

IFREMER/Centre de BREST

COURANTOMETRIE

EULERIENNE

LITTORALE

RAPPORT DE SYNTHESE

Janvier 1985

G. de NADAILLAC

DERO/EL

23

F 23

IFREMER/Centre de BREST

COURANTOMETRIE

EULERIENNE

LITTORALE

RAPPORT DE SYNTHESE

Janvier 1985

G. de NADAILLAC

DERO/EL

COURANTOMETRIE EULERIENNE LITTORALE : REALISATIONS ET PERSPECTIVES

SOMMAIRE

INTRODUCTION

I) DESCRIPTION DU MILIEU ET DE SES EXIGENCES

II CRITERES DE QUALITE DU CAPTEUR

- Seuil de démarrage
- Dérive du zéro
- Réponse polaire horizontale
- Réponse verticale en cosinus
- Influence de l'environnement
- Stockage
- Chaine de traitement
- Temps de réponse
- Forme, poids, robustesse
- Linéarité
- Coût
- Vitesse verticale
- Hystérésis
- Autres mesures
- Programmation

III) OBJECTIFS DE LA COURANTOMETRIE

IV) EFFETS DU MOUILLAGE

V) COURANTOMETRES EXISTANTS OU EN PROJET

- Aanderaa RCM 4
- Suber VACM SLS 11
- VMCM 630 EG & G
- Simrad UCM
- NBIS ACM 2
- Marsh Mac Birney 585
- Sea Data 620 A-BACM
- S4 Inter Ocean
- Ben-Comex SCOLA
- Doppler ponctuel
- Vélocimètre laser

VI) MESURE DE LA HOULE

VII) INTERCOMPARAISON DE MOUILLAGES

- a) justification du mouillage de surface
- b) lieu de l'intercomparaison
- c) Comparaison mouillages surface et subsurface
- d) Comparaison SUBER et AANDERAA sur potence au fond

VIII) Conclusion

BIBLIOGRAPHIE

- ANNEXE I Calcul de la résiduelle induite par la différence d'immersion
- ANNEXE II le courantomètre Radar
- ANNEXE III Courantomètres et coût d'une campagne

INTRODUCTION ET CONSIDERATIONS GENERALES

— Un rapport de ce type suggère :

- un suivi de l'évolution de la technologie
- un suivi des intercomparaisons de courantomètres. —

Dans la structure actuelle, on se contentera d'une synthèse partielle de ce qui existe et de ce qui est projeté.

On ne s'attendra pas, ainsi, à avoir un commentaire détaillé des caractéristiques de l'ensemble des appareils. Toutefois, une documentation détaillée sur chaque appareil existe dans le département DERO/EL.

Le département "Technologie" est sur la mailing list de Current Meter Technology Committee of the IEEE Oceanic Engineering Society. La courantométrie par radar HF est décrite dans l'annexe II.

I) DESCRIPTION DU MILIEU ET DE SES EXIGENCES

Le matériel mouillé dans le milieu littoral est soumis à des contraintes :

- des courants importants et des forts gradients (marée)
- la corrosion
- le fouling (biologique), la turbidité, les écarts de salinité
- la présence de pêcheurs et de plaisanciers (chalutage).

Ce problème est loin d'être négligeable. Récemment, des courantomètres anglais ont été chalutés à la limite du plateau continental. Des affiches avec les positions des mouillages sont posées dans les ports. Cette attitude serait dangereuse dans le Sud à cause du piratage.

- des faibles profondeurs (influence de la houle = 15 M).

Le département a donc mis l'accent sur la robustesse des mouillages (corrosion, chalutage) avec :

- des cages ou des potences pour la mesure de fond
- des cabrions sous lesquels sont pendus les courantomètres pour la mesure de surface (figure 1). Cette disposition permet d'éviter les mouvements de pilonnement. Le cabrion (poutre de bois) suit la surface.

Le département obtient en général des bons résultats. Le SHOM a obtenu aussi de bonnes mesures avec cette technique durant la campagne "Vilaine 84" (4 mois * 6 courantomètres). La campagne "Golfe Normano-breton 83" fut par contre beaucoup moins brillante.

Les mouillages sub-surface sont moins sensibles à la houle qu'un système à la surface mais sont souvent impossibles à cause de la profondeur faible et des marnages importants dans l'Atlantique. La valeur obtenue ne serait pas en effet une vraie valeur de surface.

Mouillage au Fond
par Potence

Feu jaune
5 éclats en 10s; période 20s.

Mouillage de Surface

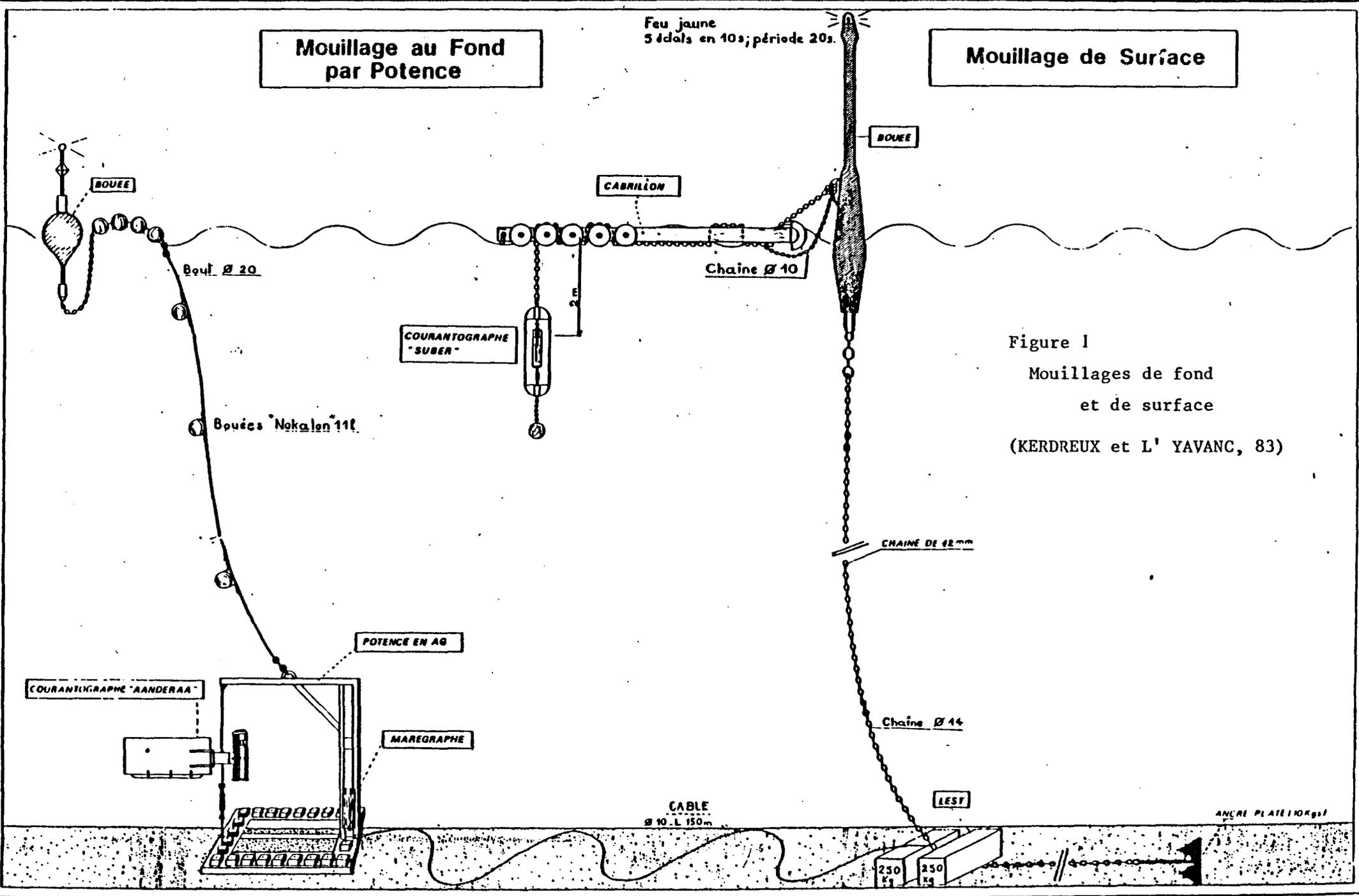


Figure I
Mouillages de fond
et de surface
(KERDREUX et L' YAVANC, 83)

La mesure de surface a été améliorée par l'acquisition de courantomètres qui moyennent suivant chaque composante pendant 10 minutes ou plus. Les courants orbitaux de houle sont ainsi filtrés, dans une certaine mesure.

II) OBJECTIFS DE LA COURANTOMETRIE

L'interprétation des mesures chimiques, biologiques passe par la connaissance de la dynamique de la région pour déterminer :

- une stratégie d'échantillonnage
- l'histoire et le devenir des masses d'eau
- un temps de résidence

En milieu littoral, en outre, la tranche d'eau est souvent stratifiée (eau douce, eau salée, thermocline). Ces couches ayant des comportements dynamiques différents, on cherche à obtenir une mesure de fond et une mesure de surface. Cette mesure de fond intéresse plus particulièrement la dynamique sédimentaire, l'écologie benthique, et la dynamique d'un rejet profond.

Les courants recherchés sont :

- les courants de marée (1 - 5 nds) (analyse harmonique)
- les courants résiduels ; ils sont faibles mais représentent la vitesse nette des masses d'eau (0 - 10 cm/s) (filtrage, analyse spectrale)
- les courants en zone sans marée (lagunes, Méditerranée), (= 10 cm/s) ou plus avec le vent).

L'existence de modèles numériques de circulation permet de limiter les mesures qui servent alors à calibrer le modèle. On place, les courantomètres dans les passes, les chenaux, aux limites des bassins pour connaître les bilans de masse.

Les mesures sont :

- de longue durée (plusieurs mois) pour obtenir des résiduelles interprétables, calculer des spectres avec des intervalles de confiance suffisamment bons.
- de courte durée (la marée) dans la perspective d'une acquisition rapide (1 Hz) pour évaluer des tenseurs de Reynolds au voisinage du fond ou les courants de houle. Dans l'immédiat, ce genre de mesures n'est qu'à peine envisagé dans le cadre de la dynamique sédimentaire.
- de courte durée (la marée aussi) pour des stations de 13 heures couplées avec des mesures de paramètres physico-chimiques et biologiques (Courantomètres BRAYSTOKE).

III) CRITERES DE QUALITE DU CAPTEUR

Seuil de démarrage :

Ce seuil dépend parfois de l'accélération du courant. En présence de courants orbitaux de houle ou de mouvements de mouillage, il est souvent dépassé (= 2-7 cm/s).

La présence d'un seuil de démarrage augmente l'énergie dans les hautes fréquences (périodes inférieures à 1 heure). Toutefois la résiduelle n'est pas affectée. Il est parfaitement possible de mesurer des résiduelles de 3 cm/s avec un seuil de 5 cm/s.

Le seuil de démarrage devra être inférieur à la moitié de l'écart-type (standart déviation) du signal. Ce critère peut être plus strict si on veut travailler sur les valeurs de haute fréquence (BRISCOE, 83).

Dérive du zéro :

La dérive à court terme (fluctuations) est analogue à un seuil de démarrage et à un bruit (1 à 2 cm/s). La dérive à long terme est évaluée par des étalonnages fréquents. Ce problème concerne les courantomètres électromagnétiques. L'extraction de composantes résiduelles peut être altérée. Les phénomènes influençant la dérive sont :

- l'amplification du signal (bruit électronique)
- la perturbation de la couche limite sur le capteur (sphérique dans la plupart des cas)
- les variations de température et de salinité.

Réponse polaire horizontale :

C'est la réponse du capteur suivant l'azimuth (horizontal) du courant. L'existence de barres de soutènement peut modifier l'écoulement et par conséquent la mesure.

Exemple du SUBER :

L'étalonnage en direction est difficile à prendre en compte actuellement pour les courantomètres qui ne se retournent pas avec le courant. En effet, le capteur mesure 2 angles surlesquels des erreurs interviennent :

l'angle que fait la girouette avec le corps de l'appareil et l'angle que fait le Nord magnetique avec le corps. Or, seule la différence est enregistrée. Dans le cas d'un courantomètre fixe, une orientation de l'appareil doit être mesurée pour la correction magnétique. Dans le cas d'un courantomètre placé sous cabrion, il faut vérifier sur l'appareil que l'erreur est faible et ne pas faire de correction. L'idéal serait d'acquérir les deux angles.

Le problème est identique pour l'étalonnage de l'angle donné par la girouette. Le sillage des colonnettes donne des écarts de $\pm 7^\circ$.

Réponse verticale en cosinus :

Si le courant à une composante verticale, la mesure doit donner la composante horizontale uniquement (c'est à dire le cosinus). Cette composante verticale peut être induite par les mouvements de la ligne de mouillage ou par les courants orbitaux de houle.

La réponse verticale dynamique peut alors être évaluée par calcul :

A un courant moyen V_0 , on superpose une composante fluctuante de période T, orbitale V_t .

La moyenne doit donner V_0 . Voir figures 2, 3, 7 et 8.

Influence de l'environnement :

Fouling, turbidité, écarts de salinité, corrosion. La sensibilité des courantomètres électromagnétiques aux variations de salinité et celle des capteurs acoustiques à la turbidité restent à évaluer. TOSCHKO (78) utilise le BASS (Benthic Acoustic Stress Sensor) au fond, en milieu littoral, sans problème notable. Quant à la salinité, il suffit d'une faible conductivité (5 micromhos/cm eau douce) pour que le courantomètre électromagnétique puisse marcher. Il semble qu'une variation importante de salinité n'ait aucun effet. Enfin, les rotors peuvent être bloqués par des algues ou autres.

Stockage :

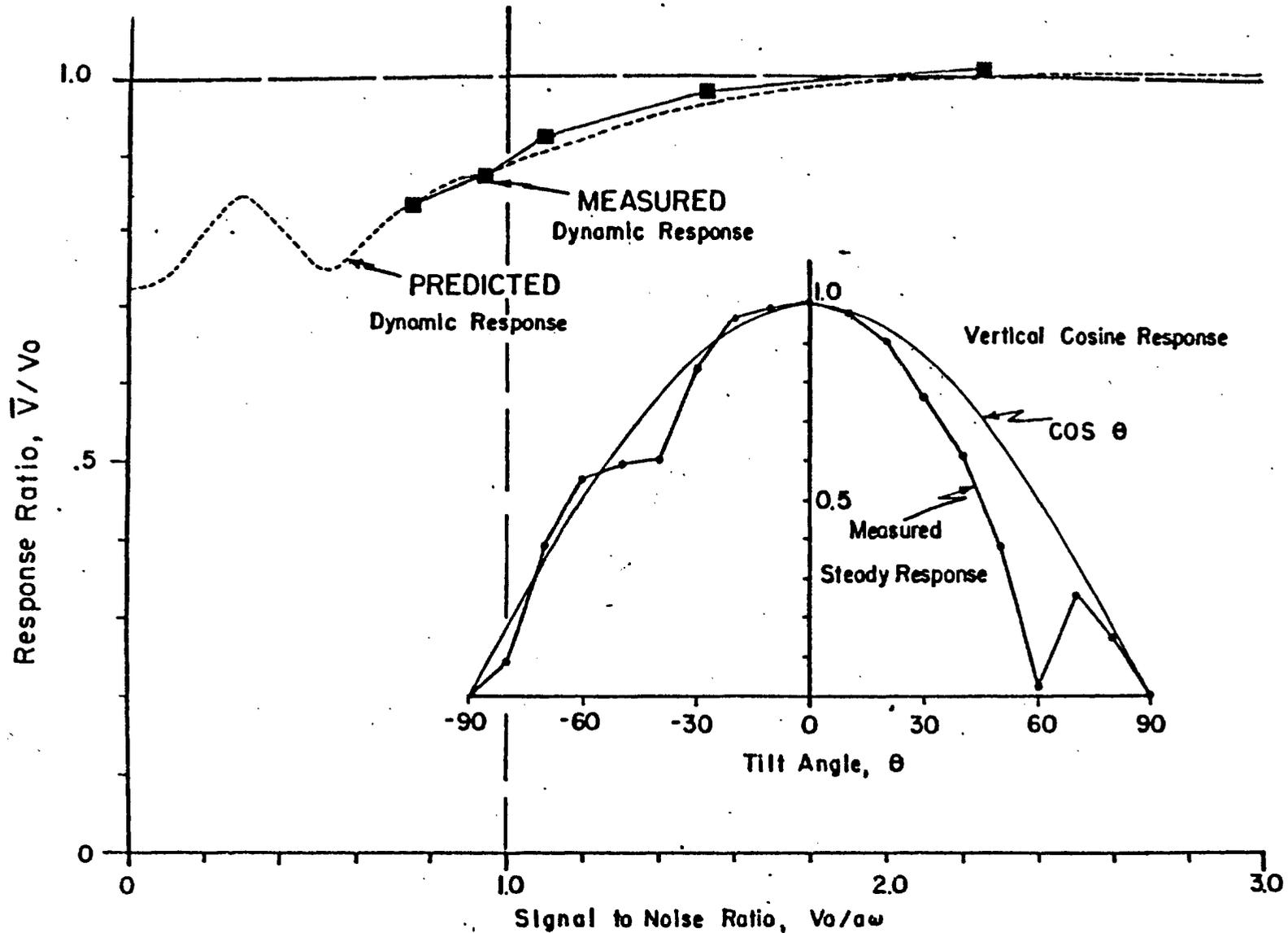
Les cassettes ou les bandes magnétiques sont utilisées à l'exception du SUBER et du S4 qui stockent sur mémoire CMOS. Cette option devrait se révéler performante bien qu'actuellement des "sauts de mémoire" interviennent parfois. Les courantomètres actuels qui ont une cadence d'acquisition permettant d'échantillonner la houle doivent avoir une capacité de stockage importante (plusieurs Mbits). Dans le cas des courantomètres mécaniques, l'obligation de les nettoyer et de les vérifier tous les mois rend le problème de stockage secondaire.

Chaine de traitement :

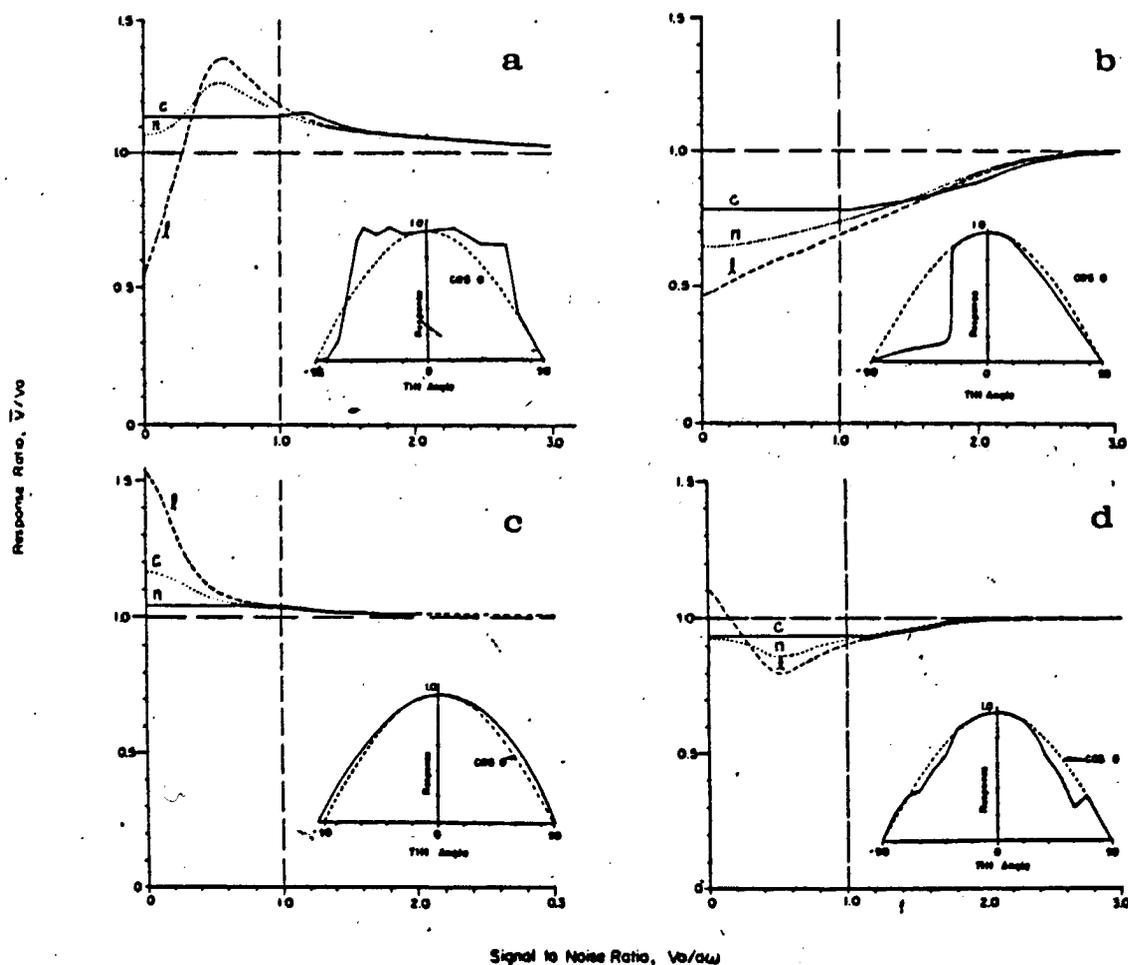
L'élaboration d'une chaîne de traitement est difficile. Actuellement, les cassettes MEMODYNE (MARSH MAC BIRNEY) ne sont pas lues au COB. Le stockage sur mémoire CMOS permettrait une meilleure standardisation. En effet, les données peuvent être sorties par liaison RS 232 sur une cassette ou une disquette de micro-ordinateur. L'avantage du micro est double :

- Acquisition et première validation des mesures
- transmission sur un gros ordinateur par le réseau.

