



Laboratoire de Recherches Hydrauliques

borgerhout

*J. Pectus*

**PORT DE ZEEBRUGGE**

**ETUDE SUR MODELE REDUIT SEDIMENTOLOGIQUE**

**CONSTRUCTION DU MODELE  
ET TARAGE HYDRAULIQUE**

**1981**

**MOD. 387.S-3**

**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

ETUDE SUR MODELE REDUIT SEDIMENTOLOGIQUE

DE L'EVOLUTION DES FONDS AUX ABORDS

DU PORT DE ZEEBRUGGE

MODELE 387.S

RAPPORT INTERMEDIAIRE N° 1

CONSTRUCTION DU MODELE ET TARAGE HYDRAULIQUE

LRH 81/7

LCHF RI/01-TH/387.S

## S O M M A I R E

	<i>Pages</i>
<u>INTRODUCTION</u> .....	1
 <u>CHAPITRE 1 : LE MODELE</u>	
1.1. <i>Conception du modèle</i> .....	2
1.2. <i>Construction du modèle</i> .....	3
1.3. <i>Equipement du modèle</i> .....	5
 <u>CHAPITRE 2 : TARAGE HYDRAULIQUE</u>	
2.1. <i>Réglage de la marée</i> .....	9
2.2. <i>Réglage des courants</i> .....	11
2.2.1. <i>En marée de vive eau moyenne</i> .....	11
2.2.2. <i>En coefficients de marée variables</i> .....	14
2.2.3. <i>Résultats</i> .....	15
2.3. <i>Réglage des houles</i> .....	21
 <u>CONCLUSIONS</u> .....	 23
 <u>Liste des figures</u> .....	 25

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

L'extension des ouvrages de protection du futur port de Zeebrugge risque d'entraîner des remaniements sédimentaires importants aux abords de ces ouvrages ou à l'intérieur même du port, compte tenu de la nature des fonds et des actions hydrodynamiques non négligeables sévissant dans cette zone.

Pour permettre d'avoir une vue d'ensemble des risques provoqués par l'extension du port et de rechercher les moyens d'y remédier, une étude sur modèle réduit physique a été envisagée.

Cette étude de l'évolution des fonds aux abords du Port de Zeebrugge, réalisée sur modèle réduit au Laboratoire de Recherches Hydrauliques du Ministère des Travaux Publics à Borgerhout, est menée en collaboration avec le Laboratoire Central d'Hydraulique de France de Maisons-Alfort, ce dernier étant chargé de la conduite des essais et assumant la responsabilité technique vis-à-vis du Laboratoire de Borgerhout.

Pour être capable de répondre de façon concrète au but qui lui est fixé, le modèle réduit a été conçu de manière à pouvoir reproduire correctement l'ensemble des paramètres hydrauliques.

Le tarage hydraulique du modèle, qui fait l'objet de ce premier rapport intermédiaire, a pour but d'une part de procéder au réglage de l'appareillage, et d'autre part, d'ajuster les conditions expérimentales de manière à ce que l'ensemble des paramètres hydrauliques -marées, courants, houles - soit reproduit conformément à la Nature.

Après avoir présenté le modèle et son appareillage, sont exposés les principaux résultats du tarage hydraulique. Certains réglages complémentaires pourront être effectués lors du tarage sédimentologique afin d'adapter les conditions à la reproduction des phénomènes sédimentaires.

## CHAPITRE I

### LE MODELE

#### 1.1 - CONCEPTION DU MODELE

Le modèle réduit sédimentologique, pour répondre aux besoins de l'étude, devait satisfaire à plusieurs conditions ; les limites du modèle devaient être telles, que toutes modifications apportées (extension des ouvrages de protection du port) n'influent pas (ou le minimum possible) sur les conditions aux limites à introduire. Les échelles de réduction devaient permettre la reproduction fidèle sur le modèle des phénomènes ou paramètres hydrauliques et sédimentologiques mesurés en Nature, tout en tenant compte des possibilités économiques et matérielles de réalisation.

##### 1.1.1 - Limites du modèle

La partie Sud du modèle\*, limitée par la côte, couvre un peu plus de 12 km. Le port de Zeebrugge étant au centre du modèle, la limite Ouest se situe au droit de Blankenberge et la limite Est en face de Knokke. Cette dernière limite coupe la fosse d'Appelzack et plus au Nord le banc du Paardenmarkt. Côté Nord, le modèle s'étend vers le large sur 6 km environ (depuis le littoral au centre du modèle). Le banc de Heist est tronqué et n'est représenté que par son extrémité SW. Si la partie W des Wielingen est reproduite, le chenal du Scheur, essentiel dans la propagation des courants, est en-dehors des limites des fonds représentés en modèle.

##### 1.1.2 - Echelles de similitude

La similitude géographique et la similitude dynamique adoptées conduisent à des échelles théoriques du modèle données dans le tableau ci-après. Dans ce même tableau, afin de donner un ordre de grandeur, sont également mentionnées quelques valeurs caractéristiques.

La reproduction simultanée de l'action des courants et de la houle sur un modèle sédimentologique pourra conduire à l'introduction d'une distorsion de froude, c'est-à-dire à une augmentation des vitesses des courants. Le compromis adopté pour une bonne reproduction des phénomènes sera contrôlé puis ajusté au cours de la phase expérimentale du tarage sédimentologique.

---

\* Les orientations sont référées par rapport au Nord géographique du lieu.

## 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
	- hauteurs	1/n	1/100	- avancée vers le large .....	6,2 km	15,5 m
	- distorsion	m/n	4	<u>Surfaces</u>		Environ
	- Surfaces verticales	1/mn	1/4.10 <sup>4</sup>	- surface totale du modèle .....		830 m <sup>2</sup>
	- surfaces horizontales	1/m <sup>2</sup>	1/16.10 <sup>4</sup>	- surface de la zone étudiée .....	72,8 km <sup>2</sup>	455 m <sup>2</sup>
	- volumes	1/m <sup>2</sup> n	1/16.10 <sup>6</sup>	- surface de la zone des fonds mobiles....	36,8 km <sup>2</sup>	230 m <sup>2</sup>
	- temps hydrauliques	1/mn <sup>-1/2</sup>	1/40	- profondeur d'eau moyenne .....	7 m	7 cm
	- vitesses verticales	1/n <sup>3/2</sup> m <sup>-1</sup>	1/2,5	- amplitude de la marée de vive eau moyenne	4,3 m	4,3 cm
	- vitesses horizontales	1/n <sup>1/2</sup>	1/10	- durée d'une marée .....	12h25'	18'40"
	- débits liquides	1/mn <sup>3/2</sup>	1/4.10 <sup>5</sup>	- vitesse moyenne en maximum de flot .....	1,5 ms <sup>-1</sup>	15 cms <sup>-1</sup>
H O U L E S	hauteurs	1/n	1/100	<u>Houles</u>		
	périodes	1/n <sup>1/2</sup>	1/10	- hauteur significative de la houle décennale	5,3 m	5,3 cm
	courants	$\frac{1}{n^{5/6} m^{-1/3}}$	1/6,3	- périodes moyennes .....	3 à 10 s	0,3 à 1 s

## 1.2 - CONSTRUCTION DU MODELE

La construction du modèle réduit réalisé à Borgerhout a été prise en charge par le personnel du Laboratoire de Recherches Hydrauliques sur plans fournis par le Laboratoire Central d'Hydraulique de Maisons-Alfort.

Le modèle délimité par des murets étanches dressés sur la chape du laboratoire forme une cuve approximativement rectangulaire. Cette cuve est bordée au Nord et de chaque côté par un canal permettant l'écoulement et l'alimentation latérale des courants.

Pour un fonctionnement et un rendement optimum, le générateur de courant devait être immergé, ce qui impliquait un niveau d'eau dans le modèle d'environ 0,75 m d'où un rechargement important dans la cuve.

Dans la zone de reproduction des fonds, une première chape plane a été faite à 0,55 m (soit la cote -20) de la chape du Laboratoire (cote -75). Le rechargement n'était que de 0,25 m (cote -50) au niveau de la chape horizontale destinée à recevoir la semelle mobile du générateur de houle. Sous la chape des fonds, un canal souterrain permettant l'alimentation de la marée était aménagé, la marée étant introduite au niveau de la pente (tôles perforées) raccordant les fonds à la chape du générateur de houle.

Sur la chape à -20 dans la partie "utile" du modèle, deux fonds ont été reproduits et superposés. Dans un premier temps, les fonds correspondant à l'état de 1901 ont été implantés, aux cotes exactes sur le pourtour, dans la zone qui restera en fonds durs, et aux cotes Nature abaissées de l'équivalent de 4 m dans la zone destinée à recevoir les fonds mobiles. Les fonds seront mis à nu lors de la seconde phase de l'étude, c'est-à-dire pour le tarage sédimentologique. Pour la partie tarage hydraulique s'appuyant sur les données concernant l'état actuel du port, ce sont les fonds de 1976 qui ont été introduits. Ces fonds ont été entièrement modelés en dur sur ceux de 1901.

La topographie des fonds a été reproduite par tracé des lignes de niveau et par nivellement de feuillards gainés de plastique aux cotes correspondantes.

A l'intérieur de la cuve étaient installés divers appareils de mesure et à l'extérieur le dispositif permettant l'alimentation et la reproduction de la marée ; le plan du modèle est donné par la figure 1.



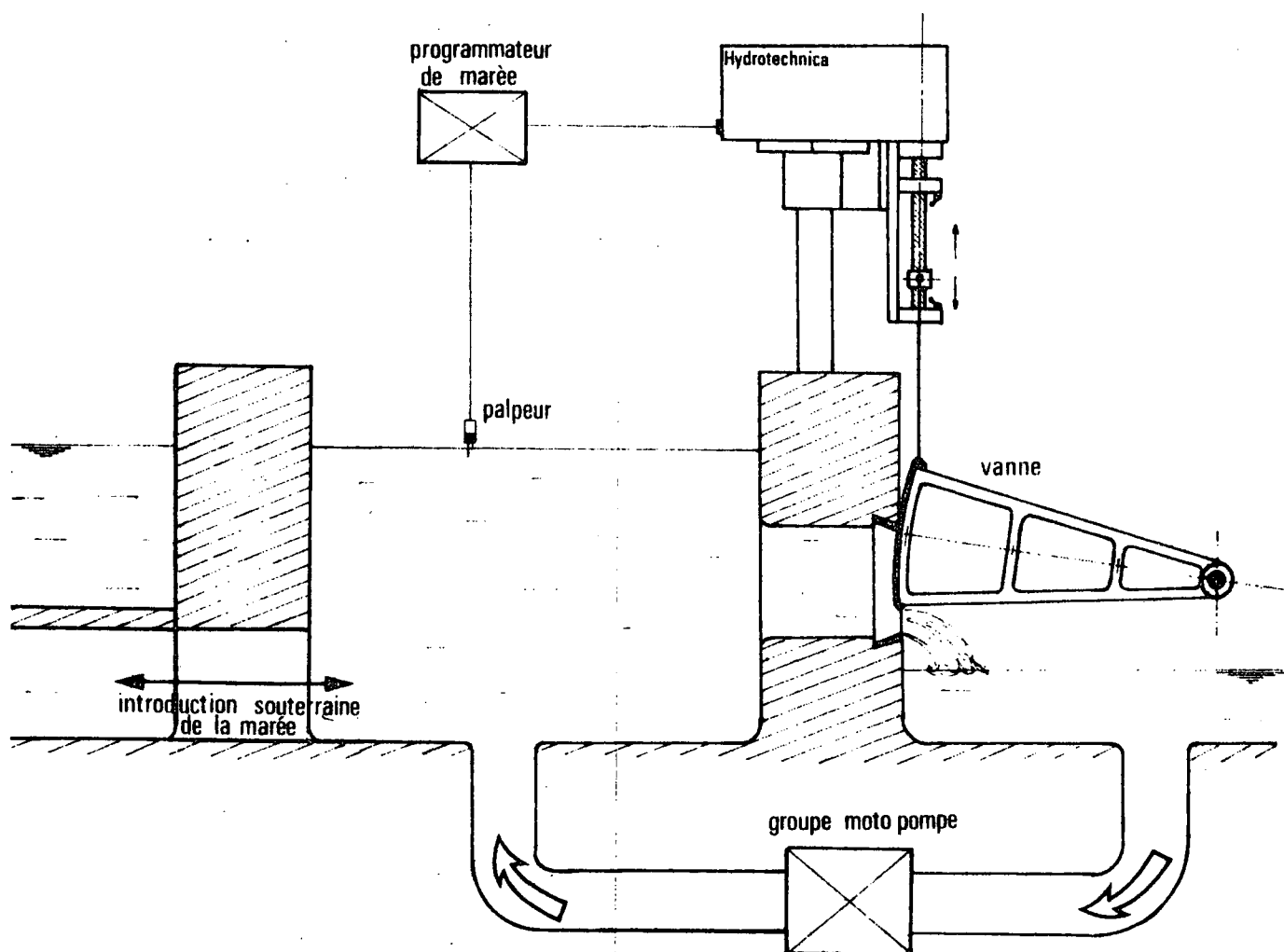
### 1.3 - EQUIPEMENT DU MODELE

#### 1.3.1 - Appareillage de reproduction des phénomènes naturels

##### 1.3.1.1 - Reproduction de la marée

Deux pompes débitent dans un bassin indépendant de la cuve un débit d'eau constant. Simultanément une ouverture en charge dans ce bassin évacue un débit variable dans le temps selon l'ouverture d'une vanne secteur équilibrée se déplaçant devant cette ouverture. Le mouvement de la vanne est assuré par un petit moteur d'asservissement qui reçoit les ordres d'un palpeur de niveau lié au programmeur de marées, comme le montre le schéma ci-après.

Schéma de principe du générateur de marée

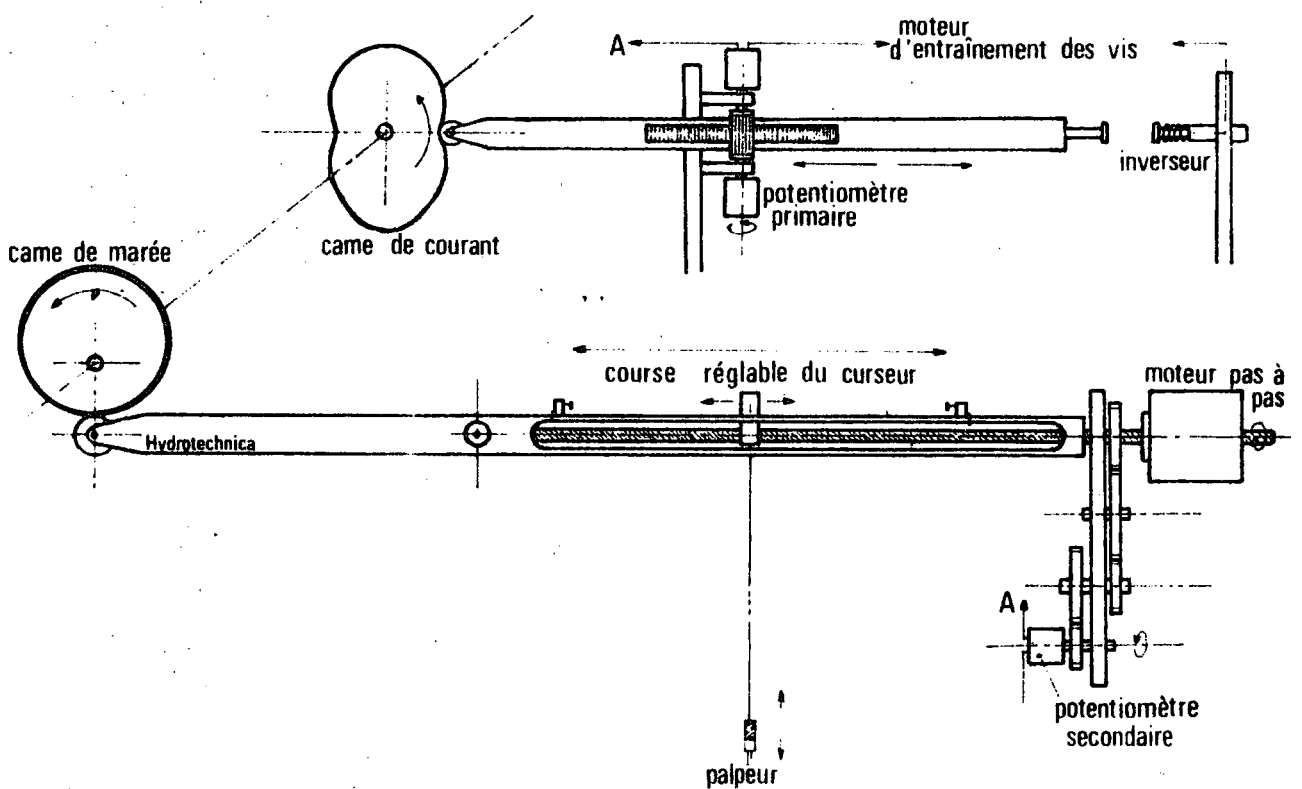


La marée est introduite dans la cuve par un canal souterrain et l'alimentation se fait par l'intermédiaire de tôles perforées, sur la pente raccordant les fonds à la chape de roulement du générateur de houle. Le niveau dans la cuve suit donc à tout instant le mouvement du palpeur imposé par le programmeur.

Ce dernier est constitué d'un ensemble mécanique qui assure la rotation d'une came. La rotation réglable de la came permet d'ajuster la période de la marée et le tracé de la came fixe la loi de niveau. Un bras de levier relie came et palpeur, et le déplacement du palpeur par l'intermédiaire d'un curseur modifie le rapport du bras de levier et de ce fait permet, pour une came donnée, d'amplifier ou de réduire l'amplitude de la marée. La vitesse de déplacement du curseur également réglable offre la possibilité de reproduire un cycle de marées à coefficients variables.

La figure ci-après donne le schéma de principe du programmeur marée/courant.

Programmeur de marée et de courant



### 1.3.1.2 - Générateur de courant

Les courants alternatifs sont générés par deux vis type d'Archimède montées en parallèle et situées dans un canal ceinturant le modèle, l'alimentation s'effectuant sur les parties latérales. Les deux vis sont synchronisées et reliées au programmeur. Le programmeur est constitué d'une came sur laquelle s'appuie un bras horizontal qui agit lui-même sur des potentiomètres commandant la vitesse de rotation des vis (potentiomètres primaires). Pour une position de la came correspondant au diamètre le plus grand, à l'autre extrémité, le bras vient appuyer sur un contacteur donnant l'ordre aux vis de s'inverser.

Le tracé de la came après étalonnage des vis permet l'introduction des débits voulus alors que le couplage des deux comes (came de courant et came de marée) sur le même axe donne un calage précis de la loi de marée avec la loi de courant.

La variation de la loi de courant avec le marnage où le coefficient de la marée est obtenu par l'introduction d'une résistance variable complémentaire (potentiomètre secondaire) liée au déplacement du curseur du programmeur de marée (cf. schéma de principe du programmeur de marée et de courant).

### 1.3.1.3 - Générateur de houle

La formation des houles est créée par un plan vertical oscillant autour d'un axe articulé par une double excentrique et actionné par un groupe motovariateur de vitesse. Ce générateur permet la reproduction de houles régulières ou en trains d'ondes réglables en période et en amplitude. Guidé par un rail et monté sur une semelle métallique, le générateur peut se déplacer, son balayage étant d'une quinzaine de degrés de part et d'autre de l'axe médian du modèle.

## 1.3.2 - Appareillage et techniques de mesure

### 1.3.2.1 - Enregistreurs de marée

Le modèle est équipé de 3 suiveurs de niveau à pointe vibrante reliés à des enregistreurs qui permettent dans un premier temps le réglage des lois de niveau, puis dans un second temps (en phase d'étude) le suivi et le contrôle des cotes d'eau à tout instant dans le modèle.

Une horloge digitale permet le repérage dans le temps de l'âge de la marée.

#### 1.3.2.2 - Mesures de courants

Le modèle est équipé de micromoulinets permettant l'étalonnage des courants en intensité et en direction par enregistrement continu sur l'ensemble de la marée. Ces mesures de vitesses (moyennes ponctuelles) peuvent être doublées par des mesures avec des flotteurs lestés et sont complétées par des mesures à l'aide de colorants (permanganate de potassium, fluoresceine) ou de flotteurs de surface donnant par chronophotographie les champs de courants sur l'ensemble du modèle.

#### 1.3.2.3 - Mesure de la houle

La houle reproduite sur le modèle est mesurée à l'aide de 4 sondes résistives connectées à un enregistreur à 4 voies. Les enregistrements papier permettent le contrôle après étalonnage de l'amplitude désirée, la période moyenne de la houle étant donnée par affichage numérique continu.

L'ensemble des appareils d'enregistrement, de contrôle ou de mesure ainsi que l'armoire de commande du générateur de houle sont groupés dans une cabine centrale.

#### 1.3.2.4 - Passerelles d'exploitation

Le modèle est équipé d'une passerelle mobile montée sur rails couvrant la zone utile du modèle. De plus, 4 ponts roulants munis de tour de prise photographique permettent d'explorer la totalité du modèle.

## CHAPITRE II

### TARAGE HYDRAULIQUE

Pour le tarage hydraulique, la situation 1976 était introduite en modèle, à savoir implantation des ouvrages portuaires existants et modelage des fonds à cette date. Pendant toute cette phase de réglage des différents appareils de reproduction des phénomènes naturels, le modèle était en "fond dur", c'est-à-dire non modifiable par les actions hydrodynamiques, ceci pour éviter des évolutions de fond qui auraient engendré des perturbations au niveau des mesures.

Les fonds conservés à l'état lisse pendant la phase de grossissage des différents paramètres étaient ensuite recouverts d'une rugosité artificielle destinée à schématiser les ondulations (dunes, rides...) propres aux fonds mobiles.

La rugosité artificielle introduite en modèle était constituée par des graviers de 10 à 15 mm de diamètre, éparpillés sur l'ensemble des fonds à raison de 2 kg par m<sup>2</sup>.

Le tarage hydraulique a débuté par le réglage de la marée (marée de vive eau moyenne) l'ajustement de la loi de niveau ainsi que le réglage des courants et à l'étalonnage du générateur de houle étant ensuite menés conjointement en fonction des besoins et des transformations ou modifications apportées au cours du tarage.

#### 2.1. REGLAGE DE LA MAREE

Compte tenu des caractéristiques du dispositif de reproduction et des données Nature, le réglage a porté dans une première phase sur une marée de coefficient 1,18 (marée de vive eau moyenne)

- positionnement du curseur supportant le palpeur, donc détermination de la longueur du bras de levier (rapports possibles : 0,25 à 1,25), de manière à pouvoir reproduire des marées de marnage compris entre 2,8 et 6,6 m (ou cm à l'échelle du modèle),
- recherche d'un niveau moyen (correspondant à la position horizontale du bras) de façon à respecter aussi correctement que possible les cotes de basse mer et de pleine mer pour les différentes marées considérées.

- exécution (une fois ces repérages effectués) du tracé théorique de la came, défini à partir de la courbe moyenne de la marée Nature,
- calage de la vitesse de rotation de la came sur la durée de la marée.

Le débit d'alimentation de la marée était déterminé en considérant, à partir d'une courbe de marée de grand coefficient, la pente maximum, soit la plus grande augmentation du niveau d'eau pour un temps donné (environ 2 m en 1 heure vers PM - 1h30). Cette valeur était très légèrement majorée de façon à avoir en permanence un certain débit d'évacuation et maintenir la vanne ouverte.

Il s'agissait ensuite de trouver un compromis quant à la vitesse de déplacement (fermeture et ouverture) de la vanne pour d'une part minimiser les fluctuations du plan d'eau engendrées par un mouvement trop rapide et d'autre part pour réduire le temps de réponse et éviter la présence d'une pointe de pleine mer et à un degré moindre une pointe de basse mer.

Pour cette raison, le programmeur de marée était placé à proximité immédiate de la vanne secteur. Les fluctuations de niveau d'eau étaient enregistrées dans un premier temps en plusieurs points (près du palpeur du programmeur dans la cuve d'alimentation et dans le modèle sur l'estran à l'Est et à l'Ouest du port ainsi que dans le coin Nord Est du modèle). Par la suite, compte tenu de la précision désirée et des enregistrements obtenus, seul un, voire deux points de mesure étaient conservés (coin Nord Est du modèle et estran Est).

Le profil de came, avant, puis après introduction des courants de marée, était pour la marée de référence (vive eau moyenne) et à partir des enregistrements, travaillé de façon à ce que les mouvements du plan d'eau soient proches de ceux désirés.

La figure 2 donne la courbe de marée de vive eau moyenne (coefficient 1,18) enregistrée dans le coin Nord Est du modèle comparée à la courbe Nature moyenne déduite des observations visuelles effectuées sur le môle du port de Zeebrugge pendant la période 1963 à 1966.

Initialement prévues sur toute la longueur de la pente raccordant les fonds à la chape de roulement du volet batteur, les zones d'introduction de la marée dans le modèle ont été modifiées en cours de tarage. Les zones ont été partiellement colmatées (comme indiqué sur le plan d'ensemble du modèle donné par la figure 1) dans le but de réduire les perturbations constatées en fin de montant (juste après le maximum de flot) et en fin de perdant (juste après le maximum de jusant), les perturbations qui tendaient à dévier les courants de jusant (par aspiration) vers le Nord Ouest au centre du modèle et les courants de flot (par refoulement) vers le Sud Est sur la partie Est du modèle.

Dans une seconde phase, ont été reproduits et vérifiés les marées de faibles et forts coefficients ainsi que le cycle des marées.

La figure 3 donne les courbes de marées de coefficients 1, 1,18, 1,4 et 1,6 enregistrées sur le modèle, le cycle de marées étant présenté sur les figures 45 et 46.

Pour ce dernier point, on peut préciser que la réalisation d'une étude sédimentologique nécessite de reproduire sur le modèle des cycles de marées, représentant une succession de marées de divers coefficients, la cote du plan d'eau ainsi que les vitesses des courants de marées variables avec le coefficient influant sur le comportement dynamique des matériaux.

La différence entre l'échelle des temps hydrauliques (fixant la durée d'une marée) et l'échelle des temps sédimentologiques (fixant le temps de fonctionnement du modèle pour reproduire les évolutions de fonds sur une période donnée) ne permet pas de représenter avec rigueur la succession des marées en nature au cours d'une année moyenne et conduit à adopter un cycle de marées représentant un compromis.

Les 700 marées se succédant en nature au cours d'une année seront donc schématisées sur le modèle par une vingtaine de marées.

Cette disposition implique de composer un cycle de marées excluant les marées de morte eau et ne comportant que des marées dont le coefficient varie approximativement entre 1 et 1,5 (et éventuellement jusqu'à 1,75 pour le cycle dit exceptionnel que l'on pourrait reproduire épisodiquement).

## 2.2.- REGLAGE DES COURANTS

Le réglage des courants, paramètre prédominant sur les mouvements sédimentaires, a été effectué dans l'état actuel du port (état 1976) à partir des données Nature existantes ainsi que des résultats du modèle d'ensemble 265 du LRH.

Dans une première étape, les réglages ont porté sur la reproduction des champs de courants et leurs fluctuations dans le temps pour une marée type de vive eau moyenne (coefficient 1,18).

Dans une seconde étape, ont été introduits et étudiés les coefficients variables, le tarage hydraulique proprement dit a été complété par des essais hydrauliques fixant un état de référence avec l'extension du port envisagée ainsi que par des mesures comparatives fonds fixes-fonds mobiles dans l'état 1901 (avant construction du môle).

### 2.2.1 - Réglage en marée de vive eau moyenne

En premier lieu, le réglage a été dégrossi en régime permanent, c'est-à-dire avec des courants constants établis pour une heure déterminée de la marée et sur l'ensemble de la marée.

Pour se faire il fallait tout d'abord étalonner les vis d'Archimède. Cet étalonnage a consisté à mesurer le débit des vis dans le canal de répartition des courants ceinturant le modèle. Deux types de mesures ont été effectués : mesure de vitesses pour une section connue \* d'une part à l'aide de moulinets, d'autre part à l'aide de flotteurs lestés. Dans les deux cas, les profils de vitesses étaient relevés en fonctionnement manuel des vis pour différentes vitesses de rotation (ou différentes positions des verniers ou potentiomètres identiques pour les deux vis). Ceci nous a permis de tracer les courbes des débits en fonction de la position des verniers ; ces courbes sont données par la figure 4 sur laquelle est également représentée la courbe donnant la relation entre la position des verniers (ou potentiomètres en fonctionnement manuel) et le débattement du bras horizontal du programmeur (s'appuyant sur la came de courant et agissant sur les potentiomètres primaires en fonctionnement synchronisé).

A partir de données du modèle d'ensemble 265 du LRH ont été déterminés les débits et les lois de répartition de ces débits aux limites. Du fait de la conception du modèle (courants en circuit fermé) et de la présence du générateur de houle, l'alimentation s'effectuait pratiquement uniquement sur les parties latérales rectilignes des canaux. Les murets intérieurs de ces canaux possédant initialement un indice de vide moyen de 40 % étaient munis de clapets permettant d'adapter les répartitions des débits au modèle, à l'admission comme à l'aspiration.

Les premières mesures ont montré qu'au centre du modèle, où l'on disposait d'un nombre appréciable de points Nature, les vitesses des courants enregistrées (en régime établi) étaient faibles par rapport aux vitesses Nature.

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

- mesure des vitesses moyennes à l'aide de micromoulinets placés, à une distance du fond équivalente à 0,4 fois la hauteur d'eau au point considéré\*\*, sur les points Nature.
- mesure des vitesses moyennes par micromoulinets sur trois radiales, une radiale centrale et deux radiales situées au niveau des limites Est et Ouest de la future zone des fonds mobiles ; ce type de mesure permettant de mieux apprécier la répartition des vitesses sur la largeur du modèle. Les enregistrements des mesures par micromoulinets donnaient les intensités et les trajectoires des courants en régime établi comme en régime variable,
- mesure par prises de vues photographiques des champs de courants donnant les trajectoires et les vitesses de surface (valeurs moyennes sur une distance équivalente à 700 m pour un temps de pose de 5s.).

---

\* Compte tenu de la hauteur d'eau dans le canal et de l'immersion des vis, les différences engendrées par modification du plan d'eau entre BM et PM n'étaient pas suffisamment importantes pour être prises en compte, du fait de la précision des mesures.

\*\* En fonctionnement variable, c'est-à-dire avec variation continue du plan d'eau, la hauteur d'eau prise en compte était celle obtenue au niveau moyen de la marée (Hz + 2,4 m environ).



Sur la figure 5 sont indiquées les positions des points Nature, les points de mesures sur les radiales ainsi que les limites de la zone couverte par les prises de vues photographiques.

Suite aux résultats obtenus précédemment, il a été décidé de réadapter les débits d'introduction en flot et en jusant déterminés (à partir des données du modèle 265) sur la radiale centrale et de mettre en place une série de guides-eau.

Les nouvelles mesures ont été effectuées pour les deux positions extrêmes du générateur de houle (directions Nord Ouest qN et sensiblement Nord) d'abord en régime établi puis en régime variable (courants variables dans le temps en intensité et direction selon l'âge de la marée, en fonctionnement synchronisé des vis après tracé d'une came de courant à partir des débits déterminés sur la radiale centrale et rattachés au débattement du bras horizontal du programmeur par utilisation des abaques de la figure 4). Malgré une légère augmentation des intensités près des ouvrages au centre du modèle, on retrouvait plus vers le large et à proximité des limites, des modifications de trajectoires très nettes et des pertes d'intensité vers le large dues à une expansion des courants vers les "hauts fonds" que constitue la zone d'emplacement et de déplacement du volet batteur.

Des modifications sur la position ou la longueur des guides-eau, des essais avec mise en place d'une bavette sur la partie inférieure ajourée et sur toute la longueur du volet batteur, un colmatage partiel du canal d'admission-aspiration de la marée n'ont pas permis d'apporter des améliorations suffisamment acceptables, la masse d'eau circulant derrière le volet batteur restant non négligeable.

Ces résultats et observations nous ont amenés à effectuer de nouvelles modifications ; modifications consistant à étendre les ouvertures d'introduction des courants dans les coudes des canaux circulaires, sur 1,5 m du côté Ouest (admission en flot) et près de 8 m côté Est (admission en jusant), et à réadapter la répartition des débits notamment par la mise en place d'un muret séparateur dans le coude Ouest et d'un muret formant un rétrécissement dans le coude Est (cf plan d'ensemble du modèle figure 1). Suite à ces transformations, les débits, déterminés en prenant les vitesses moyennes sur la radiale centrale, ont été réajustés en considérant les hauts fonds, derrière le volet batteur, non plus comme une zone d'eau quasiment morte mais en considérant que les vitesses moyennes mesurées dans ce secteur sur le modèle 265 se conservaient indépendamment de la hauteur d'eau.

Les débits, calculés pour les différentes heures de la marée, étaient alors les suivants :

- 5H	- 4H	- 3H	- 2H	- 1H	- 0H40	PM
195 l/s	135 l/s	50 l/s	255 l/s	505 l/s	570 l/s	390 l/s

+ 1H	+ 2H	+ 3H	+ 4H	+ 5H	+ 5H30	+ 6H
300 l/s	120 l/s	155 l/s	305 l/s	350 l/s	325 l/s	325 l/s

A partir de ces valeurs, une nouvelle came de courant a été définie, puis réajustée au cours de plusieurs séries de mesures et d'essais durant lesquels la rugosité artificielle de fond a été mise en place, le déphasage entre la came de courant et la came de marée a été étudié pour avoir une bonne correspondance au centre du modèle, quelques légères modifications au niveau des débits (donc du tracé de la came ou de la répartition des débits) ont été apportées.

Sur la figure 6, sont portées les courbes de débits calculées et celles obtenues à partir du tracé de la came "finale" et par l'intermédiaire des courbes d'étalonnage des vis en tenant compte du déphasage global voisin de  $- 45^\circ$ .

Les champs de courants étant à peu près correctement reproduits en intensité et direction dans la zone d'étude, le tarage hydraulique s'est poursuivi par l'introduction des coefficients variables.

### 2.2.2 - Réglage en coefficients de marée variables

Les données Nature concernant les variations de courants avec le coefficient de la marée sont peu nombreuses ; néanmoins, on peut penser qu'au delà d'un marnage de 5,5 m (coefficient de marée de 1,5) interviennent des phénomènes d'ordre météorologique qui agissent sur les niveaux d'eau sans influencer sur les courants de marée.

En considérant, par ailleurs, que les courants ne peuvent excéder pour les marées astronomiques de grand coefficient, des vitesses moyennes de l'ordre de 1,1 ms<sup>-1</sup> et 1,4 ms<sup>-1</sup> respectivement en jusant et en flot et à partir des débits correspondants, ont été définis les potentiomètres secondaires permettant la reproduction de variations de courants avec le marnage.

La plus grande modulation autorisée par ce dispositif (33 % environ) étant obtenue en fonctionnement maximum des vis (débattement maximum du bras horizontal du programmeur correspondant à une résistance minimum au niveau des potentiomètres primaires), il a fallu rechercher la position du curseur (donc le coefficient de marée) pour laquelle, en fonctionnement maximum des vis, on retrouve au maximum de flot et pour la marée de référence (coefficient 1,18) des champs de courants identiques à ceux obtenus au cours de la première partie du tarage.

