



Laboratoire de Recherches Hydrauliques
borgerhout

PORT DE ZEEBRUGGE

ETUDE SUR MODELE REDUIT SEDIMENTOLOGIQUE

RAPPORT FINAL
SYNTHESE

1981

MOD.387.S-7

Laboratoire Central d'Hydraulique de France

maisons - alfort

LABORATOIRE DE RECHERCHES
HYDRAULIQUES

borgerhout anvers



ministère des travaux publics
ponts et chaussées
administration des voies hydrauliques

ÉTUDE SUR MODÈLE RÉDUIT SÉDIMENTOLOGIQUE

DE L'ÉVOLUTION DES FONDS AUX ABORDS

DU PORT DE ZEEBRUGGE

MODÈLE 387.S

RAPPORT FINAL

SYNTHÈSE

LRH 81/19

LCHF RF/S/387.S-7

S O M M A I R E

	<u>Pages</u>
INTRODUCTION	1
2 - GENERALITES	2
3 - LE MODELE REDUIT SEDIMENTOLOGIQUE	3
4 - TARAGE HYDRAULIQUE	6
4.1 - Les marées	6
4.2 - Les courants	7
4.3 - Les houles	9
5 - TARAGE SEDIMENTOLOGIQUE	10
5.1 - Matériau mobile retenu	10
5.2 - Cycle annuel	11
5.3 - Echelles de similitude	12
5.4 - Principaux résultats du tarage	14
6 - EVOLUTION DES FONDS AUX ABORDS DES OUVRAGES DE PROTECTION DU NOUVEAU PORT	19
6.1 - Période d'extension des ouvrages	20
6.2 - Période après achèvement du port	21
7 - SUGGESTIONS SUR LES ETUDES COMPLEMENTAIRES SUSCEPTIBLES D'ETRE REALISEES SUR LE MODELE DE ZEEBRUGGE	26
7.1 - Parfaire les connaissances acquises pour les problèmes des sables aux abords du port	27
7.2 - Rechercher des moyens de protection contre l'érosion des fonds	28
7.3 - Utiliser le modèle sédimentologique actuel pour prévoir les risques d'envasement aux abords et à l'intérieur du port de Zeebrugge	29
8 - CONCLUSIONS	30

I N T R O D U C T I O N

Du fait des actions hydrodynamiques non négligeables et de la nature très diversifiée des fonds, l'extension des ouvrages de protection du nouvel avant-port de Zeebrugge risque d'engendrer des remaniements sédimentaires appréciables, se traduisant entre autre, par des approfondissements locaux ou étendus à proximité immédiate des ouvrages pouvant entraver l'avancement des travaux et être préjudiciables à la stabilité des ouvrages.

Avoir une vue d'ensemble suffisamment précise des risques d'érosion aux abords des ouvrages, de manière à prévoir les moyens d'y remédier, a été l'objectif essentiel de l'étude sédimentologique sur modèle réduit, de l'évolution des fonds supposés constitués de sable.

Cette étude réalisée au Laboratoire de Recherches Hydrauliques du Ministère des Travaux Publics à Borgerhout, a été menée avec la collaboration du Laboratoire Central d'Hydraulique de France de Maisons-Alfort, chargé de la conduite des essais et en assumant la responsabilité technique vis-à-vis du Laboratoire de Borgerhout.

Les principales phases de l'étude (études préliminaires sur les possibilités de reprise des matériaux et sur le choix du matériau mobile, tarage hydraulique, tarage sédimentologique, évolution des fonds en extension future du port) font l'objet de rapports intermédiaires dans lesquels sont développés les données et résultats correspondants.

Le présent rapport se propose de récapituler les grandes lignes de l'étude sur modèle réduit sédimentologique dans son déroulement et dans ses résultats essentiels et d'en tirer les conclusions et les recommandations pour d'éventuels compléments d'étude.

* Pour plus de facilité, les renvois ou références aux différents rapports intermédiaires seront précisés comme indiqué ci-après.

- Etude préliminaire sur les possibilités de reprise des matériaux : (EP-1)
- Etude préliminaire sur le choix du matériau mobile : (EP-2)
- Construction du modèle et tarage hydraulique : (TH-3)
- Tarage sédimentologique (première et deuxième parties) : (TS-4)
- Evolution des fonds pendant la période de construction de la digue GNL : (SI-5)
- Evolution des fonds en extension finale du port : (EF-6)

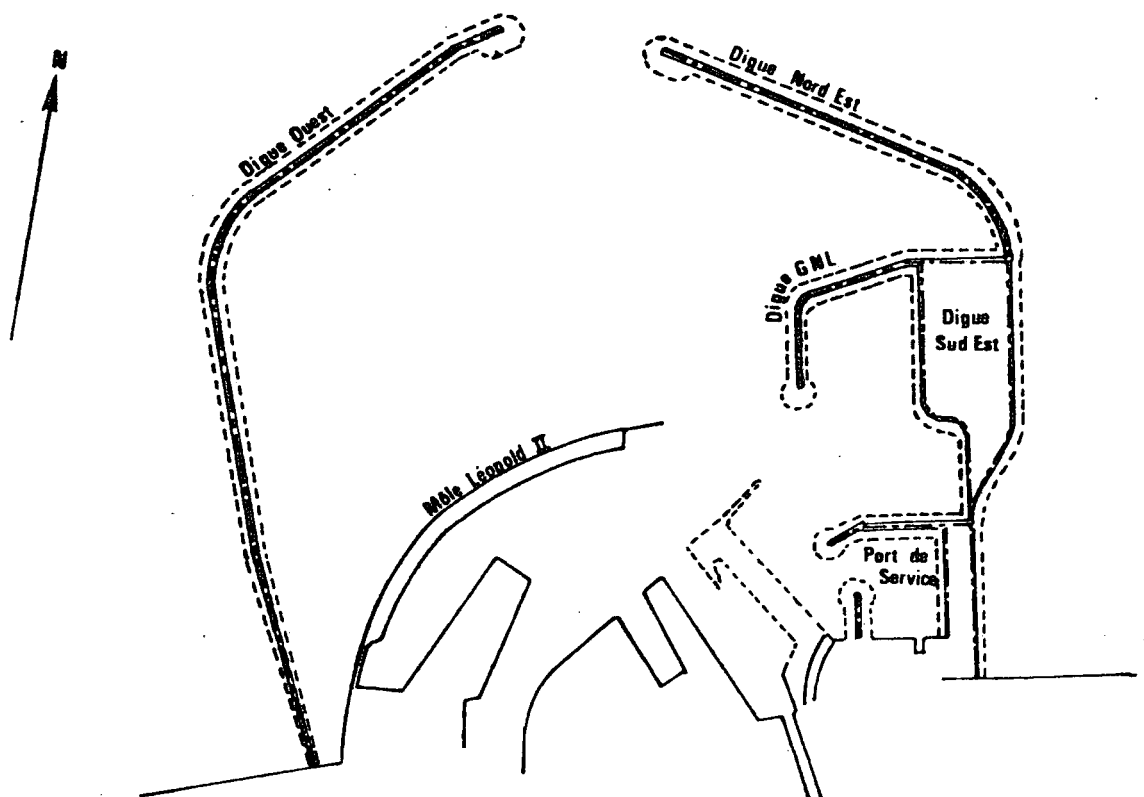
GENERALITES

Avant la réalisation d'un modèle réduit, il est essentiel de connaître et définir les paramètres naturels à prendre en considération.

Pour se faire, une synthèse, précisant l'ensemble des données et mesures Nature, a été établie par le bureau d'étude de l'Association Momentanée Zeebouw-Zeezand. Pour permettre le réglage et l'étalonnage du modèle réduit physique dans de bonnes conditions techniques, les éléments inhérents à l'étude de l'évolution des fonds aux abords immédiats des ouvrages ont été regroupés dans deux notes d'adaptation des phénomènes naturels (partie hydraulique et partie sédimentologique) au modèle.

En parallèle, deux études ont été menées au L.C.H.F. : la première (étude théorique [EP-1]) portant sur les possibilités de reprise des sédiments et une estimation des mouvements sédimentaires possibles sous l'action des houles et sous l'action des courants, la seconde (étude en canal [EP-2]) concernant le choix des matériaux mobiles susceptibles de schématiser les sédiments naturels sur le modèle tridimensionnel.

Le projet d'extension du nouveau port est présenté par le schéma ci-après :



LE MODELE REDUIT SEDIMENTOLOGIQUE

Pour être capable, dans la mesure des possibilités économiques et matérielles de réalisation, de répondre de façon concrète aux besoins de l'étude, le modèle sédimentologique devait satisfaire plusieurs conditions.

Les limites du modèle devaient être telles que toutes modifications (extension des ouvrages...) n'influent pratiquement pas sur les conditions aux limites. Les échelles de réduction devaient permettre la reproduction la plus fidèle des principaux paramètres hydrauliques et sédimentologiques relevés en Nature, tout en ayant conscience que certains phénomènes complexes ne sauraient être abordés ou représentés que d'une façon qualitative, et qu'il faudra en tenir compte dans l'interprétation des résultats.

L'équipement du modèle devait être prévu pour pouvoir supporter des modifications d'échelle (distorsion...) tout en conservant une bonne qualité de reproduction et de mesures.

Par ailleurs, le modèle devait être conçu de façon à pouvoir ultérieurement, être utilisé comme modèle pilote des travaux et éventuellement pour l'étude de l'envasement du futur avant-port et de son chenal d'accès.

Dans cette optique, le modèle réduit a été réalisé à Borgerhout, à une échelle en plan du 1/400^{ème} et à une échelle des hauteurs du 1/100^{ème}. Pour une superficie (au niveau de la zone de reproduction des fonds) de plus de 72 km², il représente une longueur de côte de près de 13 km et s'étend vers le large sur plus de 6 km, enveloppant ainsi le port de Zeebrugge localisé au centre du modèle.

La similitude géographique et la similitude dynamique adoptées en début d'étude, conduisent à des échelles théoriques du modèle données dans le tableau ci-après. Afin de donner un ordre de grandeur, sont également mentionnées dans ce tableau quelques valeurs caractéristiques.

