

**CONTROLLED
UNCLASSIFIED**

11119
**CONTROLÉ
NON CLASSIFIÉ**

**Controlled Technical
Report**

**Rapport technique
contrôlé**

1985/10

CTR-HY-008

**L'ORGANISATION POUR LA MISE EN VALEUR DU FLEUVE SÉNÉGAL
PORT DE SAINT-LOUIS, SÉNÉGAL
ÉTUDES SUR MODÈLES HYDRAULIQUES – PHASE II
LE CHENAL PEU PROFOND**

V. Barthel

**Division of
Mechanical Engineering**

**Division de
génie mécanique**



**National Research
Council Canada**

**Conseil national
de recherches Canada**

Canada

DIVISION OF MECHANICAL ENGINEERING PUBLICATIONS

- UM** (Division of Mechanical Engineering Report)
Scientific and technical information considered important, complete and a lasting contribution to existing knowledge.
- TR** (Technical Report)
Information less broad in scope but a substantial contribution to existing knowledge.
- CTR** (Controlled/Classified Technical Report)
A Technical Report with controlled distribution for national security, proprietary or other reasons.
- LM** (Laboratory Memorandum)
Preliminary or exploratory information with controlled distribution.
- CAT** (Calibration Analysis and Test Report)
Information on minor laboratory projects or services.

PUBLICATIONS DE LA DIVISION DE GÉNIE MÉCANIQUE

- DM** (Rapport de la Division de génie mécanique)
Informations scientifiques et techniques jugées importantes, complètes et susceptibles de contribuer de façon durable à l'avancement des connaissances courantes.
- TR** (Rapport technique)
Informations de moindre importance, mais pouvant contribuer substantiellement à l'avancement des connaissances actuelles.
- CTR** (Rapport technique à diffusion contrôlée/classifiée)
Rapport technique à diffusion contrôlée pour des raisons de sécurité nationale, de propriété intellectuelle et autres.
- LM** (Mémoire de laboratoire)
Informations préliminaires ou de nature exploratoire à diffusion contrôlée.
- CAT** (Rapport d'étalonnage d'analyse et d'essai)
Informations sur de petits projets ou des services de laboratoire.

CONTROLLED
UNCLASSIFIED

11819
CONTRÔLÉ
NON CLASSIFIÉ

L'ORGANISATION POUR LA MISE EN VALEUR
DU FLEUVE SÉNÉGAL

PORT DE SAINT-LOUIS, SÉNÉGAL

ÉTUDES SUR MODÈLES HYDRAULIQUES - PHASE II

LE CHENAL PEU PROFOND

THE SHALLOW ACCESS CHANNEL

V. Barthel



This report may not be published wholly or in part or cited as a reference without the written consent of the Director.

Ce rapport ne doit pas être reproduit, ni en entier ni en partie, ni être cité en référence sans une autorisation écrite du Directeur.

Controlled
Technical Report

Rapport technique
contrôlé

1985/10

CTR-HY-008

J. Ploeg, Head/Chef
Hydraulics Laboratory/
Laboratoire d'hydraulique

E.H. Dudgeon
Director/
Directeur

Copy/Copie _____

PLM

REMERCIEMENTS

La présente étude est le fruit de la collaboration de plusieurs membres du Laboratoire d'hydraulique. J'aimerais remercier tout particulièrement D. H. Willis pour sa précieuse participation aux discussions portant sur les modèles à fond mobile, N. L. Crookshank pour la réalisation du modèle mathématique, R. B. Aitkin qui s'est chargé de la construction, de l'entretien et du fonctionnement du modèle et M. E. Fellows à qui l'on a confié la transcription de la version anglaise du rapport. Sans leur contribution et de celle de tous les autres, cette étude n'aurait pas pu être réalisée.

RÉSUMÉ

La stabilité d'un chenal peu profond donnant accès à l'estuaire du fleuve Sénégal a fait l'objet d'une étude sur modèle hybride sans distortion à fond mobile. Les résultats permettent de démontrer qu'il est difficile de combiner un modèle à sédimentation par les vagues avec un modèle à contrainte de cisaillement. L'utilisation de divers matériaux pour la constitution du fond mobile permet de définir de façon qualitative les endroits où se situeraient les systèmes de dérivation de la puissante dérive littorale et les endroits où il faudrait prévoir la sédimentation et l'érosion. Les essais sur modèles physiques doivent être complétés par une étude analytique approfondie.

ABSTRACT

The stability of a shallow access channel into the Sénégal estuary was investigated in a distorted hybrid mobile bed model. Results indicate the difficulty of combining a wave-sediment with a shear stress model. The use of different mobile bed materials allows qualitative answers as to where bypassing systems for the strong littoral drift would be situated and where to expect sedimentation and erosion. A comprehensive analytical study has to complement the physical model tests.

11119.

1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030, 2031, 2032, 2033, 2034, 2035, 2036, 2037, 2038, 2039, 2040, 2041, 2042, 2043, 2044, 2045, 2046, 2047, 2048, 2049, 2050, 2051, 2052, 2053, 2054, 2055, 2056, 2057, 2058, 2059, 2060, 2061, 2062, 2063, 2064, 2065, 2066, 2067, 2068, 2069, 2070, 2071, 2072, 2073, 2074, 2075, 2076, 2077, 2078, 2079, 2080, 2081, 2082, 2083, 2084, 2085, 2086, 2087, 2088, 2089, 2090, 2091, 2092, 2093, 2094, 2095, 2096, 2097, 2098, 2099, 2100, 2101, 2102, 2103, 2104, 2105, 2106, 2107, 2108, 2109, 2110, 2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2116, 2117, 2118, 2119, 2120, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2126, 2127, 2128, 2129, 2130, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135, 2136, 2137, 2138, 2139, 2140, 2141, 2142, 2143, 2144, 2145, 2146, 2147, 2148, 2149, 2150, 2151, 2152, 2153, 2154, 2155, 2156, 2157, 2158, 2159, 2160, 2161, 2162, 2163, 2164, 2165, 2166, 2167, 2168, 2169, 2170, 2171, 2172, 2173, 2174, 2175, 2176, 2177, 2178, 2179, 2180, 2181, 2182, 2183, 2184, 2185, 2186, 2187, 2188, 2189, 2190, 2191, 2192, 2193, 2194, 2195, 2196, 2197, 2198, 2199, 2200, 2201, 2202, 2203, 2204, 2205, 2206, 2207, 2208, 2209, 2210, 2211, 2212, 2213, 2214, 2215, 2216, 2217, 2218, 2219, 2220, 2221, 2222, 2223, 2224, 2225, 2226, 2227, 2228, 2229, 2230, 2231, 2232, 2233, 2234, 2235, 2236, 2237, 2238, 2239, 2240, 2241, 2242, 2243, 2244, 2245, 2246, 2247, 2248, 2249, 2250, 2251, 2252, 2253, 2254, 2255, 2256, 2257, 2258, 2259, 2260, 2261, 2262, 2263, 2264, 2265, 2266, 2267, 2268, 2269, 2270, 2271, 2272, 2273, 2274, 2275, 2276, 2277, 2278, 2279, 2280, 2281, 2282, 2283, 2284, 2285, 2286, 2287, 2288, 2289, 2290, 2291, 2292, 2293, 2294, 2295, 2296, 2297, 2298, 2299, 2300, 2301, 2302, 2303, 2304, 2305, 2306, 2307, 2308, 2309, 2310, 2311, 2312, 2313, 2314, 2315, 2316, 2317, 2318, 2319, 2320, 2321, 2322, 2323, 2324, 2325, 2326, 2327, 2328, 2329, 2330, 2331, 2332, 2333, 2334, 2335, 2336, 2337, 2338, 2339, 2340, 2341, 2342, 2343, 2344, 2345, 2346, 2347, 2348, 2349, 2350, 2351, 2352, 2353, 2354, 2355, 2356, 2357, 2358, 2359, 2360, 2361, 2362, 2363, 2364, 2365, 2366, 2367, 2368, 2369, 2370, 2371, 2372, 2373, 2374, 2375, 2376, 2377, 2378, 2379, 2380, 2381, 2382, 2383, 2384, 2385, 2386, 2387, 2388, 2389, 2390, 2391, 2392, 2393, 2394, 2395, 2396, 2397, 2398, 2399, 2400, 2401, 2402, 2403, 2404, 2405, 2406, 2407, 2408, 2409, 2410, 2411, 2412, 2413, 2414, 2415, 2416, 2417, 2418, 2419, 2420, 2421, 2422, 2423, 2424, 2425, 2426, 2427, 2428, 2429, 2430, 2431, 2432, 2433, 2434, 2435, 2436, 2437, 2438, 2439, 2440, 2441, 2442, 2443, 2444, 2445, 2446, 2447, 2448, 2449, 2450, 2451, 2452, 2453, 2454, 2455, 2456, 2457, 2458, 2459, 2460, 2461, 2462, 2463, 2464, 2465, 2466, 2467, 2468, 2469, 2470, 2471, 2472, 2473, 2474, 2475, 2476, 2477, 2478, 2479, 2480, 2481, 2482, 2483, 2484, 2485, 2486, 2487, 2488, 2489, 2490, 2491, 2492, 2493, 2494, 2495, 2496, 2497, 2498, 2499, 2500, 2501, 2502, 2503, 2504, 2505, 2506, 2507, 2508, 2509, 2510, 2511, 2512, 2513, 2514, 2515, 2516, 2517, 2518, 2519, 2520, 2521, 2522, 2523, 2524, 2525, 2526, 2527, 2528, 2529, 2530, 2531, 2532, 2533, 2534, 2535, 2536, 2537, 2538, 2539, 2540, 2541, 2542, 2543, 2544, 2545, 2546, 2547, 2548, 2549, 2550, 2551, 2552, 2553, 2554, 2555, 2556, 2557, 2558, 2559, 2560, 2561, 2562, 2563, 2564, 2565, 2566, 2567, 2568, 2569, 2570, 2571, 2572, 2573, 2574, 2575, 2576, 2577, 2578, 2579, 2580, 2581, 2582, 2583, 2584, 2585, 2586, 2587, 2588, 2589, 2590, 2591, 2592, 2593, 2594, 2595, 2596, 2597, 2598, 2599, 2600, 2601, 2602, 2603, 2604, 2605, 2606, 2607, 2608, 2609, 2610, 2611, 2612, 2613, 2614, 2615, 2616, 2617, 2618, 2619, 2620, 2621, 2622, 2623, 2624, 2625, 2626, 2627, 2628, 2629, 2630, 2631, 2632, 2633, 2634, 2635, 2636, 2637, 2638, 2639, 2640, 2641, 2642, 2643, 2644, 2645, 2646, 2647, 2648, 2649, 2650, 2651, 2652, 2653, 2654, 2655, 2656, 2657, 2658, 2659, 2660, 2661, 2662, 2663, 2664, 2665, 2666, 2667, 2668, 2669, 2670, 2671, 2672, 2673, 2674, 2675, 2676, 2677, 2678, 2679, 2680, 26

TABLE DES MATIÈRES

	Page
REMERCIEMENTS	(ii)
RÉSUMÉ/ABSTRACT	(iii)
LISTE DES ILLUSTRATIONS	(iv)
LISTE DES TABLEAUX	(vi)
LISTE DES SYMBOLES	(vii)
1.0 INTRODUCTION	1
2.0 CHENAL D'ACCÈS PEU PROFOND	5
2.1 Modèle mathématique unidimensionnel	7
2.2 Facteurs de mise à l'échelle	14
2.3 Essais avec fond en sable quartzeux	17
2.3.1 Chenal de 500 m	17
2.3.2 Chenal de 125 m	30
2.4 Essais avec matériau léger	34
2.4.1 Marées	38
2.4.2 Marées et vagues	38
3.0 DIAGRAMME D'ÉCOULEMENT	46
4.0 CONCLUSIONS	46
5.0 BIBLIOGRAPHIE	55
APPENDICE A	A1
PAGE DE DOCUMENTATION	

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure

1	Carte du Sénégal	2
2	Chenal d'accès peu profond	3
3	Mouillage au large avec chaussée sur pilotis	4
4	Terminal au large avec digue en talus	6
5	Schéma de l'estuaire du Sénégal (modèle mathématique)	8

LISTE DES ILLUSTRATIONS (suite)

Figure		Page
6	Spécimen de résultats graphiques du modèle mathématique	11
7	Sections A-E du chenal	12
8	Marée haute et basse dans l'estuaire	13
9	Vitesses des courants en fonction des sections de chenal	15
10	Chenal "D" premier plan	19
11 a-e	Marées et vitesses du courant - Chenal "D"	20
12	Photographie: Situation après 340 jours - Largeur du chenal: 500 m	26
13	Changements bathymétriques après 415 jours	27
14	Photographies: Chenal et cordon littoral après 140 jours sous l'effet des vagues	28
15	Changements bathymétriques après 140 jours ($Q = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$)	29
16	Plan "A" avec positions des enregistreurs de courants	31
17	Photographie: Essai 1105 - 500 après 80 jours	32
18	Photographie: Essai 1105 - 1000; Le chenal qui reste après 120 jours	33
19	Photographies: Essai 1105 - 1500; Chenal et cordon sous marin après 120 jours	35
20	Essai 1105 - 1500 - La bathymétrie après 120 jours	36
21	Photographie: Essai 1106 - Superficie des modèles couvert avec le matériau léger	39
22	Photographie: La bathymétrie après 120 jours de marée	40
23	Bathymétrie avant et après la marée de 120 jours	41
24	Changements bathymétriques suite aux vagues de 53 jours (1106)	42
25	Mécanique de transport du sable	44

LISTE DES ILLUSTRATIONS (suite)

Figure		Page
26	Vitesse de cisaillement sous l'effet des courants et des vagues	45
27	Photographie: Essai 1107 - Érosion et sédimentation après 53 jours	47
28	Changements bathymétriques suite aux vagues de 53 ours (1107)	48
29	Emplacement des enregistreurs de courant - 1108	49
30	Trajectoires des flotteurs 1108-2/116 (flot)	50
31	Trajectoires des flotteurs 1108-2/116 (jusant)	51
32	Trajectoires des flotteurs 1108-2/2500 (flot)	52
33	Trajectoires des flotteurs 1108-2/2500 (jusant)	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		
1	Configuration des essais sur MM (modèle mathématique) pour le nouveau chenal peu profond	9
2	Configuration des essais sur MM avec anciennes et nouvelles embouchures ouvertes	9
3	Vitesses maximales dans le chenal d'entrée, $\Delta h = 1,65$ m	10
4	Vitesses maximales dans le chenal d'entrée, $\Delta h = 0,50$ m	14
5	Échelles du modèle hybride à fond mobile	16
6	Vitesses maximales dans le chenal d'entrée (modèle mathématique et modèle hybride)	18
7	Vitesses mesurées dans le chenal d'accès - Essais 1102 - 1105	37

LE CHENAL PEU PROFOND

1.0 INTRODUCTION

La construction de deux grands barrages a permis d'améliorer la navigabilité du fleuve Sénégal (Afrique occidentale), et cette amélioration se poursuivra au cours des prochaines années. On prévoit la construction d'un nouveau port à Saint-Louis pour le transbordement des marchandises qui descendent ou qui remontent le fleuve. Saint-Louis est situé au Nord-Ouest du Sénégal (figure 1), à proximité de la frontière avec la Mauritanie. La faisabilité d'un port situé dans l'estuaire du fleuve et marqué par la présence d'un grand chenal d'accès traversant le banc de sable séparant l'Océan Atlantique de l'estuaire a fait l'objet de plusieurs études sur modèles réalisées en 1984 par le Laboratoire d'hydraulique du Conseil national de recherches du Canada à Ottawa (réf.5). Ces études n'ont pas permis de trouver une solution satisfaisante, qui permettrait de faire appel à des techniques de pointe, de minimiser les incidences environnementales et d'obtenir des coûts d'entretien peu élevés. C'est ainsi qu'en juillet 1984, à l'issue d'une réunion entre des représentants de l'Agence canadienne de développement international (ACDI), de l'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS), du cabinet d'ingénieurs-conseils Beauchemin, Beaton, Lapointe-Swan Wooster et du CNRC, il a été décidé de se servir des modèles existants pour réaliser des essais portant sur des installations situées au large de l'emplacement précédemment étudié. Les options suivantes ont été discutées et on a convenu de ce qui suit:

(a) Chenal d'accès peu profond

Le chenal d'accès peu profond (figure 2), où la profondeur minimale de l'eau serait de 4 à 5 m, devait permettre un accès au port existant de Saint-Louis (Port-de-Pêche) tout au long de l'année. Ce chenal devait aussi permettre à des péniches de mer en provenance de Dakar ou d'autres ports de s'engager en toute sécurité dans l'estuaire pour rejoindre les ports fluviaux situés en amont. Les dimensions du chenal devaient être telles qu'il était possible de compter sur les courants des marées pour balayer les sédiments portés par les eaux, ce qui permettait de maintenir le chenal à la profondeur voulue sans avoir recours au dragage.

(b) Terminal au large avec chaussée sur pilotis

Plutôt que de construire un port pour navires océaniques situé dans l'estuaire, cette solution portait sur la construction d'un terminal au large protégé par un brise-lames (figure 3), où la profondeur d'eau serait de 12 à 13 m. Le terminal serait relié au rivage par un pont d'accès monté sur pilotis. Un tel ouvrage n'aurait pas d'incidence sur la dérive littorale, mais on pouvait s'attendre à des changements dans le mode de sédimentation et d'érosion à cause de l'atténuation de l'effet des vagues sur la plage abritée par le brise-lames.