La comparaison a, en fait, été effectuée à partir de la vitesse de rotation des vis.

De même, une fois ce repérage effectué (donnant une position du curseur correspondant à une marée de coefficient 1,4 en fonctionnement maximum des vis) les vitesses moyennes de rotation des vis ont été relevées pour toutes les heures de la marée de référence (coefficient 1,18) avec la came initiale utilisée, d'une part avant mise en place du dispositif permettant d'obtenir les variations des courants avec le coefficient de marée, d'autre part après introduction de ce dispositif (donc d'une résistance complémentaire). Le tracé des courbes (donné par la figure 7) a alors permis de déterminer les nouveaux débattements, donc le nouveau profil de came.

La fin du tarage a alors consisté à vérifier la bonne conservation des champs de courants avec cette nouvelle came pour la marée de référence, puis à enregistrer les champs de courants et les vitesses moyennes en quelques points du modèle pour plusieurs coefficients de marée et enfin, à reproduire un cycle de marée et à enregistrer les variations des vitesses moyennes.

### 2.2.3 - Résultats

Les résultats principaux se présentent en général sous trois formes :

- présentation des vitesses moyennes en direction et intensité, à partir d'enregistrements aux micromoulinets sur les points Nature,
- présentation des champs de courants donnant les trajectoires et les intensités des courants (vitesses de surface) obtenus par prises de vues photographiques,
- répartition des vitesses (moyennes et de surface) relevées sur trois radiales.

Outre ces résultats, constituant le tarage hydraulique proprement dit relatif à la situation 1976 avant le début des travaux d'extension du port, sont également présentées quelques mesures effectuées :

- en phase finale (futur port achevé),
- pour l'état 1901, avant construction du môle actuel.

### 2.2.3.1 - Situation 1976 - Marée de vive eau moyenne

Avant le stade ultime de réglage des courants, des mesures et des relevés comparatifs avaient été effectués régulièrement pour les deux positions extrêmes du volet batteur (Nord et Nord Ouest q Nord). Ces essais ont montré que la position du générateur de houle n'avait pratiquement pas d'influence sur la propagation des courants dans la zone d'étude. Cette constatation ayant été vérifiée au cours des derniers réglages du tarage, les résultats sont présentés pour une seule direction de houle, en général la direction Nord Ouest q Nord, la plus fréquente parmi celles reproduites en modèle d'après les statistiques Nature.

Si l'on considère les vitesses moyennes, l'examen des figures 8 à 17 montre, comparativement aux données Nature :

#### a) au niveau intensité

- que pour les points situés au centre du modèle, de part et d'autre du chenal d'accès, les intensités des courants au maximum de flot et au maximum de jusant sont fidèlement reproduites, avec toutefois une légère déperdition pour les points les plus au large,
- qu'en ce qui concerne les points situés à l'Ouest du port, ces maximums de flot (admission) et de jusant (aspiration) sont en général plus élevés (d'environ 10 % en moyenne),
- que pour les points situés à l'Est du port, il y a dans l'ensemble une bonne correspondance au maximum de flot comme au maximum de jusant.

#### b) dans le temps

- que les maximums sont correctement calés ; selon les points de mesures, les maximums de flot se situent entre PM - 1h et PM - 0h30' et les maximums de jusant entre PM + 5h30 et PM + 6h,
- qu'en ce qui concerne les renverses, si la renverse pendant le perdant (passage du flot au jusant) se produit effectivement aux alentours de PM +3h, la renverse en cours de montant (passage du jusant au flot) est par contre décalée vers la basse mer (PM - 3h30' sur modèle au lieu de PM -2h30' à PM -3H). Cette différence pourra sans difficulté être réajustée et la renverse repositionnée pour le début du tarage sédimentologique.

c) au niveau direction

- que vers les maximums de flot et de jusant, les directions des courants sont correctement représentées (écart maximum n'excédant pas 10°) et que les seules divergences nettes, mais sans grande importance du fait des intensités des courants, se situent au moment des renverses et principalement vers la renverse jusant-flot par suite du décalage horaire.

Les figures 18 à 29 donnant heure par heure les champs de courants (vitesse de surface) confirment les observations ponctuelles effectuées aux micromoulinets et permettent de donner un aperçu plus général.

Au niveau des directions, si l'on accepte les renverses, on retrouve en flot comme en jusant l'orientation générale des courants Nature, les différences constatées en quelques zones n'excédant pratiquement jamais 10°.

Compte tenu d'un rapport  $\frac{V_{surf}}{V_{moy}}$  supérieur sur le modèle à celui déterminé

en Nature, les vitesses de surface sont en règle générale plus élevées sur le modèle et cela, d'autant plus que les courants sont forts, principalement côté admission (à l'Ouest du port) en flot, où il a fallu forcer les vitesses pour avoir des vitesses correctes au centre du modèle.

Les mesures sur radiales (cf figures 30 pour le flot et 31 pour le jusant) ont permis de déterminer le rapport moyen entre la vitesse de surface et la vitesse moyenne \*, rapport légèrement plus élevé sur le modèle qu'en Nature, comme indiqué ci-après :

	Nature	Modèle
Vitesse de surface / Vitesse moyenne	1,2	1,3

Ces mesures sur radiales confirment les observations et résultats précédents, à savoir que si la répartition des courants est correcte sur la radiale centrale à proximité des ouvrages (jusqu'à 2000 à 2500 m vers le large à partir du môle) on retrouve :

- aux environs du maximum de flot, une déperdition vers le large, faible au centre et plus sensible sur la partie Est du modèle et côté admission (radiale Ouest) une répartition uniformément plus importante (de 15 à 20 %) en vitesses moyennes comme en vitesses de surface,
- aux alentours du maximum de jusant, une meilleure répartition générale.

\* Avec la rugosité de fond précédemment précisée, l'ensemble des mesures dans le stade final du tarage étant effectué, rappelons-le, avec cette rugosité artificielle.

Un essai rapide permettant de voir l'influence des houles sur les courants a montré qu'avec des vitesses moyennes de l'ordre de 1 ms<sup>-1</sup> :

- pour des houles inférieures à 1,5 m de hauteur significative, les courants n'étaient pour ainsi dire pas déviés,
- pour des houles voisines de 3 m Hs, on pouvait constater une modification des trajectoires proche de 5°,
- et pour des fortes houles de 5,5 m de hauteur significative, la déviation pouvait dépasser 10°.

Ces différences variant dans le même sens que l'intensité des courants.

#### 2.2.3.2 - Situation 1976 - Coefficients de marée variable

La première série de mesures donnant les vitesses moyennes a été effectuée aux micromoulinets en quelques points choisis de manière à couvrir l'ensemble de la zone d'étude.

Les résultats de ces essais sont donnés par les figures 32 à 37 pour les différents coefficients de marée expérimentés, à savoir :

- coefficient 1 (marée moyenne)
- coefficient 1,18 (marée de vive eau moyenne)
- coefficient 1,4 (marée de vive eau exceptionnelle)
- coefficients 1,6 et 1,8 (caractérisant plus un grand marnage dû aux surcotes d'origine météorologique qu'un coefficient de marée)

D'une manière générale, la variation du coefficient de marée (donc du marnage) n'influaient que sur les intensités des courants, la direction, pour les points considérés, n'étant pas ou que très faiblement modifiée.

Comme le montrent également les schémas de la figure 38 donnant, pour les maximums de flot et de jusant, la variation des vitesses moyennes avec le coefficient de marée, les vitesses croissaient régulièrement depuis le coefficient 1 jusqu'à atteindre leur maximum (en flot comme en jusant) pour des coefficients de marée de 1,4 ou 1,6, avant de décroître très légèrement. La variation maximale, enregistrée au maximum de flot pour le point situé sur le versant Ouest du chenal d'accès au port, dépassait les 30%.

A noter que pour les deux points centraux (6A et 11A), points pour lesquels nous disposons de quelques données Nature, la pente de la courbe (Vitesse moyenne / Coefficient de marée) est conservée.

Les champs de courants donnés, au maximum de flot et de jusant et pour les marées de coefficients 1 - 1,4 et 1,6, par les figures 39 à 44 montrent :

- que les trajectoires des courants ne sont pratiquement pas modifiées,
- qu'au niveau de la répartition dans le modèle, on retrouve les mêmes caractéristiques que pour une marée de vive eau moyenne (coefficient 1,18),
- que les intensités des vitesses de surface, pour les maximums de flot et de jusant, varient comme suit :

Coefficient de marée	Vitesse de surface (ms <sup>-1</sup> )		Variation par rapport à la marée de vive eau moyenne
	Maximum de flot	Maximum de jusant	
1. marée moyenne	1,4 à 1,7	1 à 1,1	- 5 à - 10 %
1.18- marée vive eau moyenne	1,5 à 1,8	1,1 à 1,2	—
1.4- vive eau exceptionnelle	1,7 à 2,0	1,2 à 1,4	+ 10 à + 15 %
1.6- vive eau exceptionnelle avec surcotes d'origine météorologique	1,7 à 2,1	1,2 à 1,5	+ 10 à + 20 %

Sur les figures 45 et 46 sont portées simultanément les variations en intensité des vitesses moyennes relevées en trois points et les variations du coefficient de marée (1 à 1,5 pour la figure 45 ; 1,4 à 1,7 pour la figure 46) enregistrées au cours de la reproduction schématique d'un cycle.

### 2.2.3.3 - Port futur

En conservant les réglages et les conditions aux limites de la situation 1976 (port actuel), le nouveau port a été introduit schématiquement en modèle et des rapides essais ont été effectués de manière à donner un aperçu des modifications engendrées au niveau courantologique par l'extension des ouvrages.

Les planches 47 à 58 donnent heure par heure les champs de courants en extension finale du port pour une marée de vive eau moyenne.

On peut constater une accélération très nette des courants le long des digues extérieures. Au maximum de flot, des vitesses de surface voisines de  $2,7 \text{ ms}^{-1}$  sont obtenues juste après le coude de la digue Nord Ouest, ce qui représente une augmentation par rapport à la situation 1976 de près de  $0,8 \text{ ms}^{-1}$  ; à proximité immédiate du coude les courants atteignent localement  $3,0 \text{ ms}^{-1}$ . Au niveau du chenal d'accès, l'augmentation des vitesses est en moyenne de  $0,6$  à  $0,7 \text{ ms}^{-1}$  ( $+0,8 \text{ ms}^{-1}$  à proximité des musoirs). Une fois le musoir de la digue Nord Est dépassé, les intensités décroissent progressivement, tout en atteignant encore  $1,8 \text{ ms}^{-1}$  à  $1,9 \text{ ms}^{-1}$  au niveau du coude de la digue Nord Est ( $+ 0,3 \text{ ms}^{-1}$ ).

Au maximum de jusant, les différences sont moins nettes ; le long de la digue Nord Est, les vitesses de surface sont de l'ordre de  $1,8 \text{ ms}^{-1}$  ( $+ 0,5 \text{ ms}^{-1}$ ) et au niveau du chenal d'accès d'environ  $1,5 \text{ ms}^{-1}$  ( $+ 0,5 \text{ ms}^{-1}$  également).

Au niveau des intensités, l'influence de l'extension du port se fait sentir sur une distance de 1500 à 2000 m au-delà des ouvrages (vers le large). En ce qui concerne les directions, en flot comme en jusant, les lignes de courants épousent la configuration générale des ouvrages et on retrouve une forme de "V renversé" assez marqué avec la présence de zones tourbillonnaires, dans l'ombre de la digue Sud Est en flot et du premier tronçon (perpendiculaire au littoral) de la digue Nord Ouest en jusant.

Les figures 59 et 60 donnant la répartition des vitesses sur les radiales au maximum de flot et au maximum de jusant, permettent de visualiser l'augmentation importante des vitesses au centre du modèle, par rapport à la situation 1976, différence d'autant plus nette que l'on s'approche des ouvrages. Au niveau des radiales Est et Ouest, l'influence de l'extension du port est déjà sensible, les vitesses augmentant progressivement du littoral vers le large. Sur les 2500 à 3000 premiers mètres depuis la côte, on constate une réduction des vitesses et au-delà un léger accroissement.

Sur ces schémas, sont également indiquées les données issues du modèle d'ensemble 265 du LRH ; si l'on accepte les admissions (radiale Est en jusant et radiale Ouest pour le flot), les résultats sont comparativement du même ordre de grandeur.

#### 2.2.3.4 - Situation 1901

Pour la phase d'étude correspondant au tarage hydraulique, la situation 1976, pour laquelle nous disposons d'un nombre de données suffisant, a été introduite. Pour la première partie du tarage sédimentologique, qui consistera à reproduire l'évolution des fonds pendant la période 1901 - 1910, les données courantologiques sont pratiquement inexistantes, principalement sur la période précédant la construction du môle actuel.

Dans le but de fixer un ordre de grandeur des courants régnant dans la situation 1901 et surtout de vérifier la bonne concordance des champs de courants sur fonds fixes munis d'une rugosité artificielle et sur fonds mobiles, des relevés comparatifs ont été effectués dans les deux cas, au maximum de flot et au maximum de jusant pour une marée de vive eau moyenne.



Après modelage des fonds de 1901 (cf plan du modèle donné par la figure 61), abaissés de l'équivalent de 4 m dans la zone destinée à recevoir les matériaux mobiles, le modèle a été équipé dans un premier temps par du sable fin, schématisant les fonds fixes, et sur lequel a été mise en place la rugosité artificielle (dans les mêmes conditions que les essais précédents). Les lois de répartition des débits aux limites du modèle étant conservées et compte tenu du fait que les fonds de 1901 sont en moyenne plus bas de 1 m comparativement aux fonds de 1976, on constate une diminution générale de l'intensité des courants (toujours par rapport à la situation 1976) ; les vitesses de surface au maximum de jusant sont de l'ordre de  $1,1 \text{ ms}^{-1}$  et voisines de  $1,4 \text{ ms}^{-1}$  au maximum de flot.

Le modèle a ensuite été équipé en matériaux mobiles et les champs de courants relevés après action de la houle et des courants pendant une courte période de manière à façonner quelque peu ces fonds.

Les dernières mesures permettent de vérifier la bonne concordance des champs de courants avec fonds fixes ou fonds mobiles. En intensité, les vitesses de surface au maximum de jusant sont identiques, alors que l'on note une réduction minime au maximum de flot, les trajectoires étant inchangées en flot comme en jusant (cf figures 62 et 63).

### 2.3. REGLAGE DES 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 et à mesurer l'amplitude résultante dans le modèle.

Ces mesures ont été effectuées en 4 points (cf plan général du modèle) pour les deux positions extrêmes du volet batteur (NWqN et N) un niveau du plan d'eau constant correspondant à la cote de pleine mer d'une marée de vive eau moyenne ( $H_z + 4,7 \text{ m}$ ). La gamme des périodes étudiées (4,5 à 10 s - périodes moyennes sur le train de 10 vagues) couvrait la gamme des périodes observées in situ, la limite inférieure (4,5 s) étant fixée par les possibilités mécaniques du volet batteur.

En ces quatre points, la houle était enregistrée pour une valeur fixe de l'excentricité en sortie d'arbre (excentricité réglable manuellement permettant de fixer l'amplitude du mouvement du plan oscillant) et pour les positions haute (maximum de débattement) et basse (minimum de débattement) de la bielle mobile, l'opération étant répétée pour plusieurs valeurs de l'excentricité.

Il s'agissait de rechercher le point pour lequel l'influence de la position du générateur de houle (du fait de la configuration des fonds, de la réflexion sur les ouvrages ou d'une houle mal formée) soit la moins sensible possible. Ce point (point témoin) servira lors du tarage sédimentologique à vérifier et à contrôler la bonne reproduction de la houle générée.

La figure 64 donne, pour les deux positions extrêmes du volet batteur, les courbes d'étalonnage déduites des enregistrements relevés du point 4 (point répondant le mieux à la condition demandée). A partir de ces courbes, sont choisies 3 ou 4 valeurs de l'excentricité correspondant à 3 ou 4 gammes d'amplitude, la période moyenne étant rattachée pour la hauteur significative moyenne de la gamme d'amplitude considérée par la relation déduite des observations Nature :

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

## C O N C L U S I O N S

Le tarage hydraulique d'un modèle réduit sédimentologique constitue une phase essentielle d'adaptation et de réglage de l'appareillage, permettant la reproduction la plus fidèle possible des paramètres susceptibles d'intervenir dans la dynamique sédimentaire.

Disposant dans le cas de Zeebrugge d'éléments et de données Nature assez complets, et après exploitation de ces derniers, le réglage du modèle a pu être abordé dans de bonnes conditions.

L'ensemble de cette première partie de l'étude correspondant au tarage hydraulique a été mené sur la situation de 1976, c'est-à-dire avant le début des travaux d'extension du futur avant-port.

Au cours de ce tarage, les principaux paramètres hydrauliques (marées, courants, houles) ont été étalonnés et réglés ; leur interaction ou l'influence de paramètres annexes (rugosité des fonds, coefficients de marée variables,...) ont ensuite été examinés.

Le réglage de la marée a consisté à ajuster les cotes extrêmes de basse mer et de pleine mer et le marnage pour une marée de vive eau moyenne, puis à vérifier en quelques points du modèle la bonne reproduction de cette dernière.

L'étalonnage du générateur de houle a conduit à l'établissement d'abaques dont l'utilisation devait permettre de fixer les gammes d'amplitudes introduites lors de la reproduction schématique du cycle de houles.

Le réglage des courants, paramètre prépondérant pour les mouvements sédimentaires, a été effectué à partir des données Nature existantes, mais également à partir des résultats du modèle d'ensemble 265 du LRH.

Après un premier réglage grossier en régime permanent et fonds lisses, les lois de répartition des débits aux limites du modèle ont été affinées en régime variable et sur fonds durs munis d'une rugosité artificielle pour une marée de vive eau moyenne. Compte tenu de la conception du modèle, les débits aux limites ont du être majorés de manière à obtenir dans la zone d'étude (zone de fonds mobiles) des courants, en direction et en intensité conformes à ceux mesurés en nature.

Les résultats étant satisfaisants pour la marée de référence, le réglage des courants s'est poursuivi par l'introduction des coefficients de marée variables.

L'influence de la variation du coefficient de marée a été examinée tant au niveau marnage (vérification de la bonne reproduction des différentes cotes de basse mer et de pleine mer) qu'au niveau courantologique.

En fin de tarage hydraulique, avant de débiter le second stade de l'étude, à savoir "le tarage sédimentologique" au cours duquel seront adaptés ou ajustés ces différents paramètres, des essais rapides ont été effectués, d'une part pour donner un aperçu des champs de courants

- dans la situation d'extension finale du port,
- dans la situation 1901 avant la construction du môle actuel,

et d'autre part, pour vérifier la bonne concordance des champs de courants (dans la situation 1901) du modèle à fonds fixes muni de sa rugosité artificielle et du modèle équipé en matériaux mobiles.

Borgerhout, le 10 juin 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

L'Ingénieur en Chef du  
Département de Sédimentologie

  
C. MIGNIOT

Pour le Laboratoire de Recherches Hydrauliques

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

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 Plan d'ensemble du modèle-situation 1976

REGLAGE DE LA MAREE

Fig. 2 Comparaison de la courbe de marée de vive eau moyenne  
Fig. 3 Courbes de marées de différents coefficients

REGLAGE DES COURANTS

Fig. 4 Courbes d'étalonnage des vis de courant  
Fig. 5 Plan de situation des points de mesure des courants  
Fig. 6 Courbes des débits  
Fig. 7 Etalonnage de la vitesse de rotation des vis

- Situation 1976

Fig. 8 à 17 Comparaisons en direction et en intensité des courants  
Nature-modèle (vitesses moyennes) pour une marée de vive  
eau moyenne  
Fig. 18 à 29 Champs de courants heure par heure - marée de vive eau  
moyenne  
Fig. 30 Mesures des vitesses sur les radiales - Flot  
Fig. 31 Mesures des vitesses sur les radiales - Jusant  
Fig. 32 à 37 Comparaisons des courants (vitesses moyennes) pour  
différents coefficients de marée  
Fig. 38 Vitesses moyennes aux maximums de flot et de jusant en  
fonction du coefficient de la marée  
Fig. 39 à 44 Champs de courants aux maximums de flot et de jusant  
Marées de coefficient 1 - 1,4 et 1,6  
Fig. 45 Variation des courants pendant le cycle de marées -  
Coefficients 1 à 1,5  
Fig. 46 Variation des courants pendant le cycle de marées -  
Coefficients 1,4 à 1,7

- Situation Port futur

Fig. 47 à 58 Champs de courants heure par heure - Marée de vive eau  
moyenne  
Fig. 59 Répartition des vitesses sur les radiales - Maximum de  
flot  
Fig. 60 Répartition des vitesses sur les radiales - Maximum de  
jusant

- Situation 1901

- |         |  |
|---------|--|
| Fig. 61 | Plan du modèle   |
| Fig. 62 | Comparaison des champs de courants fonds fixes/fonds mobiles - maximum de flot   |
| Fig. 63 | Comparaison des champs de courants fonds fixes/fonds mobiles - maximum de jusant |

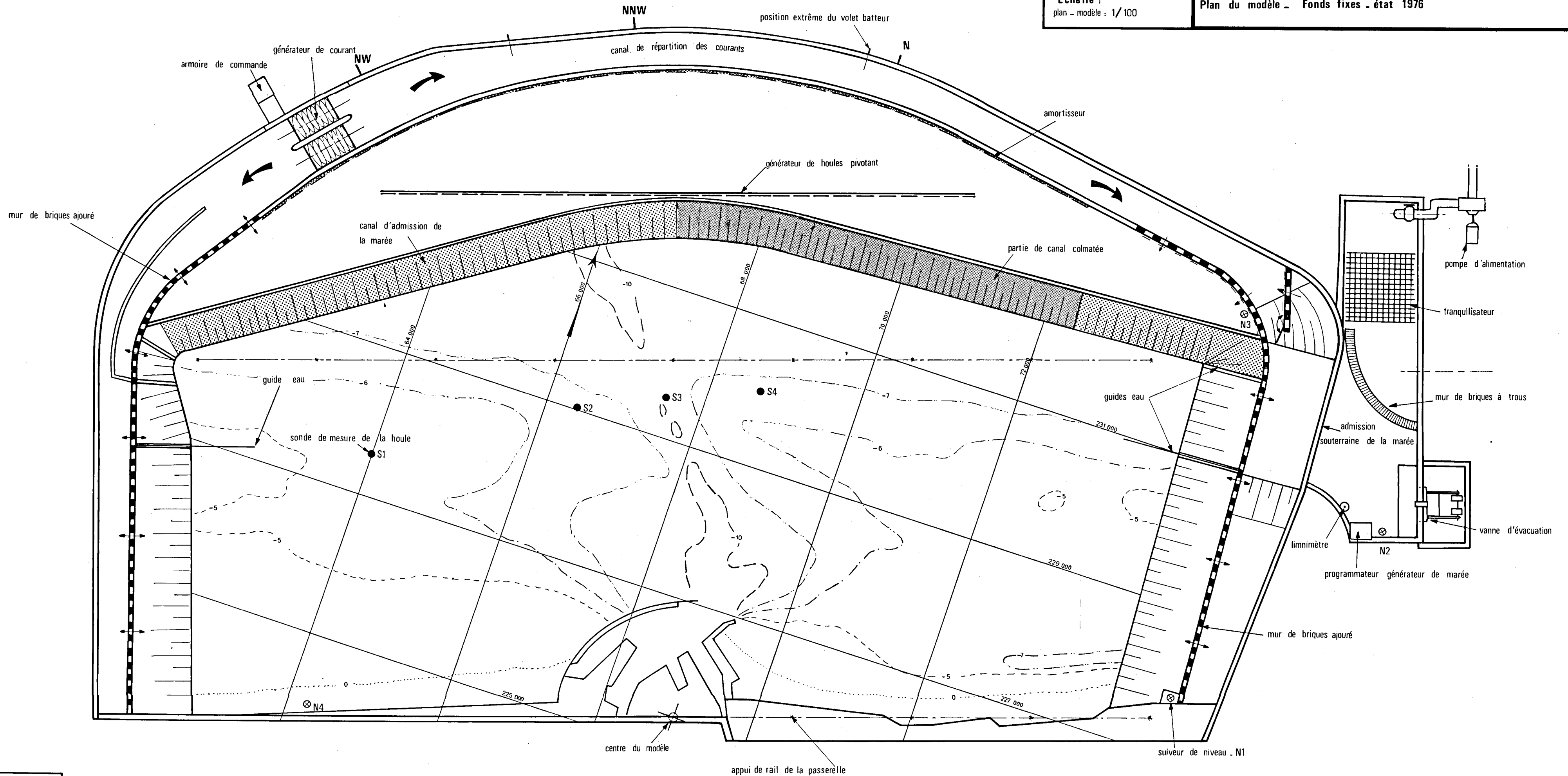
REGLAGE DES HOULES

- |         |                                       |
|---------|---------------------------------------|
| Fig. 64 | Courbes d'étalonnage du volet batteur |
|---------|---------------------------------------|



Echelle :  
plan - modèle : 1/100

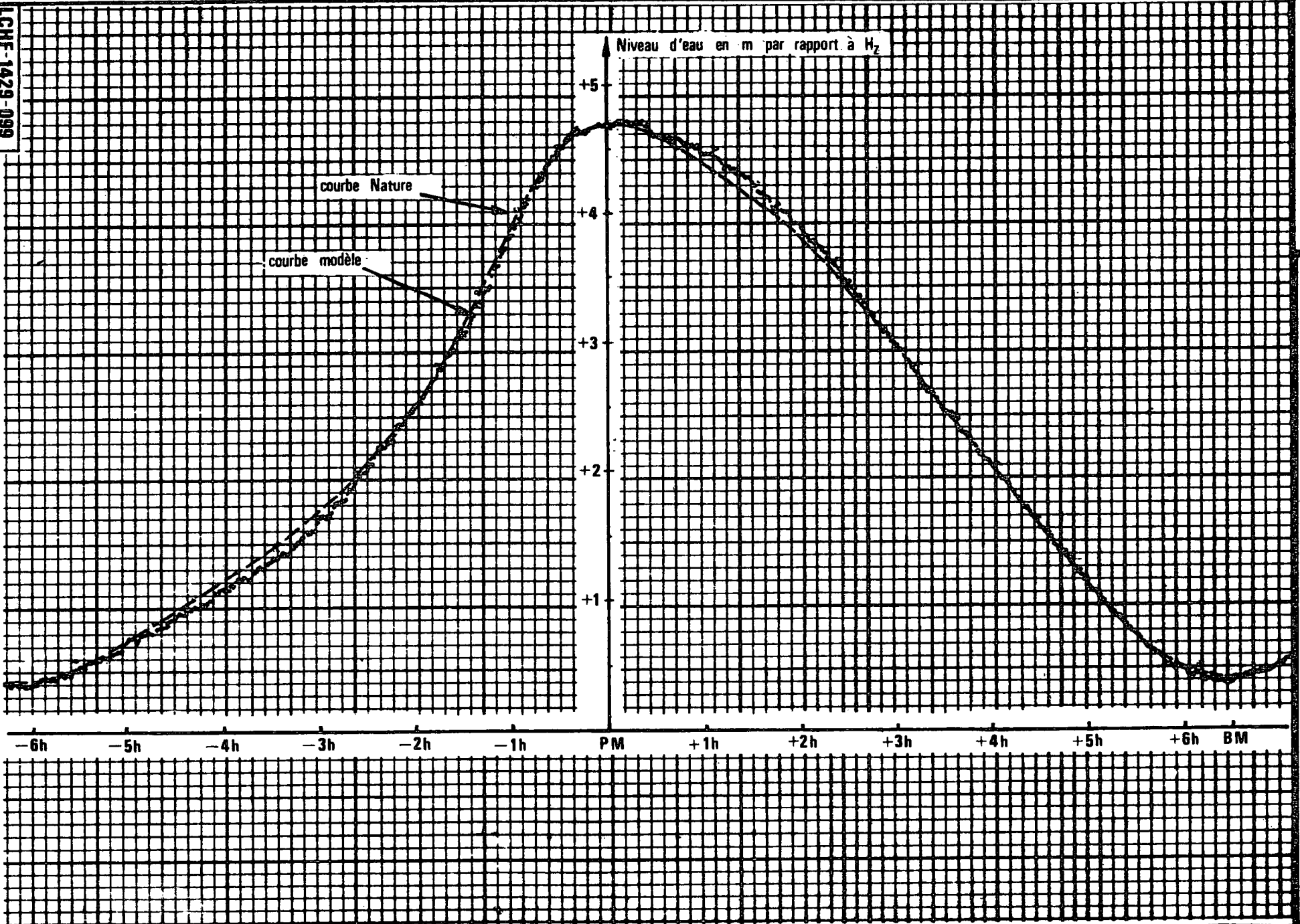
Plan du modèle - Fonds fixes - état 1976



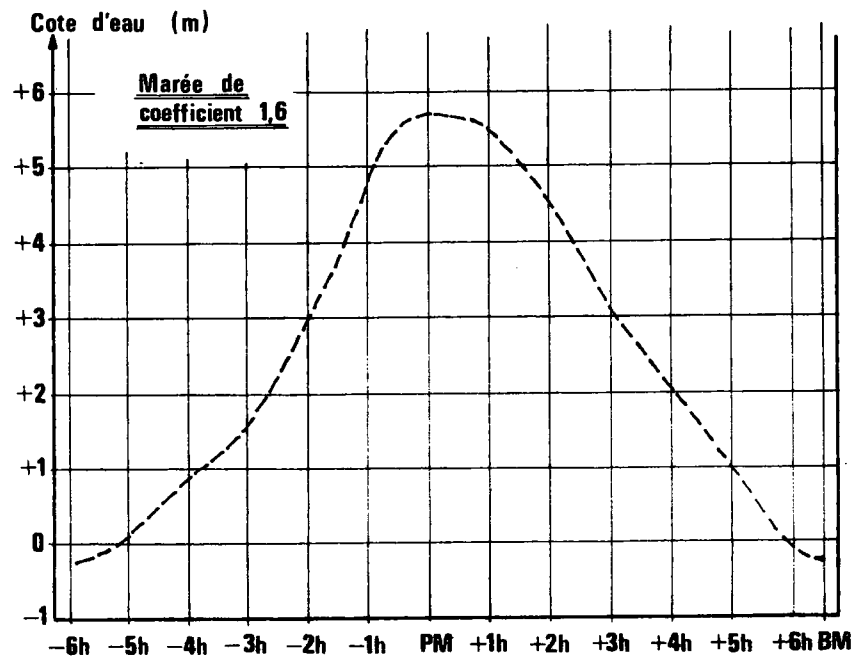
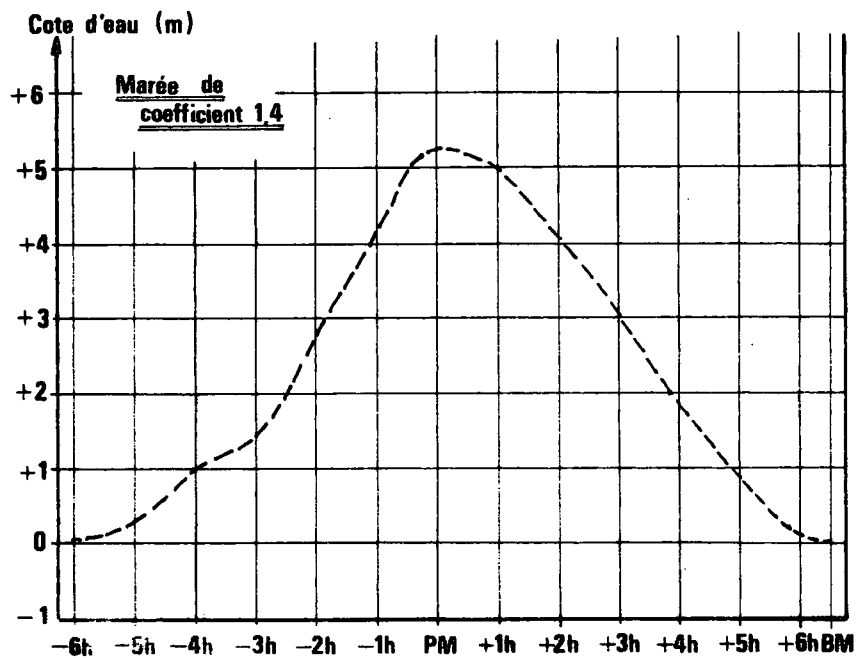
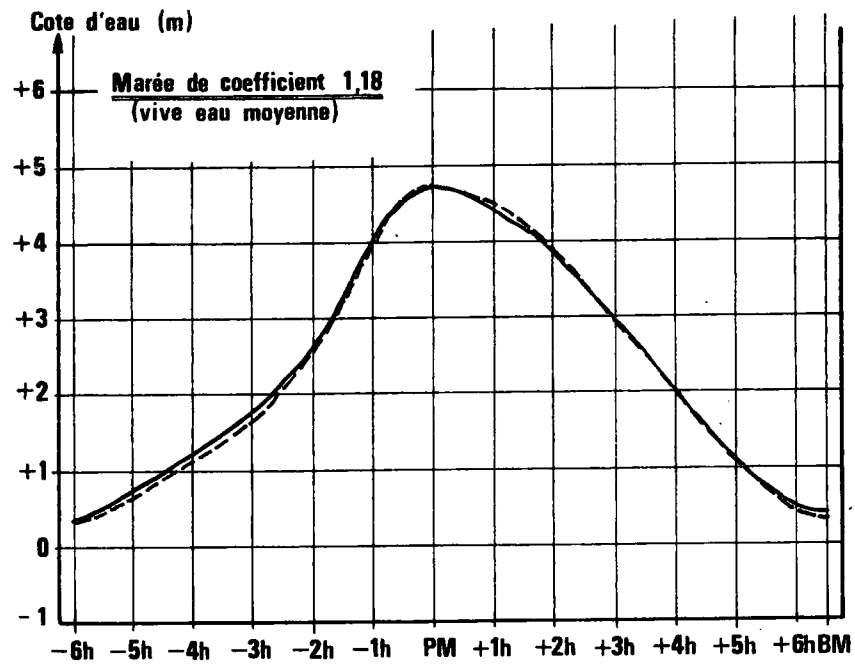
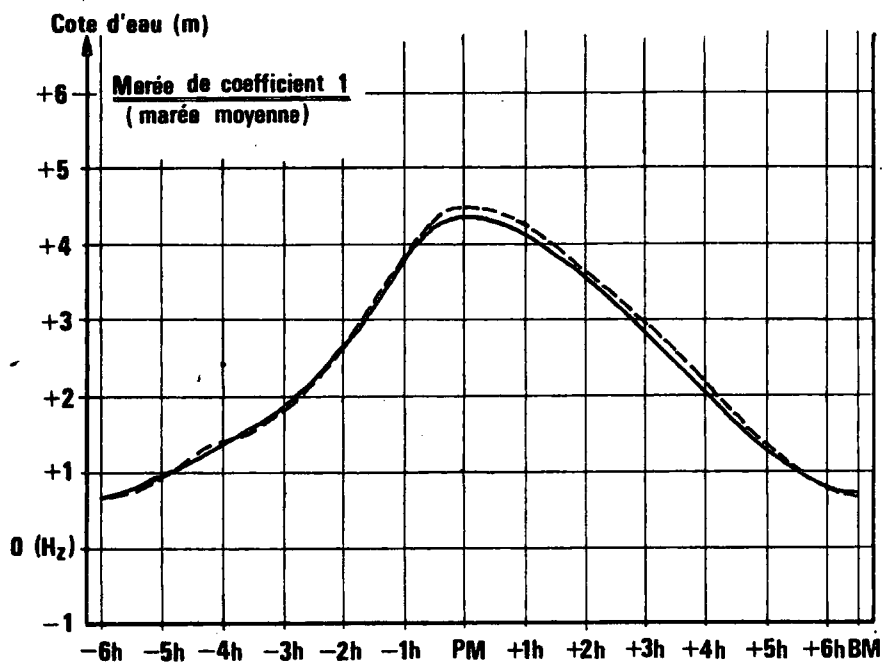




