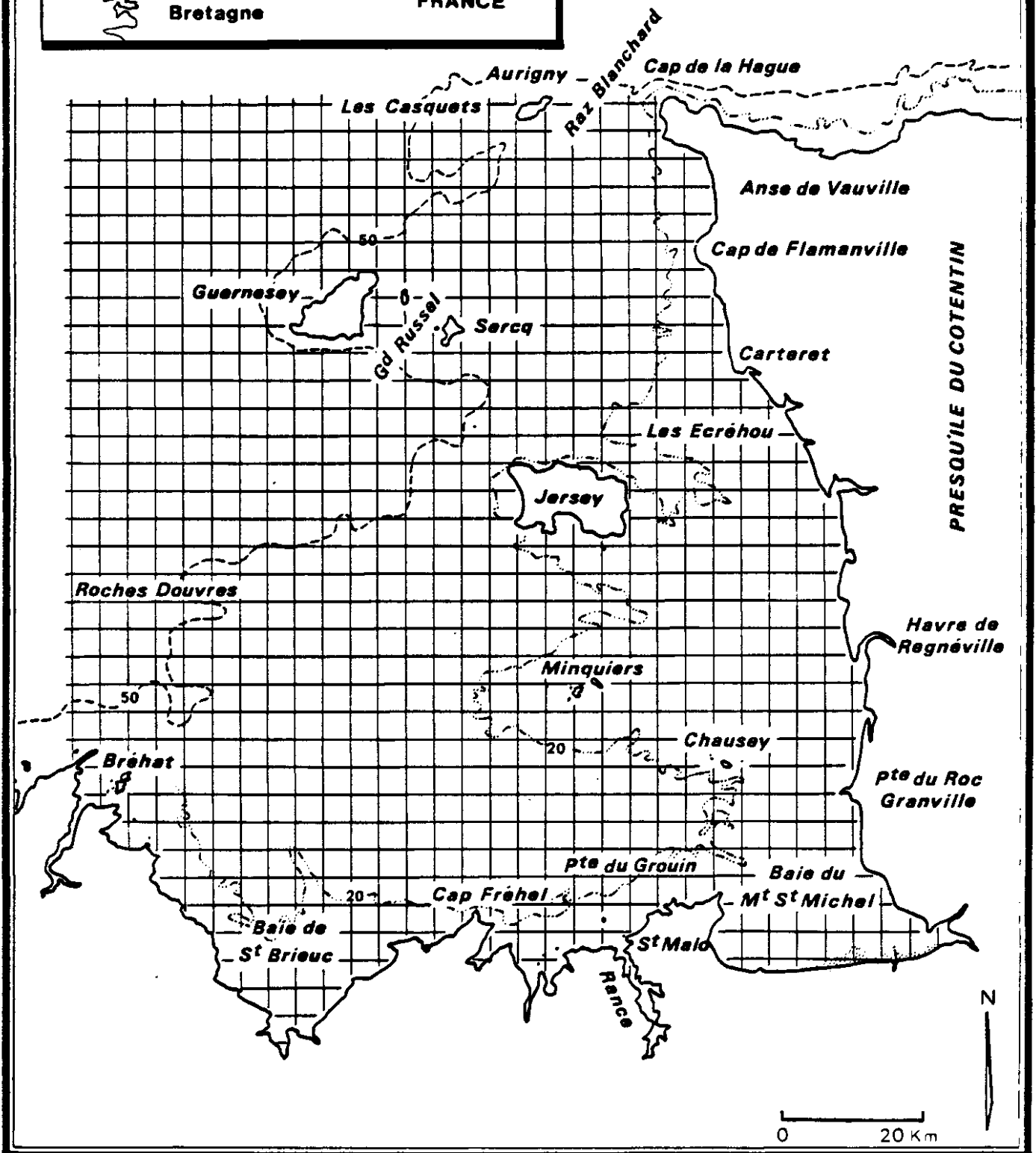
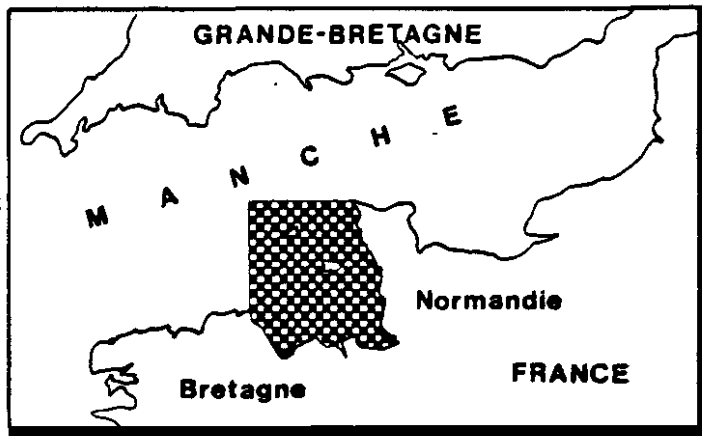
- ETUDE PARTICULIERE :

BAIE DU MONT SAINT-MICHEL

THEME VI

THEMES I A V : IFREMER ET COLLABORATEURS

THEME VI : IRIEC ET COLLABORATEURS



Golfe Normano-Breton
Plan de Situation , Bathymétrie et Toponymie

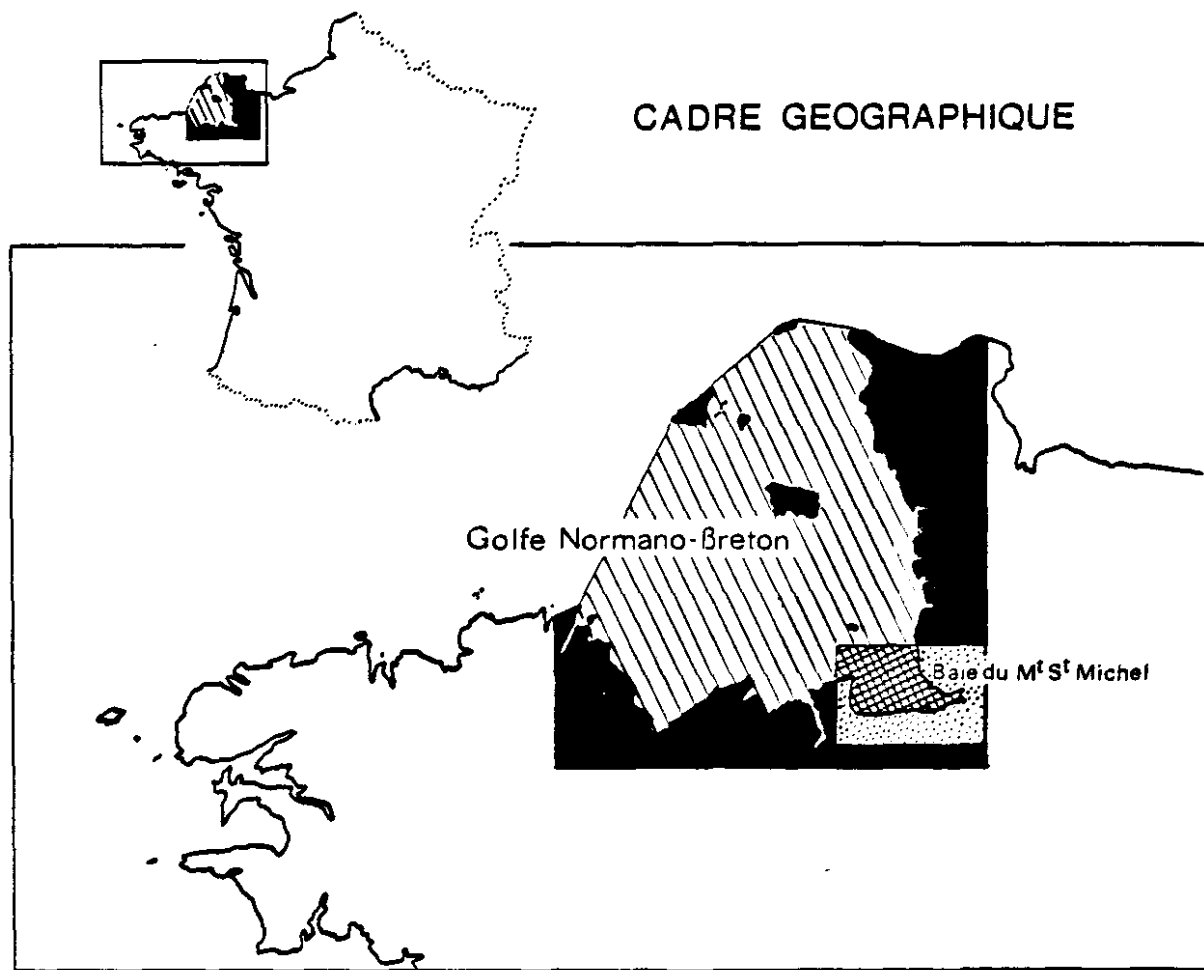
T H E M E I

	<u>PAGE</u>
- PRESENTATION DE L'ETUDE	1
M. KEMPF (IFREMER - CENTRE DE BREST / DEPARTEMENT DERO/EL)	
- CADRE PHYSIQUE	8
- HYDRODYNAMIQUE	
1ère partie - COORDINATION : P. LE HIR	
- SEDIMENTOLOGIE	101
2ème partie - COORDINATION : Ph. BASSOULLET	

PRESENTATION DE L'ETUDE

PRESENTATION

Le Golfe Normano-Breton, carrefour naturel entre la Manche orientale, la Manche occidentale et le continent, est une zone où les activités humaines sont importantes et diversifiées : pêche, conchyliculture, extraction d'agrégats marins, tourisme, activités portuaires et industrielles, centrales énergétiques. C'est également l'un des plus importants gisements d'énergie marémotrice du monde, dont l'exploitation à grande échelle est attentivement étudiée. La diversité des activités et des projets (schémas d'aménagement conchylicole et aquacole, gestion des stocks vivants, maintien de l'insularité du Mont St Michel, parc national des Chausey, projet marémoteur) concentrés sur cette zone



fait apparaître un certain nombre de conflits, actuels et potentiels. Cette situation implique un effort d'harmonisation entre le maintien des aptitudes naturelles du milieu et l'exploitation de ses ressources qui passe par un indispensable effort de connaissance de base concernant les caractéristiques de la zone, d'où la nécessité d'un programme régional s'appuyant sur un potentiel scientifique pluridisciplinaire et inter-laboratoires : la présente "Etude régionale intégrée du Golfe Normano-Breton".

Un examen des principaux travaux déjà existants sur le golfe, réalisé dans le cadre du "livre blanc", établi dès 1982*, a fait apparaître l'existence de deux types d'étude :

- (1) des études sectorielles larges à but fondamental, et
- (2) des études plus ponctuelles, à finalité appliquée, liées à des préoccupations d'aménagement ou de salubrité.

Bien que l'ensemble de ces travaux constitue une base de données très importante, il faut reconnaître que l'effort de recherche a été mené inégalement selon les disciplines, laissant des lacunes à combler, que les approches spécifiques des problèmes particuliers n'ont pu prendre en charge. Le programme de l'étude régionale intégrée du Golfe Normano-Breton a donc été établi dans le but de compléter la connaissance des processus naturels, et principalement de ceux ayant une action directe ou indirecte sur les activités humaines.

Ce programme est découpé en 6 thèmes :

Cadre physique : océanographie et sédimentologie (1)	Processus physiques
Milieu pélagique (1) Benthos subtidal (1) Estrans et zones humides (1) Etude particulière de la baie du Mont St Michel (2)	Processus et production biologiques
Aspects socio-économiques et juridiques (1)	

(1) IFREMER et collaborateurs

(2) IRIEC et collaborateurs

* BLANCHARD M. et al. - Golfe Normano-Breton : bilan des connaissances. Rapport CNEOX/COB/ELGMM, Brest Juin 1982 : 171 p.

Il est réalisé sous la responsabilité de l'IFREMER et fait intervenir, outre les équipes propres de l'organisme, de nombreux partenaires extérieurs (liste annexe); ainsi que l'IRIEC (Institut de Recherche en Informatique et en Economie) pour l'étude particulière de la Baie du Mont St Michel.

L'étude régionale intégrée du Golfe Normano-Breton a débuté en 1982 par l'élaboration d'un Livre Blanc sur le bilan des connaissances et la définition d'un programme de recherche. Les premiers travaux ont suivi en 1983. L'effort le plus important a été concentré sur les deux années 1984-1985, objet d'un contrat avec la Commission des Communautés Européennes. Il a conduit à une série de rapports thématiques correspondant au découpage du programme indiqué ci-dessus :

- THEME I : CADRE PHYSIQUE :
PROCESSUS HYDRODYNAMIQUES ET SEDIMENTOLOGIQUES
- THEME II : MILIEU PELAGIQUE
- THEME III : BENTHOS SUBTIDAL
- THEME IV : ESTRANS ET ZONES HUMIDES
- THEME V : ASPECTS SOCIO-ECONOMIQUES ET JURIDIQUES
- THEME IV : ETUDE PARTICULIERE :
BAIE DU MONT SAINT MICHEL

Enfin, une synthèse générale des travaux de l'IFREMER est prévue pour conclure l'ensemble de l'étude (tableau Chronologie des travaux).

GOLFE NORMANO-BRETON

CHRONOLOGIE DES TRAVAUX (IFREMER)

CADRE PHYSIQUE : OCEANOGRAPHIE

Circulation résiduelle

Circulation instantanée

Agitations surface

CADRE PHYSIQUE : SEDIMENTOLOGIE

Nature et répartition
des sédiments

Dynamique sédimentaire, dont
transits par traceurs radioac-
tifs.

MILIEU PELAGIQUE

Hydrologie
Phytoplancton, prod. primaire
Zooplancton, larves

1982

1983

CONTRAT CCE

1984

1985

1986/87

PREMIERES ETUDES

Campagnes de mesure :
(1) courantomètres et
marégraphes
(2) suivis de flotteurs

Exploitation modèle bidim.

Etude réfraction

Interprétation mesures
eulériennes et lagrangiennes

Simulation effets météorologiques

Mesures et interprétation
houle directionnelle.

Couverture sonar et photos
s/marines (zones particulières)

Interprétation nature séd. sur-
perficiels

Calcul tensions de frottement
Mouillage instruments
Campagnes terrain; marquage et suivi
Interprétation transits séd.

Campagnes de
Température surf. par télédét.
mesures et prélèvement
Dépouillement

THEMATIQUES

GENERALE

<p><u>BENTHOS SUBTIDAL</u></p> <p>Phytobenthos Zoobenthos écologie et prod. bent. crépidules flux énergétiques</p>	<p>LIVRE BLANC</p>	<p>Campagnes de</p>	<p>Synthèse phytobenthos prélèvement Dépouillement Campagnes et dépouillement Synthèse</p>	<p>RAPPORTS</p>	<p>SYNTHESE</p>
<p><u>ESTRANS, ZONES HUMIDES</u></p> <p>Géomorphologie, Sédimentologie Végétation marais Phytobenthos Zoobenthos</p>		<p>Campagnes terrain de mesures et prélèvements Photos aériennes (1/8 000) - Cartes morphosédimentaires - (1/25 000)</p>			
<p><u>SOCIO-ECONOMIE, DROIT</u></p> <p>Ressources halieutiques Sables et graviers Bassins versants Tourisme, trafic maritime Protection nature Facteurs juridiques</p>		<p>Collecte de données</p> <p>Collecte données et dépouillement</p> <p>Droit lié aux ressources exploitées</p>	<p>Dépouillement Enquêtes et dépouillement</p> <p>Droit lié à l'environnement Régime juridique du Golfe,</p>		

GOLFE NORMAND-BRETON : COLLABORATEURS DE L'IFREMER

Cadre physique : océanographie et sédimentologie :

- Université de Bretagne Occidentale (UBO), Laboratoire d'Océanographie physique, Brest.
- Laboratoire Central d'Hydraulique de France (LCHF), Maison Alfort.
- Laboratoire National d'Hydraulique (LNH) EDF, Chatou.
- Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydraulique (SOGREAH), Grenoble.
- Université de Nantes, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique (ENSM).
- Université de Caen, Laboratoire de Géologie Marine.
- Commissariat à l'Energie Atomique, Office des Rayonnements ionisants (CEA-ORIS).

Benthos subtidal :

- Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN), Laboratoire Maritime de Dinard.
 - Université de Bretagne Occidentale (UBO), Laboratoire de Biologie Animale, Brest.
 - Mr Daniel COIC, Lesneven.

Estrans et zones humides :

- Ecole Pratique des Hautes Etudes (EPHE), Laboratoire de Géomorphologie, Laboratoire Maritime de Dinard.
- Université de Rennes, Laboratoire de Botanique.

Aspects socio-économiques et juridiques :

- Société Géolitt Brest.
- Université de Rennes, Laboratoire d'Aménagement et de Mise en valeur des régions.
- Université de Bretagne Occidentale (UBO), Centre d'Etudes de Droit et d'Economie de la Mer (CEDEM), Brest.

Réalisation technique du rapport concernant l'ETUDE REGIONALE INTEGREE
DU GOLFE NORMAND BRETON :

Secrétariat : Y. CASSOU, D. GUILLERM, J. HUGUEN

Dessin : J.P. ANNEZO, P. BODENES

Edition : M. PLASSARD

Département

ENVIRONNEMENT

LITTORAL

CADRE PHYSIQUE

Première Partie

HYDRODYNAMIQUE

T H E M E I

- CADRE PHYSIQUE :

1ère partie : HYDRODYNAMIQUE

- CHAP. I : INTRODUCTION
P. LE HIR
- CHAP. II : MOYENS D'ETUDE DE LA CIRCULATION
P. LE HIR - A. ORBI
- CHAP. III : CIRCULATION DE MAREE
A. ORBI - P. LE HIR
- CHAP. IV : CIRCULATION INDUITE PAR LES EFFETS METEOROLOGIQUES
P. LE HIR
- CHAP. V : REGIME DES AGITATIONS
J.M. CAILLAT - P. LE HIR
- CHAP. VI : CONCLUSION - CONSEQUENCES SUR L'ENVIRONNEMENT
P. LE HIR

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

INTERVENANTS - lère partie : PROCESSUS HYDRODYNAMIQUES

Coordination : P. LE HIR - IFREMER - Centre de BREST

	INTERVENANTS IFREMER/Centre de Brest Département DERO/EL	INTERVENANTS EXTERIEURS
Mesures de terrain	M. KERDREUX, J. L'YAVANC, P. LE HIR P. BRANELLEC,* M. BRETON	UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE (Laboratoire d'Océanographie Physique) A. ORBI**, P. MORIZUR, J.P. GIRARDOT
Circulation de marée	P. LE HIR	UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE (Laboratoire d'Océanographie Physique) A. ORBI ** LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE P. PECHON
Immersion des estrans	P. GARREAU	
Circulation induite par le vent et interaction avec la marée	P. LE HIR	LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE P. PECHON
Statistiques d'agitation		LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE J.M. CAILLAT

* Département SDIT/DI

** La contribution d'Abdellatif ORBI, étudiant - chercheur en 3ème cycle à l'U.B.O., a été particulièrement importante, spécialement pour la circulation résiduelle de marée.

THEME I : 1ère PARTIE

SOMMAIRE

	<u>Page</u>
CHAP. I - <u>INTRODUCTION</u>	13
I.1. LES PHENOMENES PHYSIQUES EN JEU	14
I.2. RAPPEL DES ACQUIS ANTERIEURS SUR LA DYNAMIQUE DU GOLFE NORMANO-BRETON	15
I.3. OBJECTIFS	17
CHAP. II - MOYENS D'ETUDE DE LA CIRCULATION	19
II.1. Mesures de courant et de marée	21
II.1.1. Mesures au point fixe	21
II.1.2. Mesures lagrangiennes	23
II.2. MODELISATION NUMERIQUE	25
II.2.1. Le modèle 2D de l'UBO	26
II.2.2. Le modèle 2D du LNH	28
II.2.3. Le modèle 2D "détaillé" du LNH	28
CHAP. III - CIRCULATION DE MAREE	30
III-1. CIRCULATION DE MAREE "INSTANTANEE"	31
III.1.1. Variations de la surface libre : conséquence sur l'exondation des estrans	31
III.1.2. Courants de marée	31
III.2. CIRCULATION DE MAREE "RESIDUELLE"	39
III.2.1. Courants résiduels eulériens	39
III.2.2. Déplacements des masses d'eau	49
III.2.3. Circulation lagrangienne	49
III.3. CIRCULATION LIEE AU "FRONT THERMIQUE" ENTRE JERSEY et GUERNESEY	56
III.3.1. - Interprétation des mesures	58
III.3.2. - Quelques calculs analytiques	59
III.3.3. - Stabilité du front et conséquences sur la circulation résiduelle	61

CHAP. IV - <u>CIRCULATION INDUITE PAR LES EFFETS METEOROLOGIQUES</u> ...	63
IV.1. SIMULATION D'UN VENT TYPE	63
IV.1.1. Les problèmes posés et les hypothèses de calcul	63
IV.1.2. Présentation et discussion des schémas de circulation	69
IV.1.3. Comparaison avec les mesures	75
IV.2. ESSAI DE SIMULATION D'UNE TEMPETE	78
IV.2.1. Présentation de la simulation	78
IV.2.2. Discussion des résultats	79
CHAP. V - <u>REGIME DES AGITATIONS</u>	85
V.1. METHODOLOGIE	86
V.1.1. Rappel des processus physiques et hypothèses de calcul	86
V.1.2. Méthode de calcul	87
V.2. STATISTIQUES DES AGITATIONS	88
CHAP. VI - <u>CONCLUSION - CONSEQUENCES SUR L'ENVIRONNEMENT</u>	92
VI.1. Le point de vue du dynamiqueien	93
VI.2. Rappel du schéma de circulation - conséquences sur l'environnement	95
 BIBLIOGRAPHIE	 97
ANNEXE 1 - Mesures de trajectoires par suivi "Argos"	197
ANNEXE 2 - Temps d'exondation de l'estran en divers points du golfe	205
ANNEXE 3 - Champs horaires de courants de marée simulés	211
ANNEXE 4 - Mesures de courant filtrées	225
ANNEXE 5 - Roses d'agitation en 15 sites du golfe	249

CHAPITRE I

INTRODUCTION

CHAPITRE I - INTRODUCTION

Les processus hydrodynamiques que nous allons considérer sont les mouvements des masses d'eau, qu'ils se manifestent par des courants, des agitations (vagues) ou un déplacement de la surface libre. L'objet de cette étude est de décrire et d'expliquer les mouvements qui concernent l'ensemble du Golfe Normano-Breton, avec le souci d'en analyser les conséquences pour l'environnement, de telle sorte que les résultats puissent être facilement "intégrés" par les autres disciplines faisant l'objet de l'Etude Régionale du golfe.

I.1. - LES PHENOMENES PHYSIQUES EN JEU

On peut distinguer quatre principaux moteurs physiques intervenant dans la distribution des masses d'eau : la marée, les phénomènes météorologiques (circulation induite par le vent et agitations de surface) et les variations de température elles-mêmes liées à des échauffements diurnes ou saisonniers. A noter que dans le Golfe Normano-Breton les apports d'eau douce sont très faibles et localisés près de la côte bretonne : partout ailleurs, les gradients de densité par variation de salinité sont négligeables.

I.1.1. La marée

Le jeu des forces astrales induit un mouvement des plans d'eau à l'échelle océanique qui se propage en s'amplifiant dans les zones côtières et tout particulièrement en Manche. Devant un tel phénomène, l'effet des forces astrales "locales", qui s'exercent directement sur les masses d'eau du golfe, est négligeable.

I.1.2. Les variations météorologiques, facteurs de circulation

Les gradients de pression atmosphérique entraînent des variations de pression dans la masse d'eau qui s'équilibrent par des courants et une pente de la surface libre. Surtout ces gradients de pression atmosphérique génèrent un vent qui entraîne les masses d'eau superficielles : là encore un équilibre doit s'établir, avec pente de la surface et mouvement sur toute la colonne d'eau. Ces mécanismes fonctionnent à grande échelle (Manche) comme à petite échelle (littoral du golfe).

I.1.3. Le vent, facteur d'agitation

Tout comme au large le vent génère une houle, localement il provoque une agitation de surface ("mer de vent") de courte période : ces mouvements superficiels s'accompagnent d'une légère dérive (dérive de Stokes) mais surtout accroissent le mélange des masses d'eau, augmentent les tensions exercées sur le fond et donc favorisent les transports solides, et enfin génèrent un courant littoral près de la zone de déferlement. Pour toutes ces raisons, et compte tenu de l'ouverture du Golfe Normano-Breton vers le large, les phénomènes de houle et de mer du vent doivent être pris en compte.

I.1.4. Variations thermiques

En l'absence de thermocline, le réchauffement ou le refroidissement des masses d'eau superficielles par l'atmosphère sont d'autant plus sensibles que les profondeurs sont faibles : par conséquent la bathymétrie complexe du Golfe Normano-Breton entraîne des gradients thermiques non négligeables qui peuvent dans certains cas induire des circulations de densité.

I.2. - RAPPEL DES ACQUIS ANTERIEURS SUR LA DYNAMIQUE DU GOLFE NORMANO-BRETON

Le chapitre 2 du "bilan des connaissances" [CNEOX, 1982] résume les connaissances acquises sur l'hydrodynamique dans le Golfe Normano-Breton avant la mise en route d'un programme spécifique à la présente étude. Nous en rappelons les éléments principaux :

I.2.1. La marée

Il s'agit du phénomène physique le plus spectaculaire dans le Golfe Normano-Breton. Il a fait l'objet de nombreuses mesures et études par modèles motivées par divers projets de centrale marémotrice dont celle de la Rance qui fut une première mondiale.

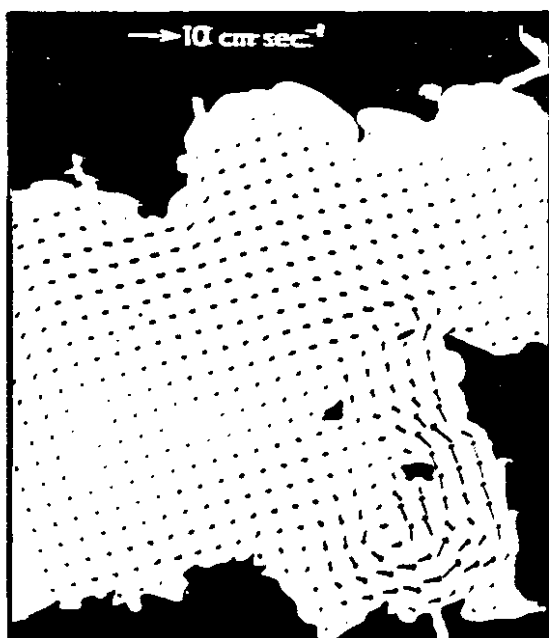
La marée en Manche est à dominante semi-diurne et résulte de la propagation d'une onde incidente à l'ouest de la Manche qui se réfléchit successivement sur le Cotentin et sur le littoral Nord de la France en constituant une amphidromie. Sous l'effet de la force de Coriolis, les amplitudes de marée sont plus élevées sur les côtes françaises, mais le phénomène est largement accentué dans le Golfe Normano-Breton qui joue un rôle d'entonnoir : ainsi le marnage croît régulièrement du large (6 m en vive eau moyenne) vers la baie du Mont St Michel (12 m en VE moyenne) où il peut atteindre 16 m (4e site dans le monde).

Les courants liés à ces variations de niveau sont eux aussi très importants et renforcés par la présence des îles et haut fonds qui concentrent les flux en certains passages. On peut schématiquement distinguer deux secteurs dans le Golfe Normano-Breton : au Sud-Est de Jersey, l'onde de marée est quasi stationnaire (du fait de la réflexion sur le littoral du Cotentin) les courants sont alors en quadrature de phase avec les niveaux et correspondent au remplissage ou à la vidange de la baie du Mont St Michel (au "sens large"). Entre Brehat et le Cap de la Hague, l'onde de marée présente un caractère progressif d'Ouest en Est et le déphasage entre courants et niveaux diminue. Dans certains passages tels que le Grand Russel entre Sercq et Guernesey ou le Raz Blanchard entre Aurigny et la Hague, ces courants sont extrêmement violents (8 nœuds en vive eau moyenne dans le Raz Blanchard).

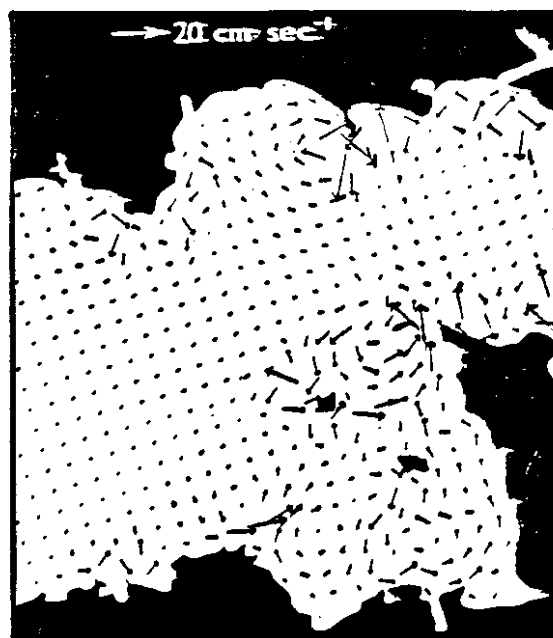
En ce qui concerne les dissymétries flot/jusant, il faut noter qu'en tout point du Golfe Normano-Breton, le montant est plus court que le perdant, particulièrement en vive eau.

I.2.2. La courantologie résiduelle

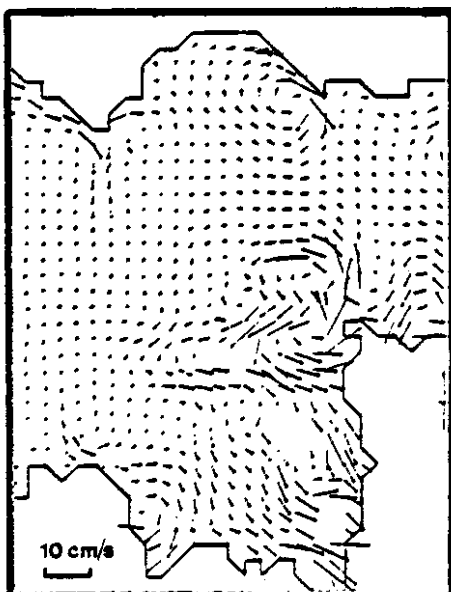
Jusqu'en 1982, seule la circulation résiduelle induite par la marée avait été examinée (PINGREE et MADDOCK, 1977 ; LOMER, 1978 ; FORNERINO, 1982). Il s'agissait d'études par simulations numériques à l'échelle de la Manche ; leur discrétisation spatiale dans le secteur du Golfe Normano-Breton n'était pas suffisante pour décrire les courants résiduels générés par les accidents bathymétriques locaux. Cependant quelques structures communes (cf. Fig. I.1.) ont pu être



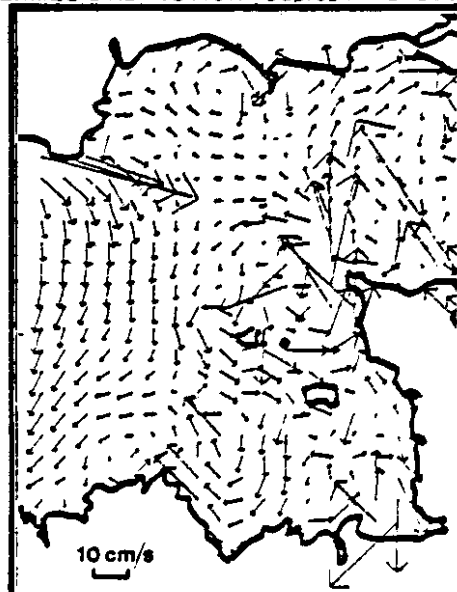
A) COURANTS RESIDUELS d'après PINGREE et MADDOCK 1977



B) COURANTS RESIDUELS POUR UN CALCUL SANS TERMES D'ADVECTION d'après PINGREE et MADDOCK 1977



C) COURANTS RESIDUELS d'après LOMER 1978



D) COURANTS RESIDUELS d'après FORNERINO 1982

Figure I.1 : Courants résiduels dans le Golfe Normano-Breton, obtenus avec des modèles numériques de la Manche.

dégagées : courants résiduels de l'ordre de 10 cm/s (parmi les plus importants en Manche), existence de tourbillons résiduels tels que celui de la baie de St Brieuc (anticyclonique), celui du nord du Golfe Normano-Breton (entre Jersey, Guernesey et Aurigny - cyclonique) et le tourbillon cyclonique autour de Guernesey. Le rôle prépondérant des termes d'advection induits par les îles et les caps a été montré par PINGREE et MADDOCK (1977) (fig. I.1.).

I.2.3. La houle

Les connaissances acquises sur la houle dans le Golfe Normano-Breton comportaient essentiellement des estimations en hauteur/période établies aux sémaphores de Bréhat, la Hague, Granville et du Cap Fréhel ainsi que des mesures de hauteur de houle enregistrées localement pour des études ponctuelles d'aménagement côtier. En outre, des épures de réfraction pour quelques houles avaient été dessinées en vue d'étudier le transport littoral sur la côte Ouest du Cotentin.

I.3. - OBJECTIFS

Compte tenu de l'acquis considérable existant sur la propagation et la circulation instantanée de marée, nous nous sommes fixé des objectifs adaptés à la problématique de l'étude régionale intégrée du Golfe Normano-Breton, à savoir : d'abord le devenir des masses d'eau, mais aussi l'approche des principaux mécanismes susceptibles d'interagir avec les processus sédimentologiques ou biologiques. En outre, nous avons délibérément porté notre intérêt aux phénomènes d'échelle régionale, considérant que les processus très littoraux, quoique de grande importance, relevaient d'études spécifiques. Ainsi 3 objectifs principaux ont été fixés :

I.3.1. Déterminer un schéma de circulation

Il s'agit d'identifier les grands traits de la circulation résiduelle dans le Golfe. La notion de résiduelle s'applique aux courants moyens sur des périodes moyennes, principalement les périodes diurnes ou inférieures de la marée. Cependant un courant induit par le vent même de courte durée doit être considéré dans la mesure où sa valeur moyenne sur une période de 24 heures n'est pas négligeable. Plusieurs schémas de circulation doivent être dégagés, correspondant aux diverses sources de résiduelle : ainsi on cherche à distinguer la résiduelle de marée, les schémas de circulation induits par des vents-type, et l'effet des gradients de densité.

I.3.2. Assurer la communicabilité des résultats

Il n'est pas rare de constater que des résultats concernant les processus physiques restent inexploités par les spécialistes d'autres disciplines, parce qu'ils ne répondent pas directement aux questions que ceux-ci se posent. Dans la présente étude un effort est réalisé pour exprimer les résultats sous forme directement assimilable et donc "intégrable" dans l'étude régionale.

I.3.3. Etablir des statistiques d'agitation pour l'ensemble du golfe

Le Golfe Normano-Breton est remarquable par la complexité de sa bathymétrie. En conséquence les houles et "mers de vent" sont largement déformées même à des distances relativement grandes de la côte. Toute étude littorale sur la propagation des houles doit donc s'appuyer sur une connaissance des houles incidentes spécifique à la zone concernée.

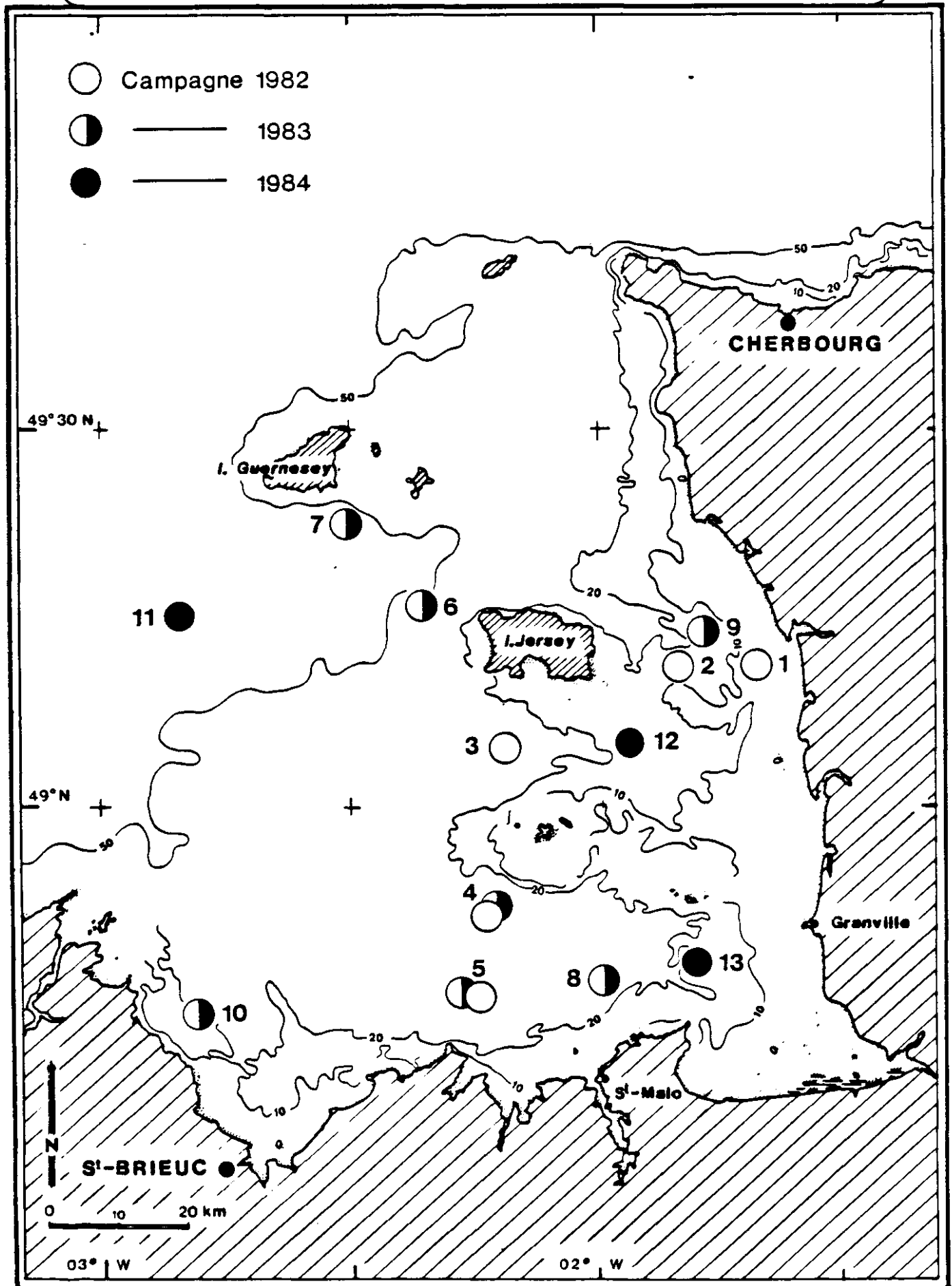
La détermination des conditions limites de tout secteur local étant un élément important dans l'esprit d'une étude régionale, il est apparu nécessaire d'établir des statistiques d'agitation à l'échelle du Golfe.

CHAPITRE II

MOYENS D'ETUDE DE LA CIRCULATION

Fig. II.1 — GOLFE NORMANO-BRETON

Mouillages Courantométriques



CHAPITRE II - MOYENS D'ETUDE DE LA CIRCULATION

Les moyens mis en oeuvre pour l'étude de la circulation dans le Golfe Normano-Breton sont des mesures au point fixe, des suivis de flotteurs, des simulations numériques d'écoulements bidimensionnels et dans une moindre part l'examen de photos satellitaires infra rouge ainsi que des campagnes de mesures hydrologiques (température, salinité).

II.1. - MESURES DE COURANT ET DE MARÉE

II.1.1. Mesures au point fixe

Les mesures de courant dans le Golfe Normano-Breton ont été nombreuses en vue de la détermination du courant périodique de marée (LNH, 1961 et SHOM, 1973) : cependant la qualité et surtout la durée de ces mesures sont insuffisantes pour étudier la circulation résiduelle ou les courants induits par le vent. C'est pourquoi 3 campagnes de mesures ont été organisées de 1982 à 1984 avec les objectifs suivants :

- mesures de longue durée : pour analyser les courants résiduels eulériens ("au point fixe") et leurs variations en fonction de l'amplitude de marée et des événements météorologiques,

- mesures "surface" et "fond" : pour tester l'uniformité des courants sur la verticale de façon à valider ou non la modélisation bidimensionnelle,

- points de mouillage choisis pour évaluer les flux résiduels transitant entre les îles principales du Golfe et le littoral breton ou normand d'une part, et pour étudier la circulation entre Jersey et Guernesey, où un front thermique avait déjà été observé, d'autre part.

On sait que des mesures eulériennes, si bonnes soient-elles, sont insuffisantes pour décrire la circulation des masses d'eau en zone littorale caractérisée par une bathymétrie complexe. C'est pourquoi elles sont utilisées pour valider, voire modifier, des résultats analogues obtenus avec des modèles numériques : mais ce sont ces derniers qui sont exploités en terme de circulation.

Les figures II-1 et II-2 présentent respectivement l'emplacement des points de mesure et leur chronologie.

Trois types de mouillages, schématisés par la figure II-3, ont été mis en oeuvre (cf. L'YAVANC et Kerdreux, 1983) :

- des mouillages de surface comportant un appareil suspendu à une structure flottante reliée à une bouée de marquage. Les courantomètres utilisés, du type électromécanique V.A.C.M. SUBER, offrent l'avantage d'enregistrer des moyennes vectorielles et par conséquent d'être moins sensibles à l'agitation de surface,

- quelques mouillages "subsurface" comportant un courantomètre suspendu à un flotteur relié au fond,

Fig II 2: CHRONOLOGIE DES MESURES

DE COURANT ET DE TEMPERATURE DANS LE GOLFE NORMANO BRETON

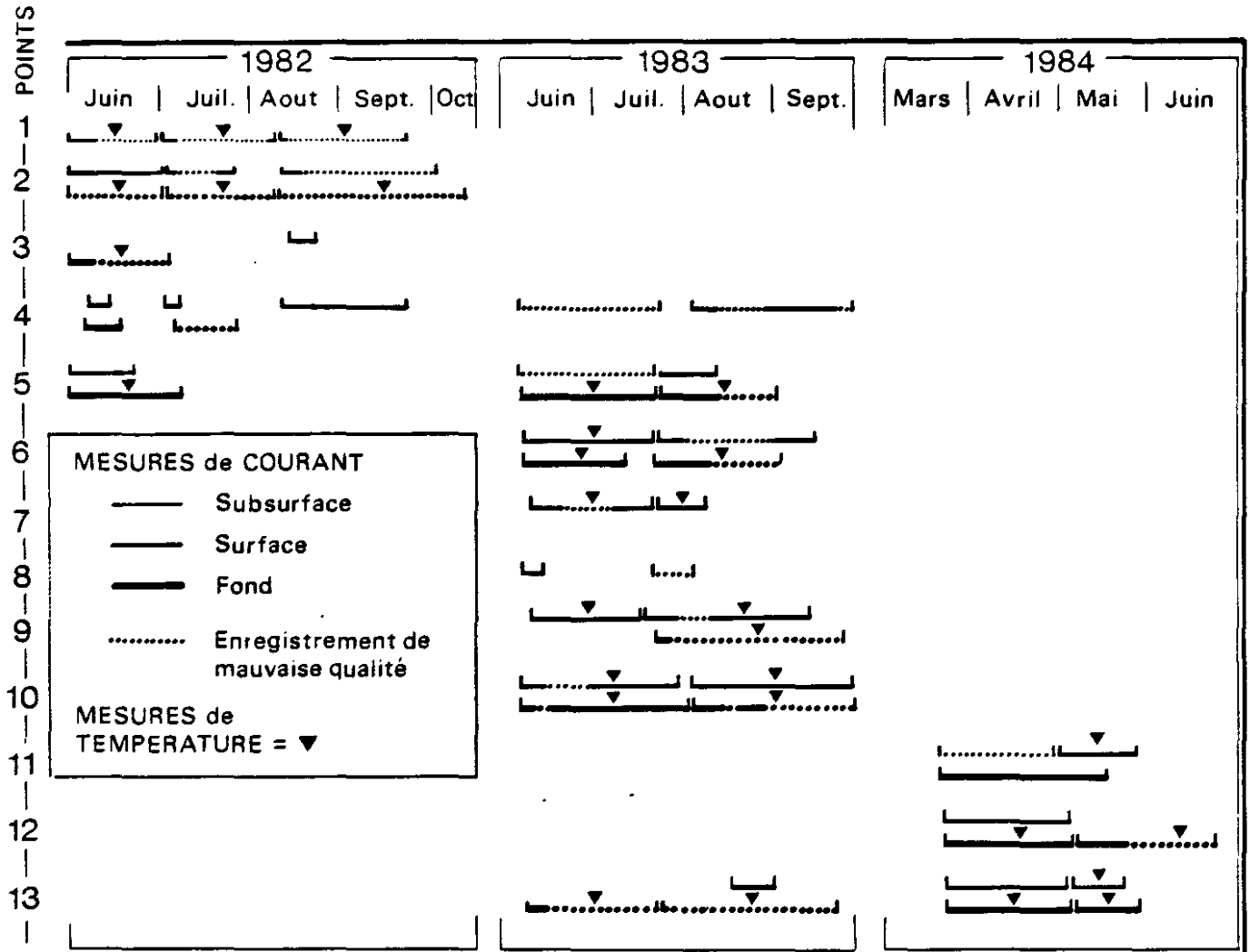
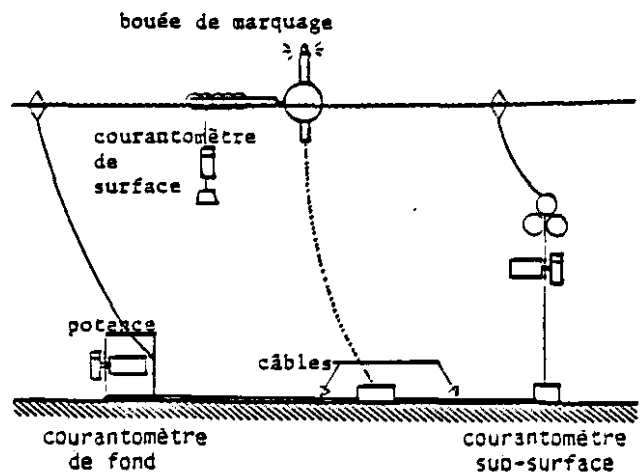


Fig. II 3

SCHEMAS de MOUILLAGES



- des mouillages de fond reliés au corps mort d'une bouée de marquage, pour lesquels l'appareil, solidaire d'une structure posée sur le fond, garde une position fixe, ce qui améliore la qualité des mesures. Dans ce cas, des courantomètres à rotor du type Aanderaa RCM IV ou V.A.C.M. Suber ont été utilisés.

Outre les courantomètres, quelques marégraphes ont été mis en place pour rechercher les variations de pente moyenne entre certains points du Golfe, en vue de les corrélérer à la fois aux courants résiduels et à la météorologie.

Les résultats bruts de l'ensemble de ces mesures sont présentés dans un rapport spécifique (KERDREUX et al, 1987). Bien entendu les chapitres suivants y feront largement référence.

Remarque

Dans leur grande majorité, les mesures ont été corrigées en fonction d'un étalonnage récent des appareils : l'expérience montre que ces corrections modifient peu les résultats et qu'en particulier, les valeurs résiduelles y sont peu sensibles, sans doute grâce à une "compensation" partielle des erreurs pendant le flot et le jusant. C'est pour cette même raison qu'il est possible de mesurer des courants résiduels inférieurs à 5 cm/s avec une relative fiabilité alors que la précision des appareils atteint rarement ce seuil.

II.1.2. Mesures Lagrangiennes

Pour évaluer les résultats obtenus par modèles en termes de trajectoires de masses d'eau, une campagne de suivis de flotteurs par système Argos a été réalisée pendant le printemps 1984. Les flotteurs utilisés sont de petit volume, en particulier leur trainée aérodynamique est très réduite. Ils sont munis d'une ancre flottante constituée par une bâche de 6 m lestée d'une barre d'acier et fixée à la bouée par une patte d'oie de telle sorte que la bâche reste perpendiculaire au courant (cf. Schéma ci-après).

L'immersion des ancres est variable (3 à 10 m).

Le positionnement des flotteurs est réalisé par le système Argos via 1 ou 2 satellites. Une moyenne de 8 positions par jour a ainsi été obtenue.

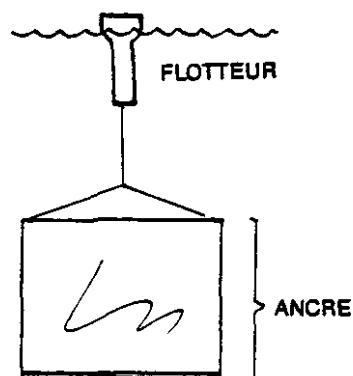
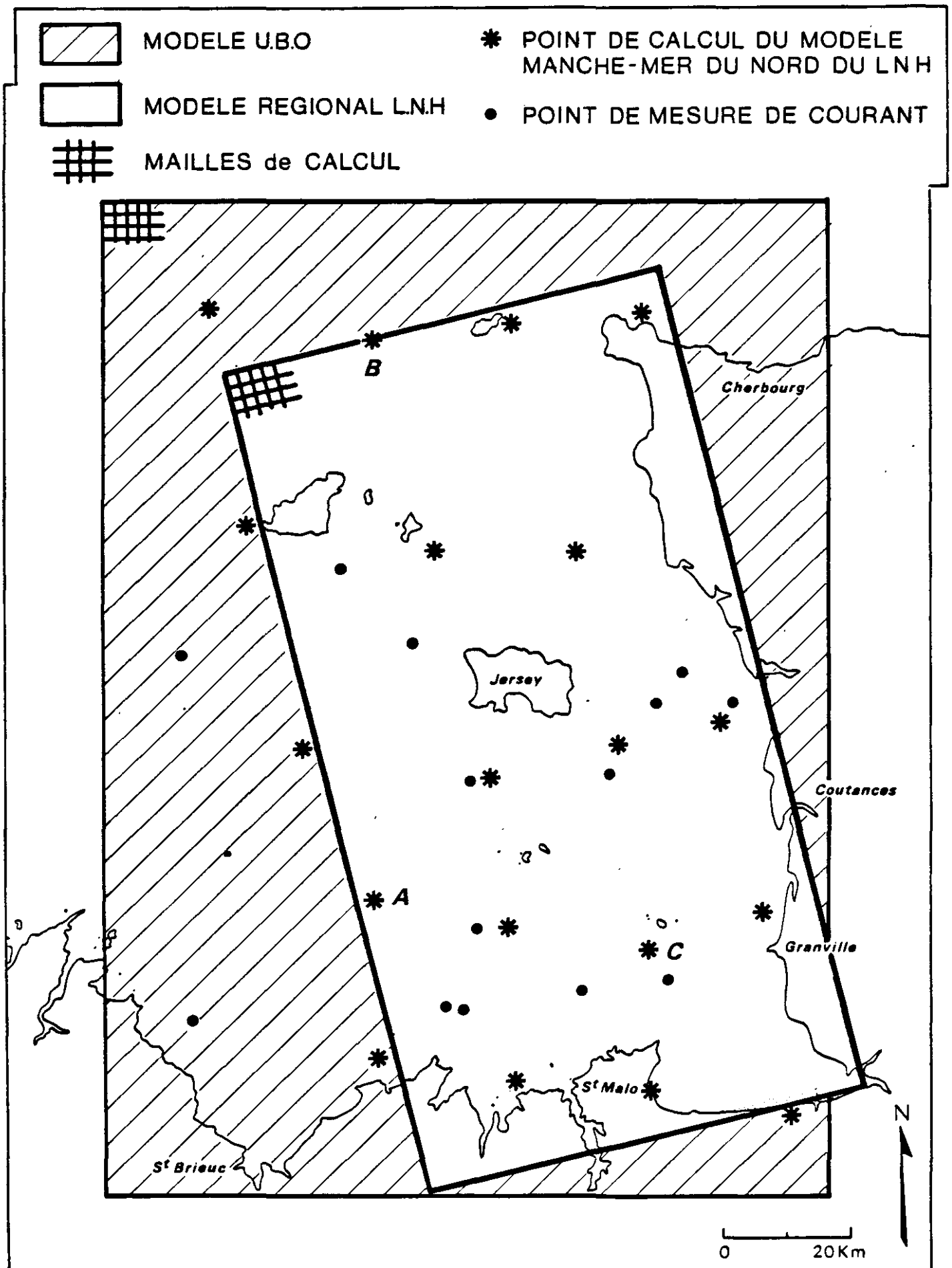


Schéma des flotteurs Lagrangiens

Fig II 4 IMPLANTATION DES MODELES NUMERIQUES DU GNB



Le tableau des lâchers successifs ainsi que les trajectoires suivies par l'ensemble des flotteurs sont reportés dans l'annexe 1 et seront commentés dans les chapitres suivants. On peut cependant formuler les constats ci-après :

- Ce système est parfaitement adapté (précision géographique et fréquence des positionnements) à la recherche de la circulation résiduelle à l'échelle du Golfe Normano-Breton.

- Les trajectoires obtenues sont souvent très fermées : ainsi en dépit d'un courant de marée intense, les déplacements moyens sont faibles.

II.2. - Modélisation numérique

Compte tenu de la complexité de la bathymétrie dans le Golfe, une modélisation numérique du secteur s'imposait, de façon à reproduire les courants et surtout les circulations lagrangiennes ; c'était aussi se donner la possibilité d'expliquer les schémas obtenus grâce à des tests de sensibilité sur certains termes des équations.

Pour l'étude de la marée, phénomène barotrope, un modèle bidimensionnel horizontal (2D) est tout à fait indiqué, sauf peut être dans des secteurs très accidentés où la topographie peut induire des structures verticales. Pour le vent, il est clair que les profondeurs du golfe justifient une modélisation tridimensionnelle des effets induits, car des cellules de circulation verticale peuvent se produire. Mais le coût d'exploitation d'un modèle tridimensionnel nous a paru prohibitif. C'est encore à l'aide de modèles intégrés sur la verticale que l'on cherchera à caractériser les schémas de circulation liés au vent, les mesures "surfaces" et "fond" devant aider à fixer la portée des résultats des modèles.

Avant le lancement de notre étude, le L.N.H. avait développé un modèle 2D couvrant les deux tiers de la superficie du Golfe. Ce modèle a été utilisé pour la caractérisation des effets météorologiques et leur interaction avec la marée. Mais les frontières de ce modèle (cf. § II.2.2.) sont très près des îles et du Raz Blanchard et il est difficile d'acquérir des données fiables sur les conditions limites dans ce secteur. En outre, la circulation autour de Guernesey semblait intéressante à simuler.

Pour contourner ces difficultés, l'U.B.O. a élaboré un autre modèle 2D que nous avons retenu principalement pour les résultats en termes de résiduelle de marée.

Accessoirement, il a été possible de comparer les résultats des deux modèles 2D et ainsi de valider les structures résiduelles obtenues.

II.2.1. Le Modèle 2D de l'U.B.O.

Ce modèle résout les équations de la mécanique des fluides sous une forme intégrée sur la verticale (équations de SAINT VENANT) :

conservation de la masse

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot H \vec{u} = 0 \quad (1)$$

Conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} + 2\vec{\Omega} \wedge \vec{u} = -g \vec{\nabla} \zeta - \vec{\nabla} P - k_1 \frac{\vec{u} |\vec{u}|}{H} + k_2 \frac{\vec{W} |W|}{H} + \nu \Delta \vec{u} \quad (2)$$

avec ζ : cote de la surface libre,
 H : hauteur d'eau
 \vec{u} : courant moyen sur la verticale
 $\vec{\Omega}$: rotation de la terre
 k_1 : coefficient de frottement sur le fond
 ν : " de diffusion (ou viscosité)
 P : Pression atmosphérique
 k_2 : Coefficient d'entraînement par le vent
 \vec{W} : Vitesse du vent

Rappelons que cette formulation repose sur l'hypothèse fondamentale de pression hydrostatique.

Le modèle mis en œuvre par ORBI (1986) s'appuie sur un schéma de résolution écrit par SALOMON selon une technique en différences finies "aux directions alternées" proposée par LEENDERTSE.

La grille de calcul rectiligne régulière couvre l'ensemble du Golfe Normano-Breton avec 59 mailles selon la direction Est-Ouest et 82 mailles selon la direction Nord-Sud. Le pas d'espace est 1 mille nautique (cf. Figure II.4).

Pour la résolution de la propagation de la marée, les conditions aux limites sont des hauteurs d'eau issues du modèle physique de la Manche réalisé par l'Institut de Mécanique de Grenoble. Elles s'expriment par recombinaison harmonique de la marée : le modèle s'applique donc à tout coefficient de marée.

Le réglage du modèle à l'aide des coefficients de frottement au fond et de la viscosité a été effectué pour une marée de vive eau moyenne par comparaison avec des enregistrements de niveaux à St Héliier et St Malo et des mesures de courant aux points 4, 5, 6, 7, 8, 9 et 10 (cf. fig. II.1. et § II-1 campagne 1983). Des exemples de comparaison mesure/modèle, donnés en figure II.5. montrent que l'étalonnage est très satisfaisant (on observe seulement un léger déphasage de 10' en fin de flot et en fin de jusant).

La loi de frottement retenue est du type Chézy modifiée pour tenir compte des variations de profondeurs (SALOMON et al, 1981), soit :

$$k_1 = \frac{g}{[\alpha \cdot 7,83 \text{ Log } (H/e.z_0)]^2}$$

avec α (paramètre d'étalonnage) = 1.15
 Z_0 (longueur de rugosité) : 1 cm

ainsi formulée, l'expression de contrainte sur le fond est compatible avec un profil de vitesse logarithmique du type "PRANDTL".

Le coefficient de viscosité adopté est $\nu = 1000 \text{ m}^2/\text{s}$. Ce coefficient, qui n'a pas de réalité physique, sert en fait à compenser la diffusion numérique générée par le modèle.

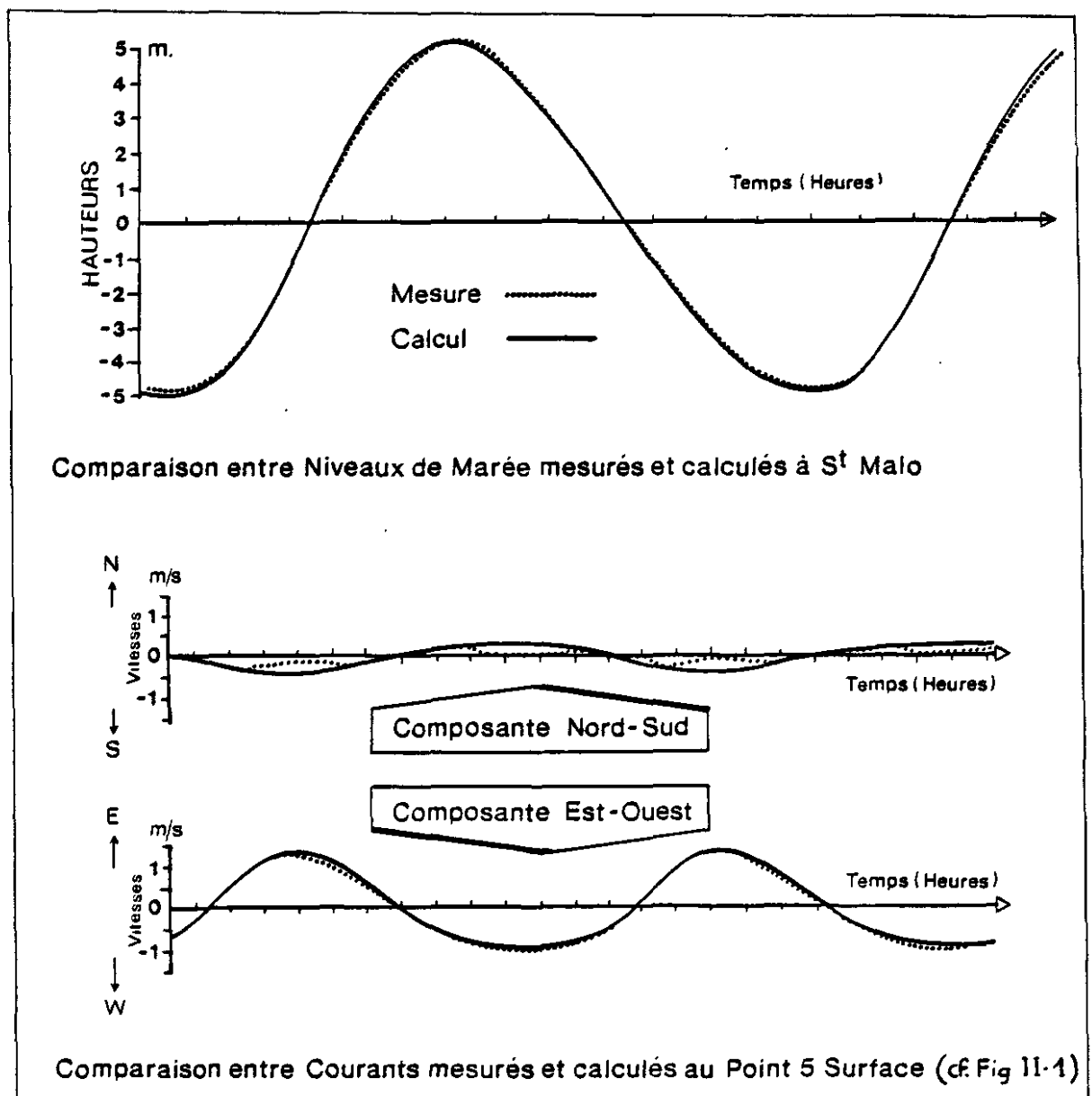


Figure II.5 : Réglage du modèle numérique. (D'après A. ORBI).

II.2.2. Le Modèle 2D du L.N.H.

Il s'agit d'une application par le L.N.H. du code de calcul CYTHERE-ES1 (BENQUE et al, 1981) développé conjointement par le L.N.H. et la SOGREAH*. Il résout les équations de St Venant citées en II.2.1., donc avec des hypothèses analogues à celles du modèle 2D de l'U.B.O. Ce modèle permet de reproduire le recouvrement et le découverture de l'estran au cours de la marée.

Les équations sont résolues en différences finies par une méthode d'éclatement d'opérateurs, les étapes successives étant traitées de la façon suivante :

- convection : méthode des caractéristiques
- diffusion : méthode de double balayage
- propagation : méthode itérative de gradients conjugués avec coordination.

Le domaine de calcul est un rectangle de 131 km x 67 km s'appuyant sur le Cotentin et orienté à 13,5° par rapport au Nord géographique. Le maillage est orthogonal régulier et comprend 35 x 67 mailles carrées de 2 km de côté (cf. Figure II-4).

Les conditions aux limites utilisées pour les simulations de vent sont explicitées dans le chapitre IV. Pour les simulations de marée, les calculs sont réalisés en vive eau moyenne (coefficient 95) à l'aide de hauteurs d'eau à la limite qui sont fournies par un modèle de plus grande emprise couvrant l'ensemble de la Manche.

Enfin les paramètres retenus pour ces simulations sont :

- viscosité $5 \text{ m}^2/\text{s}$
- Frottement sur le fond du type Chézy avec un coefficient de $60 \text{ m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ (sauf entre Jersey et les Minquiers où le frottement est accentué).

Ce modèle n'étant exploité que pour l'effet du vent, il n'a pas été jugé utile de raffiner l'étalonnage. Une comparaison des niveaux et courants de marée reproduits par le modèle avec nos mesures a permis de considérer les simulations comme satisfaisantes. Par souci de synthèse, ces comparaisons ne sont pas présentées dans ce rapport. Cependant, le schéma résiduel eulérien que donne ce modèle pour la marée sera comparé à celui des mesures et du modèle U.B.O. (Chapitre III).

II.2.3. Le Modèle 2D "détaillé" du L.N.H.

Dans le but d'étudier avec précision les courants de marée au voisinage du site "Cotentin centre" envisagé pour la construction d'une centrale marémotrice, le L.N.H. a développé un modèle 2D de même emprise que le précédent, mais raffiné le long de la côte du Cotentin et plus spécialement aux abords des îles Chausey. Le maillage (figure II-6) orthogonal irrégulier comprend 77 x 155 points de calcul, les

* SOGREAH : Société Grenobloise d'Etudes et d'Aménagements Hydrauliques.

mailles variant de 1 000 m à 500 m, ou de 2 000 à 250 m selon les directions de grille. Le schéma de résolution est analogue à celui décrit au § II-2-2.

Compte tenu de l'intérêt de connaître un champ de courant avec précision près du littoral du Cotentin, en particulier pour les applications sédimentologiques, nous avons souhaité publier les résultats d'une simulation de vive eau moyenne en 6 zones de ce littoral, dont les limites sont précisées sur la figure II-6 : ces résultats, sous forme de champs horaires de courants de marée, de champs de courants résiduels eulériens et de champs de débits résiduels eulériens sont rassemblés en un atlas disponible en annexe séparée au présent rapport.

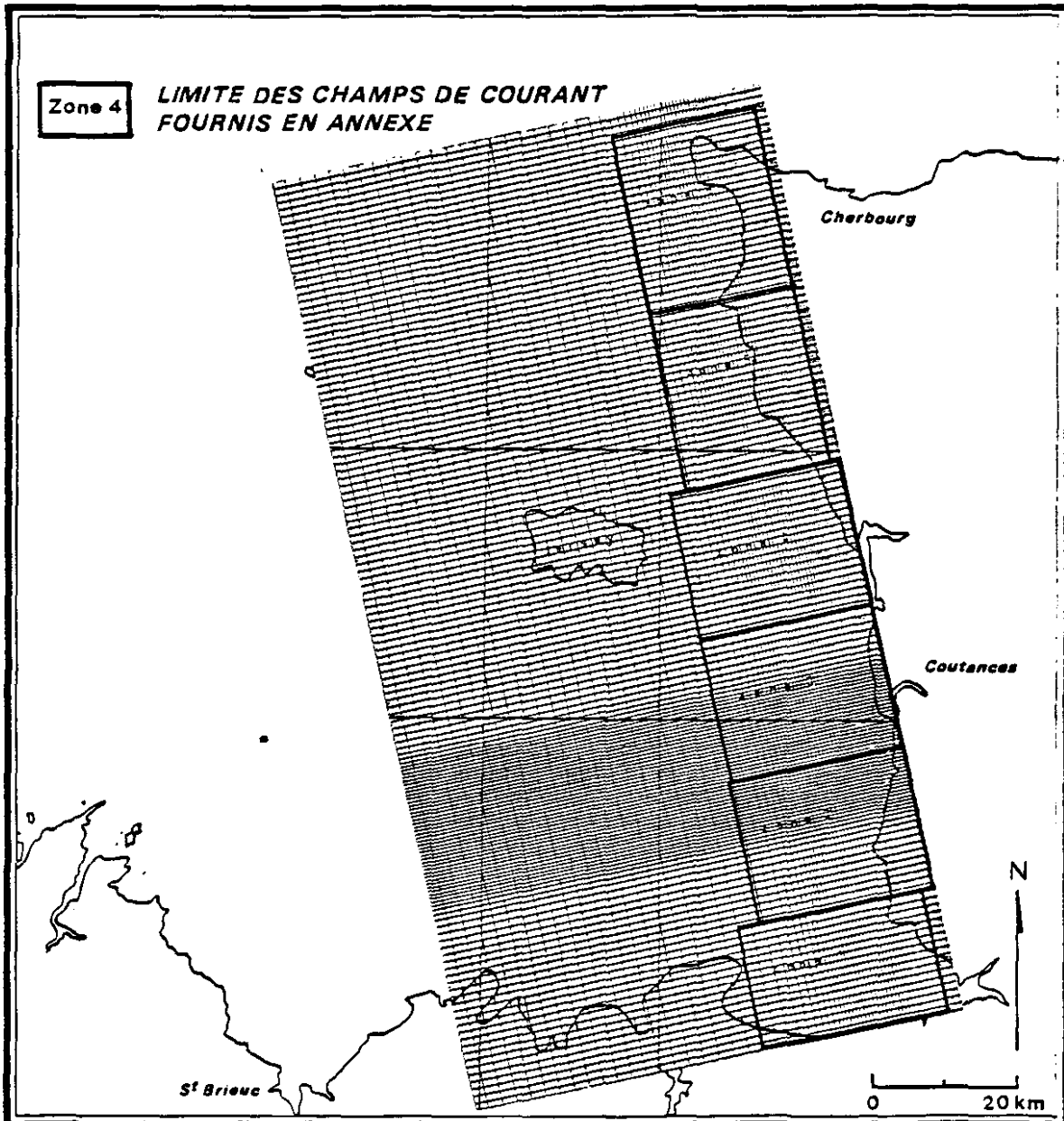


Figure II.6 : Maillage du modèle détaillé du L.N.H.

CHAPITRE III

CIRCULATION DE MAREE

CHAPITRE III - CIRCULATION DE MAREE

Nous allons considérer quelques aspects de la circulation instantanée de marée dans le Golfe Normano-Breton avant de traiter la circulation résiduelle de marée.

III.1 - CIRCULATION DE MAREE "INSTANTANEE"

Les travaux et publications antérieurs sur la marée dans le Golfe sont suffisamment abondants pour ne pas développer ici ce sujet. Nous allons plutôt présenter quelques détails dont les conséquences pratiques sont importantes ou qui aideront à la compréhension des circulations résiduelles.

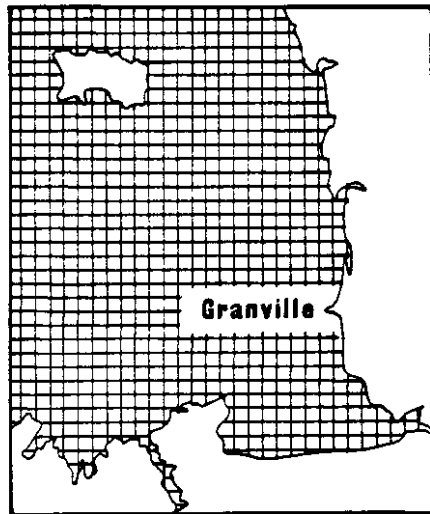
III.1.1. Variations de la surface libre : conséquence sur l'exondation des estrans

Le fond du Golfe Normano-Breton est caractérisé par une grande amplitude de marée (typiquement 15 m de marnage) et des fonds peu pentus. En conséquence, les estrans sont vastes : compte tenu de la densité des organismes benthiques qui les occupent, il est important de savoir pendant quelle fraction du temps un secteur sera ou non exondé. Des abaques tels que ceux de la figure III-1 ont été constitués à l'aide d'interpolations multiples de courbes de marée mesurées en quelques points du Golfe. Une statistique sur l'occurrence des coefficients de marée établie sur 18 années consécutives (GOUGENHEIM, 1953) permet de définir le temps d'exondation moyen (tout coefficient confondu) pour une cote de fond quelconque. L'annexe 2 au présent rapport contient les résultats équivalents en 6 points du golfe.

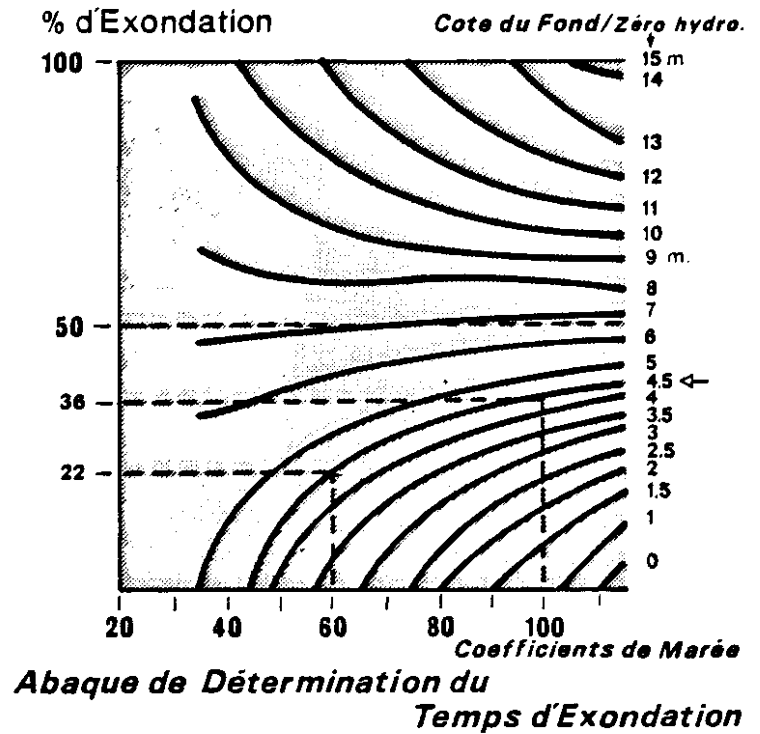
III.1.2. Courants de marée

L'exploitation du modèle 2D de l'U.B.O. a permis la production de cartes horaires du courant de marée pour des coefficients-type. En annexe 3, les cartes correspondant à la vive eau moyenne sont fournies : elles constituent un complément au document similaire du SHOM dans la mesure où la densité des points est plus grande et uniforme. Dans un esprit de synthèse, nous présentons en figure III-2 les roses de courant obtenues : on observe que le courant est alternatif au nord et dans le tiers Sud du Golfe alors qu'il est giratoire cyclonique (sens contraire aux aiguilles d'une montre) autour des îles anglo-normandes : ce phénomène est lié à des réflexions multiples de l'onde marée engendrées par la bathymétrie : cependant 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 (TAYLOR, 1921). ORBI (1986) a montré à l'aide d'un modèle schématique de la Manche que lorsque la rotation de la terre était négligée, l'ellipticité des courants était accrue : il y a donc dans le golfe compétition entre l'effet de Coriolis tendant à faire tourner le courant vers la droite et la bathymétrie (avec effet de cap du Cotentin) tendant à le faire tourner vers la gauche.

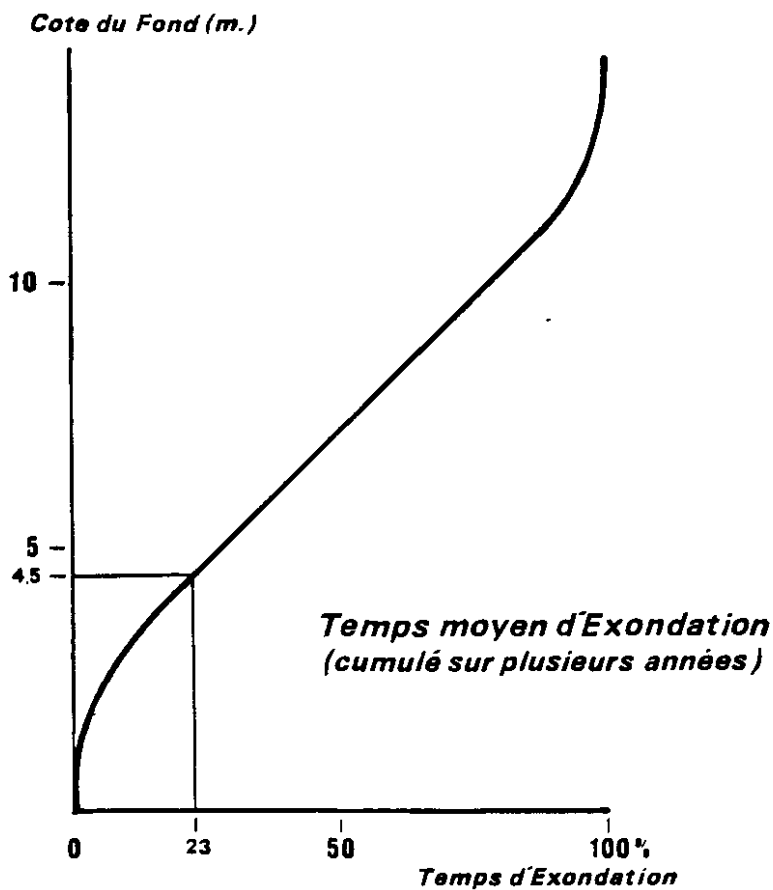
Fig III 1. TEMPS D'EXONDATION DE L'ESTRAN A GRANVILLE



Situation



Abaque de Détermination du Temps d'Exondation



Exemple : UN POINT COTE 4,5 m.
EMERGE PENDANT :
22 % du Temps, pour Coeff. = 60
36 % ————— = 100
23 % en moyenne

Fig III 2 Golfe Normano-Breton : SIMULATION DES ROSES DE COURANT

— Vive Eau · Coef 92 —

d'après A. ORBI

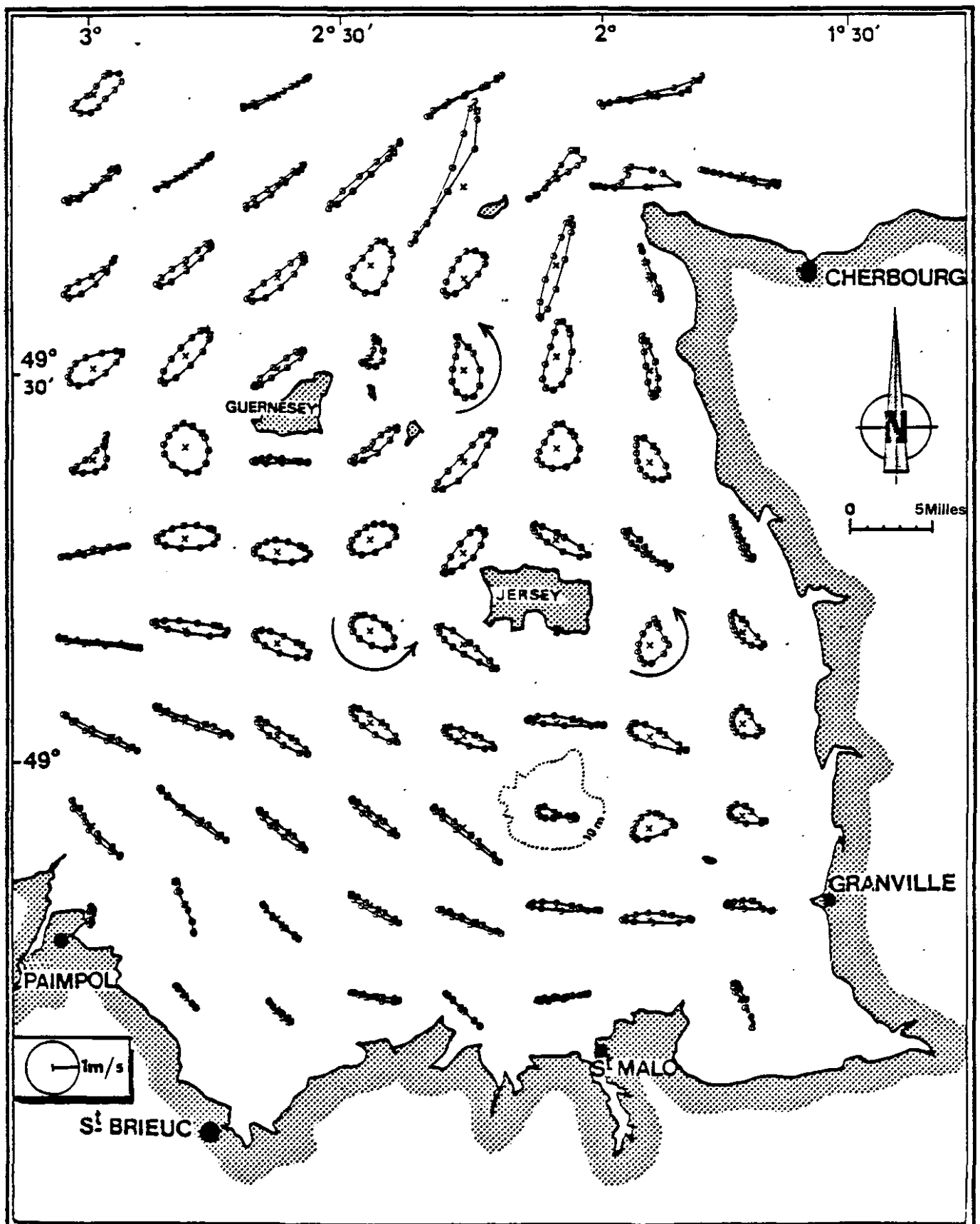
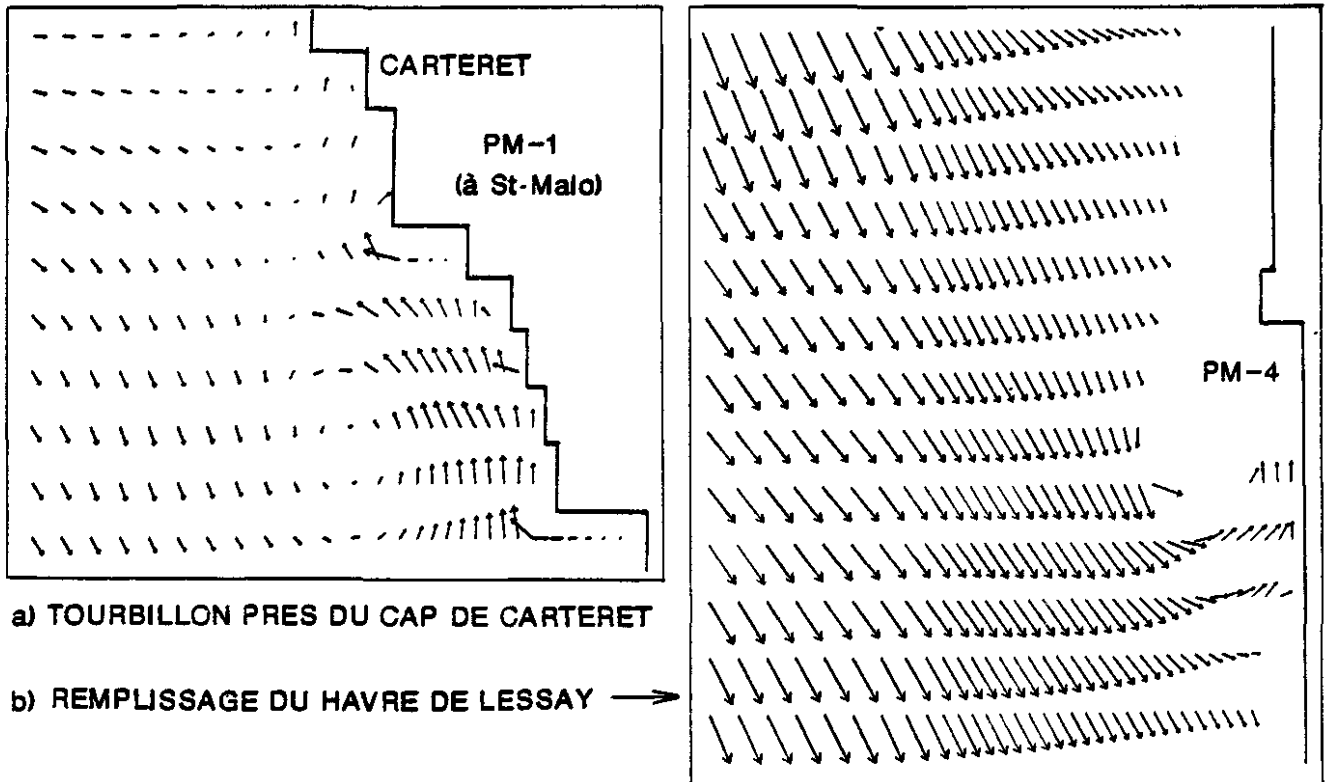


Fig.III-3 QUELQUES STRUCTURES DE COURANT MISES EN EVIDENCE AVEC LE MODELE DE DETAIL DU L.N.H. (code CYTHERE-ES1)



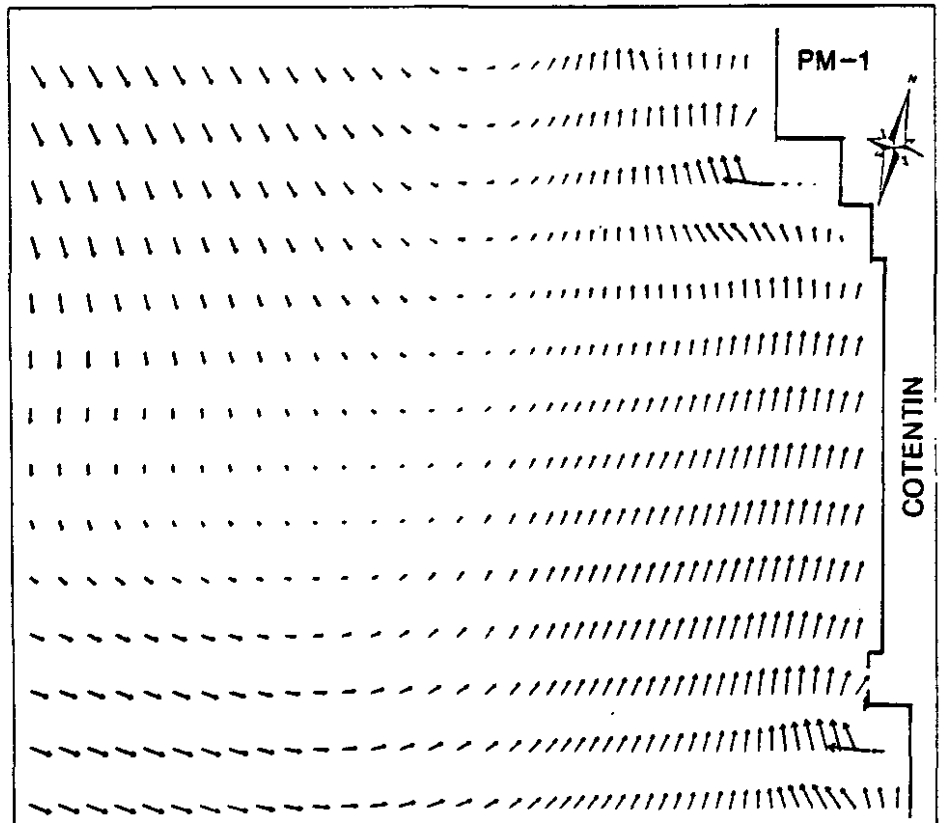
c) AVANCE DE LA RENVERSE AU VOISINAGE DE L'ESTRAN

Dans l'ensemble de ce secteur, le courant porte au Sud à PM-2 et au Nord à PM.

Echelles

VITESSE → 1 M/S

0 2 KM



En ce qui concerne le courant de marée, le modèle détaillé du Cotentin a apporté beaucoup d'éléments complémentaires, mettant en évidence, si besoin était, le rôle primordial joué par la bathymétrie et donc la non uniformité des vitesses, même à petite échelle.

Ainsi apparaissent des micro-structures instantanées, telles qu'un tourbillon au sud du cap de Carteret avec des vitesses de 0,7 m/s (figure III-3a), un autre dans l'anse de Vauville, des courants de remplissage des Havres (figure III-3b) et plus généralement le changement d'orientation des courants aux abords de l'estran. En particulier, on peut y observer une avance des renverses (figure III-3c) : ce déphasage est lié à la part croissante du terme frottement dans l'équilibre de la quantité de mouvement lorsque les profondeurs diminuent (voir "justification théorique" à la fin du paragraphe). A titre d'exemple, la figure III-3d présente une comparaison entre les champs de courant fournis par le modèle de détail et le modèle régional au voisinage des îles Chausey.

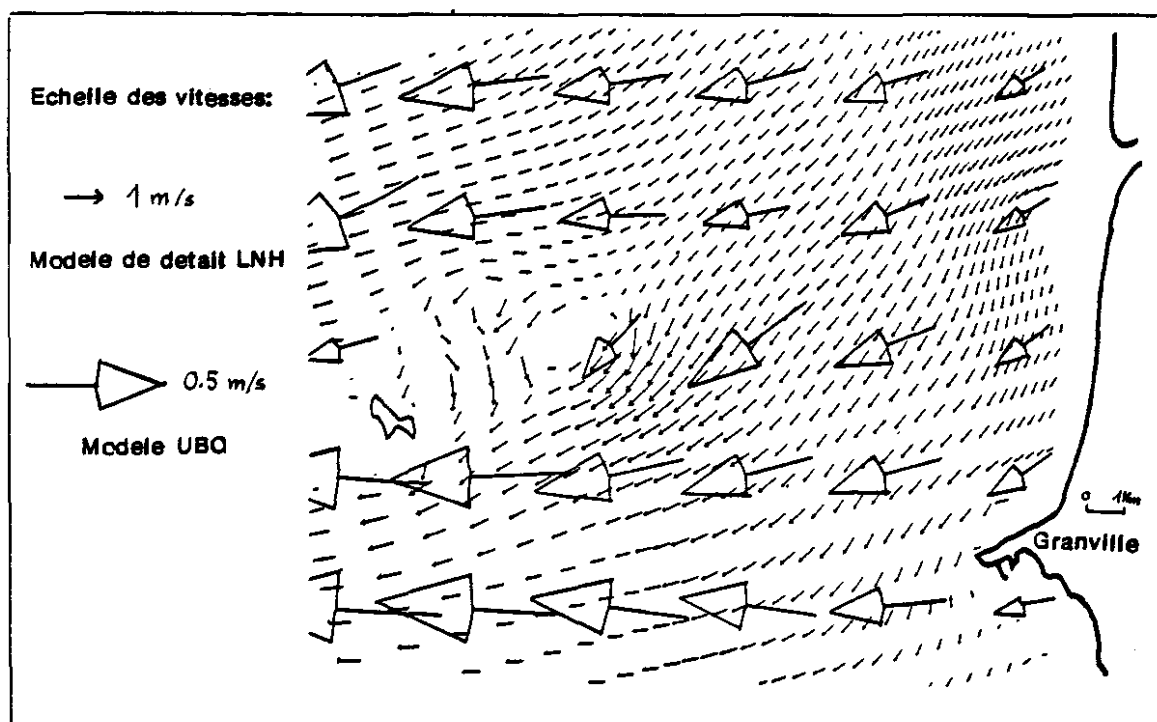
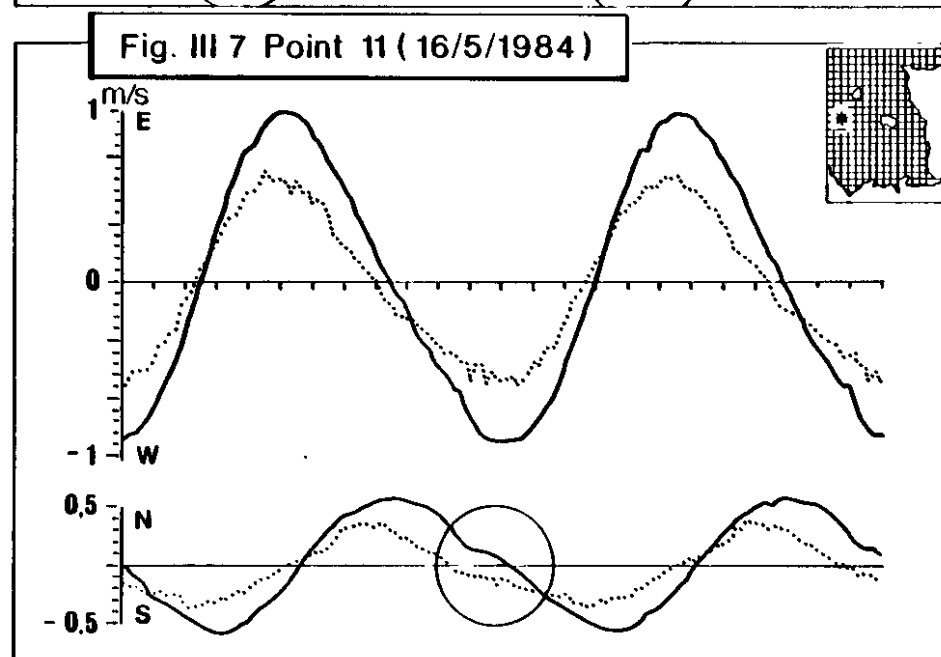
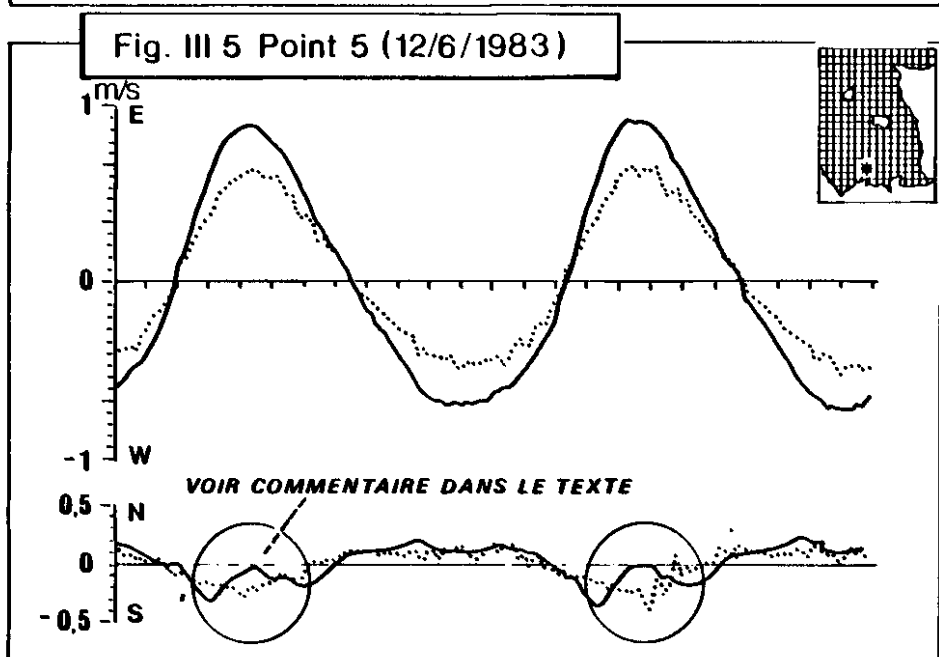
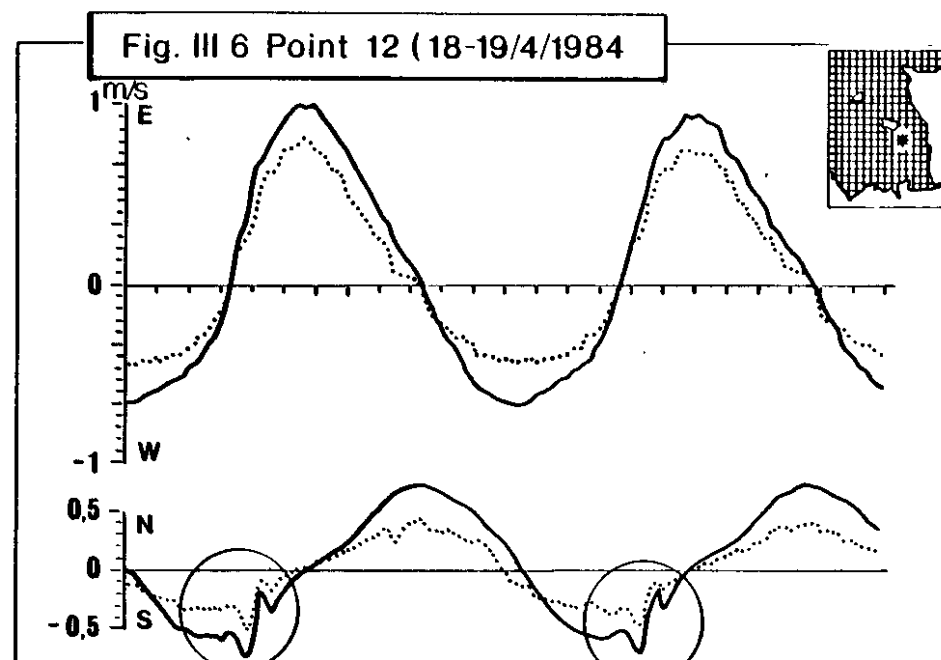
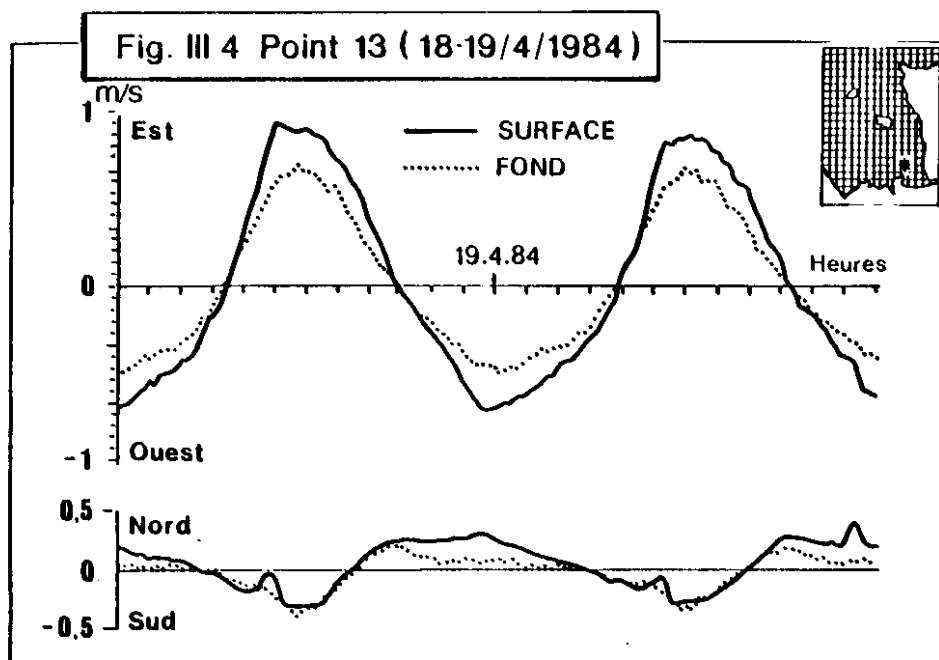


Fig. III-3d: Comparaison entre deux champs de courant calculés.
[6 heures après pleine mer à St Malo]

Ces exemples montrent qu'il convient d'être prudent sur les conclusions que l'on tentera de tirer des mesures de courant ponctuelles ou des résultats d'un modèle numérique à maillage grossier.

De la même façon, les bathymétries irrégulières et les îles peuvent engendrer des gradients de courant selon la verticale. Une comparaison succincte des courants mesurés simultanément en surface et au fond a donc été menée.

Fig III 4 à 7. Golfe Normano-Breton: EXEMPLES D'ENREGISTREMENTS DU COURANT



Les appareils de fond, positionnés à environ 1,5 m du fond, sont situés dans la couche limite où en première approximation, et selon la théorie de PRANDTL, le profil des vitesses est logarithmique. Ainsi les mesures de fond sont en moyenne 1,5 fois plus faibles que celles de surface ; on en déduit la longueur de rugosité z_0 , en écrivant :

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \text{Log}(z/z_0) \quad \text{pour } z = 1,5 \text{ m et } z = 5 \text{ m (assimilable à la surface)}$$

On obtient $z_0 = 13,5 \text{ cm}$, ce qui est fort mais compatible avec la nature grossière des fonds dans le golfe.

En ce qui concerne les directions et les déphasages éventuels du courant près du fond, on constate en général une bonne coïncidence avec la surface (cf. figures III-4 à 7).

Cependant, certaines "anomalies" ont pu être notées :

- point 5, le 12 juin 1983 (figure III-5). Lorsque le flot porte à l'E-SE, en surface il tourne vers l'E pour y atteindre sa valeur maximum : il s'agit probablement d'un effet lié à la proximité de la baie de St-Brieuc et du cap Fréhel. Compte tenu des profondeurs faibles de la baie, cet effet est beaucoup moins sensible par 30 m d'eau au point 5 (au delà de l'isobathe - 20 m, la limite terrestre est rectiligne et le cap Fréhel disparaît).

- point 12, le 18 avril 1984 (figure III-6). Quant le courant porte au S-E, donc qu'il provient de Jersey, il subit une oscillation de période 1 heure environ : cet effet observé simultanément en surface et au fond est en fait le sillage de l'île.

- point 11, le 16 mai 1984 (figure III-7). Pour ces mesures réalisées par "grande" profondeur (60 m), on observe l'avance du fond sur la surface liée au poids relatif du terme de frottement et des termes d'inertie : en effet, le frottement est responsable d'une modification du déphasage entre courant et pente de la surface. A noter que la renverse succédant au jusant est plus brutale, ce qui tend à réduire l'avance du fond.

Justification théorique :

soit un courant répondant à une pente sinusoidale par l'équation :

$$\frac{dU}{dt} = P \cos \omega t - \frac{k}{H} U$$

$P \cos \omega t$: pente

k : coefficient de frottement (frottement linéaire)

H : hauteur d'eau

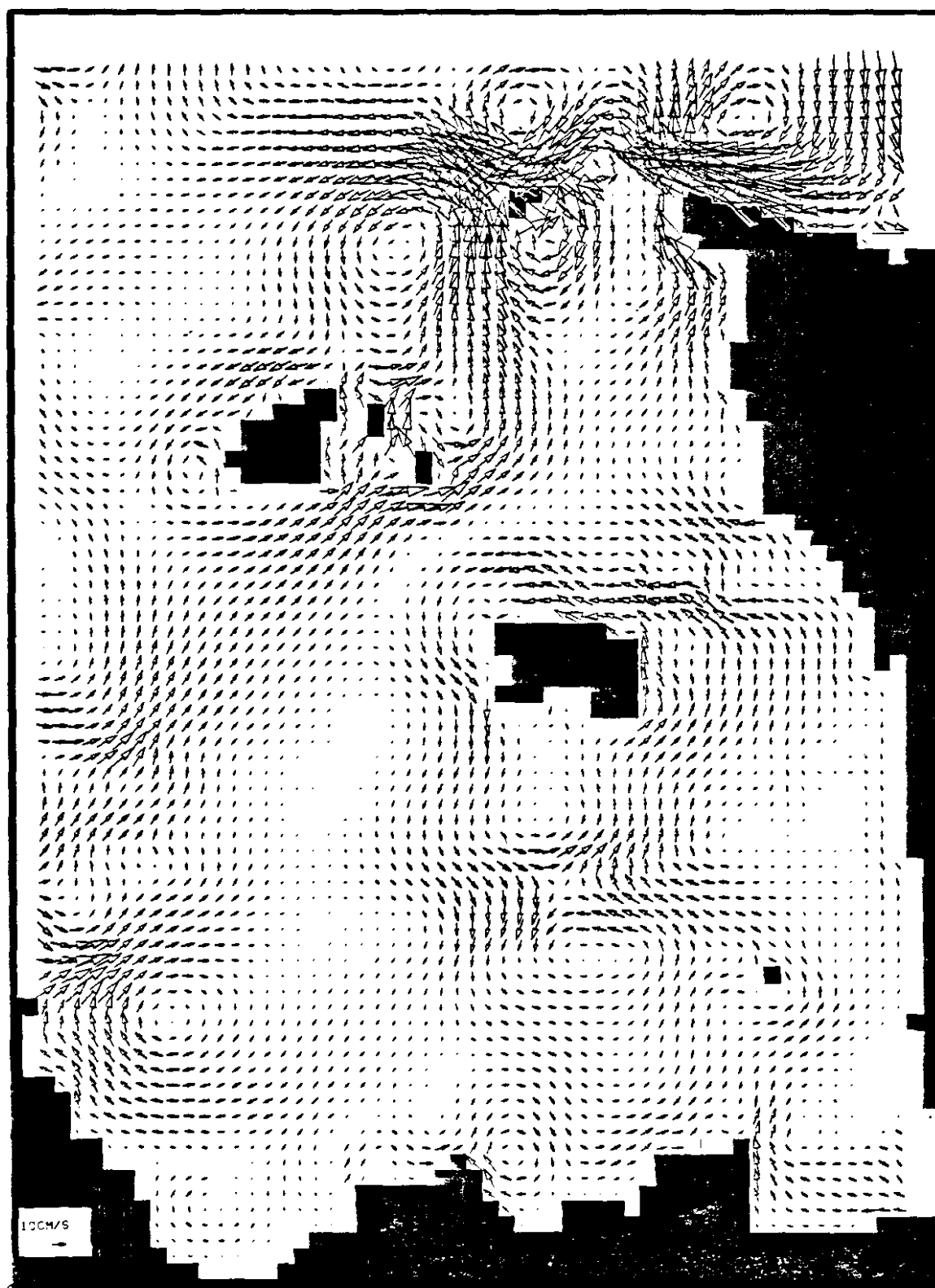
Cherchons U de la forme : $U = U_0 \cos(\omega t + \varphi)$

Pour $k = 0$ (pas de frottement) on a $\varphi = -\frac{\pi}{2}$

$$k \neq 0 \text{ (frottement non négligeable)} \quad \varphi = -\text{Arctg}\left(\frac{\omega H}{k}\right)$$

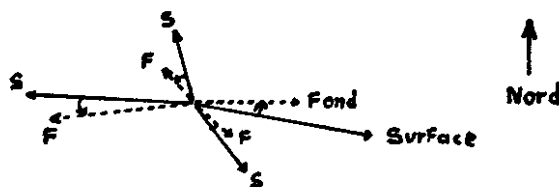
Fig. III 8 Golfe normano-breton : MODELISATION NUMERIQUE DES
COURANTS RESIDUELS EULERIENS (Marée de Vive Eau moyenne)

d'après A.Orbi



1. Si le frottement est fort ou la hauteur d'eau faible, l'avance du courant est plus importante.
2. Si la pulsation diminue (et par analogie lorsque la renverse est plus lente) l'avance du courant induite par le frottement est aussi plus grande.
3. Au fond, le frottement étant plus sensible (par rapport à l'inertie), l'avance est maximum.

Il est également probable qu'au point 11 la rotation de la terre joue un rôle, et qu'il y ait près du fond une rotation de type Ekman non stationnaire : sur la figure III-7 on observe effectivement que les courants maxima au fond sont orientés à gauche des courants de surface, comme le montre la rose de courant schématique ci-dessous :



Quoi qu'il en soit, il semble qu'en dépit des variations bathymétriques du Golfe, les courants instantanés soient à peu près uniformes sur la verticale, ce qui justifie l'application d'un modèle bidimensionnel pour les simulations de marée.

III-2 - CIRCULATION DE MAREE "RESIDUELLE"

Les courants résiduels eulériens (i.e. moyennes des vitesses au point fixe) n'ont pas de réalité physique : cependant leur étude permet d'identifier des structures tourbillonnaires et surtout de confronter les résultats d'un modèle à des enregistrements de courantomètres mouillés. C'est après cette validation du modèle qu'il devient fructueux de simuler numériquement les trajectoires des masses d'eau de manière à constituer un schéma de circulation lagrangienne.