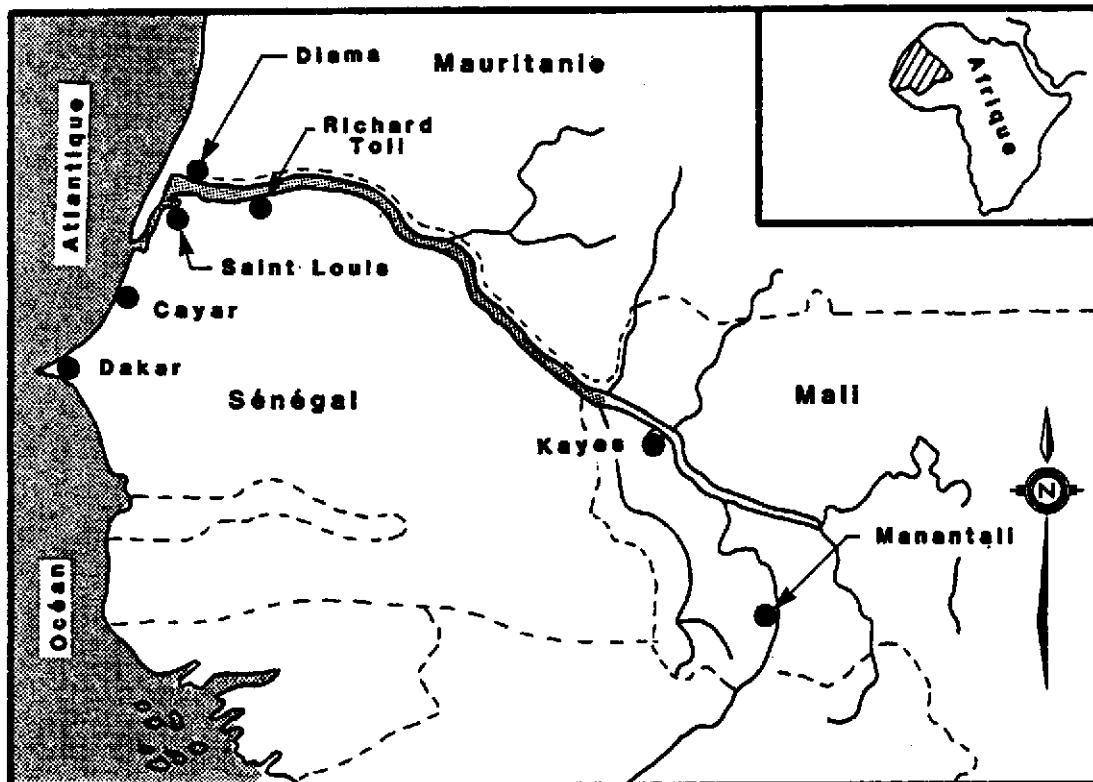


Figure 1 Le Fleuve Sénégal

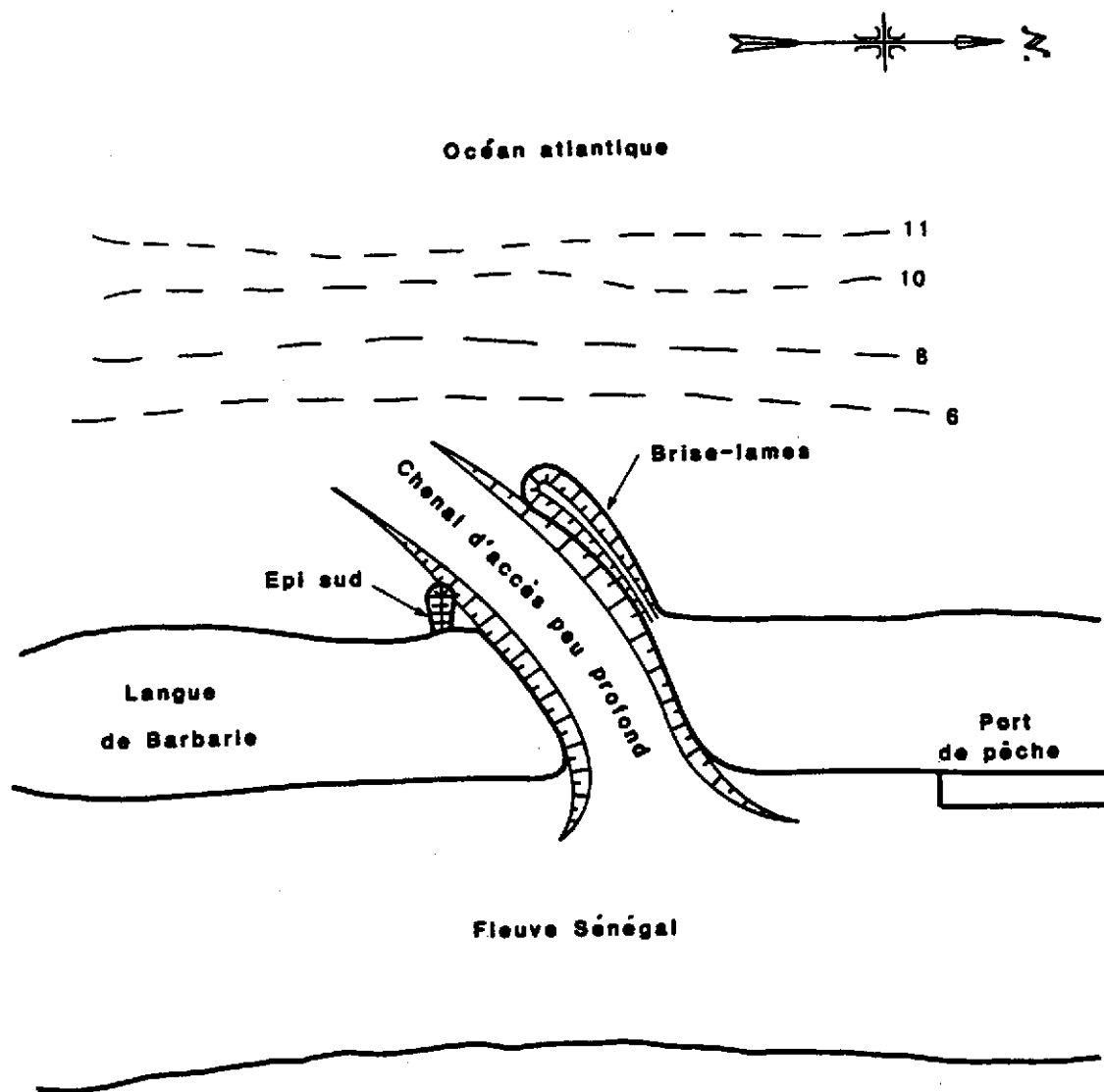


Figure 2 Chenal d'accès peu profond

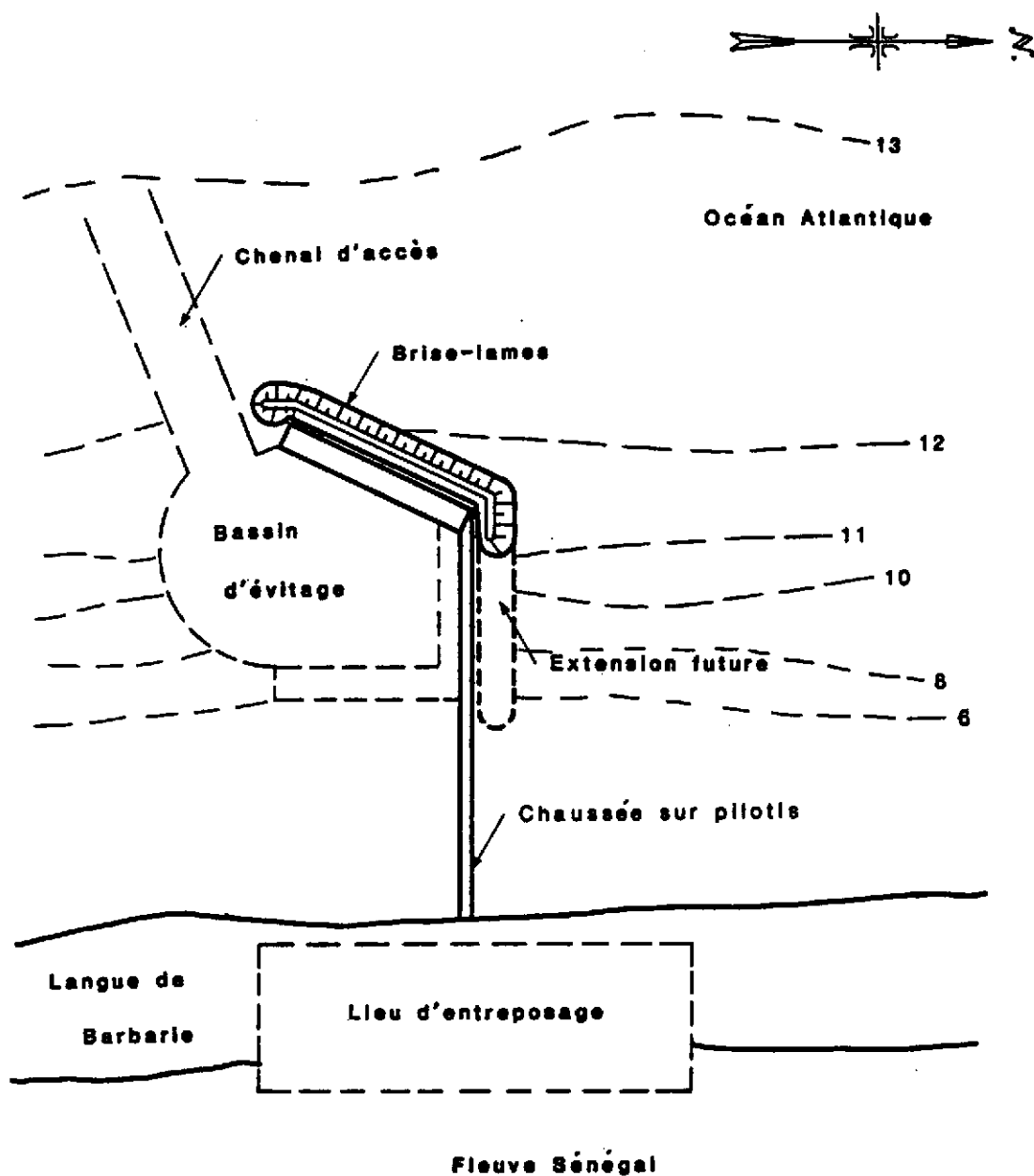


Figure 3 Mouillages au large avec chaussée sur pilotis

(c) Terminal au large avec digue en talus

Un terminal au large (figure 4) comportant des postes d'amarrage pouvant recevoir un maximum de sept navires serait protégé par un brise-lames se prolongeant jusqu'au rivage et permettant la construction d'une route d'accès. On pourrait aussi prévoir un pont sur chevalets situé derrière le brise-lames et reliant les installations au large et à la terre ferme. Il faudrait éventuellement prévoir un moyen de dérivation du sable.

Chacune des options proposées a été étudiée sur le modèle hybride à fond mobile (réf. 1), bien qu'il ait fallu tenir compte de certaines limites imposées par les lois de la modélisation. Par ailleurs, les paramètres de conception de l'ouvrage définitif, ainsi que les mouvements et les forces d'amarrage des navires au nouveau terminal ont été étudiés sur un nouveau modèle sans distorsion de perturbation par les vagues à échelle 1:100 (réf. 2). Conformément aux explications données dans l'un des chapitres suivants, il y aurait lieu d'effectuer une étude analytique approfondie de l'interaction entre les vagues et les courants et de ses effets sur le transport des sédiments, en fonction des données recueillies dans les modèles et sur les lieux (prototype), afin de compenser les insuffisances habituelles des modèles hydrauliques. Une telle analyse ne fait pas partie de la présente étude et porterait principalement sur le chenal d'entrée autonettoyant.

Les caractéristiques topographiques et hydrographiques de l'estuaire et de la région au large du fleuve Sénégal sont présentées de façon détaillée dans la référence 6. Le présent rapport ne décrit que les essais portant sur le chenal autonettoyant et ne fera référence à des passages précis du document cité précédemment qu'au besoin.

2.0 CHENAL D'ACCÈS PEU PROFOND

Un chenal d'accès peu profond situé à proximité de Saint-Louis à l'emplacement de l'ancienne embouchure instable du fleuve aurait les deux fonctions suivantes:

- (a) Le nouveau port de pêche (Port-de-Pêche) pourrait être utilisé par des navires de pêche en haute mer et permettrait la création d'une importante industrie de pêche dans cette région du pays.
- (b) Des péniches (de mer) pourraient assurer le transport des marchandises en provenance de ports situés en amont vers Dakar et d'autres ports du littoral, et vice-versa.

Le chenal devrait donc avoir une profondeur de 4,5 m (près du rivage) à 5,5 m (au large), et une largeur qui permettrait aux courants de prendre une vitesse suffisamment élevée pour emporter les sédiments se déposant dans le chenal sous l'effet des vagues.

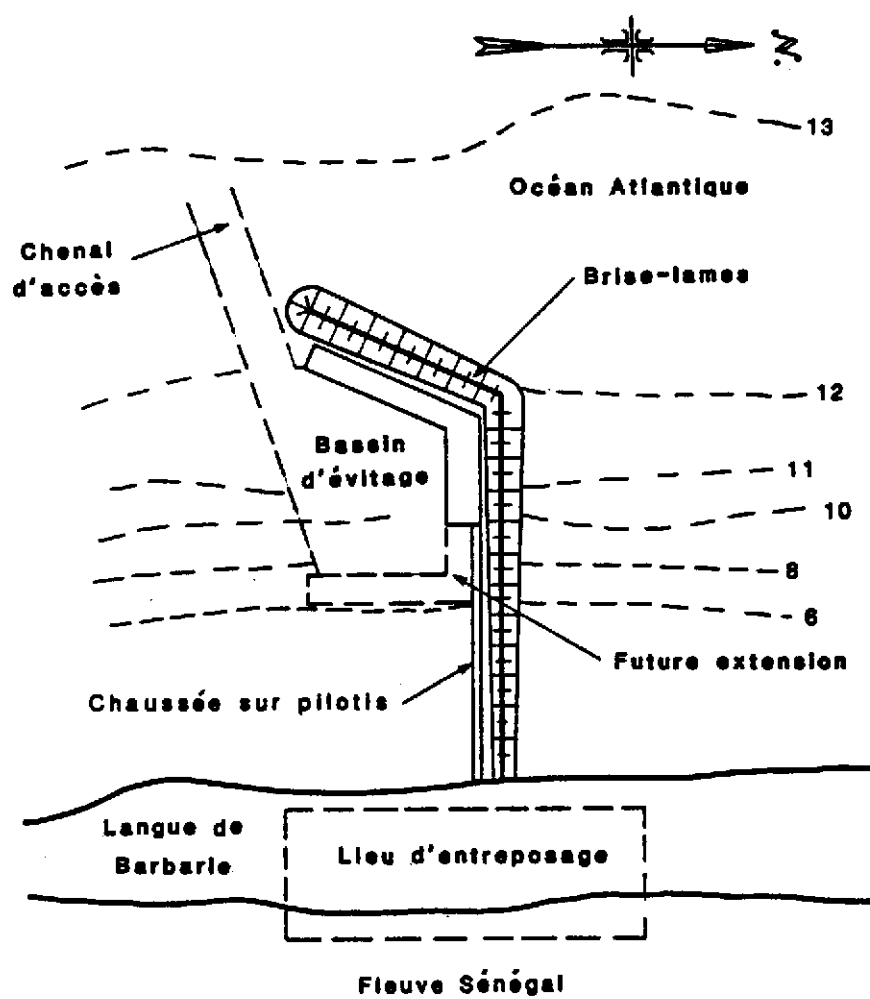


Figure 4 Terminal au large avec digue en talus

Le nouveau chenal qui doit être protégé par deux brise-lames constitue une ouverture pour les marées dont la nature a fait l'objet d'analyses décrites dans plusieurs publications, l'une des premières étant la référence 3. Il existe deux façons de faire dériver le sable dans l'embouchure d'une rivière ou une ouverture de marée:

- (a) Dérivation sur un cordon littoral.
- (b) Dérivation sous l'action des marées dans le chenal.

Compte tenu de la topographie de l'ancienne embouchure du fleuve, des conditions de vagues et de la dérive littorale, il est très probable que la dérivation se fasse sur un cordon littoral qui agit comme un pont situé à l'entrée du chenal et sur lequel sont transportés les sédiments. La profondeur d'eau sur le cordon est fonction de facteurs comme la vitesse du courant, la hauteur et la période des vagues, etc. On prévoit cependant que le déplacement des sédiments sur ce "pont" se fera par petites ondulations ou dunes de sable ou par grosses mottes à cause du mouvement des vagues et des changements dans le régime des vagues. Ce phénomène entraîne la réduction de la profondeur d'eau et fait obstacle à la navigation. Par ailleurs, les variations saisonnières du débit du fleuve et de la hauteur des marées risquent de faire changer la position du chenal d'entrée dans des limites probablement connues (brise-lames, murs de dérivation) et de poser d'autres difficultés pour la conception d'une telle entrée.

L'étude du problème s'est faite à partir du modèle existant d'estuaire/littoral du fleuve Sénégal à fond mobile (utilisé comme modèle hybride: une partie de l'estuaire comprenant l'ancienne embouchure du fleuve est représentée par un modèle mathématique unidimensionnel à différences finies). On ne pouvait s'attendre qu'à une réponse qualitative à la question ainsi posée, puisqu'il s'agissait d'un modèle déformé et que seules des vagues régulières ont été utilisées pour créer les perturbations et la dérive littorale le long de la plage.

2.1 Modèle mathématique unidimensionnel

On s'est servi du modèle mathématique existant du Laboratoire d'hydraulique du CNRC (modèle unidimensionnel à différences finies) pour effectuer une série d'essais visant à établir les valeurs initiales des dimensions du chenal et les vitesses résultantes du courant. La base théorique du modèle est décrite à la référence 4 et son application aux projets sénégalais est donnée à la référence 6. L'estuaire du fleuve Sénégal est illustré de façon schématique à la figure 5. Le modèle a été ajusté aux données extraites du prototype existant au cours de la première série d'essais portant sur les projets sénégalais, et les résultats ont été comparés à ceux d'un autre modèle (Institut Danois d'Hydraulique); les deux modèles affichaient une divergence importante entre les débits d'entrée et les niveaux de l'eau à Diama. On a par la suite découvert que la divergence provenait d'une erreur de 27 cm attribuable au point de repère à Diama, ce qui a permis une fois de plus de démontrer la sensibilité et la validité du modèle numérique.

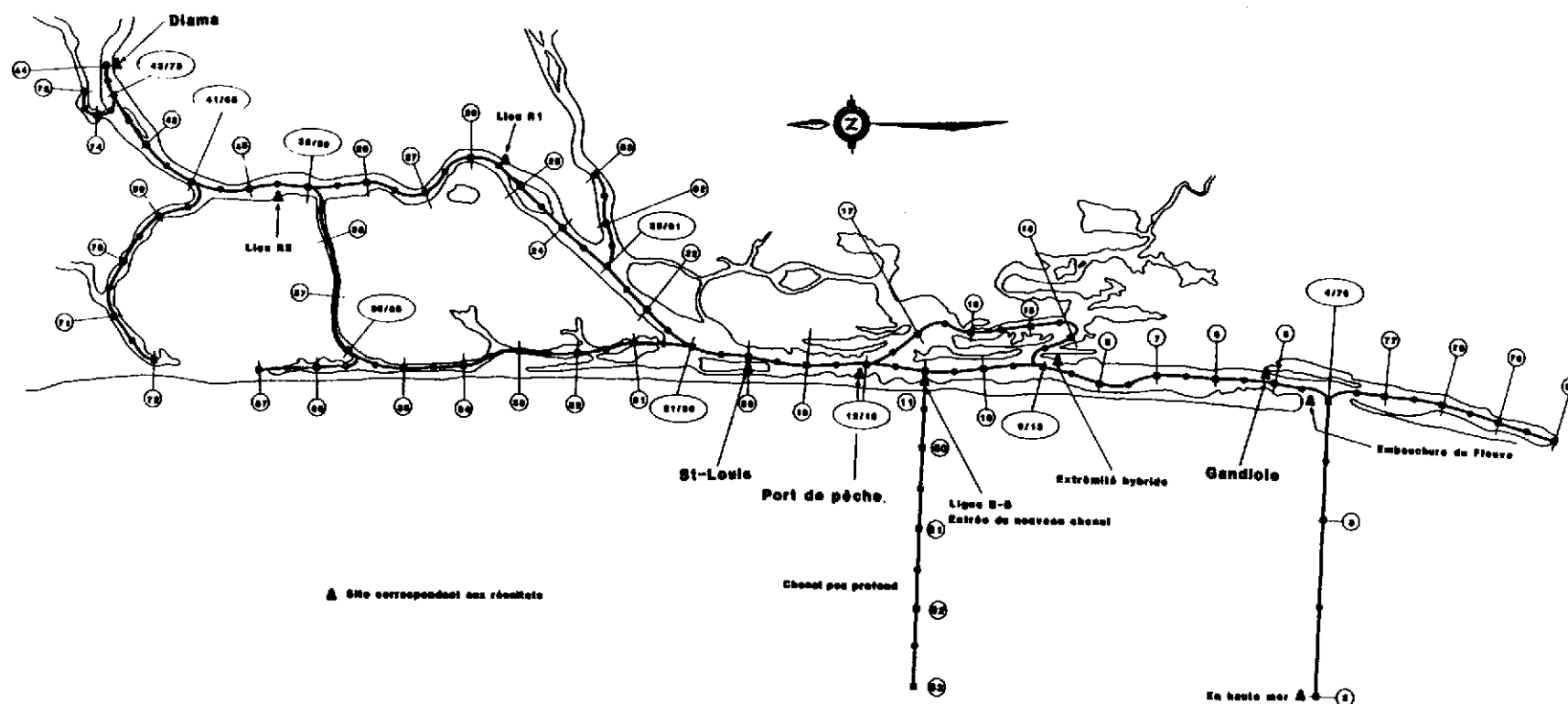


Figure 5 Plan du modèle mathématique des marées

HAUTEUR DE MARÉE (m)	NOUVELLE CONFIGURATION DU CHENAL	DÉBIT DU FLEUVE (m ³ /s)
1,65	A	116
	A	2 500
	B	116
	B	2 500
	C	116
	C	2 500
	D	116
	D	2 500
0,54	A	116
	A	2 500
	B	116
	B	2 500
	C	116
	C	2 500
	D	116
	D	2 500

TABEAU 1

Configuration des essais sur Modèle Mathématique (MM) pour le nouveau chenal peu profond (ancienne embouchure du fleuve étant fermée).