Courbes de marée - Comparaison Nature / modèle  
Marée de Vive Eau Moyenne (coefficient 1,18)



LCHF-1429-099



LABORATOIRE DE  
RECHERCHES  
HYDRAULIQUES  
BOULGARDIENNES

Courbes :  
— Nature  
- - - Modèle

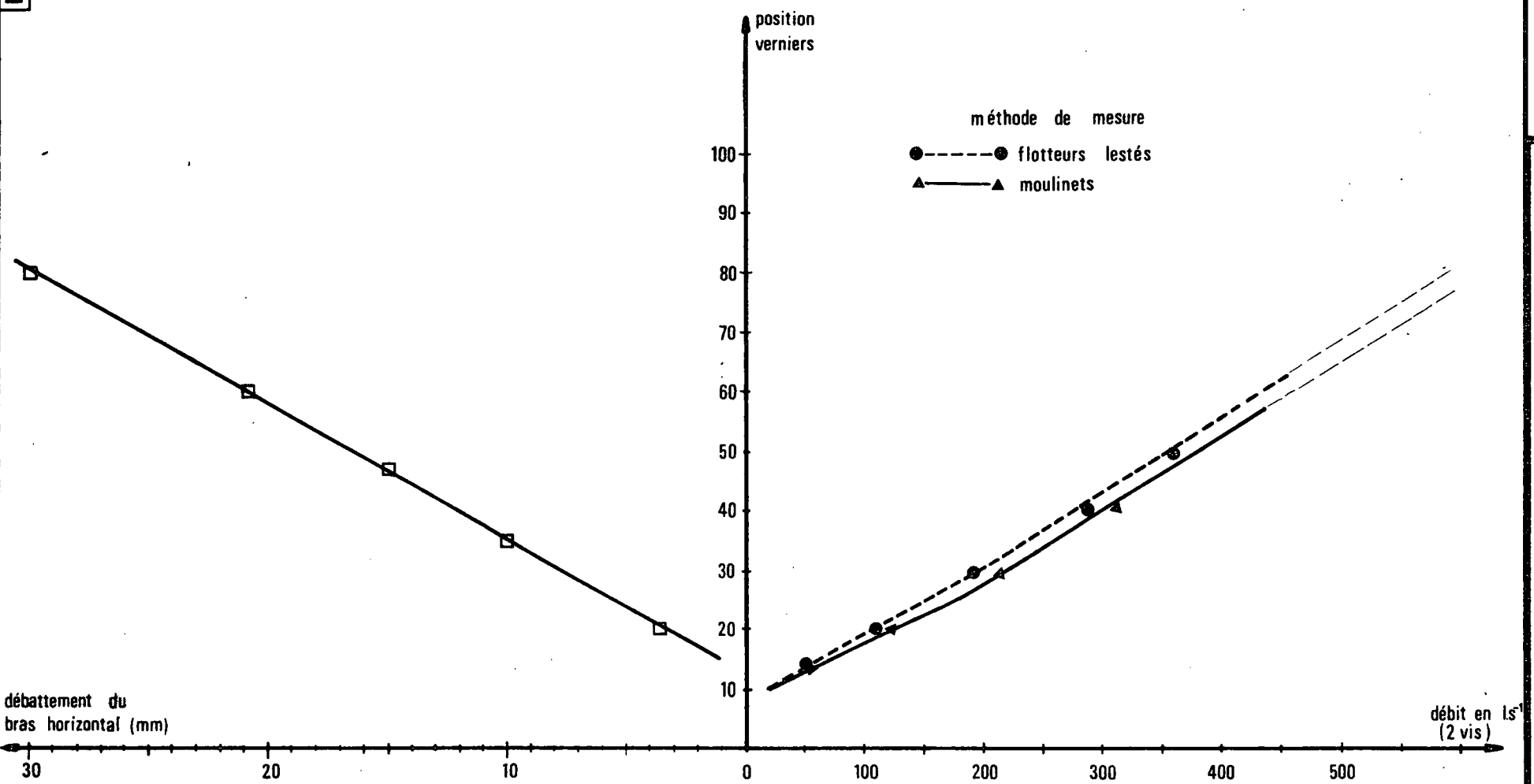
Courbes de marée

Modèle 387 S  
ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DE L'EVOLUTION DES FONDS  
PORT DE ZEEBRUGGE

Figure : 3



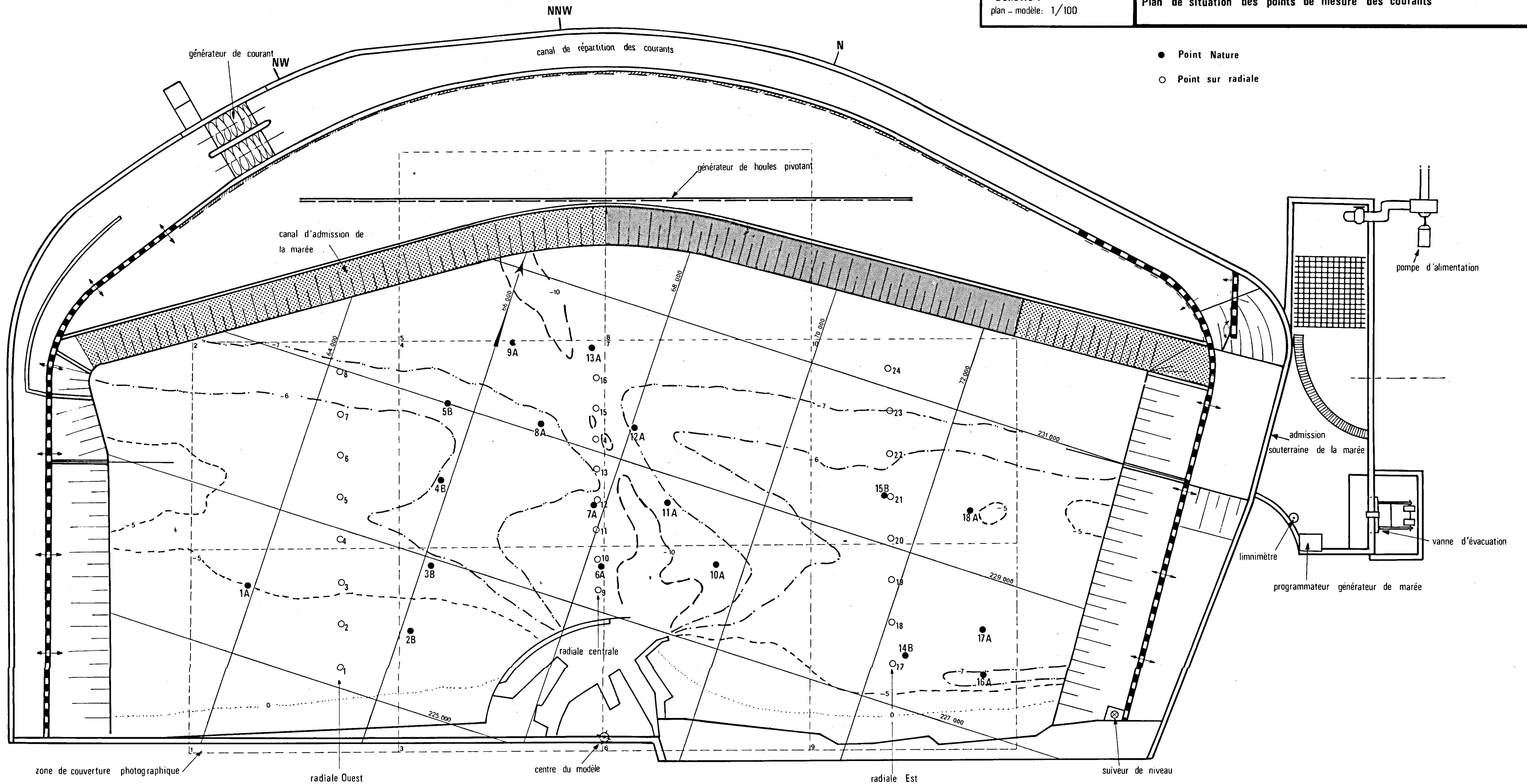
Courbes d'étalonnage des vis de courant



Echelle :  
plan - modèle: 1/100

Plan de situation des points de mesure des courants

- Point Nature
- Point sur radiale





Courbes des débits

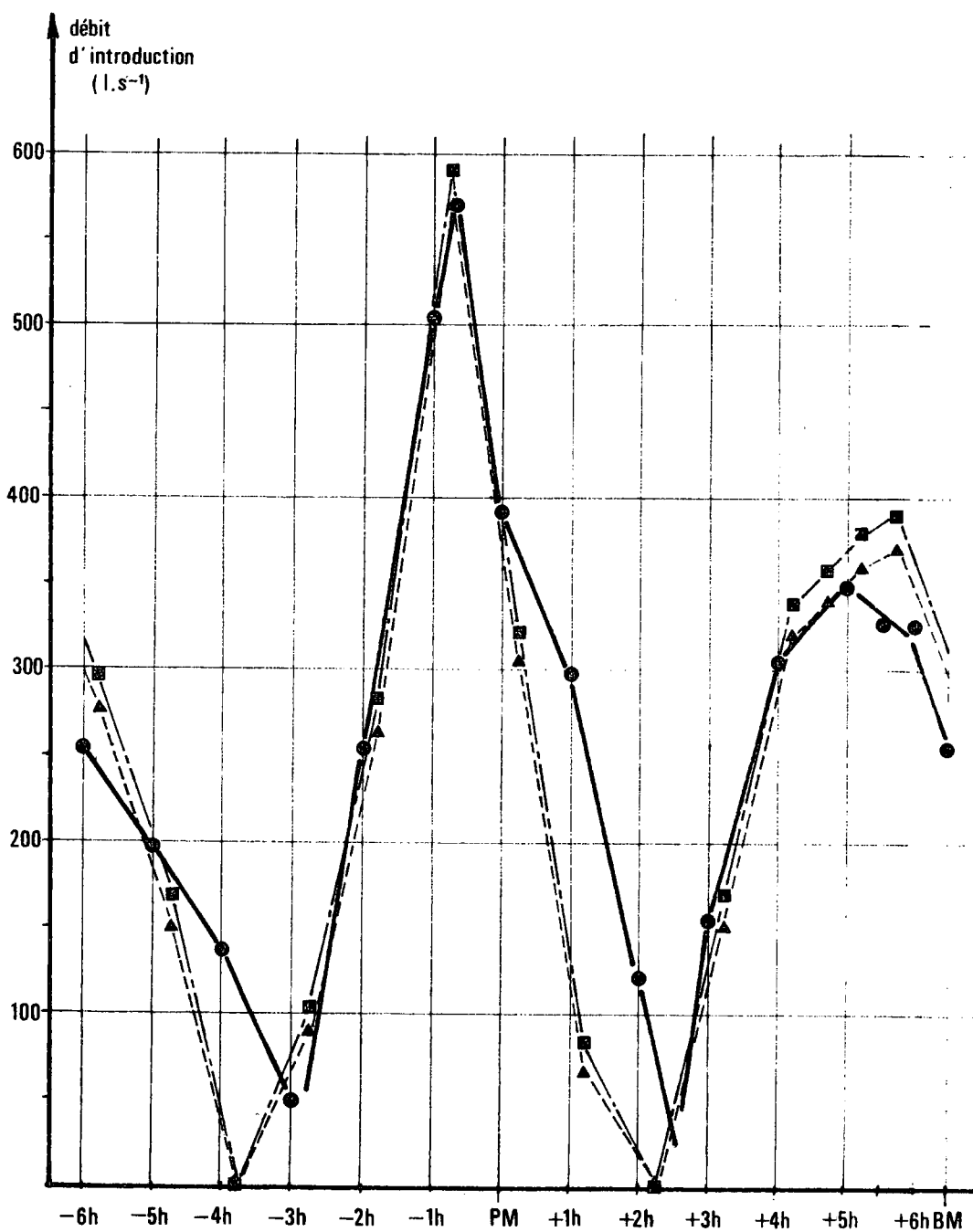
- débits calculés (résultats modèle LRH 265)

- débits introduits déduits

des courbes d'étalonnage par

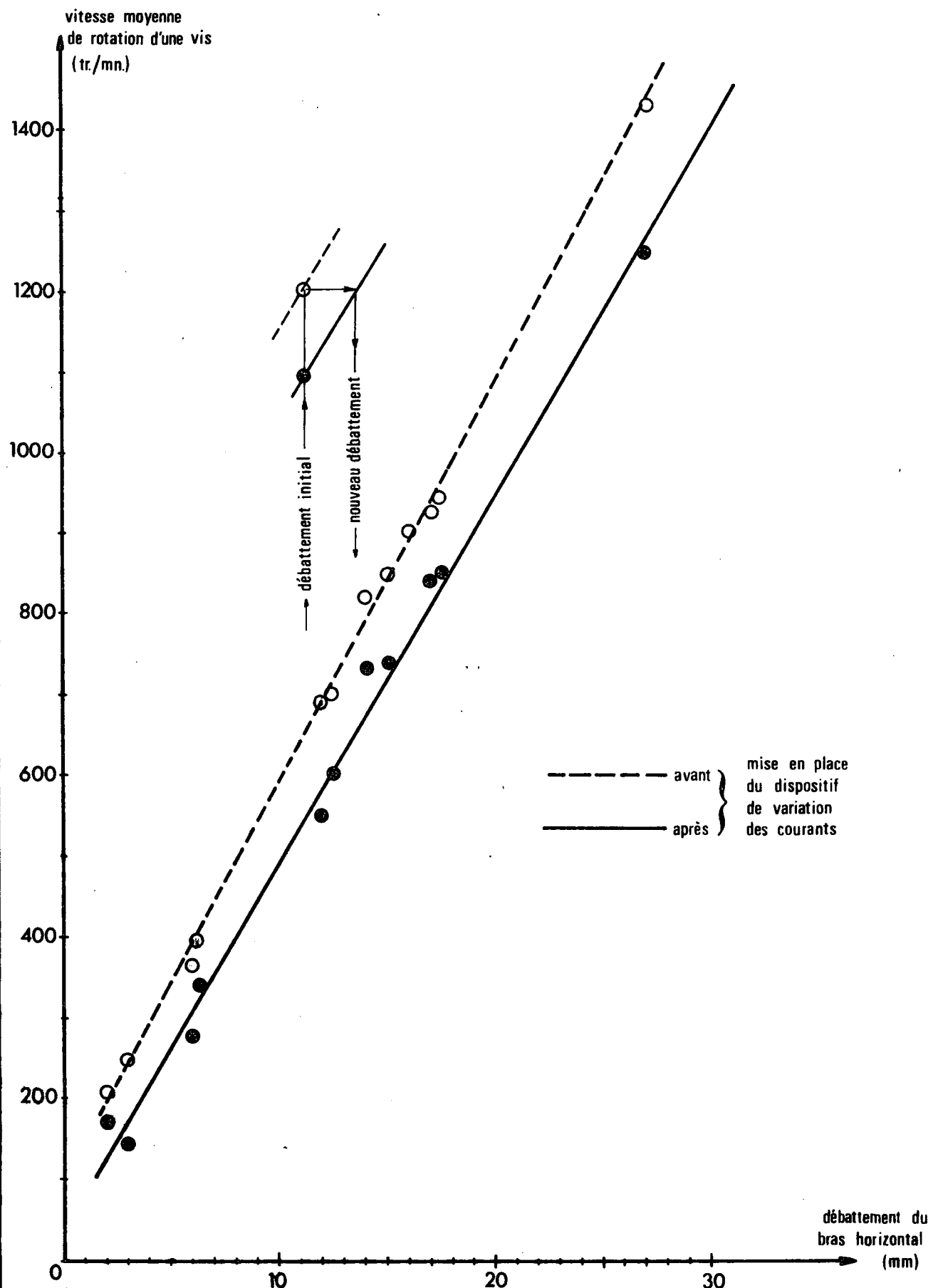
flotteurs lestés

moulinets





Etalonnage de la vitesse de rotation des vis





LABORATOIRE DE  
RECHERCHES  
HYDRAULIQUES  
D'INGENIEUR UNIVERSITÉS

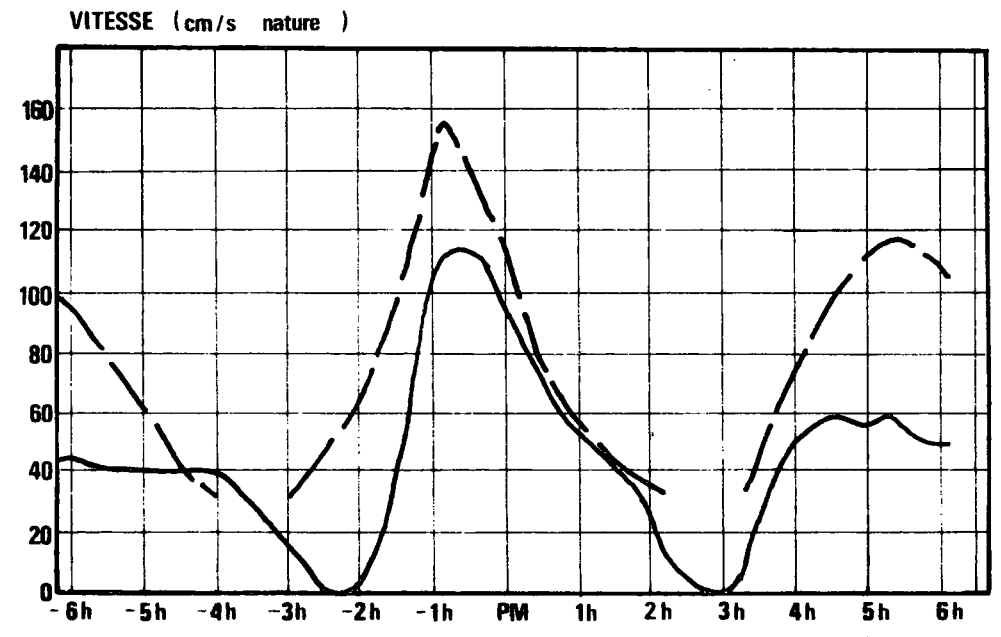
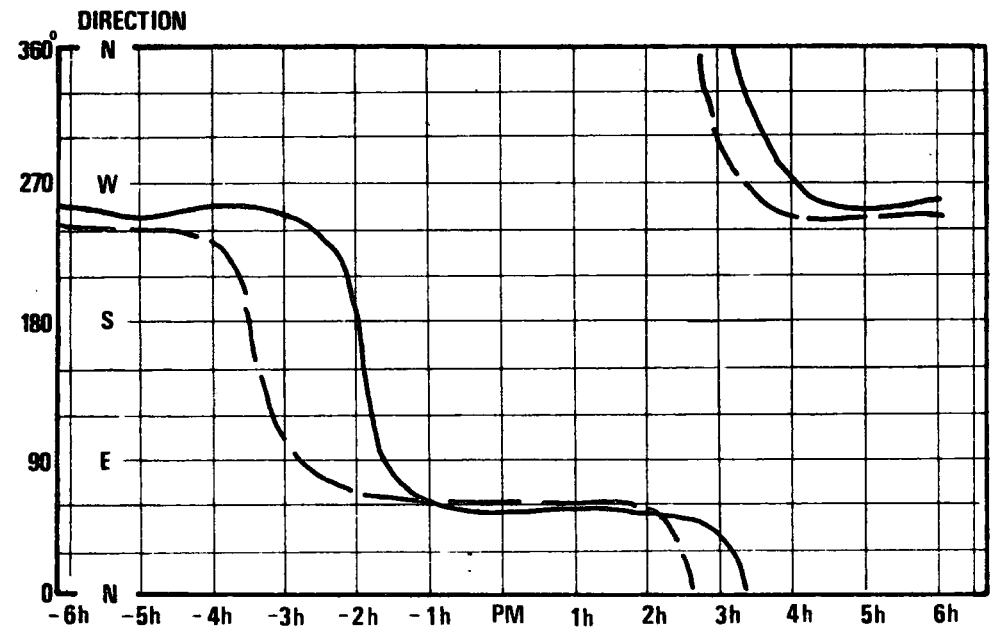
Modèle : 387 S PORT DE ZEEBRUGGE  
ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DE L'EVOLUTION DES FONDS

Figure : 8

Vitesses moyennes  
— nature  
- - - modèle

Comparaisons en direction et intensité des courants nature et modèle  
Marée de Vive Eau Moyenne

POINT DE MESURE N° 1A



LCH-1429-105

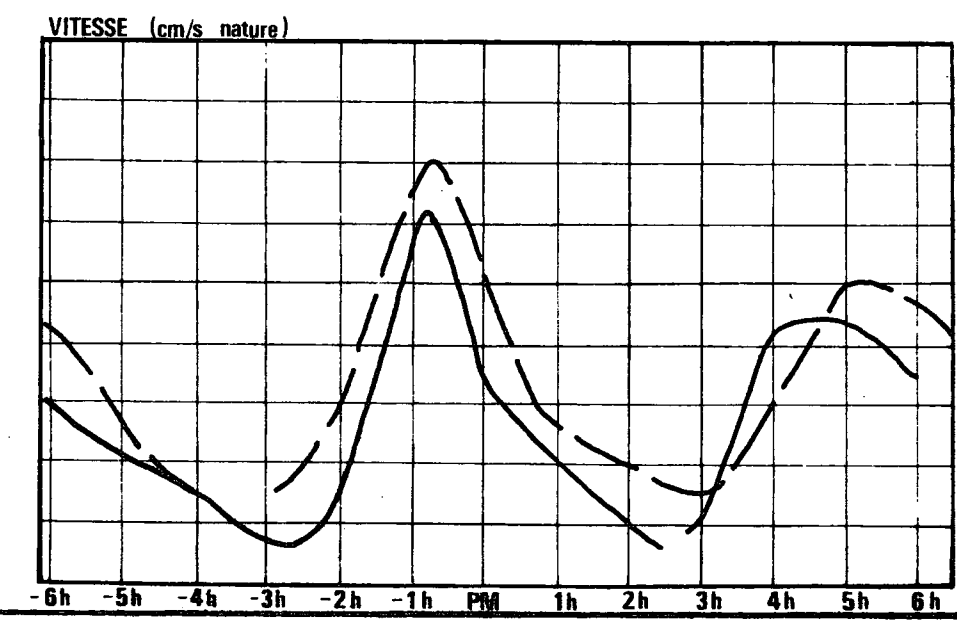
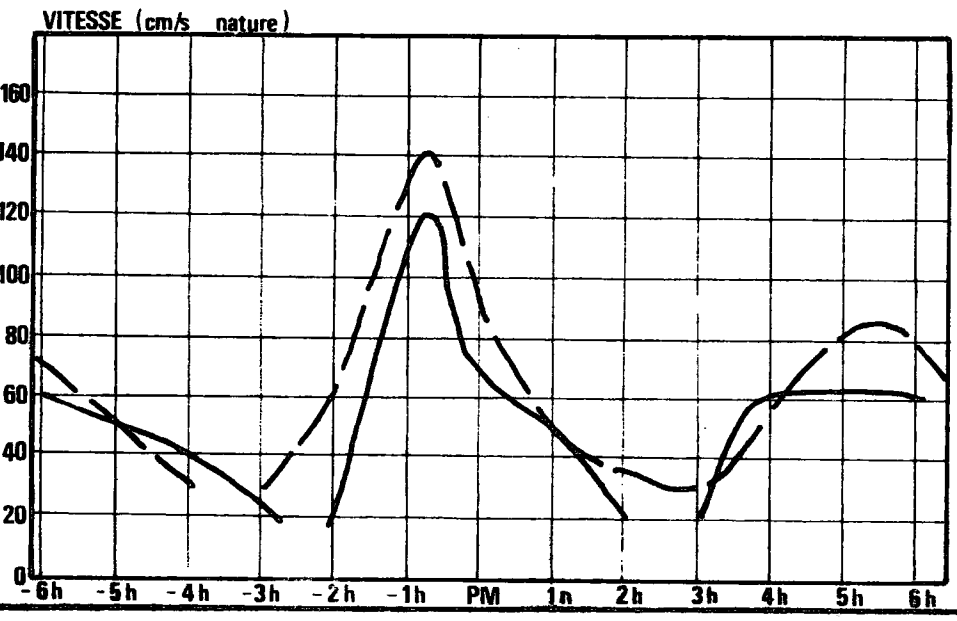
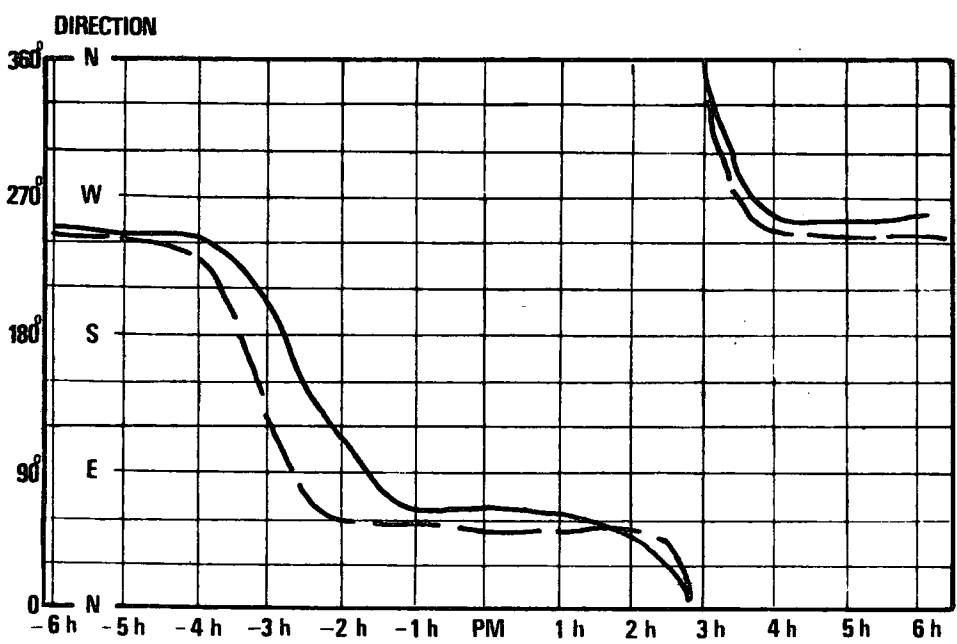
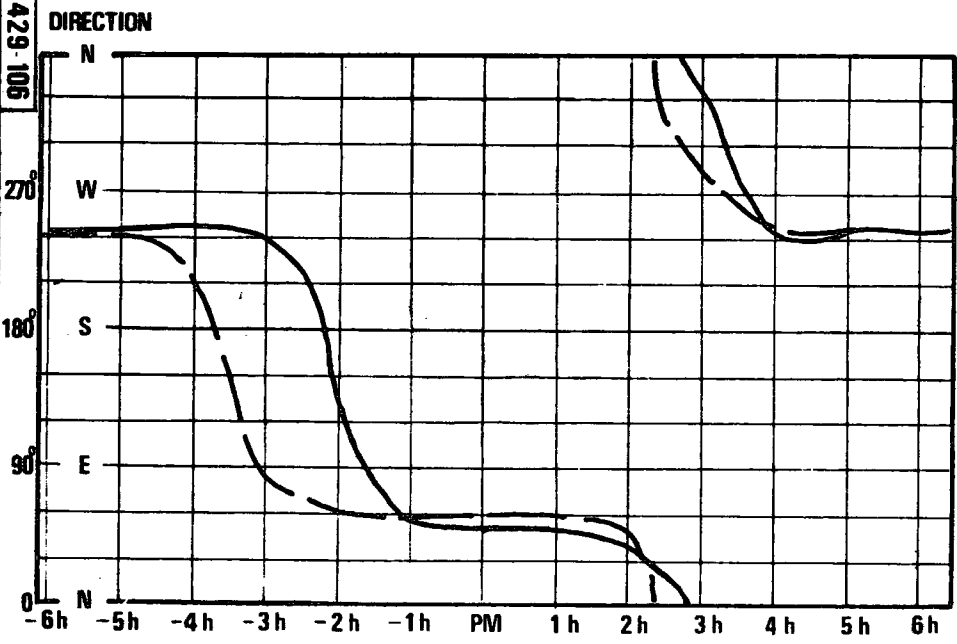
Vitesses moyennes  
— nature  
- - - modèle

Comparaisons en direction et intensité des courants nature et modèle

POINT DE MESURE N° 2B

POINT DE MESURE N° 3B

LCHE-1429-106

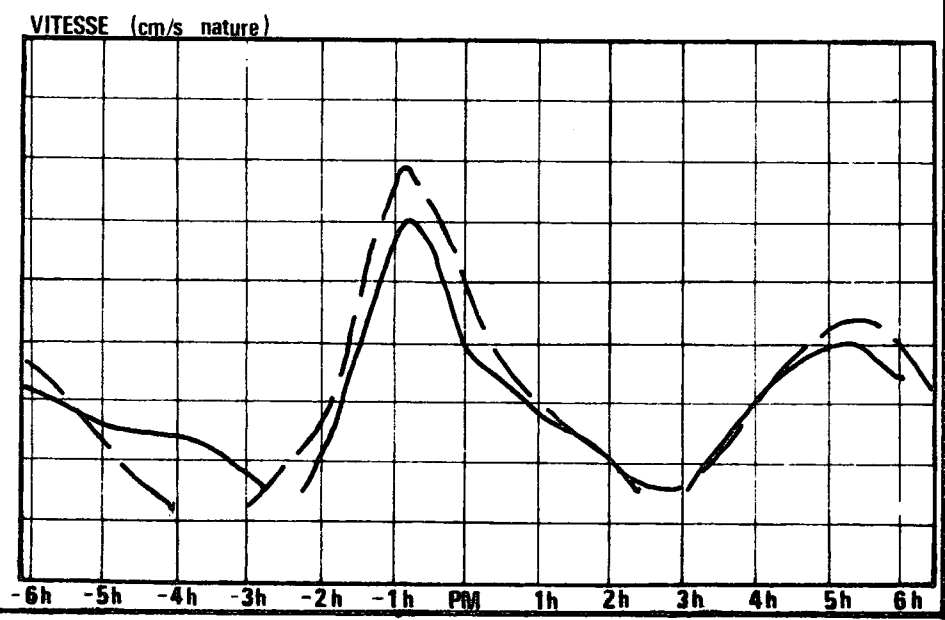
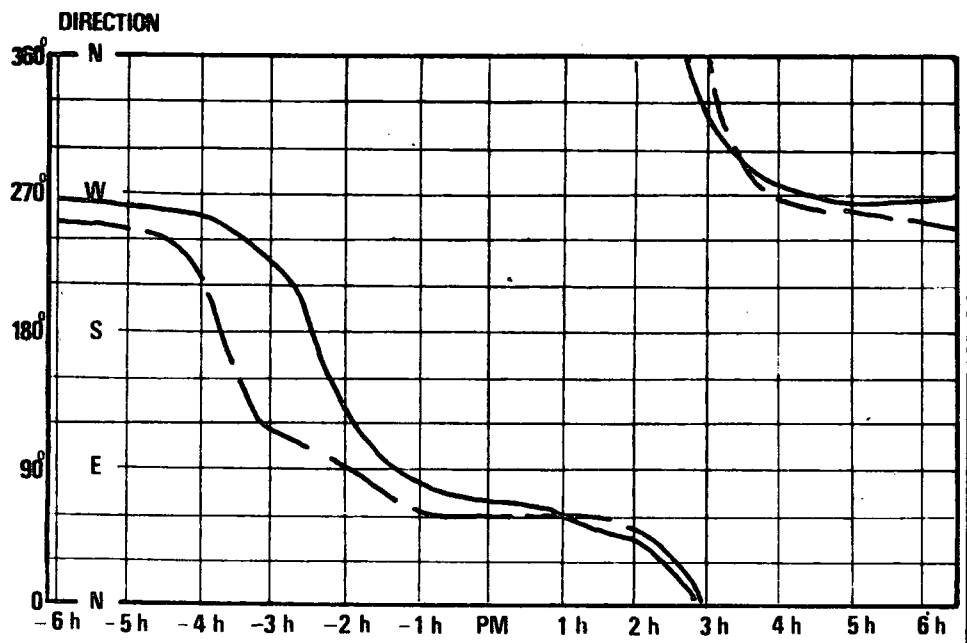




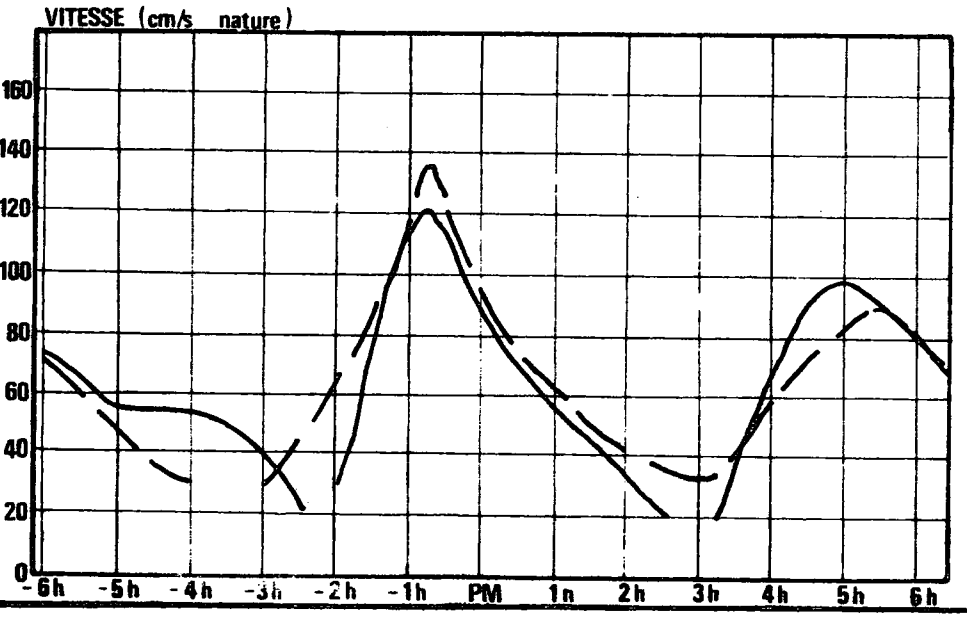
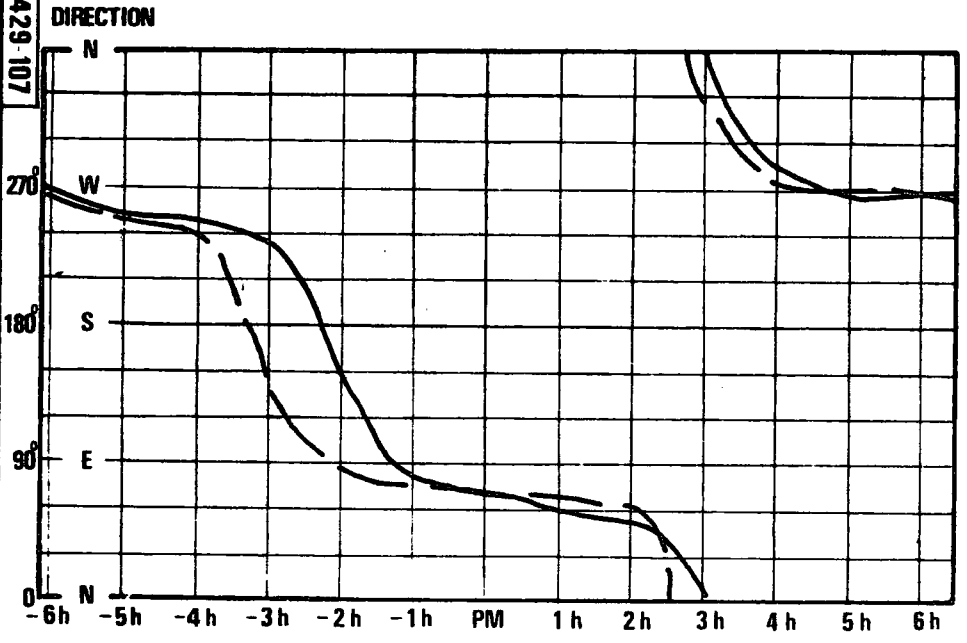
Vitesses moyennes  
 — nature  
 - - - modèle