III.2.1. Les courants résiduels eulériens

III.2.1.1. Présentation et interprétation du schéma de circulation moyenne eulérienne

La figure III-8 présente le champ de courant résiduel eulérien obtenu pour une marée de vive eau (coefficient 92, le 11 juin 1983) à l'aide du modèle de l'U.B.O. L'échelle des vitesses résiduelles est typiquement 10 cm/s mais ceux-ci dépassent fréquemment 20 cm/s devant l'île de Bréhat, autour de Sercq et dans le Nord, du cap de la Hague à Aurigny. La sensibilité du résultat aux conditions limites a été testée : lorsqu'une pente moyenne "réaliste" mais mal connue est introduite le long des limites, (par exemple la pente

indiquée par un modèle de la Manche), seuls les courants au voisinage de celles-ci sont modifiés (ORBI, 1986). Nous avons donc adopté le schéma obtenu pour une limite moyenne horizontale.

Le schéma eulérien est constitué de structures tourbillonnaires assez bien individualisées et séparées par des zones de calme où le courant résiduel est nul. Les tourbillons sont induits par les caps, les îles et les hauts fonds, conformément aux mécanismes désormais classiques décrits par plusieurs auteurs (ZIMMERMAN, 1980 ; ROBINSON in JOHNS, 1983 ; et surtout PINGREE et al, 1985 a, b, c, ainsi que ORBI, 1986).

Mécanismes de production de la vorticité

Chaque mécanisme est fondé sur la conservation de la vorticité (ω) que l'on peut écrire de la manière suivante après quelques simplifications :

$$\underbrace{\frac{\partial \omega}{\partial t}}_{\text{Variation de vorticité}} + \underbrace{\nabla \cdot \vec{u} \omega}_{\text{transport de vorticité}} + \underbrace{f \cdot \nabla \cdot \vec{u}}_{\text{Mécanisme M1}} = \left(\nabla \wedge \frac{\vec{\tau}}{\rho H} \right) \cdot \underbrace{\vec{k}}_{\substack{\text{vecteur unité} \\ \text{selon l'axe vertical}}} \quad (3)$$

Mécanisme M1
production de vorticité par la force de Coriolis lorsque la colonne d'eau s'allonge ou se comprime (en présence d'une topographie).

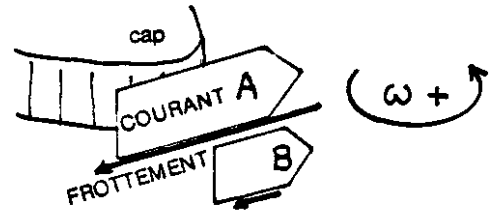
Le terme de droite de l'équation 3 est lié au frottement sur le fond. Si l'on choisit une loi de frottement quadratique : $\vec{\tau} = -\rho k_1 \vec{u} |\vec{u}|$, ce terme peut s'écrire :

$$\begin{aligned} \left(\nabla \wedge \frac{\vec{\tau}}{\rho H} \right) \cdot \vec{k} &= -\frac{k_1 |\vec{u}|}{H} \omega + k_1 \vec{u} \cdot \nabla \left(\frac{|\vec{u}|}{H} \right) \\ &= \underbrace{-\frac{k_1 |\vec{u}|}{H} \omega}_{\text{dissipation de la vorticité par frottement}} + \underbrace{k_1 \frac{\vec{u} \cdot \nabla |\vec{u}|}{H}}_{\text{mécanisme M2}} - \underbrace{k_1 \frac{|\vec{u}|}{H^2} \vec{u} \cdot \nabla H}_{\text{mécanisme M3}} \end{aligned} \quad (4)$$

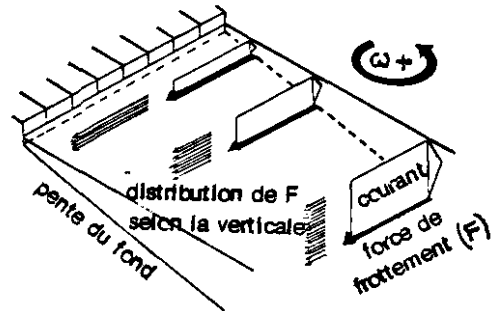
mécanisme M2
production de vorticité par frottement en présence d'un gradient de vitesse

mécanisme M3
production de vorticité par frottement en présence d'un gradient de hauteur d'eau

Le mécanisme M2, qui n'intervient que pour un frottement quadratique (le plus réaliste), est visualisé par le schéma ci-contre : le courant en A, plus rapide qu'en B, est plus fortement ralenti par frottement, ce qui crée une vorticité positive.



Le mécanisme M3 provient du fait qu'à 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. Ainsi une pente du fond perpendiculaire au courant génère de la vorticité.



(d'après ROBINSON)

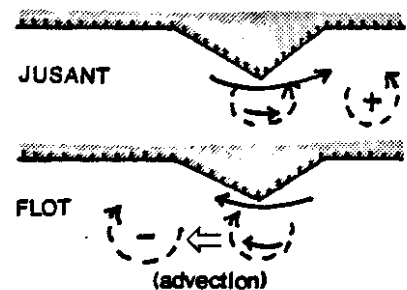
Structures résiduelles observées

Les structures observées dans le Golfe Normano-Breton résultent d'une production de vorticité par l'un des mécanismes décrits ci-dessus, et d'un transport tel qu'une "dissymétrie" intervient entre le flot et le jusant. On peut distinguer 3 types de structures.

1 - Les tourbillons résiduels induits par les caps :

Mécanisme : plusieurs explications sont proposées.

a) un cap provoque une accélération locale des vitesses : le mécanisme 2 génère une vorticité positive dans la figure ci-contre - qui est transportée dans le sens du courant. Lorsque le courant s'inverse, une vorticité de signe opposée est transportée dans l'autre direction. Il en résulte une vorticité résiduelle inversée de part et d'autre du cap.



b) Près de la côte, les fonds remontent : la pente du fond engendre une vorticité (mécanisme 3) qui est transportée parallèlement à la côte : en présence d'un cap les lignes de courant et donc la vorticité sont déviées vers le large. Lorsque le courant s'inverse, c'est encore une vorticité opposée qui est transportée de l'autre côté du cap. L'effet résiduel est analogue à celui de a).

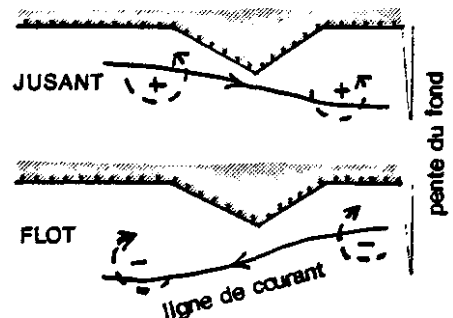
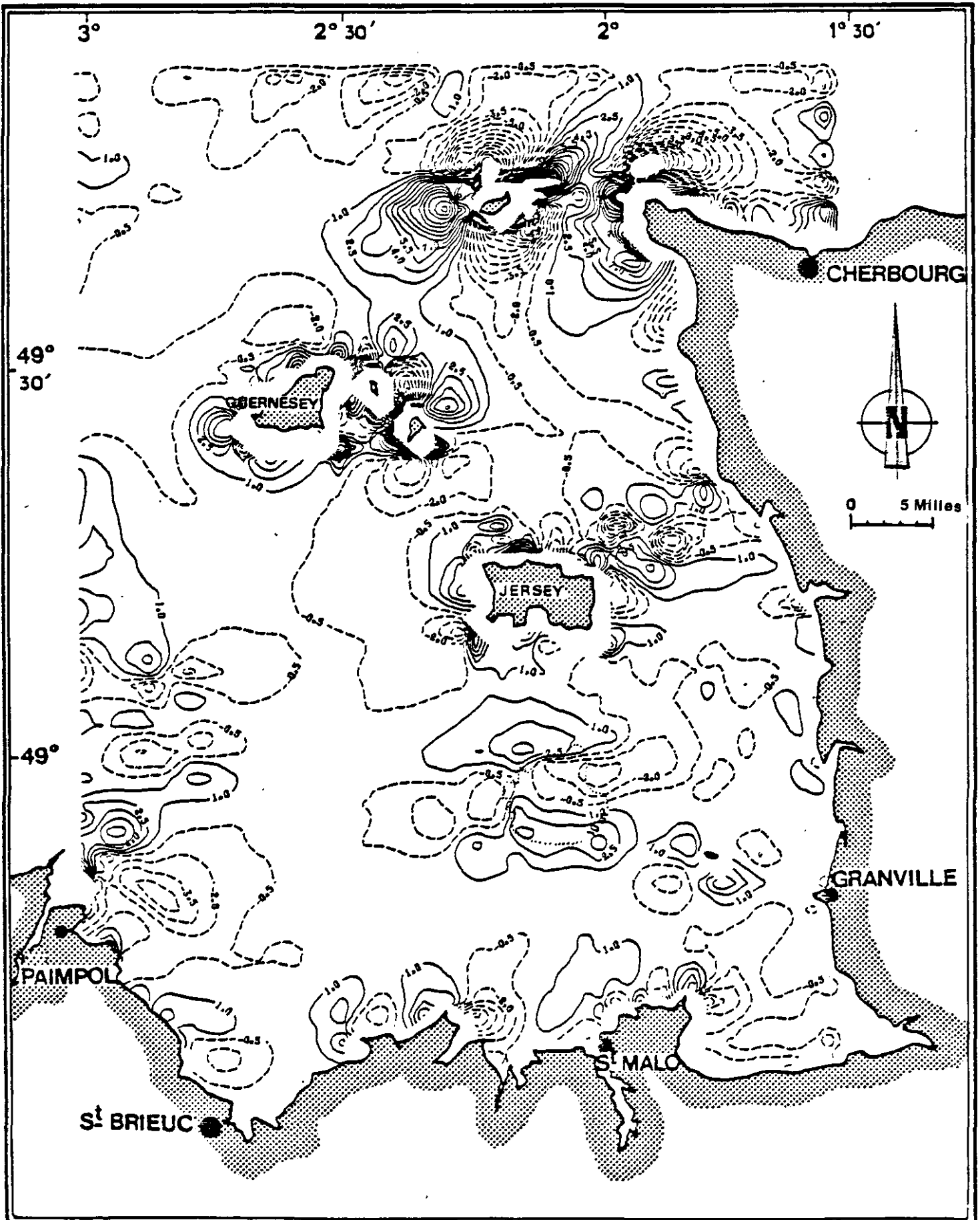


Fig III.9 Golfe Normano-Breton: VORTICITE RESIDUELLE (en s^{-1})
 CALCULEE APRES SIMULATION D'UNE VIVE EAU MOYENNE
 d'après A.Orbi

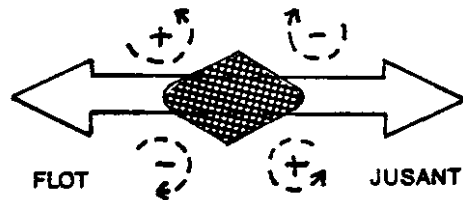


c) On peut aussi considérer qu'en se séparant de la côte en aval d'un cap, une ligne de courant génère une couche de cisaillement qui serait le siège d'une vorticité : d'après ROBINSON ce phénomène n'intervient qu'à petite échelle (~ 1 km). Cependant c'est quelque chose d'analogue qui est induit et accentué par les modèles mathématiques à grandes mailles ("tourbillons numériques").

Exemples : tourbillons du cap de la Hague, de la pointe du Grouin, du cap Fréhel, de l' le de Bréhat (qu'on nomme abusivement, tourbillon de la baie de St Brieuc).

2 - Structures à 4 tourbillons induites par les hauts fonds et les  les

Mécanisme : il s'agit en fait du même mécanisme qu'en 1, l' le pouvant être assimilée à 2 caps accolés "dos à dos".



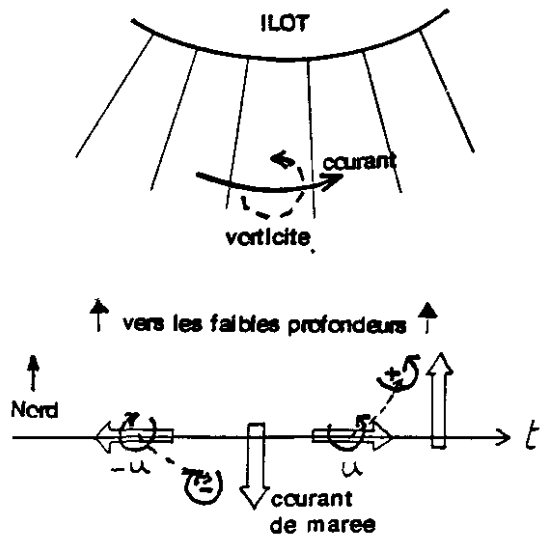
Exemples : Archipel des Minquiers - Aurigny

3 - Tourbillons autour des îles crées par un courant giratoire

Mécanisme : (PINGREE et MADDOCK, 1985 et LE CANN - Communication personnelle)

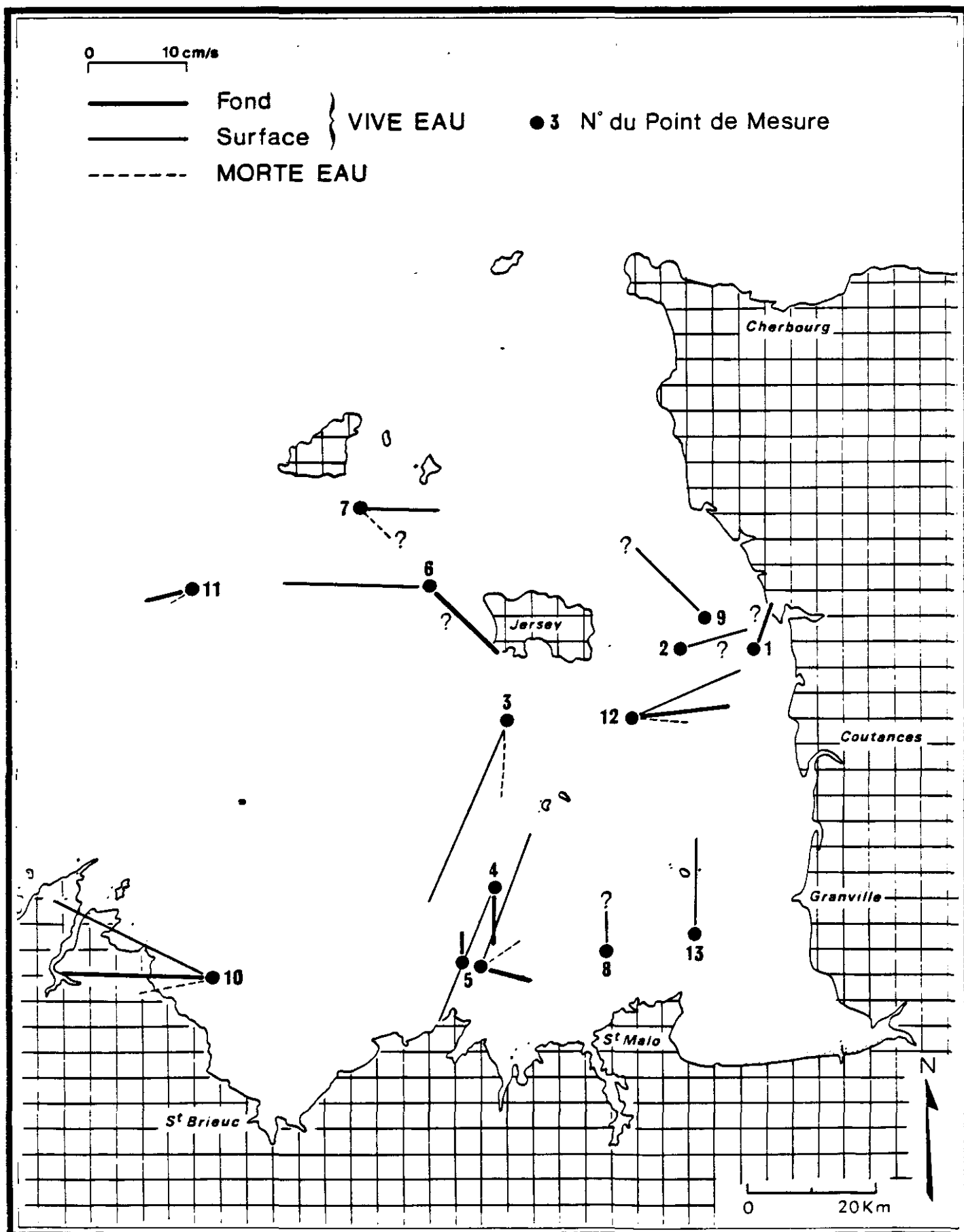
La vorticité est crée par le frottement en présence d'un fond incliné (par exemple les abords d'une  le) (mécanisme M3). Considérons le cycle de marée représenté par le schéma ci-contre : la composante de courant portant à l'Ouest génère une vorticité négative ; mais le courant, giratoire cyclonique, s'oriente progressivement vers le Sud : la vorticité est donc transportée vers le Sud. Par contre, lorsque le courant porte à l'Est en tournant vers le Nord, une vorticité positive est crée puis transportée vers la côte.

Pour une  le, il en est ainsi sur tout son pourtour. Le bilan de vorticité à l'intérieur d'un périmètre extérieur à l' le est donc positif pour un courant giratoire cyclonique, comme c'est le cas dans le Golfe Normano-Breton.



Exemples : Tourbillon cyclonique autour de Jersey, de Guernesey et des  les Chausey. Les roses de courant de la figure III-2 montrent bien

Fig III 11. Golfe Normano Breton: COURANT RESIDUEL DE MAREE
DEDUIT DES MESURES



que c'est au voisinage de ces trois îles que l'ellipticité est la plus élevée ; a contrario, au droit des Minquiers, le courant est alternatif, c'est pourquoi on n'y observe pas de tourbillon général cyclonique.

La figure III-9 visualise les vorticités résiduelles calculées simultanément aux courants de la figure III-8. Les paires de vortex positifs et négatifs autour des îles ou des caps sont spectaculaires. Les vorticités positives autour de Jersey, Guernesey et Chausey sont quant à elles présentes, mais parfois contrariées ou renforcées par des tourbillons induits par les pointes. Enfin, cette figure fait apparaître une structure de type 2 au-dessus des hauts fonds des Ecrehou au sud ouest de Carteret : dans le schéma résiduel eulérien, cette structure est "masquée" par un courant résiduel général vers le nord ouest entre Jersey et le Cotentin généré peut-être par le courant giratoire au-dessus de cette "barre" sous marine (mécanisme de type 3).

Remarque

Tous les mécanismes de création de vorticité résiduelle décrits ci-dessus font intervenir le transport des vorticités : ce dernier étant lié à l'advection du courant, on retient la nécessité de conserver les termes non-linéaires d'advection dans les résolutions numériques.

III.2.12. Validation du schéma par les mesures

Pour être interprétées en valeur résiduelle, les mesures de courant ont été filtrées à l'aide du filtre numérique de DEMERLIAC (1973) mis au point spécialement pour la marée. L'ensemble des résultats fait l'objet de l'annexe 4. La figure III.10 en constitue un exemple.

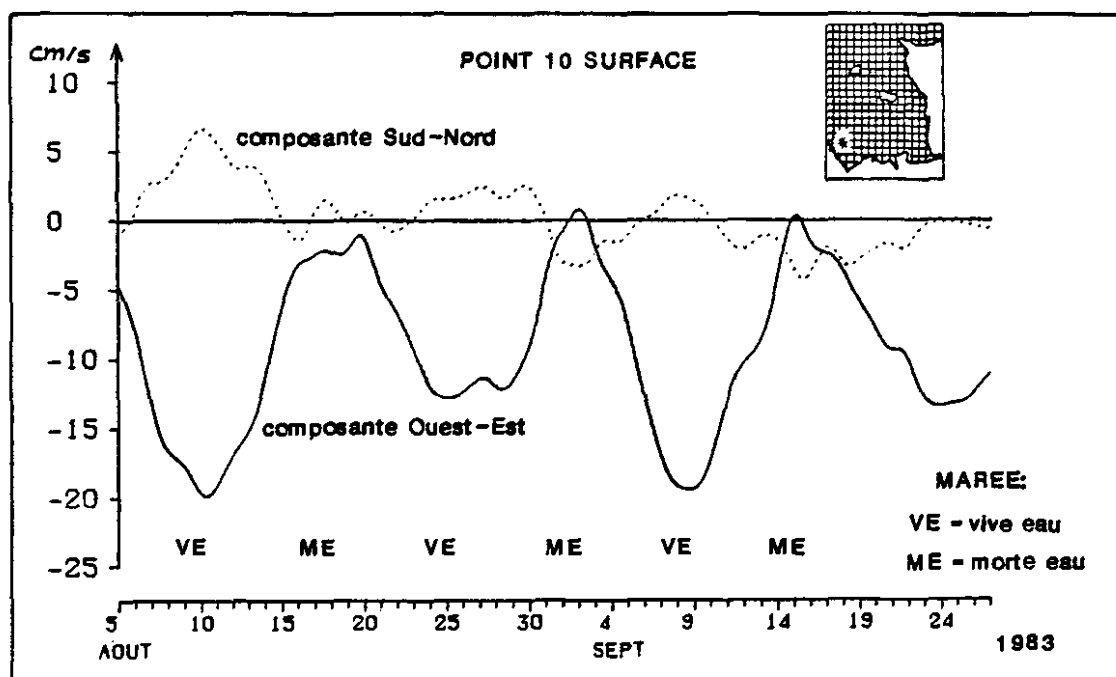
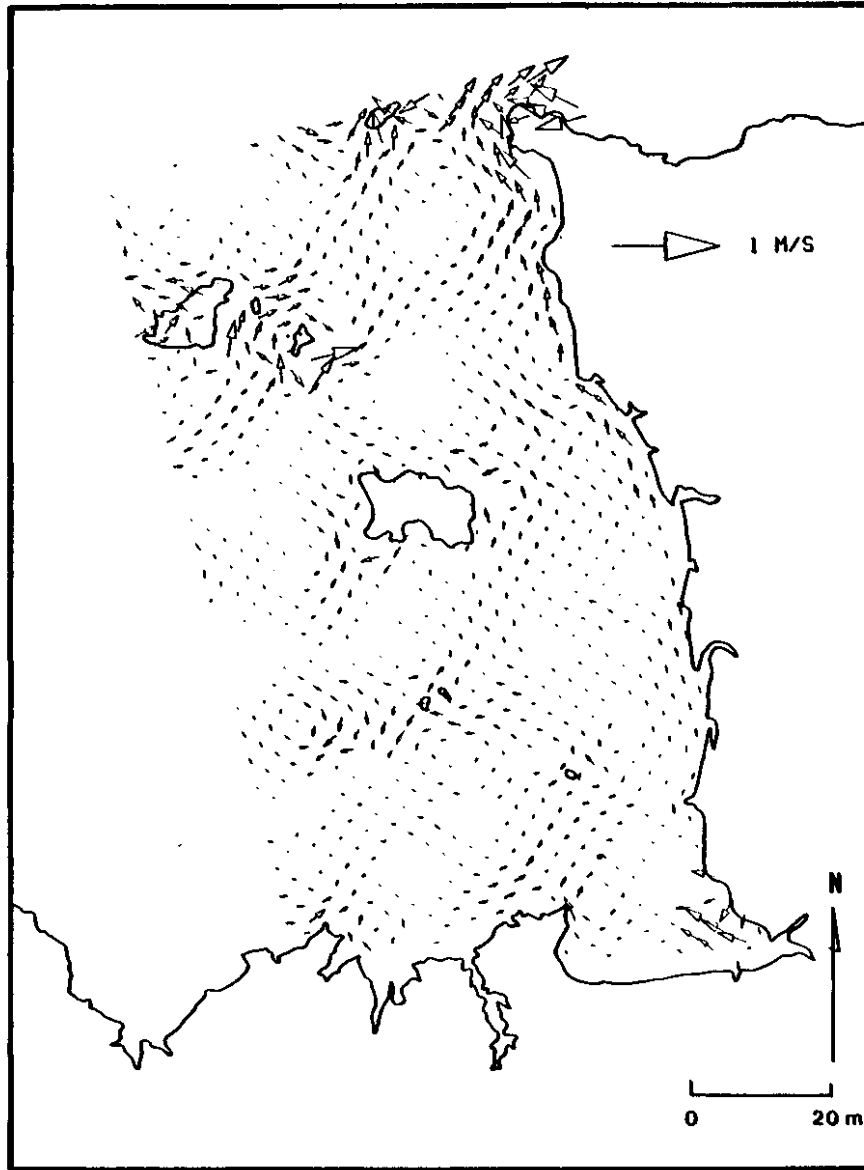


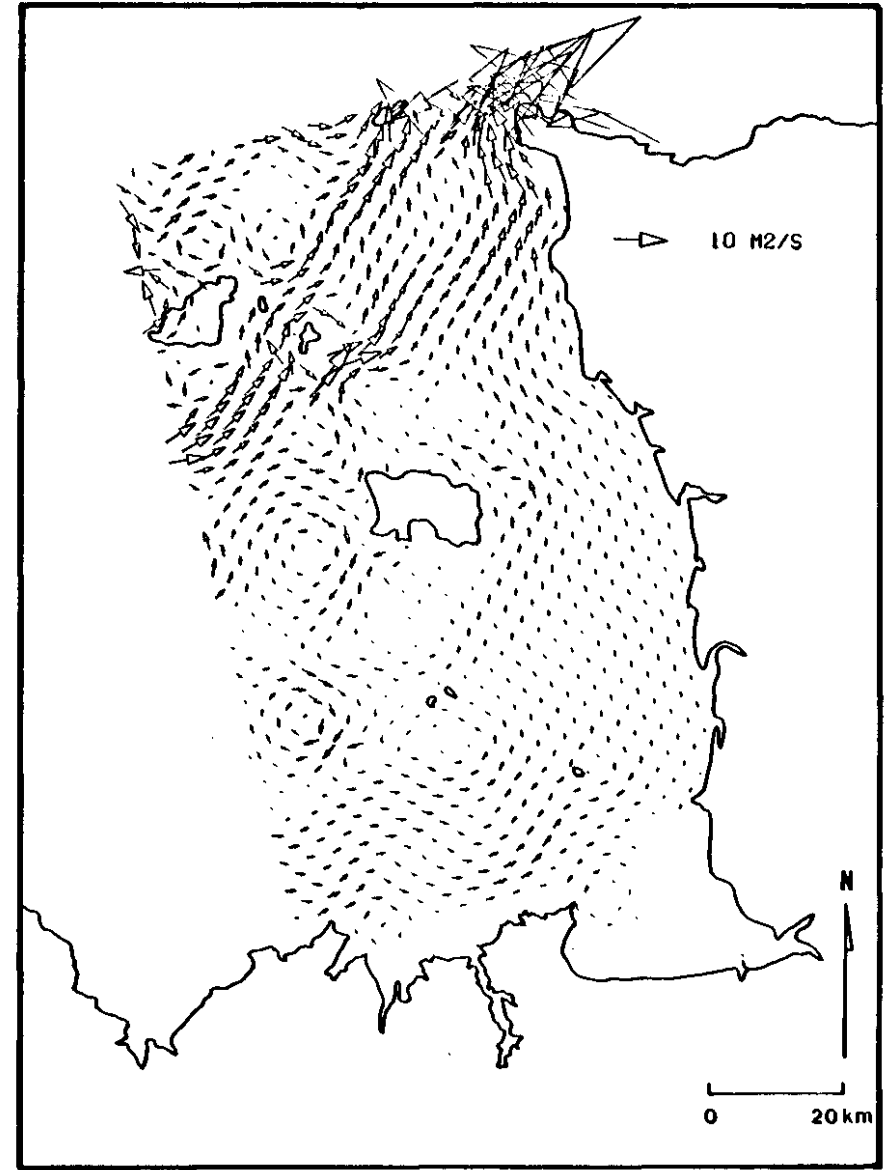
Fig. III-10 : Exemple de mesure de courant filtrée

Fig. III 12 . Golfe Normano- Breton : SIMULATION D'UNE MAREE MOYENNE : MODELE LNH

A) COURANT RESIDUEL EULERIEN



B) DEBIT RESIDUEL EULERIEN



Code de Calcul bidimensionnel CYTHERE ES1 (EDF-LNH/SOGREAH)

En recherchant visuellement la corrélation entre ce courant filtré et l'amplitude de la marée, comme dans le cas de la figure ci-dessus, une carte des courants résiduels de marée mesurés a pu être produite (figure III-11). On constate un bon accord entre les résiduelles mesurées aux points 1, 2, 3, 4, 7, 9, 10, 12 et 13 et les résultats du modèle.

Le point 5 a fait l'objet de mesures en 1982 et 1983 mais à des positions légèrement décalées. Les résultats apparemment contradictoires des mesures en résiduelles de marée résultent peut-être de la situation intermédiaire du point 5 entre les deux tourbillons générés par le cap Fréhel. Mais on note aussi une large variation selon la profondeur : tout se passe comme si près du fond le tourbillon anticyclonique engendré pendant le flot était plus petit qu'en surface, ce qui est compatible avec les hauts fonds de la baie de St Brieuc (cf. le commentaire sur le courant de marée au point 5, § III-1.2.).

A proximité des tourbillons, on remarque souvent un changement d'orientation des courants résiduels entre morte eau et vive eau (ex : points 12, 3, 10) : cela provient d'une variation du rayon du tourbillon (lié à l'intensité de la vorticité) ou parfois d'une translation de son "centre".

La mesure au point 11 donne un courant résiduel vers l'Ouest incompatible avec le résultat du modèle : compte tenu de la proximité des limites de ce dernier, il faut remettre en cause ses résultats dans ce secteur. En particulier, la dérive vers le Nord Est autour des Roches Douvres est fortement réduite si l'on modifie la pente moyenne de la surface à la limite Ouest du domaine.

Enfin le point 6 pose problème : si la mesure au fond indique comme le modèle une résiduelle vers le sud est, il n'en est pas de même en surface. S'agit-il d'un effet bathymétrique, ou d'une conséquence du front thermique souvent présent entre Jersey et Guernesey ? Ce point sera commenté au § III.3.

III.2.1.3. Comparaison des modèles

Le modèle régional du L.N.H. devant être exploité en courant résiduel pour les effets du vent, il était essentiel de connaître sa réponse en courant résiduel de marée soit pour faire la part de la marée dans les résultats, soit pour confirmer les structures mises en évidence par le modèle U.B.O. Nous avons présenté en figure III-12 le champ de courant résiduel obtenu pour un coefficient de marée 70 car c'est cette marée moyenne qui sera retenue pour l'interaction vent/marée, mais un calcul de vive eau a montré des structures identiques, avec des vitesses un peu plus fortes. Si le maillage (2 km) est comparable à celui du modèle U.B.O. (1 mille marin) les conditions aux limites sont très différentes : les variations de hauteur d'eau résultent d'une décomposition spectrale de résultats d'un calcul de vive-eau moyenne établi pour toute la Manche avec un maillage grossier (une relation de proportionnalité a été appliquée sur les marnages pour simuler une marée moyenne). Compte tenu de la proximité des caps et des îles, le niveau moyen à la limite a été corrigé à l'aide d'une relation de Bernouilli moyenne du type $S_H = -\bar{u}^2/2g$, les résiduelles près des limites devenant alors plus réalistes.

Malgré ces différences sensibles entre les conditions limite utilisées, le modèle L.N.H. indique des structures résiduelles tout à fait analogues à celles commentées dans le § III.2.1.1, avec en particulier les tourbillons du cap de la Hague, de la pointe du Grouin, du cap Fréhel, du plateau des Minquiers et la circulation autour de Jersey. Avec ce modèle nous avons calculé les débits résiduels, a priori plus représentatifs de la circulation effective des masses d'eau, en particulier dans les passages entre les îles et le littoral. Les structures précédemment décrites persistent, mais deux phénomènes apparaissent (cf. fig. III-12 b) :

- une dissymétrie entre le sud du Golfe et le nord où les masses en mouvement sont beaucoup plus importantes (grande profondeur),

- une circulation globale longeant la côte bretonne d'ouest en est puis le Cotentin du sud au nord. Un tel débit résiduel contournant l'île de Jersey de manière cyclonique avait été obtenu par PINGREE en 1977.

III.2.1.4. Compléments apportés par le modèle de détail du L.N.H.

Comme l'illustre la figure III.13, le modèle de détail fait apparaître un courant résiduel important (près de 20 cm/s) vers le nord sur une bande côtière large de quelques kilomètres devant le Cotentin. C'est probablement la résultante d'un déphasage entre les niveaux (très variables relativement à la hauteur d'eau moyenne dans cette zone) et les courants de marée. Un tel phénomène dont on imagine les conséquences pour l'environnement littoral du Cotentin, est mal reproduit par les modèles régionaux.

En ce qui concerne les débits résiduels, ce modèle confirme un transport vers le Nord, parallèle à la côte, avec des intensités de l'ordre de 2 m²/s.

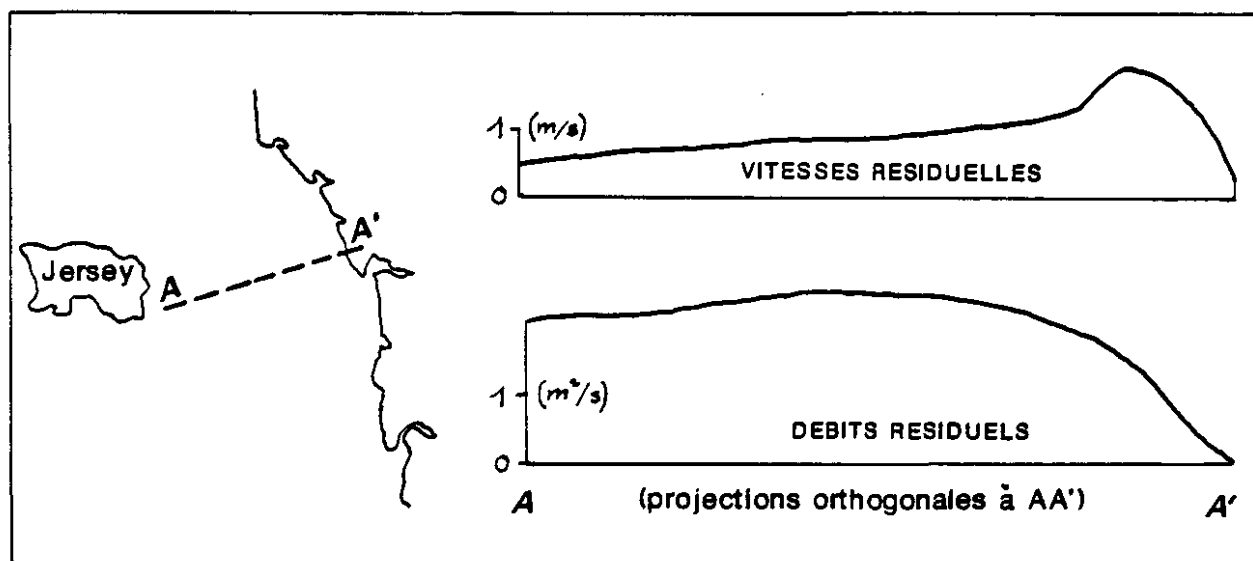


Fig. III-13 : Profils de vitesses et débits résiduels calculés avec le modèle de détail du LNH

III.2.2. Déplacements des masses d'eau

Avant de présenter un schéma de circulation lagrangienne du Golfe, il paraît essentiel de visualiser les déplacements des particules d'eau au cours d'une marée, car c'est l'amplitude de ces mouvements relativement à la topographie des lieux qui déterminera le poids de la circulation résiduelle induite par la non uniformité du champ de courant (effet de Stokes).

Des séries de trajectoires ont été simulées pendant une marée de vive eau moyenne pour des heures de départ différentes. Ainsi la figure III.14 visualise des trajectoires commençant au moment de la pleine mer à St Malo ("PM") (figure III- 14a) ou de la basse mer à St Malo ("BM") (figure III - 14b).

Les excursions de marée sont grandes : de l'ordre de 15 km en est-ouest dans la moitié sud, de 20 à 30 km selon la direction NE-SW au Nord et à l'est de Guernesey, plus ou moins giratoires au nord de Jersey (excursions de 15 km environ) mais, curieusement, nettement giratoires et faibles devant le littoral Cotentin (de l'ordre de quelques kilomètres).

Les déplacements autour des îles sont intéressants : les particules reviennent rarement à leur point de départ après une marée et contournent les îles toujours dans le sens positif. Il ne faut pas plus de 3 marées (1 jour et demi !) pour qu'une masse d'eau "lâchée" à Sercq y retourne après avoir contourné Guernesey. Ce phénomène est justifié au § III-2-3.

III.2.3. La circulation lagrangienne

III.2.3.1. Présentation d'un schéma de circulation lagrangienne

Le courant de marée étant largement prédominant dans le Golfe Normano-Breton, c'est lui qui induit la majorité des déplacements donc l'essentiel de la dérive purement lagrangienne. Aussi la circulation lagrangienne que nous allons présenter, obtenue pour une marée de vive eau sera considérée comme la circulation des masses d'eau dans le golfe, les déplacements liés aux autres facteurs (météo) pouvant s'en déduire par superposition des courants résiduels eulériens que ceux-ci provoquent.

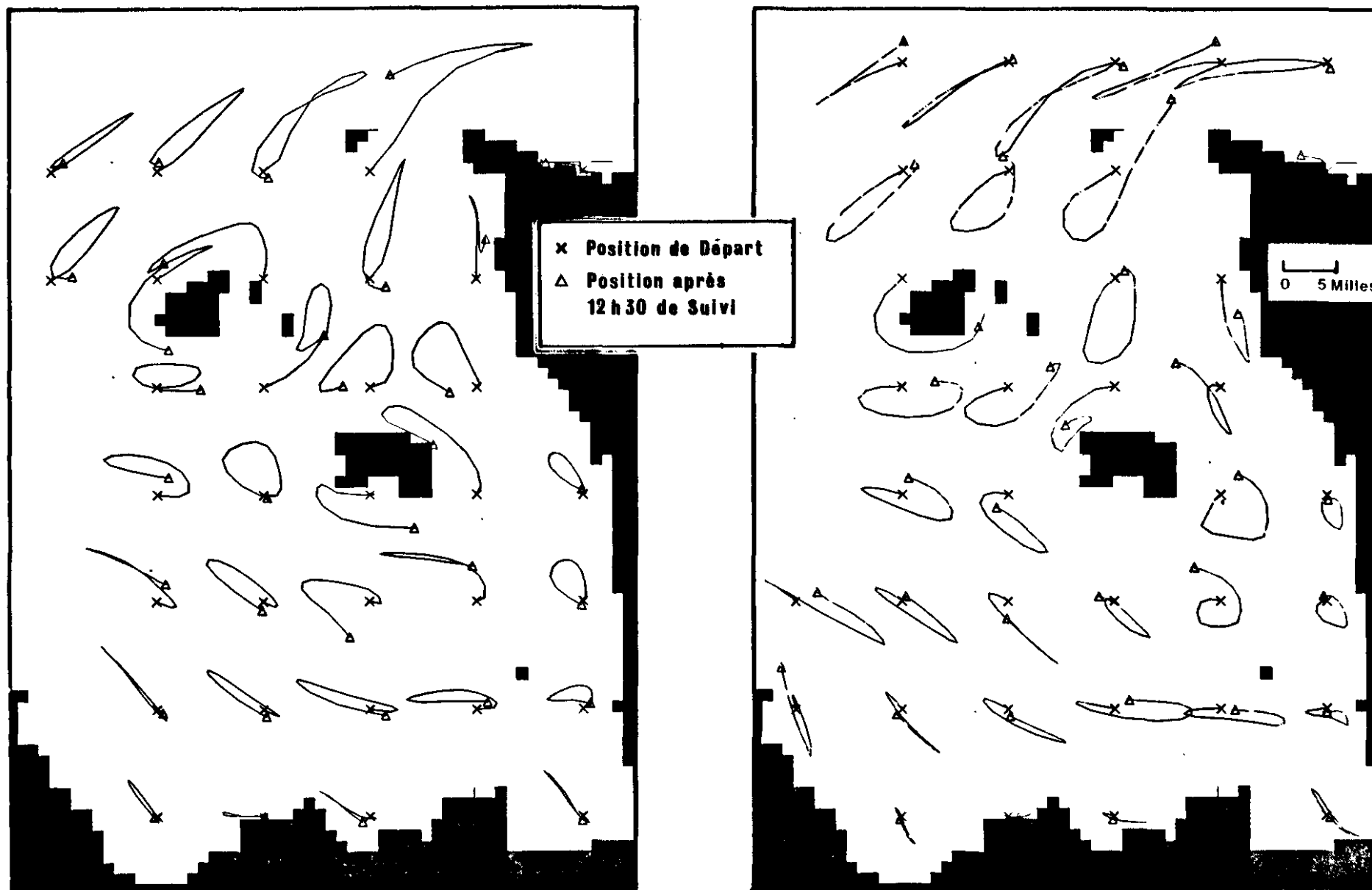
Compte-tenu des gradients bathymétriques importants, il faut s'attendre à une grande variabilité des déplacements résiduels lorsque change l'heure marée de départ. C'est ce que la figure III-15 met en évidence, en particulier près des caps et des îles. Cette variabilité doit être prise en compte lorsque l'on veut prédire la dérive d'un effluent rejeté en un point précis mais n'est pas une propriété intrinsèque de la circulation résiduelle dans la mesure où les divers déplacements issus d'un même point concernent des secteurs géographiques différents. Pour gommer cet artefact, ORBI (1986) a affecté les déplacements résiduels aux centres de gravité des excursions de marée (variables de MICHE). La figure III-16 qui représente une moyenne des résultats obtenus peut être considérée comme le schéma de circulation résiduelle lagrangienne de marée.

Fig III 14 SIMULATION NUMERIQUE DES TRAJECTOIRES DES MASSES D'EAU

Maree de Vive Eau moyenne

A) Départ : PLEINE MER à St MALO

B) Départ : BASSE MER à St MALO



(d'apres A.ORBI)

Fig III 15 : MODELE DU Golfe Normano-Breton

VARIABILITE DES DEPLACEMENTS RESIDUELS

EN FONCTION DE L'HEURE MAREE DE DEPART (Marée de Vive Eau moyenne)
d'après A.Orbi

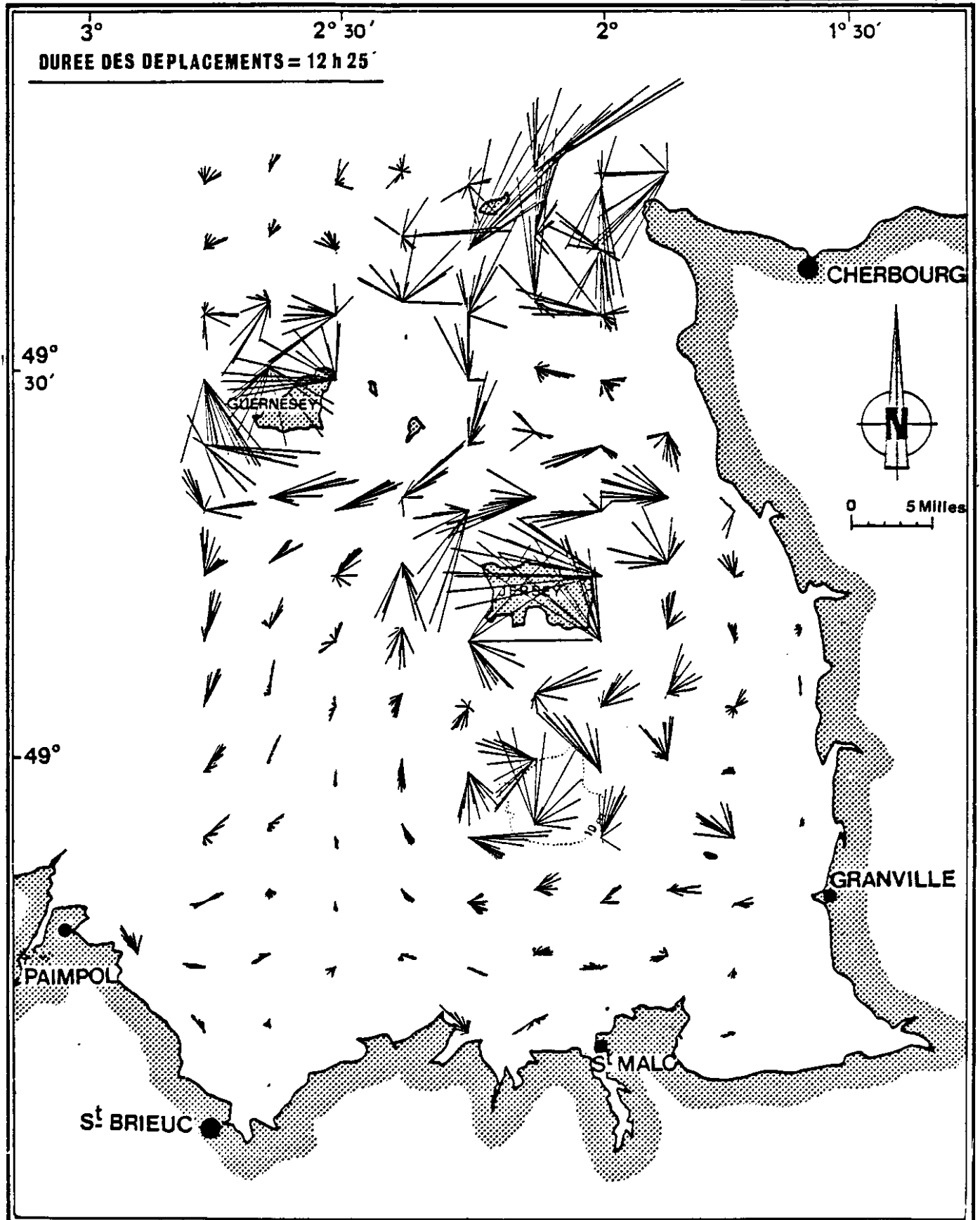
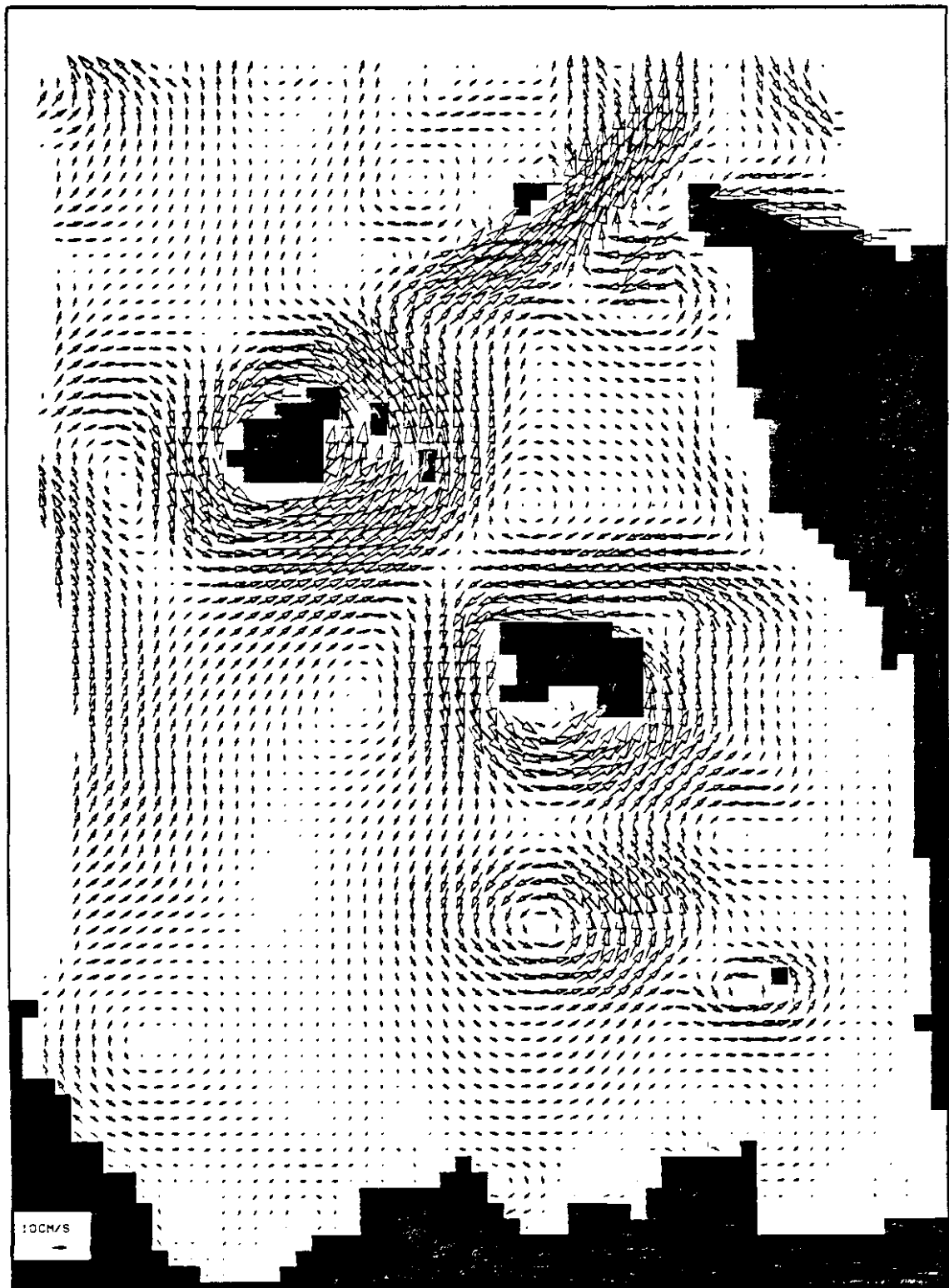


Fig.III-16 Golfe Normano-Breton : MODELISATION NUMERIQUE DE LA
CIRCULATION RESIDUELLE LAGRANGIENNE
(VIVE EAU MOYENNE)
d'après A.Orbi



Nombre de structures eulériennes ont laissé leur empreinte dans ce schéma : ainsi le tourbillon de Fréhel et surtout celui de Bréhat. Mais l'essentiel de la circulation s'est simplifié et peut se résumer en :

- 4 tourbillons cycloniques autour des îles ou archipels : Chausey, Minquiers, Jersey et Serq-Guernesey,
- un transport vers le Nord-Est au sud d'Aurigny,
- un transport vers le Sud devant Carteret, lié à un tourbillon anticyclonique dans l'espace situé entre Jersey, Guernesey et le Cotentin,
- un tourbillon cyclonique devant l'anse de Vauville,
- les tourbillons anticycloniques de Fréhel et Bréhat,
- partout ailleurs une circulation résiduelle très faible.

Il est probable cependant que le transport lagrangien vers le nord devant la côte au centre du Cotentin soit en réalité plus important si l'on tient compte des résultats eulériens fournis par le modèle de détail (cf. § III-2-1).

Enfin il faut rappeler que près des limites et tout particulièrement au Nord de Guernesey ou au voisinage des Roches Douvres, le schéma indiqué par le modèle n'est pas fiable.

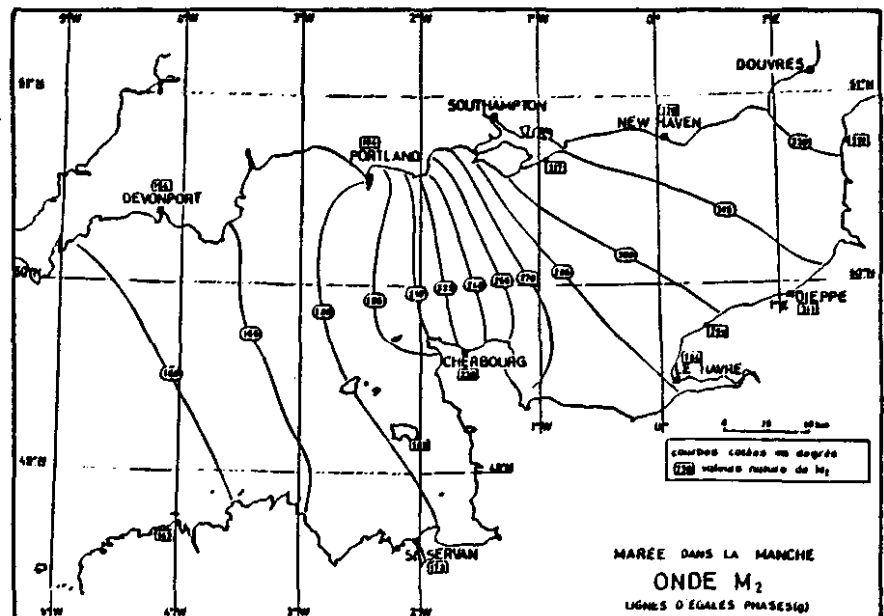
On peut chercher à expliquer l'origine des structures observées dans leur aspect purement lagrangien :

La dérive vers le Nord-Est : elle semble analogue à la dérive de Stokes dans un courant unidimensionnel induit par une onde progressive. Autour de Guernesey la marée présente effectivement un caractère progressif (cf. figure III-17 ci-dessous).

Figure III.17 :
Phases de l'onde M₂ dans la Manche

Résultats du modèle physique de l'I.M.G.

(D'après CHABERT
D'HYERES et LE
PROVOST, 1978).



Si c est la vitesse de phase de l'onde progressive et U_{\max} le courant de marée maximal, on peut évaluer la dérive de Stokes :

$$U_s = \frac{U_{\max}^2}{2c}$$

entre Guernesey et Aurigny, $c \approx \frac{35\text{km}}{0,5 \text{ heure}} \approx 20 \text{ m/s}$

(Fig. III-17)

$$\begin{aligned} U_{\max} &\approx 2\text{m/s} \\ \text{d'où } U_s &\approx 0,1 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Cette dérive purement lagrangienne est renforcée par la résiduelle eulérienne au sud d'Aurigny tandis qu'au nord elles se contrarient.

Les tourbillons cycloniques autour des îles

Ils résultent eux aussi du déphasage du courant de marée vu par une particule se déplaçant dans le voisinage d'une île et donc parallèlement à la côte. Ainsi PINGREE et MADDOCK (1985) ont montré que pour une île schématisée de rayon "a" en présence d'un courant sinusoidal giratoire au large (de pulsation ω), la dérive de Stokes était tangentielle à l'île, confinée à moins d'une distance "a", dirigée dans le sens de giration du courant, avec une intensité maximale :

$$U_s = \frac{U_{\max}^2}{2a \cdot \omega}$$

$$\begin{aligned} \text{Ainsi autour de Jersey : } a &\approx 7.000 \text{ m} \\ \omega &= 1.4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1} \\ U_{\max} &\approx 1.4 \text{ m/s} \end{aligned} \left. \vphantom{\begin{aligned} a \\ \omega \\ U_{\max} \end{aligned}} \right\} \Rightarrow U_s \approx 1\text{m/s}$$

en fait l'établissement de la formule ci-dessus n'est valable que pour une île de grande dimension par rapport à l'excursion de marée (condition $U_{\max}^2 \ll \omega a$).

On note cependant l'importance de cet effet lagrangien, en plein accord avec le résultat de la figure III-16.

N.B. : On peut retenir que la dérive purement lagrangienne est liée essentiellement au déphasage des courants maxima. Ainsi on pourrait chercher à la déduire de la carte des phases du courant lié à l'onde M2.

III.2.3.2. Validation du schéma lagrangien

Les vérifications in situ de vitesses lagrangiennes sont délicates en raison de leurs variabilités, d'autant plus que les déplacements de flotteurs intègrent les évolutions météorologiques. Les résultats portés en annexe montrent que :

- le transport vers le Nord devant le Cotentin, à hauteur de Jersey est confirmé,
- les contournements des Minquiers ou de Guernesey dans le sens positif sont aussi vérifiés,
- Comme dans le modèle, la résiduelle est faible au Nord du Cap Fréhel,
- de même une stagnation des masses d'eau a pu être constatée au Nord Est des Minquiers,
- un flotteur lâché au Sud de Guernesey a été poussé par un vent de Sud Ouest vers le Nord Est puis a décrit en 6 j un tourbillon anticyclonique au large du cap de Flamanville, comme l'avait suggéré le tourbillon indiqué par le modèle à cet endroit,
- par contre deux suivis effectués autour des Roches Douvres confirment l'erreur du modèle près de la limite Ouest.

Pour illustrer l'accord entre les mesures lagrangiennes et le modèle numérique, nous avons sélectionné la trajectoire présentée en figure III-18, qui est remarquablement conforme aux prévisions du modèle.

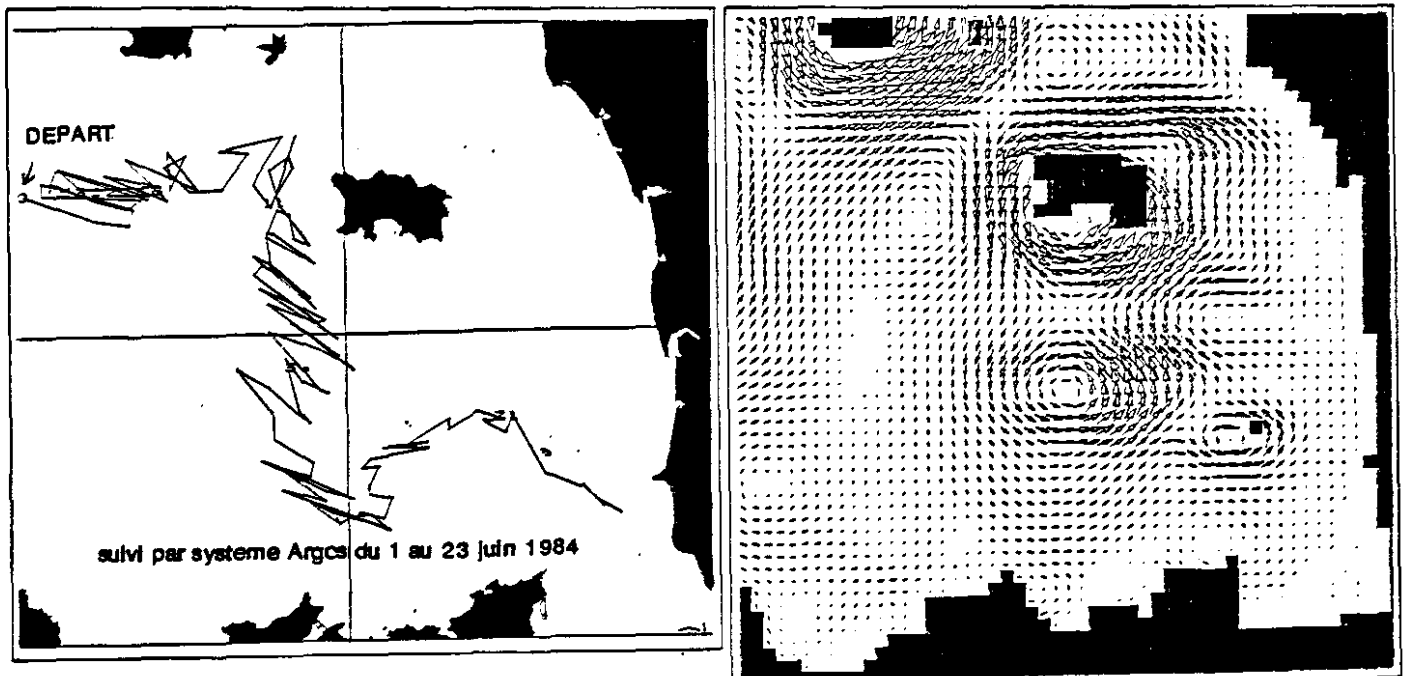


Fig. III-18 : Comparaison entre la trajectoire d'une bouée et le courant résiduel lagrangien calculé par le modèle

L'analyse des conséquences pour l'environnement (devenir des masses d'eau, transport de polluants ...) du schéma de circulation lagrangienne sera développée au chapitre VI.

III.3 - CIRCULATION LIEE AU "FRONT THERMIQUE" ENTRE JERSEY ET GUERNESEY

Il peut paraître paradoxal de présenter un courant induit par un front thermique dans un chapitre sur la circulation de marée. La raison est que la stabilité de ce front repose sur la configuration des courants résiduels entre Jersey et Guernesey.

Sur les images satellites à moyenne résolution du type NOAA (Canal infra-rouge, résolution ≈ 1 km) apparaît souvent un gradient thermique élevé entre Jersey et Guernesey et notamment pendant l'été, lorsque les écarts de température entre les eaux du large et les eaux continentales sont importants (cf. volume 2, chapitre I-1 et figure III-19 ci-après).

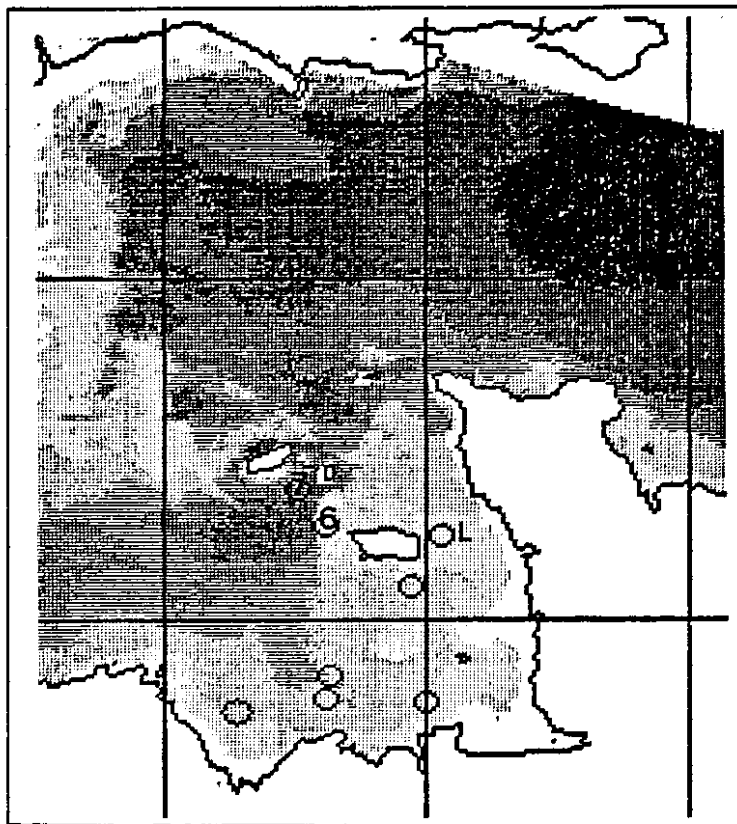


Image du 14/07/1983 à 8h08
Satellite NOAA-8
Canal 4 (infrarouge)

Coefficient de marée : 90

○ : positions des mouillages de courantomètres.

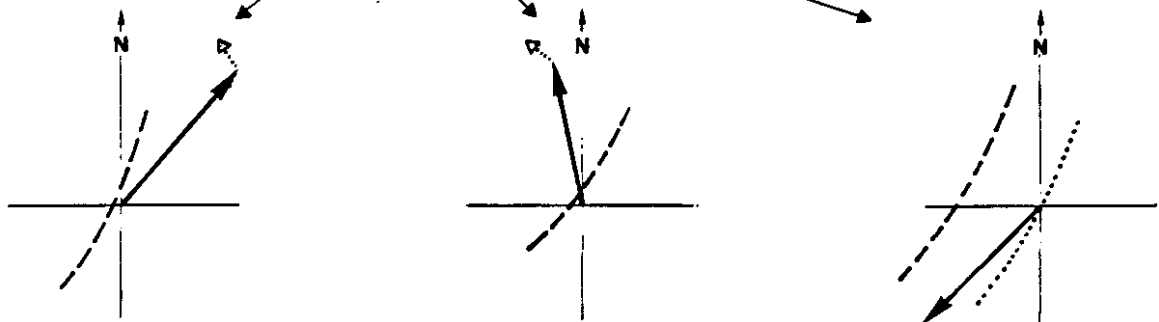
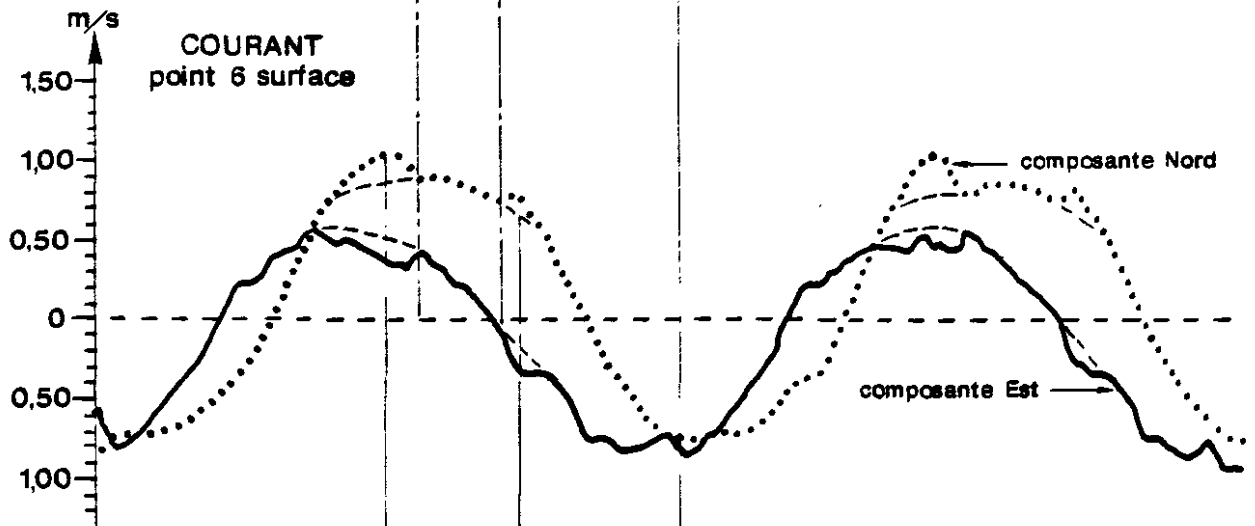
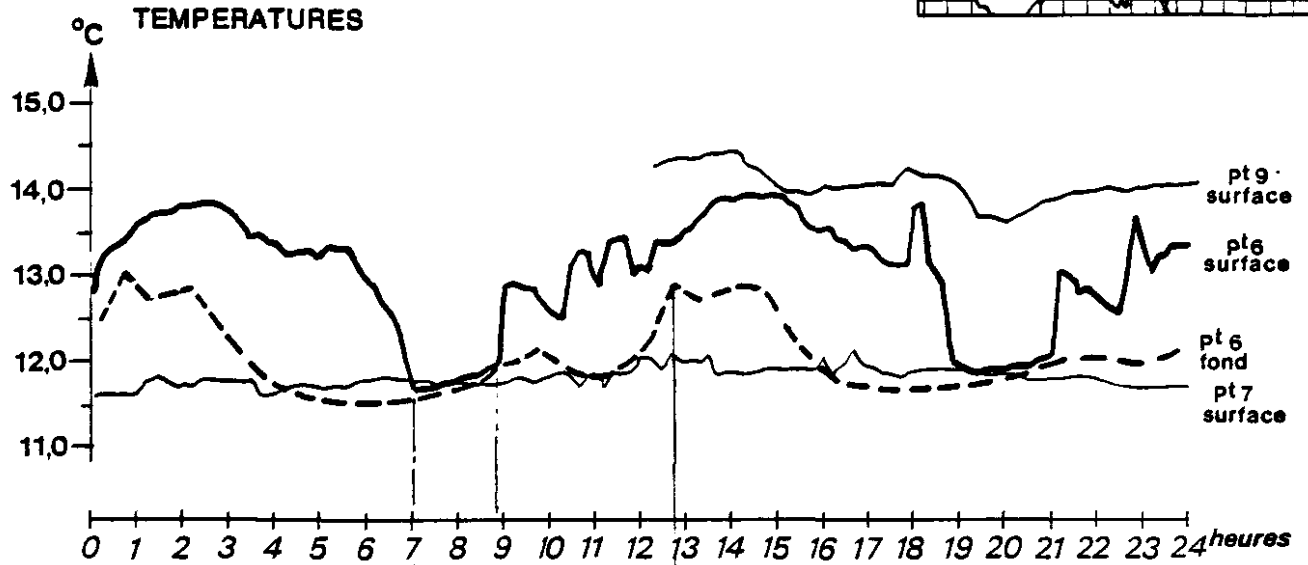
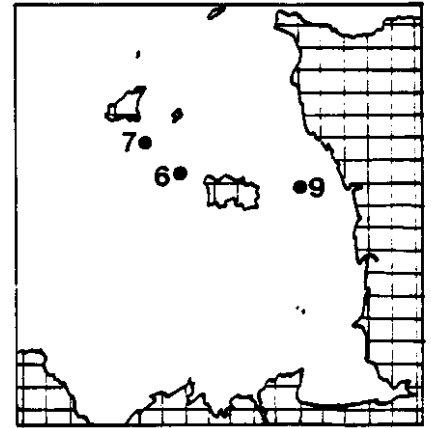
Figure III.19 : Image satellite mettant en évidence un front thermique entre Jersey et Guernesey. (IFREMER - DERO/AT et SDIT/DI).

Fig.III-20

EVOLUTION SIMULTANEE

du COURANT et des TEMPERATURES

entre JERSEY et GUERNESEY le 11 juin 1983



INTERPRETATION

- ▶ courant de marée
-▶ courant "frontal"
- - - - - position présumée du front en surface
- position présumée du front au fond

Ce front a été précédemment observé et décrit par PINGREE (PINGREE et al., 1974).

Lors de la campagne 1983, des mesures de courant et de température aux points 6 et 7 (représentés sur la figure III-19) ont permis de préciser certains effets du front sur la circulation des masses d'eau.

III.3.1. - Interprétation des mesures

Nous avons présenté en figure III-20 l'évolution simultanée des températures aux points 7 (surface), 9 (surface) et 6 (surface et fond) ainsi que des courants au point 6 en surface et au fond, le 11 juin 1983 en période d'occurrence du front (pour la position des points voir fig. II.1.). On observe que :

- les températures en 9 et 7 varient peu au cours de la marée et sont représentatives de deux masses d'eau distinctes : l'eau "Manche Ouest" d'une part (que nous appelons zone froide) et l'eau "Cotentin" d'autre part, plus chaude (+ 2,5° C) en raison des faibles profondeurs à l'Est du Golfe.

- les températures en 6-surface et 6 fond oscillent entre les valeurs précédentes, avec des variations brutales signifiant le passage du front,

- de part et d'autre du front, les eaux sont homogènes : entre 7 et 9 heures, les températures en 6 surface, 6 fond et 7 sont identiques. A 2 h ou 14 h, la température en 6 fond approche - sans l'atteindre - la température en 9,

- à 7 h, quand le point 6 voit le front passer en surface (6 fond reste en zone froide), le courant porte au Nord-Nord Est,

- à 9 h, quand le front repasse, le courant est Nord-Nord Ouest.

Compte tenu de l'orientation du front parallèle au courant de marée (pour des raisons de stabilité, et conformément aux images satellites), il s'agit donc de traversées tangentielles du front. A ces instants le courant présente une survitesse de l'ordre de 20 cm/s orienté à 70° du courant de marée, vers le front.

- A 13 h, alors que le courant porte au Sud Ouest, le point 6 surface est toujours en zone Cotentin, tandis que le fond voit passer le front et "parvient" lui aussi en zone homogène chaude.

On peut donc en déduire l'allure de la surface frontale, telle qu'indiquée sur la figure III-20. On peut aussi évaluer la pente de ce front : compte tenu de la composante du courant de marée perpendiculaire à la direction présumée du front, on obtient une distance de 0,4 m/s x 4 heures \approx 5,8 km entre les intersections du front avec la surface et le fond. Pour une hauteur d'eau locale de 40 m, cela donne une pente de 0,7 %.

Enfin le courant frontal observé lors du passage du front apparaît en surface du côté "stratifié", convergent vers le front mais avec une composante parallèle vers la droite : il s'agit probablement d'un équilibre partiellement géostrophique.

III.3.2. - Quelques calculs analytiques

Diverses théories schématiques sur l'équilibre d'un front ont été présentées.

a) OFFICER (1976), BOWMAN et IVERSON (1978) et BOWDEN (1983) proposent un équilibre entre les gradients de pression (qu'ils soient induits par une pente ou par la densité) et les forces de frottement.

Equations

Conservation de la quantité de mouvement dans les couches (1) et (2) :

$$\frac{\partial}{\partial x} [\rho_1 g(\zeta - z)] = \rho_1 N_z \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} [\rho_1 g(\zeta - h_1) + \rho_2 g(h_1 - z)] = \rho_2 N_z \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2}$$

Continuité :

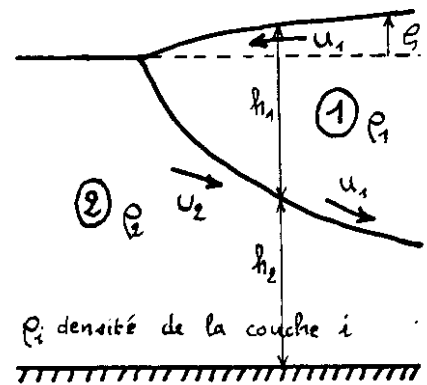
$$\int_{-h_1}^0 u_1 dz = 0$$

Conditions Limites

- en surface : $\partial u_1 / \partial z = 0$

- à l'interface : $u_1 = u_2$

- $u_2(z) = \text{cte}$ $\rho_1 N_z \frac{\partial u_1}{\partial z} = k \rho_2 u_2^2$



Solution

Profil du front

$$h_1^+ = - \frac{36 N_z^2}{k \gamma g} x \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}$$

vitesses

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

$$u_2 = -2 u_s$$

$$u_s(\text{surface}) = \frac{3 \rho_1 N_z}{2 \rho_2 k h_1}$$

Application numérique

$$\left. \begin{array}{l} \gamma = 4 \cdot 10^{-4} \\ N_z = 10^{-3} \\ k \approx 3 \cdot 10^{-3} \end{array} \right\} \Rightarrow h_1^+ \approx 3,3 x$$

$h_1 = 1 \text{ m}$ à $x = 0,3 \text{ m}$ du front
avec $u_s = 0,5 \text{ m/s}$

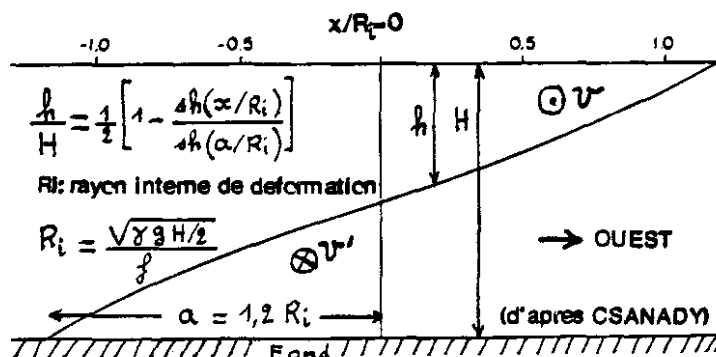
$h_1 = 5 \text{ m}$ à $x = 190 \text{ m}$ du front
avec $u_s = 0,1 \text{ m/s}$

La vitesse de convergence ainsi calculée en surface est du même ordre que celle mesurée au point 6. On peut aussi la rapprocher du courant (0.25 m/s) déduit par PINGREE de la dérive de deux flotteurs qu'il avait suivis de part et d'autre de ce front (PINGREE et al, 1974).

Le modèle précédent a l'inconvénient de négliger l'effet de Coriolis et d'imposer un courant u_2 - ou ce qui revient au même, une propagation ($-u_2$) du front - pour que la structure soit en équilibre. Enfin, compte tenu de l'hypothèse $u_2(z) = C^{te}$, il ne peut décrire que la partie superficielle du front.

b) CSANADY (1982) propose un modèle basé sur 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 "v" parallèle au front. Les résultats sont visualisés sur les figures ci-dessous :

PROFIL DU FRONT



Application au front

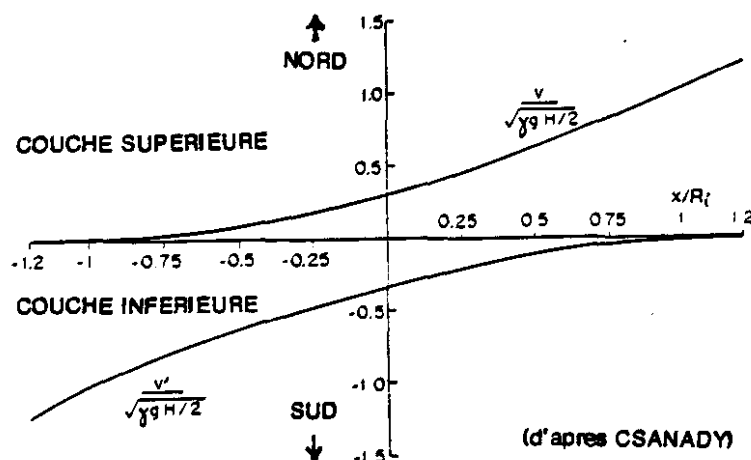
Jersey-Guernesey :

$$\left. \begin{array}{l} \delta : 4 \cdot 10^{-4} \\ H : 40 \text{ m} \\ f : 10^{-4} \end{array} \right\} Ri = 2830 \text{ m}$$

Largeur du front :

$$2a = 2 \cdot (1,2 \cdot R_i) \approx 6800 \text{ m}$$

PROFIL DES VITESSES



v surface : 0.34 cm/s

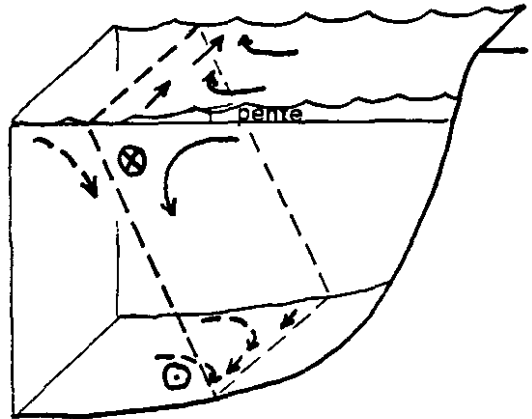
v mi-profondeur :

0,08 cm/s

La largeur du front ainsi modélisé est en accord avec celle déduite de l'enregistrement du courant et des températures au point 6. Cependant, les vitesses semblent surestimées par rapport à ces mêmes mesures.

Dans la réalité, les deux mécanismes se combinent pour assurer l'équilibre tel que représenté sur le schéma ci-contre :

- 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 convergente ou divergente 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 (par géostrophie).



III.3.3. - Stabilité du front et conséquences sur la circulation résiduelle

Il paraît surprenant qu'un front soit en équilibre dans une zone à fort courant de marée susceptible d'assurer un mélange total. En fait, le front est entretenu par un "apport" permanent des masses d'eau "réchauffées" près du Cotentin grâce à la circulation cyclonique autour de Jersey mise en évidence au paragraphe III-2.

Il semble aussi que les courants résiduels de marée cycloniques autour des deux îles, donc opposés à mi-chemin, renforcent la structure frontale qui impose par géostrophie un courant vers le Nord à l'Ouest (en surface) et vers le Sud à l'Est (au fond).

Quoi qu'il en soit, la circulation dans le secteur Cotentin/Jersey/Guernesey peut être résumée par la figure III.2 1. Les effets du front sur les courants résiduels y sont représentés et expliquent les différences obtenues sur les courants moyens enregistrés au point 6 surface et 6 Fond (voir aussi annexe 4).

L'effet du front sur la résiduelle est probablement multiple : une fraction des masses d'eau contournant Jersey est reprise par le courant géostrophique vers le Nord puis par le tourbillon cyclonique de Guernesey. Une autre partie - plus importante - "plonge" en se mélangeant aux eaux plus denses et subit une accélération vers le Sud provoquée à la fois par le front et la marée.

Remarque : Il est important de préciser que pendant la quasi totalité des enregistrements de courant et température au point 6 en juin-juillet, des traversées du front telles que décrites au § III.3.1. ont été observées : la position du front semble donc relativement stable.

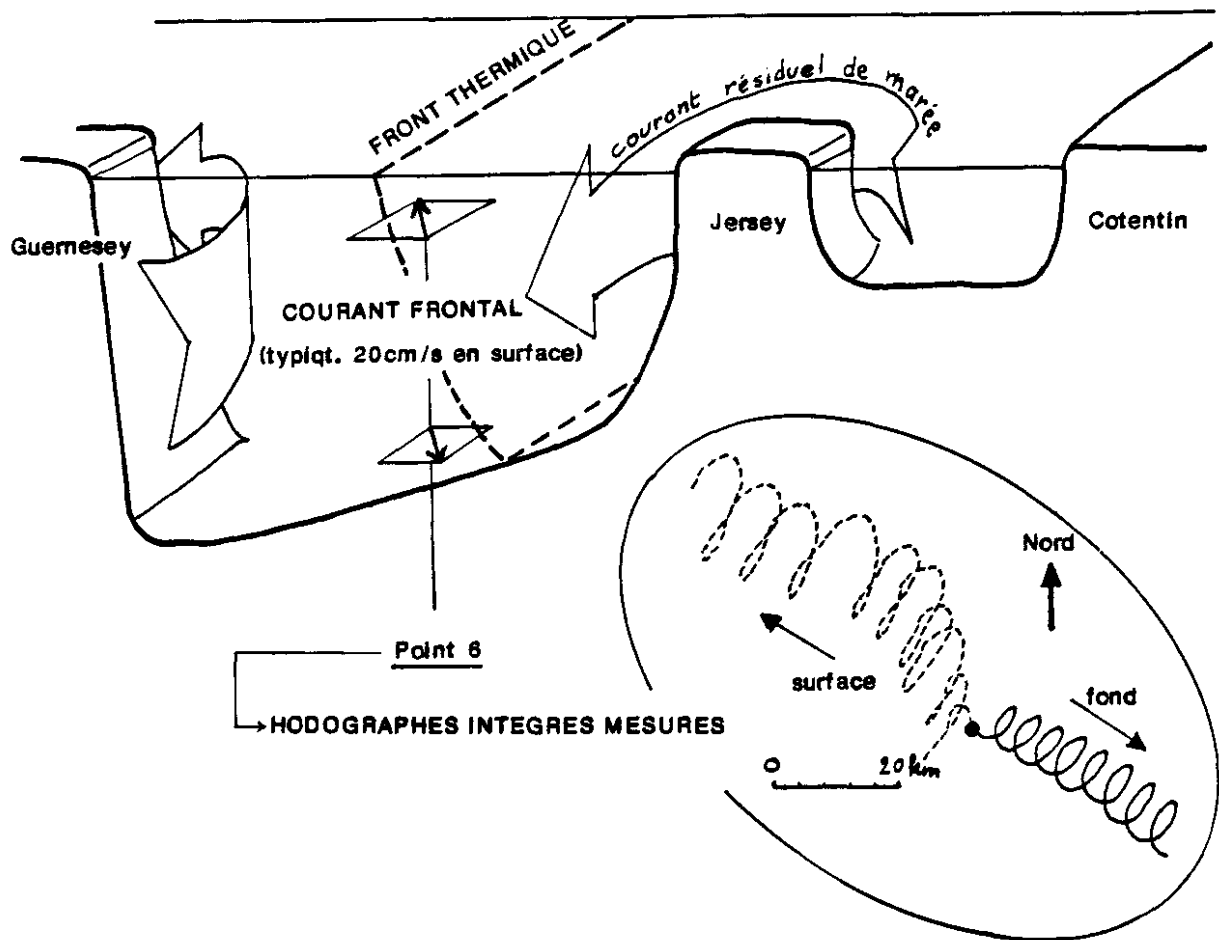


Fig. III-21 : Schéma de circulation des masses d'eau autour de Jersey
Effet du front sur les courants résiduels.

L'ampleur des courants liés au front de Jersey-Guernesey est telle que le schéma de circulation induite par la marée peut être modifié. Les structures thermiques méritent donc d'être mieux surveillées à l'aide des images satellites, en particulier entre Jersey et la Pointe du Grouin où les gradients de températures sont non négligeables et les profondeurs déjà importantes.

CHAPITRE IV

CIRCULATION INDUITE PAR LES EFFETS METEOROLOGIQUES

CHAPITRE IV - CIRCULATION INDUITE PAR LES EFFETS METEOROLOGIQUES

A l'échelle régionale que nous considérons, les événements météorologiques interviennent triplement :

- les gradients de pression atmosphérique génèrent un courant dans la masse d'eau qui tend vers un équilibre grâce à une pente de la surface libre. Il s'agit d'un phénomène de grande échelle qui ne peut être simulé que sur de larges emprises (au moins la Manche), mais qui influence les conditions à la limite du golfe.

- Les systèmes dépressionnaires donnent naissance à un champ de vent qui génère une circulation à l'échelle du plateau continental, ici encore sont nécessaires des modèles très étendus tels que le modèle Manche-Mer du Nord de NIHOUL, le modèle Mer Celtique-Manche de l'IMG* (LE PROVOST) ou le modèle Mer Celtique-Manche-Mer du nord du LNH.

- Le vent local engendre par entraînement une circulation locale qui est d'autant plus intense que les eaux sont peu profondes et qui présente de fortes variations verticales.

Enfin, il faut noter le caractère hautement instable du forcing météorologique qui en rend l'étude très difficile. En particulier l'interprétation des mesures concernant les courants induits par le vent est délicate car celui-ci a des variations rapides et les réponses des bassins côtiers sont non linéaires, avec des déphasages variables (cf. annexe III).

Quoi qu'il en soit nous avons cherché à tester la sensibilité du courant au vent local en simulant des vents-type à l'aide du modèle régional du L.N.H.

IV.1. - SIMULATION D'UN VENT-TYPE

IV.1.1. Les problèmes posés et les hypothèses de calcul

IV.1.1.1. La modélisation bidimensionnelle

L'effet du vent est représenté par la tension de surface qu'il applique à la masse d'eau.

L'expression retenue pour la tension est classique :

$$\tau_s = \gamma \cdot \rho_a \cdot W^2$$

où W : vitesse du vent

ρ_a : masse volumique de l'air (1,23 kg/m³)

γ : coefficient, choisi variable selon W :

$$\begin{aligned} \text{pour } W < 25 \text{ m/s} & \quad \gamma = (0.0008 + 0.00008 \cdot W) \\ \text{pour } W > 25 \text{ m/s} & \quad \gamma = 0.0028 \end{aligned}$$

* I.M.G. : Institut de Mécanique de Grenoble.

Au large le courant induit par le vent est maximum en surface, orienté à droite du lit du vent dans l'hémisphère Nord et présente un profil hélicoïdal lié à la force de Coriolis (spirale d'Ekman). Près des côtes, ce profil est modifié pour que le courant satisfasse la continuité, mais reste non uniforme sur la verticale. Lorsque l'on tient compte d'une variation réaliste de la diffusion verticale, on montre que le courant de surface est plus près de la direction du vent et que si les hauteurs d'eau sont faibles, le profil des vitesses est plus uniforme. Dans ce cas, schématiquement, le vent génère par diffusion un courant de masse dont l'énergie est dissipée par frottement sur le fond et qui, par continuité, modifie la position de la surface libre. Dans l'hypothèse des profondeurs relativement faibles (typiquement < 50 m), l'équilibre entre tension de surface exercée par le vent, frottement exercé par le fond, accélération dans la masse et pente de la surface peut être décrit par un modèle bidimensionnel. C'est l'objet de notre travail.

Cependant, les phénomènes suivants seront mal reproduits :

- la présence d'accidents topographiques du type dépressions peut favoriser la création de courants de retour et de cellules de circulation dans le plan vertical, comme cela a été montré en baie de Seine (LE HIR et al, 1985). Dans le Golfe Normano-Breton, on peut s'attendre à de telles structures dans les dépressions au nord et au sud de l'archipel des Minquiers. En ces endroits la comparaison entre modèle et mesures surface/fond doit être pertinente.

- Le profil des vitesses près de la surface (environ 10 % de la hauteur d'eau) est quasiment exponentiel : la modélisation bidimensionnelle ne peut évidemment pas décrire l'entraînement à la surface de l'eau (mais il paraît raisonnable d'y appliquer une loi empirique du type "pourcentage de la vitesse du vent, fortement décroissant avec la distance à la surface").

- Le frottement sur le fond est physiquement lié aux vitesses près du fond : si le profil réel est vraiment non uniforme, le frottement de fond "vu" par un modèle bidimensionnel - donc exprimé en fonction du courant moyen - est erroné. Heureusement, on a vu que le profil des vitesses est d'autant moins uniforme que les hauteurs d'eau sont grandes : dans ce cas le rôle joué par le frottement sur le fond est moindre.

IV.1.1.2. La "représentation" du courant

Puisque le modèle bidimensionnel permet seulement d'accéder à un courant moyen pas très représentatif du courant en surface ou au fond, il peut être intéressant de considérer le débit sur la verticale, très utile pour établir des bilans de masses d'eau. Toutefois dans les secteurs littoraux à faibles profondeurs, les vitesses rendent mieux compte des déplacements résiduels pendant une durée de vent donnée. Dans la suite, courants et débits seront donc examinés.

IV.1.1.3. Interaction avec la marée

Les effets du vent et de la propagation de la marée ne sont pas découplés : au niveau des équations, les deux "forcings" interagissent par les termes non linéaires, à savoir l'advection et surtout le frottement sur le fond (sous forme quadratique). Concrètement, la dissipation par frottement de l'énergie apportée par le vent sera d'autant plus efficace que le fluide sera déjà en mouvement.

Compte tenu de l'amplitude des marées dans le Golfe Normano-Breton, il paraît primordial d'en étudier l'impact sur les courants induits par le vent. Pratiquement, nous allons comparer l'effet d'un vent permanent seul et celui d'un vent superposé à une marée moyenne (coefficient 70).

IV.1.1.4. Définition d'un vent-type - Conditions à la limite

Les vents-type qui vont être traités sont des vents uniformes, de direction constante et d'intensité graduellement variable de 0 à 15 m/s pendant les huit premières heures de simulation, puis constants (15 m/s). Un état d'équilibre est alors recherché.

La détermination des conditions limite demeure un problème crucial, en particulier pour le modèle du golfe où les frontières ouvertes sont très près des accidents bathymétriques. Il est clair que le vent y génère des pentes et des débits a priori inconnus.

1er cas - simulation du vent seul.

Conformément aux conclusions d'une intercomparaison de conditions aux limites ouvertes (CHAPMAN, 1985) nous avons essayé plusieurs types de conditions, en essayant d'éviter de "rigidifier" les frontières ouvertes. Ainsi 5 tests ont été réalisés :

- Condition limite en hauteurs fixes, caractérisée par une ligne de surface horizontale (les débits sont alors calculés par le modèle),

- condition limite en hauteurs, avec pente transversale nulle et avec pivot (i.e. hauteur fixe ponctuellement) sur la limite Est ou à l'angle Nord-Ouest.

- condition limite en hauteur, de type "radiation" :

$$H_{lim}^{t+\Delta t} - H_{lim}^t = C \frac{\Delta t}{\Delta x} (H_{lim}^t - H_{lim}^t \pm \Delta x)$$

avec $C = \sqrt{gh}$ célérité des ondes de gravité

$\Delta t, \Delta x$: pas de temps, d'espace

- condition en hauteur, de type "régime permanent", i.e. telle que la conservation de la quantité de mouvement parallèlement à la limite et en régime permanent soit respectée :

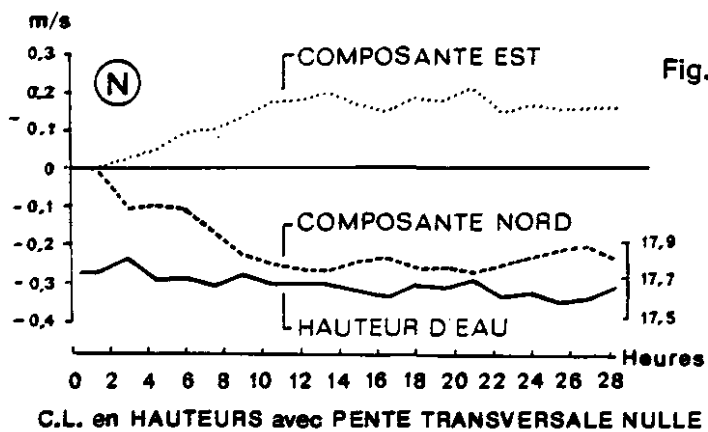


Fig.IV-1 CALCUL DU COURANT ET DE LA SURCOTE INDUITS PAR LE VENT.

EFFET DES CONDITIONS A LA LIMITE

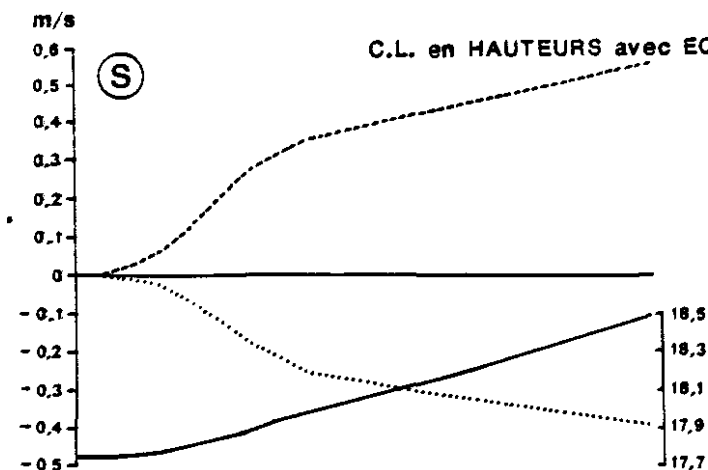
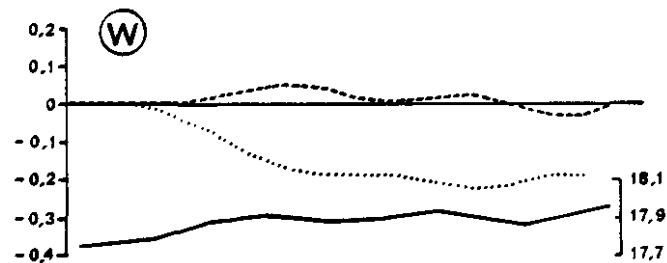
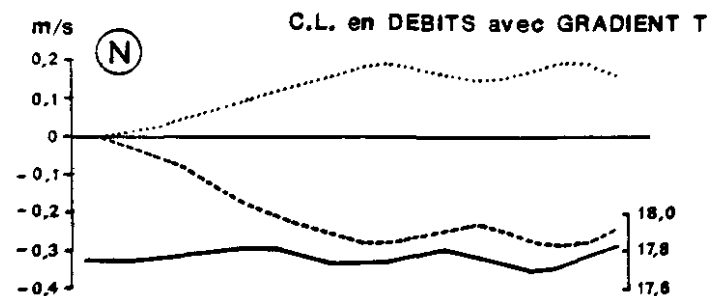
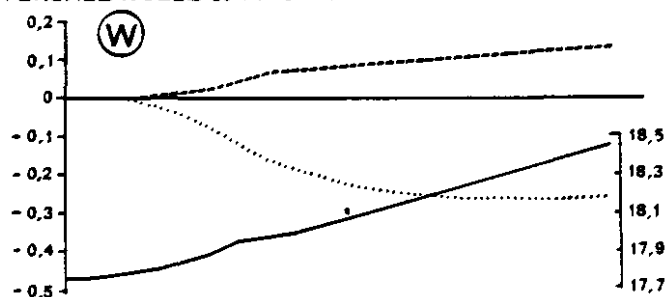
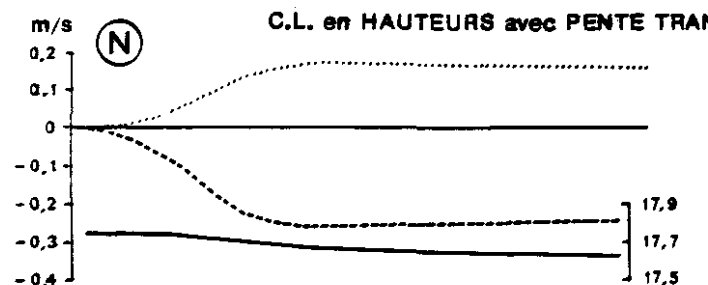
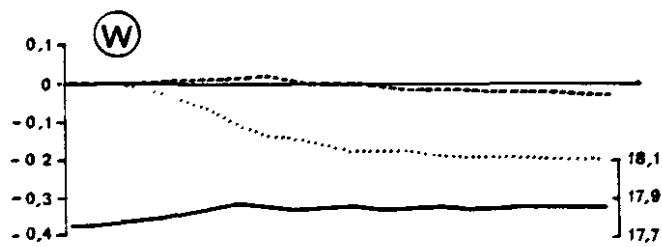
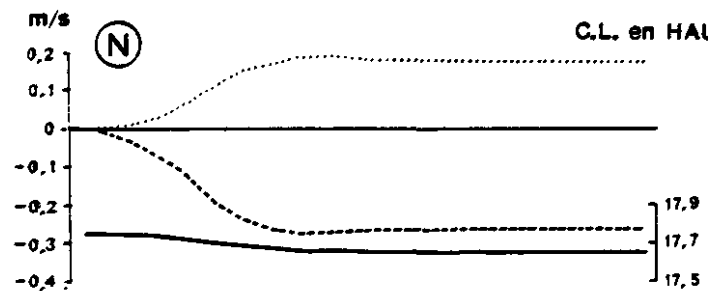
Point 9

Vent = nul à 0h.

= 15 m/s à partir de 8h.

(S, N, E, W) = provenance du vent

C.L. = type de condition limite



0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 Heures

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 Heures

$$g \frac{\Delta \xi}{\Delta x_i} = - \frac{k_1 u_i |\vec{u}|}{H} + \frac{k_2 w_i |\vec{w}|}{H} - 2 (\vec{\Omega} \wedge \vec{u})_i$$

où x_i est la direction parallèle à la limite.

(c'est l'équilibre :
 pente = - frottement/fond + tension due au vent + coriolis)

- condition limite en débits extrapolés depuis l'intérieur du domaine (avec gradient transversal nul) mais avec hauteur d'eau fixe (pivot) à l'angle Nord-Ouest du domaine.

Résultats

La figure IV-1 illustre les résultats obtenus en un point situé entre Jersey et le Cotentin (représentatif du point 9, figure II-1). On observe que :

- les conditions en hauteurs avec pente transversale nulle (avec ou sans pivot) ainsi que la condition de "régime permanent" ne permettent pas une convergence des résultats (le niveau d'eau augmente ou décroît continûment pour au moins un vent-type). Il en est de même pour la condition limite de radiation (non représentée). Ces instabilités sont probablement dues à l'existence d'une limite en "coin".

- La condition en hauteurs fixes converge rapidement vers un régime permanent (3 à 6 heures après l'établissement du vent).

- La condition en débits avec gradient transversal nul et pivot conduit, après environ 6 h, à un équilibre légèrement oscillant autour d'une valeur très voisine du courant obtenu avec la condition limite en hauteur fixe. La période d'oscillation (9 h 30) est indépendante de la direction du vent : elle correspond schématiquement à la résonance du golfe dans le sens Nord-Sud (le pivot à la limite N-W y impose un noeud de hauteur, on est donc en présence d'une onde stationnaire avec ventre vers Fréhel, soit :

$$\left. \begin{aligned} \lambda/4 &\approx 130 \text{ km (longueur du secteur modélisé)} \\ T &= 9 \text{ h } 30' \\ C &= \sqrt{g \bar{h}} = \lambda/T \end{aligned} \right\} \Rightarrow \bar{h} \approx 15 \text{ m, ce qui est compatible avec les profondeurs moyennes du golfe}$$

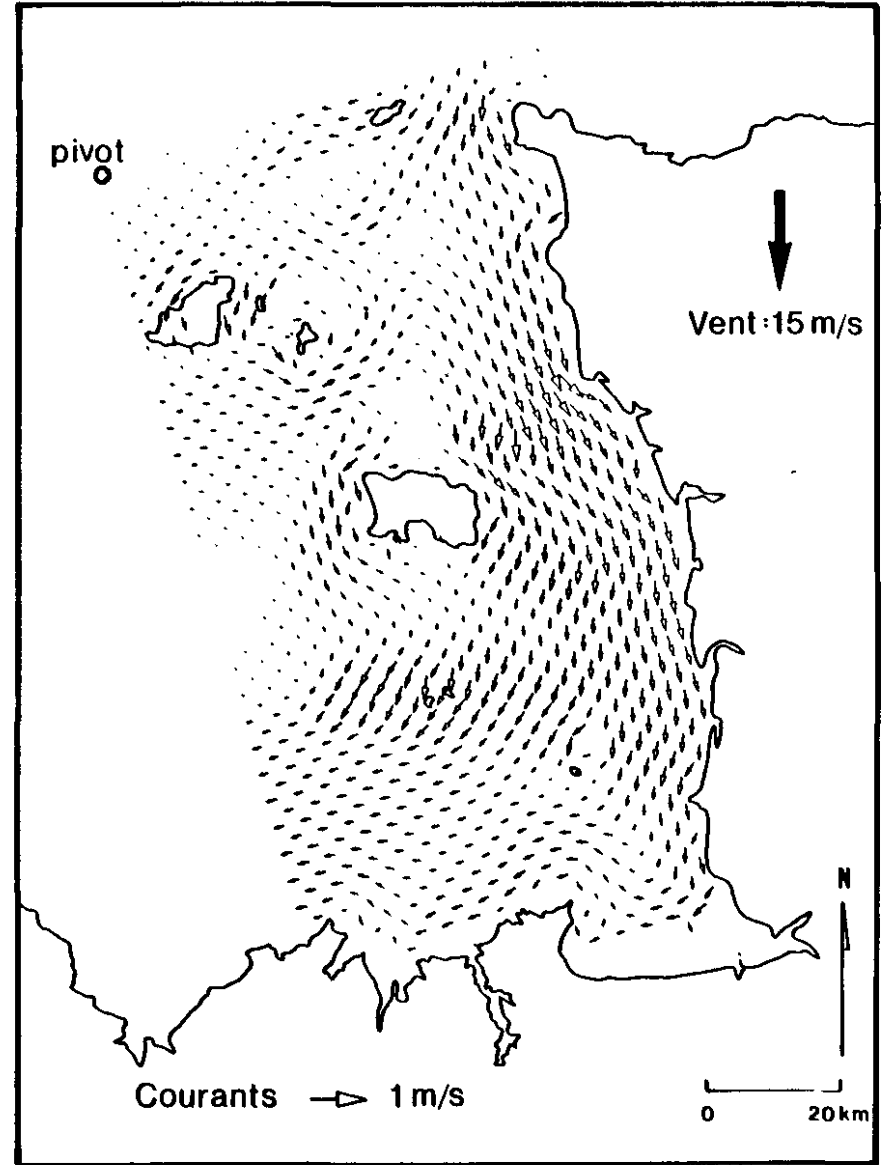
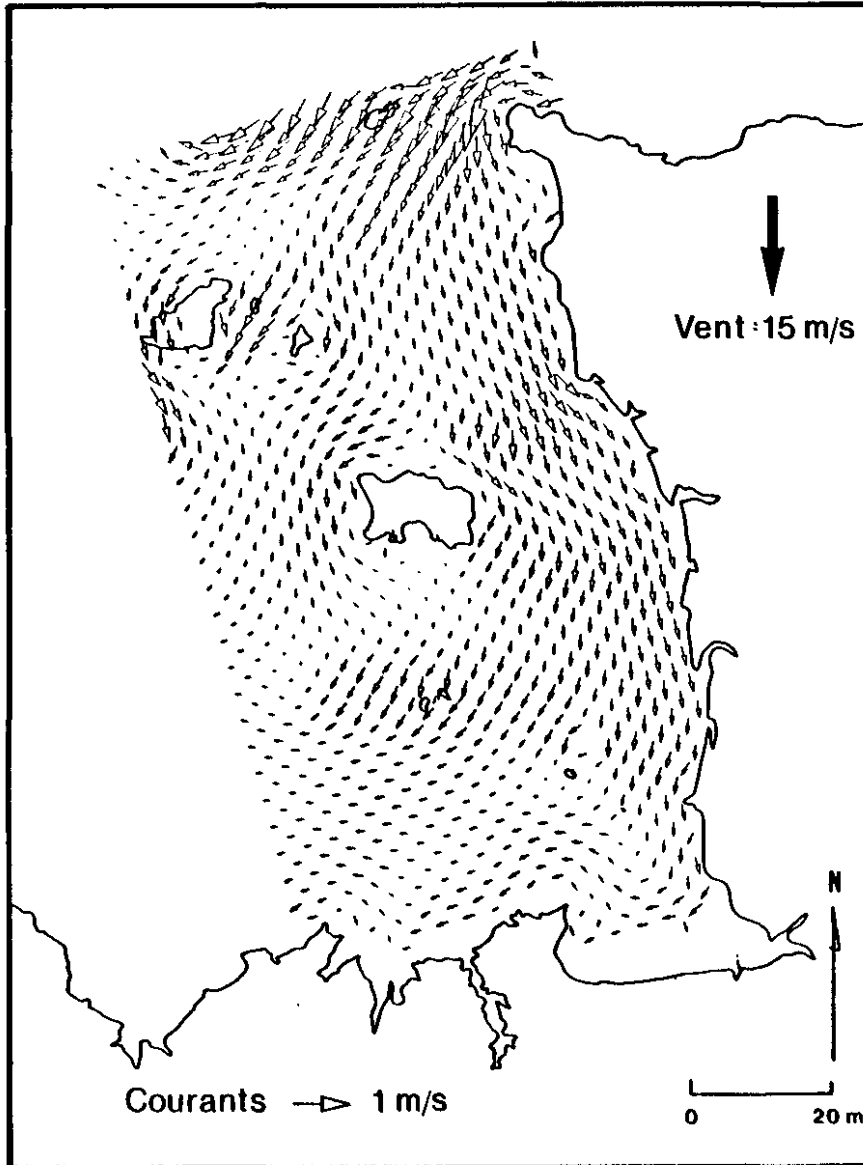
Conclusion :

En fait, comme le montre la figure IV-2, les différences de courant selon la condition adoptée sont d'autant plus faibles qu'on s'éloigne des limites : pratiquement les résultats sont invariants dans le secteur limité par le Cap Fréhel, Jersey et l'anse de Vauville. Au delà, les courants indiqués avec les conditions limite en débits (avec pivot et gradient nul) paraissent plus réalistes car peu forcés par les limites. C'est donc ce type de calcul qui sera retenu et discuté dans la suite.

