

CONTROLLED
UNCLASSIFIED

11118
CONTROLE
NON CLASSIFIÉ

Controlled
Technical Report

Rapport technique
contrôlé

1985/07

CTR-HY-009

L'ORGANISATION POUR LA MISE EN VALEUR DU FLEUVE SÉNÉGAL
PORT DE SAINT-LOUIS, SÉNÉGAL

ÉTUDES SUR MODÈLES HYDRAULIQUES – PHASE II

– LE TERMINAL AU LARGE –

V. Barthel

Division of
Mechanical Engineering

Division de
génie mécanique



National Research
Council Canada

Conseil national
de recherches Canada

Canada

TABLE DES MATIÈRES

	Page
REMERCIEMENTS	(ii)
RÉSUMÉ/ABSTRACT	(iii)
TABLE DES MATIÈRES	(iv)
LISTE DES ILLUSTRATIONS	(v)
LISTE DES SYMBOLES	(vii)
1.0 INTRODUCTION	1
2.0 ÉCHELLES ET LIMITES DU MODÈLE	7
3.0 TERMINAL AU LARGE AVEC CHAUSSÉE SUR BRISE-LAMES	9
3.1 Étalonnage de la Plage	9
3.2 Terminal au Large avec Chaussée sur Brise-lames	9
4.0 TERMINAL AU LARGE AVEC CHAUSSÉE SUR PILOTIS	17
4.1 Deuxième Essai d'Étalonnage de la Plage	17
4.2 Port avec 3 Postes d'Amarrage et Chaussée sur Pilotis	21
4.3 Conditions de Tempêtes	33
4.4 Port avec 7 Postes d'Amarrage et Chaussée sur Pilotis	35
5.0 ÉVALUATION DES RÉSULTATS DES ESSAIS ET CONCLUSIONS	49
6.0 RÉFÉRENCES	53
PAGE DE DOCUMENTATION	

LIST DES ILLUSTRATIONS

Figure		Page
1.1	Le Fleuve Sénégal	2
1.2	Chenal d'Accès Peu Profond	3
1.3	Postes d'Amarrage au Large avec une Digue	4
1.4	Postes d'Amarrage au Large avec Chaussée sur Pilotis	6
3.1	Étude du Terminal au Large avec Digue en Talus Emplacement d'Enregistreurs de Vagues	11
3.2	Marée au Large	13
3.3	Étude du Terminal au Large et une Digue Sédimentation après 187 jours	14
3.4	Étude du Terminal au Large avec Digue en Talus Sédimentation 152 jours après comblement du réservoir	15
4.1	Étalonnage de la Plage	19
4.2	Étude du Terminal au Large avec Chaussée sur Pilotis Emplacement d'Enregistreurs de Vagues - Essai 1401	20
4.3	Étude du Terminal au Large avec Chaussée sur Pilotis Formation d'une Flèche Littorale	23
4.4	Étude du Terminal au Large avec Chaussée sur Pilotis Agrandissement de la Flèche de Sable Pendant 728 jours	26
4.5	Étude du Terminal au Large avec Chaussée sur Pilotis Sédimentation et Érosion Attribuables à la Présence du Terminal	27
4.6	Étude du Terminal au Large avec Chaussée sur Pilotis Mesures dans le Réservoir Méridional	28
4.7	Étude du Terminal au Large avec Chaussée sur Pilotis Emplacement d'Enregistreurs de Vagues - Essai 1401	29
4.8	Étude du Terminal au Large avec Chaussée sur Pilotis Emplacement d'Enregistreurs de Vagues	30
4.9	Étude du Terminal au Large avec Chaussée sur Pilotis Directions Dominantes des Courants et des Vagues	32
4.10	Étude du Terminal au Large avec Chaussée sur Pilotis Emplacement d'Enregistreurs de Vagues - Essai 1402	34
4.11	Étude du Terminal au Large avec Chaussée sur Pilotis Formation de la Plage après 56 jours avec des Vagues plus Hautes	36

ORGANISATION POUR LA MISE EN VALEUR DU FLEUVE SÉNÉGAL

PORT DE SAINT-LOUIS, SÉNÉGAL

ÉTUDES SUR MODÈLES HYDRAULIQUES - PHASE II

- LE TERMINAL AU LARGE -

1.0 INTRODUCTION

Au cours des années à venir la navigabilité du fleuve Sénégal en Afrique de l'Ouest sera améliorée par la construction de deux grands barrages. Afin de permettre le transfert des cargaisons importées ou exportées on projette la construction d'un nouveau port maritime à Saint-Louis. Comme l'indique la figure 1.1, Saint-Louis est situé au Nord-Ouest du Sénégal près de la frontière Mauritanienne. Afin d'examiner la fiabilité d'un port dans l'estuaire avec un chenal d'accès traversant la barre de sable entre l'Atlantique et l'estuaire, diverses études sur modèles ont été effectuées au Laboratoire d'hydraulique du Conseil National de Recherches du Canada à Ottawa en 1984 [réf. 7]. Ces études ont permis de déterminer une solution techniquement réalisable mais d'un coût trop élevé et dont l'entretien aurait exigé des moyens techniques et financiers considérables. Par conséquent, en juillet 1984, lors d'une réunion entre l'Agence Canadienne de Développement International (ACDI), l'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS), le client Beauchemin Beaton Lapointe-Swan Wooster et le CNRC, il a été décidé d'utiliser un modèle unidimensionnel à éléments finis et une version modifiée du modèle hybride existant, pour exécuter des essais sur différents types d'aménagements possibles. Les trois cas suivants ont été étudiés:

(a) Chenal d'accès peu profond

Un chenal d'accès [fig. 1.2], d'une profondeur d'eau minimale de 4,5 à 5,5 m, permettrait l'accès tout le long de l'année, au port de pêche de Saint-Louis (Port de Pêche). Ce chenal permettrait également aux chalands de haute mer en provenance de Dakar ou d'autres ports, d'utiliser l'estuaire pour se diriger vers les ports fluviaux en amont. Les dimensions de ce chenal devraient être conçues de tel façon à assurer un minimum de travaux d'entretien.

Cette étude est décrite dans la référence 1.

(b) Terminal au large avec chaussée

Comme solution alternative pour un port dans l'estuaire, la construction d'un terminal au large dans une profondeur d'eau d'environ 13 m sous le niveau IGN [fig. 1.3] offrirait des installations d'amarrage pour 3 navires. Il pourrait éventuellement être agrandi afin de loger sept navires. Les postes d'amarrage seraient protégés des vagues par un brise-lames

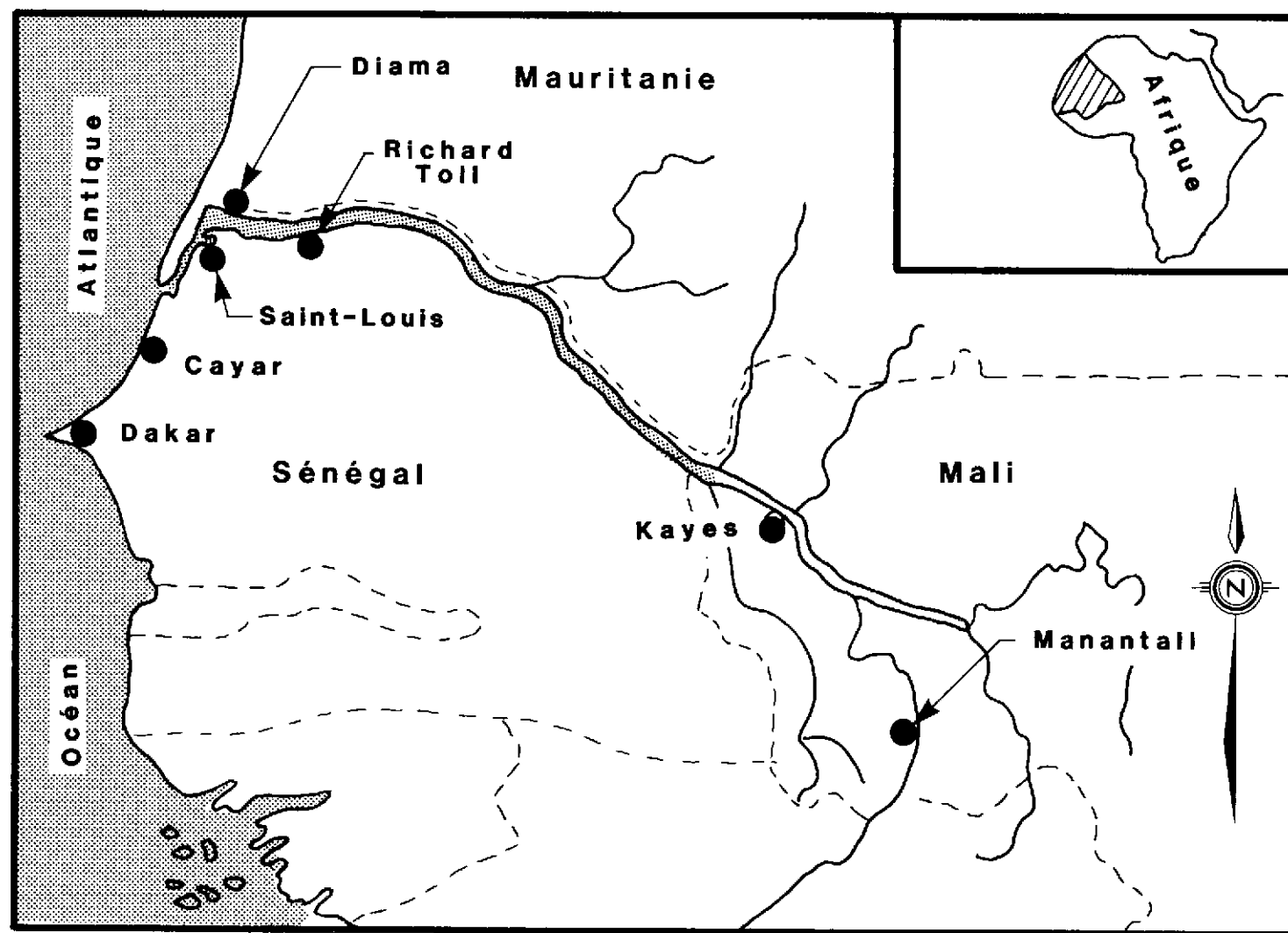


Figure 1.1 Le Fleuve Sénégal

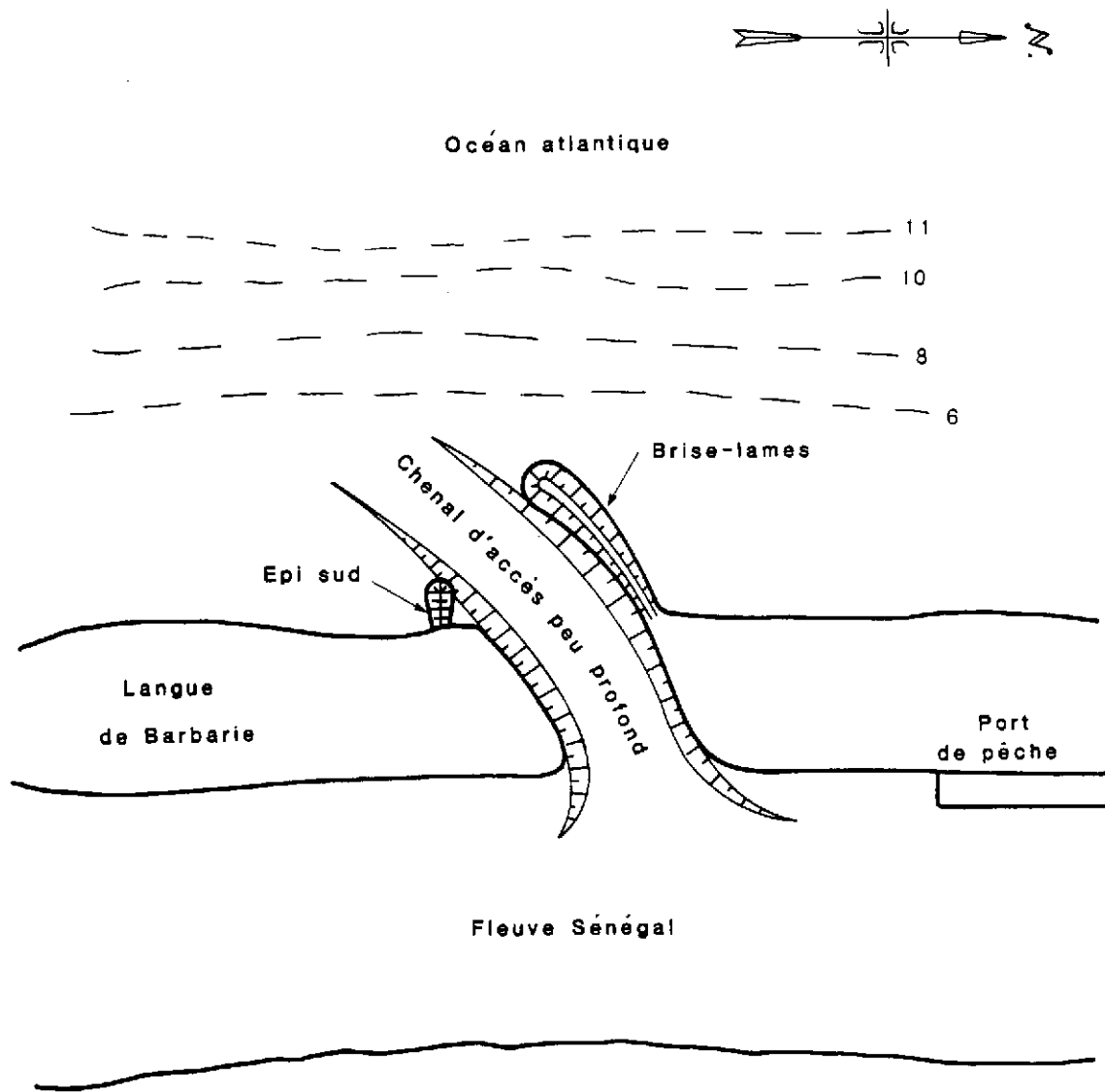


Figure 1.2 Chenal d'accès peu profond

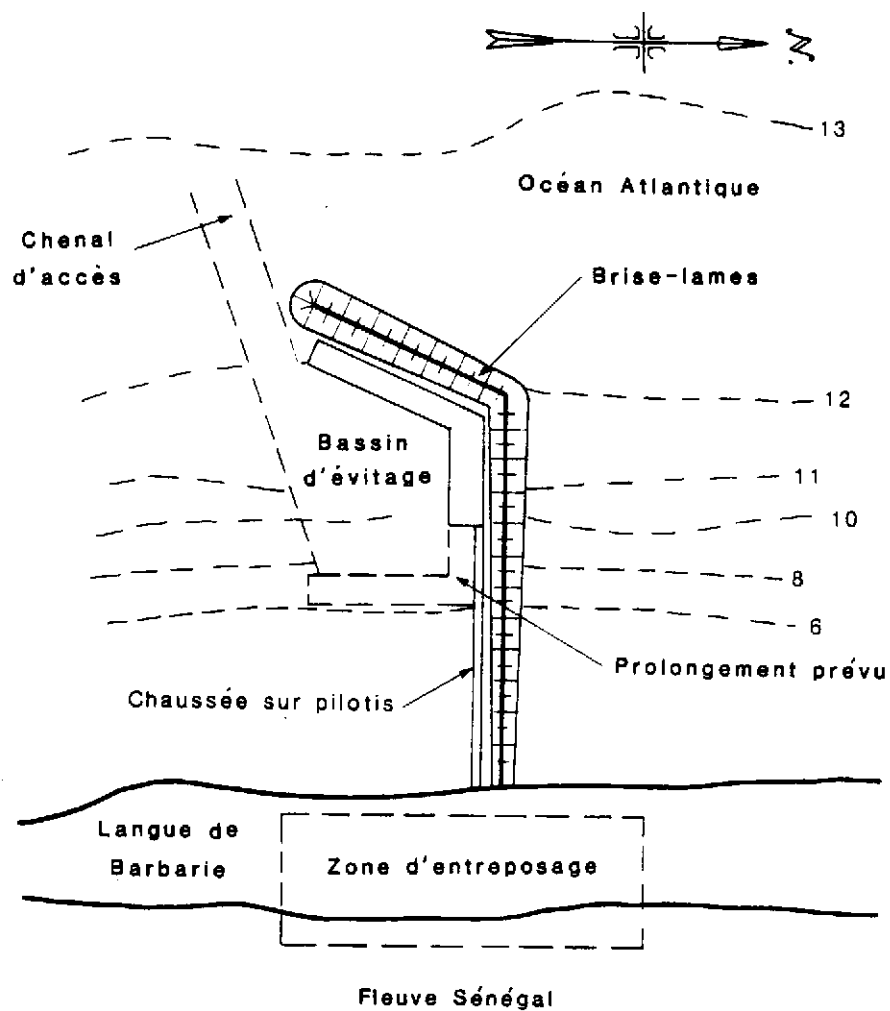


Figure 1.3 Postes d'amarrage au large avec une digue

pouvant également servir de route d'accès. Ce brise-lames interromprait inévitablement et complètement la dérive littorale pour ainsi former un grand réservoir à l'amont. Puisque le processus de comblement de ce réservoir avait déjà été étudié lors des essais du chenal d'accès profond, il n'a pas été décidé d'examiner le mode de contournement qu'après le comblement du réservoir.