Figure 2 : Réponses dynamiques mesurées et calculées
(Mac Cullough, 78)



Model verification is demonstrated by predicted and measured dynamic response of an experimental mirror-type acoustic-travel-time-difference current meter. The measured steady-flow vertical-cosine-response used to calculate the predicted dynamic response is shown in the insert. (The low response at plus 60° is caused by the wake of the acoustic mirror.) The good agreement between the measured and predicted dynamic response suggests that the main source of dynamic errors in this type meter is traceable to the static vertical-cosine-response.



Modeled dynamic response calculated for four measured steady-state vertical-cosine response functions. a) A one-inch diameter cylindrical electromagnetic probe between flat circular end plates. b) Disc-shaped electromagnetic sensor. c) Same probe as in a) less the end plates. d) An acoustic-travel-time-difference probe of the mirror type. The measured static response functions are shown in the insert of each frame. The curves labeled n, c and l represent normal ($\phi = 90$), coplanar ($\phi = 0$) circular orbits, and linear (large e) normal sinusoidal motion respectively. As before, the vertical dashed lines separate regions of high (left) and low (right) sensitivity to the orientation and shape of the oscillatory flow (a, b and c after McCullough, 1974; d after Appell, 1977a).

Figure 3 : Réponses dynamiques calculées
- (Mac Cullough, 78)

L'expérience montre que des valeurs sont perdues entre les cassettes SUBER et les fichiers sur disque DPS7, dans l'état actuel de la chaîne de traitement. (Problème de lecteur de cassettes).

Temps de réponse :

Un temps de réponse court permet une meilleure moyenne des vitesses fluctuantes et une cadence d'acquisition plus élevée dans le cadre de certaines expériences (2Hz pour la houle).

Forme, poids (8 à 43 kg), Robustesse :

Les rotors s'avèrent fragiles. Les appareils doivent être faciles à manipuler (à terre ou en mer). Les potences qui les supportent doivent avoir un encombrement modéré. Ainsi, les MARSH MAC BIRNEY pèsent dans l'air 43 kg (taille : 22 sur 144 cm) alors que les S4 pèsent 8 kg (sphère de 25 cm de diamètre).

Linéarité de la mesure

Compas ; Résolution en direction (2 à 5 degrés).

Coût (40 à 200 kF) : il conditionne le nombre de courantomètres et donc la résolution spatiale du phénomène à étudier.

Vitesse verticale : Certains appareils la mesurent.

Hysteresis :

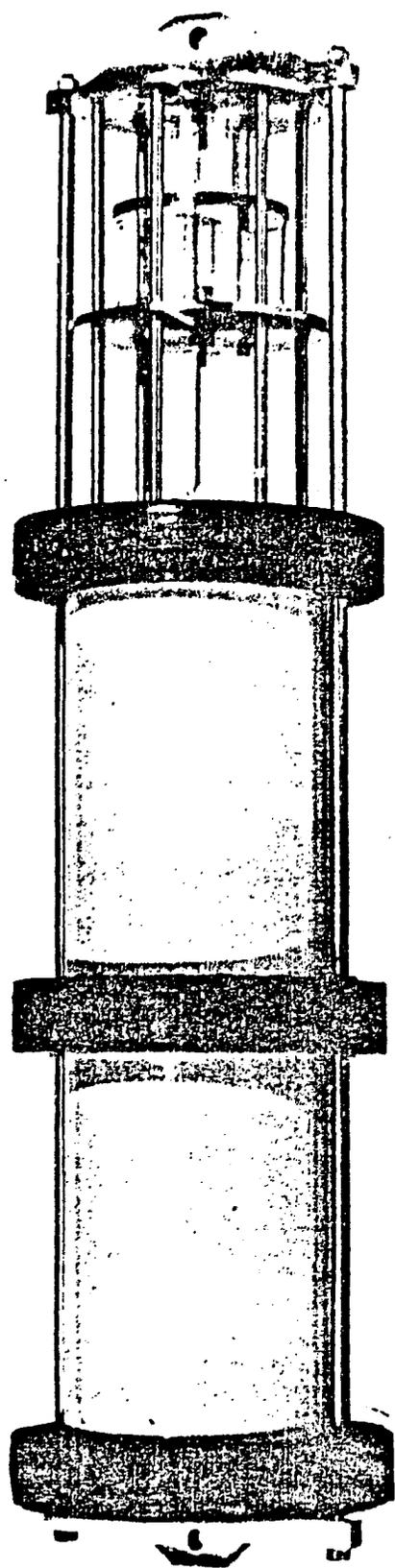
C'est le décalage d'intensité du courant dans le cas d'une accélération puis d'une décélération de même valeur absolue. Ce problème concerne les rotors de Savonius qui ont un temps de réponse plus rapide pour une accélération que pour une décélération (FOFONOFF & ERCAN, 67).

Autres mesures :

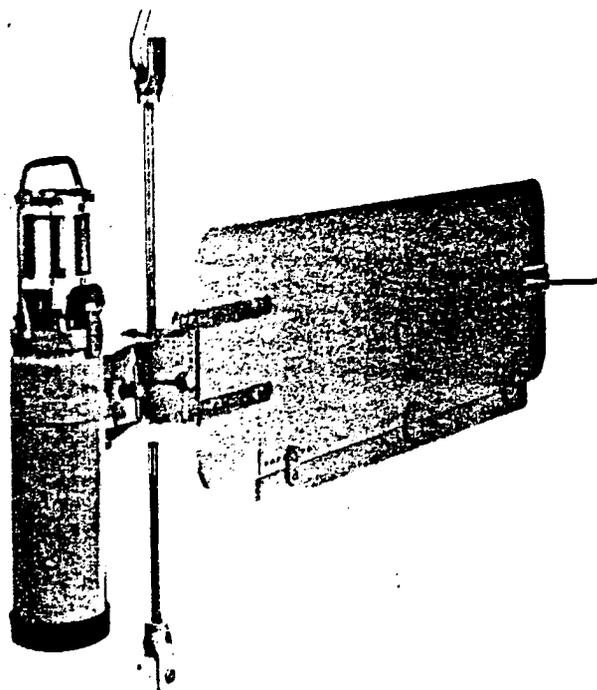
Température, conductivité, pression. Pour la houle, un capteur de pression 0-70 mètres est conseillé. L'évaluation des capteurs de pression, température et salinité n'est pas aisée et n'entre pas dans les objectifs de ce rapport.

Programmation :

Il est parfois utile de programmer des cadences d'échantillonnage à partir d'une horloge ou d'un événement extérieur (acquisition de la houle à 2 hz pendant 20 minutes toutes les 3 heures). Des possibilités de calcul peuvent être ajoutées (calcul VACM, enregistrement de certaines caractéristiques de la houle, H1/3 etc...).

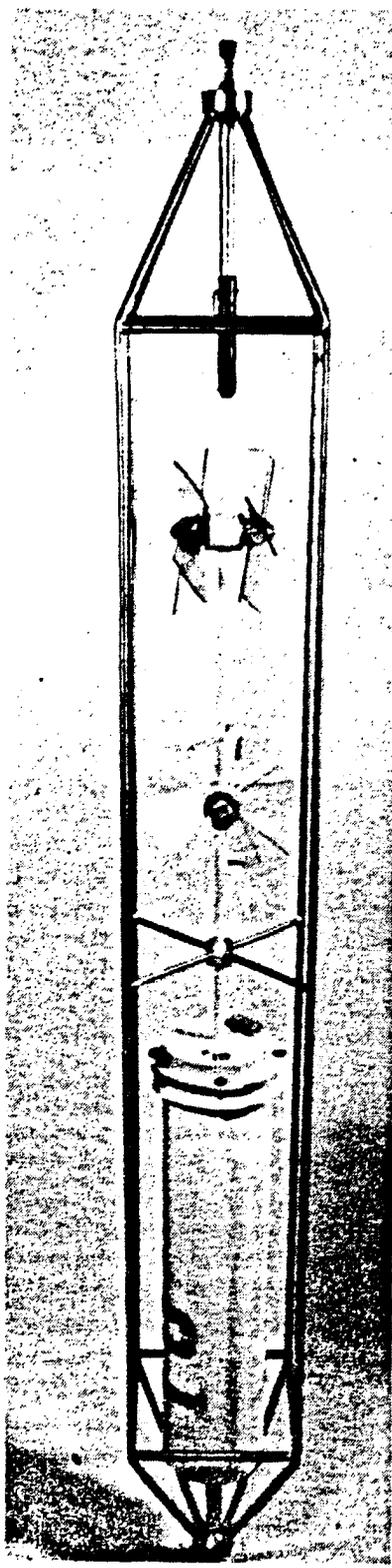


SLS 11 Suber
VACM

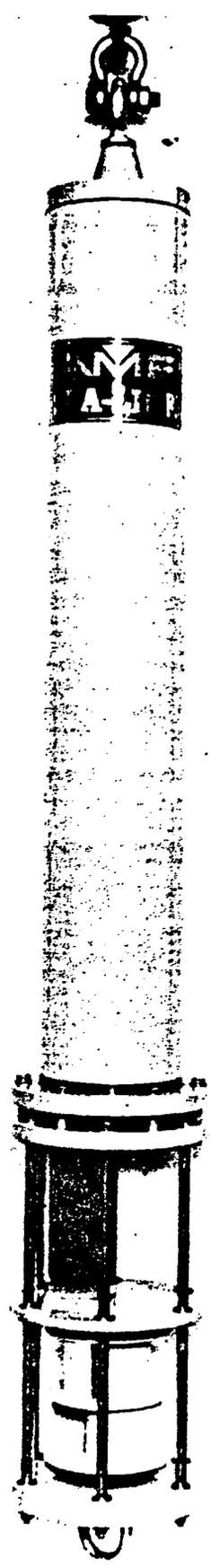


Aanderaa Model RCM-4 current meter. The instrument swivels about the vertical rod between the electronics case (left) with Savonius rotor and other sensors on top and the large direction vane (right). (Courtesy of Aanderaa Instruments.)

Figure 4 : AANDERAA et SUBER

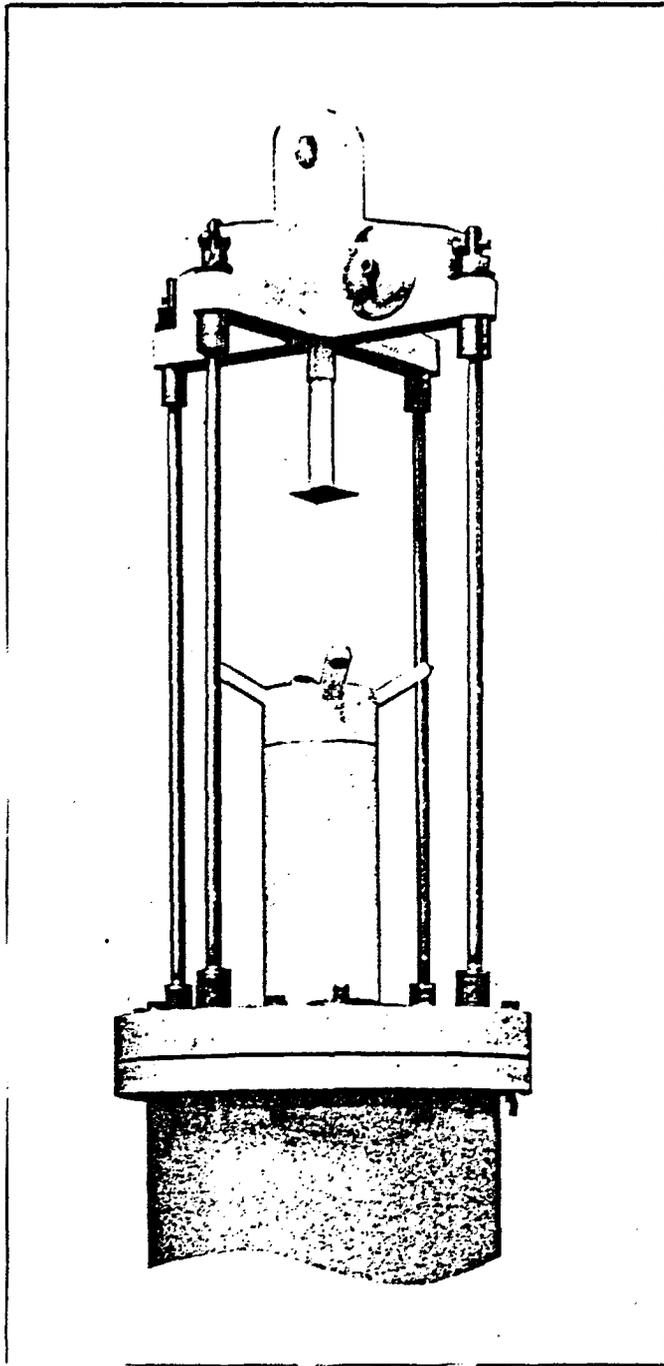


Vector-measuring current meter with dual propellers and titanium cage. (Weller, 1978.)

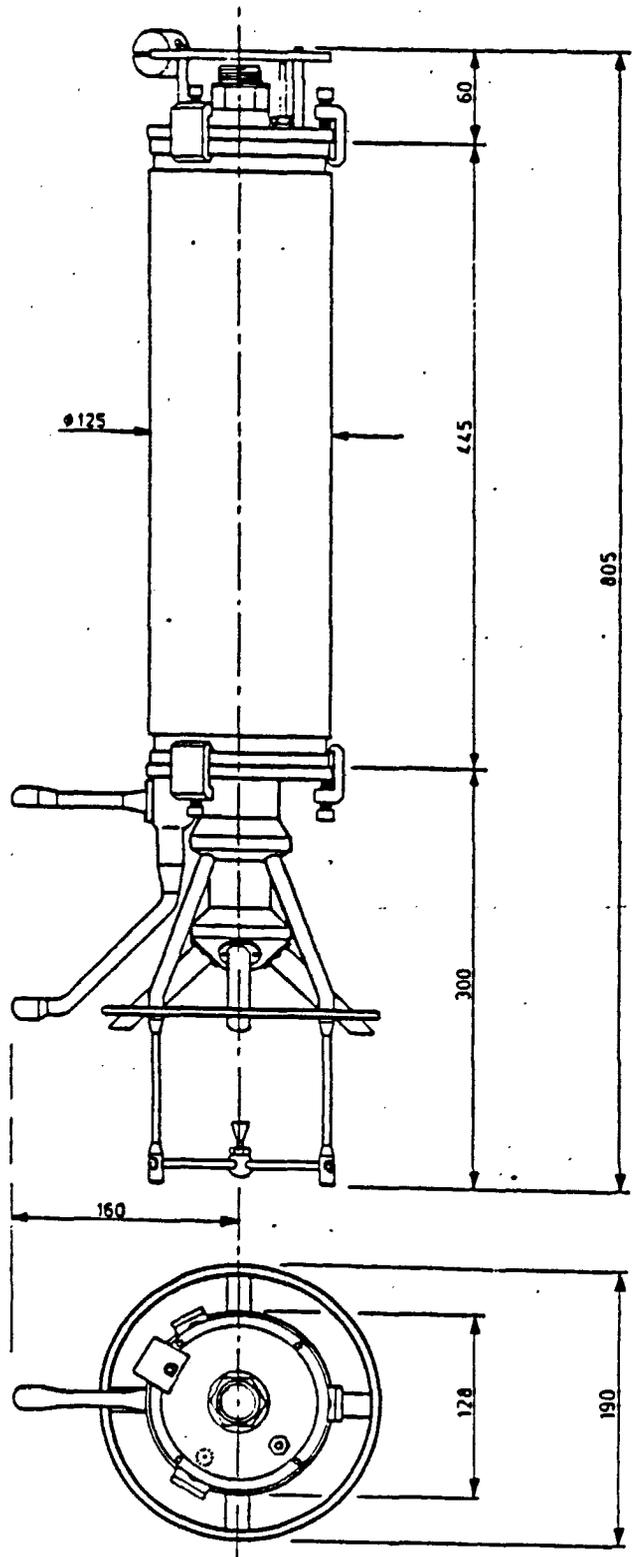


Vector-averaging current meter manufactured by Sea-Link. (Courtesy of W. Coburn.)

Figure 5 : VMCM et VACM

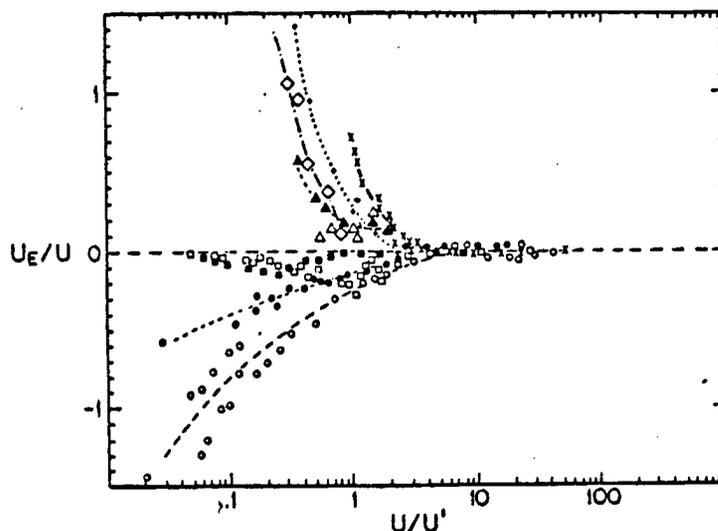


NBIS



SIMRAD UCM-10. - COTES EXTERIEURES

Figure 6 : NBIS et SIMRAD



Comparison of current meter error in combinations of steady and unsteady flow. "x" marks data points from tests of Savonius rotor response in combinations of mean flows and horizontal oscillation (KARWEIT, 1974). "+" marks data points from tests of an Aanderaa current meter (KALVAITIS, 1977) subject to a mean flow and horizontal oscillation. "◇" marks data points from a spherical electromagnetic current meter (KALVAITIS, 1974) subjected to mean flows and horizontal oscillation. "▲" and "△" mark data points from a VACM subjected to vertical oscillation when inclined 14.6° from vertical and with no inclination, respectively (KALVAITIS, 1974). "○" and "●" mark data collected by testing a Neil Brown Instrument Systems ACM subjected to horizontal and vertical oscillation, respectively, in the presence of mean flow. "□" and "■" show the largest errors found by oscillating the propeller sensor parallel to and perpendicular to the direction of tow, respectively.

Figure 7

· Comparaison des erreurs de mesure dans le cas d'un flux moyen U , associé à un flux oscillant U' horizontal.