MODELE REDUIT SEDIMENTOLOGIQUE PERMETTANT D'ETUDIER LES EVOLUTIONS DES FONDS

AUX ABORDS DU PORT DE ZEEBRUGGE

Echelles de Réduction			Quelques Grandeurs caractéristiques		
Grandeurs	Symboles	Valeurs		Nature	Modèle
- longueurs largeurs	1/m	1/400	- longueur de côte	12,8 km	32 m
			- avancée vers le large	6,2 km	15,5 m
- hauteurs	1/n	1/100			
- distorsion	m/n	4			Environ
- Surfaces verticales	1/m.n	1/4.10 ⁴	- surface totale du modèle		830 m ²
			- surface de la zone étudiée	72,8 km ²	455 m ²
- Surfaces horizontales	1/m ²	1/16.10 ⁴	- surface de la zone des fonds mobiles	36,8 km ²	230 m ²
- volumes	1/m ² .n	1/16.10 ⁶			
- temps hydrauliques	1/m.n ^{-1/2}	1/40	- profondeur d'eau moyenne	7 m	7 cm
- vitesses verticales	1/n ^{3/2} .m ⁻¹	1/2,5	- amplitude de la marée de vive eau moyenne	4,3 m	4,3 cm
			- durée d'une marée	12h25'	18'40"
- vitesses horizontales	1/n ^{1/2}	1/10			
- débits liquides	1/m.n ^{3/2}	1/4.10 ⁵	- vitesse moyenne en maximum de flot	1,5 ms ⁻¹	15 cms ⁻¹
			(avant extension du port et avant distorsion des courants)		
H O U L E S	hauteurs	1/n			
	périodes	1/n ^{1/2}	- hauteur significative de la houle décennale	5,3 m	5,3 cm
	courants	$\frac{1}{n^{5/6} m^{-1/3}}$	- périodes moyennes de la houle	3 à 10 s	0,3 à 1 s

Notons qu'au cours du tarage, une distorsion des courants (augmentation des vitesses) a été introduite. La distorsion finalement adoptée étant de +15 %, l'échelle des vitesses horizontales initialement de 1/10^{ème} était ramenée à 1/8,7^{ème} environ.

Les échelles sédimentologiques, liées à la nature du matériau artificiel seront abordées dans la partie tarage sédimentologique.

Le modèle était équipé :

- d'un générateur de marée à came permettant la représentation de marées à coefficients constants ou variables,
- d'un générateur de courant synchronisé avec le générateur de marée et assurant en continu, les variations de vitesses au cours de la marée et en fonction du coefficient de marée,
- d'un générateur de houle pivotant à amplitudes et périodes variables de façon continue, conformément au cycle de houles déduit des observations et statistiques Nature,
- d'appareils de mesure, de contrôle et d'enregistreurs (niveau de marée, amplitude et période de la houle, micromoulinets...) et de passerelles d'exploitation.

TARAGE HYDRAULIQUE

Phase primordiale dans le déroulement et la validité de l'étude, le tarage hydraulique a été réalisé avec comme objectif essentiel que seuls les phénomènes et les risques d'érosion aux abords des ouvrages de protection du port étaient étudiés.

Le tarage hydraulique du modèle avait pour but de procéder au réglage de l'appareillage et d'ajuster les conditions expérimentales de façon à ce que l'ensemble des paramètres hydrauliques (marées - courants-houles) soit reproduit conformément à la Nature.

Pour cela, la situation 1976 a été introduite en modèle (nivellement des fonds et implantation des ouvrages existants à cette période). Pendant cette phase de réglage, le modèle était en fonds durs, c'est-à-dire non modifiables par les actions hydrodynamiques. Conservés à l'état lisse pendant la période de dégrossissage des différents paramètres, les fonds étaient ensuite recouverts d'une rugosité artificielle (graviers de 10 à 15 mm de diamètre à raison de 2 kg/m² environ) de caractéristiques sensiblement équivalentes aux ondulations de fonds (rides, dunes...) relevées avec les matériaux mobiles dans l'étude préliminaire en canal [EP-2].

Le tarage hydraulique a débuté par le réglage de la marée et l'ajustement de la loi de niveau, le réglage des courants et l'étalonnage des houles étant ensuite menés conjointement en fonction des besoins et modifications apportés au cours du tarage.

4.1 - LES MAREES

Le réglage de la marée a consisté, dans un premier temps, à ajuster les cotes extrêmes de basse mer et de pleine mer, la marnage (définition de la came) et la période de la marée de vive eau moyenne, puis à vérifier la bonne reproduction de cette marée type en plusieurs points du modèle, à l'aide de suiveurs de niveau reliés à des appareils enregistreurs, avant et après introduction des courants.

Rappelons les principales caractéristiques de la marée de vive eau moyenne, en précisant que les cotes sont rapportées au niveau de référence H_z à Zeebrugge, et que d'une manière générale les valeurs précisées dans le texte sauf spécification contraire, sont en grandeur Nature :

- cote de basse mer : +0,40 m
- cote de pleine mer : +4,72 m
- marnage : 4,32 m
- durée moyenne : 12h25', soit à l'échelle des temps hydrauliques environ 18'40" modèle.

Dans un second temps, les marées de faibles et forts coefficients (modification des cotes extrêmes donc du marnage autour d'un niveau moyen et avec une durée identiques à ceux de la marée de vive eau moyenne) puis le cycle de marées (gamme de marées de coefficients 1 à 1,7) ont été reproduits et vérifiés.

4.2 - LES COURANTS

Le réglage des courants, paramètre prépondérant sur les mouvements sédimentaires, a été effectué dans l'état du port avant les premiers travaux d'extension (situation 1976) à partir des données Nature (données ponctuelles) et des résultats du modèle d'ensemble 265 du LRH (conditions aux limites) lui-même taré d'après les données Nature.

En premier lieu, les réglages ont porté sur la reproduction des champs de courants et de leur fluctuation dans le temps pour une marée de vive eau moyenne (coefficient 1,2). En second lieu, ont été introduits les coefficients de marée variables, puis le tarage a été complété par des essais donnant un aperçu des champs de courants dans la situation d'extension finale du nouveau port et par des mesures comparatives fonds fixes-fonds mobiles dans la situation 1901, soit avant la construction du môle (après transformation des fonds en vue du tarage sédimentologique).

Les mesures permettant de contrôler et d'adapter les vitesses étaient de trois types :

- mesure des vitesses moyennes sur les points Nature, par micromoulinets placés à une distance du fond équivalente à 0,4 fois la hauteur d'eau au point considéré,
- mesure des vitesses moyennes sur trois radiales par micromoulinets donnant les intensités et les trajectoires en régime établi comme en régime variable et la répartition des vitesses sur la largeur du modèle,
- mesure par prises de vues aériennes des champs de courants donnant les trajectoires et les vitesses de surface.

Compte tenu de la conception du modèle et du principe de génération des courants, et comparativement aux données Nature et à celles du modèle 265 du LRH, on constate au stade final du tarage hydraulique et pour une marée de vive eau moyenne, une bonne concordance d'ensemble, au niveau intensités, trajectoires ou calage par rapport à la marée, principalement en bordure des ouvrages et au centre du modèle.

Quelques divergences apparaissent aux alentours des renverses (PM \pm 3h environ) et au fur et à mesure que l'on s'éloigne des ouvrages. Vers le large on note une faible déperdition en intensité ainsi que des trajectoires notamment en flot légèrement trop orientées vers le Nord, phénomènes résultant de la présence de la fosse recevant le générateur de houle. Pour cette raison également, les débits aux limites ont dû être majorés (principalement en flot - limite Ouest) de manière à obtenir dans la zone d'étude des courants conformes, en direction et intensité, à ceux mesurés en Nature. Précisons que ces petites différences n'influent pratiquement pas sur les problèmes d'érosion aux abords des ouvrages, but de l'étude.

Par ailleurs, on peut noter :

- l'influence négligeable de la position du générateur de houle (débattement d'environ 30° entre les positions extrêmes N et NWqN),
- l'influence minime de la houle sur les trajectoires des courants (déviation de 5° d'un courant de 1 ms^{-1} pour une houle de 3 m de hauteur significative),
- un rapport Vitesse de surface sur vitesse moyenne légèrement plus élevé en modèle (1,3) qu'en Nature (1,2),
- l'influence de la variation du coefficient de marée sur les intensités et la non influence sur les trajectoires, les vitesses augmentant dans le même sens que le marnage jusqu'à un coefficient de marée de 1,5 environ, où interviennent alors les surcotes d'origine météorologique, et la variation maximale enregistrée sur le modèle, au maximum de flot, entre une marée moyenne et une marée de vive eau exceptionnelle dépassant les 25 %,
- l'influence de l'extension du nouveau port, se faisant sentir sur une distance de 1 500 à 2 000 m au-delà des ouvrages, les courants épousant la configuration générale du futur port avec des augmentations des vitesses de $+0,8 \text{ ms}^{-1}$ voire 1 ms^{-1} localement (comparativement à la configuration actuelle de 1976) et avec la présence de zones tourbillonnaires à l'ombre des digues Sud-Est en flot et Sud-Ouest en jusant ; on retrouve, en se référant aux données du modèle 265 du LRH, une admission en flot -se répercutant sur les trajectoires au large des ouvrages- un peu trop parallèle au littoral et pas suffisamment orientée Ouest (influence de la fosse derrière le générateur de houles),
- la bonne correspondance des champs de courants sur fonds mobiles par rapport à ceux sur fonds fixes, la seule différence concernant une très faible réduction des courants de forte intensité.

4.3 - LES HOULES

L'étalonnage du générateur de houle a consisté à reproduire des houles de différentes périodes pour plusieurs valeurs de l'excentricité du système bielle-manivelle du volet-batteur, à mesurer à l'aide de sondes résistives connectées à un enregistreur graphique l'amplitude résultante dans le modèle et à rechercher le point pour lequel l'influence de la position du générateur de houle soit la moins sensible possible.

Cet étalonnage a conduit à l'établissement d'abaques utilisés pour fixer les gammes d'amplitudes introduites lors de la reproduction schématique du cycle.

Les caractéristiques de houle reproduites fixées par les possibilités mécaniques de l'appareillage et par les observations Nature, étaient :

- en direction : débattement de 30° environ, entre les positions N et NWqN,
- en hauteur significative : de 0,3 à 5,5 m,
- en période moyenne : de 4,5 à 10 s, la période moyenne étant rattachée à la hauteur significative par la relation déduite des observations Nature :

$$T_{\text{moy}} \text{ (s)} = 1,3 H_s \text{ (m)} + 2,7 \text{ (s)}$$

Toutes les houles étaient représentées en trains d'onde avec une répartition des hauteurs des vagues dans le train, comparable aux lois de probabilité constatées en Nature.

TARAGE SEDIMENTOLOGIQUE

Les réglages hydrauliques réalisés, le tarage sédimentologique, second stade de l'étude, consistait à vérifier le comportement du matériau mobile schématisant les sédiments naturels, à adapter le cycle annuel schématique houles-marées et à ajuster les paramètres hydrauliques de manière à ce que les évolutions de fonds sur modèle soient convenablement représentées et fidèles aux évolutions de fonds constatées en nature.

Pour se faire deux périodes caractéristiques ont été étudiées :

- la première englobant la période de construction du môle Léopold II (1901-1907). Bien que disposant d'un certain nombre d'éléments sur les évolutions Nature, au cours de cette première partie du tarage, on s'est essentiellement attaché à reproduire les évolutions de fonds davantage d'un point de vue qualitatif, compte tenu du fait que les données concernant les interventions humaines étaient incertaines.
- la seconde s'étendant du début jusqu'à achèvement de la construction de la digue Sud-Est. Les données Nature, importantes et précises sur cette période devaient permettre d'apporter des éléments de vérification et d'ajuster précisément les différents paramètres de façon à pouvoir prévoir les évolutions futures.