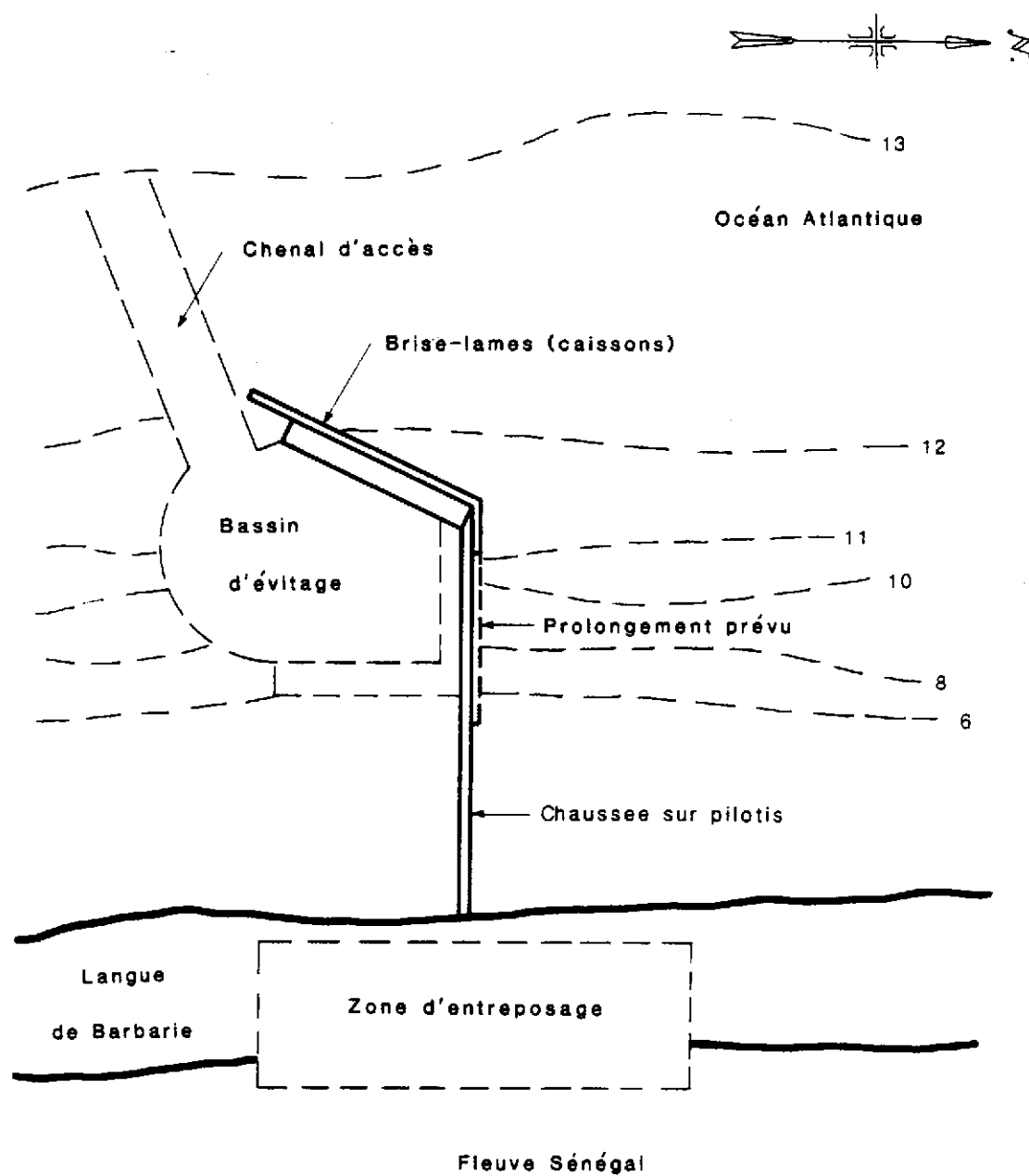
(c) Terminal au large avec chaussée sur pilotis

L'interruption du transport littoral pourrait être évitée si une chaussée sur pilotis reliait les installations portuaires au large et le rivage [fig. 1.4]. L'espacement des pilotis et leurs diamètres seraient choisis de telle sorte à perturber au minimum le transport de sable. Toutefois, on pouvait s'attendre à des modifications dans les processus de sédimentation et de l'érosion en raison de l'action des vagues relativement faible à l'abri du brise-lames; ces modifications mèneraient vraisemblablement à la formation d'une flèche littorale ou d'un tombolo. Un agrandissement du terminal en direction du rivage rétrécirait l'ouverture et influencerait probablement davantage la dérive littorale.

Les solutions comprenant des installations au large ont été testées au moyen du modèle hybride qui a été modifié pour aborder uniquement la modélisation physique des vagues et des sédiments pour le secteur au large de la langue de Barbarie. Puisque, pour des raisons économiques, une modification des échelles de ce modèle en distorsion n'était pas possible, certains effets d'échelle ont dû être pris en ligne de compte. L'un de ces effets était le fait que les conditions de vagues ne pouvaient être reproduites correctement. Un deuxième était attribuable à un problème déjà confronté dans le modèle du chenal d'accès peu profond. Puisque le matériau du fond avait été choisi en fonction du modèle d'interaction entre vagues et sédiments, on pouvait s'attendre à une faible représentation du transport dû au courant littoral dans la zone abritée.

Dans une étape ultérieure, la conception du plan final de l'aménagement ainsi que les mouvements des navires et les efforts dans les lignes d'amarrage ont dû être étudiés par un modèle à fond fixe sans distorsion (modèle d'agitation). Les résultats seront publiés dans un rapport séparé. En raison des limitations attribuables aux effets d'échelles, on devrait effectuer ultérieurement une étude analytique approfondie du chenal d'entrée peu profond et de la solution faisant intervenir le terminal au large; cela ne faisait pas partie de cette étude.

Les conditions topographiques, hydrographiques et sédimentologiques ont été décrites dans le premier rapport sur le port de St-Louis [réf.7] et dans la référence 2. Le deuxième rapport sur cette étude [réf.1] traite des essais avec un chenal auto-nettoyant ("self-scouring"). Le présent rapport ne décrit que les essais sur modèle physique à fond mobile pour différentes solutions envisagées au large et fera référence aux rapports antérieurs partout où c'est nécessaire.



**Figure 1.4 Postes d'amarrage au large
avec chaussée sur pilotis**

2.0 ÉCHELLES ET LIMITES DU MODÈLE

Les échelles de modèles hydrodynamiques sont généralement déterminées par application de la loi de Froude si les forces gravitationnelles prédominent. Le nombre sans dimension de Froude, qui décrit le rapport de la vitesse du courant sur la vitesse d'une onde de gravité de faible amplitude, devrait idéalement être le même dans le modèle et dans la réalité. Compte tenu des différents matériaux de fond et de l'espace disponible, les essais préliminaires, reproduisant les profils de plage existant en réalité, ont abouti aux échelles 1:300/1:75. On a constaté que le matériau du fond qui convenait le mieux à cette fin était un sable de silice de diamètre $d = 0,175$ mm. Puisque les vagues ne pouvaient être reproduites correctement à cause de la déformation du modèle, on a généré des vagues sinusoïdales afin de déclencher et de simuler une turbulence et en conséquence un courant littoral qui engendrerait le transport littoral requis. De plus on a reproduit, dans le bassin, un courant de marée unidirectionnel en direction du sud.

Afin de déterminer l'échelle sédimentologique et le flux de sédiments, les vagues et les courants de marée surimposées ont dû être ajustés avec la plus grande précision possible. Afin d'obtenir un profil de plage stable et un équilibre entre les processus d'érosion et de sédimentation le long de la plage, le taux d'alimentation de sable (correspondant au transport littoral) à la limite septentrionale du modèle a dû être ajusté pour correspondre à ces conditions des vagues et de courant.

Le tableau ci-dessous présente un résumé des échelles qui, à l'exception de l'échelle sédimentologique, ont été calculées suivant la loi de Froude. Les deux différentes échelles sédimentologiques qui y sont présentées correspondent aux deux différentes séries d'essai.

TABLEAU 1

Échelles du modèle hybride à fond mobile

Longueur	1:300
Hauteur	1:75
Vitesse	1:8,7
Temps (marée)	1:34,6
Période de vague	1:8,7
Débit	$1:1,96 \times 10^5$
Volume	$1:6,75 \times 10^6$
Temps (sédimentologique)	1:336 (408)

Dans la nature, les déplacements et le transport de sédiments le long d'un littoral s'effectuent sous l'influence de vagues, de la turbulence attribuable à leur déferlements et des courants littoraux engendrés par elles. Ce processus se poursuit le long du littoral aussi longtemps que l'agitation due aux vagues fournit l'énergie nécessaire. Lorsqu'une plage est protégée de cette agitation un ouvrage au large, il y a encore un certain transport attribuable aux courants littoraux, mais à des taux très réduits. Tel qu'indiqué précédemment, le transport des sédiments par le courant, qui constitue un problème de contrainte de cisaillement, ne peut être reproduit correctement par un tel modèle. Puisque le matériau du fond a été choisi par le fait d'une interaction entre des vagues déferlantes et du courant littoral il est trop lourd pour avoir un déplacement dû aux courants seuls. Si des courants littoraux, résultants d'une action antérieure des vagues, persistent dans des secteurs où l'énergie des vagues est réduite, le modèle sous-estimera vraisemblablement les quantités de matériaux transportés. De plus, le présent modèle ne peut simuler la présence de sédiments en suspension.

3.0 TERMINAL AU LARGE AVEC CHAUSSÉE SUR BRISE-LAMES

3.1 Étalonnage de la Plage

La topographie des littoraux sablonneux est très sensible, réagissant à des modifications mineures de courant ou des conditions de vagues. Il est par conséquent très important pour l'exploitation d'un modèle à fond mobile de maintenir dans le bassin les mêmes conditions de vagues et de courant après étalonnage du système plage-vagues-courant. Quoique cela fut possible pour les essais du chenal auto-nettoyant, l'espace disponible dans le laboratoire a nécessité certaines modifications de l'installation du générateur de vagues pour les essais décrits ci-après. Puisque le générateur de vagues a dû être rapproché de la plage, le fragile équilibre sédiments-vagues-courant a été perturbé et il a été nécessaire d'exécuter un nouvel étalonnage. Ceci consistait en l'opération continue du bassin, en l'absence de tout ouvrage, pendant au moins 10 heures, pour chacune des conditions de vagues. La comparaison des levés bathymétriques exécutés avant et après chaque ensemble d'essais, permettait d'obtenir la sédimentation et l'érosion à l'intérieur d'un secteur défini.

Le premier ensemble d'essais visait à étudier un terminal au large, relié au rivage par un brise-lames interrompant le transport littoral. On ne s'attendait pas à ce que ces essais produisent de nouveaux modes de contournement, mais par contre on s'attendait à ce que la réflexion importante engendrée par le brise-lames rende l'analyse détaillée impossible. Toutefois on a obtenu, après 27 heures d'essais avec des vagues de différentes hauteurs, une répartition d'énergie de vagues le long de la plage et des courants littoraux requis (entre 0,05 et 0,30 m). Le taux d'alimentation de sable (7 l/heure) nécessaire à l'équilibre a donné une échelle de temps sédimentologique de 1:408 (1 heure de modèle correspondant à 17 jours en valeur nature). Le calcul de l'échelle de temps sédimentologique est expliqué au chapitre 4.1. Certaines irrégularités dans les profils de plage obtenues ont mené à la conclusion qu'il fallait consacrer plus de temps à un meilleur étalonnage de la plage pour les essais suivants.

3.2 Terminal au Large avec Chaussée sur Brise-lames

L'une des variantes décrites à la section 1.0 consistait en un terminal au large relié au rivage par une chaussée sur digue. Comme on pouvait le prévoir, et comme cela avait été montré sur les essais précédents, le secteur au nord de l'ouvrage s'est comblé de sable à cause de l'interruption du transport littoral. Toutefois, dans la phase initiale, la chaussée devait être protégée par un brise-lames jusqu'à ce que l'ensablement assure une protection naturelle suffisante contre l'action des vagues. Il avait été convenu de commencer les essais avec un réservoir comblé dont la forme et la pente en direction du large provenaient des essais antérieurs effectués dans le cas du chenal d'accès profond [réf. 7]. Ces conditions n'auraient été réalisées qu'après l'opération continue du modèle pendant plusieurs jours.

Tel que prévu, la disposition de l'ouvrage combinée à un réservoir comblé a engendré une concentration de vagues réfléchies et ainsi un régime de vagues, qui s'écarterait nettement des conditions naturelles. Les résultats ne pouvaient par conséquent indiquer que qualitativement, la manière et la zone de l'ensablement. En particulier la forte réflexion sur l'ouvrage et sur le réservoir, tous les deux situés presque perpendiculairement à la ligne de propagation de vagues, menait à une variation du régime de vagues dans cette partie du modèle; cela accélèrerait également le transport des sédiments autour de l'extrémité du brise-lames. De plus, les pentes du réservoir en direction de la haute mer étaient probablement érodées plus rapidement que dans des circonstances normales.

La figure 3.1 présente l'installation expérimentale en indiquant l'emplacement des enregistreurs de vagues. Les élévations de la surface libre, mesurées au moyen de ces enregistreurs à capacitance, seront exprimées en terme d'écart type. Puisque la valeur de l'écart type (moyenne quadratique) est obtenue à partir du moment spectral d'ordre zéro

$$\sigma = \sqrt{m_0}$$

elle représente la quantité d'énergie des vagues à l'emplacement donné. Pour des vagues régulières, cette valeur englobe les composantes incidentes et réfléchies pour la fondamentale et les harmoniques. La valeur de σ ne sera en relation directe avec la hauteur caractéristique de vagues que si les hauteurs suivent une distribution de Rayleigh (cas de

vagues irrégulières; $H_{char} = 4 \sigma = 4 \sqrt{m_0}$). En plus, on a appliqué une analyse "vague par vague" de la surface libre, dont la hauteur n'était pas constante à cause de la réflexion, la réfraction et la diffraction. On a donc présenté la valeur moyenne (H_{AVE}) et la valeur maximale (H_{MAX}) pour chaque série d'essai. Dans la région au large, vers une profondeur correspondant à 16 m en nature, on a engendré une vague régulière ayant les propriétés suivantes:

$$\sigma = \sqrt{m_0} = 0.68 \text{ m (nature)}$$

$$T = 9 \text{ sec (nature)}$$

Les valeurs " σ " de vagues calculées pour une période d'enregistrement de cinq minutes sont indiquées ci-dessous pour les emplacements représentés dans la figure 3.1.

