



UNIVERSITE DE CAEN

CENTRE REGIONAL
D'ETUDES COTIERES

Laboratoire de Géologie
marine

MINUTE
CH/L

CONSEIL GENERAL
DE LA MANCHE

CHERBOURG

ETUDE GLOBALE CONCERNANT LA DEFENSE CONTRE LA MER

Explosifs
immergés

RAPPORT IV

COMPTE RENDU D'AVANCEMENT

1ère et 2ème Phase

Evolution du trait de côte dans le Nord-Cotentin

Evaluation des risques de submersion des côtes du
département de la Manche (1ère partie)

Présentation du matériel de mesures in situ (1ère partie)

Franck LEVOY
Ingénieur d'études

Cléude LARSONNEUR
Responsable scientifique

DECEMBRE 1990

PREAMBULE.

Le présent programme s'inscrit dans le cadre de l'étude globale concernant la défense contre la mer commandée par le Conseil Général de la Manche à l'Université de Caen (Laboratoire de Géologie marine, Centre Régional d'Etudes Côtières). Son déroulement comprend plusieurs étapes:

- une étude économique dont les objectifs successifs sont la définition des zones à risque d'érosion et de submersion, l'inventaire et le calcul du coût moyen des biens dans cette zone, l'établissement de cartes d'exposition aux risques littoraux et l'analyse de la rentabilité des investissements à mettre en oeuvre pour protéger cet espace menacé.

- une étude du milieu naturel dont les objectifs sont de connaître le fonctionnement des systèmes sédimentaires par l'intermédiaire d'un suivi des paramètres physiques et sédimentologiques qui conditionnent l'évolution du paysage littoral. La méthodologie d'étude est basée sur la définition et la prise en compte d'unités physiques homogènes indépendantes de toutes frontières administratives.

- une étude technique dont les objectifs sont la définition des types de dispositifs de protection et leurs modalités d'implantation, l'appréciation de la grandeur des paramètres à intégrer dans la conception des dispositifs de protection, la prévision des impacts des différents projets et la définition des mesures compensatoires nécessaires.

Ce **rapport IV** concerne la première et la seconde phase de l'étude globale. En premier lieu, il constitue un compte-rendu d'avancement de la phase économique avec:

- d'une part, une synthèse bibliographique de l'évolution de la côte du Nord-Cotentin et la **détermination des zones à risques d'érosion** pour cette région,

- d'autre part, une évaluation des risques de submersion de l'ensemble de la côte du département de la manche grâce à la **détermination des niveaux de pleines mers extrêmes**.

La troisième partie de ce rapport constitue également un compte-rendu d'avancement de la phase d'étude du milieu naturel en présentant une première partie du **matériel qui sera utilisé durant les campagnes de terrain**.

SOMMAIRE

EVOLUTION DU TRAIT DE COTE DANS LE NORD-COTENTIN: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE ET DETERMINATION DES ZONES A RISQUES D'EROSION

A) L'EVOLUTION RECENTE DU LITTORAL NORD-COTENTIN

- 1) LE LITTORAL DU PLAIN
- 2) LE LITTORAL DE REVILLE A LANDEMER
- 3) LE LITTORAL DE BARFLEUR A GATTEVILLE
- 4) LE LITTORAL DE VRASVILLE
- 5) LE LITTORAL DE FERMANVILLE
- 6) LE LITTORAL D'URVILLE
- 7) LE LITTORAL DE L'ANSE DE VAUVILLE
- 8) LE LITTORAL DE L'ANSE DU ROZEL
- 9) LE LITTORAL DE SURTAINVILLE

B) L'EVOLUTION PREVISIONNELLE DU LITTORAL NORD-COTENTIN: DISCUSSION ET REMARQUES

EVALUATION DES RISQUES DE SUBMERSION DES COTES DU DEPARTEMENT DE LA MANCHE: DETERMINATION DES NIVEAUX DE PLEINES MERS EXTREMES

- 1) RAPPEL SUR LES CARACTERISTIQUES DE LA MAREE DANS LE GOLFE NORMAND-BRETON
- 2) LES DONNEES MAREGRAPHIQUES DISPONIBLES
- 3) LA METHODE DE CALCUL DES NIVEAUX EXTREMES DE MAREE

4) LES RESULTATS

5) EVOLUTION PASSEE ET FUTURE DES NIVEAUX
MAREGRAPHIQUES LE LONG DES COTES DU DEPARTEMENT DE LA
MANCHE

PRESENTATION DU MATERIEL DE MESURES IN SITU (1ère PARTIE) Mise en oeuvre et tests de fonctionnement
--

1) LES COURANTOMETRES ELECTROMAGNETIQUES S4

2) LES HOULOGRAPHERS DIRECTIONNELS S4DW

3) LE MATERIEL DE LEVES TOPOGRAPHIQUES

4) LES PIEGES A SEDIMENTS EOLIENS

5) LES PIEGES A SEDIMENTS POUR LES TRANSPORTS DANS LE
DEFERLEMENT ET SUR LES BASSES PLAGES

EVOLUTION DU TRAIT DE COTE DANS LE NORD-COTENTIN

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE ET DETERMINATION DES ZONES A RISQUES D'EROSION

La délimitation de la zone à risque d'érosion littorale dans la partie Nord-Cotentin, entre la Baie des Veys et le cap de Carteret, est réalisée à partir des données bibliographiques disponibles, ceci en l'absence d'une analyse plus complète non prévue pour ce secteur de côte dans le cadre du présent contrat.

Plusieurs documents permettent d'apprécier l'évolution historique du trait de côte de cette région. Malheureusement, l'ensemble de ces données ne couvre pas la totalité du littoral à étudier. La formulation d'hypothèses sur l'évolution passée et future de ces secteurs de côte est nécessaire. La prise en compte du contexte géologique et géomorphologique est alors obligatoire. En effet, il conditionne, pour une grande partie, les vitesses différentielles d'évolution de la ligne de rivage que l'on peut observer en fonction des sites.

Il convient de rappeler que la côte du Nord-Cotentin est très diversifiée de par ses caractéristiques physiques. La Baie des Veys constitue une vaste zone estuarienne en voie de comblement. Elle est le siège d'une forte sédimentation se traduisant globalement par une progression des herbues. La flèche sédimentaire à l'Ouest de la baie est en accrétion.

Entre la baie des Veys et la pointe de Saire, la côte est constituée d'une étroite plaine maritime bordée d'un mince cordon dunaire, fréquemment bordé d'un perré.

De la pointe de Saire à Cherbourg, la côte reste relativement basse, avec de nombreux pointements rocheux encadrant de petites anses. Très souvent, la ligne de rivage est matérialisée par une micro-falaise limoneuse de quelques mètres de hauteurs. Sur la côte nord, plusieurs marais littoraux fermés par un mince cordon dunaire, sont présents.

A l'Ouest de Cherbourg, la côte s'élève progressivement. Des falaises de heads, sensibles aux éboulements, succèdent aux caps rocheux.

Sur la côte ouest, les caps rocheux alternent avec les anses sableuses, telles celles de Vauville ou du Rozel. A l'intérieur de ces anses, le trait de côte est constitué de dunes bordières s'étendant parfois vers l'intérieur des terres, escaladant les versants du plateau.

A chacun de ces types de côte, correspond une évolution souvent différente. Mais pour un même type, la variabilité spatiale des conditions hydrodynamiques peut également être un facteur de différenciation du point de vue de leur cinématique.

A partir de l'analyse des documents existants, il est possible d'évaluer:

- la **cinématique passée de la ligne de rivage** de plusieurs secteurs de la côte Nord-Cotentin,
- d'en déduire **une évolution moyenne annuelle**,
- d'apprécier **l'évolution prévisionnelle** de la côte à diverses échéances.

Les documents disponibles concernent les secteurs de côte suivants:

- la côte sud du Plain,
- le littoral de Réville à Landemer,
- le littoral de Barfleur et de Gatteville,
- le littoral de Vrasville,
- le littoral de Fermanville,
- le littoral d'Urville,
- le littoral de l'anse de Vauville,
- le littoral de l'anse du Rozel.

A - L'EVOLUTION RECENTE DU LITTORAL NORD-COTENTIN

1) LE LITTORAL SUD DU PLAIN.

La comparaison des photographies aériennes de l'I.G.N. de 1947, 1955 et 1984 (LEVOY, 1986), souligne:

- le **faible déplacement de la ligne de rivage de ce secteur de côte entre 1947 et 1984**. L'évolution entre 1947 et 1955 est d'ailleurs imperceptible à l'échelle du document (fig.1).

- globalement, une **accrétion de la côte** est constatée sur la période 1947-1984. Ainsi, entre la cale de Utah-Beach et tout le long de la réserve ornithologique, près de 100 m ont été gagnés sur la mer. Plus au Nord, il est constaté une progradation d'environ 50 m.

Le **taux moyen annuel** de progression de la ligne de rivage sur une période de 37 ans varie donc de **1.35 m à 2 m**. Cette évolution est conforme à la situation morphologique de ce secteur de côte. Elle correspond en fait à la progradation de la flèche littorale de Saint-Marie-du-Mont et à la constitution de crochons sableux sous l'action d'une dérive littorale provenant du Nord.

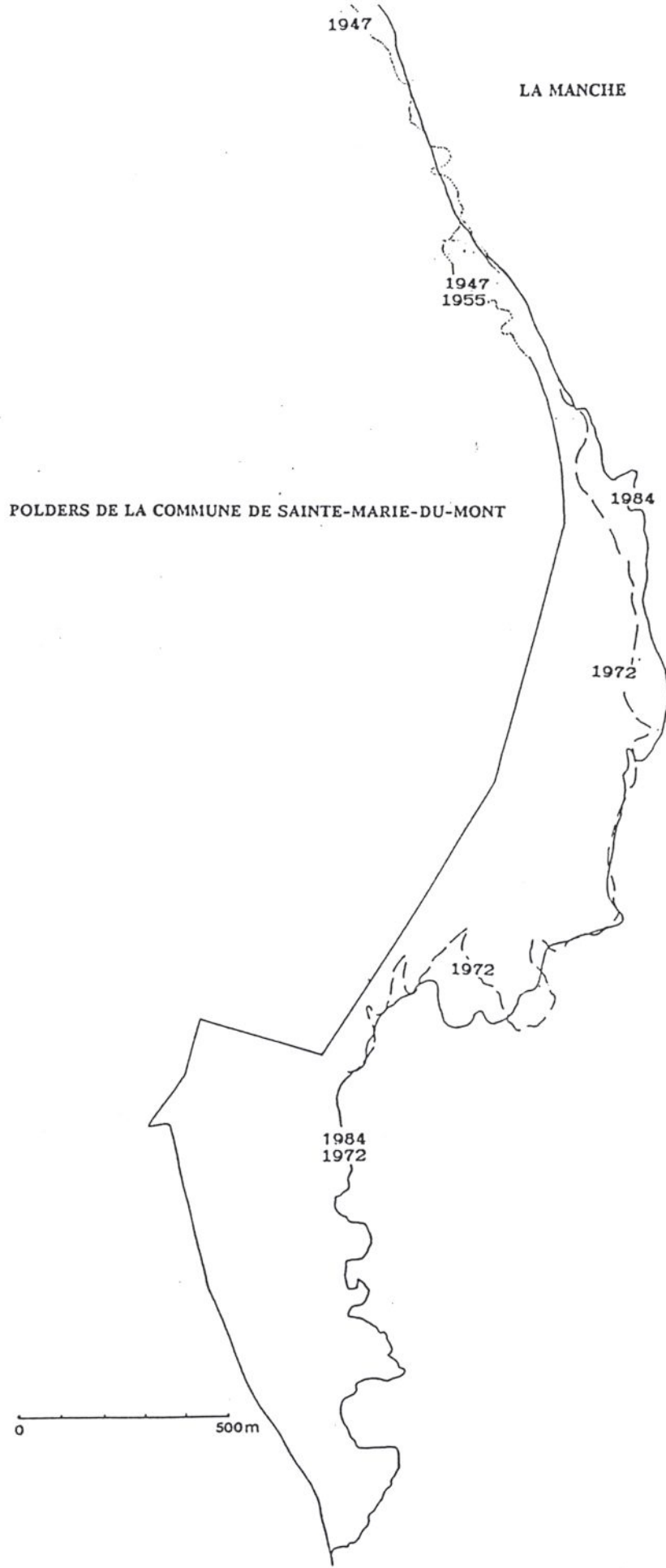


Fig.1: Evolution morphologique des schorres et du rivage du Plain (LEVOY,1986)

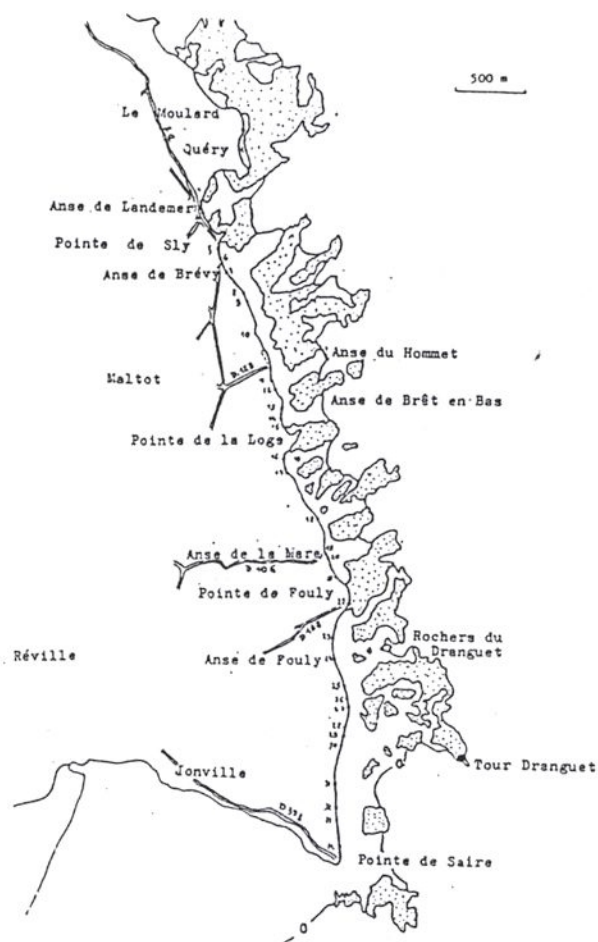


Fig.2: Localisation des points repères pour la détermination des variations du trait de côte (LARSONNEUR,1982)

Points repères	1947 - 55	55 - 72	72 - 78	78 - 82	Recul Total
1	-	-	-	-	-
2	4m de recul	-	3m	3m	10m
3	4m	-	5m	6m	15m
4	7m	3m	2m	5m	17m
5	3m	-	5m	2m	7m
6	-	Avancée du Littoral sur la mer	10m	5m	15m
7	-		12m	3m	15m
8	-		10m	5m	15m
9	-		10m	-	10m
10	-		10m	5m	15m
11	-	-	15m	-	15m
12	-	-	10m	-	10m
13	5m	-	5m	5m	15m
14	10m	-	3m	2m	15m
15	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-
19	-	10m	10m	5m	25m
20	-	5m	10m	10m	25m
21	-	-	10m	10m	20m
22	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-
24	-	5m	3m	2m	10m
25	-	5m	-	3m	8m
26	-	15m	-	5m	20m
27	-	15m	10m	5m	30m
28	5m	10m	5m	5m	25m
29	5m	10m	5m	5m	25m
30	-	10m	5m	5m	20m
31	-	-	-	-	-
32	-	-	-	-	-
33	-	10m	-	-	10m
34	-	10m	10m	-	20m

Fig.3: Tableau donnant en 34 points du littoral considéré l'évolution de la ligne de rivage depuis 1947 d'après les photographies aériennes (LARSONNEUR,1982)

Néanmoins, des phases d'érosion peuvent être observées très ponctuellement à la suite d'événements exceptionnels. Ces érosions ne seront probablement pas d'ampleur à détruire le cordon dunaire au Nord de la commune de Saint-Marie-du-Mont compte tenu de la dissipation de l'énergie des houles sur un estran très large et très élevé à cet endroit.

Plus au Nord, à notre connaissance, il n'existe pas de données disponibles sur l'évolution du trait de côte, cependant, l'observation sur le terrain d'une ancienne digue en moellons partiellement recouverte par des formations dunaires semble confirmer la **tendance évolutive progradante** du littoral analysé.

Toutefois, il est difficile de préciser sur quelle portion de côte cette tendance est observée. Il a été constaté récemment que la progradation des dunes sur l'ancien ouvrage est effective jusqu'au lieu-dit Le Hameau du Sud.

Au-delà, un ouvrage de protection relativement ancien semble pour le moment suffisant pour protéger la côte et fixer la ligne de rivage.

L'évolution passée du trait de côte entre Quinéville et Morsalines est méconnue.

2) LE LITTORAL DE REVILLE A LANDEMER

L'évolution du secteur de côte entre la pointe du Moulard et la pointe de Saire a récemment été étudiée par le Laboratoire de Géologie marine (LARSONNEUR, 1982). Des mesures sur photographies aériennes de 1947, 1955, 1972, 1978 et 1982 ont été réalisées. 34 points de référence ont été sélectionnés pour apprécier l'évolution passée de cette côte (fig.2). L'incertitude des mesures a été estimée à ± 3 mètres.

Entre 1947 et 1982, l'évolution constatée varie entre 0 et 30 m sur le secteur de côte étudié. Le recul moyen sur l'ensemble des 34 stations repères est de 12.10 m pour 35 ans, soit un recul d'**environ 0.35 m par an**.

La figure 3 précise la vitesse d'évolution des différents secteurs de côte:

- l'érosion semble s'être accélérée et s'être généralisée depuis 1972. Entre 1947 et 1972, le recul moyen annuel est de **0.15 à 0.20 m**. Sur les 34 stations, entre 1947 et 1955, seulement 8 sont en érosion; ailleurs le trait de côte est stable. Entre 1955 et 1972, 12 stations sont en recul, 7 en accrétion et les autres sont considérées comme stables. Sur la période 1972-1982, le **recul moyen annuel** sur l'ensemble du trait de côte considéré est de **0.75 m**. Sur cette période, une douzaine de stations montre une stabilité du trait de côte.

- sur la **partie nord** de la zone d'étude, entre le Moulard et l'anse de Brêt en bas, le recul **sur 35 ans** varie entre 7 et 17 m, soit entre **0.2 et 0.5 m/an**. De la pointe de la Loge à l'anse de la Mare, le trait de côte est considéré comme stable sur la période 1947-1982. Plus **au Sud**, dans l'anse de la Mare, le recul est plus intense, entre 20 et 25 m sur 35 ans, soit entre **0.57 et 0.71 m par an**. Au niveau de la pointe de Foulie, la côte est stable, alors que plus au Sud, l'évolution est très différentielle dans l'espace, entre 0 et 30 m depuis 35 ans, soit **au plus un recul de près de 0.85 m/an**.

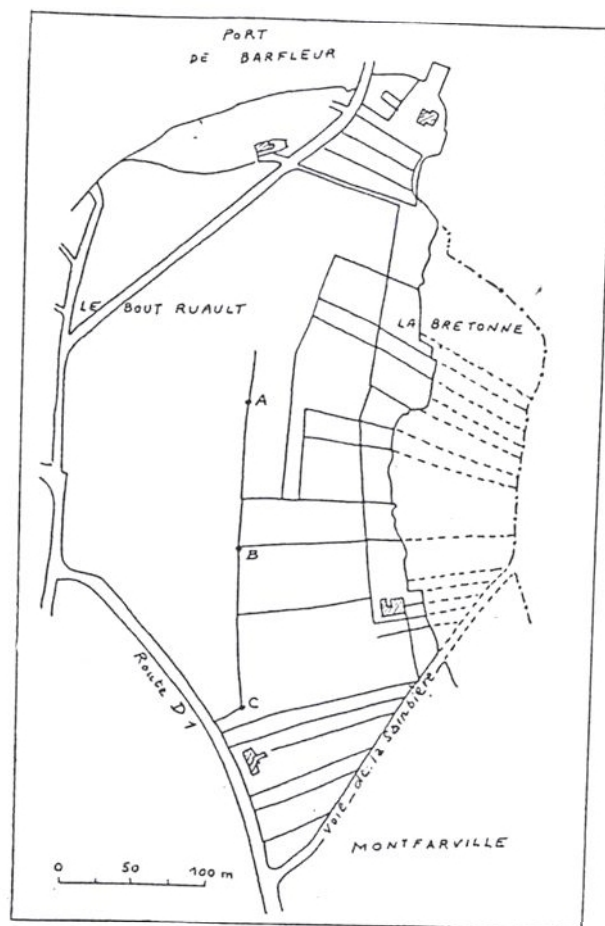


Fig.4: Extrait du plan cadastral de Barfleur (entre le port et Montfarville) (HINSBERGER, 1988)

En trait mixte la ligne de côte en 1829, en trait continu sa position en 1950. En pointillé le dessin des parcelles détruites par la mer.

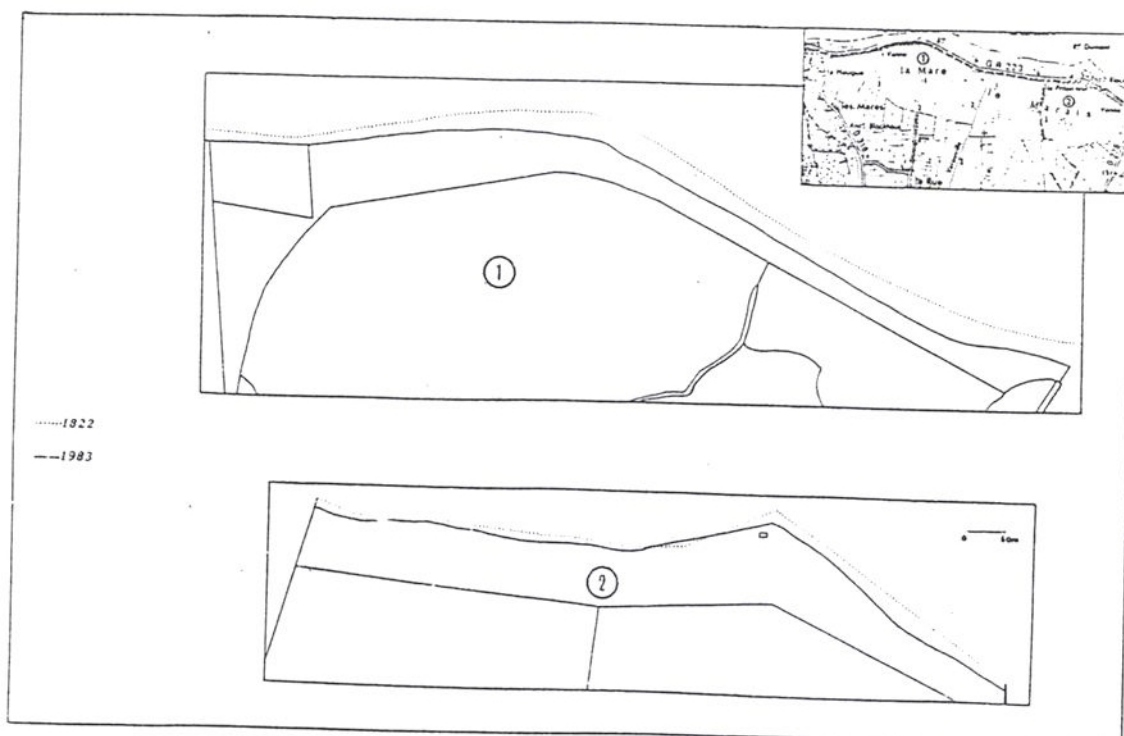


Fig.5: Comparaison des plans cadastraux de Vrasville (DELAHAYE, 1986)

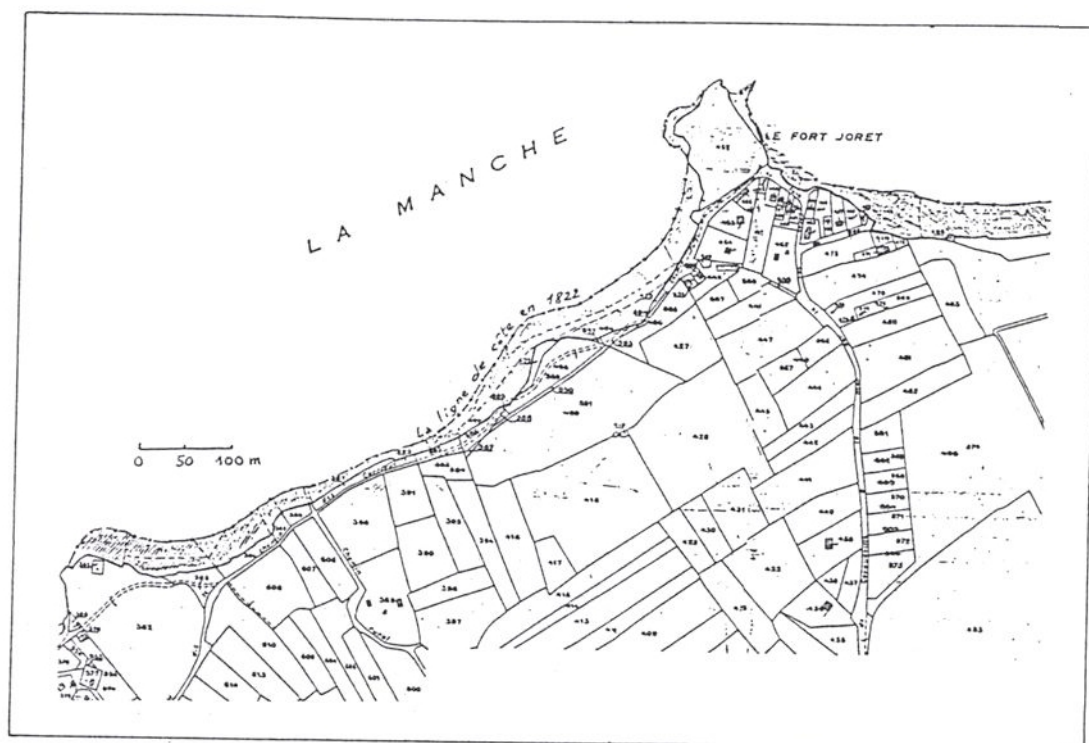


Fig.6: Extrait du plan cadastral de Fermanville (section A2) entre 1822 et 1968 (HINSBERGER,1988)

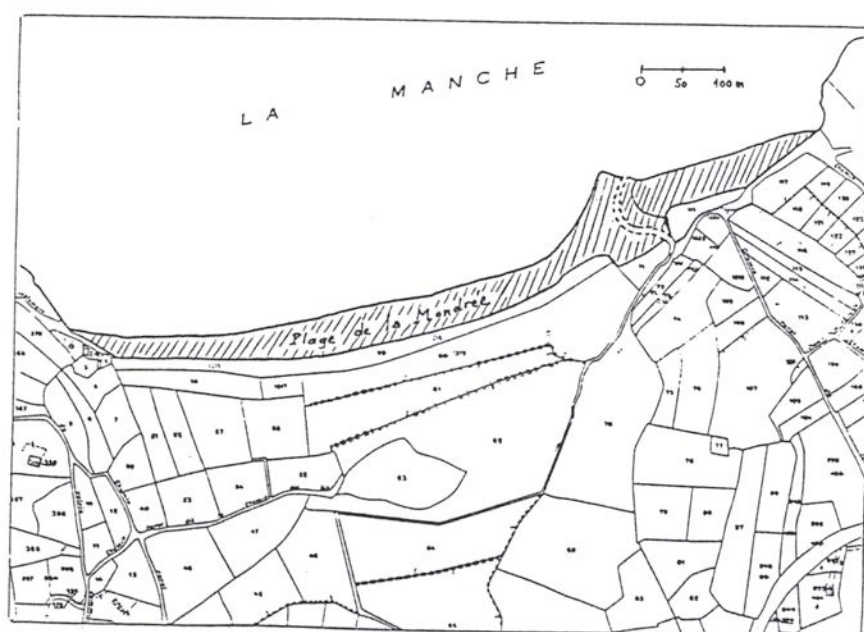


Fig.7: Extrait du plan cadastral de Fermanville (section A1). Recul de l'anse de la Mondrée entre 1822 et 1968. (HINSBERGER,1988)

Ces données relativement précises montrent une érosion relativement intense, principalement face à des couloirs sableux intertidaux bordés de rochers. L'érosion est d'autant plus importante que ces couloirs sont orientés vers le Nord-Est, ouverts aux houles les plus fortes.

Selon les sites et leurs caractéristiques morpho-géologiques, l'érosion annuelle peut être très faible, voire nulle (pointes rocheuses), ou au plus, légèrement inférieure à 1 m, sur une tendance pluriannuelle.

3) LE LITTORAL DE BARFLEUR ET DE GATTEVILLE

Le premier plan cadastral de la commune de **Barfleur**, levé en 1829, a été comparé au plan cadastral rénové datant de 1950 (HINSCHBERGER et al., 1988). La superposition de ces deux cadastres représentant la position du trait de côte à 120 ans d'intervalle, montre un recul de la ligne de rivage important (fig.4).

Un bande de terre de 80 m de large environ a disparu en 120 ans, soit un **recul moyen de 0.65 m par an**.

Une comparaison similaire entre le plan cadastral de 1822 et celui rénové de 1941 a été réalisée pour la commune de **Gatteville** située juste au Nord de Barfleur. Le recul mis en évidence est de 20 m au plus sur 119 ans, soit une érosion moyenne d'**environ 0.16 m par an**. Il faut noter que les extrémités rocheuses n'ont, bien évidemment, pas évolué à cette échelle de temps.

4) LE LITTORAL DE VRASVILLE

Selon DELAHAYE D. (1986), l'évolution du trait de côte au droit des marais littoraux de Gattemare et Vrasville est peu importante.

Le recul du cordon littoral de **Gattemare**, mis en évidence grâce à la comparaison de deux plans cadastraux datés de 1822 et de 1983, ne semble pas dépasser **5 m en 160 ans**. Par contre, l'érosion du cordon de **Vrasville** (fig.5) est de l'ordre de 25m en moyenne et de 35 m au plus, soit une érosion d'**environ 0.15 à 0.20 m par an**.

De septembre 1985 à août 1986, un suivi de l'évolution de la côte a été réalisé. Durant cette période de près d'une année, un recul du trait de côte de 0.30 m a été observé dans la partie occidentale du cordon de Vrasville.

Ce secteur de côte apparaît relativement stable, surtout dans sa partie orientale. Lors des tempêtes de janvier et février 1990, les cordons littoraux des deux marais côtiers ont été submergés, contribuant à la formation d'épandages de tempête. Le trait de côte a reculé durant ces événements, mais aucune mesure de cette évolution n'a été réalisée.

5) LE LITTORAL DE FERMANVILLE

HINSCHBERGER et al. (1988) ont entrepris d'étudier l'évolution du trait de côte de la commune de Fermanville à partir des plans cadastraux disponibles.

Les cadastres de 1822 et de 1968 ont été comparés afin de quantifier le recul de la côte sur une période de 146 ans.

Comme sur le littoral est du Cotentin, les pointes granitiques sont bien sûr immuables. Notons cependant que le **cap de Fort Joret**, dans sa partie NW exposée aux houles semble avoir reculé de 10 à 20 m, soit un recul moyen d'environ **0.10 m par an** (fig.6).

Les anses entre les pointes rocheuses et limoneuses ont par contre nettement reculé. **Les plages de part et d'autre du Fort Joret** ont subi une évolution régressive de parfois plus de 50 m, soit une érosion moyenne d'environ **0.35 m par an**.

Mais le recul le plus accentué est celui de l'**anse de la Mondrée** (fig.7). Il est de 60 à 120 m, le maximum se situant dans l'axe de l'anse, où une avancée bien marquée sur le plan de 1822 est remplacée aujourd'hui par un rentrant. Le **recul moyen annuel** sur ce secteur de côte varie donc de **0.40 m à 0.82 m** environ.

6) LE LITTORAL D'URVILLE

ELHAI (1963) a mis en évidence un exemple d'érosion spectaculaire à l'Ouest de Cherbourg sur des **falaises de head**. D'après le cadastre de 1933 et après des relevés effectués en 1960, il s'avère que la falaise d'Urville a reculé d'une quinzaine de mètres au plus, soit une **érosion moyenne annuelle de 0.20 à 0.40 m par an** (fig.8). Mais ELHAI note qu'en quelques mois un recul de 10 m en certains endroits a été observé. Cette érosion particulièrement brutale a été attribuée à des eaux d'infiltration dans le head, à l'appel au vide et au mitraillage des galets sur la base de la falaise qui finit par créer des excavations, des surplombs et donc des éboulements.

7) LE LITTORAL DE L'ANSE DE VAUVILLE

Le littoral nord de l'anse de Vauville a fait récemment l'objet d'une étude détaillée concernant sa défense contre la mer (LEVOY et LARSONNEUR, 1989).

Aujourd'hui, plusieurs constatations visuelles permettent de caractériser la presque totalité du trait de côte de la commune de Vauville comme étant en voie d'érosion:

- la ligne de contact entre le domaine continental et le domaine marin, principalement au Nord de la commune, est matérialisée par des falaises et des micro-falaises vives.

- des blockhaus de la seconde guerre mondiale sont basculés sur l'estran, principalement au centre et au Sud de l'anse de Vauville.

Cependant, il est important de souligner que les dunes bordières les plus septentrionales protégeant la mare de Vauville des invasions marines présentent un profil convexe témoin actuel de leur engraissement.

La comparaison des cadastres de 1818 et de 1965 n'a pas permis de quantifier rigoureusement le recul de la totalité du trait de côte de la commune. En effet, au Nord de Vauville le cadastre de 1818 représente le pied de la falaise, alors que le cadastre de 1965 symbolise comme ligne de rivage le parcellaire matérialisé par de petits murets que l'on retrouve encore actuellement sur le terrain (fig.9 et 10).

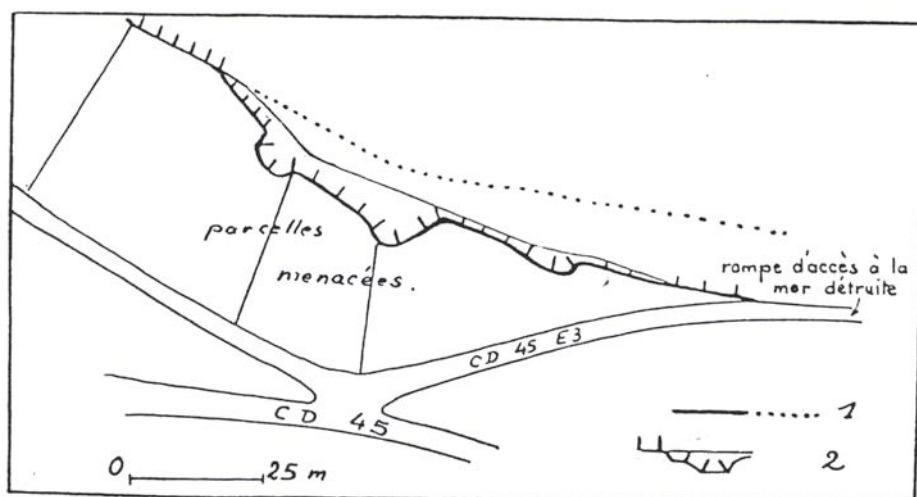
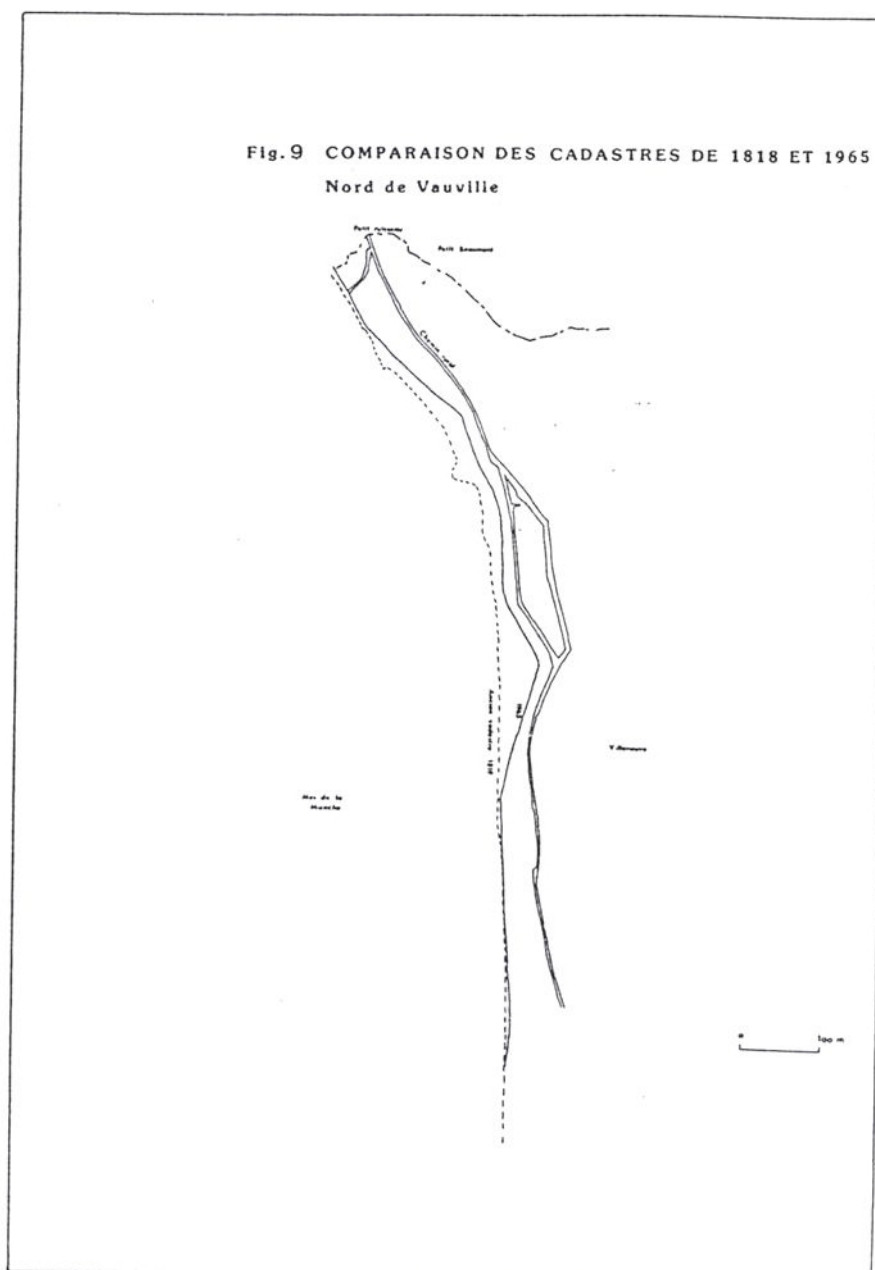


Fig.8: Recul de la falaise de head à Landemer (commune d'Urville, ouest de Cherbourg) (ELHAI, 1963)
 1: falaise en 1933 (lors de la rénovation du cadastre); 2: falaise de head et pied du talus depuis Décembre 1960



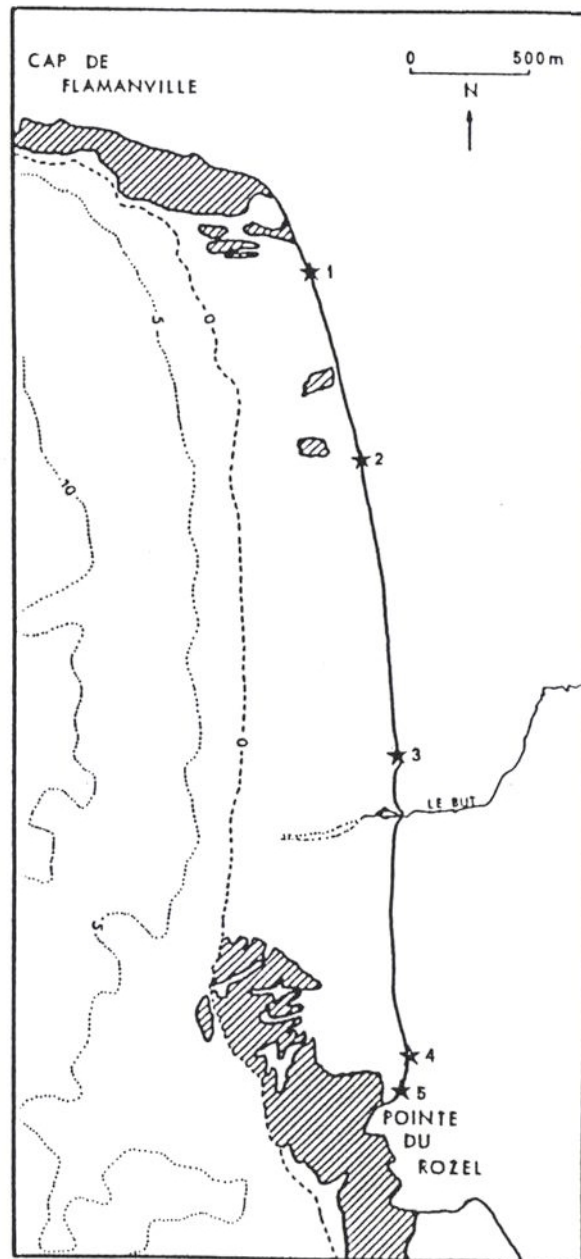


Fig.15: Localisation des points repères (HUARD,1988)

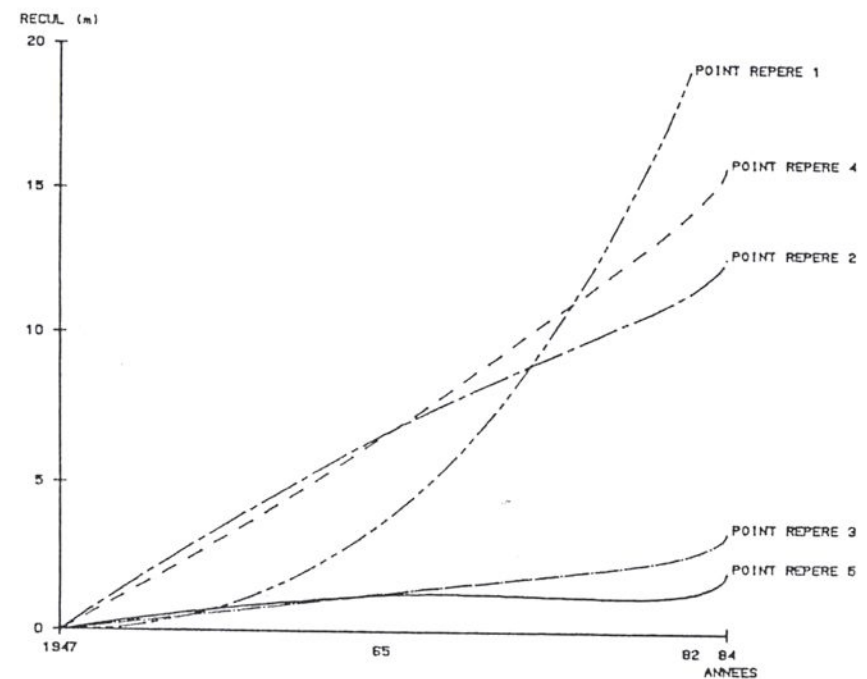


Fig.16: Recul du trait de côte en différents points de l'anse de Sciotot entre 1947 et 1984 (HUARD,1988)

Fig. 10 COMPARAISON DES CADASTRES
DE 1818 ET 1965
Sud de Vauville

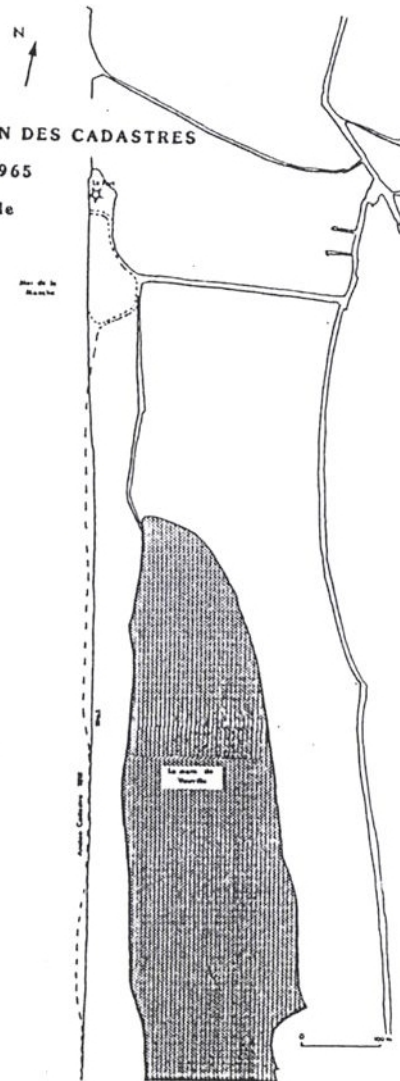
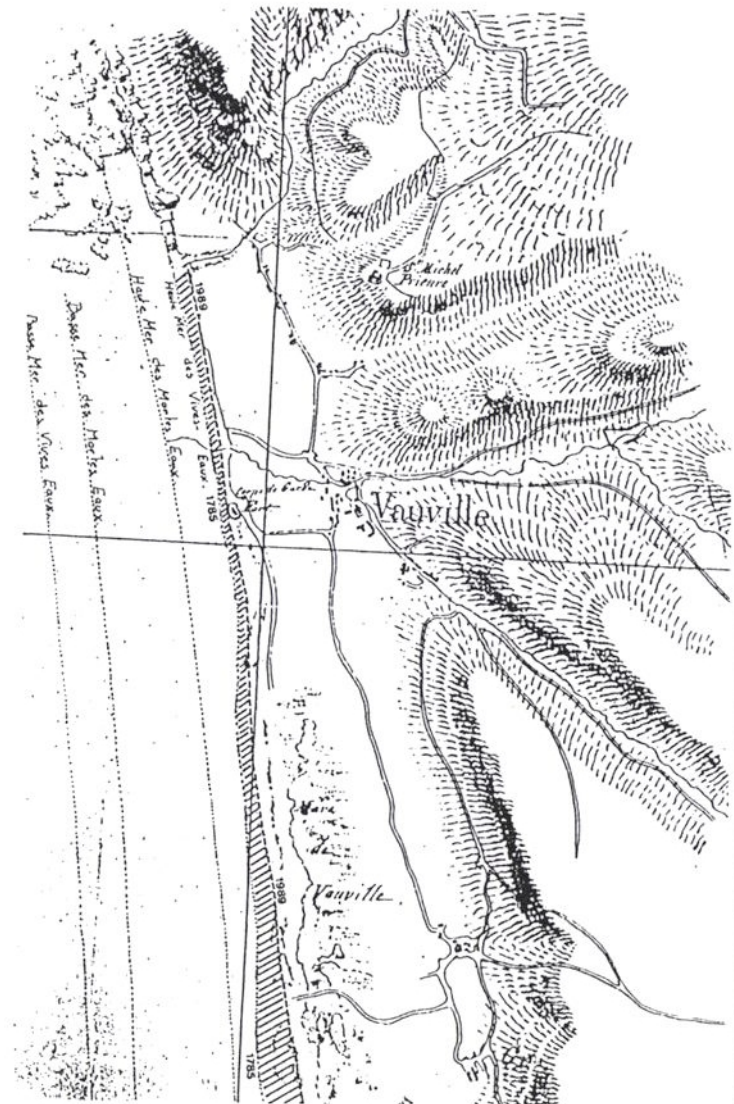


Fig. 11 CARTE DES INGENIEURS GEOGRAPHES (1785)



La comparaison des deux documents est réalisable **au Sud** du fortin, il est alors possible de noter que:

- en 147 ans, le recul de la côte est très faible, il ne dépasse jamais la vingtaine de mètres, soit **un taux maximal annuel de moins de 15 centimètres**.