(U_e est l'écart U mesurée - U moyen)

(From R.A. WELLER R.E. DAVIS)

x ROTOR

+ AANDERAA

◇ EMCM

▲ VACM (14.6° inclinaison)

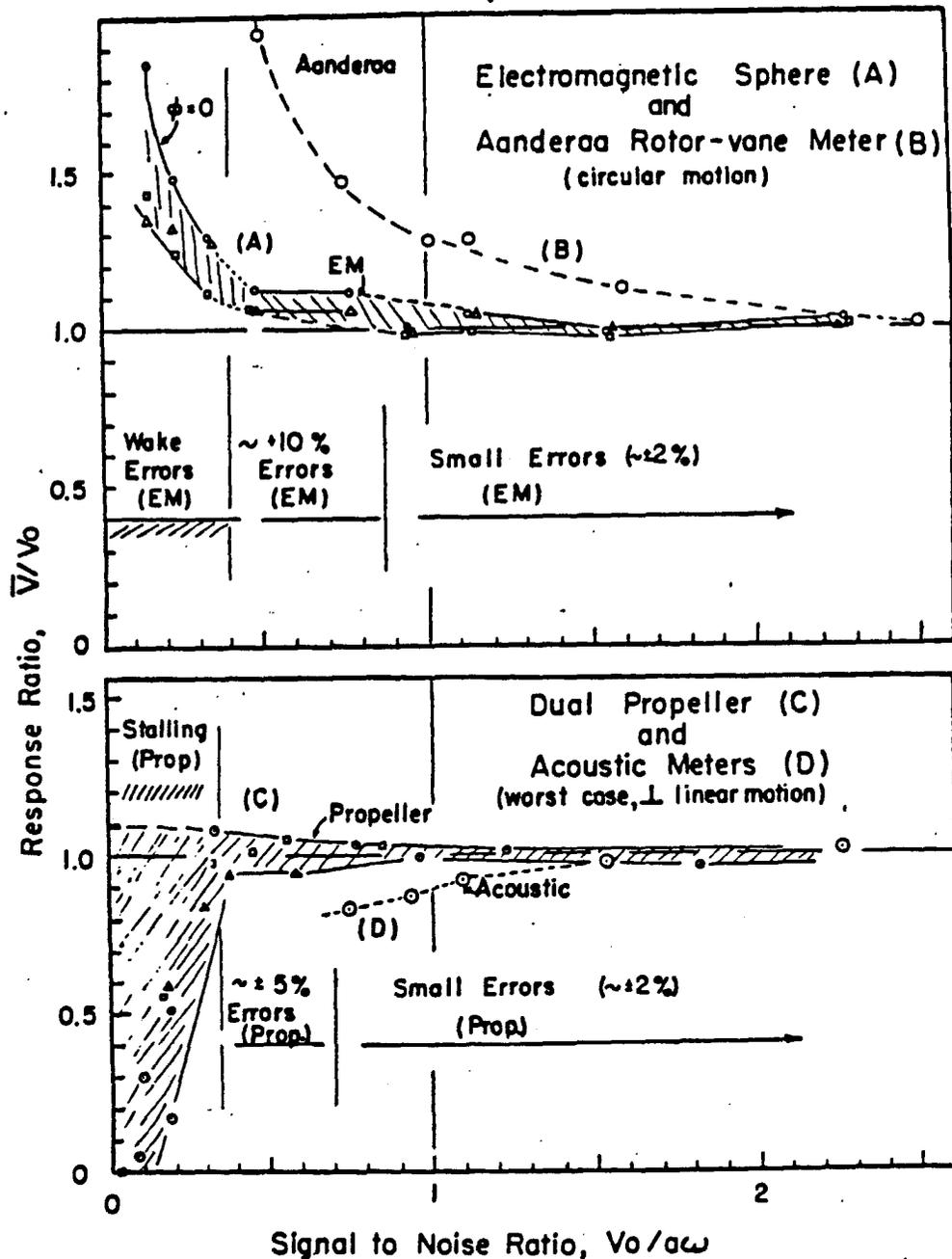
△ VACM

○ NBIS

● NBIS (oscillation verticale)

□ VMCM

■ VMCM (oscillation verticale)



Measured dynamic response functions from four types of moored current sensors used in wave-zone studies. Measurements are plotted in the coordinates used previously. At the top, the response of an electromagnetic sphere (A) and an Aanderaa rotor-vane current meter (B), are shown for coplanar-circular-orbital motion (1.22 m diameter, three periods) superimposed on selected linear tow carriage motion. In the lower frame, performance of dual propellers (C) and acoustic-travel-time difference (D) flow sensors are shown for linear-sinusoidal motion normal to the tow. In a) note that for $\phi = 0$, the measured dynamic response function is not constant as predicted by the kinematic model of Figure 5. This suggests that additional and dominant, dynamic effects exist. (Data in (a) after Kalvaitis, 1977; (b) after Appell, 1977b; (c) after Davis, 1978a; (d) is the same as shown in the previous figure.)

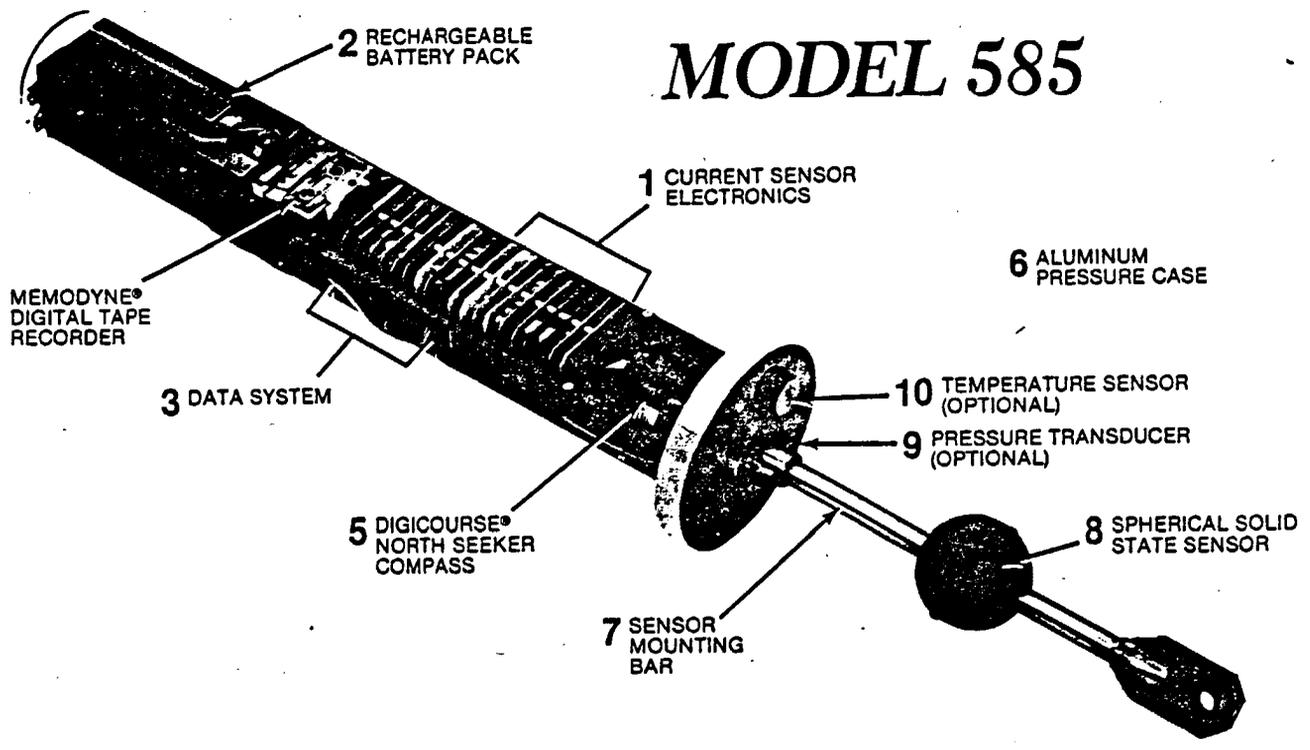
Figure 8 : Réponses dynamiques mesurées

V_o est la vitesse moyenne réelle

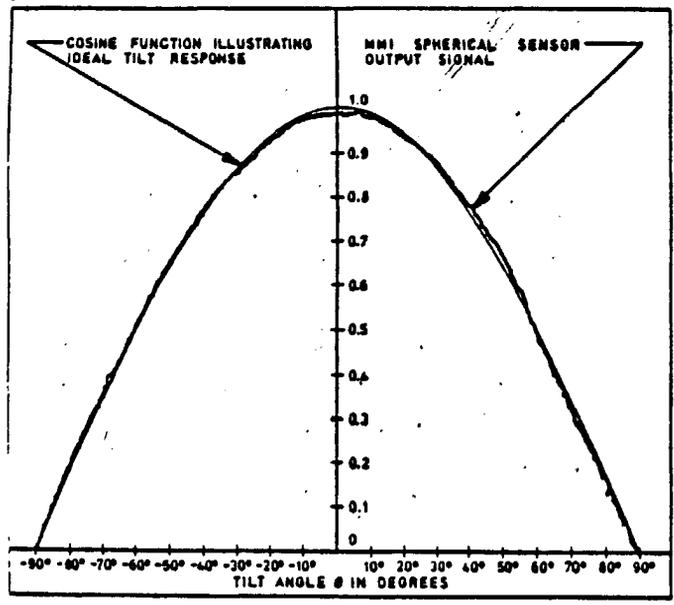
\bar{V} la vitesse moyenne mesurée

a ω l'amplitude de la vitesse fluctuante sinusoïdale

MODEL 585



VERTICAL TILT RESPONSE
MARSH McBIRNEY 4" SPHERICAL SENSOR



SPHERICAL SENSOR AZIMUTH RESPONSE

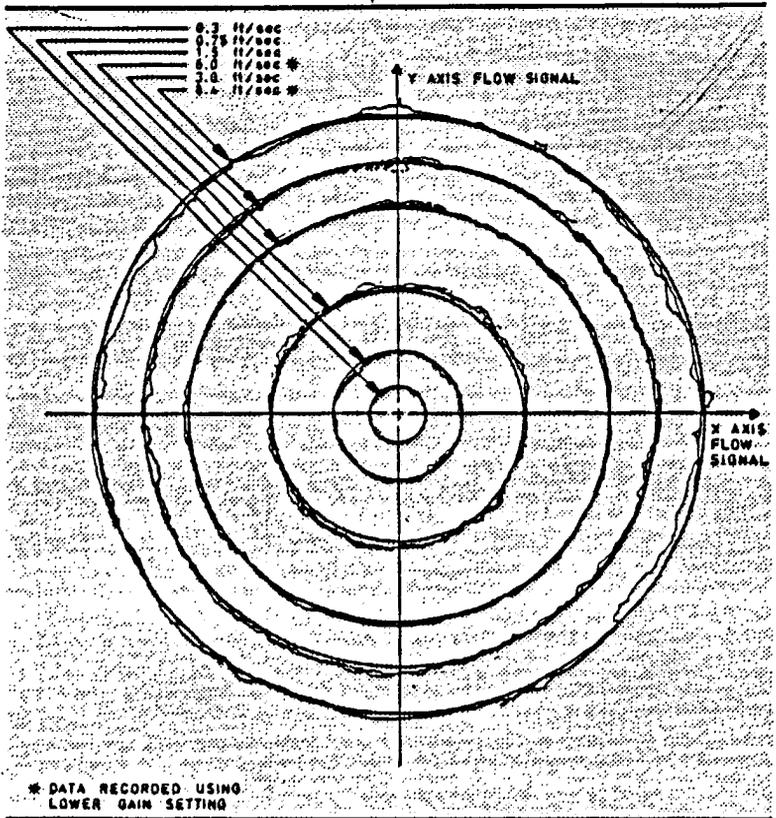


Figure 9 : Marsh Mac Birney

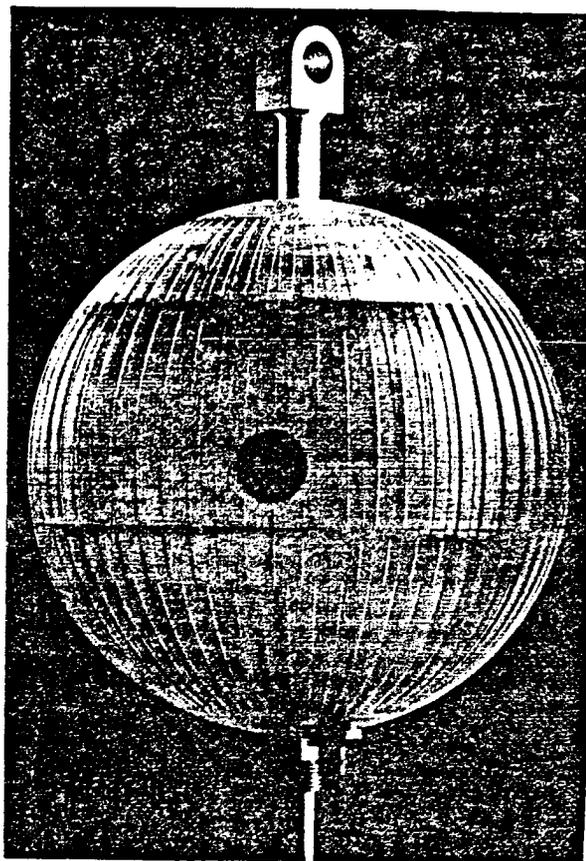


Figure 10 : Courantomètre S4 InterOcean

IV EFFETS DU MOUILLAGE

Mouillage de surface :

Les courantomètres asservis à la surface sont soumis à des mouvements verticaux qui font que l'angle d'attaque du courant apparent peut être important (voire même 90°).

Si le capteur est éloigné de la surface (5 m), il suit un mouvement orbital plus large que les particules d'eau voisines. On s'arrange ainsi pour avoir un écart minimum entre le Cabrion et le capteur. Il faut de toute façon une excellente réponse verticale. En particulier, le corps de l'appareil est parfois gênant. Les courantomètres à rotor ont un temps de réponse trop lent et une hystérésis telle qu'ils ne donnent pas de bonnes valeurs dans la zone influencée par la houle ou sous une bouée asservie à la surface (même avec des VACM).

Le mouvement dû à l'évitage du mouillage à la période de la marée induit des erreurs sur la mesure.

En effet, le forcing est en $U \cdot \text{abs}(U)$ et est donc non-linéaire. On retrouve de l'énergie sur toutes les fréquences.

Mouillage de subsurface :

La ligne doit être très tendue (flottabilité importante) et la surface soumise à la trainée doit être minimum (nombre de bouées de flottabilité faible).

V) COURANTOMETRES EXISTANTS OU EN PROJET

Les principaux résultats sont sur le tableau 1.

AANDERAA RCM 4 (Rotor, Norvège) (figure 4)

La mesure de direction est instantanée tandis que celle du module est cumulée. Il est structurellement impropre à la mesure de surface quand les courants orbitaux de houle sont importants. Il est plutôt utilisé en mouillage sub-surface ou au fond. La grande girouette ne s'oriente pas à moins de 20 cm/s.

Un nouveau rotor est proposé depuis le 1 mars 1984. Il est sensé supprimer l'hystérésis du rotor. Les plateaux externes du rotor maintiennent un certain volume d'eau à l'intérieur du rotor. Ce volume d'eau a tendance à tourner avec le rotor ce qui le conduit à se comporter comme s'il avait une plus grande inertie ; ainsi le rotor ne décélère pas aussi vite que le courant. AANDERAA estime que cet effet est prédominant en zone de vagues et que l'effet redresseur du rotor (burst-sampling) est négligeable. Le nouveau rotor est posé gratuitement sur les anciens courantomètres.

TABLEAU 1

	MARSH MC BIRNEY	SEA DATA	S4 INTEROCEAN	NBIS	SIMRAD	AANDERAA	SUBER SLS II	VMCM
vitesse max.	3.05 m/s	id.	3.5 m/s	2.5 m/s	2.5 m/s	3 m/s	3 m/s	?
Seuil de démarrage	1 cm/s	id.	1 cm/s	0.05 cm/s	1 cm/s	2 - 3 cm/s	4 cm/s (2 cm/s (SLS 21))	1 cm/s
Precision								
- linéarité	± 2 % de la lecture	id.	bonne	± 1 %	-	3 cm/s	2.5 cm/s	bonne
- dérive à long terme	> 2.13 cm/s	id.	> 2 cm/s	-	-	-	-	-
- calibration	± 2 % lecture	id.	± 2 % de lecture	5 %	2 % de l'échelle	-	-	-
Resolution	0.2 cm/s	id.	-	-	1 cm/s	-	-	0.15 cm/s
cadence	1 Hz	id.	2 Hz	5 Hz	-	-	-	4 à 0.2 Hz
d'acquisition								
Volume de mesure	1 dm3	id.	4 dm3	1 dm3	4 dm3	-	2 à 3 dm3	-
Compas								
- Resolution	1.4 °	id.	± 2 °	± 2 °	3 °	0.35 °	1.4 °	1.4 °
- Précision	5 °	id.	± 5 °	± 5 °	± 5 °	± 5 °	± 5 °	± 5 °
Reponses								
- Horizontale	± 5 °	id.	bonne	± 2 %	-	0 %	7 % de la mesure	1 %
- Verticale	± 5 % (± 60 °)	id.	bonne	± 2 % (± 20 °)	?	± 5 % (± 30 °)	± 5 % (± 30 °)	3 % (0 à 360 °)
- Verticale dynamique	bonne	id.	bonne	-	-	mauvaise	mauvaise	excellente
Options								
- température	x	x	x	x	x	x	x	x
- conductivité	-	-	x	-	x	x	x	-
- Pression	x	x	x	-	x	x	-	x
Forme								
- Poids (air)	43 kg	40 kg	8 kg	43 kg	21 kg	28,8 kg	23 kg	36,5 kg
- Poids (eau)	18 kg	15 kg	0	22 kg	12,5 kg	17 kg	12 kg	15 kg
- Taille								
Longueur	1.5 m	1.4 m	50 cm	1.33 m	1 m	75 cm	91 cm	2.58 m
Largeur	17 cm	26 cm	20 cm	20 cm	12.5 cm	1.37 m	21.4 cm	-
Enregistrement								
- Moyen	Cassette Memodyne	cassette Sea Data	Mémoire <input type="checkbox"/> Mos	Cassette Sea Data ou Memodyne	Cassette Memodyne	Bande Aanderaa	Mémoire <input type="checkbox"/> Mos	Cassette Sealink
- Capacité	3.5 à 5 Mbits	15 Mbits 500 octets mesurés	64 à 128 K octets 30 à 4000 mesurés	3 - 5 à 15 Mbits	2.2 Mbits	96 K.Octets	32 à 96 K.octets 8 à mesurés	11.5 M bits
VACH								
Intervalle	5 mn à 21 heures	-	-	-	?	-	Programmable (SLS 21)	-
Durée de moyenne	1 à 15 mn	-	1 s à 10 heures	1 à 15 mn	-	30 " à 60 mn	10 mn	1 à 15 mn
Données brutes	Données à 1 Hz	Intervalle : 3,75, 7,5, 15, 30, 60 mn en continu Durée : 8 à 120 mesures. Moyenne : 4 à 64 s	Données à 2 Hz	Données à 5 Hz	?	-	Possible (SLS21)	-
Houls	Calcul de E, N, P P2, N2, E2, NP, PE, EN. E : Est, P : Pression N : Nord	-	Programmable acquisition toutes les 3 heures pendant 20 mn à 2 Hz	-	-	-	-	-
Cadence	1 Hz							
Durée	20 mn							
Batterie	Gel-Cell rechargeables	Alcaline	Lithium Alcaline	Alcaline lithium	Lithium	Alcaline magnétique	Lithium	Lithium
Prix	190 kF	160 kF	80 kF	160 kF	160 kF	50 kF	50 kF	130 kF
Remarques	-	-	Liaison RS 232	-	Vitesse verticale	-	Liaison RS 232	-

SUBER VACM SLS 11 (rotor, France) (figure 4)

En présence de courants orbitaux de houle, il constitue un progrès par rapport à l'AANDERAA. Toutefois son seuil de démarrage est moins bon et sa réponse horizontale est altérée par la présence de barres de protection. Il a été particulièrement étudié par le COB et le SHOM. Les résultats métrologiques de l'AANDERAA et du SUBER sont dans le rapport COB/TDI/SEQM 81-33 de D. BUISINE.

KALVAITIS (74) montre que les capteurs VACM surestiment l'énergie basse fréquence en présence de fluctuations de vitesse haute fréquence.

Un nouveau modèle (SLS 21) donne des possibilités de programmation (démarrage après une heure donnée) et des facilités de transfert de données vers un ordinateur de bureau équipé d'une liaison RS 232. Un logiciel est proposé (10 kF).

Le seuil de démarrage du rotor a été abaissé (inférieur à 2 cm/s) en modifiant l'emplacement des aimants. Une version standard à 2 aimants est proposée sans altération de la résolution.