5.1 - MATERIAU MOBILE RETENU

Rappelons que compte tenu de la complexité du phénomène, une des conditions essentielles était de ne schématiser en modèle que les sédiments sableux, la vase et les éléments très fins n'étant pas représentés.

Les théories de la similitude puis une étude en canal [EP-2] réalisé dans des conditions expérimentales voisines de celles du modèle réduit sédimentologique, ont orienté le choix du matériau mobile vers de la nacre 35-50 de densité 1,22 ($D_{50} \approx 420 \mu$), mélangée ou non avec du styvarène de densité 1,06 ($D_{50} \approx 2,7 \text{ mm}$).

Le premier type de matériau expérimenté, était constitué d'un mélange homogène (50 % - 50 % en volume) de nacre et de styvarène. Les résultats peu satisfaisants [TS-4] (ségrégation rapide des matériaux avec remontée du styvarène en surface et glissement de la nacre vers le fond, et présence de zones d'accumulation de styvarène et de perturbations locales non représentatives des phénomènes naturels, dues principalement à une mobilité trop grande du styvarène par rapport à la nacre), nous ont amenés à abandonner, après d'autres essais rapides, les mélanges en conservant uniquement la nacre pure 35-50.

Les principales caractéristiques de la nacre 35-50 sont les suivantes :

- densité $\approx 1,22$
- $D_{50} \approx 420 \mu$; $D_{10} \approx 340 \mu$; $D_{90} \approx 500 \mu$
- vitesse de chute en eau calme : $W \approx 10 \text{ mms}^{-1}$ pour un grain de 420μ
- début d'entraînement sous l'action d'un courant uniforme de vitesse moyenne U :
 - départ de plusieurs grains : $U \approx 15 \text{ cms}^{-1}$
 - avec transport : $U > 20 \text{ cms}^{-1}$

5.2 - CYCLE ANNUEL

Après les réglages et étalonnages effectués au cours du tarage hydraulique, l'établissement d'un cycle schématique de houles et de marées devait permettre, à partir des considérations théoriques et statistiques et en tenant compte des servitudes mécaniques imposées par le modèle, de coordonner les différents paramètres hydrauliques.

Au niveau des marées, la différence entre l'échelle des temps hydrauliques et l'échelle des temps sédimentologiques ne permettant pas de reproduire avec rigueur la succession des marées au cours d'une année moyenne, a conduit à adopter un cycle excluant les marées de morte eau. En stade final du tarage sédimentologique, le cycle type retenu comportait 20 marées (soit 10 marées par période, le cycle annuel étant composé d'une période dite d'été et d'une période dite d'hiver équivalentes à 6 mois), et la loi de marée adoptée variait entre la marée moyenne (coefficient 1 - marnage 3,6 m) et la marée de vive eau annuelle (coefficient 1,5 - marnage 5,5 m).

En ce qui concerne les houles, on s'est attaché à respecter les fréquences des directions (regroupées en 3 secteurs), les fréquences des amplitudes par direction et par période été-hiver, les périodes de la houle étant rattachées aux amplitudes par la relation mentionnée antérieurement. Les modifications au cours du tarage ont essentiellement porté sur les hauteurs significatives H_s et 3 gammes d'amplitudes ont été retenues :

1 - périodes été-hiver : $0,3 \text{ m} \leq H_s < 1,0 \text{ m}$ ($T_{\text{moy}} = 4,5 \text{ s}$)

2 - périodes été-hiver : $1,0 \text{ m} \leq H_s \leq 2,0 \text{ m}$ ($T_{\text{moy}} = 5 \text{ s}$)

3 - période été : $2,0 \text{ m} \leq H_s \leq 3,5 \text{ m}$ ($T_{\text{moy}} = 6 \text{ s}$)
période hiver : $2,0 \text{ m} \leq H_s \leq 4,5 \text{ m}$ ($T_{\text{moy}} = 7,5 \text{ s}$)

5.3 - ECHELLES DE SIMILITUDE

Pour des raisons de commodités, on adoptera la notation suivante :

$$\overset{\circ}{A} = \frac{A_m}{A_N} = \frac{A_{\text{modèle}}}{A_{\text{nature}}}$$

Les principaux symboles utilisés sont :

m et n respectivement l'échelle en plan et l'échelle en hauteur, D le diamètre moyen du grain, W sa vitesse de chute et ρ_s sa masse spécifique, ν la viscosité cinématique et ρ la masse spécifique du liquide (ρ et ν pris égaux à 1),

$\epsilon = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$ la densité relative, τ_0 la contrainte de cisaillement et u_* la vitesse de frottement.

5.31 - Similitude du matériau

Rappelons que :

$$\begin{aligned} m &= 400 & D_m &\approx 420 \mu \\ n &= 100 & \epsilon_m &\approx 0,22 \\ & & \epsilon_N &\approx 1,60 \end{aligned}$$

a) Vitesse de chute

$$\overset{\circ}{W} = \overset{\circ}{V}_{\text{verticale}} = \frac{1}{n^{3/2} \cdot m^{-1}} = \frac{1}{2,5} ; \text{ la vitesse de chute d'un grain de nacre}$$

de diamètre moyen de 420μ étant de l'ordre de 10 mms^{-1} , la vitesse de chute W_N équivalente $W_m = 25 \text{ mms}^{-1}$ correspond à des sables de diamètre moyen de l'ordre de 250μ ; dans ces conditions, le rapport des diamètres moyens $\overset{\circ}{D}$ est de l'ordre de 1,7.

b) Conservation du même régime d'écoulement autour du grain (conservation du paramètre "G" du grain = $\frac{\epsilon g D^3}{\nu^2}$)

$G_m = G_N$ implique $\overset{\circ}{D} = \epsilon^{-1/3}$ soit $\overset{\circ}{D} \approx 1,9$ ce qui correspond à des grains de diamètre moyen D_N de l'ordre de 220μ .

c) Conditions d'entraînement sous la houle

En similitude de Froude, la similitude des vitesses de frottement sous l'action de la houle implique $\overset{\circ}{u}_* = \frac{1}{n^{1/8}} = \frac{1}{1,8}$. La conservation du nombre de Reynolds du grain $Re_* = \frac{u_* D}{\nu}$ entraîne alors $\overset{\circ}{D} = n^{1/8} = 1,8$ soit $D_N \approx 240 \mu$.

Pour conserver en même temps le paramètre "G" (similitude du régime de fond), on arriverait à $\varepsilon^{\circ} = \frac{1}{n^{3/8}} = \frac{1}{5,6}$ différent du rapport calculé $\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_N} = \frac{1}{7,3}$.

Pour s'approcher de cette dernière valeur, tout en maintenant la houle en similitude de Froude, on a introduit une réduction globale des hauteurs de houle.

d) Conditions d'entraînement sous l'action des courants

La similitude des vitesses de frottement $u_* = \left(\frac{\tau_o}{\rho}\right)^{1/2}$ avec $\tau_o = \rho g R_H i$ entraîne $\dot{u}_* = \frac{m^{1/2}}{n} = \frac{1}{5}$.

En considérant la relation de Nikuradze $\frac{U}{u_*} = 2,5 \text{ Log } \frac{12,2 h}{D_{50}}$ (h hauteur

d'eau), les rapports $\frac{U}{u_*} \Big|_m$ et $\frac{U}{u_*} \Big|_N$ sont respectivement de l'ordre de 20

et 36. Le rapport $\frac{U_m}{U_N}$ étant égal à $\frac{1}{10}$, il vient $\dot{u}_* = \frac{u_{*m}}{u_{*N}} \neq \frac{1}{5,6}$

L'introduction d'une distorsion moyenne des vitesses de +15 % donne une échelle des vitesses \dot{U} voisine de $\frac{1}{8,7}$; il en découle $u_* \neq \frac{1}{4,85}$ valeur

proche de la valeur "théorique".

L'ensemble de ces critères montre que la particule de nacre ($d = 1,22$) de diamètre moyen $D_{50} \approx 420 \mu$, correspond à un sable de diamètre moyen voisin de 250μ et que la nacre 35-50 couvre une granulométrie équivalente à la fraction des sables grossiers existants en Nature.

5.32 - Echelle des temps sédimentologiques

L'échelle des temps sédimentologiques correspond au rapport des durées respectives pour obtenir en modèle réduit les mêmes évolutions des fonds qu'en Nature sous les mêmes actions hydrauliques reproduites en similitude.

a) Transport de sable par la houle

Sur un modèle distordu, l'échelle théorique des temps sédimentologiques de transport de sable par la houle est donnée par la relation

$$\dot{t}_{sh} = \frac{T_{sh m}}{T_{sh N}} = n^{-1/2} \times \left(\frac{n}{m}\right)^2 \times \frac{K N}{K m}$$

Dans le cas de la nacre le rapport $\frac{K N}{K m}$ étant voisin de $\frac{1}{50}$, l'échelle théorique \dot{t}_{sh} est de l'ordre de $\frac{1}{8000}$.

L'introduction d'une réduction des amplitudes de houle de l'ordre de 20 % équivaldrait à adopter une échelle des hauteurs $n' = 125$ ce qui nous donne une échelle des temps sédimentologiques d'environ $\frac{1}{5700}$.

b) Transport des sables par les courants de marée

L'échelle des temps sédimentologiques de transport de sable par les courants de marée correspond au rapport des durées respectives (20 marées Modèle/705 marées Nature) pour obtenir en modèle réduit les mêmes évolutions de fonds qu'en Nature, sous les mêmes actions hydrauliques, reproduites en similitude.

Compte tenu du fait que les marées de morte eau ont été éliminées et que l'on ne représente qu'environ la moitié supérieure des marées Nature (au-delà des marées moyennes), l'échelle des temps sédimentologiques \hat{t}_{sc} devient :

$$\hat{t}_{sc} = \frac{20}{700 \times 50 \%} \times \frac{n^{1/2}}{m} \neq \frac{1}{700}$$

La distorsion des courants permet un léger réajustement de l'échelle des temps sédimentologiques sous l'action des houles et l'échelle des temps sédimentologiques sous l'action des courants de marées ; ces deux grandeurs étant difficilement compatibles, le tarage sédimentologique reste le seul élément valable de fidélité.

5.4 - PRINCIPAUX RESULTATS DU TARAGE

Nous ne présentons ici que très sommairement les résultats de l'étude de reproduction d'évolutions connues des fonds pendant la période de construction du môle (1901-1907) et pendant la période de construction de la digue Sud-Est (To + 12 à To + 24, To étant la date de début des travaux d'extension du nouvel avant-port à savoir le 1er Juin 1979).

Rappelons que la schématisation de l'avancement des ouvrages était réalisée par étape équivalente à 6 mois Nature, où un demi-cycle marées-houles (période été ou période hiver) était reproduit. A chaque étape de construction, conformément aux avancées moyennes des travaux Nature, un tronçon d'ouvrage de 400 à 450 m était mis en place, pour le môle et pour chaque front d'avancement (amorce digue Ouest, talus Est et Ouest puis Nord de la digue Sud-Est) dans le cas du nouveau port.