D'autres essais ont été effectués avec l'ancien estuaire ouvert (tableau 2).

HAUTEUR DE MARÉE (m)	NOUVELLE CONFIGURATION DU CHENAL	DÉBIT DU FLEUVE (m ³ /s)
1,65	A	116
	A	2 500
	E	116
	E	2 500

TABEAU 2

Configuration des essais sur MM avec anciennes et nouvelles embouchures ouvertes.

L'expérience acquise avec le chenal d'accès large a permis de simuler une petite entrée par la "construction" d'une entrée en entonnoirs'ouvrant sur la mer et se rétrécissant en un croisement important à l'endroit proposé de l'entrée. Par ce moyen couramment accepté par les modélistes, on évite d'avoir à se servir d'un modèle bidimensionnel.

On a tenu compte des conditions suivantes dans les divers essais effectués avec l'ancienne embouchure fermée:

La figure 6 donne un exemple graphique typique de la hauteur des marées au large et à Saint-Louis et des vitesses du courant dans le chenal d'entrée pour une faible hauteur de marée, à un débit de $116 \text{ m}^3/\text{s}$. La section utilisée dans cet exemple correspond à celle du plan A. On donne à la figure 7 les sections A à E du chenal ainsi que les paramètres utilisés pour le modèle mathématique.

Les valeurs MLW et MEW des diverses positions au large et dans l'estuaire ont été recueillies et comparées. Les résultats sont donnés sur les graphiques de la figure 8. Compte tenu de la géométrie et de la rugosité supposées des lieux, ces résultats permettent de démontrer que l'option à 500 m de large ne produit aucun amortissement de la marée. On constate que la hauteur de la marée au large ($\Delta h = 1,65 \text{ m}$) augmente à Diama ($\Delta h = 1,95 \text{ m}$). Les options C-A affichent un amortissement de la marée et une réduction de la hauteur qui correspond à $\Delta h = 1,28 \text{ m}$ à Diama. Puisque l'entrée est plus proche de Saint-Louis, il risque de se poser d'importants problèmes d'inondation dans les régions de l'estuaire du fleuve Sénégal situées en amont par suite de l'augmentation de la hauteur des marées dans cette région importante. Par ailleurs, l'augmentation de la vitesse du courant dans l'estuaire, à proximité du nouveau chenal d'entrée, risque aussi de modifier la morphologie du fond à cet endroit et d'entraîner la formation de dunes de sable ou d'ondulations plus importantes sur le fond. Cependant, l'ouverture d'un nouveau chenal sans la présence de fortifications importantes (et donc coûteuses) se traduirait par une adaptation assez rapide aux conditions naturelles; d'ailleurs, avec la formation de dunes sous-marines, on finirait par avoir, dans l'entrée et à l'entour, un facteur de rugosité beaucoup plus important que celui utilisé dans le modèle mathématique.

On retrouve aussi la même tendance dans les résultats lorsque la hauteur des marées est plus faible ($\Delta h = 0,50 \text{ m}$). Les tableaux 3 et 4 donnent les résultats pour les deux séries d'essais. Les vitesses mesurées à la section de l'entrée sont données en fonction d'une vitesse maximale moyenne prise sur toute la section.

	CONFIGURATION DU CHENAL						DEUX OUVERTS	
	Q (m^3/s)	A	B	C	D	E	A	E
Vit. max. du jusant (m/s)	116	5,1	3,5	3,0	2,4	2,4	4,1	1,75
	2 500	6,5	4,2	3,5	2,9	2,9	5,0	2,1
Vit. max. du flot (m/s)	116	4,7	3,3	2,8	2,3	2,2	3,7	1,55
	2 500	1,5	1,4	1,2	1,0	1,0	1,4	0,5

Tableau 3

Vitesses maximales (valeurs moyennes sur l'ensemble de la section) dans le chenal d'entrée, $\Delta h = 1,65 \text{ m}$

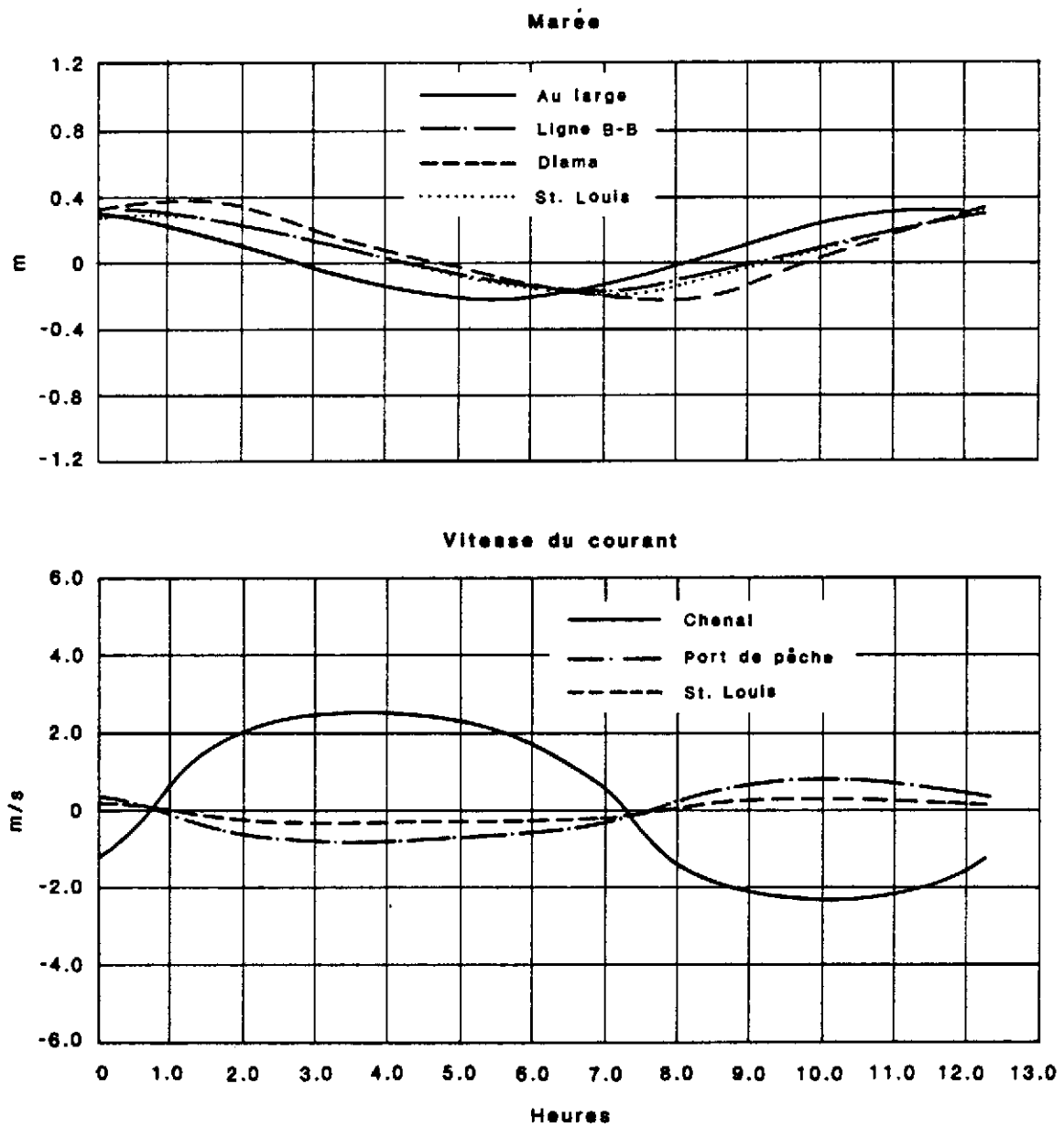


Figure 6 Spécimen de résultats graphiques du modèle mathématique

$\Delta H=0,50\text{m}$; $Q=115\text{m}^3/\text{s}$

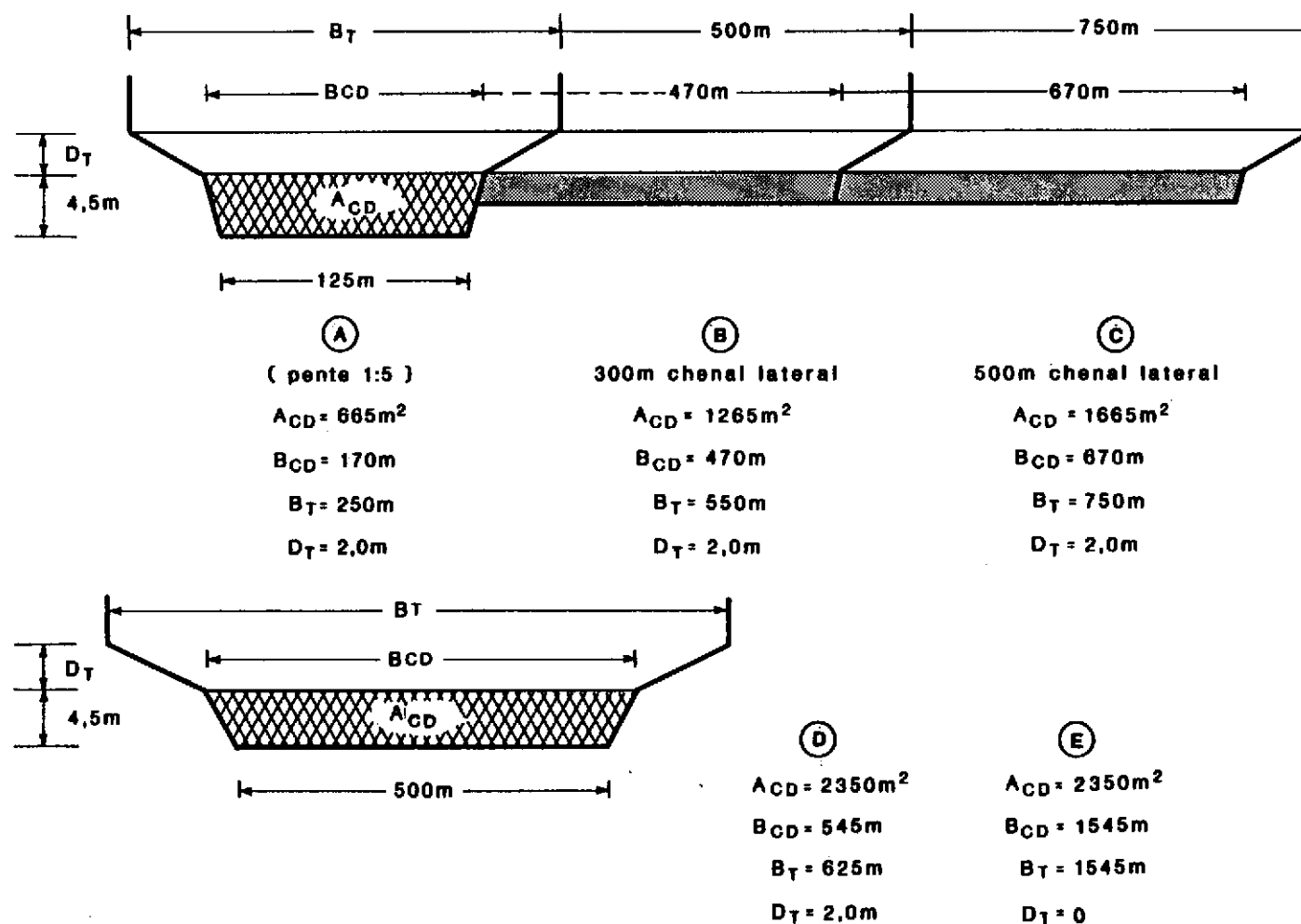


Figure 7 Etudes sur chenal peu profond

Section A-E

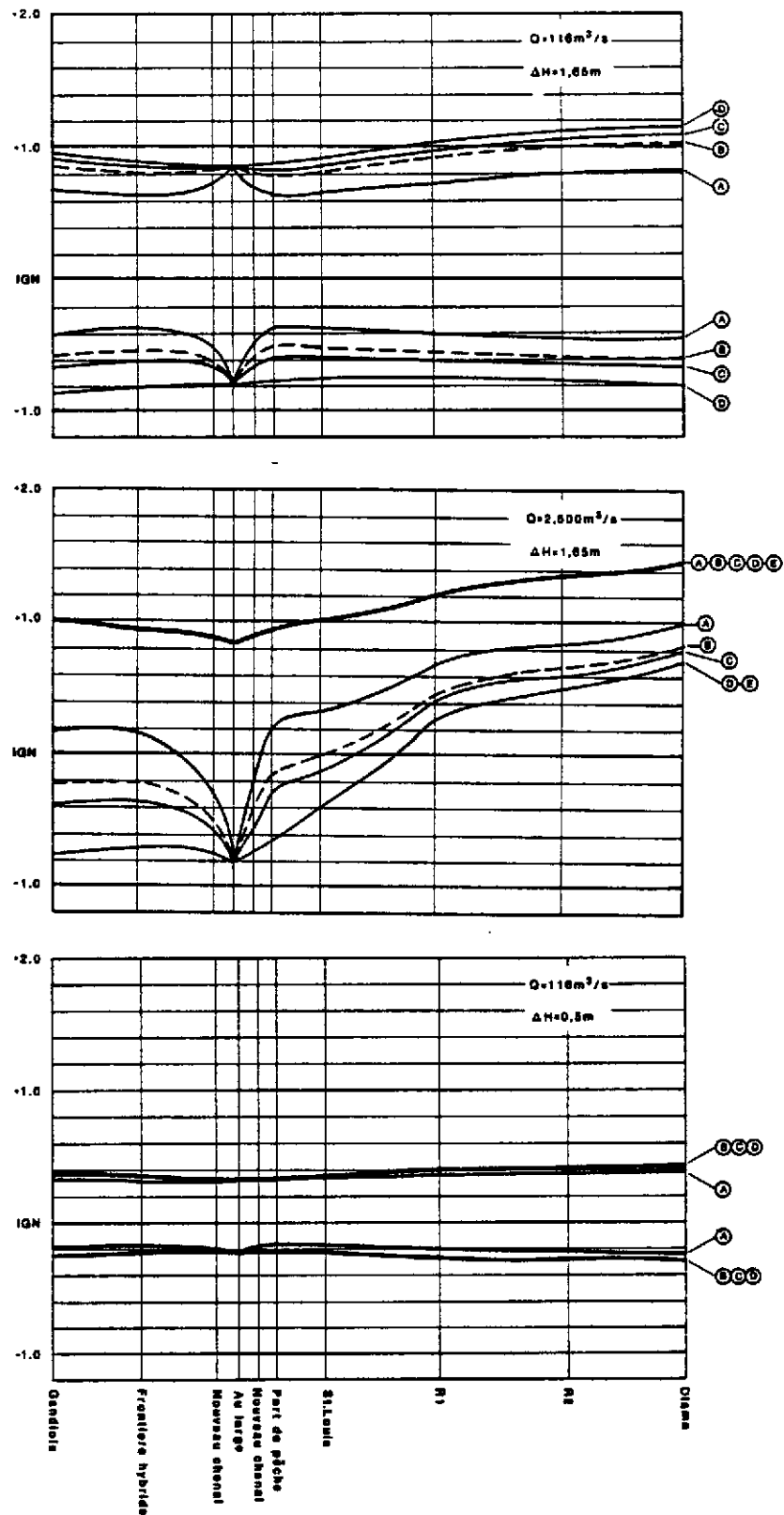


Figure 8 Etudes sur chenal peu profond-
marée haute et basse dans l'estuaire

	CONFIGURATION DU CHENAL				
	Q (m ³ /s)	A	B	C	D
Vit. max. du jusant (m/s)	116	2,5	1,5	1,2	0,95
	2 500	4,5	2,7	2,2	1,7
Vit. max. du flot (m/s)	116	2,4	1,5	1,2	0,90
	2 500	-2,3	-0,95	-0,6	-0,4

Tableau 4

**Vitesses maximales (valeurs moyennes sur l'ensemble de la section)
dans le chenal d'entrée, $\Delta h = 0,50$ m**

Si l'on suppose que la section du chenal reste constante (pas de changement de la rugosité pendant le cycle des marées), seules les configurations D et E semblent offrir la faisabilité voulue, avec une gamme de vitesses maximales qui permettent aux navires de s'engager dans l'estuaire et d'en sortir. Cependant, l'augmentation du débit du fleuve se traduirait par une augmentation importante des vitesses d'écoulement, réduisant ainsi le temps pendant lequel l'entrée pourrait être utilisée sans restriction.

Les deux dernières colonnes du tableau 3 représentent les valeurs se rapportant à la situation initiale, lorsque l'ancienne et la nouvelle embouchures sont ouvertes. On prévoit cependant que l'ancienne embouchure se fermera au bout de quelques mois, à cause de la forte dérive littorale et de la tendance de l'eau à emprunter le chemin le plus court.

On donne au tableau 4 les résultats obtenus avec une plus faible hauteur de marée ($\Delta h = 0,50$ m). Quoique la vitesse du jusant pour un débit élevé atteigne 1,7 m/s, il est à prévoir que le chenal se fermera partiellement étant donné que le faible débit qui prévaut pendant l'année ainsi que la faible hauteur de marée se traduisent par une vitesse maximale de 0,95 m/s (0,60 à 0,65 m/s si la moyenne est prise sur l'ensemble de la période de flot/jusant). On donne à la figure 9 les vitesses maximales du jusant et du flot en fonction de la forme de la section de l'entrée; ces résultats viennent confirmer les énoncés formulés ci dessus.

Les résultats détaillés sont présentés à l'Appendice A.