Emplacement	σ [m]
5	0,68
6	0,43
7	0,09
8	0,08
9	0,07
10	0,27
11	0,43

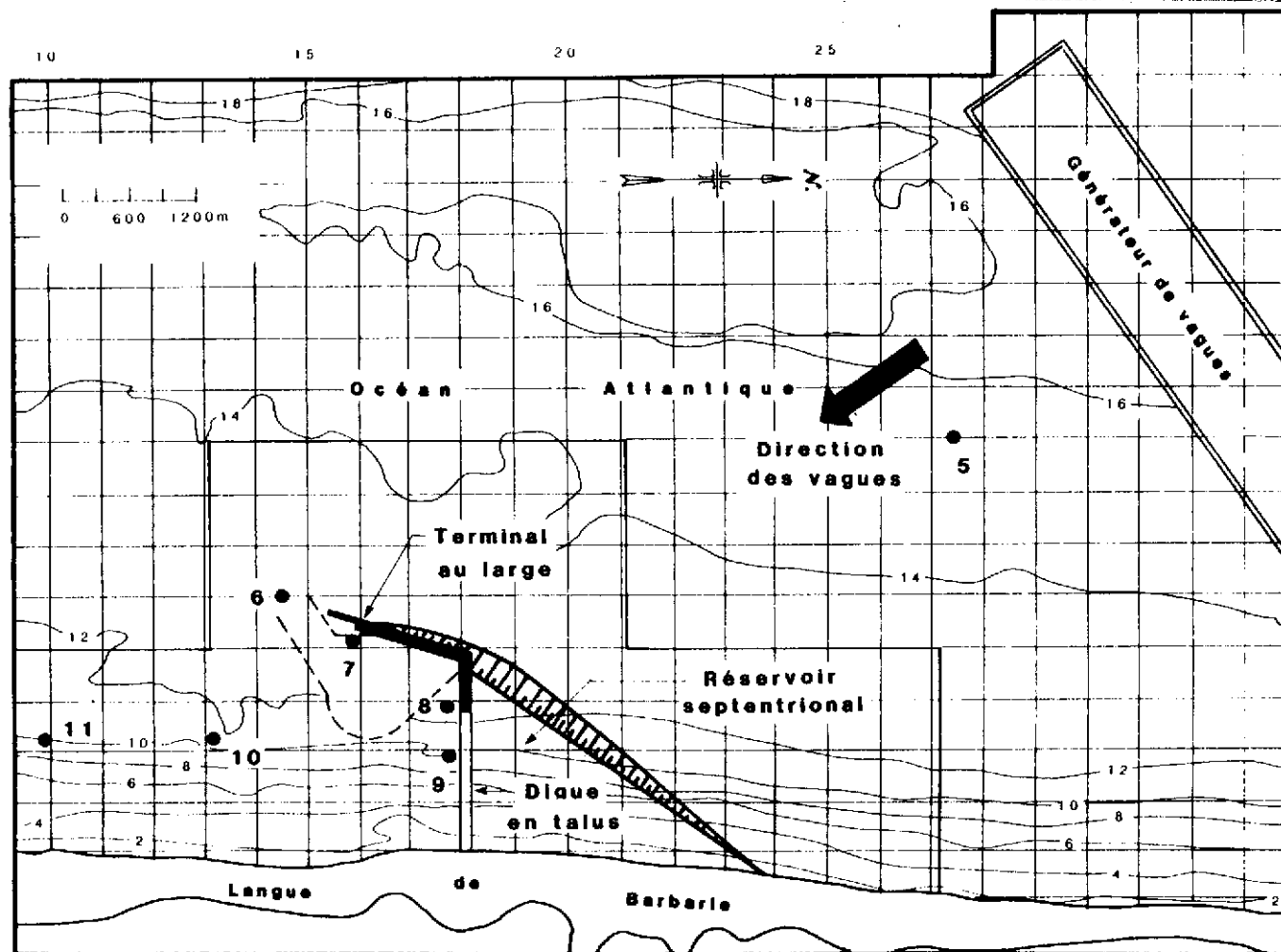


Figure 3.1 Etude du terminal au large avec digue en talus
Emplacement d'enregistreurs de vagues

La figure 3.2 présente la marée appliquée pour tous les essais, soit une marée sinusoïdale d'une amplitude de 0,55 m. Cette condition a été maintenue pendant 11 heures (187 jours). Les essais ont été entrepris avec un réservoir comblé et des matériaux se déplaçant déjà le long du brise-lames, le front de l'ensablement se situant approximativement à 300 m de l'extrémité du dernier caisson. En conséquence le début du contournement a été observé après 34 jours seulement.

En raison d'une forte réflexion et de la présence d'une onde stationnaire devant cette partie du brise-lames, le contournement s'est produit sous une étroite barre immergée dont la largeur n'était jamais plus de 200 m.

L'ordre de grandeur du déplacement des sédiments dépassait celui de la dérive littorale (taux d'alimentation). Après 187 jours, le dépôt à l'extrémité du brise-lames à caisson s'était accru considérablement pour couvrir le chenal d'entrée et une partie du bassin d'évitage. Les fig. 3.3 et 3.4 indiquent l'ampleur de l'ensablement, des matériaux s'étant accumulés jusqu'au niveau IGN + 2,0 m. La forme et la direction de cette accumulation indiquaient clairement que, selon la diffraction des vagues, ce dépôt obstruerait éventuellement tout le bassin d'évitage et continuerait de s'accroître pour rejoindre le rivage en constituant ainsi un système naturel de contournement. On a dû enlever par dragage environ $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ pour maintenir les profondeurs nécessaires dans le bassin d'évitage et le chenal d'accès.

Des calculs utilisant les levés bathymétriques, présenté dans la fig. 3.4 indiquent un ensablement d'un volume total de plus de $2,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ dans le secteur représenté dans l'angle supérieur gauche de la fig. 3.4. Toutefois la quantité maximale de sable en contournement, dans des conditions naturelles, ne peut dépasser le taux du transport littoral. Par conséquent, après un long processus de stabilisation de la pente au large du réservoir et sous l'eau juste devant le brise-lames à caisson, le taux de contournement et de dépôt n'aurait pas dépassé le taux d'alimentation d'environ $\approx 2\ 800 \text{ m}^3/\text{jour}$. En tenant compte de légères modifications attribuables à une diffraction exagérée dans le modèle, la forme du dépôt dans la nature devrait correspondre aux résultats de la modélisation.

Pendant le processus de comblement, il y a eu début d'érosion de la plage méridionale à cause de l'arrêt de la dérive littorale en amont.

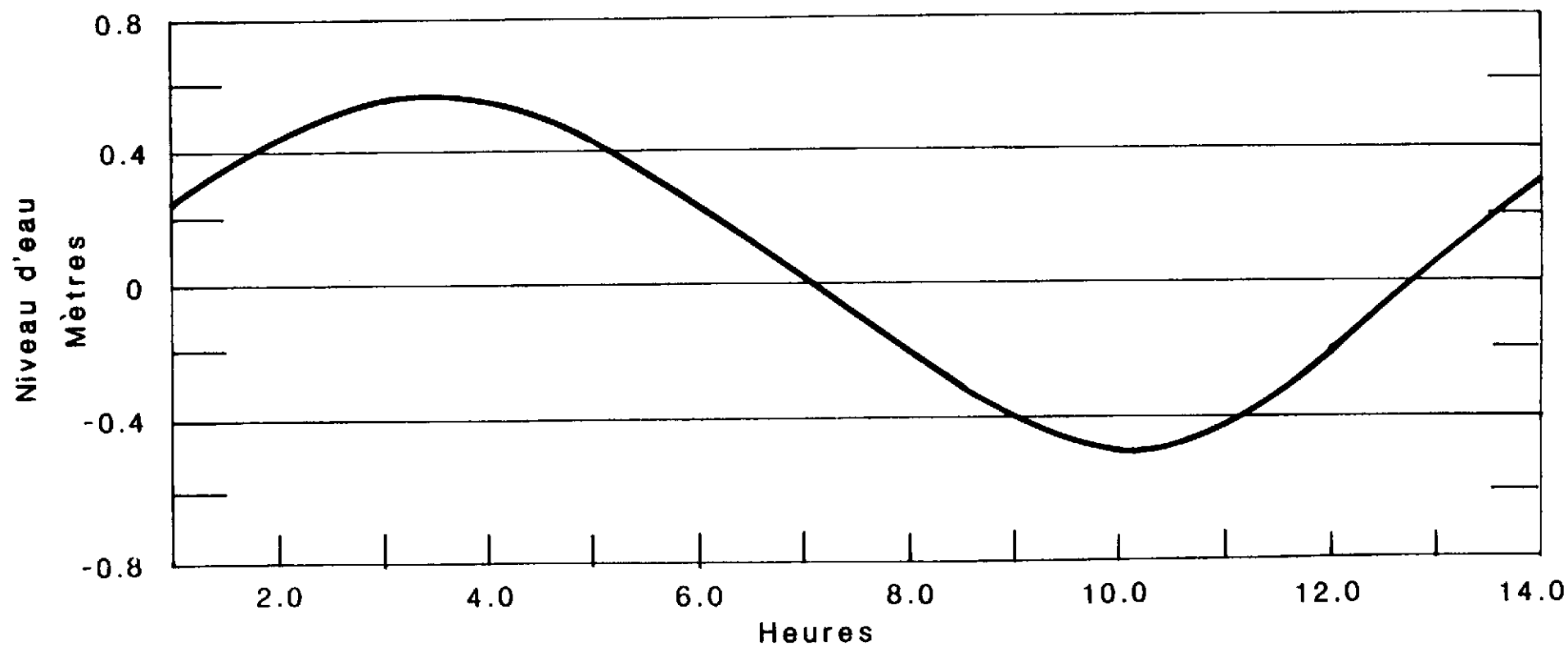
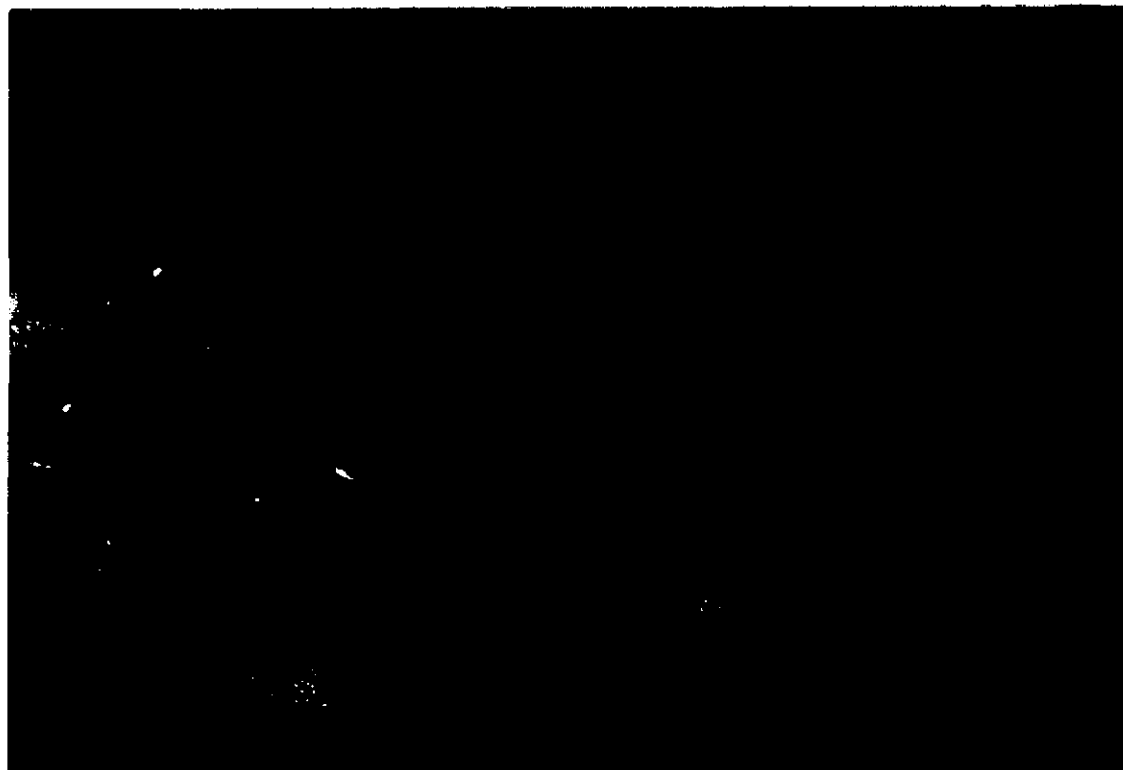
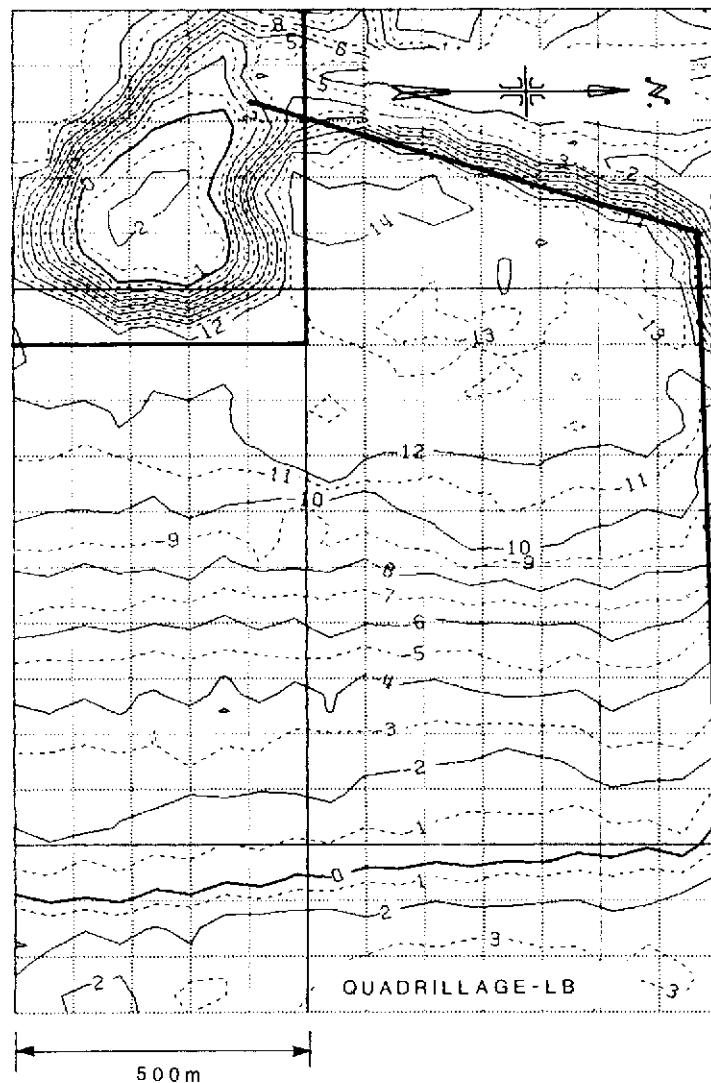


Figure 3.2 Marée au large



**Figure 3.3 Etude du terminal au large et une digue
Sédimentation après 187 jours**

Bathymétrie après 152 jours



Sédimentation (+) et érosion (-) après 152 jours

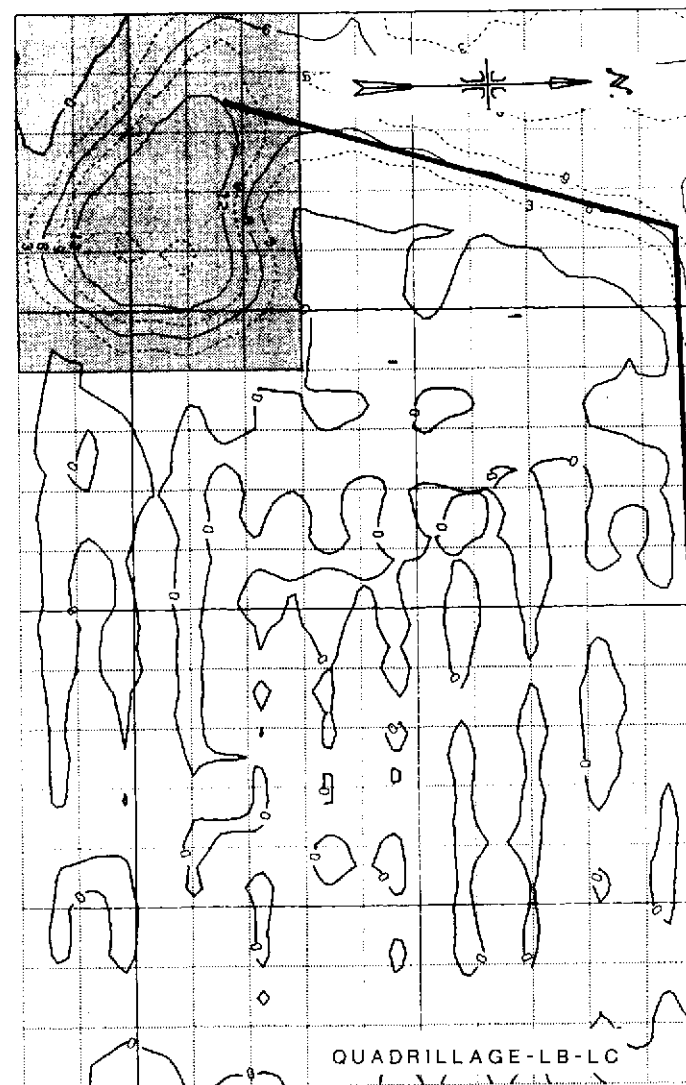


Figure 3.4 Etude du terminal au large avec digue en talus

Sédimentation 152 jours après comblement du réservoir

Puisque la zone protégée des vagues couvrirait presque toute la plage méridionale reproduite dans le modèle, on a mesuré dans ce secteur une quantité de matériaux érodés ne s'élevant qu'à 1 500 m³/jour. Les secteurs critiques seraient situés plus loin au sud au-delà de la limite du modèle où la pleine agitation des vagues déclencherait une érosion comparable au transport littoral.

Quoique les essais n'aient pu être effectués qu'à l'intérieur des limites du modèle physique existant, les résultats ont indiqué très nettement les problèmes engendrés par la construction d'un terminal au large relié au rivage par un ouvrage massif. Le réservoir ainsi formé, se comblerait en un certain nombre d'années dépendant de la longueur du brise-lames et de la distance entre le terminal et la plage. Des méthodes coûteuses artificielles de contournement devraient donc être mises en oeuvre pour empêcher l'obstruction du chenal d'accès et des installations d'amarrage. L'érosion de la plage protégée des vagues par l'ouvrage serait moins prononcée en raison d'une très faible dérive littorale. Toutefois, au sud du secteur modélisé, une érosion intense entraînerait finalement l'ouverture d'une brèche dans la langue de Barbarie.

Pour les raisons énumérées ci-dessus, cette solution n'a pas été jugée satisfaisante.