L'existence d'un autre document retrouvé à la Bibliothèque Nationale confirme ce résultat. La carte des ingénieurs-géographes datant de la période 1771-1785 (fig.11) et dressée au 14400 ème montre qu'en 200 ans environ:

- le recul du littoral est un phénomène qui est effectif sur la totalité du rivage de Vauville.

- ce recul reste globalement assez faible.

- qu'il existe un gradient d'intensité du phénomène d'érosion du Nord vers le Sud de la commune, avec un recul de 15 à 25 mètres sur le tronçon de côte entre le lieu-dit La Crecque et le bourg de Vauville et un recul de 60 à 80 mètres au minimum au droit du village du Grand Thot.

Les ordres de grandeur du taux annuel d'érosion se trouvent confirmés **sur une longue période, soit au plus 10 à 50 centimètres par an**.

L'observation des photographies aériennes verticales de l'I.G.N agrandies à l'échelle du 1/7500 ème sur la période 1927-1988 montre que (fig.12):

- sur plus de 2000 mètres de côte au Sud du hameau La Crecque, le recul est inférieur à 20 m en 61 années, soit **un taux annuel maximal de 30 centimètres**.

- **au Nord** d'une ligne perpendiculaire au lieu-dit Le Petit Doué, le recul littoral entre 1927 et 1988 a une valeur inférieure ou égale à l'incertitude qui pèse sur la mesure des distances sur les documents. Le recul de la côte est donc très faible, **moins de 10 cm par an**.

- au Sud, le recul est de 7 à 20 m durant la même période soit 10 à 30 cm par an. Au droit du camping actuel de Vauville, le trait de côte a reculé d'environ 5 à 10 mètres au plus depuis 1927.

Durant la période d'étude, aucune érosion ne fût enregistrée compte tenu des conditions hydrodynamiques rencontrées durant l'été 1989.

Néanmoins, il est possible d'apprécier les modifications de détail qui ont affecté le trait de côte de Vauville, de part et d'autre du camping, grâce à la comparaison de photographies réalisées aux mêmes endroits à 2 années d'intervalle, en mai 1987 et mai 1989.

Globalement, au regard de ces photographies, le recul de la base du talus matérialisant la limite d'action de la mer n'a pas excédé 10 à 20 cm devant le camping.

Au Sud de la cale d'accès à la mer à proximité des bâtiments du club de char à voile, le trait de côte s'est fortement engraisé durant ces deux années. **La limite de végétation a progressé vers la mer de 2 à 5 m**, favorisant une élévation de la haute plage de 30 à 50 cm.

En conclusion, il apparaît indéniable qu'à une échelle de temps pluriannuelle, le littoral de l'anse de Vauville est en voie d'érosion justifiant une prise en considération du phénomène. Les falaises vives taillées dans les formations meubles et la présence d'éboulements à leur pied au Nord de Vauville en témoignent. Plus au Sud, devant la mare de Vauville, l'érosion semble actuellement stoppée, l'ancienne corniche d'érosion étant fossilisée par des apports éoliens récents.

Cependant, cette érosion est peu intense par rapport aux phénomènes qu'il est possible d'observer plus au Sud sur la côte du Cotentin. La comparaison entre la ligne de rivage à la fin du 18^{ème} siècle et la situation actuelle, la comparaison des photographies aériennes entre 1927 et 1988, montrent que **l'évolution pluriannuelle ne dépasse jamais 5 m en 10 ans au Sud du camping et 1 à 2 m** durant la même période devant et au Nord de ce site.

Plus au Sud de l'anse de Vauville, ELHAI (1963) note que le recul littoral globalement observé n'empêche pas des évolutions locales inverses. La figure 13, montre une comparaison de la situation du trait de côte entre 1843 (carte d'Etat-major au 1/80000^{ème}, 1^{ère} édition), le 1/20000^{ème} (1903-1906) et la carte au 1/25000^{ème} de 1958. Les embouchures du Grand-Douet et du Petit-Douet, au Nord de Dielette se sont rapprochées, les deux ruisseaux étant respectivement repoussés vers le Sud et vers le Nord par le développement de deux flèches sédimentaires. Dans l'intervalle, entre les embouchures, le littoral a légèrement reculé depuis 1906, mais au Nord et au Sud, **le gain a été localement de 50 m, soit un rythme d'évolution annuelle d'environ 0.40 m.**

8) LE LITTORAL DE L'ANSE DU ROZEL

L'évolution du littoral de l'anse de Sciotot a été récemment étudiée par HUARD (1988).

Globalement, comme pour l'anse de Vauville, un net recul est constaté car:

- un blockhaus de la seconde guerre mondiale est affaissé sur l'estran,
- le fort de Sciotot datant du XVIII^{ème} siècle a été complètement détruit par la mer,
- le C.D 517 a été coupé dès 1937 par la mer au pied du cap de Flamanville,
- des micro-falaises taillées dans les dunes sont fréquemment observables.

La comparaison des cadastres de 1824 et de 1970 (fig.14) montre un net recul au Nord de l'anse, atteignant au maximum 80 m, ce qui correspond à un **rythme annuel maximal de 0.55 m. Le rythme moyen est évalué à 0.35 m par an.**

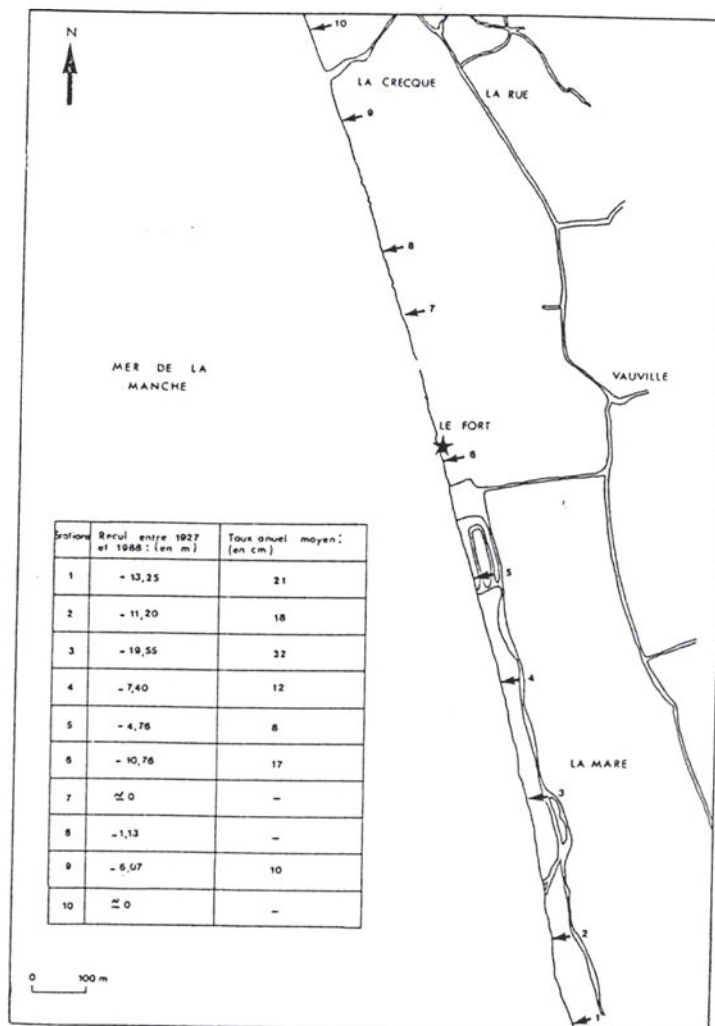


Fig.12: Evolution du trait de côte entre 1927 et 1988 (LEVOY et LARSONNEUR,1989)

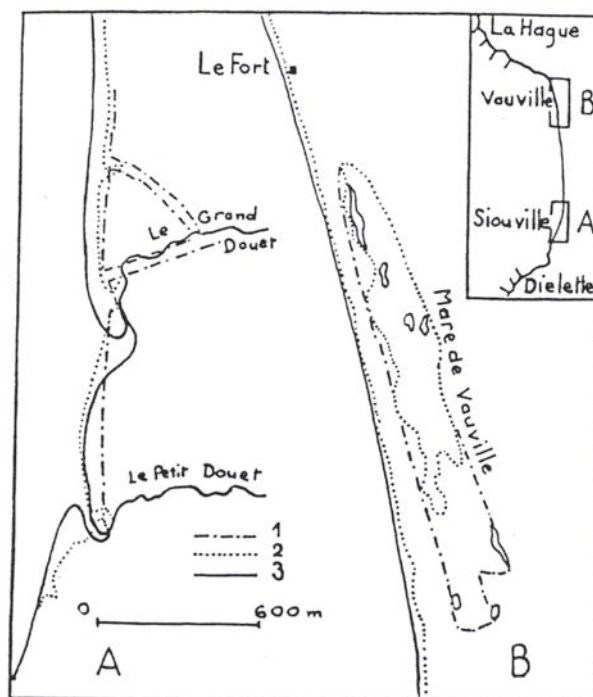
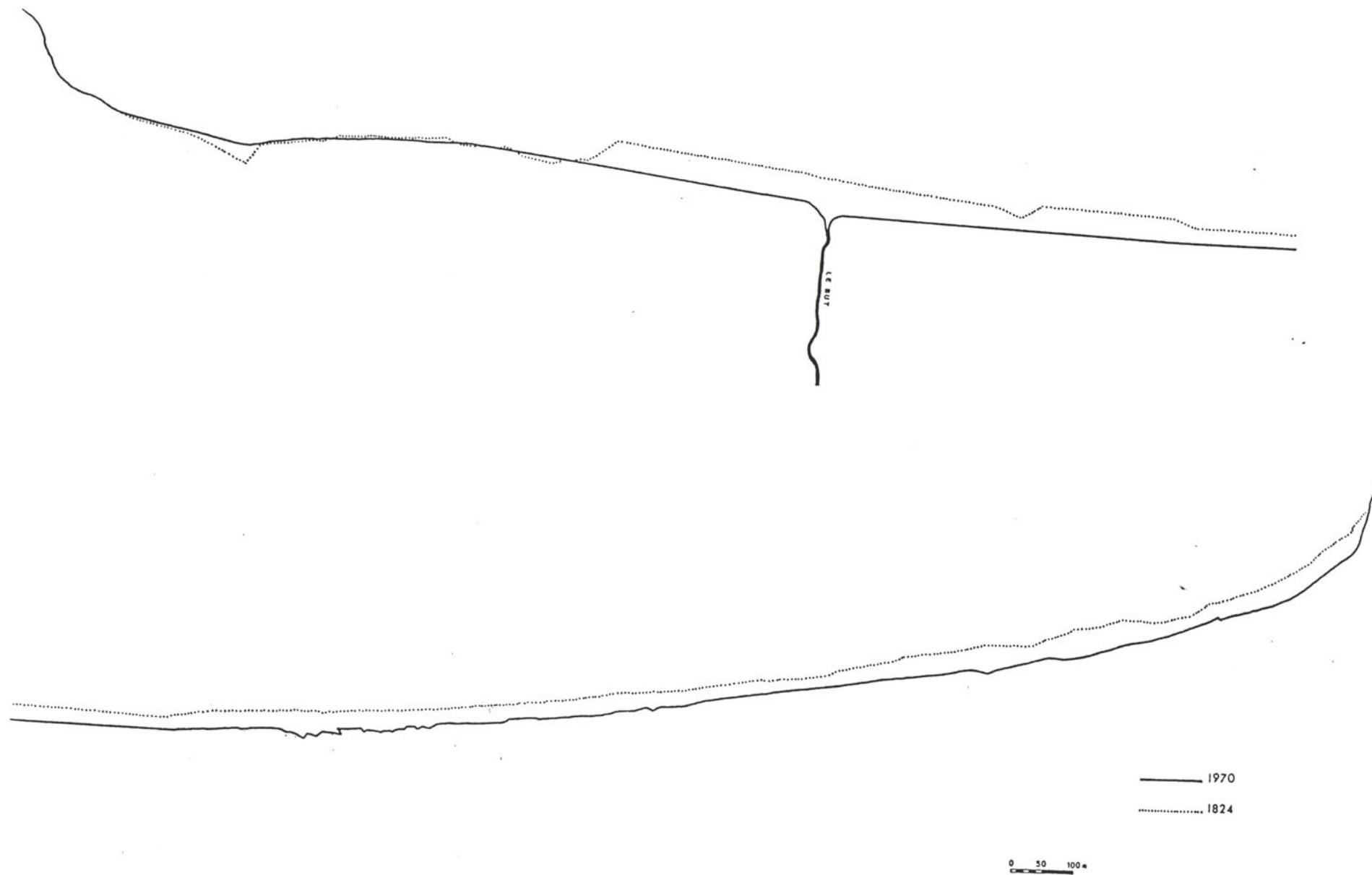


Fig.13: Le littoral sableux au Nord de Siouville (ELHAÏ,1963)
 1: la côte (ou la mare de Vauville) en 1843 (d'après le 80000 ème); 2: la côte en 1903-1906 (d'après le 20000 ème); 3: la côte en 1958 (d'après le 50000 ème).

Fig.14: Evolution du littoral de l'anse de Sciotot entre 1824 et 1970
(HUARD,1988)



Le **quart méridional de l'anse** semble stable à cette échelle de temps, avec par endroits une légère progression.

L'utilisation des différentes missions de photographies aériennes a également permis de suivre l'évolution de la ligne de rivage sur une période de temps plus courte, entre 1947 et 1984.

Par rapport à des repères immuables sur la période considérée, l'auteur a représenté graphiquement l'évolution du trait de côte pour 5 sites précis de l'anse de Sciotot (fig. 15 et 16).

Il ressort de ces documents:

- pour les 5 sites considérés, le phénomène d'érosion s'accélère depuis quelques années et la répartition spatiale du phénomène est quasiment identique à celle mise en évidence lors de la comparaison des cadastres. L'évolution est plus marquée au Nord qu'au Sud de l'anse, avec **un recul moyen annuel de 0.45 m par an**. L'érosion maximale est constatée au point n°1, le plus **au Nord**, avec un recul de près de 20 m en 37 ans, soit un **recul annuel moyen de 0.55 m**

- la **partie méridionale** subit un net recul récent d'environ 16 m, soit un rythme d'environ **0.4 m par an** (point n°4). Par contre, la falaise de head de la pointe du Rozel n'évolue que très lentement malgré une accélération récente du phénomène (point n°5).

- le **centre de l'anse** est assez stable, n'accusant un recul total sur 37 ans que de 3.5 m, soit une **érosion moyenne annuelle de 0.1 m** (point n°3)

Un suivi annuel a également été effectué dans le cadre de l'étude citée. Il se base sur des profils de plage réalisés à l'automne 1987, durant l'hiver 1987-1988 et durant l'été suivant.

Au Nord de l'anse, un recul de la base du cordon dunaire de 2 à 3 m a été constaté. Le phénomène constaté au cours de l'hiver s'est renforcé durant l'été avec un nouveau recul de 0.5 à 1 m suivant les endroits. Ces valeurs d'érosion apparaissent comme très élevées par rapport aux taux rencontrés précédemment.

Au Sud de l'anse, l'évolution est différente. Durant l'hiver 1987-1988, le trait de côte est resté stable. Par contre, durant le printemps et l'été, un recul d'environ 1 m a été constaté. Là aussi, ces constatations diffèrent des tendances évolutives passées précédemment calculées.

Ces mesures sembleraient souligner qu'à une échelle de temps relativement courte, celle de la saison, voire de l'année, l'évolution du trait de côte dans l'anse de Sciotot peut être d'un ordre de grandeur métrique et même pluri-métrique. Par contre, à une échelle de temps pluri-annuelle, il semble que la tendance érosive moyenne ne dépasse pas 0.50 m par an. Des phases d'évolution positive du trait de côte succèdent donc à des phases régressives, les secondes l'emportant sur les premières.

9) LE LITTORAL DE SURTAINVILLE

Quelques informations sont disponibles sur l'évolution du littoral de Surtainville suite aux levés topographiques effectués par les services maritimes **entre 1952 et 1961** (ELHAI, 1963).

Il s'avère que sur cette période la laisse des hautes mers a reculé de 35 m vers l'intérieur des terres, soit **un recul moyen annuel de près de 3.90 m**. D'autres repères sur ce secteur de côte permettent d'évaluer le recul à environ 2.2 m par an.

Le suivi du profil de la plage et de la dune par ELHAI a également montré:

- un recul de 1 à 3 m du pied de la dune entre le 14 octobre 1959 et le 9 décembre de la même année,

- un recul variant de 7 à 2 m du pied de la dune entre le 9 décembre 1959 et le 8 janvier 1960.

Il apparaît que pendant des tempêtes le recul de la côte de Surtainville peut être d'un ordre de grandeur pluri-métrique.

B - L'EVOLUTION PREVISIONNELLE DU LITTORAL NORD-COTENTIN: DISCUSSION ET REMARQUES

La synthèse des données issues des travaux antérieurs concernant l'évolution de la côte du Nord-Cotentin permet d'avoir une connaissance fragmentaire de sa cinématique passée. Nous constatons un manque d'informations important qui peut être préjudiciable à la détermination de l'évolution prévisionnelle de ce littoral, nécessaire à l'évaluation des zones à risque d'érosion (fig.17).

Néanmoins, pour l'ensemble des types de rivage présents, nous disposons de données concernant le taux moyen annuel d'érosion ou d'accrétion de la côte. Celui-ci est déduit de la comparaison de documents sur des échelles de temps de plusieurs dizaines d'années, voire parfois sur plus de 100 ans.

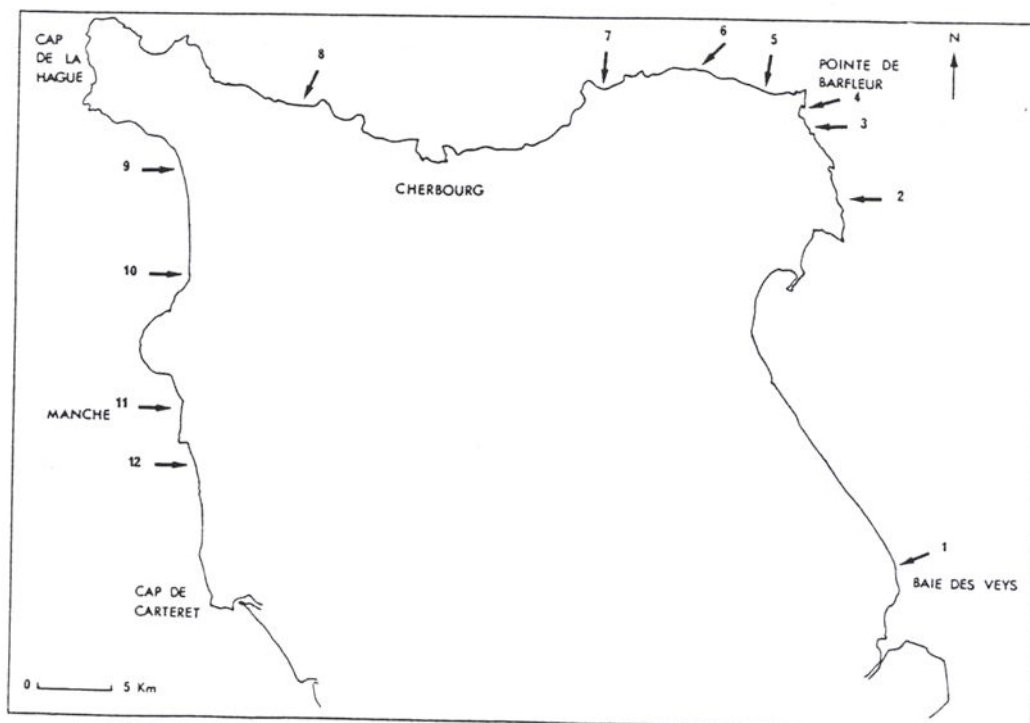
Il est cependant difficile d'apprécier, au travers de ces données, la tendance évolutive passée, qui pourra être extrapolable, sous toute réserve, dans le futur. Entre Réville et Landemer, sur la côte est du Cotentin, les informations concernant le recul de la côte mettent en évidence une accélération de l'érosion côtière sur la période 1972-1982 par comparaison à la période 1947-1972. Il en est de même dans l'anse de Sciotot pour la période 1982-1984, par rapport à la période antérieure.

Le rôle des tempêtes est également difficile à apprécier. Il est évident que le taux d'évolution à une échelle temporelle pluri-annuelle ne fait pas du tout ressortir la cinématique réelle du trait de côte. Le rôle des tempêtes est important et leur période de retour, d'une grandeur donnée, détermine la tendance évolutive à long terme. A cette échelle temporelle, les phases d'accrétion de la côte sont gommées.

Selon les informations recueillies, notamment grâce aux suivis de l'évolution de la côte effectués sur des périodes de quelques mois, le recul ou l'avancée du trait de côte n'est pas du même ordre de grandeur que le taux moyen annuel calculé sur une longue période.

Fig.17: Tendances évolutives du trait de côte du Nord Cotentin, synthèse bibliographique.

Sites	n° de localisation sur carte	Documents utilisés	Information d'échelle temporelle	Taux d'évolution moyen annuel	Taux d'évolution maximum annuel	Durée de la période d'observation
Côte du PLAIN (Utah-Beach)	1	photos aérienn.	pluri-annuelle	+ 1,35 à 2m	/	37 ans
REVILLE-LANDEMER	2	"	"	- 0,35m	- 0,85m	35 " (1947-1982)
				- 0,75m	/	10 ans (1972-1982)
BARFLEUR	3	cadastres	"	- 0,65m	/	120 ans
GATTEVILLE	4	"	"	- 0,16m	/	119 "
GATTEMARE	5	"	"	- 0,05m	/	160 "
VRASVILLE	6	"	"	- 0,15/-0,20m	/	160 "
			annuelle	- 0,30m	/	1 "
FERMANVILLE	7	"	pluri-ann.	- 0,40/-0,80m	/	146 "
URVILLE	8	"	"	- 0,20/-0,40m	/	27 "
		levés de terrain	annuelle	/	env. - 10m	qq. mois
VAUVILLE NORD	9	cadastres	pluri-ann.	- 0,15/-0,50m	/	147 ans
		phot. aér.	"	- 0,10/-0,30m	/	61 "
Camping Dunes de la mer		phot. ter.	annuelle	/	-0,10/-0,2m	2 "
		"	"	/	+ 1 à 2 m	2 "
VAUVILLE SUD	10	cartes anciennes	pluri-ann.	+ 0,40m	/	115 "
ANSE DE SCIOTOT	11	cadastres	"	- 0,35m	- 0,55m	146 "
		phot. aér.	"	- 0,1/-0,45m	- 0,55m	37 "
	12	profils topo	"	- 2,20/3,9m		10 "
SURTAINVILLE		"	annuelle	/	- 1 à - 7m	1 hiver (1959-1960)



Par exemple, pour le site d'Urville, le recul moyen annuel est de 0.40 m, alors que durant un seul hiver le trait de côte a reculé de plus de 10 m. Ce phénomène s'observe surtout, comme dans le cas présent, sur les côtes de falaises meubles, qui évoluent très brutalement par glissements successifs. La faible occurrence du phénomène entraîne une forte diminution du taux moyen annuel de recul.

Sur les côtes sableuses, le même phénomène peut être observé. A Vauville-Nord, le taux moyen annuel de recul calculé sur une période de 147 ans a été effectivement observé durant un suivi de 2 années sur le terrain. Cependant, les dernières tempêtes de février 1990 ont montré des reculs jusqu'à 20 fois supérieurs à ce taux moyen annuel. A Surtainville, le même phénomène a été observé, dans une moindre mesure, lors de l'hiver 1959-1960.

LE TAUX MOYEN ANNUEL DE REcul DE LA LIGNE DE RIVAGE NE DONNE QU'UNE INDICATION SUR SA TENDANCE EVOLUTIVE FUTURE. IL PEUT PERMETTRE PAR EXTRAPOLATION DE DEFINIR LA POSITION DU TRAIT DE COTE A L'ECHEANCE DE 10, 50 ET 100 ANS.

CEPENDANT, IL EST IMPORTANT DE POUVOIR APPRECIER LE REcul LIE A UN EVENEMENT EXCEPTIONNEL, CAR IL EST POSSIBLE DE CONDIDERER QUE LA LARGEUR DE LA ZONE A RISQUE A UNE ECHEANCE DONNEE EST EGALE A LA SOMME DES REculS OBSERVABLES DURANT LES TEMPETES QU'IL EST POSSIBLE DE RENCONTRER DURANT CETTE MEME PERIODE.

CE REcul PEUT ETRE COMPENSE, ENTRE LES PERIODES DE TEMPETES, PAR UN GAIN DE TERRAIN AU DETRIMENT DE LA PLAGE. MAIS L'ESPACE GAGNE NE PEUT ETRE CONSIDERE COMME UNE ZONE POUVANT AUSSITOT SUPPORTER DES BIENS, VOIRE DES PERSONNES. AINSI, UN TAUX MOYEN ANNUEL GOMME TOUTES OSCILLATIONS DE COURTES DUREES DE LA LIGNE DE RIVAGE.

L'ANALYSE DU RISQUE DEVRAIT PRENDRE EN COMPTE DES BANDES DE TERRAIN PARALLELES AU TRAIT DE COTE, POTENTIELLEMENT ERODABLES POUR UN EVENEMENT D'UNE PERIODE DE RETOUR DONNE, CHOISI A PRIORI.

En ce qui concerne l'évolution future de la côte du Nord-Cotentin, le peu de données disponibles sur l'érosion côtière directement issues d'événements exceptionnels exclut la réalisation d'une analyse fine. Seules des mesures de terrain et une étude de la cinématique de la côte à l'aide de photographies aériennes permettraient d'extrapoler plus précisément l'évolution future du littoral de cette région.

Dans l'état actuel des connaissances, pour définir une tendance évolutive prospective de la ligne de rivage du Nord-Cotentin, il convient de tenir compte au préalable du type de côte rencontrée. Plusieurs morphologies se distinguent:

- les secteurs de côte strictement constitués de roches dures sont considérés comme stables à l'échéance de 10, 50 et 100 ans. Aucun aléa lié à l'action de la mer ne menace les biens supportés par ces côtes rocheuses.

- les secteurs de côtes constituées de falaises de roches meubles (loess ou heads) sont presque continuellement érodées depuis la fin de la dernière grande période glaciaire, il y a près de 15000 ans. Le recul de ces falaises se produit par éboulements successifs après sapement de leur base par la mer. D'autres paramètres comme la teneur en eau du matériel ou l'action du gel peuvent déclencher des mouvements de terrain. Il existe peu d'observations concernant le recul de ces falaises meubles. Au Sud de l'Anse de Sciotot, le taux de recul calculé sur plusieurs dizaines d'années est inférieur à 0.10 m par an. Il atteint, au plus, 0.40 m par an à Urville. Par contre, des éboulements de falaise peuvent entraîner un recul brutal de la corniche de plus de 10 m.

Par conséquent, la zone à risque d'érosion le long des falaises de roches meubles du Nord-Cotentin doit à court terme tenir compte du risque d'éboulement de la falaise. **A priori, une bande côtière de 10 à 20 mètres peut être érodée brutalement.** Compte tenu de la fréquence de ces événements, à l'échéance de 50 ans, la zone à risque ne devrait pas excéder 20 à 30 m de large et dans 100 ans, 40 m environ si l'on tient compte du taux moyen annuel de recul (fig.18).

Seuls des exemples d'évolution similaire pris sur la côte du Bessin dans le Calvados permettent de valider les hypothèses posées. Sur cette côte (MAQUAIRE, 1990), la ligne de rivage est parfois matérialisée par des falaises de roches meubles, essentiellement marneuses, qui évoluent par éboulements successifs. Des encoches variant de 10 à 18 m de profondeur au niveau de la corniche des falaises du Bessin ont été observées. Elles matérialisent un recul brutal du sommet de la falaise d'un ordre de grandeur identique à celui avancé par ELHAI à Urville. Plus globalement, le taux moyen annuel de recul est estimé à 0.25 m par an en moyenne. Ce taux se situe entre celui observé pour les falaises de heads de l'anse de Sciotot et celui observé à Urville.

- les secteurs de côtes sableuses montrent deux dynamiques distinctes selon les lieux:

- très localement des zones stables ou en accrétion: ce sont les secteurs de flèches sableuses comme la partie occidentale de la Baie des Veys et le débouché des Douets, au Sud de l'Anse de Vauville. La tendance évolutive future est difficile à prévoir compte tenu des informations disponibles sur ces sites. Dans la baie des Veys, le colmatage progressif de cette zone estuarienne laisse penser que la tendance actuelle va se perpétuer durant plusieurs dizaines d'années au moins. Au Sud de l'Anse de Vauville, la tendance progradante est également très nette sur la période 1843-1958. La présence de blockhaus de la dernière guerre sur l'estran semble indiquer une inversion récente de cette tendance. Globalement, le bilan reste positif. Ces deux secteurs de côte ne sont donc pas des zones à risque d'érosion.

- plus globalement, sur la plupart du linéaire de côte sableuses du Nord-Cotentin, l'évolution passée est plus homogène. Sur les 8 sites où la tendance évolutive du rivage a été établie sur plus de 100 ans, le taux moyen de recul est d'environ 0.35 m par an. Pour les 5 sites, où cette tendance a été établie sur moins de 100 ans, le taux moyen d'érosion est également de 0.35 m par an. Globalement, le taux d'érosion annuelle maximale est 1,5 fois plus élevé que le taux moyen annuel. **Ainsi, à l'échéance de 10 ans, le trait de côte devrait se localiser entre 3 et 6 mètres en retrait par rapport à celui observé actuellement. Dans 50 ans, la bande côtière érodée devrait être au plus de 30 m. Dans 100 ans, environ 55 m de terrain côtier auront disparu.**

Type de Côte	Principaux secteurs concernés	Largeur des terrains érodables à échéance de :		
		10 ans (an 2 000)	50 ans (an 2 040)	100 ans (an 2 090)
Côte à falaises de roches dures	Cap de Carteret, du Rozel et Nez de Jobourg	/	/	/
Côte à falaises de roches meubles	Côte du Nord Cotentin entre la Baie d'Ecalgrain et Cherbourg, Cherbourg et le Cap Lévi	10 à 20m (éboulements)	20 à 30m	40m
Côte sableuse	Carteret-Rozel Anse de vauville Pointe Lévi - Cap de Barfleur Anses entre pointe de Barfleur et Pointe de Saire, Saint-Vaast, Baie des Veys	3 à 6m	30m	55m

Fig.18: Zonage du risque d'érosion. Côte du Nord Cotentin - Baie des Veys - Cap de Carteret

En conclusion, le zonage des terrains menacés par l'érosion côtière dans le Nord-Cotentin à l'échéance de 10, 50 et 100 ans ne peut être qu'approximatif compte tenu des renseignements bibliographiques disponibles, et sans analyses fines des photographies aériennes existantes depuis plusieurs dizaines d'années.

Des ordres de grandeur concernant l'évolution future du tracé de la côte ont été avancés, basés sur la cinématique passée connue. Il sont de ce fait parfaitement cohérents si les conditions dynamiques de chaque site sont conservées dans le temps.

Il apparaît qu'à l'échéance de 100 ans, la zone à risque d'érosion s'étend sur une cinquantaine de mètres de large au plus. Précisons, que cette tendance n'est pas validée pour le linéaire de côte situé entre le cap du Rozel et le cap de Carteret, ainsi que sur la côte orientale du département de la Manche entre l'anse du Cul-de-loup et Utah Beach. Un complément d'étude est dorénavant nécessaire pour préciser le zonage des risques d'érosion dans ces secteurs. Par défaut, la zone à risque d'érosion prise en compte sera identique à celle globalement définie pour les côtes sableuses du Nord-Cotentin.

Sur les secteurs protégés par des enrochements, le trait de côte peut être considéré comme figé à une échéance égale à la durée de vie de l'ouvrage. Ensuite, en théorie, le risque d'érosion n'est plus nul. De ce fait, malgré la présence d'ouvrages longitudinaux, une zone à risque d'érosion sera définie juste en arrière de ceux-ci. La valeur des biens incluse dans cette zone devra justifier l'entretien de l'ouvrage en place, au-delà de sa durée de vie actuelle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DELAHAYE D. (1986) - Les marais littoraux du Nord-Est du Cotentin, dynamique sédimentaire et hydrologie. U.F.R. sciences de la terre, Université de Caen, 137 p.
- ELHAI H. (1963) - La Normandie occidentale entre la Seine et le Golfe Normand-Breton. Etude morphologique. Thèse. Bière imp., Bordeaux.
- HINSCHBERGER F. et Al. (1988) - Le recul du littoral à Barfleur, Gatteville et Fermanville (Manche) depuis 150 ans. Bulletin du GREGEPE n°7. p 25-32.
- HUARD F. (1988) - Fonctionnement du littoral en système ouvert ou fermé: le Nord-Ouest du Cotentin à travers le cas de l'anse de Sciotot. U.F.R sciences de la terre, Université de Caen. 142 p.
- LARSONNEUR C. (1983) - L'érosion du littoral de Réville-Landemer. Laboratoire de Géologie marine, Université de Caen- D.R.A.E. de Basse-Normandie. 25 p.
- LEVOY F. (1986) - Les risques de submersion des terres dans la baie des Veys, Rapport provisoire. Université de Caen-D.D.E. de la Manche. 79 p.
- LEVOY F. et LARSONNEUR C. (1989) - Etude de la dynamique sédimentaire du littoral de Vauville en vue de sa protection contre la mer, Rapport final. Laboratoire de Géologie marine, Université de Caen - District de la Hague. 30 p.
- MAQUAIRE O. (1990) - Recherches sur les mouvements de terrain de la côte du Calvados en vue de leur prévention. Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg. 431 p.

EVALUATION DES RISQUES DE SUBMERSION

DETERMINATION DES NIVEAUX DE PLEINES MERS EXTREMES LE LONG DES COTES DU DEPARTEMENT DE LA MANCHE.

La détermination des zones à risques de submersion le long des côtes du département de la Manche nécessite une connaissance préalable des niveaux de pleines mers extrêmes et de la topographie côtière.

L'objectif de cette phase d'étude est de préciser les niveaux marégraphiques de pleine mer d'une période de retour de 2, 5, 10, 50 et 100 ans. Les altitudes atteintes par le plan d'eau statique lors de ces événements seront ensuite superposées à la topographie supratidale pour délimiter le zonage de submersions potentielles, d'une probabilité d'apparition donnée.

1) RAPPEL SUR LES CARACTERISTIQUES DE LA MAREE DANS LE GOLFE NORMAND-BRETON.

La propagation de l'onde de marée à l'intérieur du golfe normand-breton présente l'originalité d'être fortement influencée par la topographie des fonds et la géométrie de la côte, à différentes échelles spatiales. Dans un premier temps, l'onde de marée gonfle sur les fonds du plateau continental. Ensuite, elle subit l'influence de la barrière que constitue la presqu'île du Cotentin, orientée Nord-Sud. Le resserrement de la Manche entre Cherbourg et la Grande-Bretagne et son élargissement en baie de Seine contribuent à faire considérablement varier les caractéristiques de la marée le long des côtes.

Le marnage en vives-eaux le long des côtes du département de la Manche est donc très variable. Il est de 12 m dans la baie du Mont-Saint-Michel par coefficient de 95 et décroît progressivement en direction du Nord pour atteindre 4,5 m à Cherbourg. Dans la baie des Veys, celui-ci est légèrement supérieur, environ 5,5 m. Ainsi, le niveau des pleines mers varie du Sud au Nord de la côte du Cotentin et de l'Ouest vers l'Est. Au moment de la pleine mer, le niveau marégraphique est presque deux fois plus élevé à Granville par rapport à celui observé à Cherbourg.

2) LES DONNEES MAREGRAPHIQUES DISPONIBLES

Actuellement, seul le marégraphe de l'arsenal de Cherbourg fonctionne en permanence sur l'ensemble des 330 kilomètres de côte du département de la Manche. Les courbes marégraphiques recueillies sur un support papier sont directement transmises au Service Hydrographique et Océanographique de la Marine à Brest, pour être dépouillées. Les niveaux de pleines mers sont donc disponibles au S.H.O.M. pour les années 1943, 1944, 1963 et de 1974 à aujourd'hui, soit au total 20 années d'enregistrements.

D'autres données sur les hauteurs de pleine mer existent pour les sites de Granville et de la Baie des Veys. Ces données sont issues de relevés visuels effectués sur des échelles limnimétriques situées à proximité de l'écluse du port de pêche de Granville et de celles du Haut Dick, de la Barquette et du Pont du Vey, au fond de la baie des Veys. La précision de ces observations est de plus ou moins 5 centimètres selon le degré d'agitation du plan d'eau au moment de la mesure.

Sur le site de Granville, la série d'observations débute en 1961. 30 années de données sur les niveaux de pleine mer observée sont disponibles. Dans la Baie des Veys, l'acquisition des niveaux marégraphiques de pleine mer est variable selon les sites de mesures. A la Barquette, sur la Douve, des observations sont disponibles depuis 1924, soit plus de 65 années de mesures. A l'écluse du Haut Dick, sur le canal de Carentan à la mer, 51 années de données marégraphiques, entre 1924 et 1974, sont exploitables. Au Pont du Vey, sur la Vire, plus de 27 années d'observations sont disponibles.

En complément de ces principaux sites, s'ajoutent les enregistrements effectués à Saint-Malo, port de référence marégraphique pour l'ensemble du golfe normand-breton. 21 années de données, couvrant la période 1968-1988, ont été dépouillées par le laboratoire de Géomorphologie de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes de Dinard et ont pu ainsi être exploitées.

En parallèle, de ces données marégraphiques, disponibles sur des périodes de plusieurs dizaines d'années, des mesures de hauteurs de marée ont parfois été réalisées sur les côtes du département de la Manche dans le cadre d'études ponctuelles. Ainsi, dans la baie du Mont-Saint-Michel, pour des études sur le désensablement du site, plusieurs mois de mesures marégraphiques ont été effectués au barrage de la Caserne. Plus de 218 observations de pleines mers ont été recueillies et corrélées aux observations de marée réalisées à Granville.

De la même manière, des données sur les hauteurs de pleines mers pour les sites de Regnéville, de Portbail et du Grand Vey ont été utilisées.

3) LA METHODE DE CALCUL DES NIVEAUX EXTREMES DE MAREE.

Plusieurs méthodes permettent de déterminer la hauteur d'une pleine mer de période de retour donnée:

3.1) Prise en compte des hauteurs théoriques extrêmes et des surcotes exceptionnelles

La bonne connaissance des hauteurs théoriques de pleine mer prévues par le S.H.O.M., pour différents coefficients de marée, permet de définir graphiquement un nuage de points dont la droite passant par son enveloppe supérieure aboutit à une extrapolation de la plus forte hauteur pour chaque coefficient. Le prolongement de cette droite pour des coefficients de marée de vive-eau exceptionnelle permet d'obtenir des hauteurs extrêmes théoriques de pleine mer (fig.1).

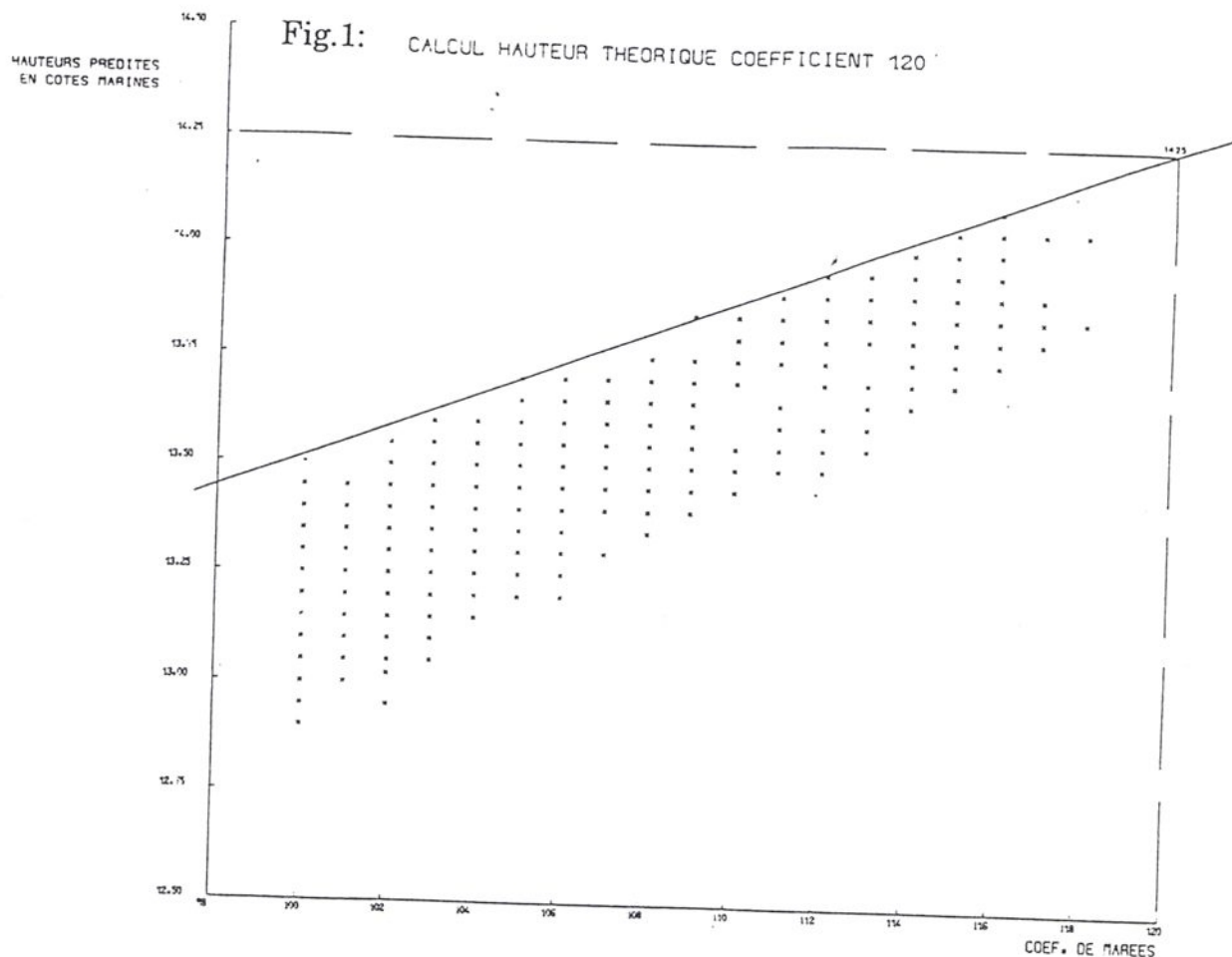


Fig.2: CONJONCTION D'UNE HAUTEUR THEORIQUE DE MAREE ET D'UNE SURCOTE A GRANVILLE

Coefficients	HAUTEUR DE MAREE PREVUE C.M.	SURCOTES		HAUTEUR OBSERVEE A GRANVILLE	
		Période de retour	Hauteur en mètres	C.M.	m IGN 69
90	13.16	10	1.06	14.22	7.50
"	"	100	1.35	14.51	7.79
"	"	1 000	1.65	14.81	8.09
100	13.52	10	1.06	14.58	7.86
"	"	100	1.35	14.87	8.15
"	"	1 000	1.65	15.17	8.45
110	13.88	10	1.06	14.94	8.22
"	"	100	1.35	15.23	8.51
"	"	1 000	1.65	15.53	8.81
118	14.18	10	1.06	15.24	8.52
"	"	100	1.35	15.53	8.81
"	"	1 000	1.65	15.83	9.11

Fig.3: Site du Pont du Veys
Ajustement à la loi de Gumbel

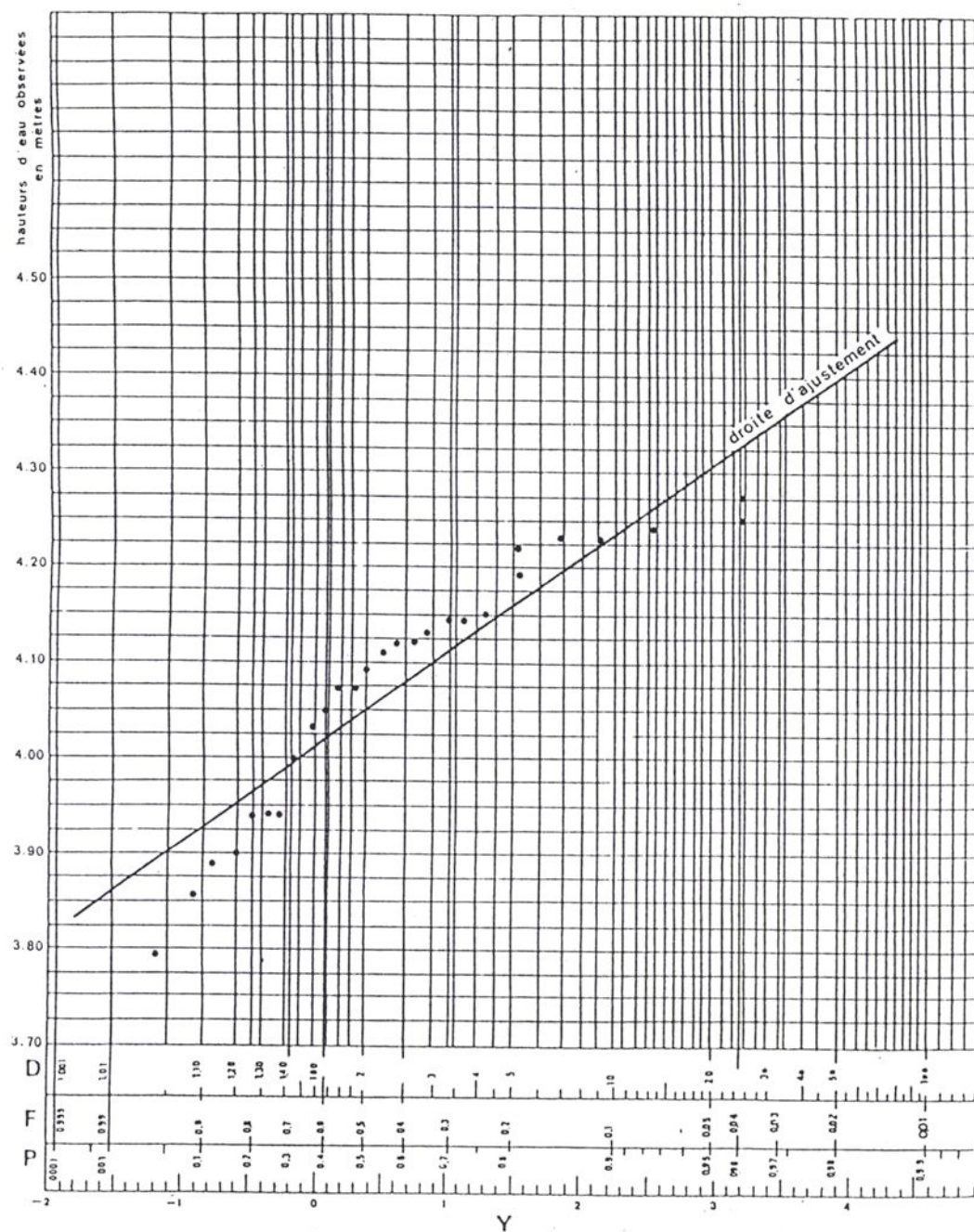
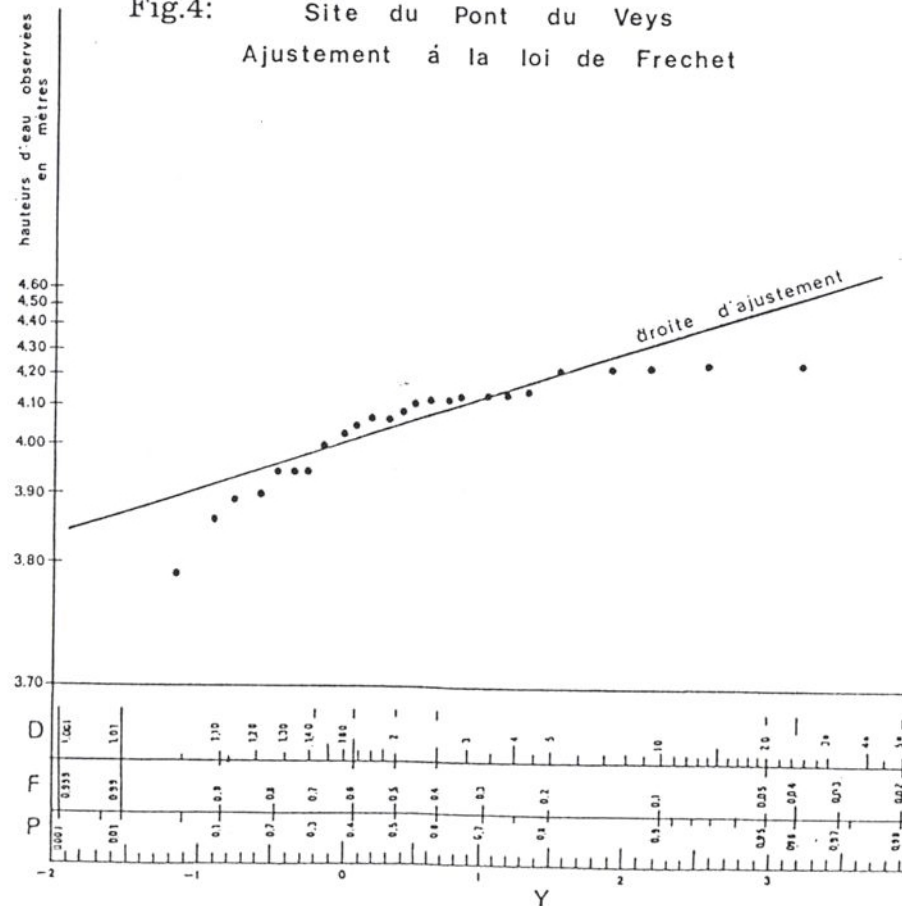


Fig.4: Site du Pont du Veys
Ajustement à la loi de Frechet



Ces hauteurs de marées extrêmes ne tiennent pas compte des paramètres météorologiques et océanographiques qui vont, soit surélever, soit réduire la hauteur de marée théorique. Il convient d'ajouter une valeur de surcote ou de décote pour obtenir une hauteur de marée réellement observée.