2.2 Facteurs de mise à l'échelle

Dans les modèles hydrodynamiques, les échelles sont normalement établies par application de la loi de Froude, à condition que prévalent les forces de la pesanteur. Le nombre de Froude, qui exprime le rapport de la vitesse du courant à la vitesse d'une onde de gravité de faible amplitude, devrait idéalement être le même dans le cas du modèle

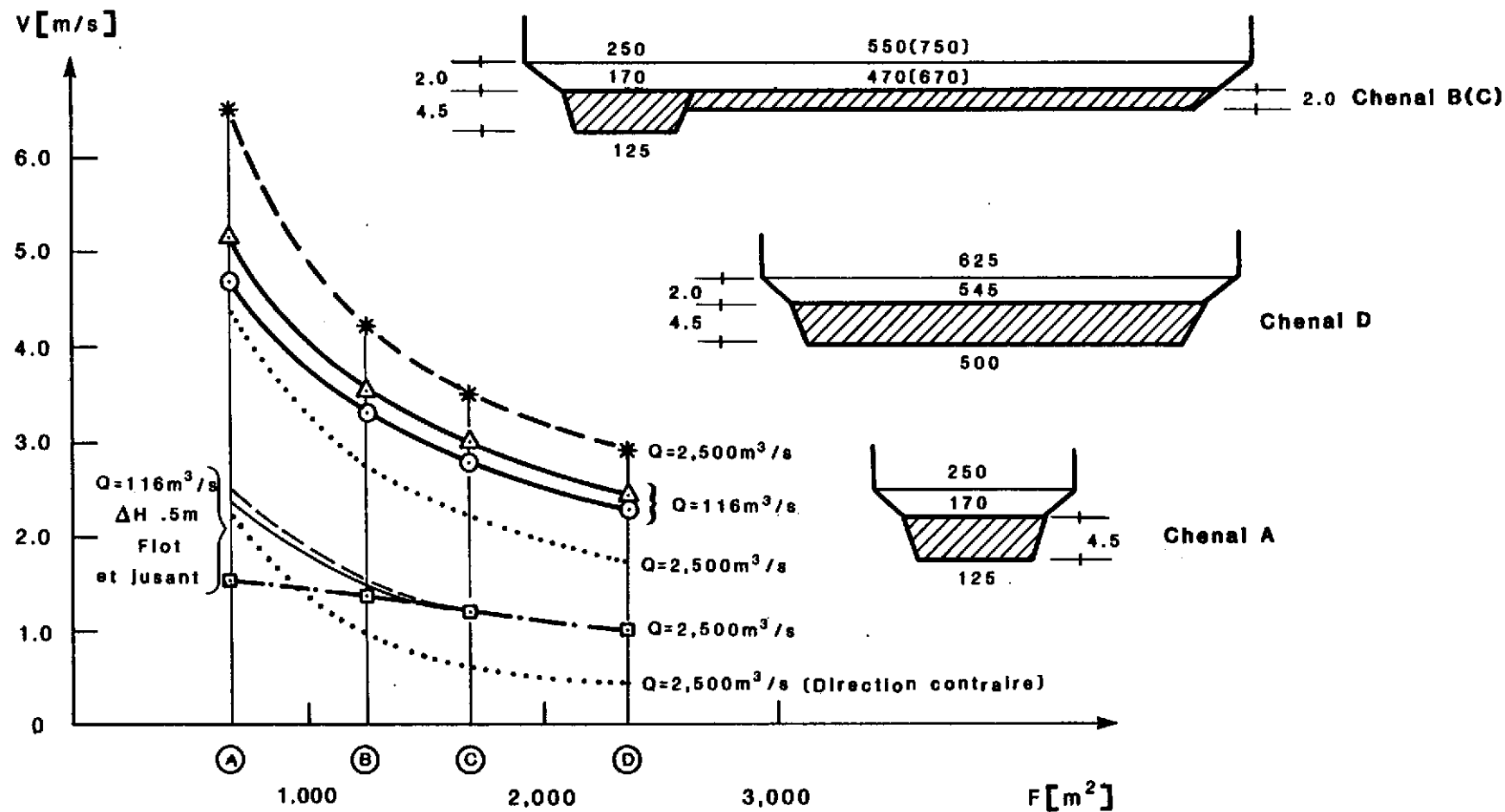


Figure 9 Vitesse des courants en fonction des sections de chenal

et du prototype. Cependant, compte tenu des limites d'espace disponible et des facteurs de mise à l'échelle, il n'a pas été possible de reproduire dans le modèle en distorsion des conditions de vagues réelles. On s'est donc servi exclusivement de vagues monochromatiques pour créer de la turbulence et un courant littoral le long de la plage. Les essais initiaux visant à reproduire les profils réels des plages et réalisés avec divers matériaux pour le fond (compte tenu de l'espace disponible en laboratoire et des instruments utilisés) se sont traduits par une échelle de 1:300/1:75. Le sable quartzeux s'est avéré être le matériau le mieux approprié pour la reproduction du fond, avec $d = 0,175$ mm (référence 6).

À l'exception de l'échelle de temps pour la sédimentation, tous les facteurs d'échelle ont été dérivés de la loi de Froude et sont résumés au tableau 5.

Longueurs	1:300
Hauteurs	1:75
Vitesses	1:8,7
Durée (hydraulique)	1:34,6
Période de vague	1:8,7
Débit	$1:1,96 \cdot 10^5$
Volume	$1:6,75 \cdot 10^6$
Durée (sédiments)	1:480

TABLEAU 5

Échelles du modèle hybride à fond mobile

Les échelles de durée de sédimentation et de débit solide ont été obtenues par la création de vagues et de courants dans le modèle de façon à réaliser un équilibre à alimentation constante pour reproduire le transport littoral. Il a fallu, pour des raisons d'économie, se servir du modèle existant non modifié, avec le même matériau de fond, pour les essais portant sur le chenal d'entrée autonettoyant. Les détails se rapportant au modèle et au plan hybride sont donnés à la référence 6.

On s'attendait à ce que les vagues et les courants aient influencé conjointement le déplacement et le transport des sédiments dans le nouveau chenal peu profond. C'est ainsi qu'on a essayé de combiner les rapports vagues-sédiments aux lois de cisaillement-tension dans un modèle qui reproduirait ces deux forces. En général, ceci signifie que les matériaux constituant le fond et choisis pour bien simuler le déplacement des sédiments sous l'effet des vagues ne sont pas facilement transportés par les courants mis à l'échelle selon la loi de Froude. On aurait pu envisager les deux démarches en adoptant une dis-

torsion de la vitesse ainsi qu'une mise à l'échelle des vagues avec un autre matériau pour le fond si le modèle avait été conçu au départ pour cette fin. Par ailleurs, toute distorsion de l'échelle de vitesses (y compris la période de marée) aurait compliqué la situation sans nécessairement permettre une reproduction suffisamment précise du déplacement des sédiments dans ce modèle hybride à fond mobile. Une autre difficulté se serait manifestée puisqu'il aurait fallu augmenter la rugosité superficielle afin de conserver les mêmes configurations de courant.

Il a donc été décidé de réaliser le modèle avec le fond de sable quartzéux sans aucune modification de la vitesse ni de l'échelle de vagues afin d'obtenir des réponses qualitatives aux questions que posait le système de cordon littoral. Il est évident qu'il aurait fallu augmenter les vitesses pour obtenir un effet autonettoyant distinct vers le large. Afin de pouvoir analyser le problème du point de vue d'un modèle cisaillement-tension, le matériau constituant le fond a été par la suite remplacé par un matériau léger nécessitant une vitesse critique de cisaillement bien plus faible. Suite à une analyse (référence 5) fondée sur l'équation de Strickler (coefficient de rugosité en fonction de la granulométrie), le matériau qui convenait le mieux à ce modèle devait avoir une très faible densité ($\gamma = 1,03-1,05$). Cependant, le seul matériau disponible était la coquille de noix broyée ($\gamma = 1,35$). Afin de compenser l'augmentation de la vitesse de cisaillement, on a surimposé l'action des vagues à l'action du courant pour augmenter la turbulence sur le fond et la vitesse réelle de cisaillement.

2.3 Essais avec fond en sable quartzéux

Tel qu'on l'a précisé précédemment, les essais avec fond en sable quartzéux ont été effectués pour analyser la formation du cordon littoral et le mode de remplissage d'un chenal artificiel à travers la Langue de Barbarie. Les essais ont porté sur deux types de chenal, avec divers débits et divers hauteurs de marée.

2.3.1 Chenal de 500 m (essais 1102-1103)

Compte tenu des résultats préliminaires obtenus avec le modèle mathématique, le choix s'est porté sur un chenal de 500 m de large, avec une profondeur de 4,5 à 5 m. La figure 10 illustre le brise-lames nord (300 de long), l'épi sud et les points de mesure des vagues et des courants (W = mesure des vagues, V = mesure des courants). On s'est servi principalement de vagues d'environ 1,32 m, ayant une période d'environ 9 s, afin d'obtenir la dérive littorale voulue. Ces valeurs proviennent des analyses effectuées sur le modèle précédent pour chenal profond. La hauteur de la marée sinusoïdale utilisée pour la plupart des essais a été fixée à $\Delta h = 0,5$ m; cette valeur, combinée au faible débit ($Q = 116 \text{ m}^3/\text{s}$), représente une valeur très critique pour la fermeture du chenal. Deux échantillons de données ont été prélevés au début de l'essai, l'un avec l'effet des vagues et l'autre sans l'effet des vagues. Les séries chronologiques de vitesses aux points V10/11 (= TID 26) et V12/13 (= TID 28) sont comparées aux figures 11a à 11e; on y donne aussi les hauteurs des marées. La coordonnée x est orientée parallèlement à l'axe du chenal, avec valeurs positives pour le flot (marée). Étant donné que

ces valeurs représentent des mesures ponctuelles et non le débit de la section du chenal, elles ne peuvent pas être directement comparées aux résultats du modèle mathématique. On peut cependant comparer l'ordre de grandeur (tableau 6).

	Q (m ³ /s)	MOD. MATH.	MOD. HYBRIDE
Vit. max. du flot (m/s)	116	0,90	0,90
	2 500	- 0,40	- 0,35
Vit. max. du jusant (m/s)	116	0,95	0,70
	2 500	1,70	1,60

TABLEAU 6

Vitesses maximales dans le chenal d'entrée (modèle mathématique et modèle hybride) Q = 116 m³/s; Ah = 0,5 m; section D.

En général, les résultats obtenus dans le modèle mathématique (MM) sont plus élevés que ceux du modèle hybride (MH), ce qui signifie que l'on peut augmenter la rugosité choisie de la section. Cependant, puisque le MM devait fournir les résultats initiaux utilisés pour le MH, en fonction de l'expérience acquise dans les essais précédents, cette façon de procéder par approximations successives ne pouvait pas être utilisée indéfiniment.

Les valeurs obtenues lors de la mesure des vagues effectuée pour cette série d'essais aux points indiqués à la figure 10 sont les suivantes:

Au large	(flot)	HMO = 1,36 m	(jusant)	HMO = 1,39 m
W 14	(flot)	HMO = 2,25 m	(jusant)	HMO = 2,32 m
W 15	(flot)	HMO = 0,94 m	(jusant)	HMO = 1,10 m

Il y a lieu de noter qu'aucun régime de vagues particulier n'était créé. Les hauteurs de vagues sinusoïdales obtenues ne peuvent être interprétées qu'en ce qui concerne les énergies relatives des vagues en divers points. Les hauteurs données sont dérivées du spectre par le calcul de l'énergie m_0 sous le spectre. La valeur quadratique est alors définie comme suit:

$$RMS = \sqrt{m_0}$$

et

$$HMO = 4 RMS = 4\sqrt{m_0}$$

Les résultats démontrent qu'une énergie initiale très importante parviendrait à l'entrée du chenal pendant le flot et le jusant, ce qui nécessiterait le prolongement et le renforcement de la fortification des banquettes des digues.

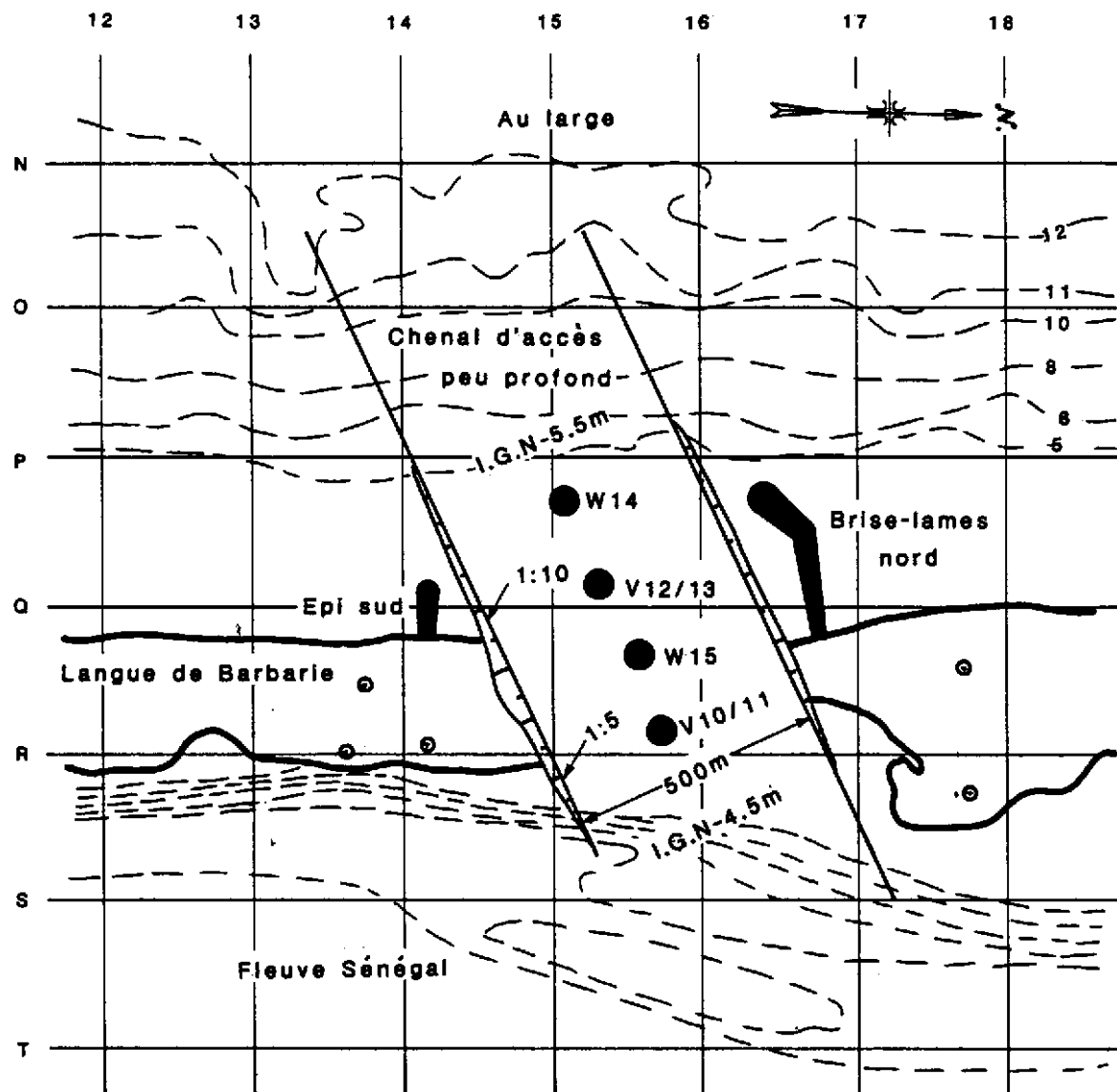


Figure 10 Chenal "D" - Premier plan

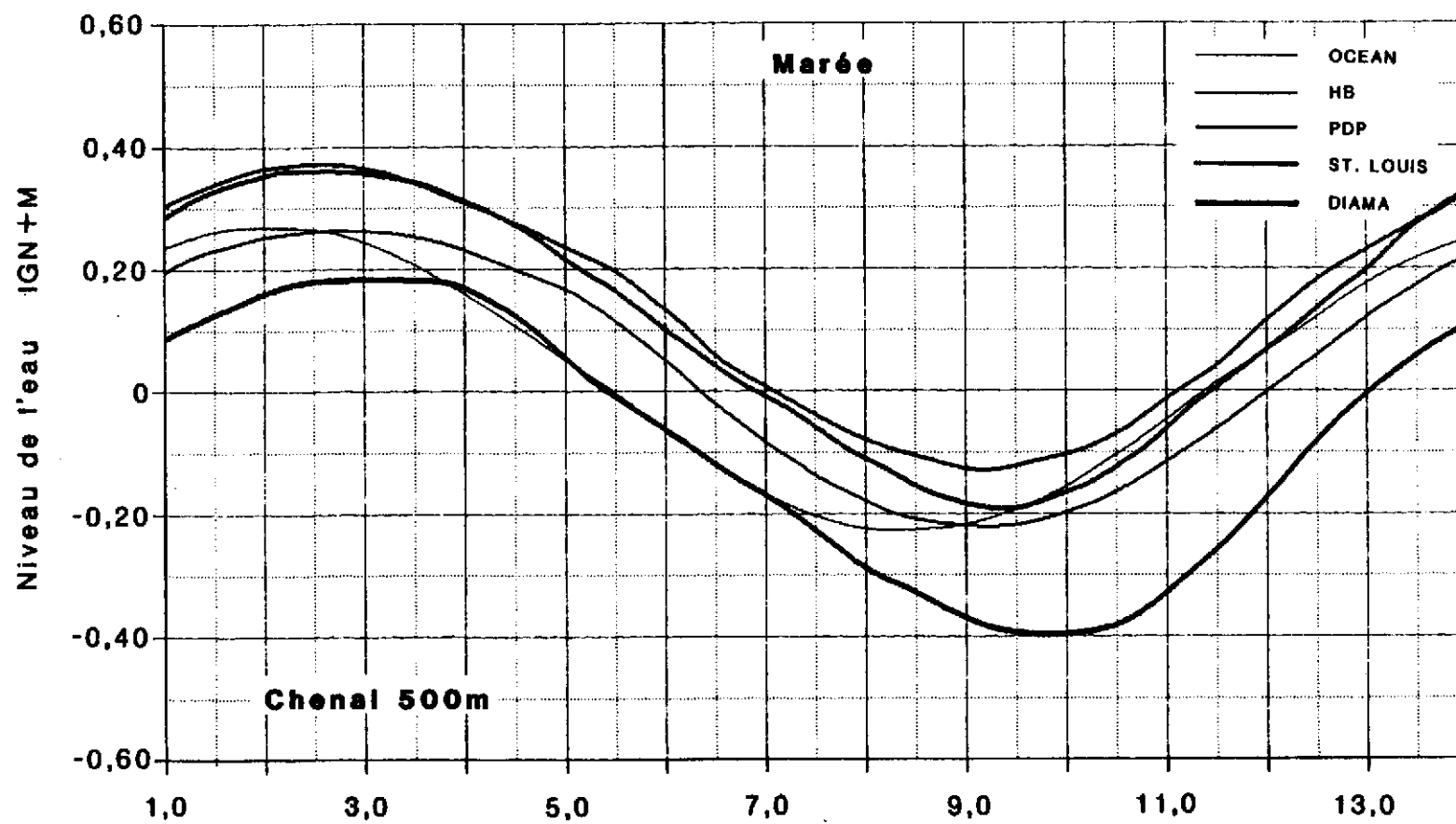


Figure 11a Marées et vitesses du courant - Chenal "D"