Comparaisons en direction et intensité des courants nature et modèle

POINT DE MESURE N° 5 B



POINT DE MESURE N° 4 B



LCHE-1429-107



LABORATOIRE DE  
RECHERCHES  
HYDRAULIQUES  
D'OSGEMUND, ANVERS

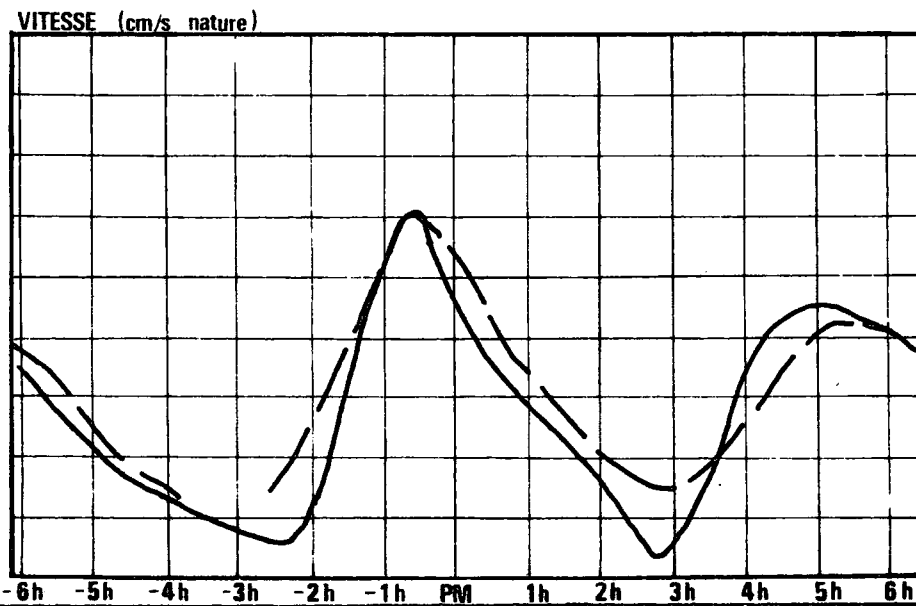
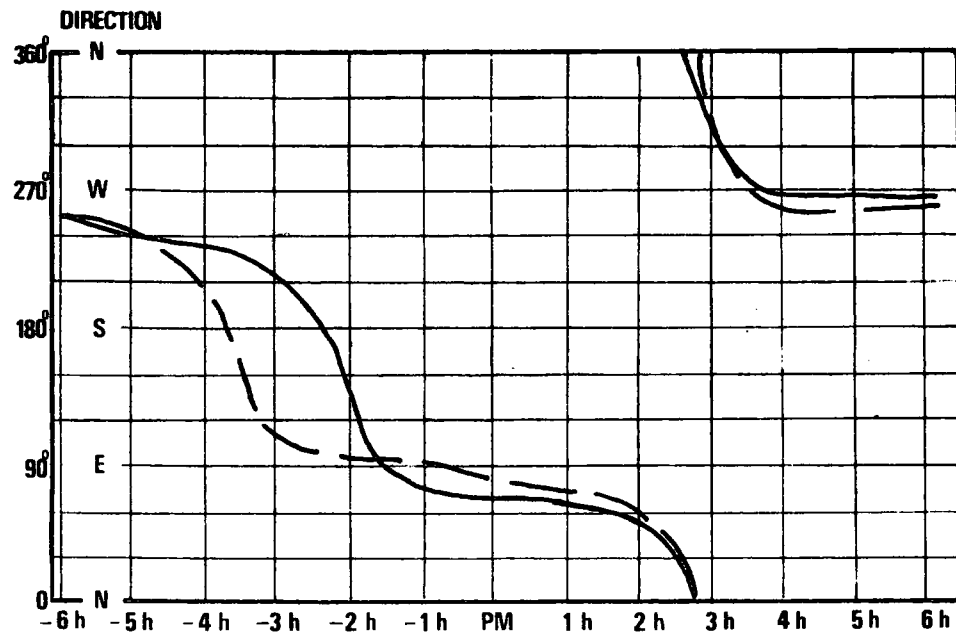
Modèle : 387 S  
ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DE L'EVOLUTION DES FONDS  
PORT DE ZEEBRUGGE

Figure : 11

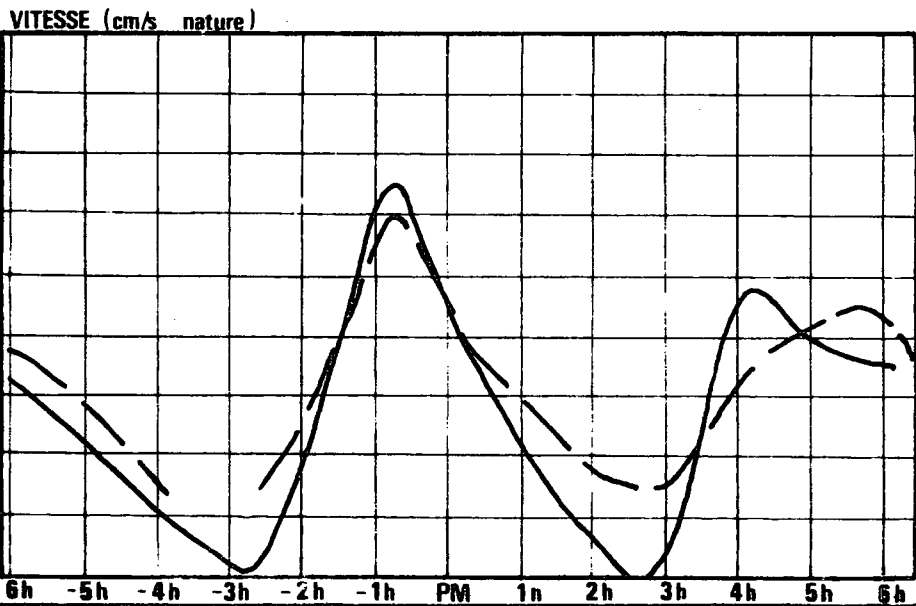
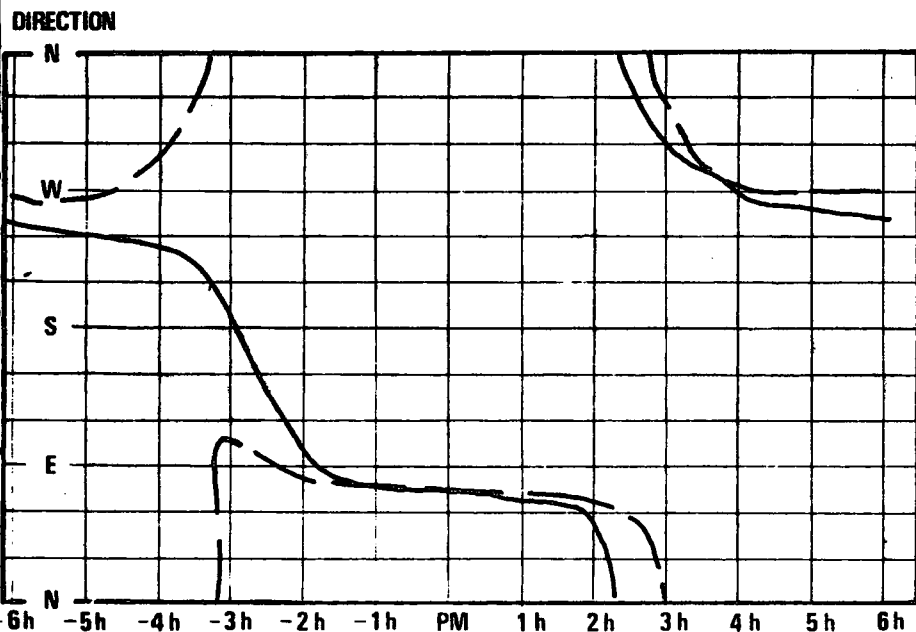
Vitesses moyennes  
— nature  
- - - modèle

Comparaisons en direction et intensité des courants nature et modèle  
Marée de Vive Eau Moyenne

POINT DE MESURE N° 7A



POINT DE MESURE N° 6A

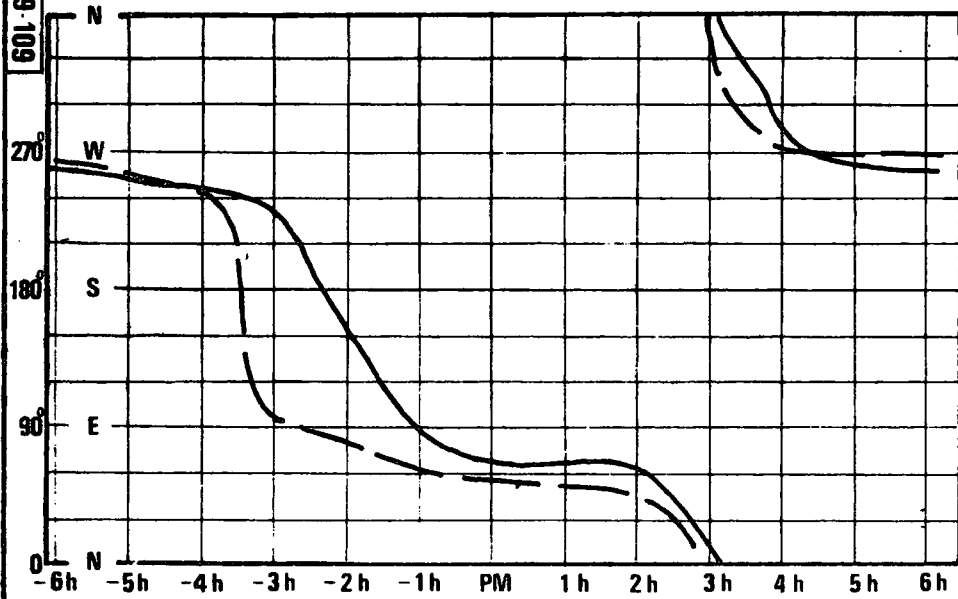


ICHF-1429-108

LCHE-1429-109

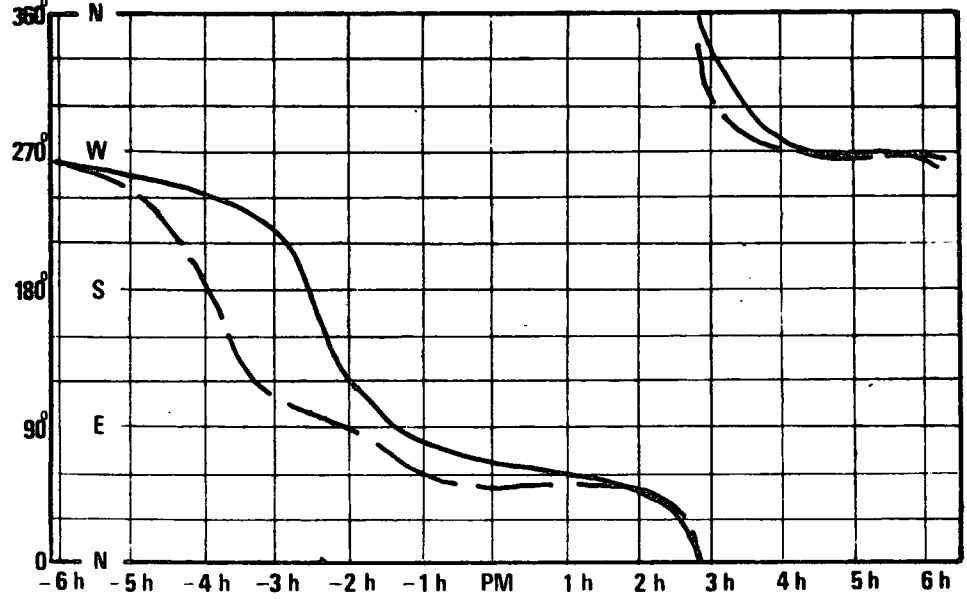
POINT DE MESURE N° 8 A

DIRECTION

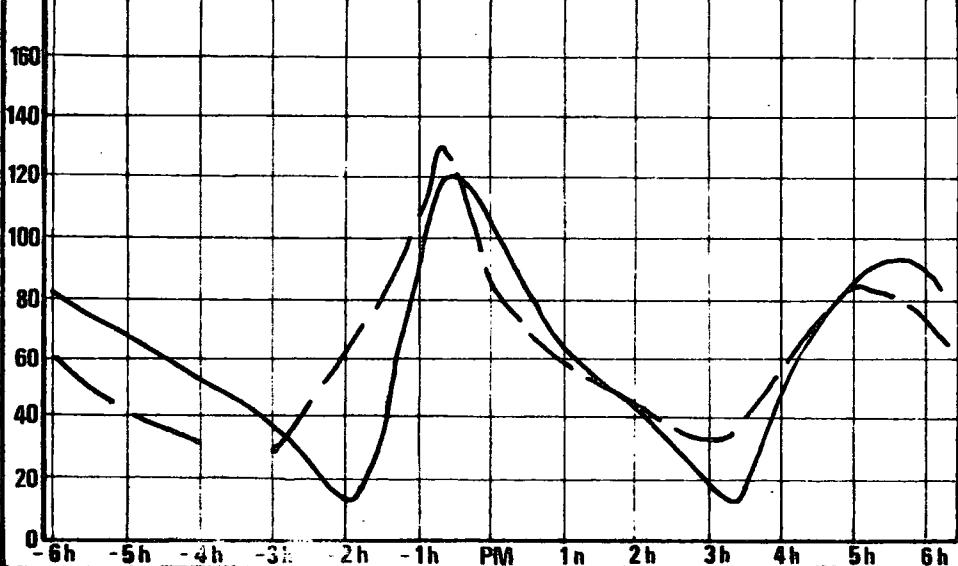


POINT DE MESURE N° 9 A

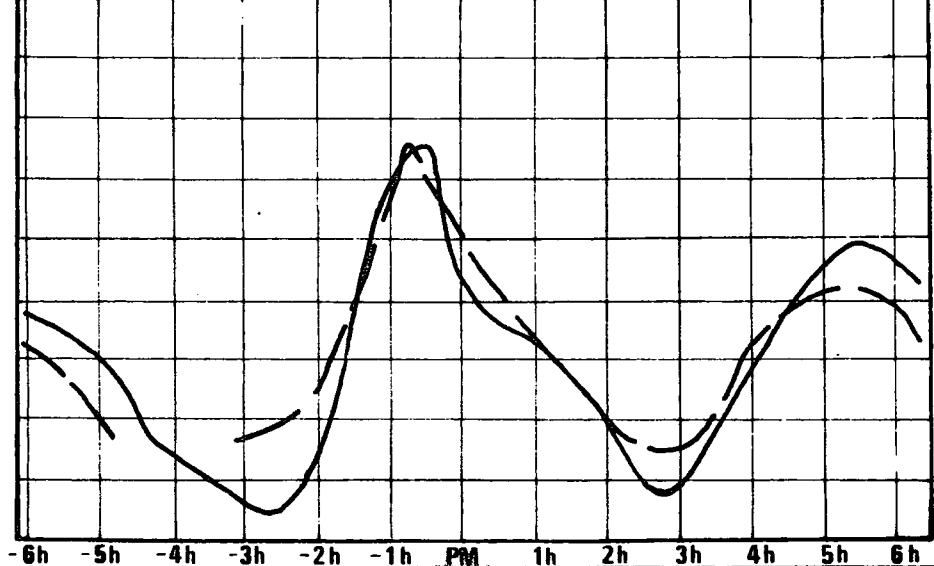
DIRECTION



VITESSE (cm/s nature)



VITESSE (cm/s nature)



LABORATOIRE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES Dourgnouli AMIENS

Modèle : 387 S  
PORT DE ZEEBRUGGE  
ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DE L'EVOLUTION DES FONDs

Figure : 12

Viesses moyennes  
— nature  
--- modèle

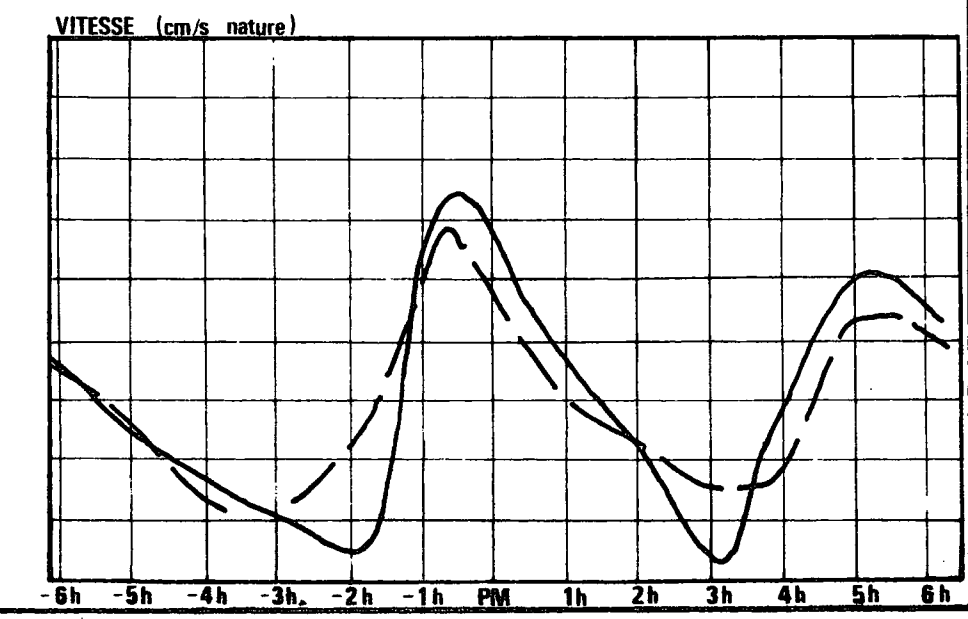
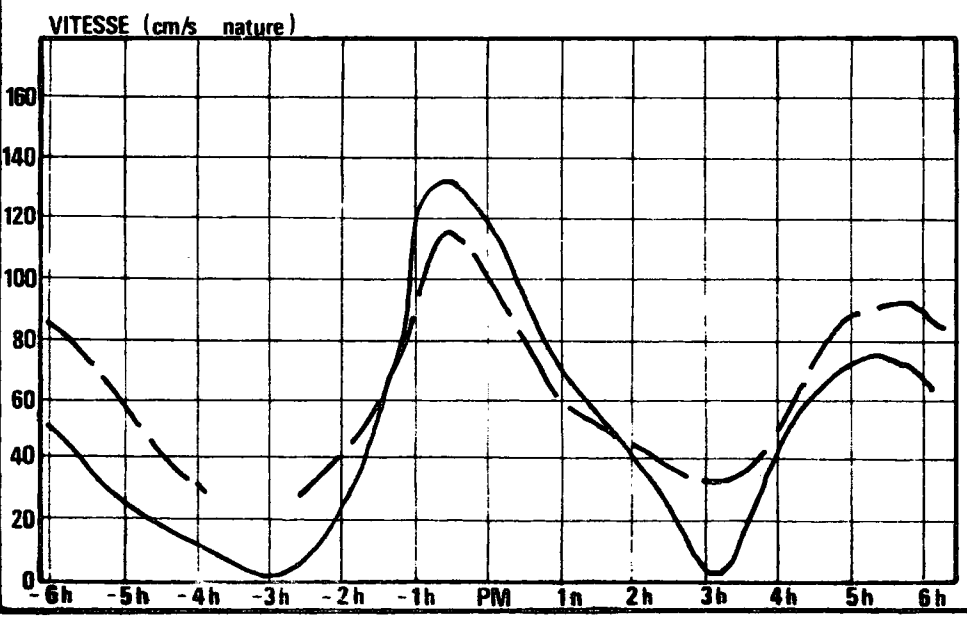
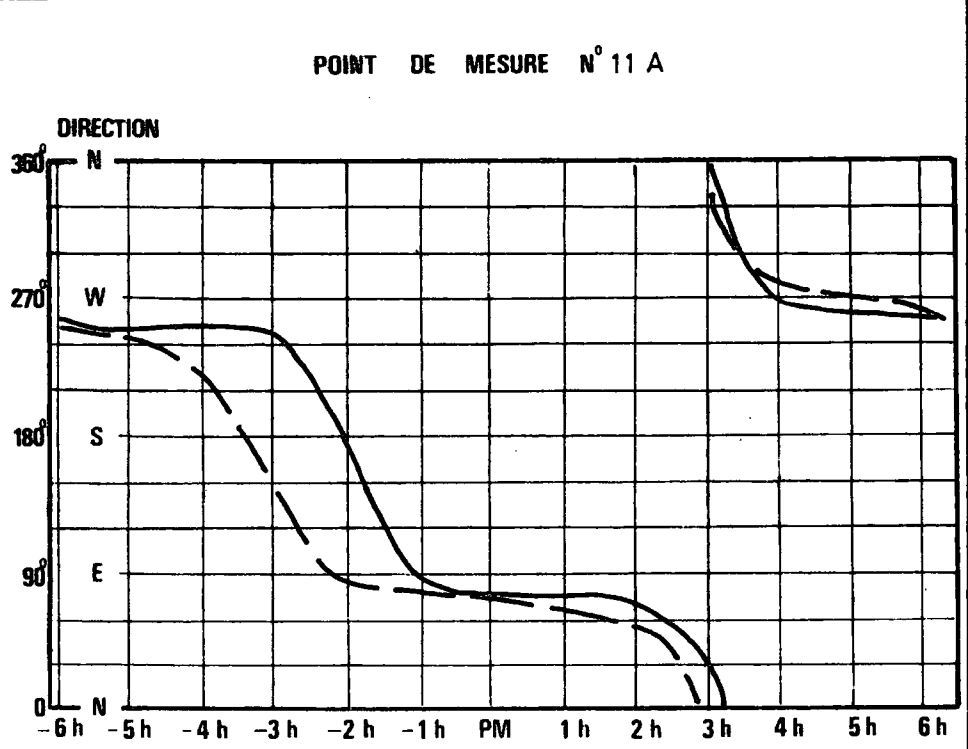
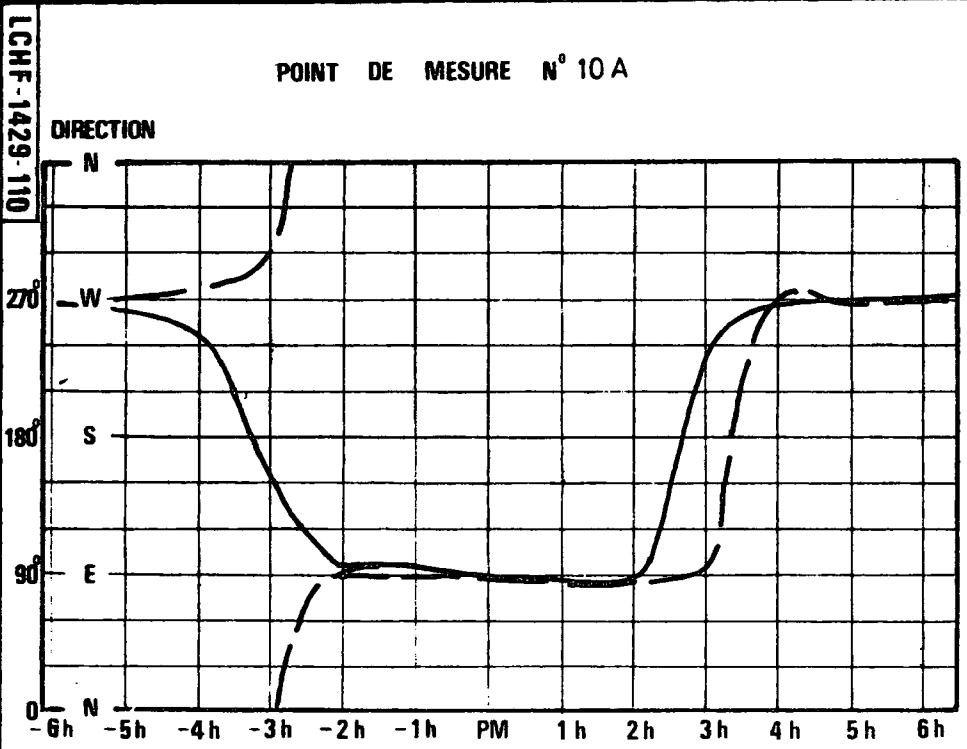
Comparaisons en direction et intensité des courants nature et modèle  
Marée de Vive Eau Moyenne

Vitesses moyennes  
 — nature  
 - - - modèle

Comparaisons en direction et intensité des courants nature et modèle  
 Marée de Vive Eau Moyenne

POINT DE MESURE N° 10 A

POINT DE MESURE N° 11 A





LABORATOIRE DE  
RECHERCHES  
HYDRAULIQUES  
D'INGENIEUR CIVILS

Modèle : 387 S  
PORT DE ZEEBRUGGE  
ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DE L'EVOLUTION DES FONDS

Figure : 14

--- Viesses moyennes  
— nature  
- - - modèle

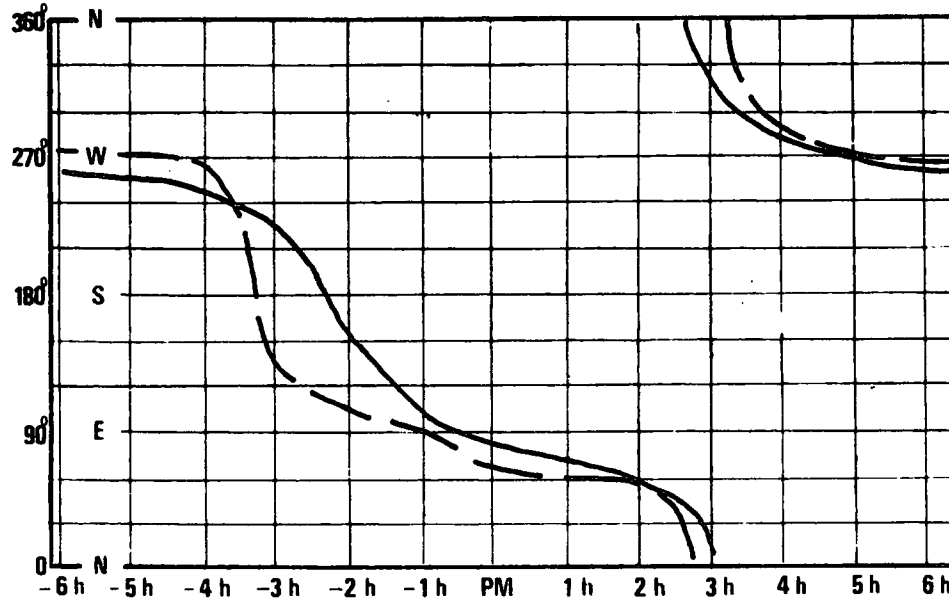
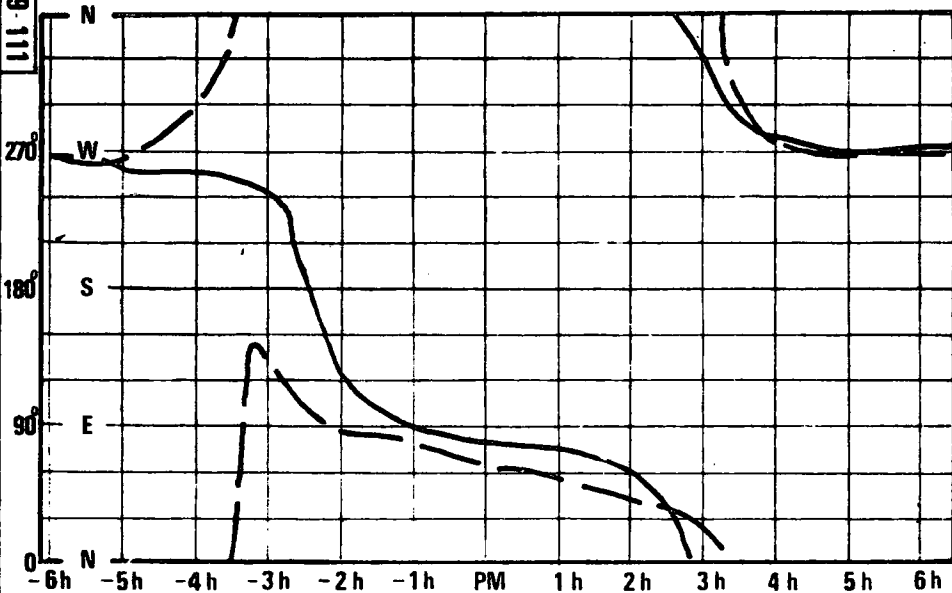
Comparaisons en direction et intensité, des courants nature et modèle

POINT DE MESURE N° 12 A

POINT DE MESURE N° 13 A

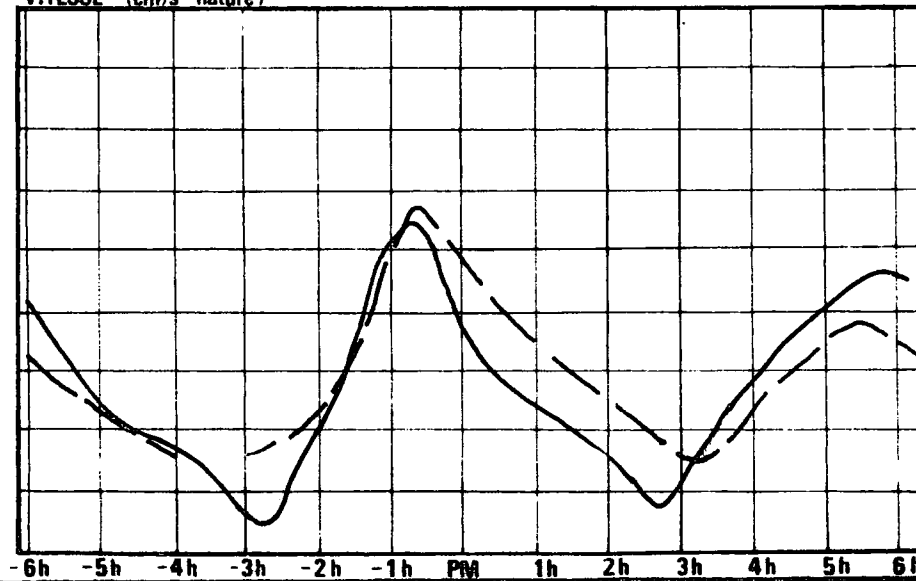
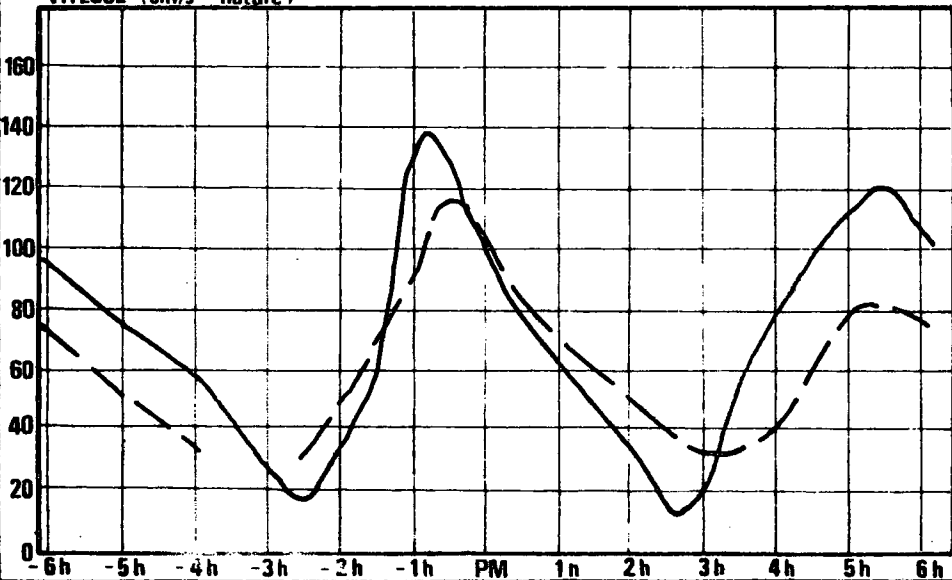
DIRECTION

DIRECTION



VITESSE (cm/s nature)

VITESSE (cm/s nature)



Viesses moyennes  
— nature  
--- modèle

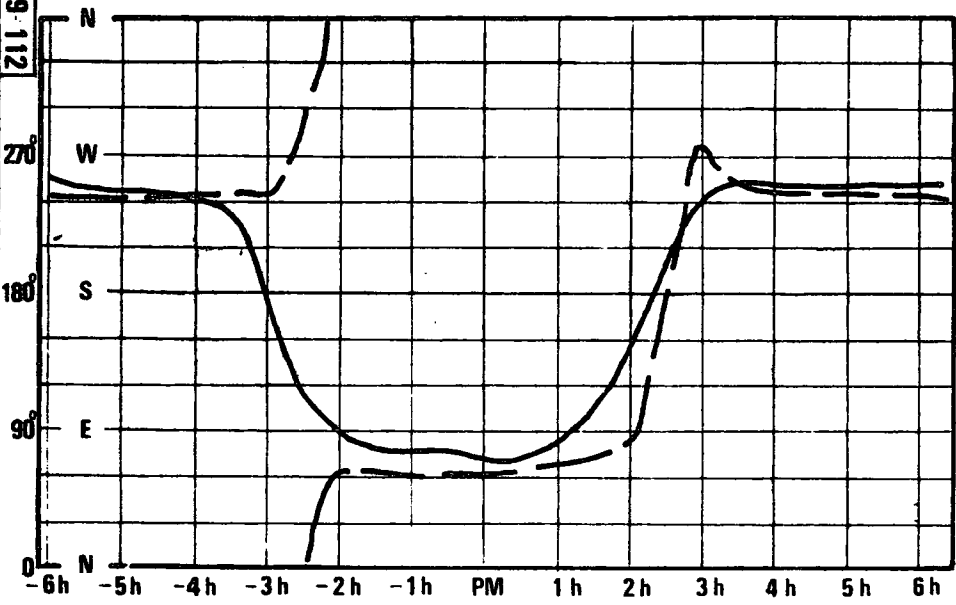
Comparaisons en direction et intensité des courants nature et modèle