La définition des surcotes extrêmes ne peut se réaliser qu'à partir d'un échantillon de données couvrant plusieurs années d'observations. Un traitement statistique permet alors d'extrapoler la grandeur d'une surcote ayant une période de retour spécifique.

Pour le site de Granville, les surcotes de période de retour décennale, centennale et millénale ont été calculées (LEVOY, 1985). Le cumul d'une hauteur d'eau théorique correspondant à un coefficient de marée, et d'une surcote extrême permet d'obtenir une hauteur de marée exceptionnelle qui pourrait être observée (fig.2).

La multiplication des probabilités de retour d'une hauteur d'eau théorique et d'une surcote permet de définir la probabilité d'occurrence de l'événement extrême ainsi caractérisé.

En fait, à une hauteur d'eau observée correspond une infinité de conjonctions entre un niveau marégraphique théorique et une surcote, voire une décote. Par conséquent, pour une même hauteur d'eau observée, mais répondant à des conjonctions de surcotes et de hauteurs théoriques différentes, la probabilité d'occurrence devient imprécise, car variable selon les conjonctions (possibilité de cumul des imprécisions sur les calculs antérieurs, choix de loi de distribution pour le calcul de l'ajustement...).

La prise en compte distincte d'un niveau du plan d'eau statique prédit et d'une surcote introduit donc une approximation sur les caractéristiques de l'événement extrême, notamment sur son intensité et sa probabilité d'apparition.

Les résultats obtenus pour le site de Granville (LEVOY, 1985) font apparaître des hauteurs extrêmes de la mer de très faibles probabilités. La conjonction entre une marée de coefficient 100 et une surcote décennale possède en effet une période de retour supérieure à 100 ans, qui devient très incertaine.

Cette méthode de calcul des pleines mers exceptionnelles, compte tenu de ses imprécisions et de la difficulté d'interprétation des conjonctions d'événements extrêmes, n'a pas été retenue.

3.2) Prise en compte des hauteurs annuelles de pleine mer observées .

La méthode utilisée consiste à prendre en compte directement un échantillon de valeurs annuelles de pleine mer observées, sans avoir recours à une prise en compte distincte d'une hauteur de marée prédite et d'une surcote.

Chaque hauteur de pleine mer annuelle, définie comme étant la plus forte hauteur de l'année considérée, peut être analysée statistiquement comme une variable aléatoire continue et illimitée, dont il est possible d'établir la distribution statistique selon des ajustements basés sur des lois de probabilité.

Plusieurs lois ont été testées:

- la loi exponentielle: $Y=a*\exp(b*X)$,
- la loi normale (Gauss): $Y=(a/(b*(2\pi)^{0.5}))*\exp(-0.5*((X-c)/b)^2)$,
- la loi de Weibull: $Y=a*(1-\exp(-b*(X)^c))$.

Les lois de Gumbel (fig.3 et 4), Fréchet ou exponentielles, testées pour des sites de la baie des Veys (LÉVOY, 1987) ont été rejetées, ne s'adaptant pas aux distributions des niveaux de pleine mer annuelle observée.

La loi de Weibull à trois paramètres montre globalement d'excellentes corrélations avec les échantillons marégraphiques. Mais le domaine d'application de cette loi ne peut dépasser la durée de l'échantillon. Ainsi, l'extrapolation de cette loi pour le calcul d'événements de période de retour de longue durée n'est pas possible, la valeur de la hauteur d'eau tendant vers une asymptote.

La loi Normale s'adapte bien aux distributions marégraphiques de longue durée. Son domaine d'application permet d'obtenir une extrapolation des valeurs marégraphiques extrêmes. Cependant, l'estimation d'un événement de probabilité P est incertaine, mais il est possible de donner un intervalle tel qu'il y ait X % de chances que la vraie valeur s'y trouve. Deux intervalles de confiance à 70 % et 95 % ont été calculés.

3.3) la méthode du S.H.O.M.

Pour le site de Cherbourg, la méthode de calcul pour définir les niveaux de pleine mer extrême a été mise au point par le S.H.O.M.

La probabilité Q(h) de prédiction d'une hauteur d'eau de pleine mer supérieure à h à Cherbourg est présentée dans l'annexe n°1.

Le calcul des pleines mers extrêmes d'une période de retour donnée peut être obtenu par le biais des expressions suivantes:

$$\log_{10} (C(h)) = -0.0437 h + 30.18$$

où C(h) est le pourcentage d'observations de hauteurs de pleines mers supérieures à la valeur h (en cm).

$$n = 705.76 * C(h)/100$$

où n est le nombre moyen par an de pleines mers de hauteur supérieure à h.

1/n est la période de retour de l'événement de grandeur h.

4) LES RESULTATS

4.1) *L'analyse descriptive des séries chronologiques*

Les hauteurs de pleines mers annuelles entre Saint-Malo et la baie des Veys sont très variables dans le temps.

Pour le site de Saint-Malo, sur 21 années d'observations, le niveau de pleine mer annuelle varie de 12,83 m C.M. en 1977 à 13,7 m C.M. en 1985. L'écart-type de la série est de 0.24 m (fig.5).

A Granville, sur les 30 années de données recueillies, les hauteurs de pleines mers annuelles fluctuent, entre 13,7 m C.M. en 1982 et 14,5 m C.M. en 1979. L'écart-type de cette série est identique à celui calculé pour Saint-Malo (fig.6).

Pour le site de Cherbourg, le niveau de pleine mer minimal sur la période 1974-1989 est de 6.79 m C.M. et le niveau maximal de 7.15 m C.M.. Ce dernier a été observé en 1976. Compte tenu du marnage, l'écart-type de cette série, environ 0.125 m, est plus faible. Néanmoins, comme pour les autres séries, il est proportionnel à l'amplitude de la marée annuelle, entre 1,57 et 1,79 % de la moyenne de chaque série (fig.7).

Dans la Baie des Veys, les séries chronologiques sont plus longues que pour les sites précédents. Pour les valeurs mesurées au Pont du Vey, 25 années de données ont été recueillies et traitées (LEVOY, 1987). Les niveaux de pleine mer annuelle varient entre 7,91 m C.M. en 1973 et 8,37 m en 1985. L'écart-type de cette série est de 0.12 m (fig.8). Au Haut-Dick, 51 hauteurs de pleine mer annuelle sont disponibles entre 1924 et 1974. La plus basse valeur a été observée en 1925, 7,89 m C.M. et la plus forte en 1957 et 1958, avec une hauteur de 8,34 m C.M. (fig.9). La série de valeurs disponibles est encore plus longue pour le site de la Barquette. Elle couvre 63 années entre 1924 et 1986. Au cours de cette période, la cote la plus basse, 7,96 m C.M., a été enregistrée en 1933 et la cote la plus forte, 8,45 m C.M., en 1985. L'écart-type de ces séries est de 0.12 m (fig.10).

En conclusion, il apparaît que les fluctuations des niveaux marégraphiques annuels sont bien corrélées entre les différents sites pris en considération.

Cette corrélation est particulièrement évidente pour les niveaux observés les plus bas. Ainsi, périodiquement, tous les 3 à 5 ans, le niveau annuel de pleine mer est relativement faible. Ce phénomène s'observe notamment pour les sites de Saint-Malo, Granville et Cherbourg sur les années 1977, 1982 et 1986.

De la même manière, des hauts niveaux de pleine mer annuelle reviennent périodiquement. La fréquence d'apparition de ces cotes élevées n'est pas aussi régulière que pour les bas niveaux annuels. Néanmoins, les années 1961, 1967, 1970, 1974, 1976, 1979 et 1980, 1984 et 1985 et 1988 montrent des cotes de pleine mer annuelle relativement élevées. Ce rythme correspond essentiellement à la fréquence d'apparition des coefficients de marée supérieurs à 115, dont l'occurrence est égale environ au quart de la période chaldéenne (LE RHUN, 1982).

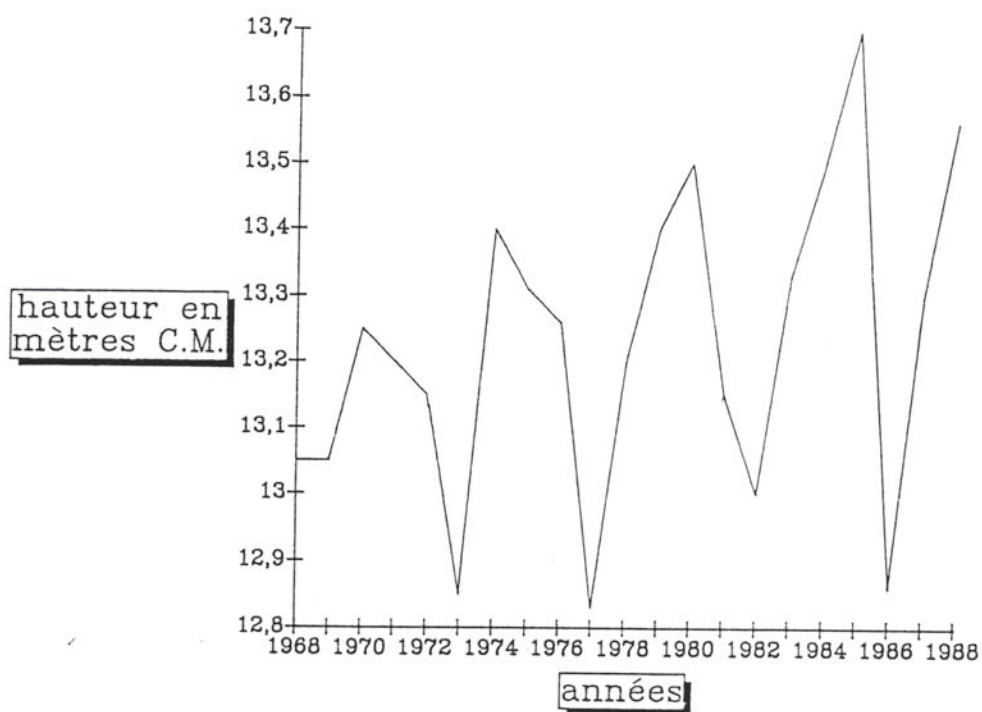


Fig.5: Evolution du niveau des hauteurs de pleine mer annuelle entre 1968 et 1988 à Saint-Malo

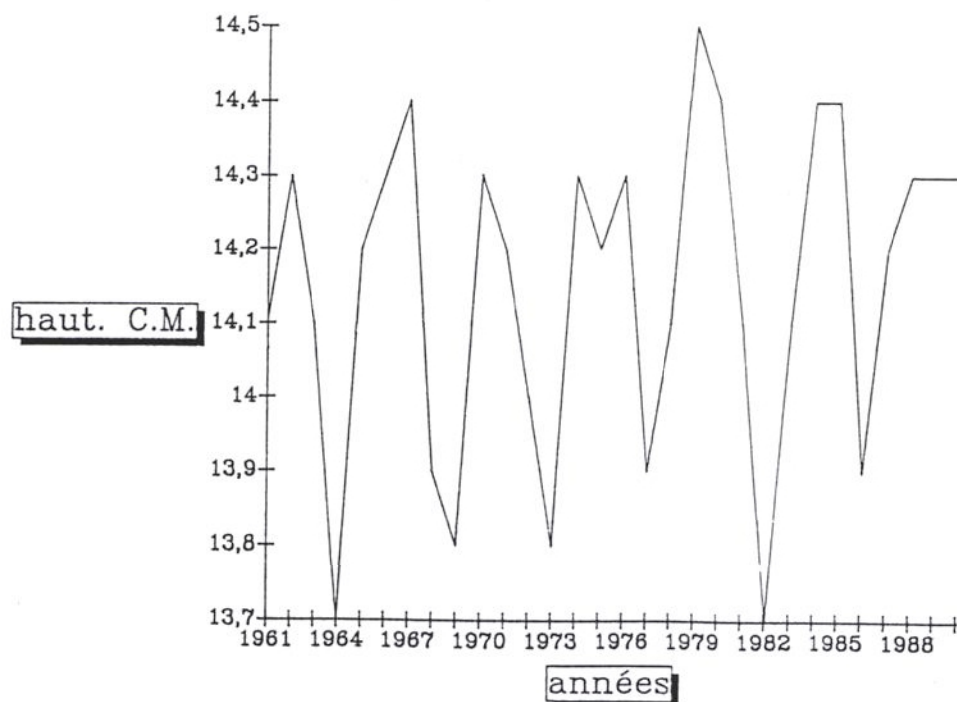


Fig.6: Evolution du niveau des hauteurs de pleine mer annuelle entre 1961 et 1990 à Granville

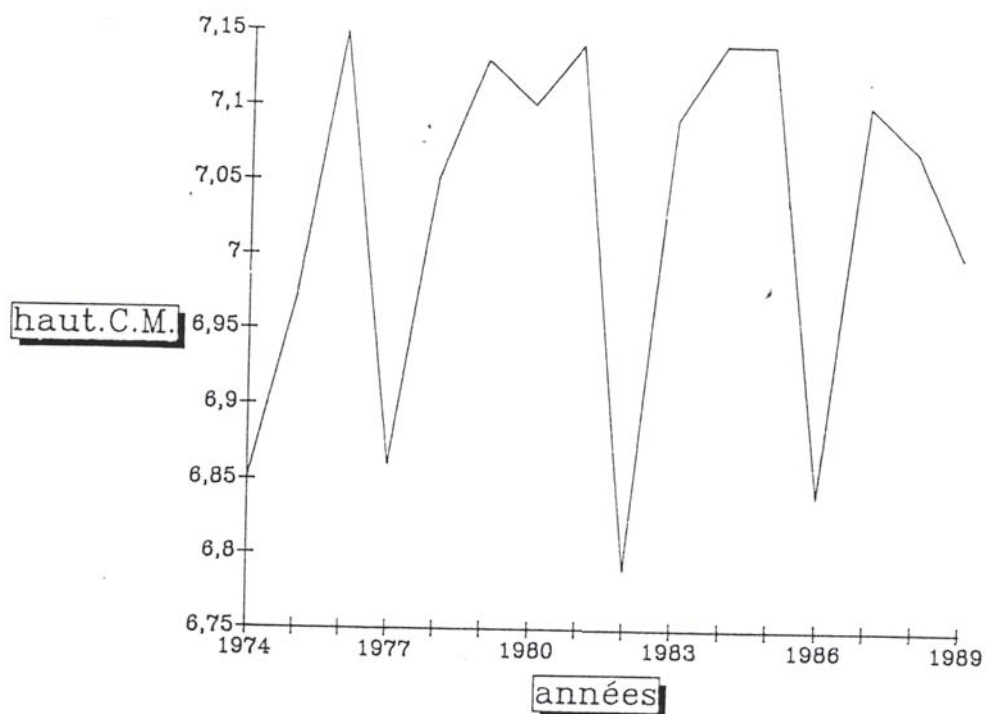


Fig.7: Evolution du niveau des hauteurs de pleine mer annuelle entre 1974 et 1989 à Cherbourg

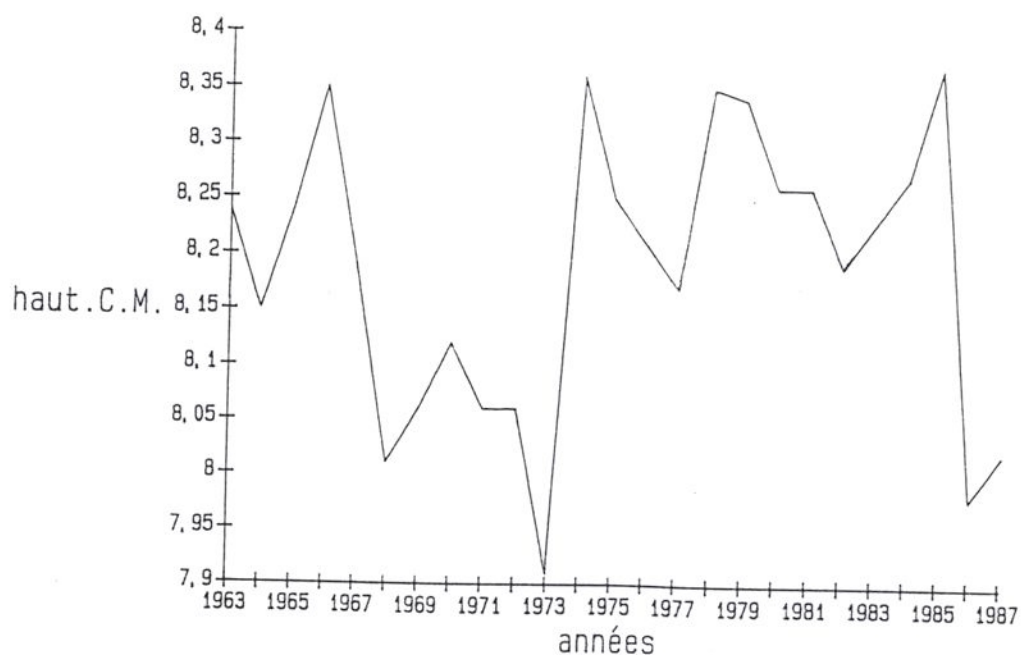


Fig.8: Evolution du niveau des hauteurs de pleine mer annuelle entre 1963 et 1987 à Pont du Veys

HAUTEUR PM BARQUETTE

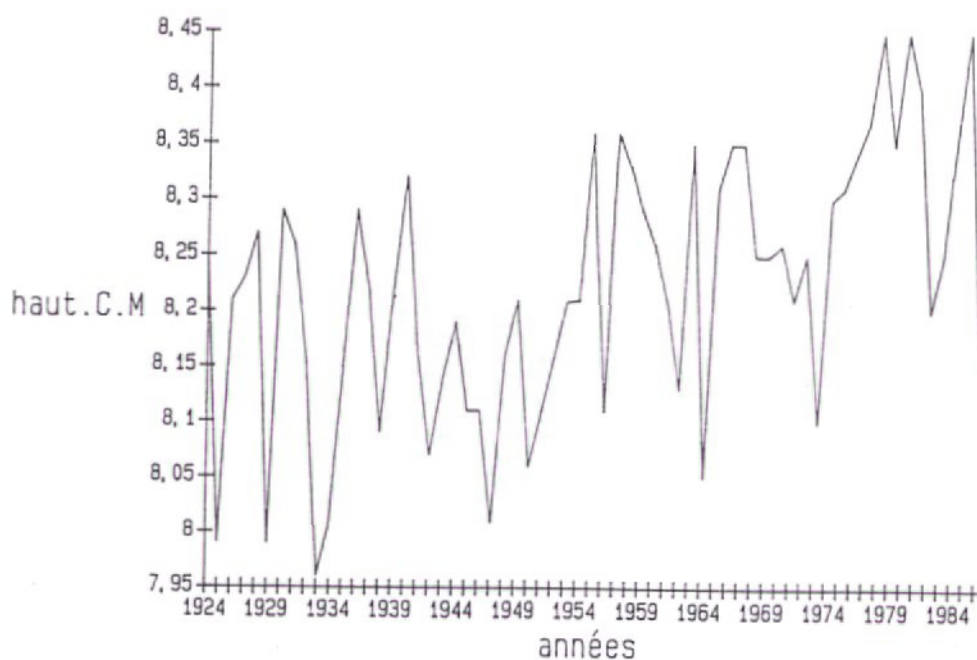


Fig.9: Evolution du niveau des hauteurs de pleine mer annuelle entre 1924 et 1984 à Barquette

HAUTEUR PM HAUT-DICK

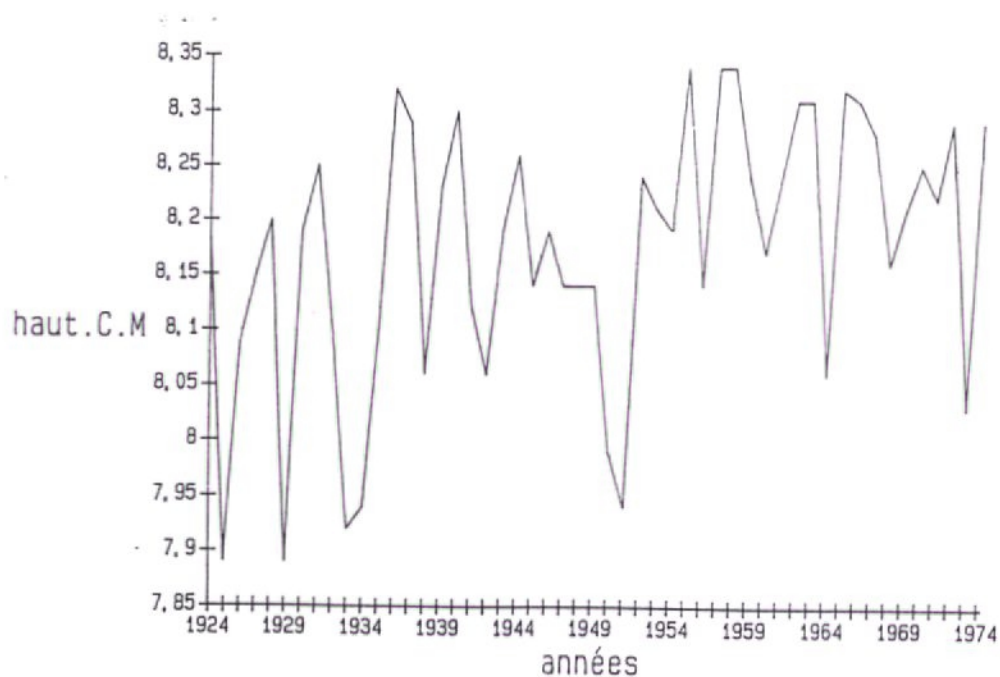


Fig.10: Evolution du niveau des hauteurs de pleine mer annuelle entre 1924 et 1974 au Haut-Dick

Fig.11: Site de Saint-Malo.

Ajustement à la loi normale

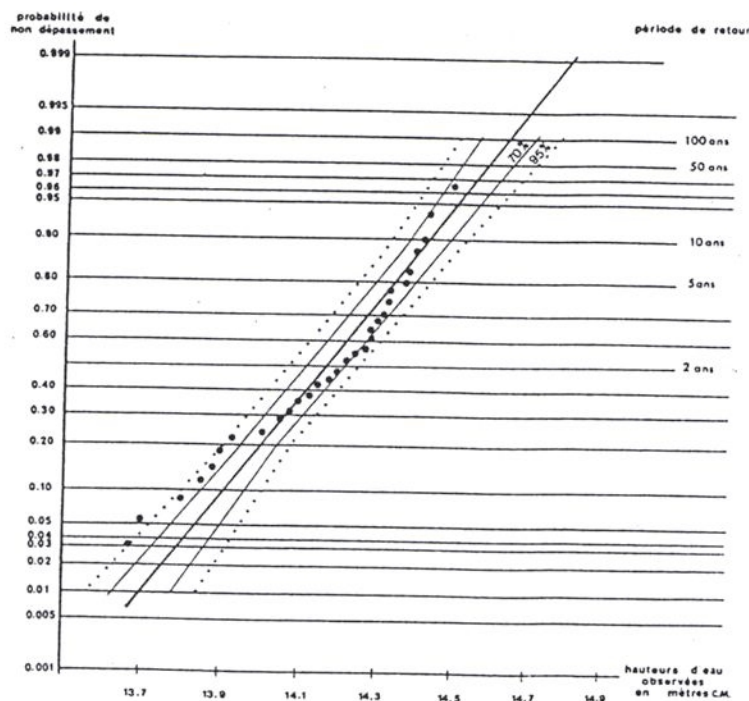
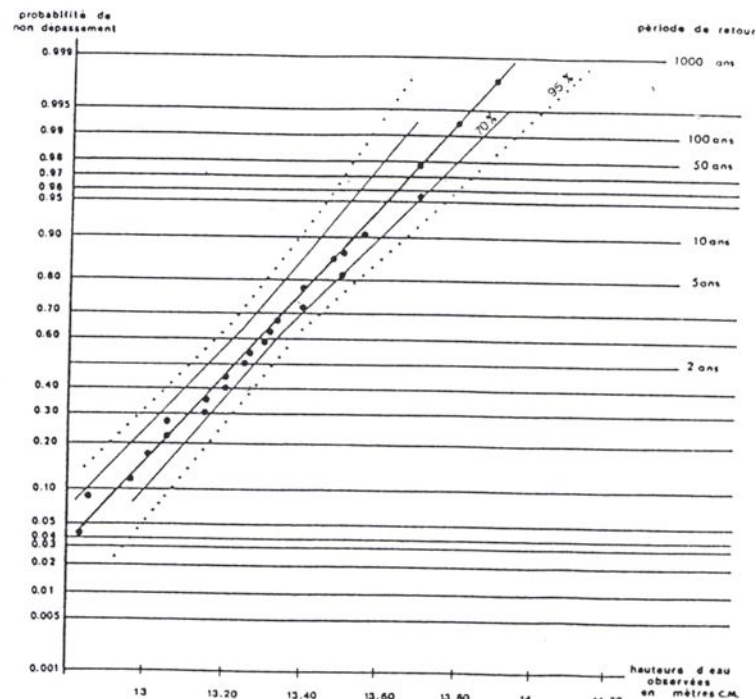


Fig.12: Site de Granville.

Ajustement à la loi normale

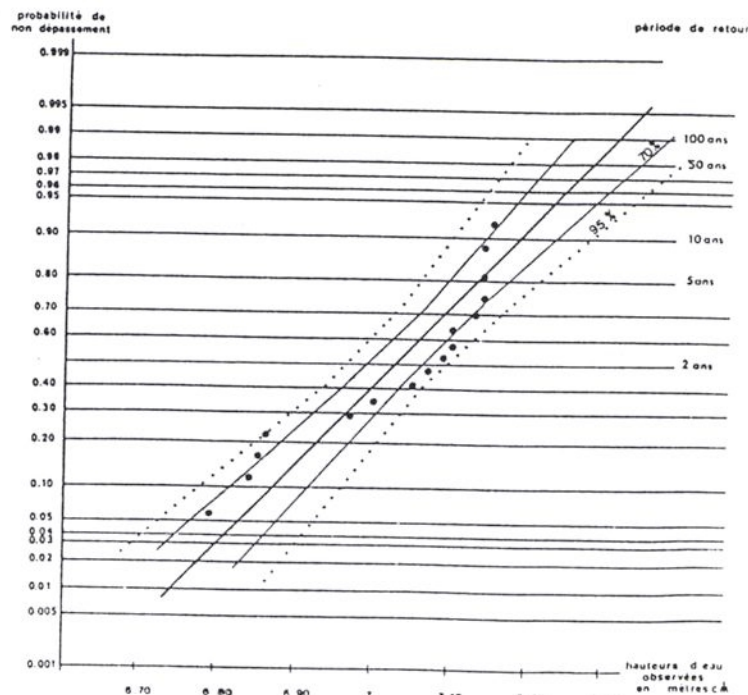


Fig.13: Site de Cherbourg.

Ajustement à la loi normale

Par ailleurs, il apparaît très nettement, que sur presque toutes les séries chronologiques étudiées, les niveaux de pleine mer annuelle les plus hauts sont les plus récents et inversement. Cette tendance générale à une élévation du niveau des plus hautes mers annuelles est à mettre en relation avec l'élévation générale du niveau moyen marégraphique. Elle est à prendre en compte dans l'appréciation future des risques d'érosion et de submersion, car elle montre que le phénomène de marée n'est pas stationnaire dans le temps.

4.2) Les hauteurs extrêmes sur les principaux sites marégraphiques.

Pour le site de Saint-Malo, l'ajustement de la série de données marégraphiques à la loi Normale est satisfaisant. L'ensemble des valeurs observées se situe entièrement dans un intervalle de confiance de 70 % (fig.11). La plus forte pleine mer observée, sur la période 1968-1988, est de 13.70 m C.M. (coefficient 116). Elle a une période de retour de 22 ans. La surcote du moment était de 0.40 m.

Pour le site de Granville, l'ajustement de la série de données marégraphiques à la loi Normale est moyennement satisfaisant (fig.12). En effet, un lissage suivant une distribution de Gauss a dû être effectué pour répartir statistiquement les nombreuses valeurs identiques, issues de l'imprécision des relevés. Malgré cela, la série reste encore déformée. Néanmoins, le test de suites permet de considérer la loi comme acceptable. La plus forte hauteur de pleine mer a été enregistrée sur le site de Granville en février 1979. Avec une cote marine de 14,5 m, la période de retour de cet événement est de 31 ans.

Pour le site de Cherbourg, les données transmises par le S.H.O.M. ne permettent pas d'apprécier la validité de l'ajustement proposé. La hauteur maximale annuelle sur ce site a été obtenue le 25 septembre 1976, avec une cote de 7,15 m C.M.. La période de retour de cet événement est, d'après la méthode du S.H.O.M, inférieure à 2 ans. Ce résultat est incohérent avec les données brutes de la série chronologique, qui porte sur une durée continue de 16 ans.

La distribution des probabilités d'apparition d'une hauteur donnée a donc été adaptée à la loi Normale, comme pour les autres sites d'études. Même si l'ajustement n'est pas rigoureusement parfait, la validité de cette loi est confirmée dans un intervalle de confiance à 95 % (fig.13).

Dans la baie des Veys, pour l'ensemble des trois sites étudiés (fig.14), la loi Normale donne de bons résultats. L'ensemble des tests de validation effectués sur ces séries, tests des suites et de Kolmogorov-Smirnov, ont confirmé que la loi représentative de la distribution des hauteurs de pleines mers observées annuelles est une loi Normale. Le calcul des intervalles de confiance permet de quantifier leur incertitude (fig.15, 16 et 17).

La figure 18 synthétisent les résultats des hauteurs observées prévisibles pour des événements de période de retour de 2, 5, 10, 50 et 100 ans. Chaque donnée en cote marine a été transformée en cote I.G.N. 69 afin de mieux évaluer, ultérieurement, le zonage des risques de submersions du domaine supratidal.

Globalement, pour une même période de retour, la hauteur d'une pleine mer augmente de Saint-Malo vers Granville, puis décroît le long de la côte Ouest du Cotentin, pour augmenter à nouveau du Nord vers le Sud de la côte est du Cotentin.

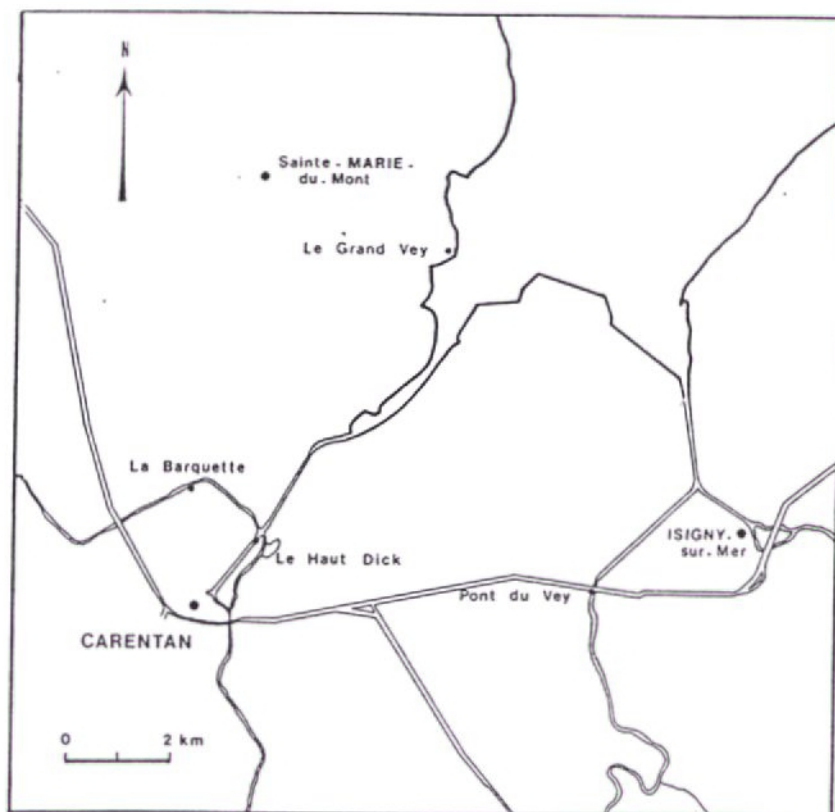


Fig.14: Localisation des sites de mesures marégraphiques dans la Baie des Veys

Fig.15: Site de la Barquette
Ajustement à la loi Normale

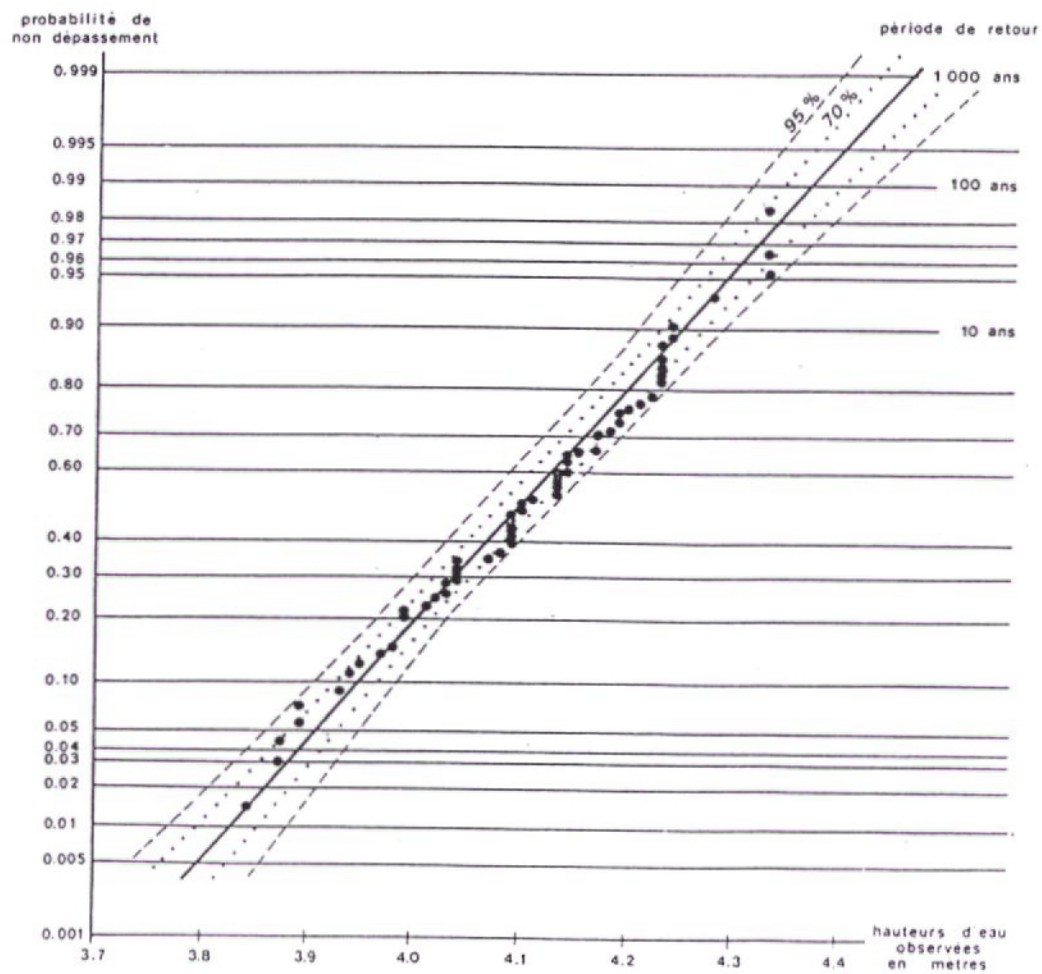


Fig.16: Site du Haut Dick
Ajustement à la loi Normale

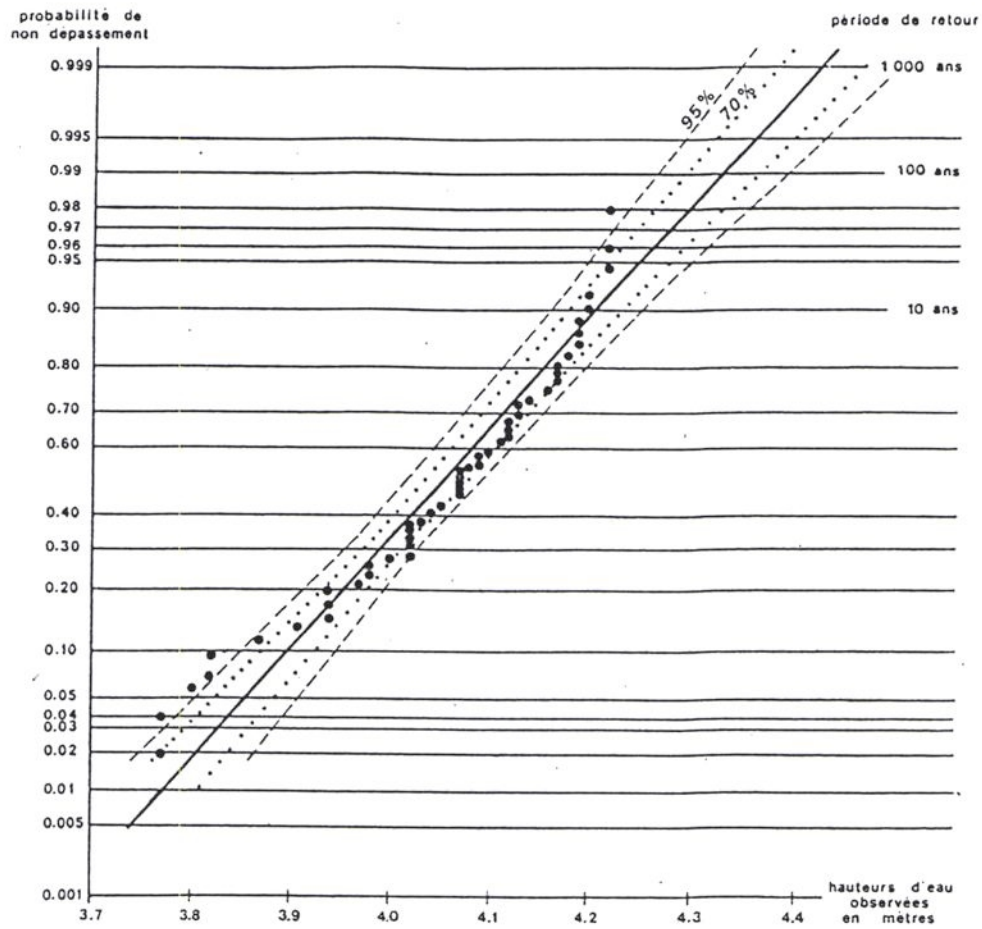
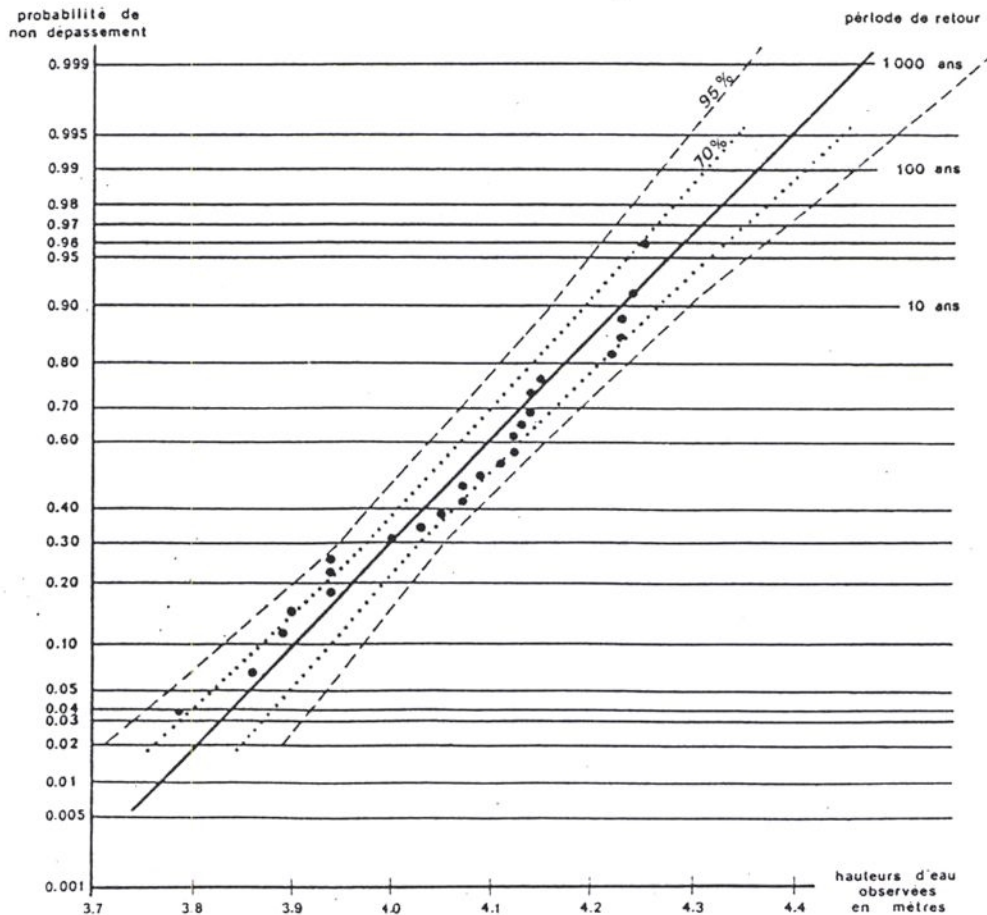


Fig.17: Site du Pont du Veys
Ajustement à la loi Normale



La différence de hauteur d'eau entre le niveau de période de retour 2 ans et 100 ans est assez faible: 54 cm à Saint-Malo, 48 cm à Granville, 39 cm à Cherbourg et 28 cm dans la baie des Veys.

Pour un événement d'une période de retour de 2 ans, l'intervalle de confiance varie autour de la valeur ponctuelle de plus ou moins quelques centimètres pour la baie des Veys à plus ou moins 10 centimètres pour le site de Saint-Malo. Mais, pour un événement d'une période de retour centennale, il varie de plus ou moins 7 centimètres dans la baie des Veys à plus ou moins 20 centimètres à Saint-Malo.

4.3) Les hauteurs extrêmes sur les sites marégraphiques secondaires

En parallèle des résultats obtenus pour les principaux sites côtiers, où des données marégraphiques sont disponibles sur de longues périodes, des hauteurs extrêmes de pleine mer ont pu être calculées sur 4 autres sites de la côte du département de la Manche: au Grand Vey, à l'entrée de la baie de la baie des Veys, à Portbail, à Regnéville et à proximité du Mont-Saint-Michel.