4.0 TERMINAL AU LARGE AVEC CHAUSSÉE SUR PILOTIS

Ayant anticipé les résultats mentionnés précédemment, on a étudié en priorité la solution d'un terminal au large protégé par un brise-lames. Puisque les coûts des différents aménagements pour cette même solution étaient comparables, on a choisi d'étudier en détail celui qui perturberait au minimum la dérive littorale, c'est à dire un ensemble terminal/brise-lames éloigné le plus possible du littoral. Cela pourrait:

- (a) minimiser la longueur de la plage abritée par l'ouvrage
- (b) permettre le transport continu des sédiments par le courant et les vagues.

Ceci serait réalisé si l'accès du terminal était fait au moyen d'une chaussée sur pilotis. Puisque le transport littoral s'effectuait dans une zone turbulente relativement étroite, l'influence de pilotis serait vraisemblablement minimum.

On a choisi d'utiliser le même régime de marée que celui utilisé dans le cas d'un terminal relié au rivage par une digue. Afin d'obtenir un plus long segment de plage méridionale exposé à l'action des vagues, le modèle de l'ouvrage a été déplacé vers le nord, sa bordure orientée vers le large, étant placée à la limite septentrionale de la section à fond mobile. La figure 4.2 présente la disposition du modèle ainsi que le quadrillage et les emplacements des appareils de mesure utilisés pour le premier ensemble d'essais.

4.1 Deuxième Essai d'Étalonnage de la Plage

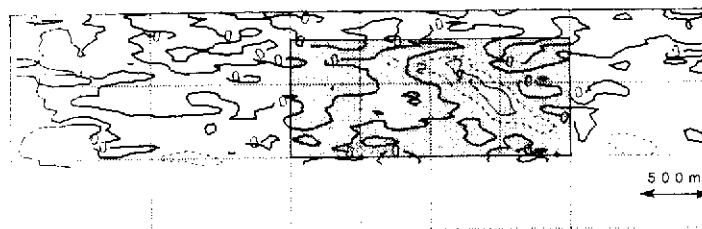
Les essais préliminaires visaient à définir des profils de plage stables et à établir les échelles du modèle dans certaines conditions de vagues et ont été effectués dans un canal étroit, avec toutes les restrictions qu'un essai à deux dimensions comportait. Il a toutefois été possible de reproduire dans le modèle tridimensionnel à fond mobile des résultats équivalents en suivant la méthode itérative précédemment décrite, basée sur des hauteurs des vagues, dont l'ordre de grandeur avait été obtenu pendant les essais dans le canal étroit. Le premier étalonnage pour ces nouveaux essais a indiqué que le repositionnement du générateur de vagues avait changé le régime de vagues dans le bassin de telle sorte que des vagues plus petites étaient suffisantes pour assurer une dérive littorale constante, et ainsi maintenir la stabilité des profils et l'équilibre de la plage.

Pour arriver à cette configuration pour le générateur de vagues, on a effectué un ensemble d'essais pour lesquels différents réglages du générateur de vagues (variation du signal d'entrée) avec différents taux d'alimentation ($F(2/h)$) avaient été utilisés:

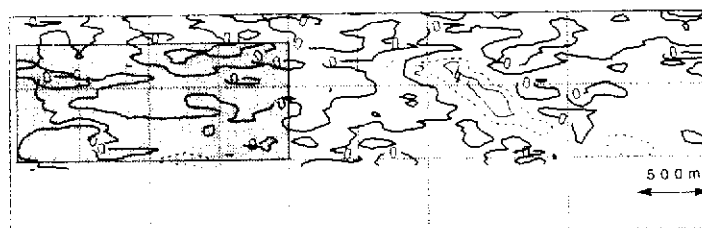


Figure 4.4 Etude du terminal au large avec chaussée sur pilotis

Agrandissement de la flèche de sable pendant 728 jours



Région 1: Flèche de sable



Région 2: Plage méridionale

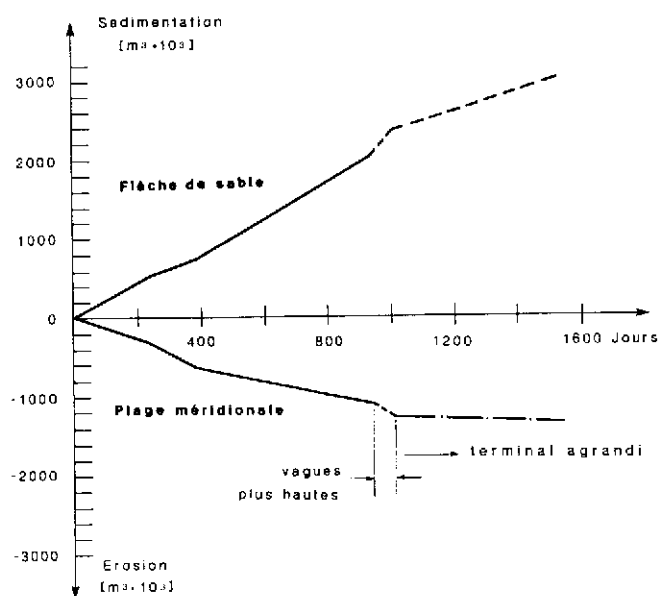


Figure 4.5 Etude du terminal au large
avec chaussée sur pilotis

Sédimentation et érosion attribuables à la présence du terminal

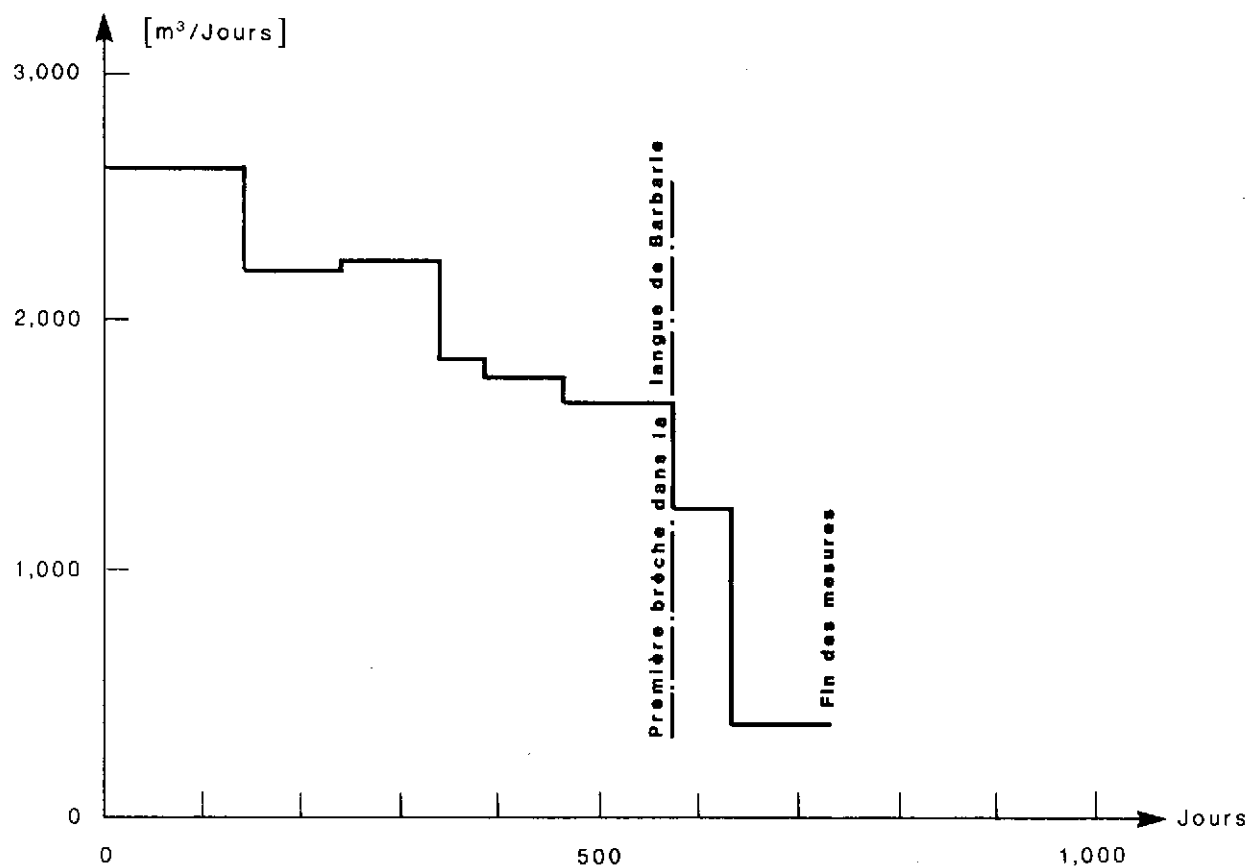


Figure 4.6 Etude du terminal au large avec chaussée sur pilotis
Mesures dans le réservoir méridional

WAV35

	5	6	7	8	9	10	11
RMS	.48	.81	.37	.28	.45	.28	.35
H _{AVE}	1.25	1.23	1.02	.34	.28	.71	.92
H _{MAX}	1.37	1.36	1.17	.43	.35	.81	1.47

WAV36

	5	6	7	8	9	10	11
RMS	.52	.62	.68	.47	.78	.71	.54
H _{AVE}	1.35	.51	.52	.42	.88	1.44	.80
H _{MAX}	1.58	.76	.62	.52	1.06	1.63	.98

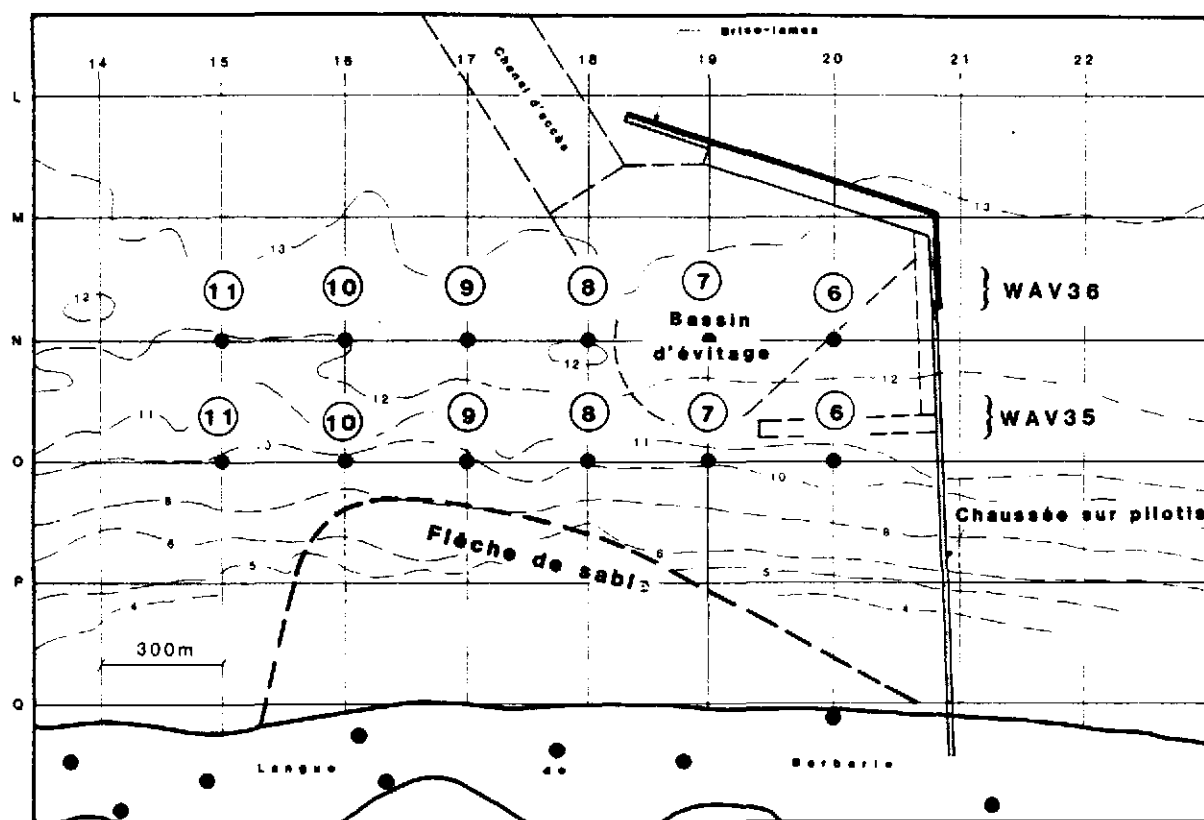


Figure 4.7 Etude du terminal au large avec chaussée sur pilotis

Emplacement d'enregistreurs de vagues - Essai 1401

WAV35 après 238 jours

WAV30 après 518 jours

	1	2	3	4	5	6	7	8
			OSF01	OSF01	OSF02	OSF02	OSF03	OSF03
V _{AVE}	.28	.32	.58	.66	.16	.22	.22	.06
V _{MAX}	.35	.46	.90	1.06	.33	.38	.75	.11
D _{MAX}	-	-	239	222	335	218	284	284

	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	OSF04	OSF04	OSF05	OSF05	OSF06	OSF06	OSF07	OSF07	OSF08	OSF08
V _{AVE}	.44	.21	.22	.30	.23	.24	.67	.35	.56	.27
V _{MAX}	.54	.37	.27	.43	.33	.33	.84	.52	.68	.35
D _{AVE}	199	241	168	193	202	205	178	199	181	178

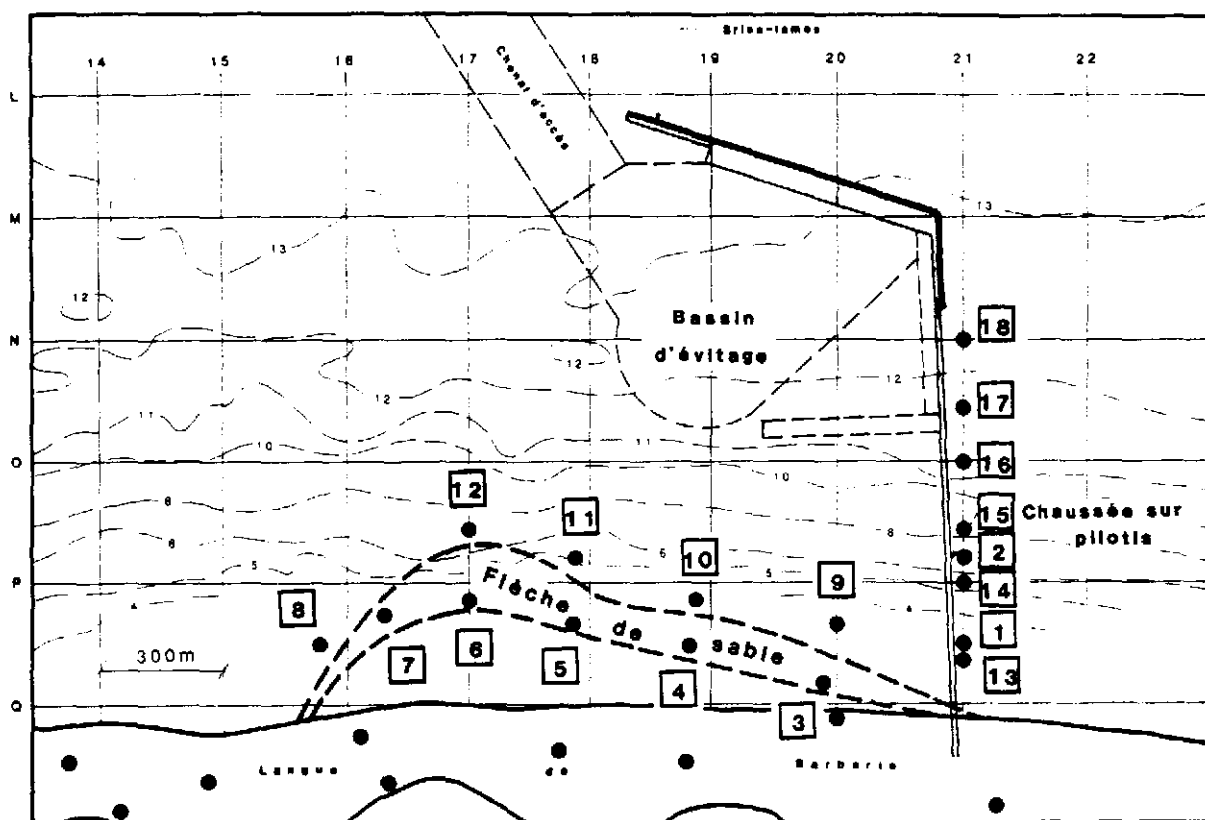


Figure 4.8 Etude du terminal au large avec chaussée sur pilotis

Emplacement d'enregistreurs de vagues

1-2 après 380 jours

3-8 après 434 jours

9-12 après 805 jours

13-18 après 896 jours

On a remarqué une certaine concentration de vitesses vers le large, le long d'une coupe transversale définie par les emplacements 15 à 17. Toutefois cette concentration ne contribuerait pas au transport littoral.