Fig. IV-2 . Golfe Normano-Breton : EFFET DES CONDITIONS LIMITE SUR LA SIMULATION D'UN VENT TYPE

A) *CONDITIONS LIM. EN HAUTEURS FIXES : FRONTIERE HORIZONTALE*

B) *CONDITIONS LIMITE EN DEBIT AVEC
GRADIENT TRANSVERSAL NUL ET PIVOT A L'ANGLE N.W*



2ème cas - Simulation du vent et de la marée

Dans ce cas, la part du courant induit par le vent est plus faible (cf. § IV.1.2.) ; l'hypothèse de surélévation (liée au vent) nulle à la limite est plus raisonnable. La condition limite est donc une hauteur de marée, comme pour les simulations de marée. Ici aussi, les hauteurs sont corrigées d'un abaissement du niveau moyen fonction du carré des vitesses (loi de Bernouilli "moyenne"), de façon à produire des champs de courant représentant la différence entre résiduelle de marée et résiduelle de "vent + marée".

IV.1.2. - Présentation et discussion des schémas de circulation

5 vents-type ont été simulés, avec ou sans interaction avec la marée : Nord, Est, Sud, Ouest et Sud-Ouest. Les cartes des courants ou débits après stabilité (ou stationnarité) des résultats ainsi que les champs de courants ou débits résiduels dans le cas d'une résolution avec marée ont été produites.

En fait, il y a presque symétrie entre les courants induits par des vents opposés. Les éventuels "effets d'ombre" des îles ou de la côte sont limités à des distances très faibles et donc non reproductibles par un modèle régional.

NB : . Notre préoccupation étant le devenir des masses d'eau, nous ne présentons que les courants liés au vent, sans aborder le sujet des surcôtes ou décotes qui peuvent cependant porter à conséquence en terme d'inondation ou d'exondation exceptionnelles du littoral.

. Par ailleurs, un doute subsistant sur la validité des conditions limite retenues, nous ne considérons que le courant induit dans la région Fréhel-Jersey-Carteret. Les autres secteurs restent mal connus et indiqués comme tel sur les figures.

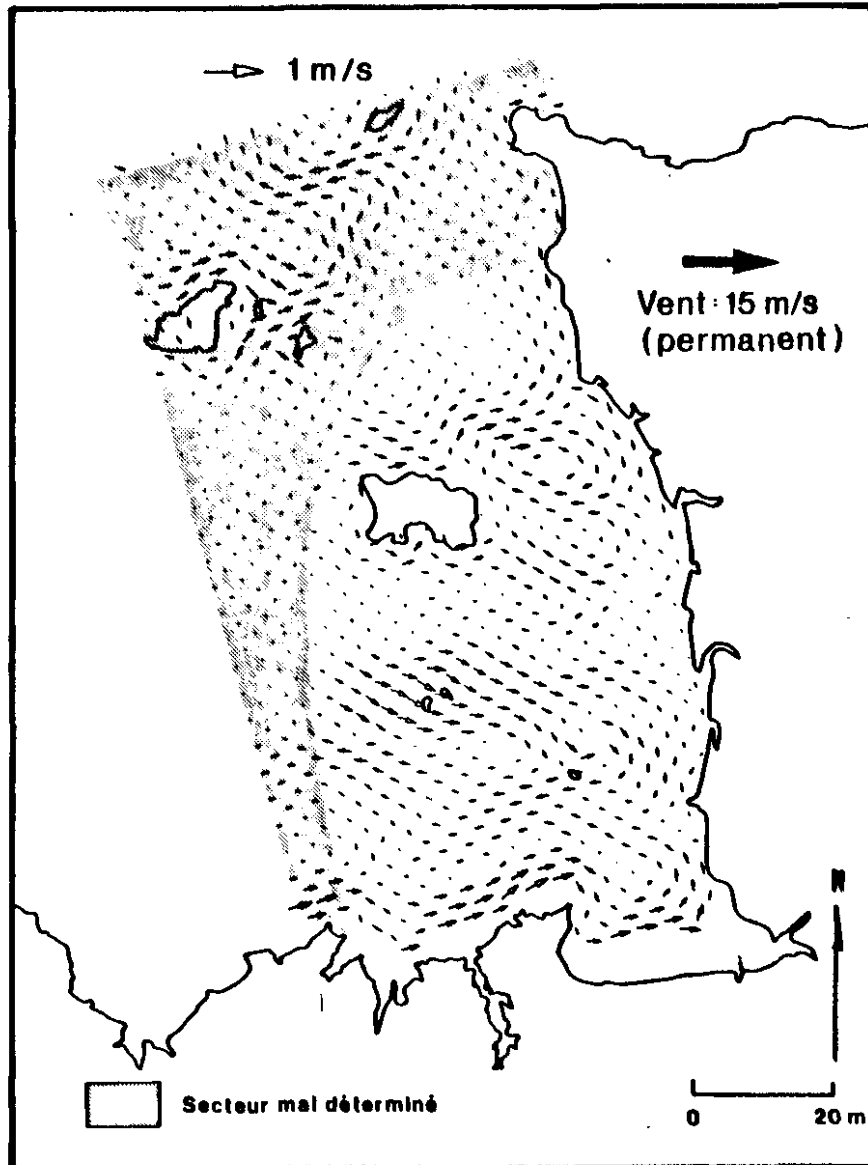
IV.1.2.1. Vent d'ouest

La figure IV.3 montre simultanément les courants et les débits générés par un vent d'ouest de 15 m/s : il n'y a pas de transport global concernant l'ensemble du golfe, mais une série de circulations cellulaires, en particulier entre Jersey et le Cotentin et surtout au sud de Jersey. Le facteur dominant est la bathymétrie : là où les profondeurs sont faibles (littoral breton, plateau des Minquiers ...) les courants sont importants (de l'ordre de 0,3 m/s par 15 m d'eau) et dans le sens du vent tandis que les débits sont faibles. Au contraire par grande hauteur d'eau, les débits restent importants - voir supérieurs car confinés - mais les vitesses sont faibles (5 à 10 cm/s) et opposées au vent de manière à assurer la continuité de la masse d'eau. Dans la réalité, il s'y produit probablement des inversions de courant entre surface et fond, le courant de surface restant dans le lit du vent.

Ainsi entre les Minquiers et la Bretagne, on aurait au fond un courant de retour des masses d'eau équilibrant le transport vers l'Est au Nord et au Sud, avec tourbillons dans la baie du Mont St Michel et au Nord Ouest de Granville (contournement anticyclonique de l'île Chausey). Mais en dehors de ces tourbillons et de ceux liés aux haut-fonds à l'Est de Jersey, le transport le long du Cotentin est presque inexistant.

Fig. IV-3. Golfe Normano-Breton · SIMULATION D'UN VENT D'OUEST SANS INTERACTION AVEC LA MAREE

COURANTS MOYENS



DEBITS

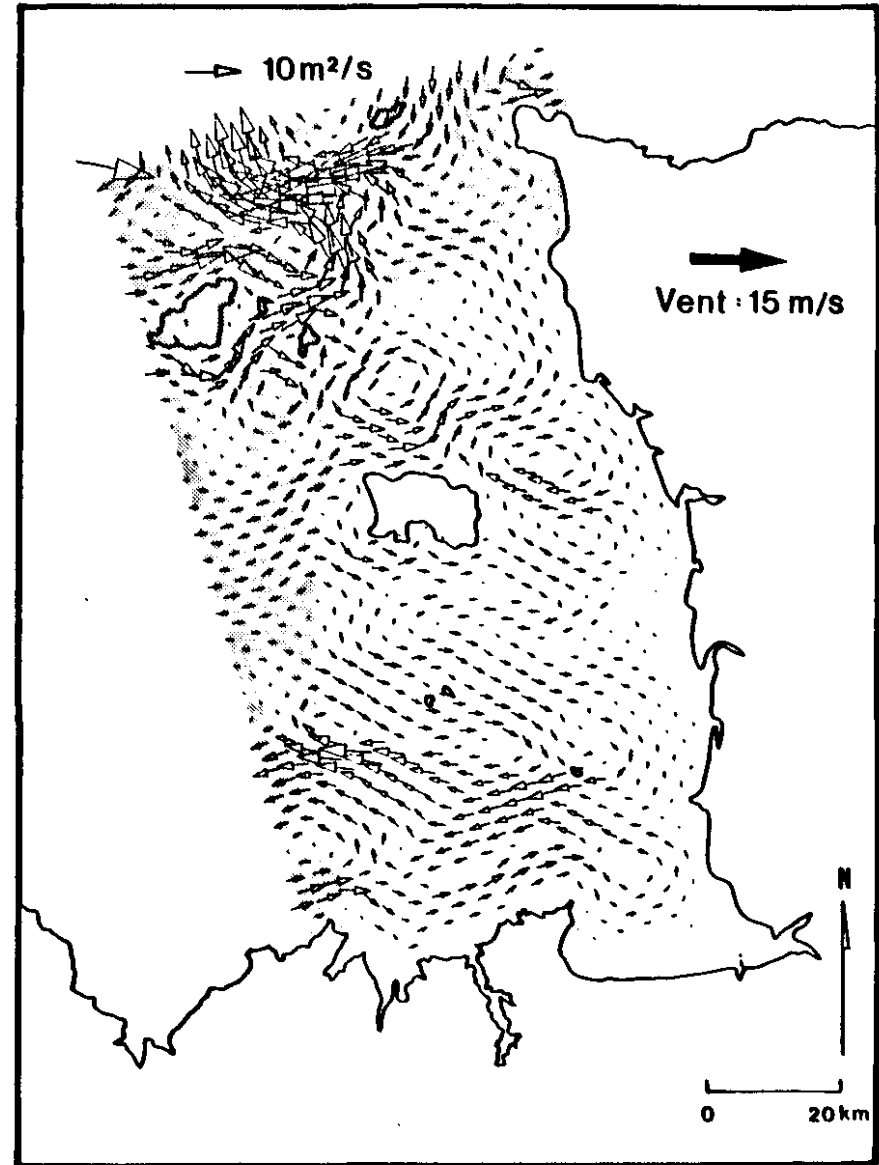
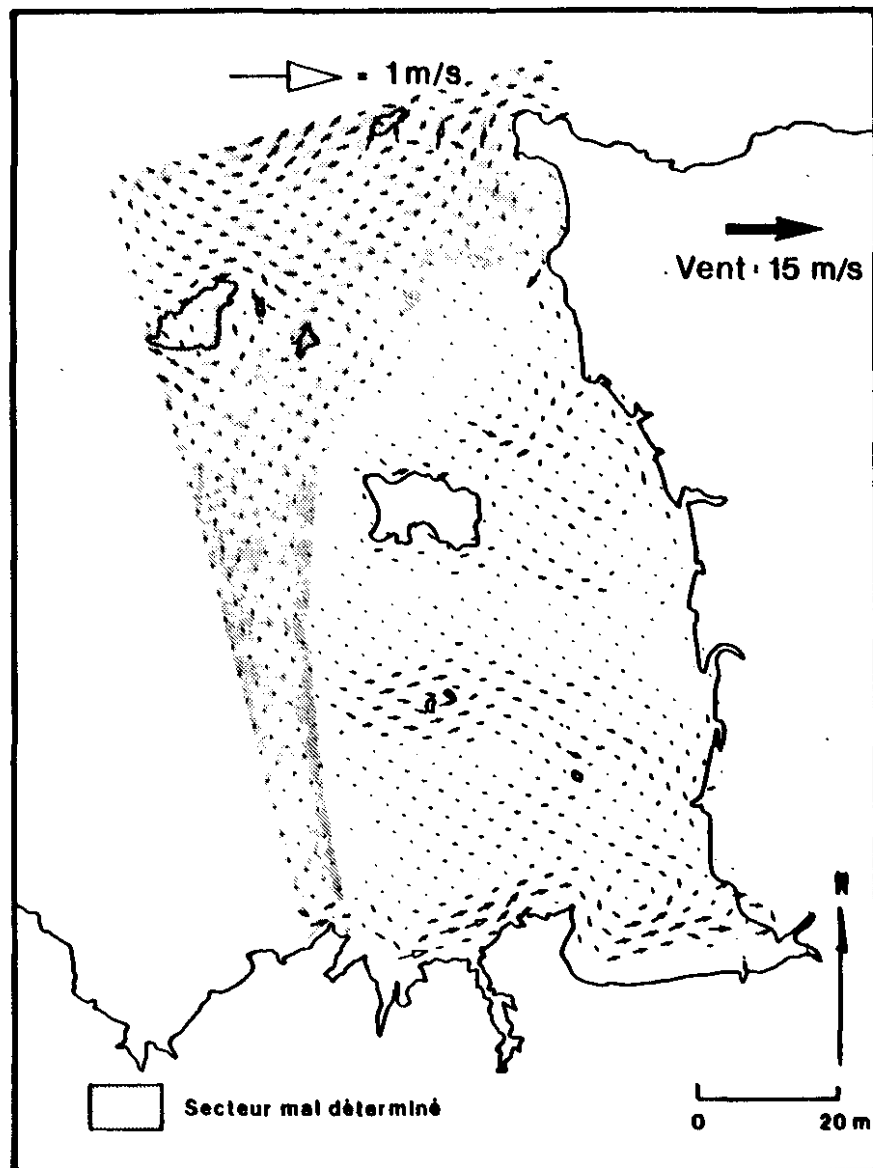
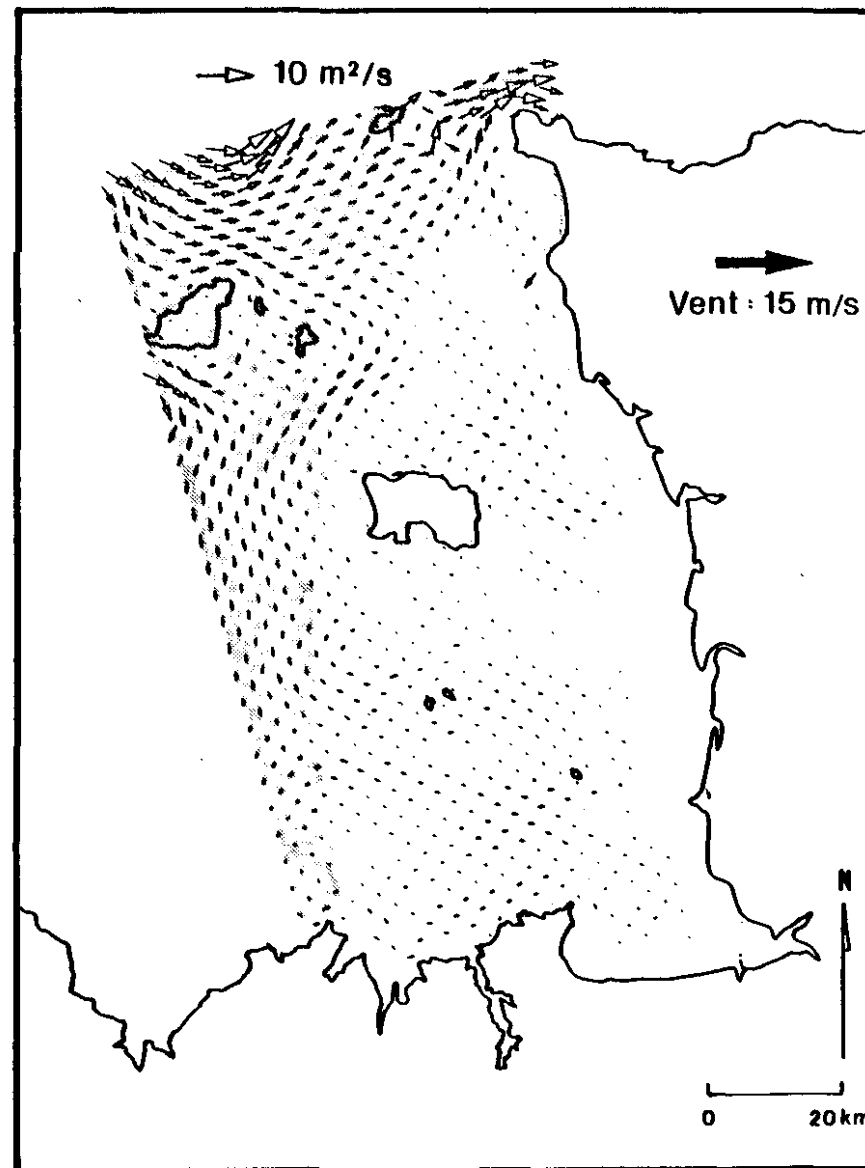


Fig. IV-4 Golfe Normano-Breton : SIMULATION D'UN VENT D'OUEST - INTERACTION AVEC UNE MAREE MOYENNE
(LES COURANTS OU DEBITS RESIDUELS DE MAREE SONT SOUSTRAITS)

COURANTS MOYENS



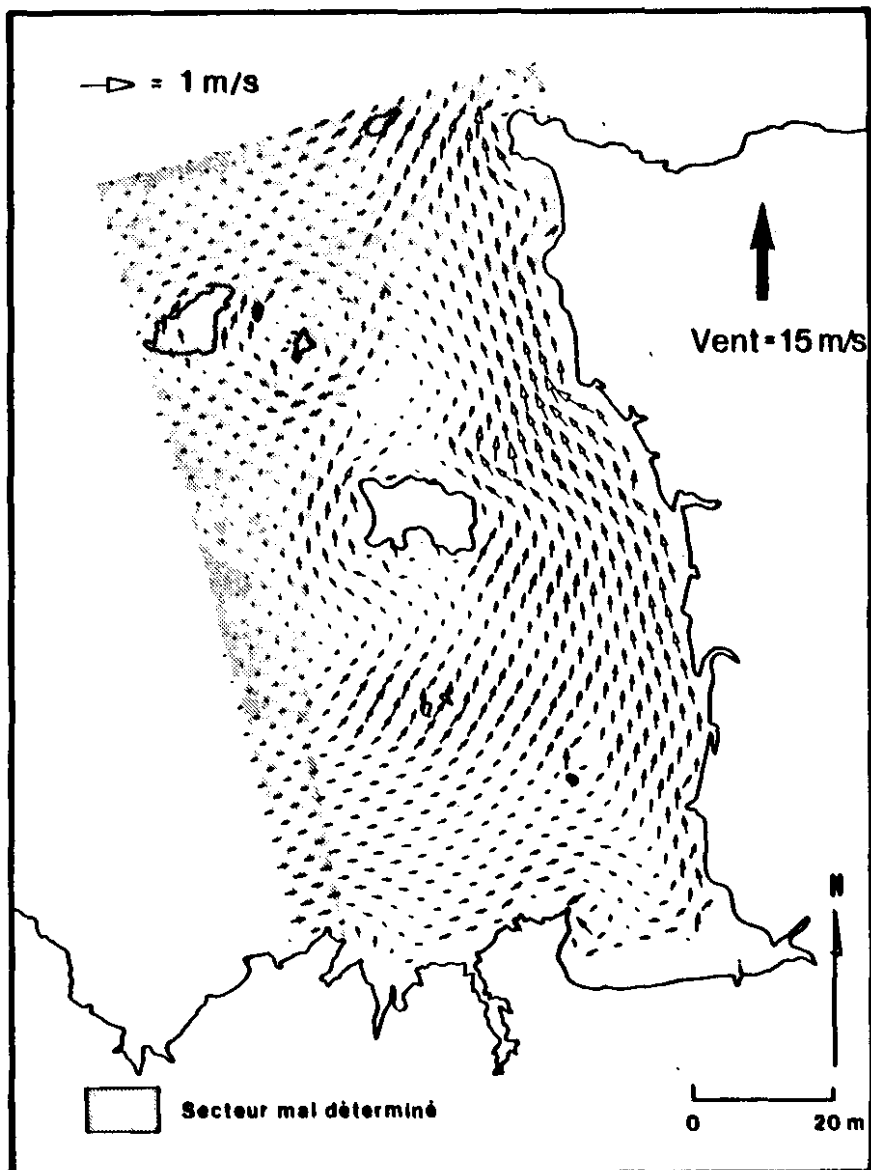
DEBITS RESIDUELS



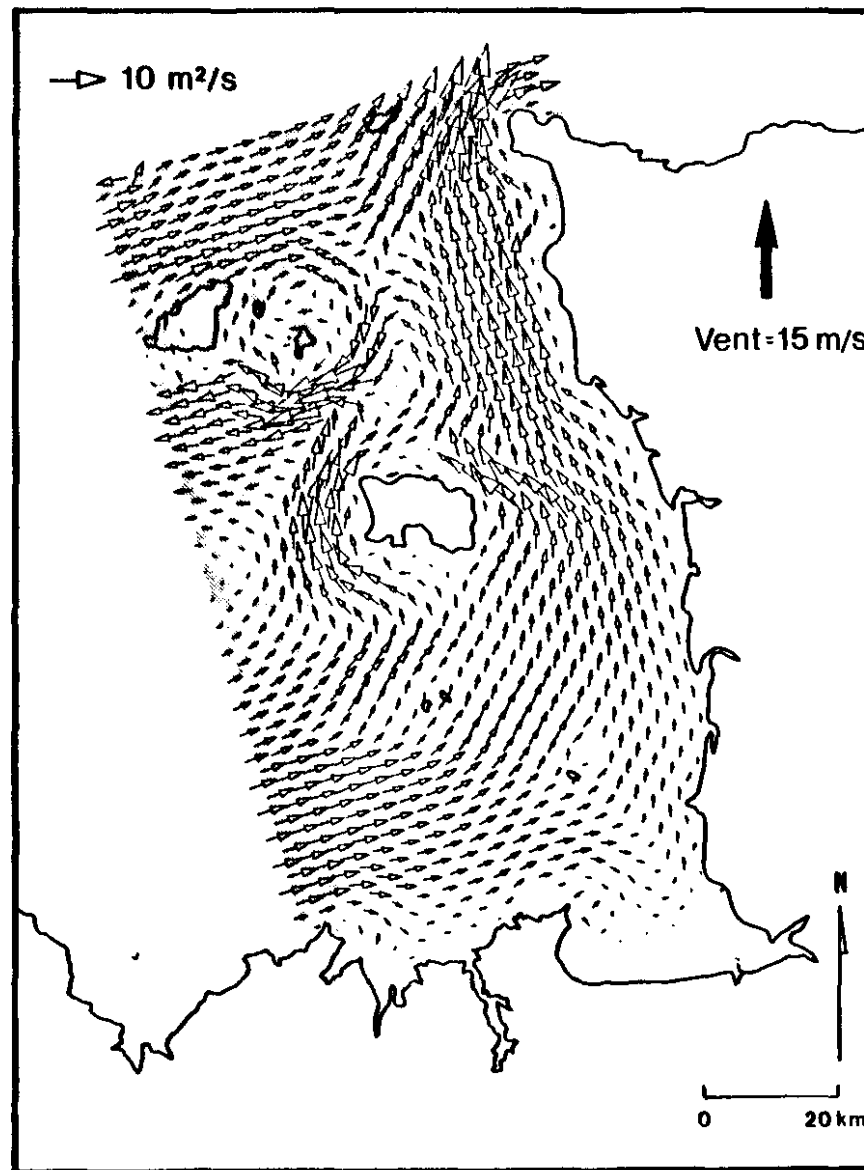
Code de Calcul bidimensionnel CYTHERE ESI (EDF_LNH/SOGREAH)

Fig. IV-6 . Golfe Normano-Breton : SIMULATION D'UN VENT DE SUD SANS INTERACTION AVEC LA MAREE

COURANTS MOYENS



DEBITS



Code de Calcul bidimensionnel CYTHERE ES1 (EDF_LNH/SOGREAH)

Interaction avec la marée l'effet d'amortissement induit par la marée (de coefficient moyen) est spectaculaire (figure IV-4). Les structures sont très atténuées ; seuls les courants sur les haut-fonds persistent avec des vitesses 2 à 3 fois moindres. Un courant de retour est mis en évidence au Sud-Est de Sercq, mais la proximité du "coin limite" suggère de ne pas y accorder crédit.

Bien entendu, l'effet du vent sur le courant instantané est plus important à basse mer (cf. fig. IV-5). C'est la raison pour laquelle le schéma des débits résiduels peut différer du schéma des courants. Pratiquement les débits induits par le vent sont très faibles : en particulier ils sont tout à fait négligeables devant les débits résiduels liés à la marée (cf. Fig. III-13).

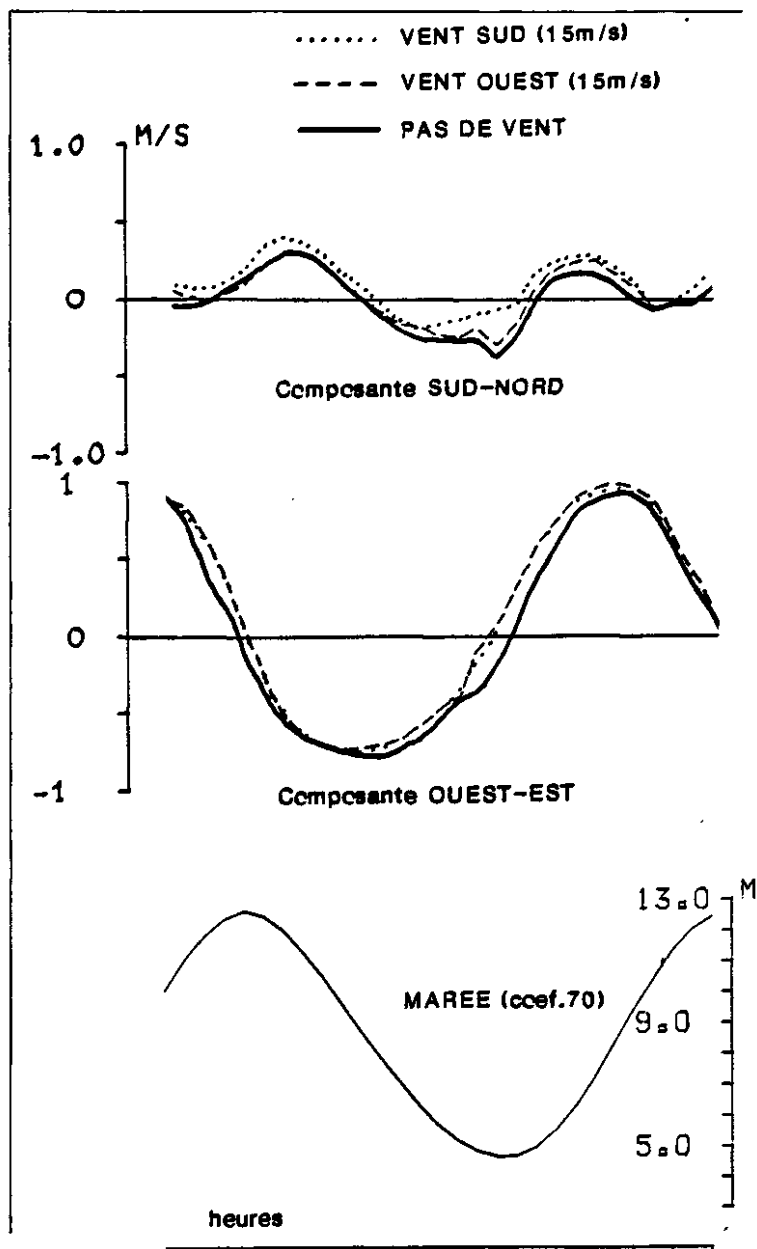


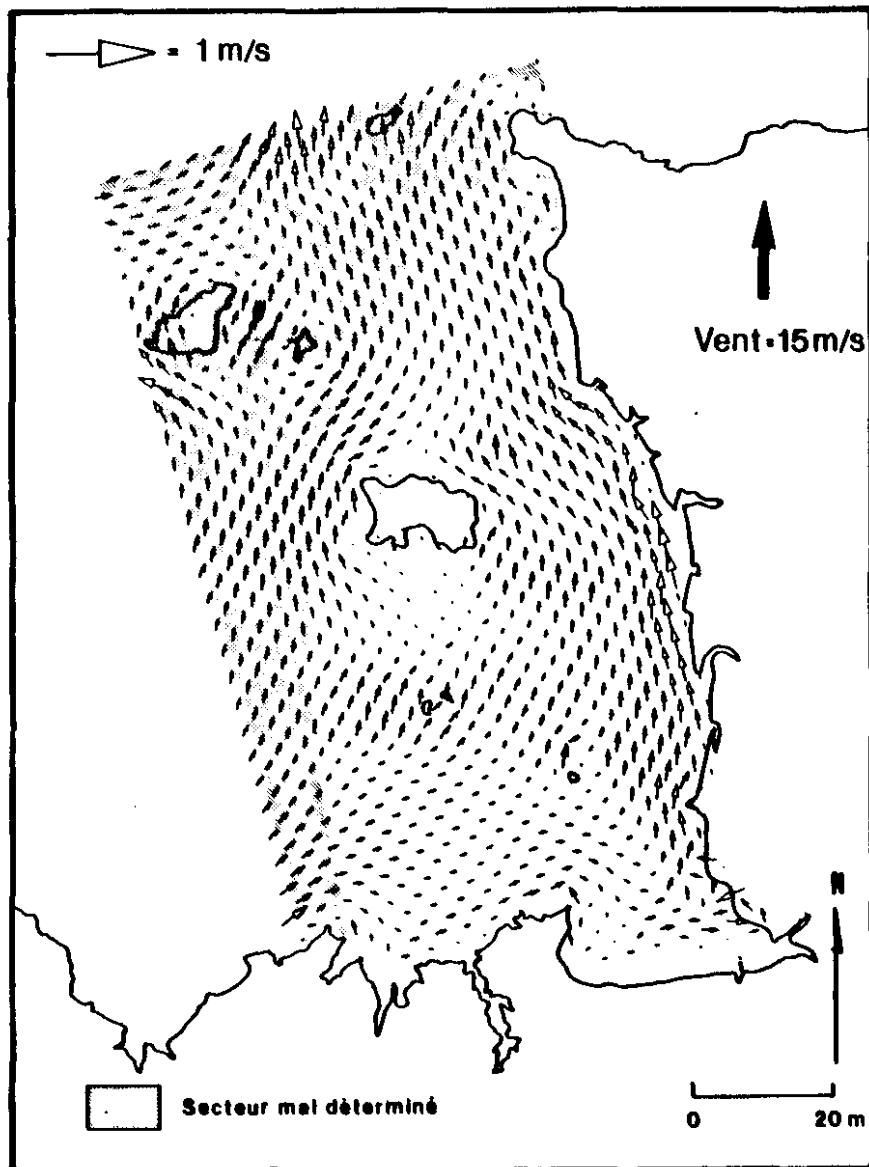
Fig. IV.5 : Effet du vent sur le courant de marée au sud des Minquiers [Maille 15,21 (Fig. II-4)]

IV.1.2.2. Vent de Sud

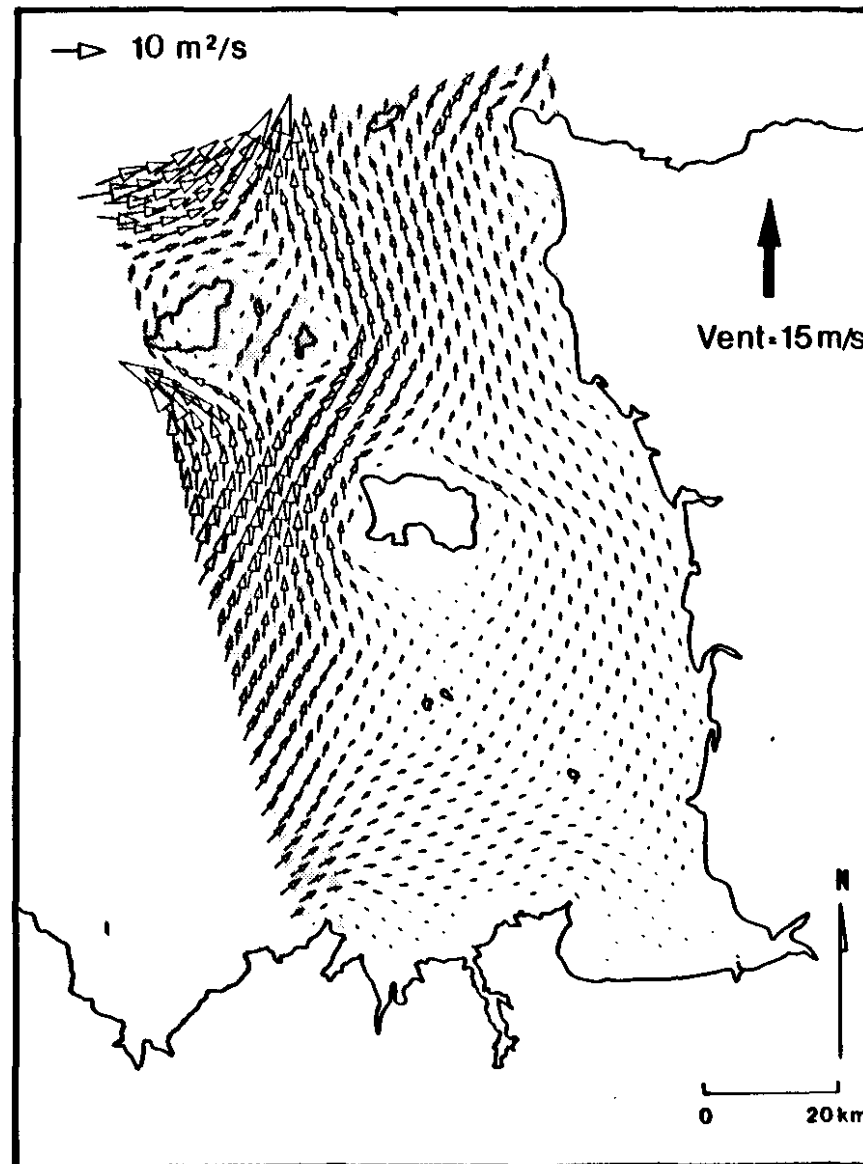
Vent sans marée (figure IV-6) : ici le courant généré par le vent concerne l'ensemble du golfe et se traduit par un transport général d'Ouest en Est entre les Minquiers et la Bretagne, puis vers la Nord le long du Cotentin où les vitesses moyennes sont de 30 cm/s sur toute la colonne d'eau pour un vent de 15 m/s.

Fig. IV 7 . Golfe Normano-Breton : SIMULATION D'UN VENT DE SUD - INTERACTION AVEC UNE MAREE MOYENNE
(LES COURANTS OU DEBITS RESIDUELS DE MAREE SONT SOUSTRAITS)

COURANTS MOYENS



DEBITS RESIDUELS



Code de Calcul bidimensionnel CYTHERE ES1 (EDF-L N N/SOGREAH)

Entre Jersey et Guernesey, une cellule est constituée : une masse d'eau venant du Sud (plateau des Minquiers) est entraînée le long de Jersey puis est déviée vers l'Ouest par l'ensemble Sercq-Guernesey. La carte des débits résiduels montre l'ampleur du phénomène. Toutefois le contournement anticyclonique de l'île de Sercq est suspect car un changement de type de condition limite le supprime (cf. Fig. IV-2).

Vent et marée (figure IV-7)

A l'inverse de ce qui se produit par vent d'Ouest (ou Est), le schéma de courant résiduel induit par un vent de Sud (ou de Nord) est relativement peu modifié en présence de la marée. Mais les amplitudes sont réduites de moitié, sauf très près du littoral Cotentin où elles atteignent 30 cm/s. Une comparaison avec les schémas résiduels de marée montre que les effets résiduels d'un vent de Sud sont du même ordre que ceux de la marée, et l'emportent même devant le Cotentin.

Les différences d'amortissement par la marée entre les effets du vent d'ouest et ceux du vent de sud proviennent essentiellement de l'orientation principale des courants de marée dans la direction E-W : c'est donc sur cette composante du frottement que la marée est la plus sensible.

IV.1.2.3. Autres vents

Comme on l'a dit, les schémas de circulation obtenus par vent d'Est ou Nord sont respectivement opposés aux schémas des vents d'Ouest ou Sud.

En ce qui concerne les vents de direction intermédiaire, les résultats constituent un compromis entre les schémas précités. A titre d'exemple, la figure IV-8 illustre le schéma de circulation induite par un vent de Sud Ouest, avec un fort courant littoral à la fois sur les côtes bretonne et normande et un effet résiduel non négligeable, même lorsque la marée est prise en compte.

IV.1.3. - Comparaison avec les mesures

La validation des schémas obtenus par modélisation est difficile car en réalité le régime permanent est rarement atteint. Les tracés des courants résiduels mesurés (cf. annexe 4) montrent bien la prédominance de la marée mais aussi de nombreuses corrélations avec la météorologie, telles que celle représentée sur la figure IV-9.

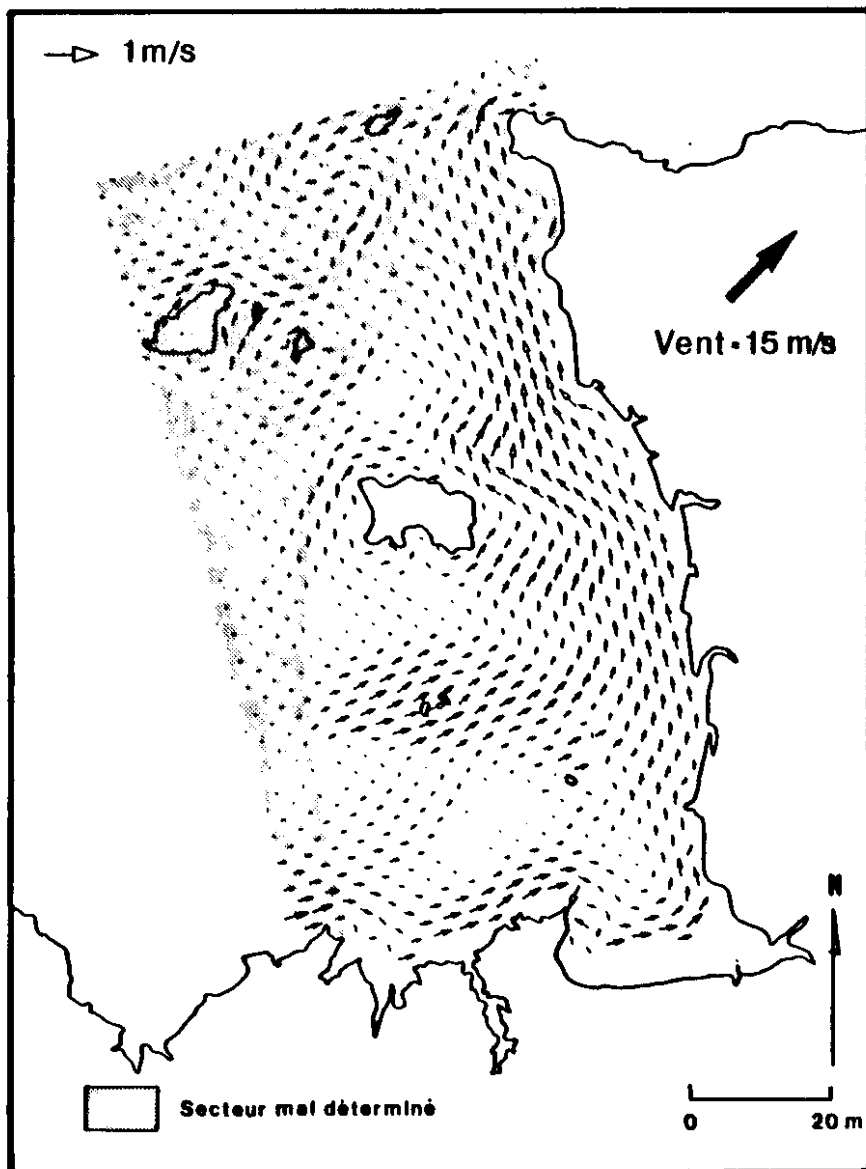
Un examen des courants filtrés nous a permis de retenir les éléments suivants : (position des points sur la figure II-1).

- devant le Cap Frehel, en surface (point 5 S) : le courant E-W suit la composante E-W du vent avec des vitesses de l'ordre de 5 cm/s pour un vent de 10 m/s. Près du fond, l'effet du vent est très faible et pas clair.

- Au large de la pointe du Grouin (point 13). En surface la composante Est-Ouest du courant est très sensible au vent et surtout au vent Nord-Sud (vitesse ~ 5 cm/s pour vent de 5 à 10 m/s). Au fond

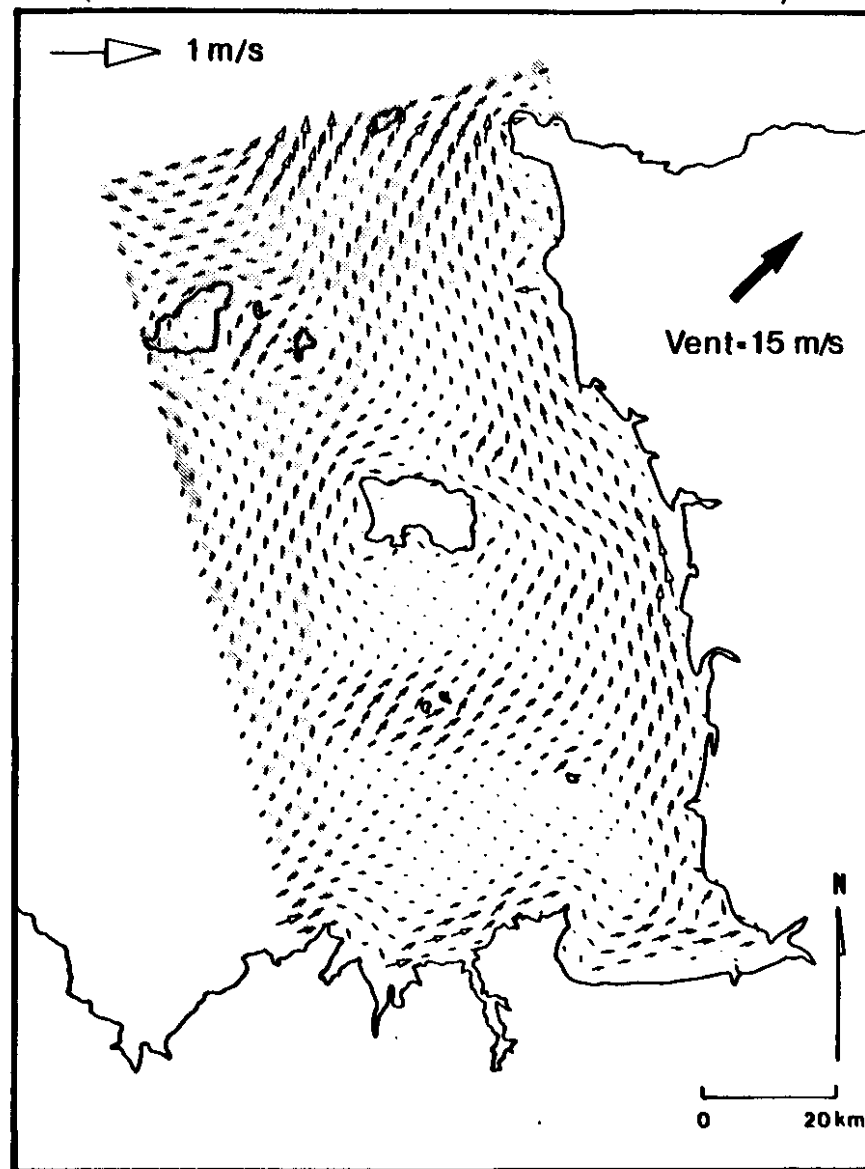
Fig. IV-8 _ Golfe Normano-Breton : SIMULATION D'UN VENT DE SUD-OUEST

SANS INTERACTION AVEC LA MAREE



INTERACTION AVEC UNE MAREE MOYENNE

(LES COURANTS RESIDUELS DE MAREE SONT SOUSTRATS)



Code de Calcul bidimensionnel CYTHERE ES1 (EDF_LNH/SOGREAH)

le courant induit par le vent est faible et les fluctuations E-W souvent opposées au courant de surface. Ces résultats sont en accord avec le modèle : en surface il semble que le courant soit plus lié à la réponse globale du bassin qu'à un entraînement local ; au fond il y a parfois recirculation en sens opposé au courant de surface, ce qui correspond à la circulation en cellule proposée au § IV-1.2.1.

- Au Sud-Ouest des Minquiers (point 4) le courant résiduel est faible : ce point est à peu près au centre d'une cellule de circulation indiquée par le modèle pour les vents Est-Ouest.

- Entre Jersey et le Cotentin (points 2 et 9) le courant semble canalisé par la bathymétrie : un vent de S-W entraîne un courant Est au point 2 et W-NW au point 9 (figure IV-9) comme le suggère le modèle.

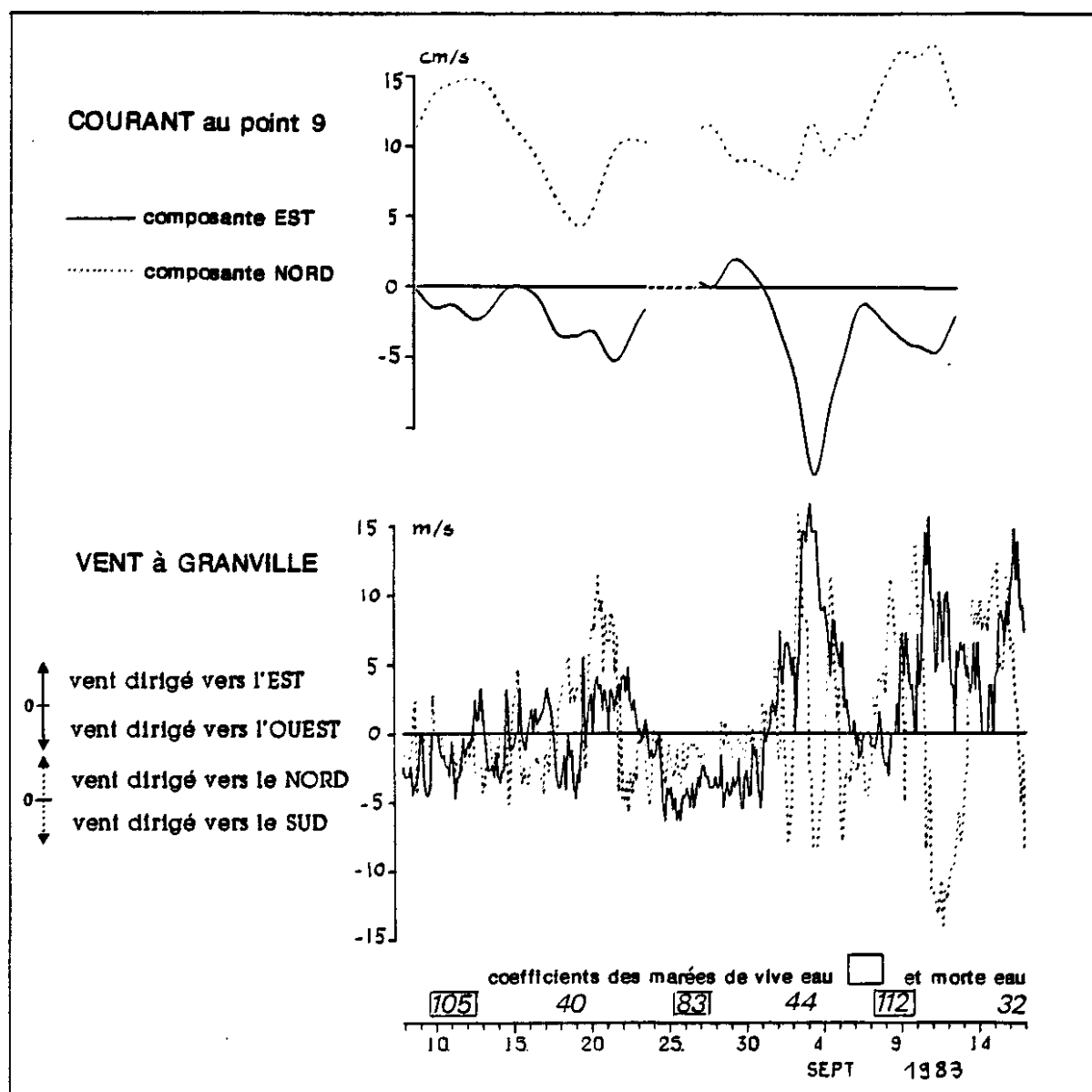
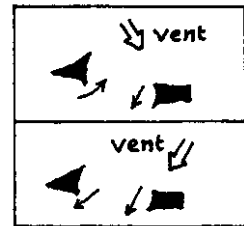


Figure IV.9 : Comparaison entre vent et courant mesuré à l'Est de Jersey (point 9).

(Données météorologiques aimablement fournies par le Service de Climatologie Marine, Météorologie Nationale).

- Entre Jersey et Guernesey (points 6 et 7) l'effet du vent semble complexe :

vent de NW :	au point 7	surface :	courant vers l'E
"	" 6	" :	" le SW
"	" 6	fond :	" "
vent de NE :	" 7	surface :	" l'W
"	" 6	" :	" l'WSW
"	" 6	fond :	" ?



Apparemment, lorsque le vent est dans la direction du passage entre les îles, le courant le suit. Si le vent est dans l'alignement des îles (direction NW-SE), alors des cellules se constituent, comme indiqué par le modèle ; mais ce dernier en crée artificiellement pour d'autres vents, à cause des frontières trop proches.

En conclusion, il paraît difficile d'affirmer que les mesures confirment les résultats du modèle : en fait les points de mesures ont été choisis de manière à déterminer des débits résiduels, donc dans les secteurs plus profonds, là où les courants induits par le vent sont faibles. Quoi qu'il en soit, les mesures de surface, en général effectuées à 3 m de profondeur montrent qu'à cette immersion le courant observé est bien souvent un courant de masse induit par la forme des fonds plutôt qu'un entraînement superficiel.

IV.2 - ESSAI DE SIMULATION D'UNE TEMPÊTE

Pour essayer de progresser dans la prévision des courants induits par le vent, nous avons tenté une simulation de vent réaliste en tenant compte des variations effectives du vent local (supposé uniforme à l'échelle du Golfe) et en prenant pour conditions limites des niveaux de surface calculés par un modèle de grande emprise. Dans notre application l'interaction avec la marée n'a pas été considérée : la simulation ne peut donc être vraiment réaliste. En fait il s'agit ici de tester la sensibilité du modèle local aux effets induits par la limite et d'évaluer le poids respectif des courants générés par une pente à grande échelle spatiale et de ceux induits par le vent local.

IV.2.1. - Présentation de la simulation

Nous avons sélectionné la tempête du 17 au 20 décembre 1982 caractérisée par une situation dépressionnaire au nord de la Manche et un vent passant du Nord Ouest au Sud Ouest, assez fort (17 m/s environ) (cf. Fig. IV-10).

Ce coup de vent a fait l'objet d'une simulation réalisée par le LNH à l'aide de son modèle en éléments finis couvrant l'ensemble du plateau continental de l'Europe du Nord Ouest (DALSECCO, 1984). Les mailles de ce modèle situées dans le golfe sont positionnées sur la figure II-4). Les surcotes calculées aux noeuds voisins de la frontière du modèle "Golfe" ont été interpolées et utilisées comme condition limite.

Un test sur l'effet du gradient local de pression atmosphérique a montré que pour cette tempête, il pouvait être négligé.

IV.2.2. - Discussion des résultats

La figure IV-10 montre que pour un point tel que le point 9, situé assez loin des limites et soumis à un courant de vent important en raison de sa position de "passage obligé" des masses d'eau entre Jersey et le Cotentin, l'évolution du courant ne varie pas trop en fonction des conditions limite (environ 20 % d'écart selon que le niveau à la frontière est constant ou non).

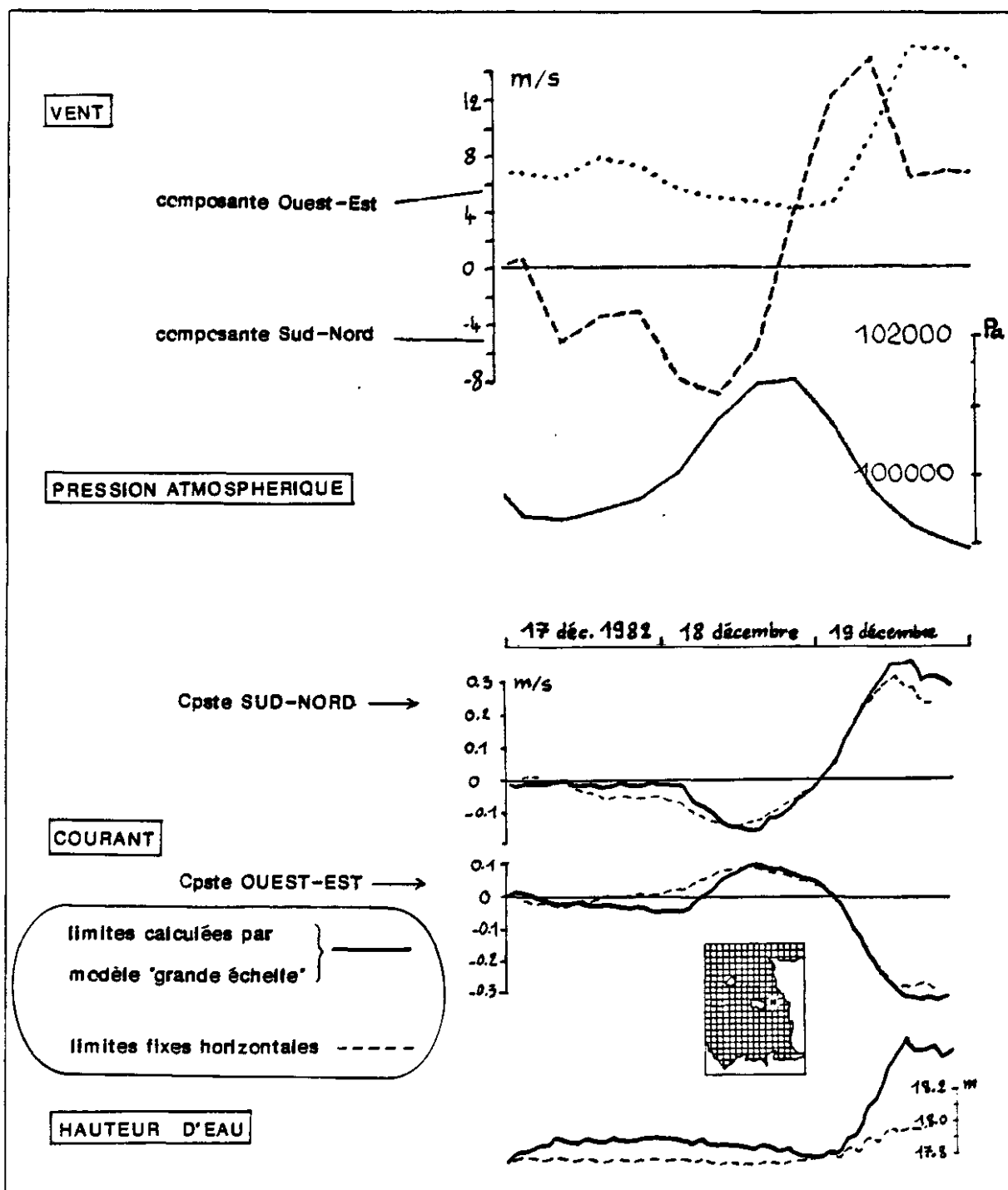


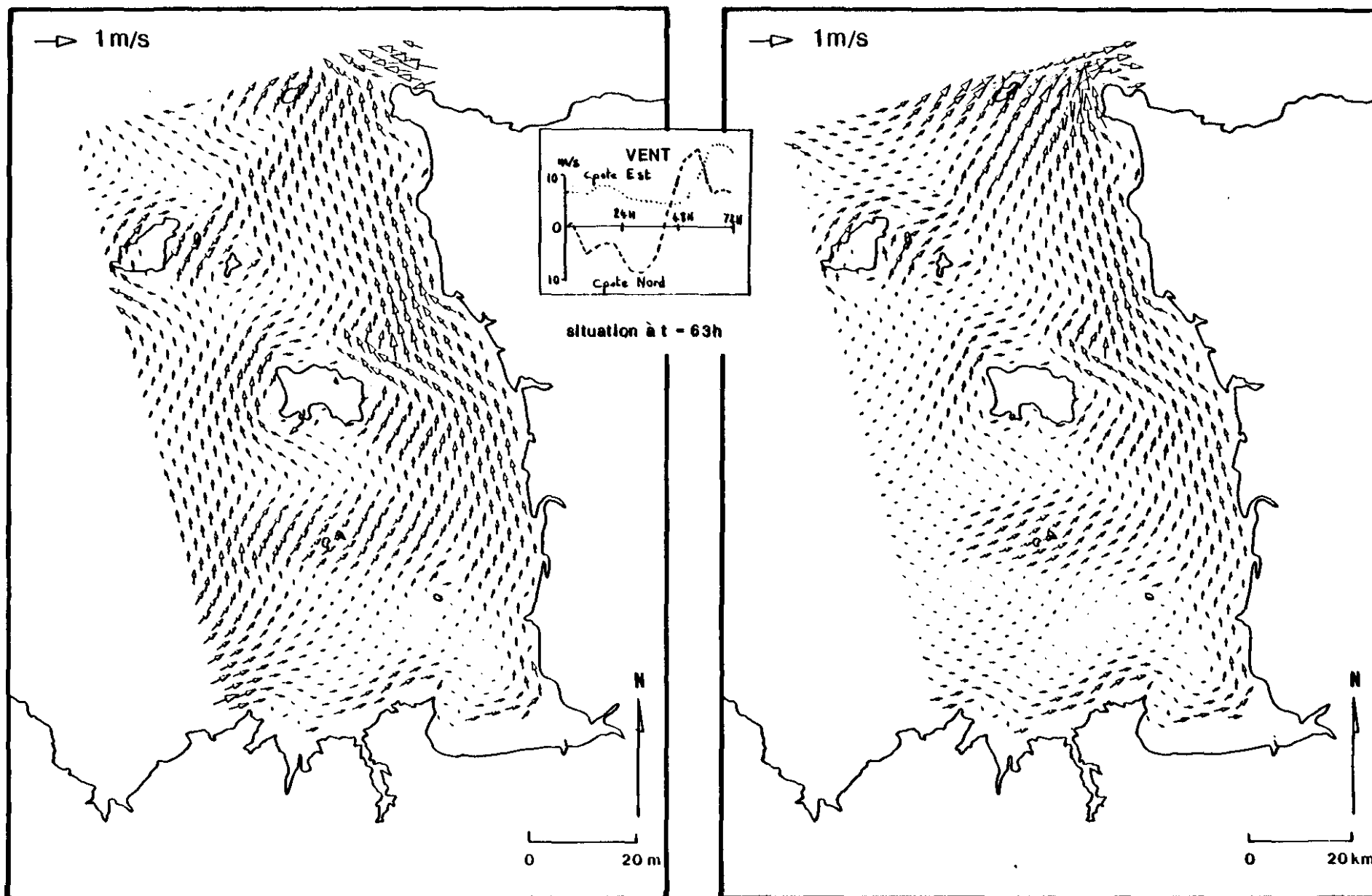
Figure IV.10 : Simulation d'une tempête réelle.

Evolution du courant moyen et de la surface libre à l'Est de Jersey.

Fig. IV-11 . Golfe Normano- Breton : SIMULATION D'UNE TEMPETE -VARIATION SELON LES CONDITIONS LIMITE

CONDITIONS LIMITE EN HAUTEURS ISSUES
D'UN CALCUL A GRANDE ECHELLE

CONDITIONS LIMITE EN HAUTEURS FIXES (Frontière horizontale)



Pourtant on ne peut généraliser cette conclusion à l'ensemble de la zone modélisée. La figure IV-11 met en évidence l'effet de la condition limite sur la moitié du domaine modélisé et montre l'importance du courant barotrope lié à une pente réaliste de la surface à la limite de la zone (les résultats du modèle de grande emprise avaient été vérifiés en termes de "surcotes").

Pour valider les résultats du modèle régional près des limites, une comparaison entre les vitesses calculées et les courants fournis par le modèle de grande emprise a été menée. Les résultats, très décevants, indiquent un désaccord entre les deux calculs : à la limite Ouest, le modèle régional accentue un courant vers le Nord qui assure le contournement des îles anglo-normandes par des masses d'eau venant de l'Ouest. Ce mécanisme est lié à la pente moyenne de la surface puisqu'il disparaît lorsque les limites sont maintenues horizontales. En fait, la différence entre les modèles provient de l'approximation nécessairement grossière de la bathymétrie qui est prise en compte par le modèle du plateau continental : pratiquement, celui-ci "ignore" les îles du golfe et répartit plus près du Cotentin les débits transitant vers l'Est. De ce point de vue, les résultats du modèle régional sont donc meilleurs. Mais la question de la compatibilité des conditions limites qui lui sont appliquées se pose car les niveaux calculés par le modèle de grande emprise ne tiennent pas compte des îles toutes proches (Guernesey en particulier).

En l'absence d'informations complémentaires, il est donc difficile de valider le schéma de circulation obtenu.

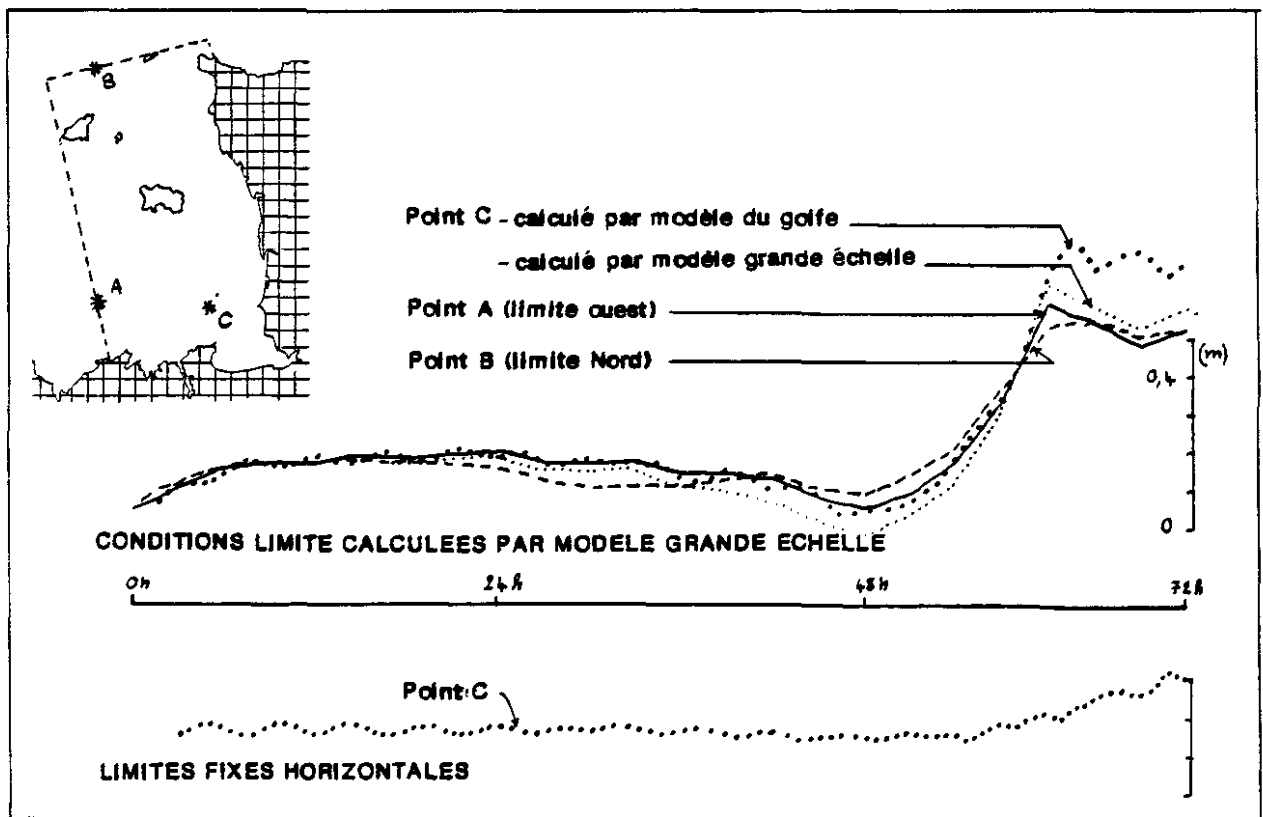


Fig. IV-12 : Simulation des surcotes induites par le vent. Effet de la condition limite

Fig. IV-13 . Golfe Normano-Breton

COMPARAISON ENTRE UNE SIMULATION DE VENT REEL

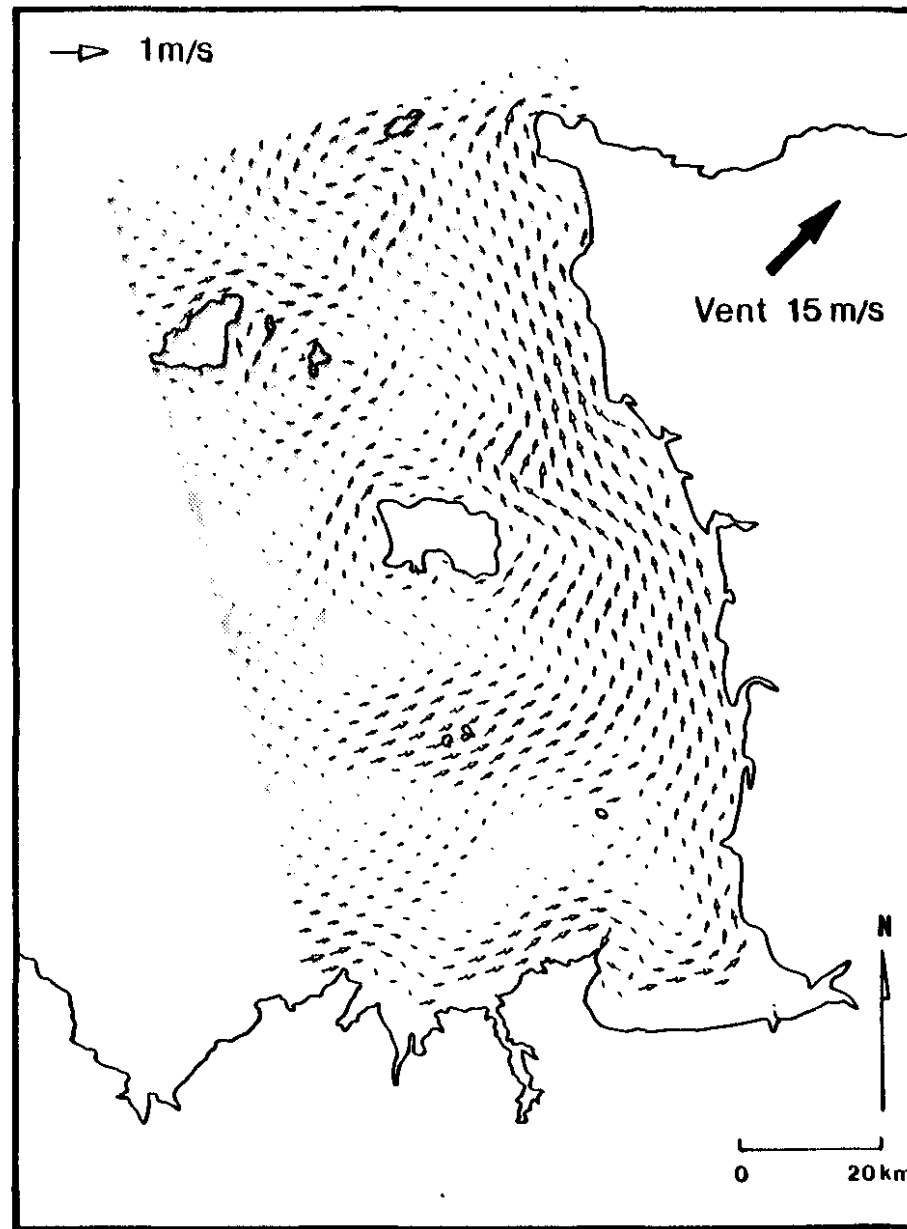
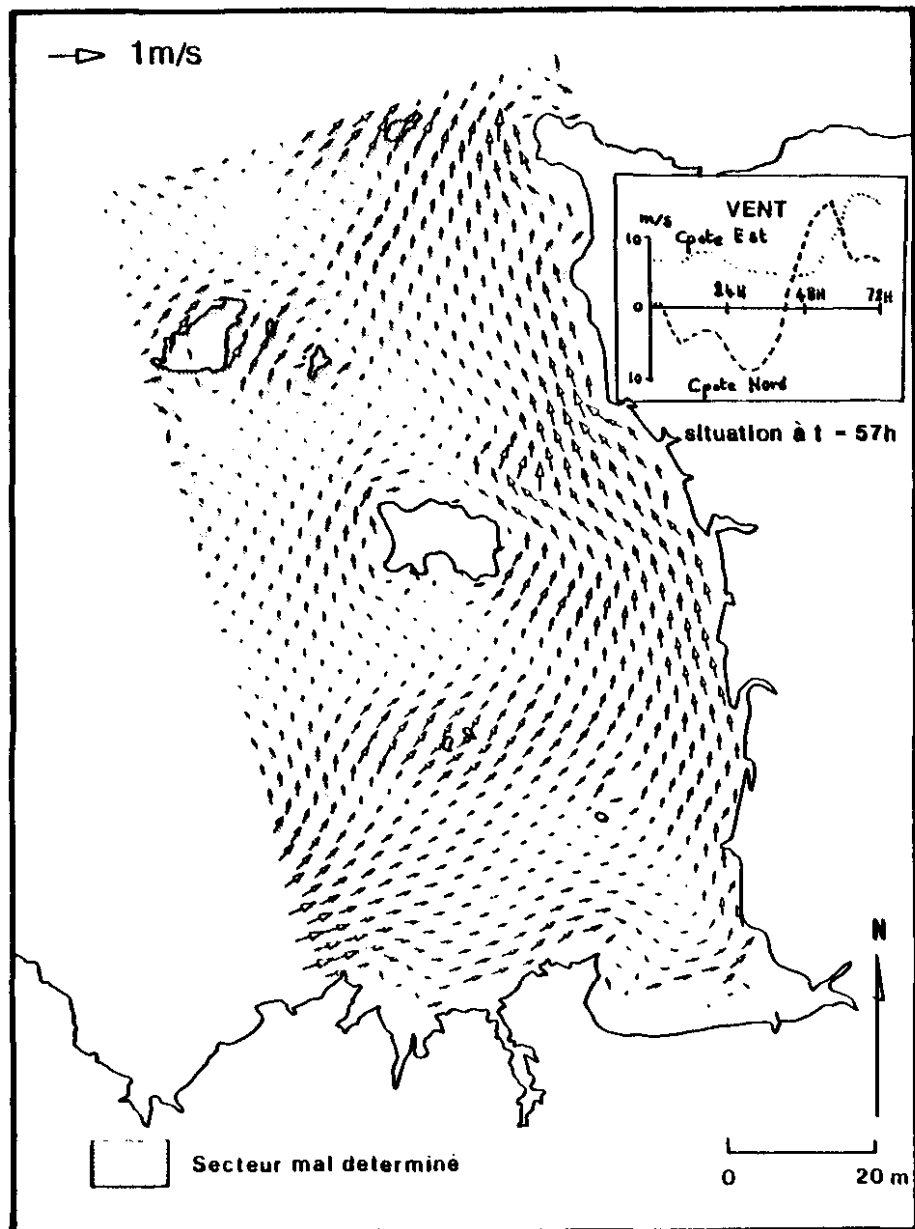
ET UNE SIMULATION DE REGIME PERMANENT

VENT REEL

CONDITIONS LIMITE EN HAUTEURS
ISSUES D'UN CALCUL A GRANDE ECHELLE

VENT PERMANENT

CONDITIONS LIMITE EN DEBITS AVEC GRADIENT
TRANSVERSAL NUL ET PIVOT A L'ANGLE NW



En ce qui concerne les niveaux, la concordance entre les modèles est meilleure, comme le montre la figure IV-12. On voit aussi que la surélévation relative en un point intérieur au modèle par rapport à la limite proche est fort différente selon le type de condition limite adoptée.

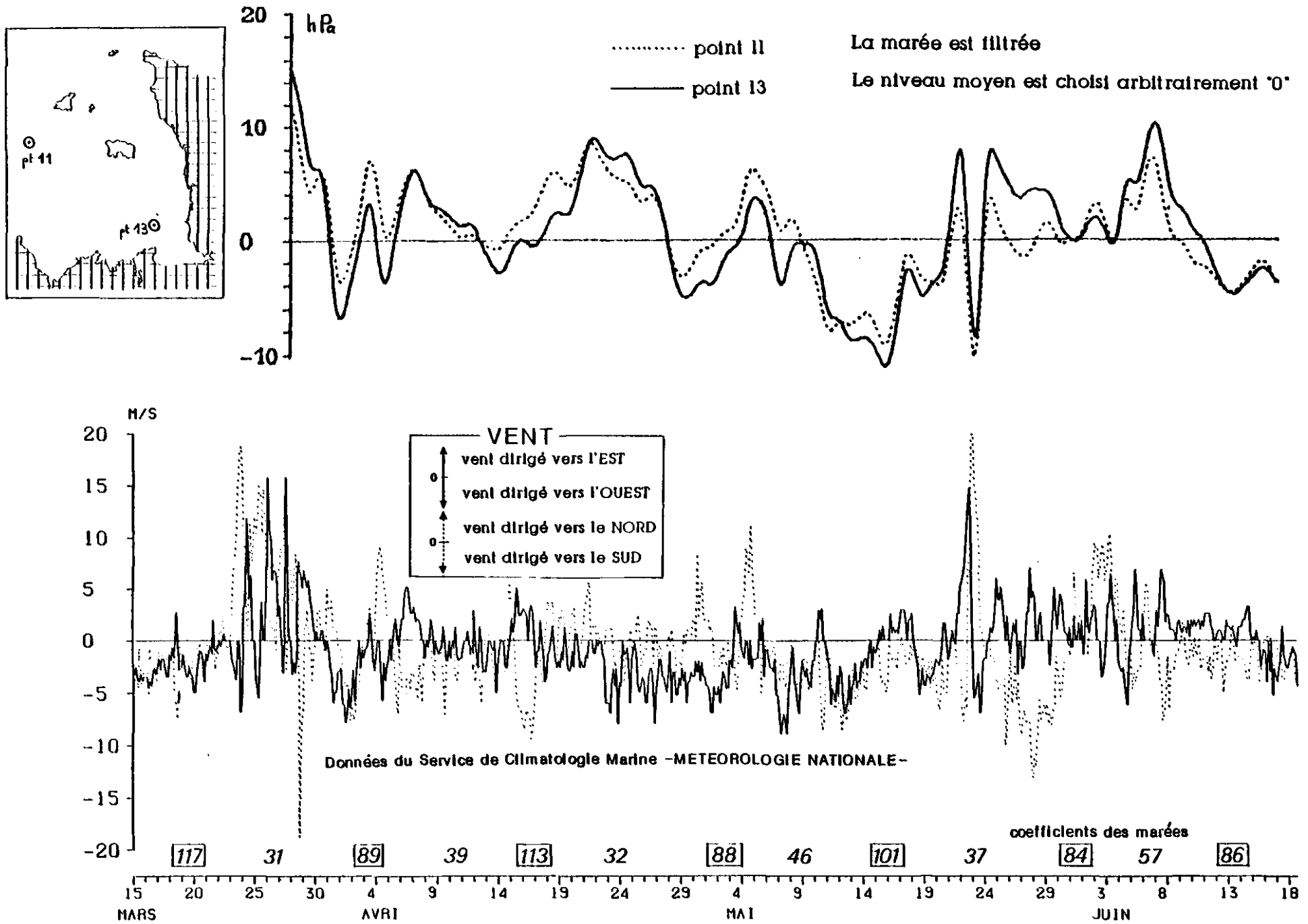
Enfin, on peut chercher à comparer les courants ainsi calculés loin des frontières marines avec ceux que l'on aurait obtenu par simulation d'un vent permanent. La figure IV-13 indique que les schémas obtenus pour un vent de Sud Ouest sont très ressemblants.

En conclusion, on peut considérer qu'assez loin des limites et lorsque les profondeurs sont relativement faibles (donc là où l'entraînement par le vent est maximum) il suffit de simuler les effets induits par le vent à l'aide d'un calcul pour un vent-type permanent et avec des conditions aux limites théoriques (à l'approximation bidimensionnelle près, bien entendu ! ...).

En dehors de ce contexte, il est nécessaire de modéliser les évolutions successives des facteurs météorologiques en disposant de conditions aux limites valides (donc calculées avec une bathymétrie réaliste).

Cette importance de la connaissance du niveau à la frontière du domaine modélisé montre l'intérêt que présentent les mesures in situ de hauteur d'eau (ou plus directement de pression au niveau du fond) : s'il est impossible de niveler des marégraphes en mer et donc de connaître la pente de la ligne d'eau entre eux, on peut néanmoins calculer les variations à moyen terme de cette pente. Avec une hypothèse de pente moyenne donnée, on obtient alors des variations de niveaux tout à fait satisfaisantes comme condition limite d'un modèle. La figure IV-14 illustre de telles mesures et leurs corrélations avec le vent (on observe en particulier le basculement de la surface libre dans la direction du vent).

Fig.IV-14 VARIATIONS RESIDUELLES DE LA PRESSION AU FOND. CORRELATION AVEC LE VENT.



CHAPITRE V

RÉGIME DES AGITATIONS

V - REGIME DES AGITATIONS

L'objectif de cette étude est double :

- déterminer les conditions limites nécessaires à une étude littorale de la houle et de la mer du vent en un secteur quelconque du Golfe Normano-Breton,

- définir une statistique schématique des agitations à travers tout le golfe de façon à évaluer les risques de remise en suspension de sédiments, les probabilités de brassages superficiels des masses d'eau, voire leur transport par la dérive de Stokes etc ...

Pratiquement, on s'est attaché à produire en plusieurs tronçons de l'isobathe - 20 m une statistique des agitations sous la forme de diagrammes d'occurrence par classes de période, amplitude et direction.

V.1. - METHODOLOGIE

V.1.1. - Rappel des processus physiques et hypothèses de calcul

Alors que la houle réelle est composée de plusieurs périodes et directions élémentaires, par souci de schématisation, seules les houles monochromatiques sont considérées dans cette étude. En se propageant vers la côte, la houle subit un certain nombre de déformations :

1. Réfraction

La célérité des ondes variant avec la hauteur d'eau, lorsqu'une crête de houle aborde orthogonalement des isobathes, elle change d'orientation et se déforme : il en résulte des concentrations d'énergie (vers les caps) ou des atténuations (dans les baies).

C'est principalement ce phénomène qui est pris en compte ici. Le paramètre clé est la hauteur d'eau : compte tenu des amplitudes de marée dans le golfe, il faudrait établir les calculs de réfraction pour différentes heures de marée : puisque l'on s'intéresse à des statistiques par 20 m de fond ou plus, seule la hauteur locale à mi-marée a été retenue. De même le courant de marée est susceptible de modifier la réfraction : cette interaction a été négligée.

2. Diffraction

Ce phénomène qui permet à la houle de contourner partiellement un obstacle traduit un transfert d'énergie parallèlement aux crêtes. Dans la présente étude la diffraction n'a pas été prise en compte : pourtant, en certains secteurs à l'abri des îles, elle doit intervenir, même par profondeur importante : en particulier, c'est la diffraction qui résout le problème de transfert d'énergie posé lorsque deux orthogonales se croisent, comme c'est le cas près des hauts fonds (cf. fig. V.1).

3. Réflexion

Lorsque la houle rencontre un obstacle, elle peut être partiellement ou totalement réfléchi. Si le phénomène peut se produire dans le golfe, la houle réfléchi perd son énergie assez rapidement pour pouvoir être négligée par profondeurs de 20 m.

4. Déferlement

Si la cambrure de la houle (rapport entre hauteur et longueur d'onde) dépasse un seuil, la vague est instable et déferle. Cela arrive en général par très faible profondeur, par conséquent le phénomène n'intervient pas dans notre cas d'étude.

V.1.2. - Méthode de calcul

On distingue deux étapes :

- Evaluation de la fonction de transfert entre houle au large et houle à l'isobathe - 20 m par calculs de réfraction à l'aide d'un modèle numérique utilisant une méthode d'intégration par orthogonales. 38 plans de vague du type de celui de la figure V.1 ont été produits, correspondant à des houles de période comprise entre 6,5 et 16 secondes et de direction 235° (S-W) à 30° (N-NW).

- Estimation des statistiques de houle venant du large et de la mer du vent à prendre en considération.

Plus précisément, le principe d'établissement des statistiques côtières a été le suivant :

- * Recherche d'une statistique de houle et mer de vent pour la zone "entrée du golfe" fournie par la Météorologie Nationale.
- * Correction de cette statistique le long de la limite du Golfe de façon à prendre en compte les réfractions au large des houles les plus longues : pour ce faire, des plans de réfractions à l'échelle de la zone Manche Ouest ont été calculés et des statistiques de houle du large recherchées.
- * Evaluation de la fonction de transfert des caractéristiques de houle à l'intérieur du golfe.
- * Calcul des statistiques en 16 tronçons de l'isobathe - 20 m, à partir des épures de réfraction et des statistiques à l'entrée du golfe.
- * Ajout d'agitations de courtes périodes (< 7 secondes) pouvant être générées par des vents locaux : dans ce cas les estimations de mer du vent ont été établies à l'aide de l'abaque de BREITSCHNEIDER à partir des statistiques de vent au sémaphore de Bréhat.

Remarque

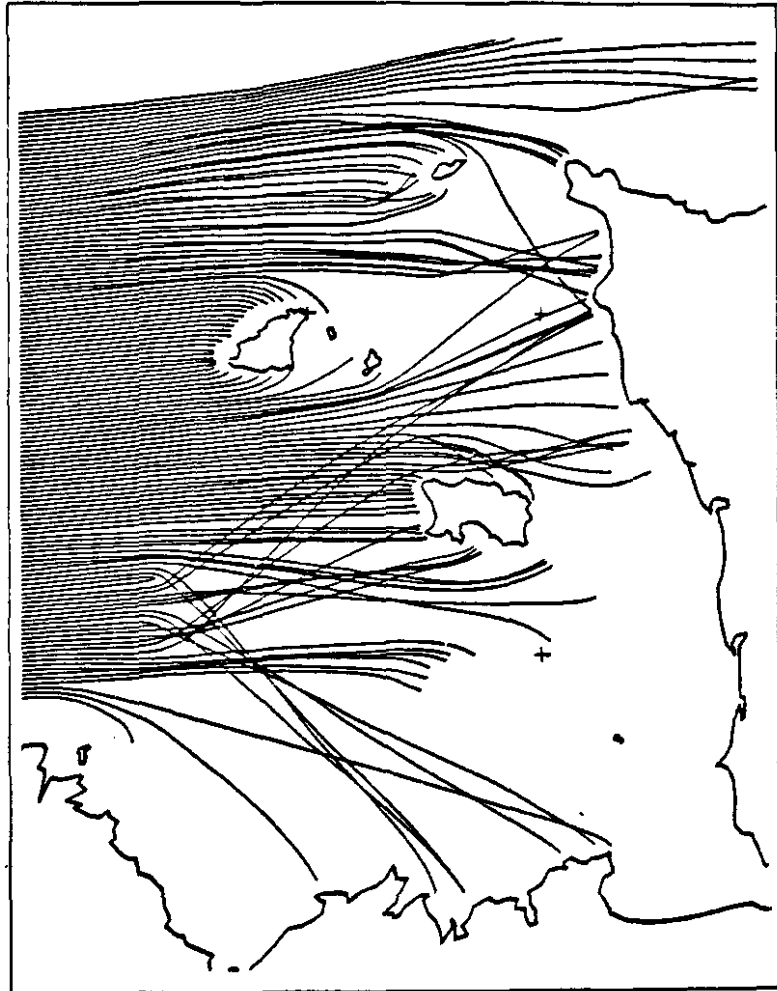
Si des calculs de propagation de la houle jusqu'à la côte devaient être entrepris, il faudrait, à partir des résultats relatifs à l'isobathe 20 m, réaliser une simulation de réfraction/diffraction simultanées avec bathymétrie précise, en tenant compte des variations de niveau liées à la marée (surtout vers la baie du Mont St Michel) et de la réfraction induite par le courant de marée. Enfin, la dispersion d'énergie par réflexion et par déferlement sur les hauts fonds serait aussi à considérer.

Fig. V-1 :

Epure de réfraction
calculée dans le
Golfe Normano-
Breton

(visualisation des
lignes orthogonales
aux crêtes de
houle).

Caractéristiques de
la houle : période
12 secondes
direction 265°
(d'après LCHF,
1984)

**V.2. - STATISTIQUES DES AGITATIONS**

Les diagrammes d'occurrence des houles et mers du vent en une quinzaine de secteurs du golfe constituent l'annexe 5. Nous présentons et discutons ici 3 exemples ainsi que la rose des agitations concernant l'entrée du Golfe Normano-Breton (source Météorologie

Fig. V-2 Rose des agitations du large entrant dans le Golfe Normano Breton

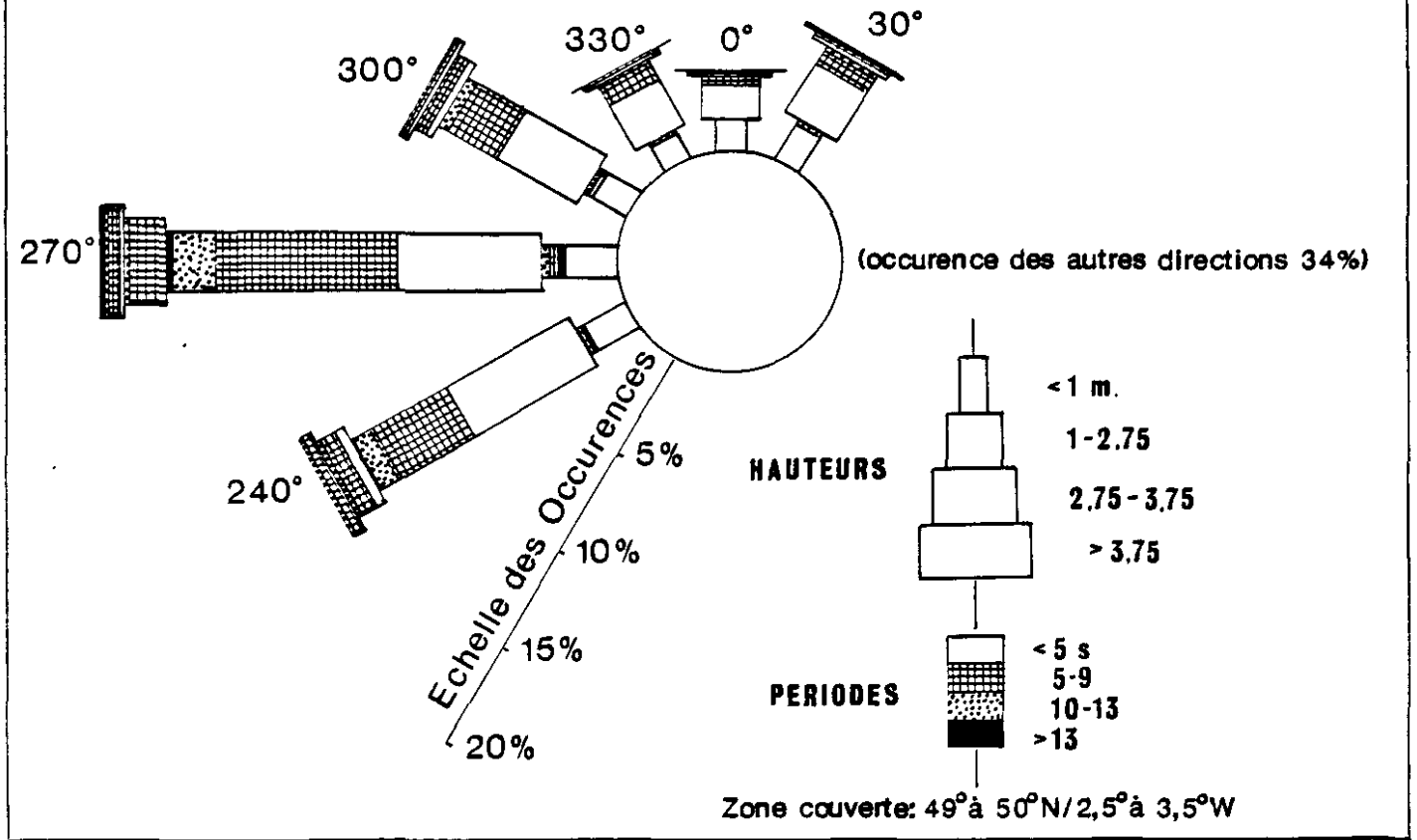
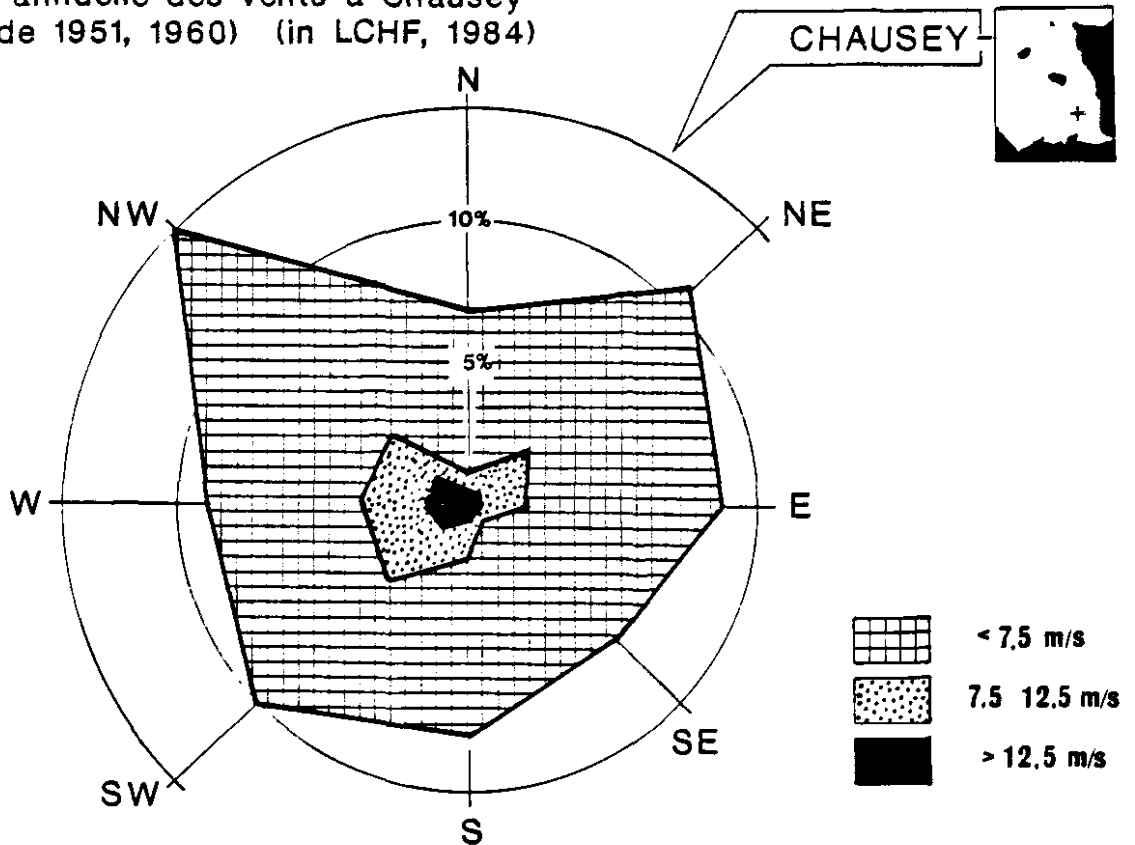


Fig.V-3 Rose annuelle des vents à Chausey (période 1951, 1960) (in LCHF, 1984)



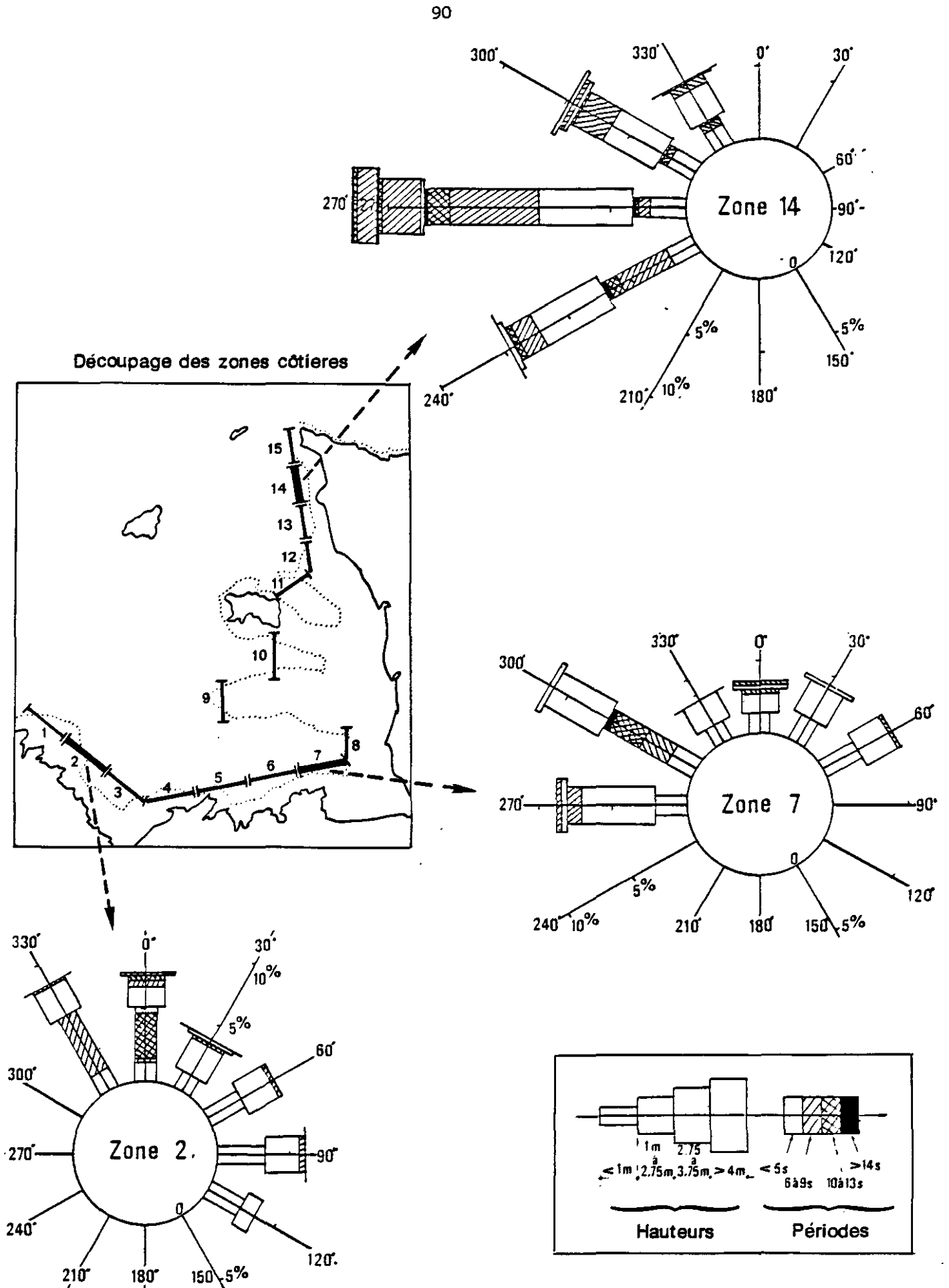


Fig.V-4

Exemples de statistiques d'agitation calculées dans le Golfe Normano Breton

Nationale) (Fig. V-2 et V-4). La figure V-3 qui met en évidence les vents dominants de N-W permet de prévoir les agitations de courte période générées localement et prises en compte dans les roses côtières.

On observe de très grandes différences d'un côté à l'autre du golfe. Au Nord Ouest du Cotentin (zone 14), les agitations sont fortes et très peu amorties par les îles anglo-normandes. Progressivement ces dernières jouent le rôle d'écran de plus en plus net vers le Sud (Granville). Ainsi au Nord de la Pointe du Grouin (zone 7) les houles de secteur Ouest sont très amorties sauf peut être pour les courtes périodes : en effet, celles-ci sont moins sensibles aux remontées des fonds à l'ouvert du golfe. Par contre les agitations de secteur Nord sont plus fréquentes, mais caractérisées par de courtes périodes.

En baie de St Brieuc (zone 2) on observe des agitations de secteur Sud-Est à Nord-Ouest avec des périodes plus longues pour la direction Nord.

Les effets sédimentologiques des houles de longue période sont beaucoup plus importants que ceux de la mer de vent. En conséquence la dissemblance notée entre le Nord du Cotentin et le Sud est essentielle : dans le fond du golfe, on doit s'attendre à un transport sédimentaire par la houle nettement plus faible qu'au Nord (entre Carteret et le cap de La Hague).

CHAPITRE VI

CONCLUSION

CONSEQUENCES SUR L'ENVIRONNEMENT

CHAPITRE VI - CONCLUSION - CONSEQUENCES SUR L'ENVIRONNEMENT

VI-1 - LE POINT DE VUE DU DYNAMICIEN

Le Golfe Normano-Breton apparait comme un excellent terrain d'étude de la marée : les amplitudes sont fortes, l'énergie en jeu considérable, et la bathymétrie est telle qu'on y trouve la plupart des structures de circulations connues pour la marée.

Notre étude montre la prédominance de la marée dans la circulation résiduelle. Les grands mécanismes de génération de courants moyens par production de vorticité résiduelle y sont mis en évidence :

- effets des caps et des îles dans un courant alternatif,
- effet d'un courant giratoire abordant une variation topographique. Dans le cas où cette variation est isolée (  le ou haut fond), constitution d'une dérive circulaire autour de cet accident bathymétrique.

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

Les processus de création de dérive lagrangienne ont été analysés. En particulier les variations des phases des courants liés à l'onde de marée principale semblent le paramètre déterminant des effets purement lagrangiens (dérive de Stokes).

Ainsi un schéma de circulation résiduelle de marée a pu être produit. Nous l'analyserons dans le paragraphe suivant.

Parmi les conséquences d'une telle importance de la marée, on peut naturellement citer le fort brassage des masses d'eau et leur homogénéisation verticale. Pourtant des zones frontales thermiques ont été observées par satellites et confirmées par des mesures in situ : la compatibilité d'un front tel que celui de Jersey-Guernesey avec un courant de marée intense est liée à la configuration particulière des structures résiduelles autour de ces îles.

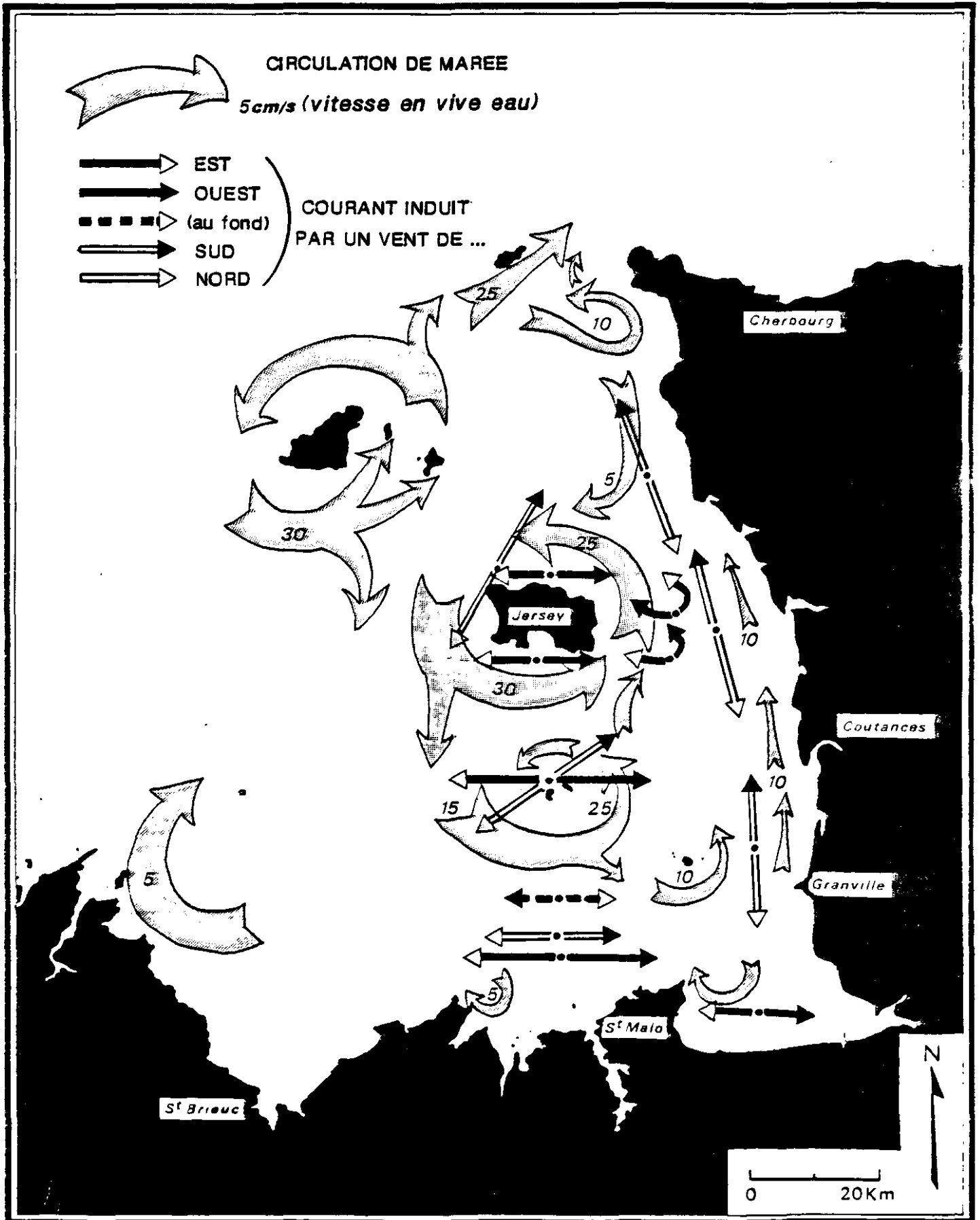
En ce qui concerne les circulations induites par les   v  nements météorologiques, l'étude a montré qu'en raison du frottement principalement induit par la marée, l'effet d'un vent local est faible, et ce d'autant plus que la direction du vent co  incide avec l'orientation principale des ellipses de marée (   peu près Est-Ouest au Sud de Jersey).

Des tests de sensibilité montrent l'importance du choix des conditions limites pour les simulations numériques des effets du vent : pratiquement, il est impératif de placer les frontières ouvertes du domaine modélisé loin des accidents topographiques.

Fig.VI-1

GOLFE NORMANO BRETON

SCHEMA GLOBAL DE CIRCULATION RESIDUELLE



Enfin l'étude des répartitions statistiques des houles et mers du vent dans le golfe fait apparaître clairement les différences entre la cote Nord-Ouest du Cotentin, très exposée, et le fond du golfe, abrité par les îles anglo-normandes. Le brassage des masses d'eau le long du littoral en dépend naturellement.

VI.2. - RAPPEL DU SCHEMA DE CIRCULATION - CONSEQUENCES SUR L'ENVIRONNEMENT

Le schéma de circulation des masses d'eau est dominé par les structures résiduelles lagrangiennes de marée. Compte tenu de la prédominance du courant de marée instantanée, responsable de ces structures, il est réaliste de considérer que les mouvements effectifs des masses d'eau résultent de la superposition de ces circulations de marée seule et des courants moyens (donc "eulériens") générés par d'autres moteurs tels que le vent.

Le schéma ainsi obtenu est représenté en figure VI-1.

* Il est caractérisé par des circulations intenses en cellules séparées par des secteurs "immobiles" : par conséquent les masses d'eau peuvent séjourner, voire tourbillonner longtemps dans le golfe.

* Les échanges avec l'extérieur du golfe sont limités au secteur Nord-Nord Ouest (de Guernesey à la Hague) ; la masse d'eau limitée par une ligne allant du Cap Frehel à Carteret en contournant Jersey serait "indépendante" et homogène car soumise à un brassage important.

* Les circulations résiduelles de marée sont tourbillonnaires autour des îles et haut fonds avec des vitesses de l'ordre de 30 cm/s (~ 26 km/jour) autour de Jersey et Guernesey, 20 cm/s (~ 17 km/jour) autour des Minquiers et 10 cm/s (~ 9 km/jour) autour de Chausey.

* Les caps génèrent des tourbillons latéraux caractérisés par des extensions de 10 à 20 km mais des vitesses relativement faibles : 5 cm/s (~ 4 km/jour) à l'Est du cap Frehel et à l'Est de la pointe du Grouin (ce qui permet le renouvellement partiel des eaux de la baie du Mont St Michel) ; de l'ordre de 10 cm/s au Nord Ouest de la baie de St Briec et devant l'anse de Vauville.

* 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 : compte tenu des conséquences importantes qu'elle peut avoir sur l'environnement du littoral normand, cette dérive serait à confirmer par quelques suivis de flotteurs.

* Le vent est susceptible de modifier le schéma avec d'autant plus d'effet que le coefficient de marée est faible. Ainsi, pour le secteur compris entre Jersey et les côtes bretonne et normande :

- un vent de Sud (respect. Nord) entraîne un courant vers le Nord (resp. Sud) devant le Cotentin et à l'Ouest de Jersey, ainsi qu'un transport général de l'Ouest vers le Nord Est. Sur ple plateau des Minquiers le courant porte alors au Nord-Est.

- Un vent d'Ouest (ou d'Est) aura moins d'effet : pour l'essentiel, un courant Est devant la Bretagne, au-dessus des Minquiers ainsi qu'au Nord et au Sud de Jersey, avec des courants de retour en profondeur dans les zones dépressionnaires et des circulations giratoires près du Cotentin.