Pour l'étude de l'évolution des fonds pendant la période de construction du môle, les fonds de 1901 étaient introduits en modèle alors que pour l'étude de l'évolution des fonds de la première situation d'extension du futur port, les fonds étaient nivelés conformément au levé de 1976, avec engraissement de l'estran Est pour schématiser les refoulements de sable effectués entre 1976 et 1980 et approfondissement du chenal d'accès à la cote moyenne de -12 m sur une largeur équivalente à 200 m. Les fondations (graviers, fascines) pour cette seconde partie du tarage, étaient également représentées, et schématisées par du sable fixant les fonds, en respectant les avancées et les cotes Nature. Les fonds d'argile bartonnienne non érodable, pouvant stopper le processus d'érosion, étaient introduits en réalisant un modelage de cette zone par des fonds durs situés sous les fonds mobiles.

Les variations de profondeurs étaient cartographiées par la méthode dite des lignes de niveau et complétées par des mesures d'épaisseur de matériaux permettant de préciser les cotes caractéristiques.

5.41 - Période de construction du môle

Réalisée en cinq étapes de construction avec une distorsion moyenne des courants de marées de 25 % (donnant, pour une marée de vive eau moyenne, des vitesses de surface de près de $2,5 \text{ ms}^{-1}$ au maximum de flot -PM -0h40- et de $1,7$ à $1,8 \text{ ms}^{-1}$ au maximum de jusant -PM +5h30- en extrémité du môle), l'étude de l'évolution des fonds aux abords du môle a permis de constater au cours de chaque cycle :

- la formation d'une fosse principale en extrémité de l'ouvrage, légèrement excentrée par rapport au tracé du môle, et dont la profondeur variait entre -16 et -18 m,
- l'apparition de petites fosses le long de l'ouvrage et en bordure de la fosse principale atteignant des profondeurs de -10 à -14 m,
- la présence de secteurs sédimentés localisés au Sud et à l'Ouest de la fosse principale,
- l'étalement progressif de la zone érodée en extrémité d'ouvrage, vers le NNW et vers l'ENE (influence du flot et du jusant),
- le maintien, avec léger comblement au fur et à mesure de l'avancement, des puits formés au cours des cycles antérieurs.

La reproduction d'un cycle une fois le môle achevé, n'a pas engendré de modifications notables des fonds, hormis une légère extension des zones érodées.

L'examen de l'évolution des fonds en Nature montre que la fosse d'érosion à -15 m bordant le môle résulte d'un cumul de petites fosses se creusant au fur et à mesure de l'avancement des travaux et que par la suite, la tendance est à un colmatage, à la cote -10 m quelques années après l'achèvement du môle, puis à une sédimentation plus marquée jusqu'à ces dernières années, alors que les courants se sont intensifiés.

Sur le modèle, les différents puits qui se sont formés au cours de chaque cycle paraissent moins étendus et en phase finale (môle entièrement construit) la fosse d'érosion le long du môle est moins marquée en étendue et en profondeur (-10 à -11 m), les maximums de profondeurs, puits correspondants aux différentes phases d'avancement du môle, étant situés au pied du môle à une profondeur moyenne de -12 m.

Devant ces résultats à tendance générale satisfaisante à ce stade du tarage, et pour affiner les résultats sur des données récentes et précises, les essais se sont poursuivis par l'étude de l'évolution des fonds pendant la période de construction de la digue Sud-Est.

5.42 - Période de construction de la digue Sud-Est

Cette seconde partie du tarage sédimentologique a permis de fixer définitivement la distorsion des courants et le cycle adoptés pour la suite de l'étude. Pour ce faire, trois distorsions des courants de marées ont été expérimentées.

D'une manière générale les évolutions de fonds et le processus érosion/sédimentation étaient d'autant plus marqués que la distorsion des courants était grande mais les résultats d'ensemble étaient pratiquement similaires.

Pour la première des trois étapes de construction introduites en modèle (situation To + 12), une zone d'érosion s'est formée devant la digue Sud-Est entre les talus Ouest et Est. Dans la situation To + 18, marquée par la fin des travaux d'exécution du talus Ouest de la digue Sud-Est, une nouvelle fosse s'est creusée, sous l'action des courants de flot principalement, en bordure des fondations du talus Nord, légèrement excentrée à l'Est du talus Ouest ; les sables repris dans la fosse se déposaient quelques centaines de mètres plus loin*. L'achèvement de la digue Sud-Est (situation To + 24) voyait une extension de la fosse, orientée sensiblement selon un axe SW-NE, le long des fondations du talus Nord et de l'amorce de la digue GNL. La sédimentation, résultant du dépôt de matériaux repris dans la fosse, au niveau de l'enracinement de la digue Nord-Est, sur les fondations et à l'extérieur, était également plus franche.

On pouvait par ailleurs, observer au Nord de cette zone sédimentée une tendance à l'érosion des fonds, et au Sud, au niveau de l'amorce du coude de la digue Nord-Est, une fosse locale et peu profonde.

Au niveau de l'enracinement de la digue Ouest, aucune modification des fonds n'était constatée, l'avancée en mer de la digue (PM 700 atteint dans la situation To + 24), n'étant pas suffisante pour engendrer des accélérations de courants susceptibles de remanier fortement les fonds.

En prenant comme critères de comparaison la profondeur maximale de la fosse, la surface érodée au niveau de la cote -10 m et le volume érodé sous la cote -10 m on a :

* *Du fait de la reproduction des seuls sables grossiers, rappelons que la sédimentation modèle n'est pas complètement représentative des phénomènes naturels de sédimentation.*

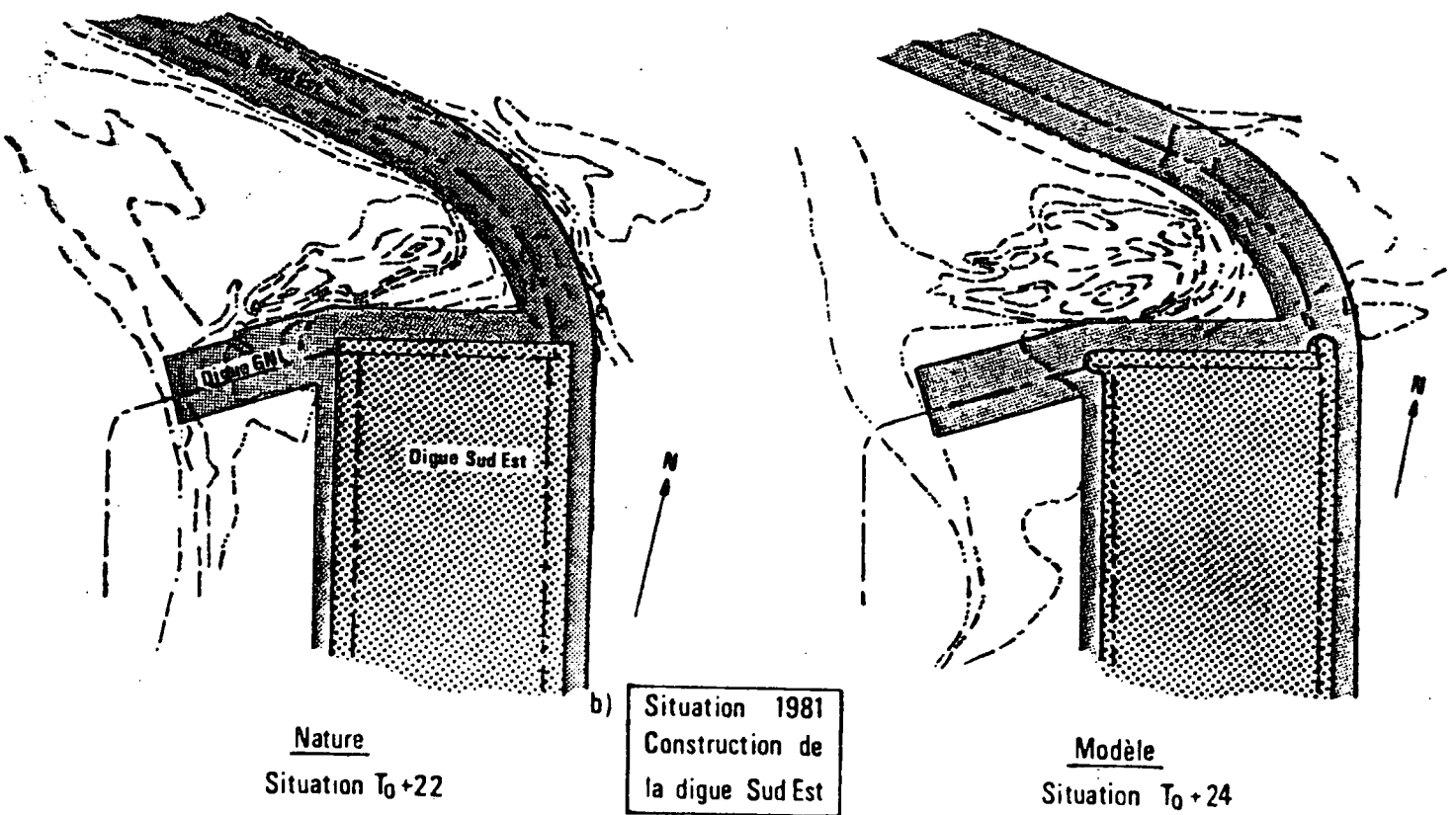
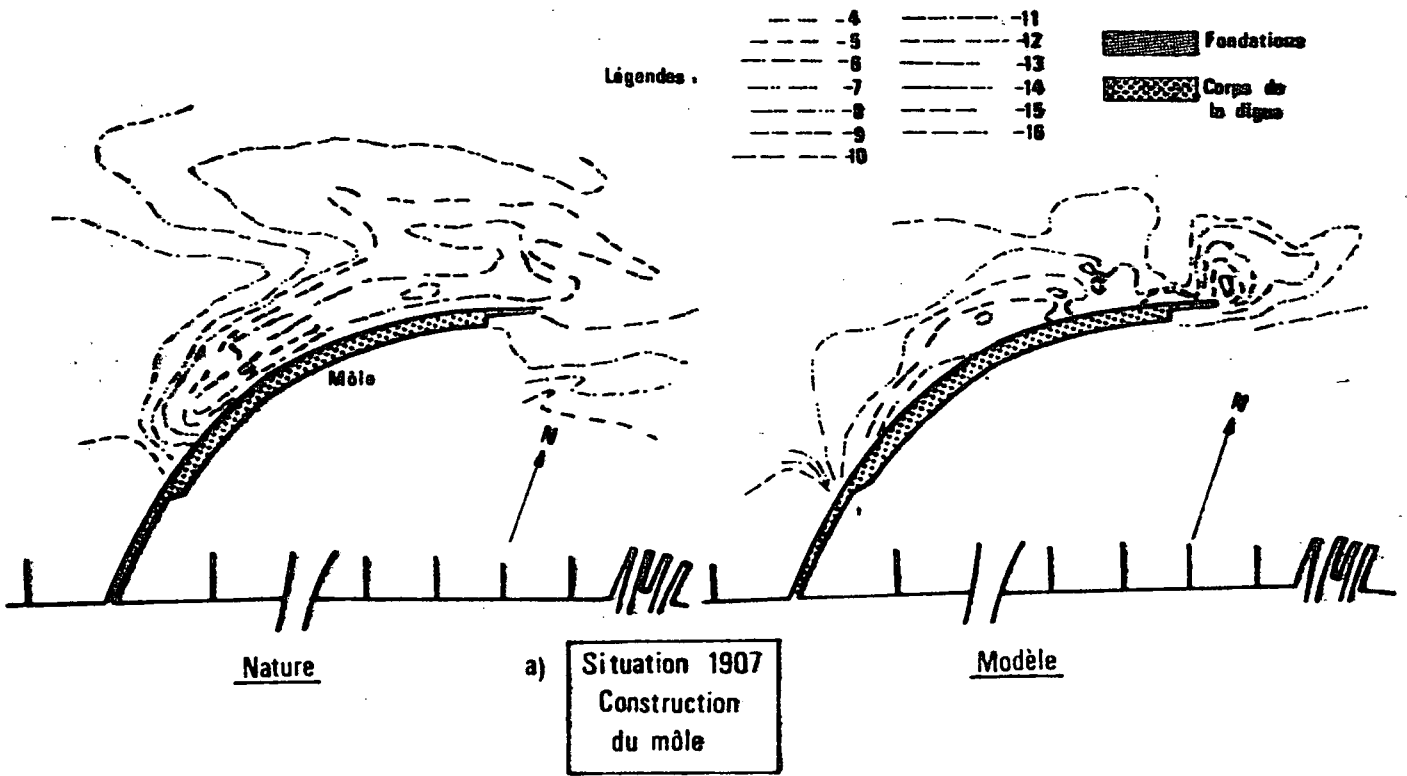
	Situations	Profondeurs maximales de la fosse	Surfaces érodées à la cote -10 m	Volumes érodés sous la cote -10 m
1) <u>Nature</u>	To + 21	-14 m	27 000 m ²	20 000 m ³
	To + 23	-19 m	46 000 m ²	90 000 m ³
2) <u>Modèle</u> distorsion de + 5 à + 10 %	To + 18	-12,5 m	19 000 m ²	
	To + 24	-14,5 m	25 000 m ²	
distorsion de + 15 %	To + 18	-15 m	32 000 m ²	82 000 m ³
	To + 24	-17 m	53 000 m ²	137 000 m ³
distorsion de + 25 %	To + 18	-16,5 m	46 000 m ²	105 000 m ³
	To + 24	-18,5 m	85 000 m ²	240 000 m ³