Le même phénomène a été observé sur les enregistrements vidéo dont on s'est aussi servi pour évaluer ce processus de formation. En raison de la variation de l'angle d'attaque des vagues sur la flèche en formation d'une part, et de la diminution de la hauteur des vagues d'autre part, les colorants (habituellement entraînés le long de la plage en eau très peu profonde à des vitesses comprises entre 1,0 et 1,4 m/s), ralentissaient d'une manière importante. On n'a remarqué un mouvement important qu'en eau plus profonde. A l'extrémité de la flèche le nuage de colorant se séparait du rivage et progressait dans la direction indiquée sur figure 4.9. Cette représentation schématique du mécanisme de transport, (valable pour la plupart de l'ensemble des essais 1401) ainsi que les données sur les vagues et les courants mènent à la conclusion que même si l'on prend en considération les effets d'échelles dans le modèle, le transport littoral sur le prototype serait presque complètement interrompu. Cela déclencherait la formation et la progression continue d'un tombolo jusqu'au point où des courants de marée pourraient l'éroder et transporter les matériaux dans un secteur de plus grande agitation, ou jusqu'au point où la flèche rejoindrait l'ouvrage. La première hypothèse implique toutefois que l'extrémité du tombolo serait transformée en un banc de sable parallèle au rivage, qui se propagerait éventuellement en direction du sud pour être ensuite atteint par des vagues plus hautes. Toutefois le transport de sédiments autour du bord du tombolo ainsi formé devrait s'effectuer sur le prototype à un taux très faible; il était à peine observable dans le modèle.

Durant les divers stades de formation du tombolo on a pu observer une réflexion importante provenant de certains secteurs du tombolo, et se dirigeant vers la zone des postes d'amarrage. Cela ne se produirait en réalité qu'en présence de vagues très longues. Un autre système de vagues progressait en direction du sud le long du bord intérieur des quais et pourrait exciter les mouvements des navires dans ce secteur [fig. 4.9]. Après 67 heures (presque trois ans sur le prototype) on a arrêté l'ensemble des essais. Comme l'indiquent les figures 4.3 et 4.4, la distance entre l'extrémité du tombolo et le bassin d'évitage était encore de 300 m et la flèche avait tendance à se propager avec son centre de gravité situé au sud du bassin d'évitage. Si on ne tenait pas compte de la capacité de transport croissante du courant pendant la formation d'un tombolo, (ce qui pouvait, dans une certaine mesure, compenser une diminution de l'agitation des vagues sur une plage en progression), il faudrait théoriquement au moins trois autres années sans entretien avant que les installations portuaires soient influencées par la sédimentation. Toutefois pendant la même période la plage au sud des installations portuaires continuerait de s'éroder à cause de l'interruption du transport littoral. Puisque la partie gravement touchée de cette plage se situait au-delà des limites du modèle, aucune attention supplémentaire n'a été consacrée à la mesure du taux d'érosion après l'ouverture de la première brèche.

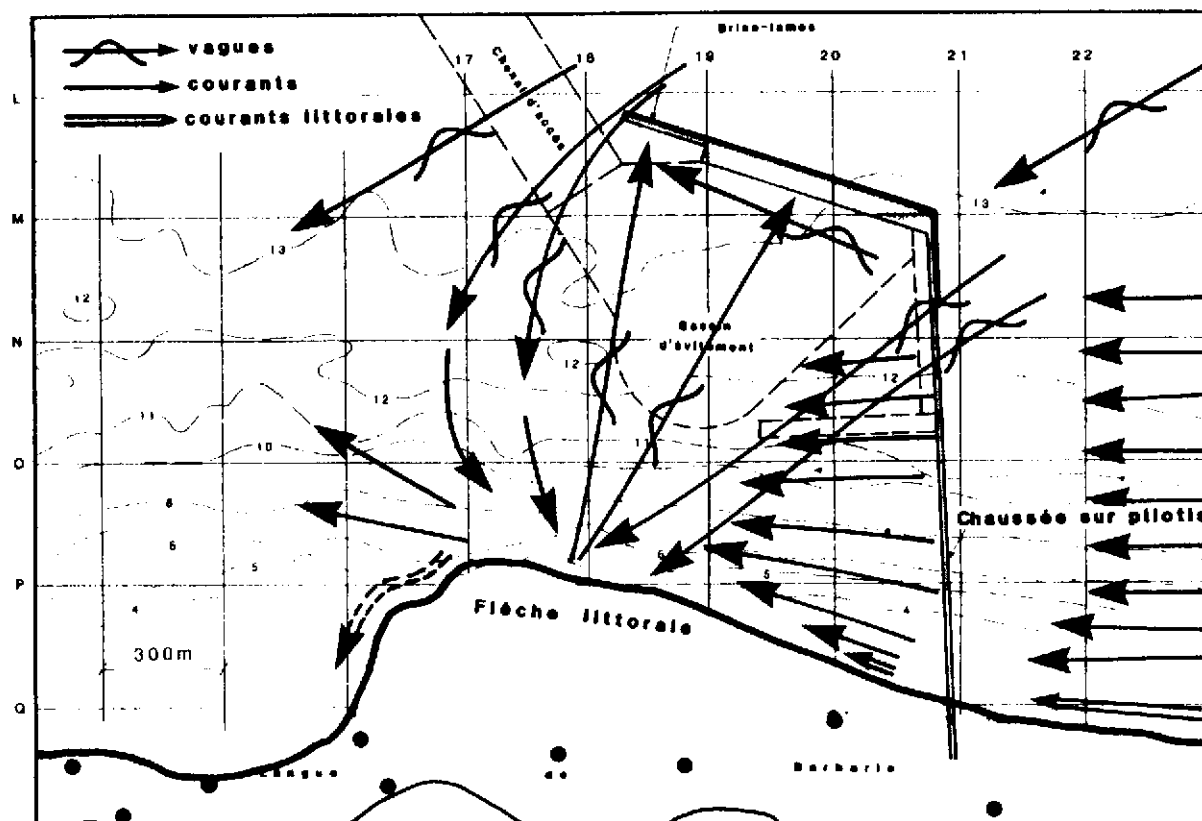


Figure 4.9 Etude du terminal au large avec chaussée sur pilotis

Directions dominantes des courants et des vagues

Un contournement artificiel dans le cas de cet aménagement serait considérablement moins coûteux que dans le cas d'un port installé dans l'estuaire avec un chenal d'accès profond, (étudié dans les deux rapports précédents [réf. 1, 7]) ou que dans le cas d'un terminal relié au rivage par une chaussée. Des matériaux de plage pourraient être transportés des zones d'accumulation aux zones d'érosion puisque cela pourrait être fait avec des équipements sur la terre ferme et sans interférer avec les voies de circulation majeure.

En conclusion, un terminal au large avec chaussée sur pilotis doit être considéré comme étant une solution fiable.

4.3 Conditions de Tempêtes

La génération de régimes moyens de vagues dans un modèle sédimentologique est généralement suffisante pour obtenir la tendance générale de l'évolution morphologique. Puisque l'on sait que le transport des sédiments varie en fonction du carré ou d'une puissance plus élevée de la vitesse, des écarts de courte durée des conditions moyennes peuvent déclencher des modifications extrêmes des modes d'érosion et de sédimentation. On a par conséquent décidé de générer des vagues plus hautes pendant une durée limitée et de surveiller ces modifications. Le signal de génération des vagues a été accru de 50 % et la zone du modèle a été soumise à ces vagues pendant 4 heures (modèle), correspondant à 56 jours (prototype). La figure 4.10 présente les régimes de vagues et de courants peu de temps avant et après l'accroissement (OSF09/OSF10) ainsi que les régimes de vagues 5 jours après (WAV38). Il était évident qu'avec des vagues plus hautes il y a eu augmentation de l'énergie des ondes longues et par conséquent de l'énergie totale, surtout entre l'ouvrage et le générateur.

On a mesuré la vitesse le long de la plage en deux emplacements et noté un accroissement de 234% de la vitesse moyenne à l'emplacement 2, et de seulement 52% à l'emplacement 3. Ceci illustre à quel point le transport littoral dépend de la hauteur et de la direction des vagues. Les enregistrements vidéo ont montré que les vitesses le long d'une coupe transversale perpendiculaire au rivage étaient plus régulièrement distribuées que dans le cas de vagues plus petites. Le maximum de la distribution des vitesses était plus rapproché du rivage ce qui entraînait vraisemblablement un transport plus important de sédiments. On pouvait également observer qu'une plus grande quantité de matériaux était transportée le long du bord du tombolo dans ces conditions de vagues. La répartition des vagues derrière l'ouvrage était comparable à celle observée dans le cas des vagues plus petites, mais elle était toutefois beaucoup plus accentuée. Pendant les tempêtes on peut s'attendre à une agitation intense due aux vagues le long du quai au large.

Il va sans dire qu'une plus grande agitation due aux vagues engendre un transport de sédiments beaucoup plus élevé le long du rivage. Etant donné leurs fortes capacités de chasse ("flushing capability") les courants et les vagues derrière l'ouvrage, devaient

OSF09/10

	OSF09	OSF10	OSF09	OSF10	OSF10 a été effectué avec des vagues plus grandes
	2	3	2	3	
V_{AVE}	.38	.17	.86	.23	
V_{MAX}	.53	.25	1.77	.38	
D_{MAX}	193	174	220	200	

	5		6		7		8		9		10		11	
H _{AVE}	1.20	1.75	.54	1.20	.35	.65	.57	.73	.88	1.15	1.24	1.64	.82	1.08
H _{MAX}	1.48	2.26	.71	1.45	.58	.85	.79	.93	1.06	1.40	1.42	1.89	1.02	1.25

WAV38

	5	6	7	8	9	10	11
H_{AVE}	1.56	2.80	1.23	1.00	.71	1.10	1.02
H_{MAX}	2.04	3.18	1.65	1.31	1.08	1.27	1.37

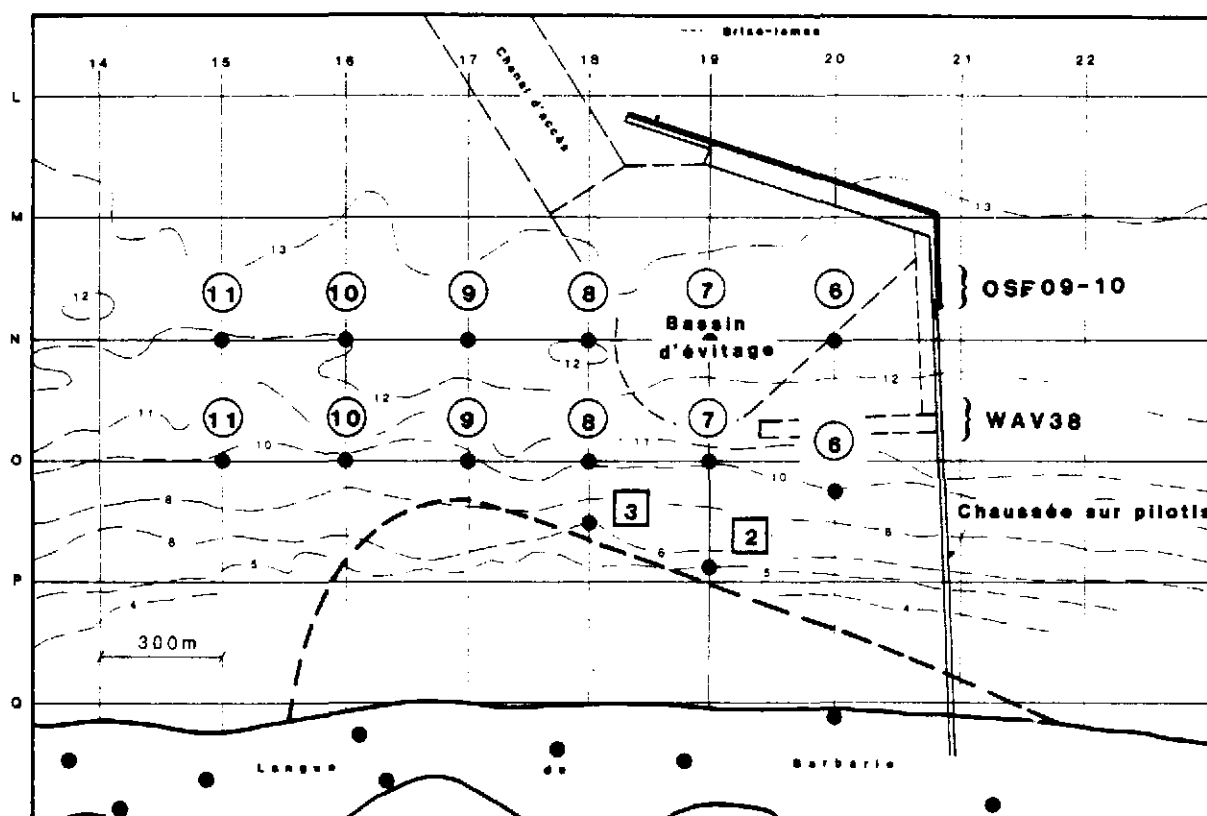


Figure 4.10 Etude du terminal au large avec chaussée sur pilotis

Emplacement d'enregistreurs de vagues

Essai 1402 (des vagues plus hautes)

OSF09 après 938 jours

OSF10 après 945 jours

WAV38 après 950 jours

transporter de plus grandes quantités de matériaux le long de la plage non perturbée. Tel que déjà indiqué à la figure 4.5 le taux de sédimentation s'est considérablement accru pendant cette période relativement courte. Puisque dans la nature il existe une source presque illimitée de sédiments, une période de tempêtes accélérera très vraisemblablement la progression de la flèche. La figure 4.11 présente au moyen de deux photographies les effets d'une plus grande agitation due aux vagues. Sur la photographie du bas on peut observer une certaine érosion le long du bord sud de la flèche. La photographie du haut montre, au nord de la flèche, la formation de rides accentuées qui s'étendent loin au large, indiquant que la dérive littorale se produit dans une bande plus large. La figure 4.12 illustre les résultats du levé bathymétrique avant et après les 56 jours de vagues plus hautes suivant 8 jours de régime de vagues moyennes. La quantité de matériaux déposés pendant ces 64 jours s'élève à

$$292\,500\text{ m}^3 + 4\,570\text{ m}^3/\text{jour}$$

La première période de conditions "moyennes" de vagues (938 jours) avait fourni

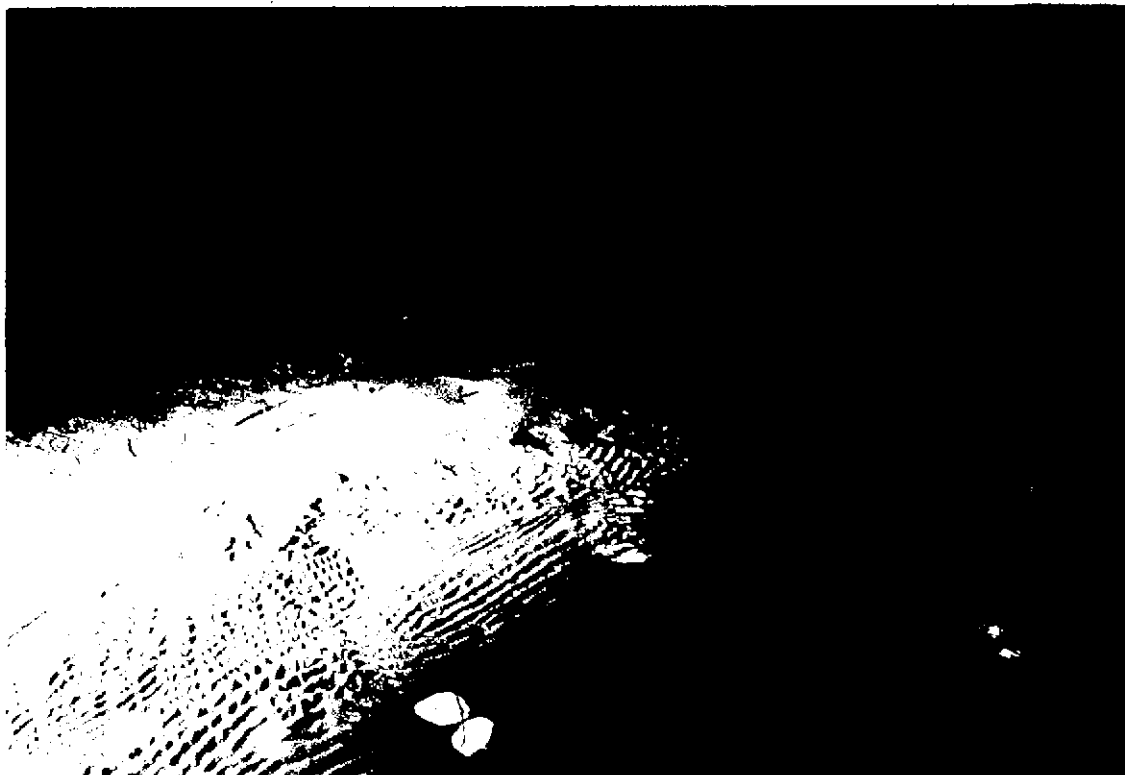
$$2\,350\,000\text{ m}^3 + 2\,505\text{ m}^3/\text{jour}$$

correspondant à près de 100 % de la dérive littorale.