Enfin il faut rappeler que, dans une région à bathymétrie irrégulière comme le Golfe Normano-Breton, le déplacement résiduel de la masse d'eau issue d'un point stationnaire est variable selon l'instant de départ par rapport à la marée : ce phénomène, qui est mis en évidence dans notre étude, doit être pris en considération si l'on étudie le devenir en mer d'un rejet ponctuel.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- BENQUE J.P., CUNGE J.A., FEUILLET J., HAUGUEL A., HOLLY F.M. New method for tidal current computation - A.S.C.E. - Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, Vol. 108, WW3, p. 396-417.
- BOWDEN K.F., 1983. Physical Oceanography of Coastal Waters. Ellis Horwood 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, Springer-Verlag, Berlin, p. 87-104.
- Centre National pour l'Exploitation des Océans, 1982. Golfe Normano-Breton. Bilan des connaissances. Rapport CNEOX-COB-ELGMM, juin 1982.
- CHABERT D'HIERES, LE PROVOST, 1978. Atlas des composantes harmoniques de la marée dans la Manche. Annales Hydrographiques, Vol. 6, Fasc. 3.
- CHAPMAN D.C., 1985. Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model. Journal of Physical Oceanography (1985) Vol. 15, p. 1060-1075.
- CSANADY G.T., 1982. Circulation in the coastal ocean. D. Reidel Publishing Company, 279 p.
- DALSECCO S., 1984. Utilisation des éléments finis pour le calcul des surcotes. Rapport n° 3. Rapport EDF-DER HE41/84.20.
- DEMERLIAC, 1973. Calcul du niveau moyen journalier de la mer. Rapport du Service Hydrographique de la Marine.
- FORNERINO M., MOLINES J.M., LE PROVOST C., 1982. Modélisation des courants de marée dans la Manche. Institut National Polytechnique de Grenoble. Rapport de contrat CNEOX n° 80/6260, 267 p.
- GOUGENHEIM, 1953. Fréquence des coefficients de marée. Revue du Comité Central d'Océanographie et d'Etude des Côtes, n° 3, mars 1953.
- JOHNS B., 1983. Physical Oceanography of Coastal and shelf seas. Elsevier Oceanography series n° 35, 470 p.
- KERDREUX M., BRANELLEC P., LE HIR P., 1987. Mesures de courant et de hauteurs d'eau dans le Golfe Normano-Breton. Présentation des résultats bruts. Rapport IFREMER DERO/EL (en préparation).
- Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1984. Golfe Normano-Breton - Etude du régime de l'agitation : Approche des agitations du large. Rapport de contrat pour le CNEOX, 1984.

- Laboratoire National d'Hydraulique, 1961. Modèle réduit des îles Chausey : les conditions naturelles du golfe de St-Malo. Les mouvements du plan d'eau (rapport n° 2) ; les courants de marée (rapport n° 3). Rapports EDF T.163 (octobre 1960) et T.169 (août 1961).
- LE HIR P., SALOMON J.C., LE PROVOST C., CHABERT D'HYERES G., MAUVAIS J.L., 1985. Approche de la circulation résiduelle en baie de Seine. Colloque Baie de Seine, Caen 24-26 avril 1985.
- LOMER F., 1978. La dérive en mers à marée. Thèse de docteur ingénieur. Université P. et M. Curie, Paris. VI.
- L'YAVANC J., KERDREUX M., 1983. Réalisation de mouillages côtiers pour mesures de courant. Rapport CNEOX-ELGMM.
- OFFICER C.B., 1976. Physical Oceanography of Estuaries (and Associated Coastal Waters). John Wiley & sons.
- ORBI A., 1986. La circulation résiduelle de marée dans le Golfe Normano-Breton. Thèse en préparation. Univ. de Bretagne Occidentale.
- PECHON P., GEBEL M., 1986. Modélisation numérique des courants de marée dans le Golfe Normano-Breton. Rapport EDF/LNH n° 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) 54, 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., 1985a. Rotary currents and residual circulation around banks and isolands. 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., MARDELL G.T., MADDOCK L., 1985c. Tidal mixing in the Channel Isles region derived from the results of remote sensing and measurements at sea. Estuarine Coastal and Shelf Science (1985) 20,000.
- SALOMON J.C., LE HIR P., 1981. Etude de l'estuaire de la Seine. Modélisation numérique des phénomènes physiques. Rapport Université de Bretagne Occidentale.
- Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, 1973. Courants de marée de Cherbourg à Paimpol. Iles anglo-normandes. Fascicule n° 553 du SHOM.

TAYLOR G.I., 1921. Tidal oscillations in gulfs and rectangular basins. Proceedings of the London Mathematical Society 20, p. 148-182.

ZIMMERMAN J.T.F., 1981. Dynamics, diffusion and geomorphological significance of tidal residual eddies. Nature, London 290, p. 549-555.

CADRE PHYSIQUE

Deuxième Partie

SEDIMENTOLOGIE

T H E M E I

- CADRE PHYSIQUE :

2^{ème} PARTIE : SEDIMENTOLOGIE

INTRODUCTION

CHAP. I : ETUDE DE LA SEDIMENTATION FINE PAR L'UTILISATION
DES RADIONUCLEIDES ARTIFICIELS.
P. WALKER, Ph. BASSOULLET

CHAP. II : ETUDE DU TRANSIT DES SEDIMENTS SABLEUX PAR
CHARRIAGE.

II.1. : DEBITS DE CHARRIAGE INSTANTANES.
R. LOARER, P. LE HIR

II.2. : CONTRIBUTION DU SONAR LATERAL A L'ETUDE DES
TRANSITS SABLEUX
P. WALKER, J.P. AUFFRET, S. BERNE, Ph. BASSOULLET

II.3. : UTILISATION DE TRACEUR RADIOACTIF POUR L'ETUDE DES
TRANSITS SABLEUX CÔTIERS EN ZONE INTERTIDALE (CÔTE
OUEST-COTENTIN)
B. LONG, Ph. BASSOULLET, A. CAILLOT

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

INTERVENANTS - 2ème partie : SEDIMENTOLOGIE

Coordination : Ph. BASSOULLET - IFREMER - Centre de BREST

	INTERVENANTS IFREMER/Centre de Brest Département DERO/EL	INTERVENANTS EXTERIEURS
Sédimentation fine et radionucléides artificiels	Ph. BASSOULLET	UNIVERSITE DE CAEN (Laboratoire de Géologie marine) et LABORATOIRE de RADIO ECOLOGIE MARINE DE CHERBOURG (Centre de la Hague) C. LARSONNEUR, P. WALKER
Etude du transit des sédiments sableux par charriage : - Débits de charriage instantanés - Contribution du sonar latéral à l'étude des transits sableux - Utilisation de traceurs radioactif côte Ouest-Cotentin	R. LOARER P. LE HIR MM. DANIELOU S. BERNE * L. d'OZOUVILLE * Ph. BASSOULLET GENAVIR Ph. BASSOULLET J. L'YAVANC R. LOARER GENAVIR	UNIVERSITE DE CAEN (Laboratoire de Géologie marine) J.P. AUFFRET, F. GRESSELIN, P. WALKER - INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Océanographie - Rimouski (Quebec) CANADA B. LONG - COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE (Service des Applications des Radioéléments) - Gif/Yvette A. CAILLOT, P. GOURLEZ, P. REGNARD, T. ROLL - UNIVERSITE DE PARIS SUD ORSAY (Laboratoire de Géomorphologie) P. FARNOLE - ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE MECANIQUE (Laboratoire de Genie Civil) NANTES Y. RIOU

* Département DERO/GM

THEME I : 2^{ème} PARTIE

SOMMAIRE

	Page
INTRODUCTION - OBJECTIFS	106
CHAP. I - ETUDE DE LA SEDIMENTATION FINE PAR <u>L'UTILISATION DES RADIONUCLEIDES ARTIFICIELS</u>	108
I.1. Méthodologie et rappels sur l'origine et le comportement des radionucléides	110
I.1.1. Méthodologie	110
I.1.2. Rappels sur l'origine et le comportement des radionucléides dans l'eau et les sédiments	111
I.1.3. Processus et variables intervenant sur le piégeage des radionucléides dans les sédiments ...	112
I.2. Radioactivité et caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des sédiments	114
I.2.1. Mise en évidence d'une corrélation entre l'activité en ⁴⁰ K et l'activité des radionucléides d'origine artificielle	114
I.2.2. L'activité en ⁴⁰ K, une fonction des caractéristiques granulométriques des sédiments ..	118
I.2.3. Conclusions : la "normalisation au ⁴⁰ K"	119
I.3. Interprétation des profils verticaux de radioactivité et caractéristiques sédimentologiques des dépôts	121
I.3.1. Activités en ¹³⁷ Cs rejetées dans le golfe	121
I.3.2. Modélisation de l'accumulation des radionucléides dans les sédiments	122
I.3.3. Interprétation des profils et détermination des vitesses de sédimentation	125
CONCLUSIONS	130
CHAP. II - ETUDE DU TRANSIT DES SEDIMENTS SABLEUX PAR <u>CHARRIAGE</u>	132
II.1. Etude des débits de charriage instantanés dans le Golfe Normano-Breton	133
II.1.1. Les courants de marée	133
II.1.2. Le charriage	138
II.1.3. Le débit de charriage instantané théorique	139
II.1.4. Les sédiments superficiels	144
II.1.5. Stabilité et instabilité des sédiments superficiels	146
II.1.6. Conclusions	149

II.2. Etude des transits sableux : contribution du sonar latéral	150
II.2.1. Méthodologie	150
II.2.2. Répartition des sédiments	152
II.2.3. Les structures sédimentaires	152
II.2.4. Les transits sableux	154
II.2.5. Comparaison des directions de transit avec les résultats du modèle mathématique des courants de marée	156
CONCLUSIONS	158
II.3. Etude des transits sableux côtiers en zones intertidales : utilisation de traceurs radioactifs côte Ouest Cotentin ..	159
II.3.1. Introduction - Présentation des sites d'études ...	159
II.3.2. Matériel utilisé, équipements et principe de la méthode	161
II.3.3. Les conditions physiques de l'étude	166
II.3.4. Analyses des divers sites d'études	170
II.3.5. Conclusions de l'étude.	180
BIBLIOGRAPHIE (Sédimentologie)	183
ANNEXES (Sédimentologie)	187

INTRODUCTION

INTRODUCTION

DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE DANS LE GOLFE NORMANO-BRETON

Les objectifs visant à une meilleure connaissance de la dynamique sédimentaire dans le Golfe Normano-Breton, portent sur deux points constituant les deux chapitres de la partie sédimentologie :

- d'une part, l'étude du devenir des suspensions et donc du transport du matériel fin particulaire dans la masse d'eau. Cet objectif est analysé ici par une tentative d'évaluation de la vitesse de sédimentation dans divers environnements sédimentaires du Golfe Normano Breton à partir de l'étude de la répartition de divers radionucléides,

- d'autre part, l'étude du transit de sédiments sableux principalement par charriage. Cet aspect est envisagé par une analyse de la répartition des tensions de frottement sur les fonds du golfe en fonction des coefficients de marée.

Deux méthodes d'études de déplacements sédimentaires sont ensuite décrites et permettent, au moins dans un cas, de quantifier le transit sableux. La première s'appuie sur l'analyse d'enregistrements de sonar à balayage latéral, levés au cours de diverses campagnes sur l'ensemble du golfe ; la seconde concerne les transports sableux littoraux dans les zones intertidales de la côte Ouest-Cotentin par marquages avec des éléments radioactifs.

CHAPITRE I

ETUDE DE LA SEDIMENTATION FINE

PAR L'UTILISATION DES RADIONUCLEIDES ARTIFICIELS

CHAPITRE I

ETUDE DE LA SEDIMENTATION FINE

PAR L'UTILISATION DES RADIONUCLEIDES ARTIFICIELS

Cette étude de la sédimentation fine à l'aide des radionucléides artificiels a fait l'objet d'un contrat (LARSONNEUR, WALKER, 1986) entre l'IFREMER et le Laboratoire de Géologie Marine de l'Université de Caen en collaboration avec le Laboratoire de Radioécologie Marine du C.E.A. de la Hague et le Laboratoire d'Océanographie Physique de l'Université de Bretagne Occidentale.

Les travaux ont été entrepris au printemps 1983 et 14 carottes ont été prélevées dans les zones abritées où se déposent des sédiments sablo-vaseux à vaseux. La figure I-1 donne la localisation des stations échantillonnées qui se répartissent entre le Havre de Carteret et le Guildo.

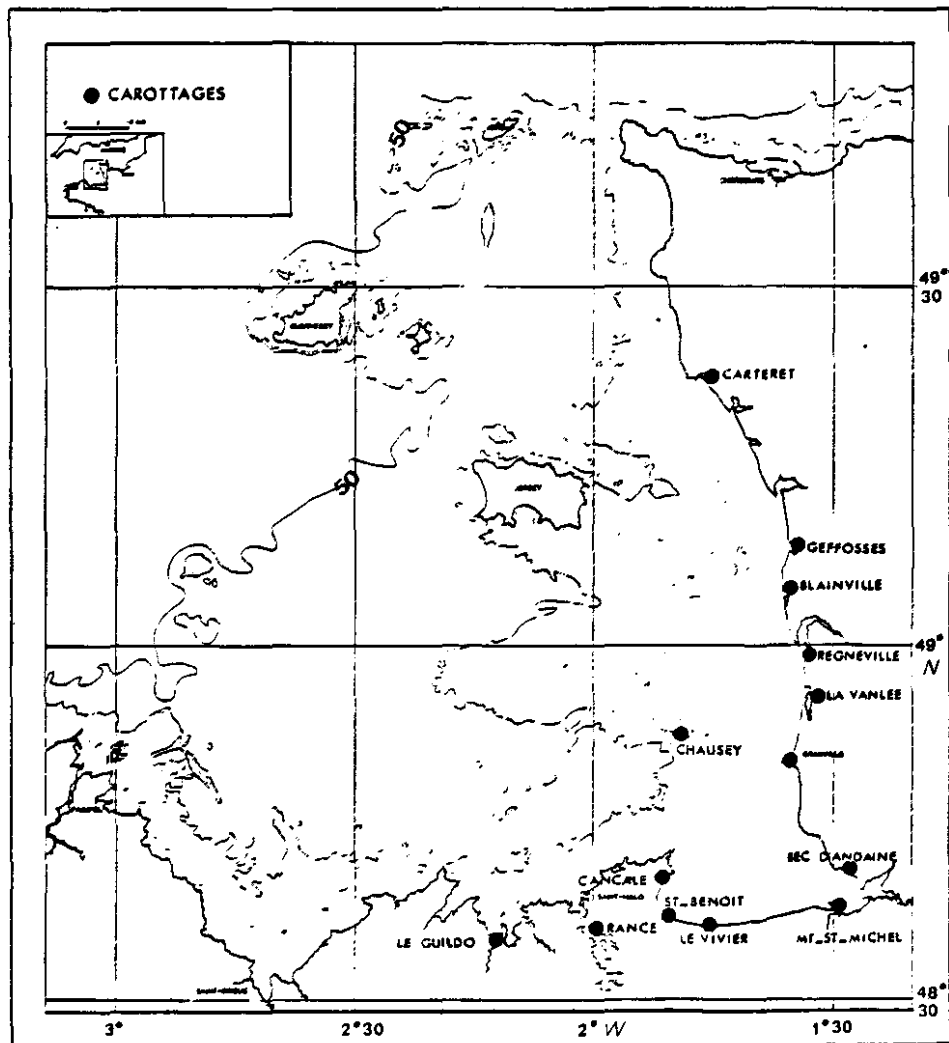


Fig. I.1. : Localisation géographique des carottages.

Les comptages de radionucléides ont montré que les éléments artificiels de courte période : ^{106}Ru , ^{144}Ce , ^{125}Sb , rejetés en grande partie par l'usine de retraitement de la Hague, ne sont détectés que dans les couches supérieures des carottes et que leur activité évolue rapidement dans le temps, rendant illusoire toute interprétation géochronologique précise.

A l'inverse, la répartition verticale du ^{137}Cs est plus large et permet une datation des diverses couches sédimentaires. Malheureusement, le taux de ^{137}Cs fixé sur les sédiments varie en fonction de la granulométrie.

En utilisant l'activité ^{40}K comme référence, il est possible de s'affranchir des variations granulométriques ou minéralogiques et ainsi, de comparer les différents profils verticaux.

L'interprétation des fluctuations de l'activité du ^{137}Cs a enfin été rendue possible par la construction d'un modèle d'accumulation permettant de déterminer la date des dépôts et le taux de sédimentation au lieu considéré.

I.1. - METHODOLOGIE ET RAPPELS SUR L'ORIGINE ET LE COMPORTEMENT DES RADIONUCLEIDES

I.1.1. Méthodologie

Les carottages ont été implantés dans les havres du Cotentin, dans la baie du Mont-Saint-Michel et dans la baie de Saint-Malo (fig. I.1). Ils ont été réalisés dans les environnements les plus riches en sédiments fins, sur le schorre (Carteret, Geffosses, Blainville, La Vanlée, Le Bec d'Andaine, le Mont-Saint-Michel), sur les slikkes vaseuses (Régneville, Le Vivier sur Mer, Saint-Benoît-des-Ondes, La Rance, Le Guildo) et dans les ports (Granville et Cancale).

- Acquisition des données

Sur chaque site choisi, 3 carottes de 140 mm de diamètre et de 2 m de longueur au maximum sont prélevées. Ces 3 carottages sont contigus afin d'obtenir la même colonne lithostratigraphique en évitant les changements latéraux de faciès.

L'échantillonnage est réalisé suivant un pas variant de 2 à 5 cm en prélevant 2 échantillons à chaque niveau. L'un, destiné à la mesure de l'activité nucléaire, est séché, puis broyé et tamisé à 100 μm ; l'autre est destinée aux analyses granulométriques, minéralogiques, voire géochimiques.

La granulométrie est effectuée sur une colonne de 12 tamis suivant une progression géométrique V2, après lavage par voie humide sur tamis à 40 μm . La fraction fine est récupérée pour effectuer une microgranulométrie au Coulter Counter et obtenir une courbe relative à l'ensemble du spectre. Les paramètres granulométriques de position ou de forme sont calculés par la méthode des moments, selon un programme établi au Laboratoire de Géologie Marine de Caen (Crevel, 1983) et adapté à nos objectifs.

- Les taux de carbonates du sédiment entier sont déterminés (par Calcimétrie Bernard) à partir de la fraction fine et de la fraction grossière.

- Certains échantillons sont soumis à l'analyse aux rayons X afin de déterminer le cortège des minéraux argileux.

- Les analyses de radionucléides ont été pratiquées au C.E.A. (Centre de La Hague) et au Groupe d'Etudes Atomiques de Cherbourg. Elles consistent en la détection des photons γ émis par certains radioéléments, puis en leur reconnaissance. Ces comptages ont été effectués à l'aide de sondes au Ge-Li dans des conditions standardisées afin de s'affranchir des influences extérieures à la composition de l'échantillon. L'activité à la date du prélèvement est ensuite calculée pour chaque élément en fonction de l'activité mesurée et de la loi de décroissance radioactive. Toutefois, pour certains isotopes à courtes périodes (^{144}Ce , ^{106}Ru), la décroissance de l'activité est rapide et la mesure ne peut pas être faite étant donné que l'énergie émise est inférieure au bruit de fond. L'énergie minimale détectable varie avec chaque élément, elle est de 170 pCi/kg pour ^{144}Ce , de 40 pCi/kg pour ^{137}Cs et de 350 pCi/kg pour ^{106}Ru .

- Traitement des données

L'ensemble des paramètres granulométriques ou géochimiques est transféré sur fichier informatique afin de pouvoir traiter automatiquement un grand nombre de données.

I.1.2. Rappels sur l'origine et le comportement des radionucléides dans l'eau et les sédiments

I.1.2.1. Origine des radionucléides

Les radionucléides peuvent avoir une origine naturelle (tellurique ou atmosphérique) ou artificielle.

Les éléments naturels, émetteurs γ , qui ont été retenus lors des analyses sont ^{40}K , ^{234}Th , ^{238}U . Le ^7Be lié aux retombées atmosphériques naturelles n'a pas pu être détecté compte tenu de sa courte période (53 jours). Les radioéléments artificiels peuvent être apportés par les retombées des expériences de bombes nucléaires dans l'atmosphère (1945 à 1965 et tirs chinois de 1980). Ils peuvent également apparaître dans les milieux naturels tout au long du cycle de transformation des combustibles nucléaires. Le ^{137}Cs (période 30, 4 ans), le ^{144}Ce (période 290 j), le ^{103}Ru et le ^{106}Ru (périodes respectives 40 j et 1 an) peuvent avoir l'une ou l'autre origine. Le ^{125}Sb et le ^{134}Cs ont une origine essentiellement industrielle et ont été ou sont encore rejetés par les usines de retraitement des déchets radioactifs ; celles de La Hague et de Windscale notamment.

I.1.2.2. Comportement physico-chimique des radionucléides dans l'eau et les sédiments :

- dans l'eau :

Nous n'aborderons ici que les propriétés des radionucléides qui apparaissent le plus fréquemment dans le milieu, à

savoir : ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{106}Ru , ^{125}Sb et ^{40}K . Pour les radionucléides artificiels, la forme physico-chimique dépend de nombreux facteurs tels que la source, le traitement avant rejet, les propriétés physico-chimiques du milieu naturel où s'effectue ce rejet.

Le ^{137}Cs est considéré comme un élément cationique soluble qui se fixe facilement sur certains sites des minéraux argileux.

Le ^{125}Sb est généralement présent sous forme anionique soluble mais il peut évoluer au cours du temps vers des formes insolubles.

Le ^{144}Ce est un élément facilement hydrolysable qui se fixe rapidement sur le matériel particulaire.

Le comportement du ^{106}Ru est variable, il dépend de son traitement chimique. Il est souvent complexé (Gueguéniat, 1974). Ces divers composés peuvent présenter des propriétés physico-chimiques très différentes. Le complexe nitro rejeté par l'usine de la Hague est peu hydrolysable et reste sous forme soluble.

Le ^{40}K est un radionucléide naturel tellurique et se trouve fixé dans les mailles cristallines des différents minéraux. On le trouve donc dans les éléments particuliers mais une partie de ce potassium passe en solution dans l'eau de mer (320 pCi/l).

- dans les sédiments :

Le comportement des radioéléments dans les sédiments est mal connu. Il semble que la fixation du césium soit assez durable et qu'il soit ainsi stocké dans la colonne sédimentaire. D'autres apports de césium soluble, par l'eau interstitielle, sont cependant probablement possibles.

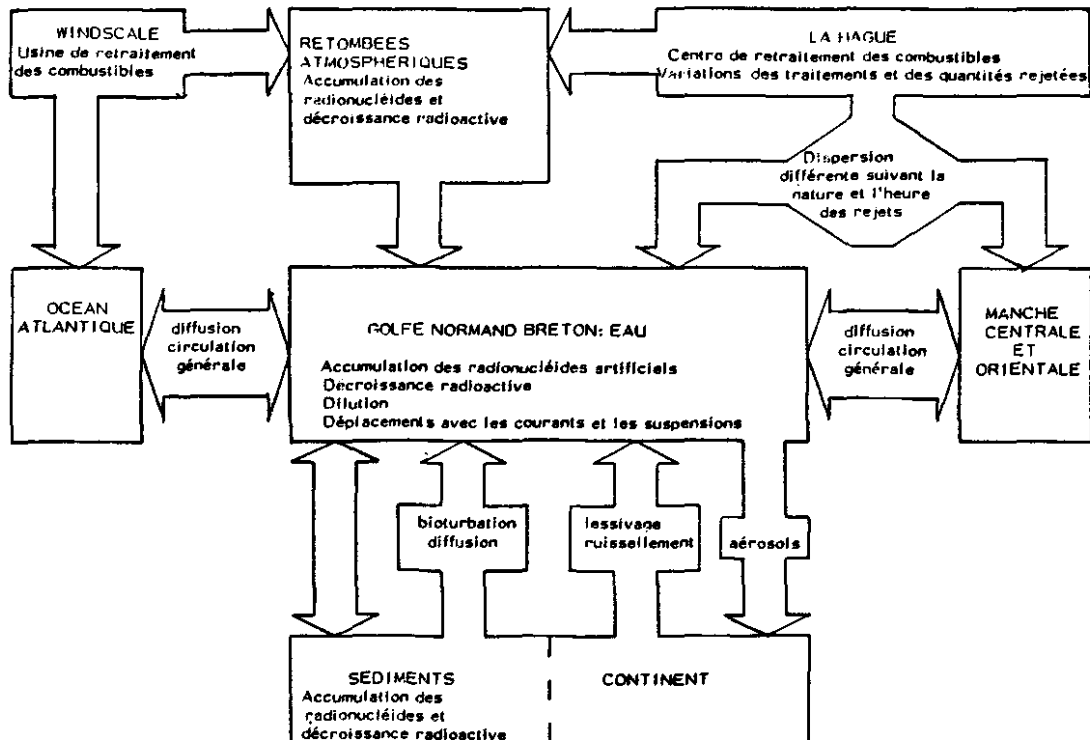
Du fait de son caractère soluble, le ^{125}Sb est certainement lui aussi véhiculé par l'eau interstitielle à travers les accumulations sédimentaires. Il peut ainsi être introduit très en profondeur ou à l'inverse être chassé lors de la compaction. Le ^{144}Ce doit être relativement bien fixé sur les sédiments. L'évolution du ^{106}Ru n'est pas connue.

II.1.3. Processus et variables intervenant sur le piégeage des radionucléides dans les sédiments

De nombreux processus liés aux caractéristiques des masses d'eau, des sédiments ou de l'activité biologique interfèrent sur les profils de radioactivité enregistrés au sein des carottes. Le schéma ci-dessous résume les diverses interactions.

Pour le Golfe Normano-Breton, les retombées atmosphériques et les rejets de l'usine de retraitement de la Hague constituent les sources principales.

Les éléments à courte période : ^{106}Ru , ^{144}Ce , ^{125}Sb proviennent essentiellement de la Hague. Le tir chinois de 1980 dans l'atmosphère a exercé une influence notable sur la radioactivité des précipitations.



Le ^{144}Ce est presque toujours absent dans les échantillons d'eau de mer car il est transporté par les particules en suspension.

Le ^{137}Cs est généralement détecté profondément dans les sédiments et il est impossible de faire la part des origines atmosphériques et rejets industriels.

- Transport des radionucléides

La dispersion des déchets radioactifs dépend de la charge sédimentaire et de la dynamique des masses d'eau. Le créneau horaire pendant lequel les radioéléments sont rejetés a été choisi de telle sorte que l'essentiel de la radioactivité soit mélangé aux eaux de la Manche centrale, c'est-à-dire lorsque les courants portent vers le Nord dans le raz Blanchard. Cependant une part des polluants revient vers le Sud, notamment vers la baie du Mont-Saint-Michel, où le ^{106}Ru et le ^{144}Ce se concentrent (Guéguénat et al, 1979, 1981, 1985).

- Fixation des radionucléides par les sédiments :

Une fois fixé sur le particulaire, le radioélément transite jusqu'à son lieu de dépôt. Dans le Golfe, l'agitation due aux courants de marée n'autorise généralement pas la sédimentation des fines en domaine subtidal, les accumulations s'opèrent pour l'essentiel dans les zones abritées du littoral, là où ont été réalisés nos carottages.

La dispersion des radionucléides est également liée aux phénomènes de diffusion, d'adsorption - désorption et de bioturbation mais ce sont là des paramètres dont l'influence est difficile à appréhender et nous n'en avons pas tenu compte. Il apparaît que la répartition verticale des radioactivités est essentiellement liée à la granulométrie des dépôts et à la vitesse de sédimentation, les influences chimiques ou biosédimentaires jouent généralement un rôle secondaire. Dans ces conditions, une analyse précise de la lithologie est indispensable pour interpréter les profils de radioactivité relevés et rendre compte de certaines discontinuités d'origine sédimentologique.

I.2. - RADIOACTIVITE ET CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES ET MINERALOGIQUES DES SEDIMENTS

En comparant les profils de radioactivité des éléments artificiels ^{144}Ce , ^{106}Ru , ^{125}Sb , ^{137}Cs et ceux du ^{40}K , radionucléide d'origine naturelle, il apparaît que leur activité évolue parallèlement.

Par ailleurs, la confrontation pour chaque carotte de la colonne lithostratigraphique et des profils verticaux de radioactivité montre que les brusques variations d'activités sont liées à des différences granulométriques importantes.

Or, si les apports d'isotopes artificiels sont récents et très variables dans le temps, l'activité en ^{40}K naturel est assez constante pour un lieu donné et ne varie probablement qu'en fonction de la composition minéralogique ou granulométrique du sédiment. C'est pourquoi, nous avons cherché à mettre en évidence :

- un rapport entre l'activité des différents radionucléides et celle du ^{40}K ,
- une relation entre les paramètres sédimentologiques et les variations d'activité de ^{40}K .

I.2.1. Mise en évidence d'une corrélation entre l'activité en ^{40}K et l'activité des radionucléides d'origine artificielle

Le traitement informatique des données nous permet une comparaison rapide entre l'activité des différents radionucléides.

Malgré une certaine dispersion des nuages de points, il apparaît sur la Fig. I.2. que l'activité émise par les radionucléides artificiels croît en même temps que celle du ^{40}K . Ceci est particulièrement net pour le ^{137}Cs , les autres radionucléides montrant une relation moins directe. Cette différence de comportement résulte probablement de la courte période des éléments considérés : ^{106}Ru , ^{144}Ce , ^{125}Sb , et de leurs propriétés physico-chimiques.

K 40

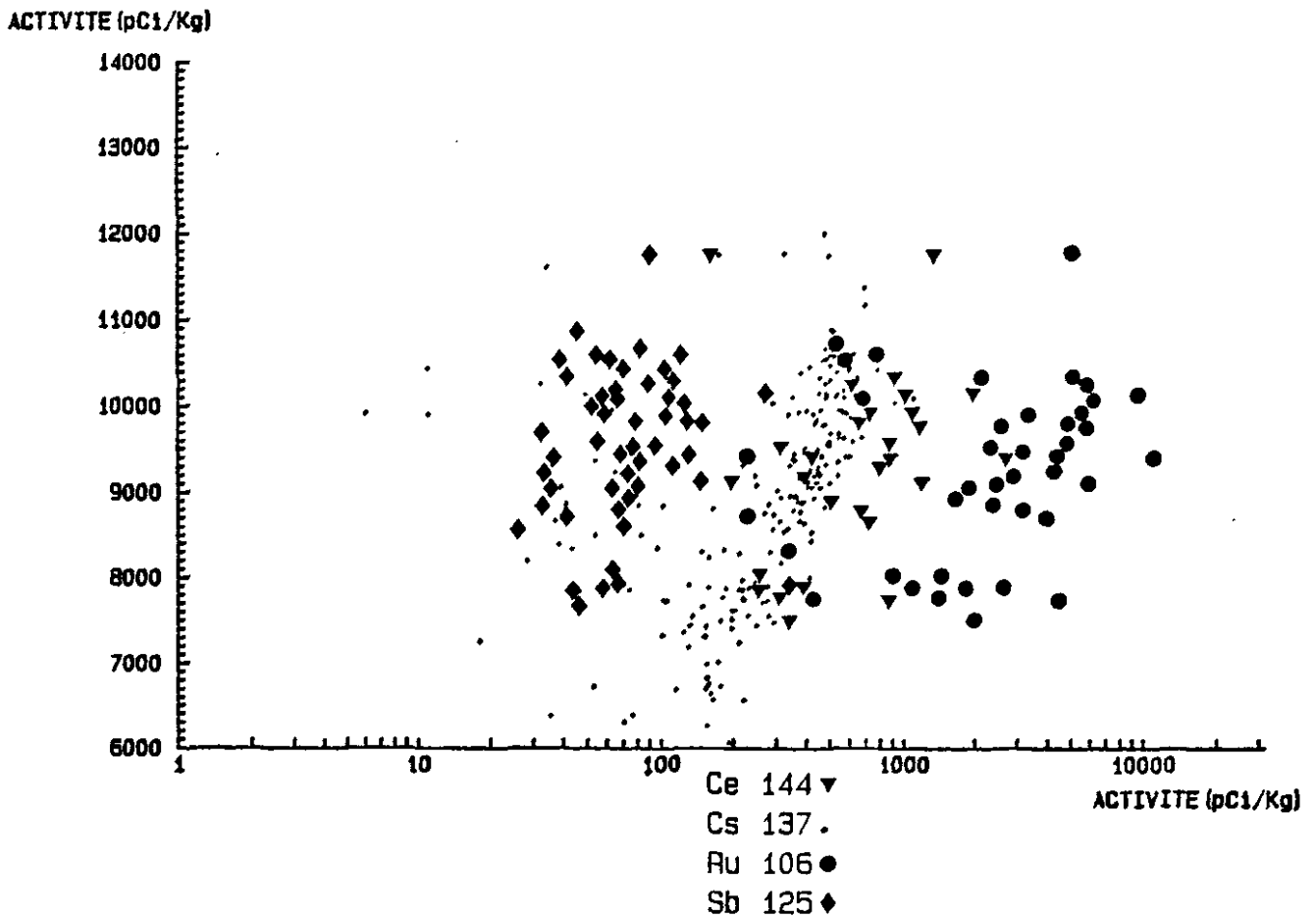


Fig. I.2. : Activités des radionucléides artificiels en fonction de celles du ^{40}K , pour les échantillons étudiés.

I.2.1.1. Sélection des échantillons et des éléments pour la mise en évidence d'une relation avec l'activité du ^{40}K

En effet, l'activité des isotopes artificiels fluctue de façon importante dans le temps, du fait, d'une part, de la variabilité des apports, d'autre part de la décroissance radioactive.

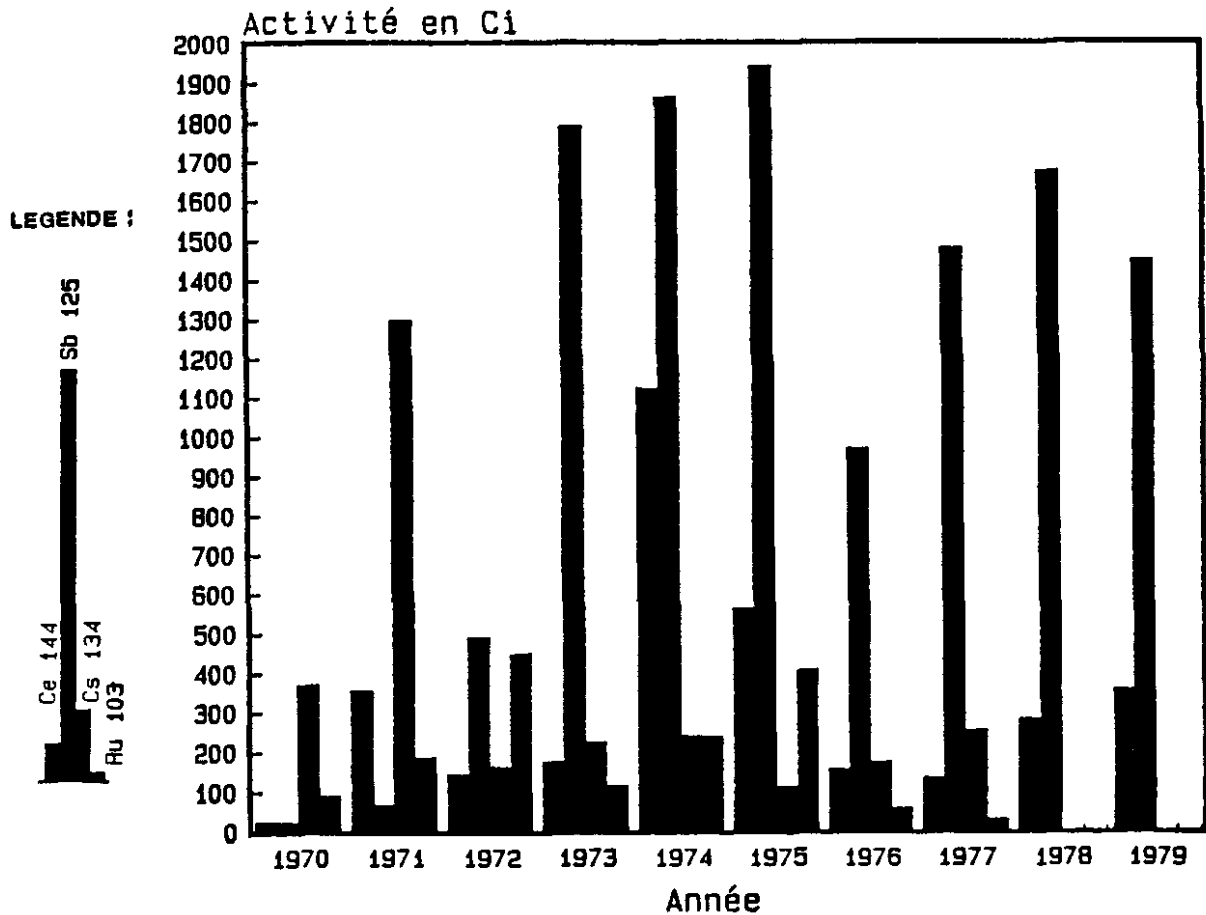
Nous avons donc sélectionné les échantillons et les isotopes étudiés afin de comparer des activités fixées par les sédiments correspondant à un niveau de contamination identique.

- Elimination des radioéléments à courtes périodes
(1 à 2 ans)

Nous n'avons pas retenu les éléments de courte période ^{106}Ru , ^{144}Ce , ^{125}Sb pour deux raisons principales :

* Les quantités rejetées sont très variables dans le temps et le plus souvent assez fortes (Fig. I.3.).

FIG. I-3: Usine de la Hague: Rejets annuels
*Ce 144 *Sb 125 *Cs 134 *Ru 103



Il est donc probable que les pics de rejets importants soient enregistrés dans les sédiments. Ainsi, une corrélation entre les activités émises par ces radionucléides artificiels et l'activité du ^{40}K liée au cortège minéralogique, peut n'être que fortuite.

* Du fait de leur courte période, l'activité mesurée est souvent très différente de celle piégée dans le sédiment à l'instant du dépôt. Par exemple, au bout d'un an, 59 % du ^{144}Ce , 50 % du ^{106}Ru et 77 % du ^{125}Sb subsistent seulement dans le dépôt.

^{137}Cs - ^{40}K Sélection des échantillons afin d'améliorer la relation

L'activité en ^{137}Cs est assez constante depuis le début des années 70. Cette constante peut être observée sur les profils verticaux des carottes prélevées dans les zones à grande vitesse d'accumulation : Genêts, Granville notamment. Nous avons donc retenu la totalité des échantillons de ces carottes.

Sur les profils des carottes où l'apparition du ^{137}Cs est détectée (1954), on peut constater qu'après une période d'augmentation rapide de l'activité, la courbe s'infléchit et se stabilise jusqu'à la surface (Régnéville, Blainville).

Si nous admettons, en première approximation, que la vitesse de sédimentation a été pratiquement constante depuis 1954, le tiers supérieur du profil vertical de radioactivité de ^{137}Cs représente une période de dix ans environ au cours de laquelle le niveau de contamination des eaux a peu varié comme nous l'avons signalé ci-dessus. Nous pouvons donc estimer que les activités mesurées aujourd'hui, sur cette fraction de la carotte, correspondent à pratiquement 80 % de l'activité initiale au moment du dépôt.

$$A_{1983} = A_{1973} e^{-\lambda t}$$

avec : $\lambda = \frac{\text{Log } 2}{T}$, $T = 30,2$ ans et $t = 10$ ans

d'où :

$$\frac{A_{1983}}{A_{1973}} = 0,79$$

C'est pourquoi nous retiendrons les échantillons appartenant à cette partie des prélèvements, l'influence de la désintégration radioactive pouvant alors être considérée comme négligeable.

I.2.1.2. Relation entre ^{137}Cs et ^{40}K

La sélection d'un certain nombre d'échantillons étant opérée, nous avons comparé leurs activités en ^{40}K et ^{137}Cs sur diverses carottes appartenant à un même secteur géographique (1)

Le coefficient de corrélation est toujours supérieur à 0,8 ce qui permet de conclure à une bonne qualité de la fonction liant l'activité des deux radioéléments.

(1) Nous remercions MM. J.P. Auffret et P. Guéguéniat de nous avoir transmis des mesures de Radioactivité non publiées qui nous ont permis d'augmenter le nombre d'échantillons utilisés (Le Vivier 1 - Granville 1 - Grouin Sud - Le Guildo 1 et 2 - Port Duc - Port Nieux - St. Benoît 1 - La Houle - Tréguier - Le Legué - Beuz).

Certaines carottes ne respectent pas cette linéarité. Il s'agit en fait d'échantillons prélevés à l'embouchure des rivières dont la charge sédimentaire est particulièrement riche en muscovite, minéral potassique. Il semble donc normal que pour un même taux de contamination par le ^{137}Cs , ces sédiments particuliers possèdent une activité en ^{40}K supérieure à celle des autres secteurs.

Cette remarque nous permet de tirer deux conclusions importantes :

1) La contamination des sédiments par le ^{137}Cs semble être constante dans le temps et dans l'espace, au moins pour les dépôts récents (années 1970 à 1980).

2) Les relations mises en évidence ici pour le Golfe Normano-Breton, ne peuvent être extrapolées à d'autres provinces sédimentaires.

I.2.2. L'activité en ^{40}K , une fonction des caractéristiques granulométriques des sédiments

Une observation attentive des profils sédimentologiques et des profils de radioactivité permet de constater que les pics d'activités en ^{40}K sont fréquemment liés à une augmentation du taux de particules fines et parallèlement à un affinement du diamètre moyen de l'échantillon. C'est pourquoi, les indices granulométriques sont comparés avec l'activité en ^{40}K du sédiment.

- Relation entre l'activité en ^{40}K et les paramètres granulométriques

Seuls des échantillons provenant d'un même niveau et ayant les mêmes caractéristiques lithologiques ont été retenus. La bonne corrélation obtenue à partir de 3 carottes du littoral Ouest Cotentin (cf. Fig. I.4.) montre que le taux d'activité en ^{40}K , considéré comme constant en un lieu et pour une granulométrie donnée, varie en fonction du pourcentage de particules inférieures à 40 μm .

Ainsi, pour un site déterminé, la granulométrie du sédiment se reflète dans l'activité en ^{40}K ; ce qui traduit l'homogénéité minéralogique du lieu.

- Activités en ^{40}K et taux de carbonates

L'influence du taux de carbonates sur l'activité en ^{40}K a été analysé. Pour ce faire, il faut s'affranchir de la variable "granulométrie". En conséquence, un calcul de l'activité de ce radioélément a été établi pour un échantillon virtuel contenant 100 % de particules fines. La représentation graphique de cette activité calculée en fonction du pourcentage de carbonates ne donne pas de résultats convaincants. La raison principale de la mauvaise corrélation des points (nuage de points), tient probablement dans le fait que les pourcentages en carbonate des sédiments de la côte ouest du Cotentin sont assez constants et le plus souvent compris entre 30 % et 50 %. Cette conclusion illustre une fois encore le caractère homogène des populations de particules sédimentaires mises en mouvement dans le Golfe Normano-Breton.

K 40

ACTIVITE (pCi/Kg)

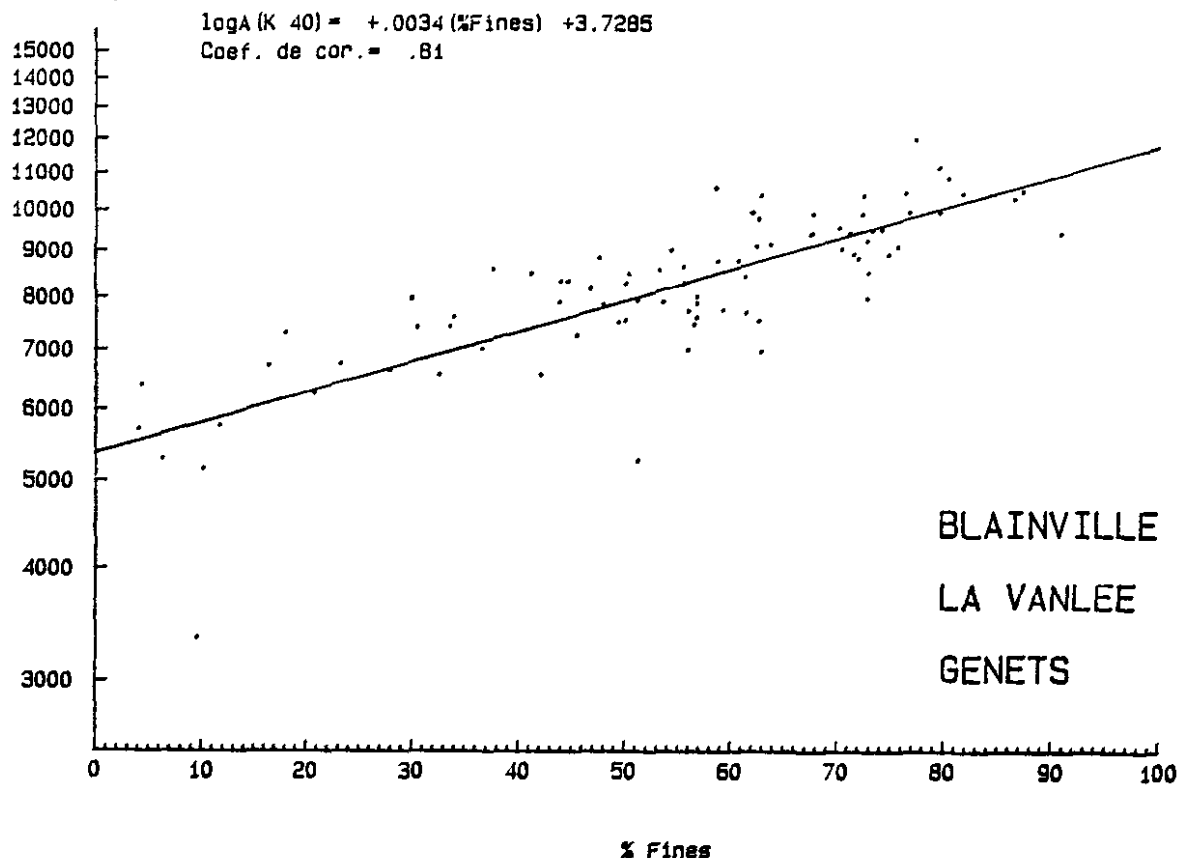


Fig. I.4. : Corrélations taux d'activité en ^{40}K et pourcentage de fines pour 3 carottes.

- Activités en ^{40}K et minéraux argileux

Des analyses aux rayons X ont été faites pour déterminer le cortège argileux de quelques échantillons afin de voir si l'activité en ^{40}K variait corrélativement avec la proportion d'illite (minéral très abondant dans les cortèges argileux du golfe).

Les résultats ne permettent pas de conclure. Ni la proportion relative d'illite par rapport aux autres minéraux, ni la cristallinité du minéral qui est approchée par la largeur du pic à mi-hauteur, ne semblent liées à l'activité du radioélément ^{40}K .

Cette fois encore, l'homogénéité des échantillons nous empêche peut-être de déceler une variation minime.

I.2.3. Conclusions : la "normalisation au ^{40}K "

Quel est l'objectif justifiant l'emploi de cette transformation ? Il s'agit d'utiliser cette méthode afin de comparer les activités des échantillons d'une même carotte, ou d'un groupe de carottes de caractéristiques sédimentologiques identiques, en s'affranchissant notamment des variations de la granulométrie.

Pourquoi rapporter les activités des radionucléides artificiels à l'activité du ^{40}K ?

Il est intéressant de noter que nous opérons une transformation mettant en jeu uniquement des mesures de désintégration radioactive. Les activités du ^{40}K et du ^{137}Cs de l'échantillon sont mesurées simultanément et par le même appareil. Nous limitons, ainsi, les erreurs analytiques ou méthodologiques en évitant de recourir à d'autres mesures. D'autre part, le ^{40}K , contenu dans les sédiments, a essentiellement une origine tellurique et, dans le Golfe Normano-Breton, il est lié, le plus souvent, à la fraction argileuse à forte teneur en illite. Rappelons, cependant, que certains échantillons contenant une fraction sableuse riche en muscovite, comme ceux de la Rance, ont une activité en ^{40}K élevée. Il apparaît, enfin, que pour un site donné, l'activité en ^{40}K correspond à la granulométrie du sédiment.

Remarque : Précisons que, pour procéder à cette "normalisation", il faut admettre que le taux de ^{137}Cs fixé varie en fonction de la composition minéralogique et granulométrique de l'échantillon, et indépendamment du degré de contamination du milieu. Cette condition est sans doute vérifiée pour les niveaux d'activité relativement faibles enregistrés dans le Golfe Normano-Breton. Dans le cas d'une forte contamination ponctuelle, peut-être en serait-il autrement ?

Quelle est la méthode utilisée ?

L'objectif est d'élaborer un profil vertical de radioactivité, virtuel, en calculant, pour chaque échantillon, l'activité en ^{137}Cs correspondant à une concentration constante en ^{40}K sur l'ensemble de la carotte. Nous avons retenu la valeur 10.000 pCi/kg sachant que les activités sont comprises le plus souvent entre 5.000 et 15.000 pCi/kg. Pour ce faire, nous déterminons d'abord les activités en ^{137}Cs et en ^{40}K , nous calculons l'activité virtuelle en ^{137}Cs émise par le sédiment si son activité en ^{40}K était de 10.000 pCi/kg (cf. Fig. I.5.).

Etant donné que les variations naturelles en ^{40}K sont liées à la granulométrie, cette méthode, par le choix d'une référence constante en ^{40}K , permet d'obtenir un profil indépendant des variations granulométriques et directement corrélé au taux de contamination de l'environnement.

Pour la côte Ouest Cotentin, la relation est :

$$B_0 = 930,25 A_0^{0,386}$$

$$B_1 = 930,25 A_1^{0,386}$$

$$\text{d'où } A_1 = \left(\frac{B_1}{B_0} \right)^{2,6} \cdot A_0$$

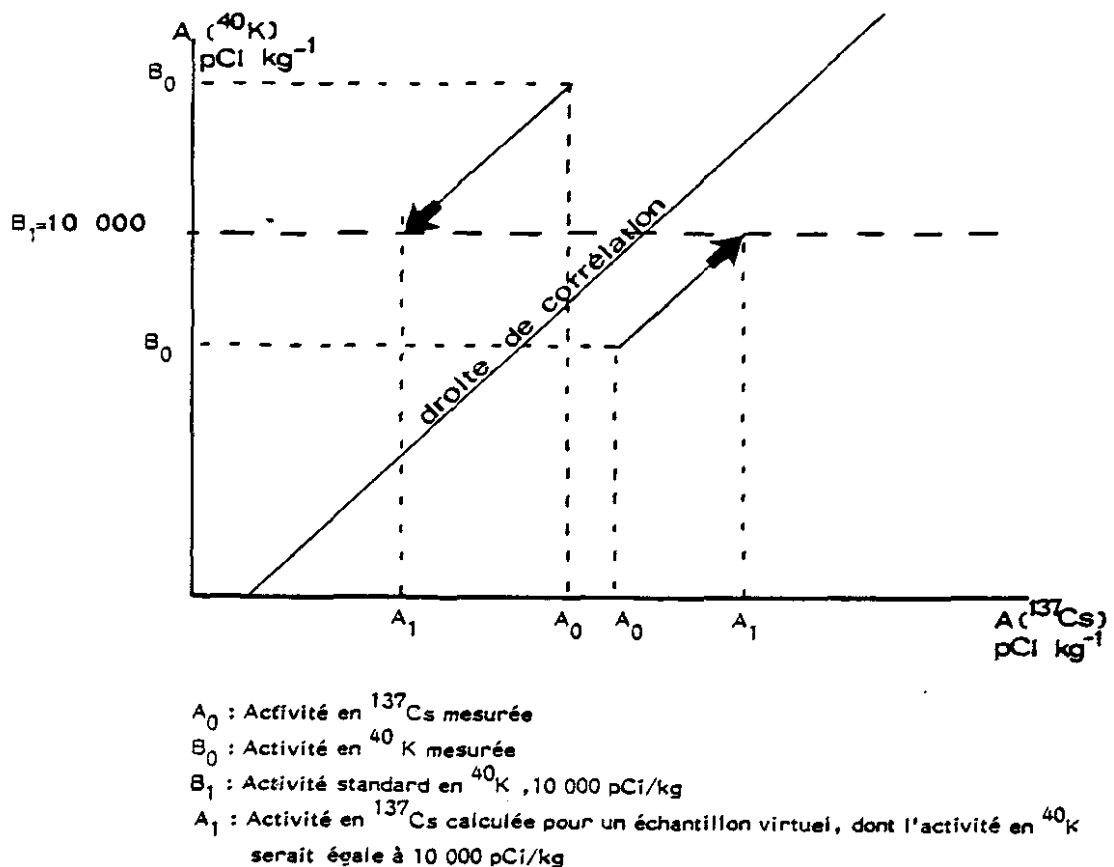


Fig. I.5. : Schéma du principe de détermination de l'activité virtuelle en ^{137}Cs .

Donc pour l'étude d'un site, il suffit de mesurer l'activité de sédiments superficiels, prélevés simultanément et en prenant soin de choisir des échantillons de granulométrie variée.

I.3. - INTERPRETATION DES PROFILS VERTICAUX DE RADIOACTIVITÉ ET CARACTERISTIQUES SEDIMENTOLOGIQUES DES DEPOTS

I.3.1. Activités en ^{137}Cs rejetées dans le Golfe Normano-Breton

Elles proviennent d'une part, des retombées atmosphériques. Les retombées sur la France en mCi/km^2 ont été mesurées (Guary et al., 1984) sur la période 1954-1980. Les pics les plus importants sont constatés en 1959 et 1963. Depuis les années 1966-67, l'activité des retombées a diminué considérablement.

D'autre part, elles proviennent de l'usine de la HAGUE (COGEMA). Le graphique figure I.6. montre, durant les années 1966 à 1979, le pic de l'année 1971. Depuis, les quantités éliminées annuellement sont pratiquement stables.

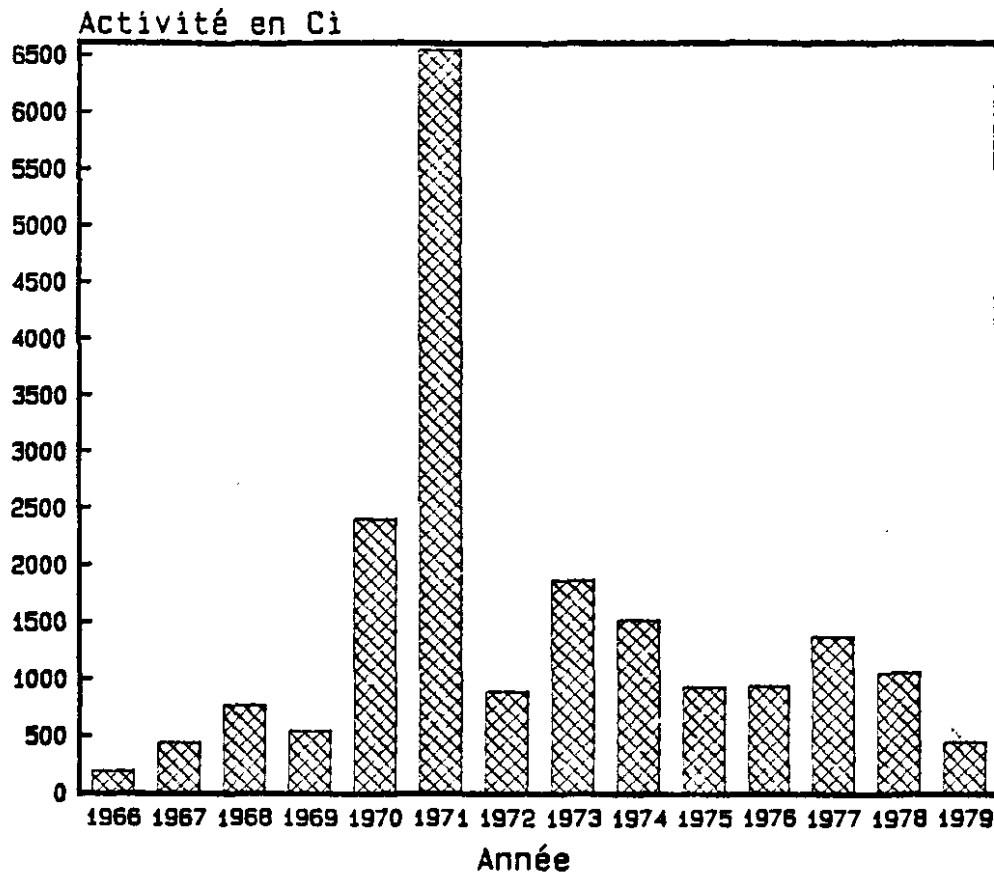


Fig. I.6. : Rejets annuels à l'usine de la HAGUE en Césium 137

I.3.2. Modélisation de l'accumulation des radionucléides dans les sédiments

Afin d'interpréter les profils verticaux de radioactivité, l'accumulation de la radioactivité reçue par les eaux et les sédiments du golfe a été modélisée de façon simple, en tenant compte de la décroissance radioactive jusqu'au moment des carotages.

I.3.2.1. L'hypothèse "événementielle"

Une façon classique d'interpréter les profils d'activité du ^{137}Cs consiste à repérer deux pics d'activité bien marqués et à leur associer les maximum des retombées de 1959 et de 1963 (Ritchie et al, 1975 ; Robbe et al., 1983).

En ce qui concerne le Golfe Normano-Breton, l'application du schéma interprétatif proposé devrait faire apparaître trois pics d'activité (1959, 1963, 1971) suivis d'une décroissance marquée des concentrations jusqu'à la surface. Or, ce résultat n'apparaît pas ; un autre modèle d'interprétation doit être recherché.

I.3.2.2. Activités cumulées et décroissance radioactive

- Hypothèses, principe et résultats de la modélisation proposée

Connaissant les quantités d'activités rejetées par l'usine de la Hague et l'importance des retombées atmosphériques, on peut considérer le Golfe Normano-Breton comme un réservoir où les échanges avec l'extérieur sont négligeables. Il a donc été calculé pour chaque année, l'activité totale contenue dans ce "bassin" (Ac) pour une année N, en tenant compte de la quantité de radionucléides accumulée depuis 1954 et de la décroissance de l'activité due à la désintégration des isotopes.

Le développement de ce calcul (in LARSONNEUR-WALKER, 1986) utilise également les activités dues aux retombées ; celles-ci sont estimées en prenant comme surface du golfe 20.000 km²*. Mais nous ne connaissons pas l'influence relative de chacune des deux sources : rejets à l'usine de la Hague et retombées.

Aussi chacune des activités annuelles des deux origines a été pondérée par un coefficient compris entre 0 et 1.

Des diagrammes $Ac(N) = f(t)$, avec $1954 < t < 1979$, ont ainsi été établis et font apparaître les variations dues à l'influence prépondérante et l'une ou de l'autre origine. Prenons le cas d'une influence dominante des rejets superposée à l'accumulation de radioéléments due aux retombées ; l'activité est croissante depuis 1954 et l'on peut remarquer trois périodes de brusque augmentation ; 1959, 1963, 1971. Etant donné la stabilisation de la quantité d'effluents rejetés depuis 1977, la diminution de la radioactivité totale commence aussi à se faire sentir en 1979.

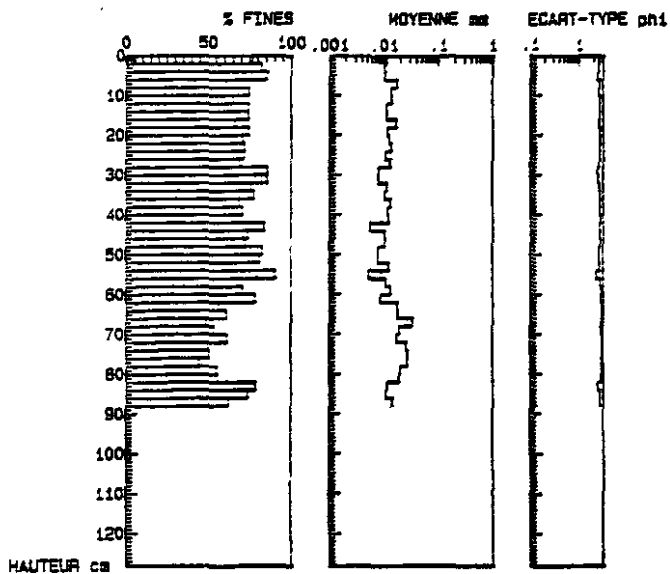
- Comparaison avec les profils verticaux de radioactivité du ¹³⁷Cs

En quoi ce modèle peut-il être rapproché de la répartition verticale de radioactivité observée dans les carottages ?

Pour le cas où la vitesse de sédimentation varie lentement, on constate que les pentes des principaux tronçons des courbes de radioactivité concernant les sédiments sont semblables à celles présentées sur les profils du modèle. Donc les variations d'activités montrées par les profils verticaux sont identiques à celles du milieu. Ainsi, on peut penser que les sédiments contiennent une concentration en radionucléides proportionnelle à celle du milieu marin (eau + suspensions).

* Cette superficie doit être augmentée des bassins versants des divers fleuves côtiers. En effet, ces bassins "participent" aux évaluations des retombées sur le golfe.

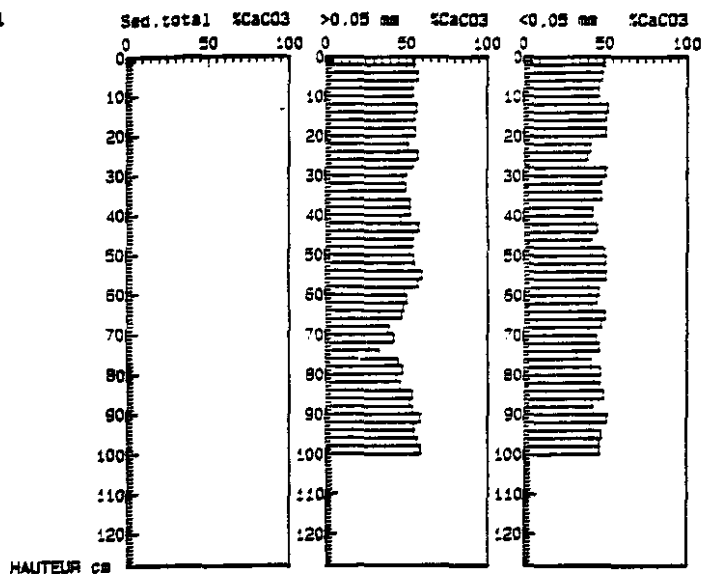
REGNEVILLE



I.7

REGNEVILLE

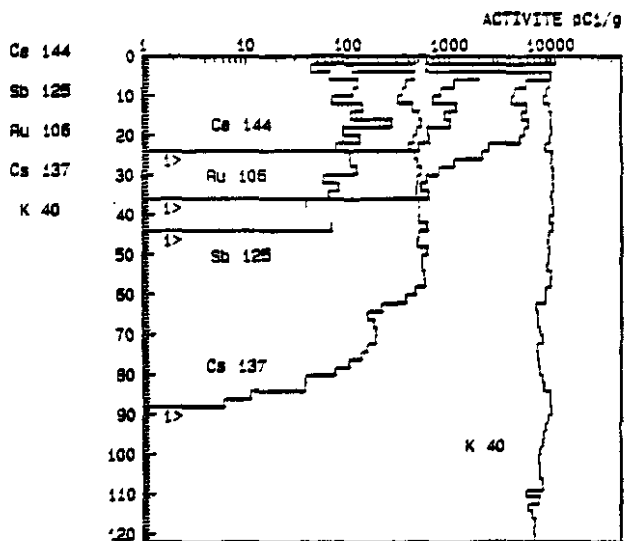
Carbonates



I.8

REGNEVILLE

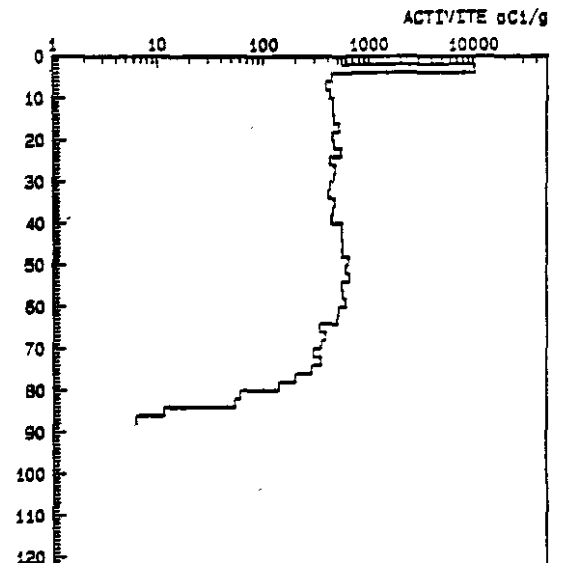
Radionucléides



I.9

REGNEVILLE

Cs 137 et K 40 constant



I.10

Fig. I.7 à I.10 : Analyses des carottes du havre de REGNEVILLE -

Profils de répartition des fines (I.7.), des carbonates (I.8.), de l'activité de divers radionucléides (I.9.), de l'activité du Césium 137, rapporté au Potassium 40 constant (I.10.).

Il est possible alors de comparer la forme des courbes théoriques à celles des mesures en nature et déterminer, en cas de concordance, les années correspondant aux variations d'activités les plus importantes.

I.3.3. Interprétation des profils et détermination des vitesses de sédimentation

L'analyse des profils de répartition du ^{137}Cs nous conduit à répartir les différents prélèvements en trois catégories distinctes en fonction de la vitesse des dépôts. L'accumulation des sédiments en un lieu donné est fonction, d'une part, de la quantité de sédiment transporté jusqu'à l'endroit considéré, d'autre part, du niveau d'énergie hydrodynamique s'exerçant sur le milieu.

I.3.3.1. Carottages effectués dans les havres de la côte ouest du Cotentin : Vitesse de sédimentation moyenne : 2 à 3 cm/an

Plusieurs carottes ont été prélevées dans les havres de la côte ouest du Cotentin, les résultats de radioactivité montrent que le fonctionnement, dans ces environnements sédimentaires, est assez identique.

Sur les divers profils de radioactivité, l'apparition du césium et son augmentation rapide, sont souvent observées ; les courbes peuvent donc être comparées aux courbes types et les pentes se correspondent bien.

- Régneville (Fig. I.7 à I.10)

Nous détaillerons, pour exemple, l'interprétation de ce carottage particulièrement intéressant.

Cette carotte a été prélevée dans la partie sud de l'estuaire de la Sienne, sur la slikke vaseuse d'un petit chenal qui draine, du Sud vers le Nord, les eaux du marais situé entre Régneville et le cordon dunaire.

Ce secteur, qui était formé au siècle dernier d'une vaste slikke sableuse (le port de Régneville était alors très actif), a été comblé à la suite de la progression du cordon dunaire et de l'endigage de la partie sud du marais.

Au fur et à mesure de l'exhaussement de l'environnement, la sédimentation s'est affinée, les dépôts sont devenus plus sablo-vaseux (tangue) et un schorre s'est installé sur cette zone.

La carotte prélevée représente bien l'histoire récente de cette partie du havre.

A la base (1,30 m), les sables sont largement dominants. Nous observons ensuite l'apparition de la tangue constituée de doublets sablo-vaseux. Les couches de sable deviennent plus discrètes et les lits de vase sont alors prépondérants ce qui traduit une diminution graduelle de l'énergie du milieu et donc l'installation progressive du schorre. Vers le haut, la sédimentation est franchement

vaseuse. L'ensemble de la colonne sédimentaire est très bioturbé. Le profil vertical de radioactivité du ^{137}Cs est le plus intéressant de tous ceux étudiés. Cet isotope a été détecté depuis 0,88 m de profondeur jusqu'au sommet de la carotte. L'apparition du ^{137}Cs correspond aux années 1954-1955 et son activité augmente alors très rapidement.

Ensuite un premier plateau est bien visible entre 0,76 m et 0,64 m, il représente sans doute la période 1959-1963. A 0,64 m le profil montre un ressaut important lié à la recrudescence au cours de l'année 1963 des expériences nucléaires dans l'atmosphère. Entre 0,64 m et la surface, les niveaux d'activités sont pratiquement constants. Le pic qui apparaît à proximité de l'interface est une anomalie due à une erreur instrumentale et ne doit pas être pris en compte.

La forme générale du profil nous permet de déduire qu'à cet endroit, l'influence des retombées radioactives est prépondérante sur celle des rejets de l'usine de la Hague. De plus, nous n'avons pas observé d'augmentation de la radioactivité liée au ^{137}Cs sur la partie de la carotte représentant les années 1971-1972.

Cette interprétation de la courbe nous permet d'estimer à 2 ou 3 cm/an la vitesse de sédimentation dans ce secteur du havre de Régneville.

- La Vanlée

Situé à l'ouest de Bréhal et à une dizaine de kilomètres au sud de l'estuaire de la Sienne, ce havre présente une morphologie très typique de ce genre d'environnement. A l'abri du cordon dunaire, s'étend un marais maritime avec l'étagement caractéristique suivant :

- Schorre sablo-vaseux couvert d'halophytes,
- slikke sableuse,
- chenal sablo-graveleux, voire par endroits caillouteux.

Le prélèvement a été effectué en aval de la route submersible, sur le schorre récent, côté rive droite du chenal. Cette zone est donc très interne, éloignée du cordon dunaire et soumise essentiellement aux apports marins en charriage et suspension.

La carotte (0,58 m) montre à sa base un épais lit sableux qui correspond sans doute à un épisode d'extension de la slikke en bordure du chenal. Au-dessus de 0,47 m la colonne sédimentaire est constituée d'une succession de couches sableuses ou sablo-vaseuses. Le profil de radioactivité du ^{137}Cs est tout à fait comparable à celui du havre de Régneville.

La vitesse de sédimentation calculée est légèrement inférieure à celle du havre de Régneville : environ 2 cm/an.

- Blainville

Immédiatement au Nord de l'embouchure de la Sienne, s'ouvre le havre de Blainville qui présente une morphologie symétrique avec des cordons dunaires nord et sud de même longueur.

Les carottes ont été prélevées sur le schorre septentrional et la succession lithostratigraphique est de type sablo-vaseuse, des lits sableux peu épais, s'intercalant entre des niveaux à doublets (sablon et vase) très caractéristiques des environnements de marais maritimes sur la côte ouest du Cotentin.

Le profil d'activité du ^{137}Cs est très différent de celui observé dans le havre de Régnéville. Cet isotope apparaît à partir de 0,66 m (hauteur de la carotte 0,94 m), nous pouvons donc dater ces premiers dépôts renfermant du ^{137}Cs , de 1954. La vitesse de sédimentation est alors de 2,2 cm/an.

Deux brusques variations d'activités apparaissent à 0,38 m et 0,28 m et reflètent la mise en service de l'usine de la Hague (1966) puis les rejets importants de l'année 1971. A partir de 0,28 m (1971) les activités cumulées se stabilisent puis décroissent légèrement à proximité de la surface.

L'impact de l'usine de retraitement semble donc être plus sensible sur les eaux du havre de Blainville que sur celles de l'estuaire de la Siègne situé à quelques kilomètres plus au sud.

- Geffosses

Le carottage a été effectué sur un ancien schorre dans la partie nord de la baie dont l'embouchure est fermée par une digue route depuis 1972.

Depuis cette date, le flot ne pénètre plus dans le havre que par trois canalisations et le volume oscillant a considérablement diminué provoquant de profondes modifications morphologiques et sédimentaires. L'ancien schorre a été colonisé par les herbacées, la surface de la slikke sableuse a diminué de façon importante et un néoschorre s'est développé rapidement sur l'ancienne slikke, à 1,20 m environ sous le niveau du schorre naturel.

Les dépôts échantillonnés correspondent donc à des sédiments antérieurs à l'année 1972. La colonne sédimentaire est en tout point comparable à celle observée sur les schorres des autres havres avec une alternance sablo-vaseuse de type tanguet et des épisodes sableux d'origine éolienne probablement. L'épaisseur totale de l'ancien schorre dans ce secteur est évaluée à 1,40 m environ.

Le profil de radioactivité du ^{137}Cs présente une certaine analogie avec celui du havre de Blainville avec néanmoins un plus fort taux de sédimentation (3 cm/an). La croissance de l'activité de bas en haut est rapide et le plateau correspondant aux années 1971-1983 n'existe pas ici. Le pic d'activité de 1971 (0,06 m) est bien net et ceux des années 1963 et 1959 apparaissent à 0,3 m et 0,44 m. L'influence des rejets de l'usine de la Hague est donc mesurable ici comme dans le havre de Blainville.

- Carteret

Ce havre est situé à l'extrémité septentrionale du cordon dunaire ouest-Cotentin. Le carottage effectué est donc celui se rapprochant le plus de l'émissaire de l'usine de la Hague. Il est situé sur le schorre. La slikke sableuse est représentée à sa base.

Le profil vertical de répartition du ^{137}Cs est très comparable à celui du havre de Geffosses, mais les concentrations de la partie supérieure de la carotte sont assez constantes, ce qui n'avait pu être observé dans le secteur précédent par suite de la fermeture de l'embouchure à partir de 1972.

La croissance de l'activité est très régulière de la base vers le haut. Nous pouvons rapporter le pic maximum à l'année 1971 au cours de laquelle les rejets en ^{137}Cs de l'usine ont été les plus importants.

La vitesse de sédimentation semble être différente en bas et en haut de la carotte.

A la partie inférieure du prélèvement, le taux de sédimentation est assez fort, 3 cm/an environ, alors qu'au sommet il diminue à 1,25 cm/an. Ce résultat correspond à l'évolution naturelle de la sédimentation contrôlée par le rythme des submersions de la haute slikke puis du schorre. Au fur et à mesure de l'exhaussement, les inondations par les marées diminuent, les dépôts se font plus rares et plus minces. Ceci semble témoigner de l'état presque sénile du havre de Carteret dont le comblement est fort avancé.

I.3.3.2. Les zones de forte accumulation sédimentaire : $V_m \approx 10-15$ cm/an (carottes de Genêts - Granville - Le Guildo)

La répartition verticale du ^{137}Cs dans ces prélèvements est très constante sur toute la hauteur de la carotte. Cette constante du niveau de contamination apparaît, suivant les hypothèses, entre 1965 et 1971. Il ressort que l'activité est stable vers le haut, ce qui indique que les apports liés aux retombées atmosphériques sont prépondérants.

- Genêts

Le carottage a été implanté au Sud-Est du Bec d'Andaine dans la partie orientale de la baie du Mont Saint-Michel.

La vitesse de sédimentation est importante puisqu'en admettant que la base de la carotte (-1,70 m) corresponde à l'année 1965, le taux de sédimentation est de 9 à 10 cm/an.

- Granville

Le carottage a été effectué au fond de l'avant port de Granville dans une fosse de radoub désaffectée. Les sédiments qui s'y déposent sont très fins (moyenne < 10 μm). Notons que le ^{106}Ru a été détecté jusqu'à 0,45 m ce qui atteste un fort taux de sédimentation.

Si nous admettons, comme pour la carotte de Genêts que la base du prélèvement correspond au début de la stabilisation de la contamination dans le Golfe Normano-Breton (1965) la vitesse de sédimentation peut être estimée à 9 cm/an, et même atteindre 15 cm/an si le profil vertical de radioactivité ne représente pas la totalité de la période 1965-1983.

- Le Guildo

Les sédiments ont été carottés en rive gauche de l'Arguenon sur une slikke sablo-vaseuse.

La séquence sédimentaire est plutôt sableuse à la base pour s'affiner vers le sommet en liaison semble-t-il avec l'exhaussement progressif de la slikke.

Si le profil du ^{137}Cs est assez constant, on remarque néanmoins une augmentation de l'activité entre 0,8 et 1 m, suivie d'une légère décroissance jusqu'à la surface. Il s'agirait de l'écho des forts rejets de l'usine de la Hague de l'année 1971 qui correspondrait assez bien avec une vitesse de sédimentation de 9 à 10 cm/an.

- Le Mont Saint-Michel

La carotte a été prélevée immédiatement à l'Est du Mont sur la haute slikke. Un taux tout à fait comparable au précédent est à signaler.

I.3.3.3. Profils de radioactivité des secteurs à taux de sédimentation faible ou nul

Sur plusieurs carottes, l'impact de la radioactivité artificielle n'est sensible que sur quelques centimètres à la partie supérieure du prélèvement. Ceci est lié à un taux de sédimentation faible.

- Cancale

La carotte (0.8 m) a été faite dans les vases fines au fond du port de Cancale.

Le ^{137}Cs apparaît à 0,28 m de la surface ; si l'on retient comme hypothèse que l'apparition du ^{137}Cs à ce niveau correspond à l'année 1954, le taux de sédimentation moyen observé serait d'environ 1 cm/an. Mais les radionucléides de courtes périodes sont détectés sur les dix centimètres supérieurs ce qui semble indiquer une diffusion de ces éléments au moins dans les couches superficielles.

- Le Vivier

Le prélèvement (1.80 m) a été fait sur la slikke à l'ouest du chenal dans un secteur recouvert à chaque marée. La succession lithostratigraphique est très régulière, à dominante silteuse (moyenne entre 20 et 60 μm).

Seul le ^{137}Cs est détecté dans les vingt premiers centimètres.

- St Benoit des Ondes

Le carottage a été effectué dans la partie sud-ouest de la baie du Mont. Les radionucléides artificiels ne sont présents que dans les 24 premiers centimètres. Ceux de courte période ne sont présents que dans la couche superficielle d'où l'on peut conclure à des vitesses très faibles de sédimentation.

- Chausey

Les résultats sont très semblables aux précédents.

CONCLUSIONS

Les mesures de radioactivité des sédiments apportent donc des éléments pour la compréhension des mouvements des masses d'eau et des particules en suspension. Elles peuvent être interprétées suivant deux optiques différentes :

* Si l'on cherche à estimer la quantité de radionucléides accumulés dans un secteur géographique donné, il faut prélever un grand nombre d'échantillons représentatifs de la répartition horizontale et verticale de la radioactivité dans les sédiments. Il est ensuite possible de déterminer les zones les plus fortement contaminées, mais l'activité totale piégée est fonction des apports de radionucléides, du taux de sédimentation et de la composition du sédiment.

Cette première approche est surtout intéressante pour l'étude des radioéléments de courtes périodes dont l'impact sur l'environnement est immédiat mais non pérenne.

* A l'inverse, pour le ^{137}Cs et les autres éléments dont le temps de demi-vie est plus grand, il semble indispensable de tenir compte des caractéristiques sédimentologiques des prélèvements pour comprendre les processus d'accumulation et la répartition verticale de la radioactivité. La "normalisation" au 40K est donc intéressante pour pondérer les mesures en fonction de la composition granulométrique ou minéralogique des sédiments. Cette méthode nous permet d'obtenir des profils de répartition représentatifs des variations de la quantité totale d'activité d'un élément dans le réservoir considéré.

Il faut considérer la zone du Golfe Normano-Breton comme très hermétique et l'on peut penser que les échanges de masses d'eau ou de sédiments avec les secteurs adjacents sont tout à fait limités. Il en résulte une grande homogénéité.

- Homogénéité sédimentologique

Les sédiments fins déposés dans le golfe présentent des caractéristiques granulométriques très constantes (médiane inférieure à 80 μm).

La composition chimique et minéralogique des sédiments fins est également très constante. Le taux de carbonates de la fraction inférieure à 50 µm est compris le plus souvent entre 30 et 40 % et celui de la fraction grossière est lié à la granulométrie.

- Homogénéité des activités mesurées

Les activités du ^{137}Cs correspondant à une période donnée sont très constantes dans l'ensemble du golfe et ne varient qu'en fonction de la granulométrie ou de la composition minéralogique du sédiment. Seuls les prélèvements des havres situés au Nord de l'estuaire de la Seine montrent une influence des rejets industriels. Au sud de ce secteur, l'activité en ^{137}Cs correspond à celle des retombées atmosphériques et l'impact de l'usine de la Hague n'est plus détectable.

Si les caractéristiques hydrosédimentaires du golfe semblent être constantes, il en est tout autrement des taux de sédimentation observés. Certes, il existe une certaine unité entre les carottages effectués dans des environnements identiques. Ainsi, les vitesses de sédimentation peuvent être estimées à 2 ou 3 cm/an en moyenne dans les schorres des havres du Cotentin, et à 8 ou 10 cm/an au minimum dans les zones calmes du sud du golfe : zone estuarienne de la baie du Mont Saint-Michel, estuaire de l'Arguenon ou port de Granville.

Mais entre ces points de fortes accumulations, coexistent des environnements relativement peu agités, schorre, haute slikke, sur lesquels les sédiments sont instables. C'est le cas des parties centrale et occidentale de la baie du Mont Saint-Michel où les taux d'accumulation sont très faibles par suite d'un remaniement constant par les courants de marée.

CHAPITRE II

ETUDE DU TRANSIT DES SEDIMENTS

SABLEUX PAR CHARRIAGE

CHAPITRE II

ETUDE DU TRANSIT DES SEDIMENTS SABLEUX PAR CHARRIAGE

II.1. ETUDE DES DEBITS DE CHARRIAGE INSTANTANES DANS LE GOLFE NORMANO-BRETON

Les capacités de charriage des sédiments superficiels ont été évaluées en divers points du Golfe Normano-Breton et les débits instantanés théoriques calculés pour des situations limites. Une carte d'instabilité des dépôts est proposée pour différentes situations de marée.

Les rapports entre la granulométrie des sédiments de surface et les courants de marée qu'ils subissent ont été étudiés à partir de deux documents (1) :

- Paramètres physiques : les campagnes de mesures de courant du Laboratoire National d'Hydraulique (LNH, 1961) nous donnent le maillage de base ; soit 65 points repartis sur l'ensemble de la zone (fig. II.1).

- Paramètres sédimentologiques : la carte des sédiments superficiels de la Manche (VASLET and al., 1979) dont l'échelle (1/500.000e) est en rapport avec le maillage utilisé par ailleurs.

II.1.1. Les courants de marée

Pour pouvoir étudier les différents cas en situations limites, les valeurs maximales et minimales ont été retenues pour les coefficients 95 et 45, correspondants respectivement aux Vives Eaux Moyennes (VEM) et au Mortes Eaux Moyennes (MEM).

En outre, pour le calcul des débits de charriage, les valeurs maximales et minimales ont été considérées pour un coefficient de 115 correspondant aux Vives Eaux Exceptionnelles (VEE). Ces valeurs ont été extrapolées à partir des données de VEM (2).

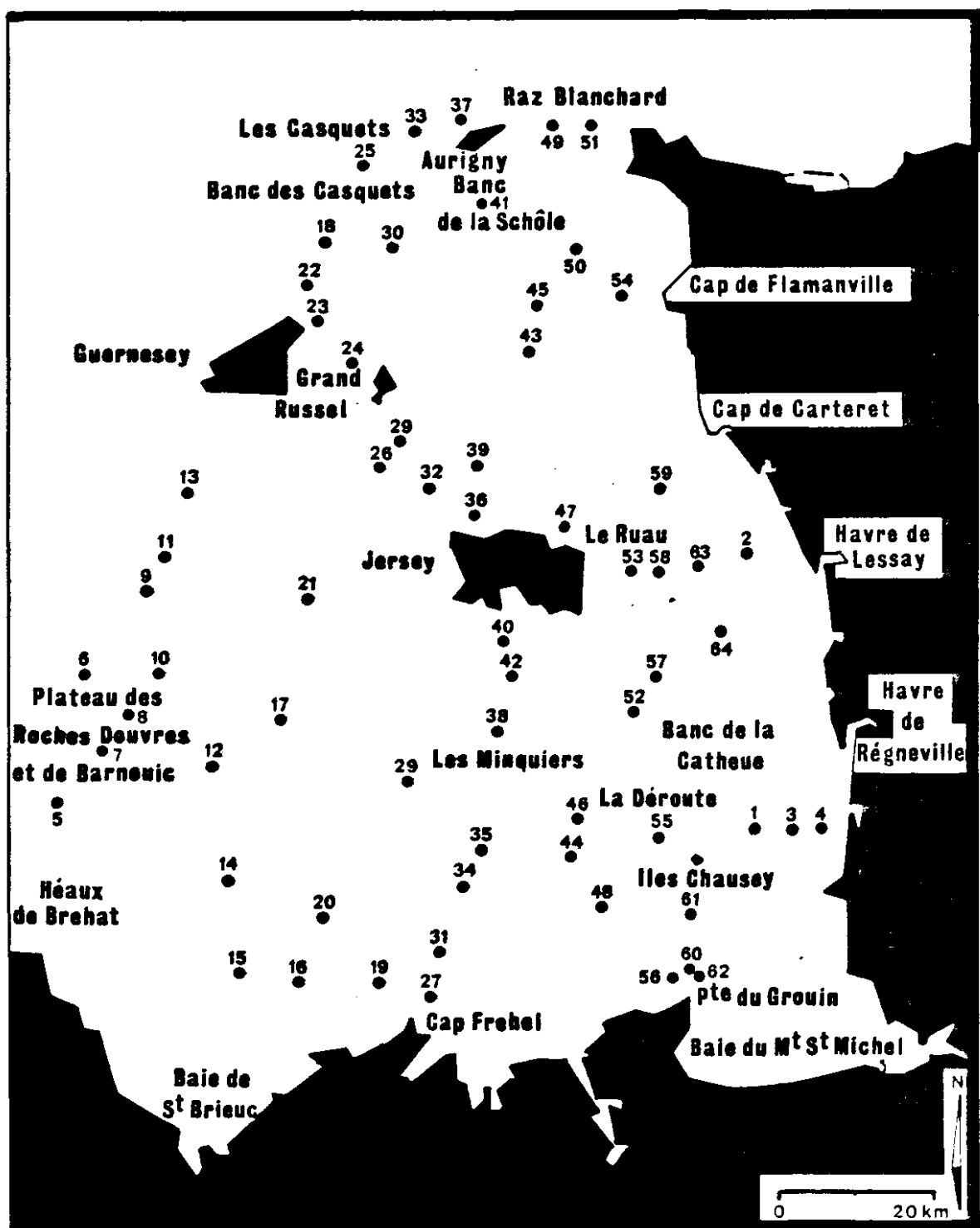
Pour chaque situation une carte des vitesses de courant a été adressée.

(1) Les données brutes sont disponibles auprès de l'auteur.

(2) Pour un coefficient de 115 : la vitesse de courant extrapolée
 $u(115) = u(95) \cdot \left(\frac{1,15}{0,95} \right)$

Fig. II.1 : GOLFE NORMANO-BRETON

Toponymie et Points de Mesures



Commentaires :

. Vitesses maximales (fig. II.2)

Pour un coefficient de 95, on relève un fort gradient de vitesse : de 2,85 m/s à 0,50 m/s. En 19 points de mesure les valeurs atteignent ou dépassent 1,50 m/s. Celles-ci se répartissent entre 3 zones, correspondant à des seuils bathymétriques :

- l'entrée Sud-Ouest du golfe : les courants maximaux privilégient un axe NW/SE. Au flot, la marée, déjà amplifiée par la remontée des fonds, s'engouffre vers la baie de Saint Brieuc entre les Roches Douvres et Barnouic d'une part, les Héaux de Bréhat d'autre part. Au jusant, on assiste au même mouvement, en sens inverse ; les vitesses maximales sont alors enregistrées : 1,90 m/s,

- l'entrée Nord du golfe : la circulation générale de la Manche est localement modifiée par les îles anglo-normandes septentrionales selon un axe SW / NE. Elle se trouve considérablement renforcée en particulier au passage des détroits que sont le Raz Blanchard, le passage entre Aurigny et les Casquets et le grand Russel : les courants y dépassent les 2 m/s (2,85 m/s dans le Raz Blanchard),

- Jersey-Minquiers : Au Nord de Jersey une succession de hauts fonds canalise et renforce les courants de marée, aussi bien au flot qu'au jusant (2,35 m/s dans le Ruau). Autour des Minquiers les courants sont surtout violents au moment de la vidange du golfe (2 m/s au Sud des Minquiers),

- On remarquera également l'effet de cap joué localement par la pointe du Grouin.

Pour un coefficient de 45 les gradients de vitesses sont très atténués : les 3/4 des points de mesure enregistrent des valeurs comprises entre 0,5 et 1 m/s. Seules 6 stations dépassent cette valeur. Celles-ci sont cantonnées dans le Nord du golfe (1,80 m/s dans le Raz Blanchard). Quant aux vitesses les plus faibles, réparties pour l'essentiel selon un axe baie de Saint Brieuc-Guernesey, leurs valeurs sont très homogènes : de 0,45 à 0,30 m/s.

. Vitesses minimales (fig. II.3)

Les minima de courant observés tant en VEM qu'en MEM ne dépassent que ponctuellement 0,5 m/s dans le premier cas, 0,25 m/s dans le second. Pres de la moitié des valeurs relevées par coefficient 45 sont inférieures ou égales à 0,05 m/s. On remarque que la disposition géographique de ces valeurs ne peut se superposer à celle des valeurs maximales : plus qu'un simple ralentissement des courants en fonction de la marée, elles constituent un système différent, non plus centré autour des détroits et des hauts fonds mais au contraire dans les zones topographiquement les moins perturbées.

VITESSES de COURANTS [m/s] · MAXIMA

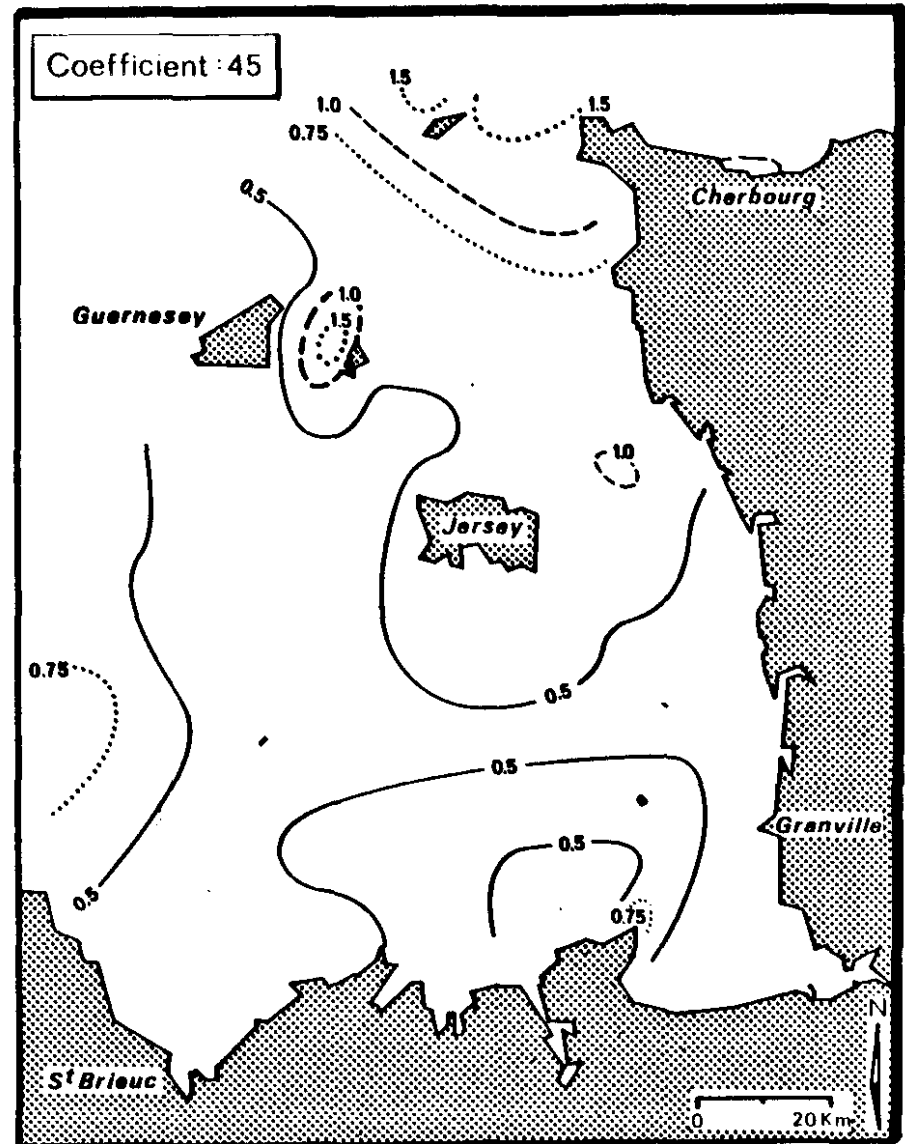
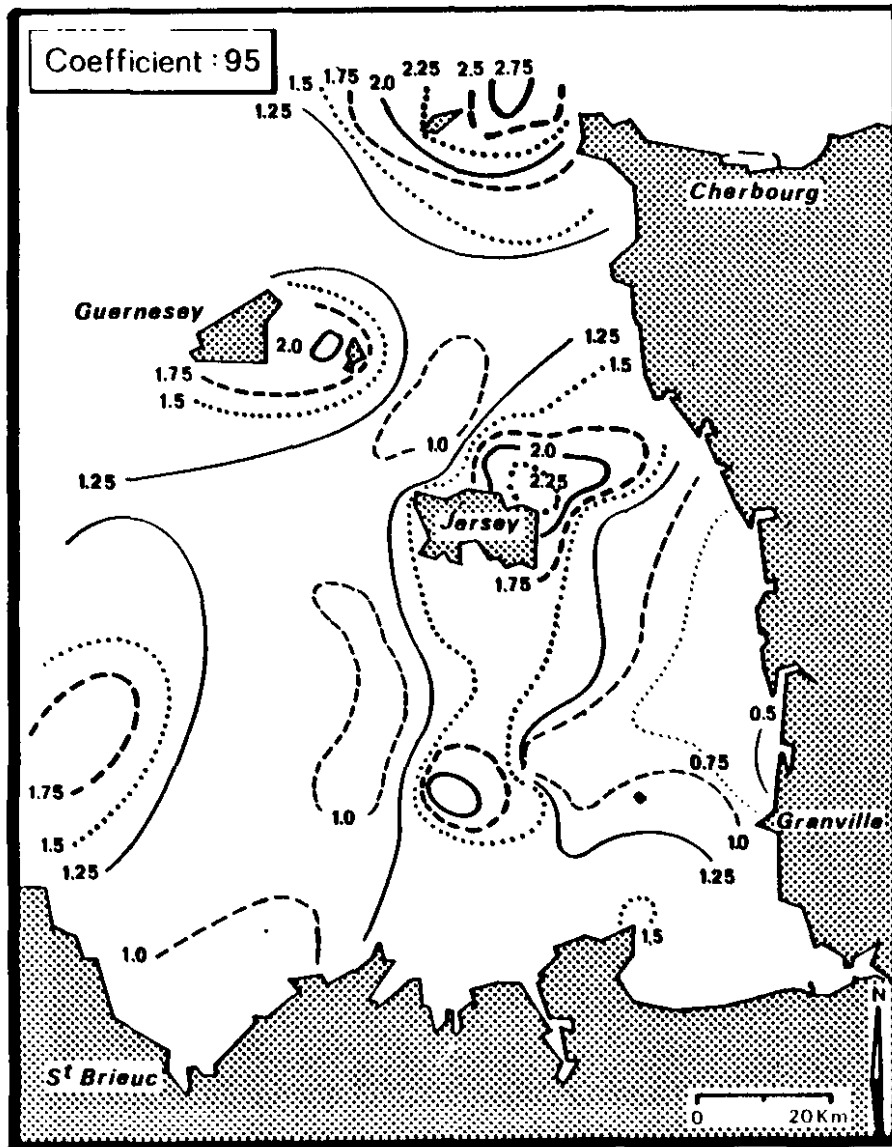
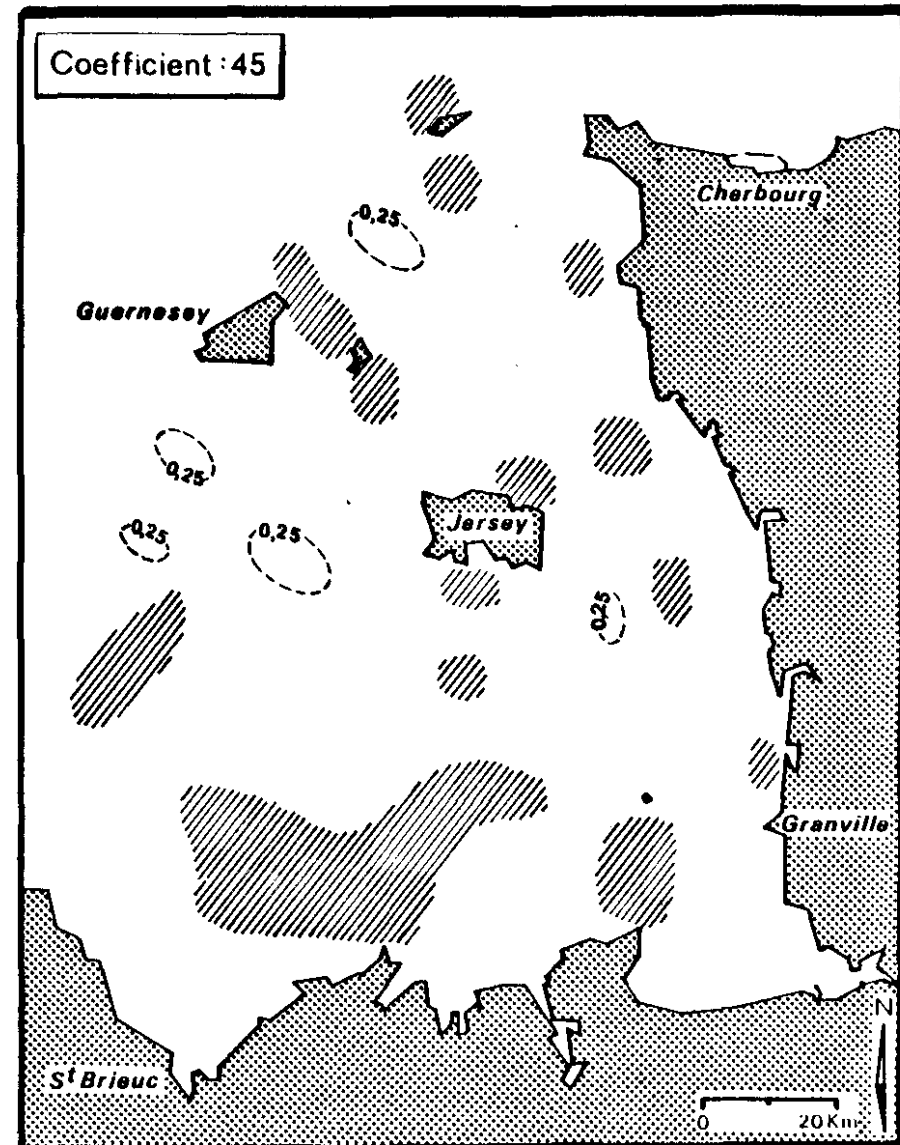
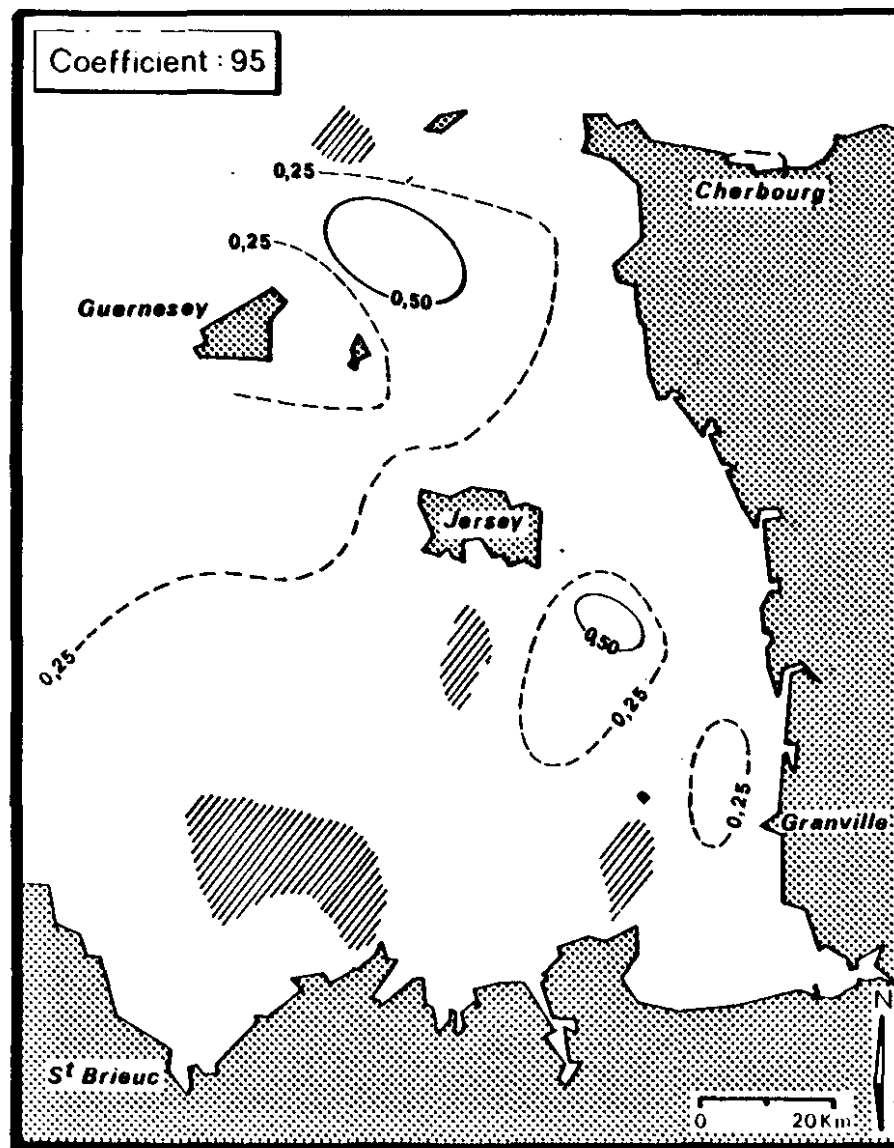


Fig. II.3 : GOLFE NORMANO-BRETON

VITESSES de COURANTS [m/s]-MINIMA-

////// VITESSE $\leq 0,05$ m/s



II.1.2. - Le charriage

Sachant qu'un dépôt meuble est en mouvement sur le fond dès que la tension de frottement (τ_0) à laquelle il est soumis est supérieure à sa tension de frottement critique (τ_c), on peut déterminer, pour tout le spectre granulométrique du golfe, les possibilités de transports en charriage en prenant :

$$\tau_0 = \rho u^{*2} \quad \text{et} \quad \tau_c = 0,90 D \text{ (en N/m}^2\text{)}, \text{ (MIGNIOT, 1981)}$$

avec ρ : masse volumique de l'eau $\approx 1.000 \text{ kg/m}^3$,

u^* : vitesse de frottement que l'on peut exprimer en fonction de

la granulométrie du fond par la relation : $u^* = 0,15 \left(\frac{D}{H}\right)^{1/6} .u$

(BONNEFILLE, 1976).

avec u : vitesse du courant en m/s

H : Hauteur de la tranche d'eau entre le courantomètre et le fond. Les courantomètres étant positionnés selon les stations à 5 m ou à 10 m au dessus du fond, nous admettons une répartition logarithmique de la vitesse et considérons que l'influence du fond est sensiblement identique à 5 m et à 10 m ; en conséquence, nous prenons une valeur de $H = 7,50 \text{ m}$,

D : Diamètre moyen, en mm, du sédiment considéré. Ce diamètre a été défini pour 7 catégories granulométriques, d'après la classification de C. LARSONNEUR (1977) :

Tableau 1 : Définition des classes granulométriques :

Classes	Criteres granulométriques	diamètres moyens (mm)
Cailloutis	Galets > 70 %	50
Cailloutis graveleux	50 % < galets < 70 %	30
Graviers caillouteux	15 % < galets < 50 %	12
Graviers	Galets < 15 %	5
Sables graveleux	Sables + silts > 50 % 15 % < graviers < 50 %	1,3
Sables moyens	Sables (0,5 - 0,2 mm) > 50 %	0,3
Sablons	Sables (0,2 - 0,05 mm) > 50 %	0,08

Les possibilités de charriage des différentes classes sédimentaires ont été cartographiées pour chacune des situations courantologiques retenues (fig. II.4 à II.6.).

Commentaires

Aux maxima de courants, quel que soit le coefficient, correspondent des tensions de frottement supérieures aux tensions critiques des dépôts meubles qui sont ainsi partout mobilisables :

Par MEM, ce sont essentiellement les sablons qui sont concernés mais pour près de la moitié des points de mesures, des sédiments plus grossiers sont aussi affectés : graviers dans le grand Russel et le Raz Blanchard.

Par VEM, les sables graveleux sont à leur tour presque partout mobilisables jusqu'aux graviers caillouteux et cailloutis graveleux dans le Grand Russel, le Raz Blanchard, le Ruau et au Sud des Minquiers.

En VEE, la répartition géographique est sensiblement la même tout en affectant la classe granulométrique supérieure : les graviers dans la quasi totalité du golfe, les cailloutis dans le Raz Blanchard et le Ruau.

Aux valeurs minimales de courant, les tensions critiques ne sont dépassées qu'en VE et pour seulement une vingtaine de points de mesure en VEE ; une dizaine en VEM. Le transit possible n'affecte dans ce cas que les sables moyens et les sablons et géographiquement se trouve cantonné dans les zones topographiquement les moins perturbées déjà définies dans le commentaire sur les courants de marées.

II.1.3. Le débit de charriage instantané théorique :

Le débit de charriage (G_s) peut se calculer d'après la formule simplifiée de MEYER-PETER (MIGNIOT, 1981) :

$$G_s = \frac{A}{\gamma} (\zeta_0 - \zeta_c)^{3/2} \text{ en } m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$$

Avec : $A = 0,4$

γ = poids volumique moyen du sédiment : 26.000 N/m^3

Cette formule permet de fixer, pour chaque catégorie sédimentaire, une relation entre le courant et le débit de charriage qu'il induit (Tableau 2).

Fig.II.4 : CAPACITE DE MISE EN MOUVEMENT DES SEDIMENTS - Coeff.: 115

Localisation des secteurs où les sédiments, d'une granulométrie inférieure ou égale à celle représentée, sont susceptibles d'être déplacés par les courants.