Le compas est disposé en bas de l'appareil (loin des aimants). La courbe de déviation du compas sera améliorée.

EG & G SEA-LINK VMCM 630 (double hélice, U.S.A.) (figure 5)

Ce courantomètre fait aussi la moyenne des composantes. Deux double-hélices sont disposées à 90°. Il a été développé par le SCRIPPS Institute of Oceanography. Il est censé se comporter particulièrement bien en présence de mouvements verticaux de mouillage ou de houle. Sa sensibilité au fouling fait qu'il est adapté aux mesures sur le plateau et dans le cas de lignes de mouillage animées de mouvements verticaux importants. Il faut savoir que plus la vitesse du courant diminue (au fond par exemple), plus la présence de mouvements verticaux altérera la mesure. Une bonne réponse verticale est donc nécessaire même pour des mesures profondes.

SIMRAD UCM (Acoustique, Norvège) (figure 6)

La mesure précise des temps de propagation d'une onde ultrasonore émise simultanément dans deux directions opposées donne la vitesse du courant. Aucun rapport d'essai n'est parvenu à ce jour au COB. Il mesure la vitesse verticale (à évaluer).

Résolution : 1 mm/s

Précision : 2 % de l'échelle (0 à 5 m/s ou 0 à 2,5 m/s)

Compas AANDERAA (données constructeur)

Prix : environ 160 kF

NBIS ACM 2 (Neil BROWN Instruments, acoustique, U.S.A.) (figure 6)

Les perturbations de l'écoulement (barres de soutien) semblent jouer un rôle important sur la précision de la mesure. Une étude de K.D. SAUNDERS (80) sur la réponse horizontale du courantomètre montre que le sillage des supports de la cage de mesure induit une erreur de $\pm 8\%$ de la mesure. En corrigeant la sortie du signal par un polynôme de calibration du 10^e ordre, l'erreur est réduite à $\pm 1-2\%$, tandis que l'erreur en direction passe de $\pm 5^\circ$ à $\pm 1^\circ$.

Pour éviter les turbulences, le réflecteur et les cellules d'émission sont écartées : la sensibilité aux algues (ou autres) est accrue et le design du capteur est moins robuste (ceci est valable de façon générale pour tous les courantomètres acoustiques).

Les courantomètres acoustiques ont des performances meilleures pour le seuil de démarrage, la linéarité, l'hystérésis. Par contre, la présence de bulles d'air modifie la mesure. Les matières en suspension ont probablement, aussi, un effet.

MARSH MAC BIRNEY 585 (électro-magnétique, U.S.A.) (figure 9)

Il mesure la différence de potentiel proportionnelle à la vitesse du conducteur (l'eau) qui est générée par ce conducteur quand il se meut dans un champ magnétique.

Il est très utilisé. Il sert à des mesures en zone de déferlement, dans la couche limite du fond aussi bien qu'en plein océan. Le capteur sphérique a permis d'améliorer les réponses verticale et horizontale. Les électrodes protubérantes permettent de diminuer les erreurs dues aux turbulences autour du capteur. Le temps de réponse est inférieur à 1 seconde. Le problème reste la dérive du zéro.

Il est muni d'un micro-processeur qui permet de calculer des paramètres tels que les covariances et autovariances (avec la vitesse et la pression). Seules ces valeurs sont alors enregistrées et on peut par la suite déduire la houle directionnelle.

SEA DATA 620 A-BACM (électromagnétique, U.S.A.)

Le capteur est Marsh Mac Birney et l'enregistrement Sea Data. La capacité de stockage est très importante (15 Mégabits). Il est possible de programmer des séquences discrètes d'enregistrement. T,P peuvent être ajoutées. Une acquisition haute fréquence est possible. La version de base est au prix de 165 kF (avec température).

S4 INTER OCEAN (électromagnétique, U.S.A.) figure 10

Cet appareil est récent. Il a l'inconvénient d'être en cours d'évaluation. Il a la forme d'une sphère de 25 cm de diamètre. Son poids est faible (8 kg dans l'air) alors que les autres électromagnétiques sont lourds 20 à 40 kg à l'air. Son prix est modique (8.600 Dollars). Il peut mesurer T, P, C. L'enregistrement se fait sur mémoire CMOS (comme SUBER). Le constructeur affiche, globalement, les mêmes performances que les autres courantomètres électromagnétiques. Si ses performances sont confirmées, ce capteur devrait connaître un développement considérable.

Des nervures ont été faites sur la sphère pour favoriser un décollement des filets d'eau en aval du courant. La réponse est ainsi quasiment linéaire entre 0 et 150 cm/s. Sa réponse horizontale est bonne (0,7 cm/s RMS pour une vitesse de 20 cm/s). La réponse verticale n'est pas perturbée par la présence d'un corps contenant piles ou électronique. Il mesure les courants de 0 à 350 cm/s. La précision affichée est de 2 % de la lecture ou ± 1 cm/s. Son autonomie est de 120 jours avec une moyenne toutes les 5 minutes. La fréquence de mesure est de 2 Hz. Il peut effectuer une moyenne de N Valeurs ($2 < N < 65535$). Il peut être programmé pour n'enregistrer qu'à partir d'une date donnée.

Le département possède une procédure de programmation et d'enregistrement des données du S4 sur un micro-ordinateur, à la vitesse de 4800 bauds. L'horloge a une dérive importante 1 mn/mois. La version 64 ko de mémoire est suffisante pour des applications courantes (moyenne sur 10 mn). C'est alors la batterie qui est le facteur limitant. Pour la mesure de la houle, il faut beaucoup plus de 64 ou 128 Ko.

BEN-COMEX SCOLA (électromagnétique, France)

En attente d'évaluation.

Mr. SCOLA de ELYSIA OCEANOGRAPHIE construit, pour ses propres besoins, des courantomètres électromagnétiques munis de capteurs en forme de champignons. Le stockage est du type SEA-DATA. Il fait, en quelque sorte, la synthèse de différentes techniques (capteur BEN-COMEX, électronique MARSH MAC BIRNEY, stockage SEA-DATA). toutefois, actuellement :

- absence de compas (nécessité de poser l'appareil sur le fond et de le caler en direction)
- Alimentation par batteries (encombrement très important)
- Prix comparable au SEA-DATA ou au MARSH MAC BIRNEY.

Les avantages sont essentiellement que l'appareil est considéré comme français et qu'il a une autonomie de stockage importante.

Il devait être examiné par DIT/QE mais Mr SCOLA a déjà un retard de plusieurs mois. Le constructeur ne souhaite pas, de toute façon, développer un marché important.

Le capteur champignon est bon quand les filets d'eau sont horizontaux (mauvaise réponse verticale). Le capteur doit donc être placé soit directement en-dessous de la bouée de surface, soit près du fond. La bouée ne doit pas pilonner (largeur importante).

COURANTOMETRE DOPPLER (ponctuel, acoustique)

En développement au COB.

Une onde acoustique est rétrodiffusée par une couche d'eau mobile avec un décalage en fréquence proportionnel à la vitesse de la couche. Ses avantages sont :

- pas de perturbation de l'écoulement
- cadence d'acquisition rapide.

Il reste à définir :

- le volume d'eau sur laquelle la vitesse est moyennée (1 m³) (pourra-t-il échantillonner spatialement la houle ?)
- L'angle des deux faisceaux partant d'une base posée au fond pour obtenir les deux composantes. En effet, plus les zones explorées par ces faisceaux sont éloignées, moins la mesure est cohérente.
- Jusqu'où la mesure sera valable (surface et près du fond),
- Le coût d'un tel appareil (100 kF).

Profileur acoustique à effet Doppler

Le profileur transmet des impulsions courtes dans l'eau suivant les axes de 1 à 4 bases faisant un angle de 30° avec la verticale. Le son rétrodiffusé par le plancton, les particules est reçu par le transducteur avec un décalage Doppler en fréquence proportionnel à la vitesse relative entre le transducteur et la matière diffusante. Un traitement temporel permet d'obtenir un profil de vitesses sur la colonne d'eau. En connaissant la géométrie précise des rayons, les trois composantes du courant sont calculées à partir de 3 des faisceaux, (le 4e apporte une redondance), pour chaque niveau de profondeur.

Il existe un courantomètre profileur Doppler français développé par THOMSON, autonome, émettant à 60 KHZ. Les résultats sont pour l'instant très médiocres et son prix est très élevé (1,5 MF)

RD Instruments propose une série de profileurs pouvant couvrir, suivant la fréquence, de 30 à 1.000 mètres. Une intercomparaison avec des VMCM semblent donner d'excellents résultats. La couche d'eau dans laquelle le courant est moyenné peut avoir une épaisseur de 1 à 32 mètres. Le nombre de couches va jusqu'à 128.

Les fréquences vont de 75 kHz (portée 1.000 mètres) à 1.200 kHz (portée 60 mètres). La précision dépend de la fréquence et de l'épaisseur de la couche (à 1.200kHz, pour une épaisseur de 4 m, elle est de 4 cm/s). Elle peut être améliorée en opérant une moyenne (0.7 cms avec une moyenne sur 1 minute).

L'amplitude rétrodiffusée est enregistrée (corrélation avec la turbidité ?). Dans le cas d'un appareil posé sur le fond, le courant de surface n'est pas accessible : 85 % de la hauteur d'eau peut être mesurée.

Le prix est d'environ 500 à 600 kF;

Le prix et les performances de cet appareil font qu'il est adapté aux mesures sur le plateau continental ou par grand fonds (inf. à 1000 mètres).

Pour des profondeurs de l'ordre de 15 mètres, il est utilisable et pour des profondeurs de 40 à 50 mètres, il est classique de faire une approximation bi-couche et de ne poser que deux courantomètres.

Toutefois, cet appareil représente un saut technologique par rapport à la courantométrie classique et les améliorations technologiques doivent être suivies.

VELOCIMETRE LASER

Il est utilisé en laboratoire. Il repose sur le même principe que l'appareil précédent avec une sonde électromagnétique dans le visible. Quelques caractéristiques :

- très faible seuil de démarrage
- réponse intrinsèquement linéaire
- résolution temporelle : 1 à 1000 Hz
- Résolution spatiale : 1 MM ou moins
- $\lambda = 6.33 \times 10^{-5}$ CM, puissance : 3 mW

Il nécessite une grande puissance. La précision dépend du nombre de particules en suspension dans le fluide et du traitement électronique. Son utilisation en mer a débuté en 75 (WOODS HOLE) et a séduit ceux qui étudient la turbulence. Il semble plus adapté à la mesure des vitesses turbulentes au voisinage du fond et aux phénomènes de haute fréquence et de petite échelle spatiale. Le même principe peut être appliqué à la mesure de la turbidité.

VI) MESURE DE LA HOULE

Dans le cadre de la dynamique sédimentaire, il est utile de mesurer la houle directionnelle. Cette mesure est accessible avec des courantomètres acoustiques ou électromagnétiques munis d'un capteur de pression. Les fluctuations des courants échantillonnés à 1 ou 2 Hz permettent d'avoir la houle directionnelle par bande

de fréquence. La direction est donnée par la direction du maximum d'énergie. L'ambiguïté sur le sens est levée par la mesure de pression. La hauteur de la houle est une fonction non-linéaire de la pression en zone côtière ($H < \lambda/2$) ; H n'est pas facile à déterminer alors. Le capteur doit pouvoir mesurer des vitesses de l'ordre de 3.5 m/s. En effet, pour une houle de période 10 s et de $H/3$ 8 m, la vitesse tangentielle est de 2,5 m/s.

La précision du capteur de pression doit être, pour un capteur 0-70 m, de 5 cm. L'important, néanmoins, est la précision relative.

La capacité de stockage doit être importante. Ainsi, pour le S4 qui est limité à 128 Ko dans sa version haut de gamme (\$ 3.530 de plus), 13 périodes de 20 minutes pourraient être enregistrées. Le SEA-DATA offre alors une meilleure capacité pour un prix légèrement supérieur. Quant au M.M.B., il a une capacité de stockage trois fois inférieure mais peut être utilisé si on ne veut stocker que les moyennes et les variances sur la période de 20 minutes,

Le SEA-DATA devrait offrir cette possibilité sans trop d'effort, puisqu'il est basé sur le même capteur.

VII) INTERCOMPARAISON DE MOUILLAGES

Les intercomparaisons de courantomètres ou de mouillage sont souvent difficiles à interpréter car on ne connaît pas la vraie valeur.

D'autre part, on ne sait pas si le courant était le même dans toute la zone (homogénéité).

a) Justification du mouillage de surface

Dans les zones côtières de faible profondeur (15 m) et de marnage important (5 - 10 M), il n'est pas possible d'avoir une vraie mesure de surface avec un mouillage subsurface.

Il arrive, en outre, que le courantomètre change de couche dans le cas d'une stratification prononcée. Les comportements hydrodynamiques sont alors différents.

b) Lieu de l'intercomparaison (figure 11, 12)

Deux campagnes ont été effectuées dans l'anse de Sainte-Anne du Portzic. La profondeur est 9 m aux plus basses mers. La première eut lieu en hiver 81/82 ; le taux de retour de bonnes données est de 60 %. Des problèmes de rotor SUBER cassé, de fiabilité des systèmes d'enregistrement AANDERAA et SUBER sont responsables de ce taux (7 mois de mesures sur 12)

Fig.11 SITE de l'INTERCOMPARAISON

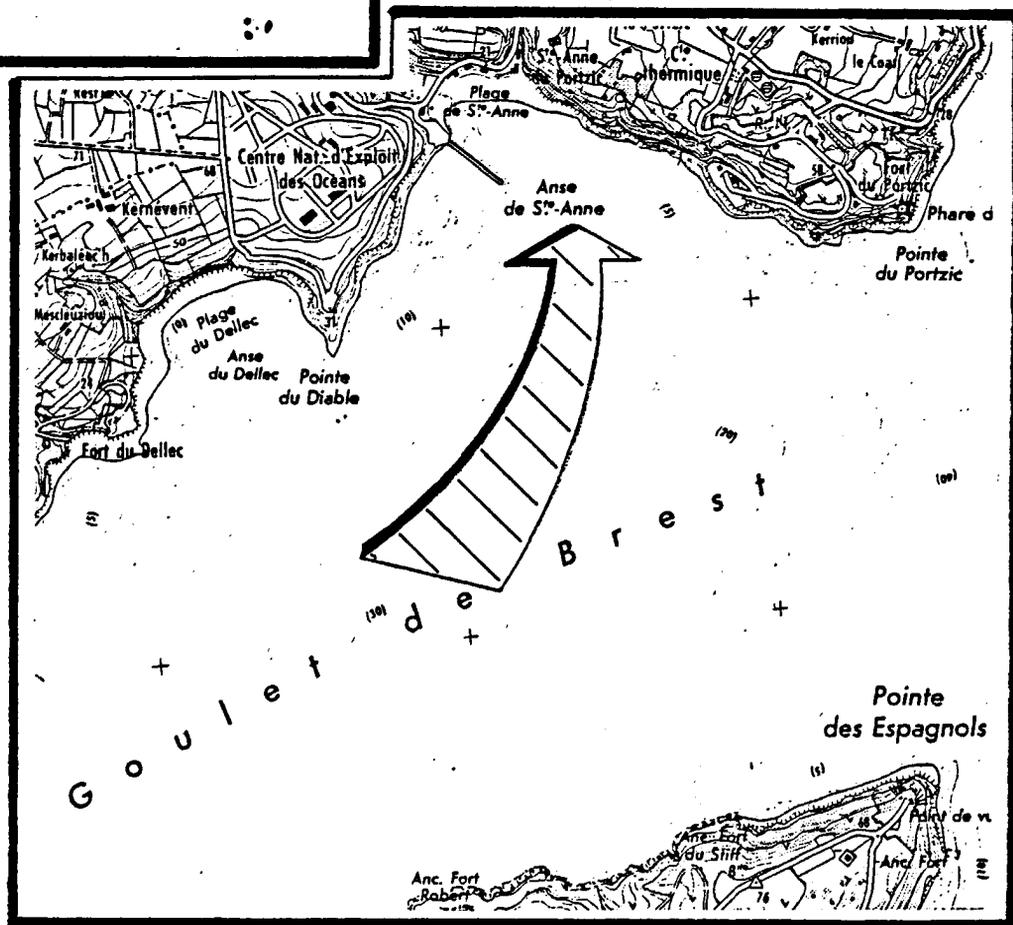
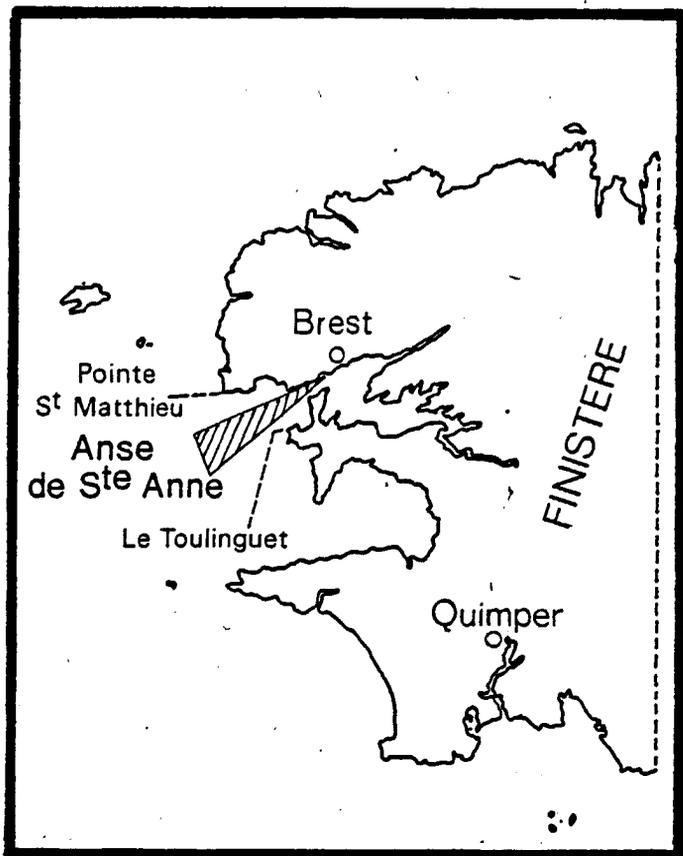
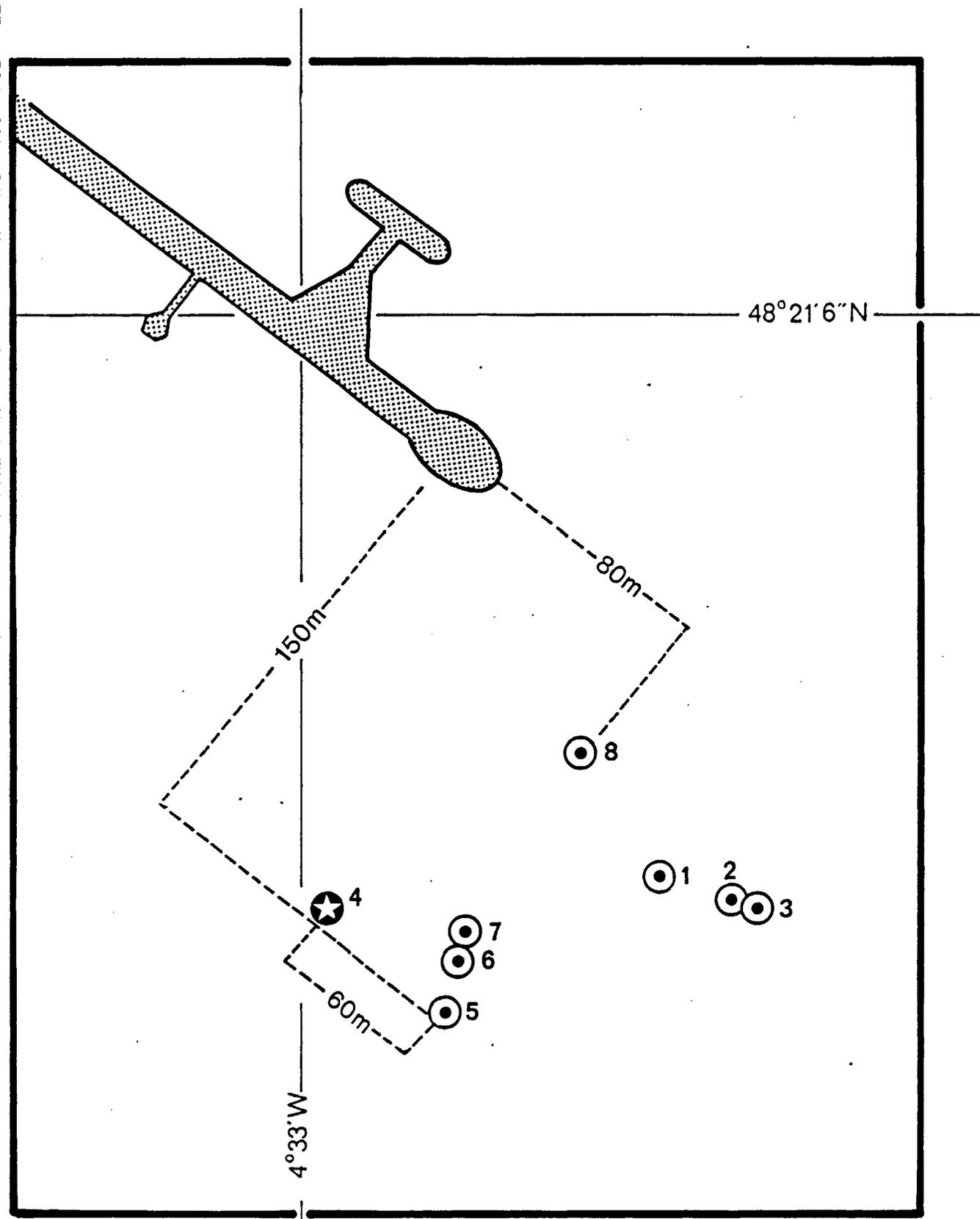
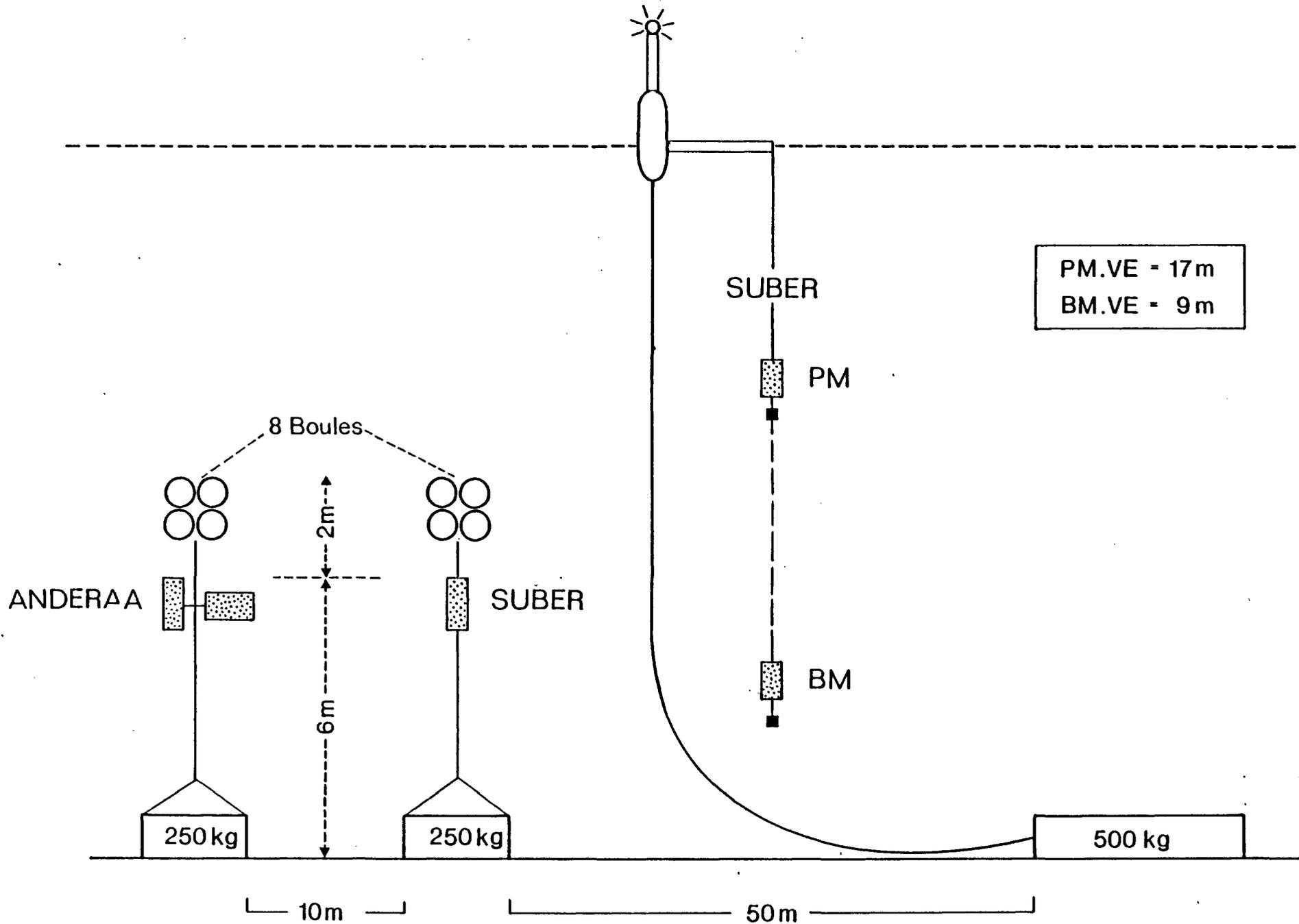