Le calcul des hauteurs extrêmes pour ces lieux a été réalisé grâce à une étude de corrélation des hauteurs de pleine mer observées avec les sites de référence, préalablement étudiés.

Les courbes de régression obtenues sont linéaires. Les coefficients de corrélation entre les distributions sont toujours supérieurs ou égaux à 0,95.

Les équations permettant de calculer la hauteur de pleine mer observée prévues (H.O.P) sont les suivantes:

- pour le barrage de la Caserne (Mont-Saint-Michel):

$$H.O.P = 1,0577 * H.O.Granville - 0,008$$

(en mètres IGN 69)

- pour l'embouchure du havre de la Sienne:

$$H.O.P = 1,0732 * H.O. Granville - 1,38$$

(en cotes marines)

- pour Portbail:

$$H.O.P = 0,939 * H.O. Granville - 0,97$$

(en cotes marines)

- pour le Grand Vey:

$$H.O.P = 0,939 * H.O. Haut Dick - 0,007$$

(en mètres IGN 69)

Suivant les sites, les valeurs à introduire dans les différentes relations proposées sont, soit en cotes marines, soit en cotes IGN 69. En effet, notamment pour le calcul des hauteurs extrêmes dans la baie du Mont-Saint-Michel, les relevés marégraphiques effectués au barrage de la Caserne ont été, initialement, rattachés par nivellement au réseau IGN. La transformation de ces mesures en cotes marines est incertaine du fait de la méconnaissance de la relation entre le zéro des sondes et le zéro IGN 69. Comme pour dans la baie des Veys, le rattachement des hauteurs d'eau directement au réseau de nivellement terrestre limite les imprécisions altimétriques liées à un changement de référence.

La figure 19 synthétise les cotes extrêmes d'une période de retour donnée obtenues en mètres C.M. (données parfois incertaines) et en mètres I.G.N. 69.

Les valeurs calculées complètent les premiers résultats issus des principaux sites marégraphiques de la côte du département de la Manche. Conformément au marnage, les niveaux extrêmes de marée diminuent régulièrement du Sud au Nord de la côte ouest du cotentin. Ils sont minimum sur la façade nord du département et augmentent à nouveau du Nord vers le Sud, le long de la côte est.

La figure 20 résume les hauteurs de pleine mer de période de retour de 2, 5, 10, 50 et 100 ans en cote I.G.N. 69 sur l'ensemble du littoral du département de la Manche.

5) EVOLUTION PASSEE ET FUTURE DES NIVEAUX MAREGRAPHIQUES LE LONG DES COTES DU DEPARTEMENT DE LA MANCHE.

Les niveaux marégraphiques de pleine mer annuelle sur les côtes du département de la Manche n'apparaissent pas stables dans le temps. Les plus fortes hauteurs de marée observées sont souvent récentes, alors que les plus faibles datent du début des séquences d'acquisition. La non-stationnarité des niveaux marégraphiques est donc évidente. Elle rejoint les propos actuels sur l'élévation générale du niveau des mers, qu'il convient d'apprécier pour les prendre en compte dans l'évaluation des risques littoraux du département de la Manche.

5.1) *Tendance évolutive passée et future du niveau moyen*

De récents travaux de l'I.P.C.C (Intergovernmental Panel on Climate Change) créée par les Nations Unies et l'Organisation Météorologique Mondiale, présentent l'état de l'art sur l'élévation du niveau des mers pour les années futures (WOODWORTH, 1990).

D'une manière globale, l'élévation du niveau des mers lors du siècle passé a atteint environ 15 cm. Plus précisément, si l'on tient compte des difficultés de modélisation des mouvements verticaux du sol où se situent les marégraphes, cette élévation varie, selon les sites dans le monde, de 10 à 20 cm. Pour le site de Brest, la tendance linéaire montre depuis 1846 une élévation de plus d'un millimètre par an (fig.21).

Les causes de cette élévation sont doubles:

- l'expansion thermique des océans due à un réchauffement global de l'atmosphère d'environ 0,5 °C,

Fig.18: NIVEAUX MAREGRAPHIQUES EXTREMES SUR LES COTES DU DEPARTEMENT DE LA MANCHE
ET SAINT-MALO - PORT DE REFERENCE

Sites	Période de retour	2 ans		5 ans		10 ans		50 ans		100 ans	
		m C.M.	m IGN	m C.M.	m IGN	m C.M.	m IGN	m C.M.	m IGN	m C.M.	m IGN
SAINT-MALO		13.23	6.94	13.43	7.14	13.53	7.24	13.71	7.42	13.77	7.48
GRANVILLE		14.17	7.45	14.34	7.62	14.44	7.72	14.59	7.87	14.65	7.93
CHERBOURG (1)		7.17	3.84	7.26	3.93	7.33	4.00	7.49	4.16	7.56	4.23
(2)		7.03	3.70	7.13	3.80	7.18	3.85	7.28	3.95	7.31	3.98
BAIE DES VEYS		8.19	4.07	8.29	4.17	8.35	4.23	8.44	4.32	8.47	4.35
(Interne)											

(1) d'après la méthode du S.H.O.M.

(2) " " F. LEVOY

Fig.19: NIVEAUX MAREGRAPHIQUES EXTREMES SUR LES COTES DU DEPARTEMENT DE LA MANCHE

Sites	Période de retour	2 ans		5 ans		10 ans		50 ans		100 ans	
		m C.M.	m IGN	m C.M.	m IGN	m C.M.	m IGN	m C.M.	m IGN	m C.M.	m IGN
MONT-SAINT-MICHEL		(14.89)	7.87	(15.07)	8.05	(15.18)	8.16	(15.34)	8.32	(15.40)	8.38
BAIE DE SIENNE		13.83	7.44	14	7.61	14.12	7.73	14.27	7.88	14.34	7.95
PORTBAIL		12.22	6.80	12.49	6.96	12.59	7.06	12.73	7.20	12.79	7.26
GRAND VEYS		7.89	3.81	7.99	3.91	8.04	3.96	8.13	4.05	8.16	4.08

(... Valeurs incertaines)

RELATION COTES IGN 69 et COTES MARINES

SAINT-MALO : 0 IGN 69 = + 6.29 m C.M.
 MONT SAINT-MICHEL " = + 7.02 m C.M.
 GRANVILLE : " = + 6.72 m C.M.
 REGNEVILLE : " = + 6.39 m C.M.

PORTBAIL : 0 IGN 69 = + 5.53 m C.M.
 CHERBOURG " = + 3,33 m C.M.
 BAIE DES VEYS
 (GRANDCAMP) : " = + 4.08 m C.M.
 (CARENTAN) : " = + 4.12 m C.M.

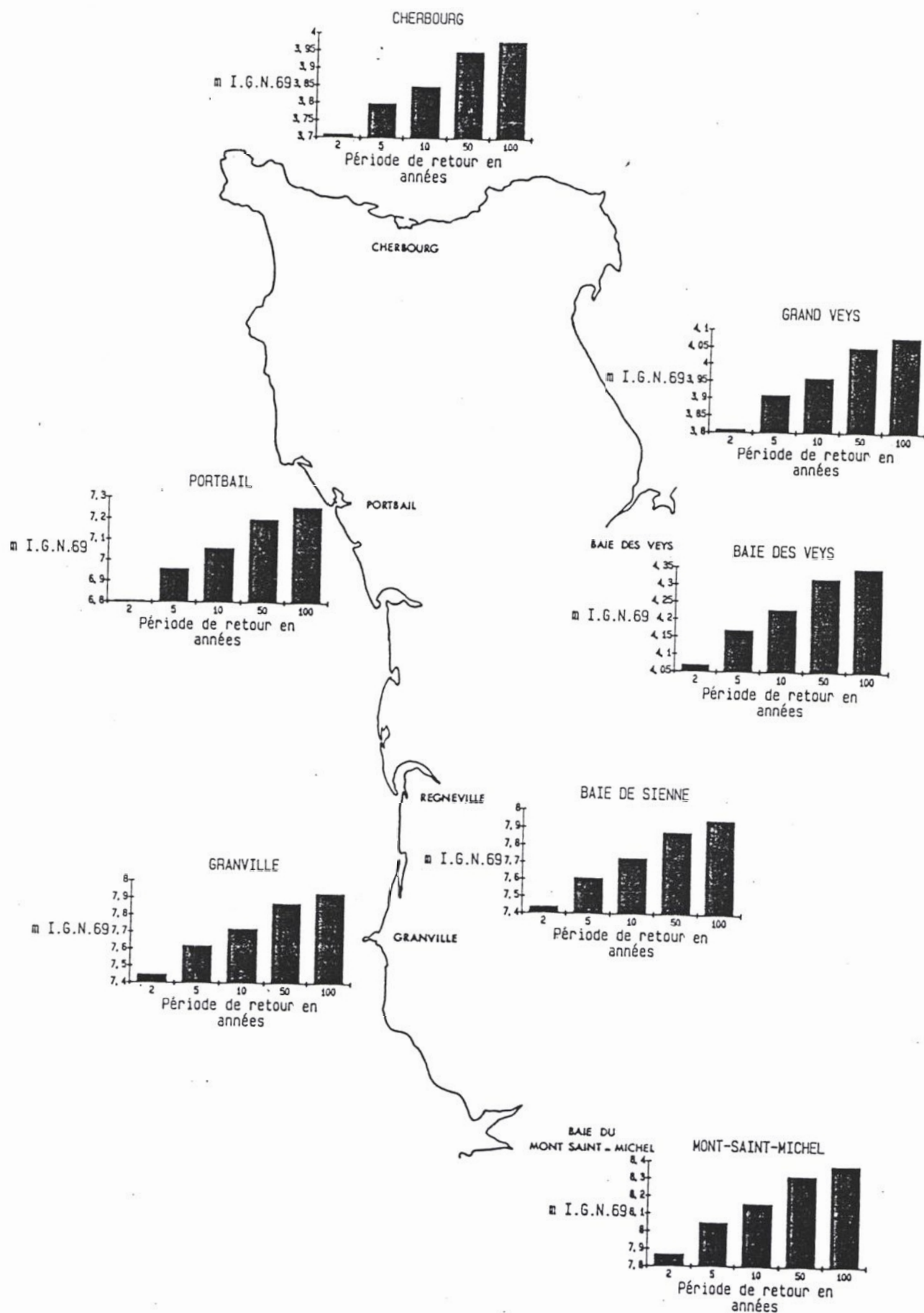
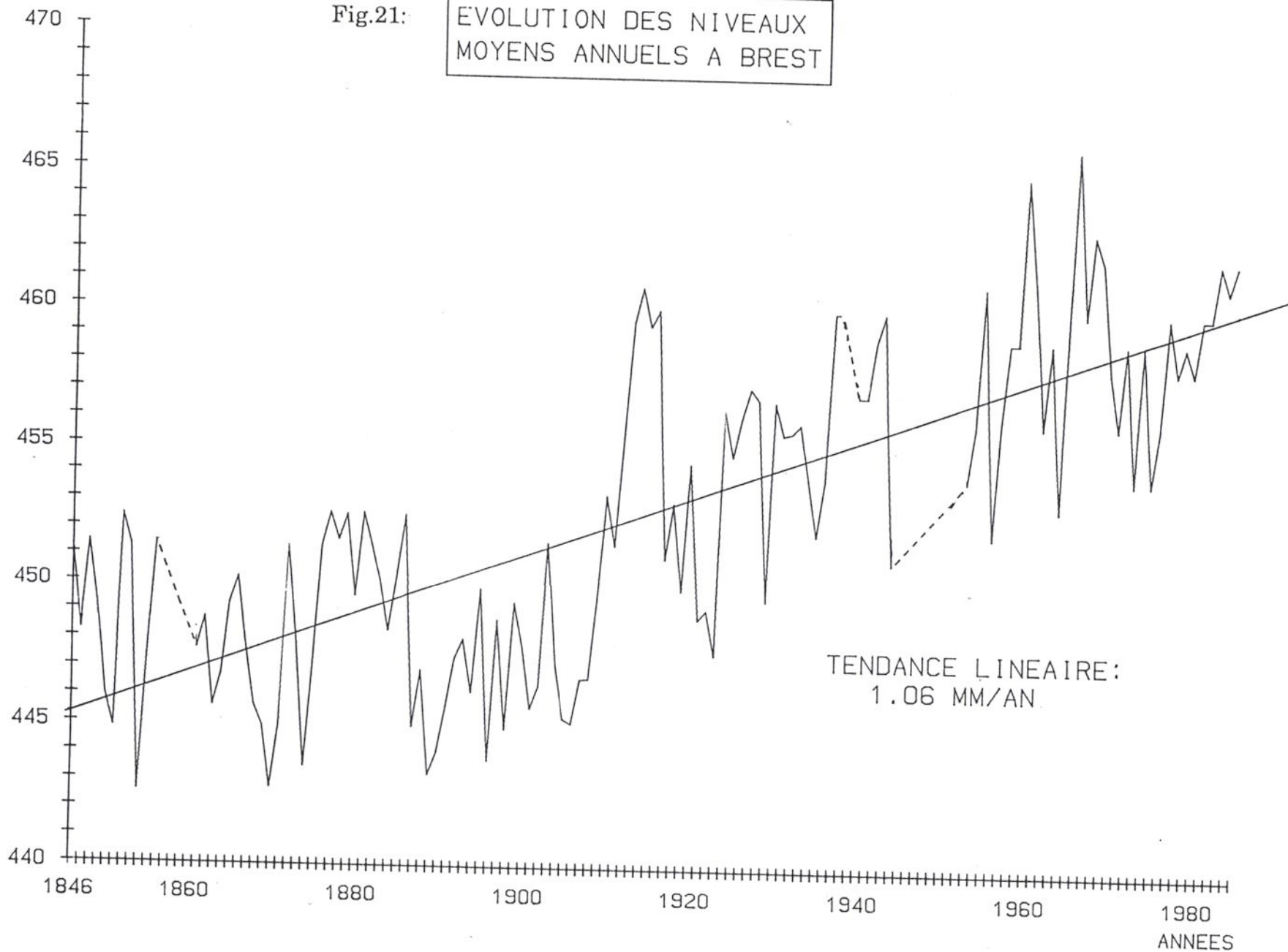


Fig.20: Niveaux de pleine mer extrême le long des côtes du département de la Manche

NIV.MOY. (cm)

Fig.21:

ÉVOLUTION DES NIVEAUX
MOYENS ANNUELS A BREST



- la fonte des glaciers des basses latitudes et des marges de la banquise du Groenland.

Actuellement, aucune preuve n'existe pour affirmer que les glaces de l'Antarctique ont participé à cette élévation.

L'élévation du niveau des mers n'est pas actuellement plus rapide que celle observée dans le passé. Aucune accélération importante n'a véritablement été décelée en Europe durant les 100 dernières années, même si cette élévation s'effectue plus rapidement durant ce siècle que durant les deux précédents. A Brest, sur la totalité des enregistrements marégraphiques, une extrêmement faible accélération de 0,4 mm/an par siècle a été calculée.

Pour le siècle prochain, les prédictions d'élévation globale du niveau des mers les plus récemment calculées sont les suivantes:

- + 18 cm pour 2030,
- + 44 cm pour 2070,
- + 66 cm pour 2100.

Un intervalle de confiance sur chaque valeur a également été défini pour tenir compte des incertitudes qui pèsent sur certains paramètres pris en compte dans les modèles d'estimation (fig.22). L'accélération future de l'élévation du niveau des mers serait équivalente à 3 à 6 fois le taux actuel. Cependant, l'élévation ne sera pas identique partout, étant donné les modifications prévues de la circulation océanique générale.

Il convient, par conséquent, de suivre les niveaux marégraphiques régionalement afin d'apprécier localement l'évolution des risques d'érosion et de submersion liée à ce phénomène.

5.2) Evolution passée des niveaux maxima annuels de pleine mer.

L'analyse des différentes séries marégraphiques disponibles pour les côtes du département de la Manche montre une nette tendance à l'augmentation des niveaux de pleine mer annuelle.

Un ajustement linéaire par la méthode des moindres carrés permet d'avoir une estimation moyenne de cette élévation progressive.

A Saint-Malo, entre 1968 et 1988, l'élévation moyenne du niveau maximal annuel est de 1,45 cm par an, ce qui semble considérable (fig.23). A Granville, la tendance est moins forte: elle est de 0,5 cm par an (fig.24). Pour le site de Cherbourg, avec une série de données plus courte, la tendance est identique à celle observée à Granville (fig.25). Dans la Baie des Veys, l'élévation moyenne des cotes de pleine mer annuelle atteint 3,4 mm par an à la Barquette (fig.26) et au Haut Dick (fig.27) et seulement 1,5 mm au Pont du Veys (fig.28).

Les tendances observées sont donc très variables dans l'espace, variant d'un rapport de 1 à 10 entre Saint-Malo et la partie orientale et interne de la Baie des Veys.

Ces résultats montrent que les risques d'érosion et de submersion peuvent augmenter dans le temps à des vitesses différentes selon les lieux. Ceci est lié aux caractéristiques locales des différentes causes qui génèrent ces phénomènes sur chacun des sites pris en considération (élévation du niveau moyen, subsidence locale, aménagements hydrauliques...).

Un exemple, en Angleterre, à Newlyn, a montré une augmentation des niveaux de marée les plus hauts de 20 cm sur les 100 dernières années, alors que les niveaux les plus bas ont augmenté de 16 cm seulement. Globalement l'amplitude de la marée peut augmenter, elle est due à un changement de forme et de taille du bassin où se propage l'onde de marée. Les travaux d'aménagement portuaire peuvent donc prendre une importance considérable dans cette évolution.

A Saint-Malo, la proximité du Barrage de la Rance explique pour partie la modification locale du régime de marée. Dans la baie des Veys et certains havres de la côte du Cotentin, les travaux de poldérisation ont très probablement engendré une modification locale du régime des marées, et donc des hauteurs d'eau extrêmes. Les relevés marégraphiques s'effectuant fréquemment dans ces zones abritées sont donc sujets à ces évolutions.

5.3) Prise en compte de l'élévation des niveaux marégraphiques extrêmes dans l'évaluation des risques littoraux

a) Rappel des incertitudes et des limites sur le calcul des niveaux extrêmes de marée.

La méthode de calcul utilisée prend en compte une série historique de hauteurs de pleine mer annuelles observées. Chaque hauteur intègre par conséquent, une hauteur théorique, prévue par le S.H.O.M., une surcote ou une décote liée au champ de pression atmosphérique, à l'action du vent sur le plan d'eau (wind set-up) et à l'état de la mer (wave set-up).

Cette somme d'événements définit un niveau du plan d'eau statique de pleine mer observé. Cette cote extrême de période de retour donnée est, ensuite, transformée en altitude I.G.N. 69. Les données alors calculées peuvent être superposées à la topographie de la bande côtière potentiellement soumise à risques afin de définir un zonage théorique de submersions, dont l'occurrence sera égale à celle de la cote marine du plan d'eau pris en compte.

Une première incertitude réside dans la méconnaissance actuelle de la relation entre la valeur du zéro I.G.N. 69 et sa cote marine équivalente, qui est différente en fonction des lieux. L'ordre de grandeur de ces incertitudes peut être décimétrique. Par exemple, les relations prises en compte pour connaître les zones submersibles de la côte du département de la Manche sont imprécises:

- pour le site du Mont-Saint-Michel: le zéro IGN 69 = + 7,02 m C.M. selon les données de l'Equipement de Granville et + 6,74 m C.M. pour le S.H.O.M.

- pour le site de Granville: le zéro IGN 69 = + 6,72 m C.M. pour les services de l'Equipement et + 6,61 m C.M. pour le S.H.O.M.

- pour le site de Portbail: le zéro IGN 69 = + 5,53 m C.M. pour les services de l'Equipement et + 5,78 m pour le S.H.O.M.

Des mesures de marées sont dorénavant prévues dans le programme de mesures in situ de l'étude en cours, pour affiner la position du zéro des cartes marines, notamment dans la région de Carteret sur la côte ouest du Cotentin.

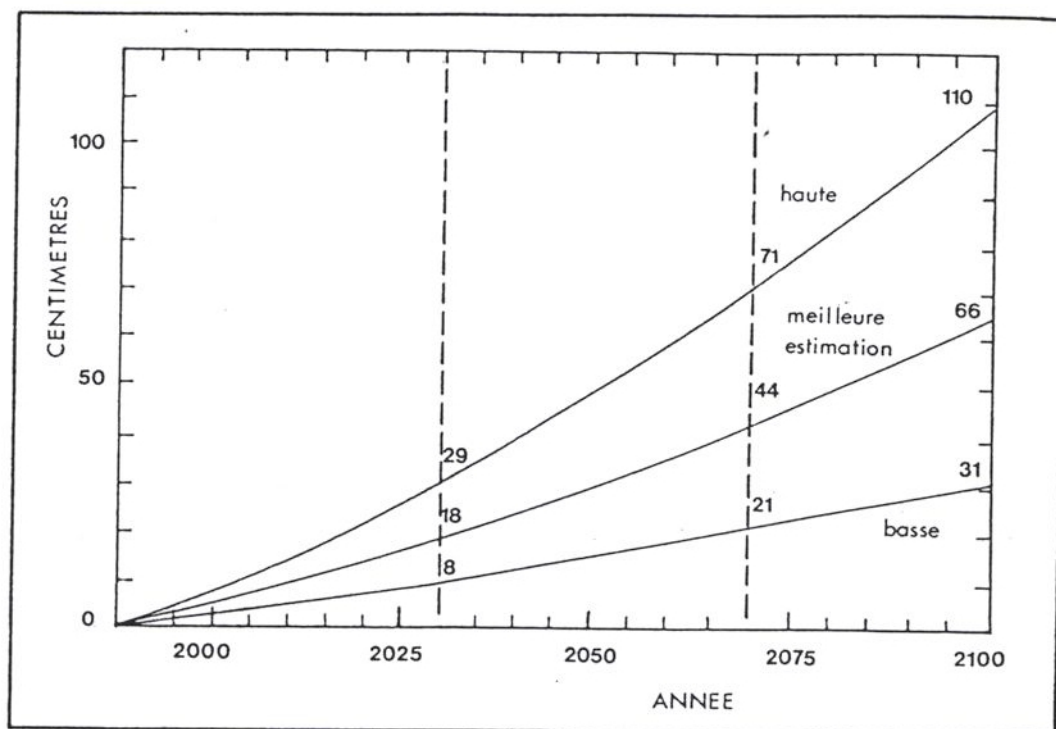


Fig.22: Estimation de l'I.P.C.C sur l'élévation future du niveau global des mers

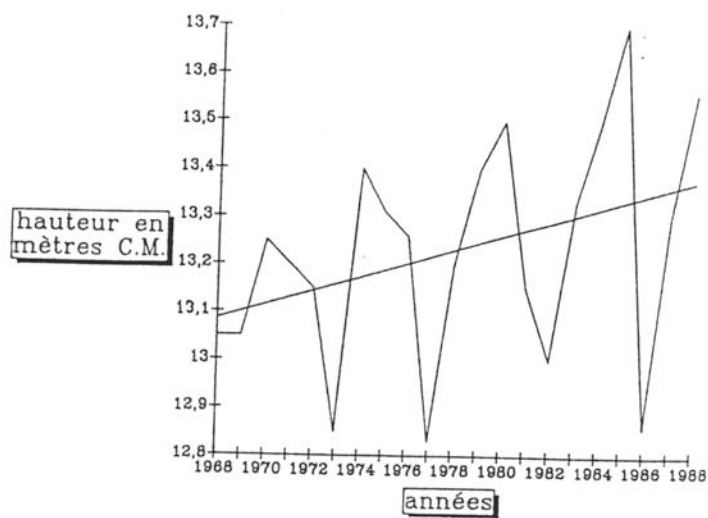


Fig.23: Evolution récente du niveau des pleines mers annuelles à Saint-Malo

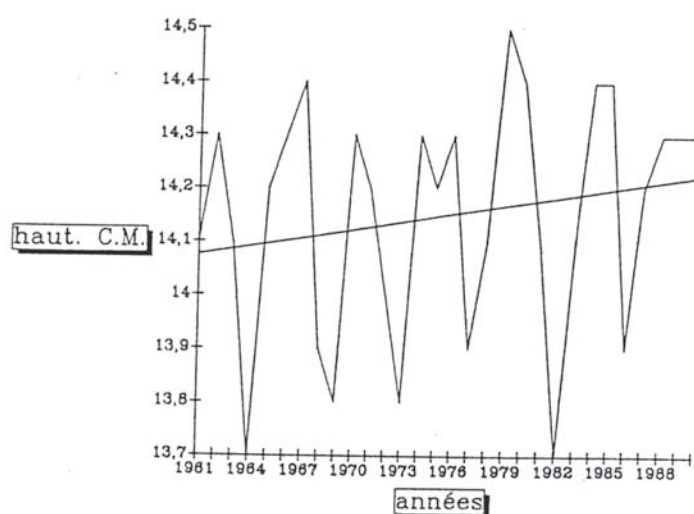


Fig.24: Evolution récente du niveau des pleines mers annuelles à Granville

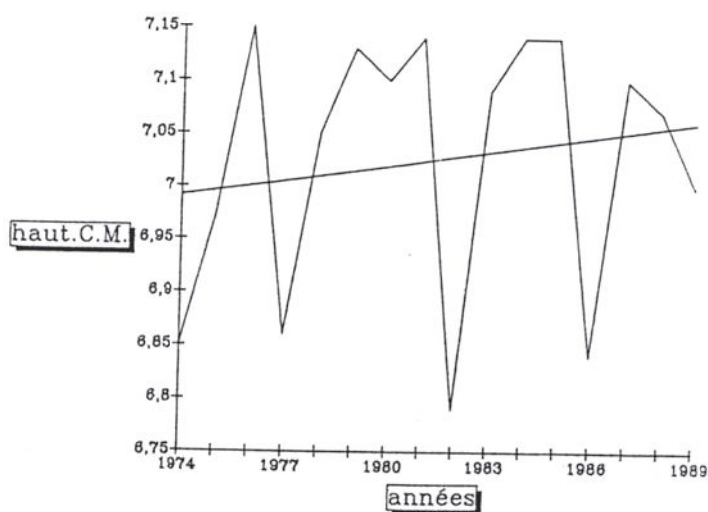
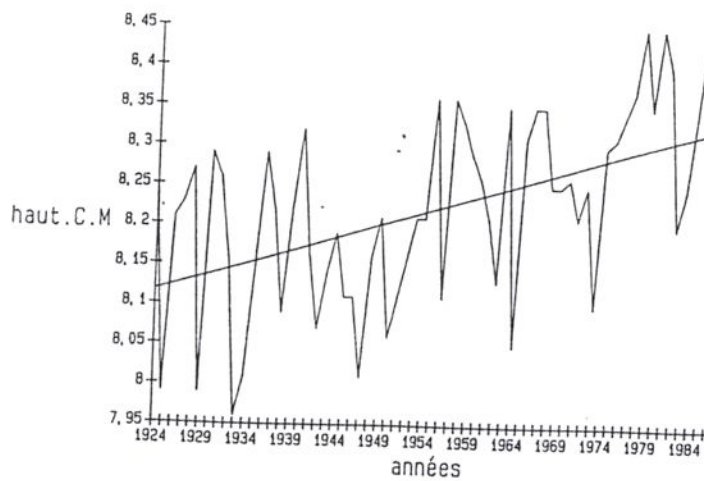
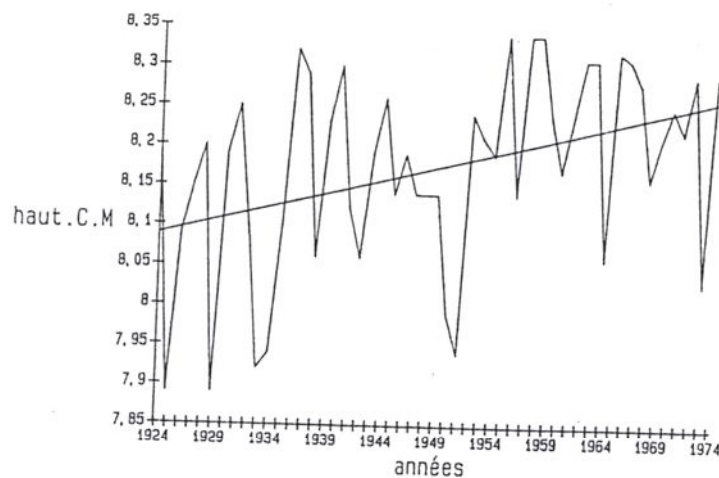


Fig.25: Evolution récente du niveau des pleines mers annuelles à Cherbourg



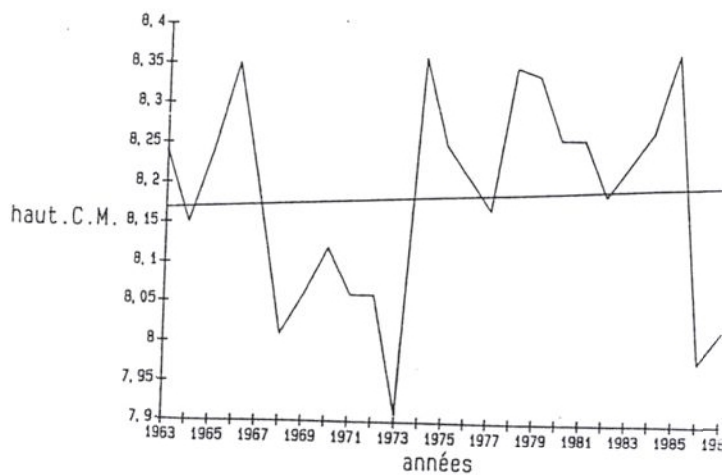
tendance linéaire: 0,34 cm/a

Fig.26: Evolution récente du niveau des pleines mers annuelles à la Barquette



tendance linéaire: 0,34 cm/ar

Fig.27: Evolution récente du niveau des pleines mers annuelles au Haut-Dick



tendance linéaire: 0,15 cm/an

Fig.28: Evolution récente du niveau des pleines mers annuelles au Pont du Veys

Fig.29: EVALUATION DES HAUTEURS DE PLEINE MER

CENTENNALES ENTRE 1990 ET 2100

(mètres IGN 69)

S I T E S	Scénario A		Scénario B *	
	(niveau marin global actuel)		(niveau marin global en 2100)	
	hauteur centennale moyenne	hauteur centennale haute	hauteur centennale moyenne	hauteur centennale haute
MONT ST-MICHEL	8.38	8.54	9.04	9.64
GRANVILLE	7.93	8.08	8.59	9.18
BAIE DE SIENNE	7.95	8.09	8.61	9.19
PORTBAIL	7.26	7.38	7.92	8.48
CHERBOURG	3.98	4.10	4.64	5.20
GRAND VEYS	4.08	4.12	4.74	5.22
BAIE DES VEYS (Interne)	4.35	4.43	5.01	5.53

* Valeur de l'élévation du niveau global des mers :

+ 0,66 m : estimation moyenne

+ 1.10 m : estimation haute

Le phénomène de "run-up" correspondant à la dénivelée entre le plan d'eau statique de pleine mer et la hauteur totale d'affleurement des vagues après déferlement n'est pas pris en compte dans le calcul des hauteurs de submersion des terres basses côtières.

Ce phénomène peut être à l'origine de débordements, que ce soit des ouvrages de protection de la côte ou d'un seuil topographique après destruction totale d'un cordon dunaire. La valeur de ce phénomène est directement liée aux caractéristiques de la houle incidente et à la pente de la plage, voire à la rugosité des ouvrages de protection quand ils existent. Actuellement, les données sur la houle, sur la côte du département de la Manche, ne permettent pas d'appréhender avec justesse ce phénomène. Les campagnes de mesures in situ le préciseront.

Le risque de submersion apparaît comme légèrement surestimé car un simple débordement de digues ou de dunes est peu probable, même lorsque le plan d'eau statique de pleine mer est très élevé. Le rôle des vagues est en effet fondamentale car elles génèrent le phénomène de run-up et surtout sont responsables du creusement de brèches qui permettront l'envahissement des terres basses situées en arrière du trait de côte.

Les études réalisées à Montmartin-sur-mer (LEVOY, 1985) ont montré les limites de validité de la méthode proposée. Le niveau marégraphique de pleine mer décennal a été atteint lors de deux marées consécutives en avril 1985. Des submersions ont été observées sur les terres basses de la commune de Montmartin, mais celles-ci ont été très limitées dans l'espace par rapport à la superficie totale des terrains en-dessous de la cote marégraphique observée. L'agitation du plan d'eau lors de ces marées était faible.

Deux conclusions peuvent être déduites de cet exemple:

- entre le zonage théorique des submersions et les faits réels, les surfaces inondées peuvent être très différentes. Le rôle de la micro-topographie de la zone submersible est donc fondamental.

- le zonage théorique des risques tend vers une réalité potentiellement observable quand l'agitation de la mer devient importante. En effet, dans ce cas la houle attaque et détruit le front de dune, crée des brèches permettant le débordement des eaux marines dans les terres basses.

Par ailleurs, le calcul des ajustements permettant l'extrapolation des niveaux extrêmes est soumis à des incertitudes que la définition des intervalles de confiance pondère. Néanmoins, entre la cote bi-annuelle et la cote centennale, la différence de hauteur d'eau varie au plus d'environ 50 cm dans la baie du Mont-Saint-Michel à moins de 30 cm à Cherbourg. L'ordre de grandeur des intervalles de confiance apparaît très élevé par rapport à ces résultats.

Les niveaux extrêmes de pleine mer sont donc relatifs à la prise en compte de certains phénomènes qui contribuent à la formation des ondes de tempêtes. La non-considération du phénomène de run-up surestime le risque calculé dans un premier temps. Cependant, cette appréciation permet, si des conditions d'agitation du plan d'eau existent, de rentrer dans des situations de risques de submersion tout à fait réalistes, car la dune ou la digue qui assurera encore la protection des terres basses pourra alors être détruite.

b) Prise en compte de l'élévation globale du niveau des mers.

Les conséquences d'une élévation du niveau global des mers, telle qu'elle est à l'heure actuelle prévue, sont encore incertaines et imprécises.

D'après les travaux du National Research Council aux U.S.A.(1987), l'élévation du niveau des mers devrait engendrer une élévation des ondes de tempêtes, notamment sur les côtes bordées de fonds peu importants comme cela est le cas de la côte ouest du Cotentin. De la même manière, comme nous l'avons déjà évoqué, le marnage pourra légèrement augmenter du fait des modifications de la géométrie des côtes. Les vagues devront également subir des modifications, devenant plus puissantes car la profondeur d'eau sera plus importante. Si des essais de quantifications existent déjà sur ces problèmes, ceux-ci restent très imprécis et théoriques, difficilement intégrables spatialement sur l'ensemble de la côte du département de la Manche.

Par souci de simplification, et afin de traiter régionalement le problème, seules les prédictions de l'IPCC seront prises en compte pour simuler un nouveau scénario permettant de localiser les terres potentiellement submersibles à l'échéance de la fin du XXI^{ème} siècle.

En 2100, l'élévation prévisible du niveau global des mers devrait être comprise entre 31 et 110 cm. La prise en compte de la valeur supérieure de cette fourchette, s'ajoutant aux cotes extrêmes du plan d'eau statique calculées pour un événement qui se déroulerait actuellement, apparaît souhaitable, même si le risque est une nouvelle fois surestimé. En effet, cette élévation aurait pour avantage de prendre en considération l'ensemble des modifications hydrodynamiques induites que l'on maîtrise mal actuellement et qui pourraient cependant engendrer une augmentation non négligeable des risques de submersions.

La traduction cartographique du zonage des submersions devra tenir compte de ces différents scénarios (incertitudes sur les niveaux extrêmes et sur l'élévation future du niveau des mers), afin de ne pas sous-estimer l'ampleur des risques dans des secteurs côtiers où les aménagements sont, en général, réalisés pour des périodes supérieures au siècle.

La figure 29 résume l'ensemble des scénarios qui permettront d'aboutir à une zonation des risques de submersion. La cote de pleine mer centennale est prise comme référence. Rappelons que cet événement peut cependant se produire dans 2 ans, comme dans 200 ans; seul son intensité détermine les frontières des zones à risques.

Dans le scénario A, seuls les niveaux extrêmes de période de retour centennale, seront représentés cartographiquement. La prise en compte de hauteurs d'eau de période de retour inférieure n'aurait que peu de signification compte tenu de leur faible différence d'amplitude par rapport aux hauteurs centennales calculées. Le choix de ne retenir qu'un événement extrême pour limiter les zones à risques de submersion se trouve, par ailleurs, justifié car la micro-topographie des zones potentiellement submersibles, ne peut être précisément connue qu'à partir de levés topographiques de détail, qui font fréquemment défaut. D'autre part, les différences de hauteurs d'eau entre les événements de période de retour retenue (2, 5, 10, 50 et 100 ans) sont d'un ordre de grandeur équivalent aux dénivelés micro-topographiques que l'on trouve dans les terrains submersibles.

Dans le scénario B, les niveaux extrêmes de pleine mer de période de retour centennale le long des côtes du département de la Manche sont majorés d'une élévation prévisible du niveau global des mers à l'échéance de la fin du XXI^{ème} siècle. Cette majoration est de 66 cm, dans un premier cas, correspondant à la valeur calculée la plus probable pour ce phénomène. Dans un second cas, une surélévation de 110 cm majore les cotes extrêmes actuelles, correspondant à l'estimation haute de l'élévation du niveau des mers pour 2100. La prise en considération de ce scénario extrême ressort d'une démarche préventive vis-à-vis des risques potentielles. Sa probabilité de réalisation est cependant faible.

CONCLUSION

La méthode de calcul pour déterminer les hauteurs de pleine mer de période de retour bi-annuelle à centennale sur la côte du département de la Manche est basée sur l'ajustement de hauteurs annuelles observées à une loi de probabilité Normale.

Les résultats obtenus montrent de faibles différences de hauteurs d'eau entre un niveau de période de retour bi-annuelle et une cote de période de retour centennale. Cette différence est maximale sur la côte sud du département de la Manche, environ 50 cm et minimale sur la côte nord et est, environ 30 cm.

Les cotes extrêmes du niveau de la mer, calculées pour différents sites côtiers, ont été transformées en valeurs altimétriques IGN 69, afin de superposer la hauteur du plan d'eau statique à la topographie de la zone côtière pour délimiter les zones à risques.

De nombreuses incertitudes existent sur la validité du modèle de calcul. La méconnaissance des relations de hauteur entre le zéro des cartes marines et le zéro IGN 69, les incertitudes qui pèsent sur les modèles statistiques, les approximations sur les niveaux extrêmes calculés pour des sites secondaires par extrapolation linéaire sont compensées par une surestimation des risques de submersions.

En effet, le plan d'eau statique, même avec une valeur centennale, ne peut pratiquement pas être responsable de submersions très étendues (à l'exception des polders de la Baie des Veys, LEVOY, 1987). Seule l'action d'une houle, surimposée à un niveau de pleine mer, entraînera au déferlement le phénomène de "run-up", permettant, soit de créer des brèches dans les massifs dunaires, soit de déborder certaines digues et inonder les terres basses situées en arrière.

Le manque de données in situ sur les processus hydrodynamiques côtiers de la côte du Cotentin ne permet pas, actuellement, de quantifier le phénomène de "run-up" et de l'intégrer dans l'estimation des risques.

La validité du risque de submersion et de son zonage, qui sera proposé cartographiquement dans un second temps, est donc maximale quand une houle se superpose au niveau de pleine mer exceptionnelle. Plus la houle sera forte, plus la cote de submersibilité des terrains inondés sera proche du niveau statique de pleine mer observé. En ce sens, sans une prise en compte de l'action de la houle, la superposition d'une cote de pleine mer extrême sur la topographie supratidale surestime la superficie de la zone submersible.

Le marnage sur les côtes de la Manche pondère également les risques de submersion, car il module la durée des submersions côtières. Ce paramètre ne peut être apprécié globalement pour l'ensemble de la côte du département de la Manche. En effet, la durée de submersion est fonction du marnage sur chaque site, de la hauteur d'eau observée, de l'amplitude de la houle, des caractéristiques du déferlement, de la section de la brèche responsable des submersions. Par conséquent, seules des approches au cas par cas permettraient d'apprécier au mieux la zone à risques en fonction des caractéristiques de chaque paramètre évoqué précédemment.

Dans la cartographie des risques de submersion, deux scénarios seront présentés:

- le scénario A, présentera les zones côtières submersibles potentielles pour une cote de pleine mer de période de retour centennale, sans prise en compte de l'élévation future du niveau global des mers. Cette représentation présentera le risque actuel.

- le scénario B présentera, les zones côtières submersibles pour une cote de pleine mer de période de retour centennale, avec une prise en compte de l'élévation global du niveau de la mer à l'échéance de la fin du XXI^{ème} siècle. Ce scénario correspond à une situation extrême, de faible probabilité.

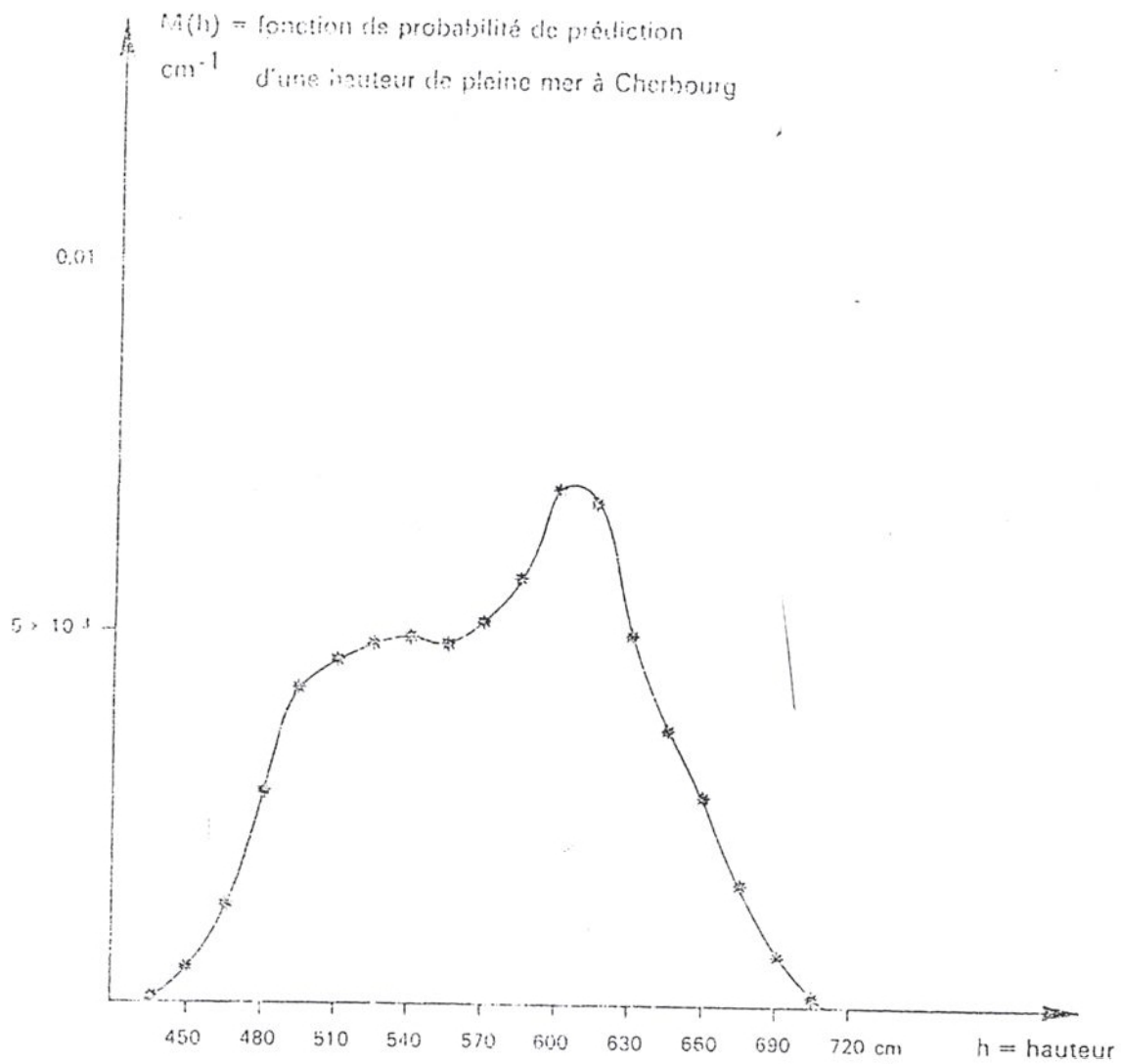
Ces documents cartographiques constitueront les éléments de base pour l'évaluation de la vulnérabilité des côtes du département de la Manche.