● = Charriage $\geq 2,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

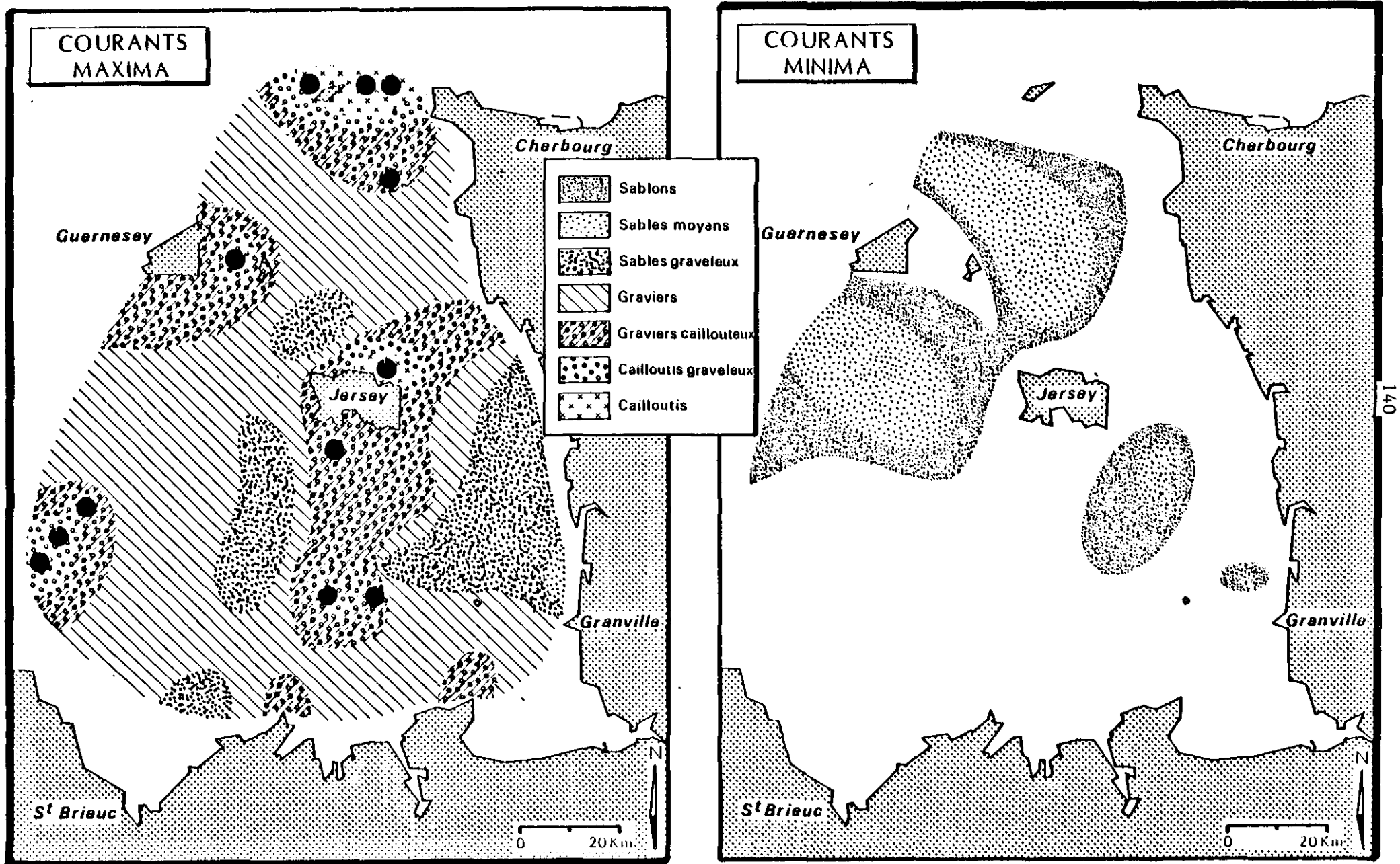


Fig.II.5 : CAPACITE DE MISE EN MOUVEMENT DES SEDIMENTS - Coeff.: 95

Localisation des secteurs où les sédiments, d'une granulométrie inférieure ou égale à celle représentée, sont susceptibles d'être déplacés par les courants.

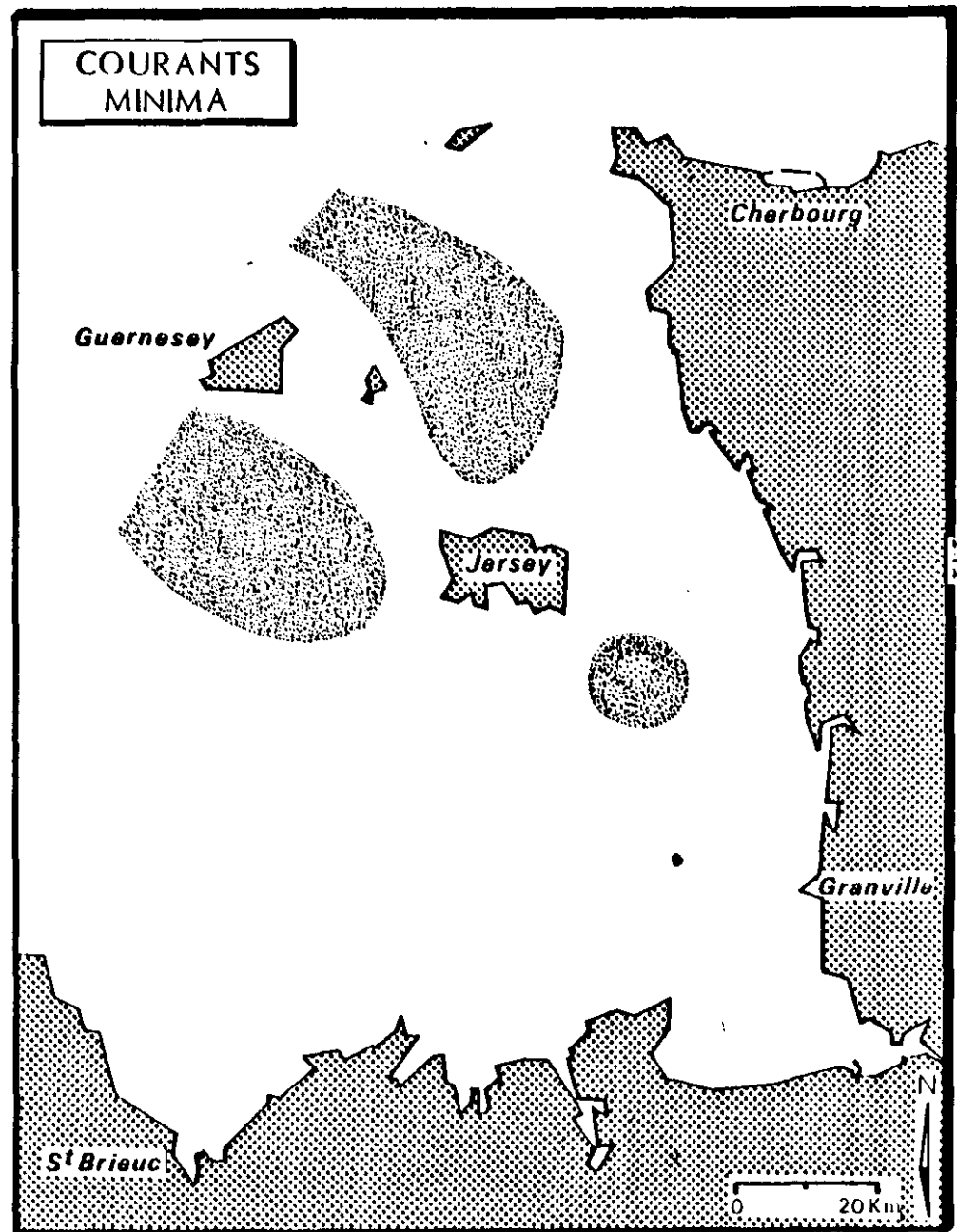
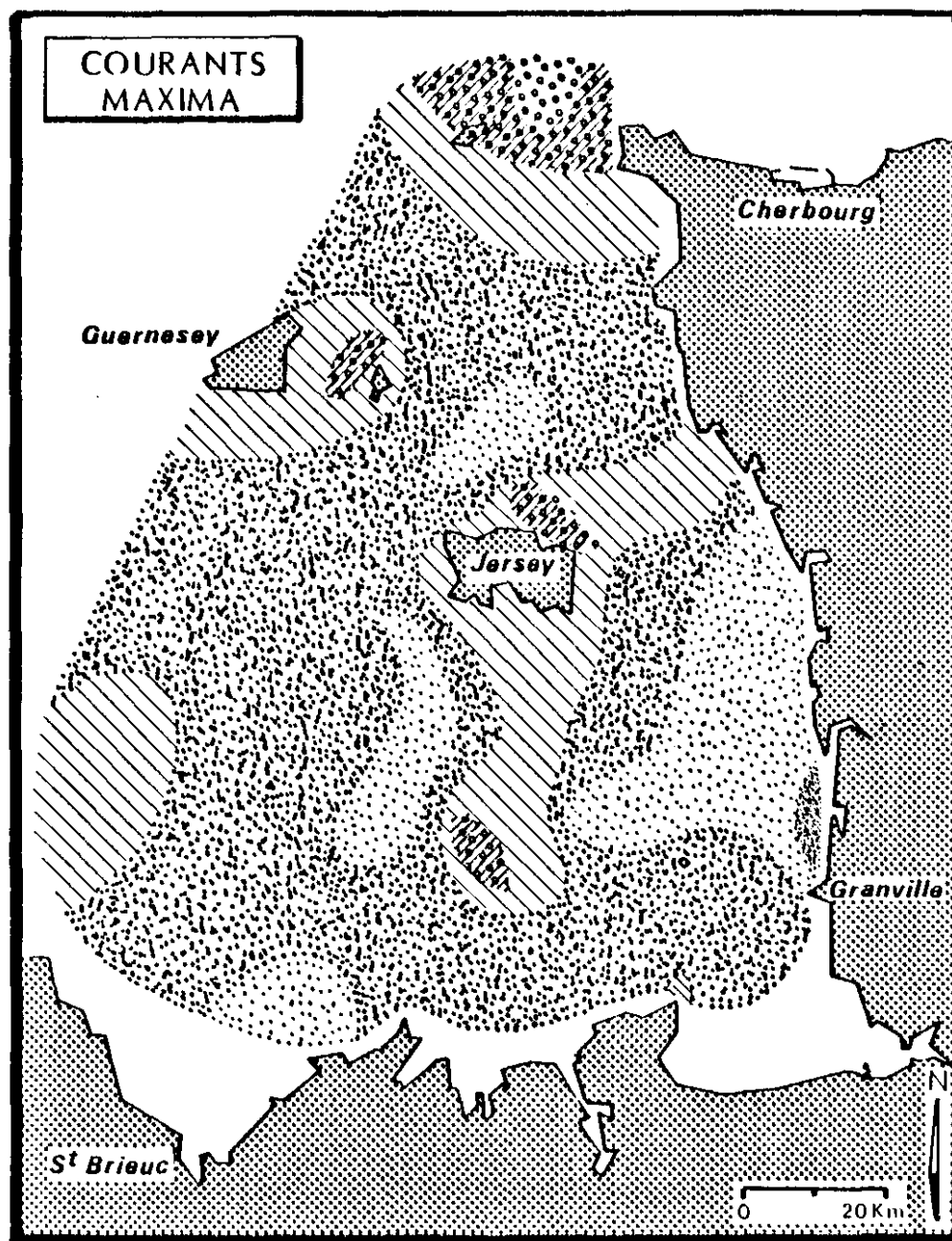


Fig.II.6 : CAPACITE DE MISE EN MOUVEMENT DES SEDIMENTS - Coeff.: 45

Localisation des secteurs où les sédiments, d'une granulométrie inférieure ou égale à celle représentée, sont susceptibles d'être déplacés par les courants.

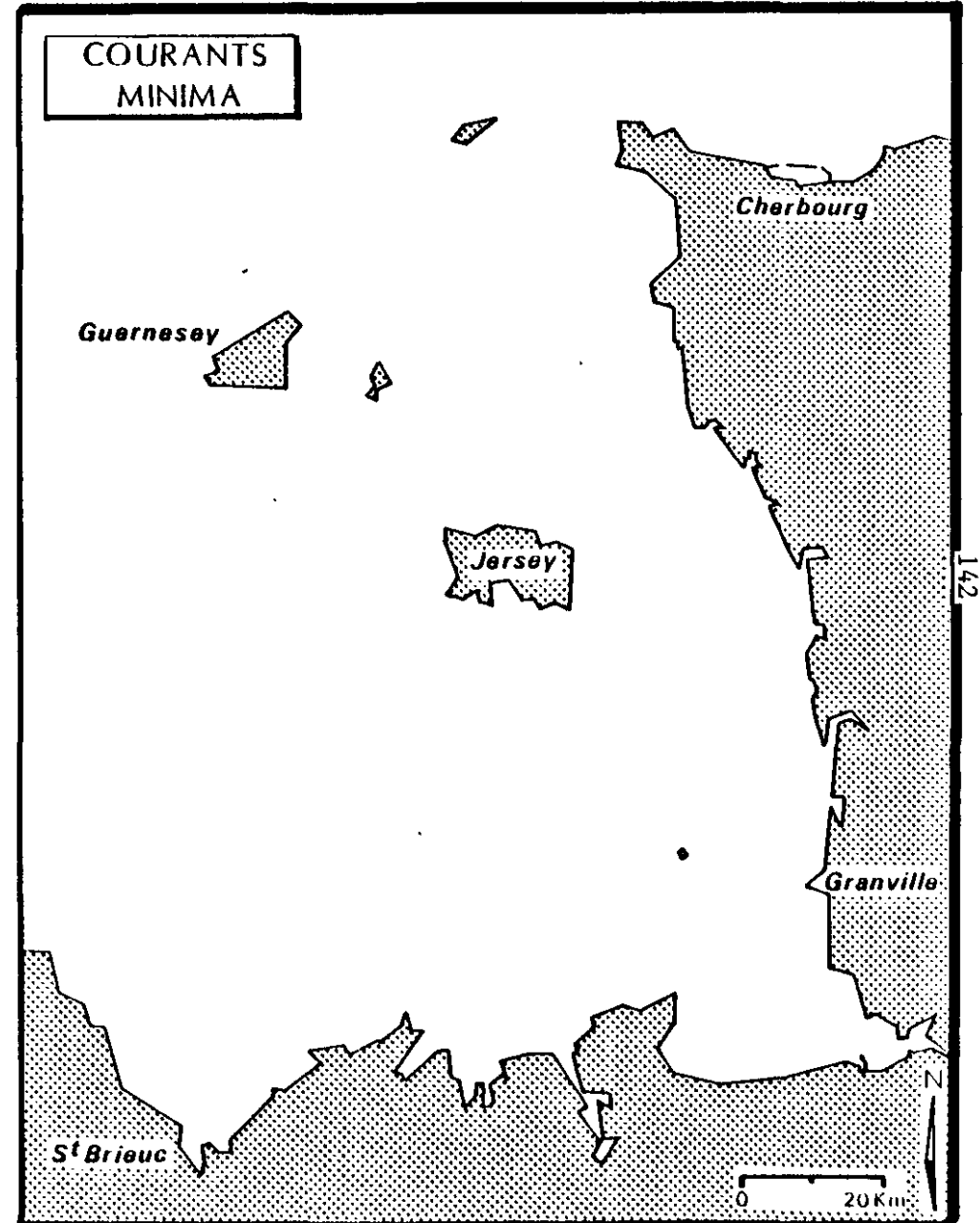
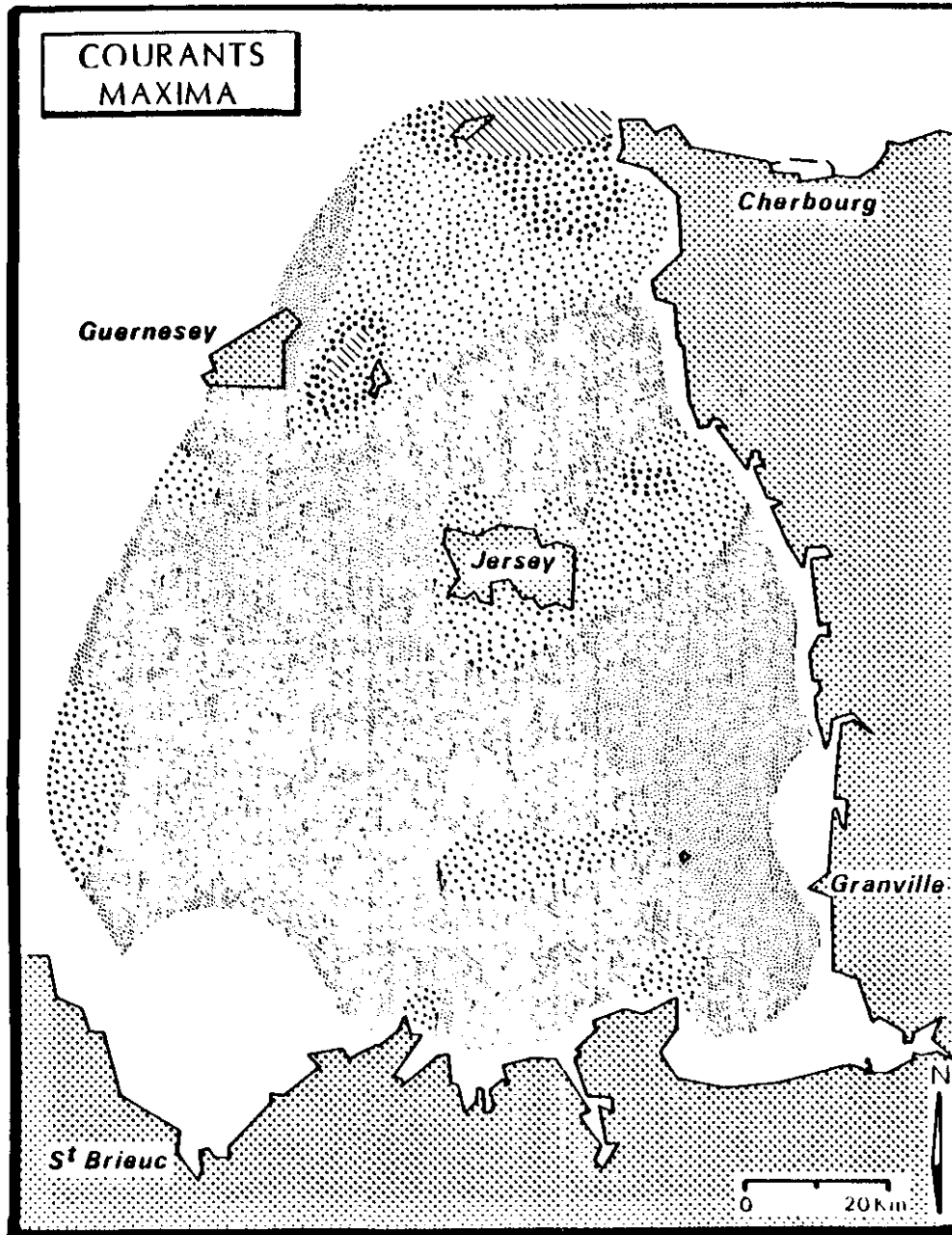


Tableau 2 : Vitesses de courant (m .s⁻¹) nécessaires à quelques débits de charriage pour différents types de sédiments :

Classes granulométriques	débits théoriques			
	10.10 ⁻³ m ³ .m ⁻¹ .s ⁻¹	5.10 ⁻³	2,5.10 ⁻³	0 (1)
Cailloutis	3,75	3,55	3,45	< 3,26
Cailloutis graveleux	3,45	3,20	3,05	< 2,75
Graviers caillouteux	3,20	2,85	2,60	< 2,03
Graviers	3,20	2,85	2,45	< 1,51
Sables graveleux	3,20	2,85	2,45	< 0,97
Sables moyens	3,20	2,85	2,45	< 0,59
Sablons	3,20	2,85	2,45	< 0,38

La comparaison de ces valeurs avec les mesures de courant montre que si l'on dépasse souvent le seuil critique indiqué dans la dernière colonne, on en reste généralement très proche : seuls quelques points

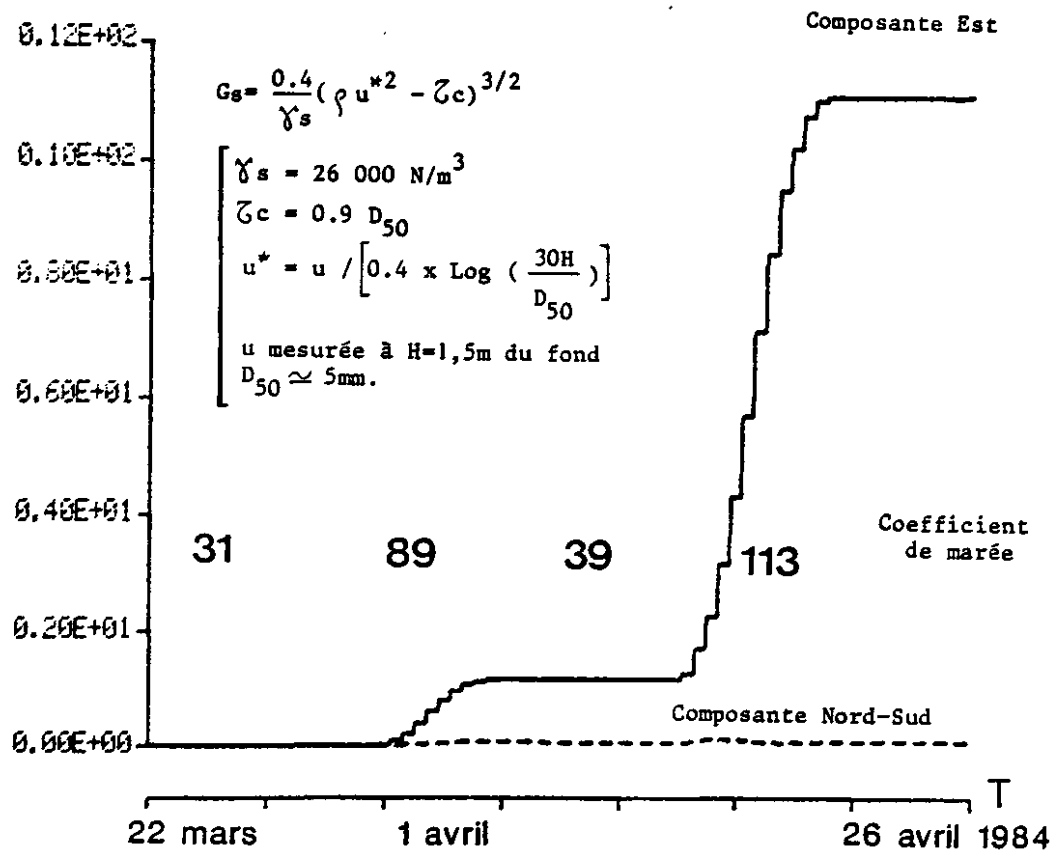
sont en mesure de dépasser $2,5.10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, en particulier

dans le Raz Blanchard et le Ruau ($G_s > 10.10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) (Fig.II.4).

Il apparait ainsi que dans le golfe, les vitesses de courants sont souvent proches d'un point d'équilibre entre des situations de stabilité et d'instabilité des dépôts superficiels. La conséquence directe de cet équilibre instable est que le processus de charriage, bien qu'important, ne pourra avoir lieu qu'exceptionnellement. Cela est illustré par le schéma ci-dessous, obtenu en appliquant la loi de charriage précitée, à mesure continue du courant en un point, pendant un mois.

(1) A un débit de charriage nul, correspond une vitesse de courant inférieure à un seuil critique équivalent à $\zeta_0 - \zeta_c = 0$ dans la formule de MEYER-PETER.

Débit solide calculé
(m³ / m)



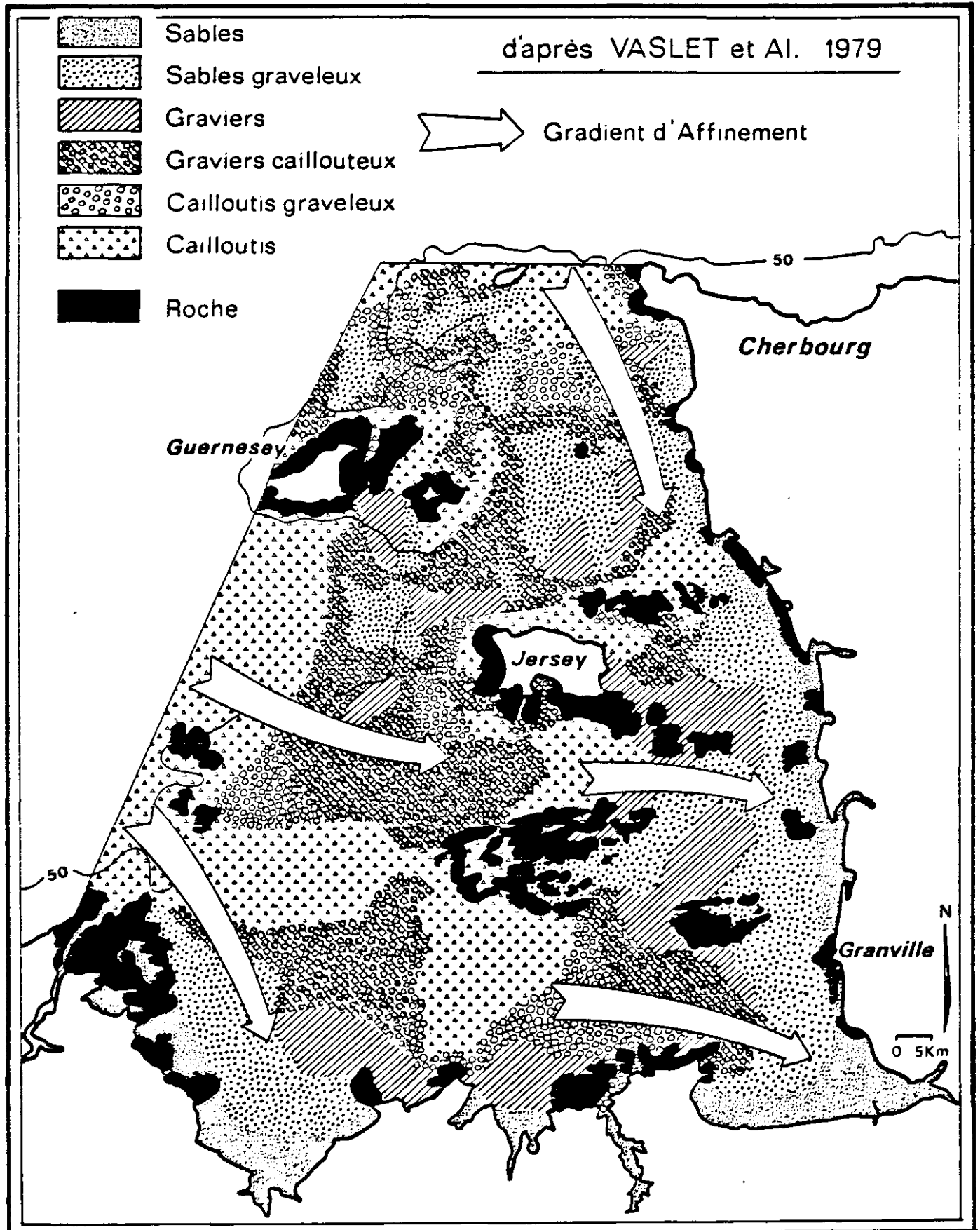
EVALUATION DU DEBIT SOLIDE AU S.E. DE JERSEY.
(mesure de courant au point 12; voir Thème I, 1ère Partie,
Fig.II.1.)

On observe que le transport est nul pendant 70 % du temps, qu'il reste faible par marée de coefficient 90 et que tout se passe pendant les grandes vives eaux. Ce calcul doit aussi nous conduire à relativiser les résultats quantitatifs de débits charriés, car ils sont extrêmement sensibles aux expressions de u^* et ζ_c .

Voyons comment ceci se concrétise eu égard à la répartition actuelle des sédiments en place.

II.1.4. Les sédiments superficiels

Les catégories granulométriques définies précédemment ont été cartographiées à partir de la carte des sédiments superficiels de la Manche (VASLET and al, 1979) (fig. II.7).

Fig. II.7 : *GOLFE NORMANO-BRETON***Répartition des Sédiments superficiels**

Commentaires

La fraction grossière (cailloutis et graviers) couvre l'essentiel du golfe tandis que la fraction fine (sables moyens et sablons) est cantonnée dans le fond des baies (baie de St Brieuc et baie du Mont St. Michel en particulier) et sur la frange littorale du Cotentin où elle est à mettre en relation avec les grands cordons dunaires qui le borde. La répartition des sédiments superficiels s'est réalisée selon un gradient d'affinement du large vers la côte. La succession est particulièrement nette au Sud de Chausey. Cependant, la topographie du golfe, en modifiant la courantologie, modifie également ce schéma général selon que l'on se trouve de part et d'autre d'une ligne Bréhat-Jersey - Cap de Carteret :

- Au Sud, hormis un axe cap Fréhel-Jersey où les cailloutis dominent en raison d'un renforcement de l'hydrodynamisme lié à une ligne de hauts fonds culminant aux Minquiers, le gradient d'affinement s'est effectué selon 3 directions :

- . vers la baie de Saint Brieuc,
- . vers la baie du Mont Saint Michel,
- . vers la région des havres.

On peut d'ailleurs observer que, hormis la baie de St Brieuc, l'essentiel des sédiments graveleux et sablo-graveleux du golfe se répartit le long du Cotentin.

- Au Nord, la multiplicité des îles et des hauts fonds perturbe le dispositif et de nombreux bancs sableux ou graveleux parsèment la zone, comme le banc de la Schôle ; ils privilégient la direction Nord-Sud. "Il s'agit d'accumulations bio-clastiques à bio-lithoclastiques de 15 à 30 m d'épaisseur qui prennent place dans des zones de fortes énergies où existe un piège hydraulique. Aussi relève-t-on bien souvent le passage assez brusque des cailloutis aux sables" (LARSONNEUR 1982).

Quels sont les dépôts actuellement perturbés par l'action des courants de marée ?

II.1.5. Stabilité et instabilité des sédiments superficiels

La superposition de la carte des sédiments superficiels (Fig.II.7) avec les cartes de charriages théoriques (fig. II.4. à II.6.) fait apparaître la stabilité des fonds meubles du golfe pour les minima et les maxima de courants en MEM aussi bien que pour les minima de VEM ou de VEE. En effet, en tout point de mesure, les valeurs relevées sont inférieures au seuil critique nécessaire à la mobilisation du sédiment en place. Et il en est de même, en maxima de VEM de de VEE pour la plus grande partie des dépôts du golfe.

En cela on peut dire que "le modèle sédimentaire est en équilibre avec les conditions hydrodynamiques ambiantes" (LARSONNEUR, 1977).

Cependant cet équilibre présente des exceptions (fig.II.8).

Par coefficient 95, valeur atteinte et dépassée par 12,3 % des marées (GOUGENHEIM, 1953), huit points de mesure sont ainsi en situation de charriage pendant un moment de la marée dont l'importance croît avec le coefficient.

Le débit instantané, calculé pour un maximum de courant, bien que faible, n'est pas négligeable : $16.10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ en moyenne avec un maximum de $51.10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, car le débit prolongé pendant 1 heure passera respectivement à 58 et 184 m^3 .

Seuls les sables graveleux sont ainsi affectés. Cependant, si l'on considère comme valables les mesures de courant dans une aire de quelques centaines de m^2 morphologiquement homogène, d'autres types de sédiments sont alors susceptibles d'être remaniés. Dans ce cas :

- les accumulations sableuses correspondant à des pièges hydrauliques comme les bancs de la Schôle, des Casquets ou de la Catheue sont certainement en mouvement,

- les dépôts de certains passages le sont vraisemblablement, ainsi les sables de la Déroute, les graviers du Grand Russel et les graviers caillouteux du Raz Blanchard.

Les coefficients de 115 sont plus rares : 0,5 % des marées les atteignent ou les dépassent (GOUGENHEIM, 1953). Les volumes charriés sont, en valeur instantanée, de l'ordre de $45.10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ au cours des maxima de courant, avec un maximum de $195.10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Six stations supplémentaires sont affectées.

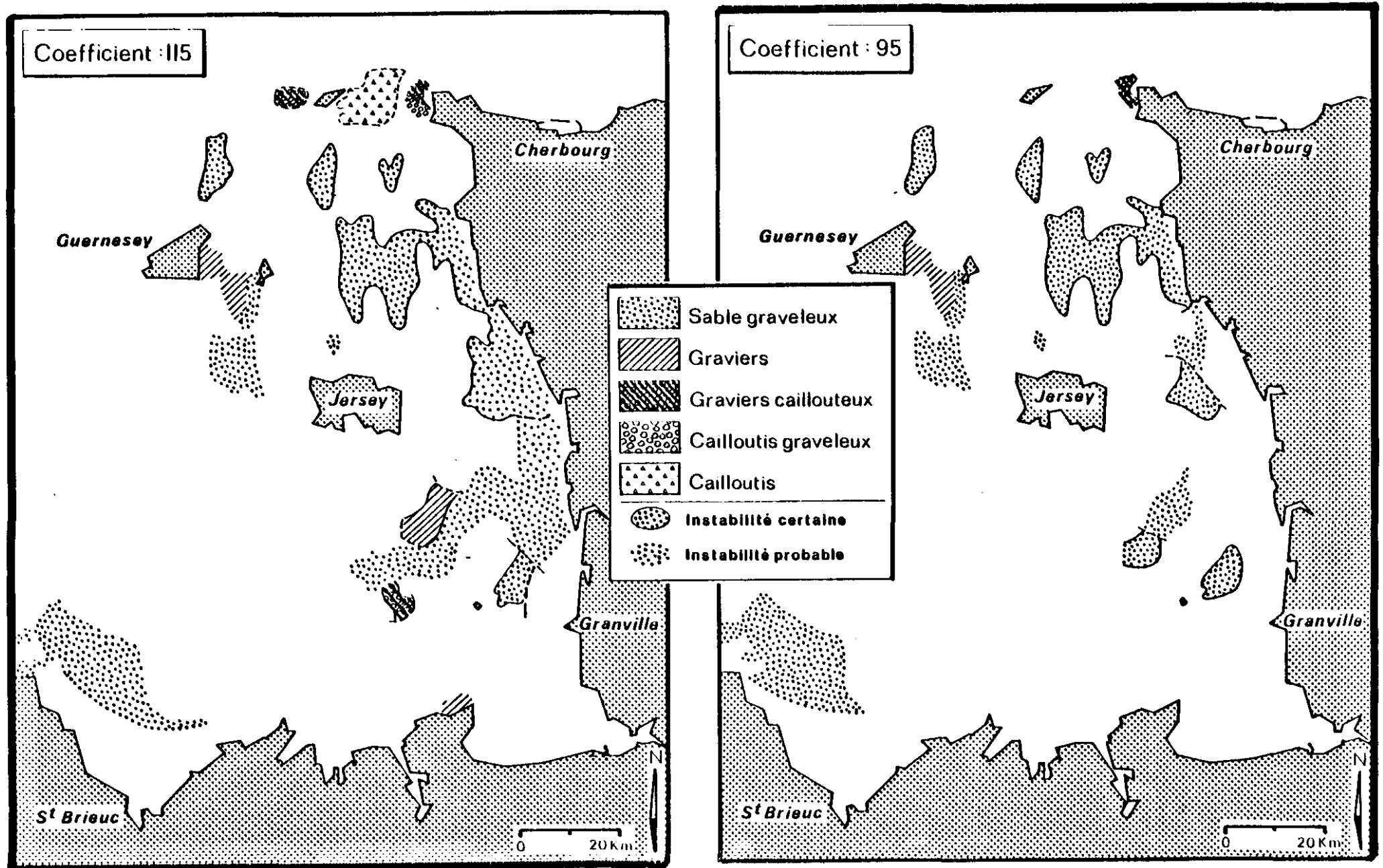
Toutes les catégories granulométriques observées sont ici intéressées et, selon la méthode utilisée pour le coefficient 95, les aires géographiques atteintes se multiplient et s'étendent. Sont ainsi mis en mouvement, ou susceptibles de l'être :

- . les cailloutis graveleux ou non et les graviers caillouteux du Raz Blanchard,

- . les graviers du Grand Russel, de la Déroute et de la pointe du Grouin,

- . les sables de tous les bancs parsemant le golfe ainsi que les accumulations pré littorales situées à l'entrée de la baie de Saint Brieu d'une part, entre le cap de Flamanville et le havre de Régneville d'autre part.

INSTABILITE DES SEDIMENTS EN PLACE LORS DES MAXIMA DE COURANTS



II.1.6. - Conclusions

De ces quelques observations on retiendra qu'en matière de dynamique sédimentaire :

- Le Golfe Normano-Breton est dans l'ensemble un milieu stable. Cependant il existe dans le détail une instabilité des dépôts superficiels :

- * réduite aux maxima de VEM et VEE,
- * circonscrite aux détroits, pièges hydrauliques et voisinages des caps,
- * touchant essentiellement la fraction graveleuse,
- * prenant la forme d'une auto-alimentation car, à l'époque actuelle, les apports extérieurs sont faibles (voir paragraphe II.2).

Cette instabilité affecte la répartition des peuplements benthiques (voir thème III) : aux accumulations sablo-graveleuses mobiles correspondent des populations peu diversifiées, à la biomasse souvent faible et demandant un sédiment grossier propre et bien oxygéné. On relève ainsi la présence de :

- . Spisula ovalis au banc de la Catheue,
- . Glycymeris glycymeris dans le passage de la Déroute,
- . Nucula nucleus devant le cap de Flamanville,
- . Venus ovata au large de la baie de St Brieuc.

Si l'importance réelle du charriage ne peut s'apprécier qu'en intégrant ces situations instantanées dans l'ensemble cyclique des marées, il reste que ce phénomène ne peut expliquer à lui seul le million de tonnes de sédiments qui, chaque année, vient s'accumuler dans la baie du Mont St Michel. Si l'on considère que la majeure partie de ces dépôts proviennent de matériaux transportés en suspension ; que la charge solide ainsi véhiculée est considérable (0,7 à 30 g/l) et qu'enfin un courant de 0,8 m/s suffit à mettre en suspension des particules dont le diamètre est compris entre 70 et 100 μm (FETTER-TURTAUD, 1981), on conçoit que le calcul du transport par charriage sous évalue largement l'importance des sablons dont le diamètre moyen est de 80 μm .

Il est d'ailleurs vraisemblable que cette fraction fine mise en mouvement dans une tranche d'eau peu importante (< 15 m) soit brassée par la houle littorale, ce qui favorise ainsi son transport.

II.2. - ETUDE DES TRANSITS SABLEUX : CONTRIBUTION DU SONAR LATÉRAL

Au cours des années 1982 à 1985, diverses campagnes, utilisant le sonar à balayage latéral, ont été réalisées dans le Golfe Normano-Breton. Leur but est, d'une part, de compléter les connaissances concernant la couverture sédimentaire (répartition des sédiments, importance du recouvrement) et, d'autre part, d'obtenir des renseignements sur la dynamique des particules en charriage.

Plus de 1.000 kilomètres de profils ont ainsi été levés entre Bréhat et le Cap de la Hague. Cette reconnaissance à large maille a été complétée par la réalisation de quatre "mosaïques" sur la zone pré littorale, entre la pointe du Rozel et l'anse de Vauville. La figure II.9 récapitule les positions des profils des diverses missions.

Cette étude, menée dans le cadre du Programme Intégré Golfe Normano-Breton de l'IFREMER avec la participation du Laboratoire de Géologie Marine de l'Université de Caen, a fait l'objet d'un rapport de contrat (LARSONNEUR-WALKER, 1986).

II.2.1. Méthodologie

Selon les campagnes, le positionnement était assuré par les systèmes Syledis ou Motorola avec une précision de l'ordre d'une dizaine de mètres. Un profil de la mosaïque fait en juin 1983, et repris en juillet 1983 et 1984 a montré la grande fiabilité du système de positionnement, les images coïncidant avec un décalage inférieur à 10 mètres.

Le plan de position des campagnes a été tracé, après traitement informatique, à partir des données enregistrées sur cassettes magnétiques au cours des diverses missions.

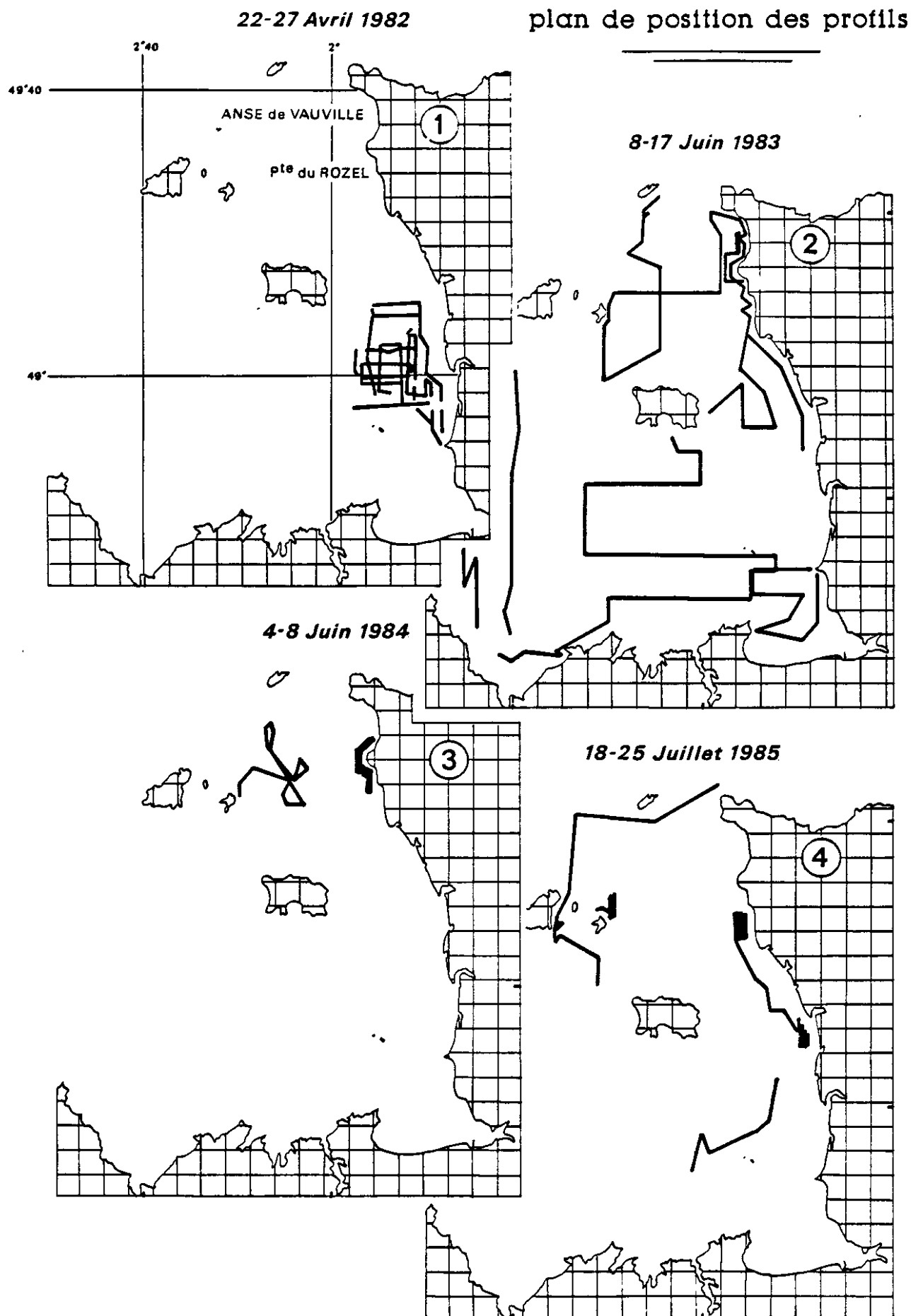
Le sonar à balayage latéral est le type EGG SMS 960, fréquence 100 kHz, avec un poisson EGG 272. L'appareil corrige les déformations dues à l'obliquité des ondes et aux variations de vitesses du bateau. Il restitue ainsi une image isométrique de la surface topographique.

Un système d'enregistrement sur bande magnétique permet d'accumuler les données avant traitement graphique et de rejouer les profils en corrigeant les erreurs éventuelles de vitesse du bateau ou de hauteur du poisson (BERNE et al, 1986).

Les courants de marée sont particulièrement forts dans cette région et le cap tenu par le bateau correspond rarement à la route fond. Aussi, toutes les cinq minutes, le cap au compas gyroscopique était relevé afin de pouvoir reporter les directions des structures géologiques ou sédimentaires. Les sondes étaient lues, corrigées de la marée et reportées sur les profils.

Quelques traits de télévision et photographies sous-marines ont permis d'étalonner les faciès acoustiques et d'observer les structures sédimentaires de dimensions inférieures au pouvoir de résolution du sonar latéral (1 m environ). Il a été ainsi constaté une

Fig. II.9: CAMPAGNES "SONAR LATÉRAL": 1982-1985



bonne corrélation entre les orientations des facettes réfléchissantes et l'enregistrement sonar. D'autre part, l'amplitude des structures peu importantes a été mesurée et les directions apparentes des courants au fond se sont révélées proches de celles prédites par les atlas de courants de marée.

II.2.2. Répartition des sédiments

La répartition des sédiments établie à partir des enregistrements s'est montrée globalement cohérente avec celle présentée par la carte des sédiments superficiels de la Manche (Vaslet et al., 1979). L'analyse des faciès a été facilitée par les photographies sous-marines qui ont permis d'identifier certaines zones uniformes.

Les campagnes ont mis particulièrement en évidence l'importance des zones d'affleurements rocheux surmontés ou non d'une couverture discontinue et peu épaisse de cailloutis et de graviers. L'épifaune sessile colonise souvent ces substrats durs.

Dans la baie de Saint-Brieuc et dans la zone sud-est du Golfe Normano-Breton dominant les sédiments sablo-graveleux coquilliers se caractérisant par une image homogène de réflectivité moyenne. De nombreuses traces de dragues à praires ont été relevées sur ces fonds.

Les sables moyens ou fins apparaissent sous forme de zones claires et uniformes sur les enregistrements ; leur extension est surtout en domaine littoral ou peuvent constituer des bancs plus au large. Les images de télévision ont montré que ces sables possédaient souvent des ripple-marks.

Les variations latérales de faciès peuvent être brutales et fréquentes ; certains secteurs présentent en effet une grande hétérogénéité (Flamanville).

Les sédiments se trouvent souvent piégés dans les fractures entre les roches et au pied des affleurements. Ces accumulations sont peu épaisses, discontinues et contrôlées par la structure du substrat rocheux. De plus, certains organismes tendent à retenir les particules :

- Les lanices, annélides à tubes arénacés, forment des buttes lorsqu'elles se trouvent en forte densité.

- Les lithothamniées qui se développent en arbuscules et dont les fragments constituent le maërl, sédiment qui présente un aspect bosselé sur les enregistrements.

II.2.3. Les structures sédimentaires

L'analyse des divers types de figures sédimentaires rencontrées, longitudinales et transversales, permet de préciser les directions et le sens des transits sableux.

II.2.3.1. Les structures longitudinales (Auffret et al., 1984)

Les traînées sableuses ("Sand streamers"), parfois interrompues par des affleurements ou des blocs, sont longues de plusieurs centaines de mètres et ont une épaisseur très faible. Certaines traînées, plus diffuses, ont peut-être pour origine le piégeage des sédiments fins par l'épifaune. En effet, un trait de télévision a montré une succession de bandes de sédiments graveleux, couvertes d'épifaune sessile, orientées suivant la direction des courants dominants et qui apparaissent en zones plus claires sur l'enregistrement. Ces traînées, qui retiennent les particules fines, sont séparées par des bandes de graviers "propres".

Les rubans sableux ("Sand ribbons") sont des structures longitudinales un peu plus épaisses, parfois recouvertes de mégarides perpendiculaires à l'allongement. Ces figures, parallèles aux directions des courants les plus forts semblent être relativement stables. En effet, nous avons retrouvé, par 20 mètres de fond, au cours d'une reprise d'un profil déjà levé, une succession de rubans qui ne montrent pas de modifications notables. Les courants de marée maximum ont atteint durant cette période 1,2 m/s en surface.

II.2.3.2. Les structures transversales

Les structures transversales affectent les sédiments sableux et graveleux. Les plus petites sont les ripple-marks qui ne peuvent être observées que par la photographie sous-marine. En effet, leur amplitude, inférieure à 3 cm, et leur longueur d'onde, 10 à 20 cm, sont inférieures au pouvoir de résolution du sonar.

Une classification dimensionnelle des figures transversales ne semble pas pouvoir être établie car l'amplitude et la longueur d'onde de ces structures sédimentaires augmentent de façon continue, en fonction de la vitesse du courant, du débit solide et de la granulométrie.

Toutefois, des limites arbitraires peuvent être fixées pour simplifier les phénomènes. Ainsi, nous appellerons mégarides (Sand waves, dunes, mégaripples), des figures transversales ayant de 1 à 25 m de longueur d'onde et de moins d'un mètre d'amplitude. Elles présentent souvent une dissymétrie de forme permettant de déterminer le sens du transit sableux. Les sédiments les plus fins sont localisés dans la zone "d'avalanche" ; les plus gros, débris coquilliers et même coquilles entières, sont accumulés à la base. La crête des mégarides peut être droite, plus ou moins rectiligne, parfois avec de nombreuses anastomoses. Elle peut aussi présenter une forme en croissant isolé.

D'autres mégarides, de 1 à 2 m de longueur d'onde, d'allures presque symétriques, recouvrent parfois les fonds graveleux en bordure de côte par des fonds inférieurs à 20 mètres. La mise en place de ces rides d'oscillation, dont l'orientation des crêtes est le plus souvent parallèle au rivage, semble due à l'action des houles.

Les ridins (Large Sandwaves) ont des longueurs d'ondes supérieures à 25 mètres et une amplitude généralement supérieure à un mètre. Ces structures caractérisent un fort courant.

Ils sont observés, en groupe ou plus ou moins isolés, dans la bande côtière. Leur amplitude est alors généralement faible. Ils sont aussi associés aux grands bancs sableux, leur amplitude est dans ces cas plus importante. Les ridins sont fréquemment recouverts de mégarides et de ripple-marks. Leur crête peut être rectiligne ou d'allure sigmoïdale.

La direction d'allongement des mégarides sur le flanc en pente douce du ridin est sécante par rapport à sa crête suivant un angle de 5° à 20° . A la base de la pente abrupte, les mégarides ont parfois une direction d'allongement perpendiculaire à celle du ridin. Les ripple-marks s'organisent de la même façon, sur les mégarides.

II.2.4. Les transits sableux

Les figures sédimentaires observées au sonar à balayage latéral permettent souvent d'estimer les directions principales de transport. De plus, la géométrie des corps sableux, constituant les principales zones d'accumulations, apporte des enseignements sur leur origine et leur formation.

La majorité des figures sédimentaires indique des directions de transits charriés conformes à l'allongement des ellipses de courants de marée. Les transports sont donc dus essentiellement à l'action des courants sauf à proximité des côtes où l'influence des houles se fait sentir à partir de l'isobathe des 15 mètres.

L'intensité des courants sur l'ensemble du golfe est telle que les sédiments ne peuvent s'accumuler que dans les fonds de baie abrités (baie du Mont Saint-Michel, baie de Saint-Brieuc) ou localement, dans des zones où des structures hydrauliques particulières, de type tourbillons, permettent la construction de corps sableux.

Aussi, le faciès le plus fréquent est celui des fonds durs, rocheux ou caillouteux, avec des traînées et des rubans sableux.

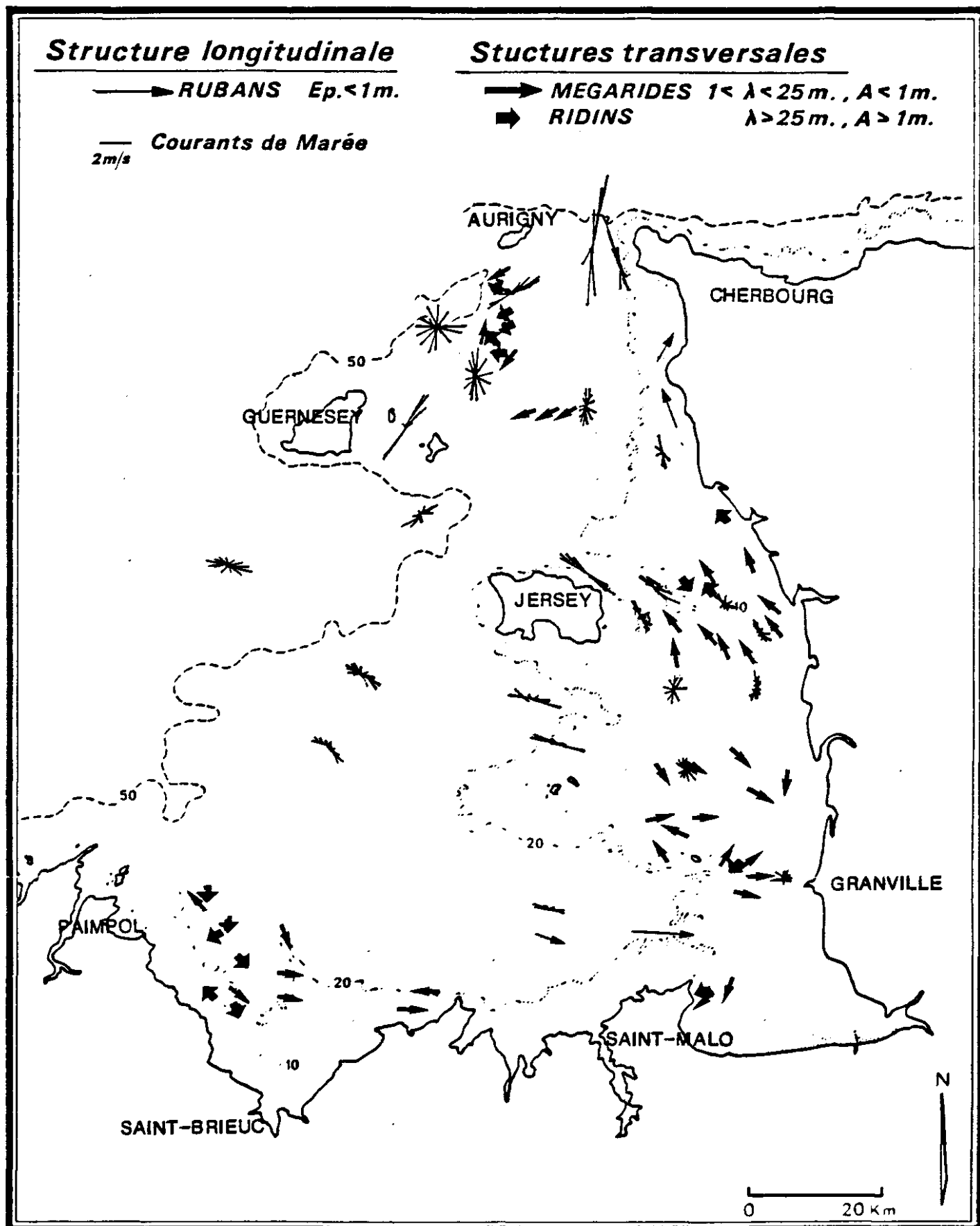
Deux grands systèmes de transports peuvent être reconnus dans le Golfe Normano-Breton en fonction de la situation géographique (cf. fig. II.10).

* Secteur méridional du golfe

Au sud de l'île de Jersey, les sédiments transitent essentiellement de l'ouest vers l'est ou du nord-ouest vers le sud-est. Un important ruban sableux, parfois ramifié, s'allonge depuis les roches de la Catheue vers la pointe du Roc de Granville.

Les pointes de Bréhat et du Cap Fréhel perturbent les écoulements, et des bancs sableux plus ou moins volumineux s'installent au centre des perturbations : banc de Paimpol, banc de l'Etendrée. Sur le banc de Paimpol, les apports proviennent essentiellement du NNE et les sables sont emmenés depuis l'extrémité sud du banc en direction de l'île de Bréhat à la base du flanc occidental qui est le plus pentu.

Fig. II.10 : GOLFE NORMANO-BRETON
TRANSITS SEDIMENTAIRES



Entre l'île de Jersey et le Cotentin, les sables et graviers transitent principalement du SE vers le NW et sont alors dirigés vers le système septentrional. Toutefois, les ridins des bancs de l'Ecrevière, du Château (Est Jersey) et des Bancs Fêlés indiquent des composantes de transport inverses.

* Secteur compris entre Iles Anglo-Normandes et littoral Cotentin :

Les directions de transit dans cette partie du golfe peuvent être présentées schématiquement de la façon suivante :

- un transport de sables depuis le secteur des îles de Jersey et Serk vers Aurigny,
- un charriage des sédiments, du sud vers le nord, le long du Cotentin,
- un retour des sables, du nord vers le sud, depuis le raz Blanchard vers l'île de Jersey au centre du système.

Sur le banc de la Schôle, les sables proviennent essentiellement du NE, circulent selon un mouvement giratoire anticyclonique et migrent vers le sud, à l'extrémité méridionale du corps sableux. Il est probable que la partie sommitale du banc soit instable lorsque l'agitation due à la houle ou aux mers de vents devient importante. La dispersion des sables est alors favorisée sur le côté oriental de l'accumulation sédimentaire entraînant un recyclage des particules.

Au NE de l'île de Serk, existe un banc de moindre superficie mais dont les ridins sont particulièrement élevés. Ces mégastructures indiquent une rotation des sables dans le sens cyclonique et il semble qu'une partie des sédiments migre vers le NE.

Sur la côte ouest du Cotentin se succèdent plusieurs zones d'accumulations sableuses (bancs de Surtainville, barres sableuses de l'anse de Vauville) entre lesquelles transitent les sédiments du sud vers le nord.

Au large du Cap de Flamanville, les courants sont très violents et les sables se dispersent, laissant apparaître le substrat dur. Dans l'anse de Vauville, se développent des contre-courants côtiers qui ramènent les particules en bordure de l'estran vers le sud. Il faut noter que les accumulations sableuses de ce secteur sont situées au point de convergence des transits, où les transports résiduels sont probablement très faibles.

II.2.5. Comparaison des directions de transit avec les résultats du modèle mathématique des courants de marée.

Le modèle des courants a été utilisé pour calculer un transport résiduel en tout point de la grille, après une marée de vive-eau de coefficient 95. La formule de transport total (charriage +

suspension) proposée par Engelund et Hansen * a été utilisée avec les diamètres de particules des sédiments en place.

$$Q_s = 0,05 \rho_s v^2 \sqrt{\frac{D_{50}}{g\rho'}} \left[\frac{\tau_f}{g\rho' D_{50}} \right]^{1,5}$$

avec

$$\left[\begin{array}{l} \rho_s \approx 2600 \text{ kg/m}^3 \\ \rho' \approx \rho_s - \rho \approx 1600 \text{ kg/m}^3 \\ \tau_f \text{ conforme à la tension sur le fond exprimée dans le modèle soit :} \\ \tau_f = \rho g \frac{v^2}{C^2}, C : \text{Coefficient de Chézy} \end{array} \right.$$

V est calculée par modèle U.B.O. (cf. Thème I, 1ère Partie, et ORBI, 1986).

C = Paramètre introduit dans le modèle :

$$C = 1,11 \times 7,83 \text{ Log} \frac{H}{e z_0}$$

H = hauteur d'eau totale

$z_0 = 1 \text{ cm}$ (longueur de rugosité)

Finalement : $Q_s = 16,2 \frac{v^5}{C^3}$

D_{50} = Sédiment superficiel en place.

La simulation donnant estimation du transport solide total résiduel, par marée de vive-eau, est proposée en annexe de ce volume.

Les directions résiduelles de transit s'avèrent très proches de celles observées in situ au sonar latéral et les accumulations sédimentaires se trouvent situées au niveau de zones de convergence des vecteurs transport (voir basse de la Schôle par exemple). De même, elles se situent à proximité du littoral notamment, lorsque l'intensité des vecteurs transport diminue.

* Task committee for preparation of sedimentation manual (1971).
Sediment transportation mechanics : sediment discharge formulas.
Proc. A.S.C.E. - HY.4 (Avril).

CONCLUSIONS :

Le Golfe Normano-Breton semble donc constituer une vaste zone de piègeage d'où ne peuvent sortir les particules en provenance du large.

Les apports sédimentaires sont faibles et pénètrent en majeure partie par l'ouest du Golfe, entre l'île de Guernesey et celle de Bréhat. Ils sont constitués principalement par des bioclastes qui se mélangent à une fraction siliceuse plus ou moins résiduelle.

Le matériel déplacé au Sud des Minquiers est emmené vers le sud-est et le sud-ouest en direction des baies du Mont Saint-Michel et de Saint-Brieuc ; les sédiments passant entre Jersey et les Minquiers migrent vers le sud-est, ou remontent vers le nord, le long du Cotentin.

Les sables et graviers qui pénètrent dans la partie septentrionale du golfe, s'accumulent principalement sur les bancs situés au niveau des zones de convergence, banc de la Schôle et banc des Casquets, ou en arrière des îles, à l'abri des houles.

Les principales zones d'accumulations sont situées en zones intertidale et pré-littorale, sur la côte ouest du Cotentin : havres, où la sédimentation est de quelques centimètres par an (voir 2ème partie de ce thème, chapitre I), mais aussi partie estuarienne de la baie du Mont-Saint-Michel où il se dépose annuellement une dizaine de centimètres de sédiments.

Le Golfe constitue donc un vaste système sédimentaire actuellement peu actif et dont les zones d'accumulations et les directions de transits semblent bien stabilisées.

II.3. - ETUDE DES TRANSITS SABLEUX CÔTIERS EN ZONES INTERTIDALES : UTILISATION DE TRACEURS RADIOACTIFS CÔTE OUEST-COTENTIN

Diverses méthodes sont actuellement utilisées afin de mettre en évidence les transits sableux côtiers. Parmi elles, très peu sont susceptibles d'apporter une réponse précise à l'évaluation quantitative de ces transits. Cela tient principalement à la difficulté d'estimer ces transports solides en particulier lorsque houles et courants superposent leurs effets, mais également au type même du transport particulaire : en suspension, en charriage. Si une certaine quantification peut être effectuée sur les estrans, les techniques de mesures sont insuffisantes ou peu adaptées pour apprécier les transits sédimentaires en suspension.

Or les zones intertidales constituent des lieux privilégiés d'intenses transports sédimentaires et l'équilibre dynamique des littoraux en dépend.

La mise au point d'une méthodologie et d'une instrumentation appropriées s'avère donc nécessaire pour acquérir les données permettant de quantifier les transports sédimentaires sur de vastes estrans périodiquement accessibles ; estrans soumis aux actions conjuguées des houles et des courants.

C'est dans ce but qu'une campagne d'étude sur le terrain a été menée, sur une période de 178 jours, du 7 novembre 1984 au 2 mai 1985 sur les estrans de la côte Ouest du Cotentin.

La technique utilisée est celle des traceurs radioactifs à longue période ; il s'agit de couvrir une période d'étude correspondant à un cycle d'évolution morpho-sédimentologique du littoral. Cette technique présente l'avantage de déterminer directement en nature les transits de sédiments charriés.

II.3.1. Introduction - Présentation des sites d'études

Cette étude a fait l'objet d'un contrat IFREMER/CEA-SAR (*). Seuls seront exposés ici les principaux résultats afin de montrer l'intérêt et les limites de la méthode utilisée.

Diverses équipes ont collaboré aux campagnes de terrain ainsi qu'à l'interprétation afin de confronter les résultats obtenus par plusieurs procédés. En fonction des divers thèmes, ces collaborations étaient les suivantes :

- pour les suivis réguliers des déplacements des traceurs radioactifs : CEA/SAR avec INRS/O (Institut National de la Recherche Scientifique du Québec/Océanologie),

(*) Contrat IFREMER /CEA-Service d'Applications des Radioéléments n° 84/7472 "Etude au moyen de traceurs radioactifs des déplacements sédimentaires de la côte Ouest du Cotentin". Rapport B. LONG. Avril 1986

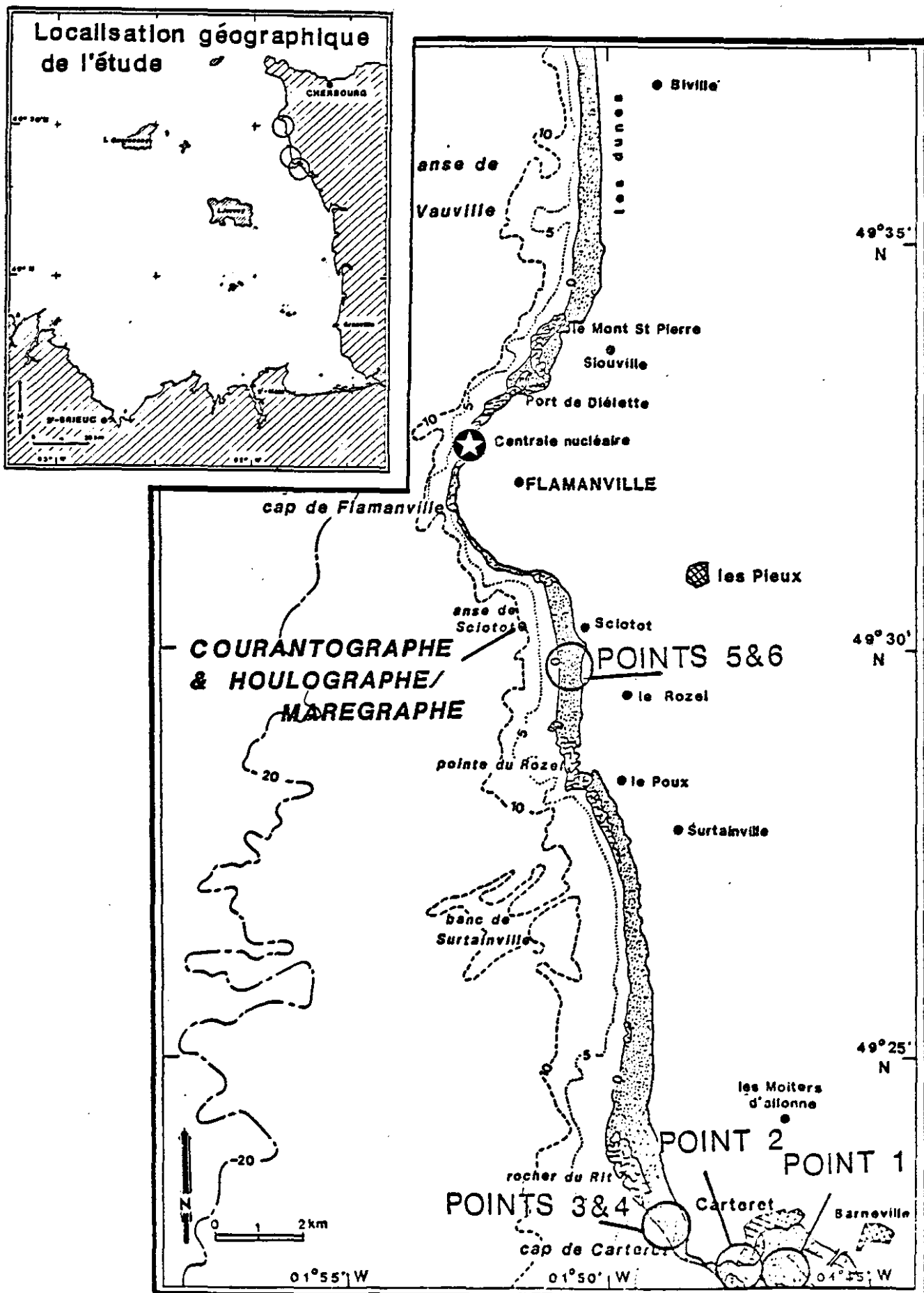


Fig. II.11: LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DES SITES D'ETUDE.

- pour les mesures des paramètres hydrodynamiques : IFREMER/DERO-EL (Direction de l'Environnement et de la Recherche Océanique-Environnement Littoral) Centre de Brest, INRS/O et ENSM (Ecole Nationale Supérieure de Mécanique) de Nantes pour les dépouillements informatiques de ces paramètres.

- pour le positionnement sur le terrain : IFREMER/GENAVIR (Centre de BREST),

- pour les suivis de la morphologie des estrans tout au long de l'étude : Université de Paris-Sud/Centre d'Orsay (Laboratoire de Sédimentologie).

La sélection des sites s'est faite en fonction des diverses conditions hydrodynamiques auxquelles ils sont confrontés. Ainsi, il a été retenu (fig. II.11) :

- une plage relativement fermée, formant entité et n'ayant que peu de contacts avec les plages environnantes : l'anse de SCIOTOT (fig. II.12). Ce site est particulièrement ouvert aux houles d'ouest à NW (houles océaniques longues) ainsi qu'à celles de SSW à WSW (houles plus courtes). Le profil de plage correspond à celui d'un estran dominé par l'action des houles,

- des environnements ouverts aux houles locales ; principalement ceux d'HATAINVILLE et CARTERET (fig. II.12.). A Carteret, les houles diffractent autour du cap et déferlent par le SW sur la plage de Carteret,

- des environnements plus protégés de l'action des houles : le site de BARNEVILLE (fig. II.12.). Les houles sont fortement atténuées après avoir contourné deux obstacles : le Cap de Carteret et la jetée.

Les immersions de traceurs ont été faites sur les haut et bas estrans pour les sites de SCIOTOT et HATAINVILLE.

Les numéros 1 à 6 correspondent aux six immersions effectuées simultanément (fig. II.12).

II.3.2. Matériel utilisé, équipements et principe de la méthode

II.3.2.1. Le traceur

Le traceur utilisé pour la totalité des expériences est l'Iridium 192 inclus dans une matrice de verre non activable broyé à la granulométrie représentative de chaque site d'étude (COURTOIS et HOURS, 1965). Les caractéristiques du traceur sont :

Période : 74,02 jours

Elément fils : $\begin{matrix} 192 & \text{Pt} & \text{et} & 192 \\ & 78 & & 76 \end{matrix}$ Os

La quantité de verre immergée (Fig. II.13.) est fonction de la granulométrie ; en effet le nombre de grains minimum pour l'immersion doit être supérieur à 10^6 (SAUZAY, 1968).

Fig. II.12: PRESENTATION DES QUATRE SITES D'ETUDE.

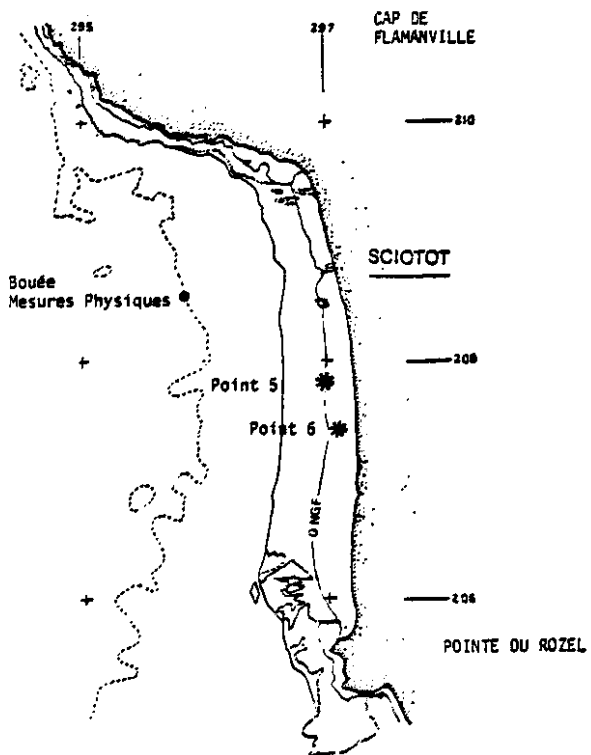
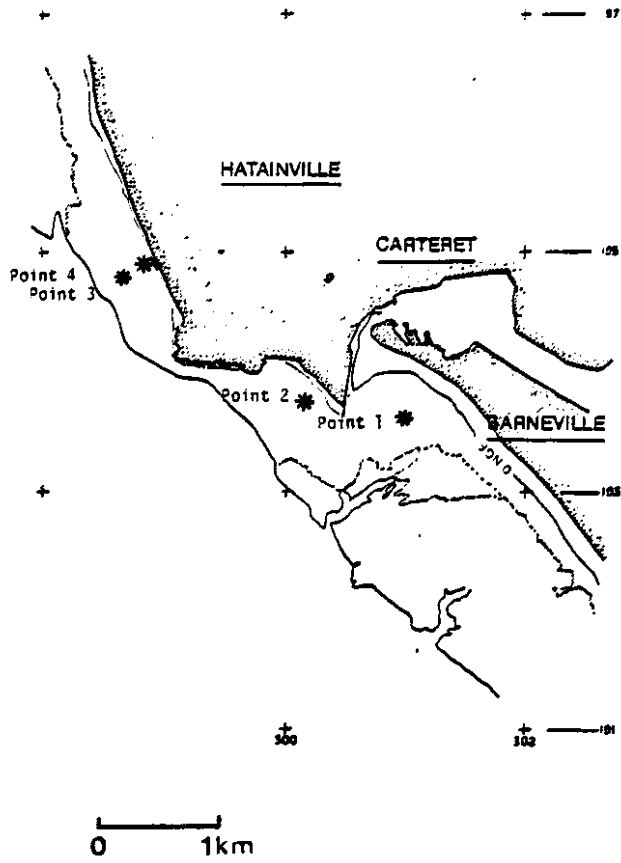


Fig. II.13 : IMMERSION DU TRACEUR RADIOACTIF .

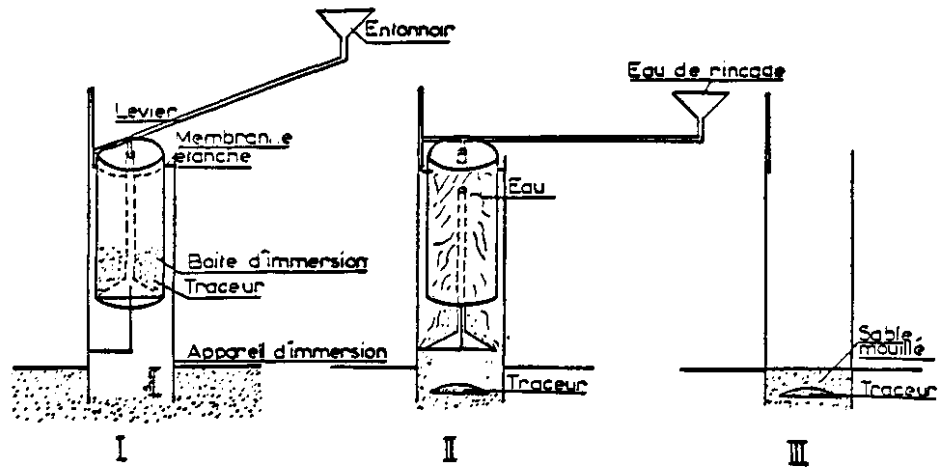


Fig. II.14 : SCHEMA DE LA DETECTION ET DU POSITIONNEMENT

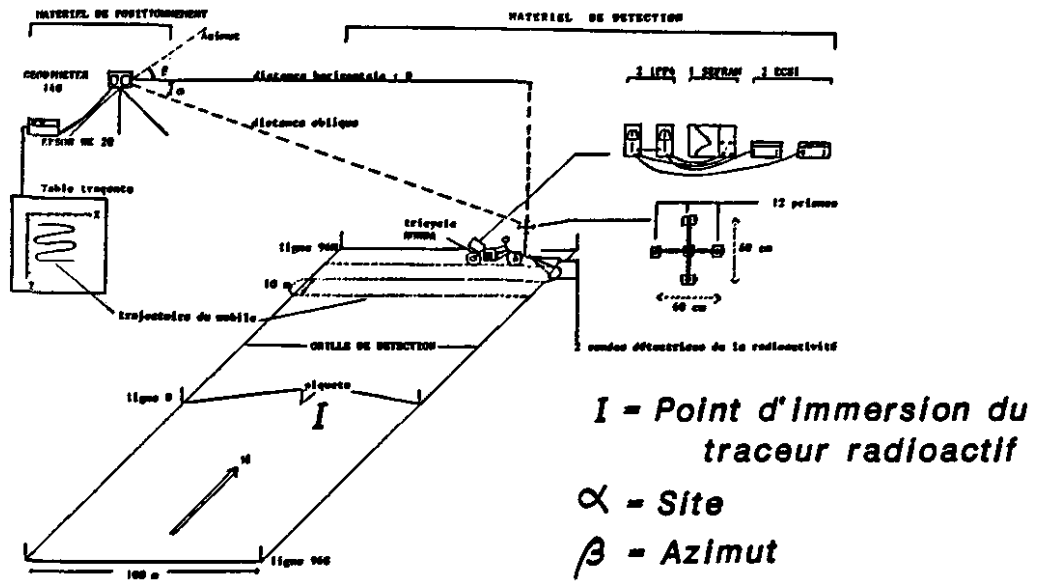
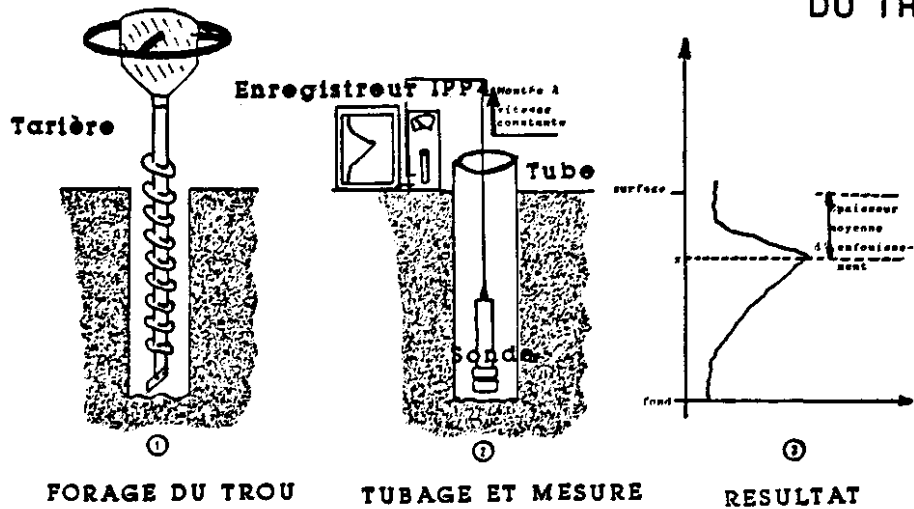


Fig. II.15 : MESURE DE L'ÉPAISSEUR MOYENNE D'ENFOUISSEMENT

DU TRACEUR.



Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des six immersions :

	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
Localisation :	Barneville	Carteret	Hatainville	Hatainville	Sciotot	Sciotot
Position sur :	mi-estran	mi-estran	bas-estran	haut-estran	bas-estran	haut-estran
Granulométrie (mm) :	0,200-0,250	0,250-0,135	0,250-0,315	0,250-0,315	0,250-0,315	0,250
D50 (mm) :	0,200	0,250	0,250	0,250	0,280	0,280
Quantité immergée :	250 g	350 g	350 g	350 g	215 g	215 g
Nombre de grains (10^6) :	2,86	1,79	1,79	1,79	1,10	1,10
Jour d'immersion :	07-11	07-11	07-11	07-11	07-11	07-11
Heure d'immersion :	10 h 40	09 h 50	11 h 30	12 h 10	14 h 50	14 h 20
Activité à l'immersion (mCi) :	740	950	680	837	825	770
(GBq) :	27,38	35,15	25,16	30,97	30,53	28,49

II.3.2.2. Le système de détection

Chaque chaîne de mesure est constituée d'une sonde marine de Saphimo-Stel raccordée à un détecteur IPP4 puis parallèlement, à une échelle de comptage Nardeux et un enregistreur Sefram.

L'utilisation d'une ATC Honda avec électronique d'acquisition montée sur l'avant de la moto et porte sondes tracté, s'est révélé efficace dans ces environnements où les détections doivent être faites dans des délais très courts. Les détections ont été menées selon des profils transversaux (E-W) et longitudinaux (N-S) par rapport à la côte.

II.3.2.3. Le système de positionnement

Le positionnement de l'ATC est assuré à l'aide d'un système infra-rouge Aga Geodimeter 140 dont la portée maximale est de 5 500 m. La précision horizontale est inférieure au mètre et de l'ordre de 20 cm pour la précision verticale. L'acquisition des données est faite par micro-ordinateur. La figure II.14. schématise le principe de la détection ainsi que le positionnement sur le terrain.

II.3.2.4. Equipement pour la mesure de la radioactivité en profondeur

Des mesures de distributions verticales du traceur sont également effectuées avec une sonde (fenêtre latérale : 0,5 cm) descendue à vitesse constante dans un tubage (fig.II.15.).

II.3.2.5. Equipement de mesures hydrodynamiques

L'appareillage utilisé est un houlographe-marégraphe Sea Data (type 635-11) mouillé sur potence avec un courantomètre électromagnétique InterOcéan (Type S4), face à l'anse de Sciotot

(fig. II.11./II.12.), par 11 mètres de profondeur au dessous du zéro des cartes. L'acquisition des données a été réalisée du 4/12/84 au 29/01/85. De plus des "mouillages estrans" de ces deux appareils ont été effectués durant les dernières détectations.

II.3.2.6. Principe de la méthode des traceurs

Cette méthode est basée sur le bilan des taux de comptage à partir des données mesurées en surface, afin de déterminer le débit de charriage des sables (CRICKMORE et LEAN, 1962 et 1963 ; COURTOIS et SAUZAY, 1966 ; SAUZAY, 1968).

Les mesures de distribution verticale du traceur permettent, assez souvent, de lever l'ambiguïté des faibles comptages de surface lors des enfouissements massifs du traceur.

Les paramètres à prendre en compte sont (TOLA, 1982) :

- la vitesse du mouvement du centre de gravité en surface,
- le bilan des taux de comptage et profondeur d'enfouissement du traceur,
- le transport par charriage.

* Mouvement du centre de gravité

Pour chaque détéction, la distance entre le point d'immersion (PI) et le centre de gravité (CG) correspond à la vitesse moyenne du transport (L_m). La vitesse moyenne du mouvement entre le premier jour et le jour de la détéction est U_{m0} :

$$U_{m0} = \frac{L_m(d) - L_m(o)}{t(d) - t(o)}$$

* Bilan des taux de comptage et profondeur d'enfouissement :

Ce bilan N est utilisé pour déterminer la profondeur d'enfouissement du traceur ($N = N_o/A_o$; avec N = activité détectée lors de la reconnaissance en coups par seconde et par mètre carré ; N_o = activité corrigée de la décroissance du traceur ; A_o = activité initiale au jour de l'immersion) (COURTOIS, 1964 - SAUZAY, 1968).

* Le transport par charriage

Il est calculé par la relation : $D = \rho w U_m Z$

avec ρ = densité du sédiment

w = unité de largeur (= 1 m)

U_m = mouvement moyen du centre de gravité

Z = épaisseur moyenne du remaniement

La valeur du transport est ainsi donnée en tonnes par mètre linéaire .

II.3.3. Les conditions physiques de l'étude

II.3.3.1. Conditions météorologiques

Sur les six mois de l'étude toutes les conditions météorologiques ont été rencontrées. Les tempêtes principales accusaient des directions de vents des secteurs WNW à SSW. Parmi les seize tempêtes relevées, l'une, très violente, s'est produite les 23-24 novembre 1984 avec des vents WSW de 11 à 35 m/s (vent maximal instantané) et était conjuguée avec une marée de vives eaux.

II.3.3.2. La marée et les courants dans le Golfe Normano-Breton

La première partie de ce thème présente la propagation de la marée dans le golfe. En ce qui concerne le secteur étudié, les amplitudes sont les suivantes :

	VIVE EAU	MORTE EAU
Carteret	9,7 m	4,8 m
Dielette	8,4 m	4,4 m

Des surcotes peuvent atteindre 1 m par vents de secteur ouest. Dans le Golfe Normano-Breton, les courants sont principalement générés par les houles et les marées.

Très peu de mesures de courant ont été réalisées par des fonds inférieurs à 10 m dans le golfe, hormis les mouillages effectués par E.D.F. pour les études concernant Flamanville.

Les données concernant les houles proviennent essentiellement du Laboratoire National d'Hydraulique. Pour Flamanville, 90 % des houles maximales sont inférieures à 2,5 m (dont 30 % entre 0,6 et 1,20 m). Le secteur SW à NW est le plus touché et les périodes varient généralement de 8 à 11 s.

Afin de relier les suivis de traceurs avec les conditions hydrodynamiques, un houlographe-marégraphe a été mouillé face à Sciotot, par 11 mètres ; sa période d'acquisition était de 17 mn toutes les trois heures pour la houle et de 8 mesures moyennes par heure pour la marée.

Un courantomètre électromagnétique était couplé et programmé pour acquérir 540 mesures à 1 Hz pendant 9 mn toutes les 12 heures. Cette programmation est liée à la faible capacité de mémoire de l'appareil.

Le rythme d'acquisition pour les "mouillages estrans" était de 2 Hz en continu, pendant un cycle de marée afin d'appréhender la houle, et d'une mesure toutes les 15 minutes pour la marée. Pour le courantomètre, la vitesse d'acquisition était de 2 Hz, la durée, de 9 mn, et le déclenchement, toutes les 20 mn.

Un programme de dépouillement, mis au point par CAVANIE et al (1982) permet le calcul du courant moyen et du spectre d'énergie sur seize périodes, de 3,6 à 22,8 secondes, des puissances transmises par mètre de côte et de l'énergie totale (en J/m²).

II.3.3.3. Les principaux résultats hydrodynamiques

Les dépouillements des paramètres houles, marées, courants pour le mouillage "bouée Sciotot" ainsi que pour les divers mouillages estrans ont été confiés au Laboratoire de Génie Civil de l'Ecole Supérieure de Mécanique de Nantes.

Il s'est avéré qu'un grand nombre d'informations que devait fournir le houlographe-marégraphe ont été perdus lors de la mesure, suite, semble-t-il, à des problèmes d'alimentation.

Durant la période d'acquisition de données au mouillage de Sciotot, l'influence relative des courants de marée et des cycles de tempête sur le fond, a été mise en évidence.

La figure II.16 montre les variations des puissances transmises calculées à partir du houlographe Sea Data et du courantomètre Inter Océan.

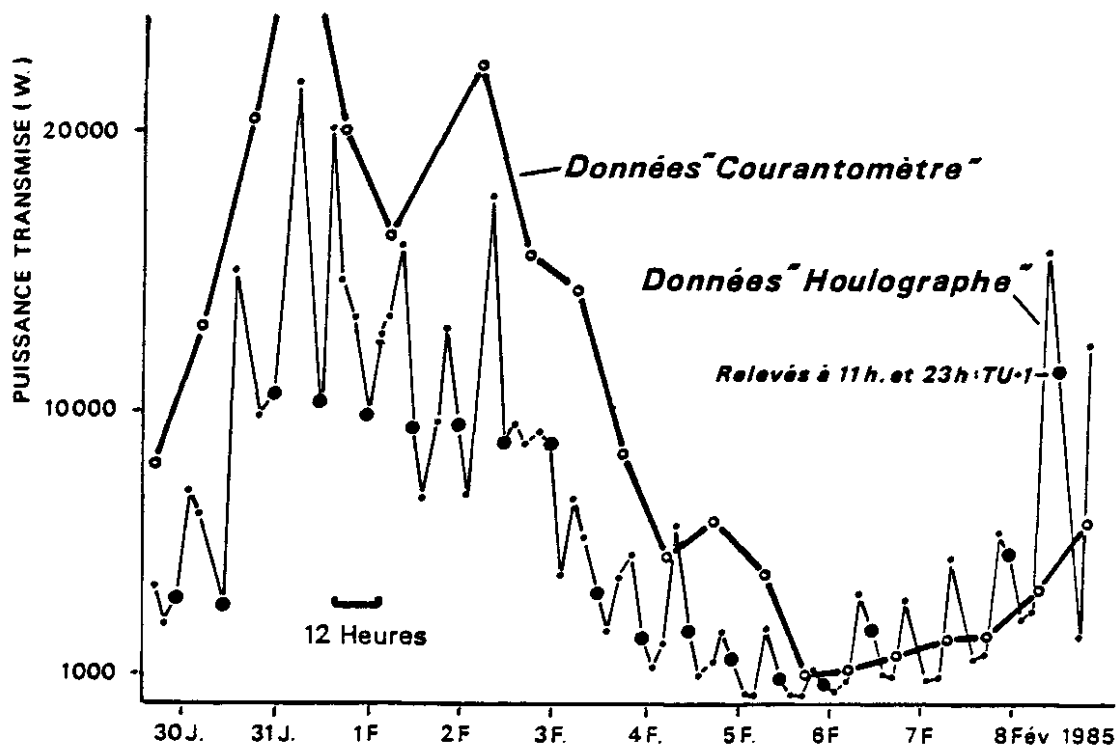


Fig. II.16 : Variations des puissances transmises (w) entre le 30.01.85 et le 08.02.85.

Il apparaît que la puissance transmise par mètre de côte et mesurée avec le houlographe, varie suivant un cycle en phase avec la marée. En période calme, et bien que l'on soit en vive-eau (5-6 février), la variation est de 2 à 3 kw. En période de tempête, du 31/01 au 03/02, cette puissance transmise atteint 20 kw avec une moyenne de 12 kw ; les variations entre basse mer et pleine mer représentent alors un facteur deux.

Avec le courantomètre électromagnétique, si les fluctuations tidales ne sont pas visibles avec le type de programmation choisi, il est néanmoins possible de mettre en évidence le rôle des différentes tempêtes. Les valeurs obtenues à partir du courantomètre sont toujours supérieures à celles enregistrées au houlographe. Les caractéristiques des houles de tempêtes étaient les suivantes :

Dates	période	direction	Vitesse max.
21/01/1985	11 à 13 s	NW	20 cm/s
24/01 au 26/01	9,4 à 11 s	WNW	45 cm/s
31/01 au 02/02	9,4 à 16 s	SW	40 cm/s
08/02 au 09/02	13 à 16 s	W	50 cm/s
15/02/1985	13 s	W	30 cm/s

Durant les détections, des mesures de courant ont été réalisées durant un ou deux cycles de marée, à l'aide de mouillages "estran", * à proximité des points d'immersion de traceurs sur Sciotot et Hatainville.

Ainsi à Siotot, le courant moyen (sur 10 mn) porte au nord durant le flot avec une vitesse supérieure à 20 cm/s pendant 20 mn, et 15 cm/s pendant 80 mn. Durant le jusant, le courant porte au sud avec des vitesses n'excédant pas 10 cm/s. Ces courants enregistrés lors de cette situation (19/02/1985) étaient principalement dus aux marées ; la houle était faible.

Pour Hatainville, à partir de deux cycles tidaux, il a été possible de montrer l'action conjuguée des courants de houle et de marée. Deux houles sont superposées : l'une de période 7,3 s ; l'autre, de période 11 à 13,3 secondes.

* Les dépouillements concernant les mesures hydrodynamiques ne sont pas détaillés dans le cadre de ce chapitre ; elles sont néanmoins disponibles sur demande.

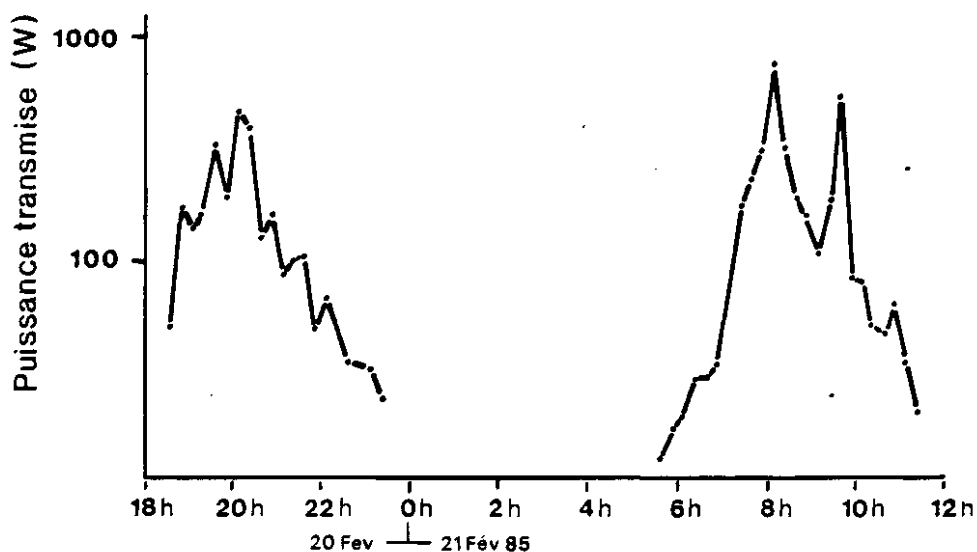


Fig II.17: Relation entre la Période de la Houle et la Puissance transmise Site d'Hatainville

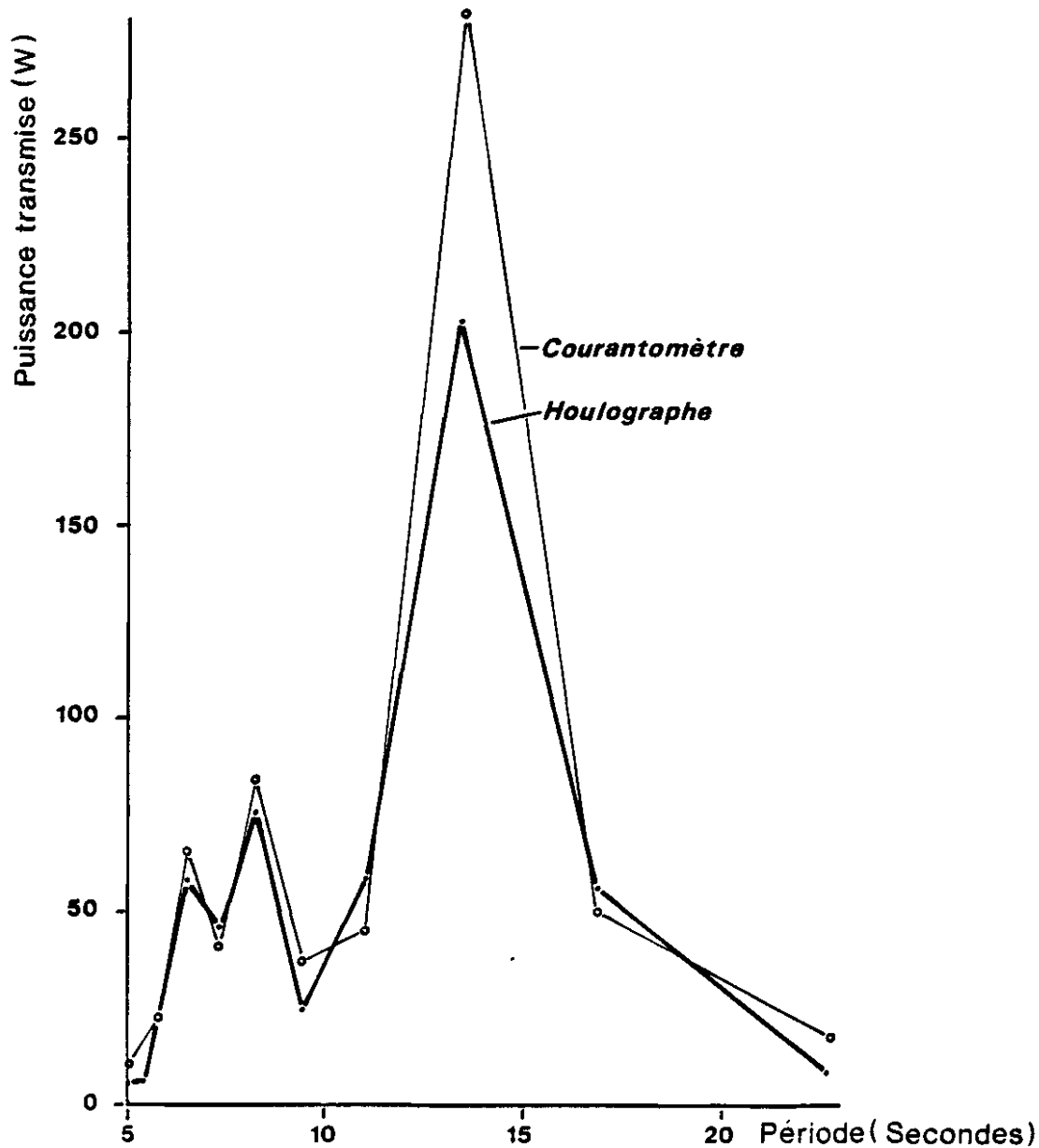


Fig II.18: Puissance transmise calculée à partir des Données courantométriques Site d'Hatainville

Il ressort de l'exploitation des données que :

- la puissance totale est inférieure à 1 Kw durant les deux cycles (Fig. II.17).

- La puissance est principalement transmise au niveau du fond par les houles longues de 13 s (200 à 270 W) ; celle transmise par les houles de 6 à 7 s est de l'ordre de 60 à 80 W (Fig. II.18).

Il est donc bien établi que le littoral est essentiellement modelé lors des tempêtes d'ouest et non par les mers de vent locales.

II.3.4. Analyses des divers sites d'études

Avec le type de positionnement choisi, il a été possible d'une part, d'établir les trajectoires suivies par le mobile par rapport à la grille de détection et, d'autre part, d'obtenir un très grand nombre de points cotés en X, Y et Z afin de suivre l'évolution morphologique de chaque site au cours du temps. Toutes les quatre secondes la position du mobile est mémorisée (mesures d'angles et de distance). Les données sont ensuite traitées par un micro calculateur ; les valeurs sont transcrites par table traçante sur un fond Lambert (en X, Y) donnant ainsi l'altitude des points.

Deux méthodes d'investigation pour l'évaluation des transits sédimentaires seront donc discutées dans ce chapitre ; ces méthodes d'approches sont complémentaires :

. l'une concerne l'évolution topographique des estrans avec le temps par juxtaposition de situations successives en un même lieu. Cette représentation permet de suivre l'évolution des isobathes dans des zones morphologiquement perturbées,

. l'autre méthode consiste à détecter et à suivre la migration du centre de gravité d'un "nuage" radioactif par rapport au point d'immersion. La disposition des courbes isochocs est ainsi cartographiée pour chaque détection. Les volumes mis en jeu par le transport littoral sont mis en évidence par un diagramme de transit et une courbe cumulée de la radioactivité.

Ces deux méthodes permettent donc d'obtenir le sens du transport ; la seconde, quant à elle, apporte en outre, des précisions sur l'évaluation quantitative du transport en complétant les détections de radioactivité menées en surface du sédiment par des détections en profondeur (par tubage).

Chacune des sept détections menées sur le terrain représente une durée d'investigation de 2 à 4 jours (tableau ci-après).

TABLEAU RECAPITULATIF DES DETECTIONS TERRAIN

Date	N° Détection	Point 1 Barneville	Point 2 Carteret	Point 3 Hatainville bas estran	Point 4 Hatainville haut estran	Point 5 Sciotot bas estran	Point 6 Sciotot haut estran	(1)
07.11.84	Imm. traceur	740 mCi	950 mCi	880 mCi	837 mCi	825 mCi	770 mCi	
08.11.84		733,12		867,4	821,5			1
09.11								2
10.11	Détection		923,8					3
11.11	1			649,0		794,8	741,8	4
12.11								5
13.11		699,7						6
14.11	Détection			837,0	784,1			7
15.11	2					765,7	714,6	8
16.11		680,4	873,5					9
26.11				569,6				19
27.11	Détection					684,67	639,0	20
28.11	3	608,4			688,2			21
29.11			773,9					22
10.12			698,9					33
11.12	Détection			495,3	609,7			34
12.12	4					595,3	555,6	35
13.12		529,0						36
08.01.85				381,6	469,6			62
09.01	Détection					458,5	428,0	63
10.01	5	407,5	523,2					64
19.02	Détection					312,9	292,0	104
20.02	6			235,5	314,5			105
21.02		275,5	353,7					106
02.05	Détection	142,2	182,5					177
03.05	7				159,3	157,0	146,5	178

(1) Nombre de jours depuis l'immersion.

II.3.4.1. Le Site de BARNEVILLE (fig. II.19 : point 1)

La plage de Barneville est limitée au sud par le havre de Portbail et au nord par celui de Carteret. Le point d'immersion se situe à mi-estran, sur un banc sableux, entre une zone de cailloutis couvrant le bas estran et un haut estran très pentu.

- Etude morphologique :

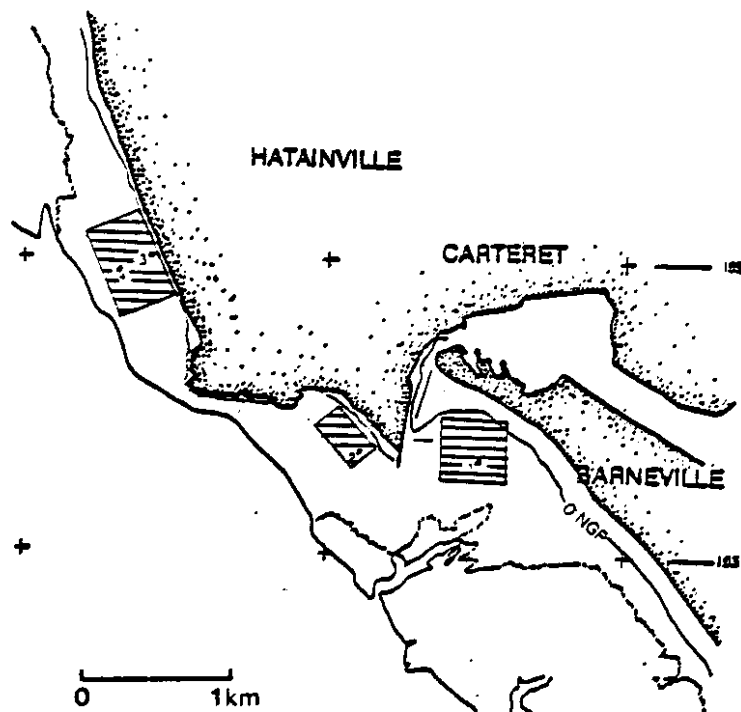
Cinq cartes topographiques ont été dressées (voir en annexe I l'évolution entre les détections 3 et 6). La pente générale est très faible ($< 1\%$) avec un système de rides dissymétriques SSW-NNE, très développé. Au point d'immersion, on observe des périodes d'érosion et d'engraissement par des sables naturels correspondant au passage de rides (amplitude max. : 0,50 m, longueur d'onde : 80 à 100 m).

- Etude de l'évolution spatio-temporelle du traceur (voir annexe II)

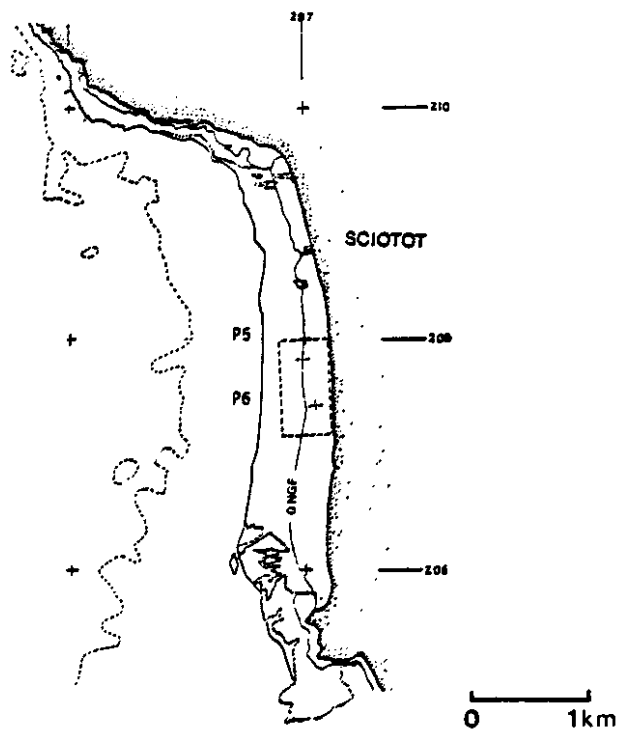
On observe, dès la détection 1, un étalement du nuage vers le nord-ouest sans déplacement du centre de gravité du traceur ; cela correspond à la direction des courants du deuxième tiers du flot.

La détection 2 montre, d'une part, la poursuite de l'étalement précédent (déplacement de surface uniquement) et d'autre part, un vecteur de transport perpendiculaire à la côte, portant essentiellement vers le haut estran. Ce transport est dû à la houle.

**Fig.II.19: LOCALISATION DES POINTS D'IMMERSION DE TRACEUR
SUR LES SITES DE BARNEVILLE, CARTERET ET HATAINVILLE
(Points 1 a 4)**



**Fig.II.20: LOCALISATION DES POINTS D'IMMERSION DE TRACEUR
SUR LE SITE DE SCIOTOT (Points 5 et 6)**



Deux couloirs parallèles de migration dirigés vers le nord-ouest apparaissent ensuite dès la détection 4 (voir annexe II). Tout comme sur les sites de Carteret et Hatainville, les déplacements sont parallèles au rivage dès la détection 3. Il existe donc une continuité dans le sens du transit littoral du nord vers le sud (depuis Hatainville vers Barneville). Néanmoins le transport résultant est orienté vers le nord-est en direction de la côte par dessus le banc sableux ; ce qui dénote la prépondérance des houles dans ce secteur. La dispersion très grande du radioélément à partir de la détection 4 ne permet plus d'effectuer, au delà, une interprétation rigoureuse (voir détection 6 en annexe II).

- Etude de l'évolution verticale du traceur

Lors des détections 4, 5 et 6, des carottages ont montré l'évolution verticale du traceur. Les résultats concernant la totalité des carottages sont donnés in LONG (1986).

Prenons l'exemple du profil (2) orienté SW-NE, lors de la détection 4 (annexe III) et passant par le point d'immersion. Le premier sondage en bas estran ne montre pas de sable marqué, alors que l'on en retrouve à 30 cm de profondeur dans le deuxième. Dans la troisième carotte, quatre niveaux sont visibles entre la surface et 20 cm. Enfin, sur le dernier sondage au NE, les 50 cm sont affectés par le traceur, particulièrement en trois couches appartenant à une même nappe entre 30 et 50 cm ainsi qu'au niveau 15 cm.

Ceci témoigne de l'arrivée de vagues successives du traceur au niveau de la crête de la première mégaride dont l'orientation est NW-SE.

Les distributions de traceurs sont plus discrètes sur les autres profils. Les sondages réalisés lors des deux détections suivantes montrent un enfouissement du traceur dans les parties les plus actives du nuage, sur les crêtes des mégarides. D'autre part, la profondeur d'enfouissement augmente d'ouest en est ; elle passe de 10 cm à 35 cm vers l'est. Les activités les plus fortes sont toujours par des profondeurs ne dépassant pas 15 cm ; cela semble dû au mode de piégeage des grains de sable le long de la pente d'accrétion des figures sédimentaires (stockage sur la pente protégée).