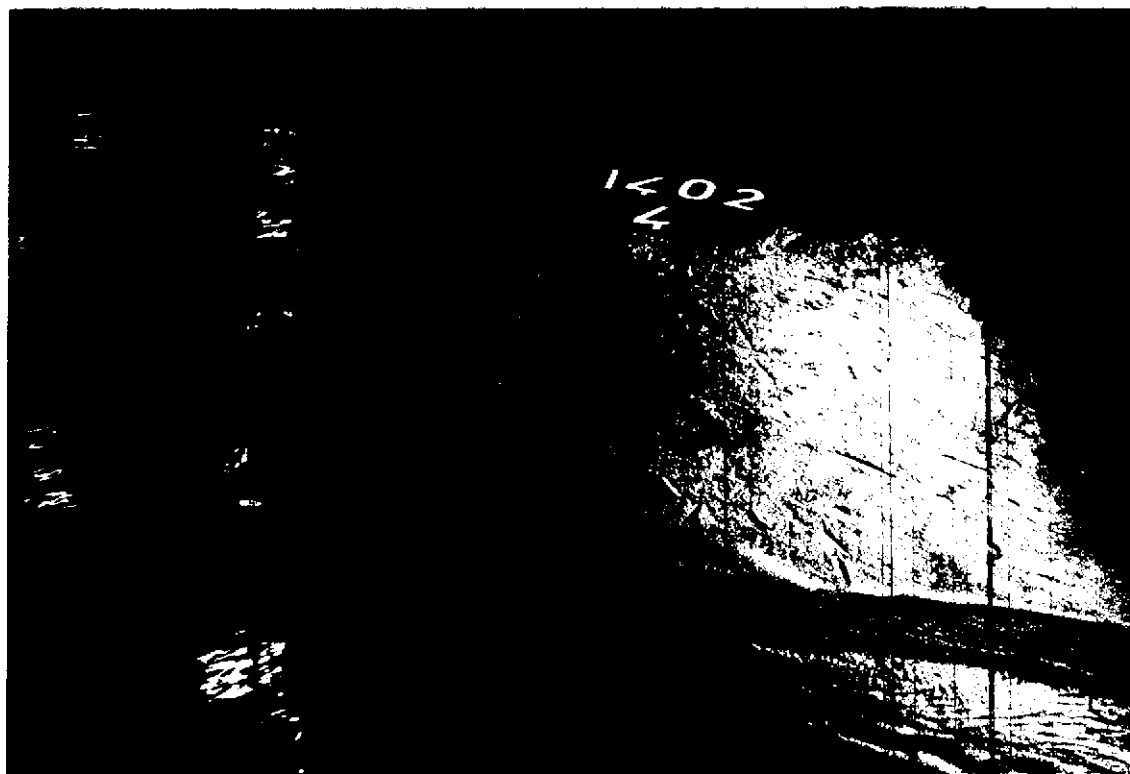
Comme on peut le constater sur le graphique le centre du dépôt est situé près de l'extrémité de la flèche. Aucune modification n'a été enregistrée sur la plage méridionale de la flèche tandis qu'on a détecté une érosion distincte au sud et au nord du secteur en question. Puisque la plage septentrionale n'avait pas été alimentée à un taux supérieur au taux habituel pendant ce court ensemble d'essais, l'on avait pu de toute manière s'attendre à une érosion à cet endroit.

4.4 Port avec 7 Postes d'Amarrage et Chaussée sur Pilotis

L'agrandissement futur du terminal jusqu'en l'an 2000 nécessitera le prolongement des quais en direction du rivage ce qui pourrait rétrécir considérablement l'ouverture entre le terminal et le rivage. Puisque cet agrandissement ne sera logiquement entrepris que quelques années après la formation de la flèche, on a décidé de laisser la topographie inchangée et de poursuivre l'étude dans les mêmes conditions de vagues mais avec l'agrandissement incorporé au modèle. Puisque vraisemblablement cet ouvrage protégera une zone beaucoup plus grande le long du rivage, on peut s'attendre à ce que la flèche s'agrandisse avec une base plus large et à ce que le courant littoral résiduel soit moindre que dans le cas de la configuration précédente. D'autre part on pourrait formuler l'hypothèse que la fermeture partielle du passage entre les pilotis entraînerait une concentration des courants engendrés par la marée et les vagues.



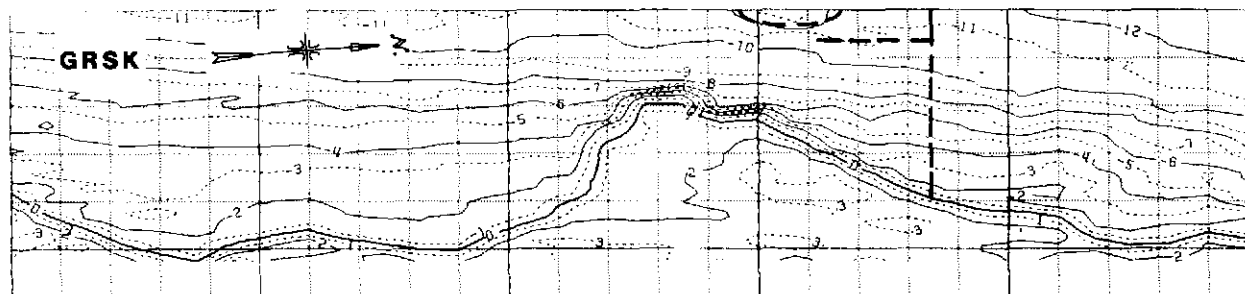
La flèche littorale vûe du nord



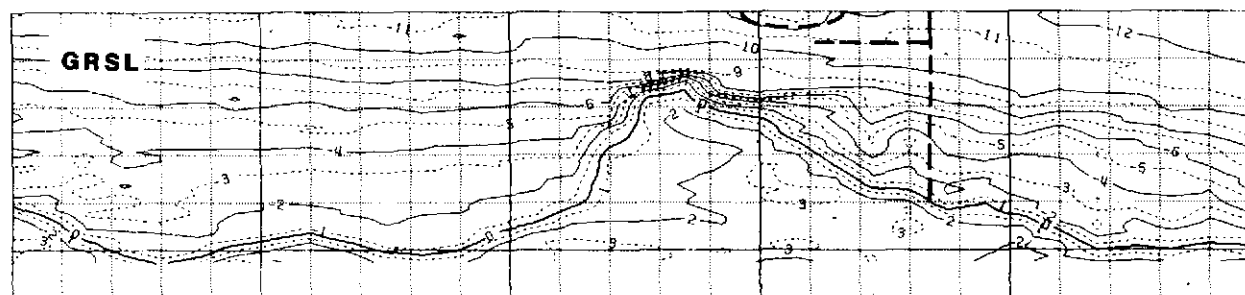
La flèche littorale vûe du sud

**Figure 4.11 Etudes du terminal au large
avec chaussée sur pilotis**

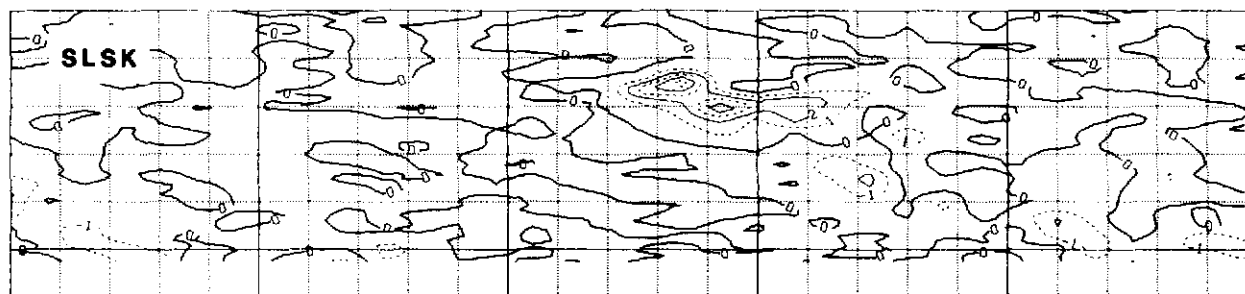
**Formation de la plage après 56 jours avec
des vagues plus hautes**



Bathymétrie après 938 jours



Bathymétrie après 1002 jours



Erosion (—) et sédimentation (+)
après 64 jours

0 200 400 600 800 1000m

Figure 4.12 Etude du terminal au large

Modification de la bathymétrie après 56 jours avec des vagues plus hautes

	OSF11	OSF11	OSF14	OSF14
	1	2	1	2
V_{AVE}	.12	.21	.15	.23
V_{MAX}	.29	.28	.29	.26
D_{MAX}	208	160	233	152

	5		6		7		8		9		10		11	
RMS	.28	.27	.28	.28	.36	.33	.33	.31	.35	.33	.30	.28	.29	.26
H _{AVE}	1.24	1.18	.90	.68	.15	.16	.52	.41	.22	.14	.72	.71	1.06	1.00
H _{MAX}	1.46	1.46	1.06	.80	.20	.25	.61	.59	.32	.35	.88	.81	1.17	1.19

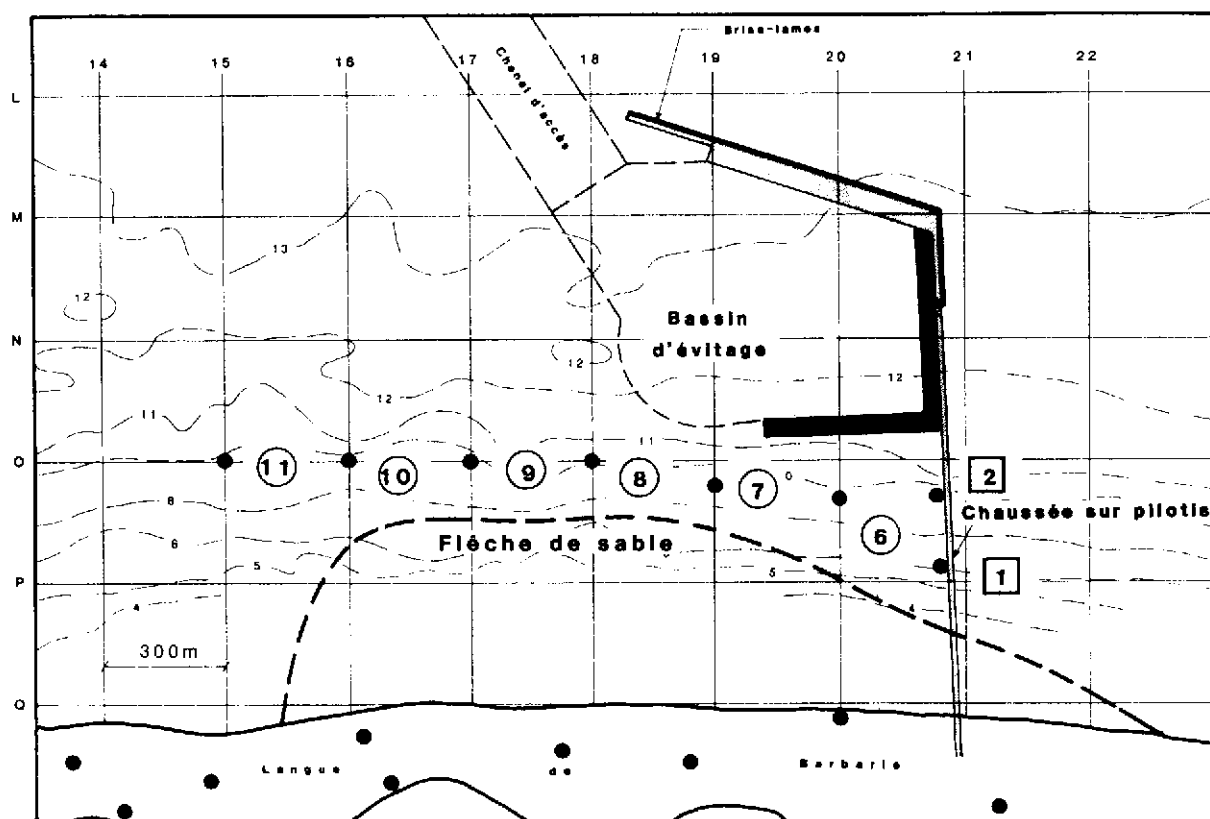
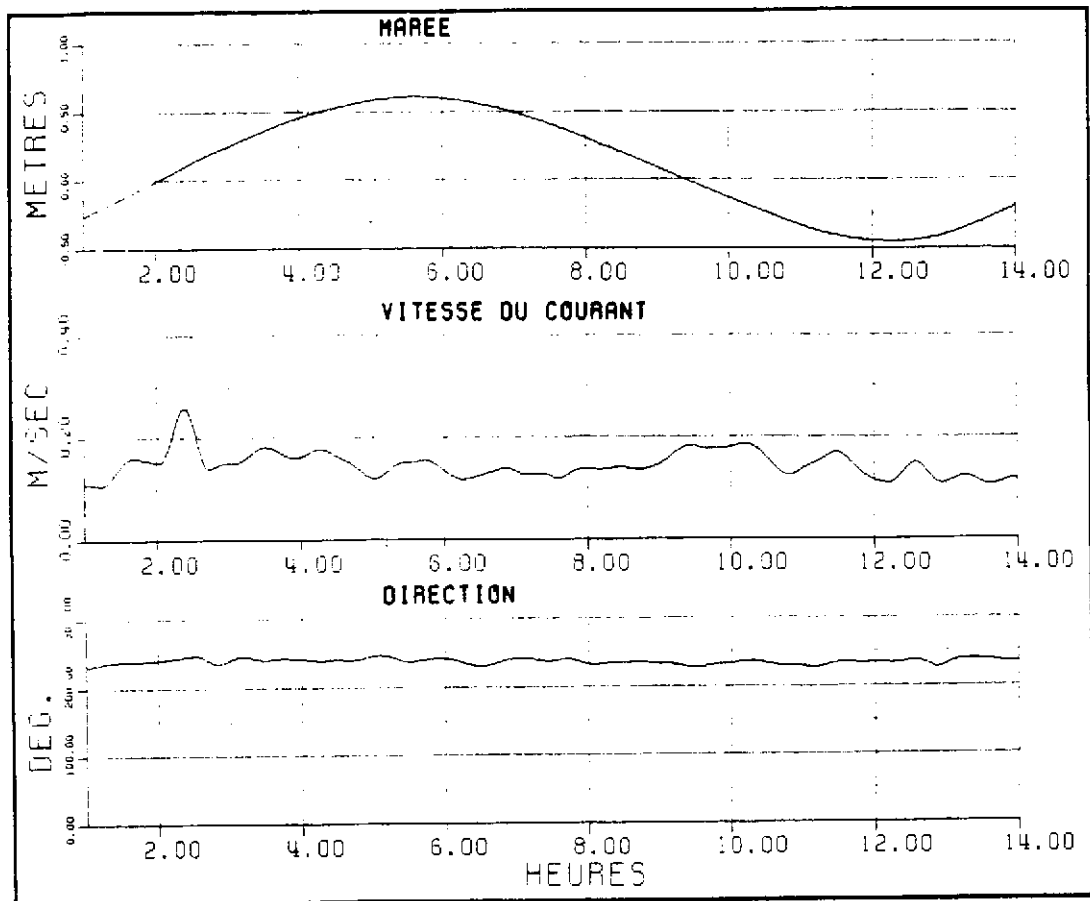


Figure 4.13 Etude du terminal agrandi

Emplacement d'enregistreurs de vagues - Essai 1403

OSF11 après l'agrandissement

OSF14 après 322 jours



Statistiques sur le courant

$V_{AVE} = .15 \text{ m/s}$
 $V_{MAX} = .29 \text{ m/s}$
 $D_{AVE} = 236^\circ$
 $D_{MAX} = 233^\circ$

Figure 4.14 Etude du terminal agrandi
Vitesse et direction du courant (OSF14)