POINT DE MESURE N° 14 B

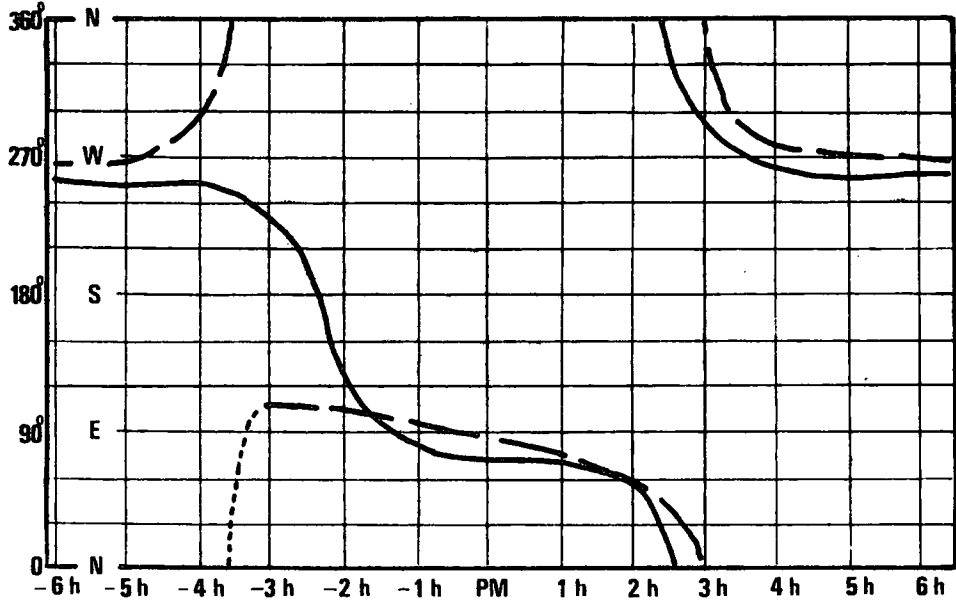
POINT DE MESURE N° 15 B

LCHF-1429-112

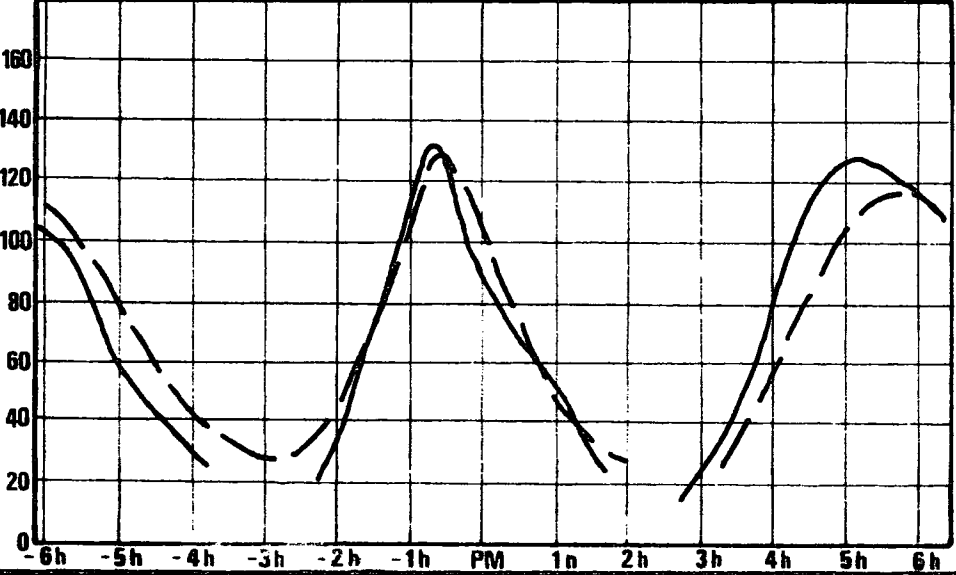
DIRECTION



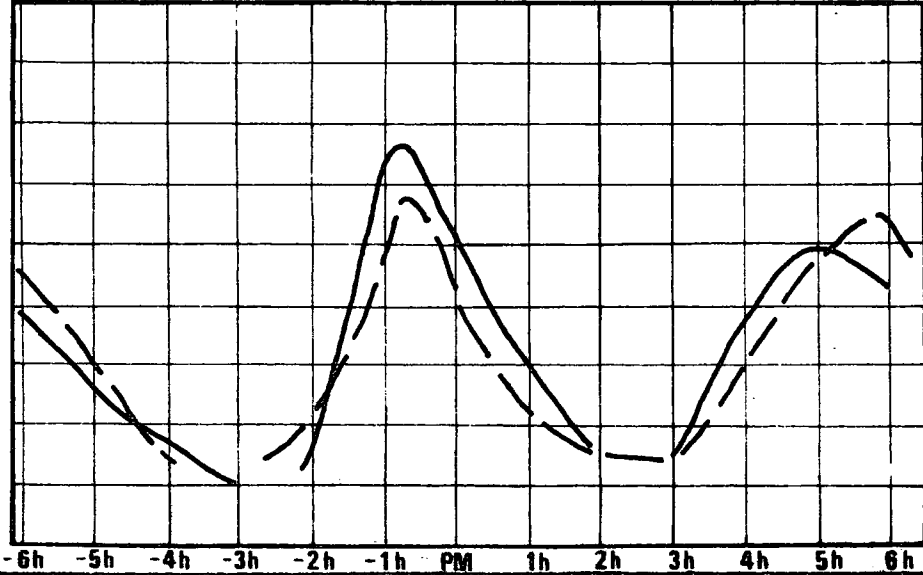
DIRECTION



VITESSE (cm/s nature)



VITESSE (cm/s nature)





LABORATOIRE DE  
RECHERCHES  
HYDRAULIQUES  
D'OSERHOUL' ARRIS

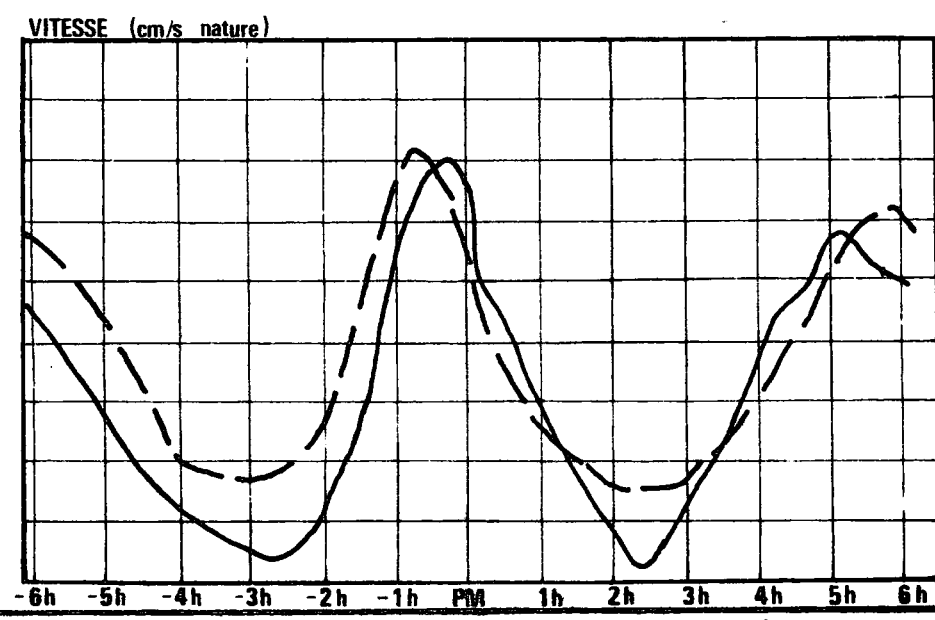
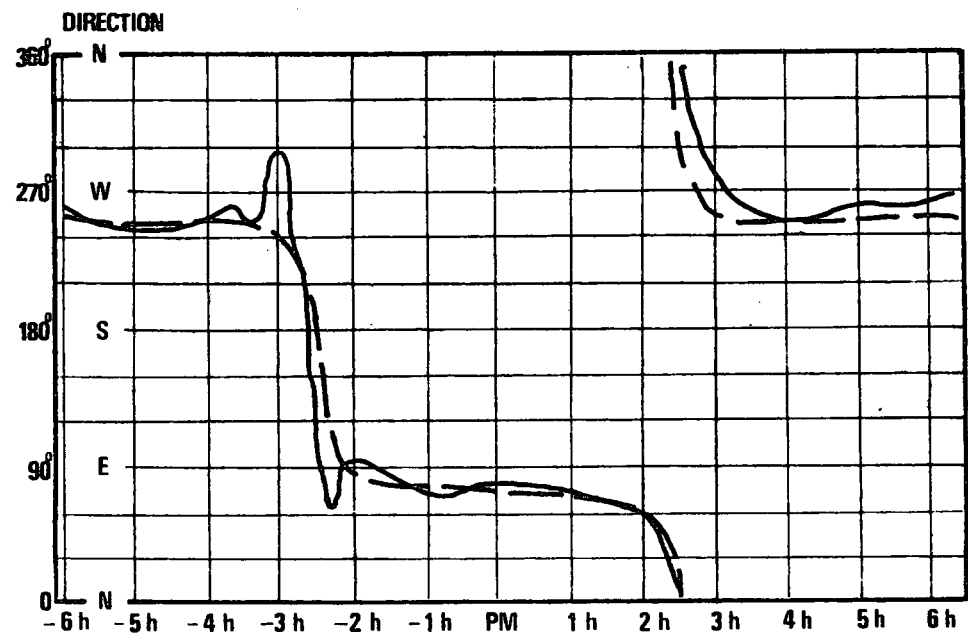
Modèle : 387 S  
ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DE L'EVOLUTION DES FONDS  
PORT DE ZEEBRUGGE

Figure : 16

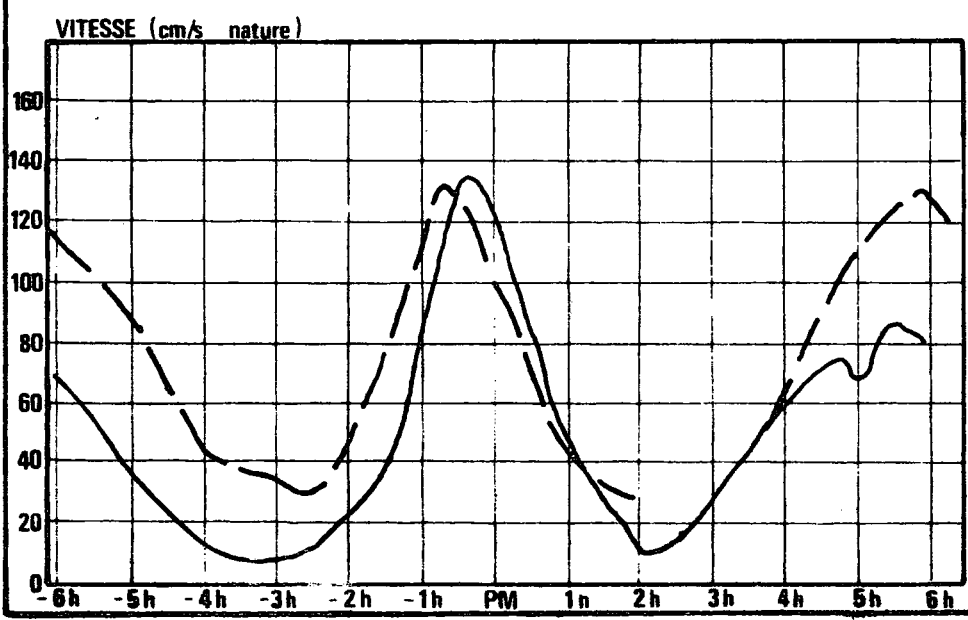
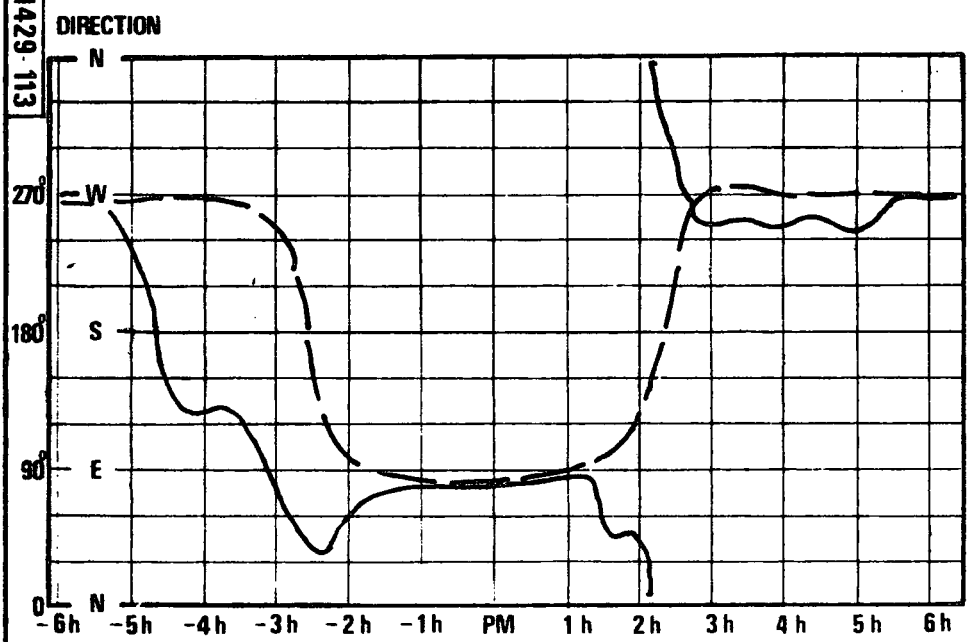
Vitesses moyennes  
--- nature  
- - - modèle

Comparaisons en direction et intensité des courants nature et modèle  
Marée de Vive Eau Moyenne

POINT DE MESURE N° 17 A

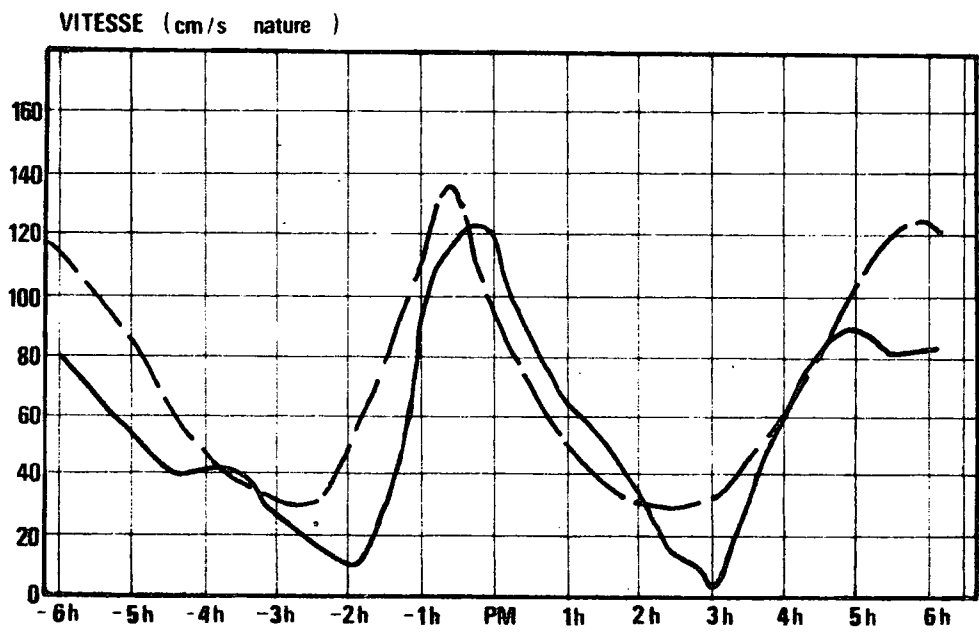
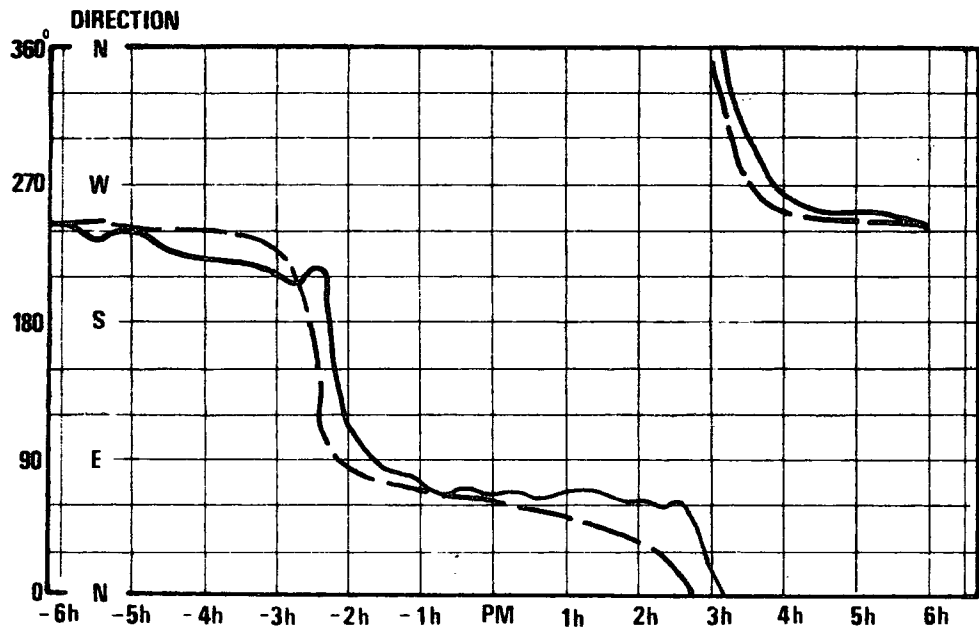


POINT DE MESURE N° 16 A



LCMF-1429-113

POINT DE MESURE N° 18 A



LABORATOIRE DE  
RECHERCHES  
HYDRAULIQUES  
DIDEROT

Modèle: 387 S  
PORT DE ZEEBRUGGE  
ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DE L'EVOLUTION DES FONDS

Figure: 17

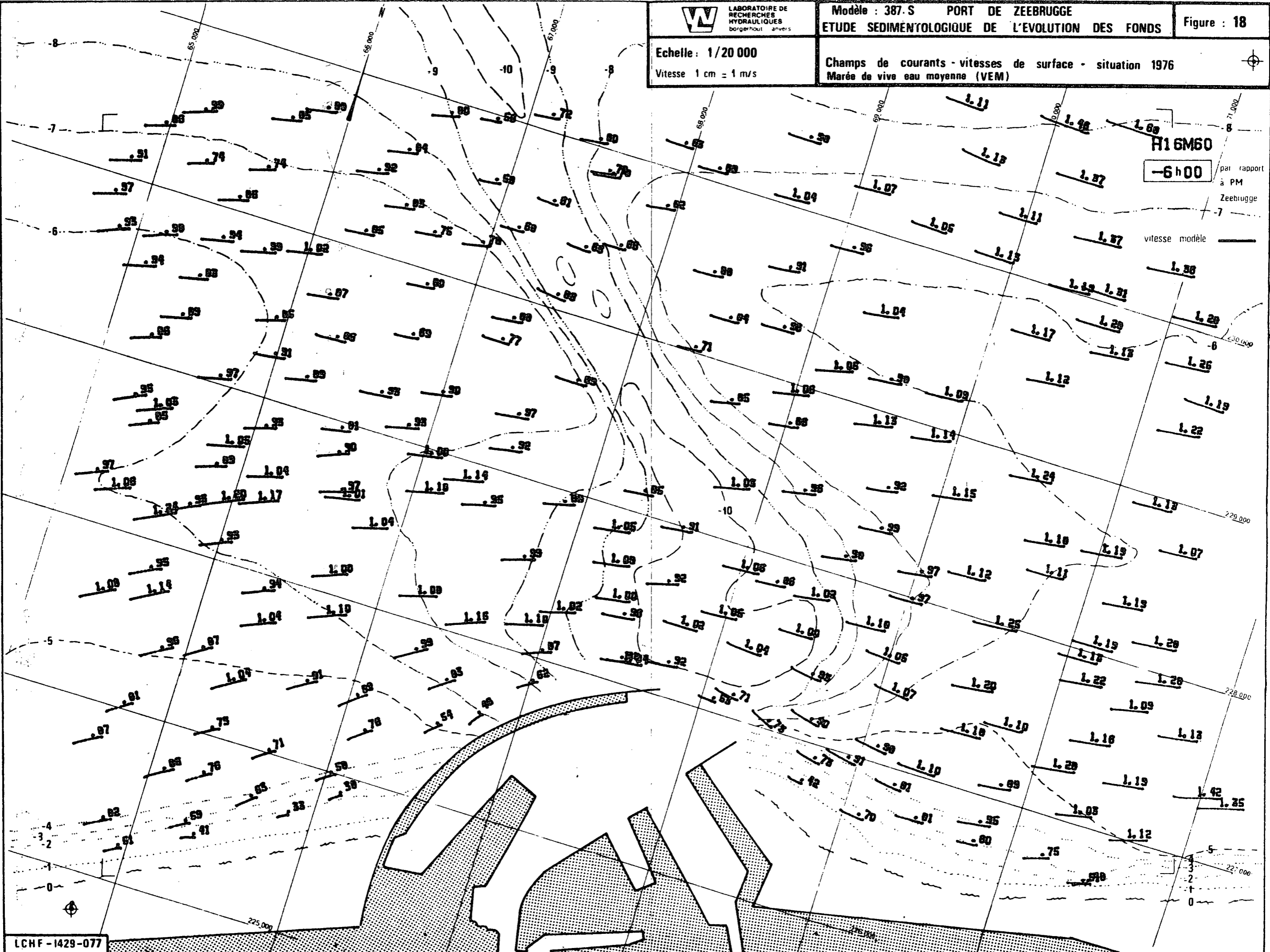
Viesses moyennes  
— nature  
- - - modèle

Comparaisons en direction et intensité des courants nature et modèle  
Marée de Vive Eau Moyenne



Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976  
Marée de vive eau moyenne (VEM)



R16M60

-6h00

par rapport à PM  
Zeebrugge

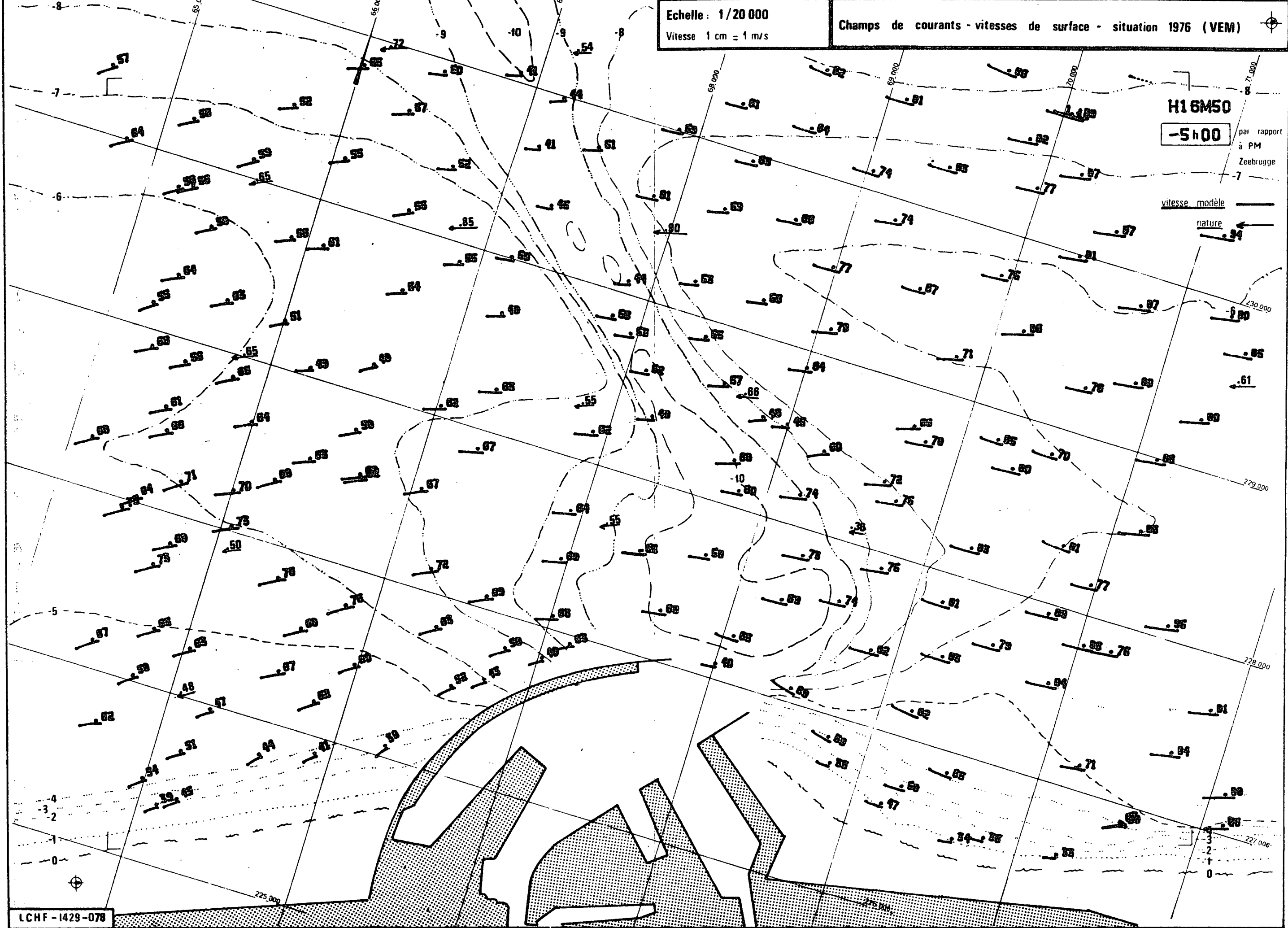
vitesse modèle



LABORATOIRE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES  
borgerhout anvers

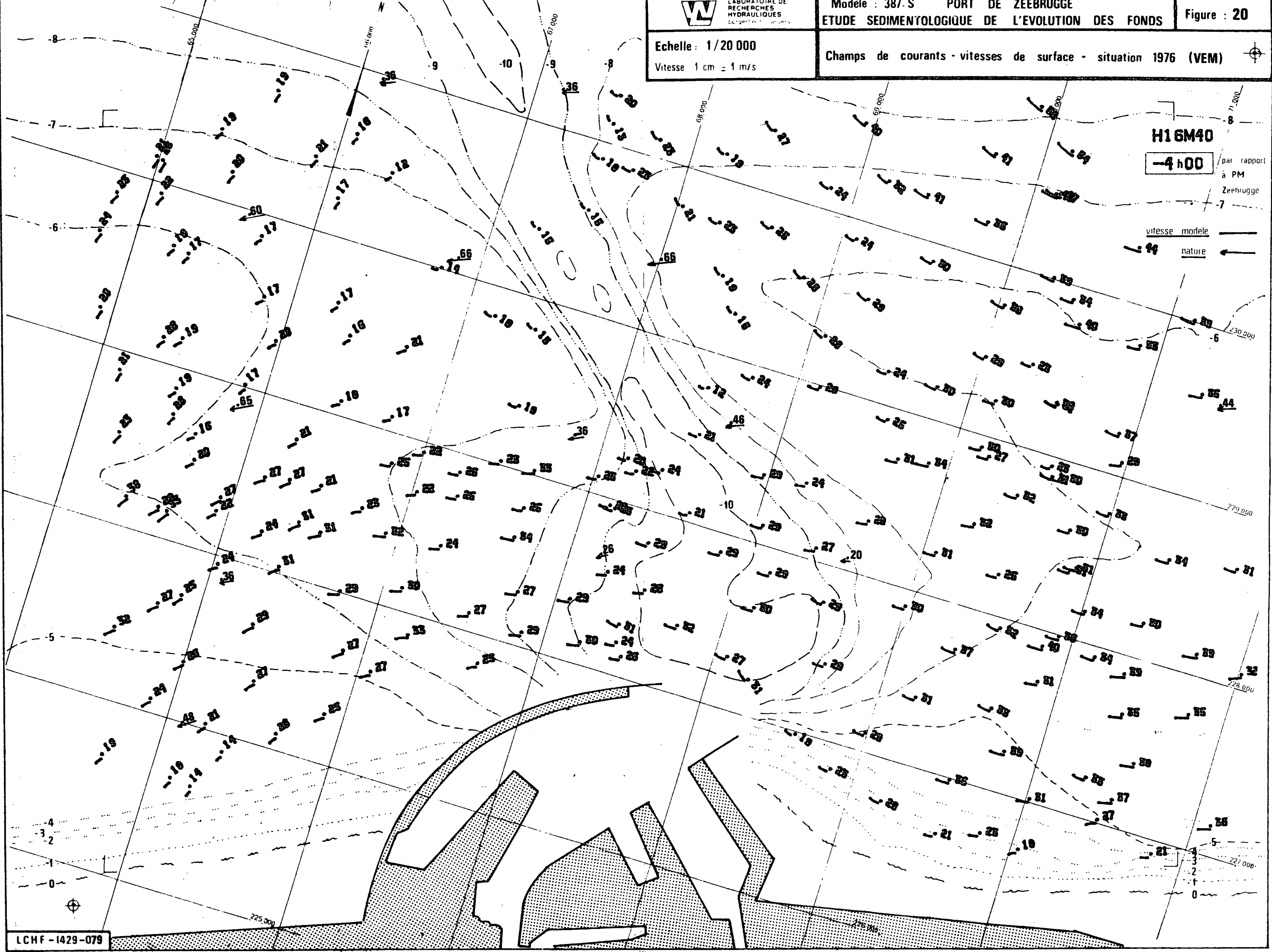
Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976 (VEM)



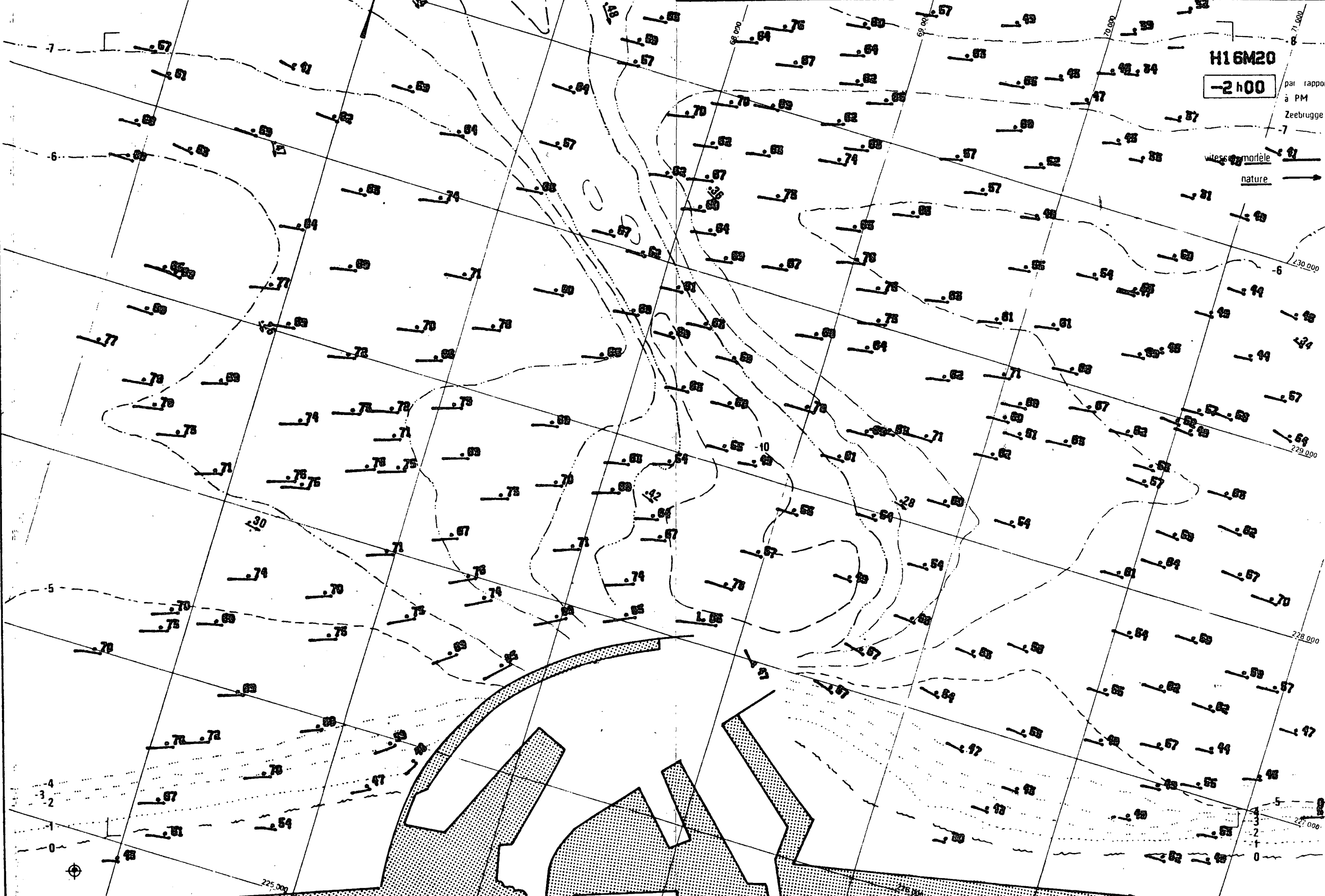
Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976 (VEM)



Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976 (VEM)