Le zonage des risques proposé est donc une évaluation maximaliste. Il constitue un élément d'aide à la décision dans le cadre de l'étude globale de défense contre la mer actuellement en cours.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

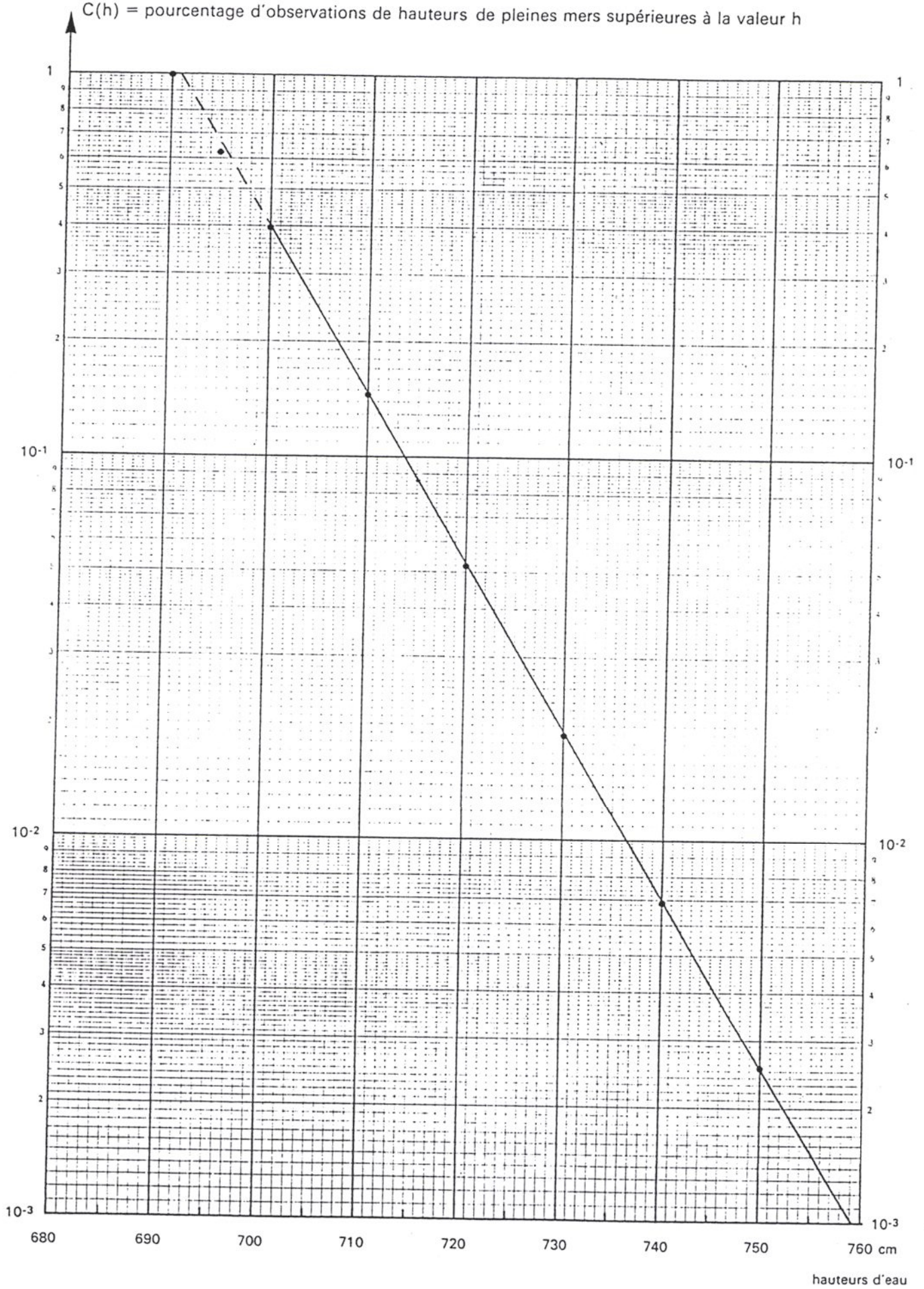
- LEVOY F. (1985) - Les risques naturels en milieux littoraux sableux. Côte ouest du Cotentin. Havre de Regnéville, havre de Portbail. Ed. CREGEPE, 266 p. 51 photos. 61 fig. 5 pl. h.t.
- LEVOY F. (1987) - Etude des risques de submersion des terres dans la baie des Veys; Note technique sur les niveaux de marées extrêmes. Université de Caen - S.P.U., D.D.E. de la Manche, 24 p.
- LE RHUN J. (1982) - Etude physique de la baie du Mont-Saint-Michel, Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Paris-Sud, Orsay.
- WOODWORTH P. (1990) - Measuring and predicting long term sea level changes, NERC news, octobre 1990, p 22-25.
- N.C.R. (1987) - Responding to changes in sea level: Engineering implications. National Academy Press. 148 p.

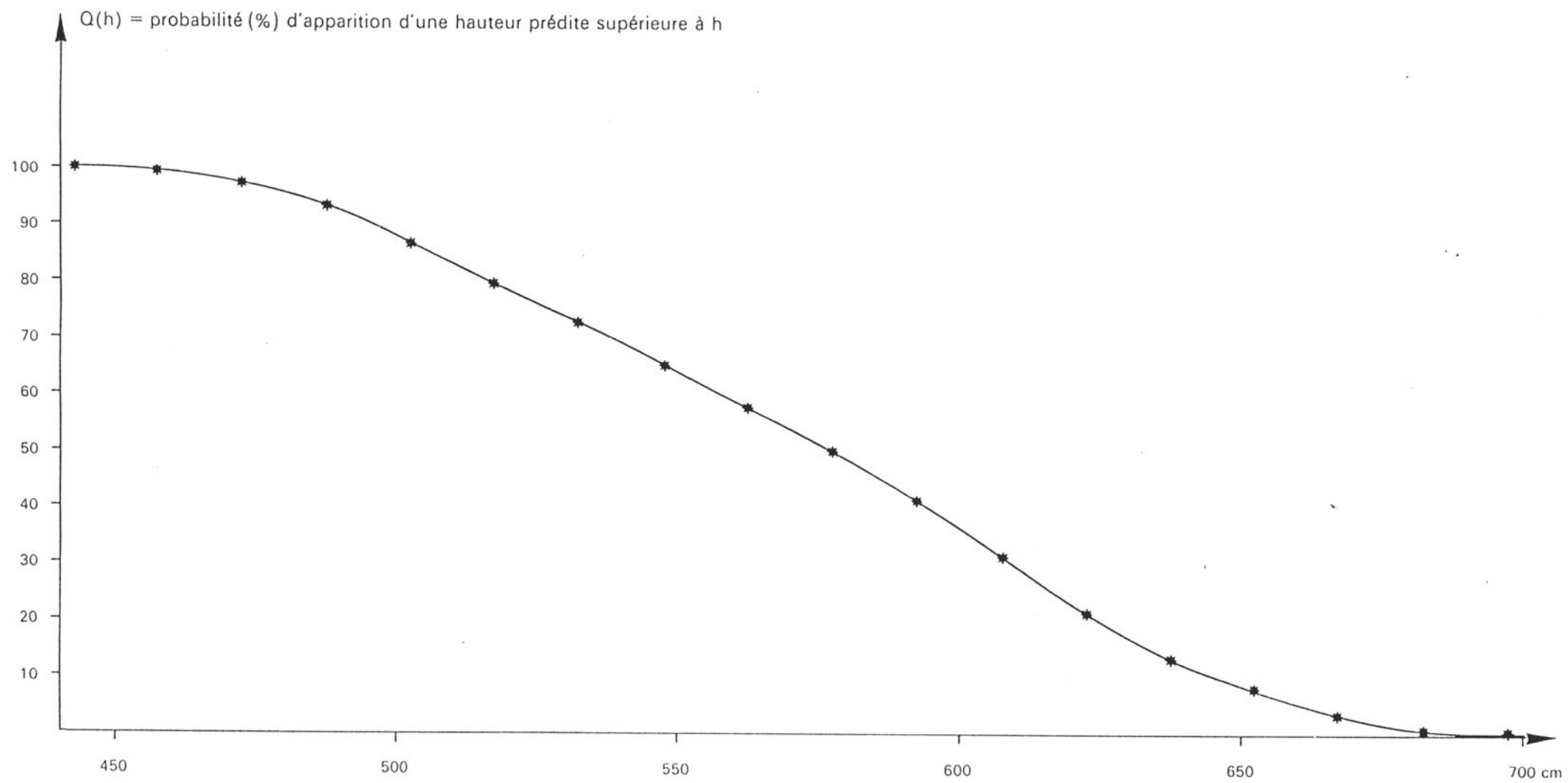
ANNEXE 1



Eléments de calcul des niveaux extrêmes observés pour le port de Cherbourg

$C(h)$ = pourcentage d'observations de hauteurs de pleines mers supérieures à la valeur h





PRESENTATION DU MATERIEL DE MESURES IN SITU (1ère partie)

Mise en oeuvre et tests de fonctionnement

La synthèse bibliographique des données géologiques, géomorphologiques, sédimentologiques, hydrodynamiques sur la côte ouest du Cotentin a mis en évidence de nombreuses lacunes (LEVOY et LARSONNEUR, 1990a).

Afin d'améliorer la connaissance des processus responsables directement de l'érosion de la côte du département de la Manche, un programme de mesures sur le terrain, inspiré d'expériences réalisées à l'étranger, a été proposé.

Ce programme est basé sur la mise en place d'un Réseau d'Observations et de Mesures In Situ (R.O.M.I.S) regroupant, à la fois, l'instrumentation océanographique et les techniques de quantification des transports sédimentaires sur les plages.

Les principes généraux concernant le programme de mesures, ses objectifs et ses finalités ont été détaillés dans le rapport II de l'étude actuellement en cours, intitulé: "Programme de mesures des paramètres dynamiques et de l'évolution des systèmes sédimentaires" (LEVOY et LARSONNEUR, 1990b).

Le présent compte-rendu vise à faire le point sur le matériel acquis et développé pour l'étude globale de défense contre la mer du département de la Manche. Le matériel de mesures déjà testé est présenté. Les conditions de mise en oeuvre sont détaillées et les résultats des tests effectués sur l'estran, au droit du Laboratoire maritime de Luc-sur-mer, sont exposés.

I) LES COURANTOMETRES ELECTROMAGNETIQUES S4

1) Descriptif du matériel

Le S4 a été conçu pour mesurer l'intensité et la direction d'un courant d'eau horizontal. L'écoulement de l'eau au travers du champ électromagnétique créé par l'instrument génère une modification du voltage qui est proportionnelle à la vitesse de l'eau. Ce voltage est perçu par deux paires d'électrodes en titane disposées symétriquement sur l'équateur du capteur. Les données sont stockées sur une mémoire vive de technologie CMOS (photos 1 et 2).

L'électronique et l'alimentation nécessaires à la mesure de courant sont contenues dans une sphère compact de 25 cm de diamètre, constituée d'un plastique résistant à la corrosion et au choc.

La forme sphérique du S4 permet d'éliminer les composantes verticales du mouvement de l'eau, améliorant la connaissance des courants dans les secteurs soumis à la houle. Par ailleurs, grâce à sa résolution et à sa précision (annexe 1), le S4 peut mesurer des courants peu élevés et qui fluctuent très rapidement.

La fréquence d'acquisition des données est de 2 Hz, moyennés sur 1 seconde. Cette fréquence est modifiable par programmation soft.

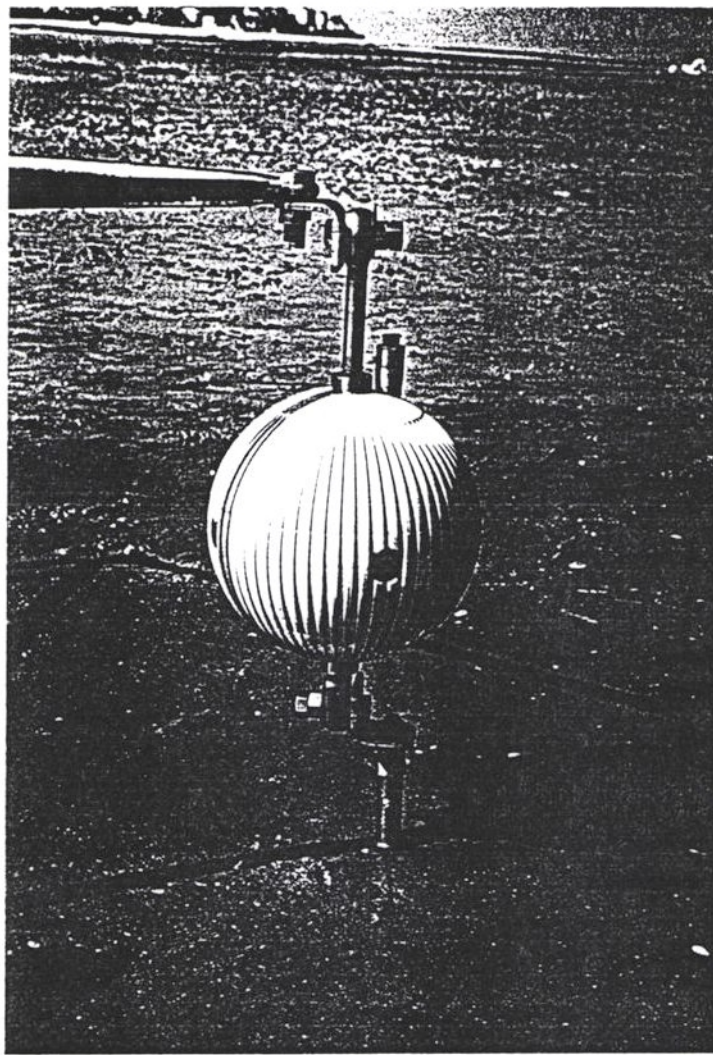


Photo 1: Courantomètre électromagnétique standard S4

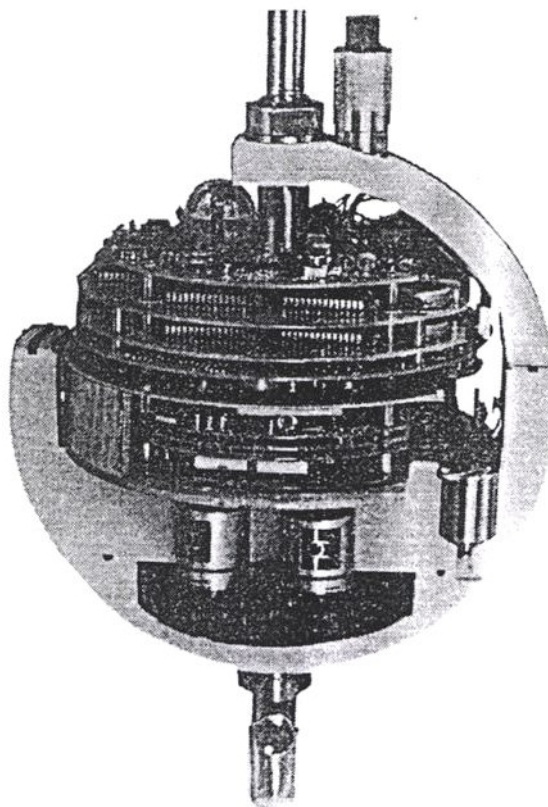


Photo 2: Electroniques du S4 standard

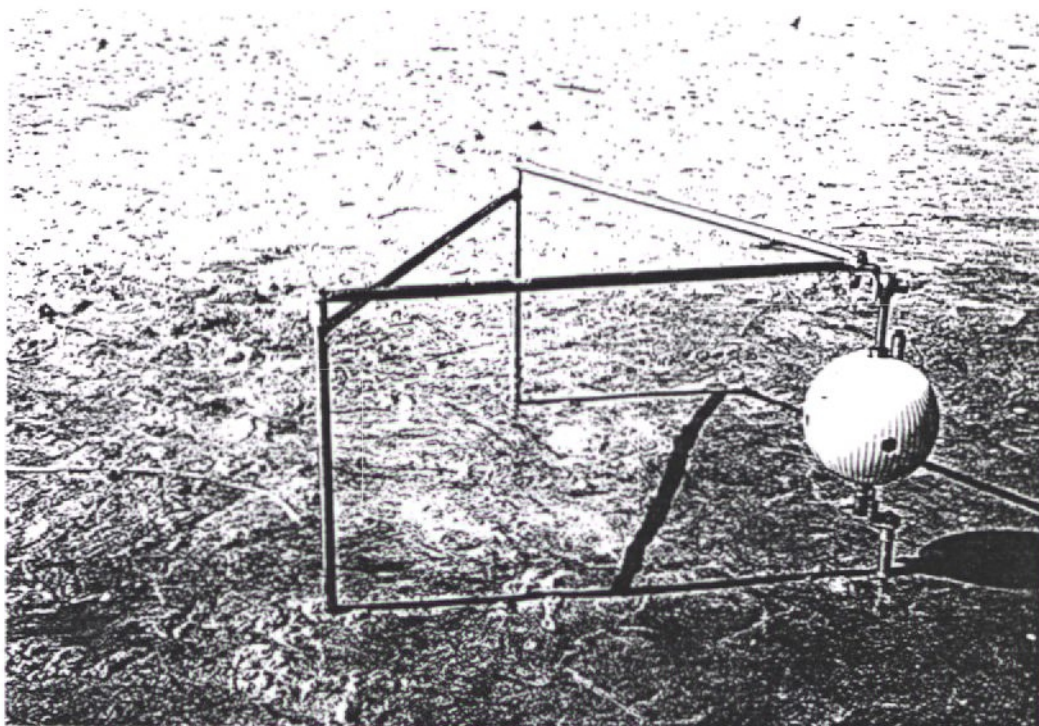


Photo 3: S4 sur un support trépied

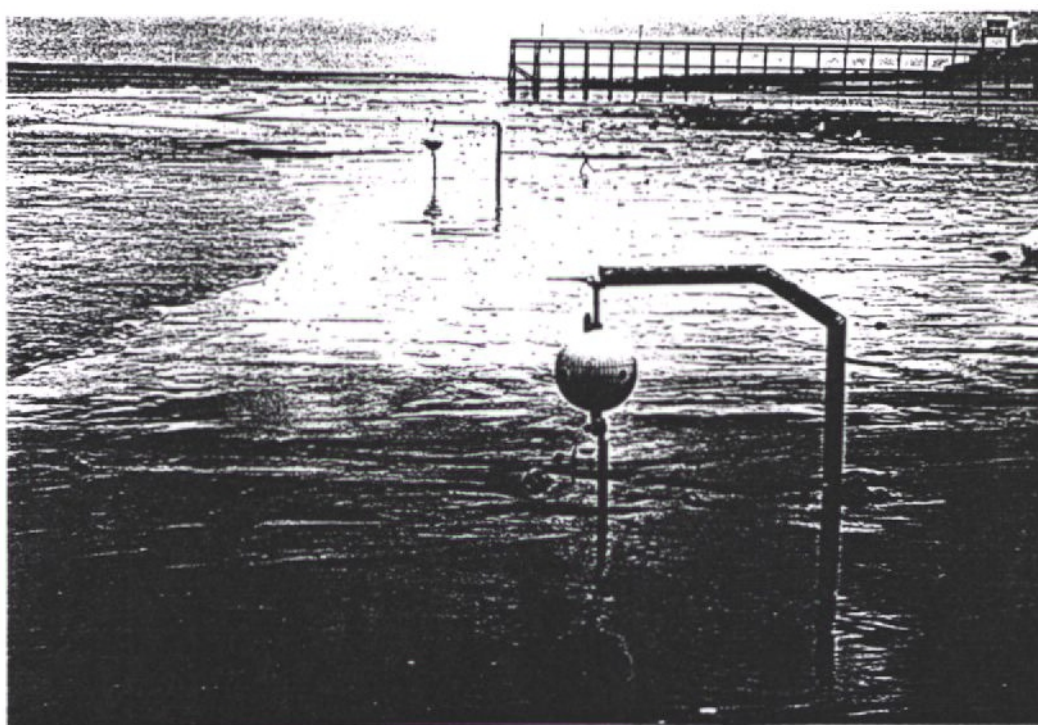


Photo 4: S4 sur un support potence

La surface rainurée du S4 permet d'obtenir des caractéristiques hydrodynamiques stables, conférant à l'appareil une bonne stabilité et une bonne linéarité. Il n'y a pas de pièces qui se déplacent mécaniquement ou de protubérances qui interfèrent sur les caractéristiques des écoulements d'eau.

Un compas interne fournit les informations pour calculer la position de référence du S4 par rapport au Nord magnétique.

Les données stockées sur une mémoire de 64 ou 128 Ko sont récupérées par le biais d'une sortie RS232C et d'une interface permettant le transfert vers un ordinateur PC.

Les S4 standards acquis dans le cadre de l'étude globale de défense contre la mer du département de la Manche ne possèdent aucune option. Pour deux d'entre-eux, leur mémoire de masse est de 64 Ko, pour le troisième, elle est de 128 Ko.

L'alimentation retenue pour ces appareils est fournie par des piles alcalines.

2) Mise en oeuvre in situ

Les S4 acquis pour mesurer les courants sur les estrans de la côte ouest du Cotentin seront fixés sur des supports en inox ou en aluminium, afin de ne pas perturber le champ magnétique induit par le capteur.

Deux types de supports ont été réalisés et testés sur l'estran de Luc-sur-mer:

- des potences à embase rectangulaires ou en forme de H,
- un trépied calqué sur un modèle de l'IFREMER, ayant une embase en forme de T.

Sur chacun de ces modèles, les embases sont enfouies dans le sable d'environ 0,20 à 0,40 m, afin que les électrodes du capteur se situent à exactement 0,30 m au-dessus de la surface de la plage. Par ailleurs, ces embases sont enfichées avec des mèches en métal d'environ 0,40 m et, en complément, une ancre plate attachée au bâti par un câble inox permettra d'éviter une dérive et un basculement du support lors des fortes agitations du plan d'eau (photos 3 et 4).

Le diamètre des tubes inox ou aluminium de chaque support a conditionné la taille du bâti. En effet, la distance entre le S4 et le tube vertical du support le plus proche est égale ou supérieure à 10 fois le diamètre de celui-ci, afin que le bâti lui-même ne perturbe pas les écoulements à proximité des électrodes. Ce paramètre de dimensionnement a été déduit d'expériences en nature réalisées sur le bâti de la Station Autonome Multiparamétrique du Laboratoire de Géologie marine de l'Université de Caen.

Les supports réalisés ont montré une bonne rigidité, limitant les effets vibratoires qui pourraient perturber les mesures. Leur conception, assez simple, ne laissant apparaître hors du sable qu'un minimum de prise, permet d'éviter le piègeage des algues, nombreuses sur la côte du Calvados.


```

-----|Set up S4|-----
F1  Header :                GET DATA
F2  Period :                Continuous
F3  Average count :        5
F4  Channels at average :   4 5 6
F5  SRB count :            0
F6  Channels at SRB :      None
F7  Write mode :           Internal
F8  Log mode :             North & East
F9  Start time :           Immediately
F10 Arm memory init. :     armed
P   Print this screen :
Q   Quit logging :
S   Save setup on disk :

CR  Start logging according to setup above
ESC Main Menu
-----

```

Fig.1: Fonction de programmation du logiciel S4 APP

La mise en oeuvre des supports nécessite le creusement préalable d'une fouille d'environ 1 m², sur une profondeur de 0,40 m. Les mèches sont alors plantées dans chaque embase et l'ancre enfouie à proximité. L'ensemble est ensuite recouvert par du sable.

Les S4 sont boulonnées sur les supports par le biais de l'axe d'amarrage en titane de chaque appareil.

Les opérations de pose des appareils se réalisent toujours juste avant que la marée montante n'atteigne le point de mesures. De la même façon, au jusant, les opérations de repli s'effectuent juste après que la mer ait découvert le point de mesures. Les courantographes ne sont jamais laissés, sans surveillance, sur l'estran découvert.

3) Programmation de l'appareil et récupération des données.

La programmation du S4 s'effectue grâce à un ordinateur PC par le biais de l'interface S110. Chaque S4 possède une prise spéciale, qui permet cette liaison.

Un logiciel d'application S4APP, écrit en basic compilé (version 2.67) permet de dialoguer avec les courantomètres. La fonction de programmation de ce logiciel permet de paramétrer l'acquisition des données courantométriques. Ainsi, la période d'acquisition, la moyenne des mesures qui seront stockées en mémoire, les canaux d'enregistrement, la fréquence des informations horaires, le système de référence des mesures de direction, l'heure de départ de l'acquisition, l'initialisation de la mémoire peuvent être programmés (fig.1).

La fréquence d'acquisition par défaut est de 2 Hz, ainsi pour obtenir une valeur du courant de marée moyen, il est nécessaire de moyenner l'acquisition sur 60 à 120 mesures. Par contre, pour apprécier les courants de houles, une acquisition toutes les demi-secondes est nécessaire.

Une fois la programmation de l'appareil définie, le paramétrage est stocké en mémoire et le S4 peut être mis à l'eau.

La récupération des données se fait également par le biais du logiciel S4APP. Le fonctionnement du S4 doit être stoppé. Une fonction de récupération des données permet d'ouvrir un fichier préalablement nommé et de le stocker sur la mémoire d'un ordinateur, pour le traitement ultérieur. Ce fichier peut être sauvegardé en binaire ou en ascii, un utilitaire permettant, éventuellement, le passage d'un format à l'autre.

4) Généralités sur le traitement des données.

Le logiciel S4APP permet une multitude de traitements des données acquises par le courantomètre électromagnétique S4. Après avoir sélectionné un fichier qui a été récupéré sur la mémoire de masse du S4, il est possible de sélectionner différentes formes d'impression des résultats, avec ou sans traitements.

InterOcean Systems, Inc.				Model S4 Current Meter #04430794				Page 1	
--Std S4--				File : baystd2.S4B					
Vn (cm)	Ve (cm)	Vr (v)	Hx (deg)	Hy (deg)	Cond (mS/cm)	Temp (degC)	Depth (M)	Tx (deg)	Ty (deg)
30.2	6.2				44.10	18.12	11.29		
34.6	9.2				44.30	18.12	11.29		
33.4	6.8				43.90	18.07	11.36		
32.4	6.0				44.20	18.17	11.43		
26.6	6.8				43.90	17.97	11.43		
24.2	7.4				43.60	17.78	11.50		
5/20/86 03:51									
24.6	8.6		125	-153	43.80	17.78	11.50		
25.0	8.6				43.60	17.68	11.56		
26.0	7.8				43.40	17.63	11.63		
26.8	14.2				43.30	17.39	11.70		
29.0	15.4				43.30	17.34	11.77		
30.4	10.0				43.60	17.53	11.77		
5/20/86 04:51									
28.0	19.8		157	-124	43.20	17.34	11.77		
27.4	15.2				43.50	17.39	11.91		
29.0	15.8				43.20	17.29	11.91		
28.4	15.6				43.20	17.24	11.97		
24.0	13.4				43.20	17.24	12.04		
20.6	11.0				43.10	17.14	12.04		
5/20/86 05:51									
26.4	12.4		139	-143	43.10	17.19	12.04		
26.8	5.6				43.10	17.09	12.04		
27.4	0.8				42.90	17.04	12.11		
26.0	8.6				42.90	16.90	12.18		
15.8	3.2				43.10	16.95	12.18		
9.0	-6.4				42.80	16.85	12.18		
5/20/86 06:51									
14.0	-4.6		151	-129	42.70	16.90	12.18		
8.2	-9.6				42.70	16.80	12.18		
4.6	-6.0				42.60	16.75	12.18		
-0.2	-9.0				42.70	16.70	12.18		
-0.8	-7.2				42.70	16.70	12.18		
-2.0	-6.2				42.70	16.65	12.18		
5/20/86 07:51									
-4.8	-4.2		137	-144	42.70	16.80	12.18		
-8.8	-0.8				42.80	16.85	12.18		
-16.0	-2.8				42.90	16.85	12.11		
-20.0	-5.8				42.80	16.85	12.04		
-15.2	-0.6				43.10	17.04	12.04		
-15.2	-3.4				43.10	17.04	11.97		
5/20/86 08:51									
-17.4	-4.6		-203	47	43.10	16.99	11.91		
-22.0	-4.0				43.10	17.04	11.91		
-23.6	-4.2				43.10	17.19	11.84		
-28.4	-5.6				43.30	17.29	11.84		
-30.8	-9.0				43.50	17.43	11.77		
-31.4	-8.6				43.50	17.53	11.70		
5/20/86 09:51									
			-175	118					

InterOcean Systems, Inc.				Model S4 Current Meter #04430794				Page 1		
--Std S4--				File : baystd2.S4B						
Speed (cm/s)	Dir (deg)	Vr (v)	Hdg (deg)	Cond (mS/cm)	Temp (degC)	Depth (M)	Tilt (deg)	Salin (psu)	Density (Kg/M ³)	SV (M/s)
30.8	12			44.10	18.12	11.29		33.37	1024.05	1514.3
35.8	15			44.30	18.12	11.29		33.54	1024.18	1514.5
34.1	12			43.90	18.07	11.36		33.24	1023.96	1514.0
33.0	10			44.20	18.17	11.43		33.42	1024.07	1514.5
27.5	14			43.90	17.97	11.43		33.32	1024.04	1513.8
25.3	17			43.60	17.78	11.50		33.23	1024.02	1513.1
5/20/86 03:51				51						
26.1	19			43.80	17.78	11.50		33.40	1024.15	1513.3
26.4	19			43.60	17.68	11.56		33.30	1024.10	1512.9
27.1	17			43.40	17.63	11.63		33.17	1024.02	1512.6
30.3	28			43.30	17.39	11.70		33.29	1024.16	1512.0
32.8	28			43.30	17.34	11.77		33.33	1024.21	1511.9
32.0	18			43.60	17.53	11.77		33.43	1024.23	1512.6
5/20/86 04:51				38						
34.3	35			43.20	17.34	11.77		33.24	1024.14	1511.8
31.3	29			43.50	17.39	11.91		33.46	1024.30	1512.2
33.0	29			43.20	17.29	11.91		33.28	1024.18	1511.7
32.4	29			43.20	17.24	11.97		33.32	1024.23	1511.6
27.5	29			43.20	17.24	12.04		33.32	1024.23	1511.6
23.4	28			43.10	17.14	12.04		33.32	1024.24	1511.3
5/20/86 05:51				46						
29.2	25			43.10	17.19	12.04		33.28	1024.20	1511.4
27.4	12			43.10	17.09	12.04		33.36	1024.29	1511.2
27.4	2			42.90	17.04	12.11		33.23	1024.20	1510.9
27.4	18			42.90	16.90	12.18		33.35	1024.32	1510.6
16.1	11			43.10	16.95	12.18		33.48	1024.42	1510.9
11.0	325			42.80	16.85	12.18		33.30	1024.30	1510.4
5/20/86 06:51				41						
14.7	342			42.70	16.90	12.18		33.17	1024.19	1510.4
12.6	311			42.70	16.80	12.18		33.25	1024.28	1510.2
7.6	307			42.60	16.75	12.18		33.21	1024.25	1510.0
9.0	269			42.70	16.70	12.18		33.33	1024.36	1510.0
7.2	264			42.70	16.70	12.18		33.33	1024.36	1510.0
6.5	252			42.70	16.65	12.18		33.38	1024.40	1509.9
5/20/86 07:51				46						
6.4	221			42.70	16.80	12.18		33.25	1024.28	1510.2
8.8	185			42.80	16.85	12.18		33.30	1024.30	1510.4
16.2	190			42.90	16.85	12.11		33.39	1024.37	1510.5
20.8	196			42.80	16.85	12.04		33.30	1024.30	1510.4
15.2	182			43.10	17.04	12.04		33.40	1024.33	1511.1
15.6	193			43.10	17.04	11.97		33.40	1024.33	1511.1
5/20/86 08:51				193						
18.0	195			43.10	16.99	11.91		33.44	1024.37	1511.0
22.4	190			43.10	17.04	11.91		33.40	1024.33	1511.1
24.0	190			43.10	17.19	11.84		33.28	1024.20	1511.4
28.9	191			43.30	17.29	11.84		33.37	1024.25	1511.8
32.1	196			43.50	17.43	11.77		33.42	1024.25	1512.3
32.6	195			43.50	17.53	11.70		33.34	1024.17	1512.5
5/20/86 09:51				214						

Fig.2: Présentation des Résultats sous la forme de tableaux

A: direction et vitesse du courant

B: composante N et E

L'entête du fichier permet d'abord de repreciser le paramétrage de programmation de l'appareil. Les données peuvent ensuite être éditées sous la forme d'un tableau dont les deux premières colonnes indiquent, soit la vitesse et la direction du courant, soit ses deux composantes V_n et V_e (fig.2). Suivant la programmation effectuée, les "Special Record Blocks" indiquant en particulier la date et l'heure, apparaîtront toutes les N mesures.

Les résultats pourront directement être traduits graphiquement. De nombreux types de graphes sont réalisables (fig.3), mais dépendent des options propres à chaque S4. Une partie de la séquence d'acquisition correspondant au fichier sélectionné peut être visualisée, à l'écran ou sur imprimante, en précisant la date et l'heure du début et de la fin de l'échantillon de données retenu. De même, il est possible de modifier les échelles des graphiques, de procéder à des moyennes mobiles pour lisser les courbes obtenues et de calculer l'écart-type sur chaque série de données.

5) Tests et expérimentations in situ à Luc-sur-mer.

Dans un premier temps, des tests en bac ont permis de contrôler le bon fonctionnement des S4 standards, de l'interface S110 et du logiciel de traitement S4APP. Ces tests ont été menés en temps réels, l'appareil qui était relié à l'ordinateur par le biais de l'interface S110 envoyait directement les informations à l'écran, soit sous une forme graphique ou tabulaire. Les séquences d'acquisition recueillies n'ont duré que quelques minutes chacune.

Des mesures en nature ont été effectuées sur l'estran de Luc-sur-mer, au droit de la Station marine. Au total, 7 mouillages ont été réalisés. Ces essais ont permis de:

- mettre au point la procédure d'installation du matériel sur les plages,
- tester la procédure de programmation en temps différé des appareils,
- effectuer différentes programmations, sur la durée et la périodicité des séquences d'acquisition,
- mesurer l'occupation mémoire en fonction des différentes programmations réalisées,
- vérifier le bon fonctionnement de chaque S4, notamment en contrôlant les résultats issus de deux appareils disposés l'un à côté de l'autre (photo 4).

Pour la mesure des courants de marée, des essais d'acquisition moyennant 60, 100 et 120 mesures à 2 Hz ont été effectués. Pour saisir les courants induits par la houle, la fréquence par défaut a été maintenue.

La capacité mémoire des appareils étant un facteur limitant d'utilisation, il convenait de préciser ces limites. En retenant, une sauvegarde de mesures toutes les 30 secondes et des informations horaires toutes les 10 sauvegardes, c'est-à-dire toutes les 5 minutes, les 64 Ko de mémoire seront consommés en 156 heures si l'appareil fonctionne en continu. Avec ce type de programmation, l'occupation de la taille mémoire n'est pas optimisée, car au plus une expérience sur un estran durera une dizaine d'heures si l'appareil est situé à proximité du niveau de basse mer de vive-eau.

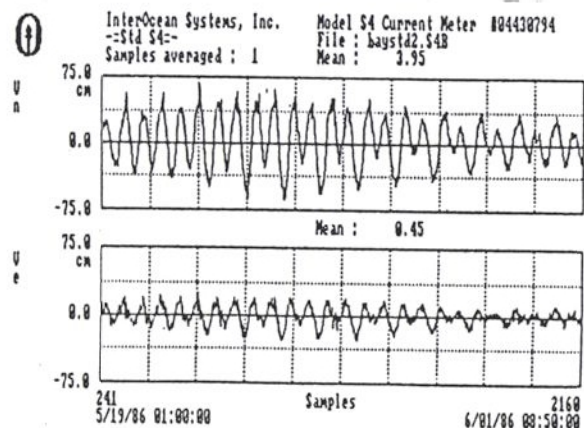
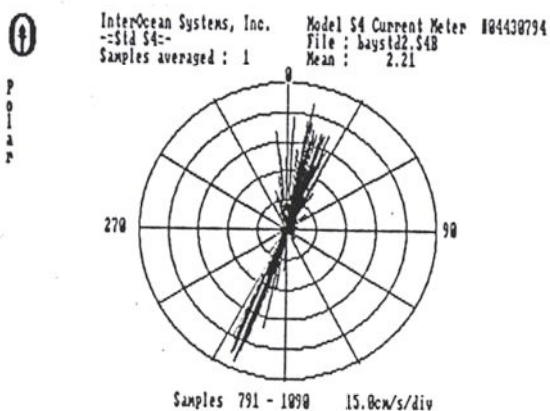
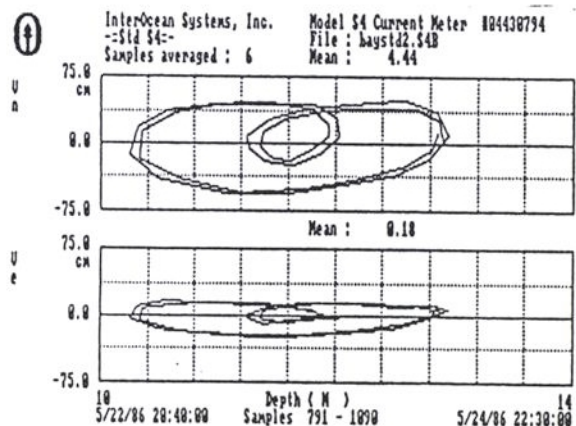
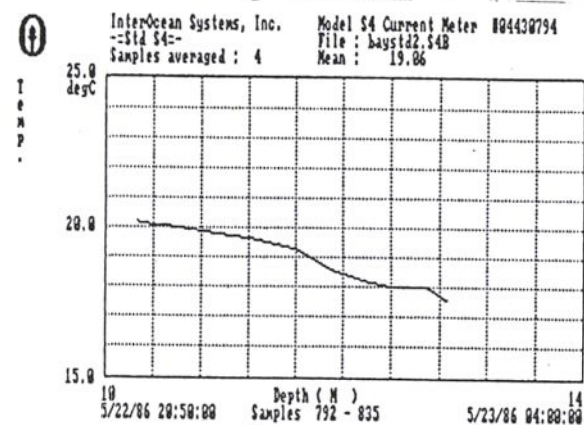
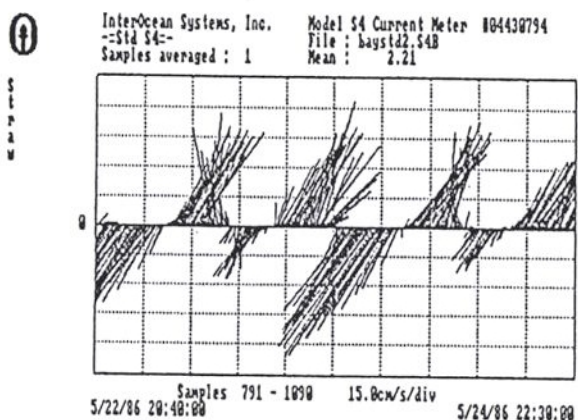
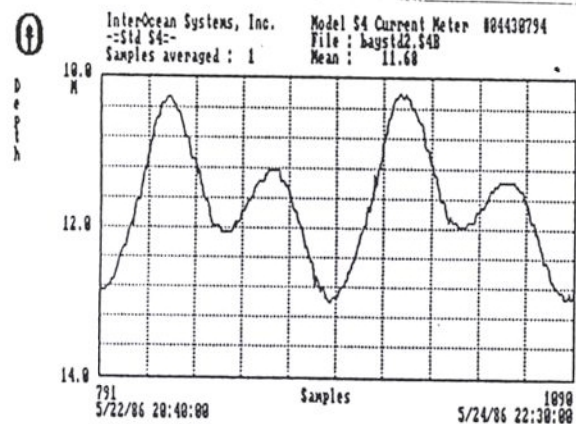
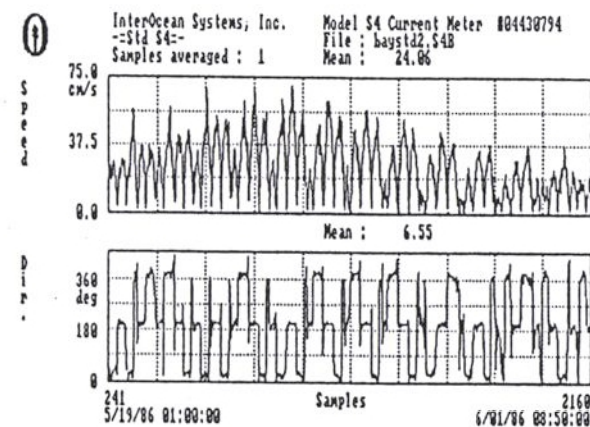
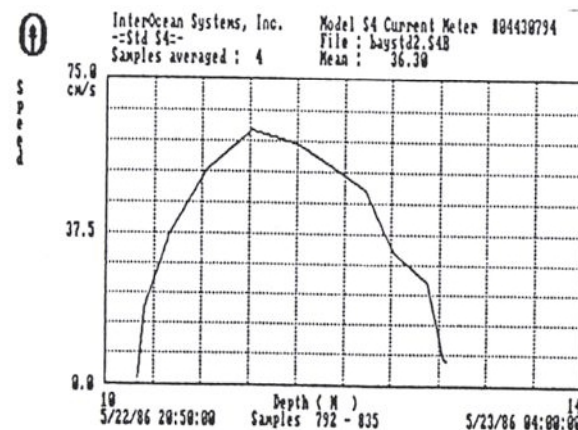
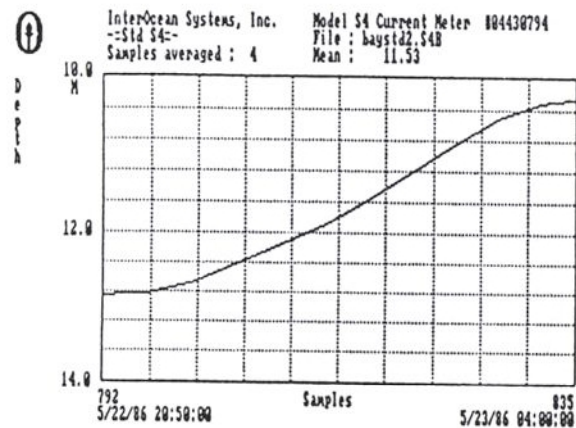


Fig.3: Présentation des résultats du S4 sous la forme de différents graphes

Le principe actuellement retenu est de faire fonctionner ces appareils en continu, avec une fréquence d'acquisition la plus élevée possible, afin de recueillir le maximum d'informations sur les courants, soit de houles, soit de marée. Le traitement permet ensuite de procéder à des filtrages et d'individualiser l'intensité des courants induits par l'un ou l'autre des processus.

Ainsi, avec une mémoire de 64 Ko, les essais et calculs réalisés permettent de prévoir une acquisition en continu durant 7,8 heures, avec une moyenne des mesures sur 3 secondes.

Avec 128 Ko de mémoire, 37448 échantillons de données peuvent être recueillis à une fréquence 1 Hz, ce qui permet de faire fonctionner l'appareil en continu pendant 5,2 heures.

Le S4 standard possédant une capacité mémoire de 128 Ko sera placé préférentiellement sur la basse plage car il sera plus longtemps sous l'eau. Par contre, les S4 possédant 64 Ko seront disposés sur la moyenne ou la haute plage en fonction des conditions d'agitation, car leur temps d'immersion sera beaucoup plus court.

En fait, la définition de la fréquence d'acquisition de chaque appareil dépendra de sa cote d'implantation sur l'estran et du marnage du moment.

La durée de vie des piles alcalines, calculée avec les abaques fournis par le constructeur, est de 444 heures pour un fonctionnement en continu, soit à raison de 8 heures d'immersion maximale par jour, un total de 55 jours équivalent à une année d'expérimentations in situ sur la côte ouest du Cotentin (10 campagnes de 4 à 5 jours).

6) Présentation de quelques résultats

Les mesures de courant effectuées sur l'estran de Luc-sur-mer ont été réalisées dans des conditions de marées et de houles variées.

La cote altimétrique d'implantation de l'appareil sur le fond est importante, puisqu'elle conditionne la durée de mise en eau de l'appareil et les caractéristiques des courants par rapport à ceux observés plus au large.

La figure 4 montre un exemple d'enregistrement du courant durant un cycle marégraphique complet sur estran. La séquence d'acquisition programmée était de 5 minutes avec une moyenne des mesures toutes les 10 acquisitions et une répétition du cycle toute les heures. La moyenne sélectionnée dans le cas présent n'est pas représentative de l'ensemble des essais effectués pour appréhender les courants de marée. Dans le cas présent, elle a le mérite de faire ressortir les différentes caractéristiques des courants lors d'une mise en station de l'appareil sur un estran.

La première partie de la courbe, A-B, n'a aucune signification car les électrodes sont hors d'eau. La seconde partie, B-C, montre le passage de la zone de déferlement au-dessus du capteur. Les vitesses de courant observées sont liées à l'action de la houle; elles sont très rapides et très fluctuantes. La partie C-D présente un courant établi de faible vitesse. Ce tronçon se termine par le passage de la zone de déferlement au jusant (D-E) et un enregistrement hors d'eau correspondant à la fin de l'expérience (E-F).



InterOcean Systems, Inc.

Model S4 Current Meter #19261544

LUCSS4

File : luc4.S4B

Samples averaged : 1

Mean : 24.95

Rms : 32.05

Speed

150.0
cm/s

75.0

0.0

Samples

9/20, 09:00:00

9/20, 17:03:35

524

A B

C

D

E

F

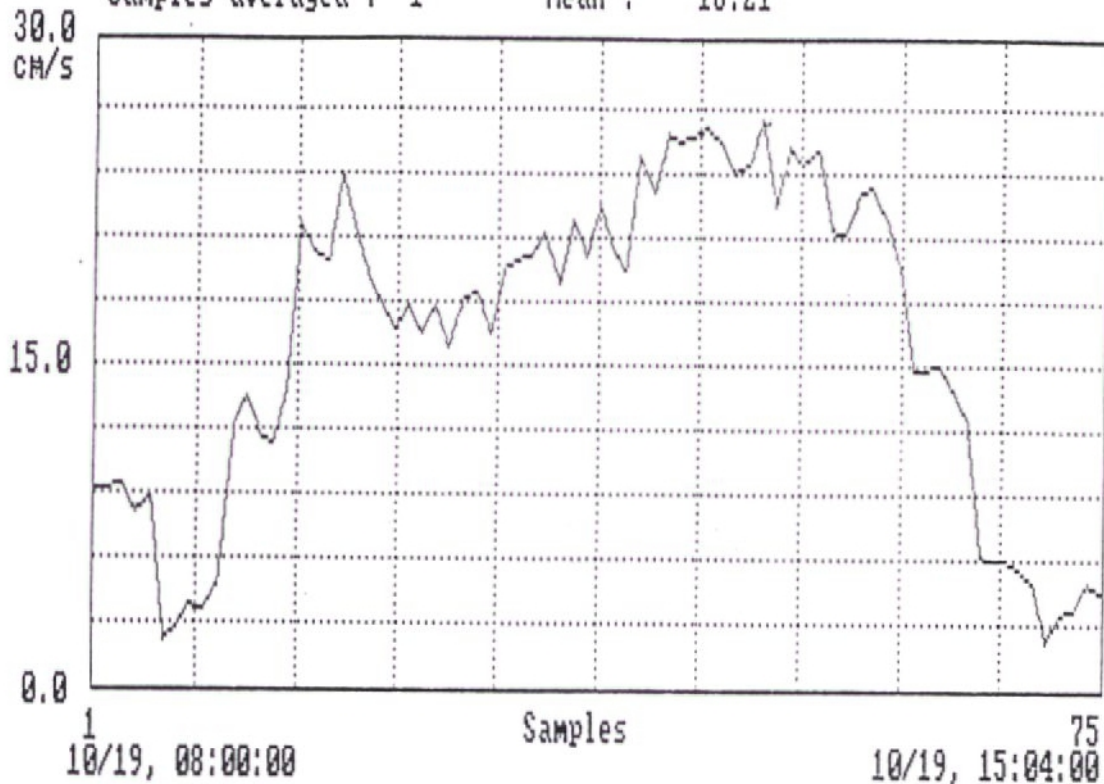
Fig.4: Exemple type d'un enregistrement de la vitesse du courant



InterOcean Systems, Inc.
LUC18C
Samples averaged : 1

Model S4 Current Meter #19261543
File : luc18c.S4B
Mean : 16.21

S
p
e
e
d



InterOcean Systems, Inc.
LUC23C
Samples averaged : 1

Model S4 Current Meter #19261544
File : LUC23C.S4B
Mean : 9.85

S
p
e
e
d

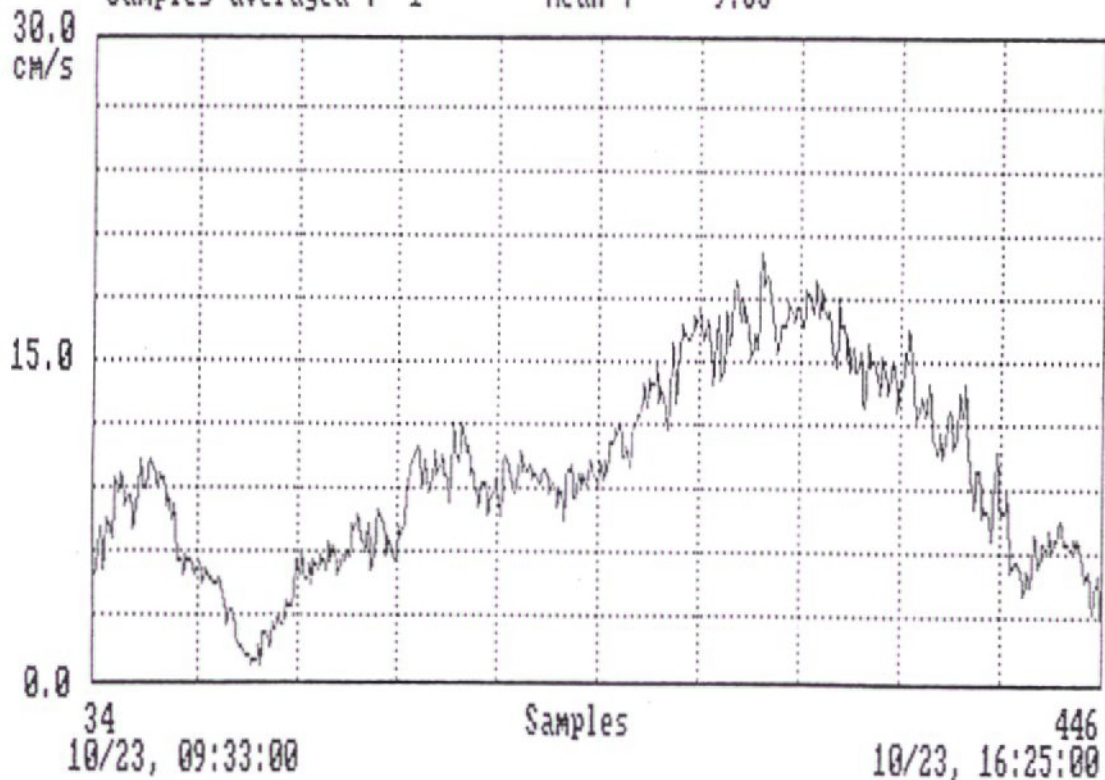


Fig.5: Exemples de graphiques présentant la vitesse du courant acquise à différentes fréquences

D'une manière générale, comme le montrent différentes séquences de mesures, la vitesse des courants de marées n'a jamais dépassé 0,30 m/s sur le moyen estran de la plage de Luc-sur-mer. L'allure plus ou moins indentée des courbes est directement liée à la valeur de la moyenne qui a été appliquée à la fréquence d'acquisition brute de 2 Hz (fig.5). Globalement, la forme de la courbe est toujours identique. Deux maxima de vitesses sont observés, le premier étant moins important que le second, et la pleine mer se situant entre les deux. Le courant est alors extrêmement faible, entre 10 cm/s en moyenne-eau et 20 cm/s en vive-eau moyenne, avec semble-t-il une très forte variabilité.