$\Delta h = 0,50m$

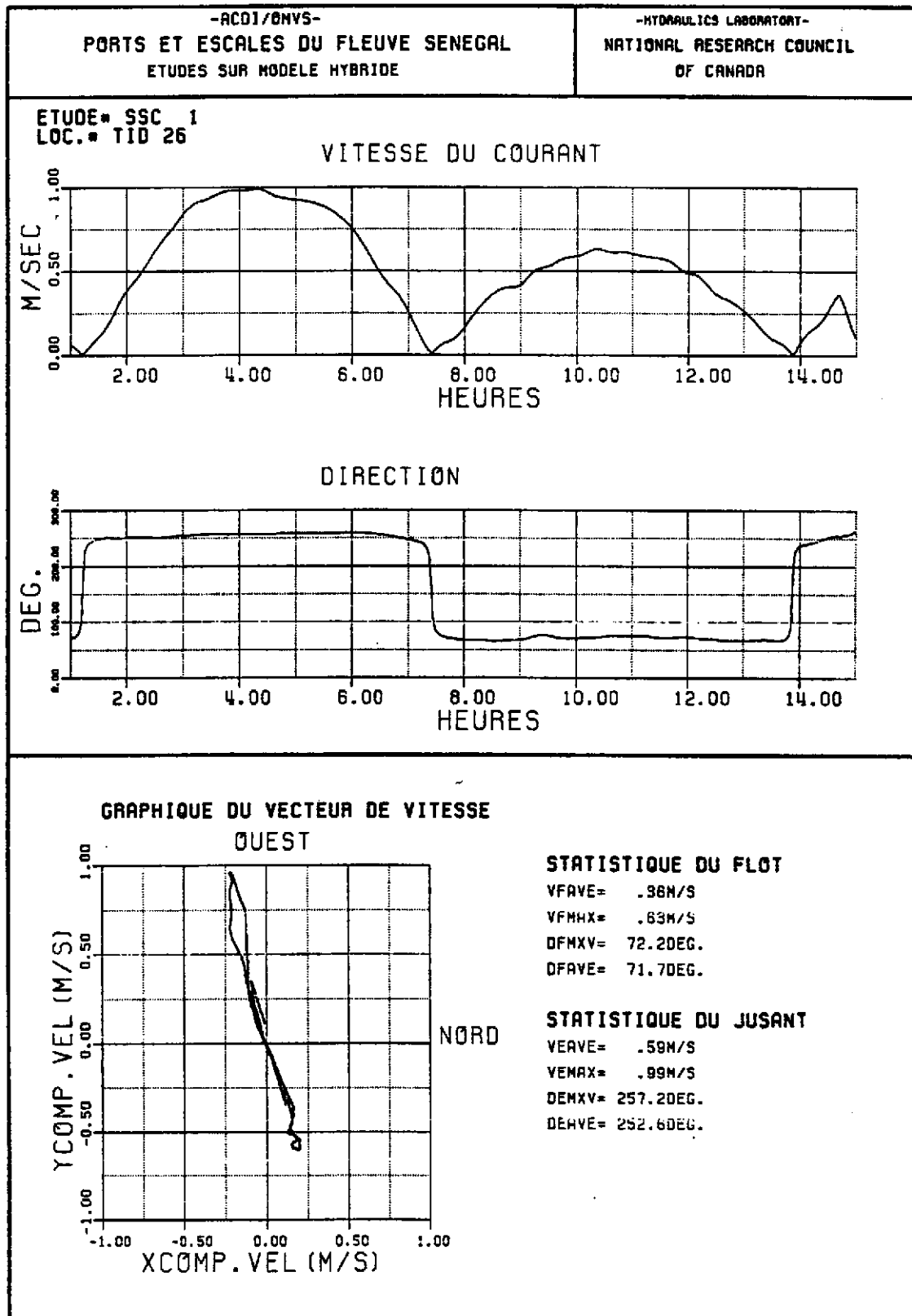


Figure 11b

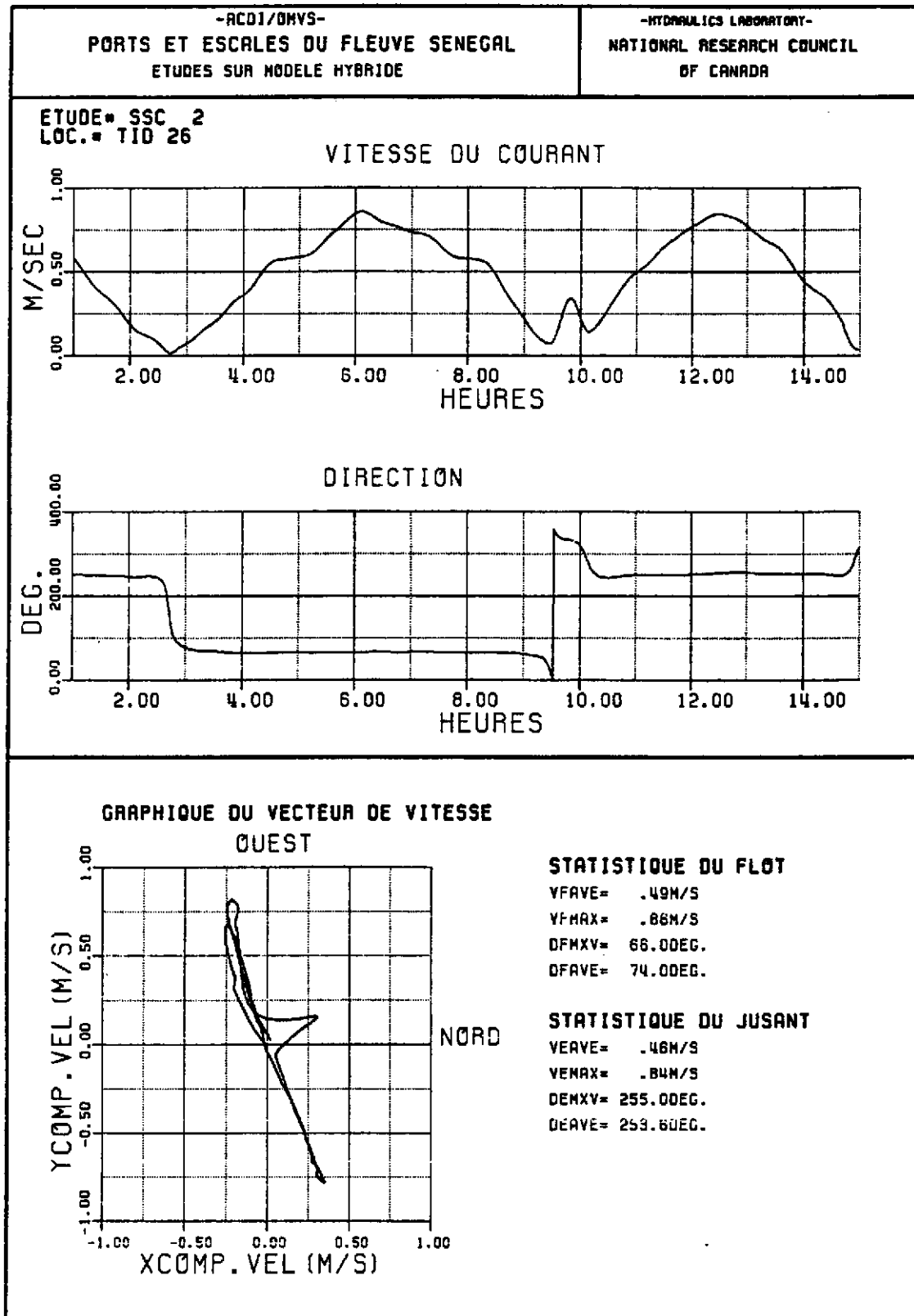


Figure 11c

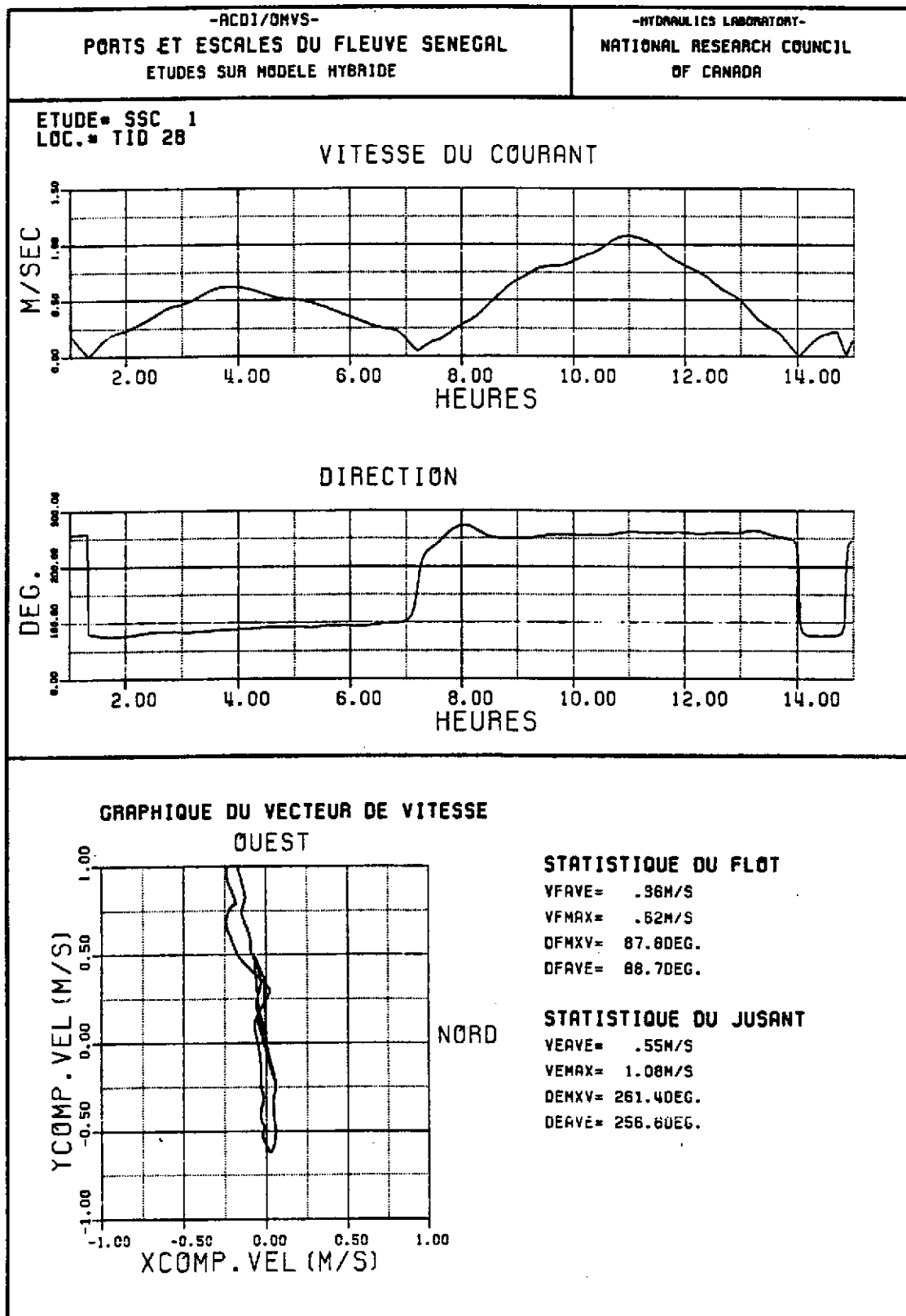


Figure 11d

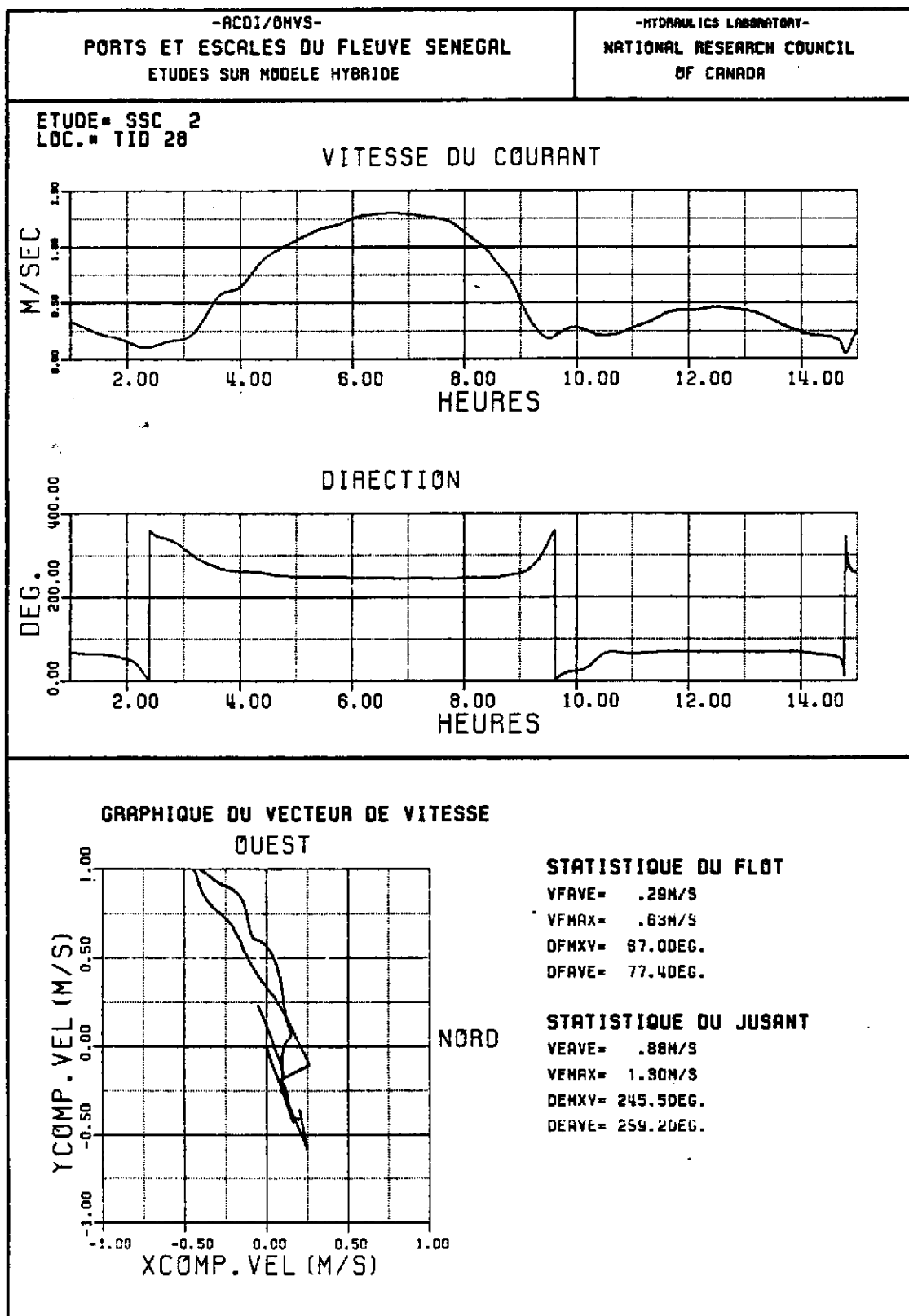


Figure 11e

Pour les besoins de l'essai, les vagues ont agi pendant 20,75 heures, soit l'équivalent de 415 jours. Dans le scénario initial, on a supposé que le petit réservoir créé par le brise-lames nord était plein et que la dérivation a commencé immédiatement. La figure 12 illustre la situation dans le chenal 340 jours plus tard, la section étant fermée à près de 75%. Les enregistrements vidéo ont permis de constater que les sédiments étaient transportés autour de l'extrémité du brise-lames nord et se déposaient dans le chenal. Compte tenu de l'effet d'échelle cité ci-haut et du faible débit, les courants n'ont pas été assez puissants pour emporter ces dépôts qui se sont donc accumulés, entraînant la dérivation des eaux vers l'autre côté du chenal. La concentration des courants dans la partie sud du chenal a provoqué l'érosion de l'épi et de la pente sous-marine du chenal. Ce processus s'est cependant poursuivi avec la sédimentation dominante et, environ 370 jours plus tard, il ne restait plus qu'une petite gorge de 40 m de large et de 3 m de profondeur, qui s'est d'ailleurs fermée 40 jours plus tard.

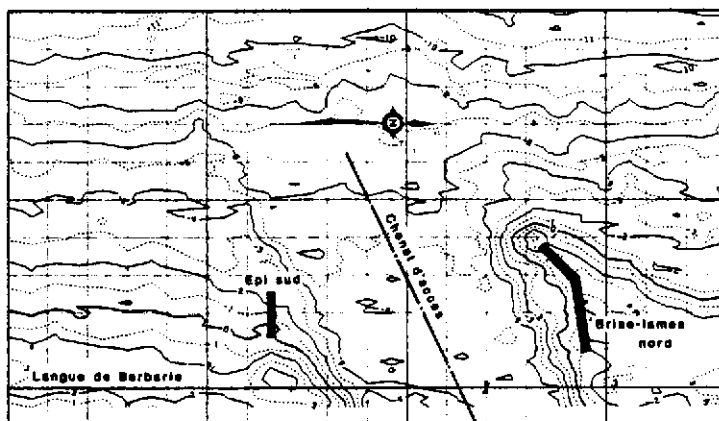
La figure 13 illustre la situation qui prévalait avant et après l'essai, et montre bien les zones d'érosion et de sédimentation et leur importance. On pourrait évidemment avancer qu'il n'y a jamais eu fermeture complète de l'estuaire du Sénégal. Il faut cependant noter que des variations dans le régime des vagues peut se traduire par la présence de vagues très hautes à des périodes où le débit du fleuve est très faible. L'érosion du rivage sud, la fermeture pratiquement complète du chenal d'entrée et la présence d'un soudain orage se traduiraient très probablement par la fermeture du chenal restant et par une percée à un autre endroit. À moins que l'on puisse prévoir un chenal principal bien protégé et bien stabilisé et toujours capable de générer suffisamment de pouvoir autonettoyant sur la face aval du brise-lames, il ne sera pas possible de garantir la stabilité et la permanence d'une voie d'accès à Port-de-Pêche et éventuellement aux autres installations portuaires.

Dans le but d'analyser le pouvoir autonettoyant créé par un débit plus important, on s'est servi de la situation actuelle pour creuser un petit chenal de 30 m x 4 m dans le cordon d'entrée. Sous l'action des vagues, l'augmentation de la puissance des courants de jusant sous l'effet du débit élevé ($2\,500\text{ m}^3/\text{s}$) a permis de creuser un chenal triangulaire dont les dimensions se sont maintenues à 220 m x 11 m après 35 jours. Pendant les 100 jours qui ont suivi, les vagues ont entraîné la formation d'un cordon littoral qui a servi de pont pour le transport du sable d'un côté à l'autre du chenal (figure 14). Ainsi, l'augmentation de la vitesse du courant a causé la stabilisation du système; on peut s'attendre à ce que ce phénomène se reproduise sur les lieux dans des conditions de vagues et de courants quasi-stables. Il faut cependant noter que l'effet d'inversion des grandes vitesses des marées n'était pas présent; cet effet pourrait avoir une incidence importante sur l'emplacement du cordon littoral.