Ces sondages permettent de confirmer et de quantifier les transits observés à partir des détections de surface.

En conclusion, le déplacement sur ce site a été mis en évidence essentiellement par la méthode des radioéléments ; les volumes de sédiments déplacés étant très réduits. Il semble bien que l'action des courants sur le débit solide soit négligeable comparée à celle due aux houles. Cette dernière est néanmoins plus faible que pour les sites de Carteret et Hatainville.

- Etude de l'évaluation quantitative du transport sédimentaire-Discussion

A partir des activités retrouvées en surface, il a été possible de calculer le bilan des taux de comptage afin de déterminer un bilan quantitatif du mouvement sédimentaire par charriage. Ce bilan

admet une continuité de la distribution du traceur entre deux lignes et ne tient pas compte des zones de piégeages situées sur les flancs abrités des figures sédimentaires. Néanmoins, il donne une idée globale du transport et est, à ce titre, représentatif du mouvement général.

Le mouvement du centre de gravité a été calculé dans les deux directions EW et NS permettant ainsi de déduire, entre deux détecteurs, les déplacements (en mètre/jour). La direction résultante de ce mouvement est NE.

En ce qui concerne l'épaisseur du transport, on considère que tout le traceur est retrouvé et que la différence entre l'activité au jour de la détection et l'activité retrouvée (corrigée de l'effet du seuil) est due soit à un remaniement associé à un enfouissement, soit à un recouvrement.

Les interprétations des données des carottages montrent que l'épaisseur du transport est de 6 cm pour une migration du traceur sur le flanc marin du banc (mouvement du centre de gravité G de 2,43 m/j), et de 30 cm d'épaisseur moyenne lorsqu'il transite sur le sommet du banc (soit un déplacement de G de 0,48 m/j). Le transport solide moyen serait de l'ordre de 0,15 m³ par mètre linéaire et par jour, quelle que soit la période de mesure.

II.3.4.2. Le site de CARTERET (Fig. II.19 : point 2)

La plage de CARTERET occupe une anse de 800 m de longueur limitée à l'WNW par les formations schisteuses du Cap de Carteret et à l'ESE par la digue ouest du port de Carteret, construite pour lutter contre l'ensablement du chenal. Celle-ci a provoqué l'accumulation du sable contre la jetée nord, d'où la création d'un petit massif dunaire situé le long de la partie est de l'anse de Carteret (LCHF, 1981).

L'alimentation principale de la plage a pour origine une dérive littorale NS avec transits sableux depuis la plage d'Hatainville en contournant le Cap de Carteret. Ce transport se produit le long d'un couloir situé entre le bas-estran et la zone infralittorale ; d'où une alimentation de bancs sableux intertidaux, parallèles au rivage et migrant progressivement depuis le Cap de Carteret jusqu'au musoir de la digue.

Le site d'immersion est situé à mi-estran, à 350 m de la digue ouest.

- Etude morphologique

Entre le 10 novembre 1984 et le 2 mai 1985, six relevés topographiques ont été exécutés.

En début d'expérience, le site est formé de trois unités morphologiques distinctes (détection 1) :

- à l'ouest, la terminaison d'un banc sableux (H = 1 m, $\lambda = 150$ m) orienté NNW-SSE avec une pente d'accumulation très marquée (20 %),

- au centre, un chenal avec champ de mégarides,

- à l'est, un autre banc sableux, jusqu'à la digue du port. Celui-ci, plus modeste, subit une ablation due aux activités d'extraction du sable, à une migration du matériel à travers le chenal de CARTERET, vers les zones internes du hâvre ou vers la plage de Barvenille.

La détection 3 (29 novembre 1984) a été réalisée après une tempête exceptionnelle 23-24/11/1984). Le banc a globalement subi une très forte translation vers l'est tout en gardant une topographie générale identique.

Les détections 5 à 7 montrent toujours la progression du banc vers l'est avec une érosion de plus en plus active sur le secteur ouest de la zone.

En conclusion, nous avons un cycle complet entre les processus d'érosion et d'engraissement (dont l'amplitude maximale peut être estimée à 1,25 m) sur la durée d'expérience de six mois.

- Etude de l'évolution spatio-temporelle du traceur

Sept détections ont permis de suivre l'évolution spatio-temporelle du traceur sur le site de Carteret (annexe IV). Le traceur, dans un premier temps, s'étire le long de la crête du banc sableux puis est progressivement piégé sur le flanc terrestre pour ne réapparaître et être repris qu'après le passage du banc.

La confrontation des deux techniques d'étude, morphologie et évolution des traceurs, est très complémentaire sur ce site. Deux couches apparaissent comme indépendantes. Le dépôt n'affecte pas la couche sous-jacente. Le transit des sédiments n'est pas essentiellement dû ici à des phénomènes de charriage, mais à un transport essentiellement en suspension tout comme pour le site d'Hatainville plus au nord. Un transport par charriage aurait remobilisé une partie du radioélément dans la même direction que celle observée à partir des variations topographiques, ce qui n'est pas le cas (FARNOLE, 1986). Le dépôt s'établit donc dans les secteurs de moindre énergie par excès de charge.

- Etude de l'évolution verticale du traceur

Les mesures de distribution verticale du radioélément établissent parfaitement le phénomène de piégeage des sédiments déterminé ci-dessus et permettent de confirmer que l'enfouissement maximum dépasse 80 cm.

- Etude de l'évaluation quantitative du transport sédimentaire - Discussion

Le bilan des taux de comptage s'avère délicat dès lors que l'enfouissement est important, ce qui est réalisé aux détections 4 à 6. Le bruit de fond peut représenter 20 % du compte ! Le volume du transport sédimentaire moyen journalier est égal au volume de sédiment déplacé (épaisseur du transport par mètre linéaire de plage), par la

distance journalière parcourue. La gamme des épaisseurs retenue varie de 15 à 22 cm. La vitesse de transit à la surface du banc est de l'ordre de 2 à 3 mètres par jour. Dès qu'il y a enfouissement du traceur (supérieur à 80 cm) par progression du banc, la vitesse n'est plus que de 0,27 m/j.

Dans ces conditions et par temps calme, le transport solide est compris entre 0,4 et 0,7 m³/m et par jour. En situation de tempête (identique à celle des 23 et 24 novembre 1984, où les vents d'WSW étaient de 15 à 35 m/s), le transport solide a été de 27 m³/m durant deux jours.

Le transit annuel moyen, en direction du havre de Carteret est estimé avec cette technique à 310 m³/m. Pour une largeur d'estran de 300 m, une estimation de 93.000 m³/an peut être établie.

Cette estimation, obtenue à partir des résultats de calcul de bilan de taux de comptage (donc ne concernant que les transports par charriage), appelle une précision ; en effet, nous avons vu que le transport en suspension était prépondérant sur ce site.

Aussi, cette estimation a été comparée à celle obtenue par FARNOLE (1986) et basée sur les calculs de débits solides à partir des durées d'immersion (125 000 m³) pour un coefficient de répétitivité des tempêtes de 2 à 2,5 %. Cette dernière estimation est comparable au volume de sédiments extrait au musoir de la jetée de Carteret. Les travaux du L.C.H.F. donnent des estimations de 75000 m³ (1981).

En conclusion, le site de Carteret, se présente comme relativement abrité des houles de tempête et est, en réalité, un lieu où la concentration des houles à l'ouest de la jetée accroît le niveau d'énergie de la houle sur la plage de Carteret. Le transit littoral instantané est donc ici essentiellement contrôlé par la houle.

II.3.4.3. Le site d'HATAINVILLE (Fig.II.19 : points 3 et 4)

Deux immersions, haut et bas estran, ont été réalisées sur le site d'Hatainville. La largeur de la zone intertidale est d'environ 600 mètres.

- Etude morphologique

L'étude topographique fait ressortir :

. Un transit vers le sud, parallèle au littoral, sur la totalité de l'estran (très marqué entre les détections 2 et 3).

. Aucun indice du transport dans le profil de plage n'est détecté par la morphologie.

Il faut se garder de conclure cependant qu'une absence de modification morphologique sur un secteur implique une absence de mouvement sédimentaire ; d'où l'intérêt d'associer à cette technique, celle des traceurs radioactifs.

- Etude de l'évolution spatio-temporelle du traceur

Dès la détection 2 (cinq jours après l'immersion), on constate une résultante de transport vers le SSE pour le haut estran, sans modification de la position du centre de gravité. Ce transport est dû au courant d'obliquité de la houle.

Le bas estran, quant à lui, accuse un transport opposé dû à l'action des courants.

La détection 3 (voir annexe V) intervient juste après une forte tempête d'WSW étalée sur 8 jours pendant une marée de vives-eau. Les transits haut et bas estrans sont alors orientés vers le sud parallèlement au rivage.

Les détections ultérieures se traduisent par une dispersion intensive du traceur ne permettant plus de distinguer les nuages propres des haut et bas estrans.

En conclusion :

- l'action des houles obliques de tempête représente le vecteur principal de transit des sédiments (dérive littorale) ; le transit vers le nord dû aux courants est en effet inversé en période de tempête pour le bas estran, bien qu'étant en vive eau,

- tout comme pour le site de Carteret vu précédemment, le mode de transport en suspension des sables, pour le bas estran, est bien mis en évidence par la dispersion très grande du traceur constatée dès la détection 3, d'où la présence d'une multitude de cellules indépendantes, de faible radioactivité ne permettant plus la localisation du centre de gravité de la tache (voir annexe V). Par contre, le transport par charriage sur le fond, observé lors des premières détections (sous l'action des courants de marée), s'effectuait tout en conservant l'intégralité du nuage (FARNOLE, 1986).

- Etude de l'évolution verticale du traceur

Sur les six mois d'étude, quatre séries de mesures de l'évolution verticale ont été effectuées. Haut et bas estrans ont évolués de la même façon avec une dérive vers le nord du traceur suivi de son enfouissement (de 40 à 80 cm sous du sable inactif) pour la durée de l'étude.

La période de tempête a permis une très grande dispersion des sédiments en transit vers le Cap de Carteret, pour la zone sud de la tache.

- Etude de l'évaluation quantitative du transport sédimentaire
- discussion

Le bilan des taux de comptage a été établi jusqu'à la cinquième détection ; au delà, la dispersion est trop grande et la radioactivité mesurée est très proche de la radioactivité naturelle de la zone.

Les positions des deux centres de gravité sont le reflet des déplacements constatés ci-dessus. Pour le haut estran, un déplacement moyen de 1,9 m/j vers le sud est calculé, sur toute la période ; les fluctuations du centre de gravité dans le profil de plage sont relativement limitées.

Les volumes de sédiment déplacé sur les haut et bas estrans, par beau temps et en période de tempête sont résumés dans le tableau ci-dessous :

	BAS ESTRAN			HAUT ESTRAN		
	Vitesse de déplacement (en m/j)	Epaisseur de transport (en cm)	Volume journalier déplacé (en m ³ /m/j)	Vitesse de déplacement (en m/j)	Epaisseur de transport (en cm)	Volume journalier déplacé (en m ³ /m/j)
Situation de beau temps	0,6	3	0,02	1,4	17	0,24
Situation de tempête	-	17	8 pour la durée de la tempête	-	50	0,3 pour la durée de la tempête

En conclusion, on remarque donc, pour ce site d'Hatainville, soumis à la double action des courants et des houles, que ce sont les situations de tempêtes qui engendrent les érosions de bas-estran et contribuent le plus au transit nord-sud des sédiments. Ce transport se produit alors essentiellement en suspension tandis que le charriage représente le mode principal de transit des sédiments sous l'action des courants en situation de beau temps.

II.3.4.4. Le site de SCIOTOT (Fig. II.20)

Située entre le cap de Flamanville au nord et la pointe du Rozel au sud, l'anse de Sciotot forme sur quatre kilomètres, une entité directement soumise aux houles océaniques. En ce lieu, l'érosion varie de 0,3 à 0,9 mètre par an. La zone intertidale est généralement dépourvue de figures sédimentaires.

- Etude morphologique

Six couvertures topographiques ont été levées au cours de la période d'étude. Les deux sites d'immersion de traceur (haut et bas estran) ont fait l'objet d'une couverture complète de la plage depuis le sommet de la zone de jet de rive jusqu'à la limite des basses mers.

La plage accuse un profil de beau temps au début de l'expérience et passe à un profil de tempête (après le 23 novembre 1984) puis à une alternance pour atteindre un profil identique au profil initial en mai 1985.

- Etude de l'évolution spatio-temporelle du traceur

Les principaux relevés interprétatifs des sept détections du traceur sont donnés en annexe VI.

Avant la situation de tempête (détection 2), il y a étirement de 130 mètres de la tache bas estran vers le nord. Pour le haut estran, le nuage prend une direction NW, vers le bas estran, associé à un étirement vers le haut de plage beaucoup moins marqué.

Après la tempête du 23-24 novembre, détection 3, la zone bas estran montre une tache plus restreinte (sable inactif en provenance du SE par érosion du haut estran). Par contre, pour le haut estran, on observe une extension importante de la tache, sous l'effet cumulé des houles et courants, vers le NW et sur 500 mètres. En fait, l'évolution simultanée des deux taches met en évidence le processus d'un estran soumis à une forte houle.

Les taches évoluent ensuite légèrement vers le NE puis sont en voie de disparition (détection 6). Trois tempêtes successives reprennent les sédiments en direction du bas estran et, à la détection 7 du 3 mai 1985, le traceur n'est pratiquement plus détectable en surface, hormis deux taches reliques.

En conclusion, selon les conditions météorologiques et hydrodynamiques, la plage évolue ainsi :

- en situation de temps calme, les sédiments se déplacent vers le nord sous l'action des courants de marée,

- en situation de tempête, les sédiments sont entraînés vers le bas estran, au NW par l'action conjuguée des houles et des courants,

- dans les épisodes de post-tempête, le profil de plage se reconstitue et les sédiments se déplacent vers le NE.

- A noter que durant les 177 jours de l'étude, aucun transport vers le sud ne s'est produit.

- Etude de l'évolution verticale du traceur

Les coupes longitudinales (S-N) et transversales (W-E), ont permis de mettre en évidence que :

- le traceur se présente en couches superposées et est le plus enfoui à 10 m au nord et à l'est du point d'immersion,

- il n'y a pas d'extension selon l'axe N-S (longitudinal),

- le traceur a progressé vers l'est sur le profil transversal.

- Etude de l'évaluation quantitative du transport sédimentaire - Discussion

Soumis préférentiellement à l'action des houles, les deux marquages mettent en évidence les interactions existant entre les stocks sédimentaires des haut et bas estrans.

Le tableau ci-dessous résume les principales conclusions concernant l'étude du site de Sciotos :

	BAS ESTRAN		HAUT ESTRAN	
	Volume journalier déplacé vers le nord (en m ³ /m/j)	Echanges dans le profil haut estran-bas estran	Volume journalier déplacé vers le nord (en m ³ /m/j)	Echanges dans le profil haut estran-bas estran
Situation de beau temps	0,05	-	0,05	Haut Estran jusqu'à 0,06 m ³ /m/j
Situation de tempête	0,08	Bas estran jusqu'à 0,5 m ³ /m et par jour de tempête	2,3	-

Outre les mouvements oscillatoires dans le profil, se surimpose un transport S-N sous l'influence des courants de marée pour le bas estran ; en effet, ce transfert ne varie que de 0,05 à 0,08 m³ par mètre et par jour, d'une situation de beau temps à une situation de tempête.

Pour le haut estran, ce mouvement est contrôlé par les houles et se produit entre la zone de déferlement et celle du jet de rive de pleine mer. Il passe de 0,05 à 2,3 m³ par mètre et par jour en période de tempête.

II.3.5. Conclusions de l'étude

Cette étude a permis non seulement d'observer les transports sédimentaires à la côte sous l'action cumulée des houles et des courants, mais aussi de tenter une quantification des transits :

- sur des sites différents de par leur exposition vis à vis des actions hydrodynamiques,

- dans des conditions météorologiques diverses (périodes de tempêtes hivernales à période de beau temps).

La figure II.21 fait la synthèse des diverses directions de mouvements sédimentaires en fonction des modes de transports mis en évidence par les expériences de traceurs radioactifs (sites de Barneville, Carteret, Hatainville).

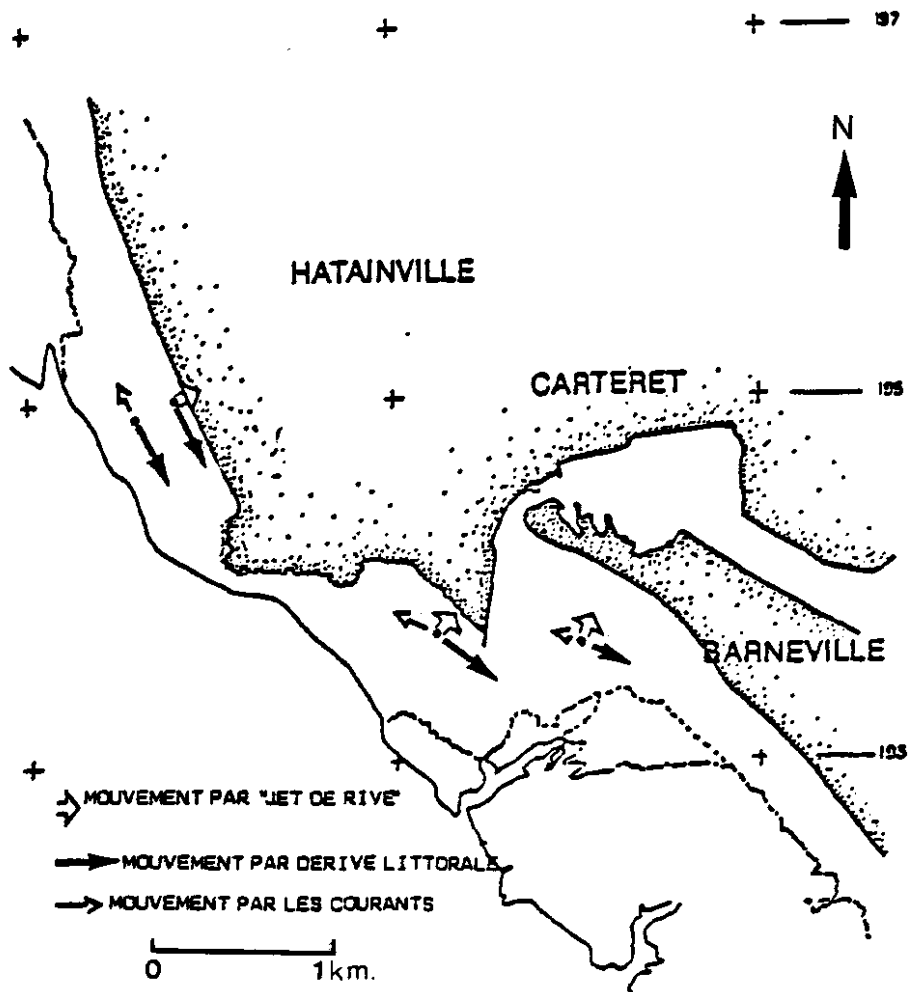


Fig. II.21 : Synthèse des divers transits sédimentaires

Ce type d'étude, basé sur le couplage de deux techniques : variations morphologiques des estrans et suivi de l'évolution par la méthode des traceurs radioactifs, sur une durée aussi importante (6 mois), constitue une première en zone intertidale. Plus particulièrement à Carteret, les sables inactifs se déplacent par bancs, venant recouvrir les traceurs. Il est clair que, sur un tel site, seule l'utilisation des deux méthodes pouvait permettre un bilan quantitatif de transit, les traceurs étant utilisés comme "repère fixe". La technique de mesures à trois dimensions est alors employée afin de prendre les caractéristiques du banc en transit au cours du temps, au moyen du théodolite.

Cela nous amène à quelques réflexions concernant la méthodologie et la technologie à mettre en oeuvre, afin d'observer et quantifier les transports solides en zone intertidale. La technique des traceurs radioactifs touche sa limite lorsque le transit est essentiellement effectué en suspension ; la méthode du bilan des taux de comptage n'étant applicable que pour un transit par charriage des sédiments. Ces problèmes ont été exposés lors des interprétations des sites d'Hatainville et Carteret.

Un autre problème concerne l'enfouissement du traceur : 8,5 cm de sables inactifs entraînent une décroissance en surface de 73 % et donc font passer l'activité lue de 30 cps à moins de 8 cps (soit le bruit de fond). D'où la nécessité, lors des détectations d'adjoindre des carottages pour l'évolution verticale du traceur.

Enfin, et cette étude l'a démontré, seules les expériences de ce type menées sur une grande période sont significatives. Elles doivent être couplées avec les mesures de paramètres hydrauliques. Dans le cas présent, la corrélation entre les mesures de houles et courants d'une part, et évolution des traceurs d'autre part, n'a pas donné toutes les informations que l'on pouvait en attendre ; les mesures hydrodynamiques étaient trop ponctuelles par rapport à l'espace temps entre deux détectations du traceur.

Néanmoins l'analyse des résultats acquis par une telle expérience prouve que ces méthodes sont très prometteuses et même si elles ne permettent pas d'apprécier le transit global le long de la côte ouest du Cotentin, elles apportent une connaissance sur l'évaluation des transits en des points "clés" du littoral.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- AUFFRET J.P., GERMAIN P., GUEGUENIAT P., LEMOSQUET Y., 1971. Etude expérimentale de la fixation du Caesium 137 par certains sédiments de la Manche. Cahiers Océanographiques, XXIII, 10 (décembre 1971) p. : 935-955.
- AUFFRET J.P., WALKER P., D'OZOUVILLE L. 1984. Le sonar à balayage latéral et ses applications à l'étude des transports sédimentaires en Manche. XVIIIe Journées de l'hydraulique. Soc. Hydrotech. de France I,14, p. 1-8. Marseille - Sept. 1984.
- BERNE S., AUGUSTIN J.M., BRAUD F., CHENE G., WALKER P. 1986. Cartographie et interprétation de la dynamique sédimentaire des plates formes continentales : améliorations de la technique d'observation par sonar latéral. Bull. Soc. géol. France, 1986, (8), t II, n° 3 (sous presse).
- BONNEFILLE R. 1976. Cours d'hydraulique maritime - Masson. 159 p, 159 fig.
- CAVANIE A., EZRATY R., GOUILLOU J.P. 1982. Tidal current modulations of wave directional spectra parameters measured with a pitch and roll buoy. West of Ustrant in winter. Proc. First Int. Conf. of Meteorology and Air/Sea Interaction of the Coastal Zone. A.M.S. Edit, 5, (6), p : 123-128.
- COURTOIS G. 1964. Possibilité d'emploi d'un nombre limité de grains radioactifs dans les études quantitatives de mouvements de sédiments. Inter. Jour. Applied Rad. in Iso. (15).
- COURTOIS G., HOURS R., 1965. Proposition concernant les conditions particulières d'emploi des radio-isotopes pour étudier les mouvements des sédiments. Enrisotop. Cah. Inf., 8, (29), p. 441-480.
- COURTOIS G., SAUZAY G. 1966. Count rate balance methods using radioactive tracers. Radio-isotopes in Hydrology Symposium, Tokyo.
- CREVEL L., 1983. Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire dans la partie nord-orientale de la baie de Seine. Thèse de 3ème cycle. Univ. de Caen, 173 p - 1983.
- CRICKMORE M.J., LEAN G.H. 1962. The measurement of sand transport by the time integration method with radioactive tracers. Proc. Royal Soc. of London, série A (270), 1340, p. 27-47.
- CRICKMORE M.J., LEAN G.H. 1962. The measurement of sand transport by means of radioactive tracers. Proc. Royal Soc. of London, Serie A (266).

- CRICKMORE M.J., LEAN G.H. 1963. Methods for measuring sand transport using radioactive tracers. Radio-isotopes in Hydrology. Symposium, Tokyo.
- E.N.S.M. 1986. Dépouillements des mesures physiques houles, courants, marées. Sites de Carteret, Sciotot, Hatainville (Ouest Cotentin). Y. RIOU commande IFREMER DERO/EL/ENSM Lab. de Génie Civil. NANTES.
- FARNOLE P. 1986. Morphogenèse et dynamique sédimentaire sur le littoral de la côte ouest du Cotentin. Thèse de 3ème cycle. Université Paris Sud Orsay. 130 pages. Février 1986.
- FETTER-TURTAUD N. 1981. Litages et rythmes de la sédimentation en domaine estuarien, sur les côtes de la Manche (Baie du Mt. Saint Michel, estuaire de la Sienne, Havre de la Vanlée, Baie de Morlaix). Thèse de 3ème cycle - Université de Paris Sud-Orsay. 188 pages + 5 pl. fotogr. Juin 1981.
- GOUGENHEIM A. 1953. Sur les fréquences des coefficients de marée. COEC, n° 3, 1953, p. 119-133.
- GUARY J.C., MARTIN J.M., THOMAS A.J. 1984. Industrie nucléaire et radioactivité de l'environnement. Le CNRS et la radioactivité artificielle. Mars 1984, p. 48-52.
- GUEGUENIAT P. 1975. Comportement physico-chimique du ruthénium de fission dans le milieu marin. Thèse Université Louis Pasteur, Strasbourg et rapport C.E.A. /R.4644, 1975, 205 p.
- GUEGUENIAT P., AUFFRET J.P., BARON Y. 1979. Evolution de la radioactivité artificielle gamma dans les sédiments littoraux de la Manche pendant les années 1976, 1977, 1978. Oceanologica Acta, 2, (2), p. 165-180.
- GUEGUENIAT P., AUFFRET J.P. 1981. Etude des transferts des radionucléides artificiels dans les sédiments de la baie du Mont Saint-Michel. Oceanio, Vol. 7, Fasc. 3, (1981), p. 295-308.
- GUEGUENIAT P., GANDON R., BARON Y., AUFFRET J.P. 1985. Discussion sur l'utilisation du ^{125}Sb et du ^{144}Ce comme éléments marqueurs des déplacements des masses d'eau et des particules en Manche. Colloque Baie de Seine. CNRS - Université de Caen, avril 1985. p. 151 - 158.
- LARSONNEUR C., 1977. La cartographie des dépôts meubles sur le plateau continental français : méthode mise au point et utilisée en Manche. J. Rech. Océanogr. 2(2) : 33-39.
- LARSONNEUR C. et WALKER P. 1982. Le Golfe Normand-Breton : synthèse sédimentologique - Université de Caen, Laboratoire de Géologie Marine. Contrat CNEOX 81/6646 - 73 p., 27 fig.
- LARSONNEUR C. et WALKER P. 1986. Etude de la sédimentation fine et des radionucléides artificiels dans le Golfe Normano-Breton. Contrat CNEOX 83/7161 (sous presse).

- LARSONNEUR C. et WALKER P. 1986. Contribution à la connaissance de la dynamique sédimentaire dans le Golfe par exploration des fonds au sonar latéral. Contrat CENXO 83/7557 (sous presse).
- L.C.H.F. 1981. Catalogue sédimentologique des côtes françaises, tome 3. De la baie de Seine à la baie du Mont Saint-Michel. Min. des Transports. Dir. des Ports et de la Nav. Mar-Serv. Cent. Technique.
- L.N.H. 1961. Modèle réduit des Iles Chausey. Rapport n° 3 : les conditions naturelles du golfe de St Malo. Les courants de marée.
- LONG B. 1986. Transport sédimentaire des zones intertidales ; Plages de Carteret, Barneville, Hatainville et Sciottot. Contrat IFREMER/CEA-SAR 84/7472 mars 1986. 154 pages + annexes.
- MIGNIOT C., BOULOC J. 1981. Erosion et sédimentation en mer et en rivière in FILLIAT G. "La pratique des sols et fondations", éditions du Moniteur p. 629-731.
- RITCHIE J.C., Mc HENRY J.R., GILL A.C. 1973. Dating recent reservoir sediments. Limnol. and Oceanogr., V.18 (2), mars 1973, p. 254-263.
- ROBBE D., MARCHANDISE P., THOMAS A.J. 1983. Détermination de l'origine des pollutions métalliques par datation des carottes de sédiments-Bull. Liaison L.P.C., 127, p. 81.92.
- SAUZAY G. 1968. Méthode du bilan des taux de comptage d'indicateurs radioactifs pour la détermination du débit de charriage des lits sableux. Thèse doc. ing., Toulouse, 162 p.
- SOGREAH 1973. Côte Ouest du Cotentin. Etude de l'évolution du littoral. Rapport pour la D.D.E de la Manche.
- TOLA F. 1982. L'emploi des traceurs radioactifs en sédimentologie dynamique. Note CEA.N.2261, 78 p.
- VASLET D., LARSONNEUR C. et AUFFRET J.P. 1979. Carte des sédiments superficiels de la Manche au 1/500.000 BRGM/CNEXO.

ANNEXES

THEME I : 2 ÈME PARTIE

SÉDIMENTOLOGIE

- ANNEXE DU CHAPITRE II, 2
- ANNEXES DU CHAPITRE II, 3 (I A VI)

ANNEXE

du Chapitre II.2

ESTIMATION DU TRANSPORT SOLIDE (CHARRIAGE + SUSPENSION) RESIDUEL -

MAREE DE VIVE EAU (COEF.92)

(d'après ORBI)



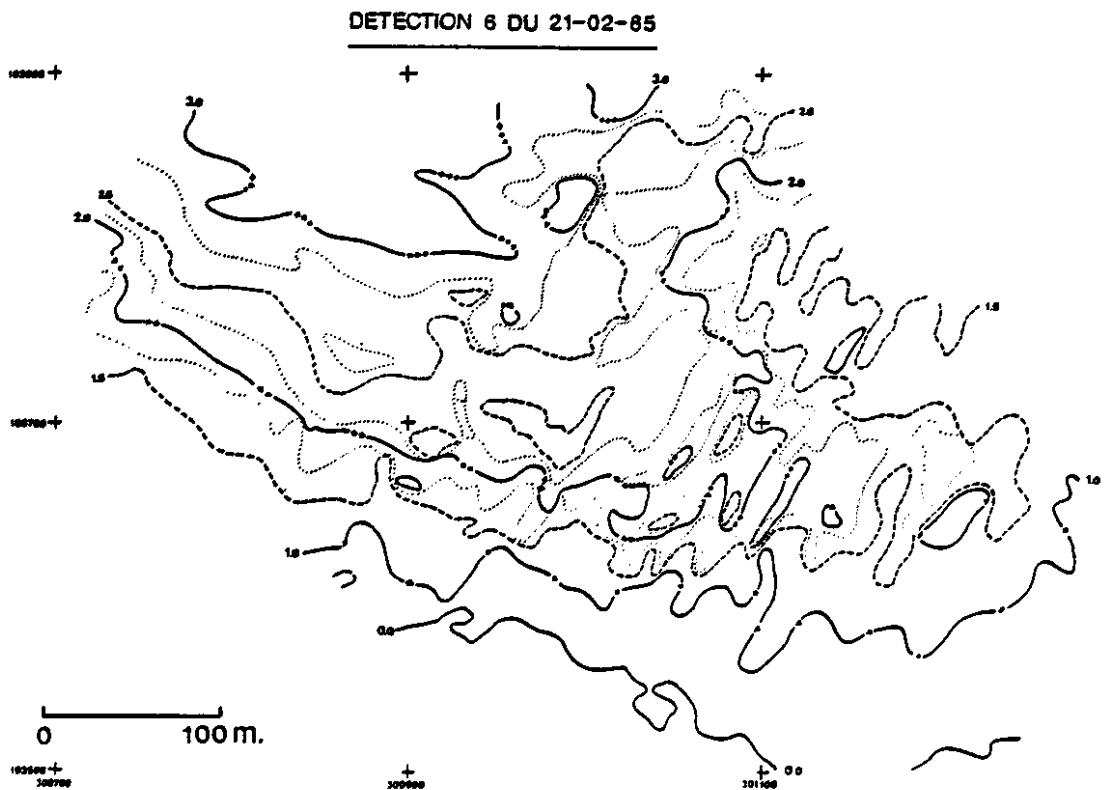
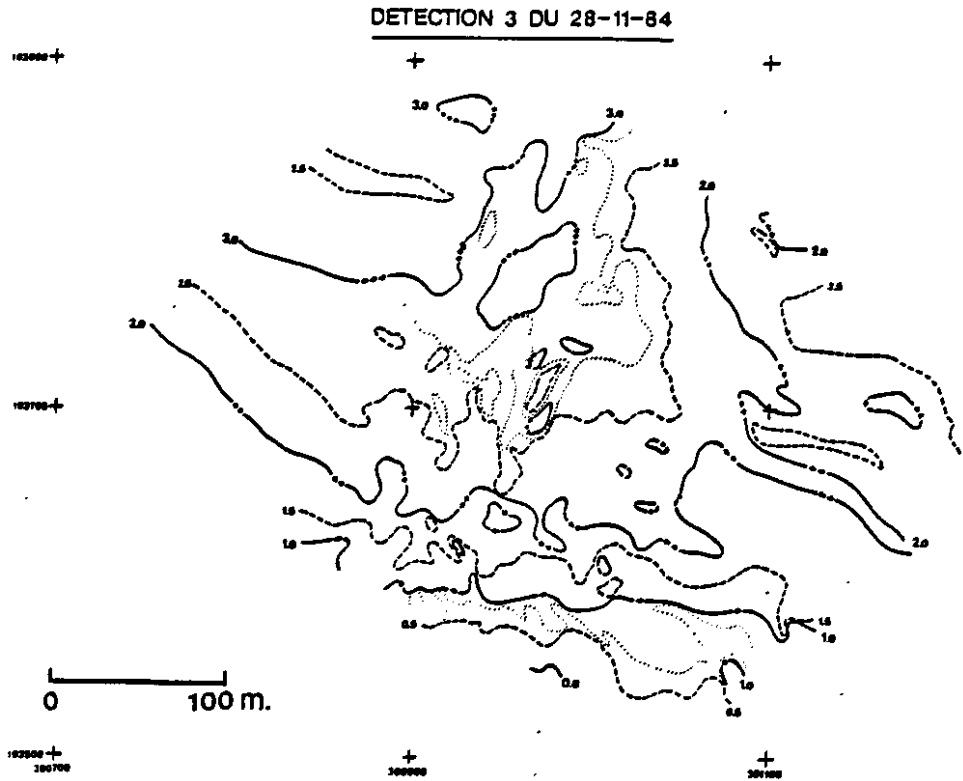
ANNEXES DU CHAPITRE II. 3

(ANNEXES I A VI)

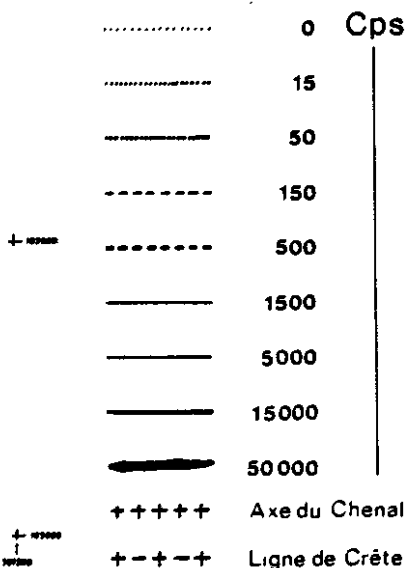
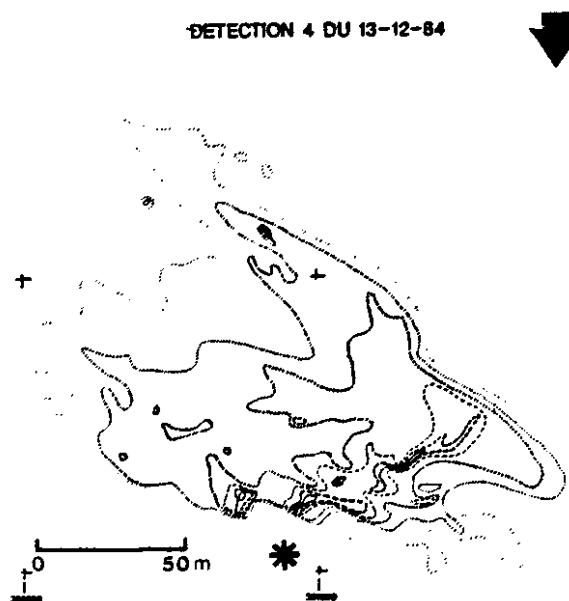
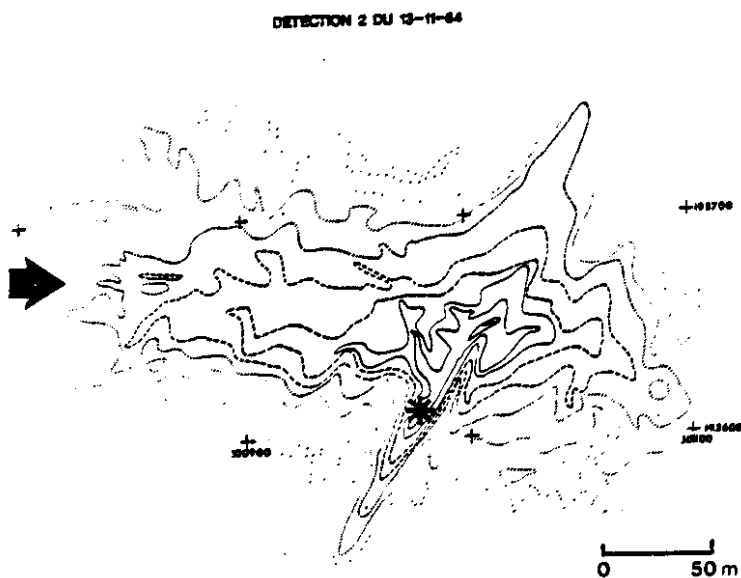
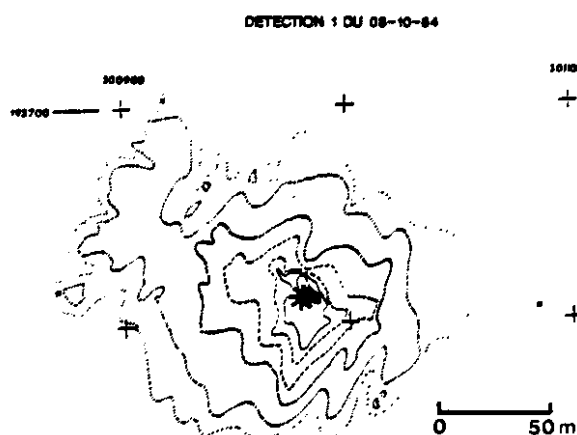
.....

ANNEXE I :

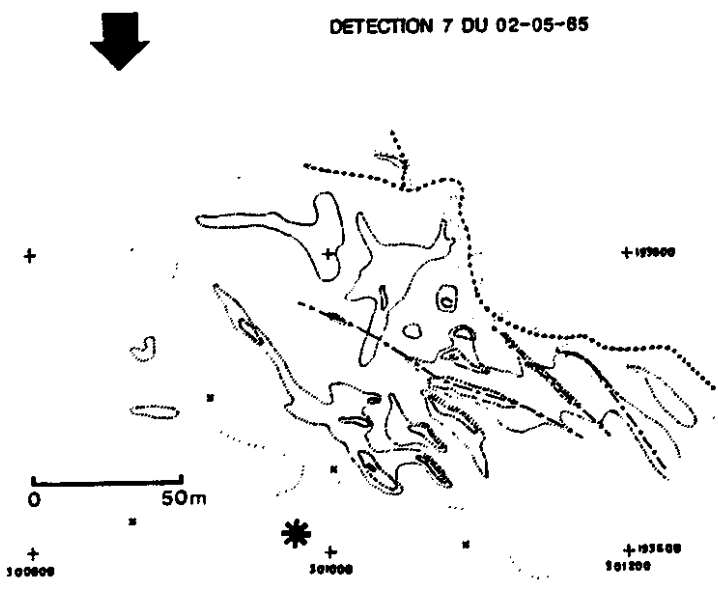
ESTRAN BARNEVILLE : EVOLUTION DE LA TOPOGRAPHIE (en mètres)



ANNEXE II : EVOLUTION DU TRACEUR RADIOACTIF A BARNEVILLE du 08-10-84 au 02-05-85

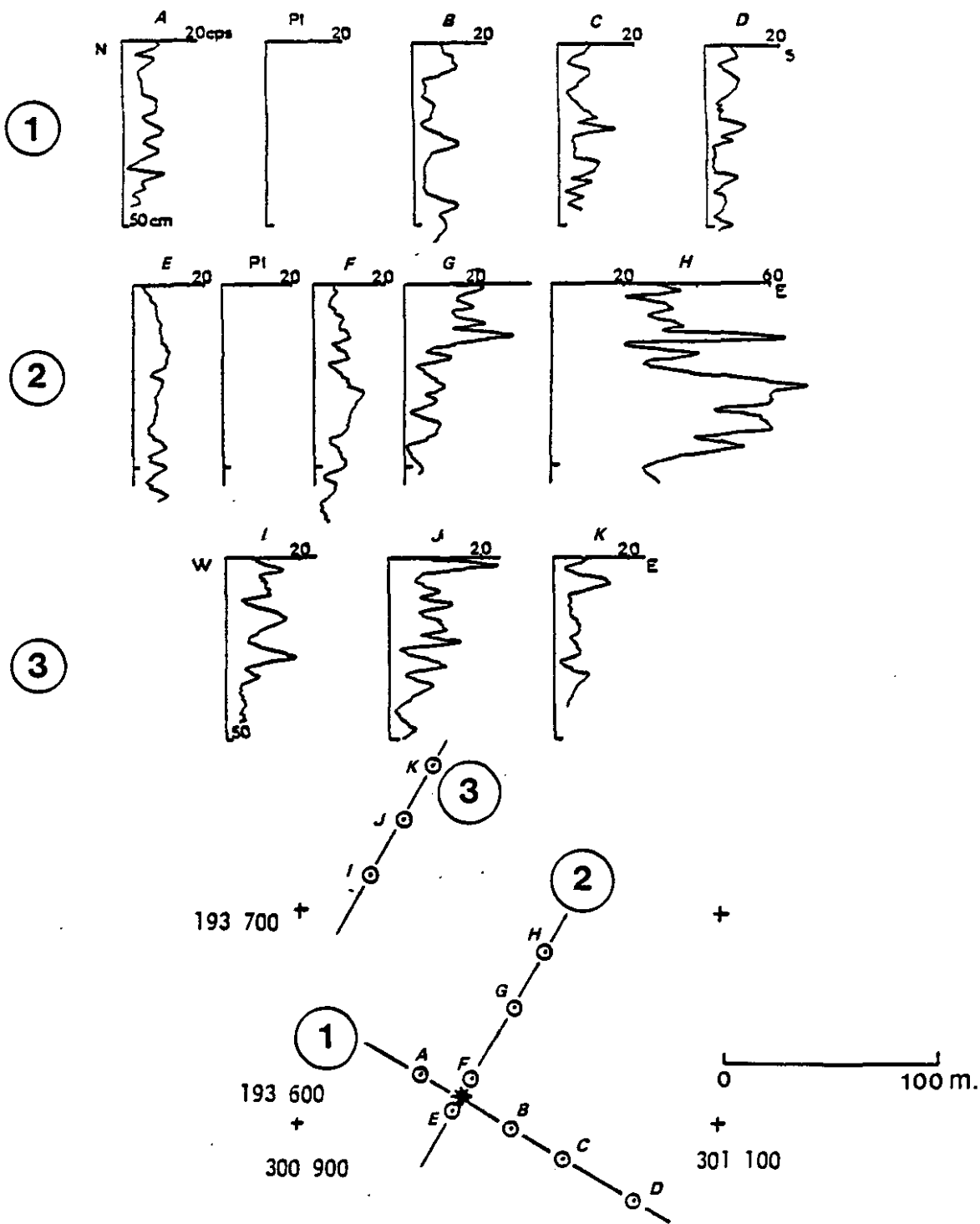


* POINT D'IMMERSION
DU TRACEUR RADIOACTIF



ANNEXE III : EVOLUTION VERTICALE DU TRACEUR A BARNEVILLE

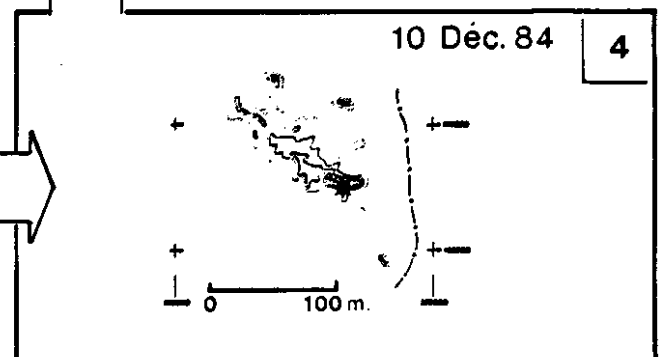
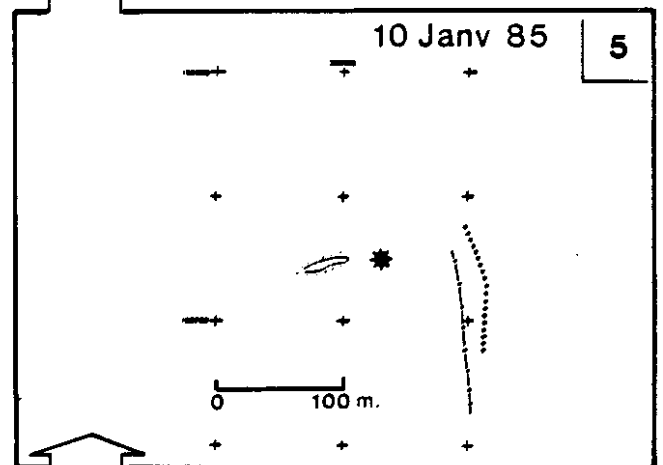
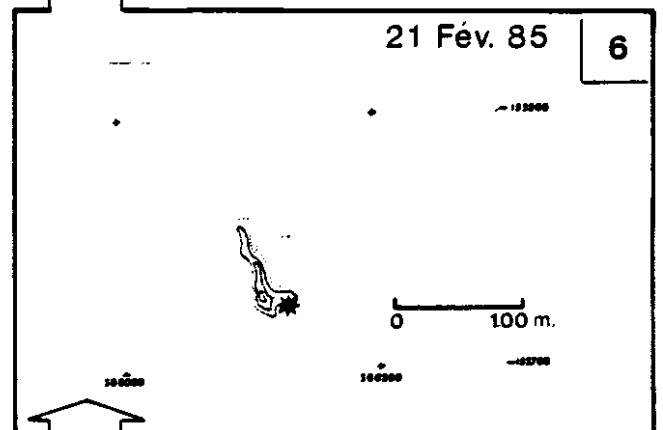
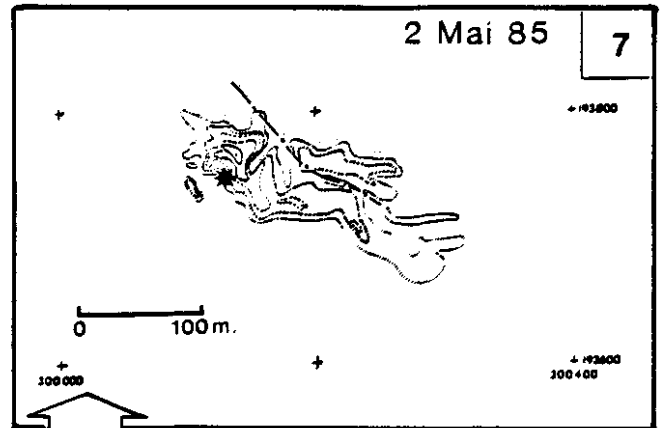
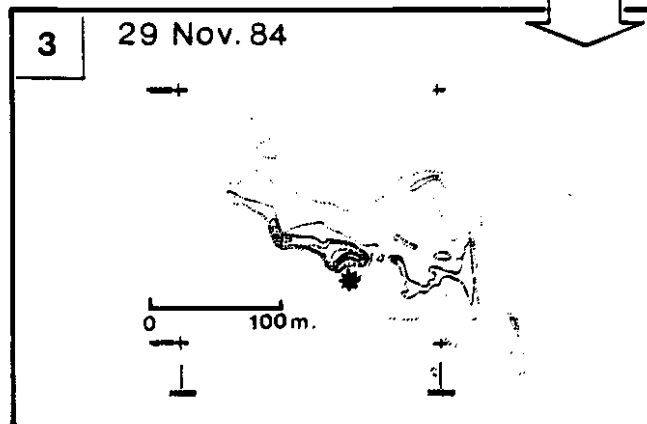
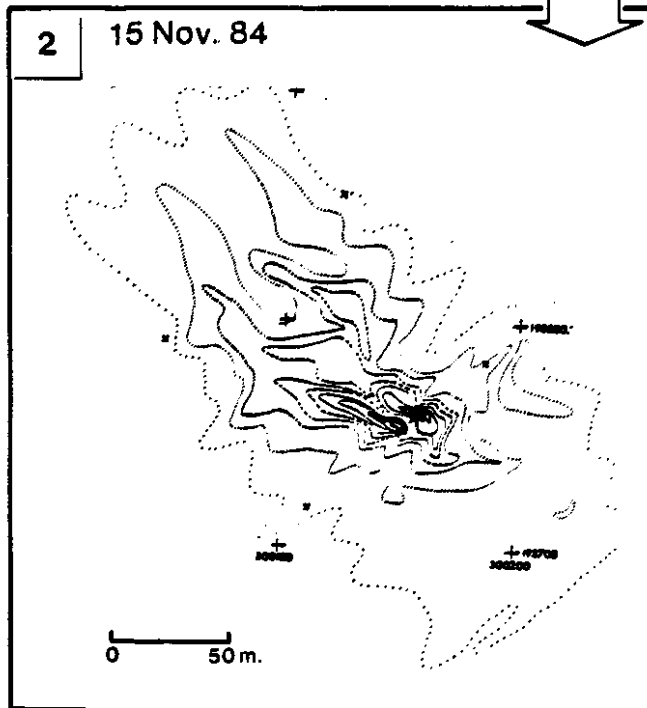
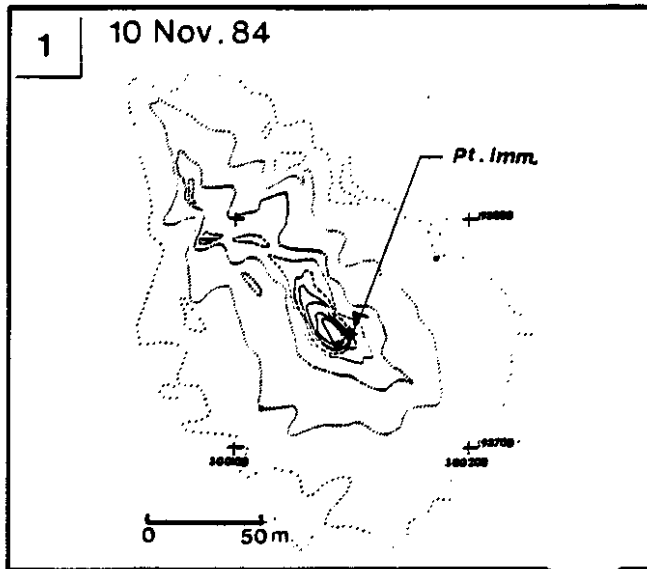
DETECTION 4 (13-12-1984)



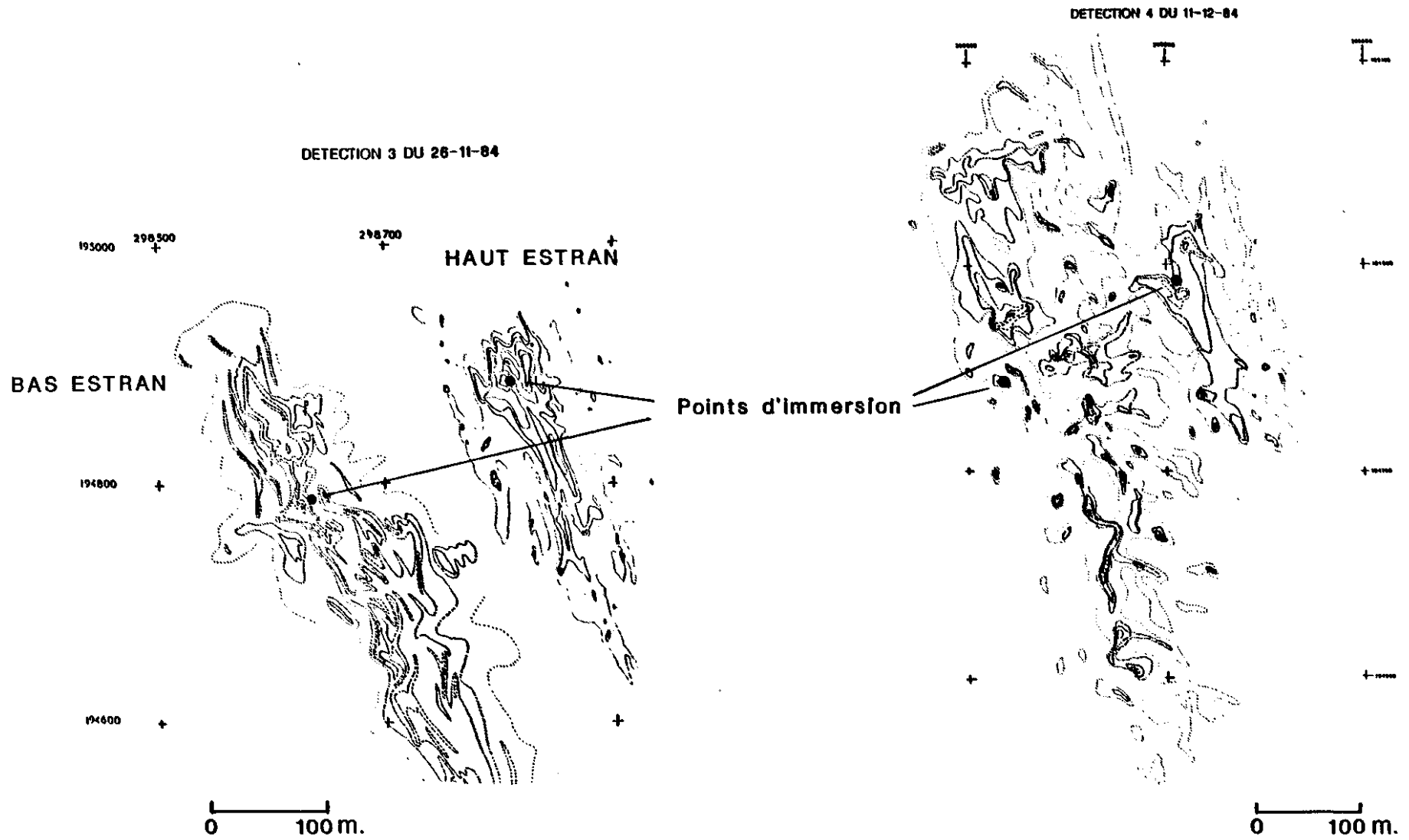
* : POINT D'IMMERSION DU TRACEUR

ANNEXE IV :

EVOLUTION DES TRACEURS RADIOACTIFS A CARTERET du 10.11.84 au 2.5.85

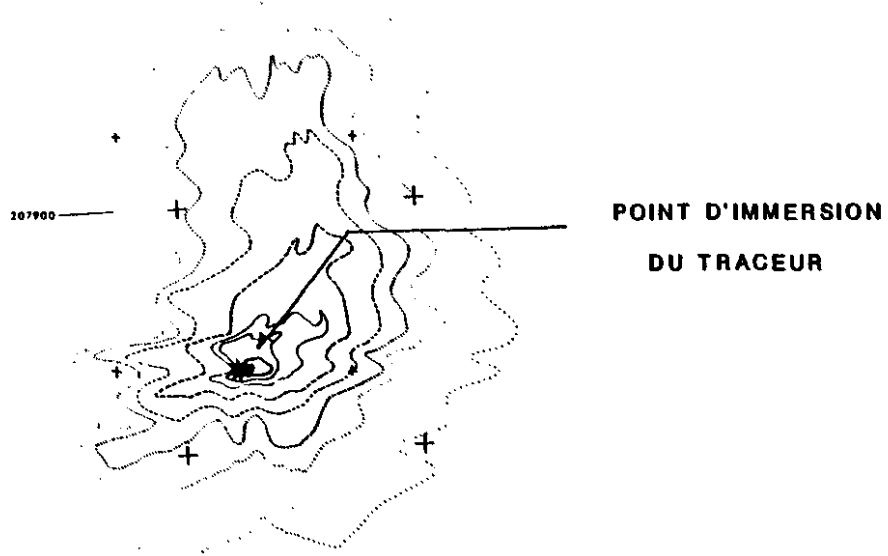


ANNEXE V : EVOLUTION DU TRACEUR RADIOACTIF A HATAINVILLE

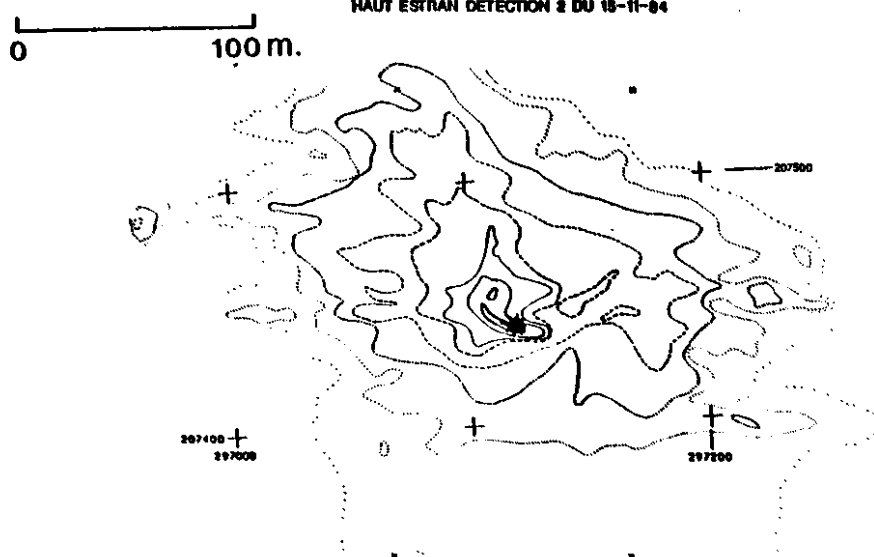


ANNEXE VI : EVOLUTION DU TRACEUR RADIOACTIF A SCIOTOT.

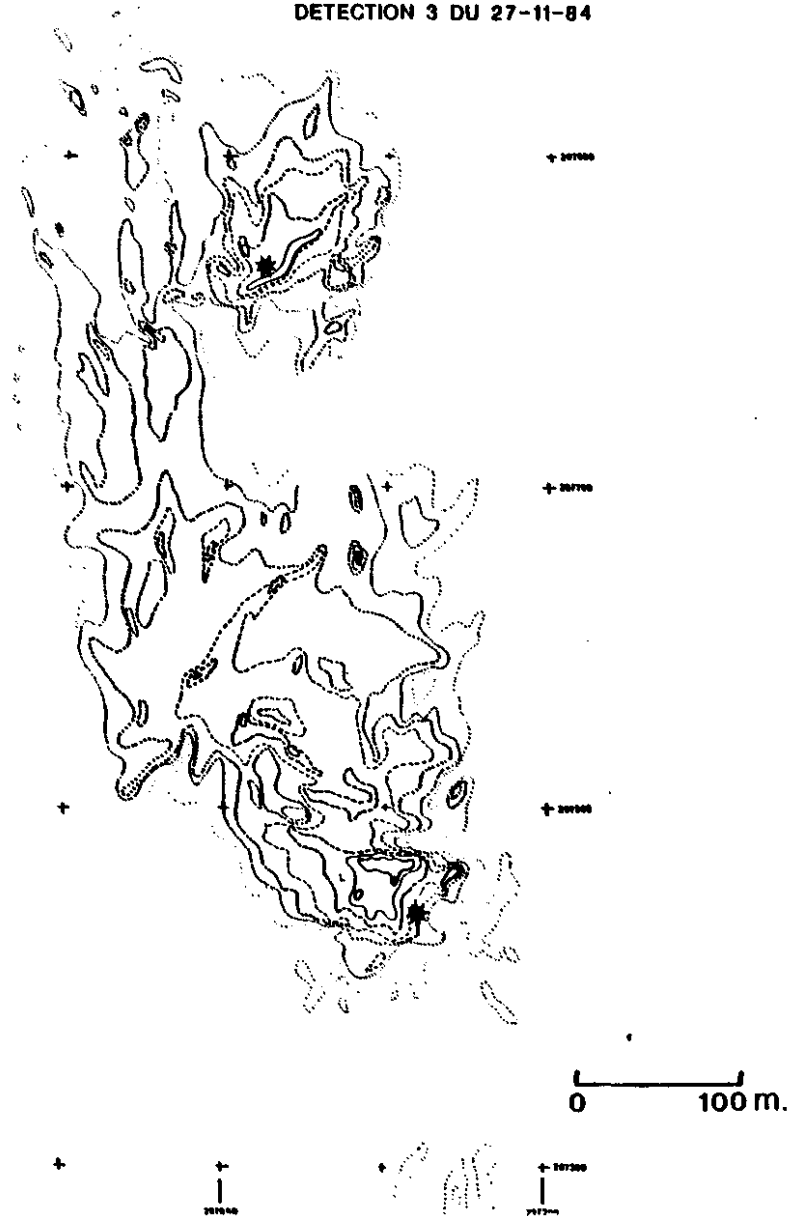
BAS ESTRAN DETECTION 2 DU 15-11-84



HAUT ESTRAN DETECTION 2 DU 15-11-84

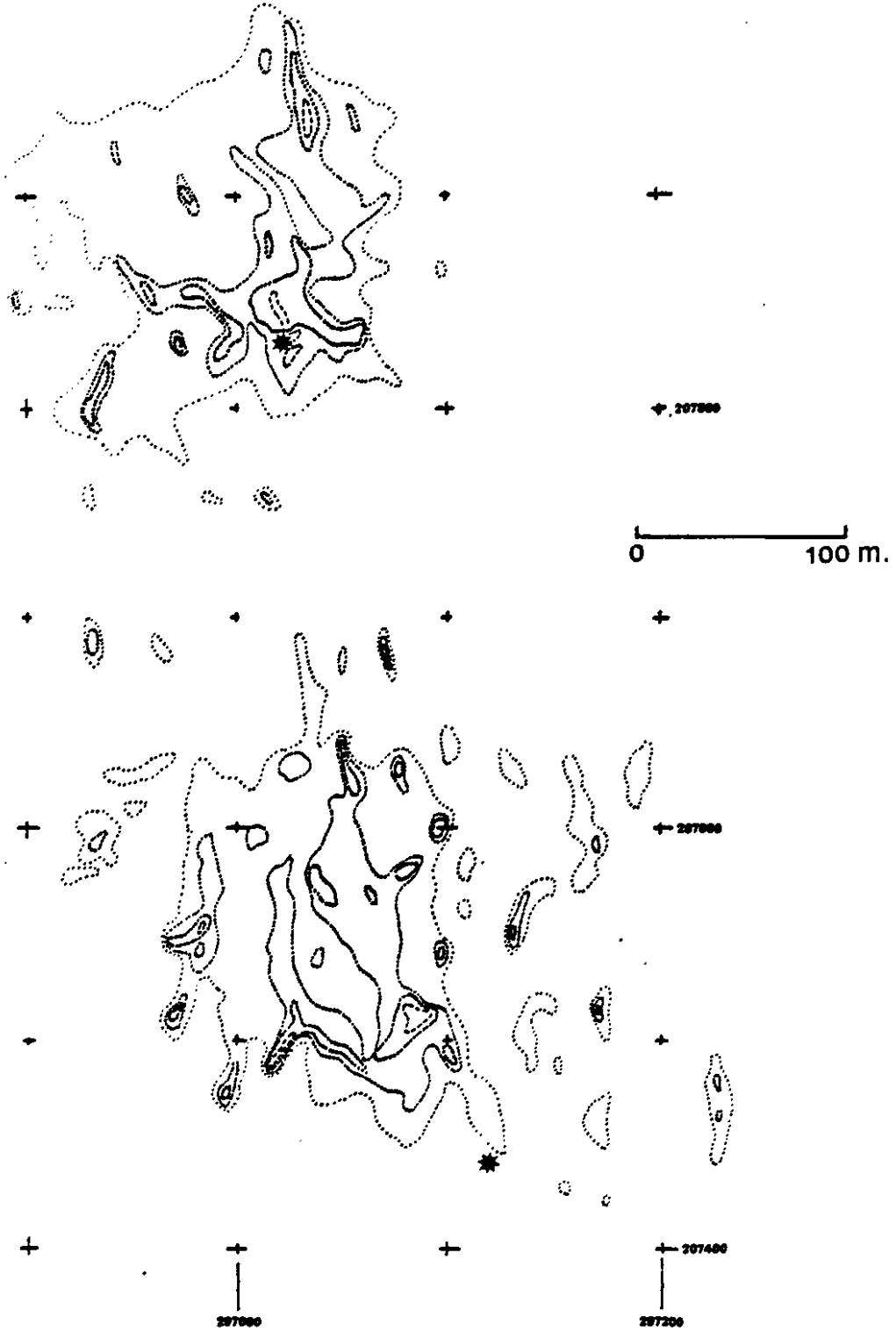


DETECTION 3 DU 27-11-84



ANNEXE VI : Suite

SCIOTOT DETECTION 6 DU 19-02-85



ANNEXES

PREMIERE PARTIE

HYDRODYNAMIQUE

- ANNEXE 1 - Mesures de trajectoires par suivi "Argos"
- ANNEXE 2 - Temps d'exondation de l'estran en divers points du golfe
- ANNEXE 3 - Champs horaires de courants de marée simulés
- ANNEXE 4 - Mesures de courant filtrées
- ANNEXE 5 - Roses d'agitation en 15 sites du golfe.

ANNEXE 1

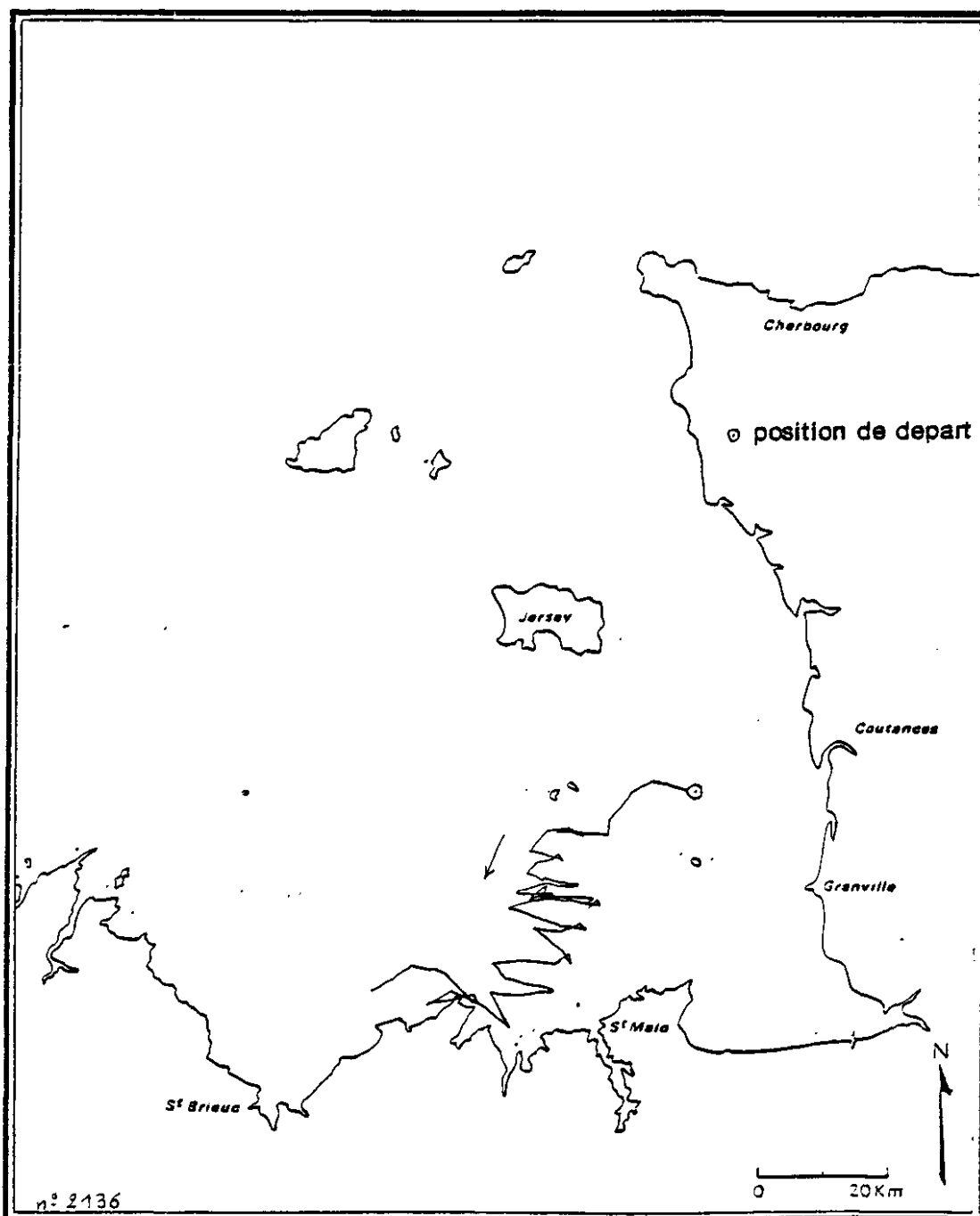
MESURES DE TRAJECTOIRES PAR SUIVI "ARGOS"

N° de la bouée	Date de la mise à l'eau	dimension et Nature de drogue	récupération par et date	position du lacher		profondeur	périodes dans l'eau
				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 effectifs en mai

TRAJECTOIRE D'UN FLOTTEUR SUIVI PAR SYSTEME 'ARGOS'

FLOTTEUR SANS ANCRE FLOTTANTE

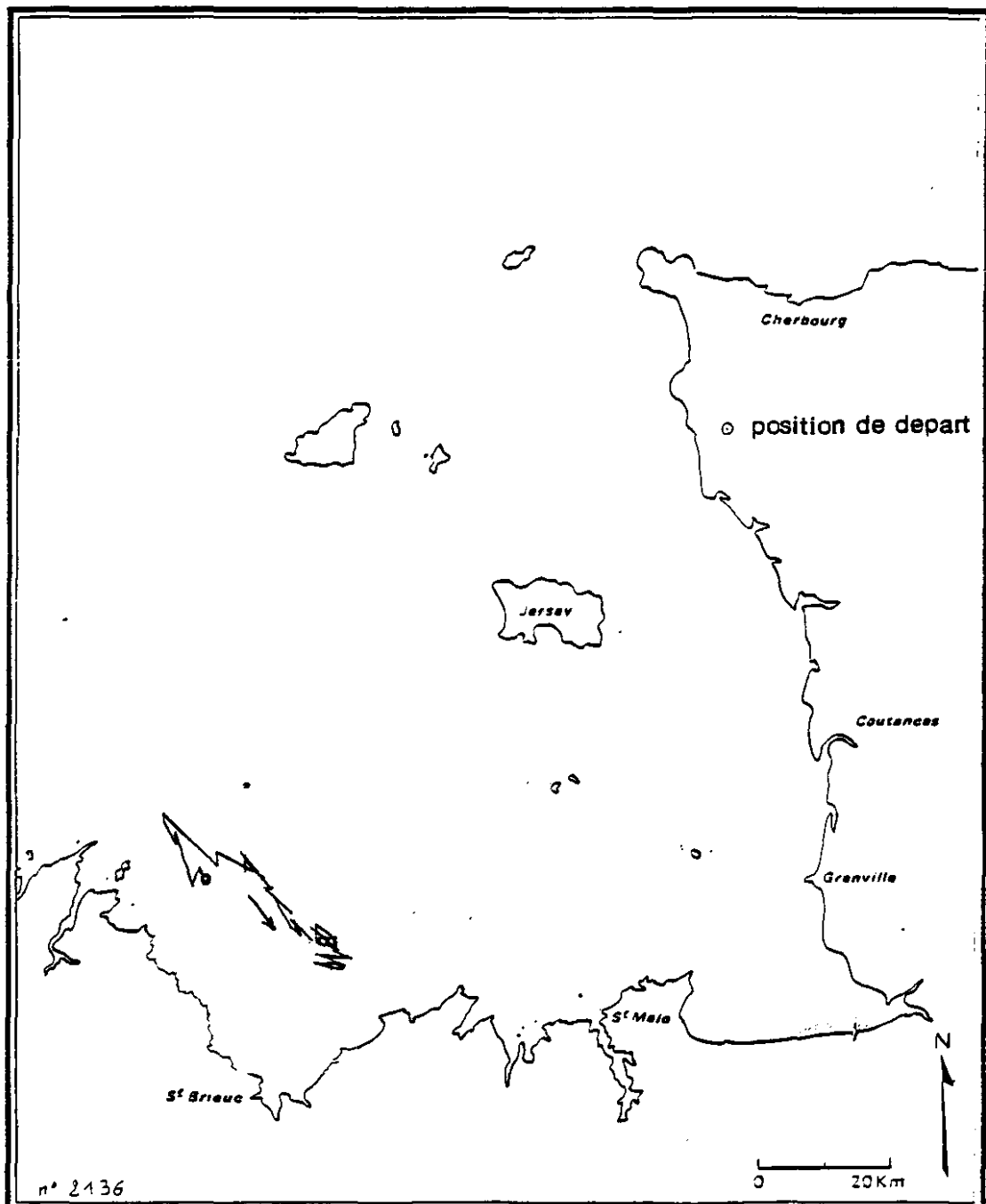
DU 7 AU 14 MAI 1984



TRAJECTOIRE D'UN FLOTTEUR SUIVI PAR SYSTEME 'ARGOS'

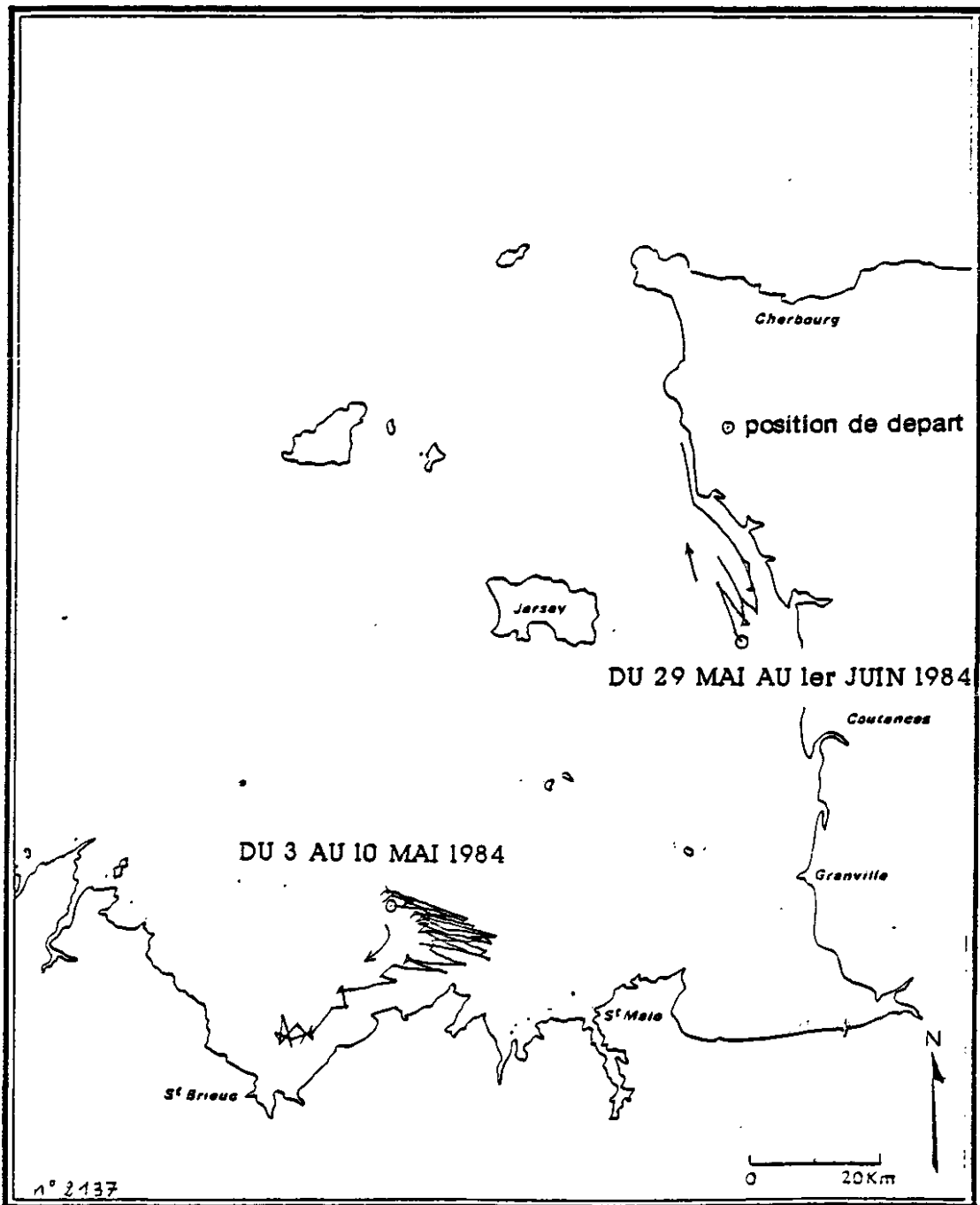
ancre flottante en surface

MAI 1984



TRAJECTOIRE D'UN FLOTTEUR SUIVI PAR SYSTEME 'ARGOS'

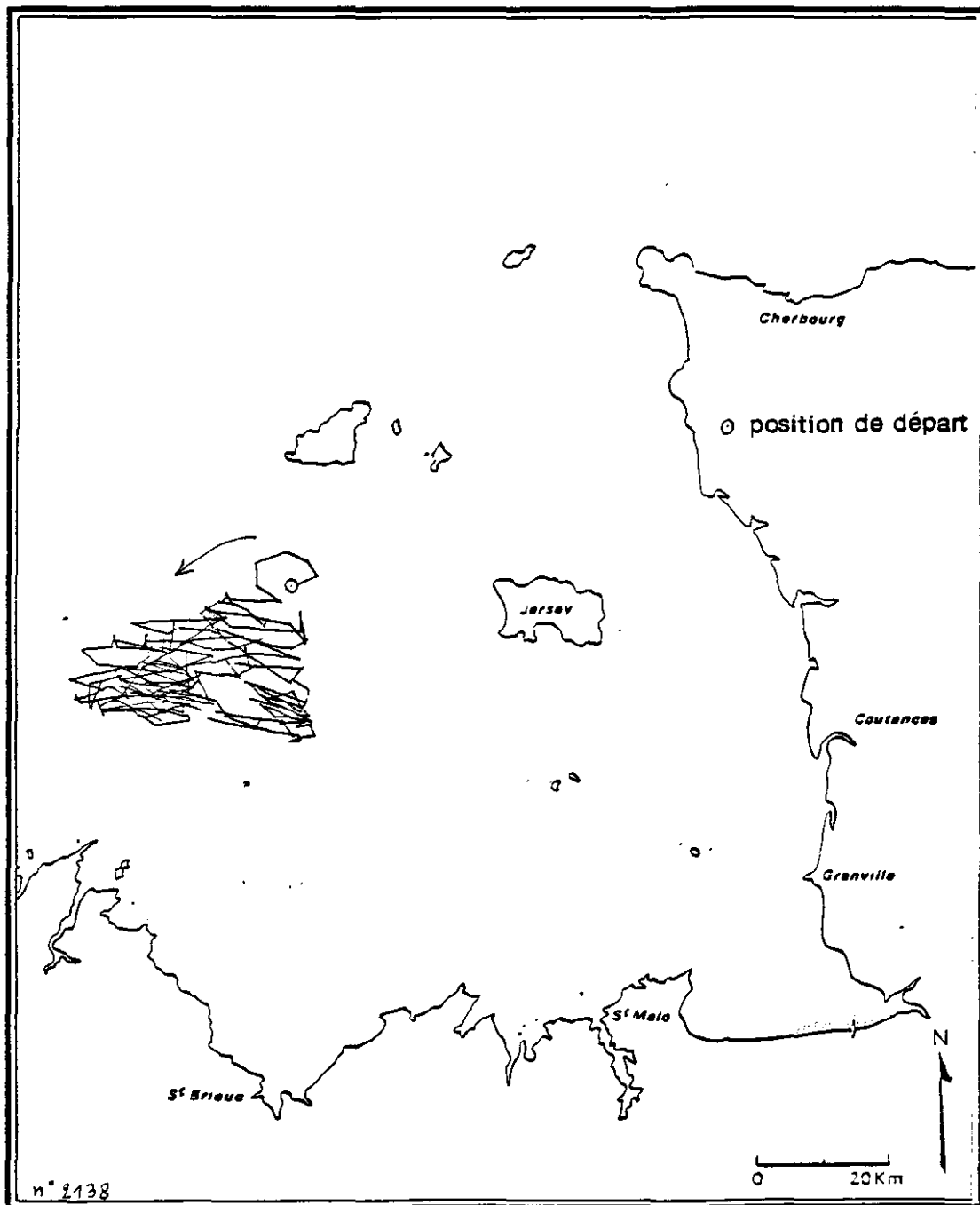
ancre flottante en surface



TRAJECTOIRE D'UN FLOTTEUR SUIVI PAR SYSTEME 'ARGOS'

ancre flottante en surface

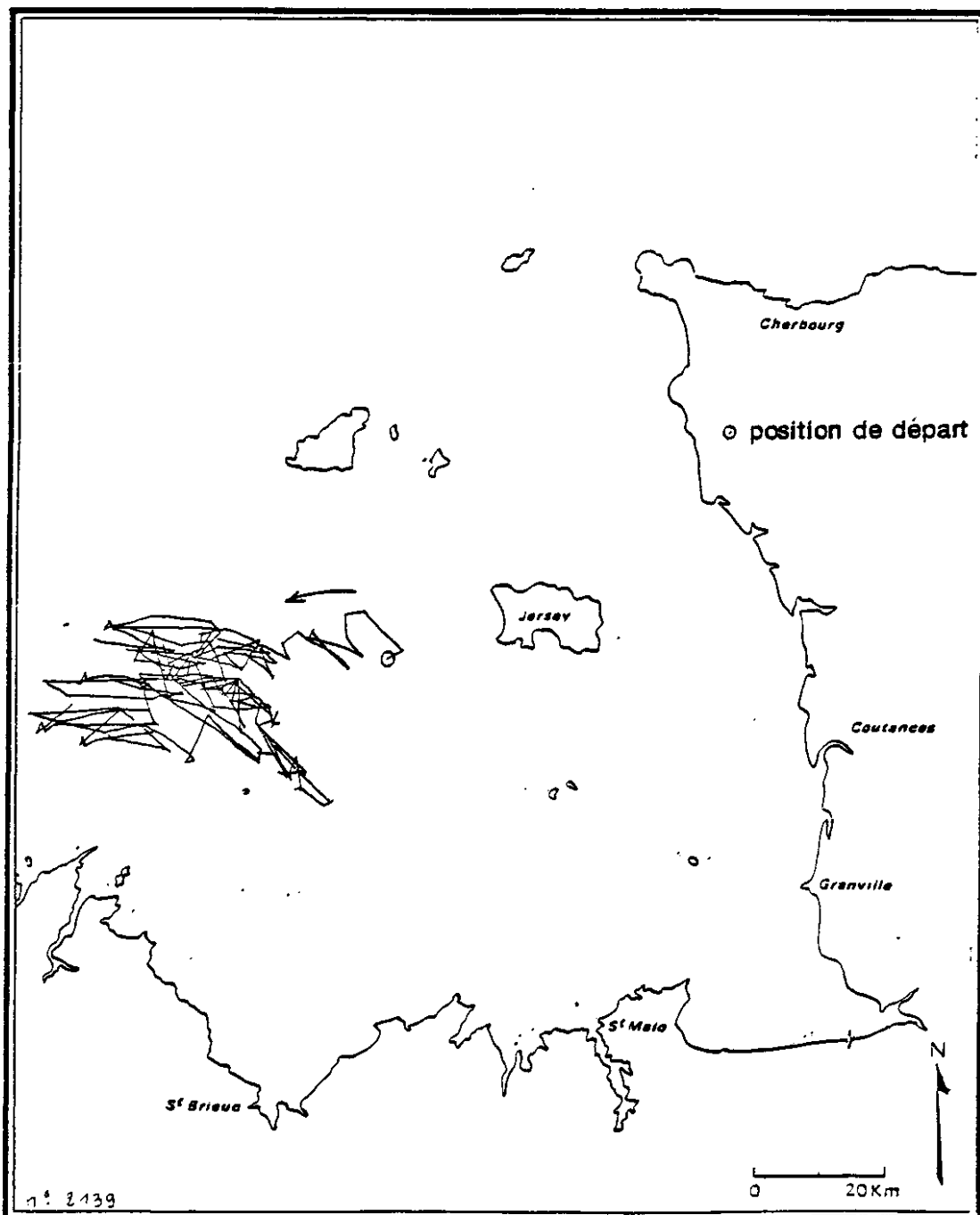
DU 6 AU 31 MAI 1984 (suite: Fig.III-18)



TRAJECTOIRE D'UN FLOTTEUR SUIVI PAR SYSTEME 'ARGOS'

ancre flottante en surface

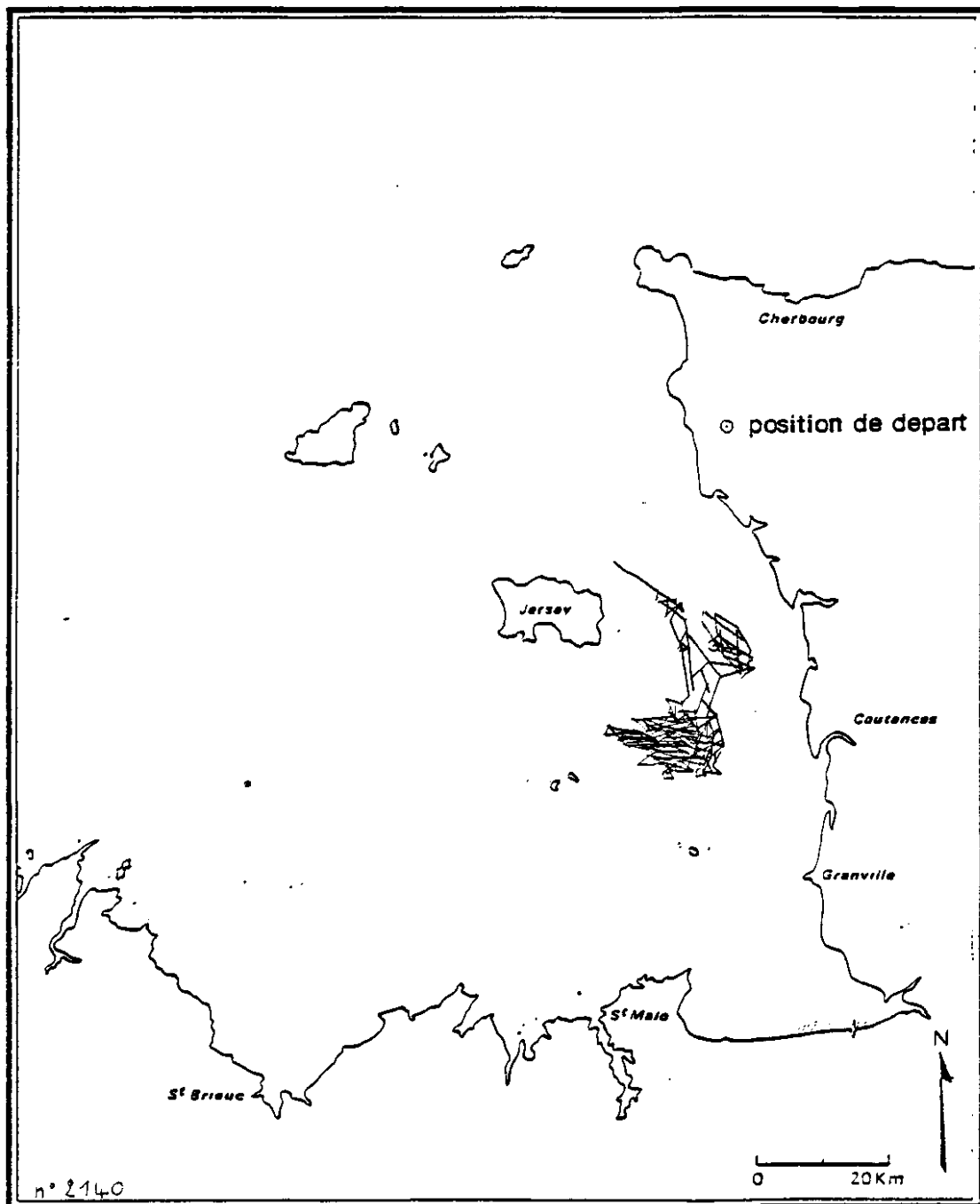
DU 6 AU 29 MAI 1984



TRAJECTOIRE D'UN FLOTTEUR SUIVI PAR SYSTEME 'ARGOS'

ancre flottante en surface

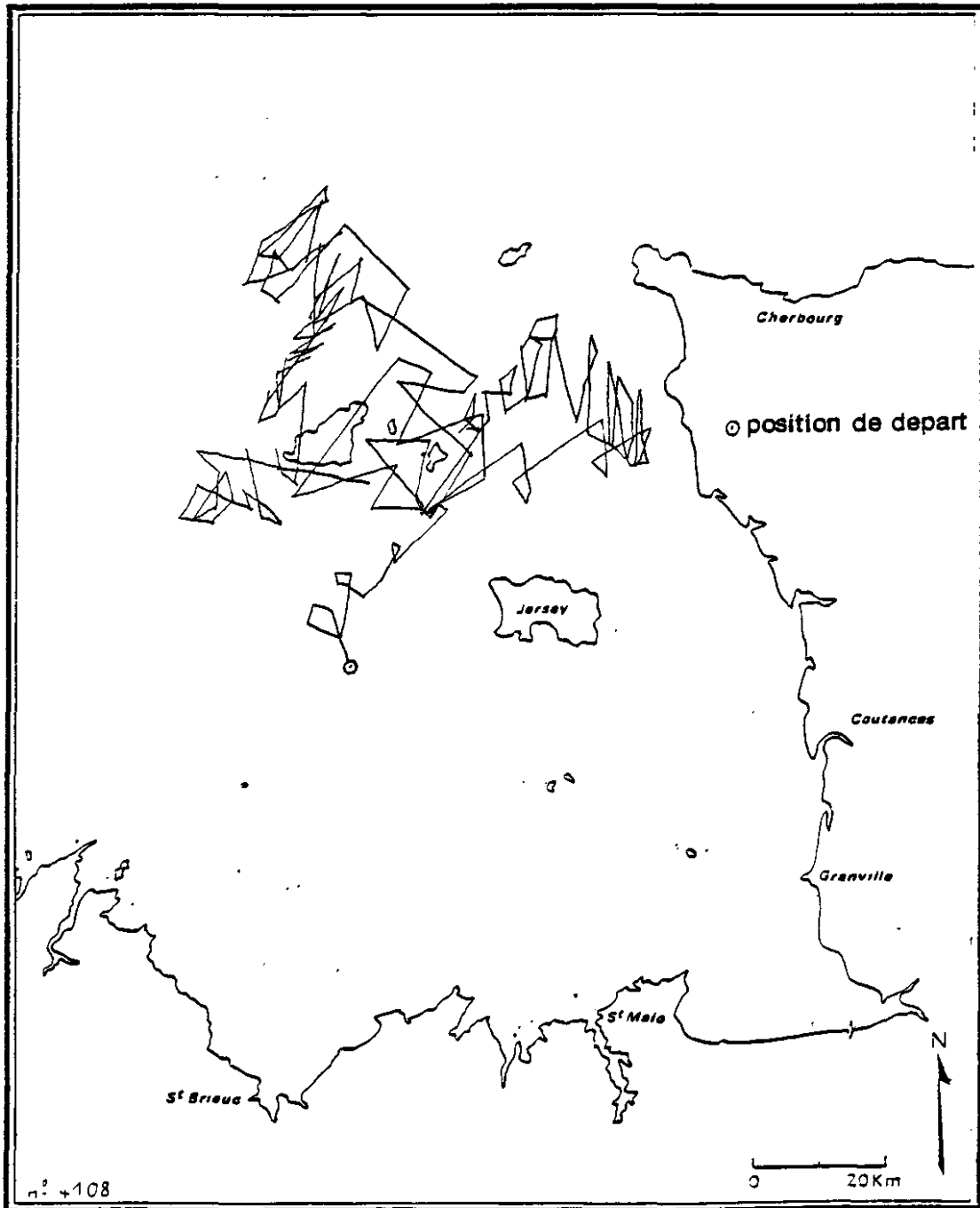
DU 4 AU 22 MAI 1984



TRAJECTOIRE D'UN FLOTTEUR SUIVI PAR SYSTEME 'ARGOS'

ancre flottante en surface

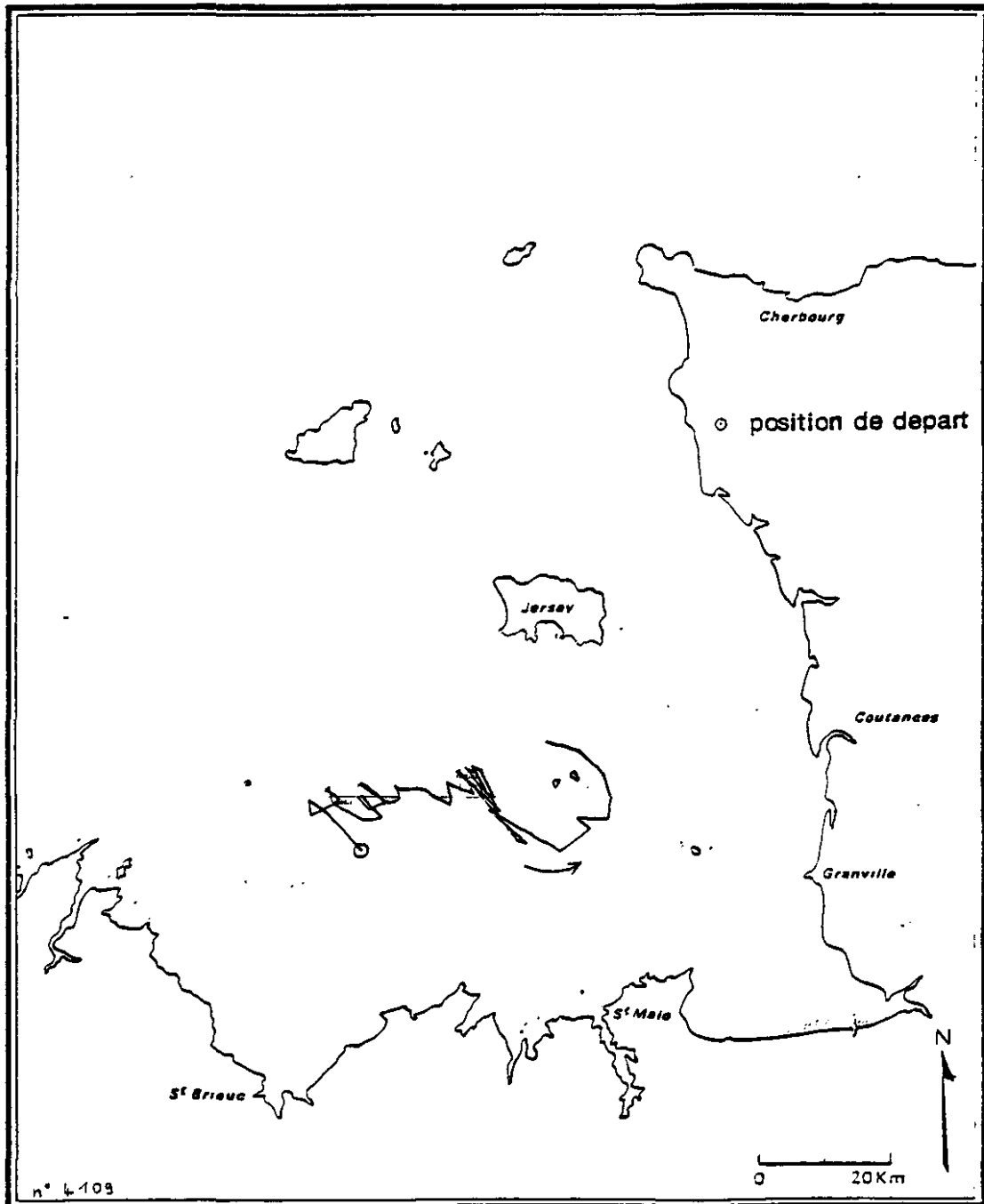
MARS 1984



TRAJECTOIRE D'UN FLOTTEUR SUIVI PAR SYSTEME 'ARGOS'

ancre flottante à -15m

DU 3 AU 7 MAI 1984

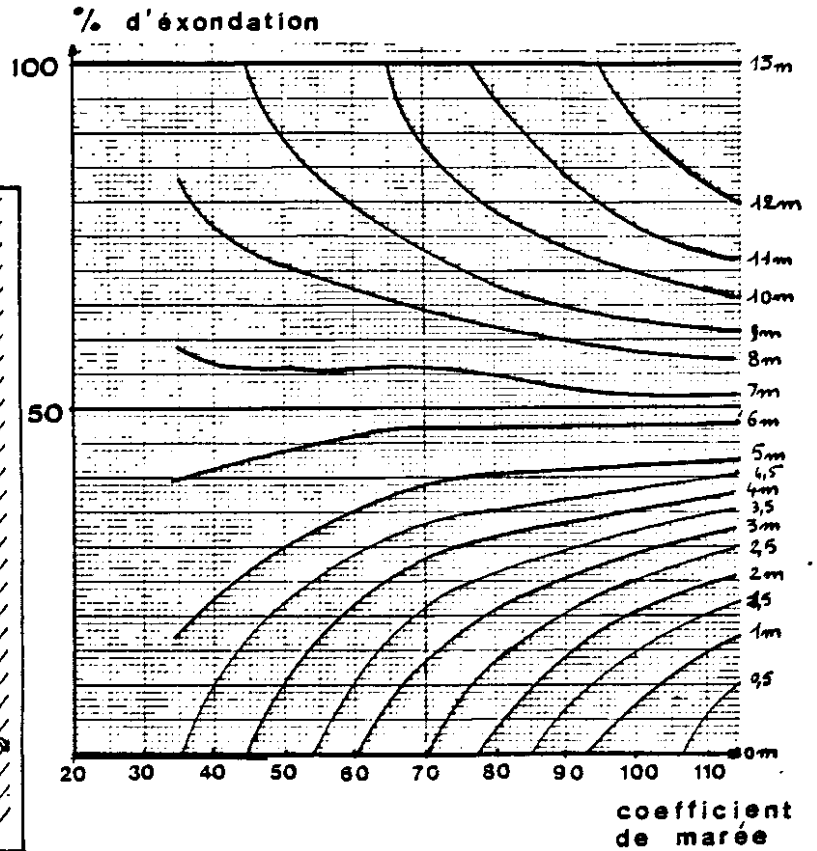
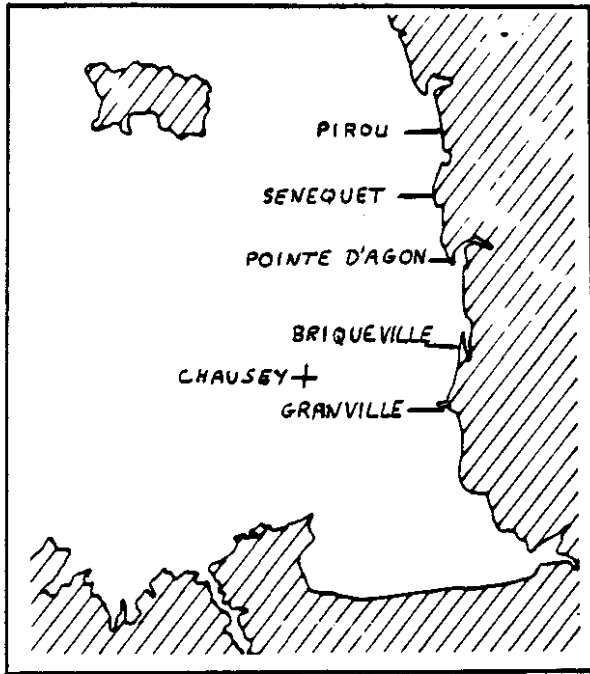


ANNEXE 2

TEMPS D'EMONDATION DE L'ESTRAN
EN DIVERS POINTS DU GOLFE NORMAND-BRETON

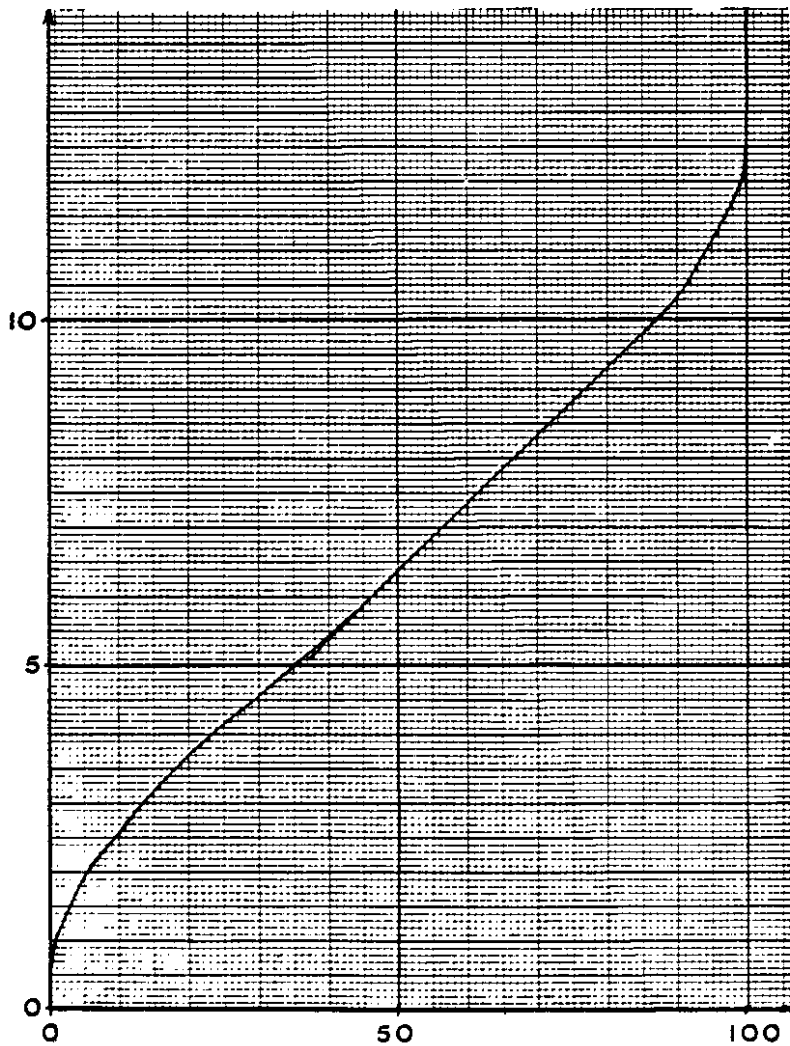
LE PIROU

49° 10' N



niveau au dessus du zéro hydrographique (m)

NIVEAU DE MI-MAREE : 6,50m

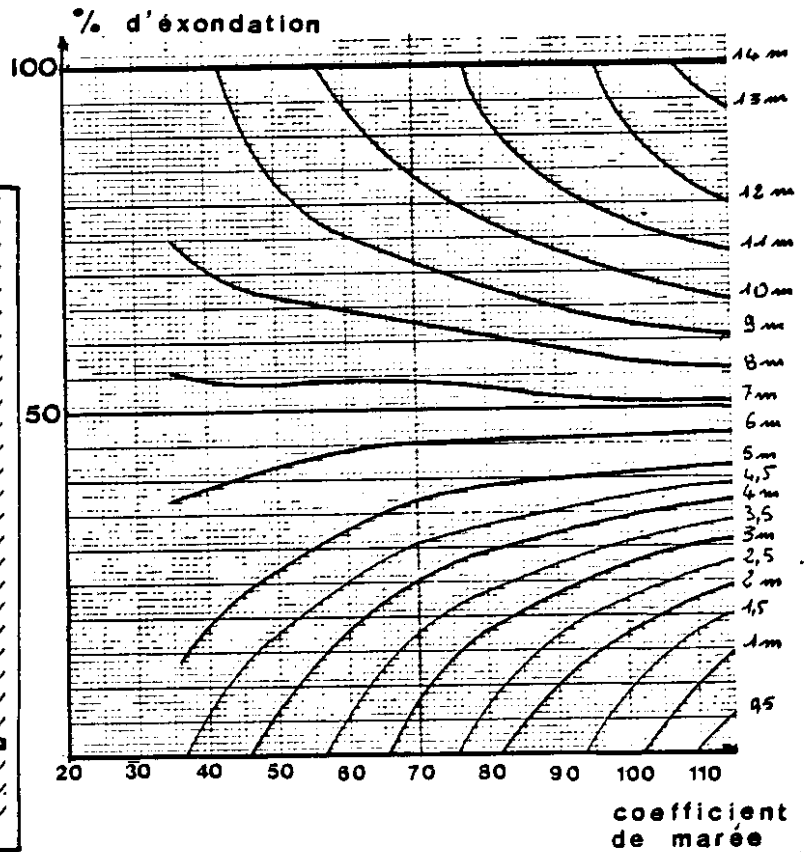
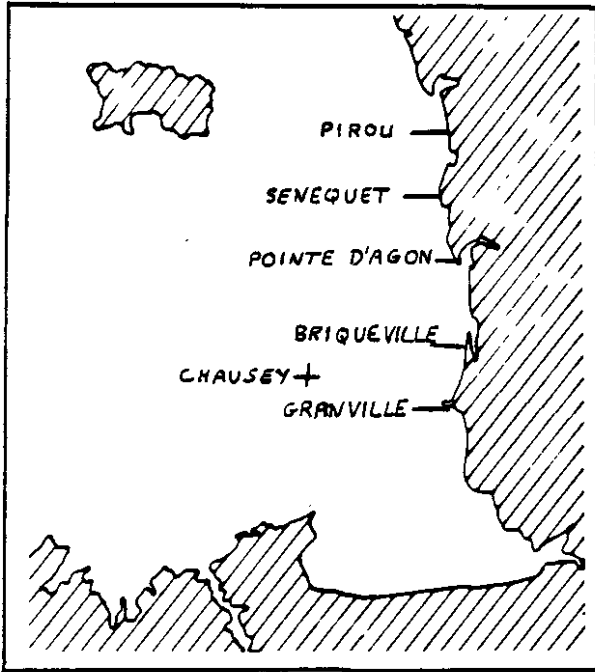


coef- ficient	niveau (m)	
	P.M.	B.M.
35	8,25	4,75
45	8,90	4,15
55	9,50	3,50
65	10,10	2,90
75	10,70	2,30
85	11,25	1,75
95	11,80	1,20
105	12,40	0,60
115	12,95	0,05