En ce qui concerne la direction générale du courant. Plusieurs cas de figures ont été rencontrés:

- le plus fréquemment, le courant portant vers le NW, domine. Il correspond au jusant. Le flot, portant vers le SE, ne dure que peu de temps ou est parfois absent (fig.6).

- quelquefois, le phénomène s'inverse, ou le flot a une durée à peu près égale au jusant (fig.7).

Sans rentrer dans une analyse fine sur les expériences réalisées à Luc-sur-mer, il est important de souligner que pour expliquer ces caractéristiques différentes de courant, des mesures précises de la cote altimétrique de mouillage des appareils, de la hauteur de la marée, de l'état de la mer, des conditions météorologiques qui diffèrent d'une expérience à un autre... sont absolument nécessaires. L'ensemble de ces paramètres seront pris en compte durant les expériences qui seront menées sur la côte ouest du Cotentin.

II) LES HOULOGRAPHERS DIRECTIONNELS S4 DW

1) Descriptif du matériel

Le S4 DW est un courantomètre électromagnétique tel qu'il vient d'être décrit précédemment, auquel a été ajouté un capteur de pression haute résolution 0-70 m.

Avec cette option, le S4 est capable de mesurer la hauteur des vagues et la marée. La résolution du capteur est de 1 pour 16363, soit une différence de hauteur d'eau de 4,27 mm pour une lame d'eau maximale de 70 m.

L'acquisition des données doit être réalisée à 2 Hz afin de mesurer les vitesses orbitales liées à la houle et les variations de hauteur d'eau associées au passage des vagues au-dessus du capteur de pression. La combinaison de ces deux informations permettra ensuite de calculer la hauteur et la direction de propagation des vagues.

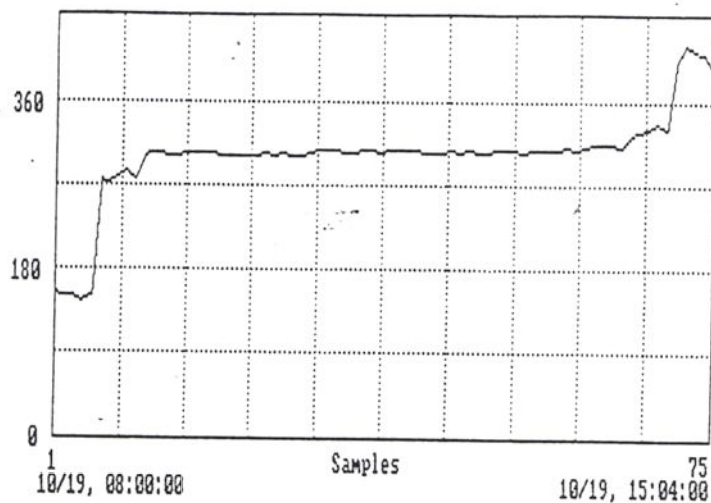
Les fluctuations du plan d'eau statique liées à la marée peuvent être obtenues en moyennant les données de hauteurs sur une période de 2 à 4 minutes.



InterOcean Systems, Inc.
LUC18C

Model S4 Current Meter #19261543
File : luc18c.S4B

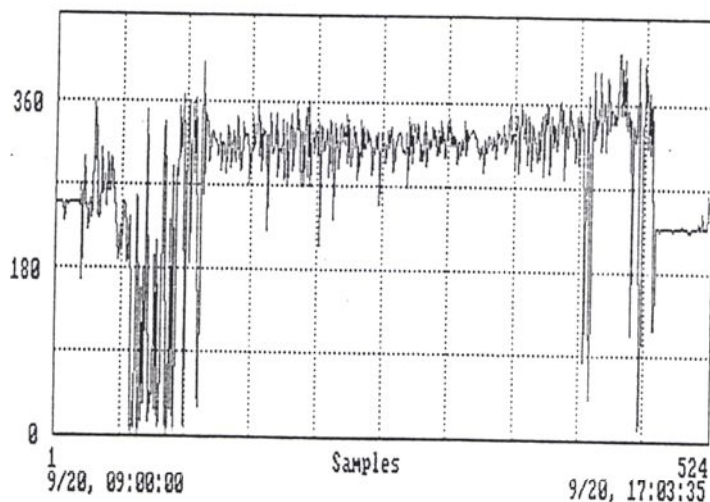
Dir



InterOcean Systems, Inc.
LUCSS4

Model S4 Current Meter #19261544
File : luc4.S4B

Dir



InterOcean Systems, Inc.
LUC23C

Model S4 Current Meter #19261544
File : LUC23C.S4B

Dir

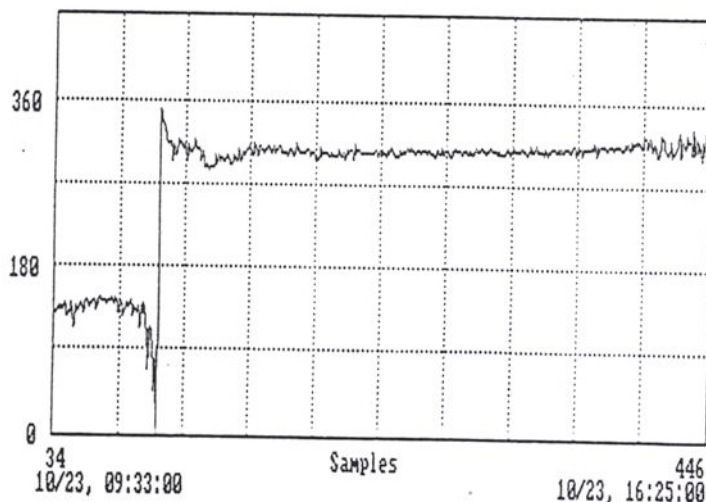


Fig.6: Exemples de graphiques présentant la direction du courant acquise à différentes fréquences. Dans ces exemples, le jusant (NW), l'emporte sur le flot (SE)



InterOcean Systems, Inc.
LUC8C

Model S4 Current Meter #19261543
File : luc7C.S4B

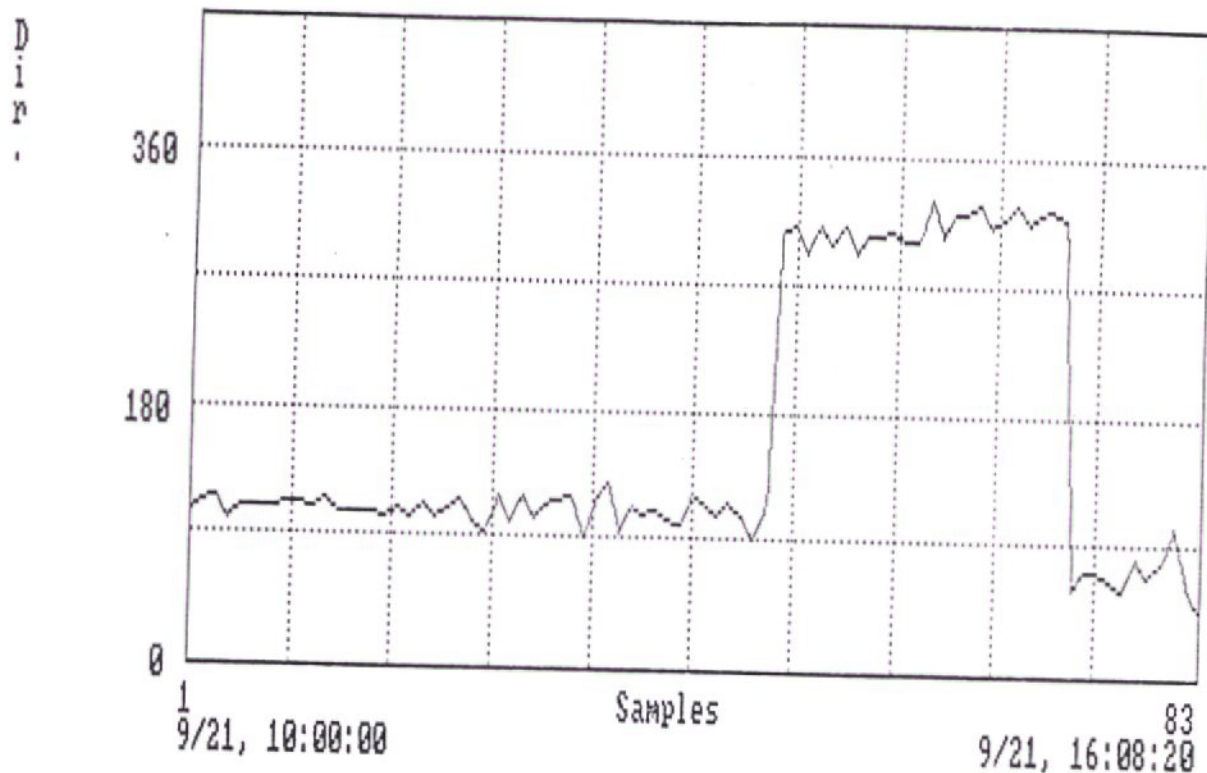


Fig.7: Enregistrement de la direction du courant. Dans cet exemple, le flot l'emporte sur le jusant

En fonction de la profondeur où est installée le S4 DW et des caractéristiques des vagues sur le site (période et longueur d'onde), un facteur d'atténuation K permet de définir la hauteur réelle des vagues par rapport à celle déterminée à partir des mesures brutes du capteur de pression (annexe 2). Le rapport $1/K$ est proportionnel à la profondeur d'immersion de l'appareil et inversement proportionnel à la longueur d'onde ou à la période de la houle. Quand ce rapport s'élève, la hauteur de la houle calculée devient de plus en plus imprécise.

Il convient donc de bien définir la finalité des mesures de houles à réaliser afin d'adapter la profondeur d'immersion de l'appareil. La connaissance des houles courtes nécessite de positionner le S4 DW à une faible profondeur afin que le rapport $1/K$ soit le plus proche possible de la valeur 1.

La capacité mémoire des S4 DW a été portée à 1 Méga-octets pour permettre des enregistrements sur plusieurs semaines, compte tenu de la quantité de données à stocker pour définir les caractéristiques d'une houle.

De la même manière, pour permettre une plus longue utilisation, des batteries lithium ont été préférées aux piles alcalines des S4 standards.

2) Mise en oeuvre in situ

Les tests effectués à Luc-sur-mer ont été réalisés uniquement sur estran. Ce type d'implantation ne représente qu'un seul type d'immersion qui sera mis en oeuvre sur la côte ouest du Cotentin. L'immersion en domaine subtidal, qui se pose de nombreux problèmes de balisage du point de mesures et la mise en oeuvre de moyens importants (navires, plongeurs...), sera testée en janvier 1991. Par ailleurs, l'ensemble du matériel nécessaire à ces opérations n'est actuellement pas complètement réuni.

Sur l'estran, la mise en oeuvre des S4 DW est réalisée de manière identique à celle des S4 standard, à savoir sur potence ou trépied inox solidement amarré dans le sable.

3) Programmation de l'appareil et récupération des données

La programmation des séquences d'acquisition est réalisée par le biais de l'interface S110 connectée à un ordinateur PC. Le logiciel S4APP est de nouveau utilisé pour déterminer les caractéristiques de l'expérimentation: entête, fréquence d'acquisition, période de mesures, cycle de mesures, date de départ de l'enregistrement, canaux sélectionnés... Les principales différences avec la programmation d'un S4 standard sont la mise en fonctionnement du capteur de pression, la fréquence d'acquisition qui doit être élevée et la périodicité des enregistrements qui doit être soigneusement déterminée compte tenu de la consommation mémoire importante de ce type de mesures.

La récupération des données s'effectue de la même manière que pour le S4 standard.

4) Généralités sur le traitement des données

Plusieurs types de traitements sont possibles une fois que les données sont recueillies. Au préalable, il est intéressant d'utiliser le logiciel S4APP permettant de visualiser les fichiers de données sur les courants et les hauteurs d'eau mesurés toutes les demi-secondes (fig.8). Toutes les sorties graphiques et possibilités de manipulations des données présentées pour le traitement des mesures effectuées avec un S4 standard sont réalisables. Par exemple, la direction et la vitesse du courant moyen peut être calculée en moyennant sur 60 à 120 valeurs les données acquises à 2 Hz. L'étude des interactions Houle-Courant pourra être réalisée par ce biais.

Cependant, pour aboutir à la connaissance de la houle, il est nécessaire d'utiliser un second logiciel de traitement des données dénommé WAVE (version 1.0) développé par InterOcean Systems. Ce programme réalisé en Fortran compilé est utilisable sur un ordinateur PC. Il permet de décrire les caractéristiques de la houle à partir des mesures de pression et des deux composantes V_n et V_e du courant, collectées par le S4 DW muni d'un capteur de pression haute résolution.

La théorie concernant le traitement de la houle est développée en annexe 3. Notons cependant que les calculs effectués sont basés sur les caractéristiques d'une houle de premier ordre et que la détermination des périodes utilise la technique du "zéro up-crossing".

Pour exécuter le programme, il convient de définir plusieurs éléments, nécessaires aux calculs:

- le nom du fichier binaire,
- la hauteur de l'appareil par rapport au fond,
- la limite fréquentielle supérieure,
- le nombre de points nécessaires à la Transformée de Fourier Rapide (F.F.T.),
- un facteur de pondération du poids des données en fonction du temps,
- un paramètre de lissage de la bande fréquentielle,
- la date de début et de fin de l'analyse.

Les résultats fournis par ce logiciel sont:

* après chaque burst (séquence d'enregistrements dont la durée a été programmée):

- les fluctuations du plan d'eau statique en fonction du temps,
- la hauteur d'eau moyenne en mètres et son écart-type,
- le spectre des fréquences de l'élévation du plan d'eau statique,

Speed (cm/s)	Dir (deg)	Vr (v)	Hdg (deg)	Cond (mS/cm)	Temp (degC)	Depth (meters)	Tilt (deg)	Salin (psu)	Density (Kg/M^3)
58.4	71	1.21	124			1.192			
68.0	82	1.21	124			1.231			
77.8	92	1.21	124			1.337			
69.7	108	1.21	124			1.483			
71.9	143	1.21	124			1.641			
92.7	158	1.21	124			1.628			
74.5	156	1.21	125			1.504			
50.4	144	1.21	124			1.423			
45.1	120	1.21	125			1.307			
9/13, 16:07		1.21	125			1.307			
60.2	92	1.21	125			1.307			
71.0	81	1.21	125			1.252			
59.4	81	1.21	123			1.329			
55.2	97	1.21	125			1.372			
50.7	107	1.21	124			1.401			
48.6	123	1.21	125			1.470			
51.2	139	1.21	124			1.598			
64.0	157	1.21	124			1.619			
56.0	163	1.21	124			1.521			
31.1	140	1.21	124			1.406			
9/13, 16:07		1.21	124			1.406			
40.3	99	1.21	124			1.406			
60.2	86	1.21	124			1.239			
69.3	82	1.21	125			1.269			
64.5	79	1.21	123			1.337			
57.6	92	1.21	125			1.444			
43.2	122	1.21	123			1.607			
62.4	162	1.21	125			1.598			
60.4	147	1.21	123			1.401			
49.0	92	1.21	125			1.256			
59.7	75	1.21	124			1.290			
9/13, 16:07		1.21	124			1.290			
56.7	81	1.21	124			1.290			
43.6	132	1.21	124			1.645			
68.6	169	1.21	124			1.628			
52.6	166	1.21	124			1.478			
29.4	127	1.21	124			1.384			
36.6	91	1.21	125			1.325			
52.6	81	1.21	124			1.295			
64.8	84	1.21	125			1.346			
51.9	87	1.21	123			1.521			
37.0	149	1.21	125			1.722			
9/13, 16:07		1.21	125			1.722			
65.1	178	1.21	125			1.722			
33.7	163	1.21	125			1.389			

Fig.8: Résultats de l'acquisition des paramètres nécessaires aux calculs des caractéristiques de la houle

S4 Deployment Information (Wave Analysis)
Serial Number: 19261542

Header: LUC7H

Cycle: On for 0 Days 0 Hrs 15 Mins Every 0 Days 1 Hrs 0 Mins

Number of Samples Averaged: 1 (.5 Seconds)

Number of Averages Between Special Record Blocks: 120

Channels Recorded at Average Time: 1

Channels Recorded at Block Time: 3

Date/Time In Water : 9/21/90 10: 0

Date/Time Start Analysis: 9/21/90 10: 0

DATE/TIME End Analysis : 9/21/90 16:15

ENTERED HEIGHT OFF BOTTOM IS .26 M

PLEASE PUSH RETURN TO CONTINUE

PARAMETERS OF SPECTRAL DENSITY CALCULATIONS

NUMBER OF DATA POINTS = 1800

NUMBER OF FFT POINTS = 512

SAMPLING FREQUENCY = 2.00 HZ

NO OF POINTS AVERAGED = 2

NYQUIST FREQUENCY = 1.00 HZ

CUTOFF FREQUENCY = .25 HZ

WINDOW FACTOR = .00

DEGREES OF FREEDOM = 4

95% CONFIDENCE LIMITS FOR POWER SPECTRAL
DENSITY ESTIMATES

LOWER AND UPPER LIMITS= .36 S(f) AND 8.26 S(f)

Fig.9: Analyse de la houle directionnelle
Exemple d'entête

- la hauteur significative des vagues H_s , en mètre,
- la direction moyenne de propagation des vagues en degrés, pour différentes fréquences ou période de houle,
- un paramètre d'appréciation de la largeur de la bande spectrale variant de 0 à 1.

* en résumé, pour l'ensemble de l'expérimentation:

- les fluctuations de H_s en fonction du temps,
- les fluctuations de la période de pics T_p en fonction du temps,
- les fluctuations de la direction de la propagation de la houle associée à la période principale,
- les fluctuations du paramètre de largeur du spectre,
- les fluctuations de la période de zéro-crossing T_z , de la période significative T_s et de la période de crête T_c , en fonction du temps.

5) Tests et expérimentations à Luc-sur-mer

15 mouillages de S4 DW ont été effectués sur l'estran de Luc-sur-mer en septembre et octobre 1990. Les 3 S4 DW acquis dans le cadre de l'étude globale ont chacun été mis à l'eau, entre 3 et 4 fois, pour la durée d'une marée. Par ailleurs, le S4 DW du laboratoire de Géologie marine de l'Université de Caen a également été testé 4 fois. Une expérience a été réalisée avec 4 appareils enregistrant en simultané des données sur les courants et la houle.

L'objet de ces essais est identique à ceux menés avec des S4 standards. Néanmoins, un accent particulier a été mis sur les périodes et cycles d'acquisition et l'occupation-mémoire des données.

Ainsi, avec 1 Mo de mémoire, il sera possible de laisser, au large, l'appareil en fonctionnement pendant 29 jours sous l'eau, avec une acquisition à 2Hz pendant 10 minutes toutes les 4 heures. La récupération des données par des plongeurs sera conditionnée par cette durée de fonctionnement. Sur estran, la taille mémoire est suffisante pour un fonctionnement en continu sur un cycle de marée.

6) Quelques Résultats

Les campagnes de mesures de houles sur l'estran de Luc-sur-mer ont permis de tester le fonctionnement des S4DW et du logiciel de traitement de données WAVE.

L'exemple de l'expérience menée le 21 septembre 1990 entre 10 heures et 16 heures 15 permet de résumer le type de résultats obtenus.

L'entête (fig.9) montre que le cycle d'acquisition retenu est de 15 minutes d'enregistrements toutes les heures, avec une fréquence d'échantillonnage de 2 Hz. Des données sur la date et l'heure seront stockées en mémoire toutes des 120 mesures, soit toutes les minutes car aucune moyenne n'est réalisée sur les données brutes. Le capteur de pression a été installé à exactement 26 cm de la surface de la plage. Les paramètres de calculs de la densité spectrale sont ensuite précisés.

Pour chaque burst, d'une durée de 15 minutes, différentes informations sont reproduites graphiquement (fig.10). Ainsi, pour le premier burst, la hauteur significative de la houle est de 0,67 m et la période de pic de 7,2 s. Sur la courbe représentant la densité spectrale en fonction de la fréquence, le caractère pratiquement unimodal de la distribution est souligné. A chaque fréquence, est ensuite associée une direction de propagation de la houle.

Pour chaque burst, ce type de résultats est présenté graphiquement. L'ensemble de l'expérience est ensuite résumé sur un tableau indiquant la valeur de chacun des paramètres calculés par burst. Le dernier burst a été enregistré hors d'eau, il convient donc de l'annuler. Ensuite, ces données sont traduites graphiquement, permettant une visualisation de l'évolution de tous les paramètres mesurés dans le temps (fig.11).

Durant l'expérience réalisée à Luc-sur-mer, la hauteur significative des vagues a varié entre 0,43 m et 0,91 m. Les directions de propagation de la houle correspondant à la période de pic sont différentes d'un burst à un autre. Globalement, la houle, au début de l'expérience, provenait du NNE, puis ensuite s'est orientée au Nord, puis au NNW.

Ces résultats devront être mis en parallèle avec d'autres mesures afin d'étalonner, notamment, la hauteur d'eau moyenne mesurée par le capteur de pression pour mieux apprécier les caractéristiques des houles et leurs évolutions en fonction de la marée.

D'autres résultats concernant les caractéristiques des houles mesurées sur l'estran de Luc-sur-mer sont présentés en annexe 4.

III) LE MATERIEL DE LEVES TOPOGRAPHIQUES

1) *Description du matériel*

La réalisation de nombreux profils de plages dans le cadre du suivi des évolutions morphométriques des estrans de l'Ouest-Cotentin a nécessité l'acquisition d'un matériel de levés topographiques adapté, permettant de travailler avec une bonne précision au regard des objectifs poursuivis, et avec une grande rapidité d'exécution compte tenu des contraintes du milieu et de l'ampleur des mesures à effectuer.



InterOcean Systems, Inc

BURST DATA

FILE: luc7h.S4B

BURST NO: 1

SAMPLE FREQ: 2.00Hz

MEAN WATER DEPTH: 1.94m

RMS: 0.17m

Hs: 0.67m

Ip: 7.2 sec

eps: 0.44

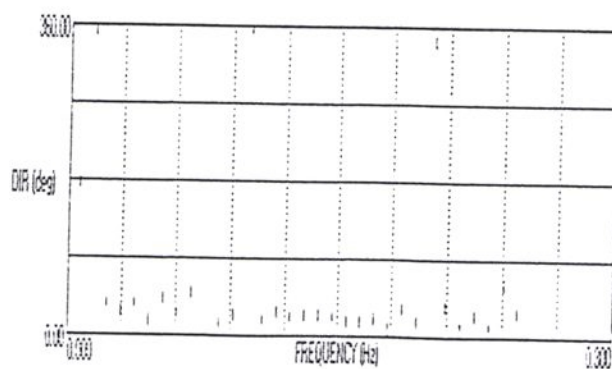
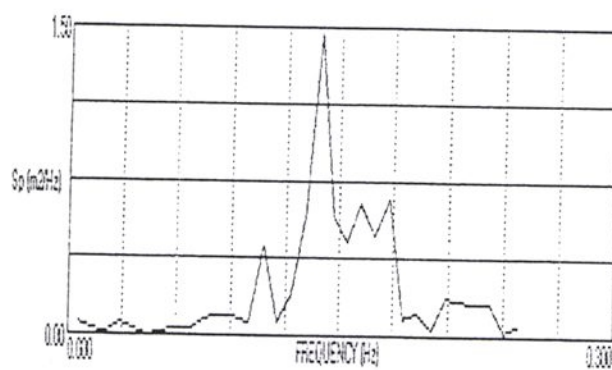
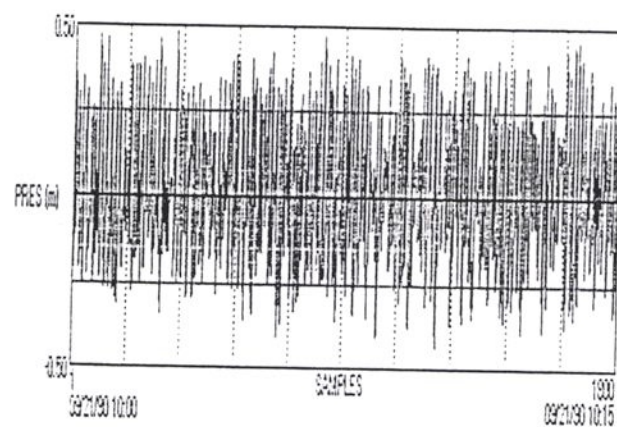


Fig.10: Résultats graphiques pour un burst

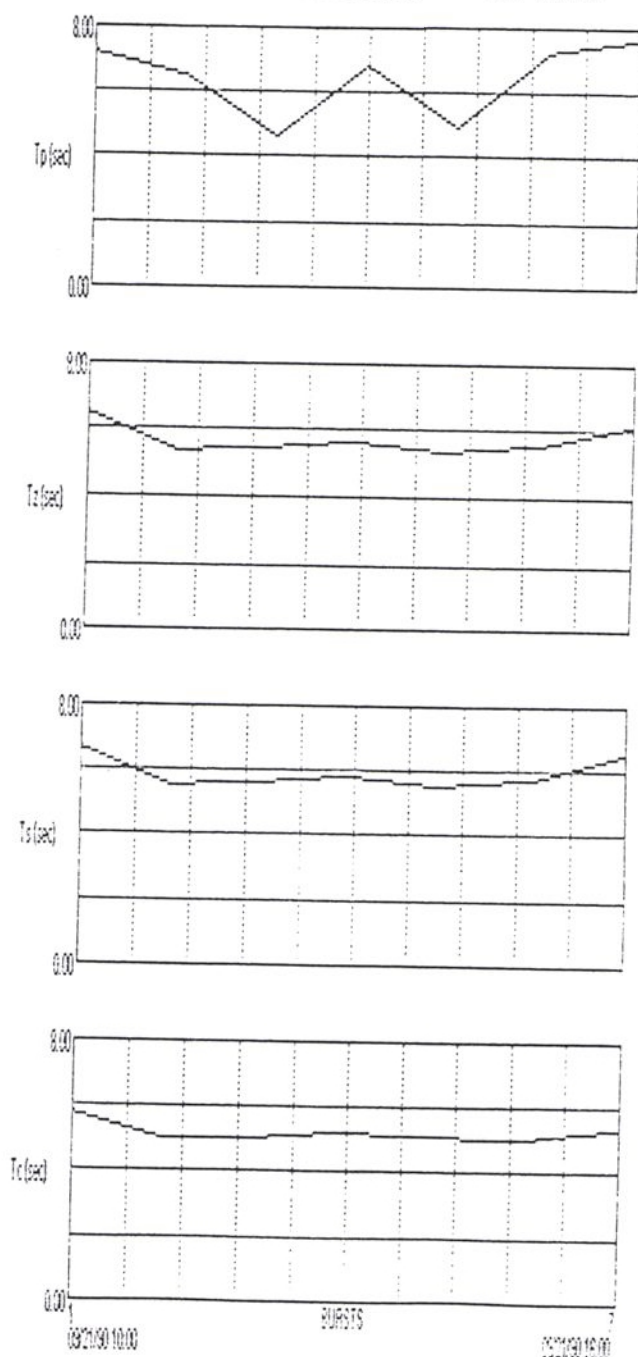
B#	DATE	TIME	STD	HS	TP	TZ	TS	TC	DIR	EPSI
1	09/21/90	10:00	.17	.67	7.2	6.5	6.7	5.8	23.9	.44
2	09/21/90	11:00	.23	.91	6.5	5.4	5.5	5.0	12.2	.37
3	09/21/90	12:00	.21	.83	4.6	5.5	5.6	5.0	15.6	.41
4	09/21/90	13:00	.15	.61	6.8	5.7	5.9	5.2	14.5	.40
5	09/21/90	14:00	.15	.60	5.0	5.4	5.5	5.1	351.3	.33
6	09/21/90	15:00	.15	.61	7.2	5.6	5.7	5.1	14.0	.40
7	09/21/90	16:00	.11	.43	7.6	6.2	6.5	5.4	15.0	.50



InterOcean Systems, Inc

WAVE PERIOD ESTIMATES

FILE: luc7h.S4B



InterOcean Systems, Inc

WAVE PARAMETERS

FILE: luc7h.S4B

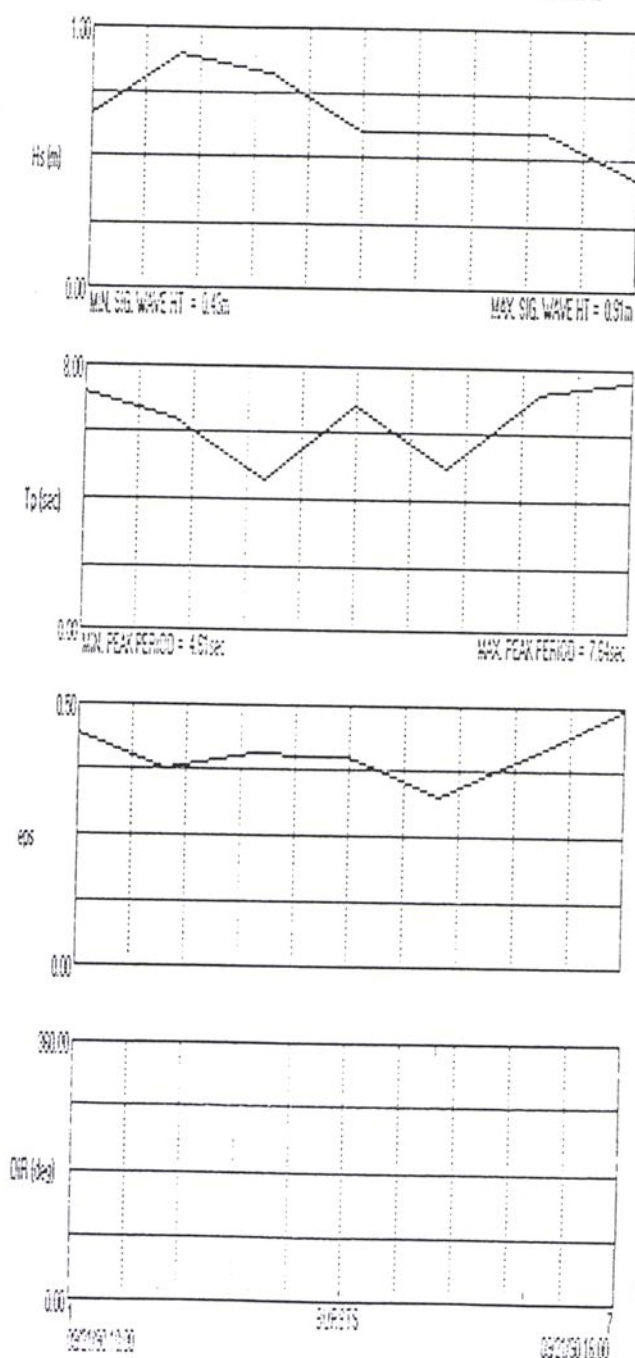


Fig.11: Résumé des résultats sur les caractéristiques de la houle pour la totalité d'une expérience

Le matériel de topométrie comporte deux appareils différents (photo 5):

- un théodolithe électronique T 1000 d'une précision angulaire de 3". Cet appareil possède une lunette permettant un grossissement de 30 fois. L'affichage des données est à cristaux liquides. Il permet de visualiser les différentes valeurs constituant un bloc de mesures topométriques. De nombreuses corrections (collimation horizontale, courbure terrestre, réfraction moyenne...) sont directement intégrées au niveau de l'affichage des mesures ou du stockage en mémoire. Ce stockage s'effectue sur une mémoire CMOS de 16 Ko, remplaçant le carnet de terrain. Environ 500 blocs de données peuvent être stockés sur cette mémoire. Une batterie externe Cd-Ni permet une autonomie de travail d'environ 9 heures.

- un distancemètre électro-optique DI 1000 est monté sur le théodolithe T 1000. Il permet de mesurer les distances grâce à l'émission d'une onde infra-rouge de 0,865 m qui se réfléchit sur un prisme. Avec un seul réflecteur, la portée du distancemètre est de 800 m dans des conditions moyennes. Elle est repoussée à 1200 m avec une batterie de 3 prismes. L'écart-type des mesures de distance est de 5 mm + 5 mm/km. La durée de la mesure varie entre 5 et 10 s en fonction de la distance, mais il est possible d'effectuer des mesures répétitives toutes les 0,3 secondes.

Les données recueillies dans un format prédéfini sont stockées sur une mémoire Rec-module. La récupération de ces données sur un micro-ordinateur s'effectue par le biais d'une interface de relecture Wild Gif 10.

2) Le traitement des données

Les données sont récupérées sous la forme d'un fichier par le progiciel TOPOJIS qui fonctionne sur un ordinateur PC. Ce logiciel permet de réaliser de nombreux traitements topométriques, indispensables à la validation et à la présentation des mesures recueillies sur le terrain. Ainsi, les données, une fois récupérées, peuvent être corrigées, modifiées et préparées pour les étapes ultérieures du traitement.

Ce programme permet le calcul de polygonales, de rayonnement, de triangulation et trilatération, ainsi que de nivellement direct.

D'autres modules permettent:

- de travailler en interactif à l'écran sur divers problèmes de géométrie,
- de créer des modèles numériques de surfaces (M.N.S),
- de tracer des plans et de les reporter sur imprimantes ou table traçante,
- de saisir ou de générer automatiquement des profils en long et en travers, d'interpoler des profils sur un modèle numérique de surfaces, d'effectuer des calculs de cubatures sur des profils ou des surfaces.

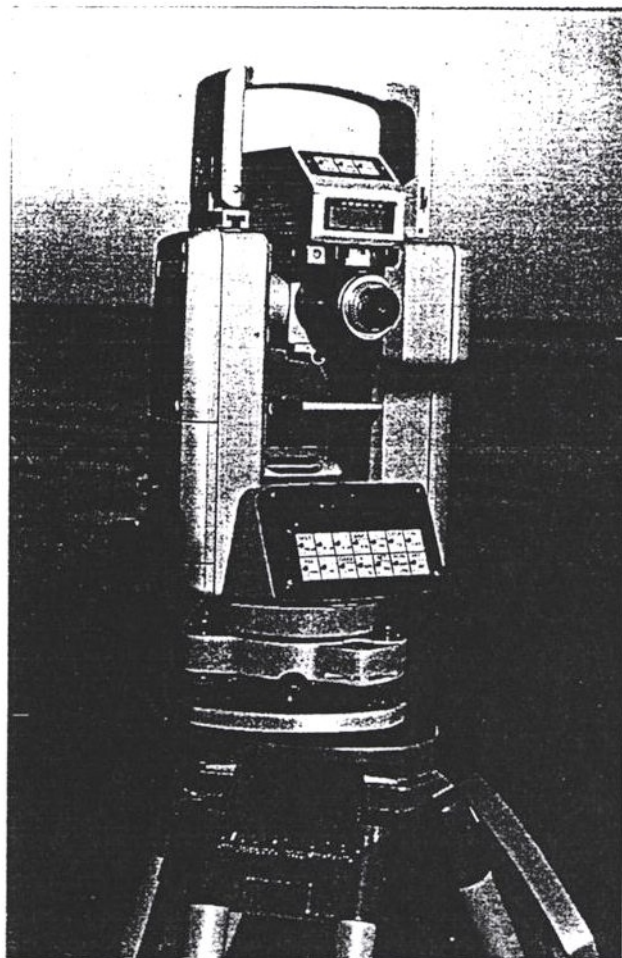


Photo 5: Théodolithe électronique T.1000 et distancemètre infra-rouge DI.1000

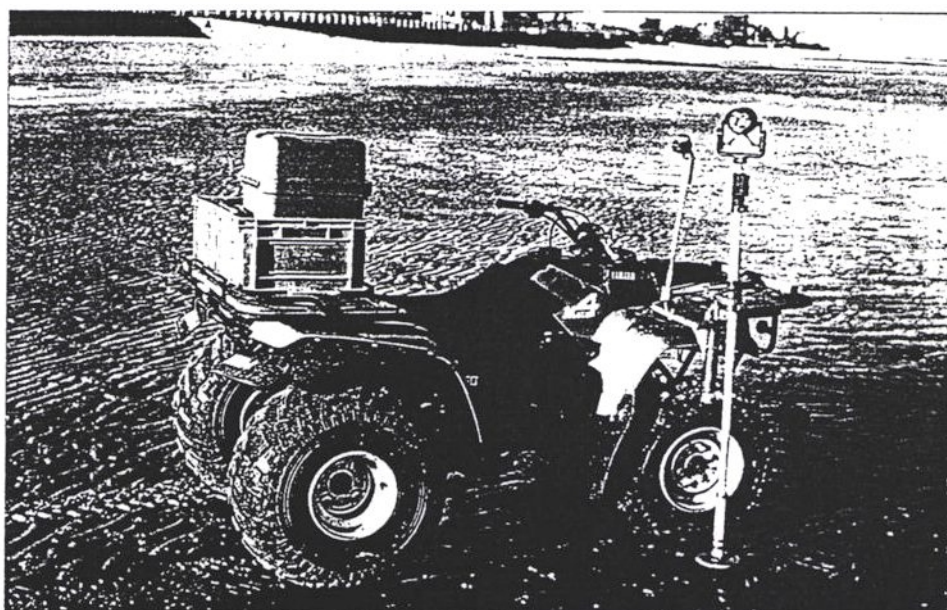


Photo 6: Prisme réflecteur pour distancemètre DI.1000 monté sur un véhicule Quad Yamaha

3) *La réalisation des levés sur le terrain*

Les levés topographiques qui seront effectués sur la côte ouest du Cotentin sont essentiellement des profils de plage. Quelques levés comportant des points rayonnés seront réalisés à proximité des embouchures des havres où l'évolution morphométrique des fonds ne peut être appréciée à partir de profils perpendiculaires au tracé de la côte.

La réalisation des profils de plage nécessite l'existence d'un réseau de repères fixes pour permettre un recalage des points levés en coordonnées X,Y et Z. Un réseau de bornes en bois sera installé sur le haut estran de la côte ouest du Cotentin (annexe 5). Chaque borne constituera un sommet d'une polygone de base, dont la planimétrie et l'altimétrie seront déterminées.

Chaque profil, dont l'implantation est précisée dans l'annexe 6, sera orienté suivant un axe passant par la borne supérieure et la borne inférieure du couple de repères. Grâce à l'utilisation du théodolithe électronique et de son distancemètre, une seule mise en station sera effectuée par profil. Celui-ci sera raccordé à la borne la plus proche.

Le réseau de bornes sera également utilisé pour positionner chaque expérience sur l'estran durant les campagnes de mesures de courte durée.

Pour effectuer le levé des points, le prisme réflecteur retournant le rayonnement infra-rouge vers le théodolithe est fixé sur un véhicule tout-terrain (photo 6). La communication entre l'opérateur au théodolithe et le conducteur du véhicule s'effectue par talky-walky. Ainsi, les larges estrans de la côte ouest du Cotentin seront couverts topométriquement en un minimum de temps, faisant face notamment aux contraintes de marées.

4) *les essais réalisés à Luc-sur-mer.*

Ils ont consisté à implanter une petite polygone de base sur la digue devant le laboratoire maritime, et à réaliser un semis de points sur l'ensemble de l'estran. L'objectif était de s'assurer du bon fonctionnement du matériel de mesures et de tester les possibilités du logiciel TOPOJIS.

Quelques résultats des calculs topométriques effectués sont présentés en annexe 7.

Respectivement, les données fournies par le logiciel sont:

- le carnet de terrain,
- le calcul brut du canevas polygonal,
- les calculs en angles verticaux et horizontaux compensés et la tolérance admise suivant un choix prédéfini.

L'ensemble de ces résultats sont ensuite repris pour réaliser des sorties graphiques présentant des courbes de niveaux, des profils en long ou en travers, des calculs de volumes.

IV) LES PIEGES A SEDIMENTS EOLIENS

1) Description du matériel

Depuis plus d'un an, des modèles de pièges à sédiments éoliens sont testés au Laboratoire de Géologie marine de l'Université de Caen. Ces études se sont basées sur les travaux réalisés par des équipes de chercheurs et d'ingénieurs aux Etats-unis, au Japon, en Afrique du Sud, en Pologne et en Grande-Bretagne.

Ces recherches ont permis de définir et de fabriquer deux types de pièges complémentaires, qui seront utilisés simultanément pour apprécier les débits solides éoliens sur la côte ouest du département de la Manche.

* les pièges verticaux:

Ils sont constitués de deux parties (photos 7 et 8):

- la partie aérienne est formée d'un tube de plexiglas de 5 cm de diamètre et de 74 cm de haut. Ce tube est percé de deux fentes diamétralement opposées, l'une de 1 cm de large qui est située au vent, l'autre de 2 cm de large, recouverte d'une maille de tamis de 180 microns, qui est localisée sous le vent, facilitant l'écoulement des filets d'air dans le piège. L'extrémité inférieure de la fente au vent est située à 2 cm de la surface de la plage (fig.12).

- la partie enterrée dans le sable est constituée d'un recipient hermétique en PVC, à l'intérieur duquel, une cuve receptrice solidaire du tube en plexiglas est montée sur un axe pivotant.

Une dérive permet à la fente ouverte au vent de correctement se positionner perpendiculairement aux flux d'air.

* Les pièges horizontaux

Ils se présentent sous la forme de boites rectangulaires qui se trouvent totalement enfoncées dans le sable. Leur fonctionnement est relativement simple. Le couvercle du piège se soulève d'une hauteur de 2 cm permettant le captage des sédiments qui se déplacent par charriage ou saltation à la surface de la plage. Les filets d'air se trouvent canalisés dans le piège grâce à l'existence d'une fenêtre en maille polyester de 180 microns située à l'extrémité du couvercle (photo 9 et fig.13).

Ce type de piège devient progressivement moins efficace au fur et à mesure que la vitesse du vent augmente.

L'utilisation simultanée des pièges verticaux et horizontaux permet d'obtenir des mesures de débits solides éoliens plus précises. Néanmoins, compte tenu du rôle perturbateur relativement important que jouent les pièges verticaux sur les écoulements d'air, il a été nécessaire de réaliser de nombreux tests en laboratoire afin de déterminer, outre la précision des mesures effectuées avec ces pièges, le coefficient de correction à apporter aux mesures in situ pour obtenir les débits vrais.