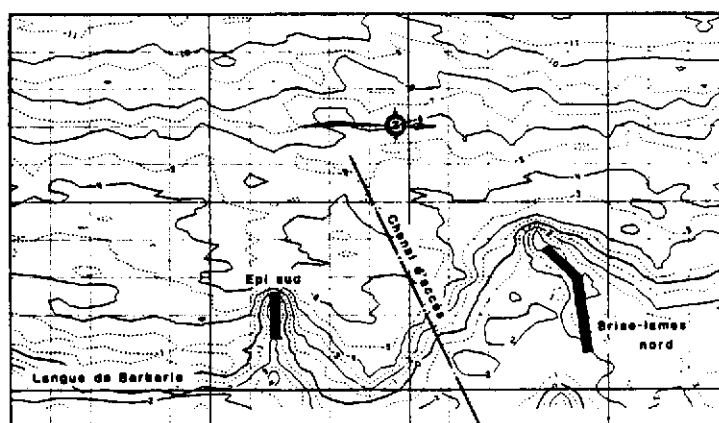
La figure 15 illustre les résultats du sondage bathymétrique et indique le parcours adopté pour le transport littoral dans des conditions données. On y voit l'effet de l'écoulement concentré qui emprunte le passage relativement étroit situé à proximité de l'épi sud, ainsi que les dépôts de sédiments au large. La poursuite de l'essai se serait



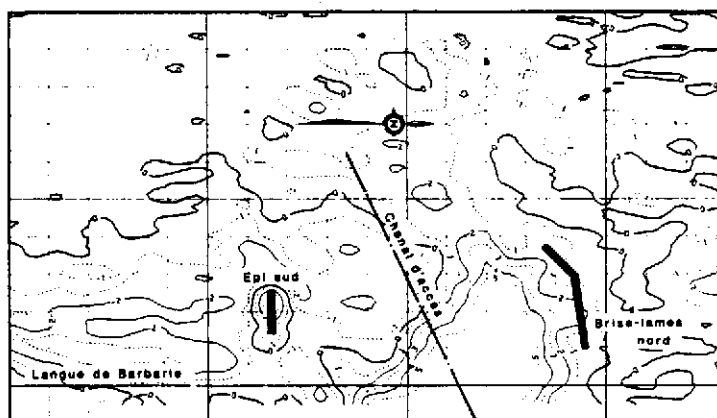
Figure 12 Situation après 340 jours
Largeur du chenal: 500m



Bathymétrie
avant
l'étude



Bathymétrie
après
415 jours



Erosion (-)
et ensablement
après 415 jours

0 200 400 600m

Figure 13 Changements bathymétriques après 415 jours

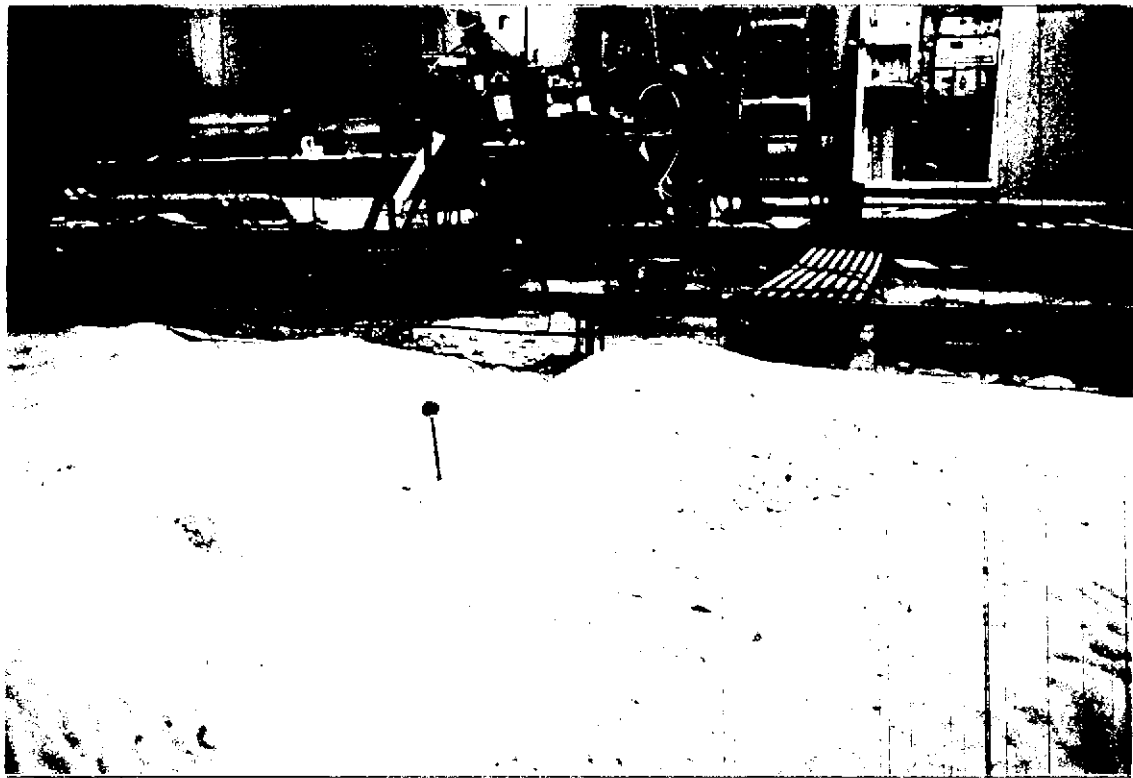
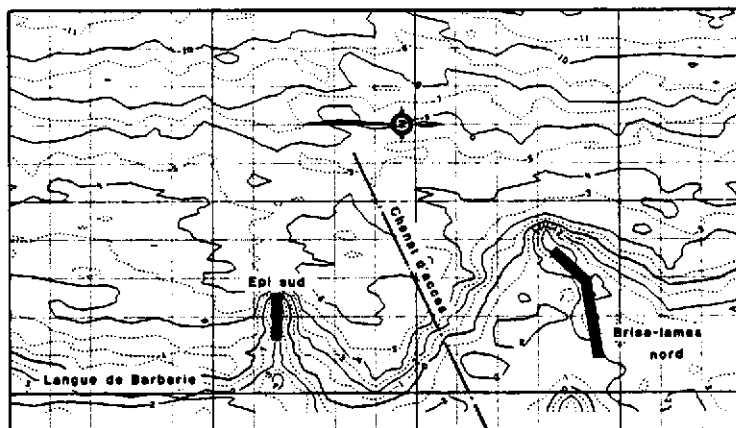
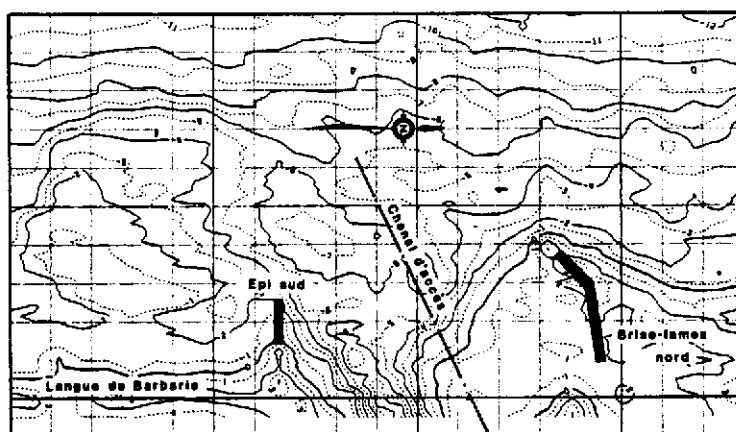


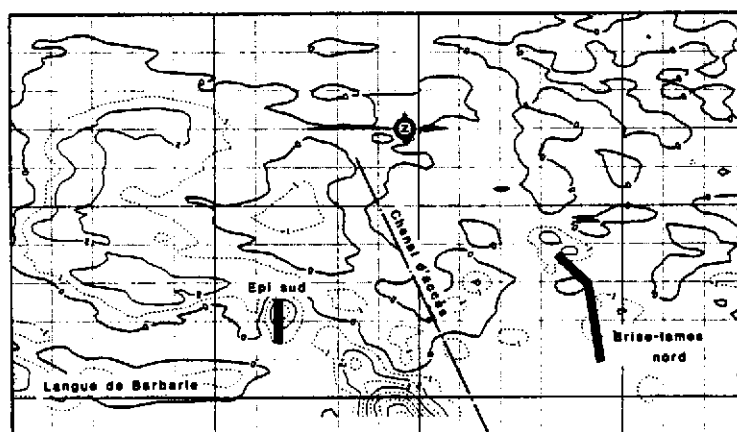
Figure 14 Chenal et cordon littoral
après 140 jours sous l'effet des vagues
($Q=2,500\text{m}^3/\text{s}$)



Bathymétrie
après
380 jours



Bathymétrie
après 140 jours
avec $Q=2,500\text{m}^3/\text{s}$



Erosion (-) et
ensablement après
140 jours

0 200 400 600m

Figure 15 Changements bathymétriques après 140 jours
($Q=2,500\text{m}^3/\text{s}$)

traduite par le prolongement du cordon de sable jusqu'au rivage, à environ 500 m au sud de l'épi, complétant ainsi le système naturel de dérivation. On a pu suivre le transport de matériaux par observation visuelle et par l'usage de colorants, une partie de ce transport se faisant directement sous l'effet des courants puissants par la formation de dunes entre les brise-lames. Le reste des matériaux a été transporté d'un côté à l'autre du chenal sous l'effet des vagues dans la partie moins profonde du littoral.

2.3.2 Chenal de 125 m (essais 1105-116/1000/1500)

Un chenal de 125 m a été construit directement derrière le brise-lames afin de mettre à l'essai le pouvoir de concentration et le pouvoir autonettoyant que possédait un petit chenal. Les deux pentes avec des sous-marines ont été fortifiées avec des pierres. Le système de cordon littoral obtenu à l'issue de l'essai 1103 a été conservé. L'objet de cette série d'essais était de trouver l'état d'équilibre qui permettrait de conserver l'ouverture du chenal sous l'effet de l'écoulement que l'on augmentait par étapes successives en augmentant le débit du fleuve. L'installation utilisée, qui comprend les points de mesure de la vitesse, est illustrée à la figure 16. Les essais ont débuté avec un débit de $116 \text{ m}^3/\text{s}$ et la hauteur de marée de 0,50 m utilisée précédemment. Le chenal s'est rempli très rapidement et s'est complètement obturé après 65 jours sous l'effet des vagues. Le mode de transport autour de l'extrémité du brise-lames était comparable à celui des essais précédents. Il a fallu retirer $132\,000 \text{ m}^3$ de sable pour reconstituer le profil initial.

Le débit du fleuve a par la suite été porté à $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Après 60 jours, il ne restait qu'un petit chenal en V de 60 m x 4,5 m. Les vitesses maximales enregistrées dans cette gorge se sont élevées à 1,6 m/s (flot) et 2,7 m/s (jusant). Avec l'augmentation du niveau de l'eau dans l'estuaire, l'eau a dépassé le niveau de la pente sud fortifiée du chenal, entraînant des sédiments au-delà de l'obstacle. Le chenal complètement rempli est illustré à la figure 17; on y voit aussi les sédiments qui passent par dessus les rives fortifiées du fleuve (pierre blanche) pour s'écouler vers le sud. La formation d'ondulations distinctes dans la partie sud du chenal provient de la concentration de l'écoulement par suite de l'augmentation des dépôts sur la rive nord. La sédimentation s'est cependant poursuivie et s'est finalement soldée par l'obturation complète du passage.

Les essais se sont poursuivis après qu'on ait dragué environ la même quantité de matériaux. Le débit du fleuve a été porté à $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$. Étant donné que les essais précédents avaient démontré que les courants débordaient la rive sud et dissipaient leur énergie et leur pouvoir autonettoyant sur une plus grande section, la rive a été relevée au-delà de IGN pour former un mur de dérivation, tel qu'illustré à la figure 16. Les vagues ont agi pendant 10 heures, soit l'équivalent de 200 jours. Après environ 120 jours, le chenal était partiellement rempli; il restait cependant un chenal en V de 90 m x 4 m qui semblait suffisamment stable pour transmettre la variation des marées dans l'estuaire (figure 18). Les vitesses du courant dans le chenal variaient entre 1,85 m/s (flot) et 2,7 m/s (jusant).

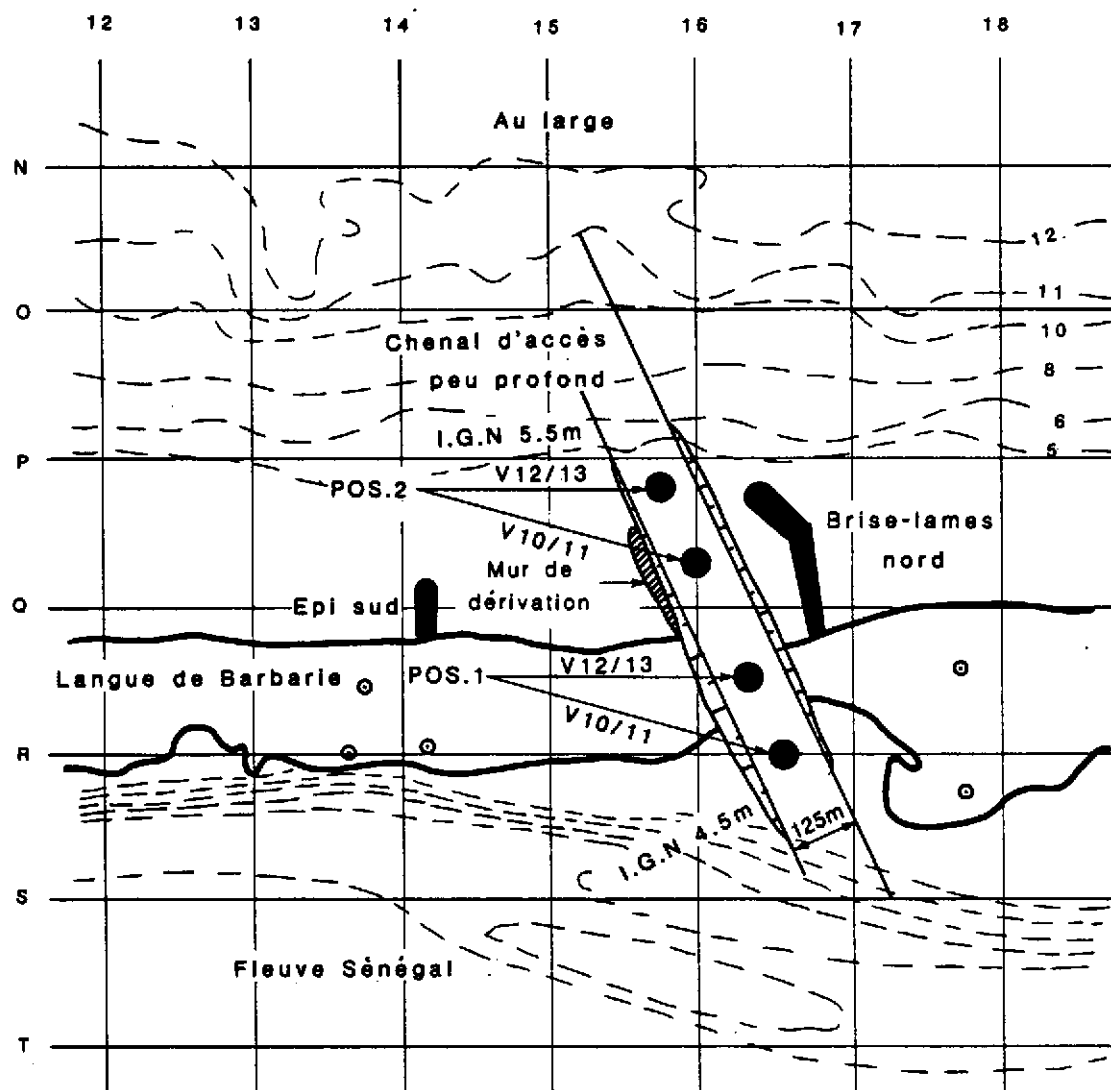


Figure 16 Plan "A" avec des enregistreurs de courant



Figure 17 Essai 1105-500
après 80 jours



Figure 18 Essai 1105-1000
Le chenal qui reste après 120 jours

Le débit du fleuve a une fois de plus été augmenté, même si cela signifiait qu'il fallait outrepasser le maintien d'une entrée stable. Avec $Q = 1\,500\text{ m}^3/\text{s}$, les vagues se sont exercées pendant six heures (120 jours). Aucun dépôt important ne s'est produit dans le chenal, mais on a constaté la formation de dunes très élevées agissant comme moyens de transport pour la dérive littorale. Les enregistrements vidéo et les photographies illustrent la formation d'un cordon très distinct dans le chenal causé par la présence du mur de dérivation et du débit élevé. Le cordon littoral a contourné l'épi sud et rejoint le rivage à un point situé de 600 à 700 m au sud de l'épi. Les deux photographies de la figure 19 illustrent la situation après que le modèle ait été vidé. Les arêtes vives du cordon littoral ont été causées par le vidage du modèle. Un levé topographique a été effectué avant que le modèle ne soit vidé afin de définir les paramètres du modèle pour d'autres essais portant sur des matériaux légers; cette érosion involontaire ne se reflète donc pas sur le levé qui est d'ailleurs donné à la figure 20. On y voit clairement qu'il est possible, avec des vitesses élevées, d'obtenir un chenal stable entre les rives fortifiées ou les murs de dérivation. On distingue aussi sur la même figure la forme plus propice à donner au brise-lames nord et au mur de dérivation sud. Cette forme permet probablement de protéger l'entrée du chenal de l'effet des vagues et favorise la concentration optimale de l'écoulement. Pour des raisons de navigabilité, les vitesses enregistrées dans le chenal d'accès ne devraient pas dépasser certaines limites; il faudrait donc prévoir une zone naturelle de débordement.

Les résultats des mesures de vitesses effectuées pendant les divers essais sur fond de sable aux points donnés aux figures 10 et 16 sont présentés au tableau 7. Ces mesures ont été effectuées avec les compteurs de vitesse électromagnétiques Marsh-McBirney (à 1 m du fond); la direction positive dans l'axe x est parallèle à l'axe du chenal ($245^\circ/65^\circ$). La dernière colonne du tableau 7 donne la déviation du flot/jusant moyen par rapport à cette direction, le signe (+) indiquant une déviation dans le sens horaire.

2.4 Essais avec matériau léger

Tel qu'on l'a précisé précédemment, ces essais avaient pour objet de combler le manque de données constaté à l'issue des essais sur fond en sable quartzeux. Il a fallu néanmoins procéder une fois de plus par approximations successives. Le matériau utilisé pour les essais (coquilles de noix broyées) présentait les caractéristiques suivantes:

- densité $\gamma = 1,30 \text{ à } 1,35\text{ g/cm}^3$
- dimension des particules $d_{50} \approx 1,1\text{ mm}$

La couche de sable de 6 cm a été remplacée par ce matériau jusqu'aux limites d'un chenal de 500 m de large. Puisqu'il fallait s'attendre à ce que l'érosion agisse à certains endroits de l'entrée du chenal, l'épaisseur de la couche de matériaux mobiles a été augmentée à certains endroits à près de 12 cm. Par ailleurs, le fond en béton autour de l'entrée du chenal a été recouvert d'une couche de 1 cm de matériau léger pour montrer les zones d'érosion et de sédimentation. Les deux rives sous-marines du chenal ont été renforcées avec du gravier.