% d'exondation
moyen

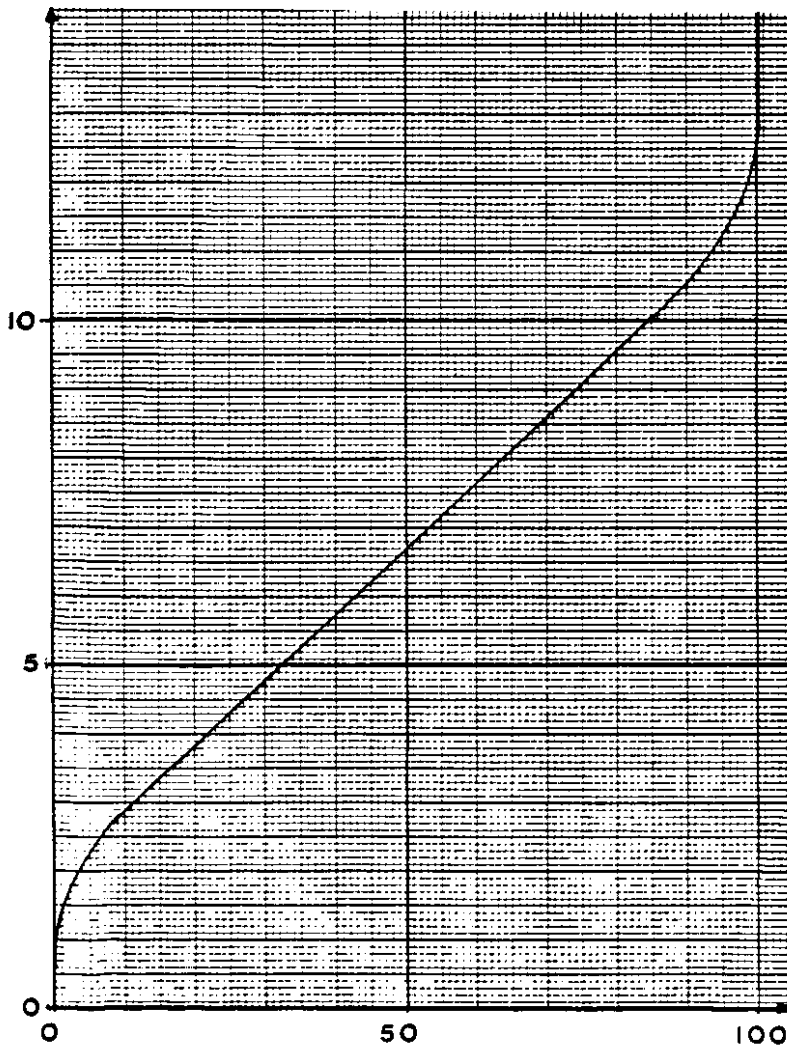
SENEQUET

49° 05' N



niveau au dessus du zero hydrographique (m)

NIVEAU DE MI-MAREE : 6,63 m

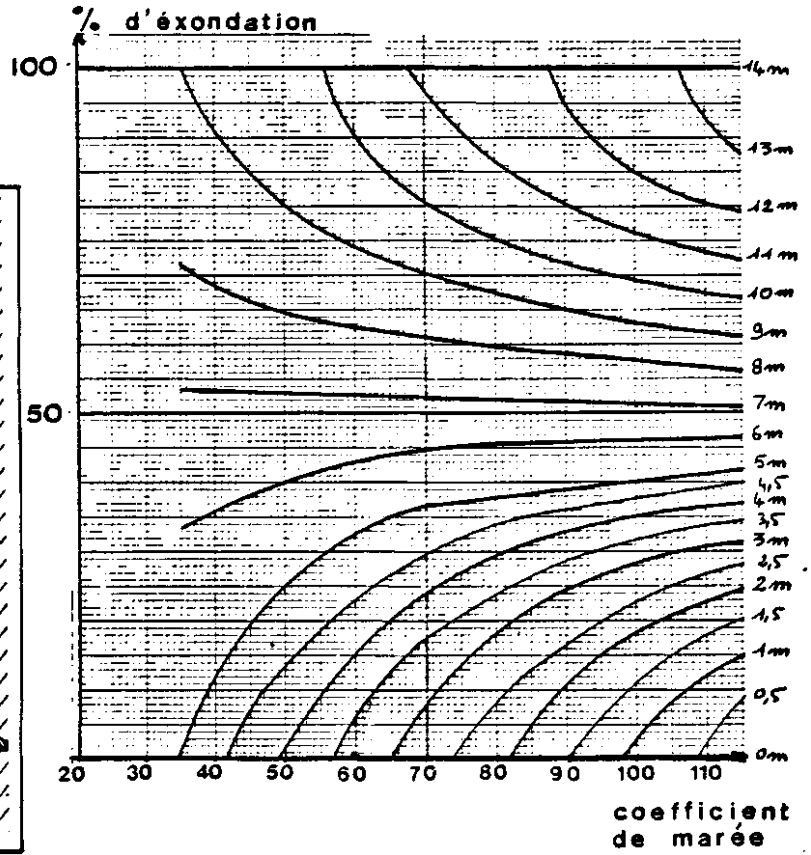
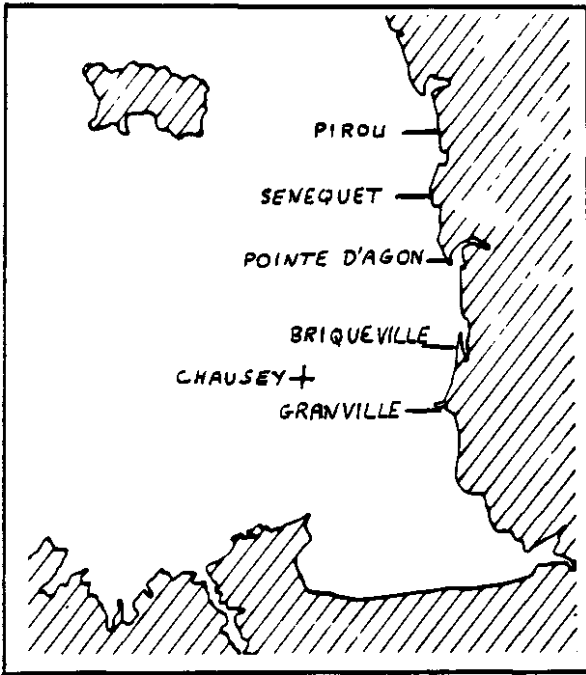


coef- ficient	niveau (m)	
	P.M.	B.M.
35	8,55	6,85
45	9,15	6,25
55	9,70	3,70
65	10,30	3,10
75	10,85	2,50
85	11,40	1,95
95	12,00	1,40
105	12,55	0,85
115	13,15	0,25

% d'exondation
moyen

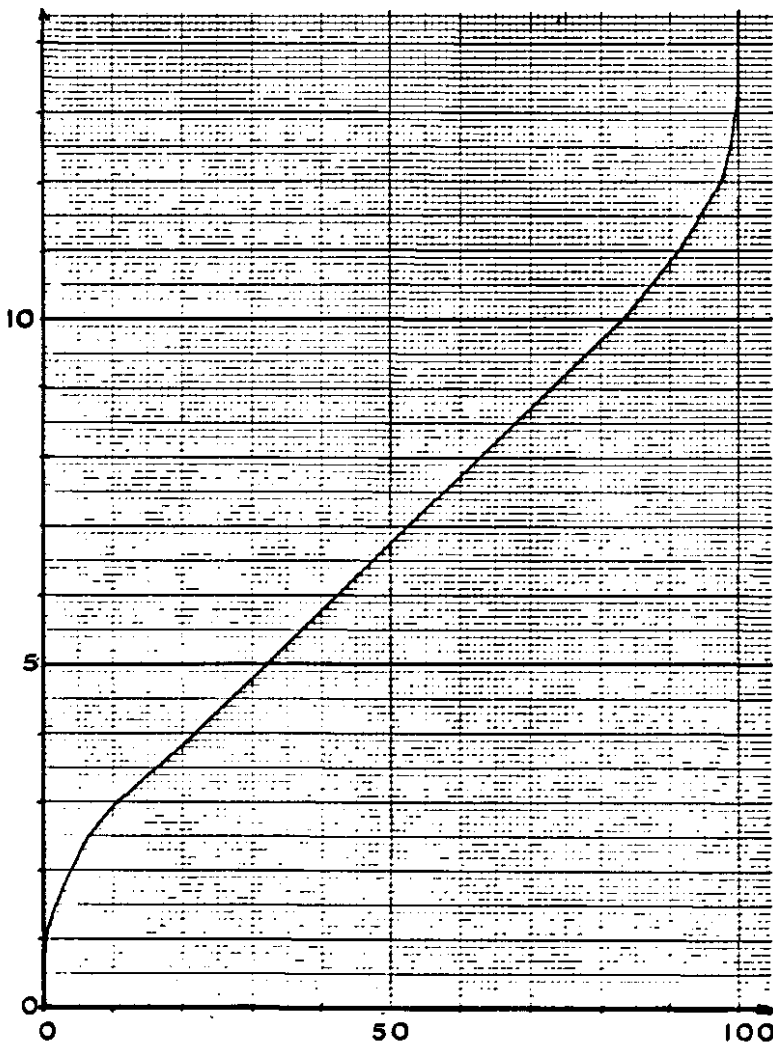
POINTE D'AGON

49° 00' N



NIVEAU DE MI-MAREE : 6,85m

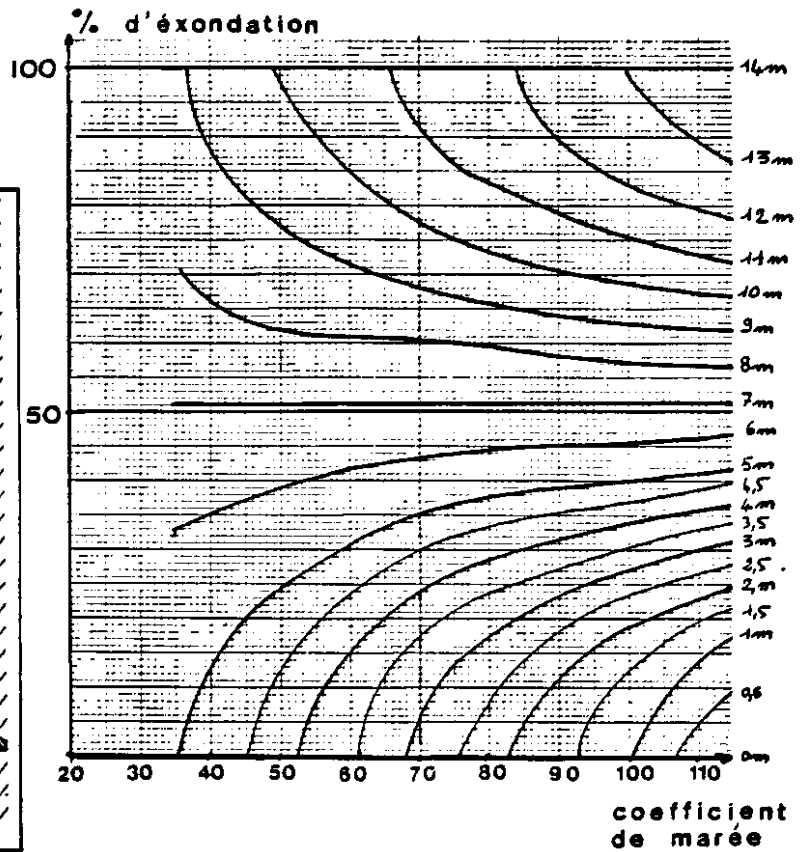
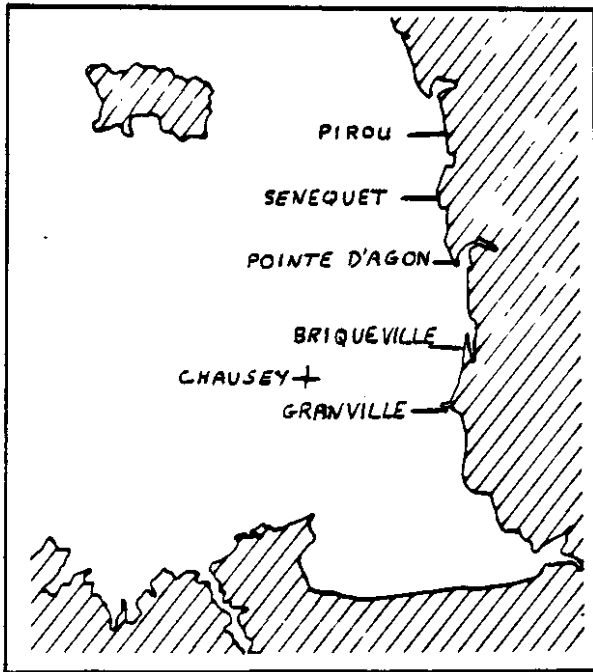
niveau au dessus du zéro hydrographique (m)



coef- ficient	niveau(m)	
	P.M.	B.M.
35	8,60	5,05
45	9,25	4,40
55	9,90	3,75
65	10,60	3,10
75	11,25	2,45
85	11,75	1,90
95	12,35	1,30
105	13,00	0,70
115	13,50	0,15

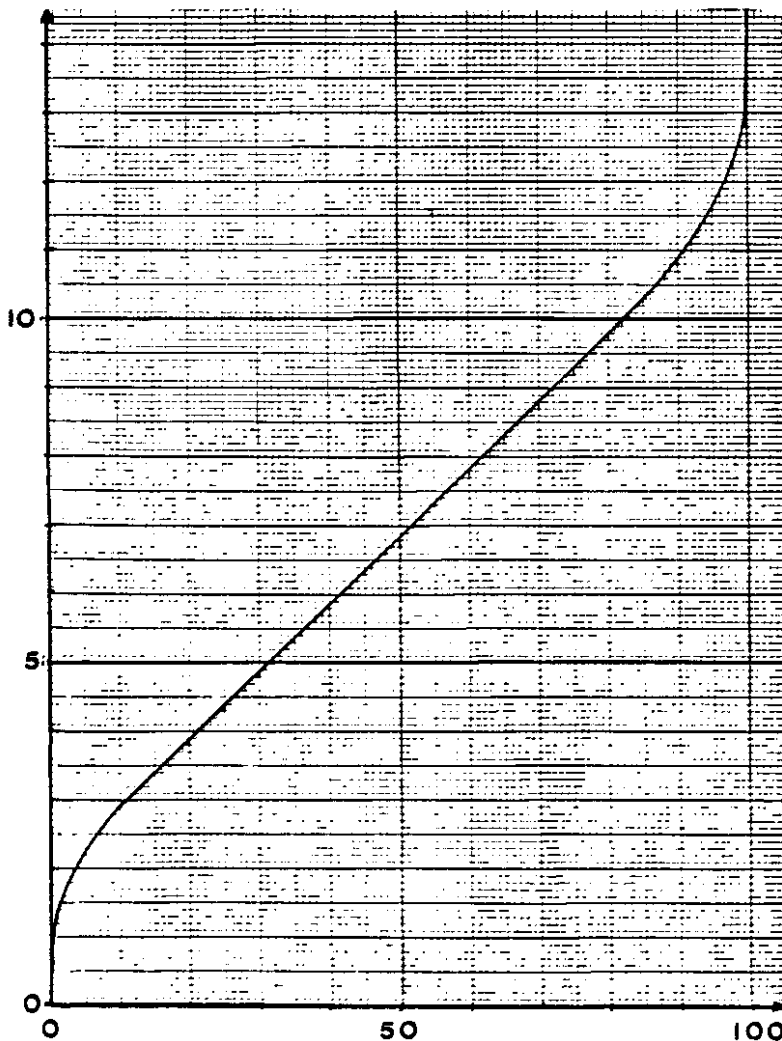
BRIQUEVILLE

48°55'N



niveau au dessus du zéro hydrographique (m)

NIVEAU DE MI-MAREE : 7,00 m

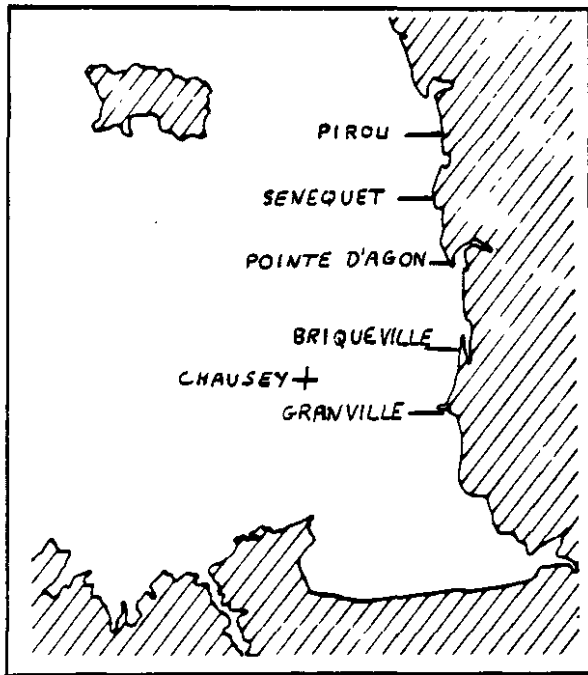


coef- ficient	niveau (m)	
	P. M.	B. M.
35	8,80	5,20
45	9,65	4,50
55	10,15	3,85
65	10,80	3,20
75	11,50	2,50
85	12,00	2,00
95	12,60	1,40
105	13,20	0,80
115	13,77	0,25

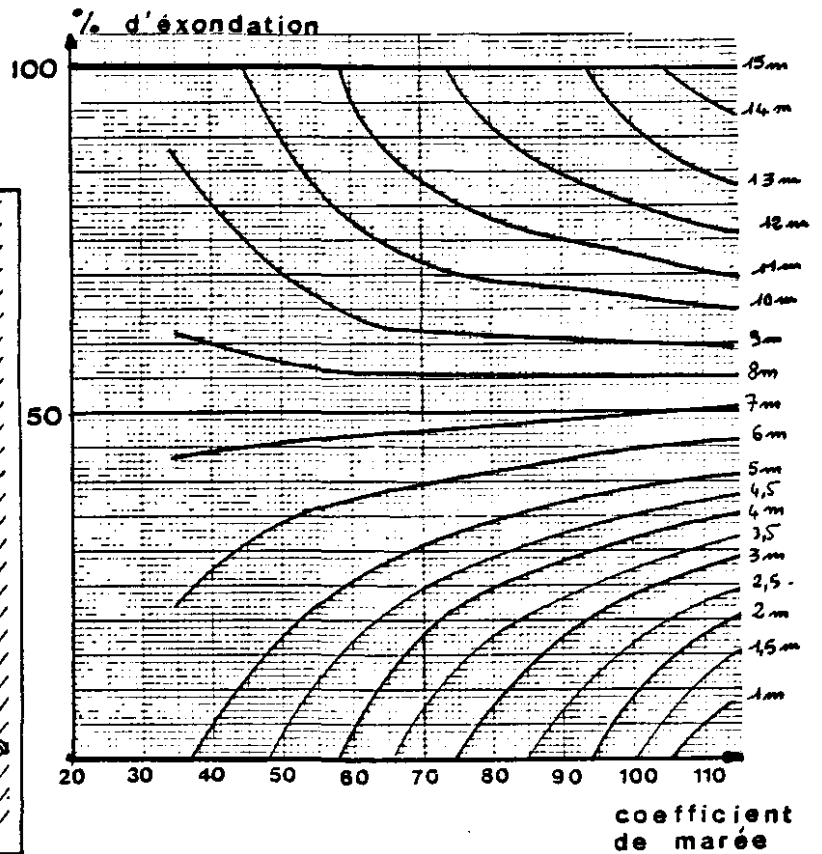
% d'exondation moyen

CHAUSEY

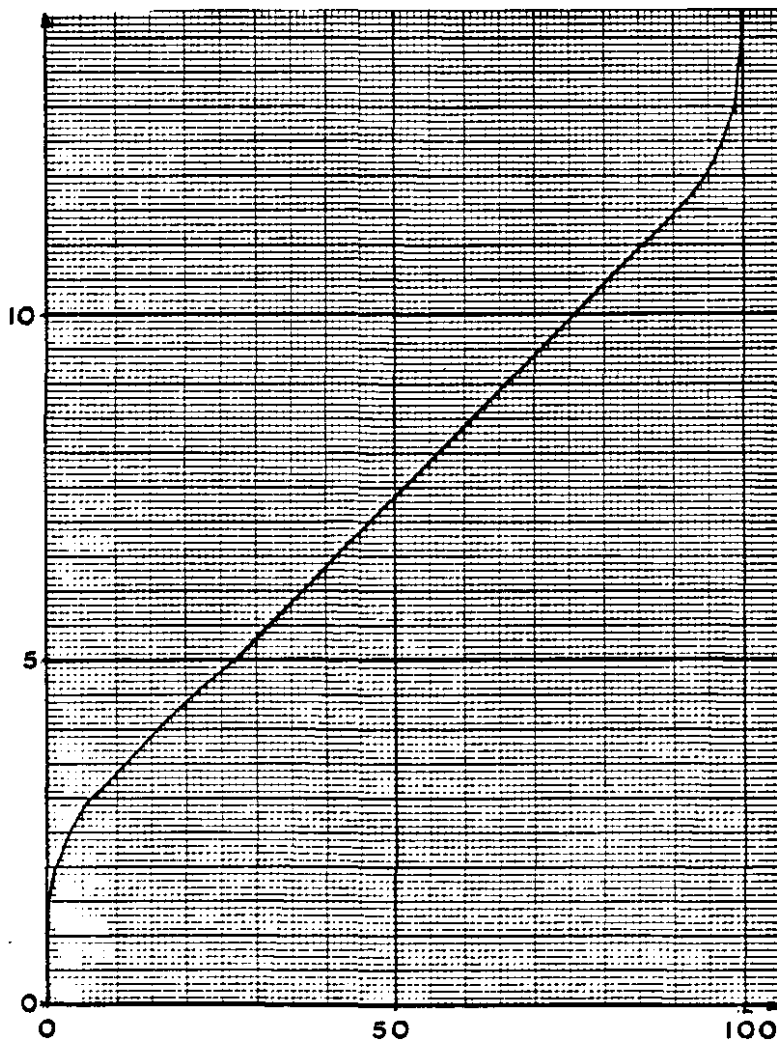
48° 52' N / 1° 49' W



niveau au dessus du zéro hydrographique (m)



NIVEAU DE MI-MAREE : 7,50m

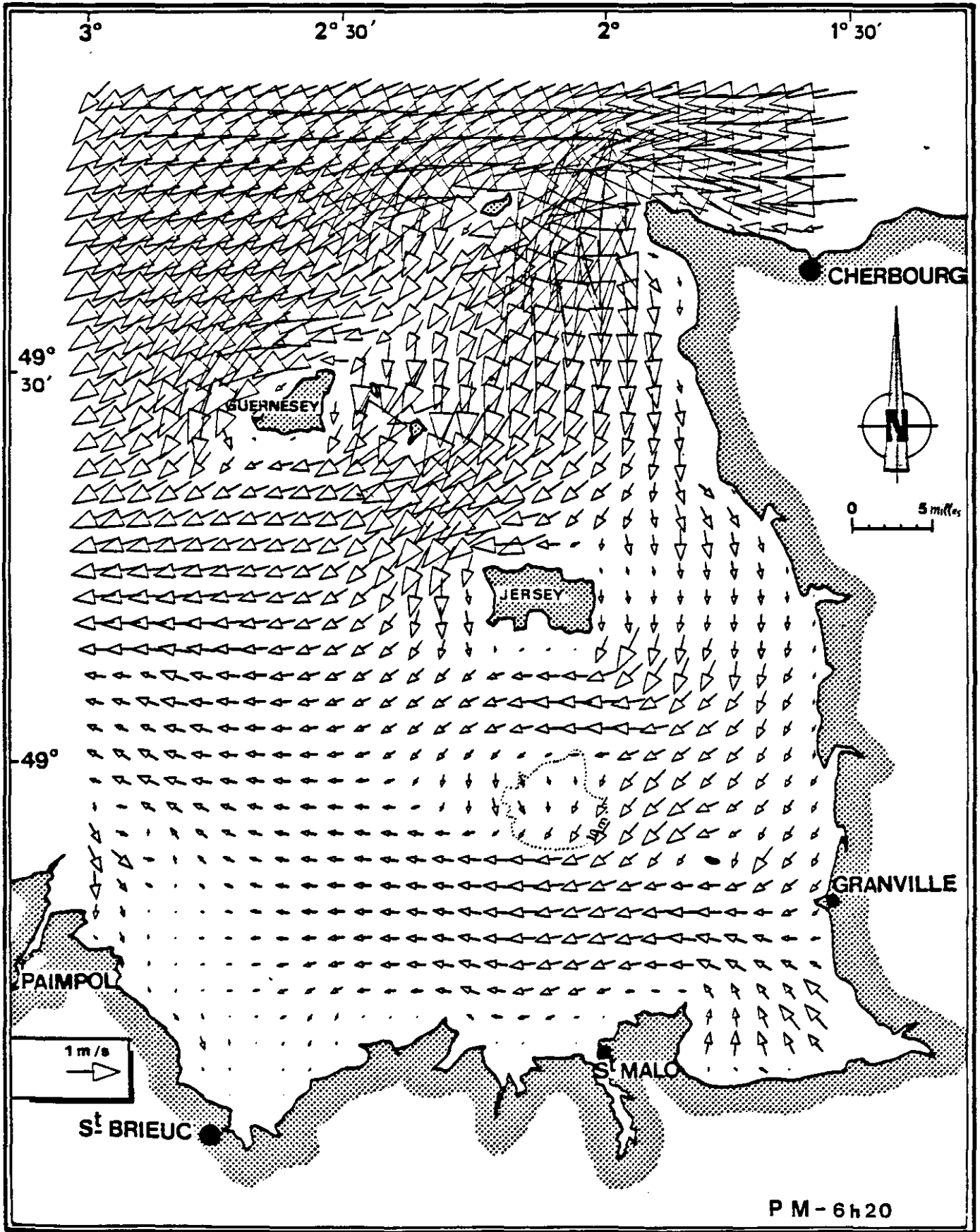


coef- ficient	niveau(m)	
	P.M.	B.M.
35	2,20	5,65
45	3,95	4,95
55	10,60	4,35
65	11,30	3,80
75	11,90	3,20
85	12,45	2,60
95	13,05	2,05
105	13,65	1,45
115	14,30	0,90

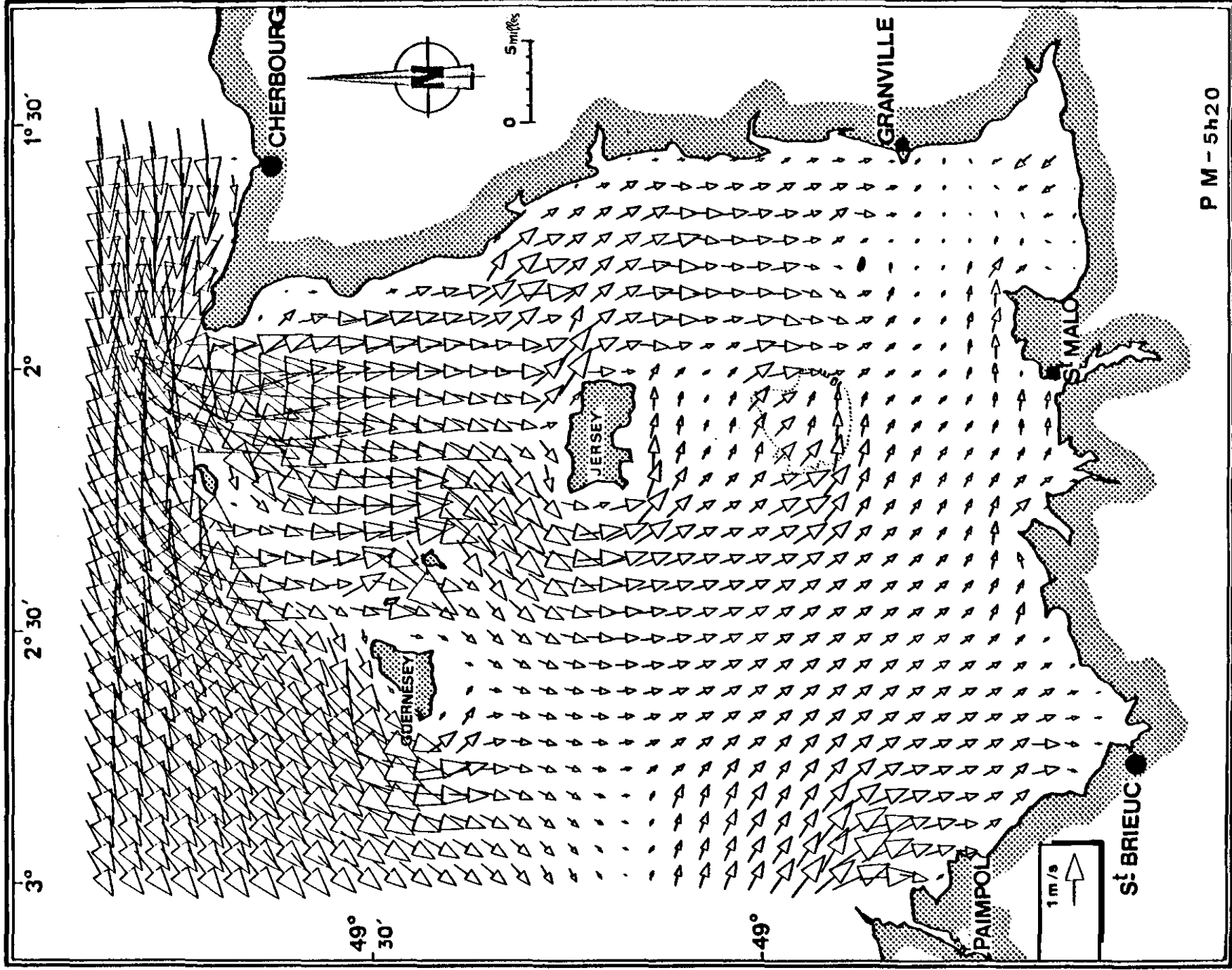
ANNEXE 3

CHAMPS HORAIRES DE COURANTS DE MAREE SIMILES

**CODE DE CALCUL BIDIMENSIONNEL DE L'U.B.O. (d'après A. ORBI)
VIVE EAU MOYENNE**

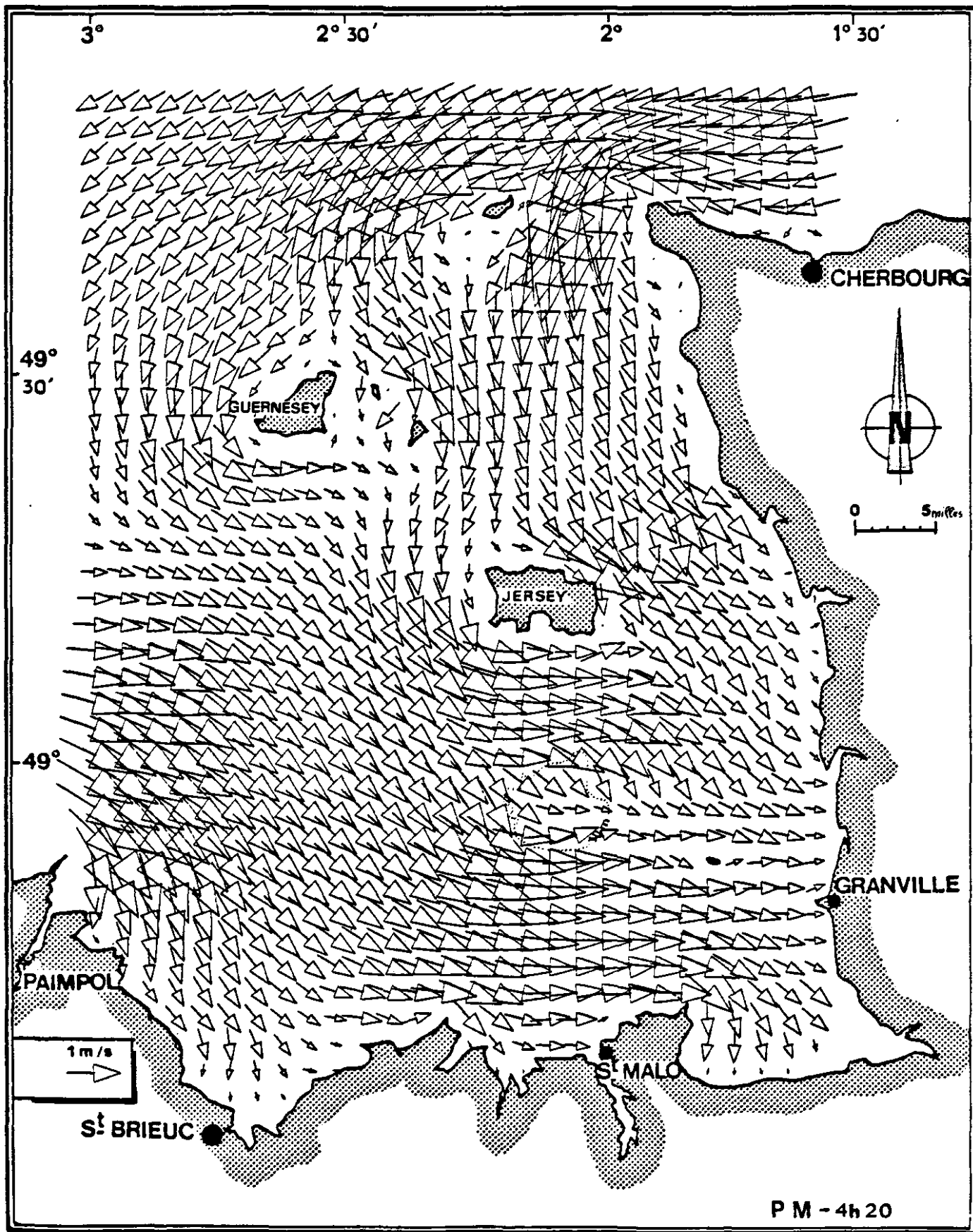


11-6-83 13 H T.U.

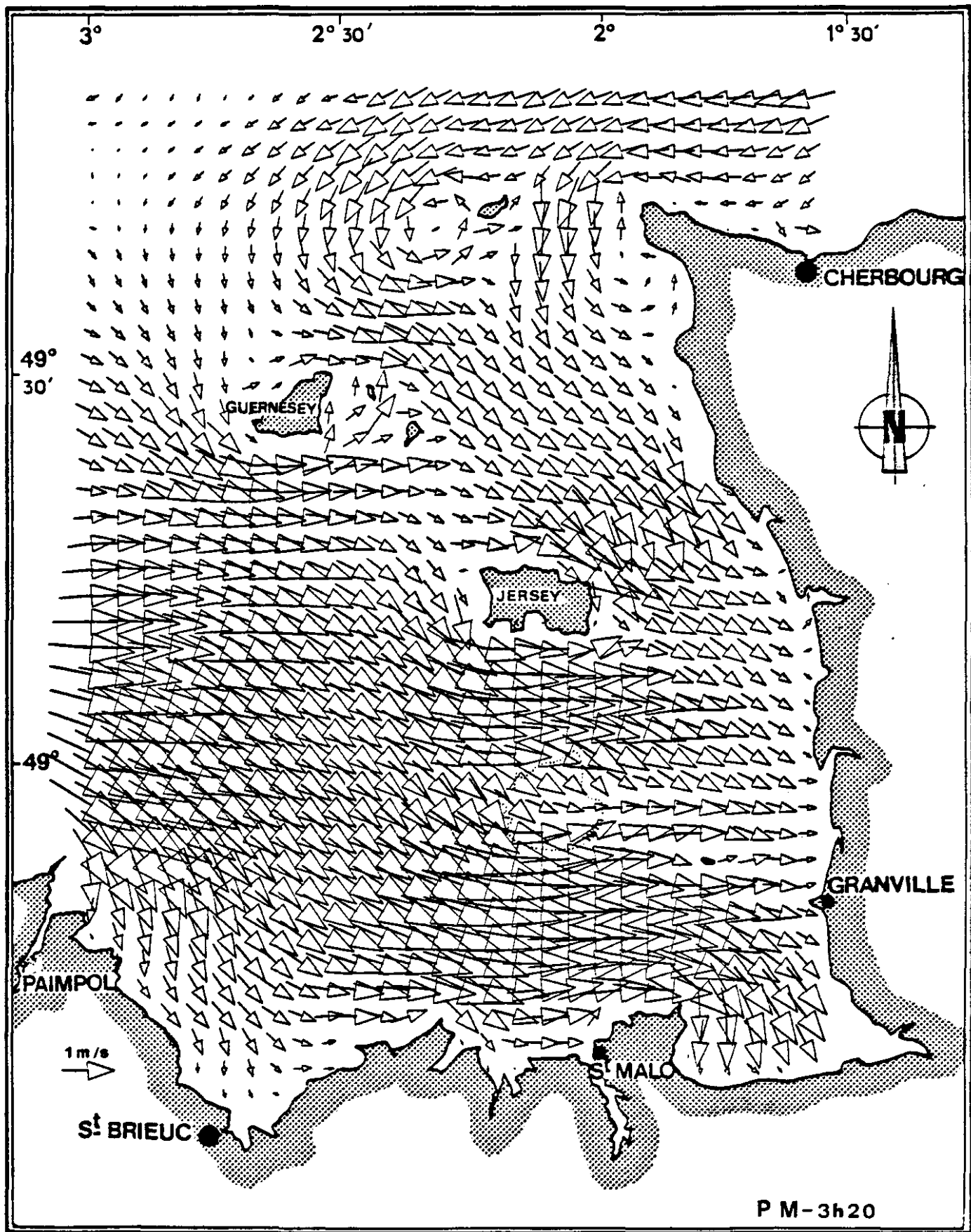


P M - 5H20

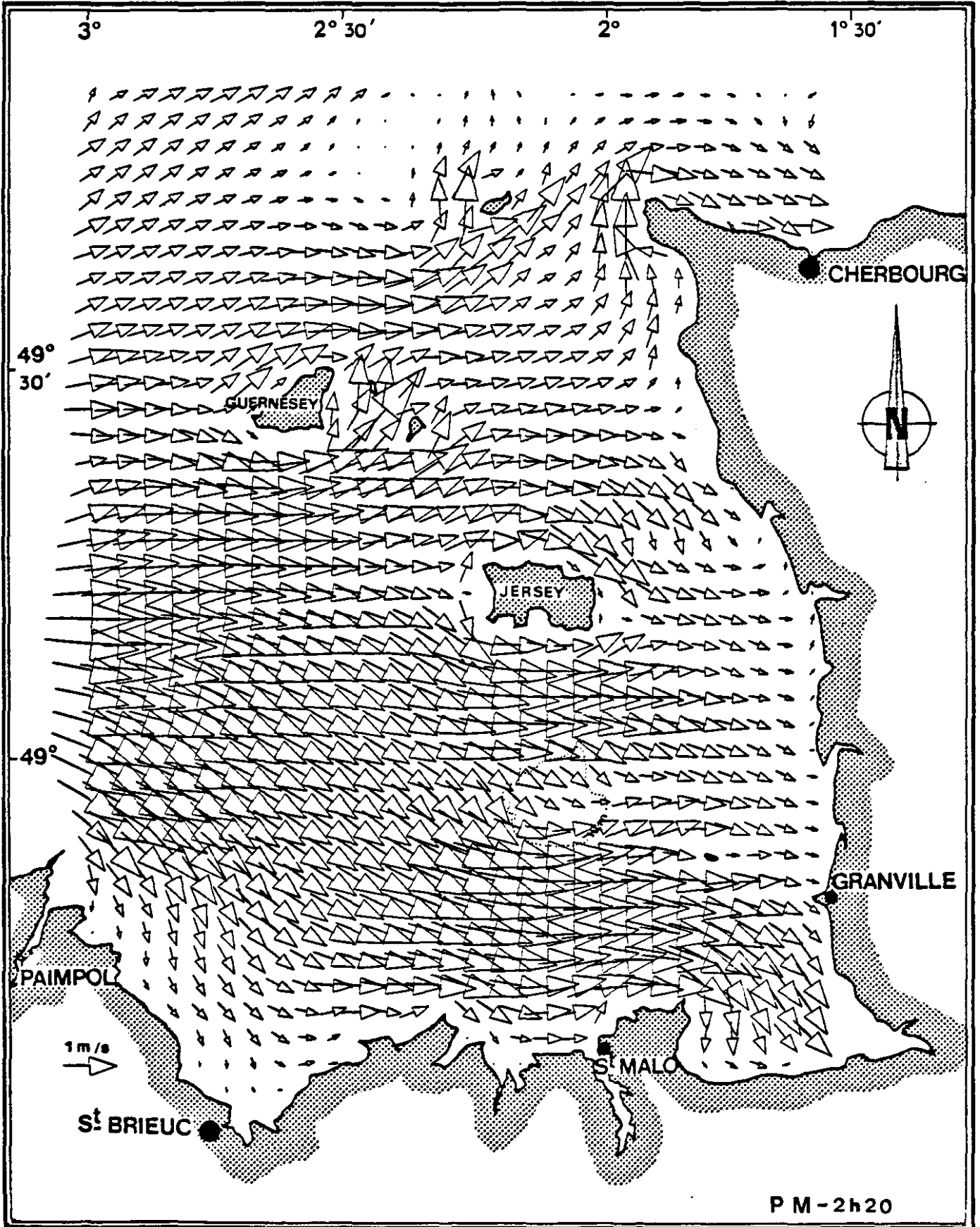
11-6-83 14 H T.U.

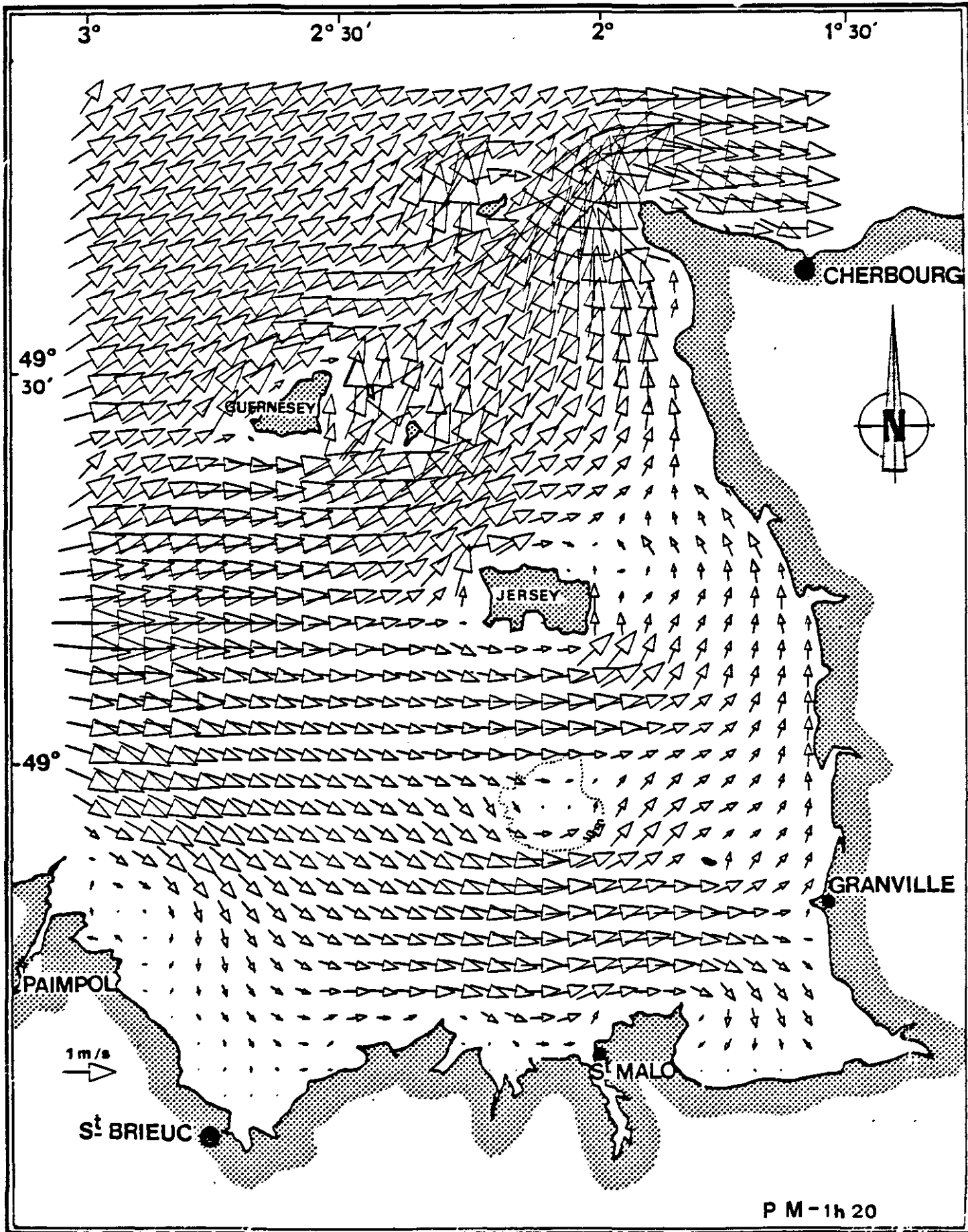


11-6-83 15H.T.U.

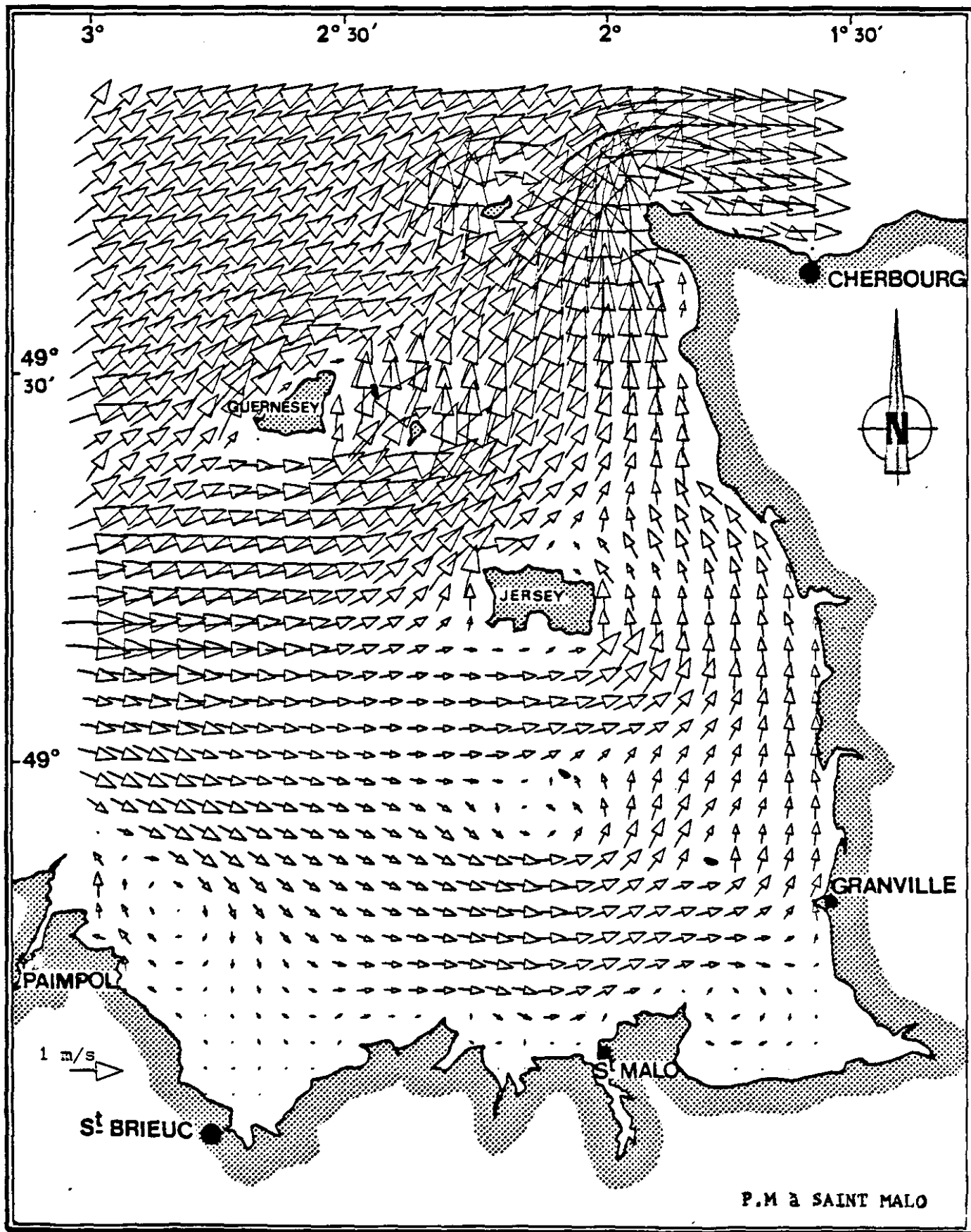


11-6-83 16H.T.U.

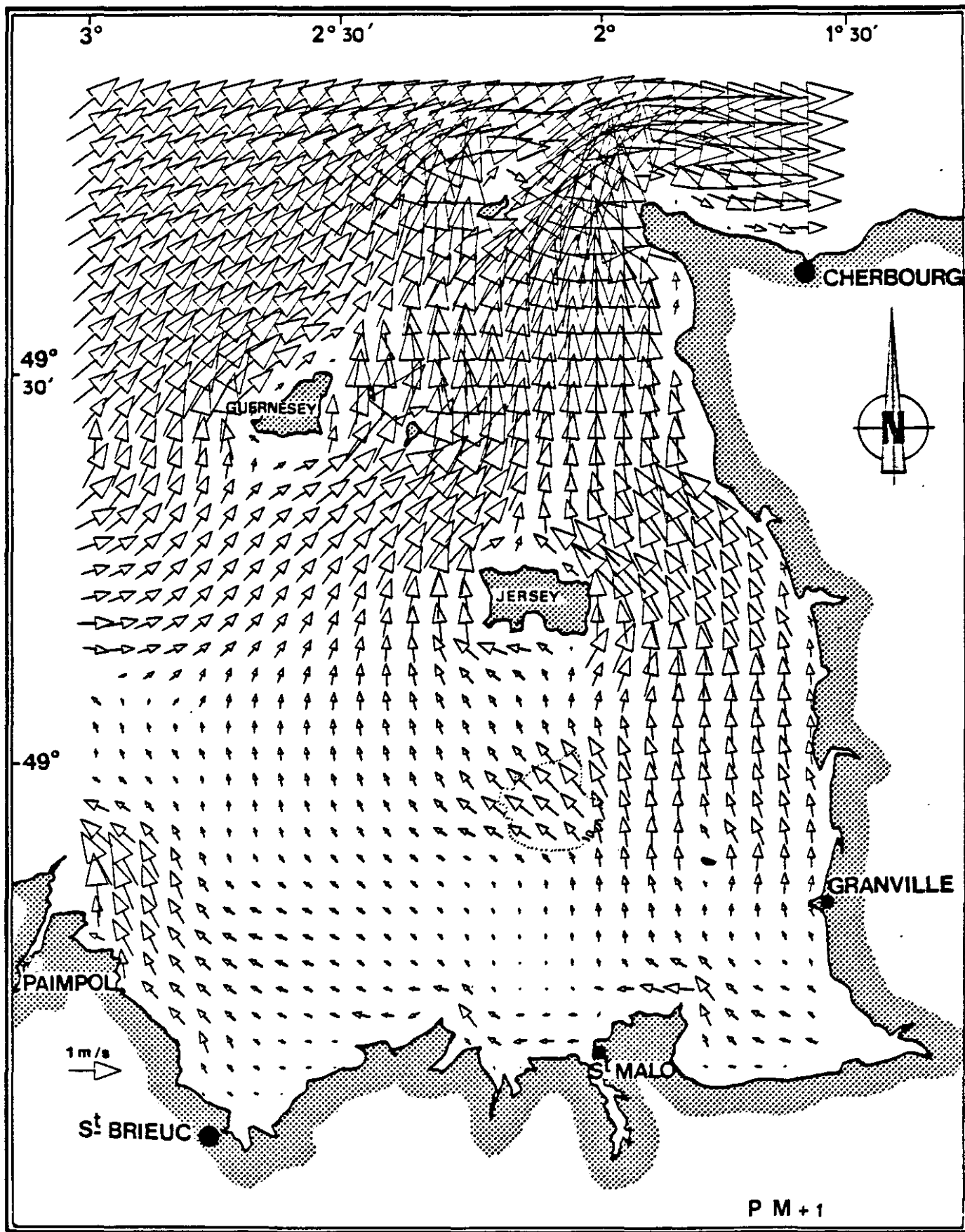


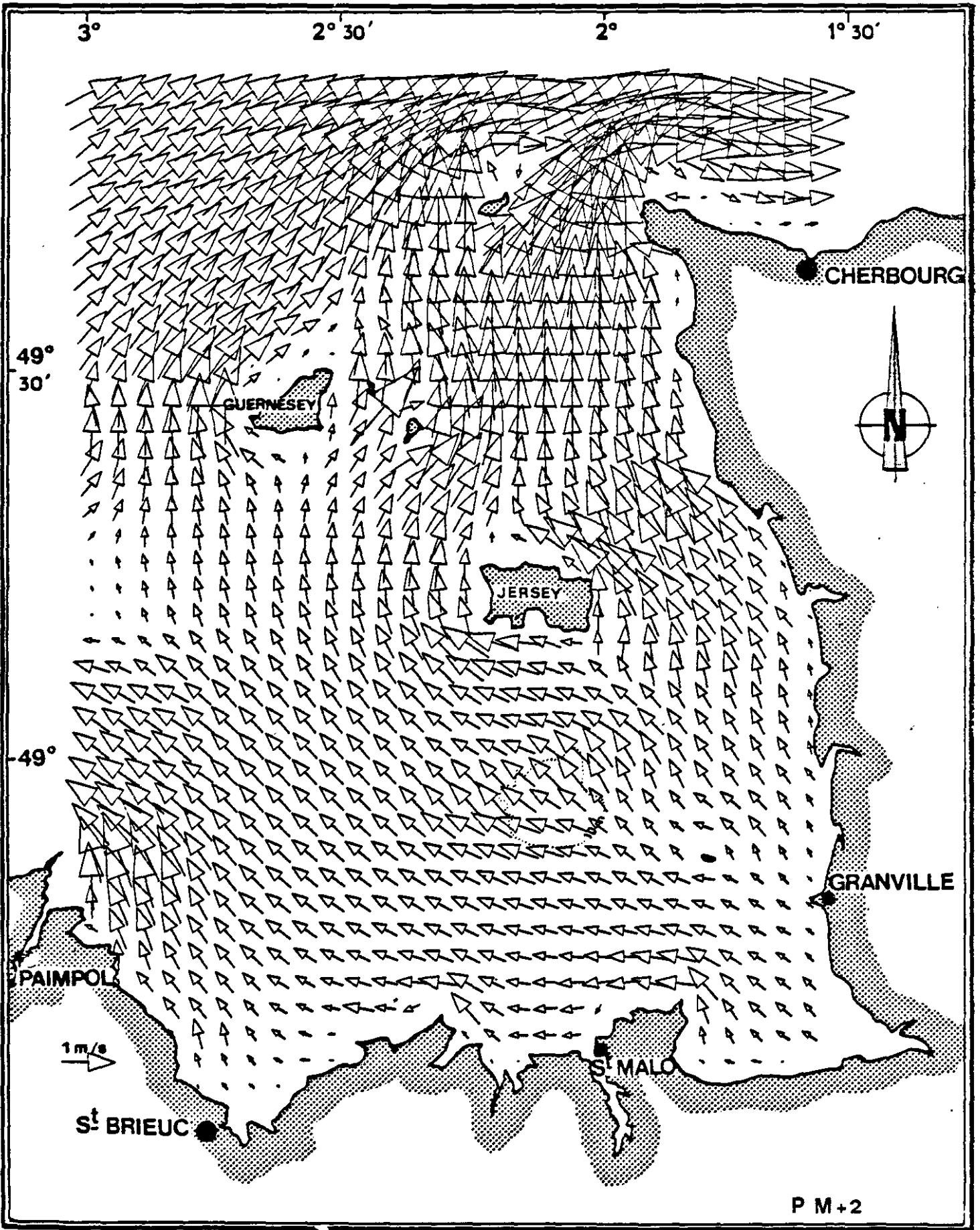


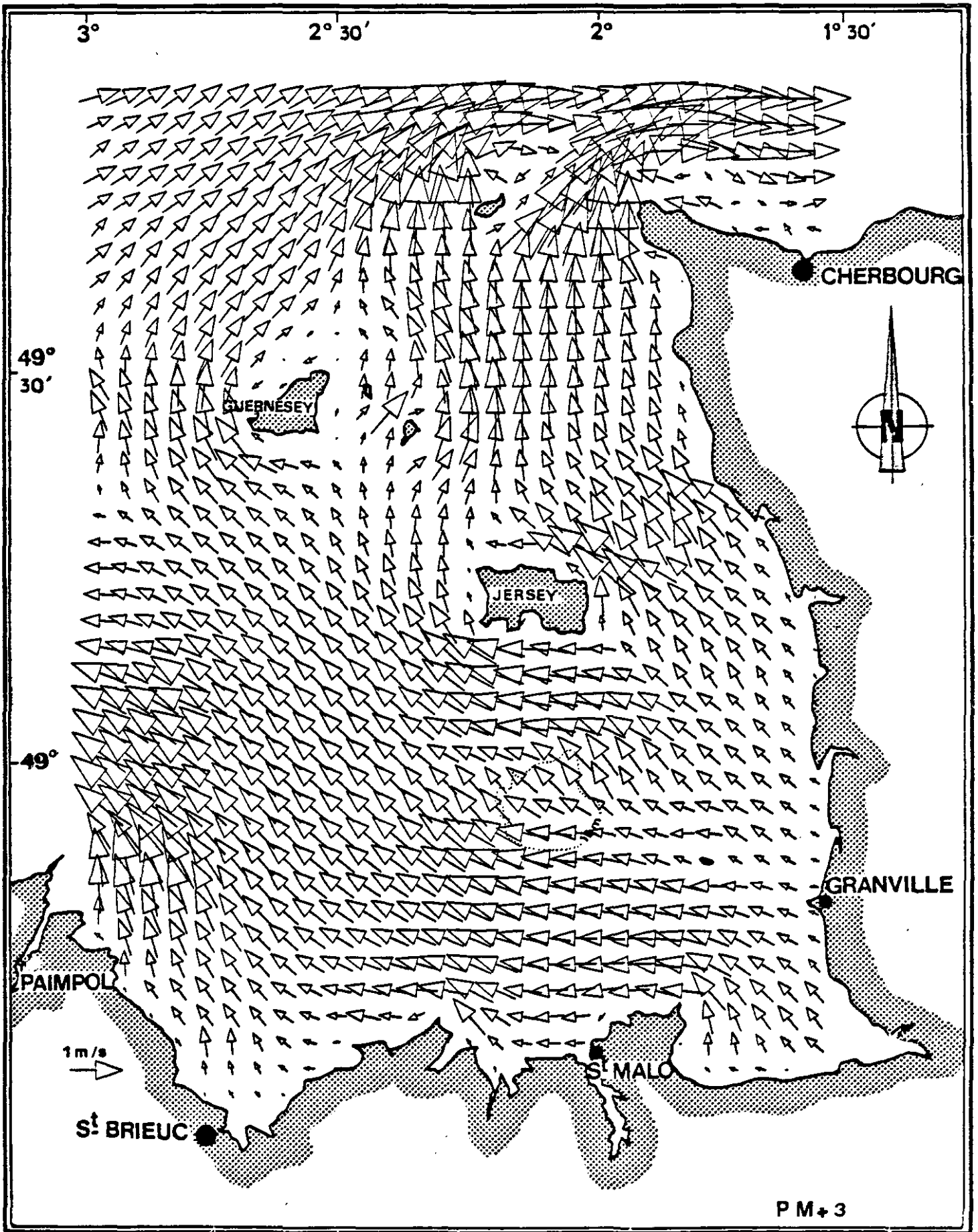
P M - 1h 20

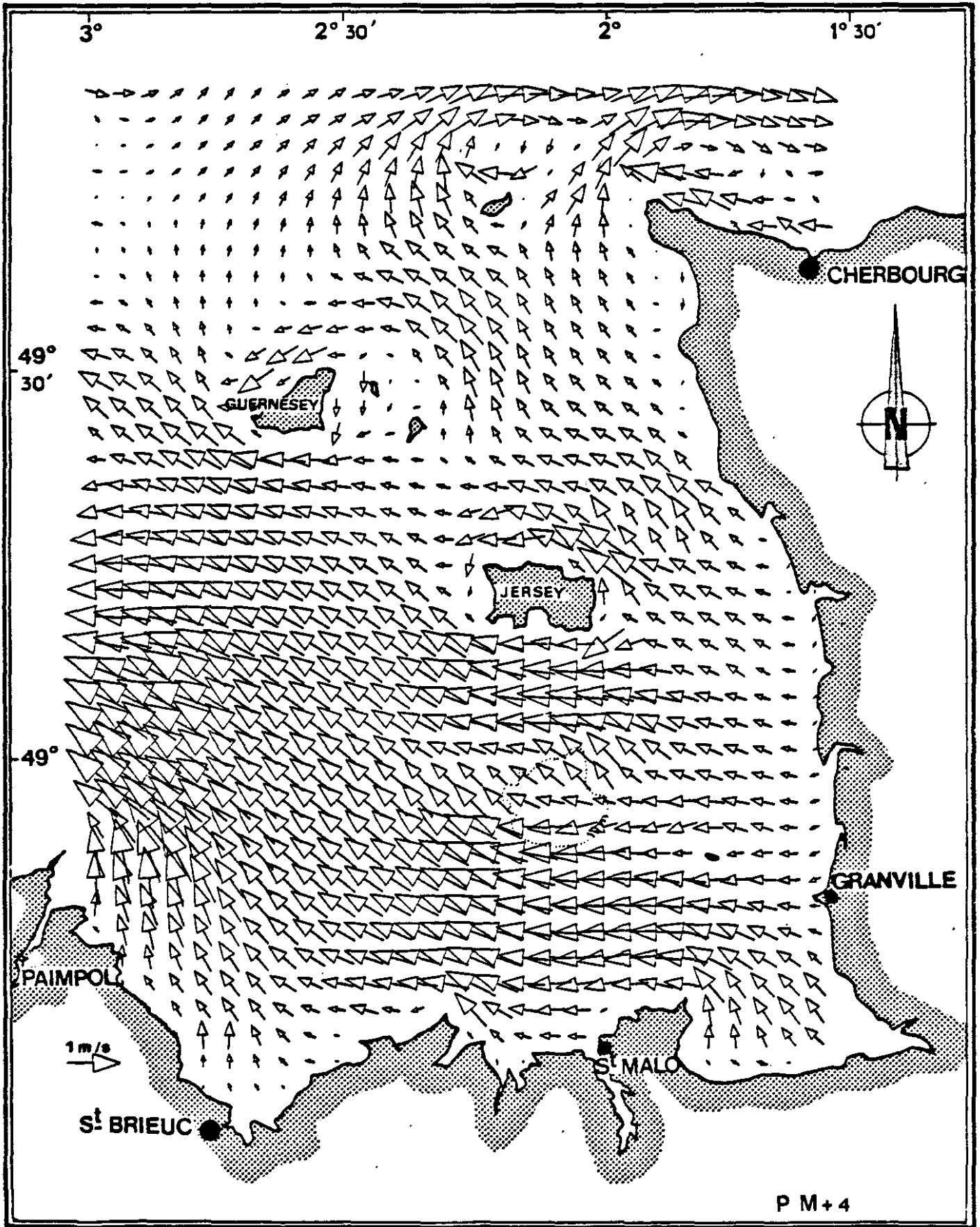


P.M à SAINT MALO

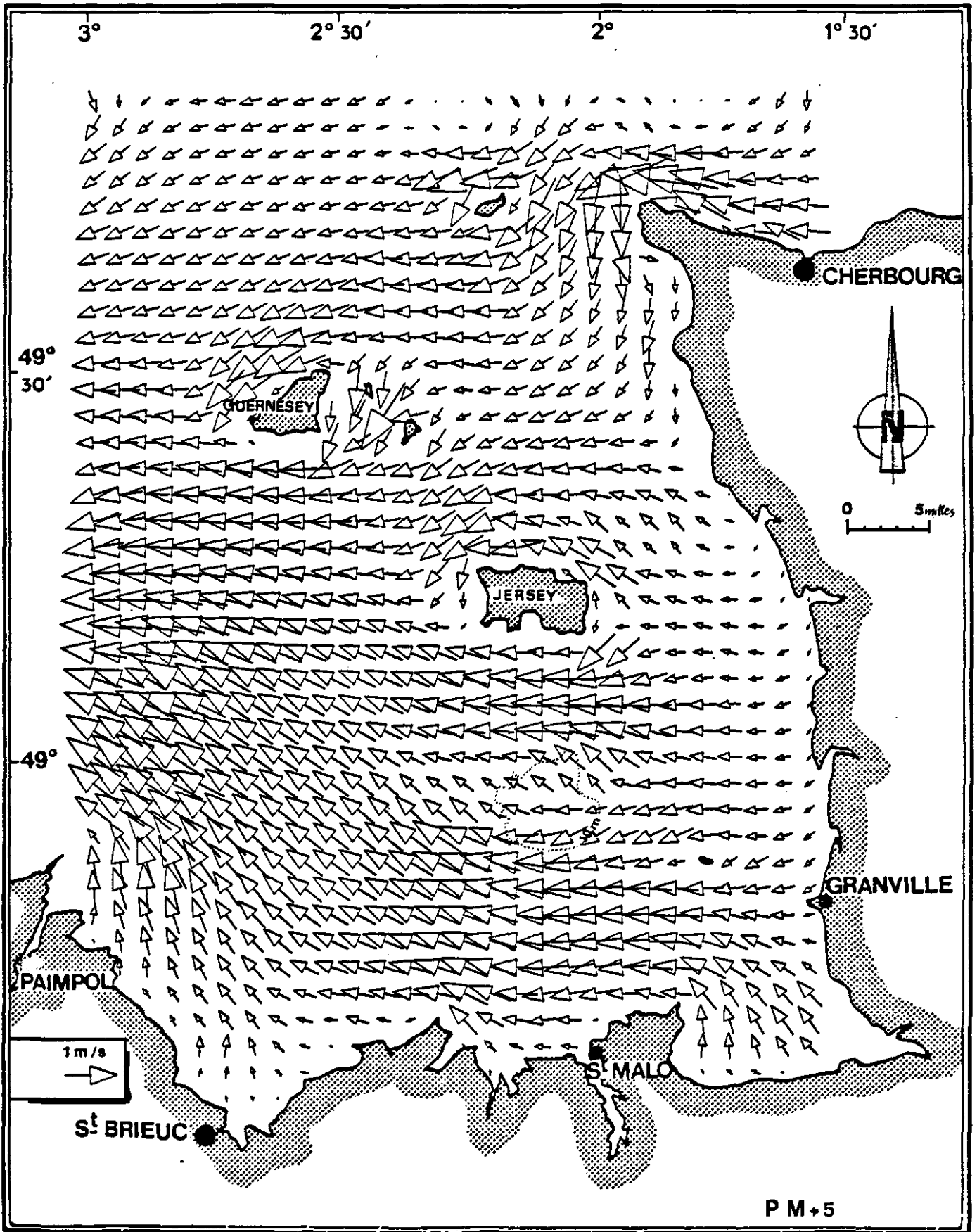


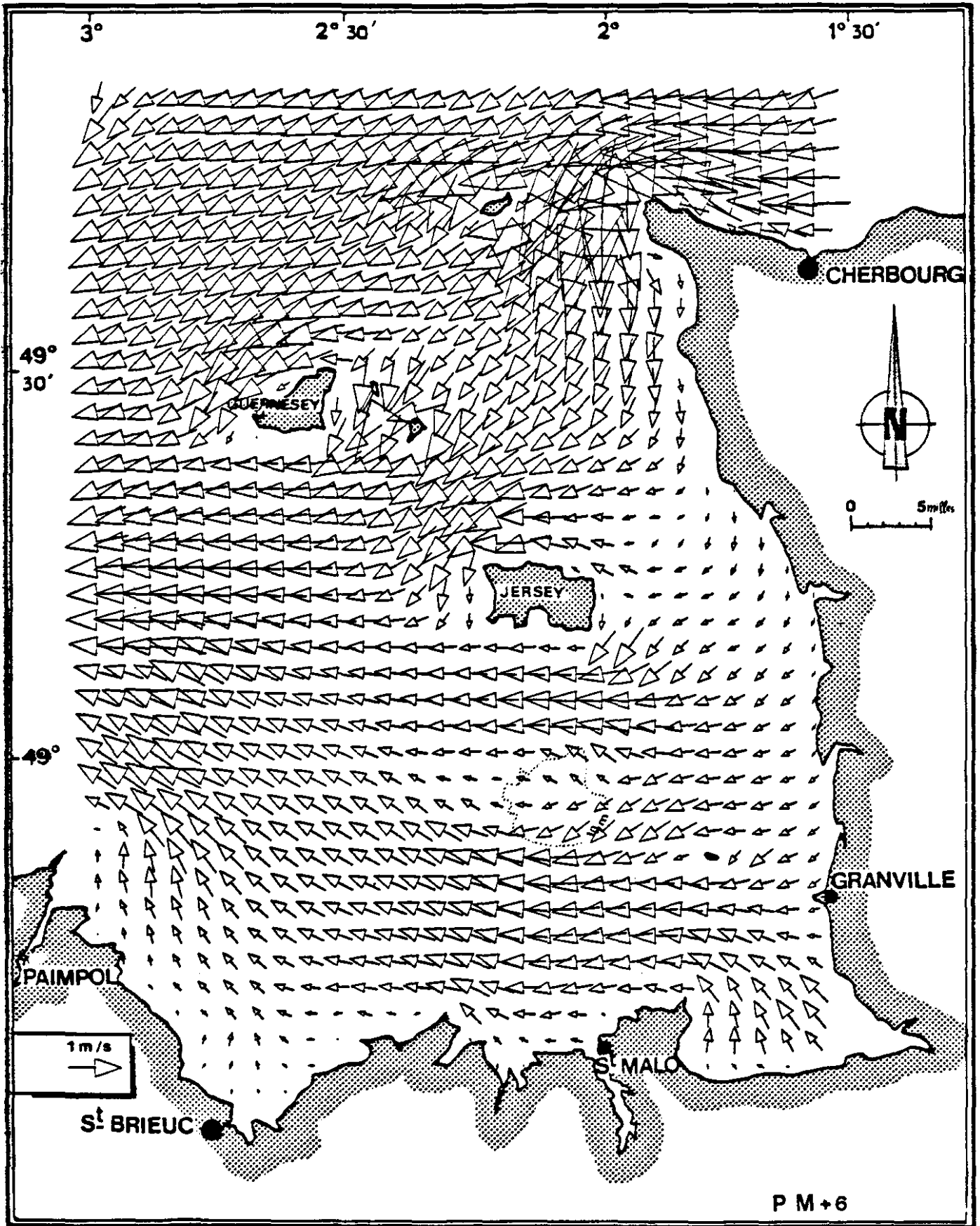






P M + 4





11-6-83 12 H T.U.

ANNEXE 4

MESURES DE COURANT FILTRES

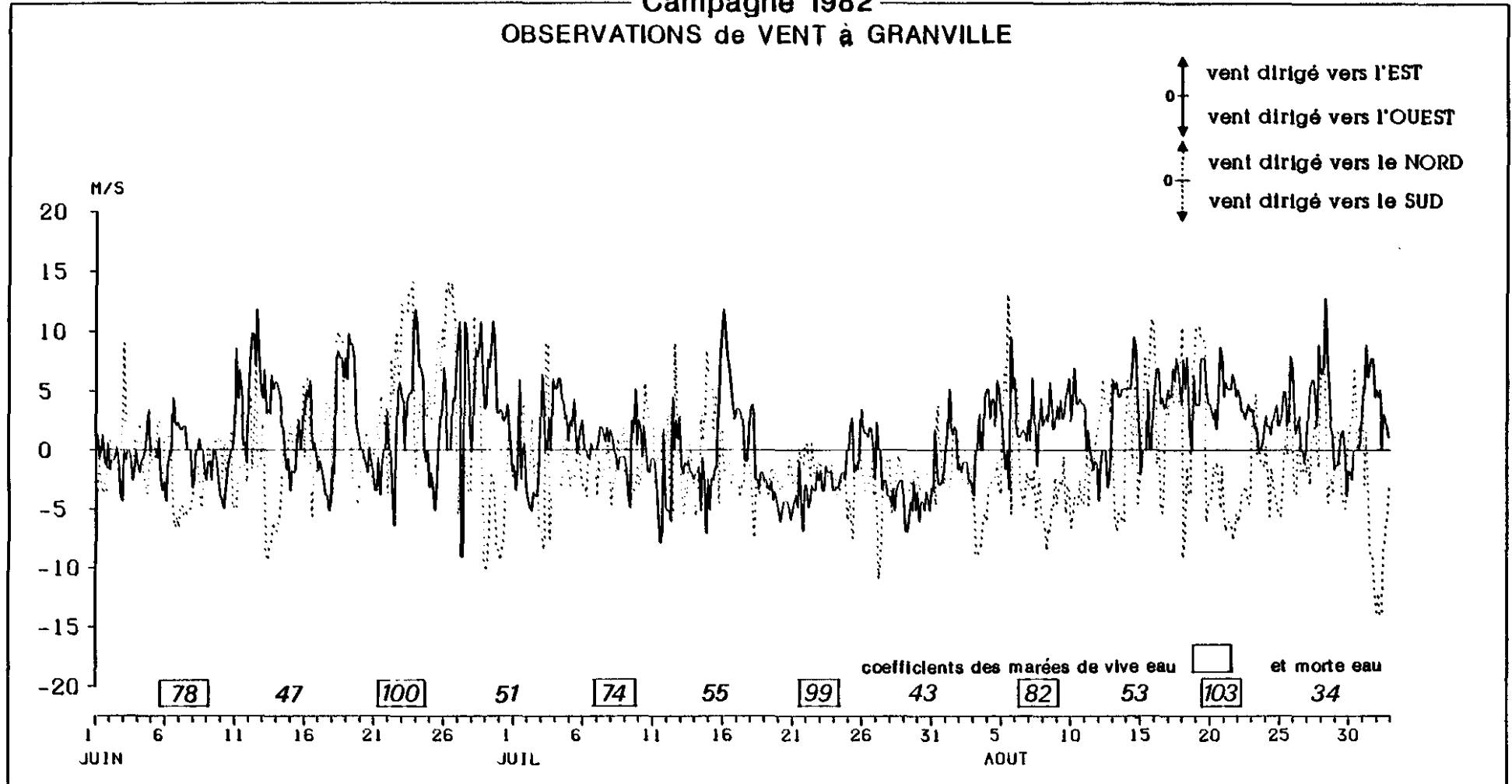
ENREGISTREMENTS DE VENT

CAMPAGNES DE 1982, 1983 ET 1984

GOLFE NORMANO BRETON

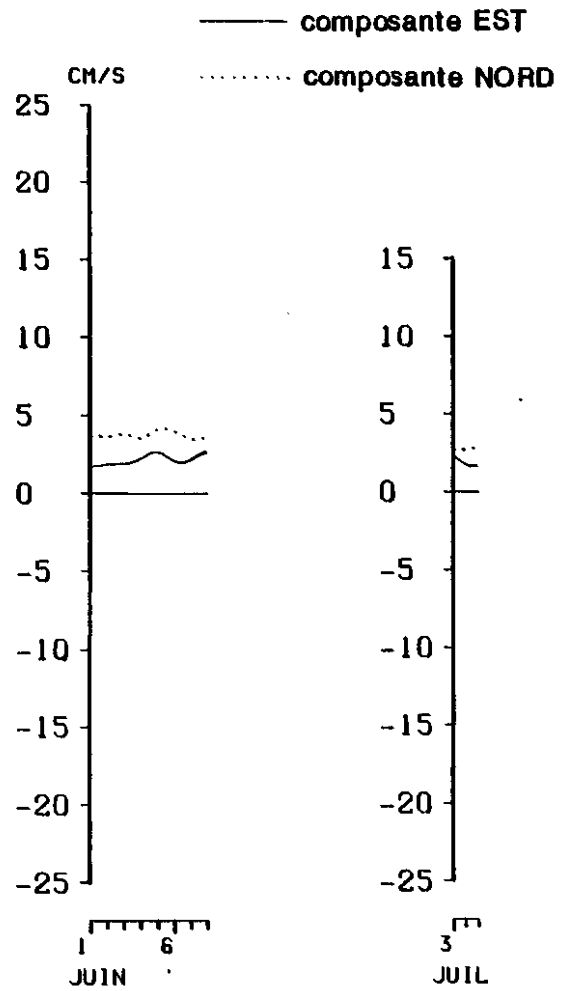
Campagne 1982

OBSERVATIONS de VENT à GRANVILLE

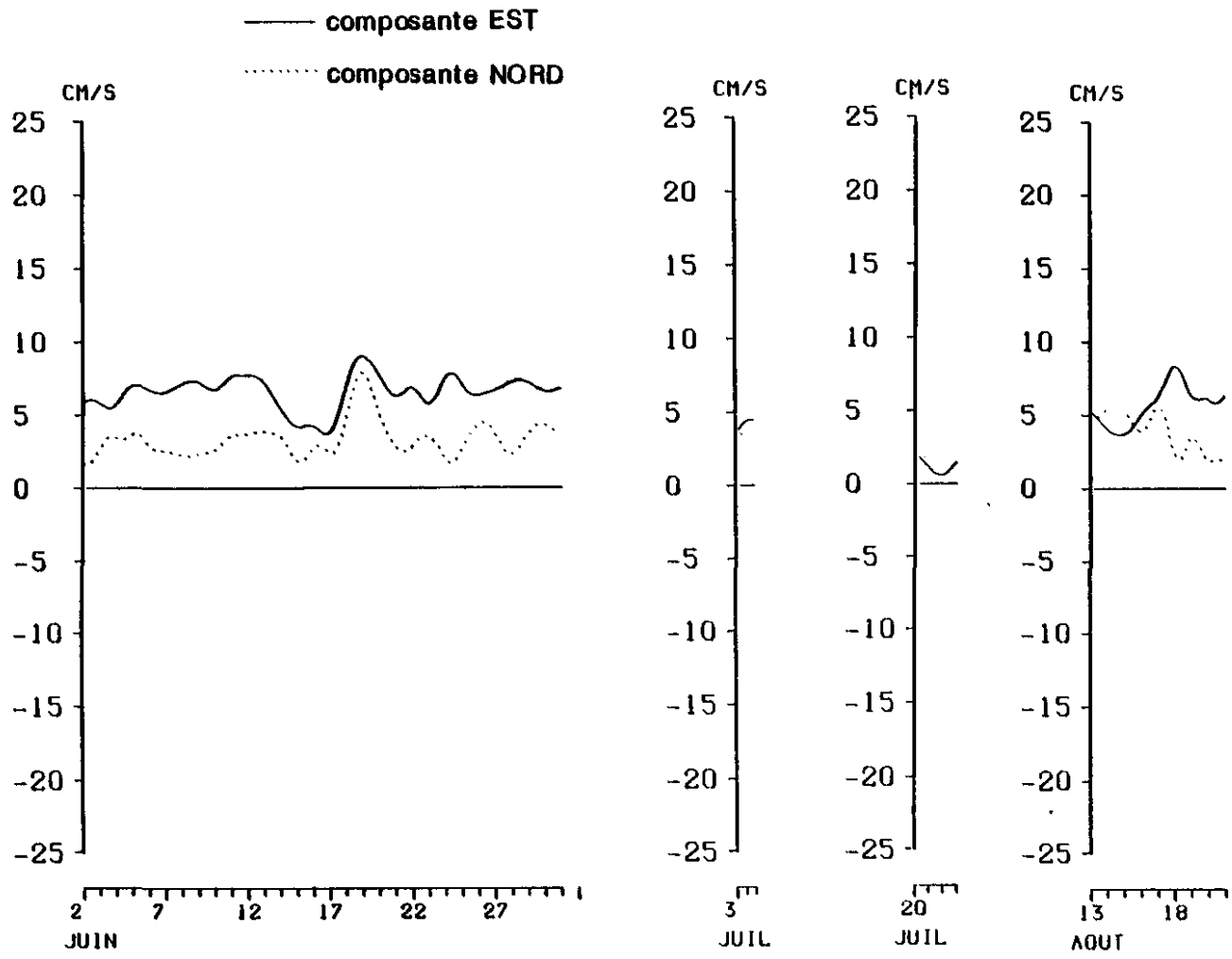


Données du Service de Climatologie Marine -MÉTÉOROLOGIE NATIONALE-

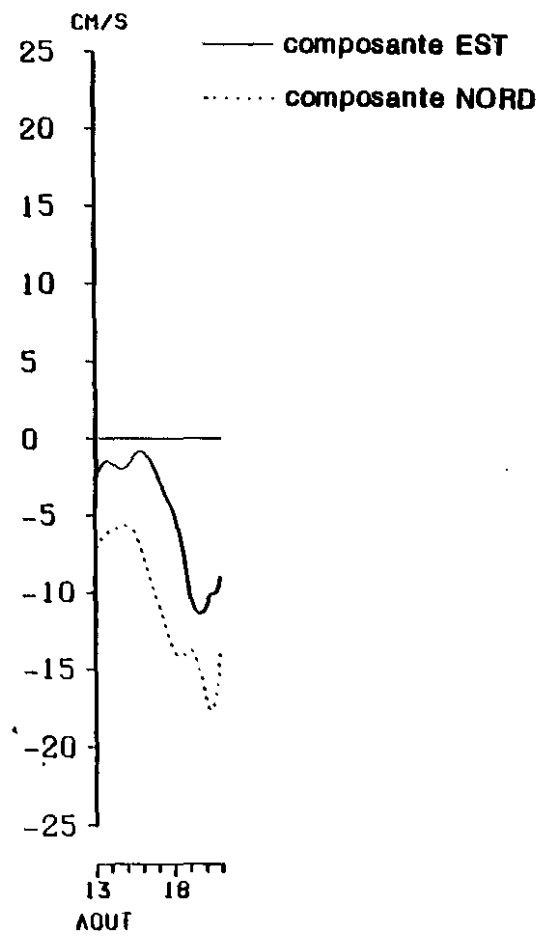
Golfe Normano-Breton campagne 1982
mesure de courant au POINT 1 Sub-SURFACE (maree filtrée)



Golfe Normano-Breton campagne 1982
mesure de courant au POINT 2 SURFACE (marée filtrée)



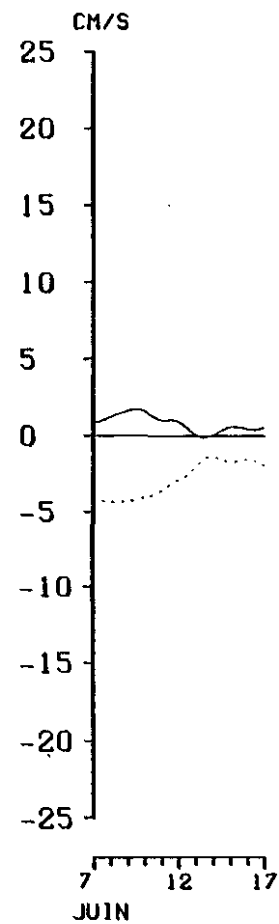
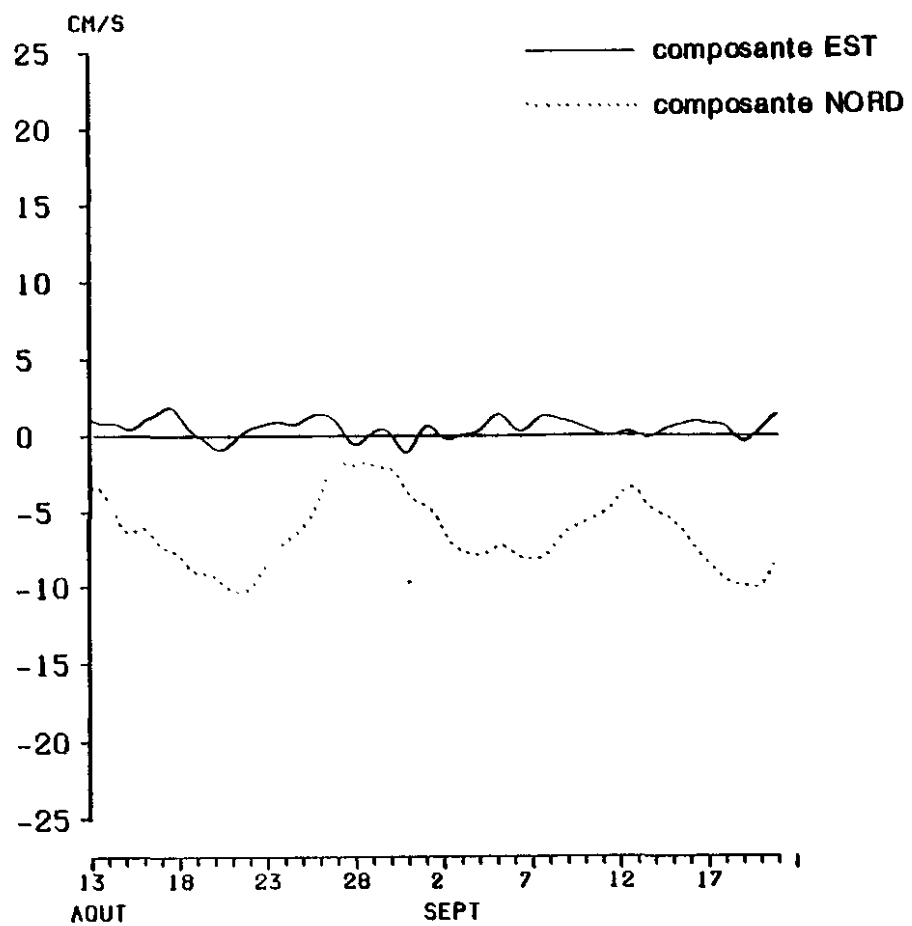
Golfe Normano-Breton campagne 1982
mesure de courant au POINT 3 SURFACE (marée filtrée)



Golfe Normano-Breton campagne 1982
mesure de courant au POINT 4 (marée filtrée)

SURFACE

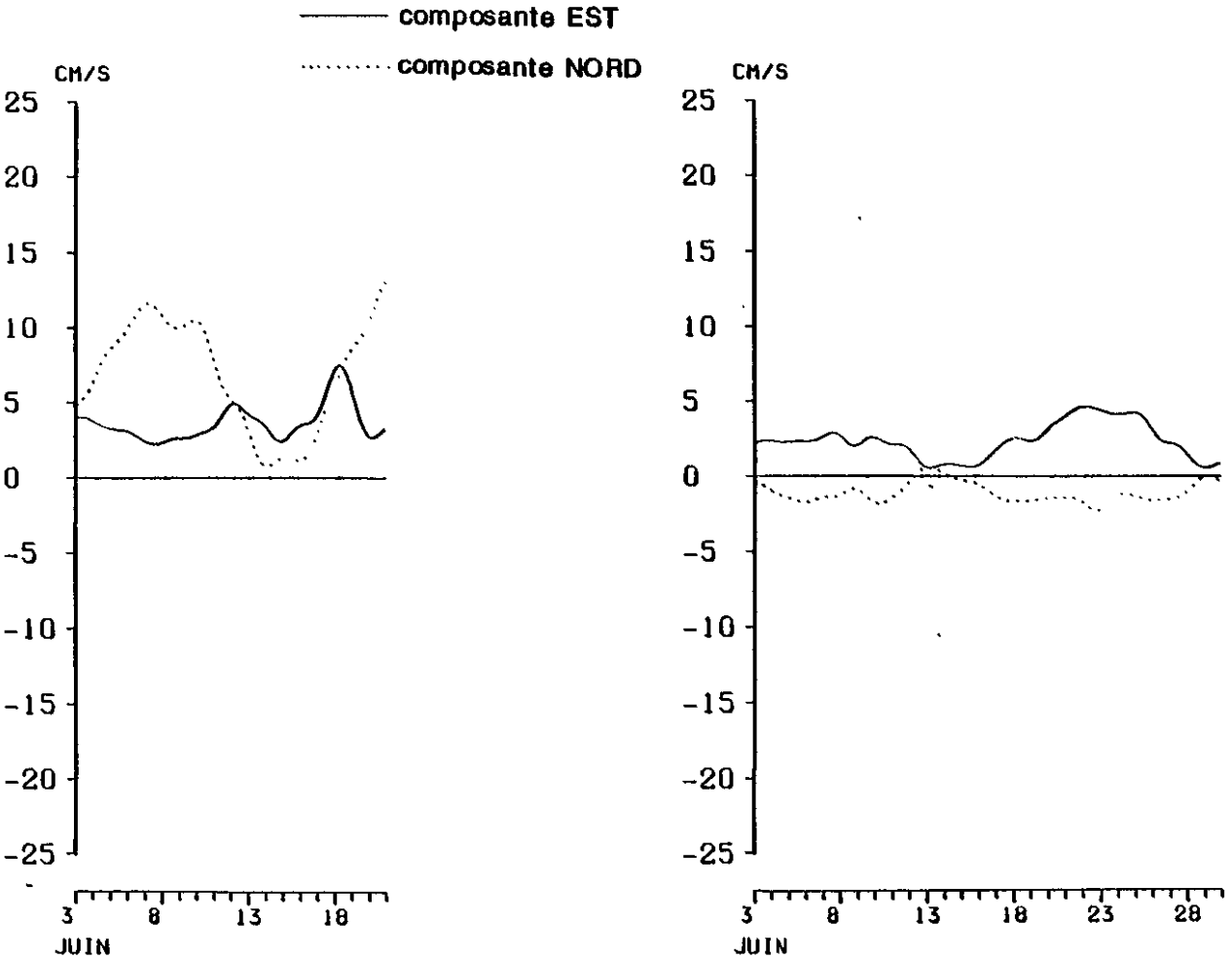
FOND



Golfe Normano-Breton campagne 1982
mesure de courant au POINT 5 (marée filtrée)

SURFACE

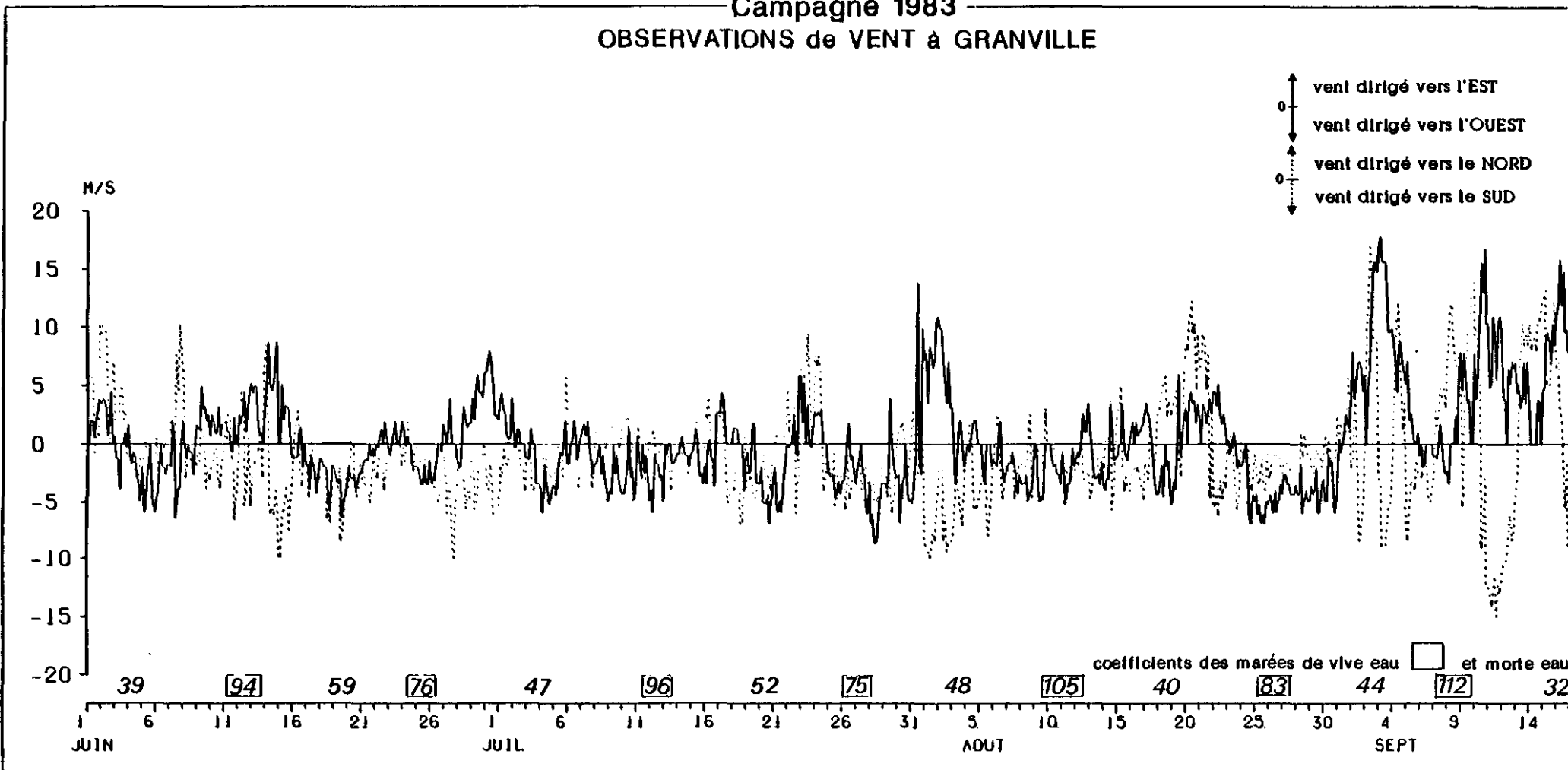
FOND



GOLFE NORMANO BRETON

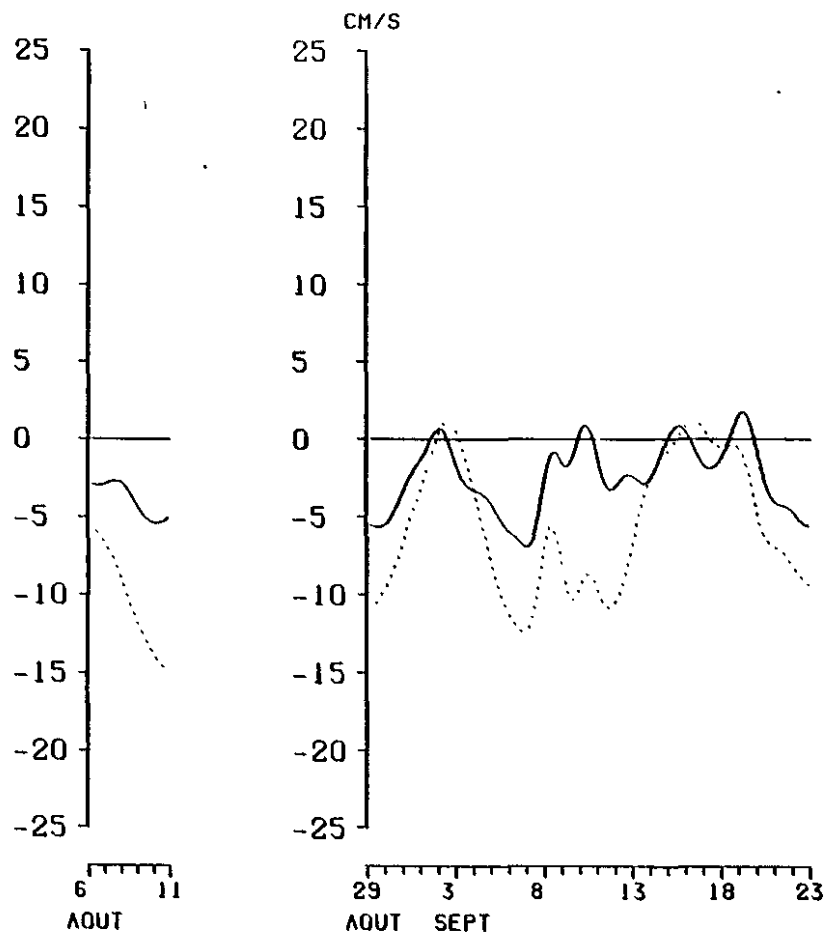
Campagne 1983

OBSERVATIONS de VENT à GRANVILLE



Golfe Normano-Breton campagne 1983
mesure de courant au POINT 4 SURFACE (marée filtrée)

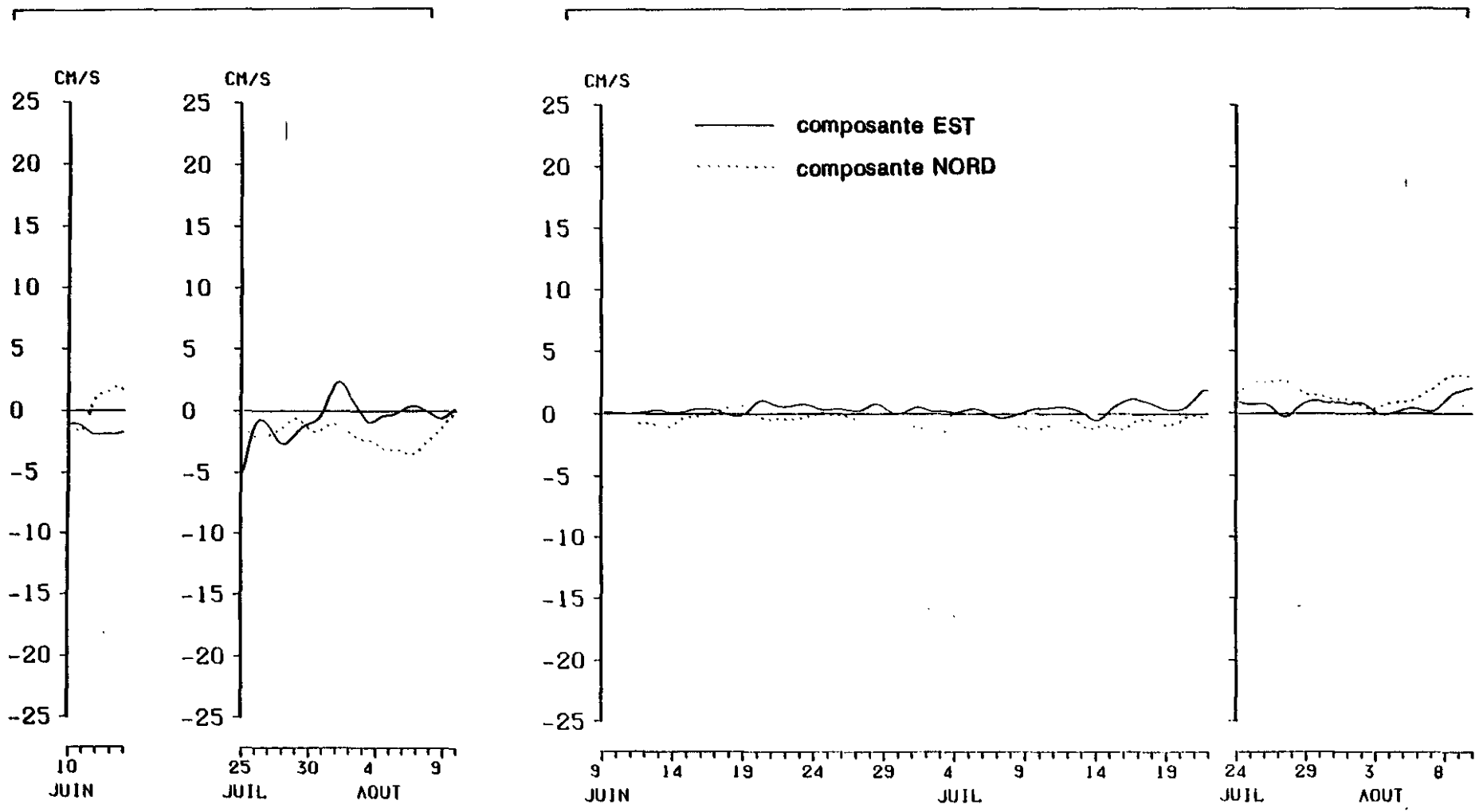
— composante EST
..... composante NORD



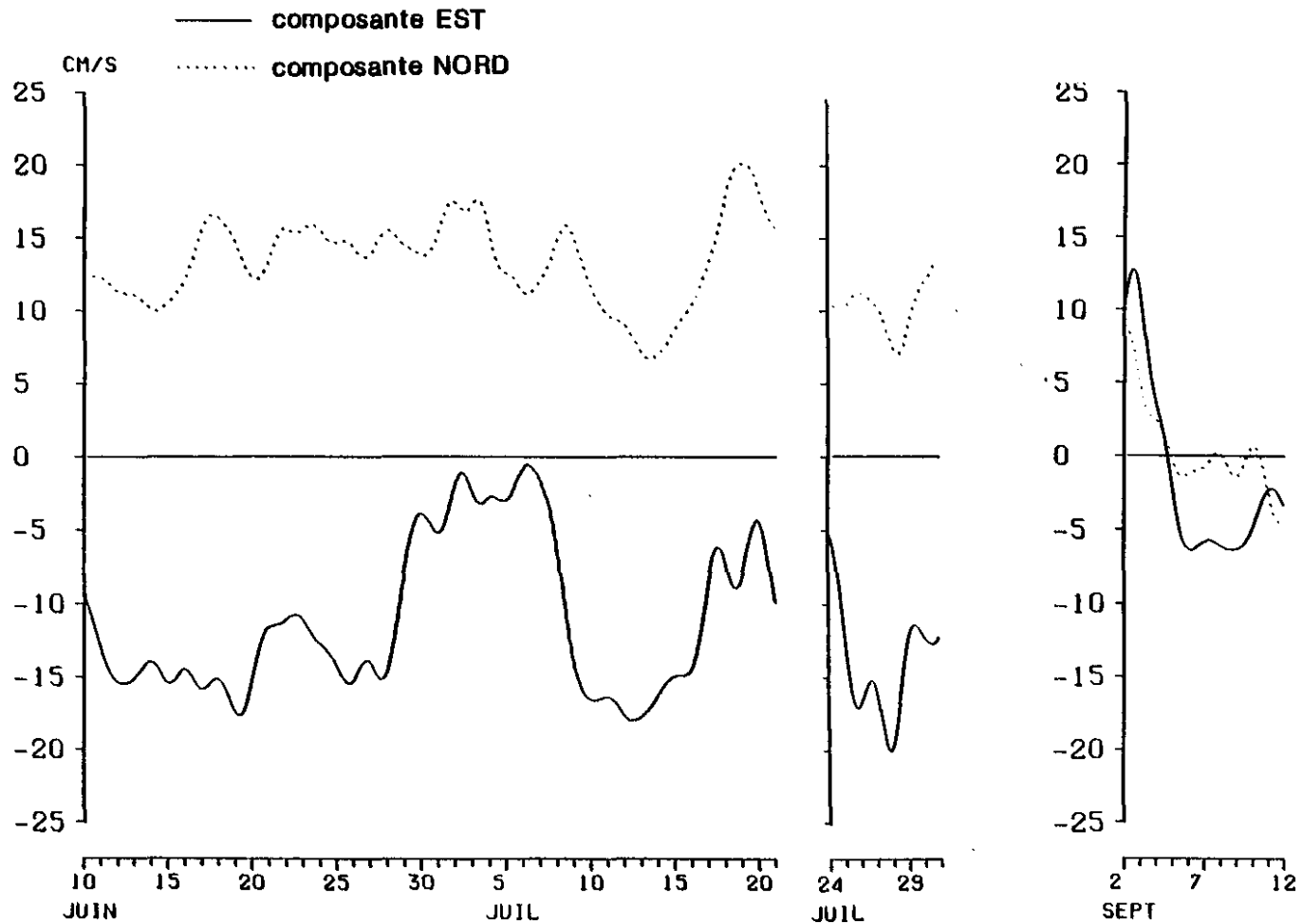
Golfe Normano-Breton campagne 1983
mesure de courant au POINT 5 (marée filtrée)