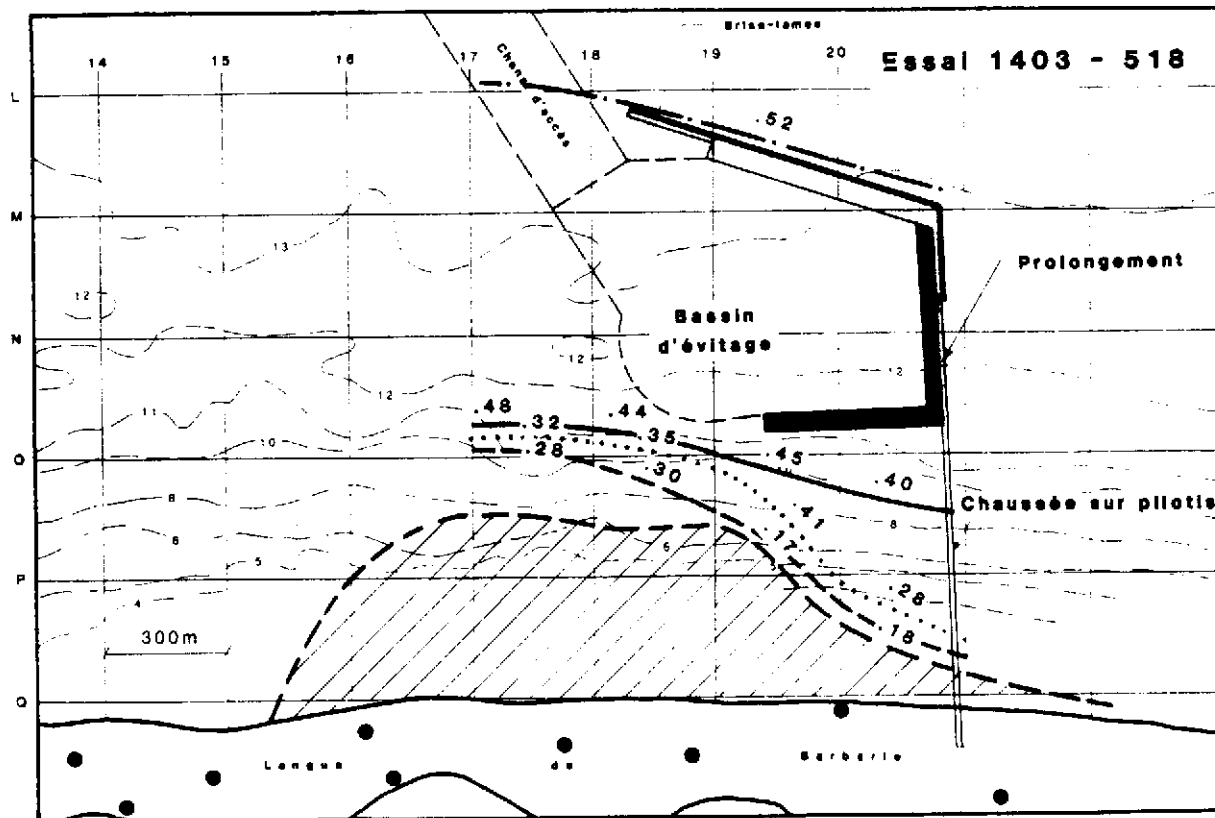
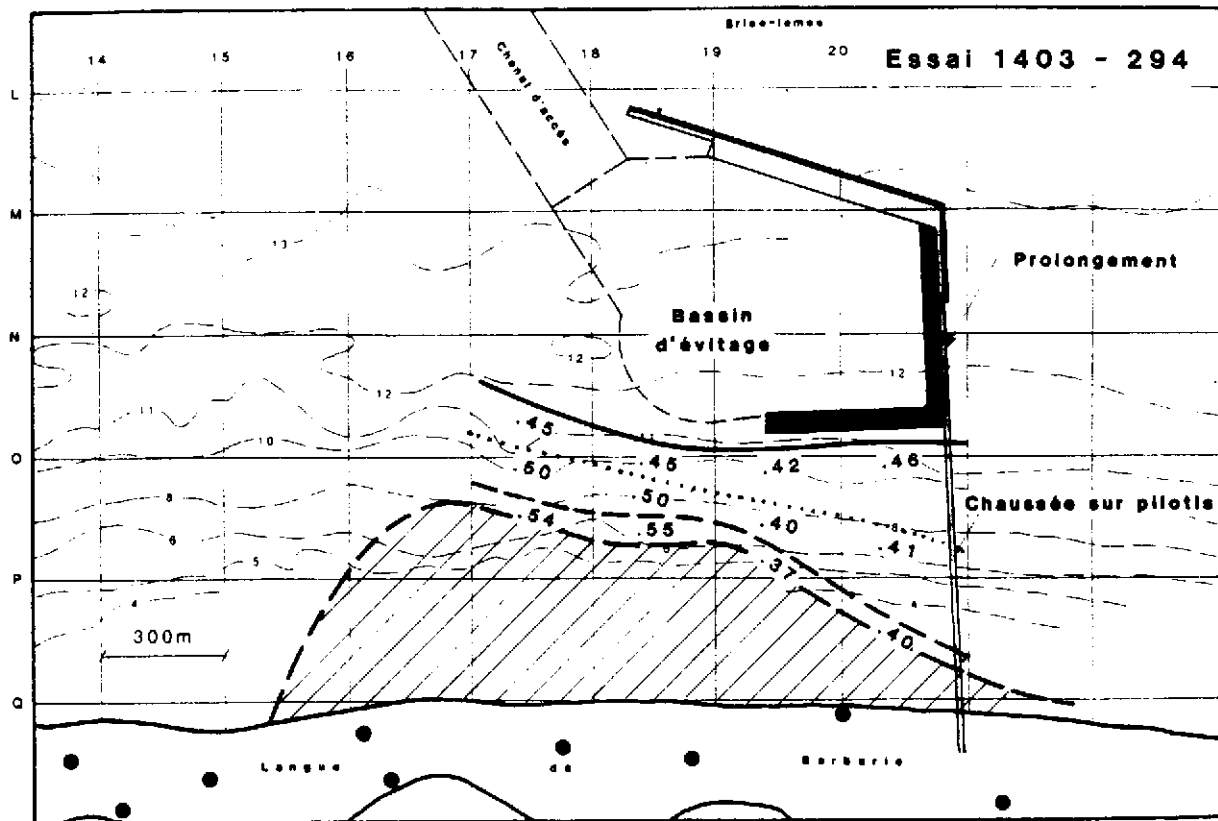
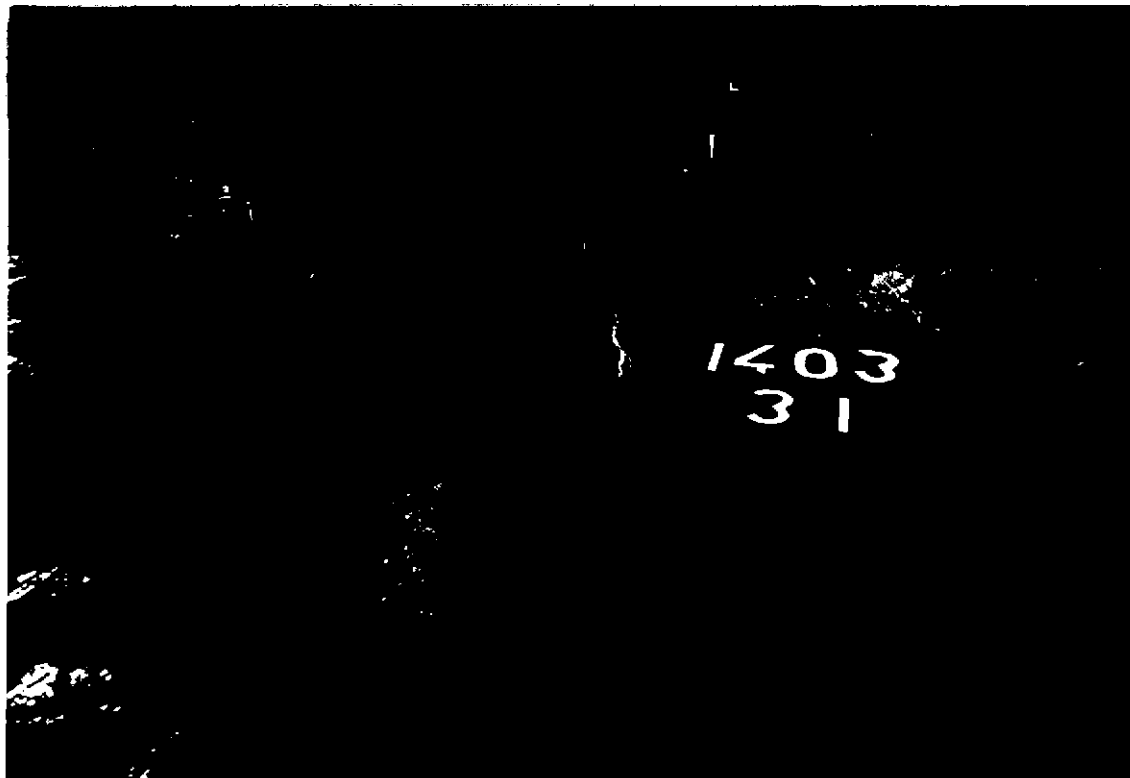


Figure 4.15 Etude du terminal agrandi
Trajectoires de flotteurs après 294 et 518 jours



Situation avant l'essai 1403



Les courants autour de la flèche littorale

Figure 4.16 Etude du terminal agrandi

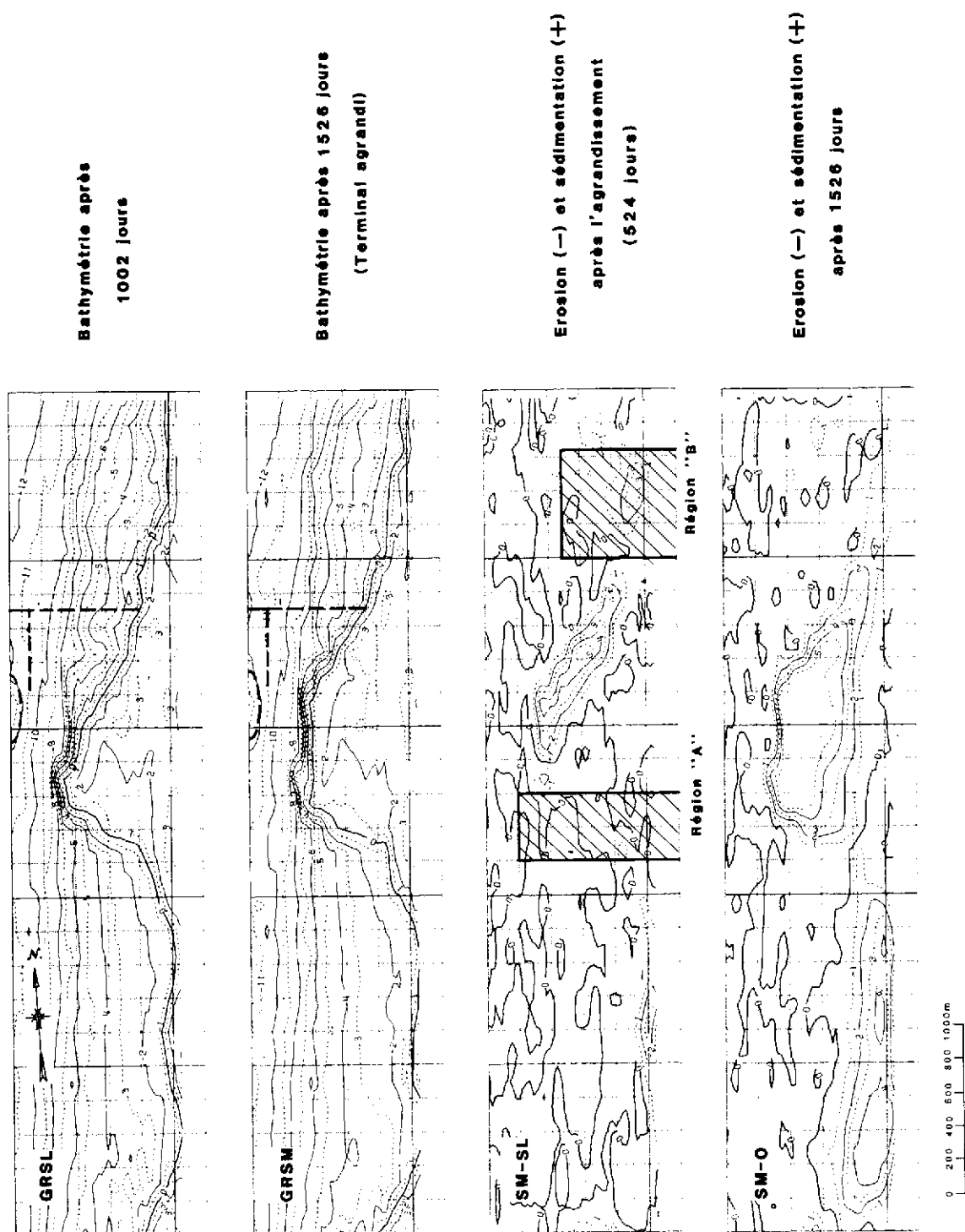


Figure 4.17 Etude du terminal agrandi

Modifications de la bathymétrie après l'agrandissement du terminal

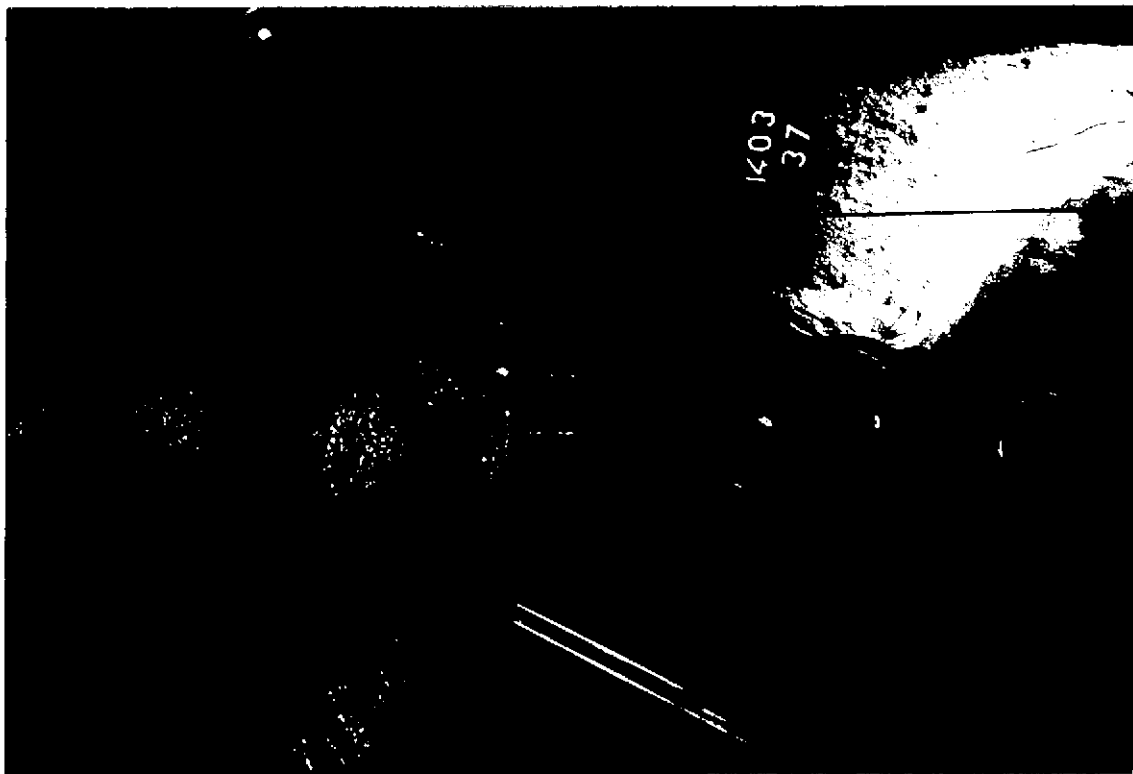


Figure 4.18 Etude du terminal agrandi
Configuration des vagues autour du terminal

Cela pourrait produire en nature, de plus grandes vitesses plus près de la plage et par conséquent, en raison d'une érosion plus élevée, réduire le danger d'une obstruction complète de la zone située entre le terminal et le rivage.

Le plan de l'ouvrage est présenté sur la figure 4.13 sur laquelle on a indiqué également les emplacements des points de mesure des vagues et des courants. OSF11 représentait les conditions juste après l'agrandissement, tandis que OSF14 représentait la situation après 23 heures d'essais, c'est-à-dire 322 jours (prototype). Les vitesses moyennes n'ont été que légèrement accrues après cette période d'essais et les valeurs maximales n'ont pas été sensiblement différentes. Les directions du courant ont été influencées par le tombolo en formation. Les courants étaient déviés dans le sens des aiguilles d'une montre et ensuite se propageaient parallèlement au bord du tombolo tourné vers le large (bord qui devenait de plus en plus abrupte). La hauteur moyenne des vagues, convenant le mieux pour des comparaisons, diminuait de plus en plus indiquant que l'ouverture continuait de se fermer. La figure 4.14 présente un exemple d'analyse des mesures effectuées aux emplacements indiqués sur la figure 4.13.

Pendant l'essai (en plus d'effectuer des mesures de vitesse) on a aussi relevé les trajectoires de flotteurs pour obtenir des indications sur la direction de l'écoulement. La figure 4.15 présente la situation après 294 et 518 jours. L'allongement de l'extrémité septentrionale de la flèche et le recul de son extrémité méridionale ont entraîné une diminution des courants littoraux et ont permis au courant de s'éloigner du rivage (partie inférieure de la figure 4.15) à la ligne 19 du quadrillage. Cela apparaît également clairement sur la figure 4.16 qui présente aussi la situation initiale, et sur laquelle les directions de l'écoulement sont indiquées par les colorants. L'effet d'étranglement a produit un courant au large dont la vitesse n'était que légèrement plus élevée que celle du courant littoral non perturbé, soit de 0,25 à 0,30 m/s.