Par rapport aux données Nature, les évolutions de fonds dans les situations To + 12 et To + 18 sont logiquement exagérées du fait de la reproduction schématique de l'avancée des ouvrages par étape de 6 mois. Après l'achèvement de la digue Sud-Est (entre les situations To + 18 et To + 24 l'avancement des travaux -talus Nord essentiellement- ne modifiant que très peu les courants de flot, paramètre essentiel dans le processus d'érosion, la réserve émise ci-dessus n'est plus justifiée), la distorsion moyenne des courants de + 15 % donne de bons résultats comparativement aux évolutions de fonds Nature. Si la profondeur maximale du puits modèle est légèrement inférieure à la profondeur atteinte in situ, les valeurs précisant les quantités de matériaux déplacés sont proches des valeurs Nature quoique très légèrement supérieures. Ces quelques divergences résultent principalement de la représentation unique des sédiments sableux et de la distorsion des échelles en plan et en hauteur.

Cette distorsion de + 15 % des courants de marées a été définitivement adoptée pour la suite de l'étude de l'évolution des fonds aux abords des ouvrages de protection du nouveau port, et il sera tenu compte dans l'interprétation des résultats, des remarques mentionnées ci-dessus.

Afin d'illustrer sommairement les résultats du tarage sédimentologique, les états de fonds comparés Nature/modèle sont donnés ci-après pour les deux phases de l'étude.

- a) Situation 1907 - fin de construction du môle Léopold II.
- b) Situation 1981 - fin de construction de la digue Sud-Est du nouveau port.



EVOLUTION DES FONDS AUX ABORDS DES OUVRAGES DE PROTECTION
DU NOUVEAU PORT (cf plan de situation page 2)

Précisons que la phase d'étude correspondant à l'état de référence permettant de suivre les évolutions de fonds sur une certaine période sans nouvelles interventions humaines, n'a pas été réalisée, car, en dehors de la zone immédiate d'implantation des ouvrages, aucune modification notable des fonds n'a été constatée pendant le tarage sédimentologique.

L'étude de l'évolution des fonds aux abords des ouvrages peut se décomposer en deux parties, la première se rapportant à la période de construction effective et d'avancement des travaux, la seconde portant sur la période (équivalente à 10 ans) suivant l'achèvement des ouvrages.

Pendant la période de construction progressive, à chaque étape, un tronçon équivalent à 400, 450 m était mis en place, par digue (les avancées adoptées en modèle étant basées sur les estimations du bureau d'étude de l'Association Momentanée Zeebouw-Zeezand), et un demi-cycle d'une période équivalent à 6 mois était reproduit.

Pour l'ensemble de l'étude, les conditions d'essais et de mesures étaient identiques à celles adoptées en phase finale du tarage sédimentologique :

- cycle annuel (période été - période hiver) de houles et de marées classique, tel que présenté antérieurement, avec l'incorporation, au milieu du cycle long suivant l'achèvement du port, d'un cycle exceptionnel (période hiver) et de la marée "décennale",
- distorsion des courants de marée de + 15 %,
- maintien des conditions aux limites du modèle introduites lors du tarage,
- relevés par la méthode des lignes de niveau et mesures des épaisseurs de matériaux, systématiques après chaque étape de construction, plus espacés après extension finale du port.

Notons également que pendant la période suivant la fin des travaux, les dragages ont été simulés dans la passe d'entrée du port et, en cas de forte sédimentation, en bordure du chenal au droit des musoirs des digues extérieures.

6.1 - PERIODE D'EXTENSION DES OUVRAGES

L'état des fonds au début de l'étude était celui obtenu en fin de tarage sédimentologique (situation To + 24), état des fonds caractérisé par la présence d'une fosse d'érosion, due essentiellement à l'action des courants de flot et localisée au pied du tronçon Ouest du talus Nord de la digue Sud-Est.

L'évolution de cette fosse pendant la construction de la digue GNL (construction s'étalant sur 12 mois environ) se caractérisait par une extension progressive de la zone érodée vers l'Ouest en bordure des fondations de la digue GNL, accompagnée d'un comblement partiel et progressif également de la fosse dans sa partie Est au niveau du puits principal notamment. Les profondeurs maximales atteintes dans la partie Ouest de la fosse étaient de l'ordre de -12 à -12,5 m alors que le puits initialement à -17 m (situation To + 24) n'atteignait plus que des profondeurs voisines de -14 m après achèvement de la digue GNL (To + 36).

Pendant cette période, les modifications importantes de la fosse résultaient en partie de la construction de la digue GNL, mais surtout de l'avancée en mer de la digue Ouest se traduisant par une déviation des courants de flot vers le large et de ce fait par une réduction des vitesses aux abords des digues GNL et Sud-Est, réduction accentuée par une dissipation dans la zone d'évitage du port actuel.

Avec la poursuite de l'extension de la digue Ouest mais aussi avec le début des travaux d'exécution de la digue Nord-Est, l'érosion de cette zone critique, protégée de l'action des courants par les ouvrages, était stoppée, la fosse étant entretenue quelque temps par l'action des houles avant de se combler progressivement.

Au cours de cette même période de construction de la digue GNL, la zone de sédimentation* située au niveau de l'enracinement de la digue Nord-Est, se dissipait sous l'action des courants de flot mais aussi de jusant et les fonds bordant les fondations de la digue Nord-Est au niveau du coude avaient tendance à s'éroder légèrement. Avec le début des travaux de la digue Nord-Est, et à chaque étape d'extension, des fosses d'érosion, à -12 m en moyenne, résultant essentiellement de l'action des courants de flot, sont apparues en extrémité Est de la digue. Avec la progression de cette dernière, ces fosses se comblaient progressivement, les courants de jusant n'étant pas suffisants pour les entretenir. Si l'avancée de la digue Nord-Est n'avait pas ou très peu de répercussion sur les fonds dans le secteur Ouest du port du fait des gradients de vitesse peu importants en jusant (comparativement au flot), par contre l'avancée de la digue Ouest influait sur les évolutions de fonds à l'Est du port. Ainsi une fois le PM 3200 (situation To + 60) atteint par la digue Ouest, déviant les forts courants de flot, les fonds devant et en bordure de la digue Nord-Est n'ont pour ainsi dire plus évolués.

* Rappelons que la similitude des phénomènes de sédimentation n'est pas rigoureuse du fait de la représentation -pour avoir des érosions correctes- des sédiments sableux grossiers uniquement.

Les fonds aux abords de la digue Ouest n'étaient que très peu modifiés jusqu'à une avancée en mer de la digue de 1 800 à 1 900 m. Sous la seule action du flot, les fonds subissaient localement, en extrémité Est de la digue et pour chaque étape de construction, une légère érosion n'excédant pratiquement pas 1 m. Une fois l'amorce du coude atteinte par le corps de la digue (environ PM 2270 - situation To + 48), la brusque accélération des vitesses a provoqué la formation d'une fosse d'érosion localisée au niveau du coude côté large. Au fur et à mesure de l'avancement de la digue, la fosse s'est étendue en profondeur pour atteindre rapidement -15 m et finalement -17 m au centre du puits (ce qui représente un approfondissement, ponctuel il est vrai, de plus de 10 m) après achèvement de la digue et du port (situation To + 72), et en superficie vers le Nord-Est, le long de l'ouvrage en restant localisée au niveau du coude. Les sables repris dans la fosse se déposaient sur les fondations et en bordure des fondations de la digue Ouest protégeant l'assise de la digue sur son tronçon terminal alors qu'au niveau du coude celle-ci était très menacée.

A la date d'achèvement du port, cette fosse pouvait être illustrée par :

- profondeur maximale : -17 m
- surfaces érodées à la cote
 - 10 m : 140 000 m²
 - 15 m : 24 000 m²
- volumes érodés sous la cote
 - 10 m : 400 000 m³
 - 15 m : 16 000 m³

6.2 - PERIODE APRES ACHEVEMENT DU PORT

Les digues extérieures du nouveau port étant entièrement construites, il s'agissait d'examiner la répercussion des ouvrages sur les fonds avoisinants et l'évolution de la fosse au droit du coude de la digue Ouest. Pendant ce cycle long réalisé sur l'équivalent de 10 ans, ne nous attachant qu'aux phénomènes d'érosion, pratiquement les seules évolutions de fonds résultaient de l'action des courants de flot et concernaient par le fait le seul secteur Ouest du port.