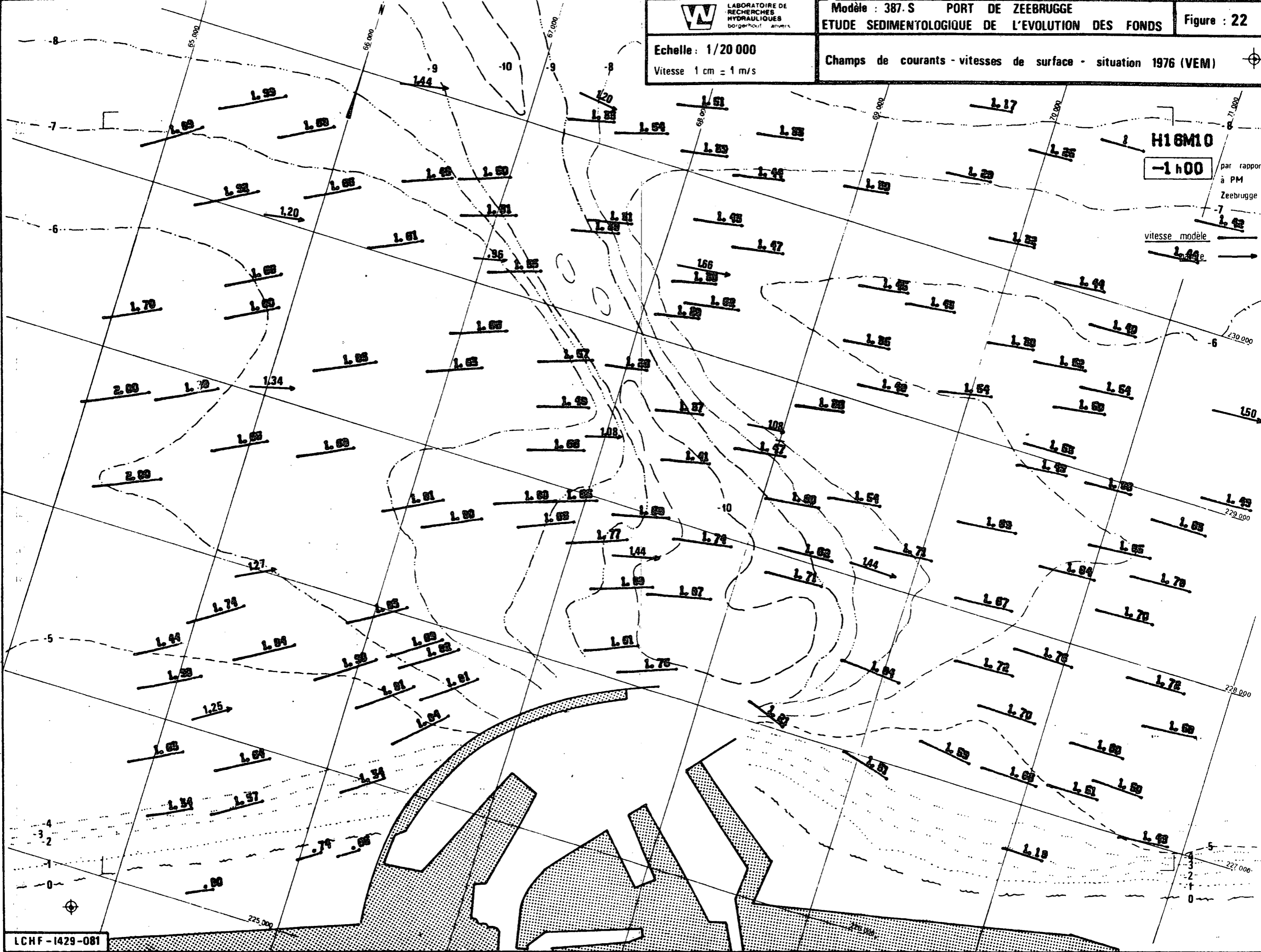


LABORATOIRE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES borgerhout anvers

Echelle : 1/20 000

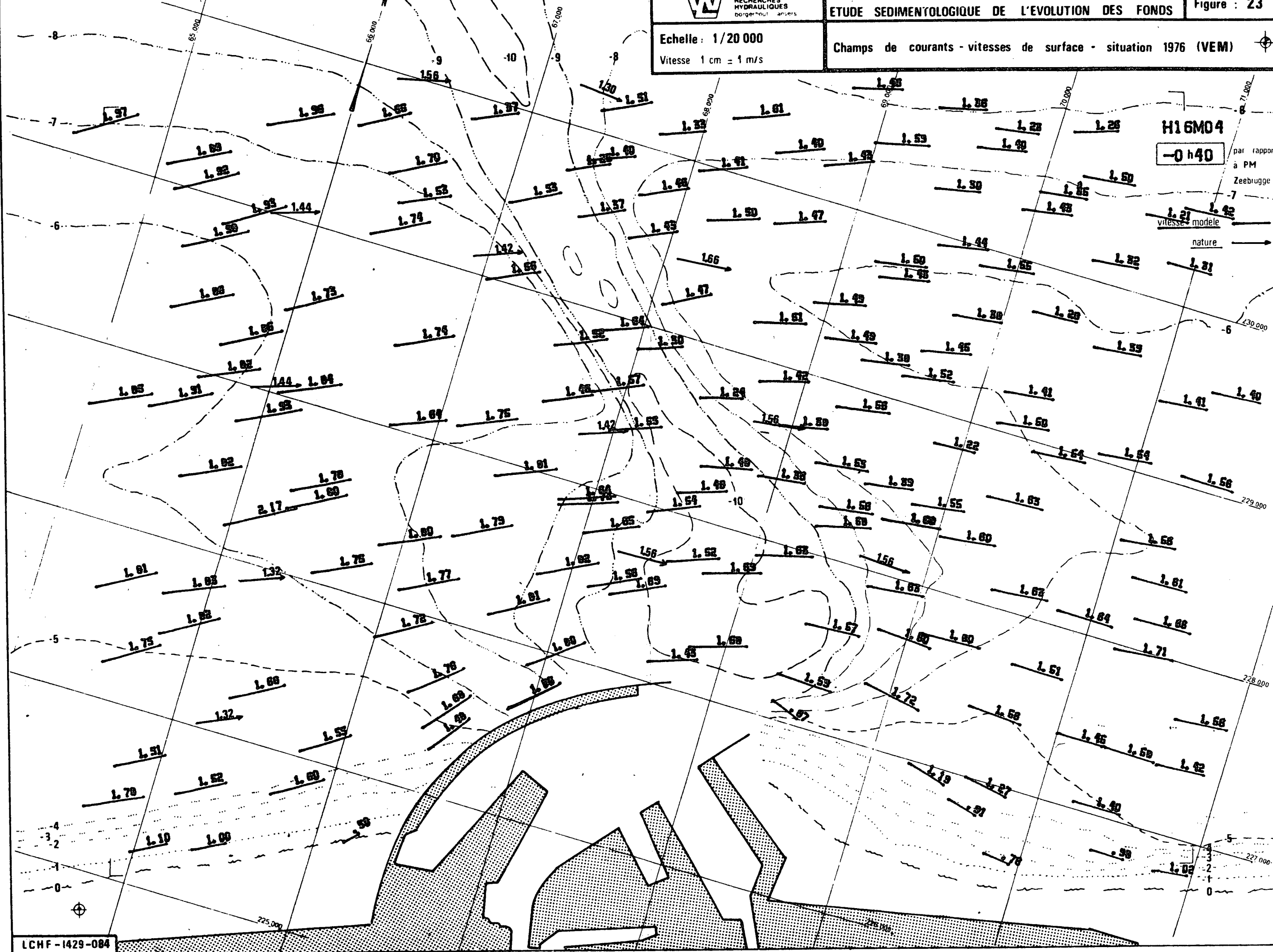
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976 (VEM)



Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976 (VEM)

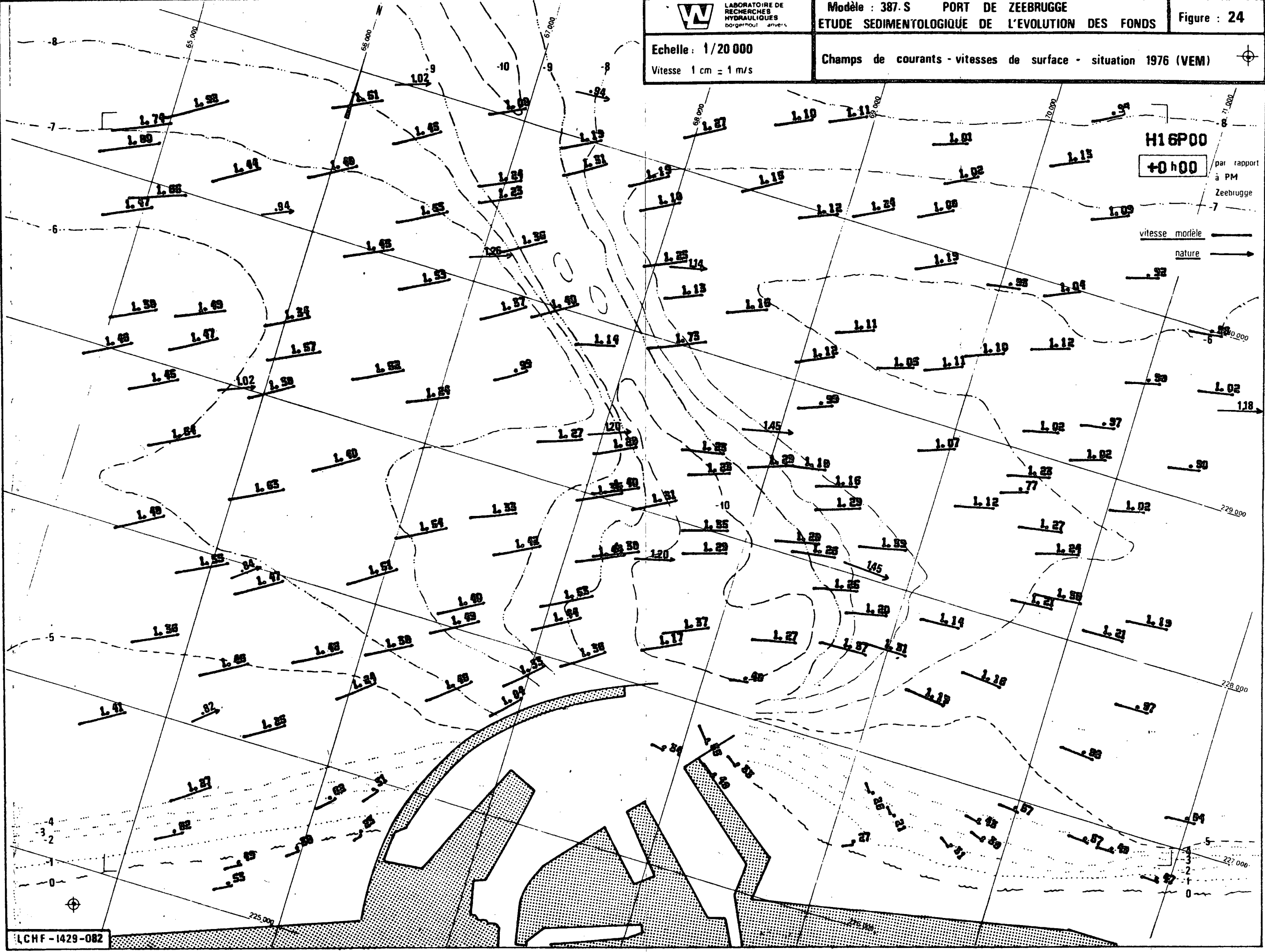




LABORATOIRE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES  
borgerhout anvers

Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976 (VEM)



H16P00  
+0h00 par rapport à PM Zeebrugge

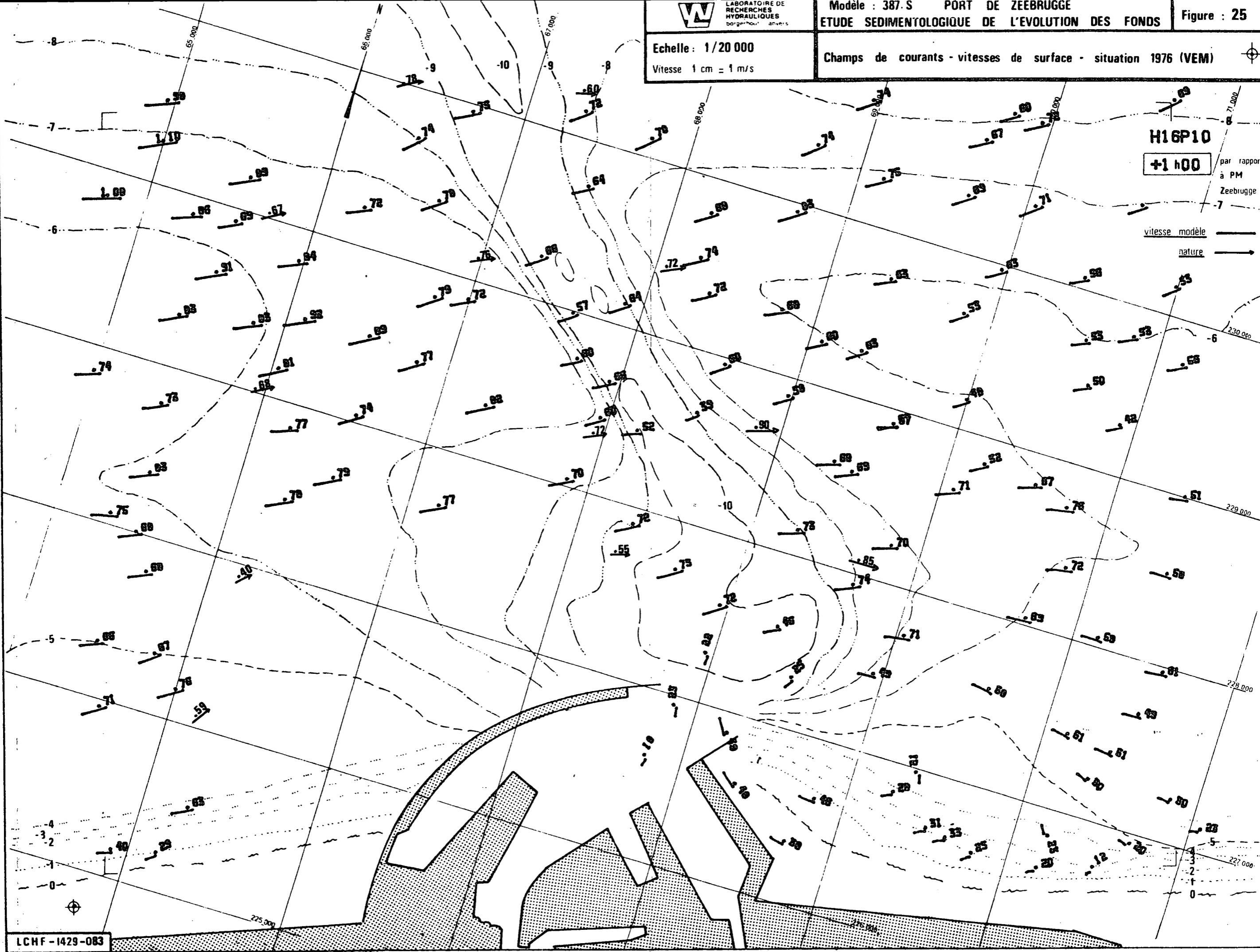
vitesse modèle  
nature



LABORATOIRE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES  
borgerhout anvers

Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976 (VEM)



H16P10

+1 h00

par rapport à PM Zeebrugge

vitesse modèle

nature



Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976 (VEM)

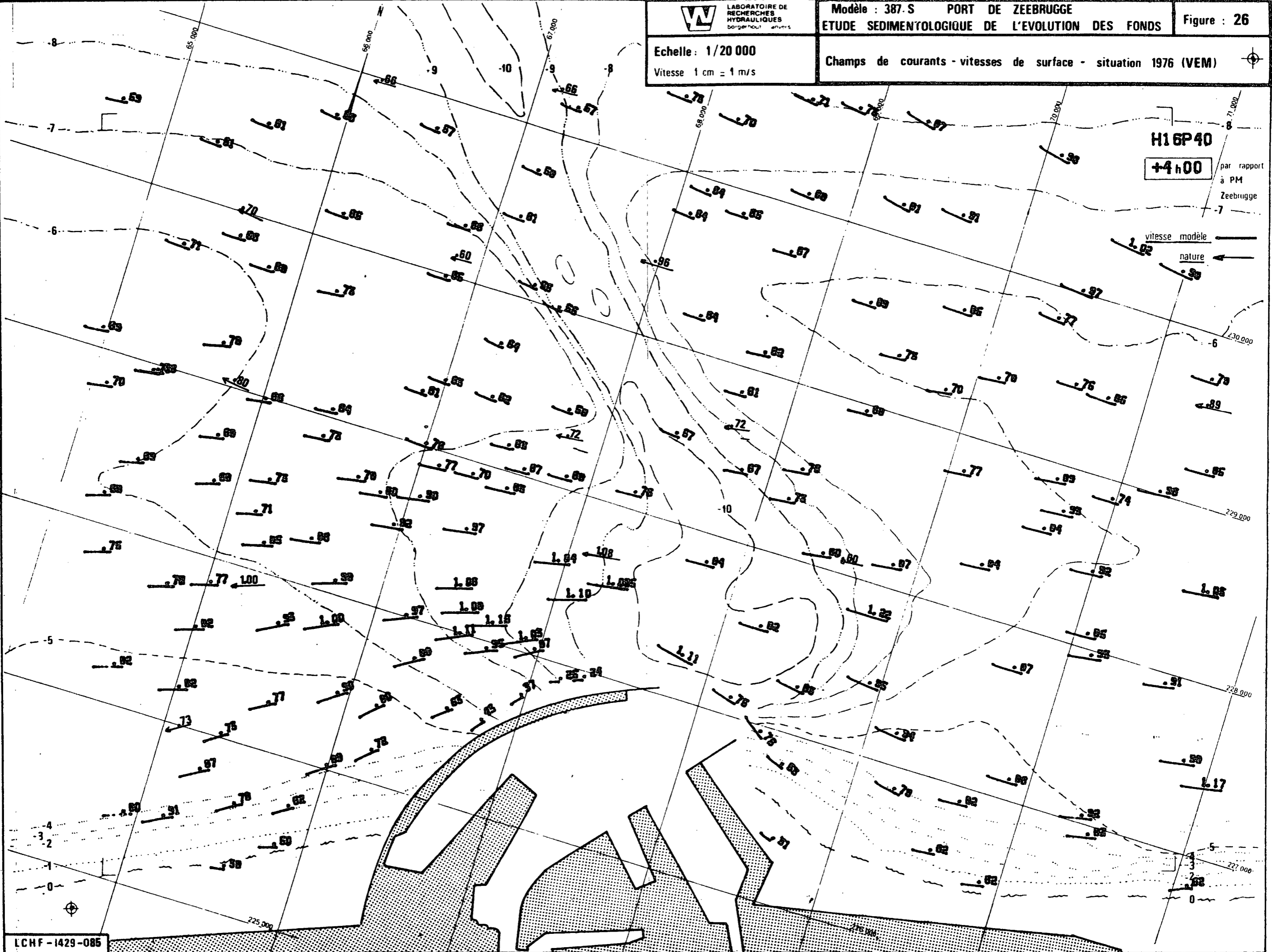
H16P40

+4h00

par rapport à PM  
Zeebrugge

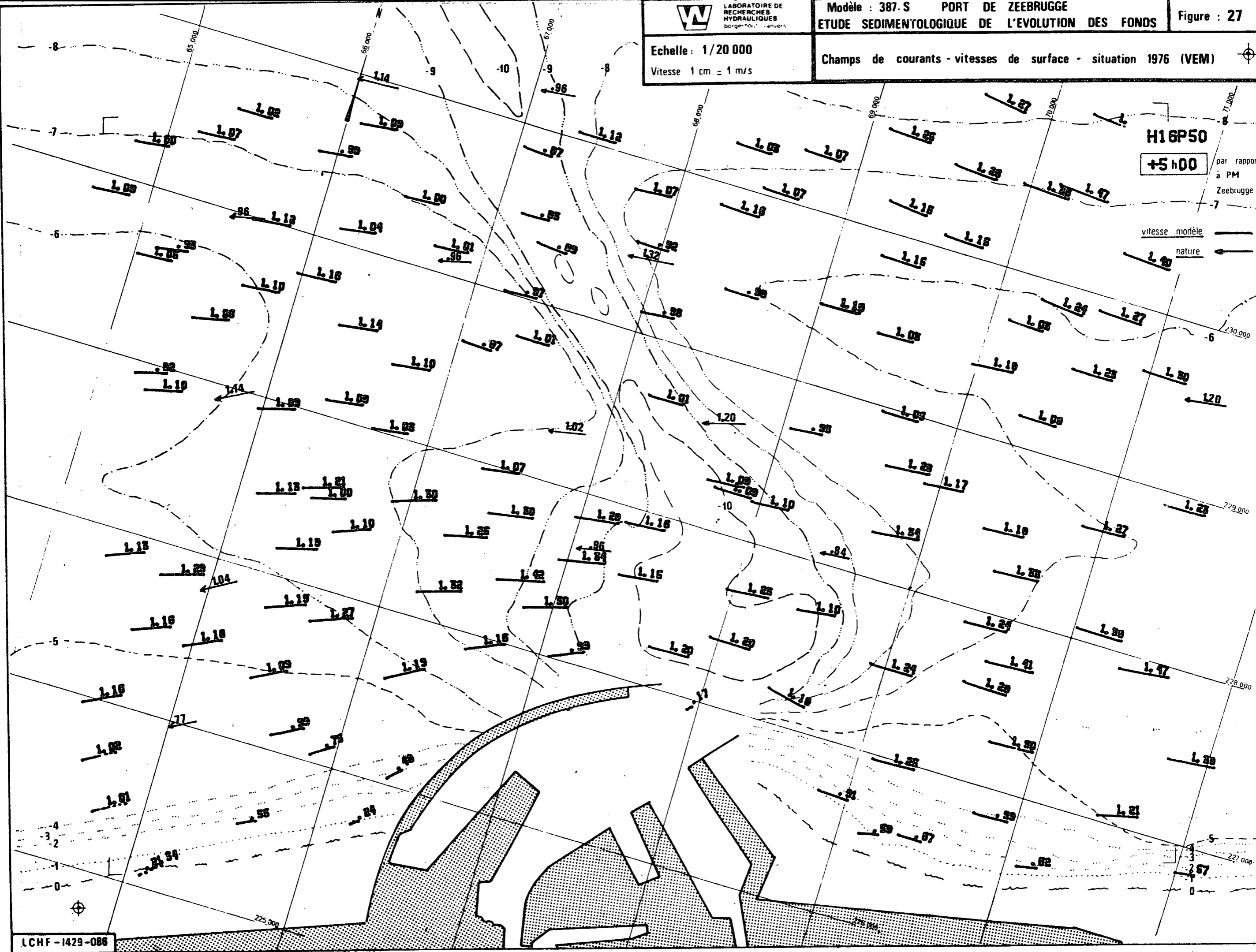
vitesse modèle

nature



Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976 (VEM)



H16P50  
+5 h00  
par rapport à PM  
Zeebrugge

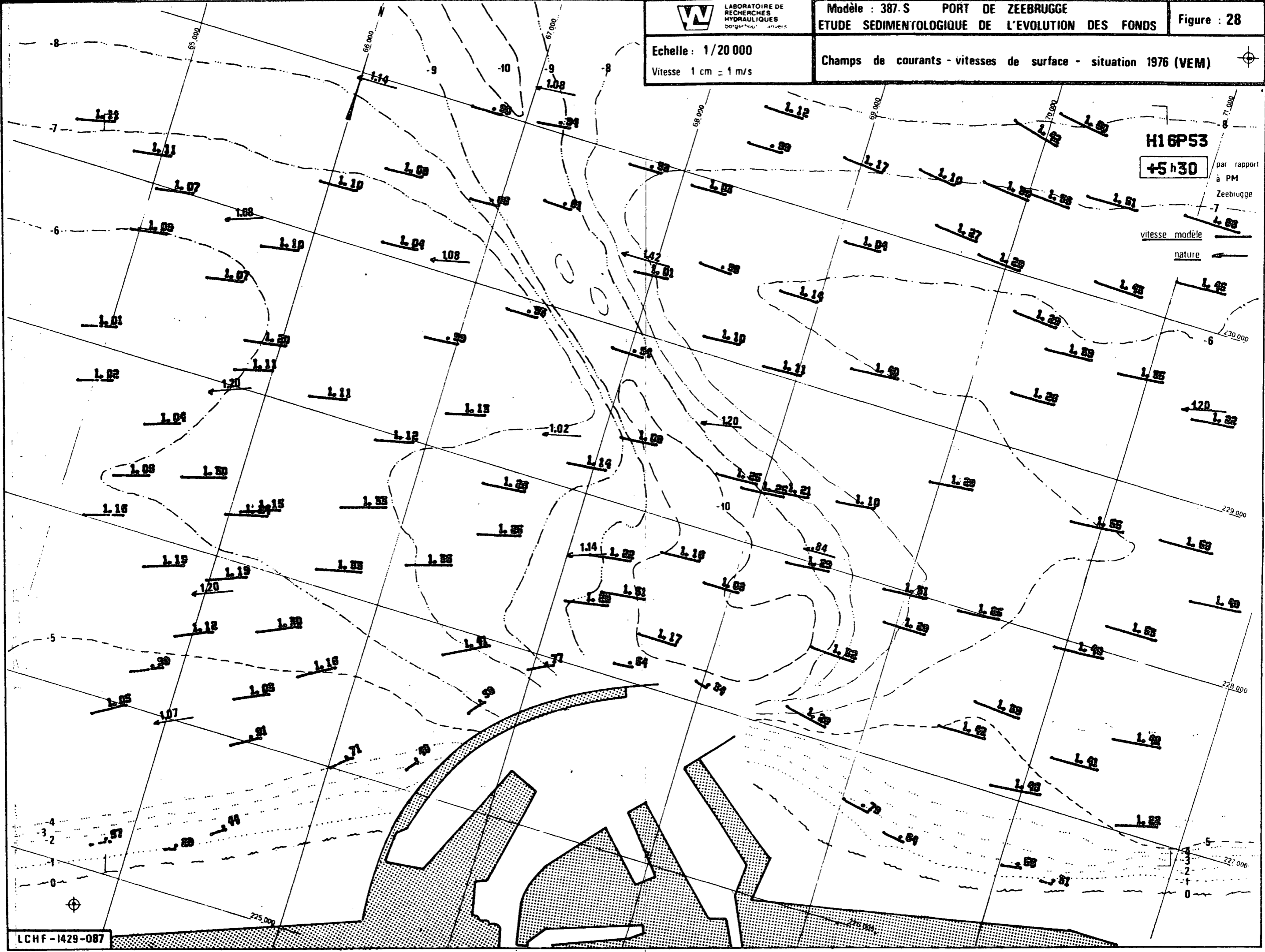
vitesse modèle  
nature



LABORATOIRE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES  
borgerhout anvers

Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976 (VEM)





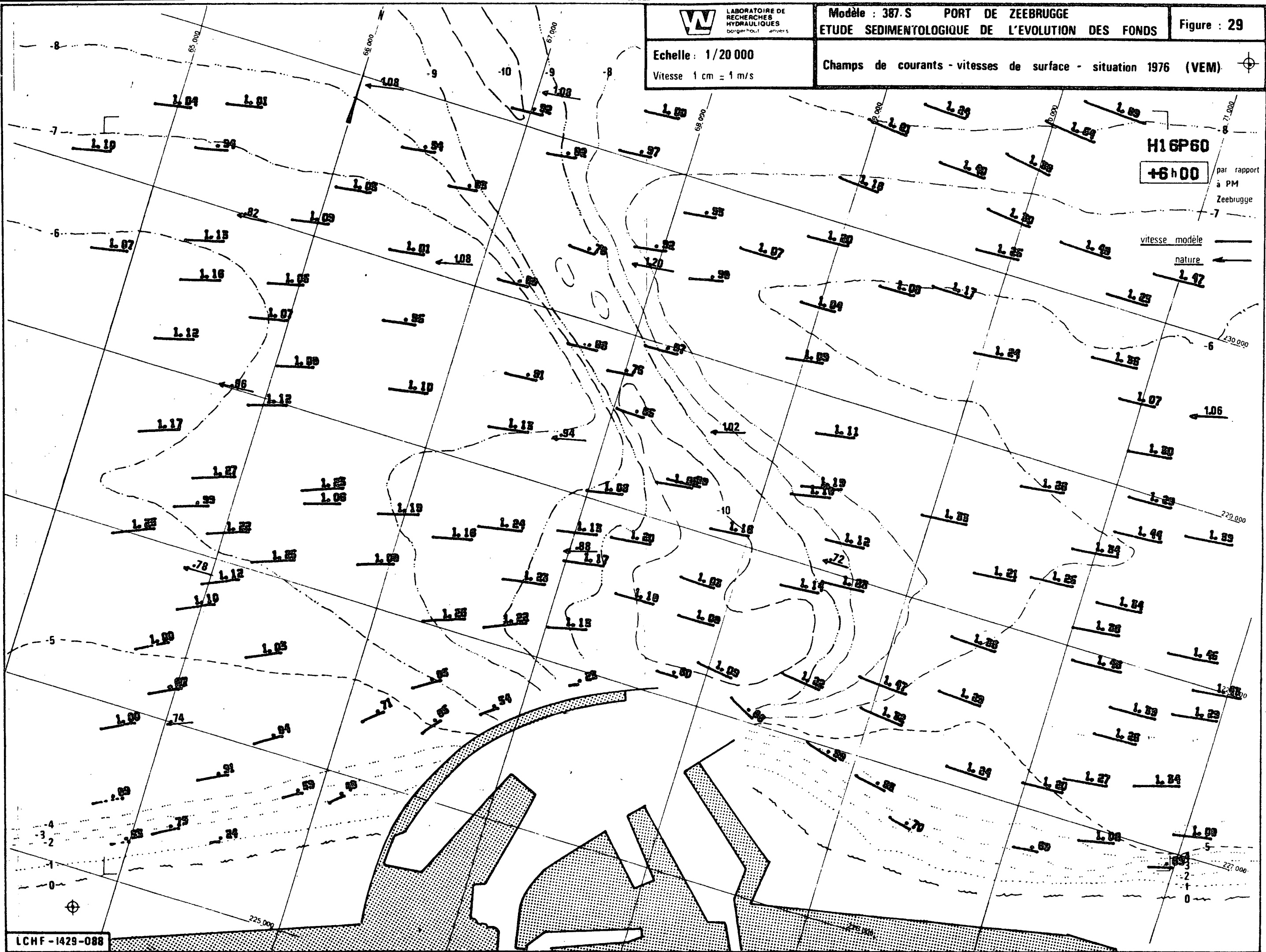
LABORATOIRE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES  
borgerhout anvers

Modèle : 387.S PORT DE ZEEBRUGGE  
ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DE L'EVOLUTION DES FONDS

Figure : 29

Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

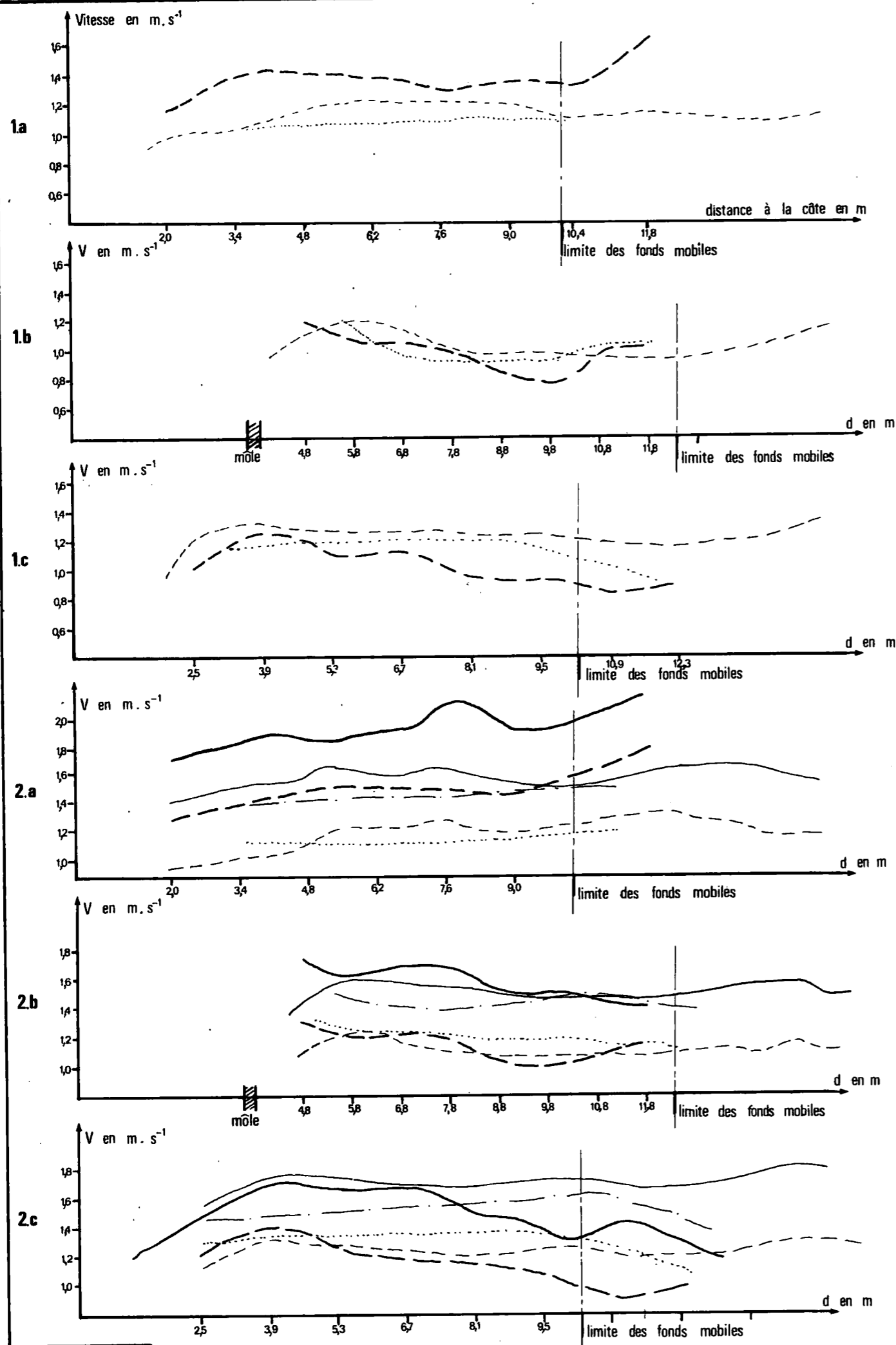
Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976 (VEM)