fig.12 LOCALISATION des MOUILLAGES



1. SUBER	22.2.83 / 8.3.83	8.3.83/7.4.83	Surface
2. SUBER	22.2.83 / 8.3.83	8.3.83/7.4.83	Subsurface
3. AANDERAA	22.2.83/ 5.3.83		Subsurface
4. SUBER	2.11.81/ 3.12.82	31.12.82/11.1.83	(Coffre) Surface
5. AANDERAA	20.10.81/8.11.81	3.12.81/4.2.82	Subsurface
6. AANDERAA	20.10.81/3.12.81	3.12.81/4.2.82	Fond
7. SUBER	20.10.81/4.12.81	4.12.81/4.2.82	Fond
8. SUBER	4.12.81/4.2.82		Surface

Fig.13 MOUILLAGES Ste ANNE Février 1984



La seconde eut lieu durant l'hiver 83 avec un taux de retour de 70 % (3 mois sur 4. 5). Une algue a bloquée le rotor AANDERAA, le cap donné par le SUBER 128 n'est pas fiable (voir figure 20). Cet appareil était sur un mouillage subsurface et il donne des résultats inverses des courantomètres placés en subsurface AANDERAA (quand il n'était pas bloqué) et en surface SUBER 129. Des sauts de mémoire ont été observés sur le SUBER 93 (voir figure 19), ces sauts sont repérables à cause des pics de courant qu'ils provoquent. Le SHOM a constaté des anomalies identiques.

La première comparaison est faite sur des courantomètres mouillés (l'un en surface, l'autre en subsurface, voir figure 13) du 8 mars 83 au 7 avril 83. Les vents ont été parfois très violents (30 m/s). L'emplacement n'était probablement pas excellent ; le courant n'est pas homogène.

La deuxième comparaison est faite sur des courantomètres différents (SUBER, AANDERAA) posés sur des potences au fond (environ 13 m), du 4.12.81 au 30.1.82.

c) Comparaison mouillages surface et subsurface

Dans les périodes inférieures à 1 heure, le spectre de courantomètre de surface contient plus d'énergie que celui de subsurface.

Il n'est pas possible de conclure pour les basses fréquences au degré de confiance de 95 % (figure 16).

Les vitesses moyennes sur le mois sont différentes aussi. Le comportement résiduel est modifié (figure 17) :

	Surface (pendu sous cabrion)	subsurface
EST	1.25 cm/s	.8 cm/s
NORD	- 3.54 cm/s	- 2.95 cm/s

Il n'a pas été possible de déterminer si l'écart venait :

- du mouillage proprement dit et des mouvements de pendule plus importants en surface qu'en subsurface.
- de la mauvaise moyenne des courants orbitaux apparents par l'appareil. Il est difficile d'évaluer l'état de la mer d'après les relevés météorologiques de la tour CESAR, de la Pointe St-Mathieu et la pointe du Toulinguet. A titre d'exemple, un tableau des valeurs correspondant aux périodes de vive-eau et de morte eau examinées est fait :

DATE	Tour CESAR		Pte Toulinguet		Pte St Mathieu	
	Dir. degrés	Vit. m/s	Dir. degrés	Vit. m/s	Dir. degrés	Vit. m/s
<u>5-6 avril 83</u>						
6 h 00	300	5	240	7	300	10
12 h 00	300	10	220	23	220	20
18 h 00	300	4	320	13	320	13
24 h 00	x	x	x	x	x	x
6 h 00	320	3	260	12	280	13
12 h 00	180	5	260	10	300	12
18 h 00	240	4	240	11	260	12
<u>14 - 15 mars 83</u>						
6 h 00	240	7	200	12	220	10
12 h 00	240	6	200	9	240	8
18 h 00	300	2	200	4	320	4
24 h 00	x	x	x	x	x	x
6 h 00	20	2	360	2	20	4
12 h 00	340	6	340	8	340	7
18 h 00		4	340	8	360	7

- de la situation alternative des deux courantomètres, l'un mesurant le courant de surface, l'autre pouvant être éloigné de la surface. Un calcul porté en annexe II montre que la résiduelle peut être plus forte pour la mesure de surface, ceci dans un ordre de grandeur identique au décalage observé.

Au vu des spectres et des tracés en fonction du temps (vive-eau, figure 15, morte-eau : figure 14), il apparaît que le mouillage de surface induit des vitesses supérieures. Les écarts sont assez importants. Il serait judicieux de savoir si un capteur électromagnétique donnerait de meilleurs résultats (en particulier pour la résiduelle).

Les instants pendant lesquels les deux courantomètres étaient au même niveau ont été repérés. Les valeurs des courants mesurés à cet instant ainsi que les valeurs voisines (+ 10 minutes, - 10 minutes) ont été portées sur la figure. On remarque une grande dispersion pour la composante Nord. Le courantomètre subsurface donne une valeur systématiquement plus faible de la composante Est. Il est probable que la résiduelle soit affectée (figure 18).

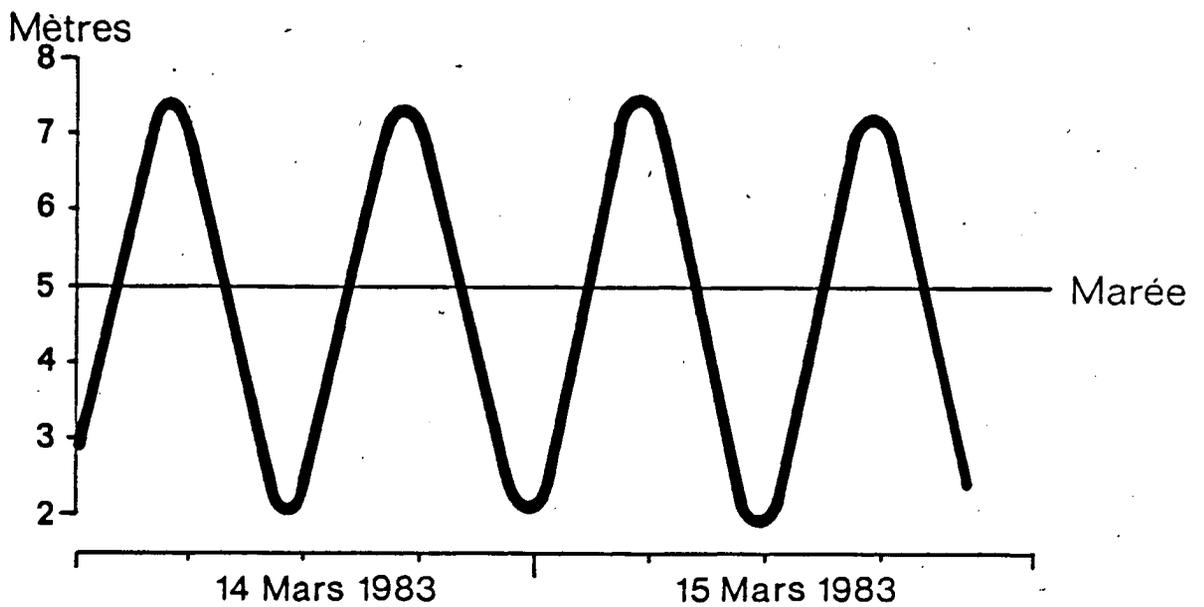
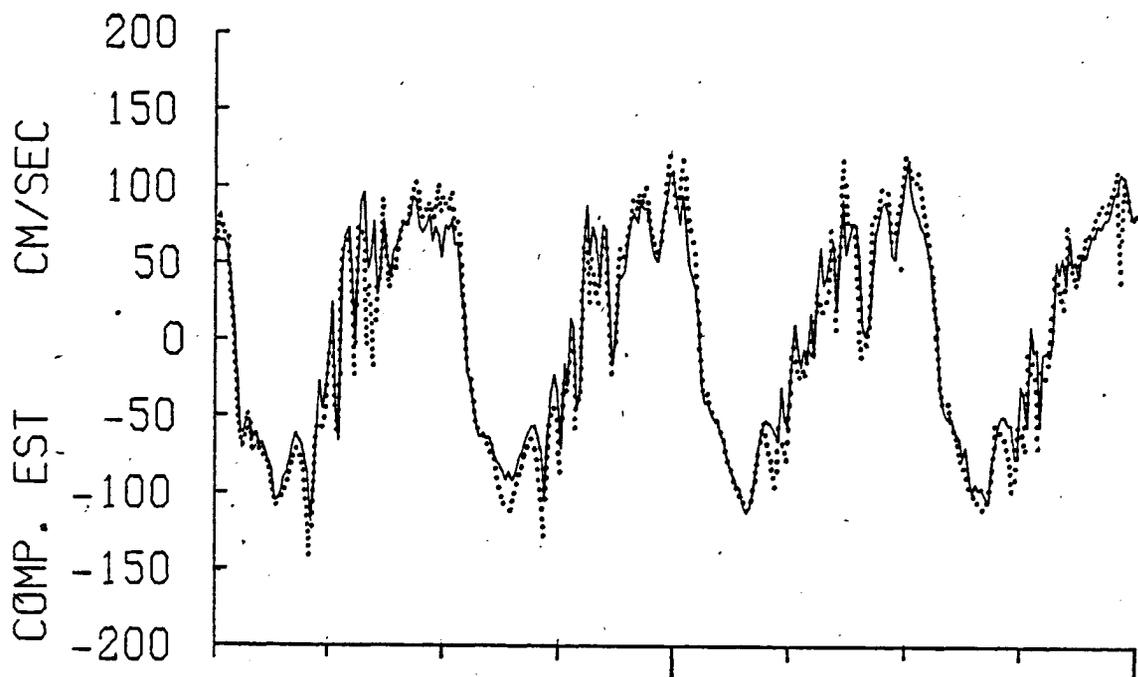
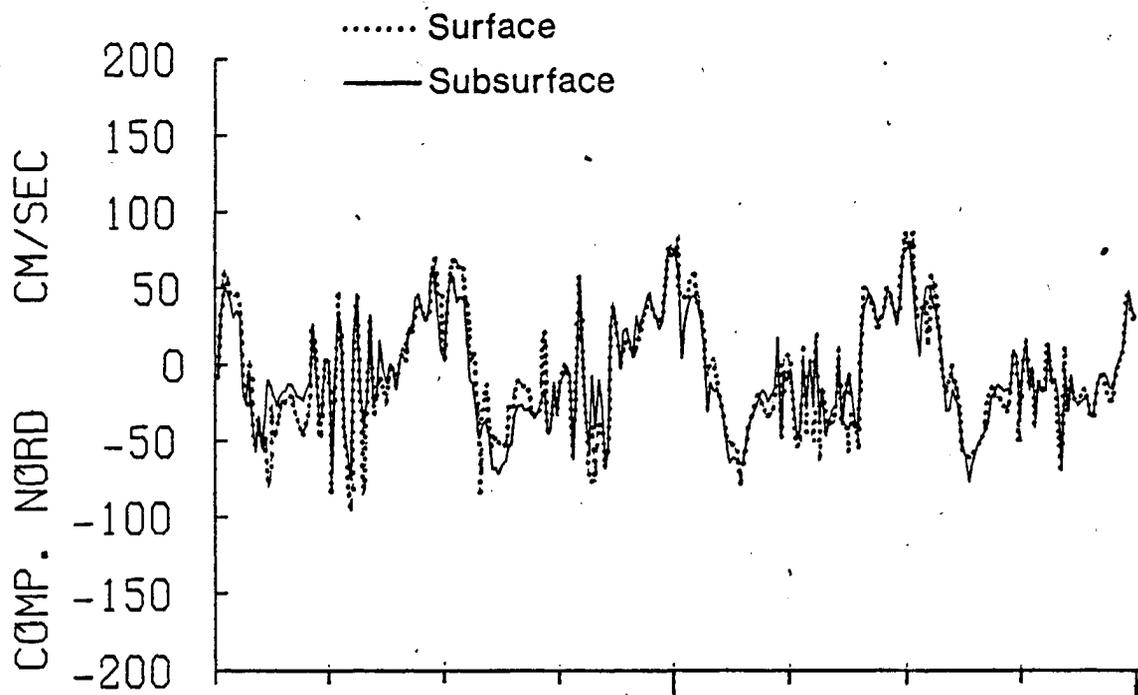