Tout au long du cycle et progressivement, la zone érodée devant le coude Ouest n'a cessé de s'étendre et à un degré moindre de s'approfondir. Cette extension était accompagnée d'une poussée de la zone sédimentée, bordant initialement le tronçon terminal de la digue Ouest, dans le sens du flot, soit vers le musoir puis vers le chenal d'accès au port et même au-delà. Pour éliminer la forte sédimentation et ainsi ne pas freiner l'extension de la fosse, des dragages (retour aux fonds initiaux dans le chenal et le cas échéant devant les musoirs) ont été réalisés épisodiquement.

Au cours des cinq premières années suivant l'achèvement du port (Ta), l'évolution de la fosse pouvait être illustrée par :

Situations	Profondeurs maximales	Surfaces érodées aux cotes		Volumes érodés sous les cotes	
		-10 m	-15 m	-10 m	-15 m
Ta (To + 72)	-17 m	140 000 m ²	24 000 m ²	400 000 m ³	16 000 m ³
Ta + 1 an	-18 m	170 000 m ²	25 000 m ²	500 000 m ³	24 000 m ³
Ta + 2 ans	-20,5 m	250 000 m ²	46 000 m ²	820 000 m ³	60 000 m ³
Ta + 5 ans	-21 m	350 000 m ²	75 000 m ²	1 150 000 m ³	120 000 m ³

La seconde partie du cycle, s'étendant sur une durée équivalente à cinq ans, n'a pas vu l'état des fonds tendre vers une stabilisation mais vers une extension, qui s'est opérée non pas en profondeur mais en étendue dans le sens du flot et en s'écartant de la digue le long du tronçon terminal où les fonds avaient retrouvé leur cote originelle de -8 m.

En reprenant les mêmes critères, la fosse ou zone érodée pouvait être caractérisée, 10 ans après achèvement du port, par :

- une profondeur maximale à -21,5 m,
- une longueur de 2 000 m au niveau de l'isobathe -10 m,
- une superficie à la cote -10 m de 680 000 m² et de 160 000 m² à la cote -15 m,
- un volume déplacé sous la cote -10 m de 2 000 000 m³ et de 440 000 m³ sous la cote -15 m.

Notons également à l'Est de la passe d'entrée une zone d'érosion à la cote -8 m (approfondissement moyen d'un mètre), prolongeant la fosse Ouest.

Cette progression importante, sur l'ensemble du cycle réalisé, de l'érosion et surtout des risques d'affouillements en pied de digue Ouest (depuis l'amorce du coude jusqu'au PM 3500 environ) doit attirer l'attention sur l'importance du suivi de l'évolution des fonds dans ce secteur et des protections de fonds en pied et devant les ouvrages (tapis de gravier, fascinages).

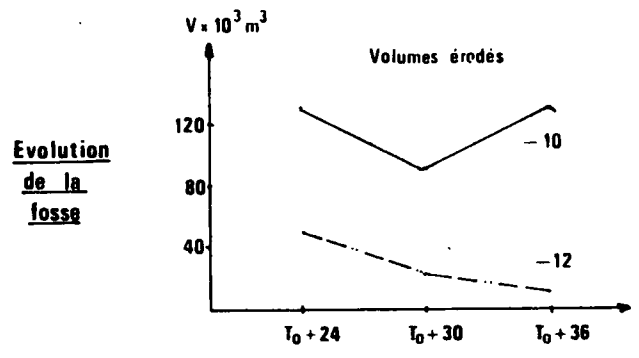
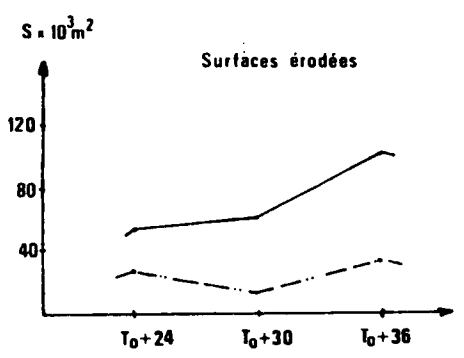
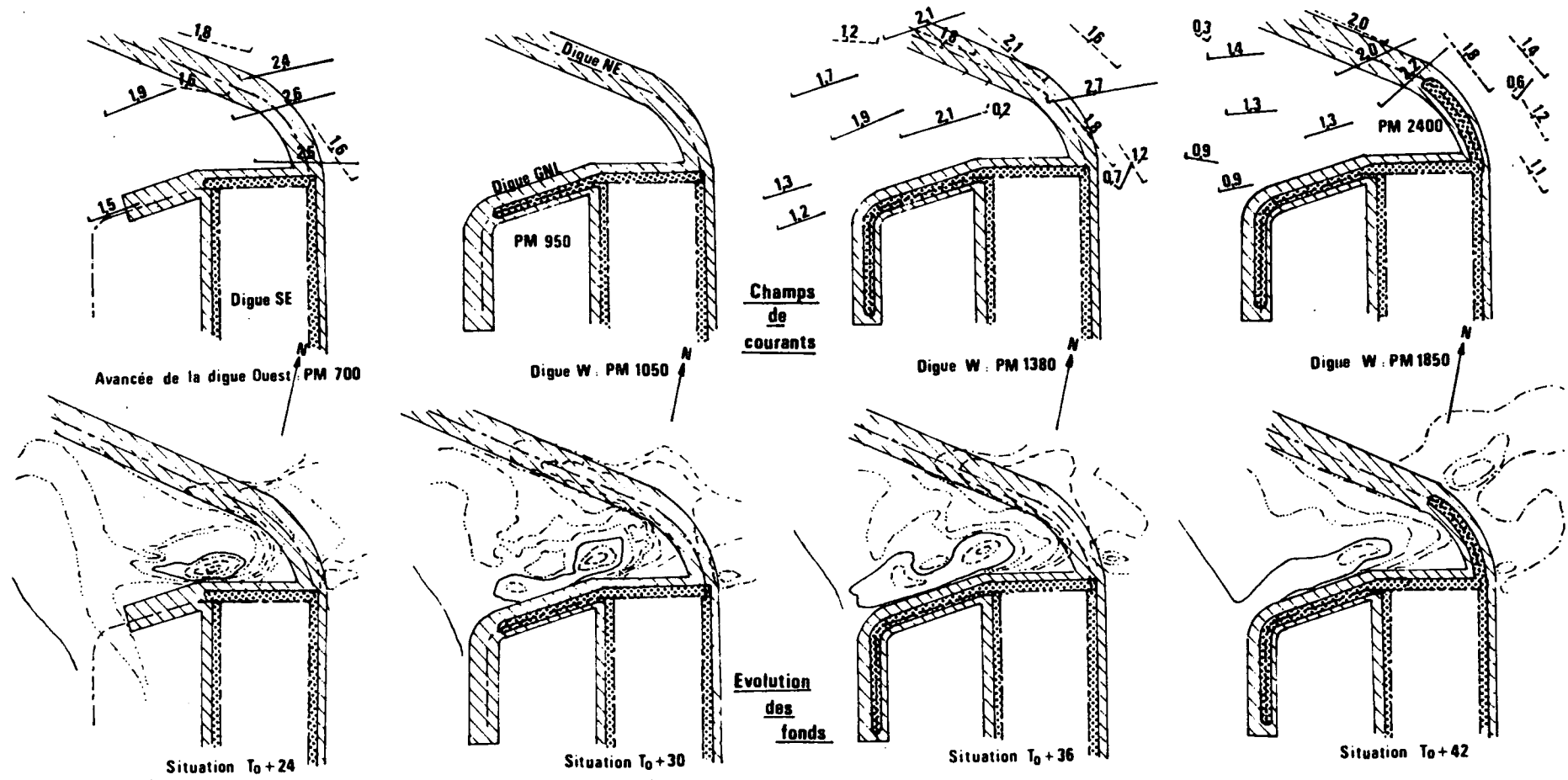
Pour illustrer l'ensemble des résultats, sont présentées schématiquement ci-après :

- l'évolution de la zone au droit de la digue Sud-Est pendant la période de construction de la digue GNL,
- l'évolution de la fosse au droit du coude de la digue Ouest pendant la période de construction des digues extérieures et en phase finale d'extension du nouveau port.

Sur ces schémas sont précisés :