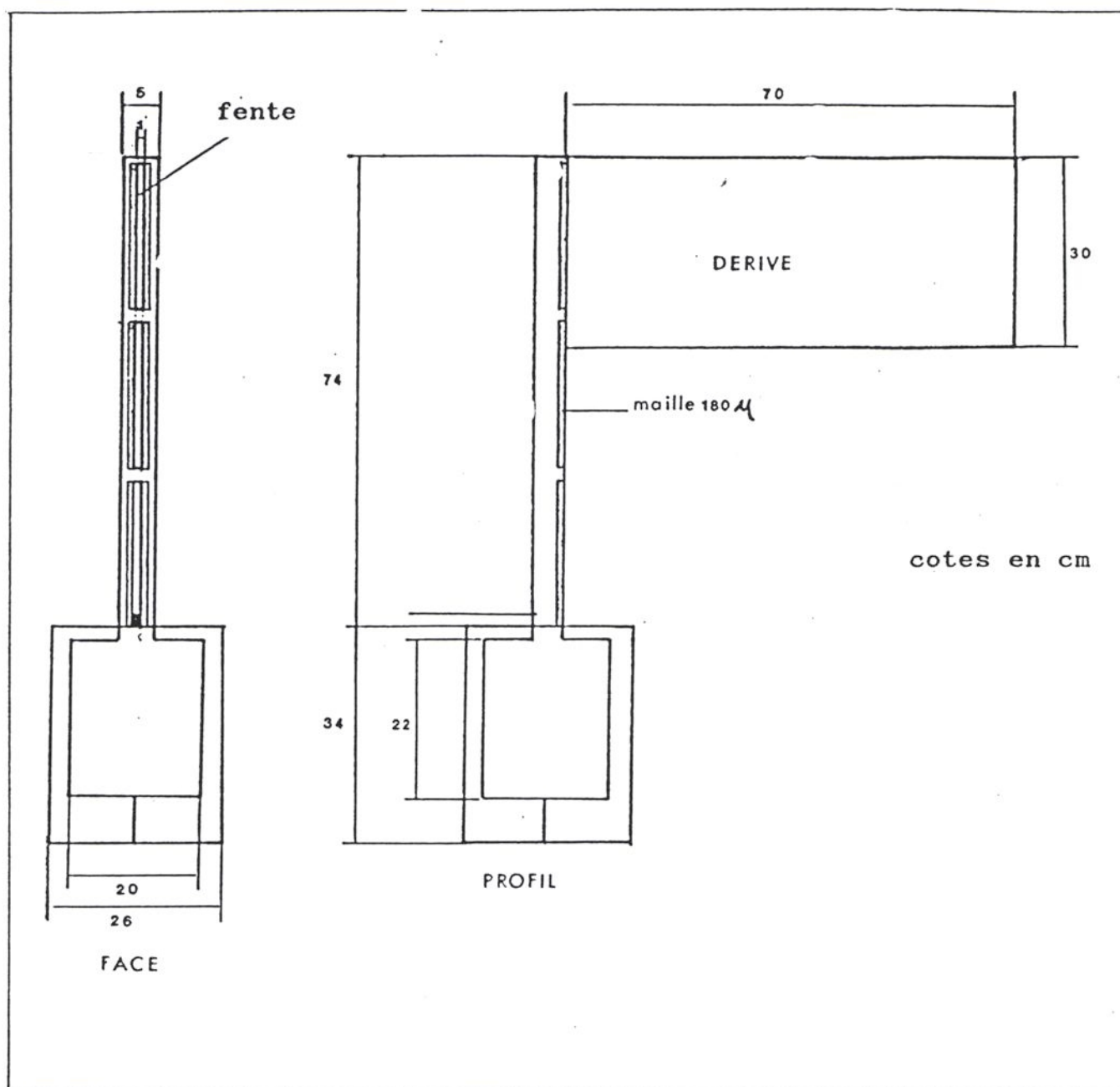


Fig.12: Piège vertical à sédiments éoliens

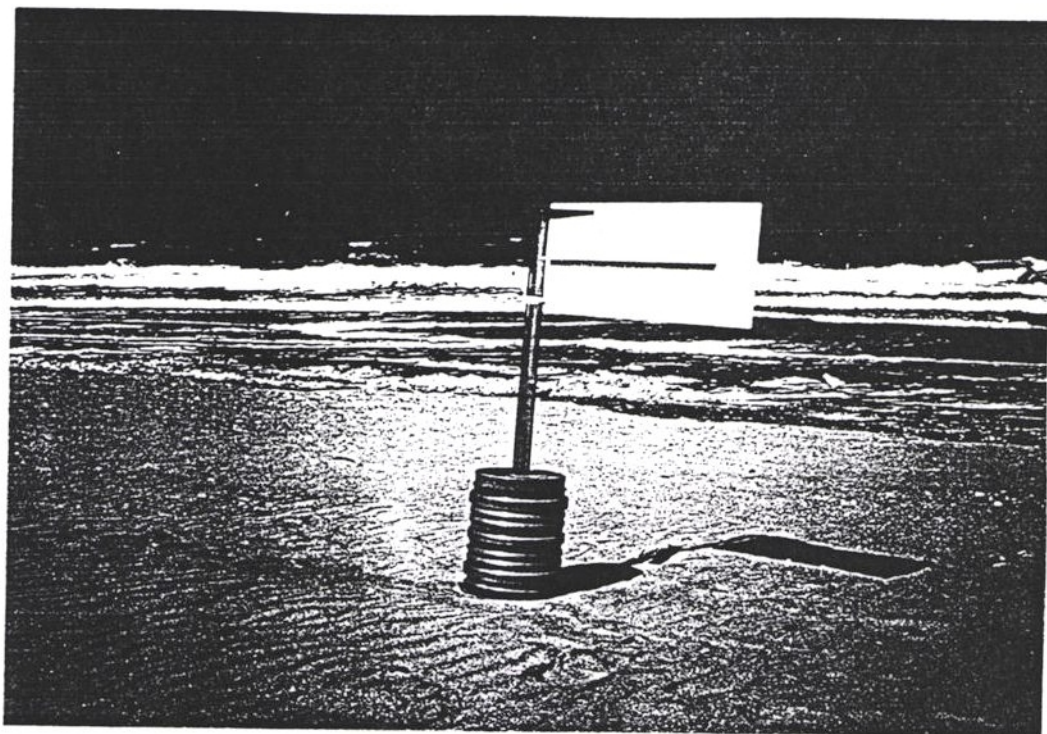


Photo 7: Piège vertical à sédiments éoliens: présentation

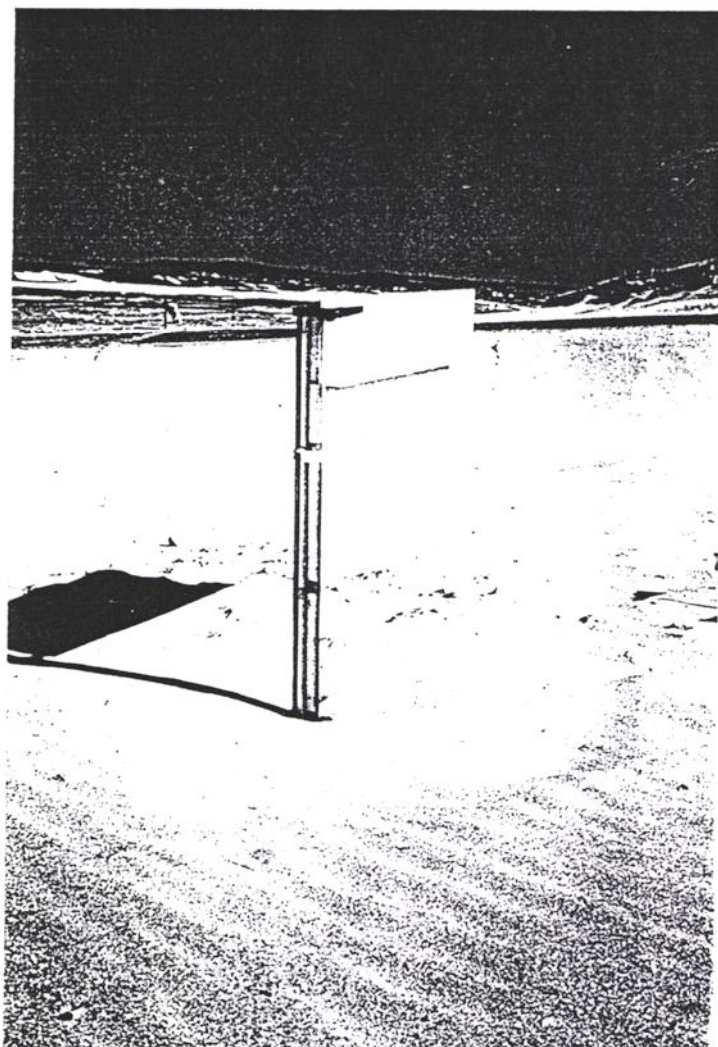


Photo 8: Piège vertical en fonctionnement

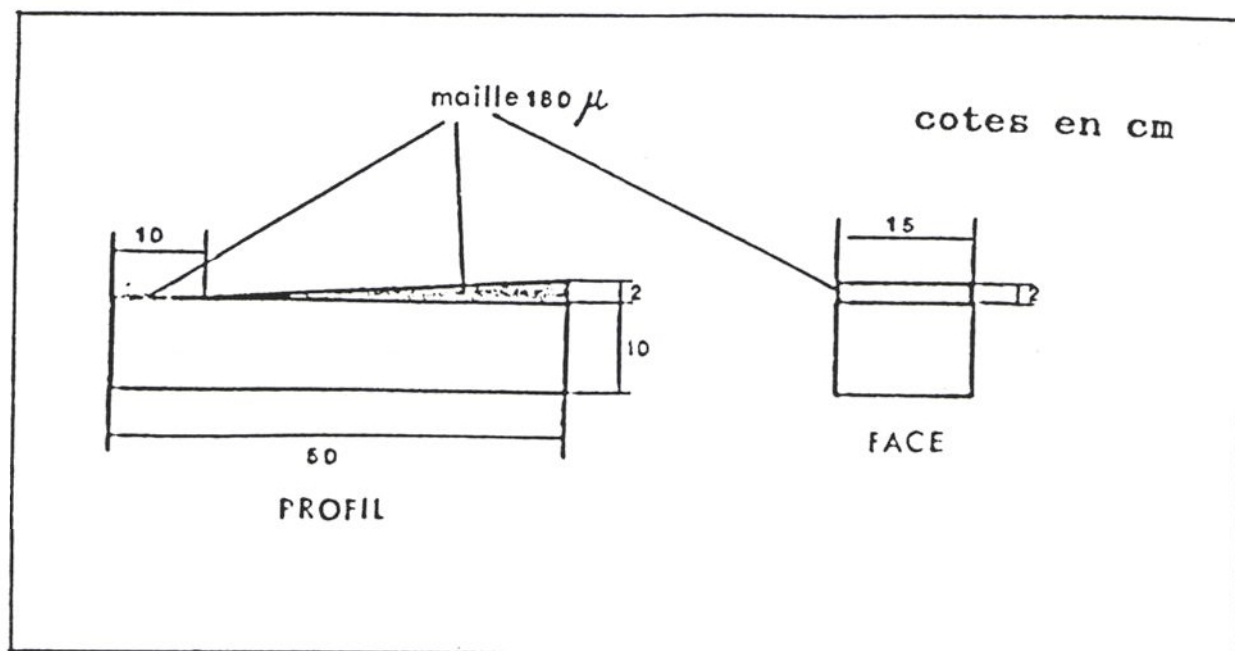


Fig.13: Piège horizontal à sédiments éoliens

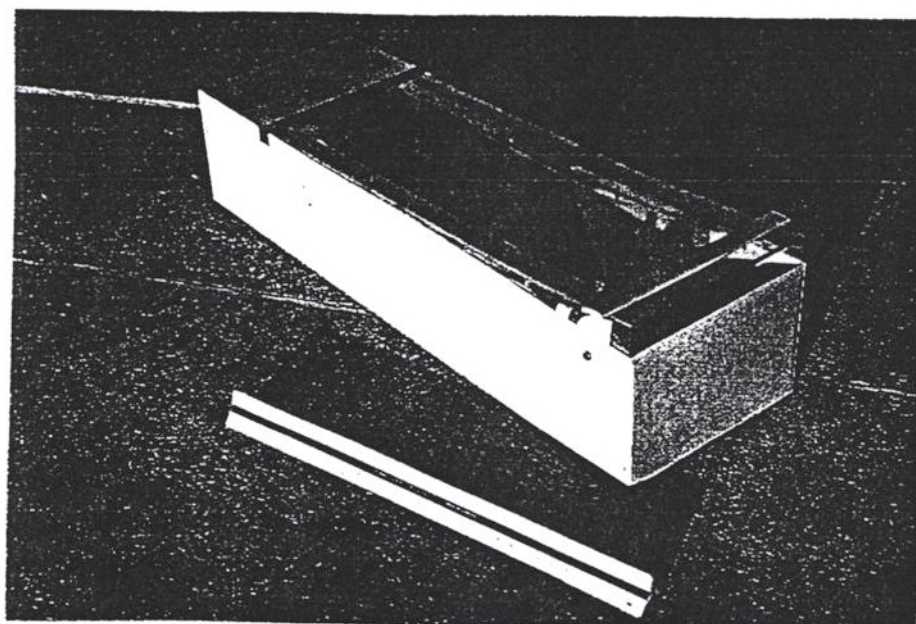


Photo 9: Piège horizontal à sédiments éoliens

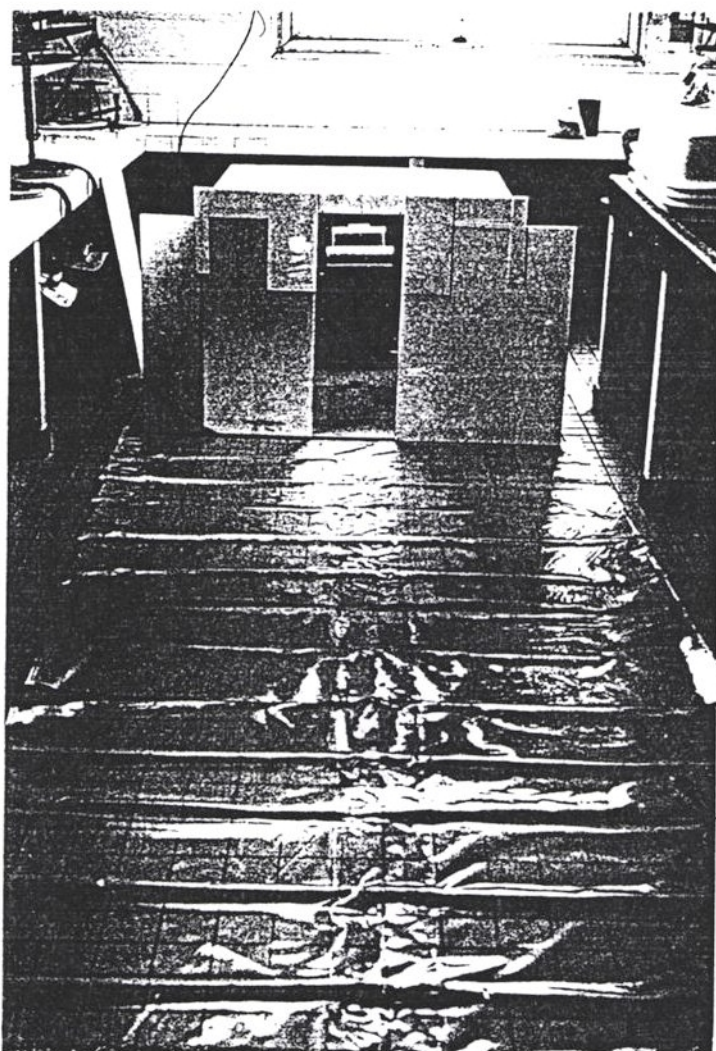


Photo 10: Dispositif de tests des pièges à sédiments éoliens

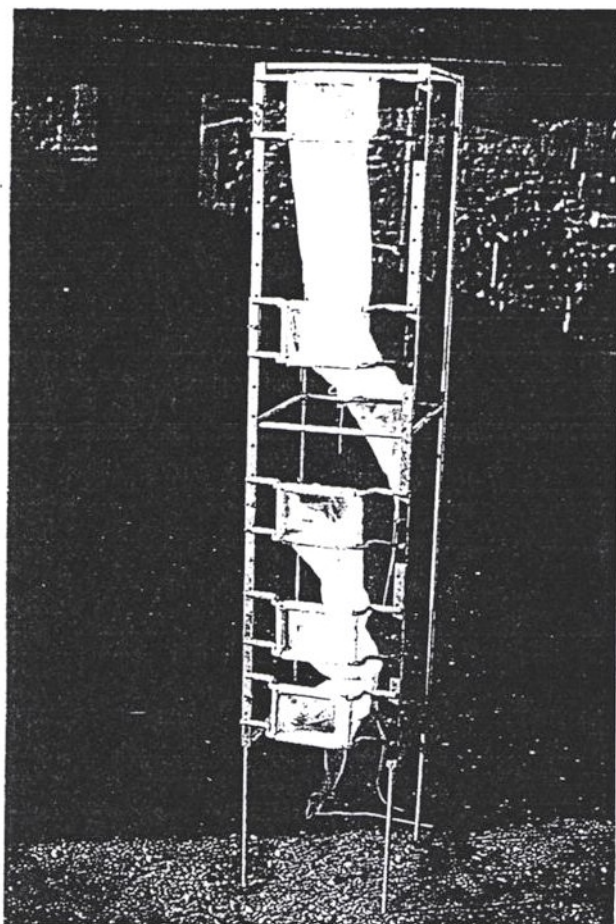


Photo 11: Pièges utilisés dans le déferlement

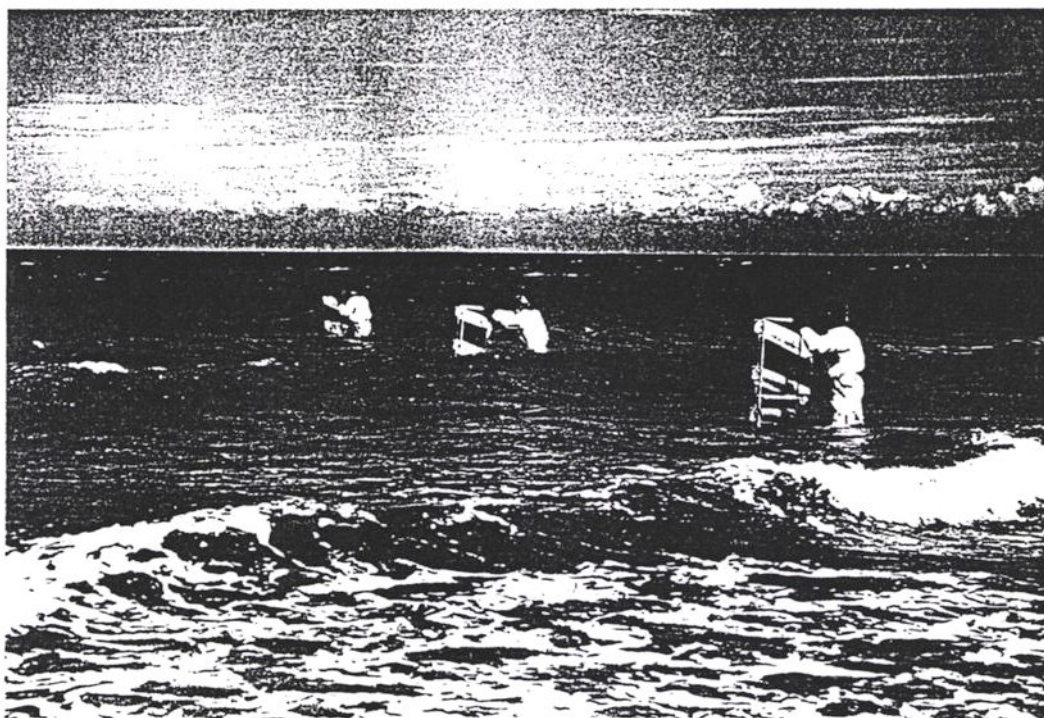


Photo 12: Mise en oeuvre in situ des pièges à sédiments pour le déferlement

2) Etalonnage des pièges verticaux

Une soufflerie a permis de générer un transport de sédiments à l'intérieur d'un tunnel dont l'extrémité comporte une fente d'une section connue. En premier lieu, il a été possible de déterminer, après de nombreux essais, le rapport entre le volume de sédiments projeté en dehors du tunnel et le volume total de sédiment injecté dans la soufflerie. Ensuite, en plaçant le piège vertical à l'extrémité du tunnel, une comparaison entre les volumes de sédiments recueillis dans le piège et étendus à la section de la fente du tunnel et le volume total sortant réellement de cette fente a permis de déterminer l'efficacité du piège (photo 10).

Les tests ont montré que les pièges verticaux captaient, en moyenne, 76,7% du débit solide réel et que la précision des résultats obtenus était de plus ou moins 12,7%.

La mise en oeuvre sur le terrain de ces différents types de pièges est aisée. Des essais préalables ont été réalisés sur la plage de Vauville dans le Nord-Cotentin permettant de définir la morphologie du piège à utiliser. Récemment, d'autres essais ont été réalisés sur la plage de Merville-Franceville. Les mesures de débits n'ont pas pu être confrontées à des données météorologiques, mais les aspects pratiques de la mise en oeuvre et de la fonctionnalité du matériel sur le terrain dans des conditions de vents forts ont été résolus.

Ainsi, la durée des mesures de piègeage est fonction de la vitesse du vent et de l'intensité des transports sédimentaires. Cette durée varie de quelques minutes à quelques heures. Les sédiments récoltés sont ensuite séchés, pesés, éventuellement tamisés, et leur volume est ramené à une unité de temps par mètre linéaire de plage.

V) LES PIEGES A SEDIMENTS POUR LES TRANSPORTS DANS LE DEFERLEMENT ET SUR LES BASSES PLAGES

1) Les pièges à sédiments dans le déferlement.

1.1) Description du matériel

Les recherches effectuées par le Coastal Engineering Research Center aux Etats-Unis (KRAUS et al, 1989) ont montré que les pièges à sédiments constituent le meilleur moyen pour obtenir des taux de transport de sédiments compatibles avec la précision nécessaire pour simuler l'évolution d'une plage avec les modèles numériques actuellement disponibles.

Ces pièges mesurent directement un flux de sédiments, une quantité directement mise en relation avec le taux de transport et non une simple concentration de sédiments. Le matériel en mouvement, quelque soit sa nature, est directement piégé si sa dimension est supérieure à la maille du filet. Contrairement aux expériences de traceurs, il n'est pas nécessaire de se poser le problème de la représentativité des caractéristiques hydrodynamiques des sédiments.

Les pièges utilisés dans le cadre de l'étude en cours, sont directement inspirés du matériel mis en oeuvre dans le programme DUCK 85, (KRAUS, GINGERICH et ROSATI, 1989) où des mesures du taux de transport dans le déferlement ont été réalisées.

La structure de chaque piège et les nacelles de chaque collecteur ont été construites à la station marine de Luc-sur-mer, avec des barres en acier galvanisé de 12 mm de diamètre. Sur chaque piège, 5 collecteurs seront fixés les uns au-dessus des autres. Au total, 21 positions sont possibles. Le filet de chaque collecteur possède une maille de tamis de 100 microns. Ce diamètre a été défini par rapport à la taille des sédiments qui sont présents sur les bas estrans de la côte ouest du Cotentin. La longueur des collecteurs est de 1 m (fig.11).

1.2) Mesures de l'efficacité des pièges.

De nombreux tests sur la morphologie des pièges ont été réalisés en canal dans les laboratoires du C.E.R.C. ou in situ (ROSATI et KRAUS, 1989). Ces essais récents, publiés après la réalisation des pièges au Laboratoire de Géologie marine de l'Université de Caen, ont permis d'apprécier la validité des mesures effectuées avec ce matériel. L'efficacité hydraulique moyenne du dispositif, (E_h = vitesse du courant avec un collecteur/ vitesse du courant au même endroit, sans collecteur) à mi-hauteur d'eau dans des courants unidirectionnels variant entre 22 et 74 cm/s, est de 0.91. Dans ce cas, la présence d'un collecteur ralentit la vitesse du courant de manière acceptable. Sur le fond, ce coefficient varie entre 0,61 pour un courant de 22 cm/s à 0,97 pour un courant de 74 cm/s.

Ces modifications du champ de courants à proximité des pièges perturbent le débit solide. Des tests au C.E.R.C. ont également été effectués pour apprécier ce problème. L'efficacité sédimentométrique des pièges est évaluée par la valeur du rapport E_s , qui est égale au débit solide mesuré avec un collecteur divisé par le débit solide mesuré sans le collecteur (utilisation d'autres méthodes). Les tests réalisés ont montré qu'à mi-hauteur par rapport à la lame d'eau totale, E_s était de $0,92 \pm 0,0024$. Par contre, pour un collecteur posé sur le fond, E_s est de $0,13 \pm 0,50$. Par ailleurs, de nombreux affouillements ont été constatés à la base de ces collecteurs.

Il apparaît que l'utilisation de pièges à sédiment pour le déferlement, avec des collecteurs, tels qu'ils ont été définis dans le programme DUCK85, donne des résultats satisfaisants pour des mesures effectuées au-dessus des fonds. Par contre, pour des mesures de débits solides sur les fonds, l'efficacité des collecteurs est médiocre. De nouveaux collecteurs, spécialement conçus pour la réalisation de mesures sur les fonds sableux, sont en cours de fabrication.

1.3) Mise en oeuvre sur le terrain

L'utilisation de pièges pour estimer les débits solides dans le déferlement nécessite une équipe de 4 personnes munies de combinaisons de plongée étanches. Chaque piège est alors tenu par une personne, le groupe étant disposé perpendiculairement au tracé de la côte (photo 12).

L'ouverture des collecteurs regarde dans une direction parallèle à la côte, suivant l'incidence des crêtes de houles. Chaque piège est positionné en distance sur un axe par rapport à une origine connue en X, Y et Z.

La durée des expériences n'excède pas 15 minutes. Par contre, compte tenu du marnage sur la côte ouest du Cotentin et des modifications des caractéristiques de la houle en fonction de la hauteur d'eau, ces expériences seront répétées plusieurs fois au cours d'un cycle de marée.

L'utilisation de ces pièges n'est cependant plus réalisable quand la hauteur des vagues déferlantes atteint environ 1 m.

1.4) Le calcul du taux de transport.

Contrairement à d'autres techniques (capteurs optiques ou acoustiques, pompes à sédiments...) qui mesurent la concentration en sable, les collecteurs permettent d'apprécier un poids de sédiments passant au travers d'une section durant un intervalle de temps. Si l'on considère un courant unidirectionnel, en théorie, aucune perte de sédiments n'est possible et le flux solide peut directement être associé à des mesures de courants pour établir de nouvelles relations.

Le débit de sable pour un collecteur peut être estimé par la relation:

$$Q(c) = \frac{P(c)}{h \cdot w \cdot t}$$

où $Q(c)$ = le débit en $\text{Kg}/(\text{m}^2\text{-sec})$,

c = le numéro du collecteur,

P = le poids sec de sable en Kg ,

h = la hauteur du collecteur,

w = la largeur du collecteur,

t = la période d'échantillonnage en secondes.

Une loi évaluant les débits solides en fonction de la hauteur de chaque collecteur sera définie par ajustement à partir des mesures réalisées sur le terrain. Les résultats seront ensuite intégrés sur la verticale du piège et sur l'ensemble du profil de mesures perpendiculaire à la côte.

Les essais réalisés à Luc-sur-mer se sont attachés à définir la méthode de mise en oeuvre sur le terrain, sans exploiter les échantillons de sédiments recueillis.

2) Les pièges à sédiments utilisés sur les basses plages

2.1) Description du matériel

Les pièges à sédiments réalisés pour évaluer les débits solides sur les basses plages de la côte ouest du Cotentin, en parallèle des expériences de traceurs fluorescents, ont été conçus et fabriqués à la Station marine de Luc-sur-mer.

Ils sont inspirés, d'une part des travaux américains présentés en partie ci-dessus, et des travaux japonais dans le cadre du programme "Neashore Environment Research Center".

Ces pièges dits multidirectionnels, fabriqués en acier galvanisé, sont posés sur une plaque de polystyrène extrudé quand l'estran est constitué de sable, ou à même la roche au-dessus des platiers. Ils sont solidement ancrés, soit par des pieds en acier, soit grâce à des haubans en inox, suivant la nature du substrat rencontré (photo 13).

Des collecteurs du même type que ceux qui sont utilisés pour les pièges à déferlement peuvent être fixés dans 8 directions différentes et sur 10 niveaux. Les collecteurs situés sur le fond ont été modifiés, suite à de nombreux essais in situ, afin de réduire au maximum les affouillements créés par la structure. Ainsi, ces derniers ont été réalisés en fer plat, sans points d'attache latéraux, afin de minimiser leur impact sur les écoulements (photo 14).

2.1) L'efficacité des pièges multidirectionnels

Aucun essai en canal n'a été effectué avec ce type de piège. Seuls des principes repris d'expériences étrangères pour certains éléments du piège permettent de limiter la perturbation induite par la structure sur les écoulements. Ainsi, les collecteurs, qui sont localisés à proximité du fond, ont une forme pratiquement identique à des collecteurs d'efficacité sédimentométrique de 0,7 environ.

Des essais restent à réaliser pour valider l'efficacité de ces pièges, notamment pour les collecteurs situés à proximité de fonds sableux. Les moyens mis en oeuvre pour parvenir à cette validation seront diversifiés (utilisation de caméra sous-marine, mise en parallèle avec d'autres techniques, extrapolation des débits de charriage par ajustement de la distribution verticale des débits solides au-dessus du fond, mesurés avec les collecteurs supérieurs).

2.3) Mise en oeuvre sur le terrain

Les pièges multidirectionnels sont implantés sur les basses plages pour la durée d'un cycle marégraphique complet. Leur forme permet donc d'estimer les débits solides, même dans le cas d'une renverse de courant.

En général, huit collecteurs sont placés sur le piège à trois hauteurs différentes par rapport au fond. Mais diverses solutions sont envisageables, notamment pour mieux apprécier le gradient de transport sur une colonne d'eau au plus égale à la hauteur totale du piège.

Actuellement, ces pièges intègrent l'ensemble des transports sédimentaires à un endroit précis de l'estran. En fonction des débits solides qui seront rencontrés sur la côte ouest du Cotentin, où les vitesses de courants de marée peuvent être élevées, des améliorations seront probablement nécessaires pour éviter le piègeage des sédiments pendant toute la durée du cycle marégraphique, de la mise en eau à la mise hors d'eau.

Le calcul des taux de transport pour les pièges multidirectionnels est identique à celui présenté pour les pièges utilisés dans le déferlement.

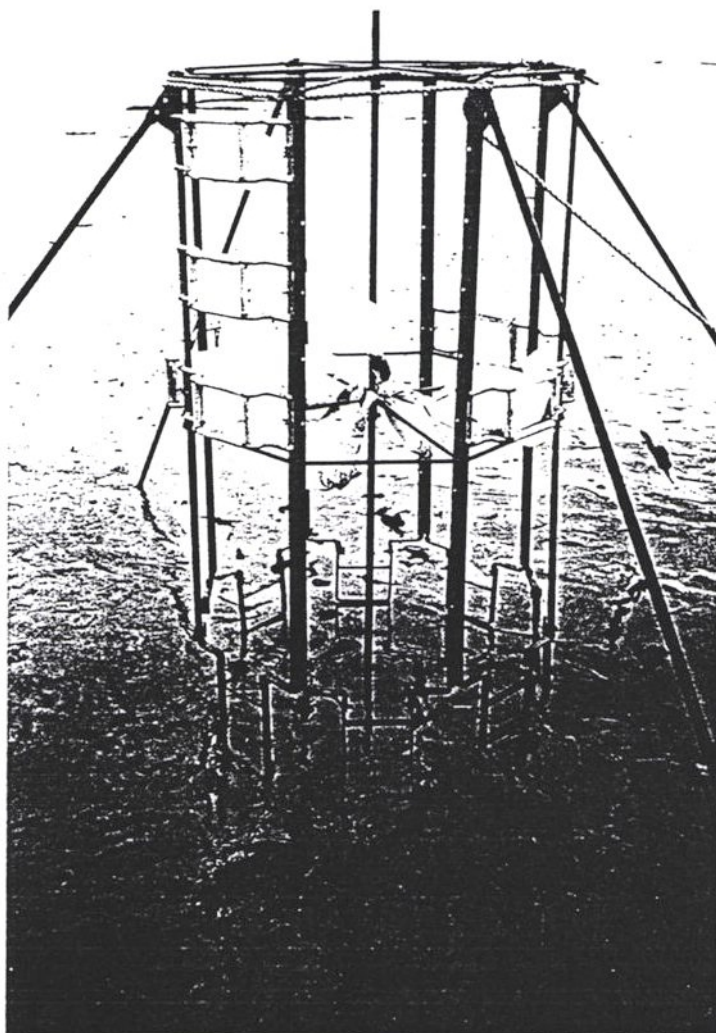


Photo 13: Piège à sédiments multidirectionnel



Photo 14: Vue de détail de la base d'un piège multidirectionnel

CONCLUSION

Ce chapitre présente les premiers essais et tests effectués avec le matériel actuellement réuni et opérationnel. Une seconde partie viendra compléter le présent document.

Il ressort de ces essais que le matériel acquis correspond parfaitement aux besoins qui avaient préalablement été définis. Cependant, la mise au point reste souvent longue et les problèmes liés à l'électronique et à l'informatique sont souvent nombreux.

Les premiers résultats concernant les mesures de courants et de houles sur l'estran de Luc-sur-mer présentent déjà une grande variabilité spatiale et temporelle, qui se retrouvera probablement sur la côte ouest du Cotentin. Cet exemple démontre, une fois de plus, combien il est nécessaire de mesurer, de manière simultanée, les différents processus dynamiques qui peuvent contribuer à la mobilité des sédiments et, en parallèle de pouvoir quantifier ces déplacements eux-mêmes et les changements de morphologie qu'ils induisent.

Les prochaines campagnes de terrain qui seront prochainement réalisées iront dans ce sens, afin de déterminer les causes des phénomènes d'érosion côtières.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

HORIKAWA K. (1988) - Nearshore dynamics and coastal processes; Theory, Measurement, and Predictive Models. University of TOKYO PRESS. 522 p.

KRAUS N.C., GINGERICH K.J. and ROSATI J.L. (1989) - Duck85 surf zone sand transport experiment. Final Report, june 1989. Technical report CERC-89-5. 48 p.

LEVOY F. et LARSONNEUR C. (1990 a) - Etude globale concernant la défense contre la mer, 1ère phase, Synthèse bibliographique, Rapports Ia et Ib. Université de Caen-Conseil Général de la Manche. 103 p. 2 vol.

LEVOY F. et LARSONNEUR C. (1990 b) - Etude globale concernant la défense contre la mer, 1ère phase, Programme de mesures des paramètres dynamiques et de l'évolution des systèmes sédimentaires, Rapport II. Université de Caen - Conseil Général de la Manche. 35 p. annexes.

ROSATI J.D. et KRAUS N.C. (1989) - Development of a portable sand trap for use in the nearshore. Final Report, september 1989. Technical Report CERC-89-11. 109 p. annexes.

ANNEXE 1

S4 responses are shown in red, ideal responses in blue

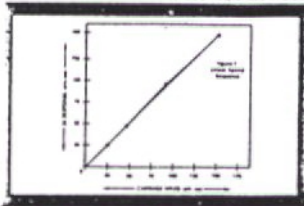


Figure 1 shows the S4 linear speed response. Earlier electromagnetic sensors have smooth surfaces. Their hydrodynamic characteristics change of certain turbulence, vibration and temperature dependent speeds, resulting in non-linear and unrepeatable response. The unique grooved surface of the S4 produces stable hydrodynamic characteristics and ensures exceptional linearity and stability.

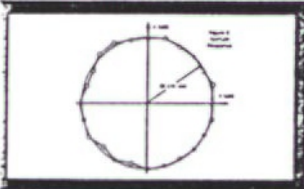


Figure 2 displays the S4 azimuth (horizontal) response in polar form. The speed error is less than 0.7 cm/sec (0.02 ft/sec), resulting in unusually accurate current measurement, unaffected by current direction.

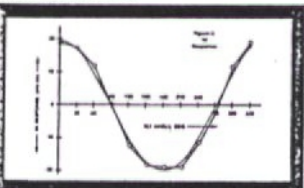


Figure 3 shows that the S4 tilt response closely approximates a cosine function, necessary for accurate performance in the presence of wave or moving induced vessel motion. Important note: The response shown is that of the computer's current meter, not simply that of a current sensor. Other current sensors demonstrate comparable responses, but their accuracy degrades when mounted to bulky and asymmetric housings.

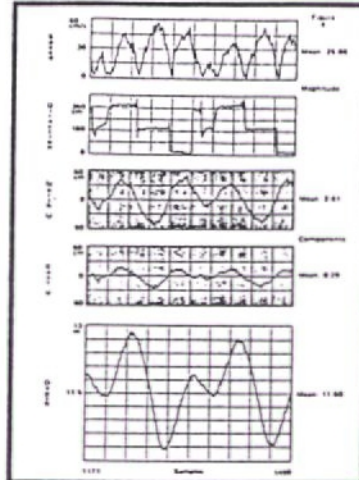
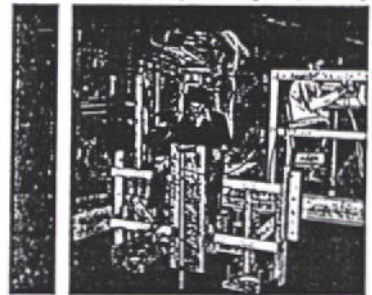


Figure 4 shows data recorded by an S4 in a bay deployment, processed using the standard InterOcean PC-S4 data reduction package. Note the clear definition of speed and direction including the event which includes the small tidal reversal, during which currents averaged less than 10 cm/sec. Note also the high resolution depth record which can be used for accurate analysis of wave and tide events. (Data recorded at 1 minute (60 sample) vector averages every 10 minutes.)



Performance testing being conducted at NofL, Space Tech, Ltd.

SPHERICAL SOLID STATE SENSOR CURRENT METER

ENGINEERING DATA & SPECIFICATIONS

CURRENT SPEED

TYPE: Electro-Magnetic, 2 Axis

RANGE: 0-350 cm/sec (standard)
0-50 and 0-100 cm/sec (optional)

RESOLUTION: 0.2 cm/sec (standard)
0.03 cm/sec (0-50 range)
0.06 cm/sec (0-100 range)

ACCURACY: 2% reading ± 1 cm/sec (0.03 ft/sec)

NOISE: Same as resolution for average of 1 minute or longer
0.05 cm/sec rms for 10 second averages
0.25 cm/sec rms for 2 second averages
0.75 cm/sec rms for burst sampling (0.5 sec rate)

THRESHOLD: Limited only by resolution and noise

VERTICAL RESPONSE: True cosine response (Internally software corrected with Tilt Option)

TIMEKEEPING

TYPE: Temperature stable Quartz oscillator

ACCURACY: $\pm 1-12$ minutes/year

POWER: Non-restricted Lithium battery (5 year life)

OPTIONAL SENSORS

TEMPERATURE

TYPE: Semiconductor (Thermistor or Platinum optional)

RANGE: -50 to $+45^{\circ}\text{C}$

RESOLUTION: 0.01°C

ACCURACY: $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$

RESPONSE TIME: 0.01 sec (Thermistor) or 1.5 sec (Platinum)

CONDUCTIVITY

TYPE: Conductivity

RANGE: $5-70$ mS/cm

RESOLUTION: 0.1 mS/cm

ACCURACY: ± 0.2 mS/cm

PRESSURE

TYPE: Resonance

RANGE: $0-100$ MPa (70 M optional)

RESOLUTION: 0.1 MPa (0.7 M optional)

ACCURACY: ± 0.2 MPa

THRESHOLD COMPENSATION (OPTIONAL)

ANGLE RANGE: ± 45 degrees

RESOLUTION: 0.06 degrees

ACCURACY: (Speed Correction) ± 1.7 of reading
(Angle Output) ± 0.25 degrees

DIRECTION

TYPE: Flux-Gate Compass

RANGE: 360°

RESOLUTION: 0.5°

ACCURACY: 2°

TILT: $\pm 1-25^{\circ}$ for specified accuracy

MEMORY

TYPE: CMOS static RAM (Non-restricted Lithium battery protected)

BATTERY LIFE: 5 years

CAPACITY: 64K Byte (128K or 256K Byte optional)
 $> 87,000$ vector averages may be stored with 256K bytes

MECHANICAL

SIZE: Sphere, 25 cm (10 in.) diameter

WEIGHT: Air, 11 kg (24 lbs.); Water, 1.5 kg (4 lbs.)

MOORING: In-line

THROUGH LOAD: 4,500 kg (10,000 lbs.) working

PAD EYES: Insulating liner, accepts 1.6 cm (5/8 in.) shackle pin

MATERIAL: Sphere, glass-filled cyclopentaphenylene epoxy; Mooring rod, stainless 6 AL-4

DRAW: 4 kg (9 lbs.) at 250 cm/sec (8 ft/sec)

DEPTH: 1,000 M (3,280 ft.) maximum

TEMPERATURE: Storage, -40 to $+50^{\circ}\text{C}$
operating, -5 to $+45^{\circ}\text{C}$

Wave Measurements

When the S4 Current Meter is supplied with the 0 to 70 meter depth option, it has the capability for wave and tide measurements. This depth option provides a resolution of 1 part in 16,363 or 4.27 millimeters water depth. Due to program-memory size limitations, extensive processing of wave data is not performed internal to the S4. However, processing of the depth information obtained from the S4 to derive such wave parameters as Significant Height, Maximum Height, and Average Period is easily done by a host computer.

For wave information, the depth channel should be sampled at 0.5 second or 1 second intervals. To set up the S4 for this mode, enter the command A1 or A2. Then enter the command CAS. The first command sets up the averaging period for recording to either 0.5 seconds (A1) or 1 second (A2). The second command selects the depth channel for recording at the averaging period. See paragraphs 5.6.2 and 5.6.2 of the S4 Users Manual.

When using the S4 in the On-Line remote readout mode (WX or WB command), the host computer can perform the calculations for derived wave parameters in real-time using running averages.

When used in the storage mode (WI command), the wave processing is best done after retrieving all of the data from the S4.

For wave processing, the mean depth and tidal fluctuations may be calculated by averaging the depth data over a two to four minutes period. This mean depth value should then be subtracted from the instantaneous depth value when calculating wave heights and periods. The mean depth values may be used to determine tidal variations.

To correct for wave attenuation due to installation depth, refer to the equations presented in the next column, "Attenuation of Wave Data as Function of Depth". The calculated wave height (H_W) should be multiplied by $1/K$ to obtain corrected wave height. Where K is the wave attenuation factor for the mean depth of the S4. For computers that do not support the hyperbolic functions in the equations for wave attenuation, the following identities may be substituted:

$$\cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

$$\tanh(x) = \frac{1 - 2e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

Many computers support the function e^x in the form "EXP(x)".

ATTENUATION OF WAVE DATA AS FUNCTION OF DEPTH

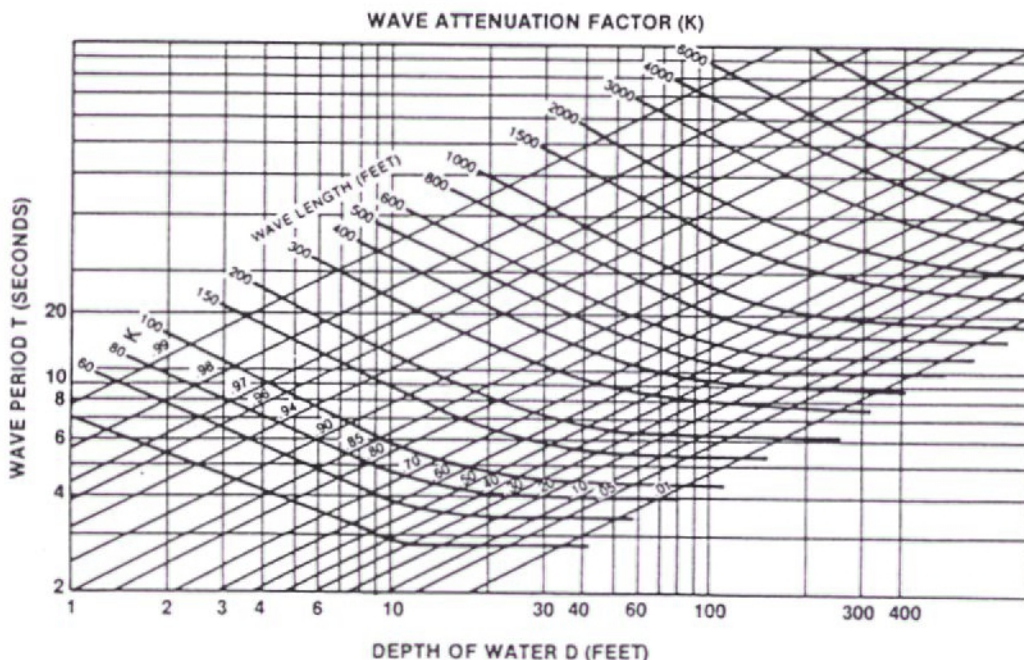
For shallow water waves, that is where the water depth is equal to one-half the predominant wave length, the measured wave amplitude is affected as follows:

$$L = \left(\frac{gT^2}{2\pi} \right) \tanh\left(\frac{2\pi D}{L} \right)$$

where L = wave length
 T = wave period
 and D = depth of water

As deep water waves enter shallow water the length becomes shortened and height increases. The figure below describes the wave amplitude or pressure attenuation on the bottom as a function of water depth and wave period for intermediate waves based on the following equations:

$$K = \left[\cosh\left(\frac{2\pi D}{L} \right) \right]^{-1}$$



THEORY

The wave program utilizes the measured wave pressure information at a point to compute the statistics of sea surface elevation η . The Fourier coefficients of sea surface elevation were obtained by applying the frequency dependent depth correction to the Fourier coefficients of the pressure time series. The correction is given by linear wave theory and is a function of wave frequency. The very large correction required for high frequency waves limits the upper frequency which can be studied (cut off frequency). At frequencies higher than this, small amounts of noise are amplified into spuriously large sea surface variations. The value of the cut off frequency is dependent on the water depth, the distance between the sensor and the bottom and the accuracy of the pressure sensor. The total variance σ^2_η of the sea surface displacement η are obtained by summing the variance in the frequency range up to the cutoff frequency. Thus, very high frequencies greater than the cutoff frequency are not included in the variance. A significant wave height H_s is then obtained through the formula

$$\begin{aligned} H_s &= 4(\sigma^2_\eta)^{1/2} \\ &= 4\sigma_\eta \end{aligned}$$

where σ_η is the standard deviation of surface elevation and is equal to rms value.

From the higher moments of the surface elevation spectrum estimates of ϵ , T_z , T_c are made.

Information about the directional properties of the waves is obtained from the phase differences observed between the surface elevation η and the two components of particle kinematics v_n and v_e . The program gives a mean direction $\alpha(f_i)$ over the frequency range for each burst. In the summary of the results we report the mean direction of the peak frequency (i.e. the direction corresponding to the band with maximum energy. This is to enable the user to compare the mean wave direction between various bursts.

Prior to detailed analysis, each time series is scanned for erroneous data in terms of abnormal amplitudes or slew rates defined as sudden change between two successive measurements. Erroneous data points (spikes) are patched, providing that they occurred in the form of short groups.

The corruption of spectral estimates by values remote from the frequencies under consideration (side lobe leakage) due to the limited sample size can be improved by use of a cosine taper function applied to each time series as

$$x'(t) = c(t) x(t)$$

DEFINITION OF TERMS

GRAVITY WAVES - Waves whose velocities of propagation are controlled primarily by gravity. They have a length greater than 5 cm. Shorter waves are in an indeterminate zone between capillary and gravity waves.