H16P60  
+6 h 00 par rapport à PM  
Zeebrugge

vitesse modèle  
nature

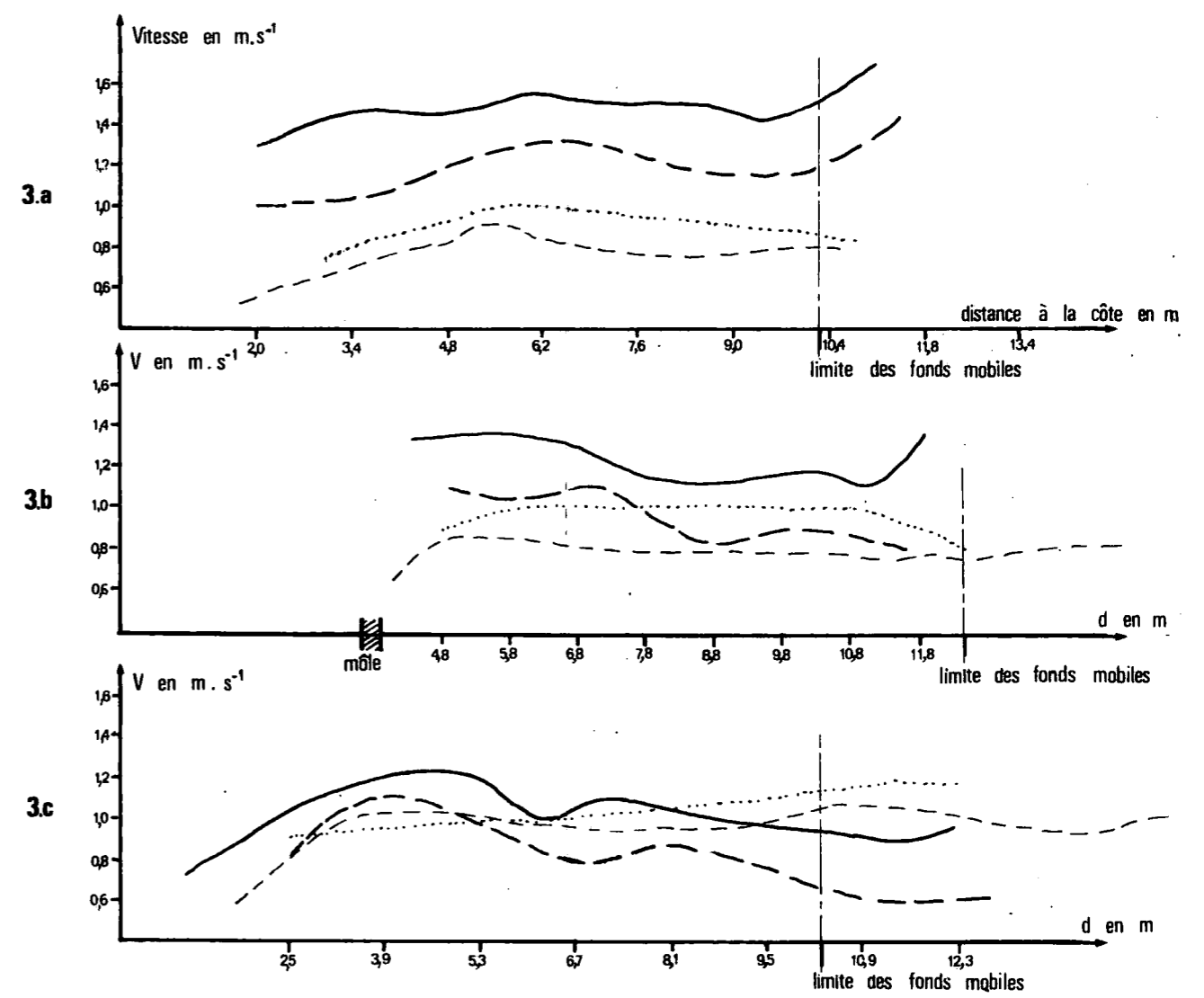
Mesures des vitesses sur les radiales - situation 1976 - flot



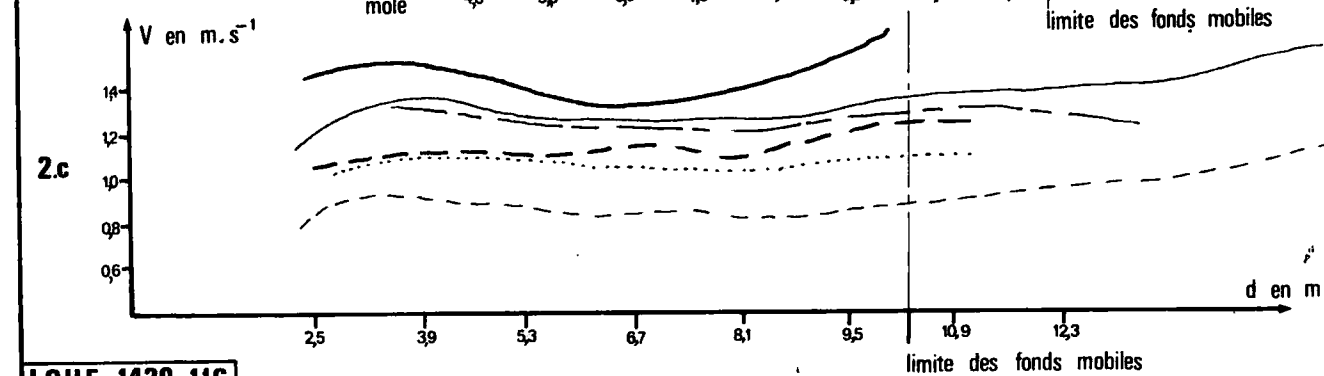
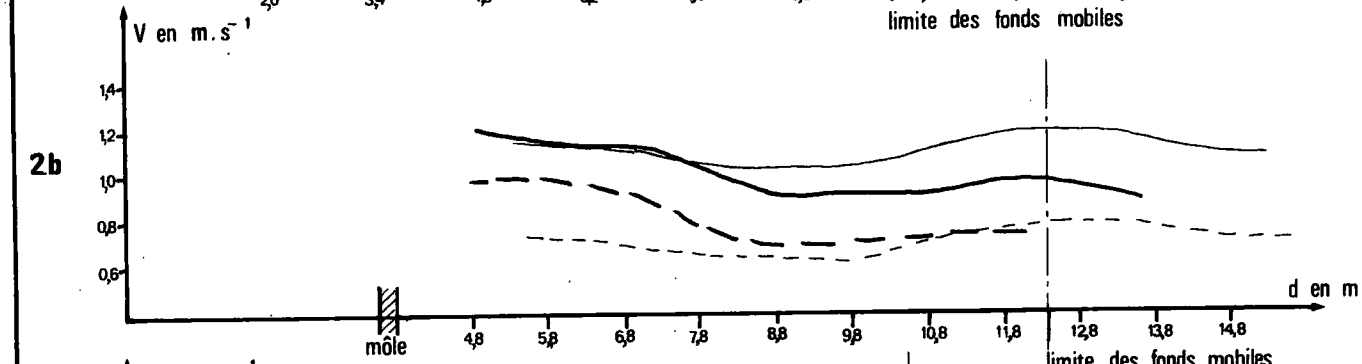
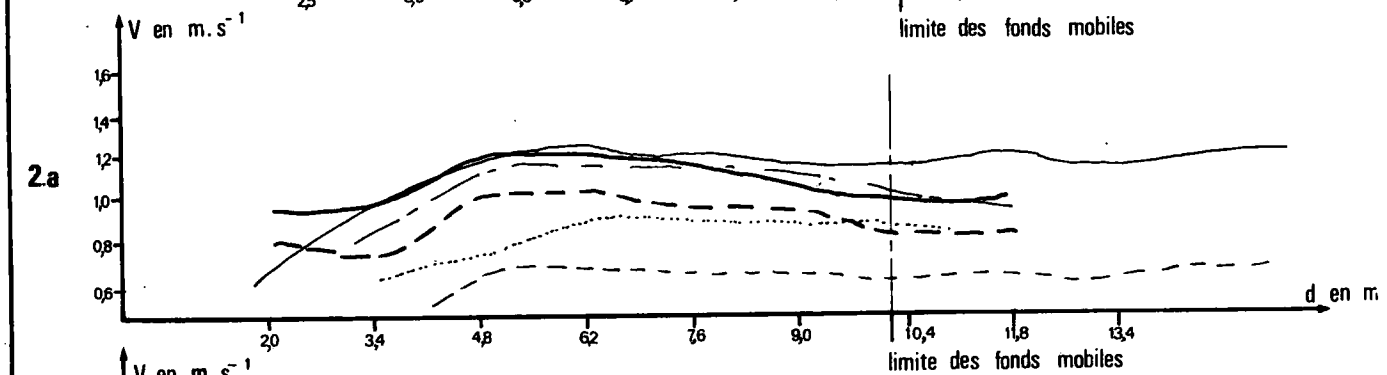
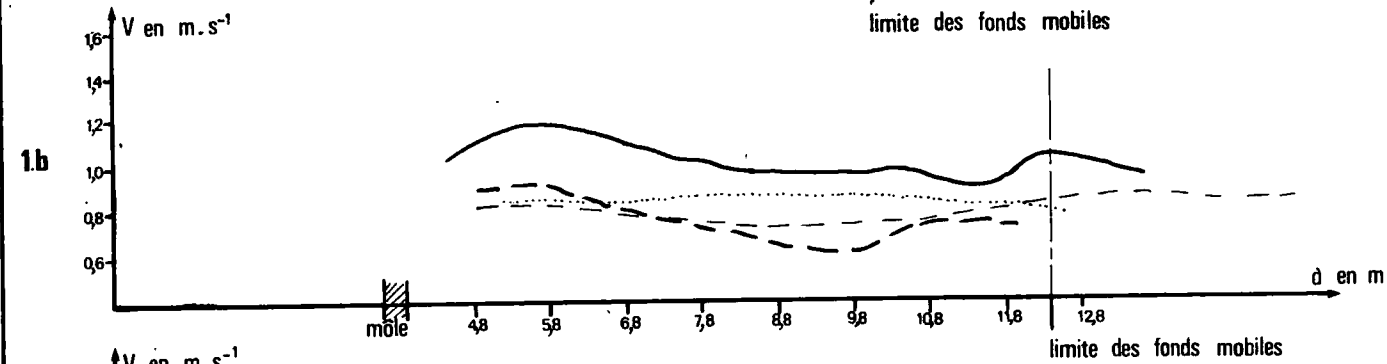
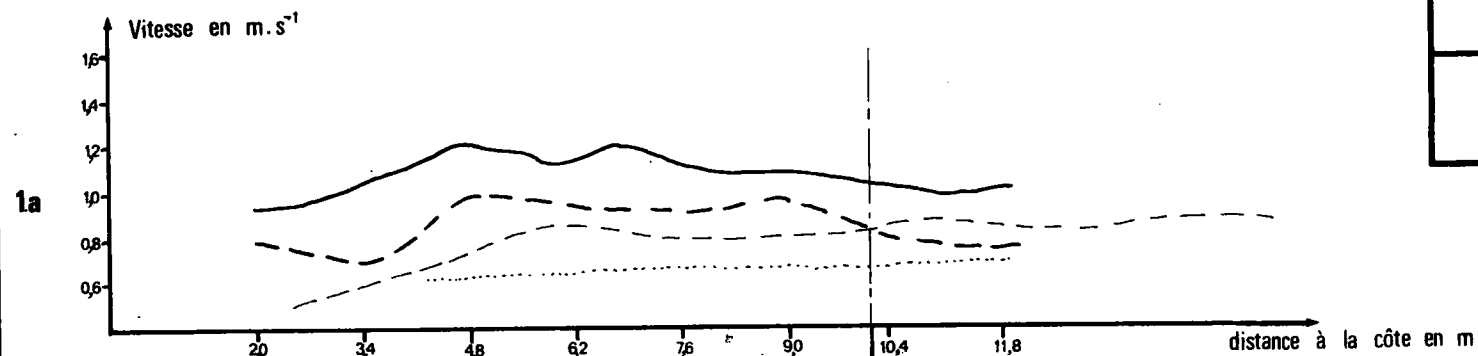
nature	modèle 265	modèle 387.S	Vitesse de surface } marée de vive Vitesse moyennes } eau moyenne
-----	_____	-----	
.....	-----	-----	

1: PM - 1 heure	a: radiale Ouest
2: PM - 0 heure 40 minutes : maximum de flot	b: radiale centrale
3: PM	c: radiale Est



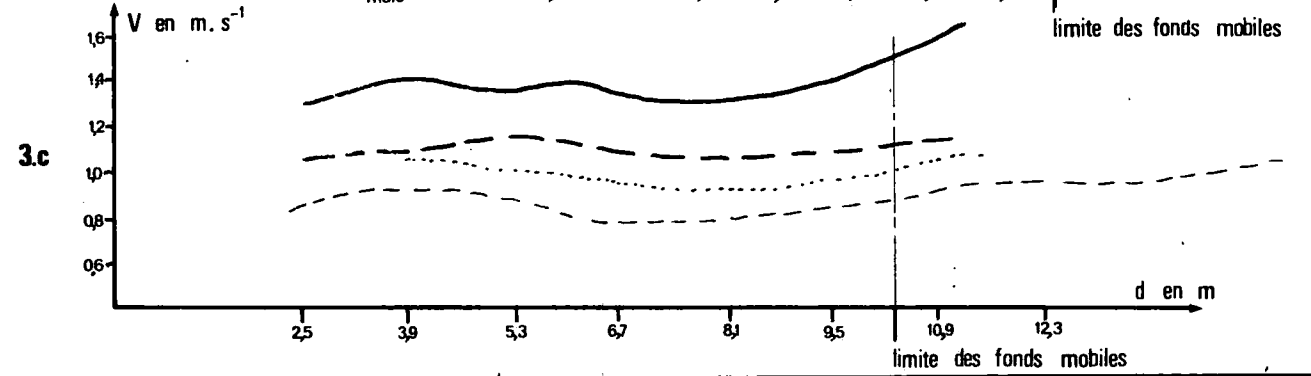
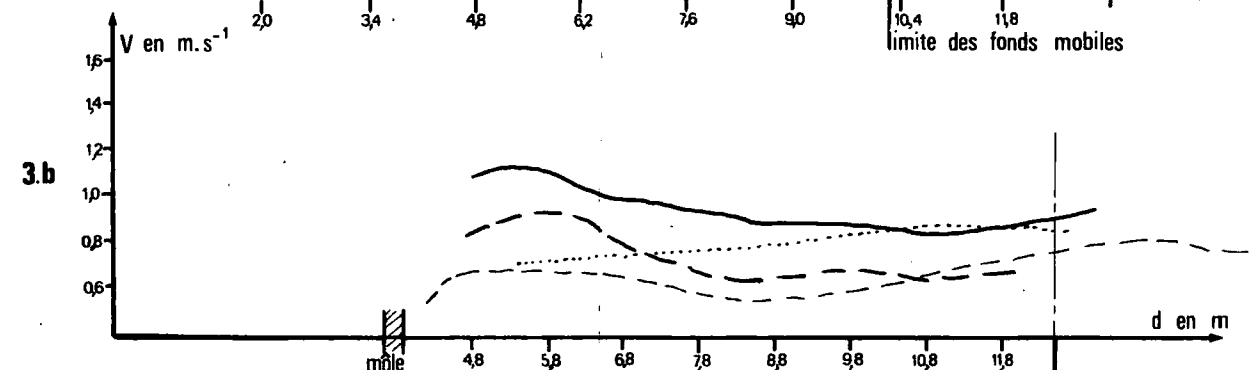
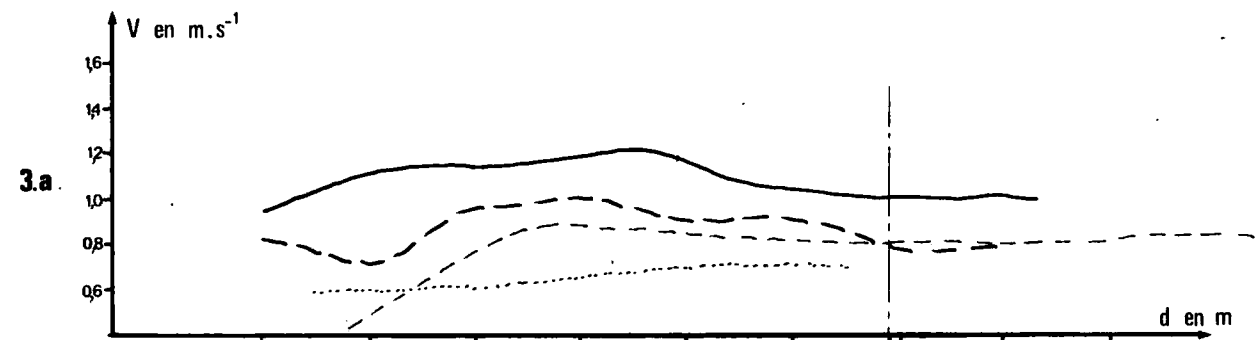
Mesures des vitesses sur les radiales - situation 1976 - jusant



nature	modèle 265	modèle 387.S	} marée de vive eau moyenne
---	---	---	
---	---	---	} marée de vive eau moyenne
---	---	---	

1 PM + 5 heures  
2 PM + 5 heures 30 minutes : maximum de jusant  
3 PM + 6 heures

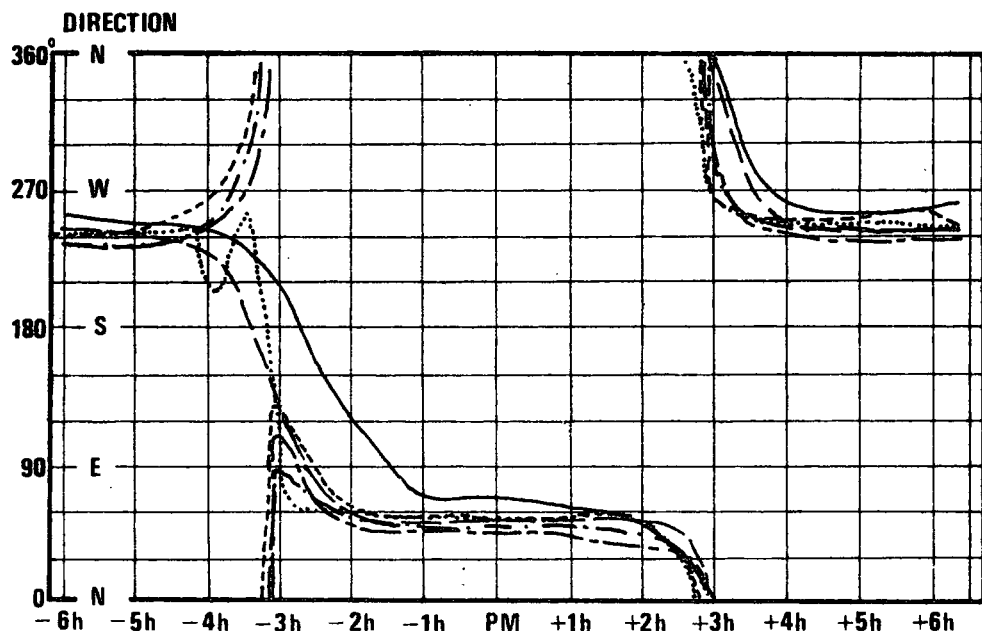
a : radiale Ouest  
b : radiale centrale  
c : radiale Est



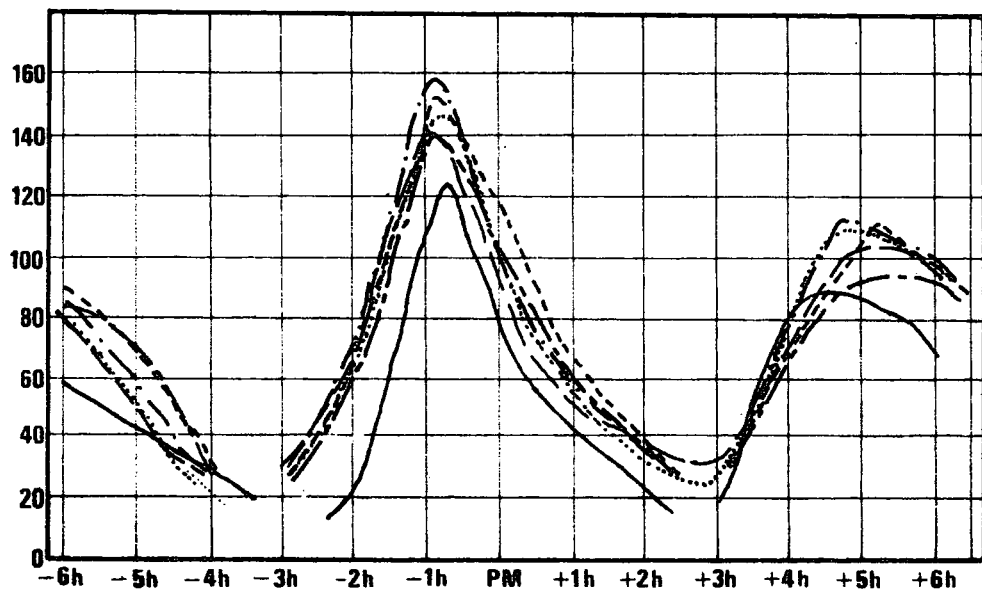


Comparaisons en direction et intensité des courants (vitesses moyennes)  
pour différents coefficients de marée

POINT DE MESURE N° 3B



VITESSE (cm/s nature)



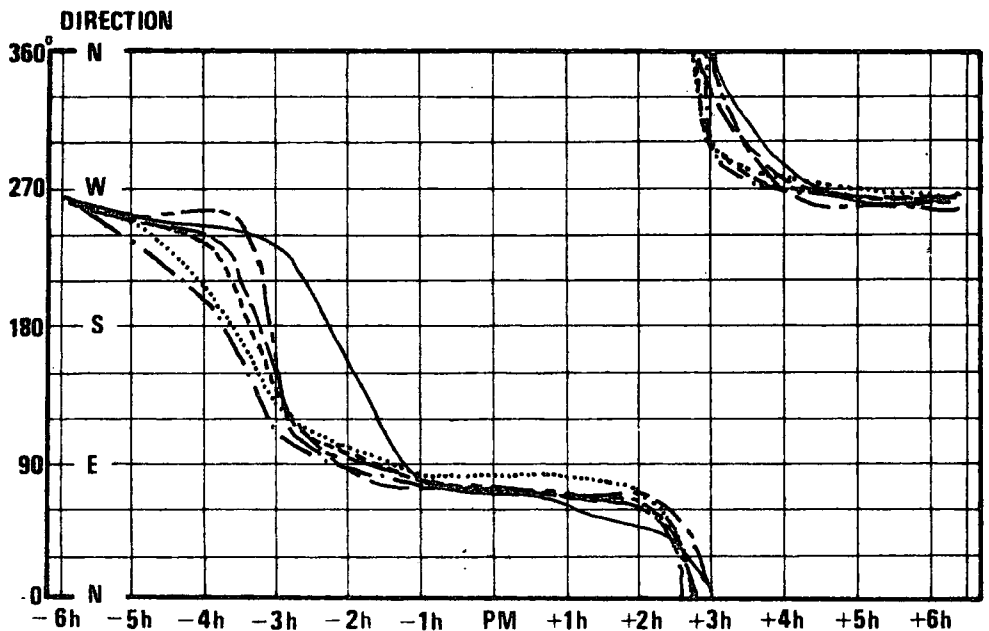
Vitesses moyennes	Coefficients de marée
— Nature	1,18
— Modèle	1,18
- - -	1
- - -	1,4
- - -	1,6
.....	1,8

} VEM



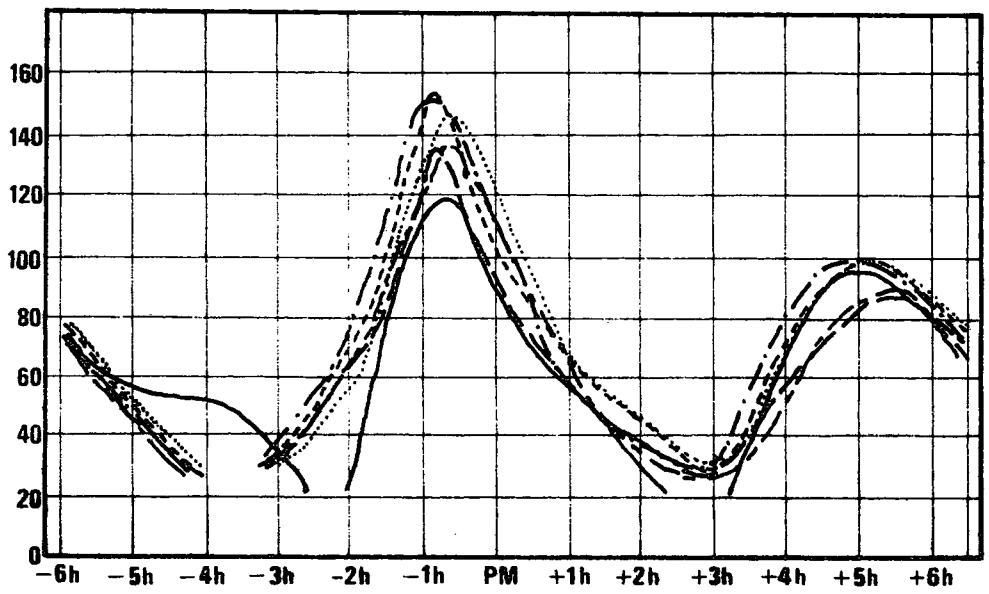
Comparaisons en direction et intensité des courants (vitesses moyennes)  
pour différents coefficients de marée

POINT DE MESURE N° 4B



Vitesses moyennes	Coefficients de marée	
— Nature	1,18	} VEM
— Modèle	1,18	
- - - - -	1	
- - - - -	1,4	
- - - - -	1,6	
.....	1,8	

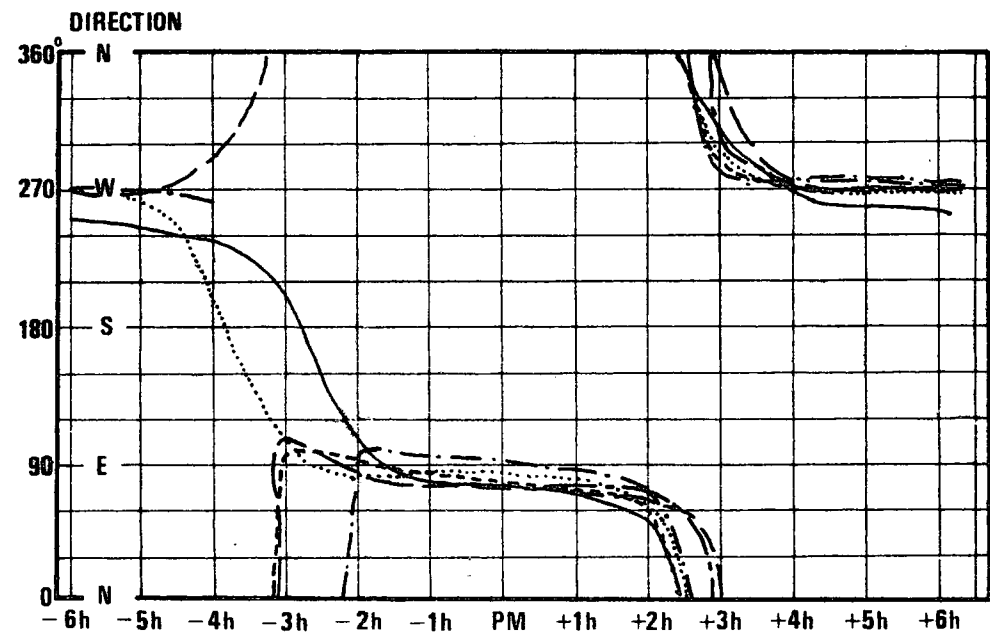
VITESSE (cm/s nature)





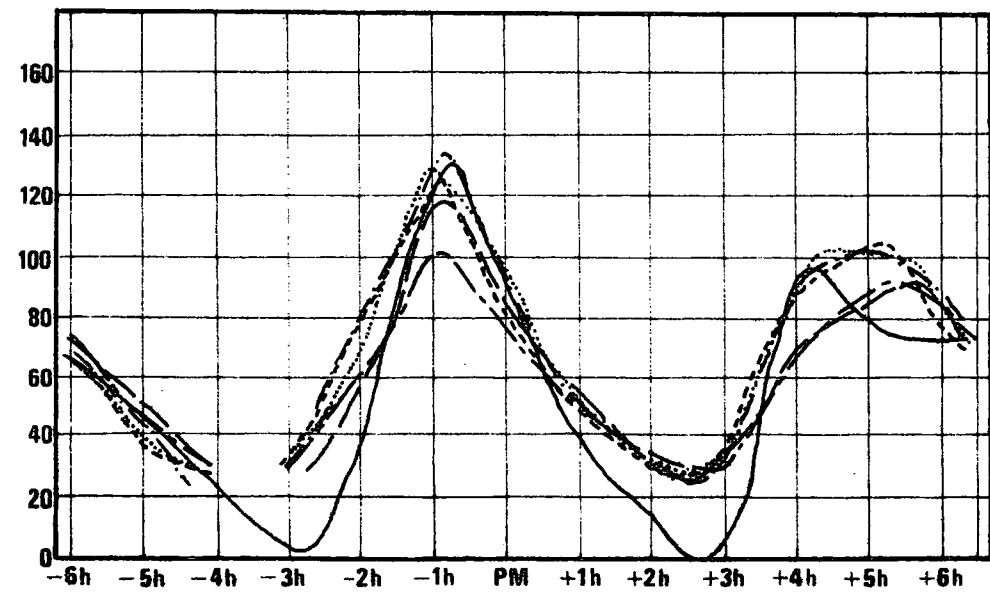


POINT DE MESURE N° 6 A



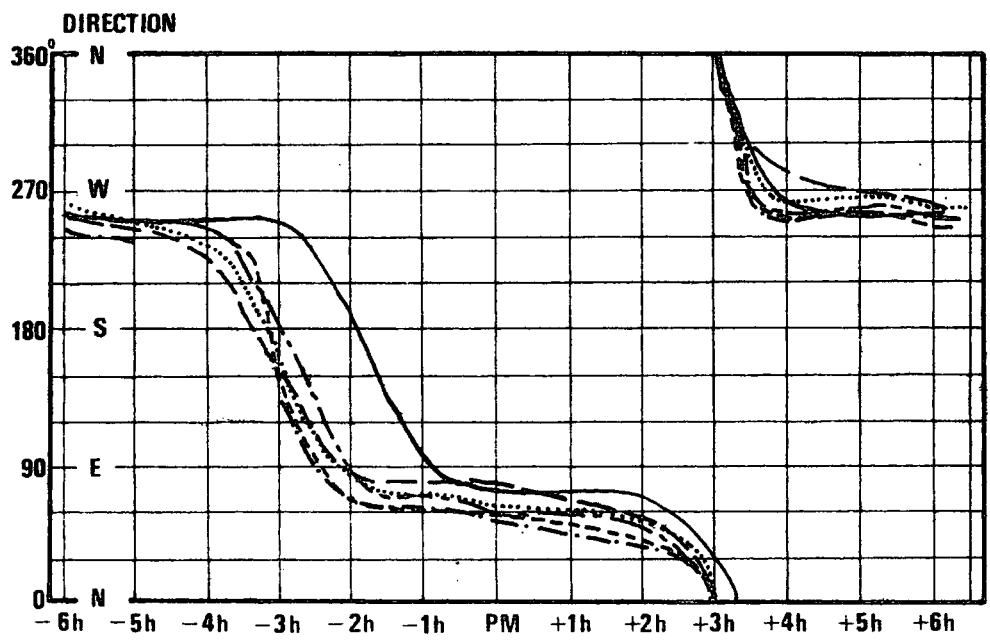
Vitesses moyennes	Coefficients de marée	} VEM
— Nature	1,18	
— Modèle	1,18	
- - - "	1	
- - - - - "	1,4	
..... "	1,8	

VITESSE (cm/s nature)



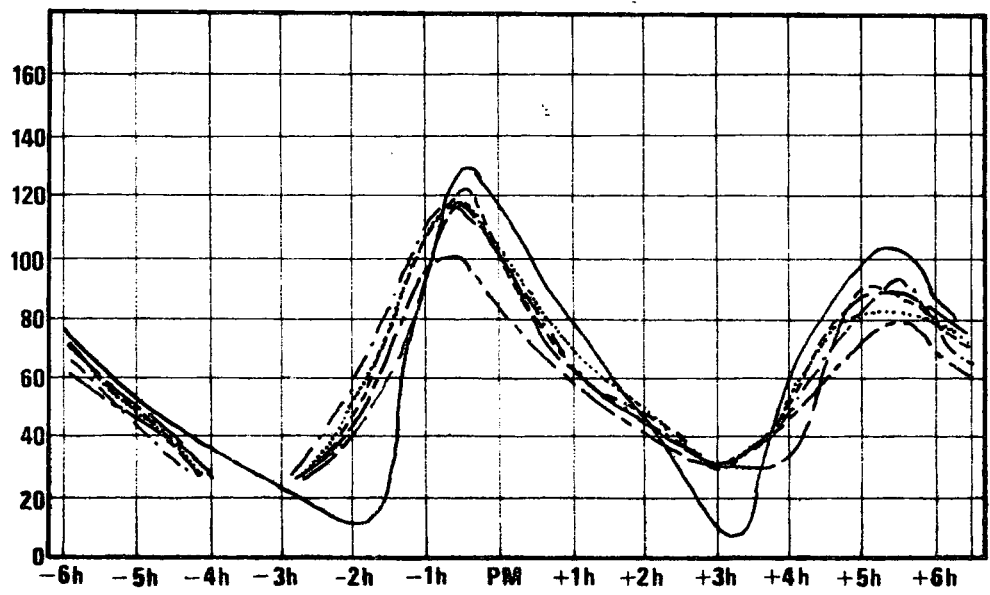
Comparaisons en direction et intensité des courants (vitesses moyennes) pour différents coefficients de marée

POINT DE MESURE N° 11 A



Vitesses moyennes	Coefficients de marée	} VEM
— Nature	1,18	
— Modèle	1,18	
- - - "	1	
- - - - - "	1,4	
- - - - - - - - - "	1,6	
..... "	1,8	

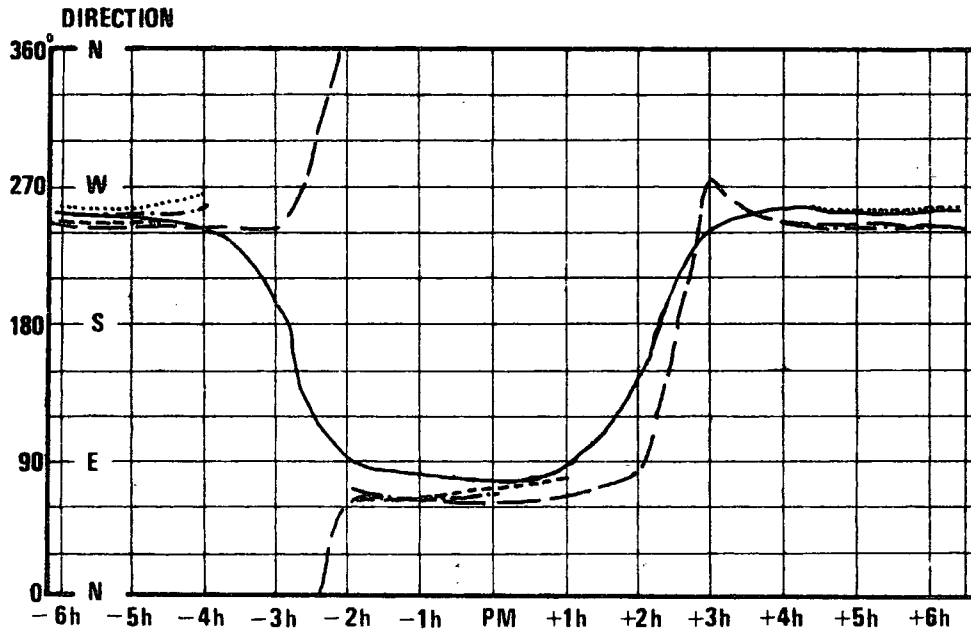
VITESSE (cm/s nature)



Comparaisons en direction et intensité des courants (vitesses moyennes) pour différents coefficients de marée