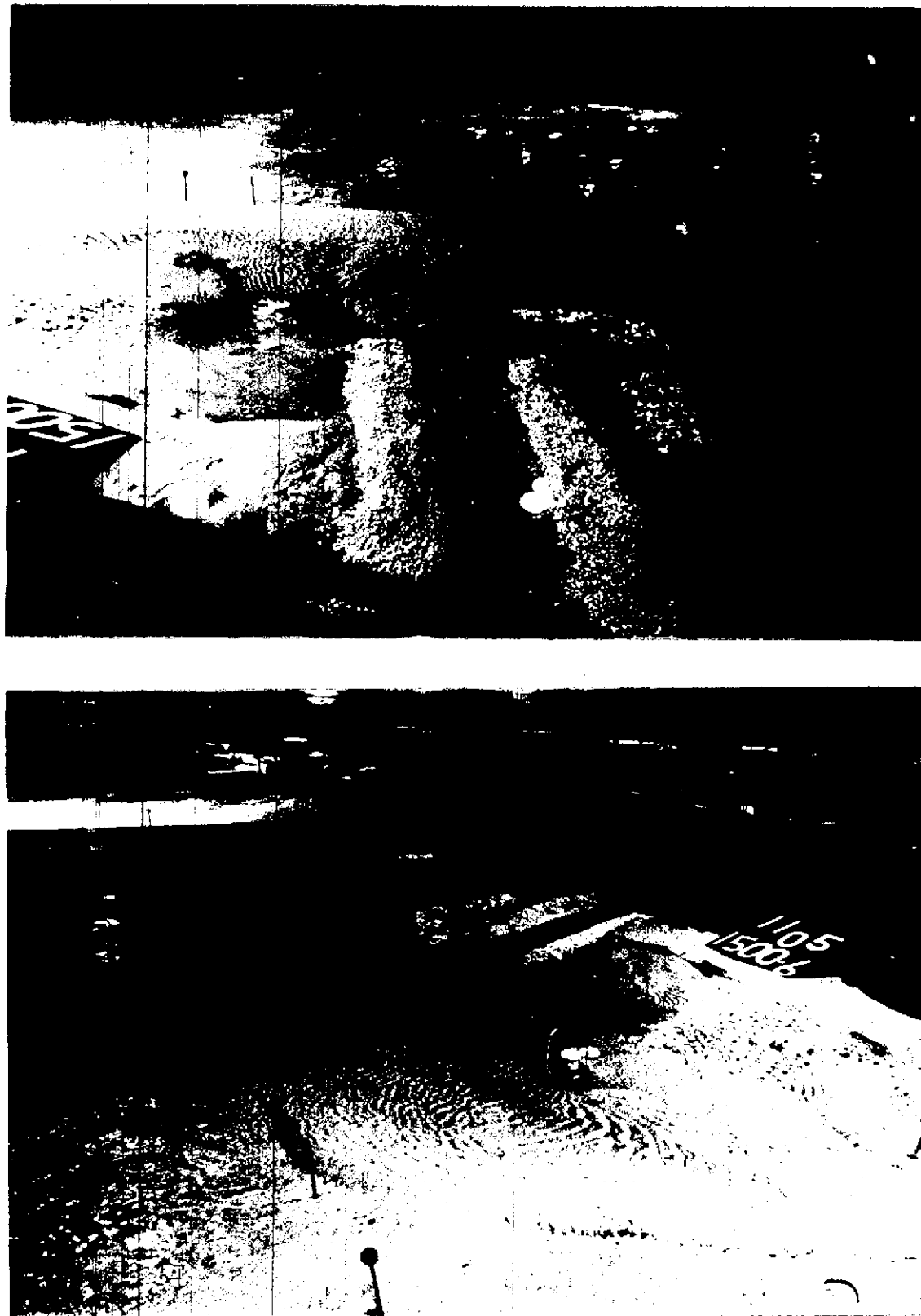


Figure 19 Essai 1105-1500

Chenal et cordon sous-marin après 120 jours

La bathymétrie utilisée pour les modèles servant aux essais comportait le cordon littoral formé au cours de l'essai précédent (1105) avec le chenal étroit à fond en sable quartzeux (figure 20). On voit à la figure 21 la superficie couverte par le matériau léger.

2.4.1 Marées

Les essais ont débuté avec les marées. La hauteur de la marée a été fixée à 0,50 m et les essais sur modèle se sont déroulés pendant 50 minutes (environ 16 jours). Cependant, l'observation visuelle et la vérification des divers repères n'ont révélé aucun changement notable. Il était évident qu'aucun mouvement ne s'était manifesté (voir 2.4.2). On a donc augmenté la hauteur de la marée de 0,50 m à 1,1 m, ce qui s'est traduit par la formation d'un prisme plus prononcé dans l'estuaire et des vitesses plus fortes dans le chenal. Ce régime a été maintenu pendant 5 heures de plus (103 jours). La figure 22 illustre le fond à l'issue de la période d'essai. Les changements topographiques sont illustrés à la figure 23 par comparaison de la bathymétrie avant et après la série d'essais. Les résultats obtenus et les observations visuelles permettent de conclure que des changements importants ont eu lieu sur le côté aval du brise-lames où l'on constate la présence de dépôts atteignant 2 m d'épaisseur. Le cordon littoral s'est aplati et s'est prolongé vers le large et on constate la formation d'une pente abrupte du côté de l'océan causée par l'absence de l'effet des vagues. On trouve aussi un chenal d'accès menant vers les eaux plus profondes dont la profondeur varie partout entre 4 et 5 m. On note sur la partie plus profonde située du côté sud, des profondeurs variant entre 5 et 6 m.

Une seule zone dans l'estuaire a été particulièrement touchée. On voit à la partie supérieure de la figure 22 (avec forte érosion dans la partie centrale) qu'il y a eu migration sédimentaire de la zone sud du chenal vers l'estuaire, avec répartition vers le centre du fleuve et formation d'une langue pointant vers l'est-sud-est. L'épaisseur du dépôt, que l'on retrouve dans chaque essai sur fond mobile, a atteint 3 m.

2.4.2 Marées et vagues

On s'attendait à ce que les vagues d'intensité moyenne causent de la turbulence sur le fond et augmentent le pouvoir transporteur des courants. Afin de vérifier l'effet de ces vagues, on a lancé des vagues ayant la moitié de l'amplitude de celles utilisées dans les essais précédents sur fond mobile, sur le profil bathymétrique obtenu suite à l'action des marées. Les vagues n'ont été surimposées aux courants des marées que pendant 53 jours, puisqu'on a constaté le déplacement immédiat de matériaux. Il a fallu simuler le transport des matériaux autour de l'extrémité du brise-lames en ajoutant environ 30 l (202 500 m³) de matériau léger qui ont été versé uniformément au cours de l'essai. On ne peut cependant pas appliquer aux sédiments les mêmes échelles qu'au sable. L'échelle de temps des sédiments est incontestablement supérieure à celle du sable quartzeux, le facteur étant au moins de 4 à 5. La figure 24 illustre la bathymétrie avant et après application de l'effet des vagues. On constate immédiatement la mécanique du transport des matériaux sous l'effet des vagues autour de l'extrémité du brise-lames.



Figure 21 Essai 1106

Superficie du modèle couvert avec le matériau léger

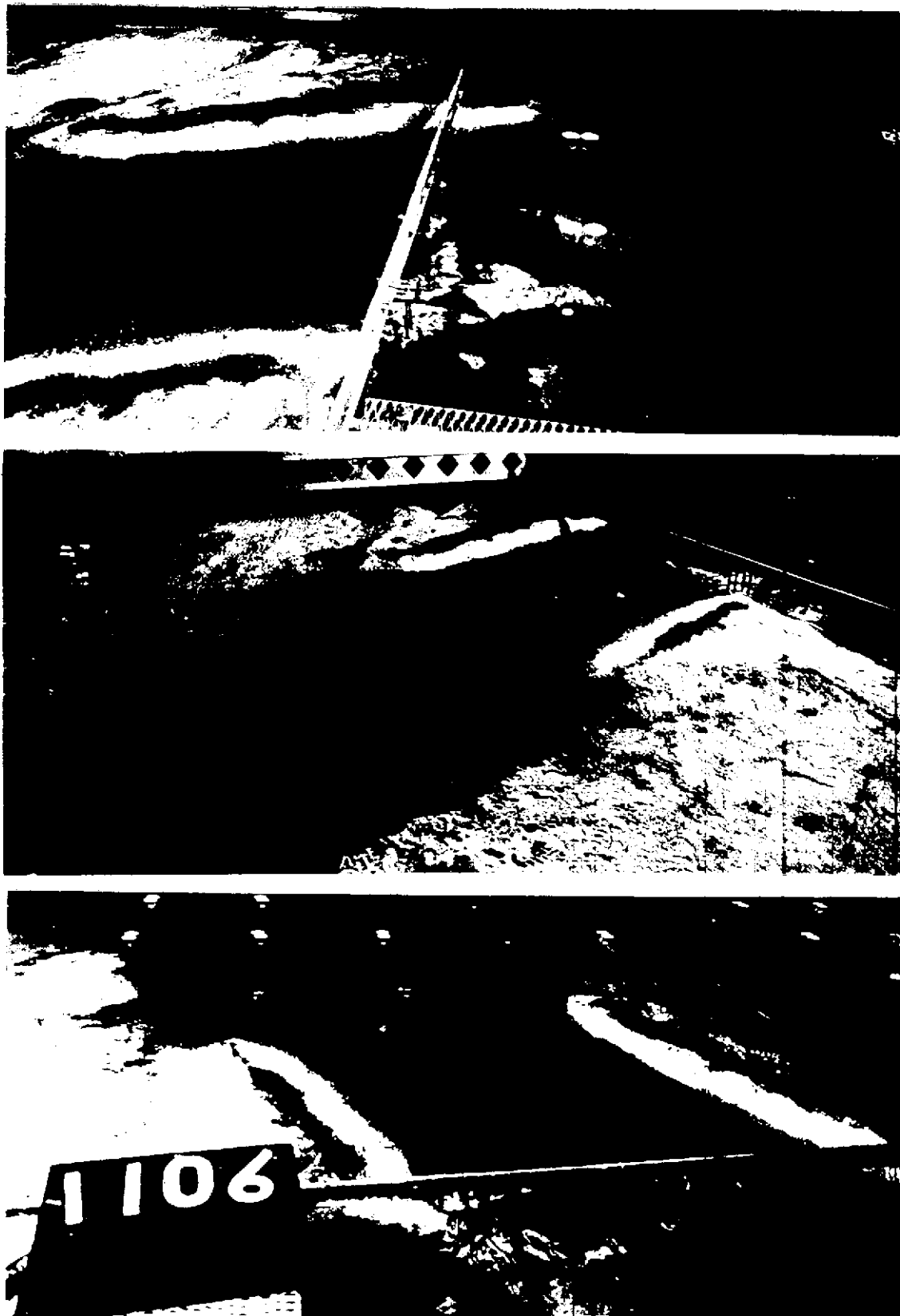
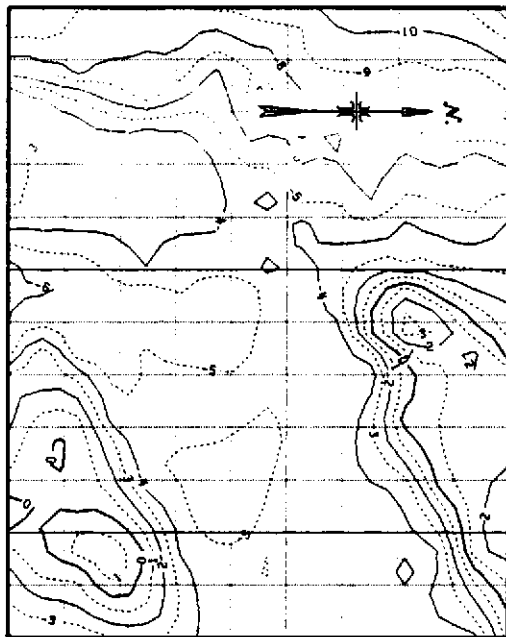


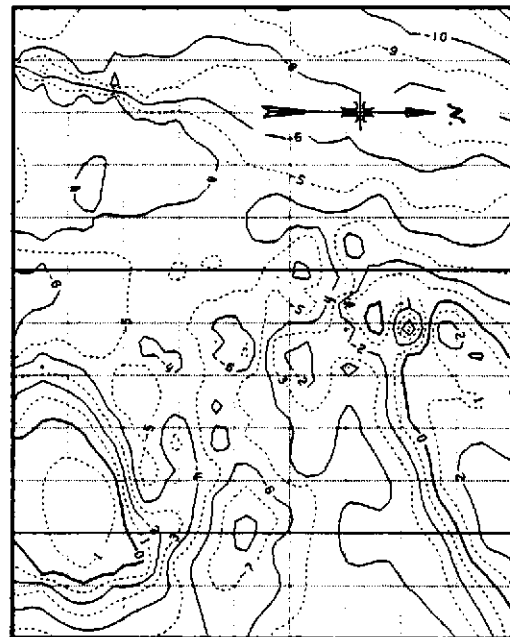
Figure 22 Essai 1106

La bathymétrie après 120 jours de marées

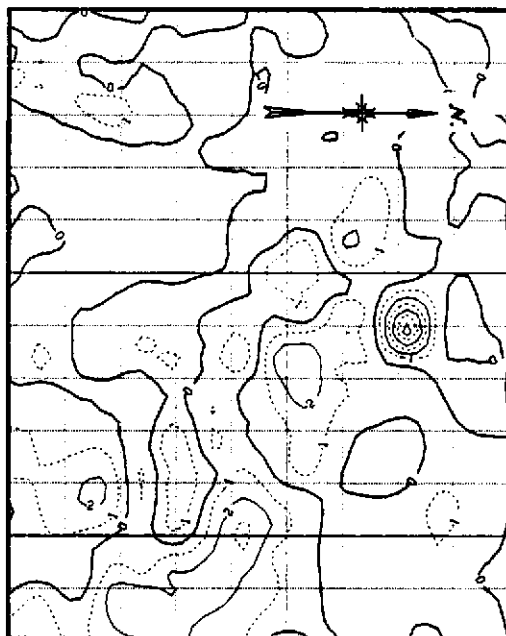
$Q=116\text{m}^3/\text{s}$ - $\Delta h=1,10\text{m}$



Avant l'essai



Après 120 jours



Erosion (-) et ensablement (+)
après 120 jours

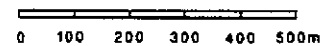
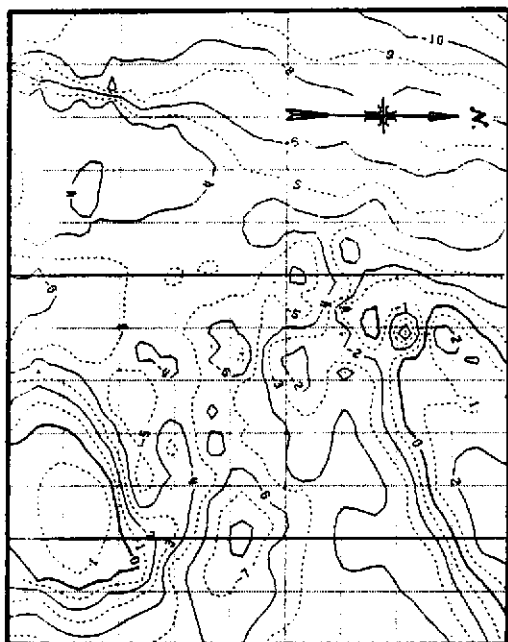
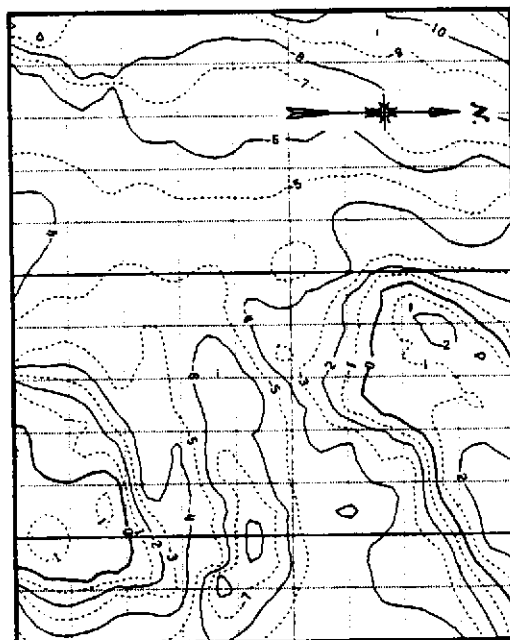


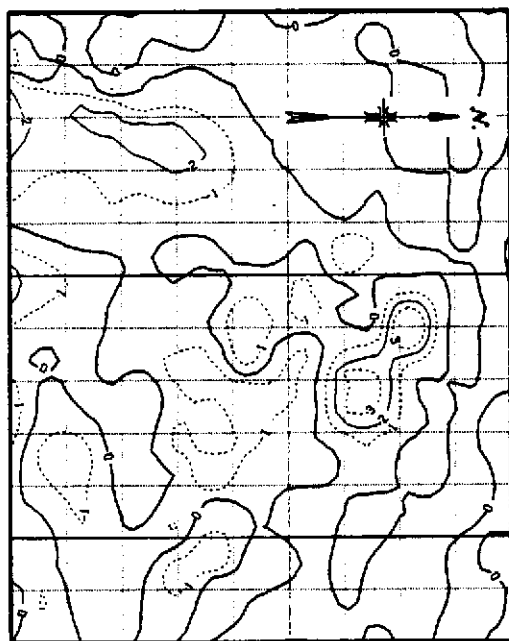
Figure 23 Essai 1106 -
Changements bathymétriques
après 120 jours de marée



Après 120 jours de marées



Après 53 jours sous l'effet des vagues



Erosion (-) et ensablement (+)
après 53 jours sous l'effet des vagues

0 100 200 300 400 500m

Figure 24 Essai 1106 -
Changements bathymétriques
après 53 jours
sous l'effet des vagues

Un dépôt important s'est effectué derrière l'extrémité du brise-lames, ce qui cause le rétrécissement du chenal vers la rive sud; ce dépôt se prolonge vers l'axe du chenal où les sédiments sont emportés par le courant pour être transportés en zig-zag sur le côté plus profond du chenal. Les vagues ont aussi augmenté la profondeur de l'autre côté du cordon littoral, créant ainsi une voie d'accès plus large. La mécanique de transport s'exerçant sur toute l'entrée est nettement visible sur la figure 25. Le corps de couleur blanche situé au large fait partie du cordon servant de pont pour le transport de matériaux en dérivation. Compte tenu de sa profondeur limitée, l'érosion causée par les vagues et les courants a atteint la base de sable. La profondeur minimale disponible pour la navigation est de 4,5 m. Cette valeur est moins élevée que la profondeur de 5,5 m spécifiée pour la partie du chenal située au large, mais il ne faut pas oublier que des essais avec ce type de matériau sont toujours du côté pessimiste.

Les vitesses de cisaillement critiques pour l'amorce du mouvement dans le modèle sont:

- pour le sable quartzeux ($\gamma = 2,65 \text{ g/cm}^3$): $U_C^* = 0,012 \text{ m/s}$
- pour les coquilles de noix ($\gamma = 1,35 \text{ g/cm}^3$): $U_C^* = 0,0104 \text{ m/s}$
- pour le matériau léger avec
 $\gamma = 1,05 \text{ g/cm}^3$ et une
 granulométrie idéale de 1,5 à 2 mm : $U_C^* = 0,0048 \text{ m/s}$

Compte tenu des profondeurs données, ces valeurs critiques peuvent être dépassées dans le cas des coquilles de noix par surimposition d'un courant ayant une vitesse de 20 à 25 cm/s. Si l'on surimpose une vague dont la hauteur-modèle est de 8 mm (comme celle qui a été utilisée pour augmenter la turbulence sur le fond), la vitesse nécessaire du courant tombe pratiquement à zéro. On donne à la figure 26 le rapport qui existe entre la vitesse du courant et la vitesse de cisaillement dans le modèle et dans la nature (prototype). On y voit clairement que seul dans le cas du modèle l'action des vagues contribue à amorcer le mouvement, alors que dans les conditions naturelles (prototype) l'effet des vagues n'est pas nécessaire. Cependant, la direction du courant constitue le principal facteur agissant sur la direction du transport du sable et intervient sur le flot principal de matériau après qu'il ait été soulevé par les vagues. Le recours à l'agitation par les vagues est donc justifié pour ces essais, même si on ne peut pas en mesurer précisément l'effet.

L'effet d'une plus grande hauteur de marée a été analysé dans le cadre de l'essai 1107. Le cordon littoral a été retiré afin que l'on puisse exclure les effets d'un cordon existant. La hauteur de marée a été fixée à 1,7 m, avec un débit de $116 \text{ m}^3/\text{s}$. Après 30 jours sans vagues, les essais n'ont rien révélé qui soit différent de l'essai 1106. On a par la suite surimposé les vagues pendant 53 jours. Il a fallu compenser l'augmentation du transport de sédiments autour de l'extrémité du brise-lames en ajoutant 49 litres (330 750 m^3) de matériau de fond. Encore une fois, il n'est pas possible d'appliquer à ce cas une échelle de temps de sédimentation. Le régime de sédimentation et le mode de dérivation étaient très semblables à ceux de l'essai 1106.