SURFACE

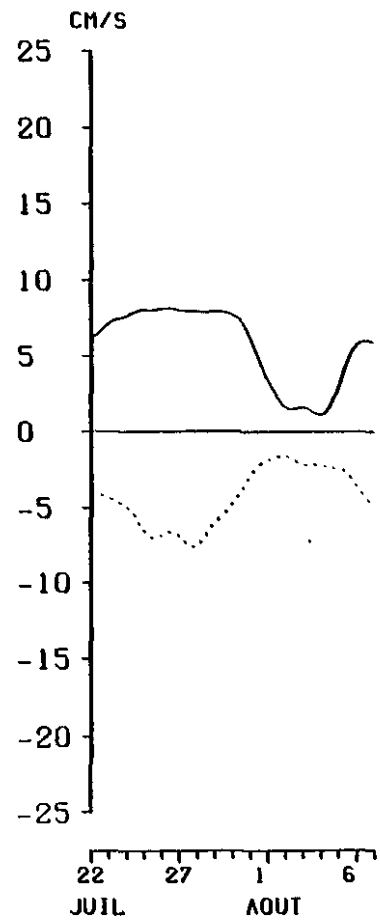
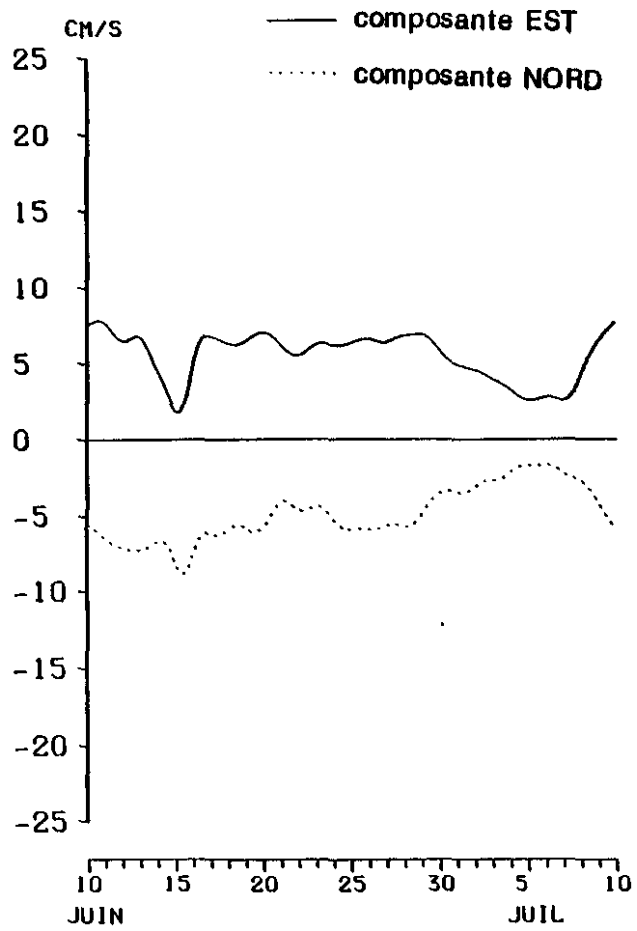
FOND



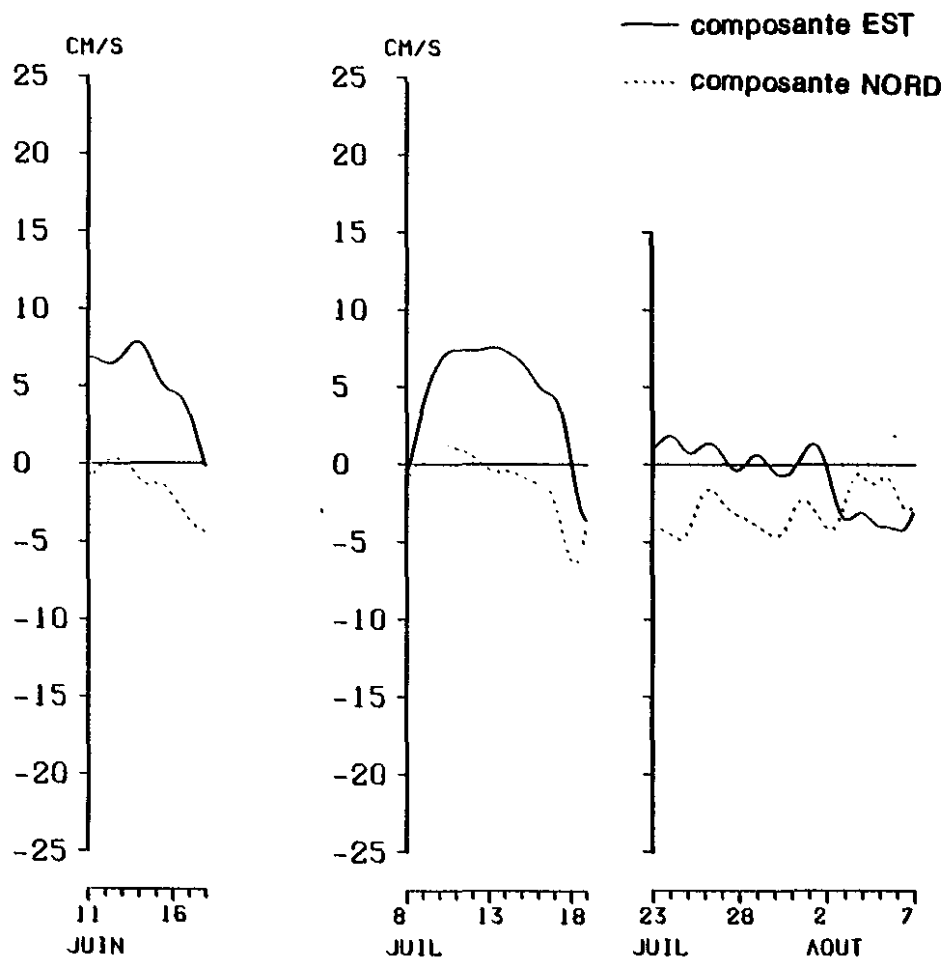
Golfe Normano-Breton campagne 1983
mesure de courant au POINT 6 SURFACE (marée filtrée)



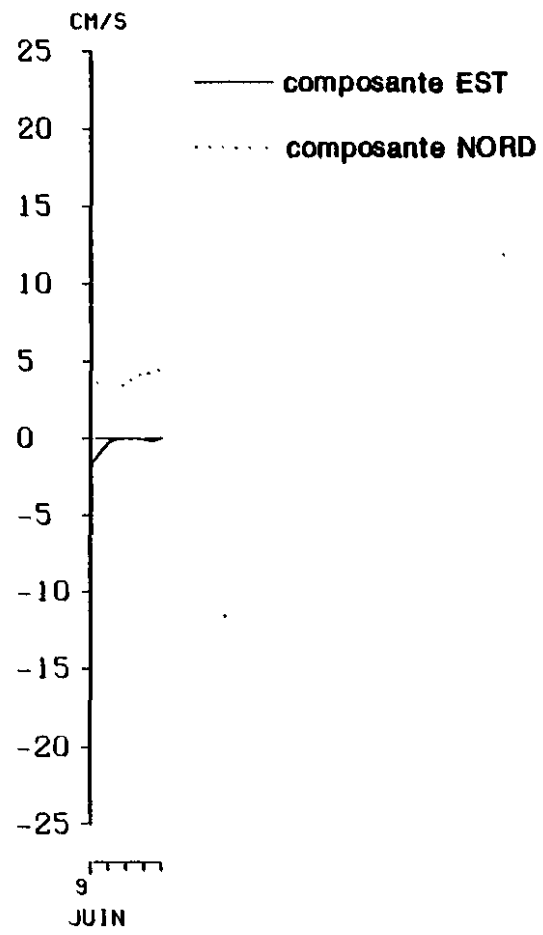
Golfe Normano-Breton campagne 1983
mesure de courant au POINT 6 FOND (marée filtrée)



Golfe Normano-Breton campagne 1983
mesure de courant au POINT 7 SURFACE (marée filtrée)

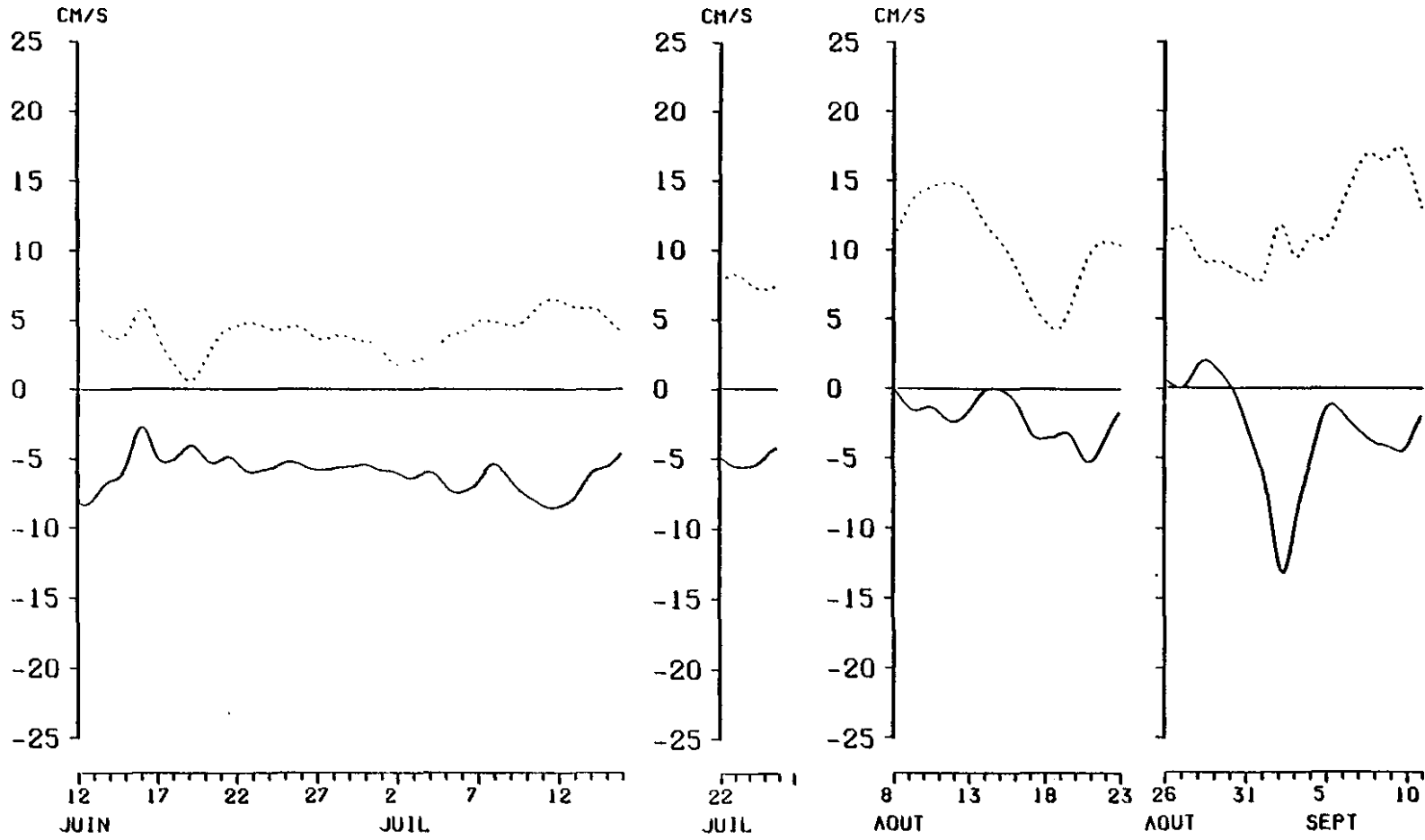


Golfe Normano-Breton campagne 1983
mesure de courant au POINT 8 SURFACE (marée filtrée)

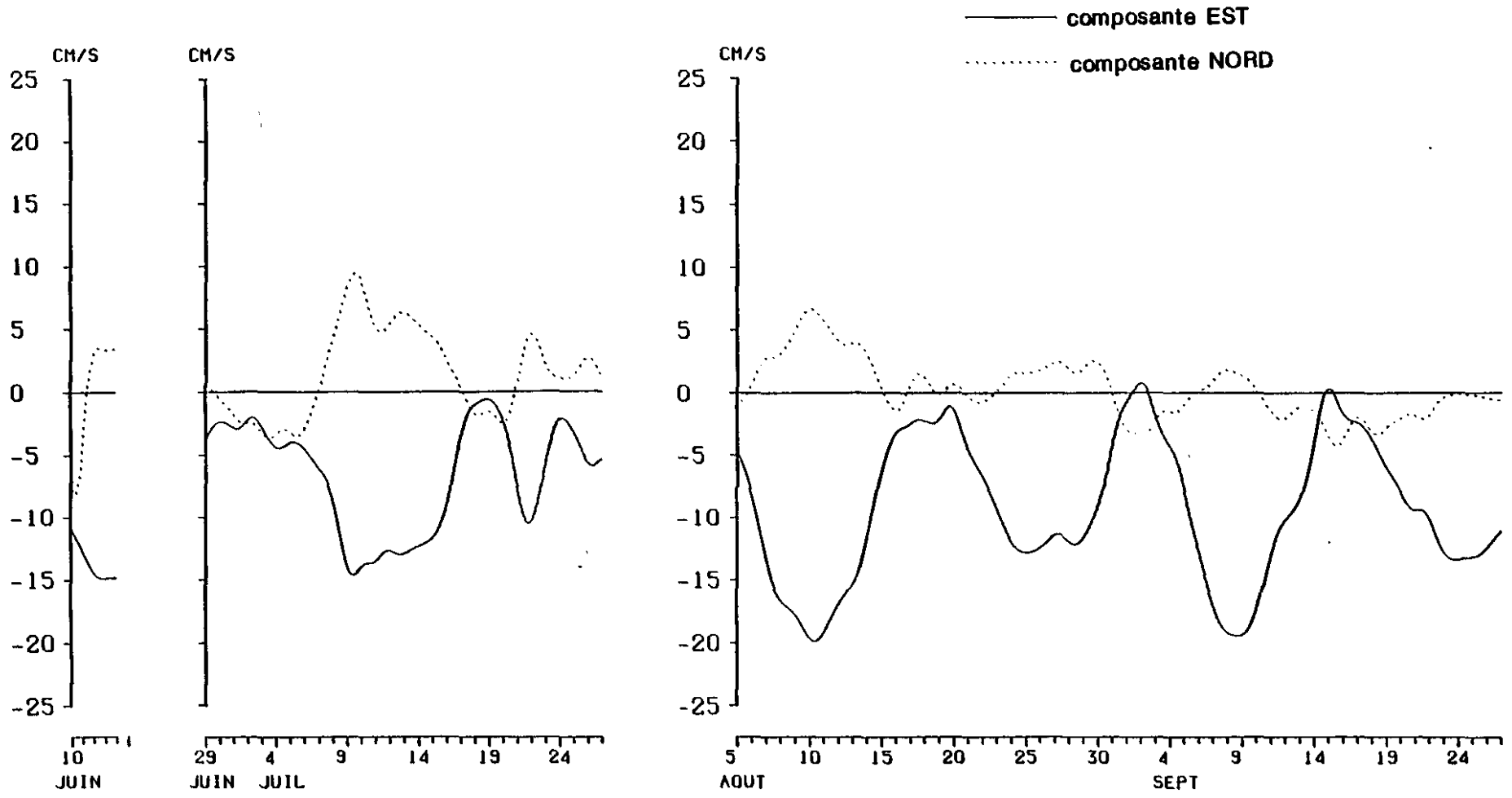


Golfe Normano-Breton campagne 1983
mesure de courant au POINT 9 SURFACE (marée filtrée)

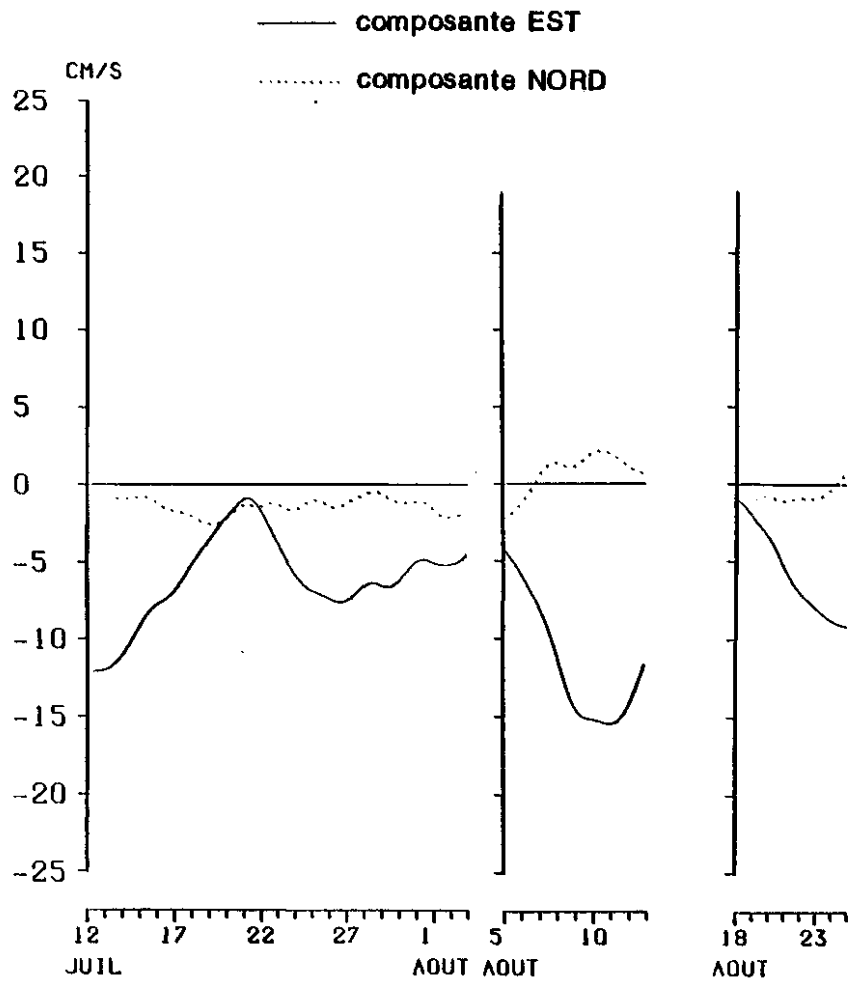
— composante EST
 composante NORD



Golfe Normano-Breton campagne 1983
mesure de courant au POINT 10 SURFACE (marée filtrée)



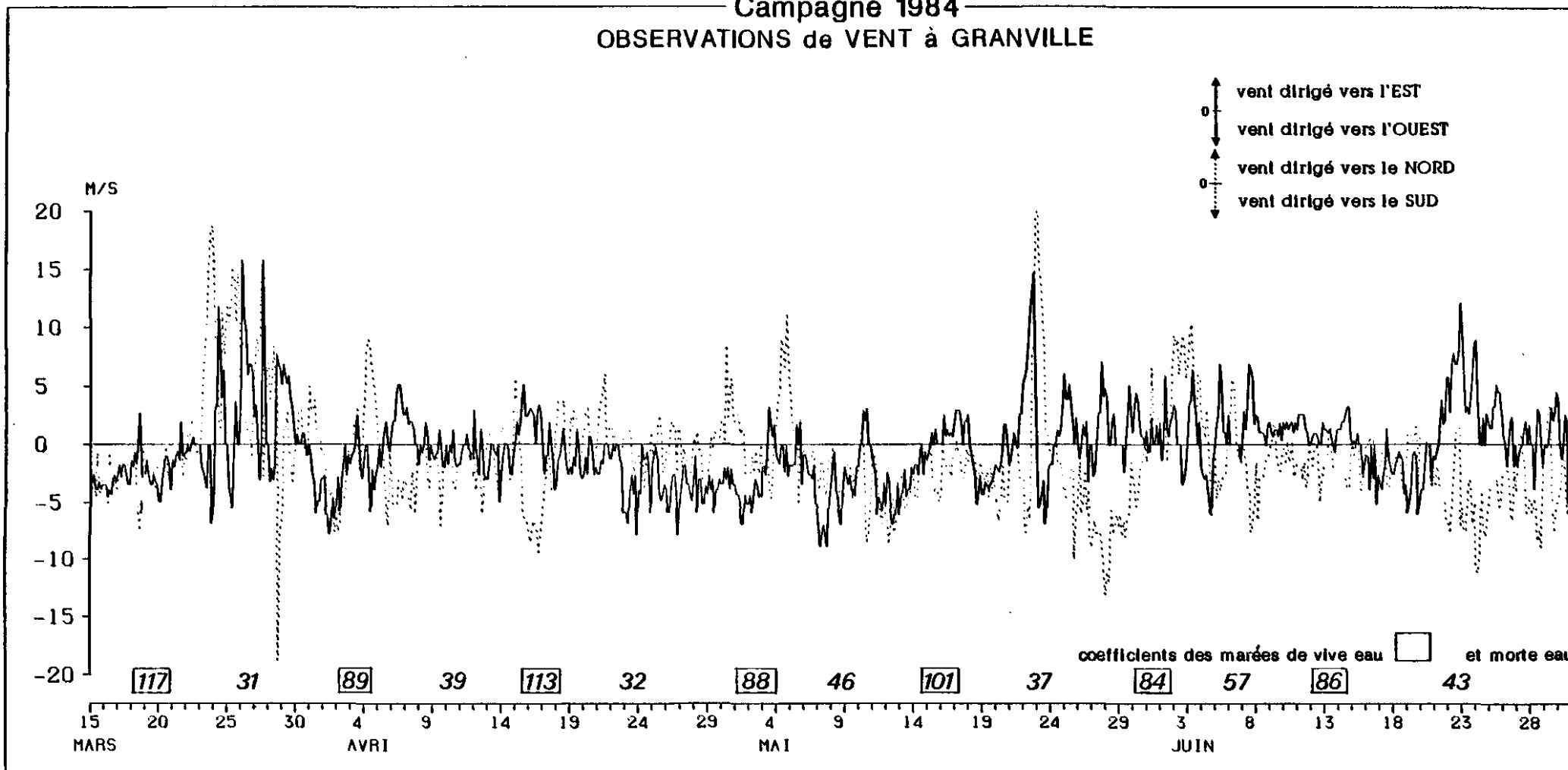
Golfe Normano-Breton campagne 1983
mesure de courant au POINT 10 FOND (marée filtrée)



GOLFE NORMANO BRETON

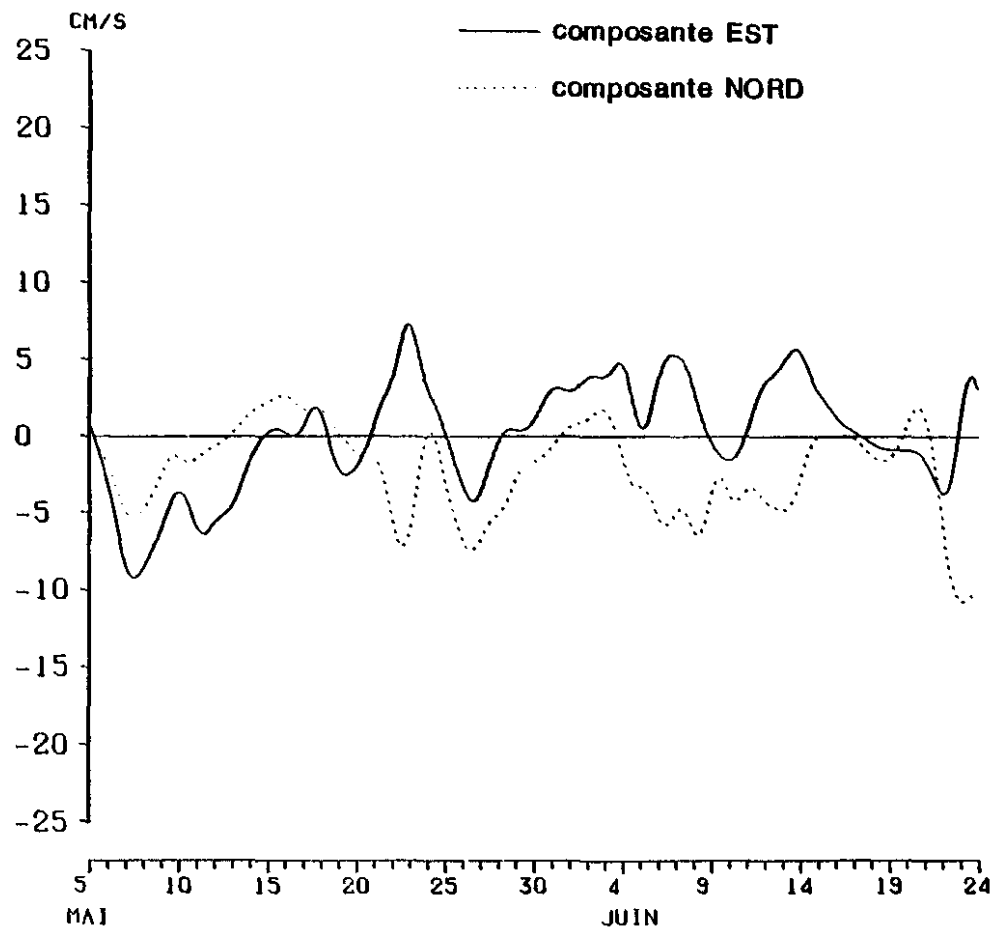
Campagne 1984

OBSERVATIONS de VENT à GRANVILLE

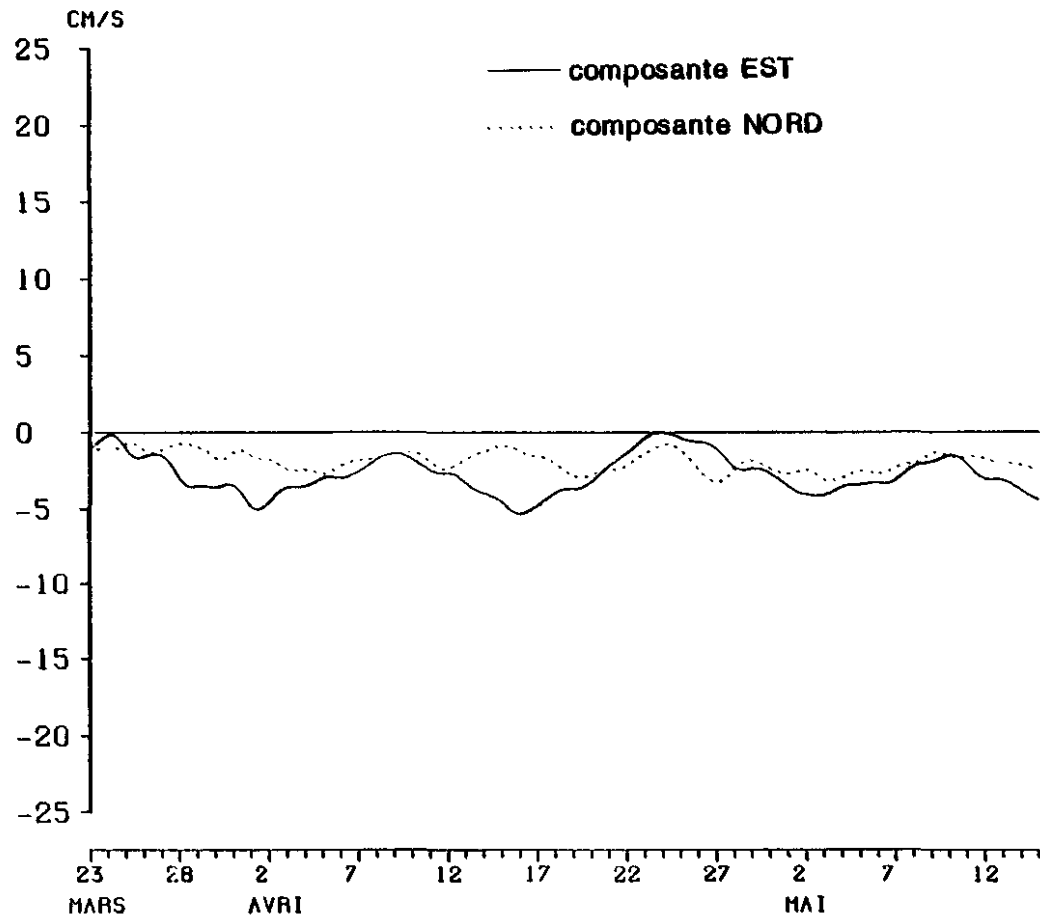


242

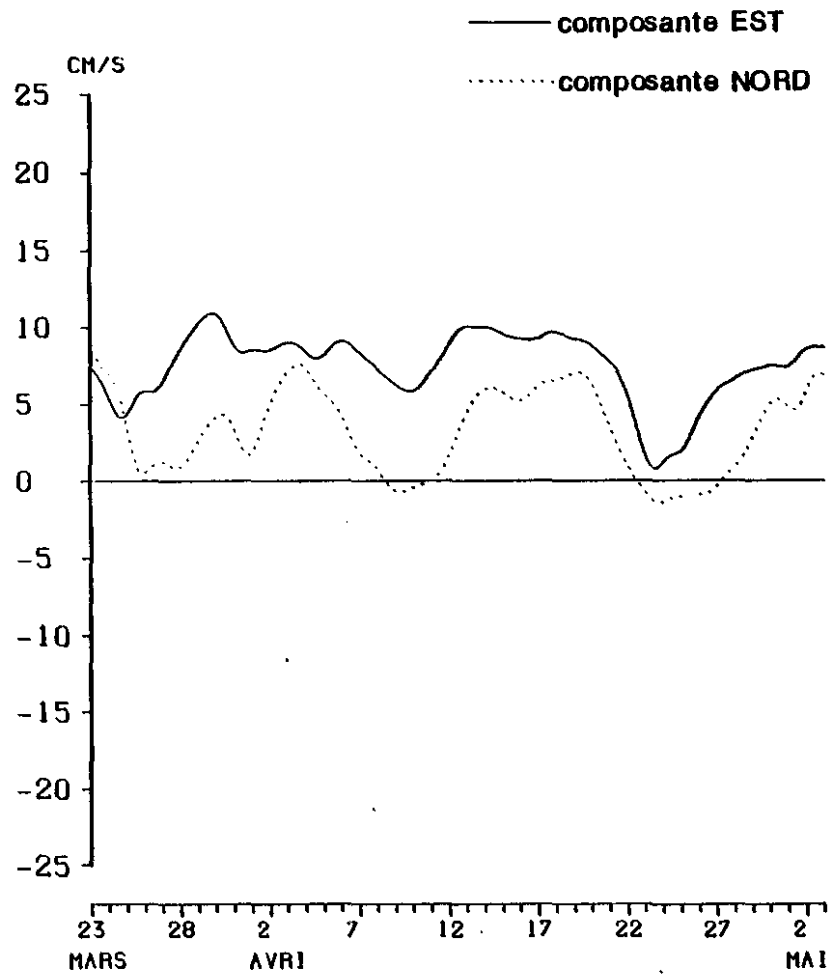
Golfe Normano-Breton campagne 1984
mesure de courant au POINT 11 SURFACE (marée filtrée)



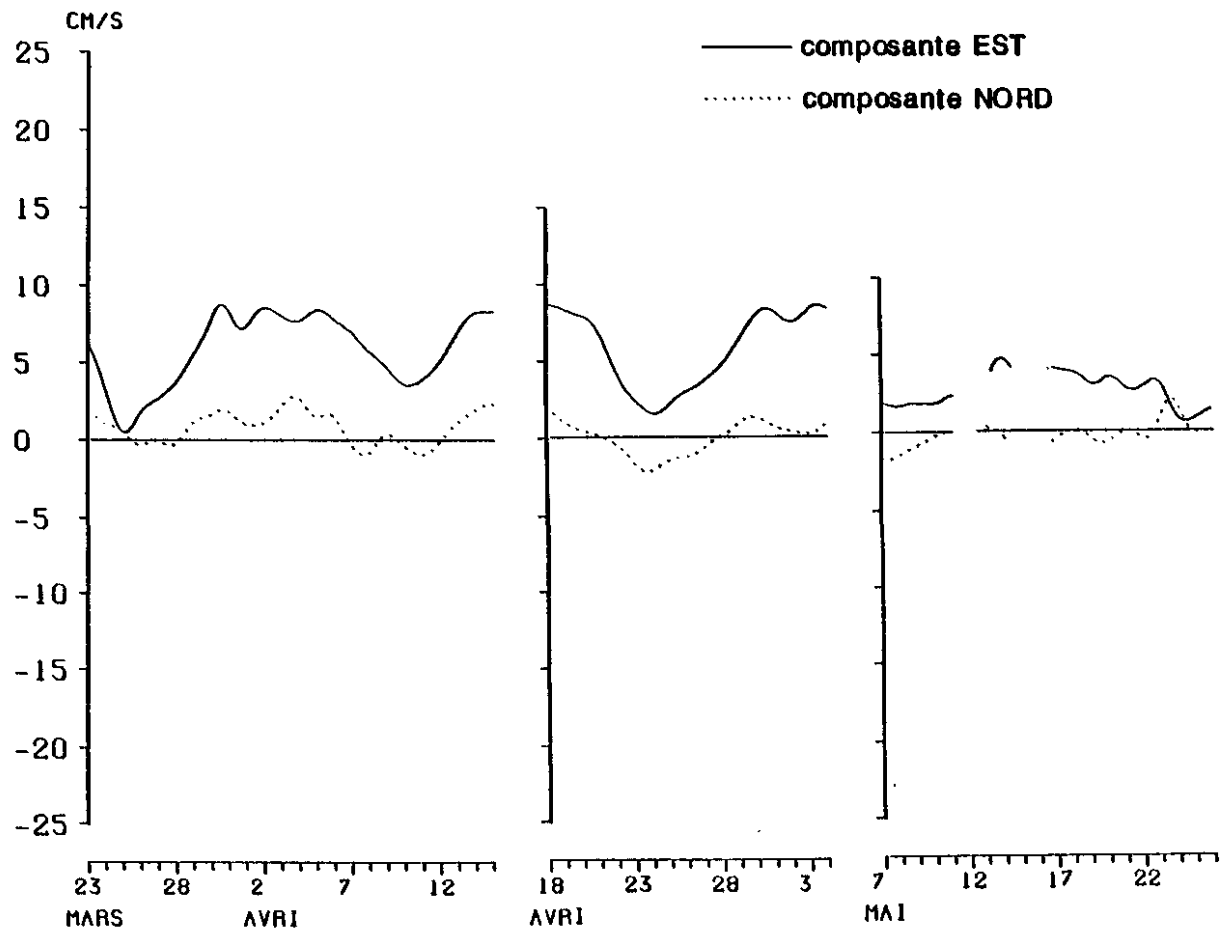
Golfe Normano-Breton campagne 1984
mesure de courant au POINT 11 FOND (marée filtrée)



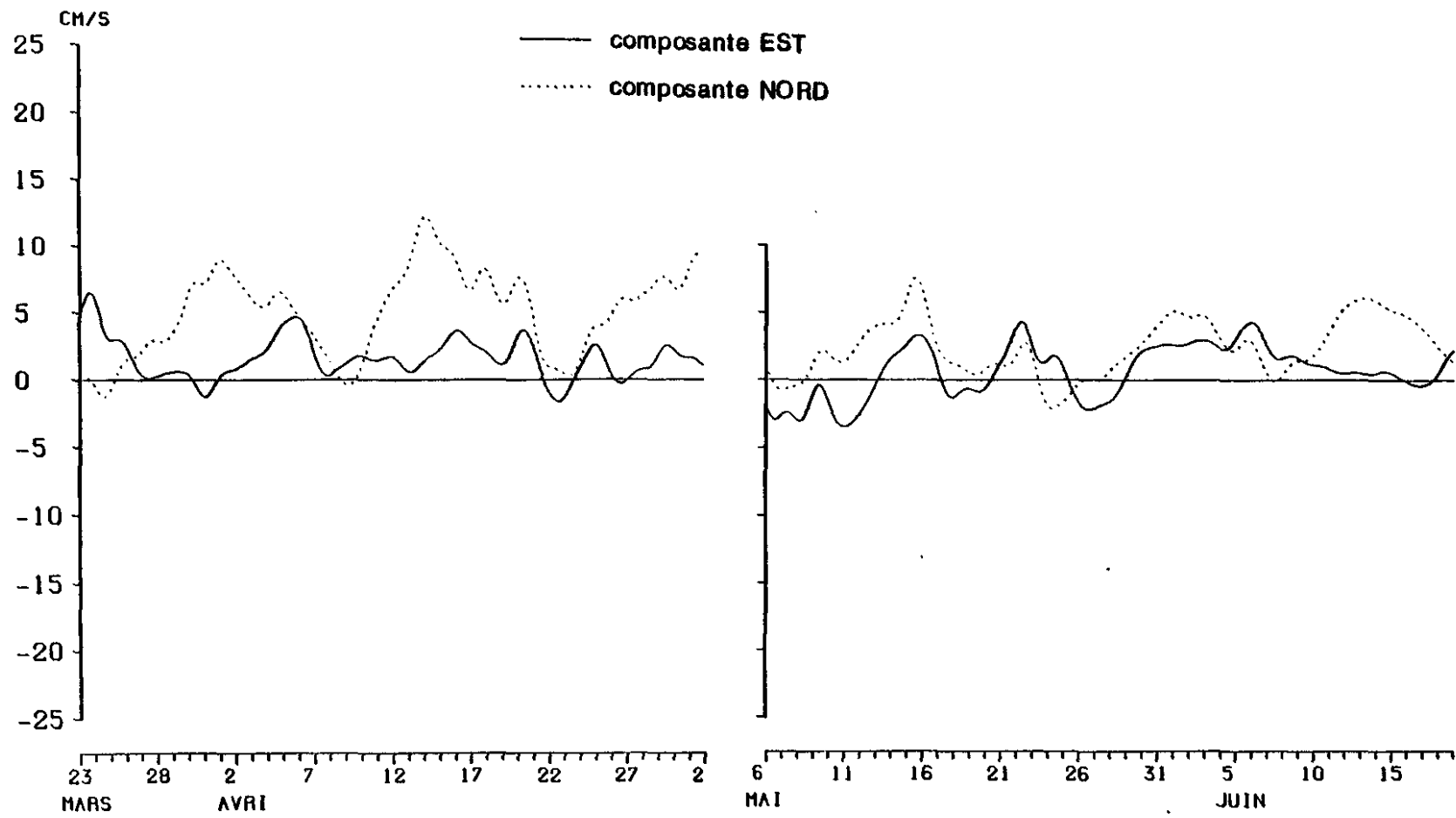
Golfe Normano-Breton campagne 1984
mesure de courant au POINT 12 SURFACE (marée filtrée)



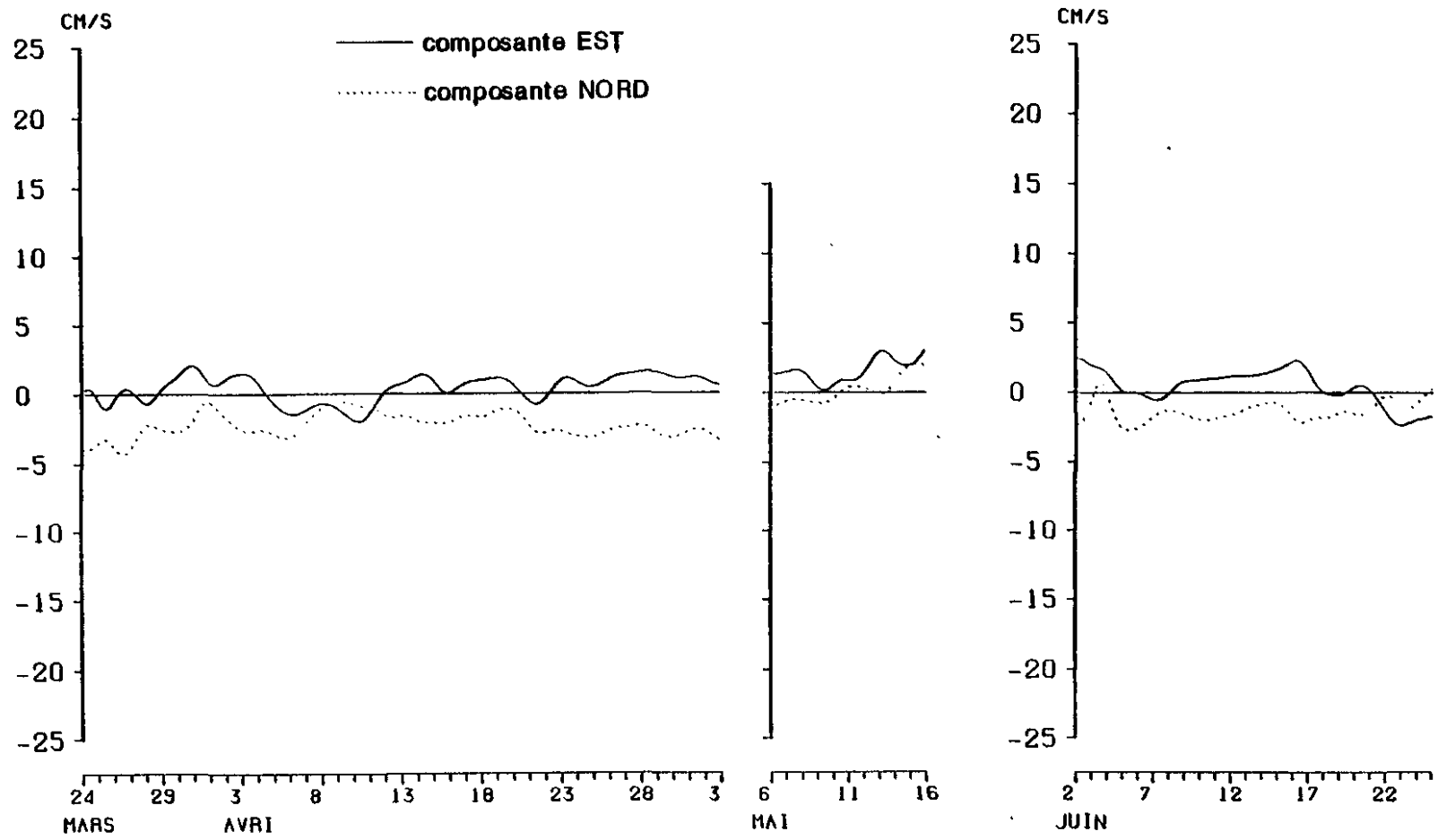
Golfe Normano-Breton campagne 1984
mesure de courant au POINT 12 FOND (marée filtrée)



Golfe Normano-Breton campagne 1984
mesure de courant au POINT 13 SURFACE (marée filtrée)



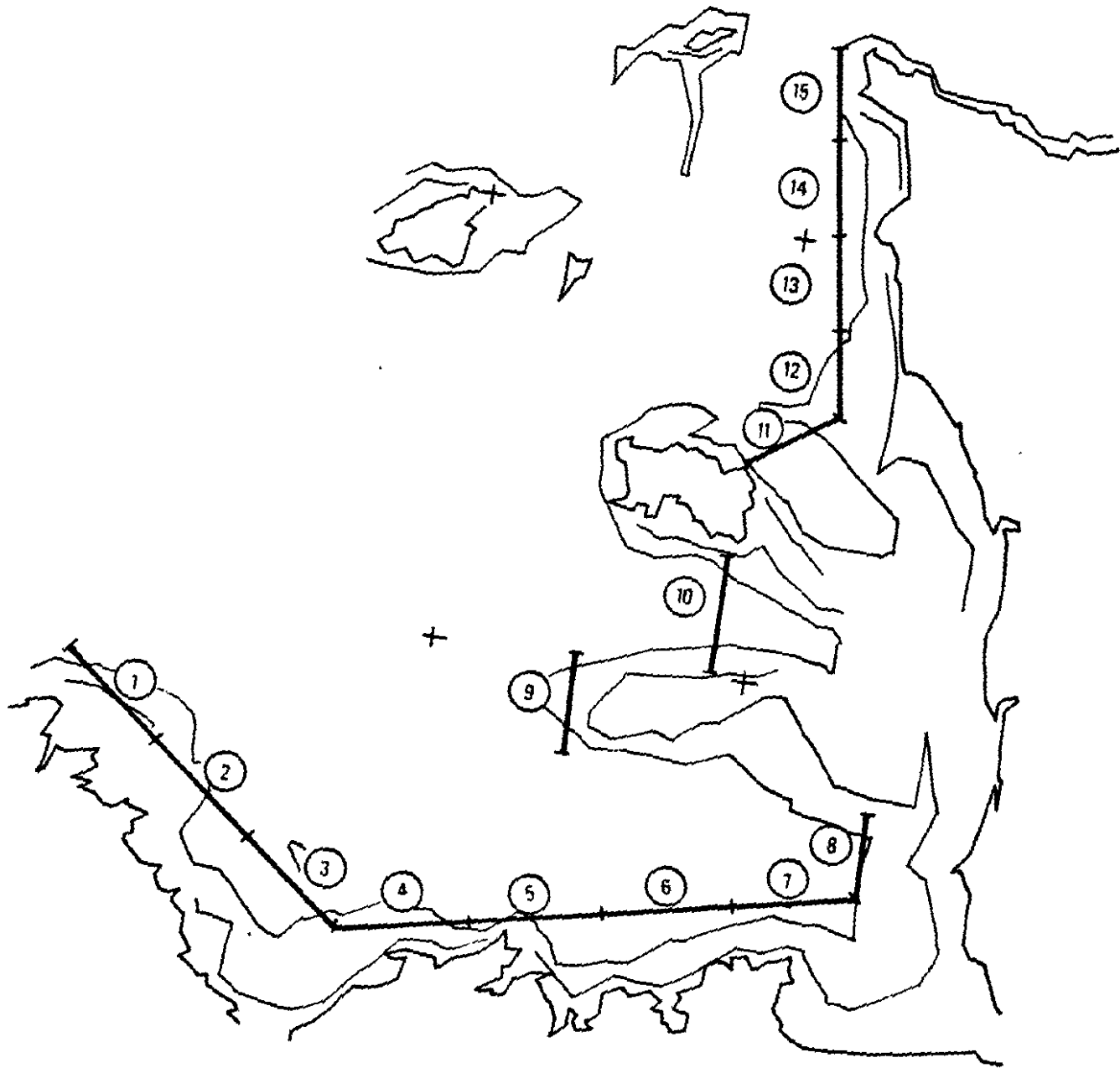
Golfe Normano-Breton campagne 1984
mesure de courant au POINT 13 FOND (marée filtrée)



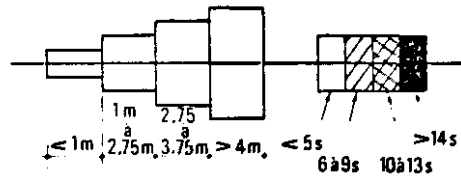
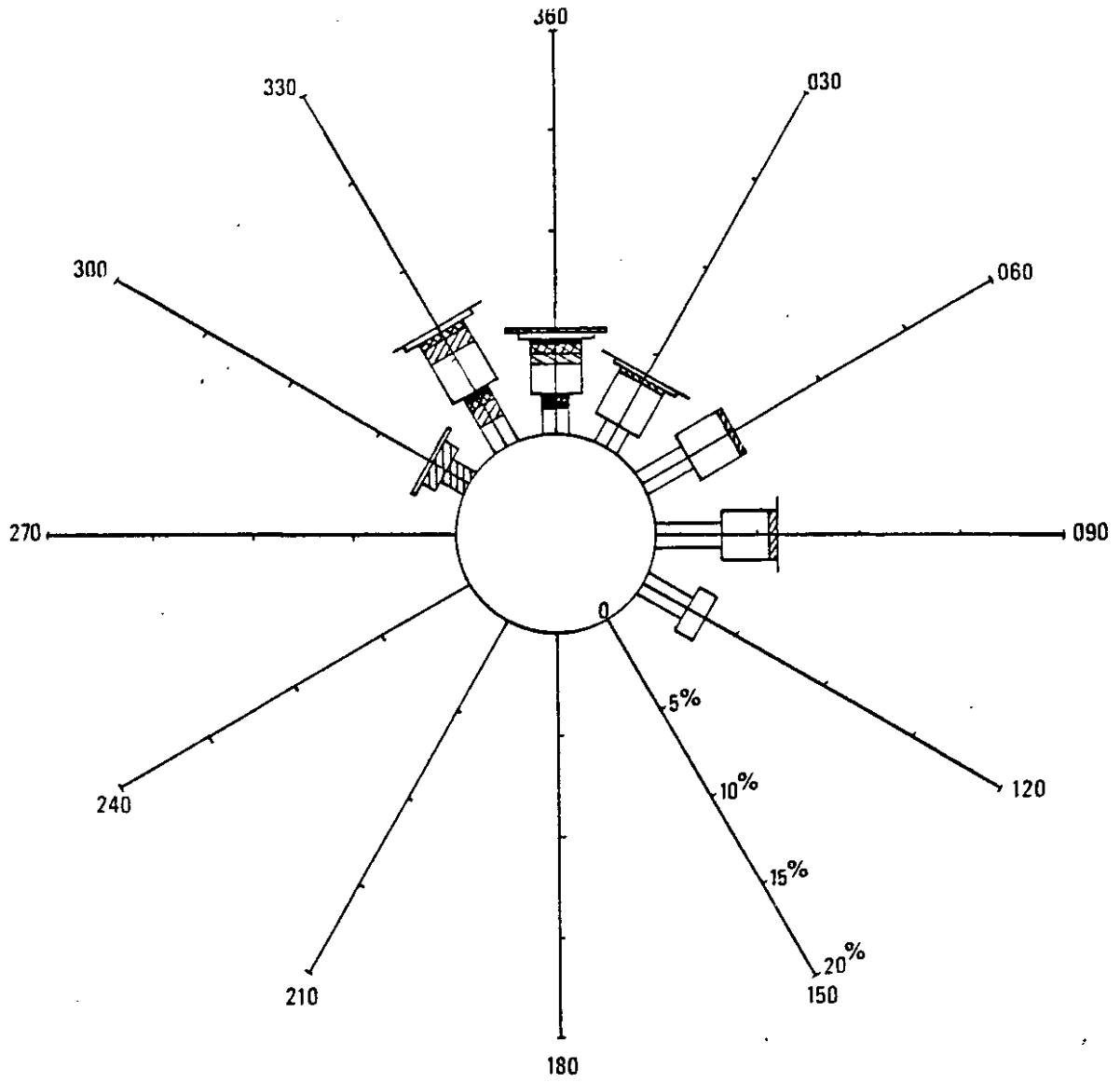
ANNEXE 5

ROSES D'AGITATION EN DIVERS SITES DU GOLFE NORMANO-BRETON

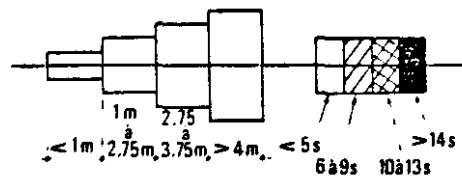
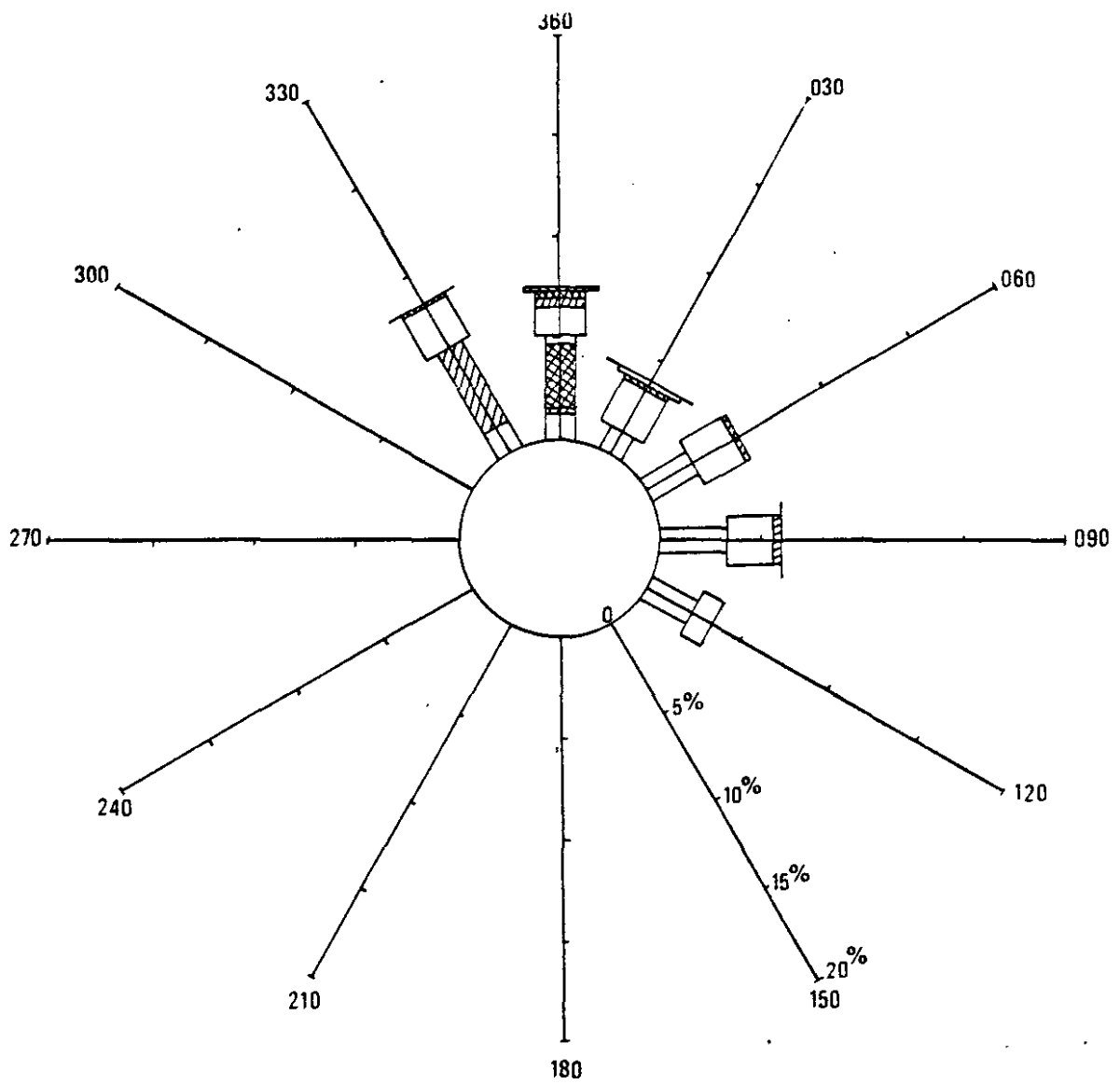
(d'après L.C.H.F., 1984)



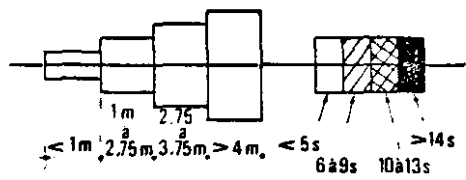
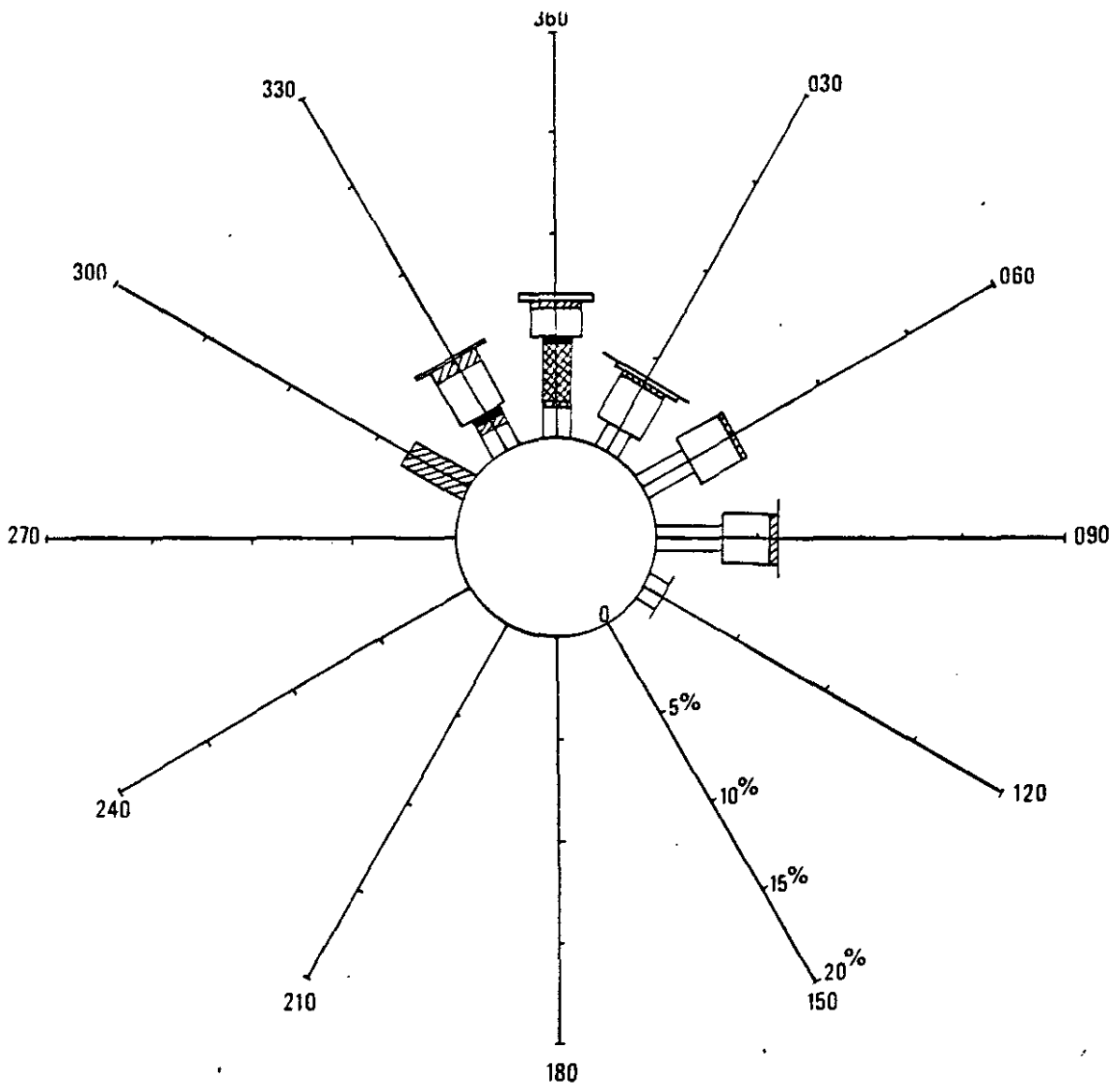
Découpage des zones cotières



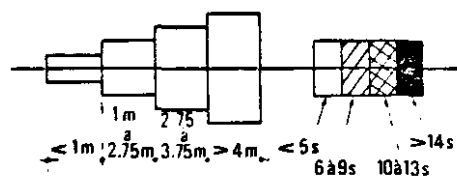
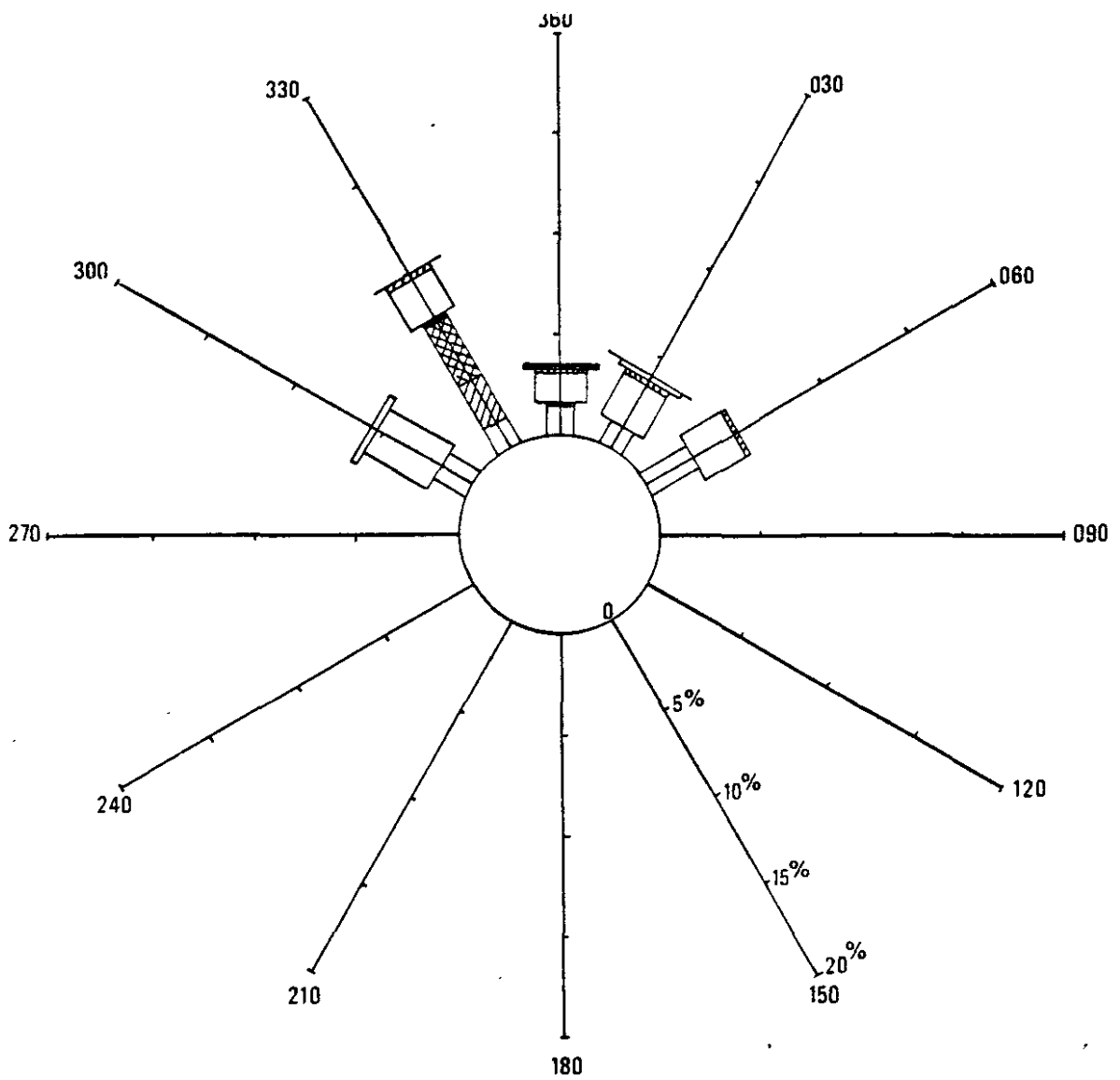
Zone 1 Rose des agitations



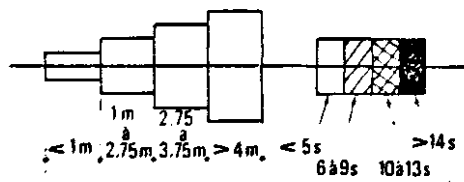
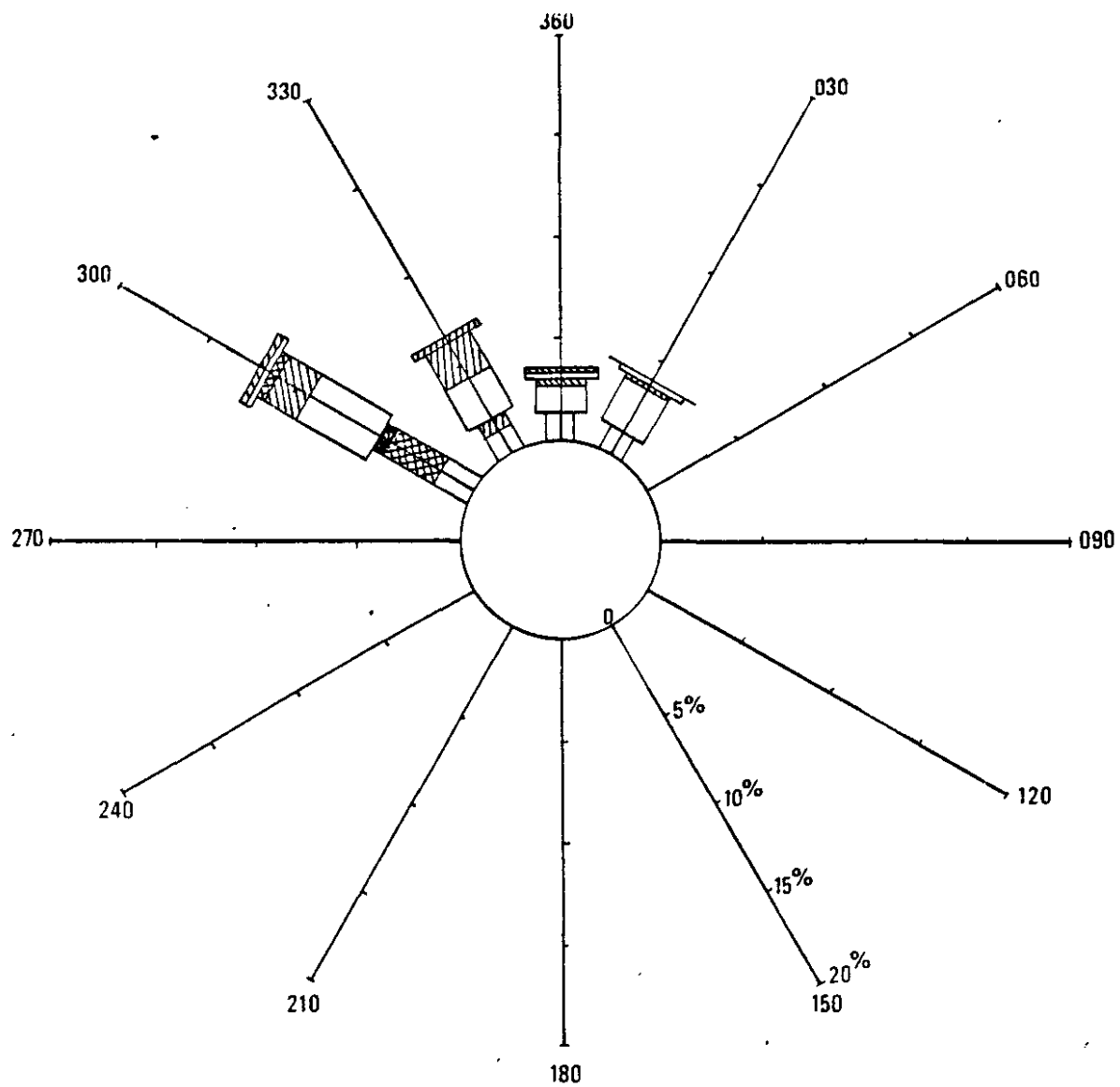
Zone 2 Rose des agitations



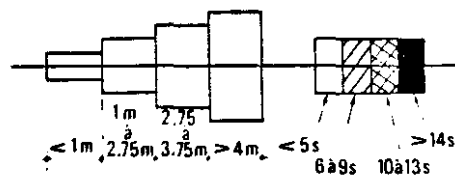
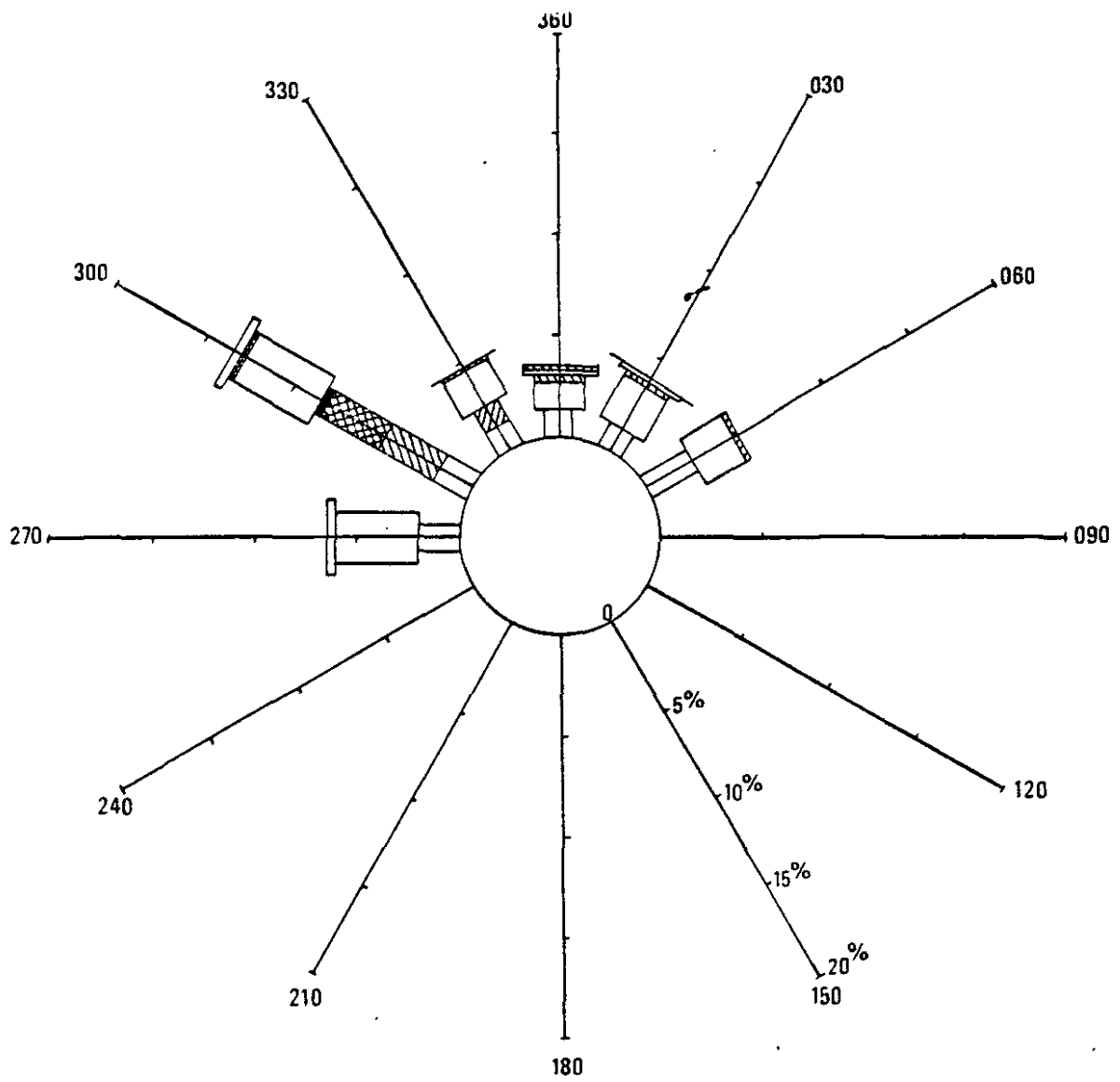
Zone 3 Rose des agitations



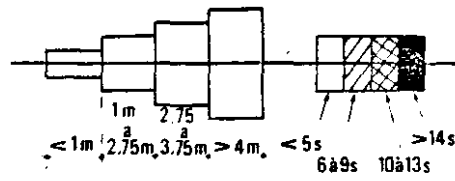
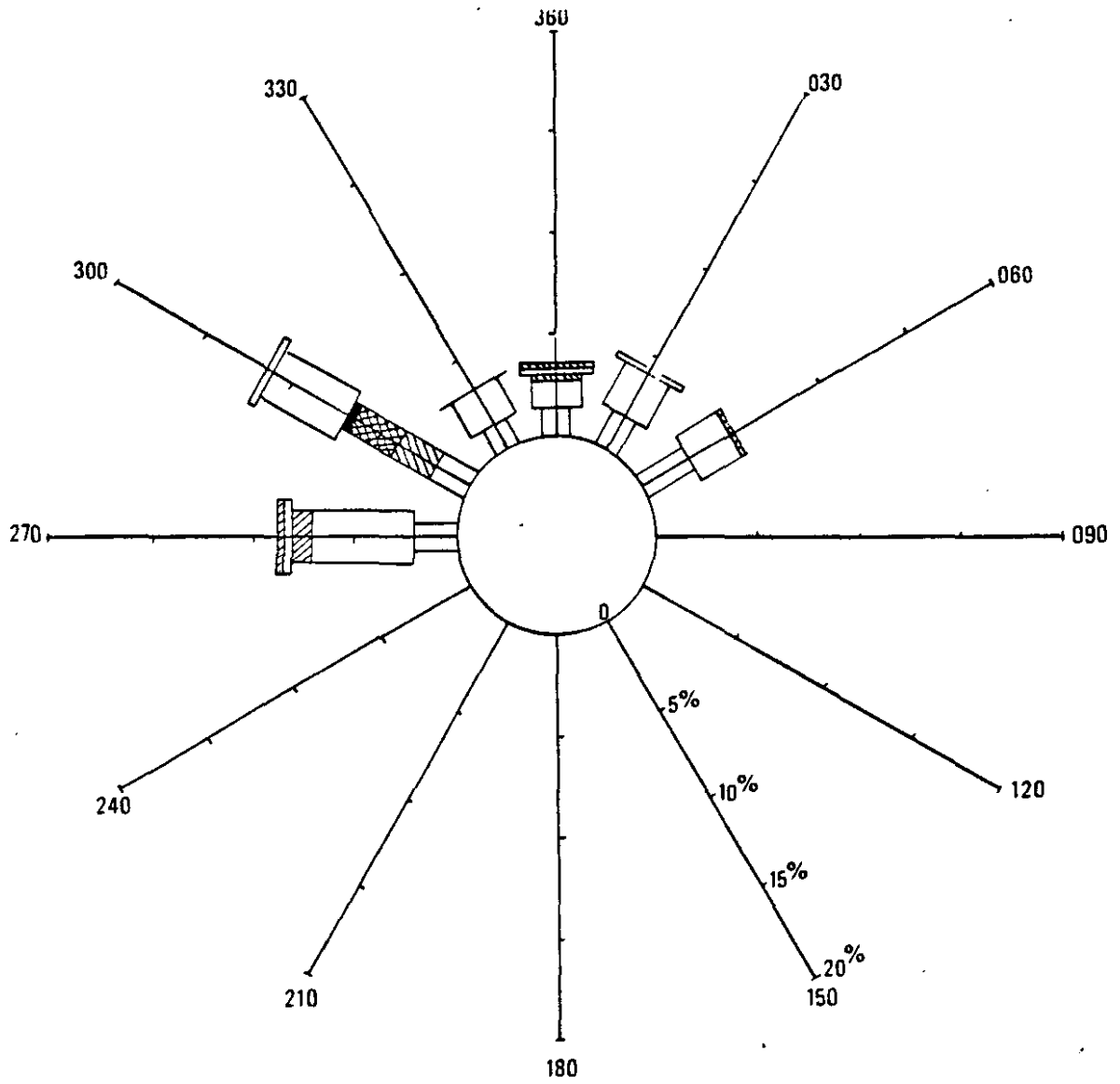
Zone 4 Rose des agitations



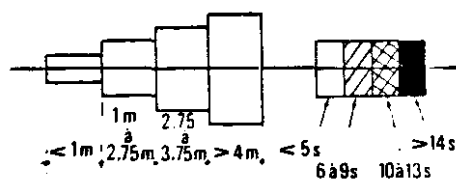
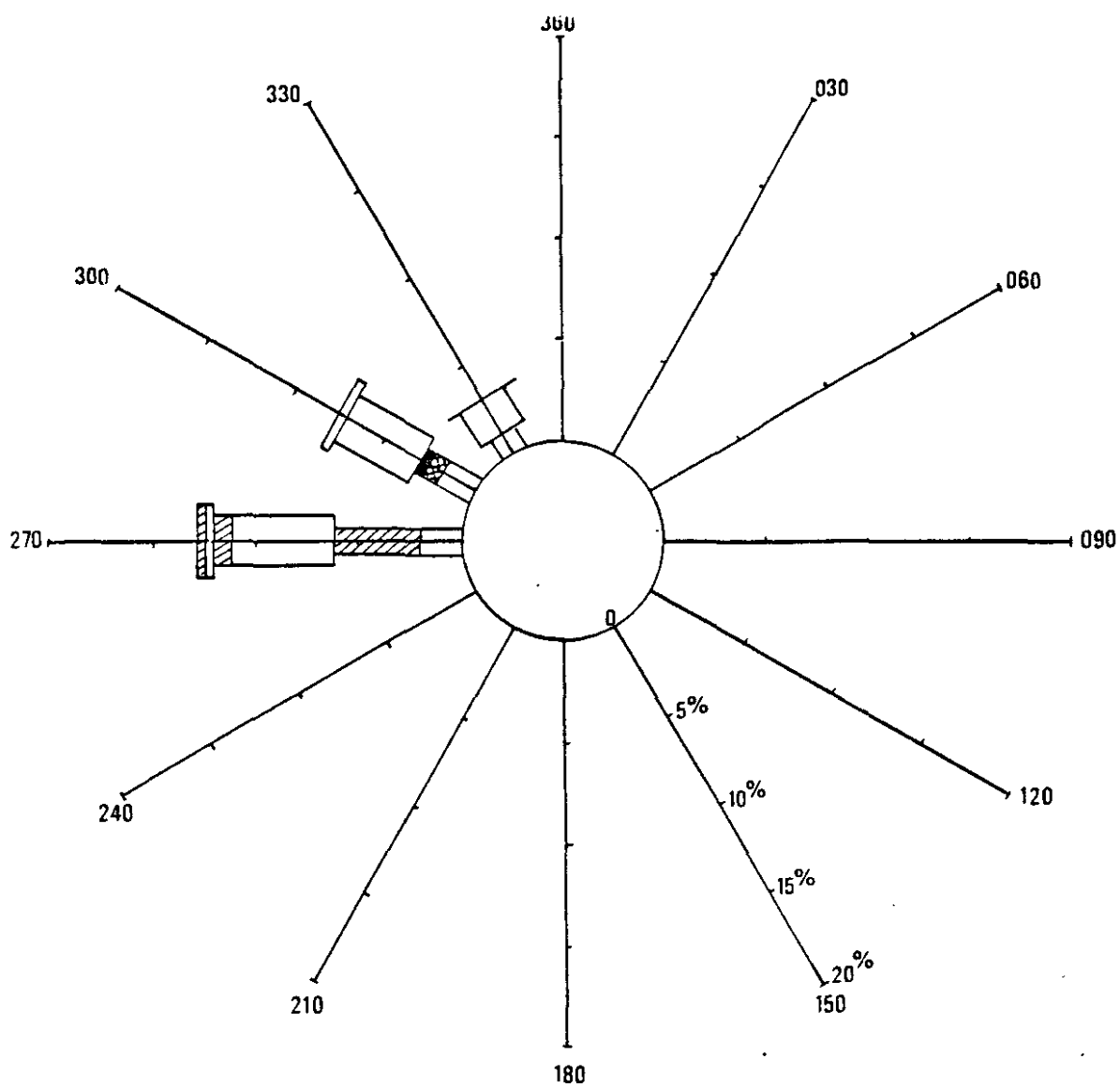
Zone 5 Rose des agitations



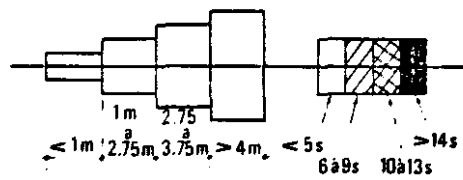
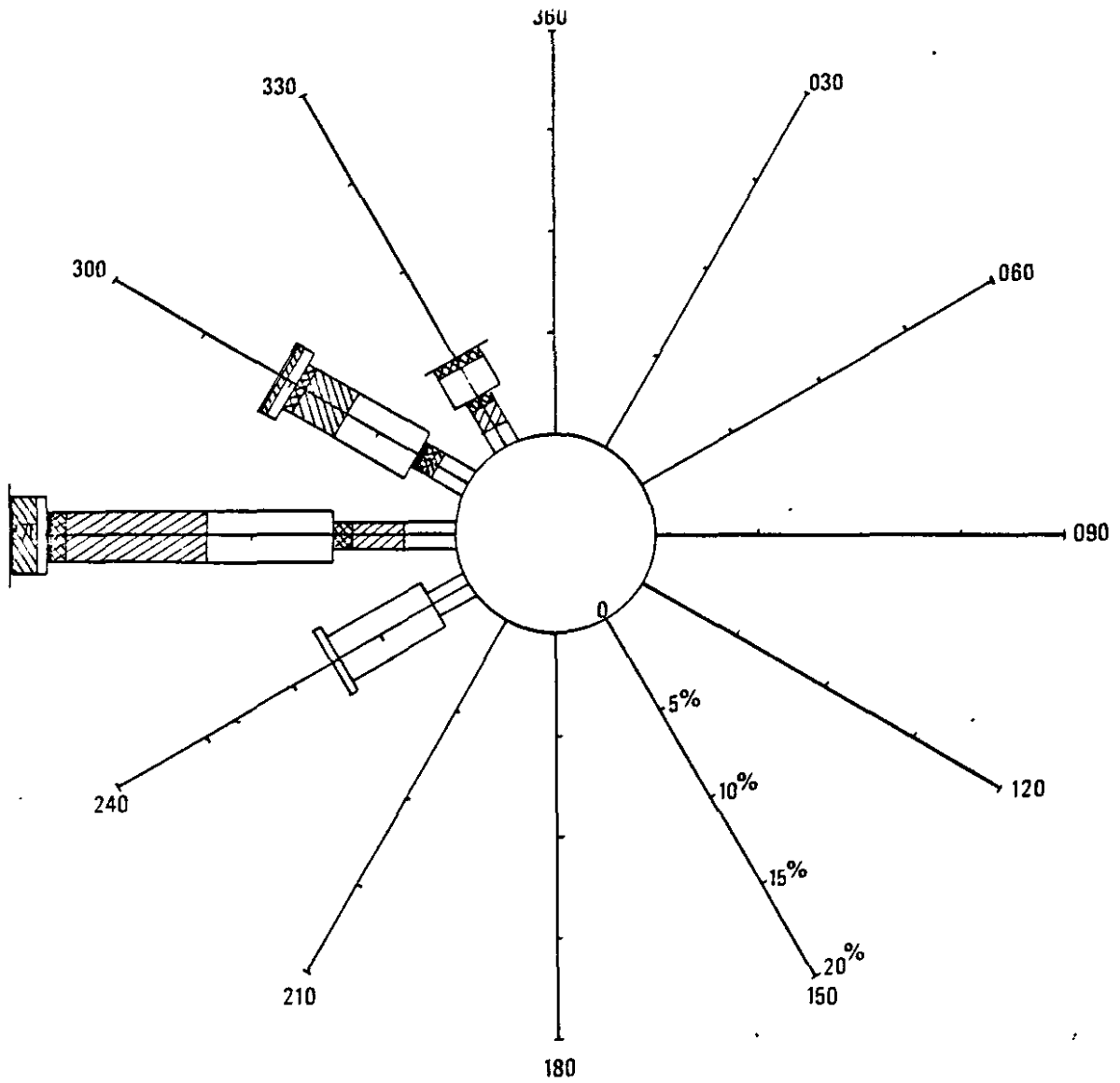
Zone 6 Rose des agitations



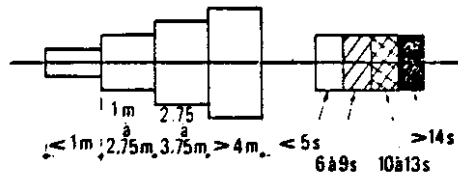
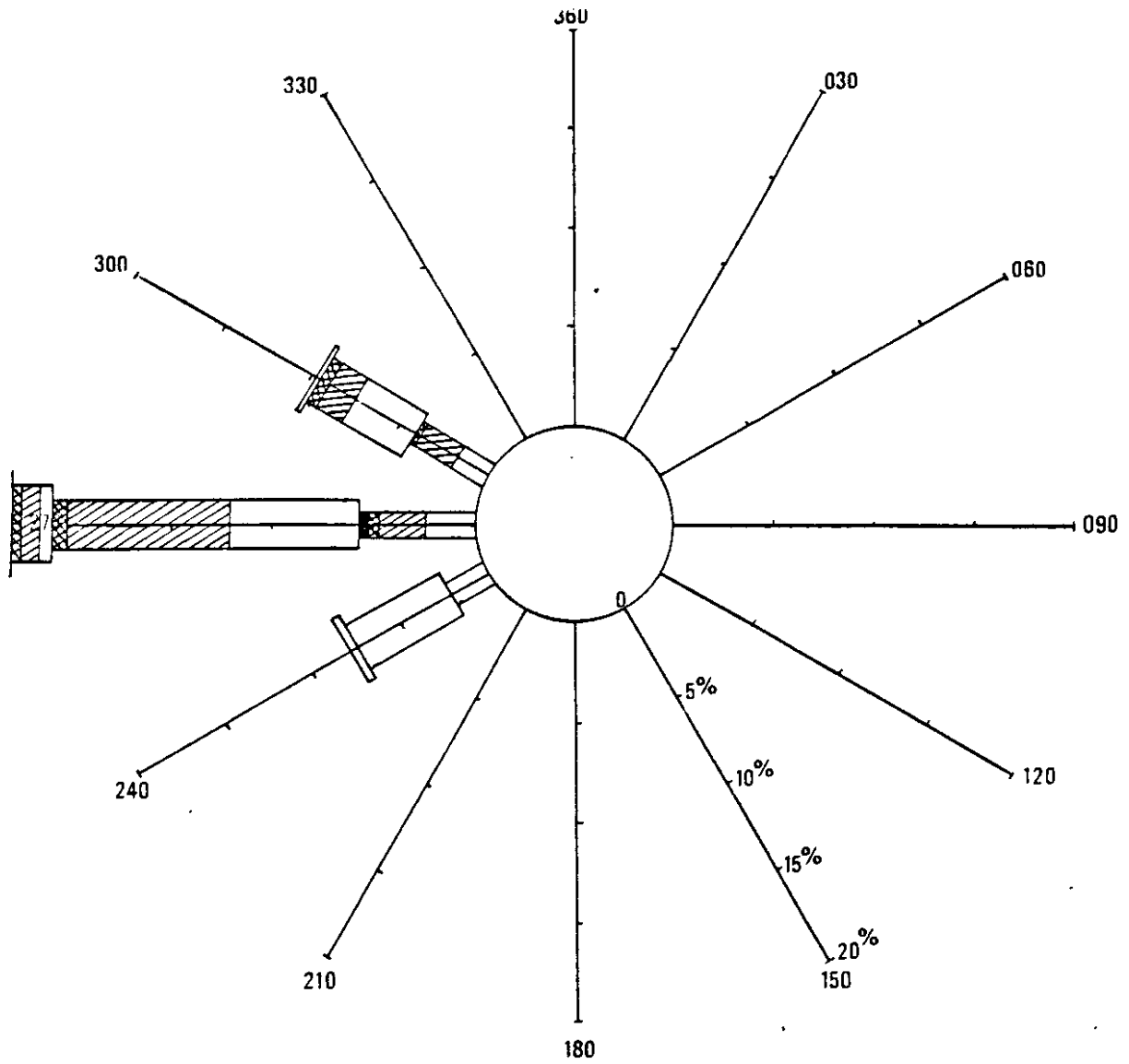
Zone 7 Rose des agitations



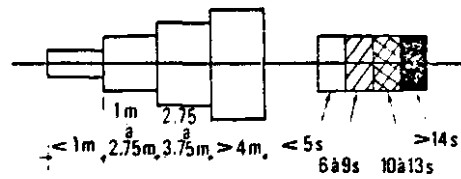
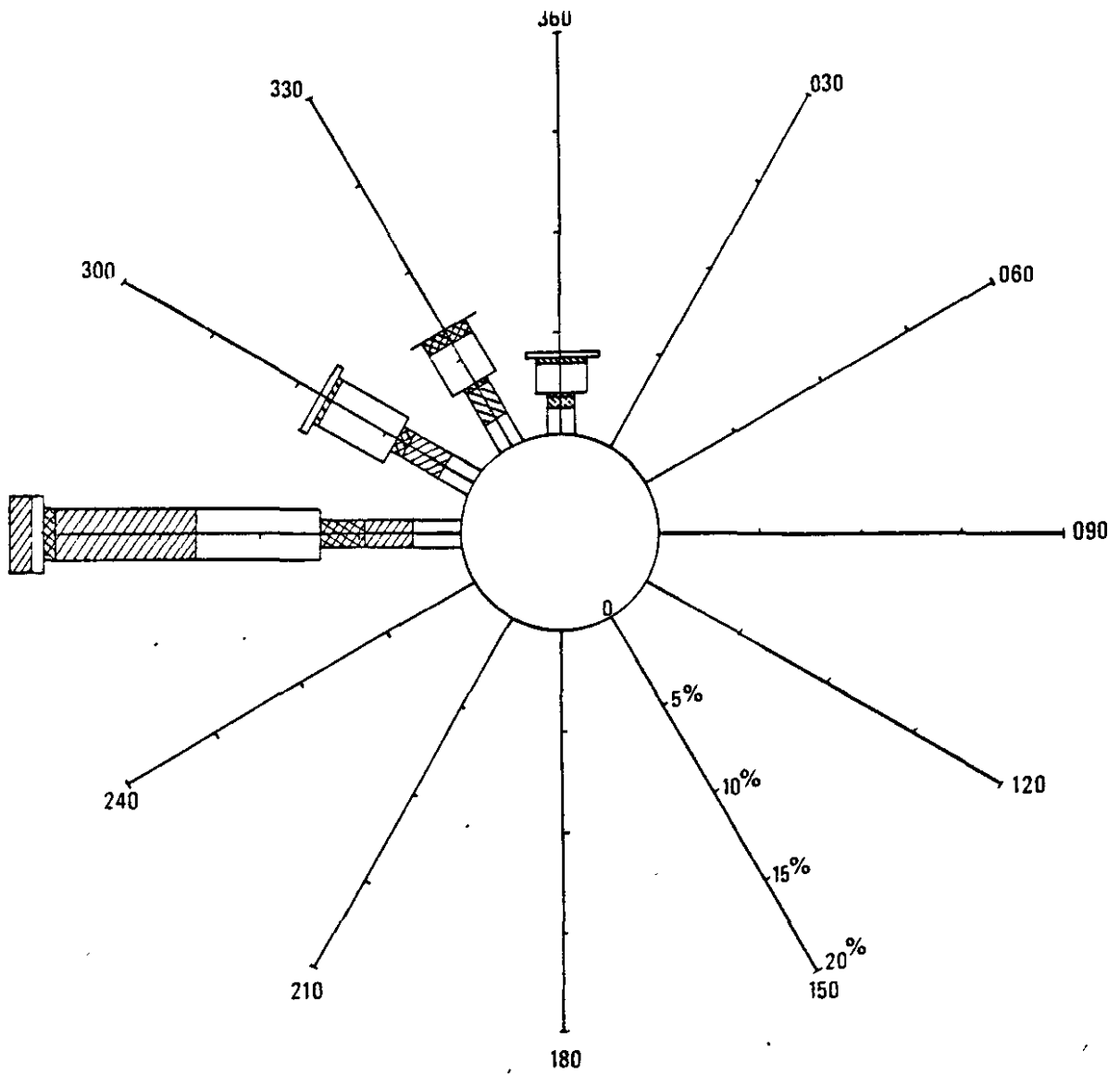
Zone 8 Rose des agitations



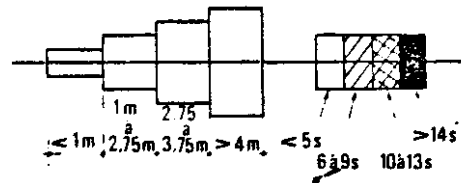
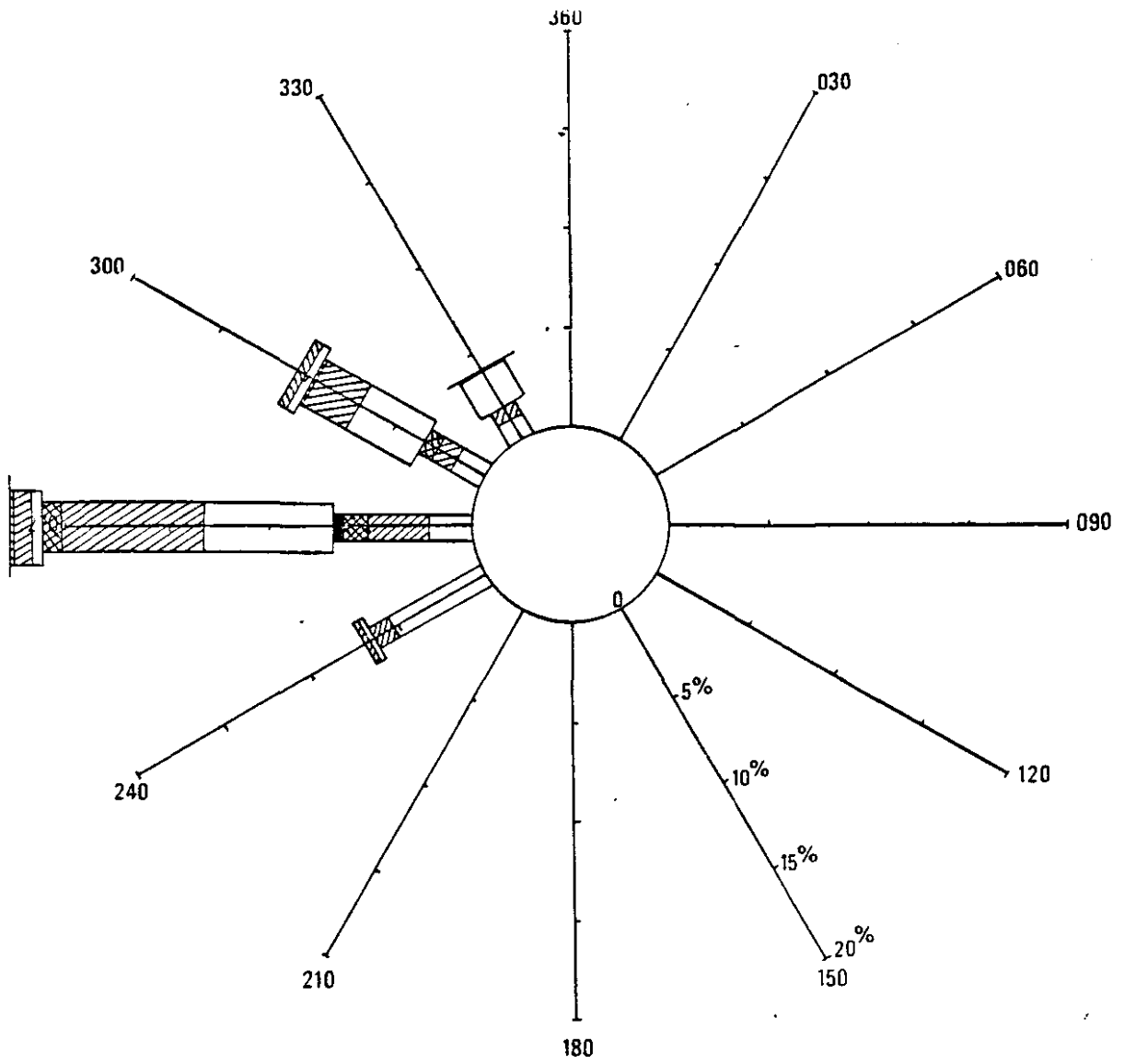
Zone 9 Rose des agitations



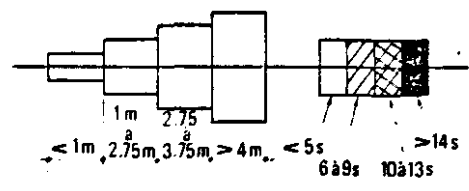
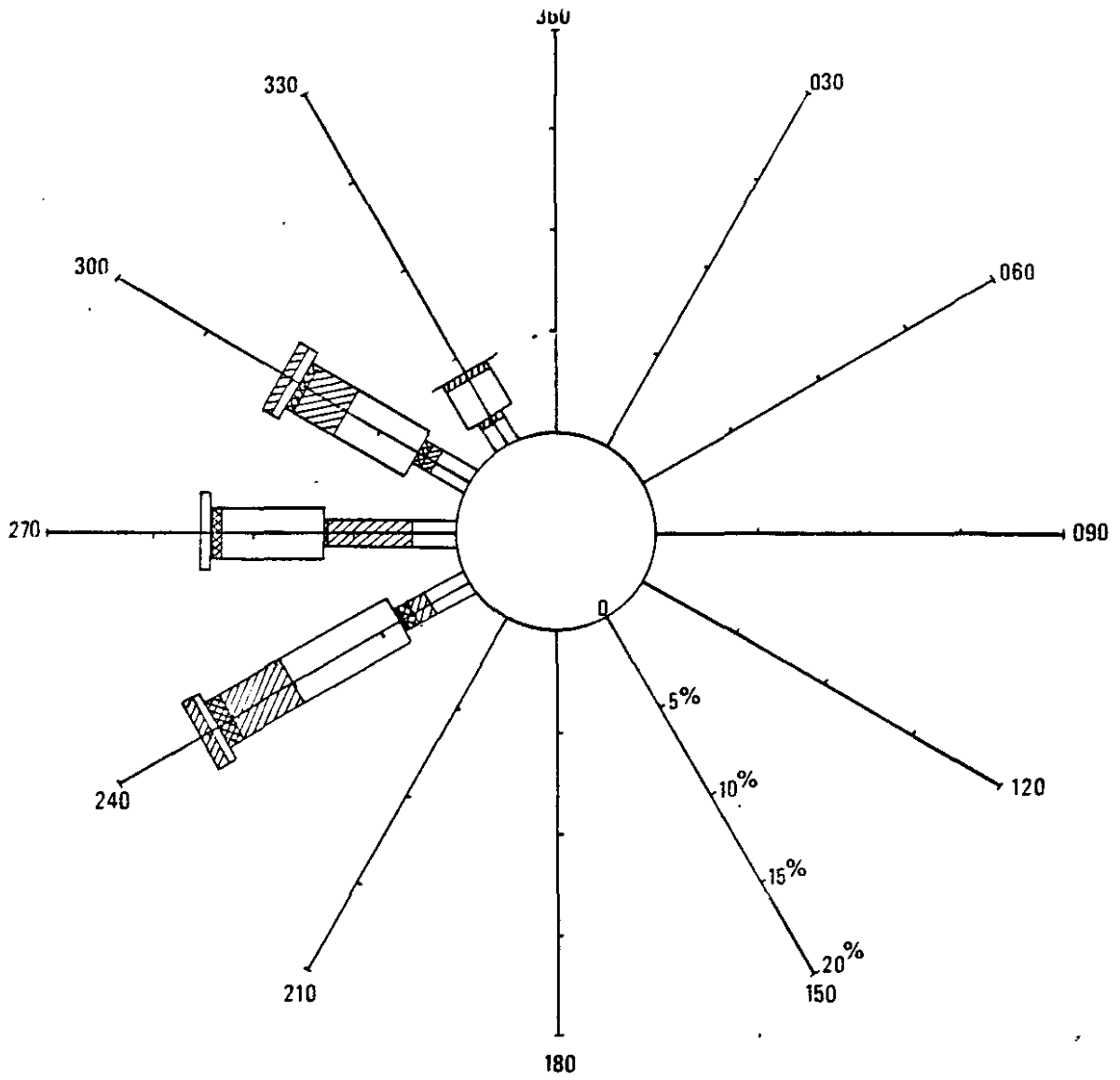
Zone 10 Rose des agitations



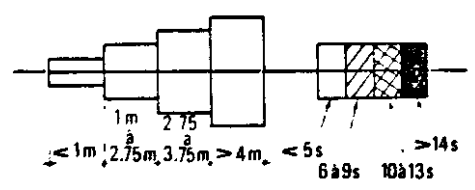
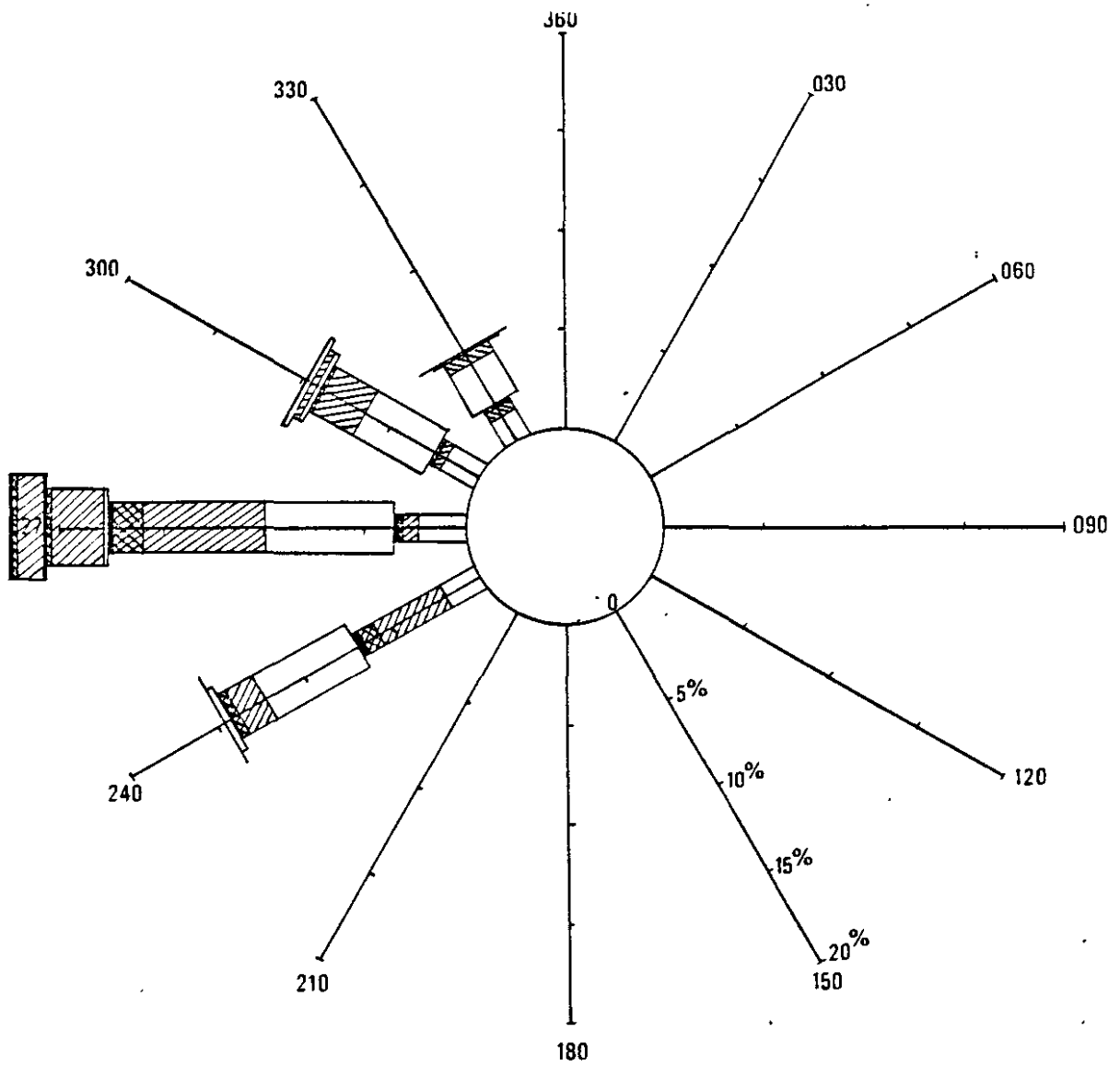
Zone 11 Rose des agitations



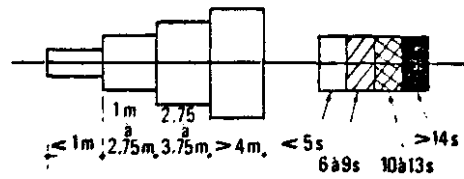
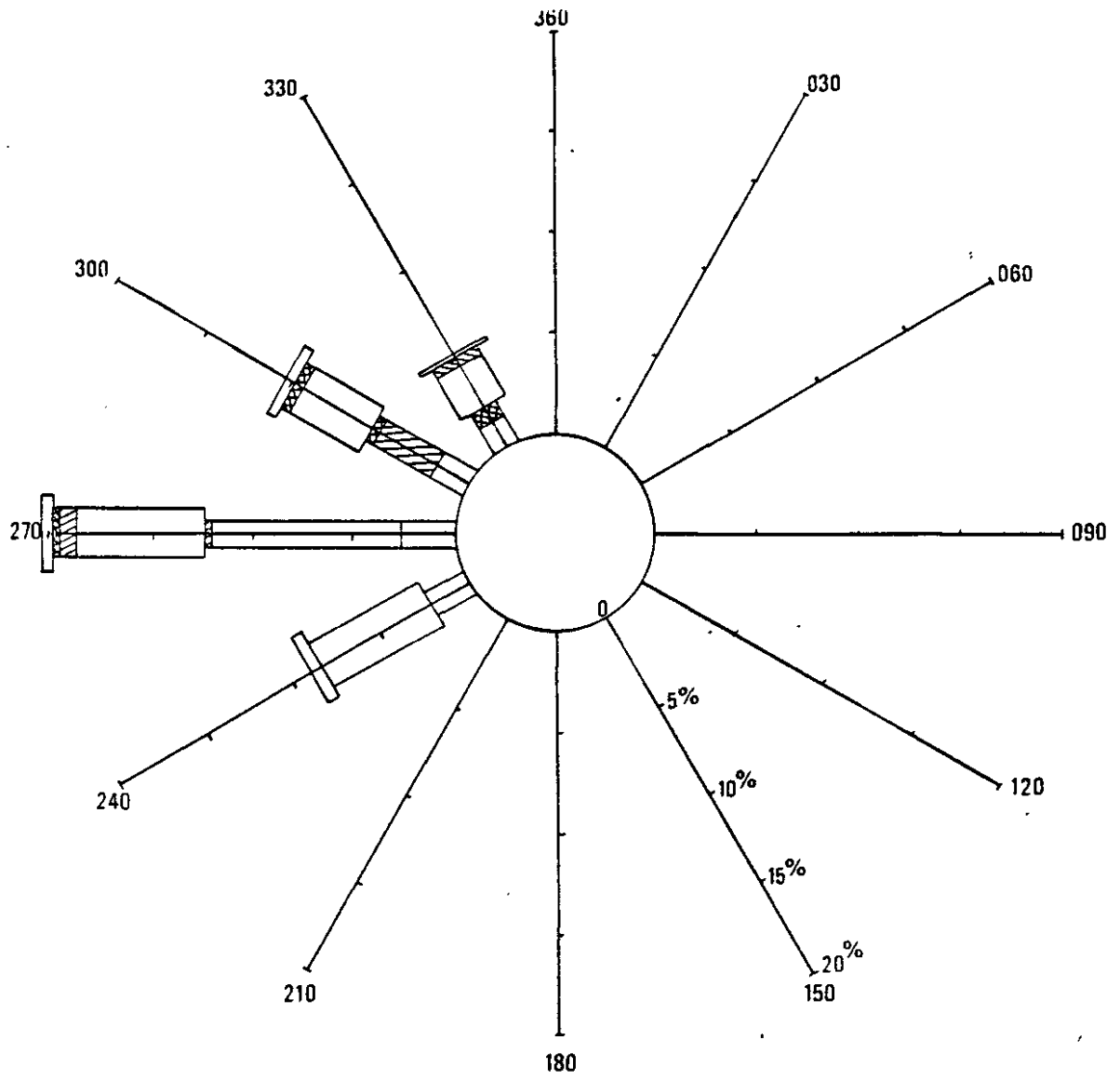
Zone 12 Rose des agitations



Zone 13 Rose des agitations



Zone 14 Rose des agitations



Zone 15 Rose des agitations