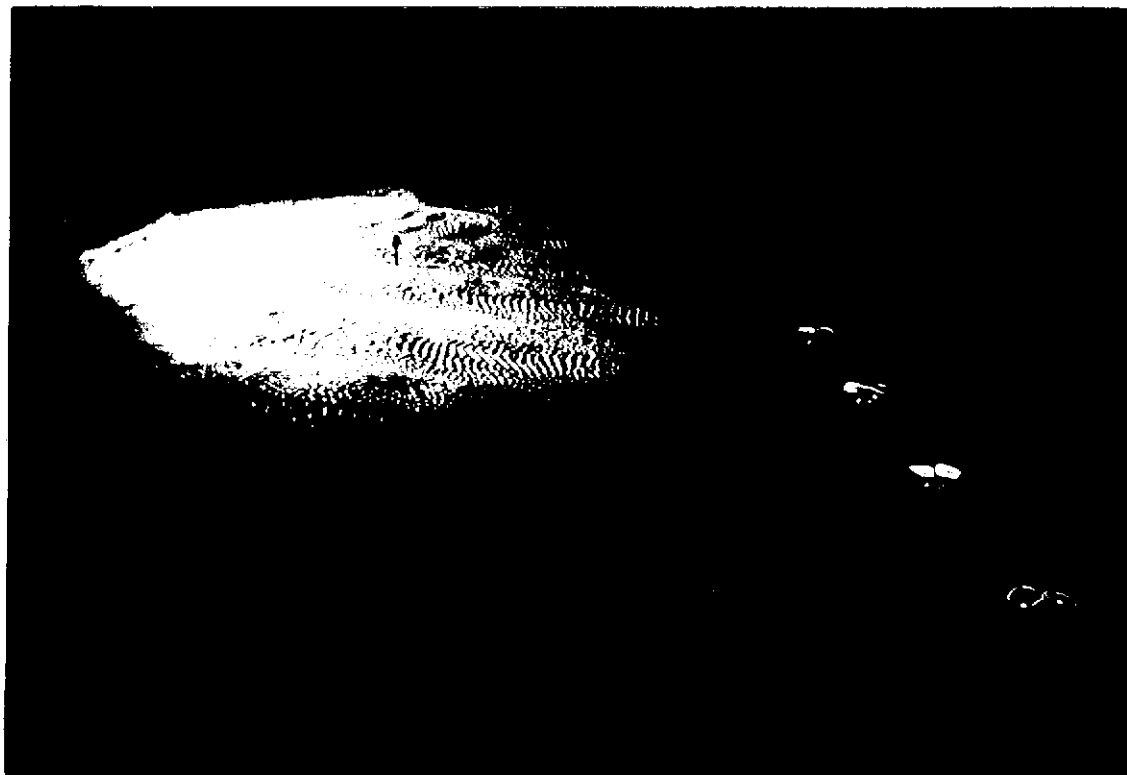
L'observation visuelle et les enregistrements vidéo ont indiqué que la configuration de la flèche a nettement changé après l'agrandissement de l'ouvrage. Comme indiqué sur la figure 4.17 l'extrémité sud du tombolo a été érodée et les matériaux qui la composaient se sont très lentement déplacés le long du bord méridional de la flèche. Pendant ce temps approximativement 35 000 m³ ont été érodés et 16 000 m³ se sont déposés dans la région identifiée par "A" sur la figure 4.17. Cela a mené à la conclusion qu'il y a eu érosion prédominante et que des matériaux ont été apportés du nord. Toutefois le taux de transport de 67 m³/jour, ou le transport net de 36 m³/jour, ne s'élevait qu'à 2% (1% net) du transport littoral nécessaire au maintien de l'équilibre de ce secteur. Des matériaux pouvaient même avoir été transportés en direction du nord par une configuration complexe des vagues engendrées derrière l'ouvrage. La flèche a complètement changé de forme et s'est agrandie alors plus directement vers le bassin d'évitage. Les configurations des vagues derrière l'ouvrage étaient plus complexes qu'elles ne l'avaient été dans le cas de la disposition originale. La figure 4.18 présente 2 photographies prises sous des angles différents et indique qu'il y avait encore une réflexion élevée provenant de la flèche et se

dirigeant vers la partie intérieure du terminal. Dans le cas de vagues irrégulières, il se pourrait que cette agitation des vagues ne soit pas aussi prononcée. Ces vagues réfléchies influenceront toutefois les mouvements de navires amarrés surtout si leurs périodes sont longues.

Les observations vidéo ont montré que les courants étaient très lents à l'intérieur du bassin du port et qu'un lent tourbillon concentré dans le bassin d'évitage pouvait entraîner le dépôt de sédiments fins dans ce secteur. Les estimations de vitesses du courant variaient de 0,1 à 0,15 m/s, ce qui vraisemblablement n'influenceraient pas les efforts d'amarrage.

Après l'agrandissement, 654 000 m³ (1 248 m³/jour) de matériaux se sont accumulés derrière l'ouvrage. Cela correspondait au taux de dépôt le plus faible de tout l'ensemble des essais. On doit toutefois souligner qu'en raison du prolongement du brise-lames perpendiculairement au rivage, une configuration complètement différente des vagues s'est manifestée sur le rivage septentrionale. Une réflexion marquée sur la face verticale du brise-lames ainsi prolongé, produisait des vagues se propageant vers le rivage dans une direction de 30 à 50 degrés par rapport au nord; ces vagues se superposaient alors aux vagues incidentes pour ainsi ralentir la dérive littorale. L'observation visuelle des courants littoraux a révélé la présence d'une zone très calme dans ce secteur, indiquant l'influence du deuxième système de vagues (réfléchies) qui générerait un courant littoral vers le nord. Toutefois, puisque ce secteur se trouvait près des limites septentrionales de la section à fond mobile du modèle, des effets de bords ne peuvent être totalement exclus. Ce résultat peut être constaté sur la figure 4.17 sous forme d'un dépôt accru au nord de la chaussée sur pilotis. D'après le relevé bathymétrique on a calculé que la quantité de matériaux déposés s'élevait à 285 000 m³ pour la région "B" (identifiée sur la figure 4.17). La figure 4.19 montre l'engraissement le long du rivage après l'abaissement du niveau d'eau à la fin de l'essai. La morphologie du dépôt (photographie du haut), montre clairement à quel point ce dépôt dépend d'une certaine configuration de vagues et de certains courants de retour, distribuant peut-être les matériaux perpendiculairement à la ligne de rivage. La photo du bas montre le tombolo avec ses plages aux pentes abruptes, sur lesquelles un transport littoral mineur ne pourrait se produire que dans une bande très étroite.

La figure 4.20 enfin fournit une représentation de l'agitation due aux vagues et aux courants, après environ 500 jours, peu de temps avant la fin des essais. La hauteur moyenne des vagues près du rivage, quoique toujours par une profondeur d'eau d'environ 10 m (OSF15), variait entre 0,30 et 0,50 m. Ces vagues étaient formées par un système complexe de différents trains d'ondes réfléchis et re-réfléchis. Les vitesses près des pilotis n'avaient pas changé sensiblement (comparaison avec la figure 4.13). Aux emplacements 3 et 4 on a relevé des vitesses VAVE de 35 à 40 cm/s, correspondant à un courant incapable de transporter beaucoup de sédiments le long de la plage.



La plage septentrionale



Flèche littorale

Figure 4.19 Etude du terminal agrandi

Sédimentation après 524 (1526) jours

	OSF15	OSF15	OSF16	OSF16
	1	2	3	4
V_{AVE}	.18	.15	.35	.40
V_{MAX}	.24	.23	.48	.51
D_{MAX}	254	165	183	170

OSF15

	5	6	7	8	9	10	11
RMS	.30	.30	.37	.33	.38	.31	.32
H_{AVE}	1.14	.94	.30	.59	.29	.81	.94
H_{MAX}	1.35	1.10	.36	.70	.37	.92	1.18

OSF16

	5	6	7	8	9	10	11
RMS	.30	.30	.36	.39	.37	.31	.32
H_{AVE}	1.15	.91	.40	.17	.33	.78	.97
H_{MAX}	1.35	1.09	.48	.54	.60	.89	1.17

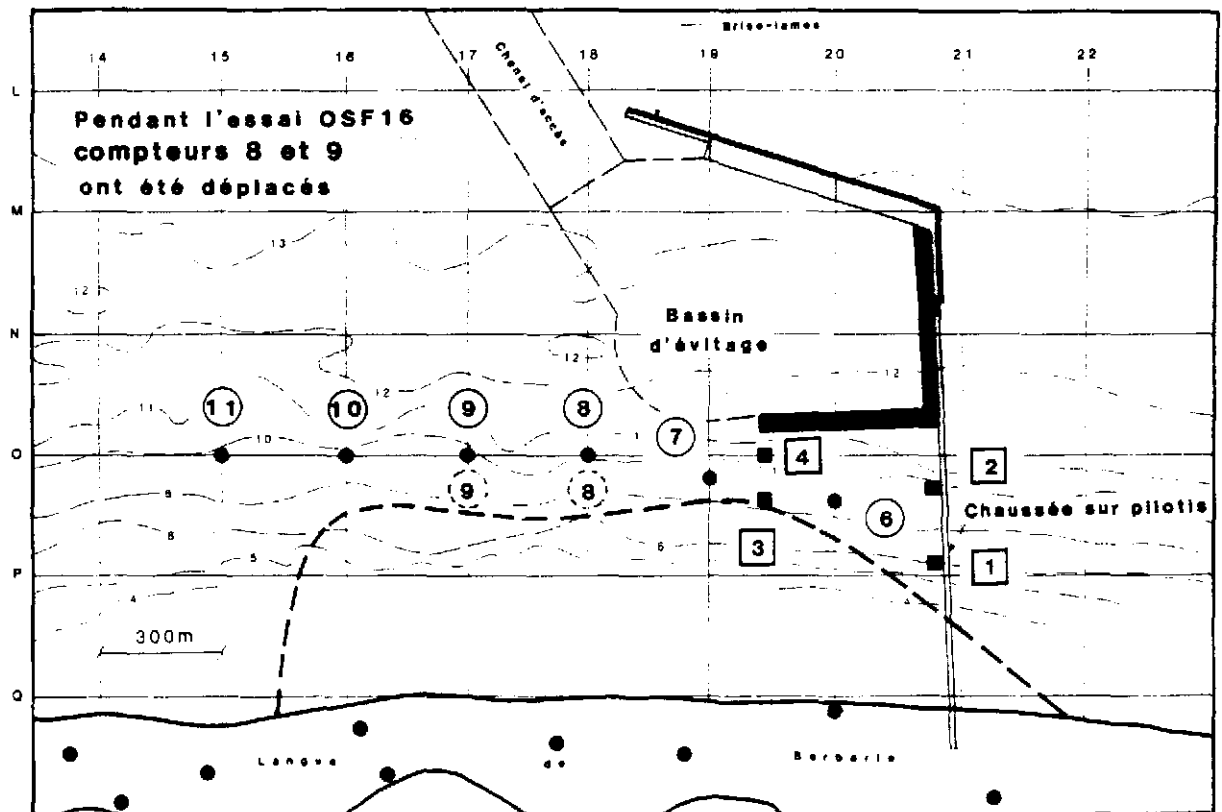


Figure 4.20 Etude du terminal agrandi
Emplacement d'enregistreurs de vagues - Essai 1403
 OSF15 après 504 jours
 OSF16 après 518 jours

Les résultats des essais sur modèle présentés ici, reflètent la réalité dans la mesure du possible sans que le stade final où le tombolo rejoint le brise-lames n'a pas été atteint. Quoique les vagues engendrées dans le modèle en distorsion aient exagéré la diffraction, les essais sous-estimaient les résultats, en raison de l'impossibilité de simuler le transport des sédiments par les courants ainsi que les sédiments en suspension. En raison de la nature complexe de l'interaction entre les vagues et les courants il est presque impossible d'interpréter les résultats des modèles de vagues et de sédiments à cause de l'effet de la contrainte de cisaillement avec le sédiment.

Pour pouvoir quantifier le transport possible le long du rivage à l'abri de l'ouvrage, on pourrait utiliser une méthode d'approximation à partir des vagues mesurées dans le modèle par une profondeur d'eau approximative de 10 m (nature). Si l'on supposait une hauteur moyenne des vagues de 0,30 m dans la section comprise entre les enregistreurs 7 à 9 ainsi qu'un angle d'approche constant de 5° et si l'on utilisait la méthode de flux d'énergie littorale telle que présentée dans le "Shore Protection Manual" [réf. 6], on obtiendrait un transport littoral annuel d'environ 75 000 m³/année (205 m³/jour). Cependant cet angle d'approche changerait et un courant contraire serait engendré au sommet de la flèche. Il ne resterait alors qu'un courant de marée oscillant, dont l'importance pourrait être accrue par un gradient du niveau moyen de l'eau. La turbulence, qui contribue généralement d'une manière substantielle à la dérive littorale, deviendrait presque nulle.

Le processus décrit ci-dessus se manifesterait pendant toute la durée de la formation de la flèche à une vitesse diminuant légèrement si le régime des vagues ne changeait pas. Pendant la formation de la flèche et avec des vagues s'approchant de plus en plus perpendiculairement au rivage, le processus de formation se transformerait en un déplacement de la flèche vers l'amont comme cela a pu être observé sur le modèle. Puisque la quantité de matériaux encore transportés en suspension est difficile à estimer, et surtout que les résultats des essais sont un peu sur-estimés, on peut tirer les conclusions suivantes:

- (a) La construction d'un terminal au large relié au rivage par un brise-lames interromprait immédiatement la dérive littorale et amorcerait un dépôt au nord du brise-lames. La capacité de cette zone de dépôt dépendrait de la longueur de l'ouvrage et elle se comblerait au même taux que celle de la dérive littorale. Après que la dérivation ait commencé, le chenal d'accès au port et le bassin d'évitage se combleraient à un taux approximatif de 2 800 m³/jour. Par conséquent, cette solution nécessiterait un entretien au moyen de dragues de haute mer, dont le coût serait élevé.
- (b) Un terminal au large relié par une chaussée sur pilotis semble constituer une meilleure solution. On peut supposer que, selon la disposition des pilotis de soutien, la dérive littorale ne serait pas perturbée par les pilotis.

Toutefois, la plage étant protégée de l'agitation des vagues par l'ouvrage, la force motrice de la dérive littorale serait affaiblie. Il se formerait, théoriquement à une vitesse de plus en plus faible, un tombolo (flèche) s'agrandissant en direction des installations portuaires. Son centre de gravité se trouverait dans la région où les courants engendrés par les vagues s'annuleraient. Une agitation accrue due aux vagues accélérerait le processus.

Après les essais de cette disposition, et pour les vagues utilisées, on peut envisager une période sans entretien d'une durée de plus de 6 ans dans le cas de l'ouvrage non prolongé. Cette période serait probablement plus longue en raison d'un certain transport des sédiments en suspension.

- (c) Le prolongement de ce terminal en direction du rivage modifierait cette situation de manière importante. Une forte réflexion sur la partie du brise-lames en caisson perpendiculaire au rivage, engendrerait une configuration de vagues qui diminuerait la vitesse de formation de la flèche d'environ 50%, et qui permettrait au processus de sédimentation de s'étendre vers le nord. Selon le type d'ouvrage utilisé pour le prolongement parallèle au rivage, la capacité de transport des courants littoraux pourrait être plus élevée ce qui ralentirait les dépôts, derrière le terminal, plus loin vers l'aval.

La figure 5.1 résume le processus de formation de la flèche en indiquant sous forme graphique les modifications de la courbe de niveau zéro pendant tout l'ensemble d'essais avec la chaussée sur pilotis. Ce graphique illustre la progression vers le nord, et les modifications de la forme de la flèche après le prolongement de l'ouvrage.

- (d) Dans le cas de la chaussée sur pilotis le processus d'érosion le long de la plage méridionale a débuté immédiatement et s'est poursuivi pendant tout l'ensemble d'essais, ses centres d'activités se situant environ à 2 000 et 3 000 m au sud de la chaussée. On pourrait s'attendre à ce qu'une première brèche dans la langue de Barbarie soit ouverte dans moins de deux ans. Des tempêtes pourraient accélérer ce processus. Toutefois l'engraissement de cette partie de la plage pourrait être effectué au moyen de systèmes de contournement sur la terre ferme, probablement à des coûts raisonnables.

En dépit des inconvénients mentionnés ci-dessus, le terminal au large avec chaussée sur pilotis est une solution satisfaisante. Ce terminal pourrait être prolongé, avec l'avantage que cela ralentirait le processus d'accumulation dans la zone abritée par l'ouvrage.