Fig.14 COURANTS MESURES en VIVE EAU

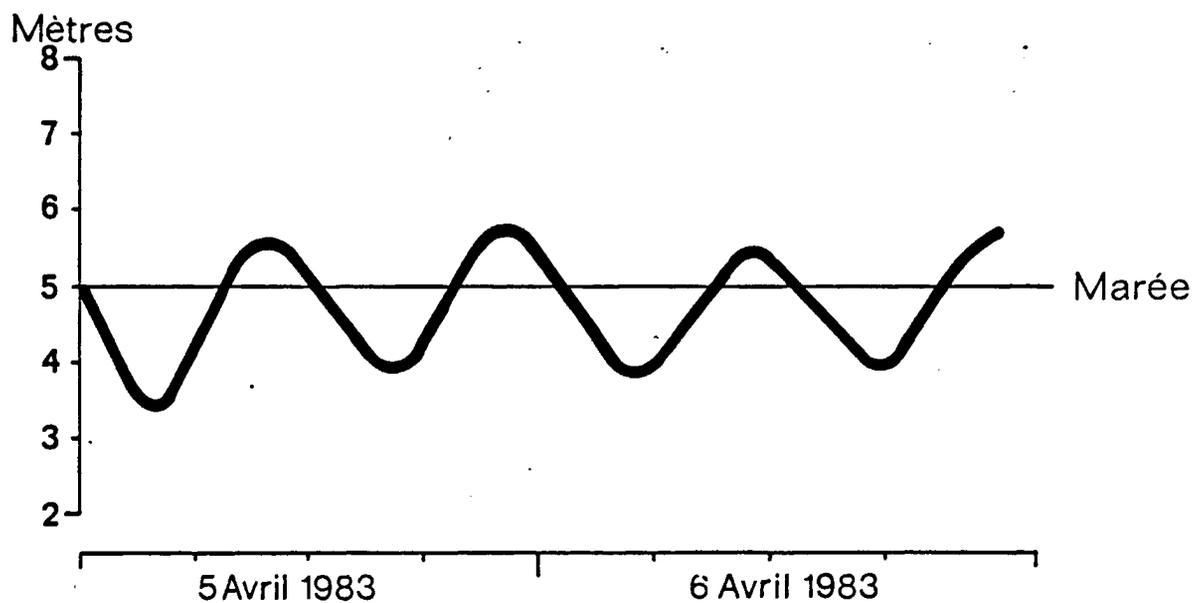
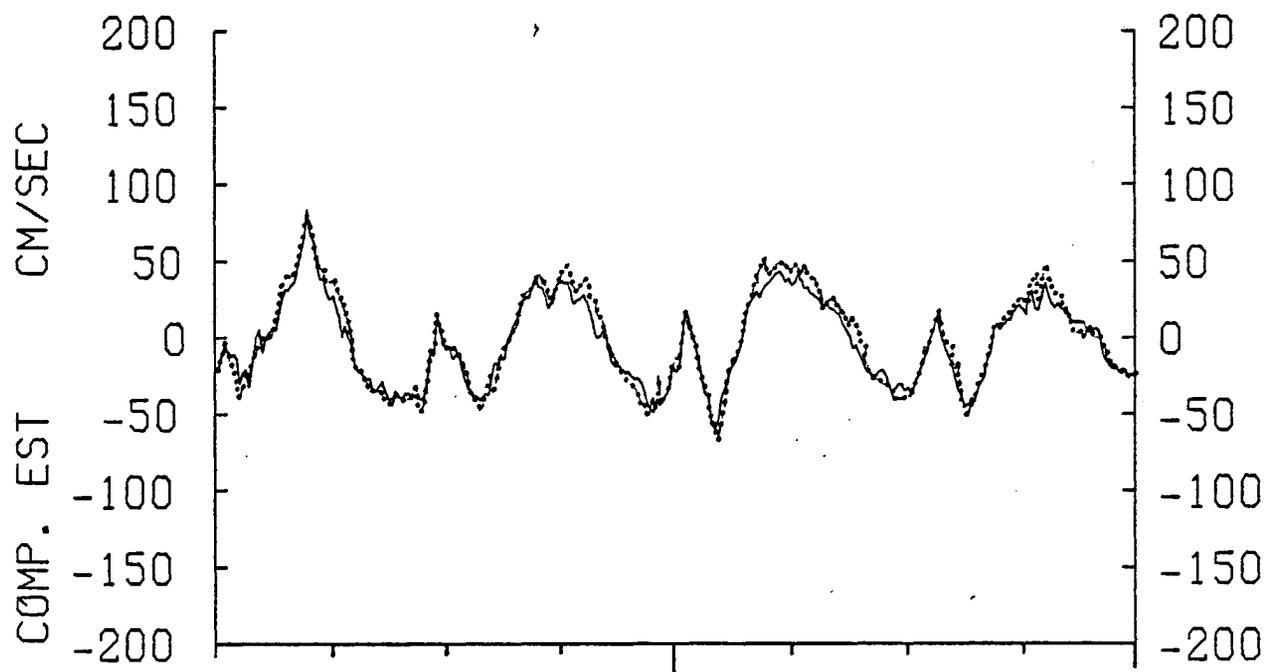
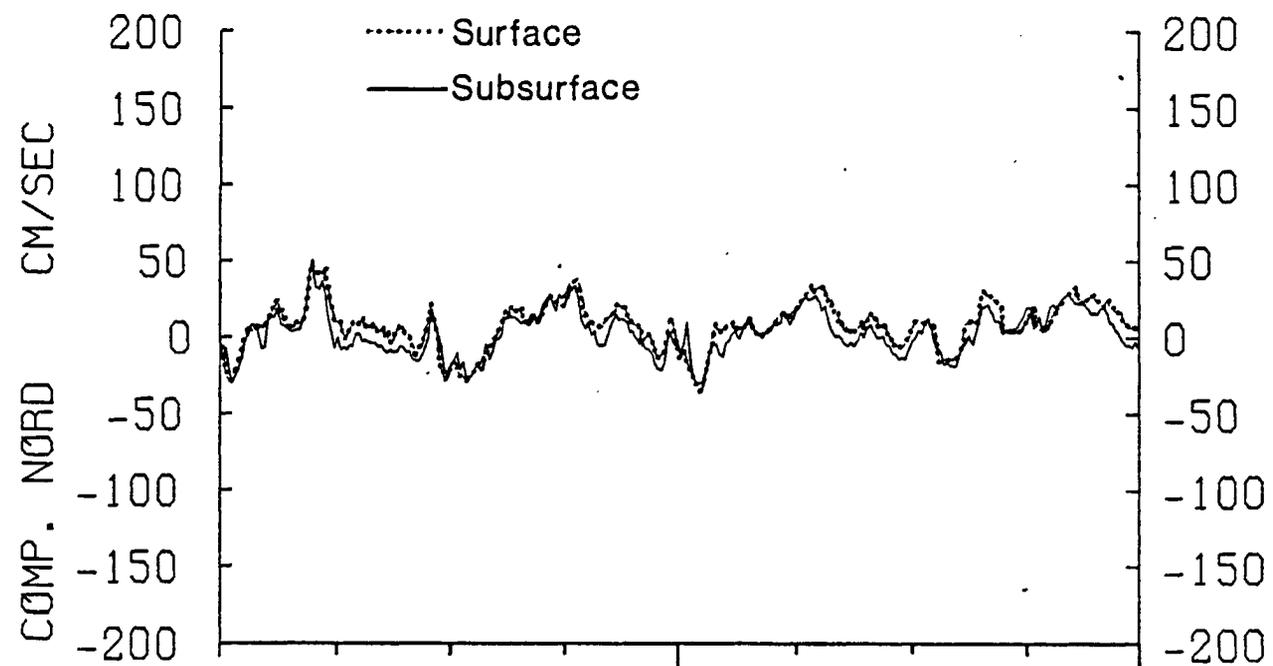
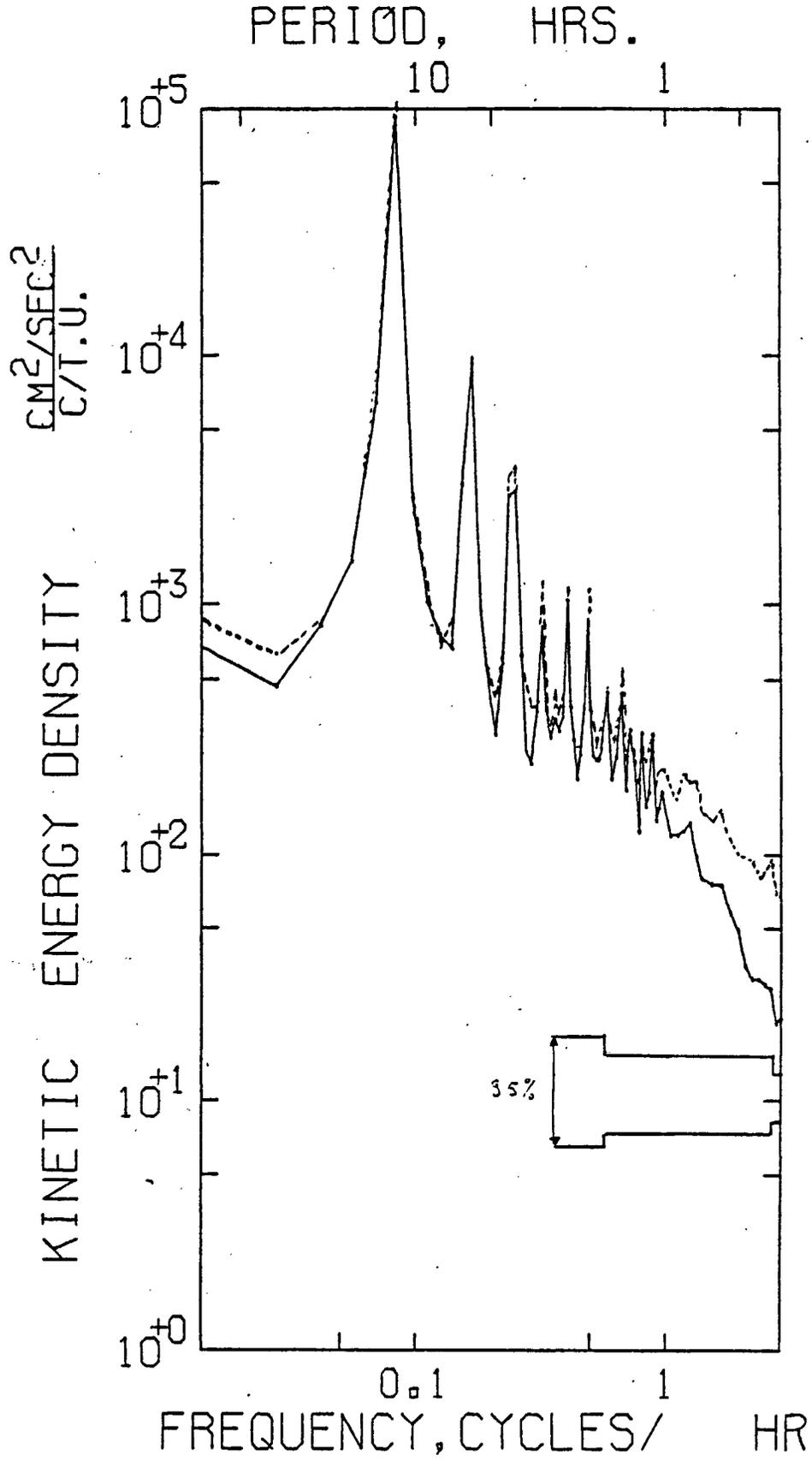
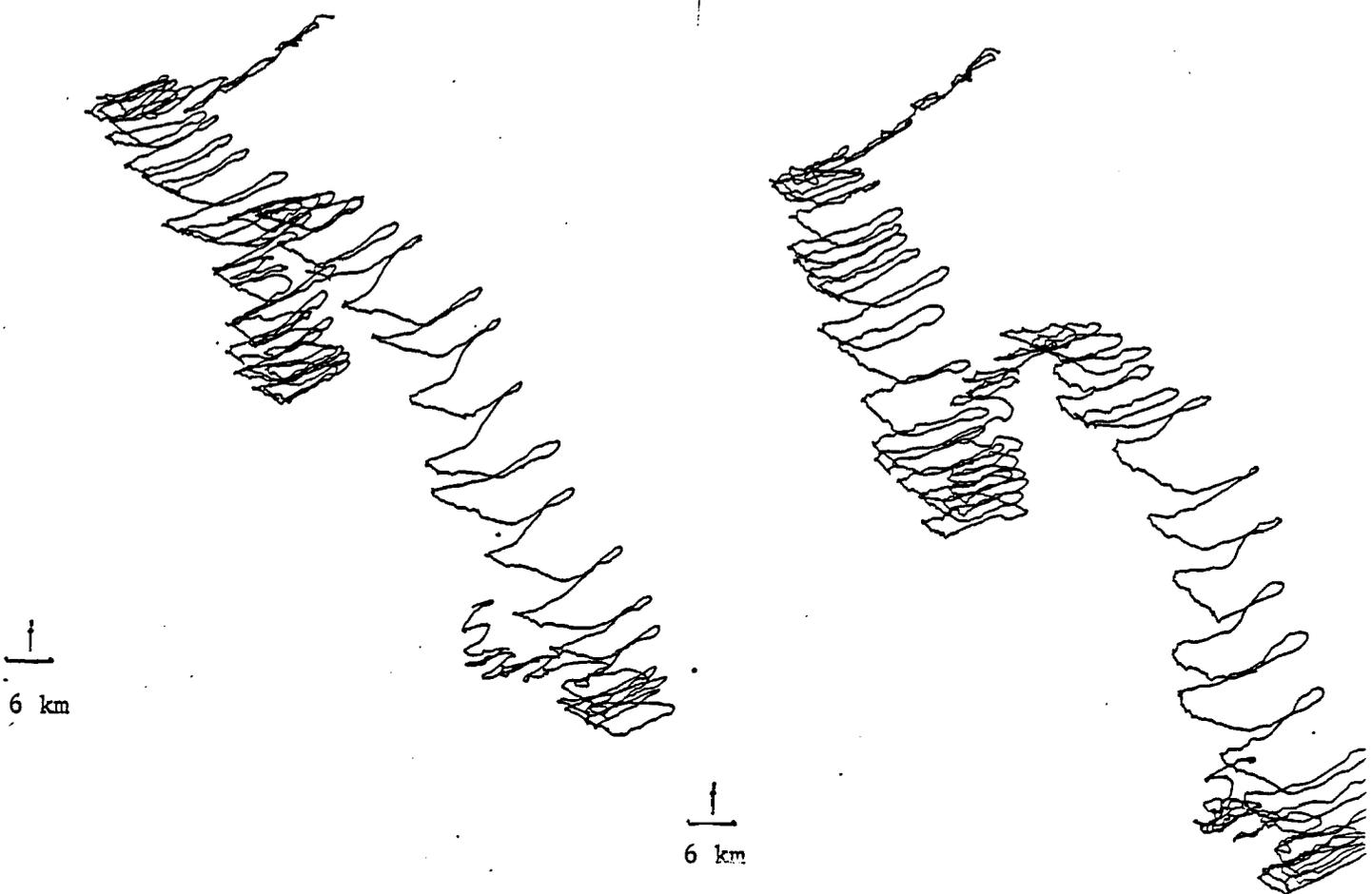


Fig.15 COURANTS MESURES en MORTE EAU



--- VACM mouillage de surface
— VACM mouillage subsurface

Figure I6 : Spectre total



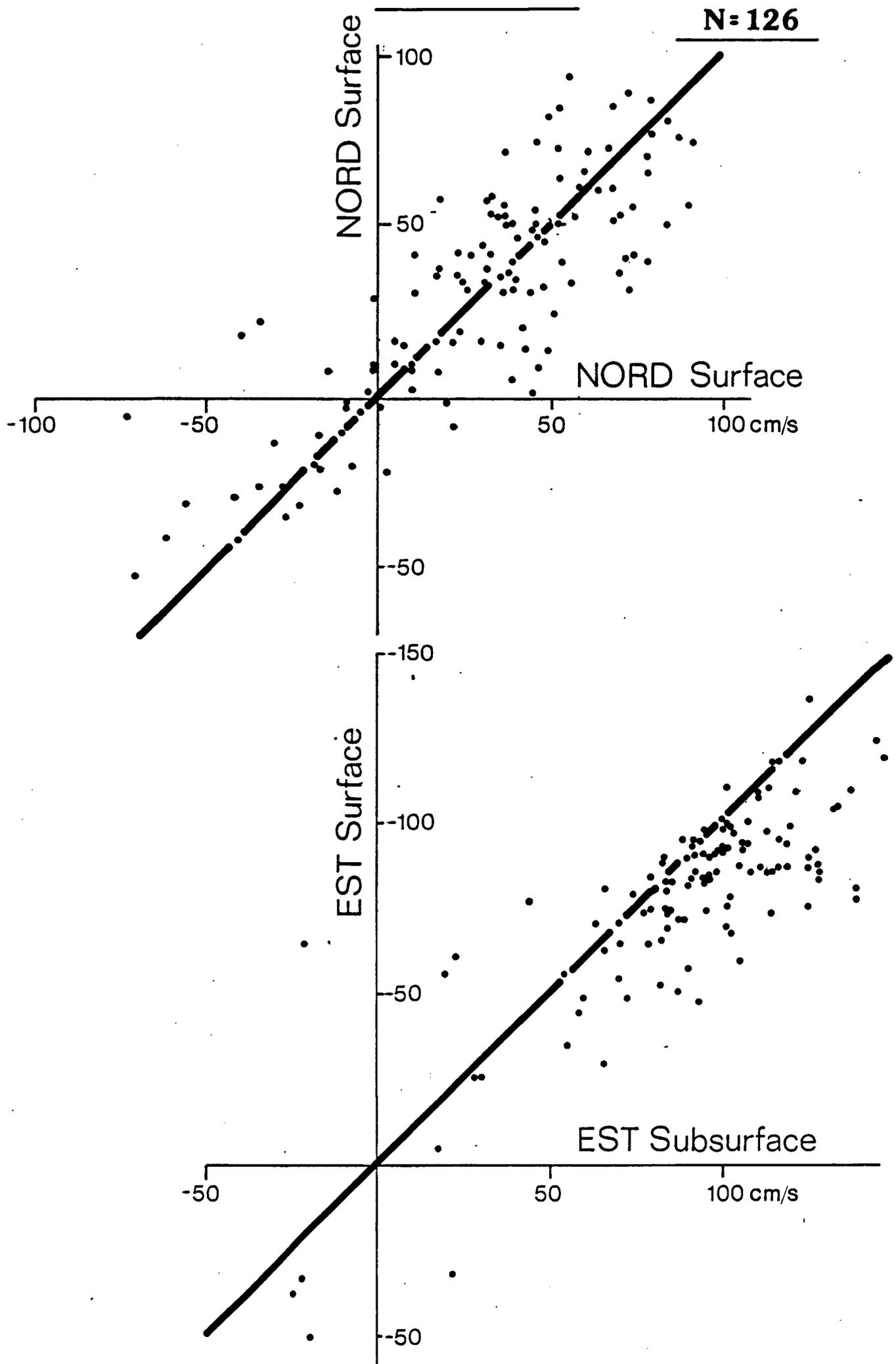
SUBER 95
Subsurface

SUBER 93
Surface

Figure 17

Hodographes Intégrés

Fig.18 COMPARAISON des VITESSES "NORD" et "EST"
en SURFACE et SUBSURFACE



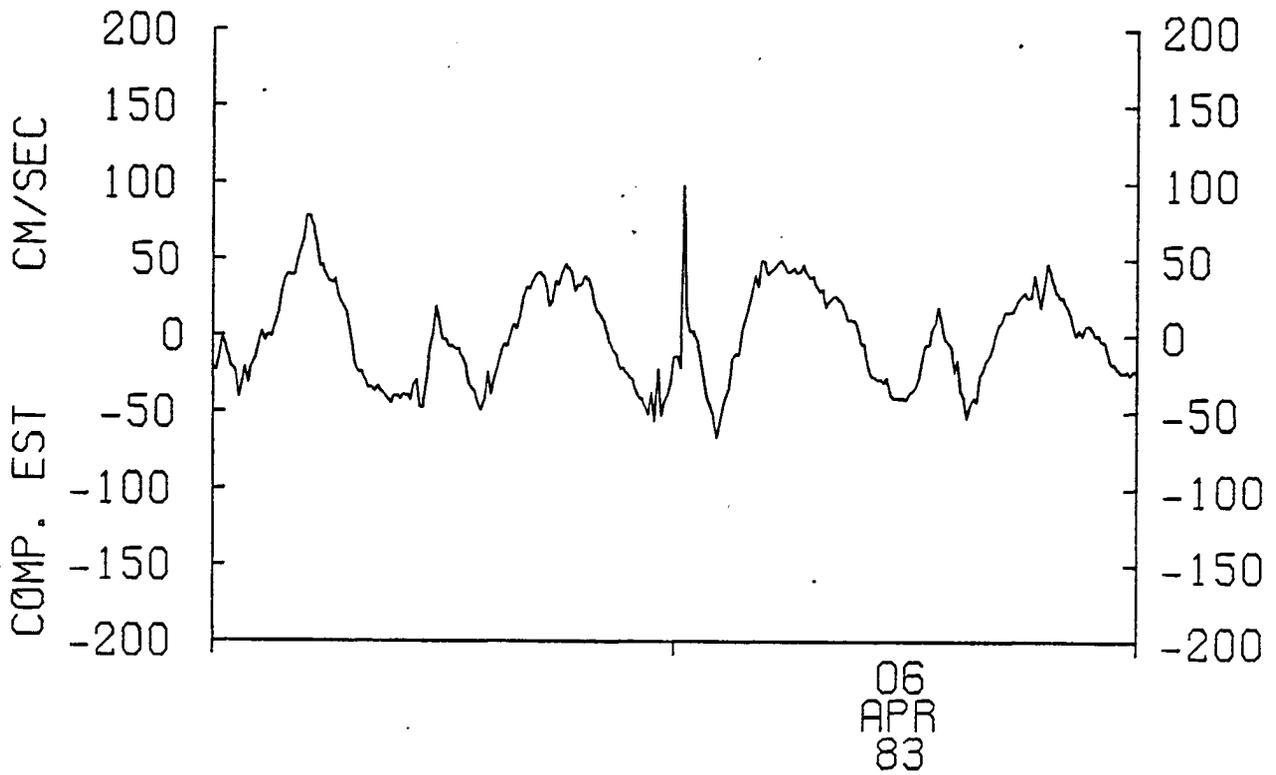
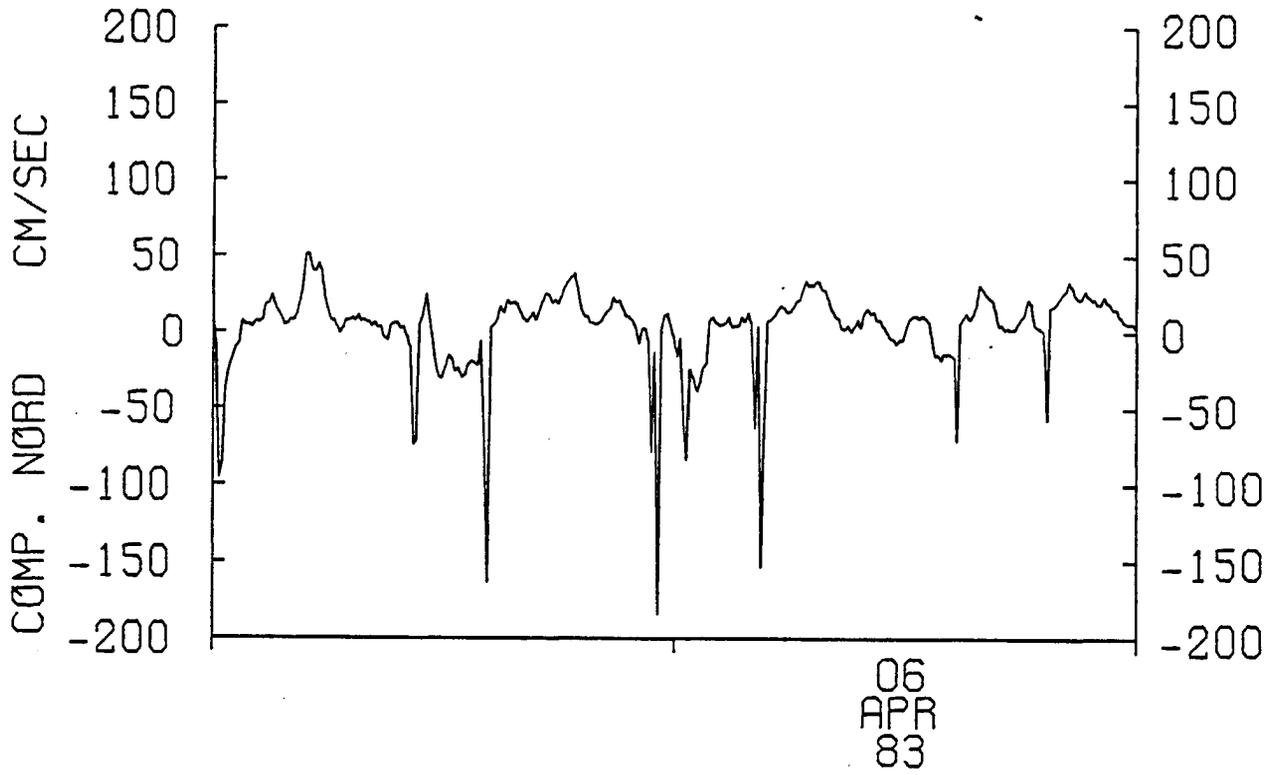
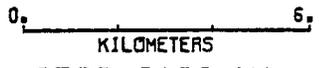