Figure 25 Mécanique de transport du sable

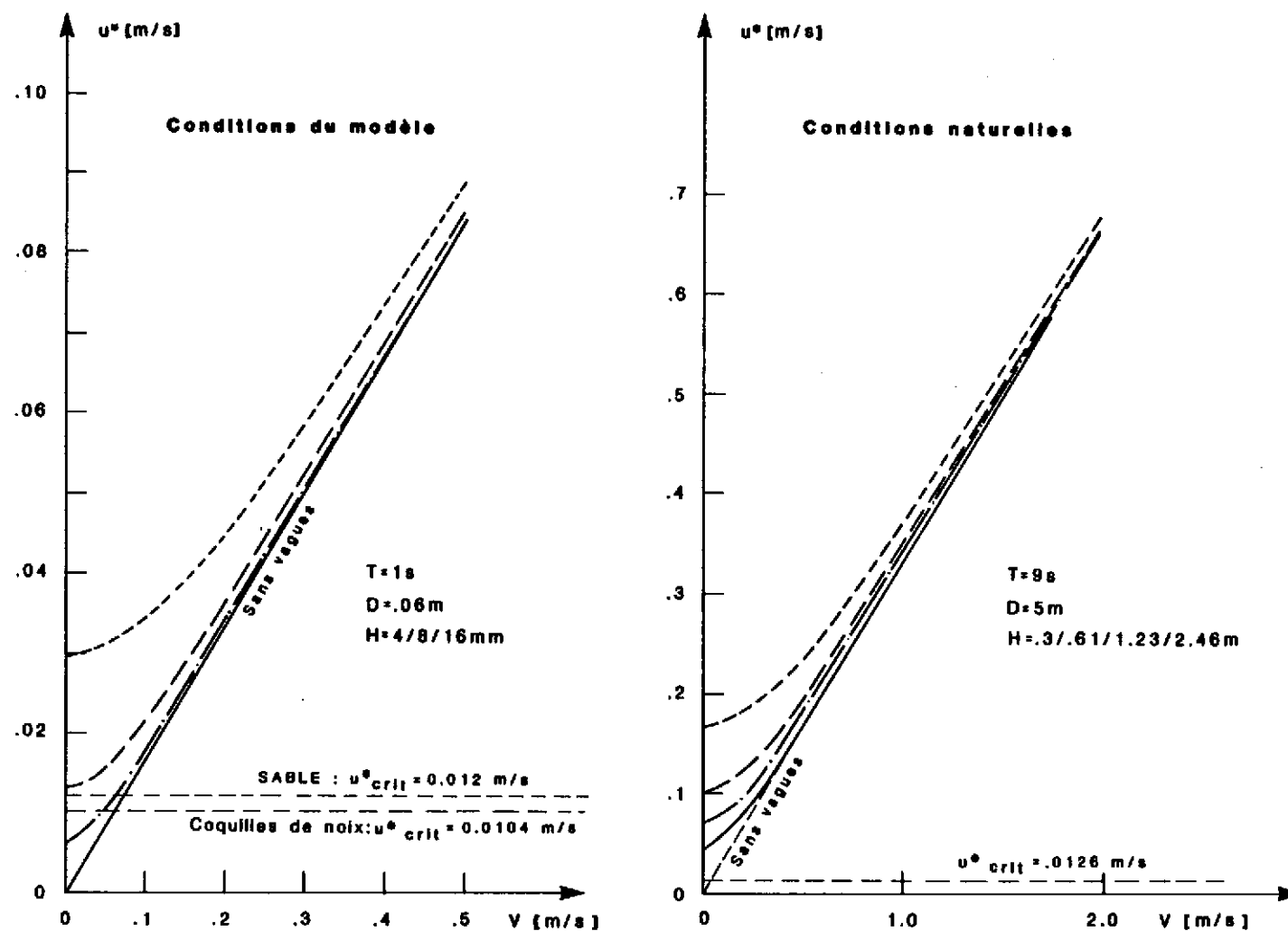


Figure 26 Vitesse de cisaillement sous l'effet des courants et des vagues

La figure 27 illustre les zones de dépôt des sédiments et les zones d'érosion. L'augmentation de la vitesse du courant se traduit par l'amélioration du chenal profond du côté sud de l'entrée. La distinction bien nette qui existe entre l'écoulement des eaux de flot et de jusant est signalée par l'orientation de ce chenal et l'emplacement des principaux hauts-fonds situés au large. Dans l'estuaire, les dépôts sont répartis à partir d'un centre qui se déplace en amont, vers Saint-Louis.

La figure 28 illustre enfin les principaux changements bathymétriques et précise les zones citées ci-dessus. Quoique le cordon littoral ne figure pas sur le plan bathymétrique à cause d'une résolution insuffisante, il est possible d'en observer la formation sur la photo, et les enregistrements vidéo indiquent clairement le tracé suivi par les sédiments en dérivation. On parvient à conserver une profondeur de 5 à 6 m dans toute la zone de l'entrée.

3.0 DIAGRAMME D'ÉCOULEMENT

Étant donné que les essais sur modèle ne pouvaient porter que sur certains aspects de la présente étude, on recommande d'entreprendre une analyse analytique approfondie de la stabilité d'un chenal d'entrée au moyen des données recueillies sur les lieux (prototype) ainsi que des résultats des études sur modèle. On a donc établi un diagramme complet d'écoulement pour les installations existantes à modèle hybride. Des mesures du courant ont été effectuées aux endroits indiqués à la figure 29 sur un cycle complet de marées au moyen des compteurs électromagnétiques Marsh-McBirney. Les sondes ont été principalement placées à 1 m du fond. Les mesures ont porté sur les cas suivants:

1. $\Delta h = 0,50 \text{ m}$; $Q = 116 \text{ m}^3/\text{s}$
2. $\Delta h = 0,50 \text{ m}$; $Q = 2\,500 \text{ m}^3/\text{s}$
3. $\Delta h = 1,35 \text{ m}$; $Q = 116 \text{ m}^3/\text{s}$

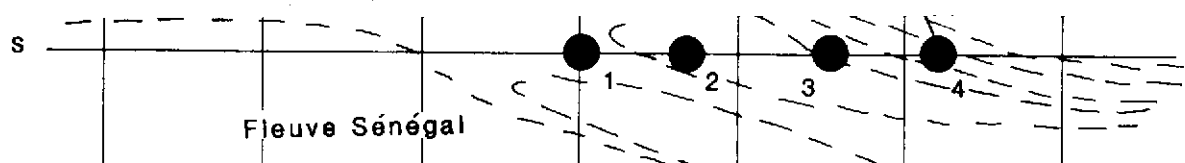
Par ailleurs, on a photographié à intervalles fixes les trajectoires suivies par des flotteurs pendant un cycle complet de marée. Les trajectoires des flotteurs pour les débits maximaux de flot et de jusant sont illustrées aux figures 30 à 33. Les résultats détaillés sont donnés à l'Appendice A.

4.0 CONCLUSIONS

La faisabilité d'un chenal autonettoyant peu profond donnant accès au nouveau port de pêche (Port-de-Pêche) situé à Saint-Louis dans l'estuaire du fleuve Sénégal a fait l'objet d'une étude de l'action des vagues et de la sédimentation sur modèle en distorsion existant de l'estuaire et d'une partie du littoral. Étant donné que le modèle avait été conçu pour reproduire la dérive littorale sous l'effet de la turbulence créée par les vagues et les courants littoraux, il n'a pas été possible de simuler convenablement la mécanique du transport sous l'effet des courants agissant en eau profonde (problème de cisaillement-tension). Les essais sur modèle ne peuvent donc fournir que des données qualitatives aux solutions envisagées. L'évaluation des sections (transversales)



Figure 27 Essai 1107
Erosion et sédimentation après 53 jours
 $Q=116\text{m}^3/\text{s} - \Delta h=1.7\text{m}$



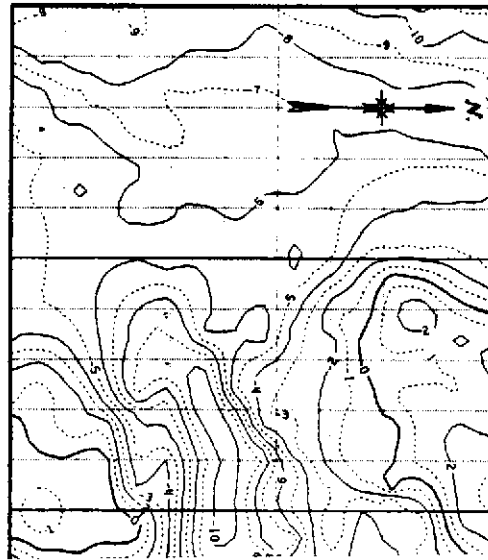
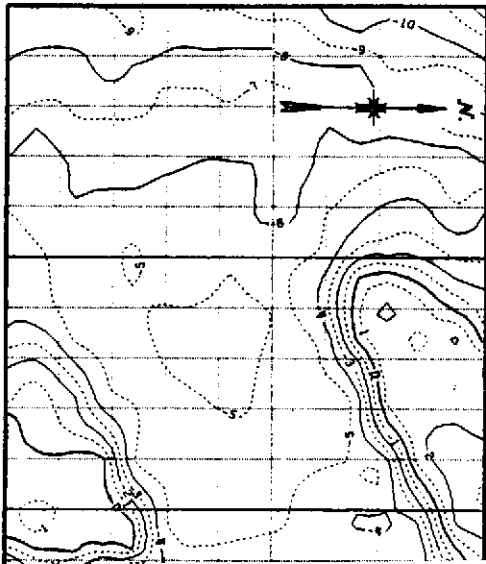




Figure 31 Trajectoires des flotteurs

$Q=116\text{m}^3/\text{s}$ - $\Delta h=0,50\text{m}$

-jusant-



Figure 32 Trajectoires des flotteurs

$Q=2500\text{m}^3/\text{s}$ - $\Delta h=0,50\text{m}$

-flôt-

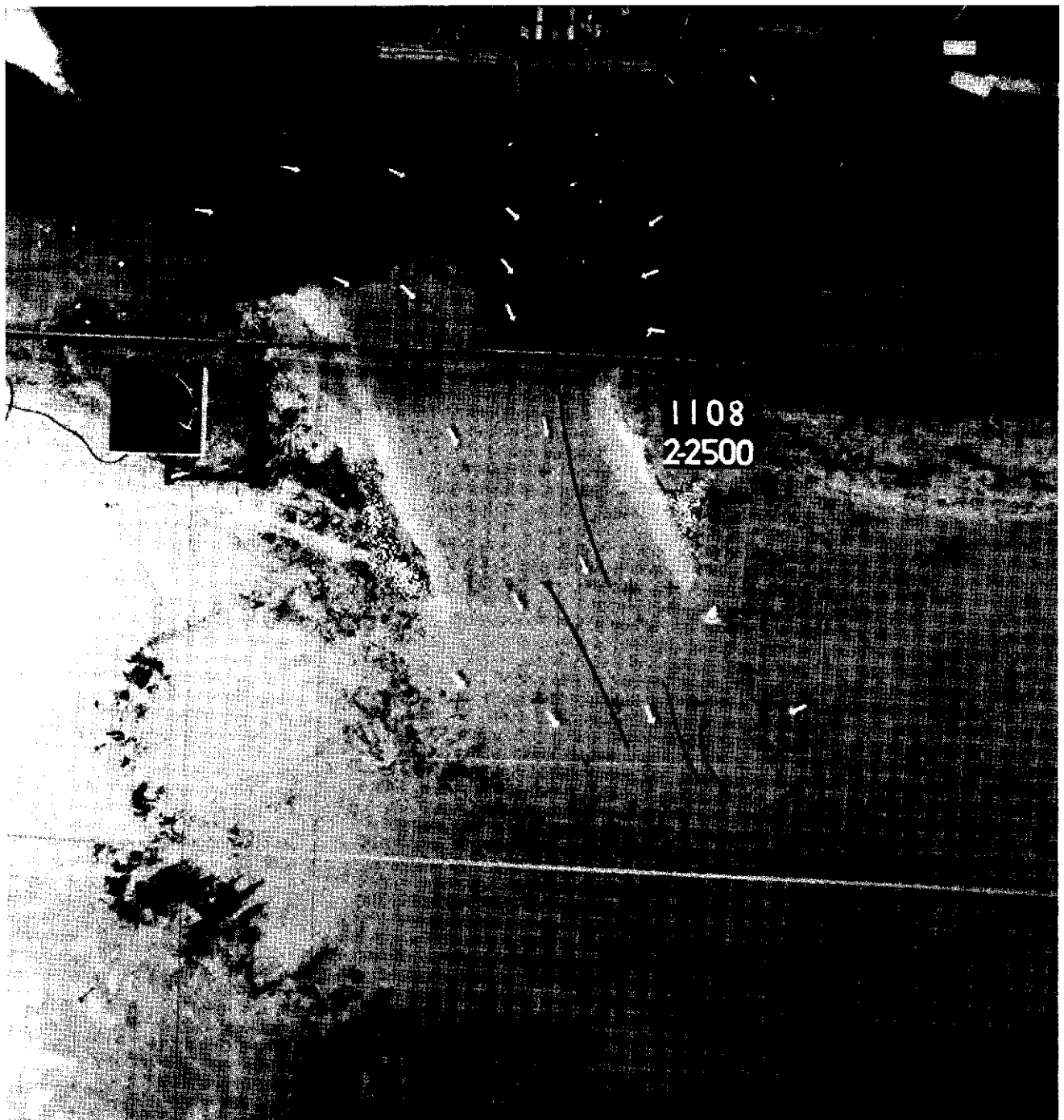


Figure 33 Trajectoires des flotteurs

$Q=2500\text{m}^3/\text{s}$ - $\Delta h=0,50\text{m}$

-jusant-

à prévoir en fonction des divers débits du fleuve et diverses hauteurs des marées a été fondée sur des essais antérieurs sur modèle unidimensionnel à différences définies.

Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes:

- Mis à l'épreuve dans le modèle à fond de sable quartzeux, il y aura obturation d'un chenal de 500 m de large sous l'action de la dérive littorale. Ce n'est que lorsque le débit du fleuve a été considérablement augmenté ($\approx 2\,500\text{ m}^3/\text{s}$) qu'il a été possible de conserver un petit chenal sous l'effet des courants unidirectionnels.
- Un chenal de 125 m de large sur fond de sable quartzeux directement protégé par un brise-lames situé sur sa rive nord pourra rester ouvert avec un débit $Q > 1000\text{ m}^3/\text{s}$ et des vitesses de 1,7 à 2,7 m/s qui, selon le rapport des vitesses critiques de cisaillement (utilisées/souhaitées), pourraient être réduites d'un facteur de 60%. Le transport de sable à travers le chenal s'est fait au moyen de dunes distinctes qui se sont traduites par la réduction de la profondeur à environ 4 m et par la formation d'un cordon littoral distinct sur lequel on pouvait observer l'action des vagues. La fortification des pentes nord et sud du chenal permettrait de garantir une stabilité optimale et d'empêcher la formation de méandres. La construction d'un brise-lames, d'un chenal et d'un épi sud courbés permettrait d'améliorer les conditions d'écoulement et de favoriser la migration naturelle. Les essais effectués avec des matériaux légers ont mieux permis d'observer le réaménagement de la sédimentation sous l'effet des courants. Le matériau léger (coquilles de noix) était encore trop lourd pour qu'il puisse être soulevé sous le seul effet des courants pendant les essais à faible hauteur de marée. Cependant, l'augmentation de l'effet des courants par suite de l'augmentation de la hauteur de marée (de 0,5 à 1,7 m) s'est traduite par le transport observable de matériaux sous l'effet des courants de flot et de jusant. La surimposition de l'effet des vagues a permis de compenser dans une certaine mesure les effets de mise à l'échelle de matériaux encore trop pesants. Les essais permettent d'observer l'emplacement éventuel et la forme d'un système de dérivation littorale et indiquent la présence de zones de dépôts dans l'estuaire. Dans ces conditions, il serait possible de maintenir une profondeur minimale de 5 à 6 m partout dans le chenal.
- Étant donné que le présent modèle ne peut que donner des résultats qualitatifs aux solutions envisagées, il faut entreprendre une analyse analytique complète de la stabilité du chenal en fonction des vitesses des courants et des hauteurs des vagues enregistrées dans les essais sur les lieux (prototype) et sur modèle. L'étude devrait porter sur un chenal de 500 m de large dont les digues seraient fortifiées pour stabiliser l'emplacement et empêcher les déplacements. À faible

hauteur de marée et à faible débit du fleuve, la sédimentation et la fermeture partielle sont inévitables. Un chenal étroit restera ouvert et se déplacera vraisemblablement dans les limites des fortifications. Cependant, lorsque la hauteur de marée et le débit du fleuve sont plus élevés, il faudra prévoir une zone de débordement à profondeur limitée qui n'entrera en vigueur qu'avec des niveaux d'eau élevés.

De façon générale, si l'on veut conserver l'embouchure artificielle d'un fleuve, qui s'adapte naturellement à toutes les conditions qui se présentent, il faudra prévoir la plus grande souplesse possible sur le plan de la forme, sans toutefois perdre la contrainte de son emplacement.

5.0 BIBLIOGRAPHIE

1. BARTHEL, V.
1985. "L'organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal, Port de St-Louis, Sénégal; Études sur modèles hydrauliques - Phase II - Le terminal au large". Conseil National de Recherches du Canada, rapport CTR-HY-009, Ottawa.
2. BARTHEL, V.
1985. "L'organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal, Port de St-Louis, Sénégal; Études sur modèles hydrauliques - Phase II - Les mouvements et les forces d'amarrages d'un navire". Conseil National de Recherches du Canada, rapport CTR-HY-010, Ottawa.
3. BRUUN, P. et F. GERRITSEN.
1959. "Natural Bypassing of Sand at Coastal Inlets". Jour. Waterways and Harbours Div., WW4.
4. CROOKSHANK, N.L.
1971. "One-dimensional Mathematical Model of the Lower Fraser River". Conseil National de Recherches du Canada, rapport LTR-HY-14, Ottawa.
5. 1978. "Wasserbauliches Versuchswesen". Hydraulic Modelling, Vol. No. 4, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft.
6. WILLIS, D.H., V. BARTHEL, N.L. CROOKSHANK et M.H. DAVIES.
1984. "L'organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal, Port de St-Louis, Sénégal; Études sur modèles hydrauliques". Conseil National de Recherches du Canada, rapport CTR-HY-003, Ottawa.

APPENDICE A

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1. Table des matières	A1
2. Essais avec $\Delta h = 0,50 \text{ m}$; $Q = 116 \text{ m}^3/\text{s}$	
VEL01 - TID26 = POS. 1 sur la fig. 29	A2
VEL01 - TID28 = POS. 2 sur la fig. 29	A3
VEL02 - TID26 = POS. 3 sur la fig. 29	A4
.	.
.	.
.	.
VEL07 - TID28 = POS. 14 sur la fig. 29	A15
3. Essais avec $\Delta h = 0,50 \text{ m}$; $Q = 2\,500 \text{ m}^3/\text{s}$	
VEL11...VEL17 (TID26 et TID28)	A16...A29
4. Essais avec $\Delta h = 1,35 \text{ m}$; $Q = 116 \text{ m}^3/\text{s}$	
VEL21...VEL27 (TID26 et TID28)	A30...A43