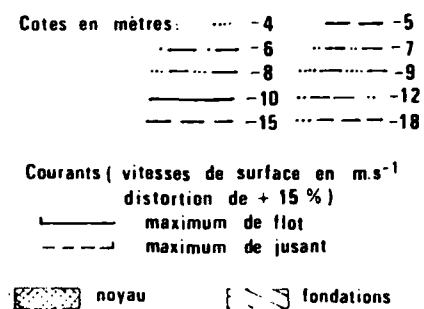
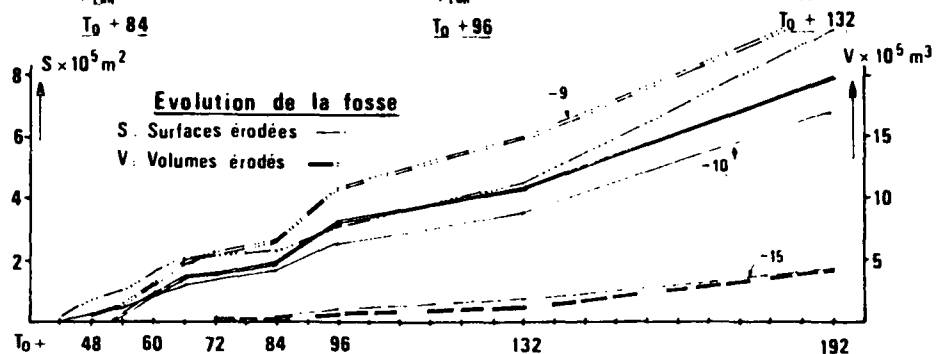
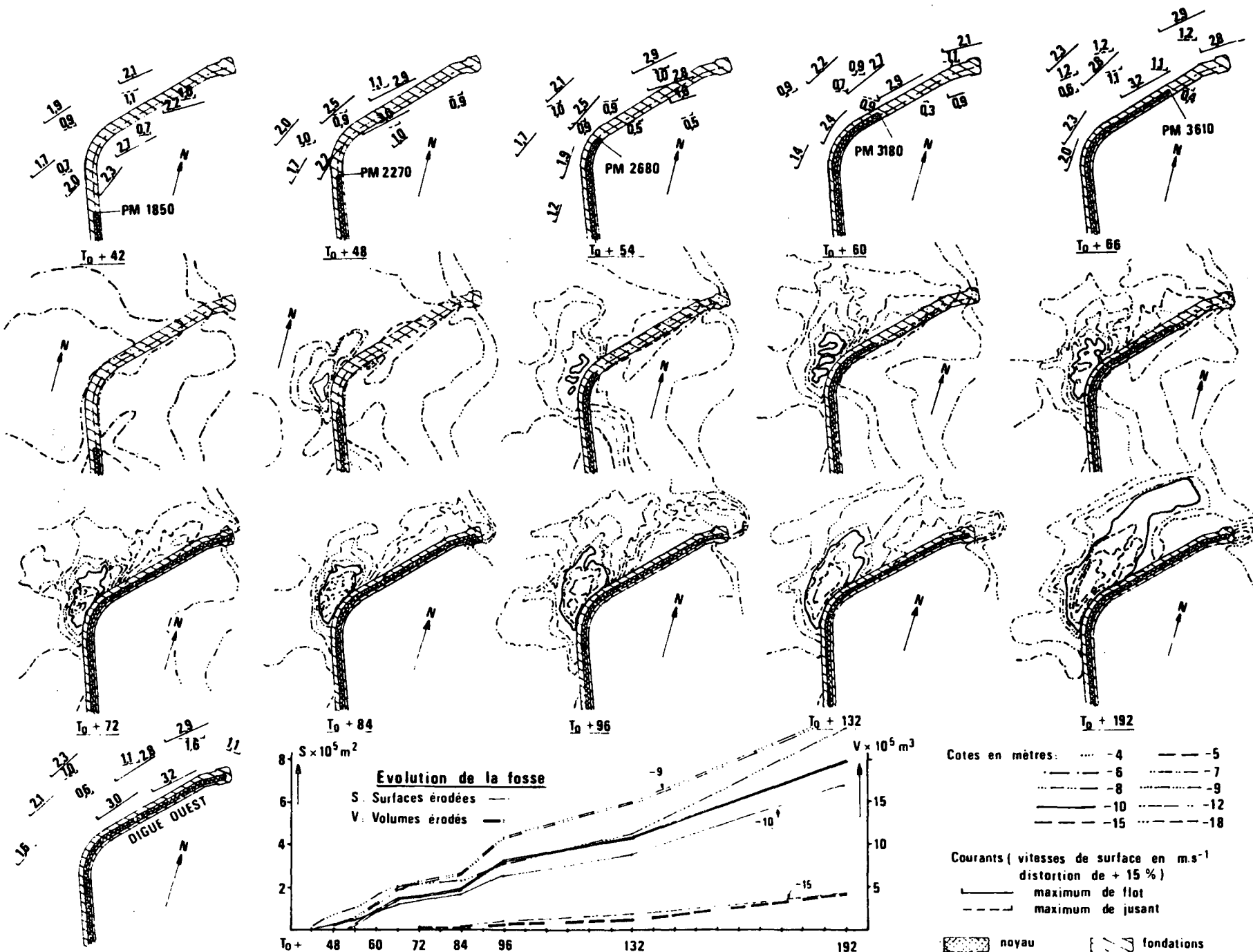
- les champs de courants (maximum de flot - maximum de jusant) donnant les vitesses de surface modèle rapportées aux valeurs Nature et avec distorsion des courants de + 15 %,
- les avancées des ouvrages,
- les différents états de fonds,
- les surfaces et volumes érodés pour certaines cotes.

EVOLUTION DE LA FOSSE AU DROIT DE LA DIGUE SUD-EST
PENDANT LA PERIODE DE CONSTRUCTION DE LA DIGUE GNL



- Légendes:
- noyau
 - fondations
- cotes en mètres
- 4
 - 5
 - 6
 - 7
 - 8
 - 9
 - 10
 - 11
 - 12
 - 13
 - 14
 - 15
 - 16
 - 17
- courants (vitesses de surface en $m \cdot s^{-1}$ distordues de + 15 %)
- maximum de flot
 - maximum de jusan

EVOLUTION DE LA FOSSE AU DROIT DU COUDE DE LA DIGUE OUEST
 PENDANT LA PERIODE DE CONSTRUCTION DES DIGUES EXTERIEURES
 ET EN PHASE FINALE D'EXTENSION DU NOUVEAU PORT



SUGGESTIONS SUR LES ETUDES COMPLEMENTAIRES

SUSCEPTIBLES D'ETRE REALISEES SUR LE MODELE DE ZEEBRUGGE

Les recherches réalisées au cours de l'année 1981 en association entre le Laboratoire de Recherches Hydrauliques à Borgerhout et le Laboratoire Central d'Hydraulique de France, ont permis de définir les risques d'érosion des fonds au voisinage des futurs ouvrages du Port de Zeebrugge à différents stades de construction et après son aménagement définitif. On a pu constater en particulier que le modèle sédimentologique représentait correctement les évolutions de fonds qui avaient pu être observées aux abords du port actuel entre 1901 et 1907, et a permis de caractériser les érosions en extrémité de la nouvelle digue Sud-Est et l'extension de ces érosions au cours de l'avancement des travaux.

Ces résultats obtenus dans des conditions expérimentales assez strictes ne prenaient en compte que les phénomènes sédimentaires liés aux sables susceptibles de recouvrir les fonds aux abords du port ; ils ne tenaient pas compte en particulier des éléments très fins que l'on peut rencontrer en Nature et qui entraînent d'une part des phénomènes de cohésion dans les sols, d'autre part des transports en suspension plus importants que sur le modèle car les sables se transportent plus spécialement en charriage.

Pour obtenir des phénomènes d'érosion corrects sur le modèle par rapport aux évolutions des fonds connues en Nature, il a fallu par ailleurs introduire une légère distorsion des échelles des vitesses données par les lois de Froude en augmentant ces vitesses de l'ordre de 15 % et en diminuant l'importance de la houle par rapport aux courants de marée. On obtient ainsi, tant par la théorie de la dynamique sédimentaire que par la pratique expérimentale des essais, des résultats d'érosion comparables à celles constatées en Nature notamment sous les actions des courants de flot. Les rapports de transports en suspension et charriage, s'ils se rapprochaient de ceux de la Nature, ne pouvaient pas, par contre, être garantis sur le modèle avec cette distorsion de 15 % des courants, de même il n'est pas certain que certaines actions du jusant n'ont pas été légèrement sous-estimées en modèle réduit, par suite du seuil critique d'entraînement des matériaux utilisés par rapport aux sables naturels et de la partie marginale caractérisant ces débuts d'entraînement.

Bien qu'estimant que les résultats actuellement obtenus sur le modèle sédimentologique de Zeebrugge soient représentatifs des phénomènes d'érosion qui pourraient se produire en Nature au cours des prochaines années, on peut penser qu'il serait possible d'affiner ces résultats -qui n'ont porté que sur une période relativement courte d'étude, puisque, les tarages hydraulique et sédimentologique compris, la durée des études n'a été que de un an- en continuant un certain nombre de mesures sur le modèle.

Ces mesures pourraient être orientées dans trois domaines différents :

- parfaire les connaissances obtenues sur le modèle en affinant les résultats,
- rechercher des moyens de protection de la digue Ouest contre les érosions localisées sur sa face externe,
- utiliser le modèle sédimentologique actuel d'érosion pour le transformer en modèle d'envasement permettant ainsi de prévoir les risques d'envasement dans la partie du chenal d'accès située aux abords de la passe d'entrée et à l'intérieur du port. Les techniques de reproduction des vases en modèle réduit mises au point au L.C.H.F. pourraient s'appliquer assez facilement au modèle de Zeebrugge permettant dans des délais raisonnables de répondre à ce problème qui peut être vital pour l'entretien du port de Zeebrugge.

7.1 - PARFAIRE LES CONNAISSANCES ACQUISES POUR LES PROBLEMES D'EROSION DES SABLES AUX ABORDS DU PORT

Les principaux points pouvant faire l'objet d'essais supplémentaires sont précisés ci-après. Notons que ces différentes modifications devront être introduites les unes après les autres et que d'une manière générale, les essais pourraient reprendre au début de la construction de la digue Nord Est, c'est-à-dire dans la situation To + 42.

- Etude de l'influence d'un "dragage schématique" permanent par retour aux fonds initiaux pour éliminer la sédimentation "jugée parasite" le long de la digue Ouest et pour permettre ainsi d'examiner dans des conditions plus défavorables, les possibilités d'extension de la fosse d'érosion ;
- Etude de l'influence d'un réajustement éventuel des conditions aux limites du modèle après examen des données récentes des champs de courants in situ dans la situation To + 24, soit après achèvement de la digue Sud-Est, et dans la mesure où ces conditions aux limites, déduites du modèle hydraulique d'ensemble 265 du L.R.H. après réglage du modèle avec les nouvelles données Nature, sont passablement modifiés ;
- Etude de l'influence d'une augmentation de la distorsion des courants de marées ; on pourrait adopter une nouvelle distorsion de + 25 % pour accroître ou ajuster certains effets du jusant en particulier au niveau de la digue Nord-Est, le long de laquelle il n'y a cependant pas de gradient de vitesses caractéristiques ;

- Etude de l'influence de la suppression de la fosse située à l'arrière du volet batteur permettant le balayage (ce qui implique le passage en position fixe du générateur de houle selon une direction sensiblement parallèle à l'orientation générale des courants), les grandes profondeurs perturbant légèrement la propagation des courants au large ;
- Etude d'une avancée plus progressive des ouvrages éventuellement réajustée en fonction de la progression actuelle ou des besoins du chantier, ou à partir d'une nouvelle estimation ;
- Prise plus fréquente des relevés et état de fonds notamment après le dernier jusant pour permettre l'étude plus précise de l'influence des courants de jusant, influence minimisée jusqu'à présent du fait des relevés systématiques après le dernier flot. Un compromis entre les deux états de fonds permettrait une approche plus juste du phénomène ;
- Etude éventuelle de l'introduction dans les sables grossiers à moyens représentés sur le modèle d'une fraction d'éléments fins à très fins permettant de donner une certaine cohésion dans les matériaux de fonds et d'ajuster le pourcentage d'éléments transportés en suspension par rapport aux éléments transportés par charriage.

Cette liste de recommandations n'est pas exhaustive, de nouvelles modifications pouvant être apportées en fonction des nouveaux résultats obtenus et de nouvelles données Nature.

7.2 - RECHERCHER DES MOYENS DE PROTECTION CONTRE L'EROSION DES FONDS

Les essais ont montré que la digue Ouest assurait une déviation des courants de flot propice à réduire les vitesses aux abords de la digue GNL et de la digue Sud-Est. En réalisant cette digue Ouest avec un rythme de construction plus rapide, on devrait réduire les difficultés rencontrées momentanément dans la partie Est du port. En fait, l'état actuel d'avancement du chantier ne permet pas d'espérer que l'on puisse agir efficacement sur cette phase de travaux.