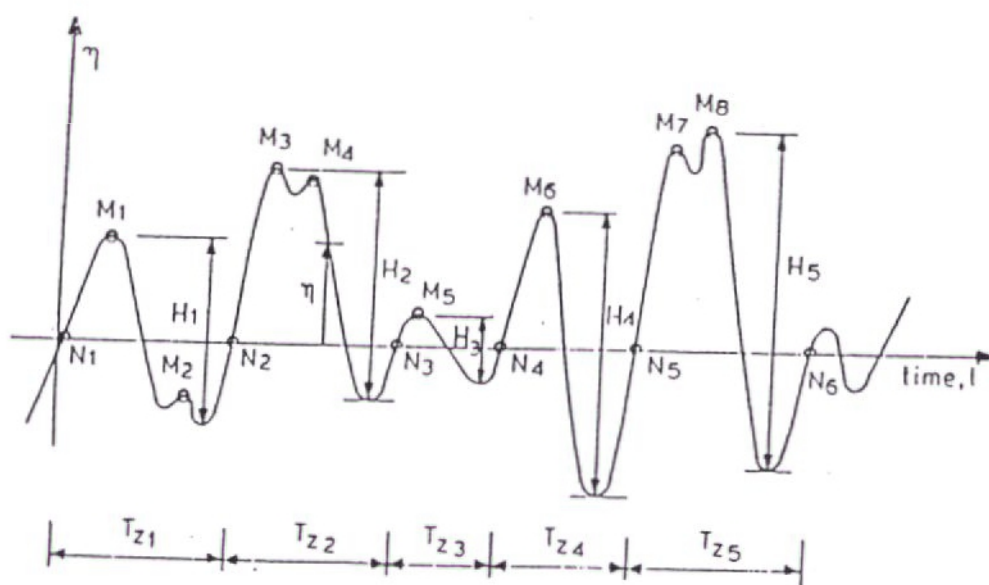
SURFACE ELEVATION (η) - Vertical variation of water surface from mean water level.

MEAN WATER LEVEL (MWL) - Average value of the height of the water column from the sea bed during the sampling period.

Zero up-crossings - The up-crossing of mean water level (MWL) by surface elevation $\eta(t)$.

WAVE HEIGHT (H) - The vertical distance between a highest crest and lowest trough between two successive zero up-crossings.

ZERO-CROSSING PERIOD (T_z) - Average number of surface elevation $\eta(t)$ up-crossings of mean water level (MWL) per unit time.



- η The surface elevation measured from MWL
- N_i Up-crossing of MWL by $\eta(t)$
- M_i Maxima of $\eta(t)$
- T_{zi} Time between successive up-crossings (zero up-crossing period).
- H_i Wave height from highest crest to lowest trough between successive up-crossings.

SIGNIFICANT WAVE HEIGHT (H_s) - The average height of the heighest one-third of the waves of a given wave train.

WAVE SPECTRUM ($S_\eta(f)$) - A graph, table, or mathematical equation showing the distribution of wave energy as a function of wave frequency f .

PEAK FREQUENCY (f_p) - Is the central frequency of the frequency band containing the maximum energy density in the frequency spectrum.

PEAK PERIOD (T_p) - Defined as the reciprocal of the peak frequency ($T_p = 1/f_p$).

SIGNIFICANT WAVE PERIOD (T_s) - Average period computed as the ratio between the first and the zero moments of the spectral density $S_\eta(f)$.

CREST WAVE PERIOD (T_c) - Average time between successive maxima, in the wave random process $\eta(t)$.

WAVE DIRECTION - The direction from which waves approach.

SPECTRAL BAND WIDTH PARAMETER (ϵ) - A measure of the width of the spectrum. ϵ takes values from 0 to 1. For narrow band spectrum ϵ value is near zero. As ϵ approaches 1 the surface elevation spectrum $S_\eta(f)$ is spread out along the frequency axis and the process is now said to be "wide-banded".

ANNEXE 4

InterOcean Systems, Inc
FILE: 1uc9h.s4b

B#	DATE	TIME	STD	HS	TP	TZ	TS	TC	DIR	EPSI
2	09/24/90	11:30	.08	.31	5.4	5.2	5.3	4.9	24.9	.31
3	09/24/90	12:30	.10	.38	4.8	4.9	5.0	4.7	19.7	.29
4	09/24/90	13:30	.07	.29	4.2	4.9	5.0	4.7	4.9	.31
5	09/24/90	14:30	.07	.29	4.8	5.0	5.1	4.8	13.1	.30
6	09/24/90	15:30	.07	.26	5.6	5.2	5.3	4.9	24.8	.34
7	09/24/90	16:30	.07	.28	5.9	5.1	5.3	4.8	14.6	.35
8	09/24/90	17:30	.05	.18	6.2	5.7	5.9	5.2	27.7	.41

InterOcean Systems, Inc
FILE: 1uc16H.s4B

B#	DATE	TIME	STD	HS	TP	TZ	TS	TC	DIR	EPSI
2	10/05/90	09:00	.09	.34	4.8	4.5	4.6	4.2	3.4	.37
3	10/05/90	10:00	.08	.31	4.5	4.7	4.9	4.3	354.6	.40
4	10/05/90	11:00	.07	.27	5.6	4.7	4.8	4.3	.6	.38
5	10/05/90	12:00	.08	.30	5.9	4.8	4.9	4.3	8.0	.44
6	10/05/90	13:00	.07	.30	4.3	4.9	5.2	4.4	1.6	.47
7	10/05/90	14:00	.06	.23	7.6	5.6	5.9	4.8	26.1	.53

InterOcean Systems, Inc
FILE: 1uc15H.S4B

B#	DATE	TIME	STD	HS	TP	TZ	TS	TC	DIR	EPSI
2	10/05/90	09:00	.09	.35	5.4	4.6	4.7	4.2	354.9	.37
3	10/05/90	10:00	.07	.29	3.8	4.6	4.7	4.3	3.9	.38
4	10/05/90	11:00	.07	.29	5.9	4.7	4.9	4.3	8.2	.40
5	10/05/90	12:00	.07	.30	5.0	4.8	5.0	4.3	353.8	.44
6	10/05/90	13:00	.08	.33	7.2	5.1	5.3	4.6	13.1	.45
7	10/05/90	14:00	.07	.27	7.6	5.9	6.2	5.0	20.7	.53

InterOcean Systems, Inc
FILE: 1uc14H.s4b

B#	DATE	TIME	STD	HS	TP	TZ	TS	TC	DIR	EPSI
2	10/05/90	09:00	.08	.33	4.0	4.6	4.7	4.2	358.8	.38
3	10/05/90	10:00	.07	.30	4.8	4.8	4.9	4.5	.9	.37
4	10/05/90	11:00	.07	.27	4.6	4.7	4.8	4.3	344.2	.39
5	10/05/90	12:00	.07	.28	5.9	4.9	5.1	4.3	357.1	.47
6	10/05/90	13:00	.08	.30	7.2	5.3	5.5	4.7	15.0	.47
7	10/05/90	14:00	.06	.23	7.2	5.8	6.1	5.0	16.3	.51

ANNEXE 5

POLITIQUE GLOBALE DE DEFENSE CONTRE LA MER DU DEPARTEMENT DE
LA MANCHE

PROGRAMME DE MESURES IN SITU

MISE EN PLACE D'UN RESEAU DE BORNES SUR LE HAUT ESTRAN DE LA COTE OUEST DU COTENTIN

* **OBJECTIF:** A partir de l'hiver 1990-1991, dans le cadre du programme d'étude sur la protection contre la mer des côtes du département de la Manche, de nombreuses expérimentations de terrain vont se dérouler, durant 3 années, sur les plages situées entre le Cap de Carteret et le bec d'Andaine.

Ces mesures concernent notamment l'évolution de la crête dunaire, l'évolution altimétrique de l'estran, les transits de sédiments sur les plages, les caractéristiques des houles et des courants côtiers.

La mise en place de matériels de mesures sur l'estran nécessite obligatoirement l'existence d'un système de référence fiable, permettant de se repérer en planimétrie et en altimétrie, rapidement et facilement. Un réseau de bornes implanté solidement sur le haut estran permettra de positionner chaque mesure dans un système de coordonnées unique et durable, dont la finalité est de pouvoir effectuer de véritables suivis et ainsi de quantifier des évolutions morpho-sédimentaires.

* **IMPLANTATION:** Le réseau de bornes à implanter est directement inspiré de celui qui existe sur la côte des Pays-Bas et dont les objectifs sont identiques à ceux que nous avons préalablement évoqués. Les bornes sont constituées de poteaux en bois disposés par couple perpendiculairement au trait de côte (photos).

Sur la côte Ouest du Cotentin, ces bornes devront également être disposées deux à deux, espacées de 20 mètres. La borne la plus haute sur l'estran sera située à une distance de 20 à 30 mètres du trait de côte, matérialisée dans le cas présent par la base du talus dunaire ou la base des ouvrages longitudinaux (fig. jointe).

Ces bornes s'élèveront au-dessus de l'estran d'1.20 à 1.50 m environ à la date de leur mise en oeuvre. Leur enfouissement sera tel qu'elles devront supporter un abaissement exceptionnel de la plage de 2 à 3 mètres environ selon les sites.

La distance moyenne entre les bornes sera de 800 mètres (contre 200 mètres aux Pays-Bas). Néanmoins, cette distance varie d'un site à un autre selon l'importance des problèmes à étudier et la morphologie côtière locale. Au total, les cartes au 1/25000 ème ci-jointes localisent les 114 couples de bornes prévus, ainsi que les profils de plage qui seront effectués à partir de celles-ci.

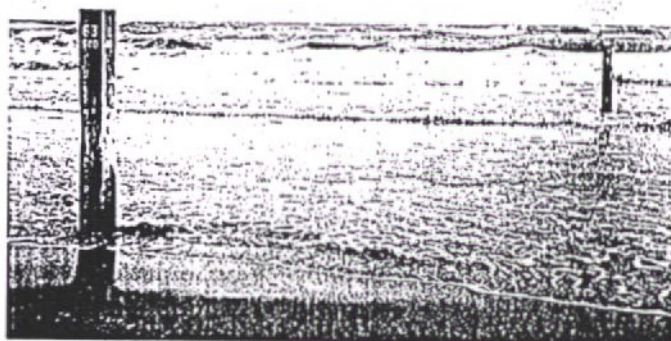
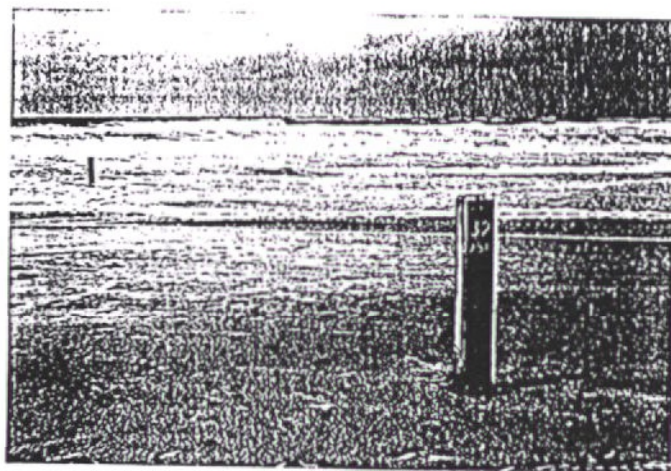
* **SECURITE:** Du point de vue de la sécurité des utilisateurs du haut estran de la côte ouest du Cotentin, compte tenu de leur localisation et de leur hauteur, les bornes situées à proximité du trait de côte ne seront pas recouvertes par la mer, à l'exception de conditions de tempêtes particulièrement violentes, lors de laquelle il n'y a pas d'occupation particulière de l'estran.

Les bornes situées légèrement plus bas sur l'estran devront être prolongées par des perches d'environ 1 mètre afin qu'elles soient visibles lors de conditions de marées de vives-eaux exceptionnelles. Par conséquent, l'extrémité des bornes ou des perches sera toujours visible. Néanmoins, un entretien du réseau de repérage sera nécessaire afin d'avoir un balisage efficace notamment en repeignant régulièrement l'extrémité des bornes d'une couleur particulièrement remarquable.

Une information particulière vis-à-vis des utilisateurs des plages devra être réalisée en parallèle, afin de préciser l'utilité des bornes et, plus globalement, les enjeux de la défense contre la mer sur la côte du Cotentin.

F.LEVOY
Ingénieur d'Etudes,
Responsable technique du projet

EXEMPLE DE BORNES EN BOIS SUR LES PLAGES AUX PAYS-BAS

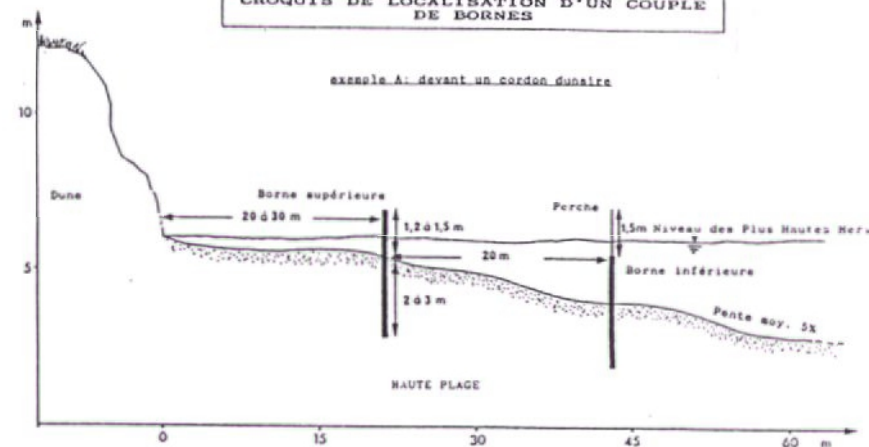


L'altimétrie des estrans aux Pays-Bas est contrôlée à partir de 1200 profils de plage raccordés à un réseau de bornes disposées, par couple, tous les 200 m environ le long de la côte. Les mesures topométriques de l'estran réalisées au moins une fois par an depuis 1964 sont fondamentales pour apprécier les pertes de sables sur les plages et établir ainsi un budget sédimentaire.

DEFENSE CONTRE LA MER DEPARTEMENT DE LA MANCHE MESURES IN SITU

CROQUIS DE LOCALISATION D'UN COUPLE DE BORNES

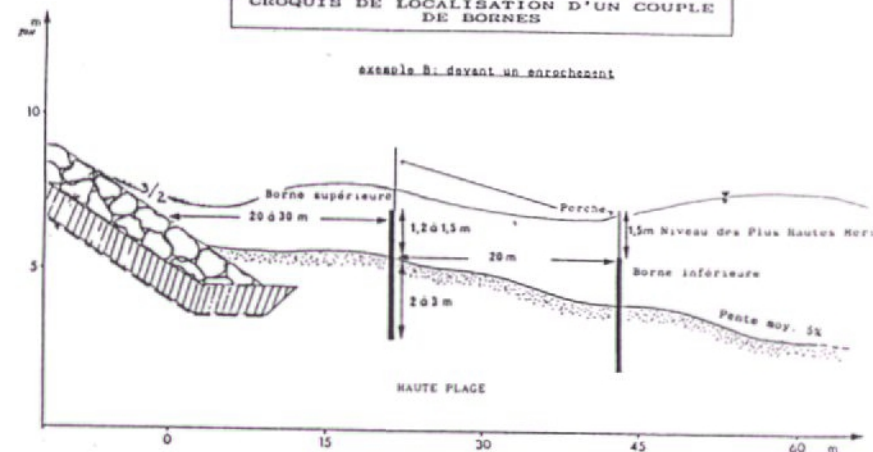
exemple A: devant un cordon dunaire



DEFENSE CONTRE LA MER DEPARTEMENT DE LA MANCHE MESURES IN SITU

CROQUIS DE LOCALISATION D'UN COUPLE DE BORNES

exemple B: devant un enrochement



ANNEXE 6

PROTECTION CONTRE LA MER
DEPARTEMENT DE LA MANCHE
RESEAU DE BORNES POUR LE SUIVI
TOPOMETRIQUE DE L'ESTRAN ET LE
POSITIONNEMENT DES SITES DE
MESURES

SECTEUR 1: BARNEVILLE-CARTERET -
SAINT-GEORGES-DE-LA-RIVIERE



PROTECTION CONTRE LA MER
DEPARTEMENT DE LA MANCHE
RESEAU DE BORNES POUR LE SUIVI
TOPOMETRIQUE DE L'ESTRAN ET LE
POSITIONNEMENT DES SITES DE
MESURES

SECTEUR 2: PORTBAIL - DENNEVILLE



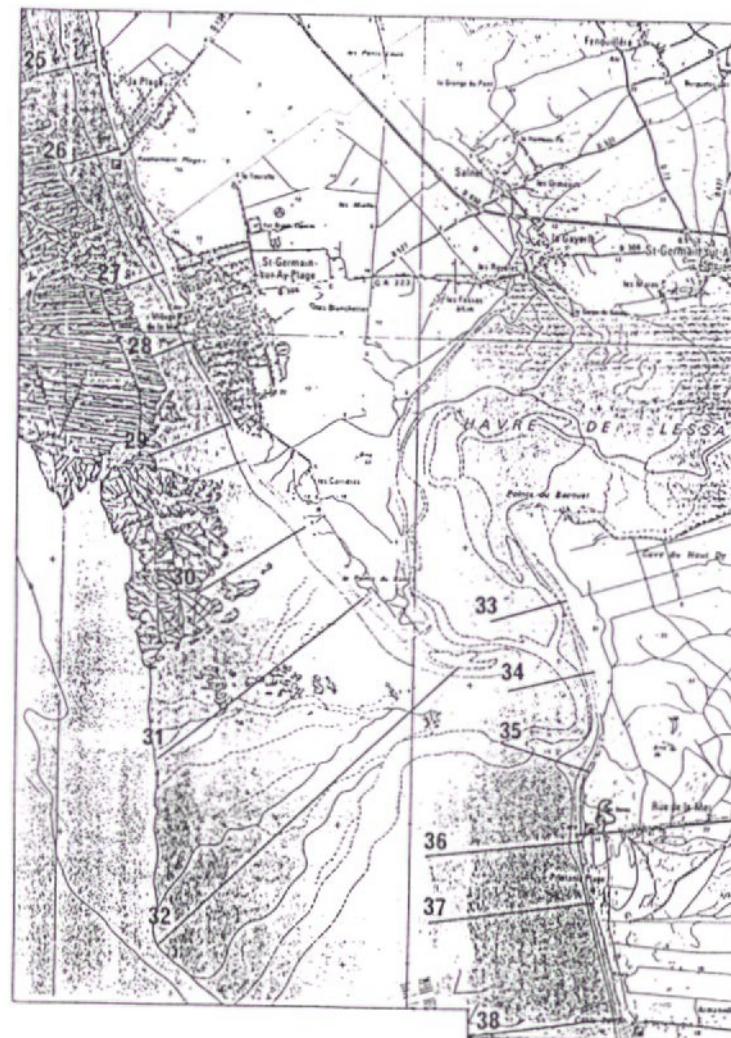
PROTECTION CONTRE LA MER
DEPARTEMENT DE LA MANCHE
RESEAU DE BORNES POUR LE SUIVI
TOPOMETRIQUE DE L'ESTRAN ET LE
POSITIONNEMENT DES SITES DE
MESURES

SECTEUR 3: SAINT-REMY DES LANDES -
BRETTEVILLE-SUR-AY

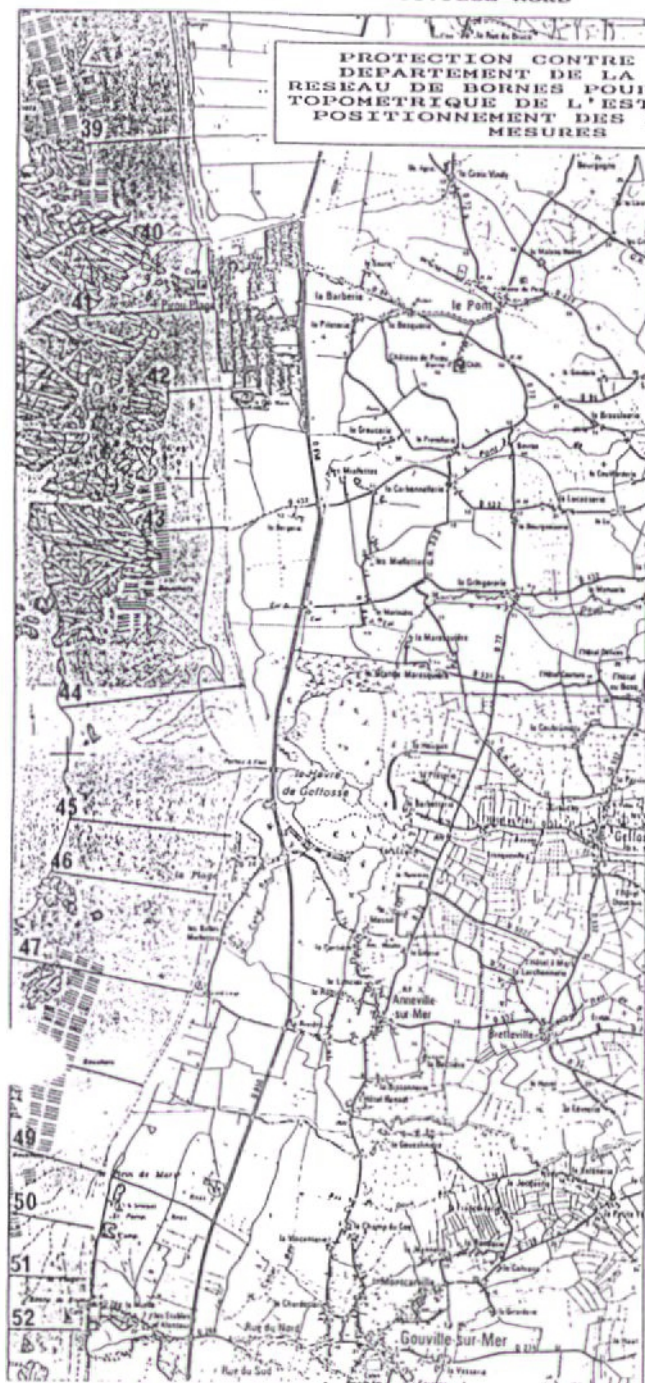


PROTECTION CONTRE LA MER
DEPARTEMENT DE LA MANCHE
RESEAU DE BORNES POUR LE SUIVI
TOPOMETRIQUE DE L'ESTRAN ET LE
POSITIONNEMENT DES SITES DE
MESURES

SECTEUR 4: SAINT-GERMAIN-SUR-AY -
ARMANVILLE



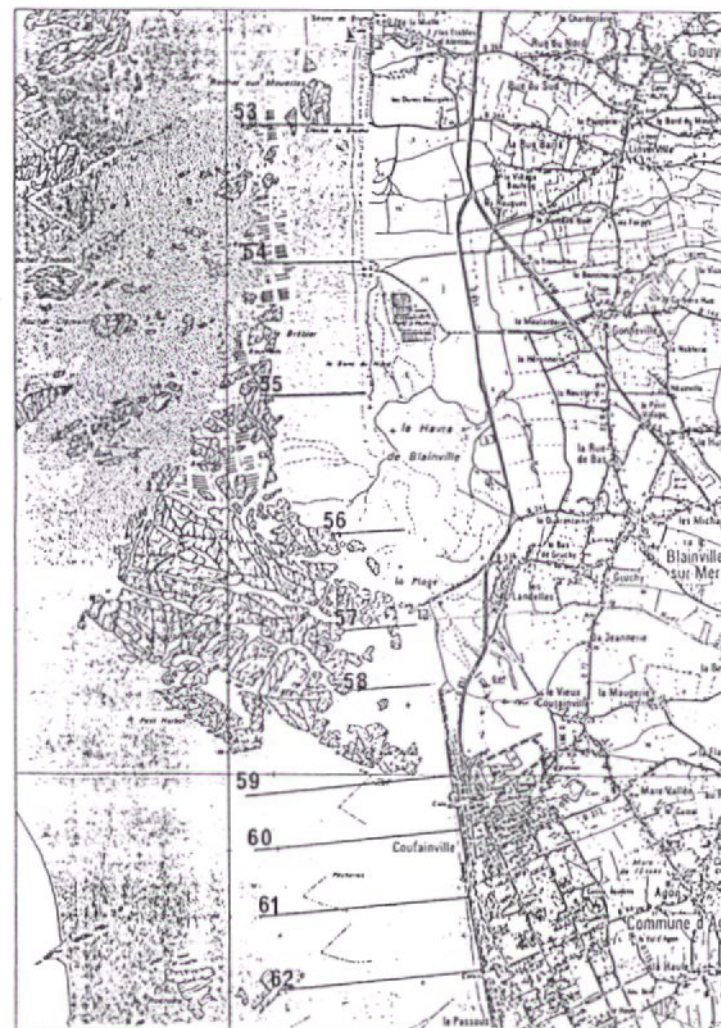
SECTEUR 5: PIROU - GOUVILLE NORD

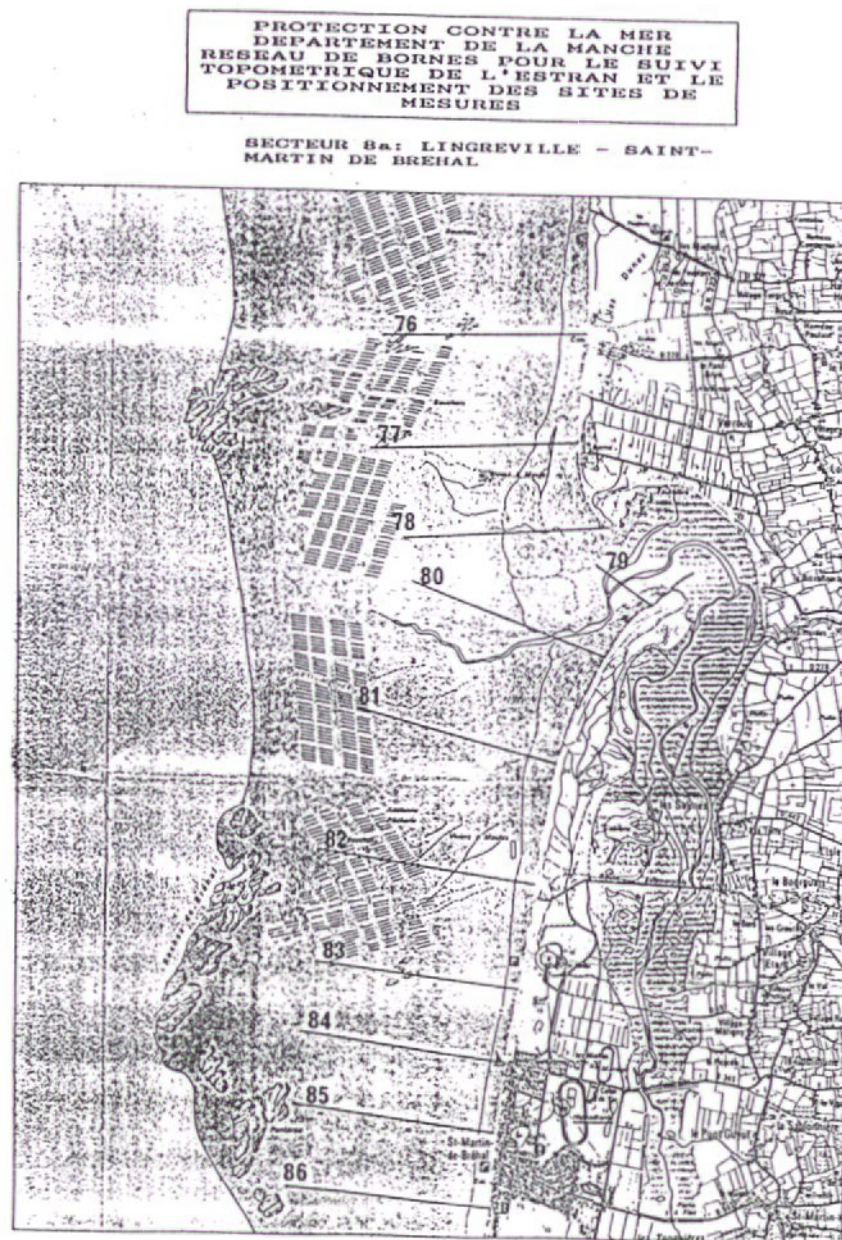
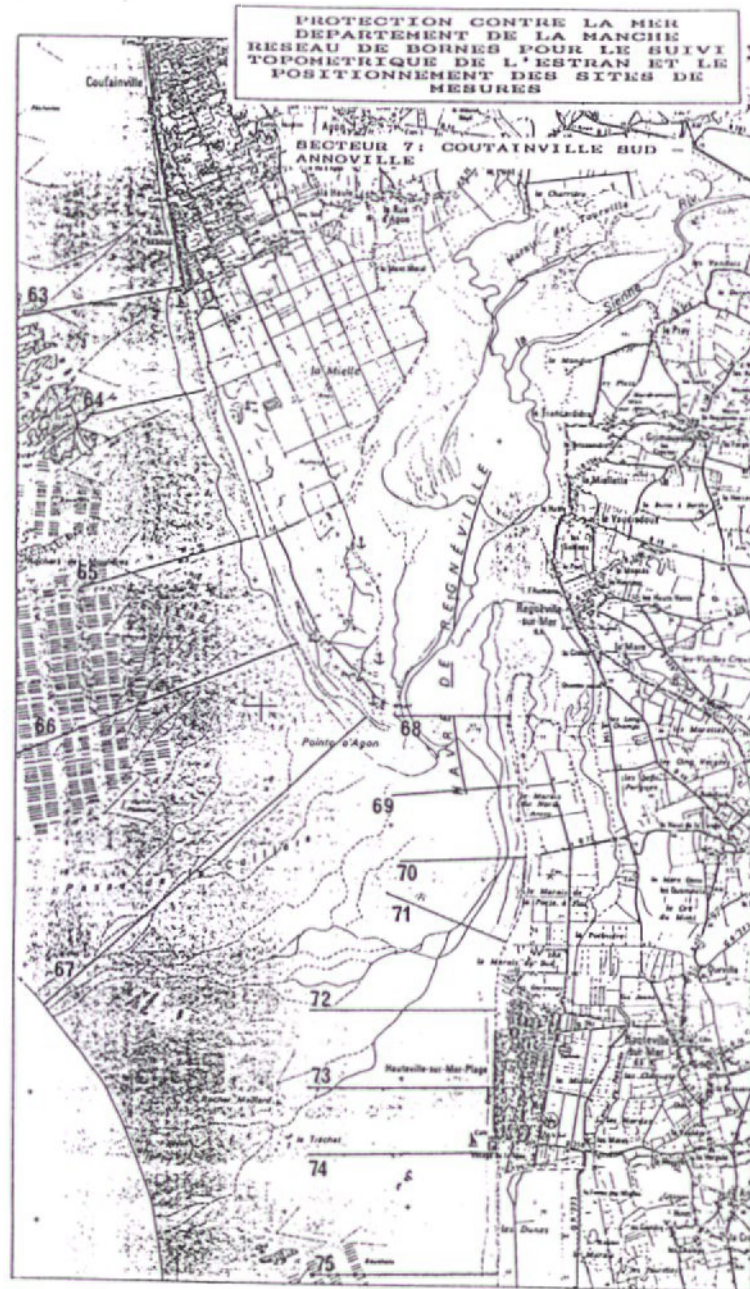


PROTECTION CONTRE LA MER
DEPARTEMENT DE LA MANCHE
RESEAU DE BORNES POUR LE SUIVI
TOPOMETRIQUE DE L'ESTRAN ET LE
POSITIONNEMENT DES SITES DE
MESURES

PROTECTION CONTRE LA MER
DEPARTEMENT DE LA MANCHE
RESEAU DE BORNES POUR LE SUIVI
TOPOMETRIQUE DE L'ESTRAN ET LE
POSITIONNEMENT DES SITES DE
MESURES

SECTEUR 6: GOUVILLE SUD -
COUTAINVILLE NORD





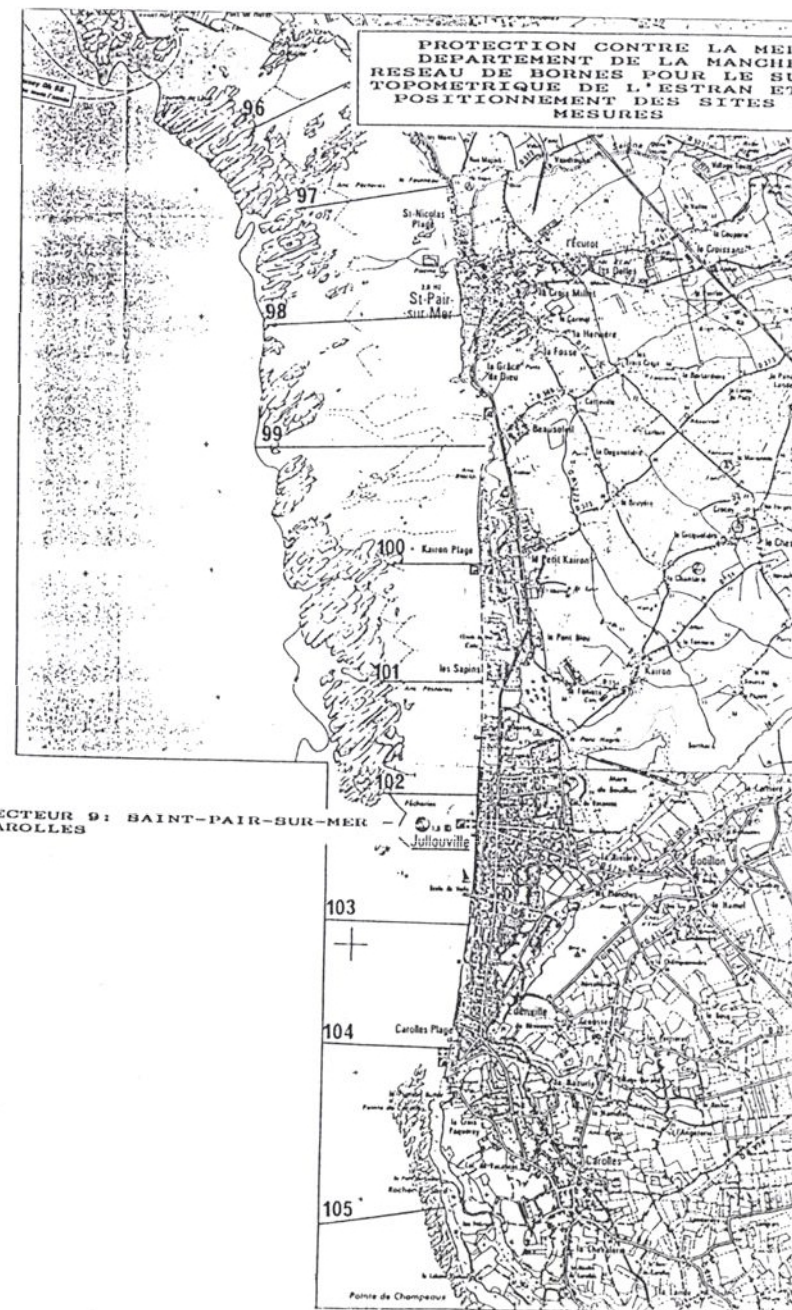
PROTECTION CONTRE LA MER
DEPARTEMENT DE LA MANCHE
RESEAU DE BORNES POUR LE SUIVI
TOPOMETRIQUE DE L'ESTRAN ET LE
POSITIONNEMENT DES SITES DE
MESURES

SECTEUR 8b: COUDEVILLE - GRANVILLE



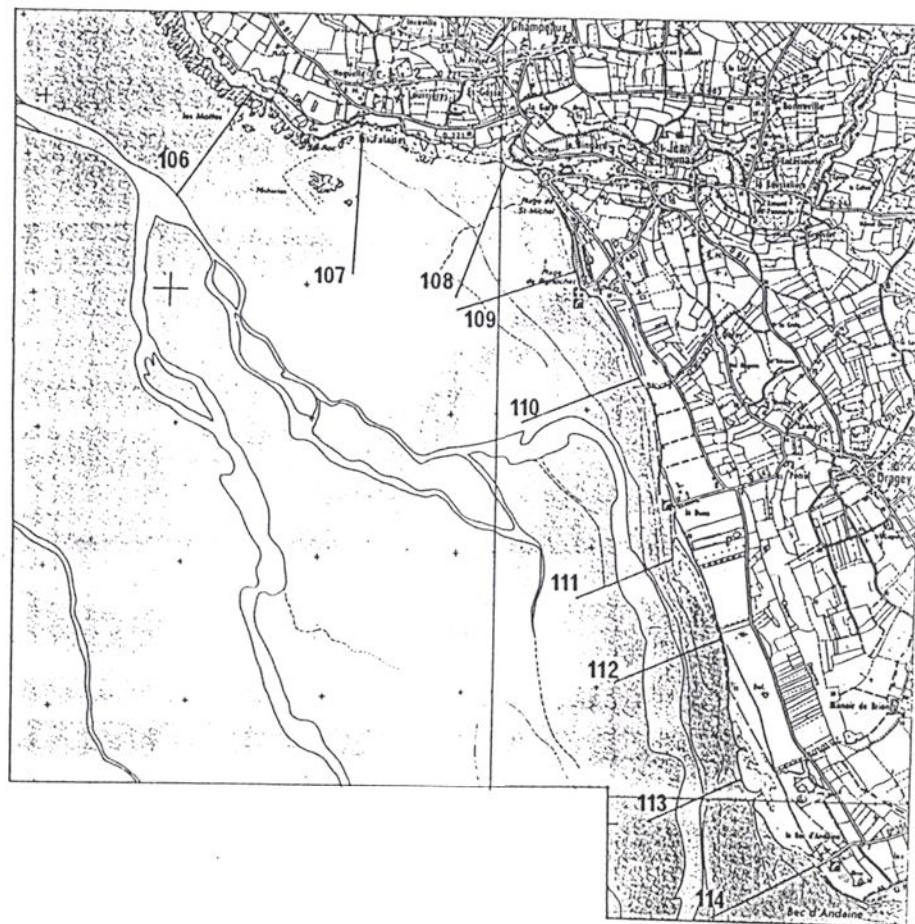
PROTECTION CONTRE LA MER
DEPARTEMENT DE LA MANCHE
RESEAU DE BORNES POUR LE SUIVI
TOPOMETRIQUE DE L'ESTRAN ET LE
POSITIONNEMENT DES SITES DE
MESURES

SECTEUR 9: SAINT-PAIR-SUR-MER -
CAROLLES



PROTECTION CONTRE LA MER
DEPARTEMENT DE LA MANCHE
RESEAU DE BORNES POUR LE SUIVI
TOPOMETRIQUE DE L'ESTRAN ET LE
POSITIONNEMENT DES SITES DE
MESURES

SECTEUR 10: SAINT-JEAN-LE-THOMAS -
GENETS



ANNEXE 7

CHEMIN C.1 CALCUL BRUT

STA:ST.101	X=10.000	Y=10.000	Z=10.000	V0=0.0000
AVA:ST.102	A=93.1020	D=15.217	E=0.041	
DRUITE	G=93.1020	D=15.221	E=0.037	
ARR:ST.101	A=167.2000	D=15.225	E=-0.034	
STA:ST.102	X=25.132	Y=11.646	Z=10.037	V0=125.9020

UNIVERSITE DE CAEN - C.R.E.C. - 14530 LUC-SUR-MER Tél. : 31-97-31-54

AVA:ST.103	A=110.8430	D=31.175	E=-0.720	
DRUITE	G=236.7450	D=31.145	E=-0.717	
ARR:ST.102	A=250.4250	D=31.114	E=0.714	
STA:ST.103	X=8.137	Y=-14.453	Z=9.321	V0=186.3200
AVA:ST.104	A=304.7750	D=26.662	E=0.207	
DRUITE	G=91.0950	D=26.664	E=0.208	
ARR:ST.103	A=112.6260	D=26.667	E=-0.210	
STA:ST.104	X=34.541	Y=-10.736	Z=9.529	V0=178.4630
STA:ST.104	X=34.541	Y=-10.736	Z=9.529	V0=178.4631

CHEMIN C.1 CALCUL EN ANGLES COMPENSES

STA:ST.101	X=10.000	Y=10.000	G=	V0=0.0000
STA:ST.102	X=25.132	Y=11.646	G=93.1018	V0=125.9016
STA:ST.103	X=8.137	Y=-14.453	G=236.7444	V0=186.3193
STA:ST.104	X=34.541	Y=-10.736	G=91.0942	V0=178.4631

FERMETURES :	LONG=-0.000	TRAV=0.000	:	:
:	PLANI=0.000	:	ALTI=0.000	ANG=-0.0009
TOLERANCES :	PLANI=0.297	:	ALTI=0.040	ANG=0.0270

CHEMIN C.1 COMPENSATION DES COORDONNEES

STA:ST.101	X=10.000	Y=10.000	Z=10.000
STA:ST.102	X=25.132	Y=11.646	Z=10.037
STA:ST.103	X=8.137	Y=-14.453	Z=9.321
STA:ST.104	X=34.541	Y=-10.736	Z=9.529

and.10LK05UNIVERSITE DE CAEN - C.R.E.C. - 14530 LUC-SUR-MER Tél.

```

1: S.M=ST.101,HT=1.33,V0=0
2: V.M=ST.102,HV=1.30,AH=93.102,AV=99.955,DI=15.217
3: V.M=ST.103,HV=1.30,AH=204.797,AV=101.852,DI=24.481
4: V.M=ST.104,HV=1.30,AH=144.715,AV=100.984,DI=32.171
5: S.M=ST.102,HT=1.24,V0=125.88046736
6: V.M=ST.101,HV=1.30,AH=167.2,AV=99.891,DI=15.225
7: V.M=ST.104,HV=1.30,AH=48.828,AV=101.165,DI=24.342
8: V.M=ST.103,HV=1.30,AH=110.843,AV=101.347,DI=31.182
9: S.M=ST.104,HT=1.354,V0=178.46807453
10: V.M=ST.101,HV=1.30,AH=166.201,AV=99.164,DI=32.165
11: V.M=ST.103,HV=1.30,AH=112.626,AV=100.63,DI=26.668
12: V.M=ST.102,HV=1.30,AH=196.185,AV=98.802,DI=24.279
13: S.M=ST.103,HT=1.275,V0=186.34237072
14: V.M=ST.101,HV=1.30,AH=218.434,AV=98.168,DI=24.518
15: V.M=ST.102,HV=1.30,AH=250.425,AV=98.489,DI=31.123
16: V.M=ST.104,HV=1.30,AH=304.775,AV=99.447,DI=26.663
17: V.M=PR.1,HV=1.30,AH=350.595,AV=99.324,DI=31.839
18: V.M=PR.2,HV=1.30,AH=371.254,AV=99.151,DI=37.998
19: V.M=PR.3,HV=1.30,AH=387.746,AV=99.513,DI=38.936
20: V.M=PR.4,HV=1.30,AH=38.268,AV=99.225,DI=33.281
21: V.M=PR.5,HV=1.30,AH=10.442,AV=99.782,DI=17.159
22: V.M=PR.6,HV=1.30,AH=363.066,AV=101.035,DI=17.582
23: V.M=PR.7,HV=1.30,AH=284.213,AV=100.614,DI=19.661
24: V.M=PR.8,HV=1.30,AH=256.383,AV=101.906,DI=18.769
25: V.M=PR.9,HV=1.30,AH=236.07,AV=102.001,DI=29.112
26: V.M=PR.10,HV=1.30,AH=241.394,AV=100.313,DI=42.893
27: V.M=PR.11,HV=1.30,AH=197.165,AV=100.31,DI=27.653
28: V.M=PR.12,HV=1.30,AH=198.261,AV=102.598,DI=16.602
29: C.M=C.1,ST.101,ST.102,ST.103,ST.104

```

C.1:
 PR.1:
 PR.2:
 PR.3:
 PR.4:
 PR.5:
 PR.6:
 PR.7:
 PR.8:
 PR.9:
 PR.10:
 PR.11:
 PR.12:

ST.101: X=10, Y=10, Z=10, PH=7, PV=7
 ST.102: X=25.1317234, Y=11.6460224, Z=10.0373443, PH=5, PV=5
 ST.103: X=8.137017, Y=-14.4531681, Z=9.3206715, PH=5, PV=5
 ST.104: X=34.5409256, Y=-10.7355264, Z=9.5289255, PH=5, PV=5

COMPENSATION VERTICALE

ST.101	Z=10.000		
ST.102	Z=10.037	E=0.041	EE=-0.003
ST.103	Z=9.321	E=-0.602	EE=0.003
ST.104	Z=9.529	E=-0.467	EE=-0.004
ST.102	Z=10.037		
ST.101	Z=10.000	E=-0.034	EE=-0.003
ST.104	Z=9.529	E=-0.505	EE=-0.003
ST.103	Z=9.321	E=-0.720	EE=0.003
ST.104	Z=9.529		
ST.101	Z=10.000	E=0.476	EE=-0.005
ST.103	Z=9.321	E=-0.210	EE=0.002
ST.102	Z=10.037	E=0.511	EE=-0.002
ST.103	Z=9.321		
ST.101	Z=10.000	E=0.690	EE=-0.001
ST.102	Z=10.037	E=0.714	EE=0.003
ST.104	Z=9.529	E=0.207	EE=0.002
ERREURS MAXIMALES :			EE=0.005

TABLEAU RECAPITULATIF

* CHEMIN C.1 : CANEVAS POLYGONAL ORDINAIRE . *

	: FERMETURE	: TOLERANCE
ANGULAIRE	: -0.0009	: 0.0270

UNIVERSITE DE CAEN - C.R.E.C. - 14530 LUC-SUR-MER Tél. : 31-97-31-54

(Grades)	:	:
PLANI	: 0.000	: 0.297
(Metres)	:	:
ALTI	: 0.000	: 0.040
(Metres)	:	:

COMPENSATION HORIZONTALE

ST.101	X=10.000	Y=10.000	V0=0.0000		
ST.102	A=93.1020	D=15.217	EA=-0.0000	ED=0.004	
ST.103	A=204.7970	D=24.471	EA=0.0434	ED=0.054	
ST.104	A=144.7150	D=32.167	EA=-0.0531	ED=-0.039	
ST.102	X=25.132	Y=11.646	V0=125.8805		
ST.101	A=167.2000	D=15.225	EA=0.0215	ED=-0.004	
ST.104	A=48.8280	D=24.338	EA=-0.0440	ED=-0.059	
ST.103	A=110.8430	D=31.175	EA=0.0210	ED=-0.030	
ST.104	X=34.541	Y=-10.736	V0=178.4681		
ST.101	A=166.2010	D=32.162	EA=-0.0072	ED=-0.034	
ST.103	A=112.6260	D=26.667	EA=0.0003	ED=-0.002	
ST.102	A=196.1850	D=24.275	EA=0.0114	ED=0.004	
ST.103	X=8.137	Y=-14.453	V0=186.3429		
ST.101	A=218.4340	D=24.508	EA=0.0636	ED=0.016	
ST.102	A=250.4250	D=31.114	EA=-0.0234	ED=0.031	
ST.104	A=304.7750	D=26.662	EA=-0.0235	ED=0.002	
ERREURS MAXIMALES :			EA=0.0636	ED=0.059	