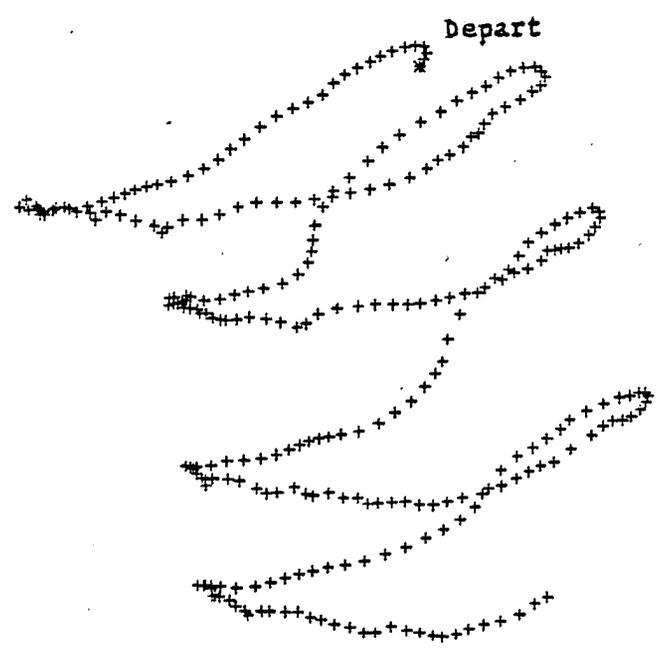
Figure 19 : Pics dûs à des sauts de mémoire
sur le SUBER 93 (Surface)



ST83-S129-W1

5 M

83- II -27 TO 83- III-01



ST83-S128-W1

1 M

83- II -27 TO 83- III-01

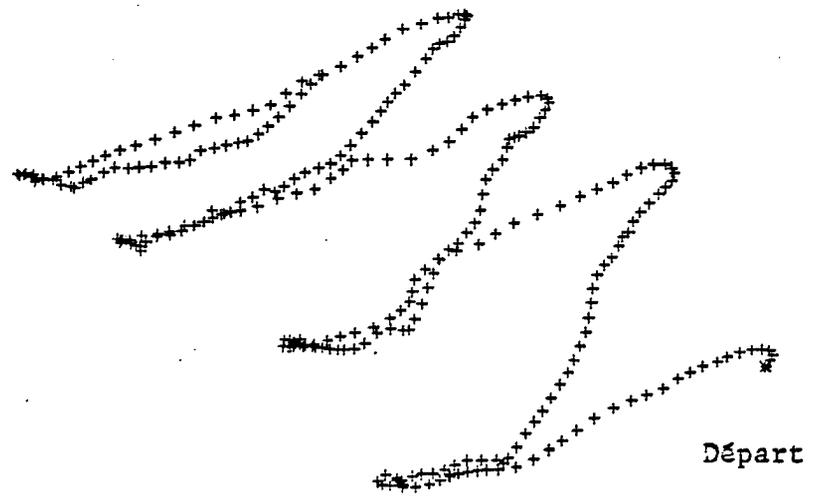


Figure 20 : Hodographes intégrés des SUBER 128 (subsurface) et 129 (surface) montrant des résiduelles inverses.

Un point est la moyenne de 6
valeurs consécutives
(moyenne sur une heure)

Le trait plein est la courbe
théorique.

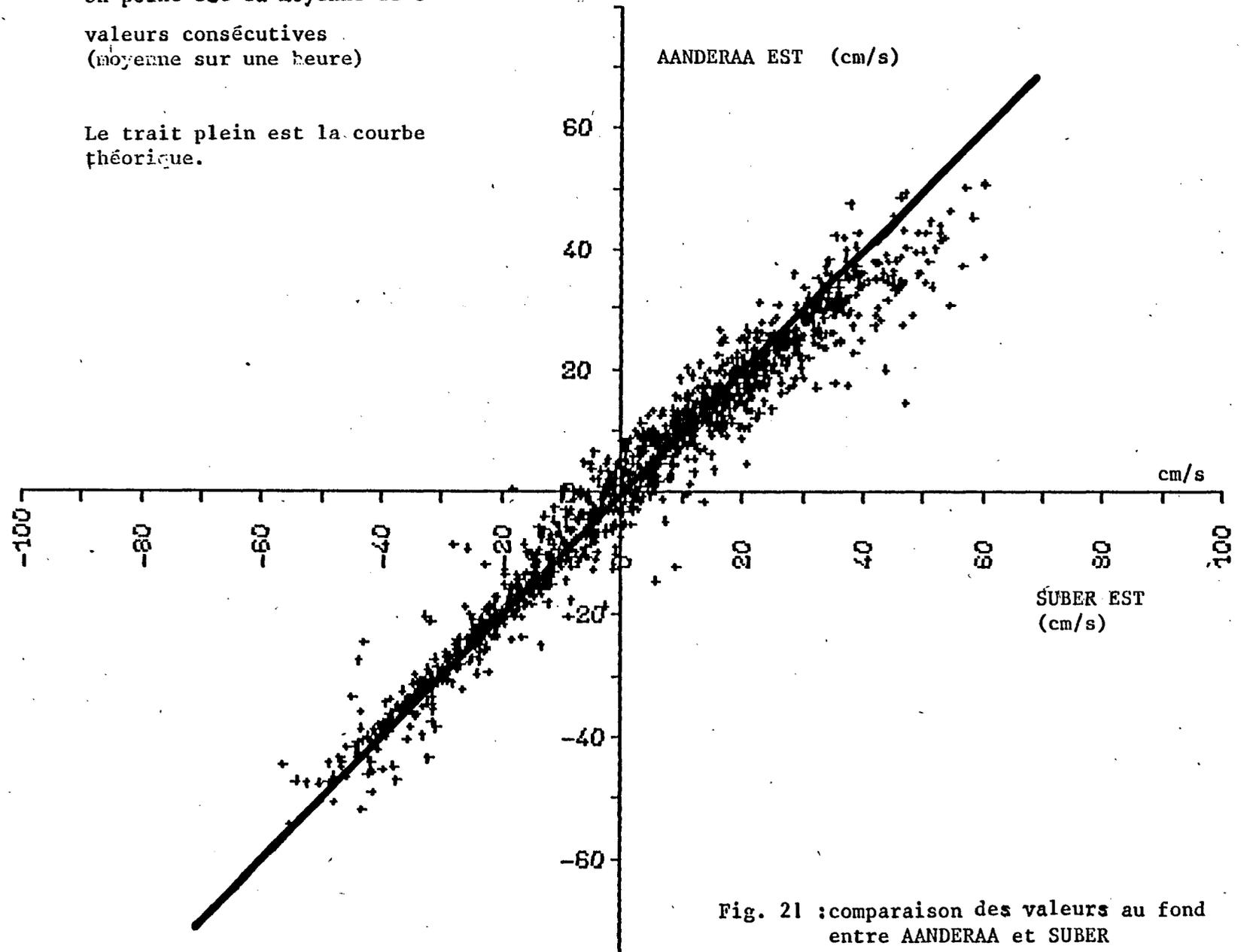


Fig. 21 : comparaison des valeurs au fond
entre AANDERAA et SUBER

Un point est la moyenne de 6
valeurs consécutives.
(Moyenne sur 1 heure)

Le trait plein est la courbe théorique

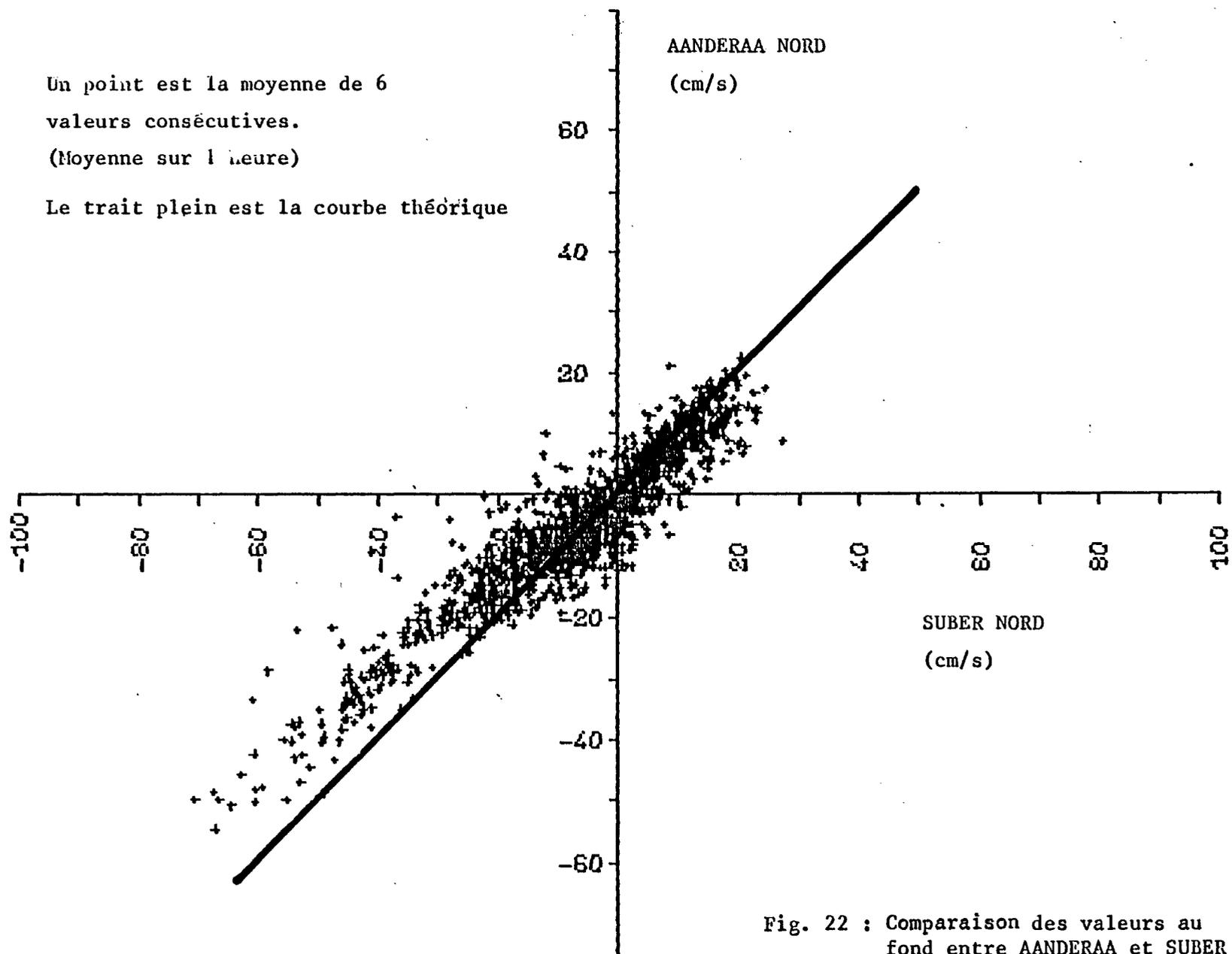


Fig. 22 : Comparaison des valeurs au fond entre AANDERAA et SUBER

d) Comparaison SUBER AANDERAA sur potence au fond

La comparaison au fond entre le SUBER et l'AANDERAA montre que le SUBER donne des valeurs plus importantes (surtout quand la valeur absolue du courant est forte > 20 cm/s).

	SUBER	AANDERAA
EST	3.57 ± 25.8 cm/s	2.64 ± 23.7 cm/s
NORD	$- 6.8 \pm 18.8$ cm/s	$- 4.9 \pm 15.2$ cm/s

Le nombre situé après \pm est l'écart type (R.M.S.). Ce résultat n'est pas vraiment expliqué (problème d'étalonnage, homogénéité du courant ou problèmes liés aux appareils).

La dispersion est légèrement accentuée pour le SUBER.

Différence Nord : $- 1,9$ cm/s $\pm 11,05$ cm/s (écart type)
 Différence Est : $.93$ cm/s ± 10 cm/s (écart type).

La dispersion des différences est élevée. Elle n'est pas vraiment mise en évidence dans les figures (figure 21, 22) où chaque point est une moyenne de 6 valeurs.

VIII) CONCLUSION

La précision est fonction des caractéristiques suivantes :

- mécaniques (fouling, hystérésis, temps de réponse pour le VACM, réponse verticale)
- magnétiques (dérive du zéro, coût, influence de la salinité)
- acoustique (perturbation de l'écoulement, coût, turbidité).

Aussi, les questions auxquelles il faut répondre à court terme sont :

- le courantomètre électromagnétique donne-t-il de meilleurs résultats dans un mouillage de surface, comme ses qualités intrinsèques le laissent prévoir (réponse verticale, cadence d'acquisition) ?
- Si oui, dans quelles applications vaut-il mieux utiliser ces capteurs en sachant qu'ils sont plus chers ?
- mêmes questions pour les courantomètres acoustiques
- Quelle est l'influence de la salinité sur les électromagnétiques ?
- Quelle est l'influence de la turbidité sur les électroacoustiques ?
- Les dérives du zéro (court et long terme) sont-elles significatives ?

L'implication financière de la fiabilité des courantomètres peut être évaluée par une méthode décrite en annexe III.

En ce qui concerne la mesure de fond, il est probable que les courantomètres mécaniques suffisent.

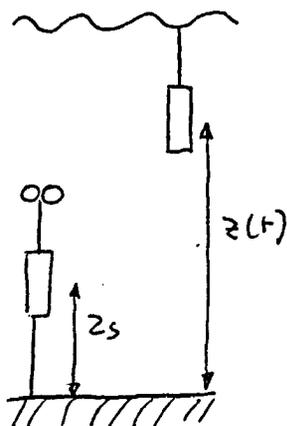
Enfin, il est impératif de s'équiper d'un logiciel d'acquisition par liaison RS 232 (pour les S4 et les SUBER qui enregistrent sur mémoire CMOS) et d'un logiciel de validation du type de celui qui a été mis au point par le SHOM. Ce logiciel interactif permettrait de valider les mesures stockées sur le DPS7 et ultérieurement en banque (problèmes de sauts de mémoire, de rotor coincé ou cassé en cours de campagne). Un micro-ordinateur portable (pour le terrain), compatible IBM-PC (pour les logiciels d'acquisition S4), et connectable (transfert de données sur DPS 7) serait très utile.

Des visites régulières des mouillages sont effectuées et les courantomètres sont vidés de leur mesures. Ceci permet de limiter la durée pendant laquelle un appareil n'a pas marché pour une raison quelconque. Si le vidage des mesures pouvait se faire sur le bateau ou à proximité, les mêmes courantomètres pourraient être remis sur leur mouillage.

Aussi l'action à court terme vise l'achat de courantomètres S4 électromagnétiques, une évaluation de ses performances en surface et au fond. Un courantomètre SEA-DATA ou M.M.B. électromagnétique sera acquis d'autre part, pour la mesure de la houle.

ANNEXE I

Soit $U_s(t)$ la vitesse du courant subsurface
 $U_c(t)$ la vitesse du courant surface
 $z(t)$ la hauteur au dessus du fond du cabrion
 z_s la hauteur du courantomètre subsurface
 z_c la hauteur moyenne du courantomètre surface



On suppose en outre que le courant suit une loi logarithmique c-a-d :

$$U_s(t) = A(t) \text{Log} \frac{z}{z_0}$$

$$U_c(t) = A(t) \text{Log} \frac{z(t)}{z_0}$$

$$U_c(t) = U_s(t) / \text{Log} \left(\frac{z_s}{z_0} \right) \times \text{Log} \left(\frac{z(t)}{z_0} \right)$$

$$z(t) = z_c + a \cos \omega t$$

ω est la pulsation de la marée semi-diurne. on suppose donc, en première approximation, que le cabrion va suivre la marée semi-diurne pure. Quand $z(t)$ est maximal alors la marée est haute et le courant est Ouest, c'est-à-dire $U_s(t) = -U_0 \cos \omega t + R$

(On le remarque sur les mesures)

Donc si R est la résiduelle sur une période $T = 12$ h :

$$U_c(t) = (-U_0 \cos \omega t + R) \frac{\text{Log}(z_c + a \cos \omega t) - \text{Log} z_0}{\text{Log} z_s - \text{Log} z_0}$$

on cherche :

$$\int_0^T U_c(t) dt = \int_0^T (R - U_0 \cos \omega t) \frac{\text{Log}(z_c + a \cos \omega t) - \text{Log} z_0}{\text{Log} z_s - \text{Log} z_0} dt$$

C'est-à-dire :

$$\int_0^T \frac{(R - U_0 \cos \omega t) \operatorname{Log}(z_c + a \cos \omega t)}{\operatorname{Log} z_s / z_0} dt = - \frac{TR \operatorname{Log} z_0}{\operatorname{Log} z_s / z_0}$$

Evaluons $\int_0^T \cos \omega t \operatorname{Log}(z_c + a \cos \omega t) dt$

on a $\int_0^T \cos \omega t \left(\operatorname{Log} \left(1 + \frac{a \cos \omega t}{z_c} \right) + \operatorname{Log} z_c \right) dt \sim$

$$\int_0^T \frac{a \cos^2 \omega t}{z_c} + \cos \omega t \operatorname{Log} z_c dt =$$

$$\frac{a}{\omega z_c} \int_0^{2\pi} \cos^2 \omega t d(\omega t) = \frac{4a}{\omega z_c} \int_0^{\pi/2} \cos^2 x dx = \frac{\pi a}{\omega z_c}$$

Evaluons $\int_0^T \left(\operatorname{Log} \left(1 + \frac{a \cos \omega t}{z_c} \right) + \operatorname{Log} z_c \right) dt \sim$

On a $\int_0^T a \frac{\cos \omega t}{z_c} - a^2 \frac{\cos^2 \omega t}{z_c^2} + \operatorname{Log} z_c dt =$

$$- \frac{a^2}{\omega z_c^2} \int_0^{2\pi} \cos^2 x dx + T \operatorname{Log} z_c = T \operatorname{Log} z_c - \frac{\pi a^2}{\omega z_c^2}$$

Par conséquent on obtient :

$$\frac{R}{\operatorname{Log} z_s - \operatorname{Log} z_0} \left(T \operatorname{Log} z_c - \frac{\pi a^2}{\omega z_c^2} \right) - \frac{U_0}{\operatorname{Log} z_s - \operatorname{Log} z_0} \frac{\pi a}{\omega z_c}$$

$$- \frac{R \operatorname{Log} z_0}{\operatorname{Log} z_s - \operatorname{Log} z_0} = \frac{\left(R (\operatorname{Log} z_c - \operatorname{Log} z_0) - \frac{a}{z_c} \left(\frac{aR}{z_c} + U_0 \right) \right) T}{(\operatorname{Log} z_s - \operatorname{Log} z_0)}$$

Donc $\frac{1}{T} \int_0^T U_c(t) dt = \left(R \left(\operatorname{Log} \frac{z_c}{z_0} \right) - \frac{a}{z_c} \left(a \frac{R}{z_c} + U_0 \right) \right) \times \frac{1}{\operatorname{Log} z_s / z_0}$

Interprétons le résultat :

$$\underbrace{R \left(\frac{\text{Log } z_c/z_0}{\text{Log } z_s/z_0} \right)}_{\text{altération de la résiduelle}} - \underbrace{\frac{a}{2z_c} \frac{U_0}{\text{Log } z_s/z_0}}_{\text{Altération de la résiduelle}}$$

altération de la résiduelle
dûe à l'écart moyen de
profondeur

Altération de la résiduelle
dûe au déphasage marée-courant.