Une protection locale des zones d'érosion susceptibles de se produire en Nature pourraient également être envisagée en déposant sur les fonds une couverture plus étendue d'éléments grossiers de type graviers ou galets qui résisteraient mieux aux actions érosives des courants. Cette technique a déjà été utilisée le long des ouvrages Est et des essais en modèle réduit pourraient montrer s'il est nécessaire d'étendre cette méthode à des zones plus importantes.

Le long de la digue Ouest, la puissance des érosions permet de penser que un revêtement de graviers, de galets ou de tout-venant, devrait être très étendu pour être efficace ; si les essais en modèle en apportaient la preuve, il n'est pas impossible d'imaginer une telle méthodologie, tout du moins sur une zone de 100 à 150 m le long de la digue Ouest ; les volumes de matériaux grossiers à mettre en oeuvre, même s'ils atteignaient des volumes de un million de m³ apporteraient peut être une sécurité dans ce secteur particulièrement menacé par les érosions.

Dans un autre esprit, il serait peut-être envisageable d'étudier sur modèle réduit des ouvrages susceptibles de dévier les courants de flot pour réduire les vitesses au voisinage immédiat des ouvrages, en déplaçant le centre de gravité des érosions plus au large.

7.3 - UTILISER LE MODELE SEDIMENTOLOGIQUE ACTUEL POUR PREVOIR LES RISQUES D'ENVASEMENT AUX ABORDS ET A L'INTERIEUR DU PORT DE ZEEBRUGGE

Le modèle sédimentologique actuel a été conçu pour étudier avant tout les phénomènes locaux d'érosion en supposant les fonds constitués uniquement de sable.

Bien que les échelles du modèle et ses conditions aux limites ne soient pas prévues pour réaliser des études d'envasement, il apparaît que de telles recherches pourraient être envisagées dans des conditions acceptables à condition de se limiter aux prévisions d'envasement dans le chenal situé aux abords de la passe d'entrée du port et à l'intérieur de ce dernier. On obtiendrait une cartographie assez précise des zones susceptibles de s'ensabler, des valeurs relatives de ces envasements, des indications sur le processus de ces envasements enfin sur les méthodes susceptibles d'améliorer les conditions de dragage des secteurs les plus menacés.

Le modèle devrait subir une légère modification afin que les eaux nécessaires à la variation de niveau dans le modèle sous l'effet de la marée, puissent être restituées dans une cuve sous le modèle, permettant de réalimenter en flot les sédiments susceptibles d'être évacués du modèle en jusant. Dans cette même cuve, on maintiendrait une loi de turbidité des eaux assurant une alimentation convenable du modèle en vase. Une autre technique consisterait à alimenter le modèle, à ses deux extrémités, par des rampes permettant d'introduire un mélange d'eau et de particules en suspension suivant une loi programmée.

Les sédiments devant schématiser les vases, suivant le degré de précision que l'on désire obtenir, pourront être soit des particules très fines de matière plastique ayant des vitesses de chute aux échelles du modèle correspondant à la vitesse de chute moyenne des vases naturelles floculées ($0,5$ à 1 mms^{-1}), soit des vases naturelles traitées permettant une approche plus grande des facteurs de floculation, tassement et rigidité des dépôts.

De telles techniques ont été utilisées à plusieurs reprises dans des modèles d'estuaire réalisés au L.C.H.F. ou dans des modèles maritimes à dominante de vases ; le L.C.H.F. pourrait donner au L.R.H. des indications sur les techniques de préparation et d'utilisation de ces matériaux sur les modèles réduits.

Les connaissances déjà acquises sur les vases de la région de Zeebrugge et notamment les recherches faites sur leurs propriétés physiques et leurs comportements sous les actions hydrodynamiques apporteront des éléments de base permettant de définir rapidement le matériau le mieux adapté pour le modèle sédimentologique existant du Port de Zeebrugge.

Dans tous les cas, cette étude de l'envasement du Port et de ses abords resterait dissociée de celle des mouvements des sables, car dans les conditions techniques actuelles, il reste très difficile d'étudier simultanément des phénomènes d'envasement et d'ensablement.

CONCLUSIONS

L'étude sur modèle réduit physique de l'évolution des fonds aux abords des ouvrages de protection du nouvel avant-port de Zeebrugge, pendant la période d'exécution des travaux et après achèvement du port, a permis d'estimer les risques d'affouillements pouvant entraver l'avancement des travaux ou porter préjudice à la tenue des digues et de ce fait localiser et prévoir les moyens d'y remédier.

Compte tenu des impératifs d'ordre économique et/ou matériel, de la connaissance actuelle dans le domaine sédimentologique sur modèle réduit et des conditions expérimentales propres à l'étude, tous les paramètres ou phénomènes n'ont pu être pris en considération, aussi faut-il en tenir compte au niveau des résultats et dans l'interprétation de ces résultats.

Les principales réserves -liées au but même de l'étude et aux choix faits dans cette optique- qui sont à considérer, concernent :

- la seule représentation des sables de granulométrie équivalente à la fraction des sables grossiers existants en Nature, avec les conséquences qui en découlent : début d'entraînement tardif, vitesse de chute élevée et dépôt rapide, transport par charriage prépondérant, absence de phénomène de cohésion...,
- la schématisation des phases d'avancement par étape de six mois,
- la conservation des conditions aux limites du tarage hydraulique,
- les relevés systématiques des états de fonds après action des courants de flot...

Pour les conditions expérimentales adoptées en modèle réduit on voit que pour la période de construction de la digue GNL, les risques essentiels sont inhérents à l'extension de la fosse apparue au droit du talus Nord pendant la construction de la digue Sud-Est. Par suite de l'extension de cette fosse, les fondations extérieures de la digue GNL et du talus Nord de la digue Sud-Est, et, à un degré moindre les fondations de la digue Nord-Est le long du coude, risquent d'être menacées bien que les nouvelles profondeurs atteintes pendant la période de construction de la digue GNL soient moins importantes que celles enregistrées au moment de l'achèvement de la digue Sud-Est.

Une fois ce secteur protégé de l'action des courants par la progression des digues extérieures, et à partir d'une certaine avancée en mer de la digue Ouest (PM 2000 environ), se forme une zone d'érosion localisée au niveau du coude de cette digue Ouest en bordure des fondations, cette zone d'érosion s'étendant vers le Nord-Est au fur et à mesure de l'avancement des travaux, se stabilisant à une profondeur de -21 m mais sa superficie (donc le volume d'érosion) augmentant presque linéairement pendant les dix premières années qui suivent la réalisation définitive des ouvrages.

A moyen terme et surtout à plus long terme, le point crucial reste donc cette fosse d'érosion ; parallèlement, les sédiments sont transportés vers l'Est et viennent se déposer dans le chenal à l'entrée même du port, menaçant de le colmater localement, et nécessitant des dragages d'intervention ponctuelle, si l'on veut éviter un "blocage" du trafic portuaire ; le secteur Est, le long de la digue Nord-Est, ne subit pas de modifications importantes d'autant que protégé des courants de flot à partir d'un certain stade d'avancement de la digue Ouest.

S'il paraît difficile de freiner le processus d'érosion le long de la digue Ouest, sinon en déplaçant plus au large le centre de gravité des zones érodées, la rapidité d'exécution de cette dernière est essentielle pour protéger le plan d'eau portuaire des fortes houles de secteurs NW et W mais surtout pour dévier les courants de flot (facteur prépondérant dans le processus d'érosion) et ainsi réduire les risques d'affouillements aux abords à l'Est du port.

Avec les réserves émises plus haut, on peut supposer :

- qu'au niveau de la fosse au droit de la digue Sud-Est, son extension vers l'Ouest pourrait être plus rapide du fait de l'avancée progressive de la digue Ouest (et non brutale de 450 m), alors que le comblement de la partie Est de cette fosse (résultant en modèle du piègeage des sables érodés devant la digue GNL) devrait être beaucoup moins net tant que ce secteur restera exposé à l'action des courants et plus rapide ensuite une fois cette zone protégée par l'avancée des ouvrages et de la digue Nord-Est notamment (dépôt des sédiments fins type vase...).
- qu'au niveau de la digue Nord-Est, une avancée plus régulière des ouvrages pourrait avoir pour effets d'étendre les zones d'érosion (apparues sous forme d'une succession de fosses sur le modèle) le long de la digue, à des profondeurs moindres, provoquant ainsi la formation d'une sorte de chenal entretenu par les courants de jusant ou partiellement comblé au fur et à mesure de l'avancement des travaux par les apports de sédiments fins en provenance de l'estran Est,
- qu'au niveau de la digue Ouest, suite à une sédimentation peut-être exagérée en bordure de la digue, l'extension de la zone érodée vers le Nord-Est a pu être minimisée sur le modèle et de ce fait on peut craindre une généralisation plus rapide de l'érosion sur l'ensemble de la digue, la profondeur maximale atteinte pouvant être, en plus ou en moins, légèrement différente selon la nature des sédiments in situ.

Toutes ces hypothèses restent à vérifier. Pour répondre à ces questions et apporter des compléments d'informations à l'étude, de nouvelles recherches pourraient être entreprises au L.R.H. Les suggestions sur les études complémentaires susceptibles d'être réalisées sur le modèle actuel de Zeebrugge sont précisées dans le chapitre précédent. Ces suggestions concernent trois domaines :

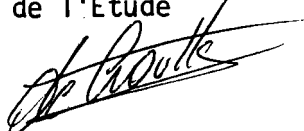
- le premier, pour parfaire les connaissances acquises sur les problèmes d'érosion des sables aux abords du port, par augmentation de la distorsion des courants pour ajuster certains effets du jusant, réajustement des conditions aux limites...
- le second, pour rechercher des moyens de protection contre l'érosion des fonds, par mise en place d'une couverture protégeant les fonds, renforcement des fondations des ouvrages, surveillance de l'évolution des zones érodées...
- le troisième, pour éventuellement utiliser le modèle actuel pour prévoir les risques d'envasement aux abords et à l'intérieur du port.

Devant les dangers et risques que posent les fortes érosions au droit de la digue Ouest, il semble très important d'utiliser au maximum le modèle réduit sédimentologique actuel pour tenter de trouver une solution permettant d'améliorer la situation et réduire localement les érosions en les éloignant de la digue Ouest.

Novembre 1981

Pour le Laboratoire Central d'Hydraulique de France

L'Ingénieur chargé
de l'Etude



E. LAGROY de CROUTTE

L'Ingénieur Principal
Chef de Projet



S. MANOUJIAN

Le Directeur des Etudes
de Sédimentologie



C. MIGNIOT

Pour le Laboratoire de Recherches Hydrauliques à Borgerhout

L'Ingénieur Principal
des Ponts et Chaussées

F. WENS

L'Ingénieur en Chef
Directeur des Ponts et Chaussées
Directeur du Laboratoire de Recherches Hydrauliques

P. ROOVERS

édition LABORATOIRE DE RECHERCHES
HYDRAULIQUES

BERCHEMLEI 118
2200 BORGERHOUT
BELGIQUE
TELEPHONE: 031/36.18.50.