Si R_c est la résiduelle issue du courantomètre sous le cabrion
alors :

$$\begin{aligned} \frac{R_c}{R} &= \frac{\text{Log } z_c/z_0}{\text{Log } z_s/z_0} - \frac{a}{2Rz_c} \frac{U_0}{\text{Log } z_s/z_0} \\ &= \frac{\text{Log } z_s/z_0 + \text{Log} \left(1 + \frac{z_c - z_s}{z_s} \right)}{\text{Log } z_s/z_0} - \frac{a}{2Rz_c} \frac{U}{\text{Log } z_s/z_0} \end{aligned}$$

$$\approx 1 + \left(\frac{z_c - z_s}{z_s} - \frac{a U_0}{2Rz_c} \right) \frac{1}{\text{Log } z_s/z_0}$$

$$\text{si } z_c = 8 \text{ m, } z_s = 6 \text{ m, } \text{Log } \frac{z_s}{z_0} \sim 14$$

alors :

$$U_0 = 50 \text{ cm/s marnage} = 2a = 3 \text{ m} \quad R = 1 \text{ cm/s}$$

on obtient 33 % d'erreur

$$U_0 = 1 \text{ m/s marnage} = 2a = 6 \text{ m} \quad R = 2 \text{ cm/s}$$

on obtient 66 % d'erreur

Par conséquent les différences de résiduelles obtenues par la mesure entre le courantomètre subsurface et le courantomètre de surface peuvent être dûes au principe même de mouillage situé tel qu'il est situé (St Anne du Portzic).

ANNEXE II - Courantomètre radar : Principes, problèmes et perspectives

Sommaire

- I) Intéraction vagues-radar
- II Présence d'un courant
- III) Dérive de stokes
- IV) La mesure radar
- V) Besoins de courantométrie
- VI) Avantages et inconvénients actuels
- VIII) conclusion
 - 1. Performances
 - 2. Industrialisation.

Intéraction vagues - radar

Le champ de vagues est représenté formellement par une superposition linéaire de modes sinusoidaux, de fréquence angulaire ω_i et de vecteurs d'onde \vec{k}_j et d'amplitude aléatoire $A(\vec{k}_j, \omega_i)$.

Pour une houle de stokes au premier ordre, la relation de dispersion est $\omega^2 = gk$.

Au premier ordre de la théorie d'interaction entre une onde électromagnétique et le champ de vagues, l'énergie du signal rétrodiffusé est due à l'interaction avec deux composantes du spectre du champ de vagues se propageant dans l'axe du tir radar. Si l'onde incidente du radar a pour vecteur d'onde \vec{k}_i , ceux des composantes du spectre seront respectivement $-2\vec{k}_i$ et $+2\vec{k}_i$.

Ce signal réfléchi est affecté d'un décalage Doppler en Fréquence du à la vitesse de phase des ondes de gravité :

$$\Delta f = \pm 2 \frac{V\varphi}{c} \quad \Delta f \text{ (Hz)} = \pm 0.102 \sqrt{g_i (\text{m/s}^2)}$$

où $V\varphi$ est la vitesse de phase ω/k

Présence d'un courant

Si le champ de vagues est globalement entraîné par un courant, un décalage Doppler supplémentaire va déplacer les deux raies d'une même quantité fc .

La modification de la vitesse de phase d'une onde de surface par un courant superficiel est étudiée en utilisant la théorie de la stabilité linéaire d'un écoulement horizontal, de profondeur infinie, stationnaire, non visqueux et non tournant. Une petite perturbation de l'écoulement donne une nouvelle vitesse de phase :

$$V_{\varphi} = \sqrt{g/k} + 2 \int_{-\infty}^0 (\vec{k} \cdot \vec{v}) e^{2kz} dz$$

où u est le courant k le vecteur d'onde la coordonnée verticale.

Dans le cas d'un profil exponentiel de vitesse $U = e^{mz}$

où $m \ll 2k$, le décalage Doppler dû au courant s'exprime alors ainsi:

$$\Delta f = \frac{2}{\lambda_i} U_r \left(\frac{\lambda_i}{2\pi} \right) \text{ en Hz}$$

où λ est la longueur d'onde de l'onde

U_r la vitesse du courant dans l'axe du tir radar.

Pour une fréquence radar de 10 MHz $\frac{\lambda}{2\pi} \approx 1 \text{ m}$

Cette valeur donne l'ordre de grandeur de la profondeur à laquelle le courant est mesuré.

Dérive de stokes

En admettant que la vague est seule, la théorie de la houle de stokes au 3e ordre montre que les trajectoires des particules ne sont pas fermées et qu'en conséquence il y a une dérive globale dite de stokes.

Cette dérive vaut :

$$\vec{U}_s(z) = \sqrt{\frac{g}{k}} (ka)^2 e^{2kz}$$

où a est l'amplitude de l'onde.

Si on utilise la méthode du paragraphe précédent, la nouvelle vitesse de phase d'une onde entraînée par sa dérive de stokes est :

$$v = \sqrt{g/k \left(1 + \frac{4\pi^2 a^2}{\lambda^2} \right)}$$

Cette valeur est celle de la théorie de stokes. Donc on peut considérer que la vitesse de phase théorique d'une onde de gravité est affectée d'une part par la présence d'un courant permanent (densité, vent) et d'autre part par celle de sa dérive de stokes.

Dans le cas d'un champ de vagues (plusieurs fréquences), le décalage de vitesse de phase n'est pas uniquement dû à un courant mais aussi aux interactions non-linéaires entre les composants. Le problème intrinsèque à la mesure limite la précision à 5 cm/s.

La théorie de Stokes est valable pour un fluide non tournant, ce qui se justifie par une analyse d'ordre de grandeur.

La mesure radar

Le radar envoie une suite d'impulsions. L'intervalle de temps entre deux impulsions successives doit être suffisamment long pour que, compte tenu de l'atténuation du signal reçu, il n'y ait pas de chevauchement de réception et d'émission.

Le signal reçu provient d'une zone de mer comprise entre d et $d + \Delta d$ où Z est la durée de l'impulsion.

$$d + \Delta d = c (\Delta t + Z) / 2$$

Cette procédure est répétée tous les Z' .

Une somme de réceptions est réalisée et forme un signal tronqué dont la résolution spectrale est limitée. Si l'acquisition d'un spectre se fait sur 128 secondes, la résolution est d'environ 8.10 et ainsi la précision est d'au plus 10 cm/s.

La moyenne de spectres est ensuite effectuée qui porte la durée d'une mesure de courant à 15 mn ou une demi-heure.

Un système d'entrelacement d'impulsions permet, dans le même temps, de traiter plusieurs azimuts et plusieurs distances. La présence de deux radars donne une couverture spatiale de plusieurs dizaine de kilomètres carrés.

L'ouverture du lobe d'antenne (1/8 radian environ) et la durée d'impulsion délimitent une zone où la mesure du courant est intégrée.

La mesure radar est donc intégrée temporellement (15 à 30 minutes) et spatialement (quelques km², CODAR : 2.4 x 2.4 km²).

Besoins de courantométrie

La courantométrie près du littoral doit pouvoir mettre en évidence :

- les courants de marée
- les courants d'estuaire
- les courants dus au vent ou des courants dit permanents.

Les mesures de courant doivent durer longtemps pour déterminer des courants résiduels faibles.

Ces courants résiduels fixent la précision de la mesure à environ 5 à 10 cm/s.

Les courants de marée fixent l'intégration temporelle à environ 15 minutes. Les courants d'estuaire, de front halin fixent l'intégration spatiale à quelques centaines de mètres au maximum.

Ainsi, si la couverture instantanée d'une zone est intéressante pour le calage d'un modèle et la connaissance de la dynamique générale des courants près de la côte, la mesure fine reste du domaine de la courantométrie classique.

Il faudrait connaître les possibilités :

- de réduction du lobe d'antenne,
- de réduction de la durée d'impulsion
- de portée.

Infrastructure de la mesure

La mesure demande deux radars. Pour l'instant chaque station demande une présence humaine constante. Pour des mesures de plusieurs mois, il faudrait évaluer l'immobilisation en matériel nécessaire. (Présence d'un micro-ordinateur et de son environnement informatique de traitement, de stockage et de tracé).

Auparavant, il faut améliorer l'algorithme de recherche des raies pour pallier les problèmes :

- de parasites (lignes haute tension)
- de lobes secondaires
- d'interprétation en présence de forts gradients de courants spatiaux ou temporels.

Avantages Inconvénients actuels

<u>AVANTAGES</u>	<u>INCONVENIENTS</u>
* Vraie mesure de surface (pas de pilonnement)	* Traitement pas encore tout à fait au point.
* Pas de modification de l'écoulement	* Présence humaine (indispensable ; faible couverture temporelle)
* Couverture immédiate d'une zone importante	* Intégration spatiale trop grossière (qqes km ²)
* Pas de travaux en mer (bateaux, pertes éventuelles)	* Nécessité de la présence de vagues

Il faudrait donc continuer à suivre l'évolution de cet outil et demander :

- une analyse détaillée de l'algorithme de recherche des raies
- une étude sur diminution de la cellule de mer près de la côte.

- une évaluation de l'infrastructure nécessaire à une longue mesure (quelques mois)
- la possibilité d'avoir une précision de l'ordre de 5 cm/s.

Conclusion

Cette conclusion reprend les éléments de réponse de M. BROCHE du LSEET à un certain nombre de questions du département.

1) Performances

a) Résolution spatiale - modèles numériques

La résolution spatiale d'un radar HF restera limitée à un ordre de grandeur de quelques kilomètres. Les interférences radioélectriques et le maintien d'une logistique raisonnable sont les facteurs limitants. Il faut noter toutefois que les modèles numériques couvrant des zones d'étendue comparable (5-50 km de la côte) ne résolvent pas des structures spatiales inférieure à 10 kilomètres (pour une maille de 2 x 2 km²).

Une maille plus petite ne donne pas forcément de meilleurs résultats à cause de la qualité des conditions aux limites et de la paramétrisation de la turbulence et du frottement. Le courant de surface n'est pas vraiment donné (courant intégré sur la verticale).

b) Continuité temporelle - courantomètres eulériens

Il est difficile :

- d'occuper longtemps un site
- d'obtenir une allocation de fréquence qui soit suffisamment propre pour garantir un rapport signal/bruit toujours suffisant pendant les mesures. La présence d'un opérateur sur le site est indispensable.

D'autre part, la mesure de fond n'est pas accessible. Il faut noter, par contre, que le coût d'une campagne de courantométrie assurant la diversité spatiale du courantomètre HF serait colossal (nbre d'appareils, pertes, temps bateau).

c) Flotteurs Lagrangiens

Ils sont adaptés à la mesure de la dispersion mais ne permettent pas de décrire la circulation dans un bassin donné (précision, couverture spatio-temporelle).

d) Complémentarité

Tous les appareils sont plus complémentaires que concurrents. Le radar HF peut donner des éléments de validation, voire de perfectionnement de modèles numériques.

Dans une bande littorale 0-10 km (étang de Berre par exemple), les performances techniques pourraient être améliorées. La maille serait alors de 150 m au minimum.

2) Industrialisation

a) Les possibilités techniques

L'élaboration d'un produit commercial serait très longue (cf. le CODAR, environ 5 ans).

b) Le marché

Le programme le l'IFP s'est arrêté (il concernait plutôt la mesure des paramètres de vagues). Le CODAR existe sur le marché.

Pour développer un produit français, il faut prendre en compte le marché potentiel, le retard sur le CODAR et les performances prévisibles de l'appareil.

c) Conclusion

Bien que le LSEET ne soit pas un prestataire de service, il peut néanmoins participer directement à des expériences de durée limitée compatibles avec des objectifs scientifique et éventuellement mettre les radars à la disposition d'autres investigateurs.

Une autre possibilité serait de confier un exemplaire à un organisme particulier qui pourrait gérer l'outil au bénéfice de la communauté.

BIBLIOGRAPHIE

- BUTT K.A., JEANS P.K., HICKEY K.J. (83) H.F. Radar technology transfer project project-implementation and testing of a 2-size capability. Technical Report C-CORE 83-11.
- BARRICK D.E., EVANSM W., WEBER B.L. (77). Ocean surface currents napped by radar Science 198 oct. 77.
- LIPA B. BARRICK D. (82). Codar measurements of ocean surface parameters at ARSLOE - preliminary results. Ocean' 82.
- MARESCA J.W., CHENQ. R.T., SEIBEL E. (80). High frequency radar measurements of tidal currents flowing through San Pablo strait, San Francisco Bay. Limnol. Oceanogr. 25 (5) 929-935.
- LIPAR J., BARRICK D.E., MARESCA J.W. Jr (81). HF Radar measurements of long ocean waves J. of Geophys. Res. Vol 86 n° C5 May 81.
- DEVENON J.L. (83). Etude des courants en baie de Seine Rapport LSEET.

- BROCHE P. (83). Etude des courants superficiels engendrés par le vent : résultats de l'expérience Camargue, éléments de méthodologie, discussion. Rapport interne LSEET/80/83/1.
- BROCHE P. (83). Courantométrie par radar HF. Rapport LSEET contrat CNEXO 82/6806.
- WEBER B.L., BARRICK. D.E. (77). On the non-linear theory for gravity waves on the Ocean's surface. Part 1 : Derivation. J. of Phys. Oceanogr. Vol. 7 n° 1 Jan. 77.
- BARRICK D.E. WEBER B.L. (77). On the non-linear theory for gravity waves on the Ocean's surface. Part II. Interpretation and applications. J. of Phys. Oceanography. Vol. 7 n° 1 Janv. 77.
- BROCHE D.E., LE MAISTRE J.C., FORGET P. (83). Mesure par radar decamétrique cohérent des courants superficiels engendrés par le vent. Oceanologica acta 83. Vol. 6 n° 1.
- HOLBROOK J.R., FRISCH A.S., (81). A comparison a near surface CODAR and VACM measurements in the strait of Juan de Fuca, August 78 J. of Geoph. Res. Vol. 86 n° 611.

ANNEXE III - Courantomètres et coût d'une campagne.

Le problème est de savoir si, financièrement, l'achat de courantomètres électromagnétiques est justifié compte-tenu :

- de la part qu'occupe le capteur dans le prix d'une mesure
- des statistiques de récupération des appareils
- des statistiques de récupération de mesures validées (enregistrement) défectueux, algues dans les rotors).

L'adéquation des mesures aux besoins scientifiques n'est pas prise en compte (les mesures sont-elles suffisamment précises ?)

Exemple : la campagne VILAINE 84 (très approximativement)

Jour * technicien (préparation, mouillages, traitement) :
40 j * 1.250 F = 50 kF

Jour * cadres (mouillages, traitement, validation)
40 j * 2.000 F = 80 kF

Bateau (THALIA, vedette, barge louée) personnel + amortissement
15 j * 15 kF = 225 kF

Plongeurs
15 j * 4 kF = 60 kF

Matériel divers et fonctionnement (frais de mission)
20 kF

Matériel (potences et cabrions 1000°/jour
50 F/jour * 120 jours = 6 kF

Courantomètres 1000°/jour pour 120 jours et 6 appareils
SUBER : 420 F/jour * 120 jours = 50 kF
M.M.B. : 1.080 F/jour * 120 jours = 130 kF (env. 72 kF pour S4)

Statistiques de perte d'appareil : 2 % (taux actuel dans le département DERO/EL)

SUBER : 420 kF * 2 % = 8,4 kF
M.M.B. : 1.080 kF * 2 % = 21,6 kF (Env. 12 kF pour S4)

Soit donc un total :

SUBER : 500 kF
M.M.B. : 593 kF (534 kF pour S4)

Le jour de mesure revient donc à

SUBER : 4.17 kF

SUBER : 4.17 kF
 M.M.B. : 4.94 kF (4.44 kF pour S4)

Ce schéma est simplificateur puisqu'il ne tient pas compte :

- du bonus dans le cas d'une longue série temporelle (sans trou)
- de la précision de la mesure.

SYMINEX utilise des M.M.B. et annonce 85 % de récupération de bonnes valeurs.

Le taux de retour des données de la campagne sur le golfe Normano-breton est d'environ 40 % (rotor cassé et rotor coincé). Les taux de retour des campagnes de Sainte-Anne du Portzic sont de 60 %. Pour la campagne Vilaine 84 le taux est de 85 %. Un calcul simple montre alors que l'achat de courantomètres chers peut être justifié.

BIBLIOGRAPHIE

- TERRY, W.E., GRANT, W.D., WILLIAMS, A.J., SANFORD, L.P., (80). A laser velocimeter for use in coastal boundary layer studies. OCEAN'S 80.
- AGRAWAL, Y.C., TERRY, W.E., WILLIAMS, A.J., (80) Backscatter laser velocimeter for energetic deep sea flows : performance study in particulate dense water. OCEAN'S 80.
- PERKINS, H., SAUNDERS, K., APPEL, G., MERO, T., (80). Design and initial testing of a three axis current meter. OCEAN'S 80.
- SAUNDERS, K.D., (80). Horizontal response of the NBIS acoustic current meter OCEAN'S 80.
- DICK, J.C., JAMES, A.L., (80). Boundary layer measurement system. OCEAN'S 80.
- MC CULLOUGH, J.R., (78). Near Surface ocean current sensors : problems and performances. Proceedings of a working conference on current measurement.
- KERDREUX, M., L'YAVANC, J., (83). Réalisation de mouillages côtiers pour mesures de courant. Rapport CNEXO-COB, Brest.
- WELLER, R., DAVIS, R.E., (80). A vector-measuring current meter. Deep sea research, 27, 565-582, 80.
- HALPERN, D., WELLER, R.A., BRISCOE, M.G., DAVIS, R.E., MC CULLOUGH, J.R., (81). Intercomparison tests of moored current measurements in the upper ocean.
- GRIFFITHS, G., COLLAR, P.G., (80). Somme comparative studies on electromagnetic sensor heads in laminar and near turbulent flows in a towing tank. OCEAN'S 80.

- BRISCOE, M.G., (83). How good are current meter data. Proceedings of a working conference on current measurements.
- COLLAR, P.G., GRIFFITHS, G., (83). Towards quality assessment of near surface measured in continental shelf areas. Id.
- AGRAWAL, Y.C., TERRY, W.E., (83). Laser doppler velocimetry on the sea floor. Id.
- FOFONOFF, N.P., ERCAN, Y., (67). Response characteristics of a Savonius rotor current meter, Tech. rep. 67-33 WHOI.
- KALVAITIS, A.N., (74). Effects of a vertical motion of vector-averaging (Savonius rotor) and electromagnetic type current meters. Tech. Memo. NOAA-TM-NOS-NOIC-3, Rockville.
- TAKASUGI, Y., NOGUCHI, H., YAMASAKI, M. (84). Intercomparison test current measurements by two types of mooring in shallow water. La mer 22 : 23-33 Société franco-japonaise d'oceanographie, Tokyo.
- BUISINE, D., (81). Essai d'étude comparative de quelques courantomètres COB/TDI SEQM 81.33 DB/MD.
- TOCHKO, J.S., (78). A study of the velocity structure in a marine boundary layer instrumentation and observations. WHOI-78-90, Doctoral dissertation, feb. 78.