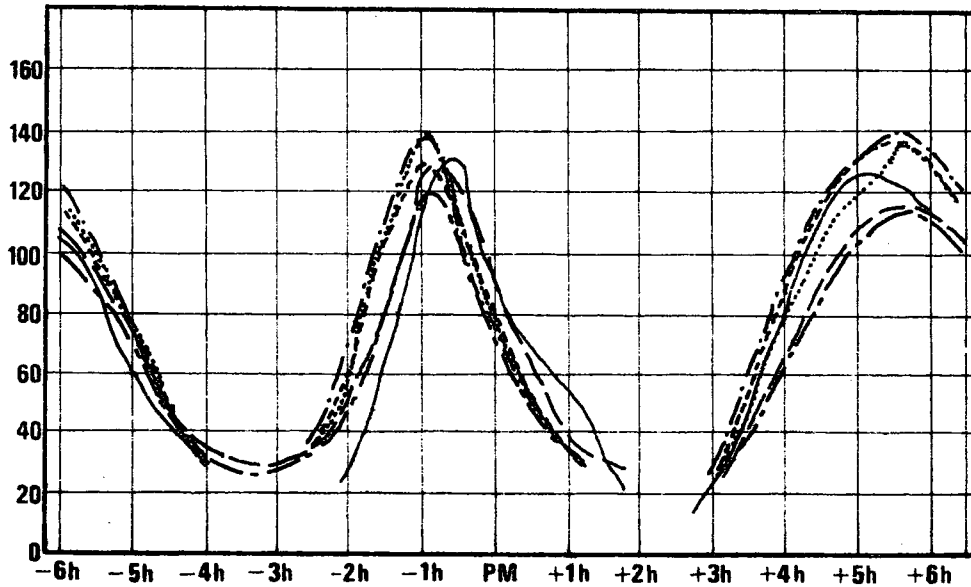


POINT DE MESURE N° 14B



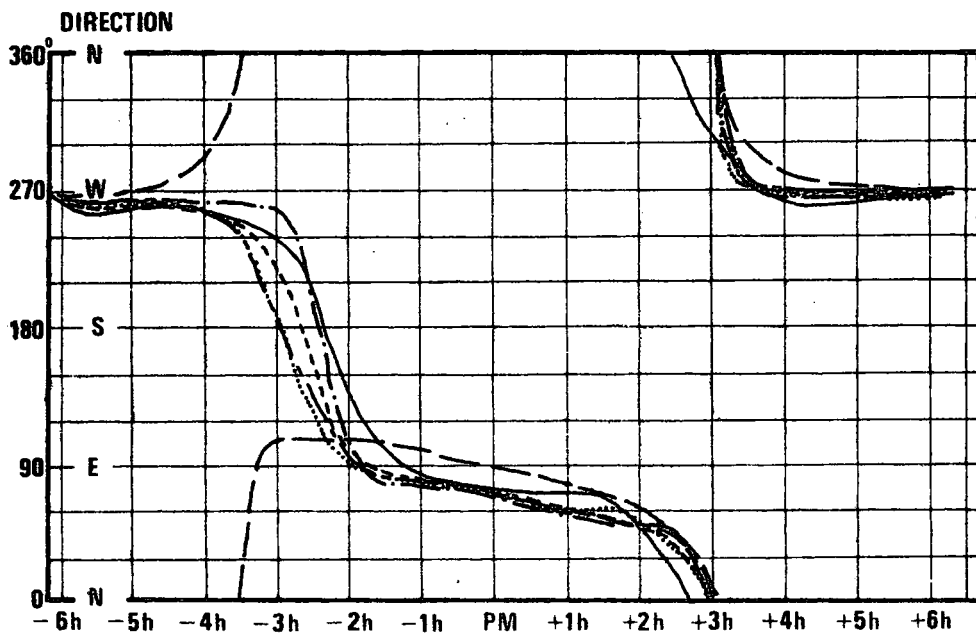
Vitesses moyennes	Coefficients de marée	} VEM
— Nature	1,18	
— Modèle	1,18	
- - - "	1	
- - - - - "	1,4	
- - - - - - - - - "	1,6	
..... "	1,8	

VITESSE (cm/s nature)

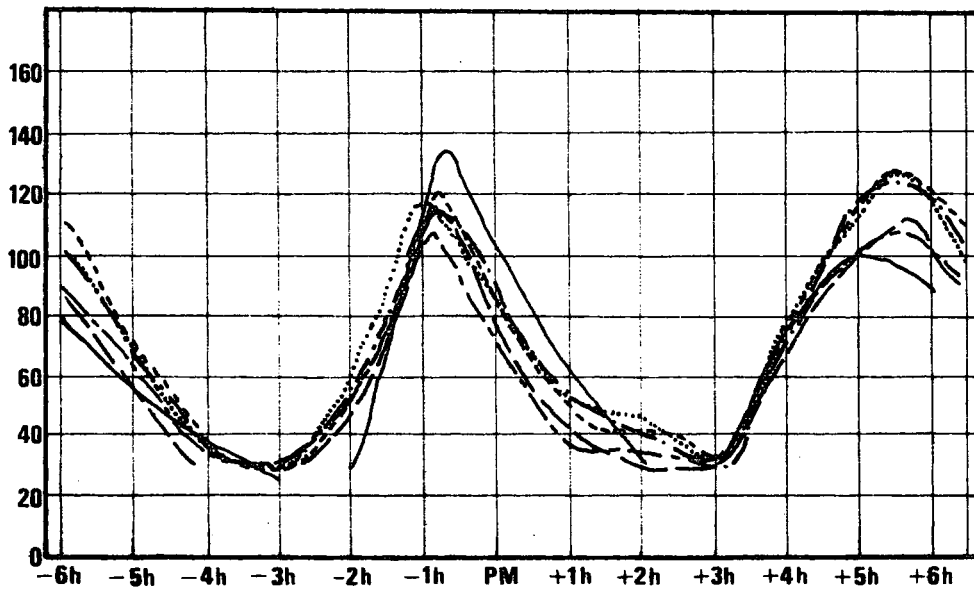


Comparaisons en direction et intensité des courants (vitesses moyennes) pour différents coefficients de marée

POINT DE MESURE N° 15 B



VITESSE (cm/s nature)



Vitesses moyennes	Coefficients de marée	
— Nature	1,18	} VEM
— Modèle	1,18	
- - - - -	1	
- - - - -	1,4	
- - - - -	1,6	
.....	1,8	

Comparaisons en direction et intensité des courants (vitesses moyennes) pour différents coefficients de marée



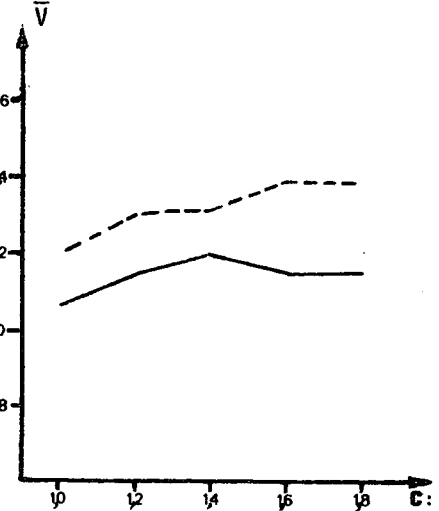
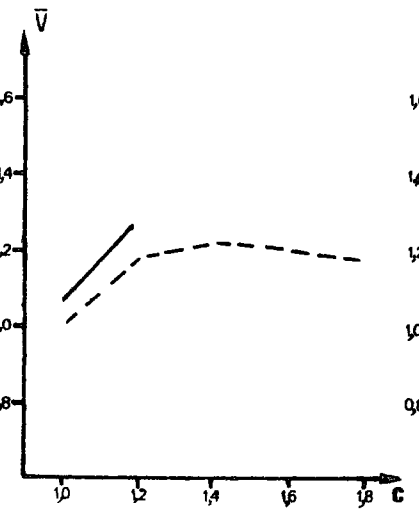
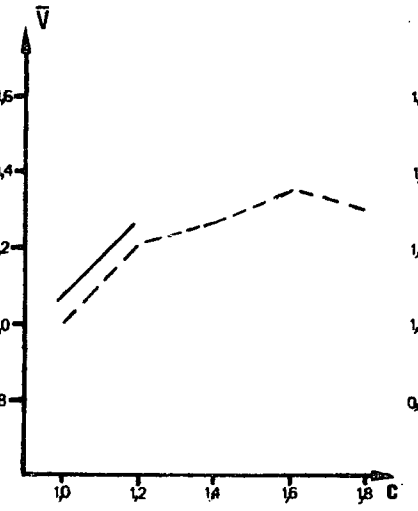
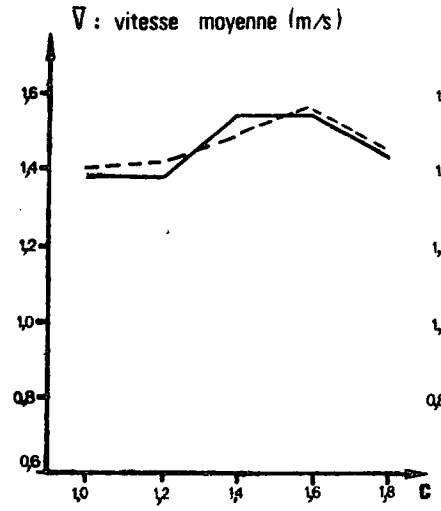
Vitesses moyennes aux maximums de flot et de jusant en fonction du coefficient de marée

points 3B 4B  
--- ---

point 6A ---  
donnée Nature —

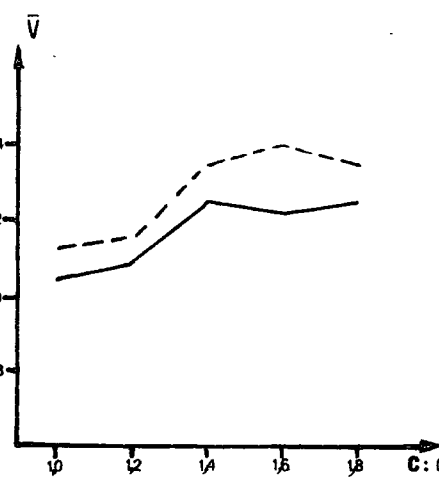
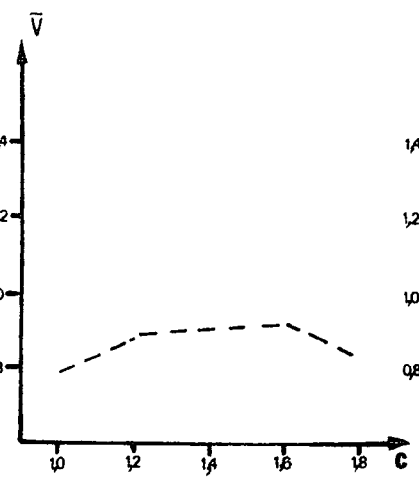
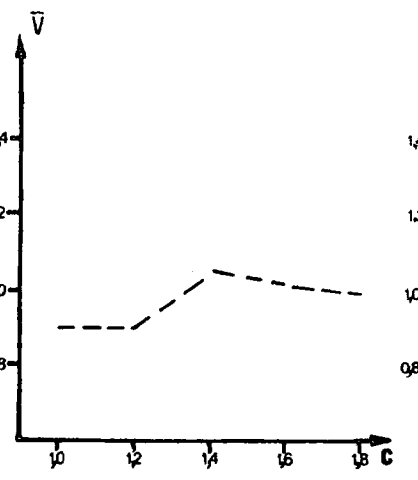
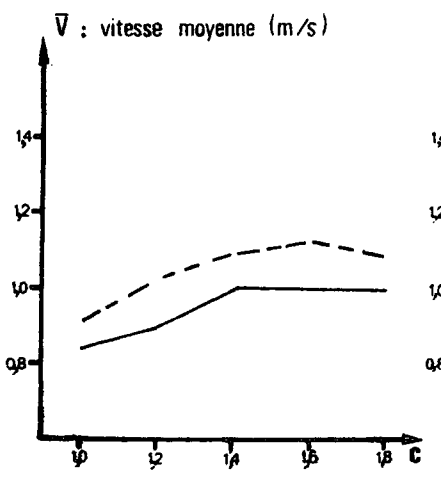
point 11A ---  
donnée Nature —

points 14B 15B  
--- ---



Vitesses moyennes au maximum de flot

C : coefficient de marée



Vitesses moyennes au maximum de jusant

C : coefficient de marée



LABORATOIRE DE  
RECHERCHES  
HYDRAULIQUES  
borgerhout anvers

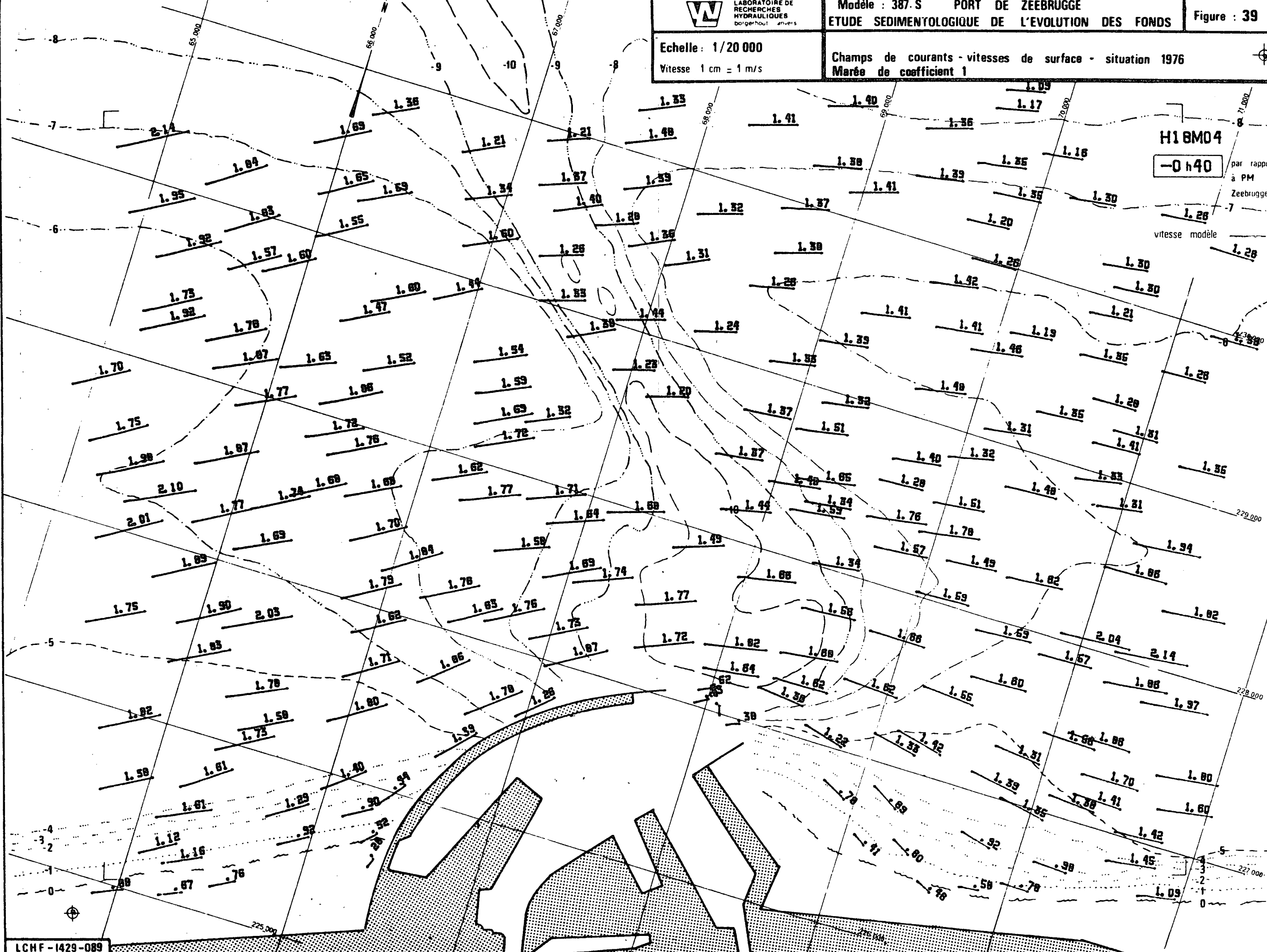
Modèle : 387.S PORT DE ZEEBRUGGE  
ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DE L'EVOLUTION DES FONDS

Figure : 39

Echelle : 1/20 000

Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976  
Marée de coefficient 1



H18M04

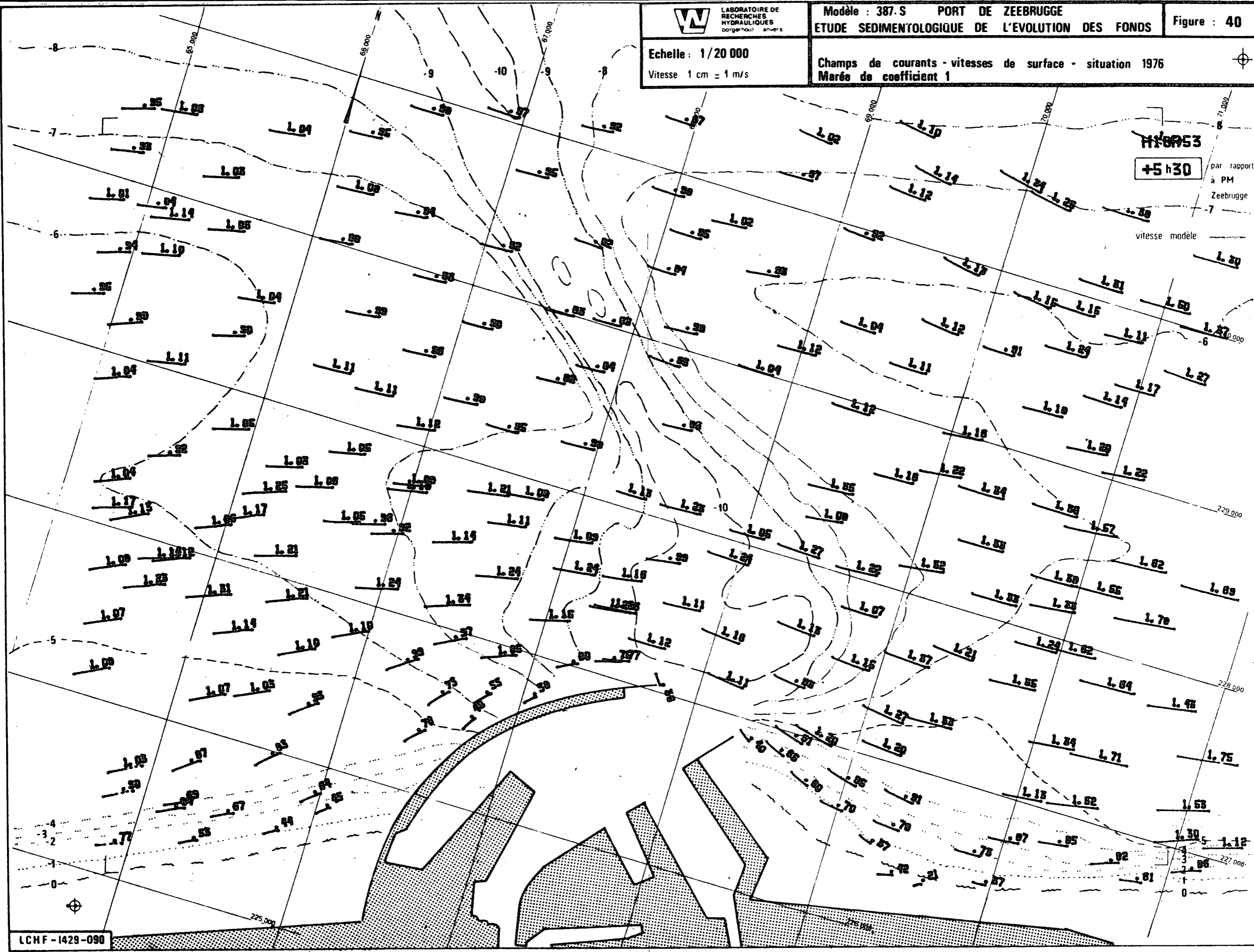
-0 h40

par rapport  
à PM  
Zeebrugge

vitesse modèle

Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976  
Marée de coefficient 1



HYBR53

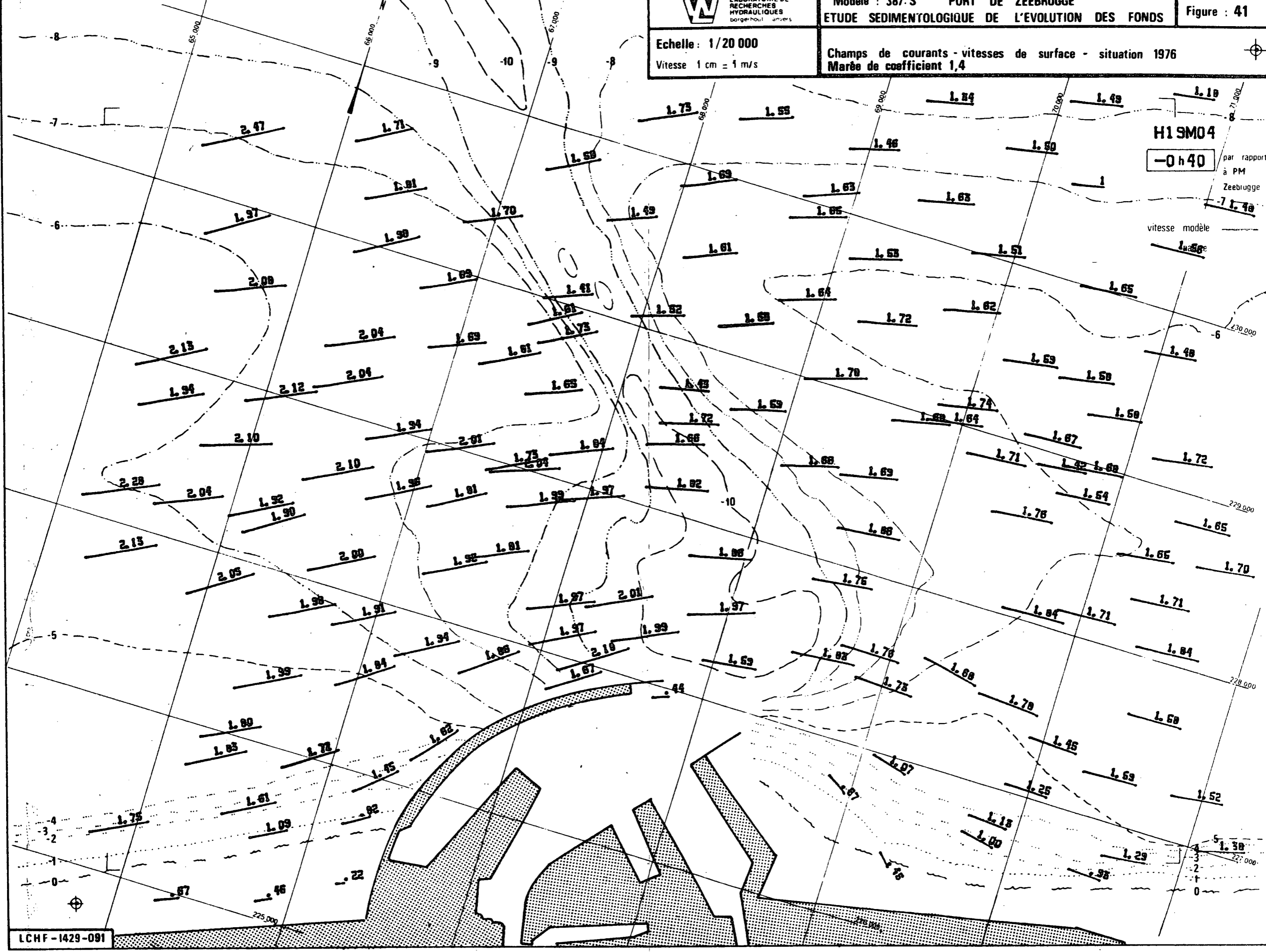
+5 h 30

par rapport à PM  
Zeebrugge

vitesse modèle

Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976  
Marée de coefficient 1,4



H19M04

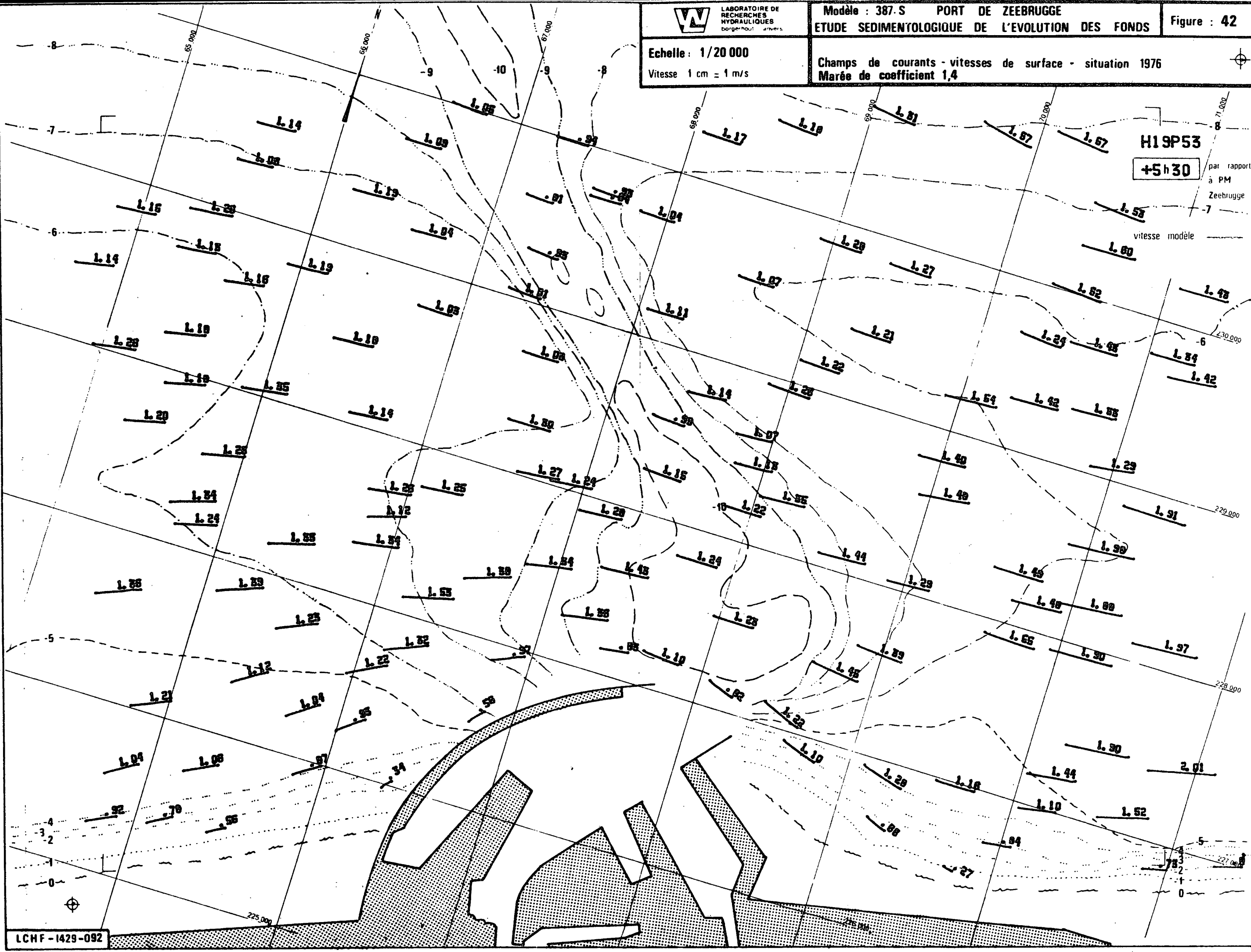
-0 h 40 par rapport à PM Zeebrugge

vitesse modèle 1.50



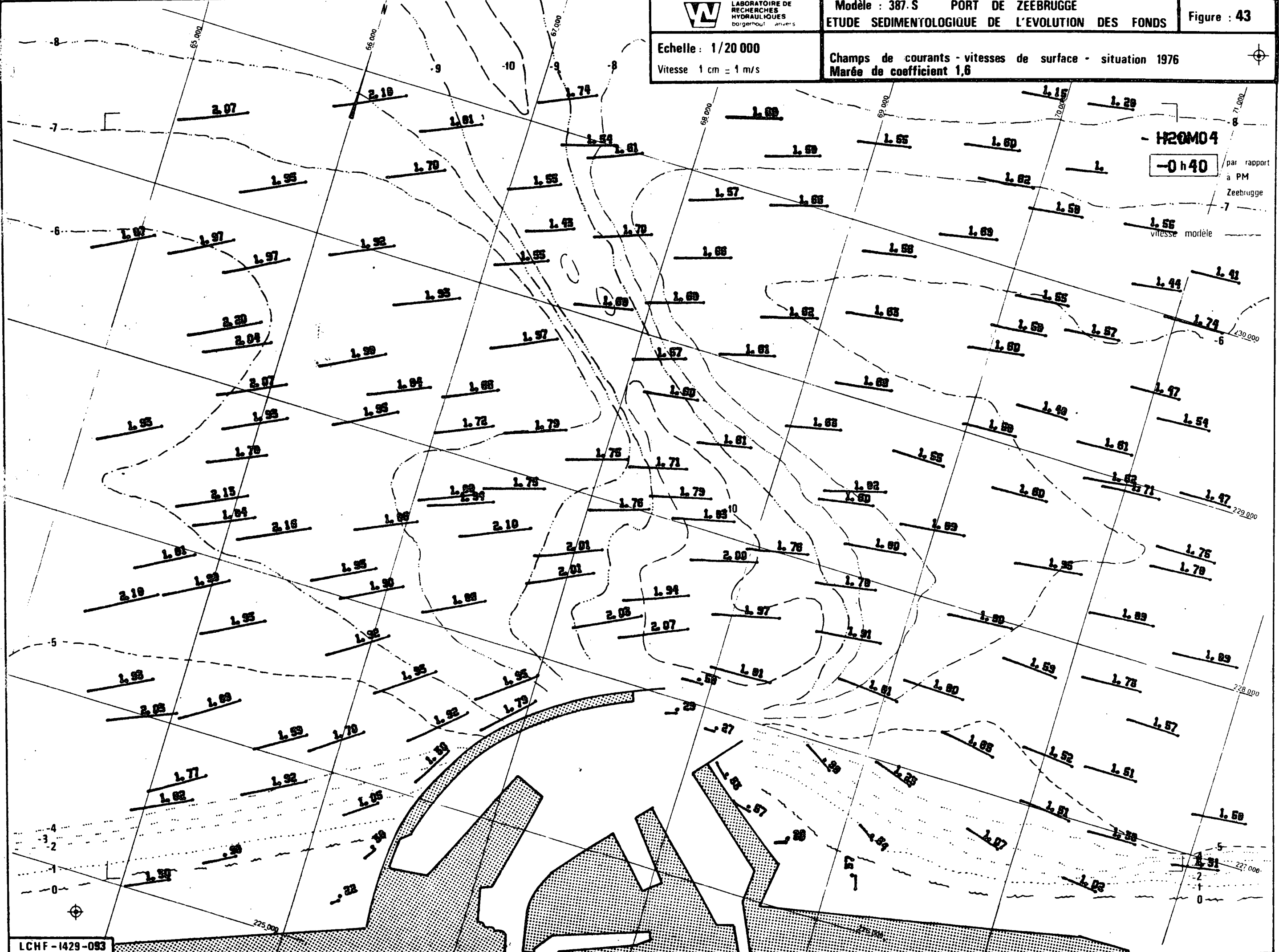
Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976  
Marée de coefficient 1,4



Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976  
Marée de coefficient 1,6



- H20M04

-0h40

par rapport  
à PM  
Zeebrugge

1.55  
vitesse modèle

Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1976  
Marée de coefficient 1,6

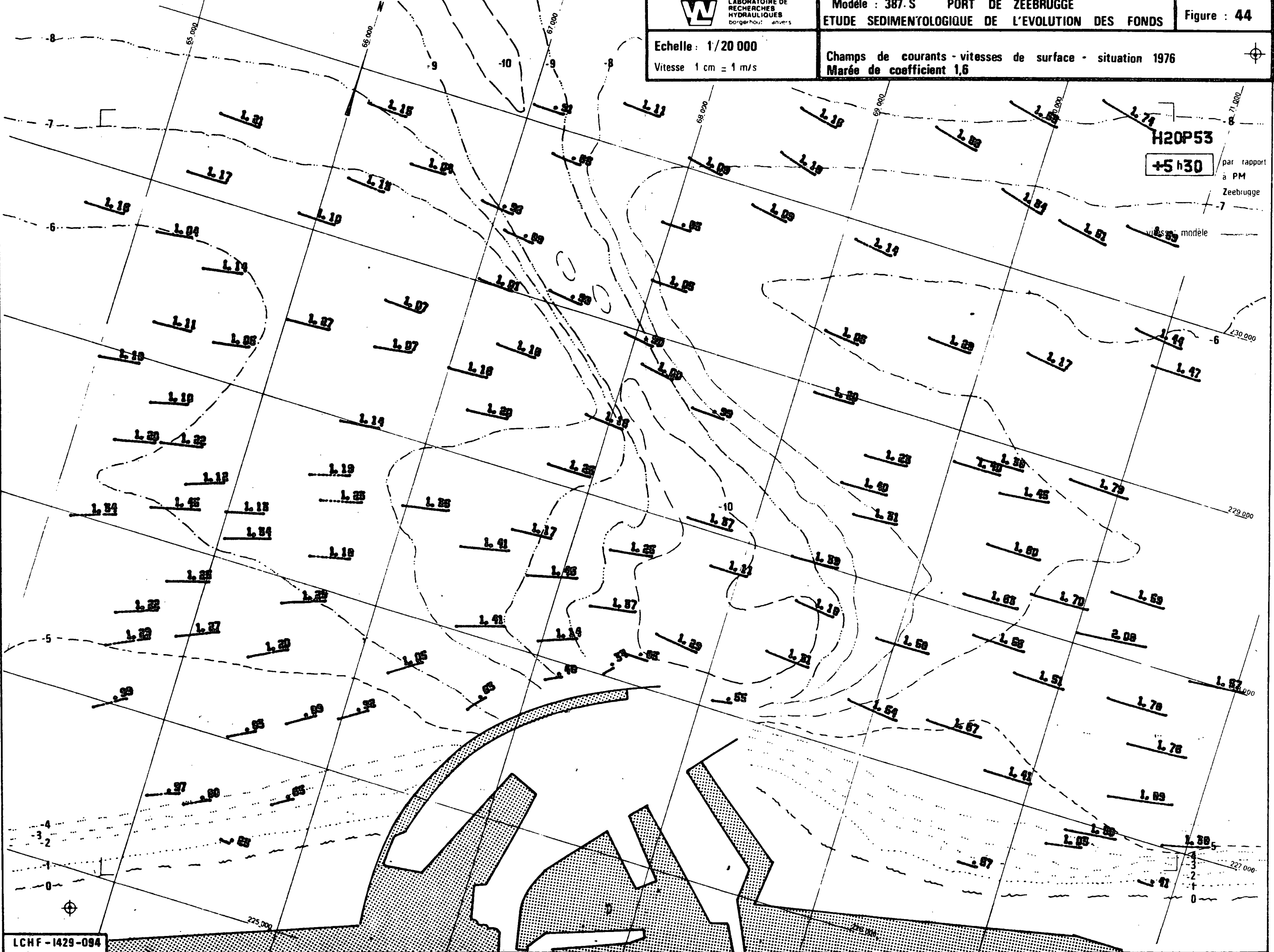


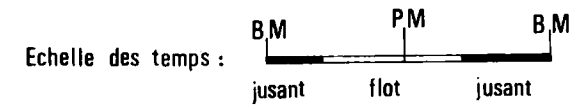
H20P53

+5 h30

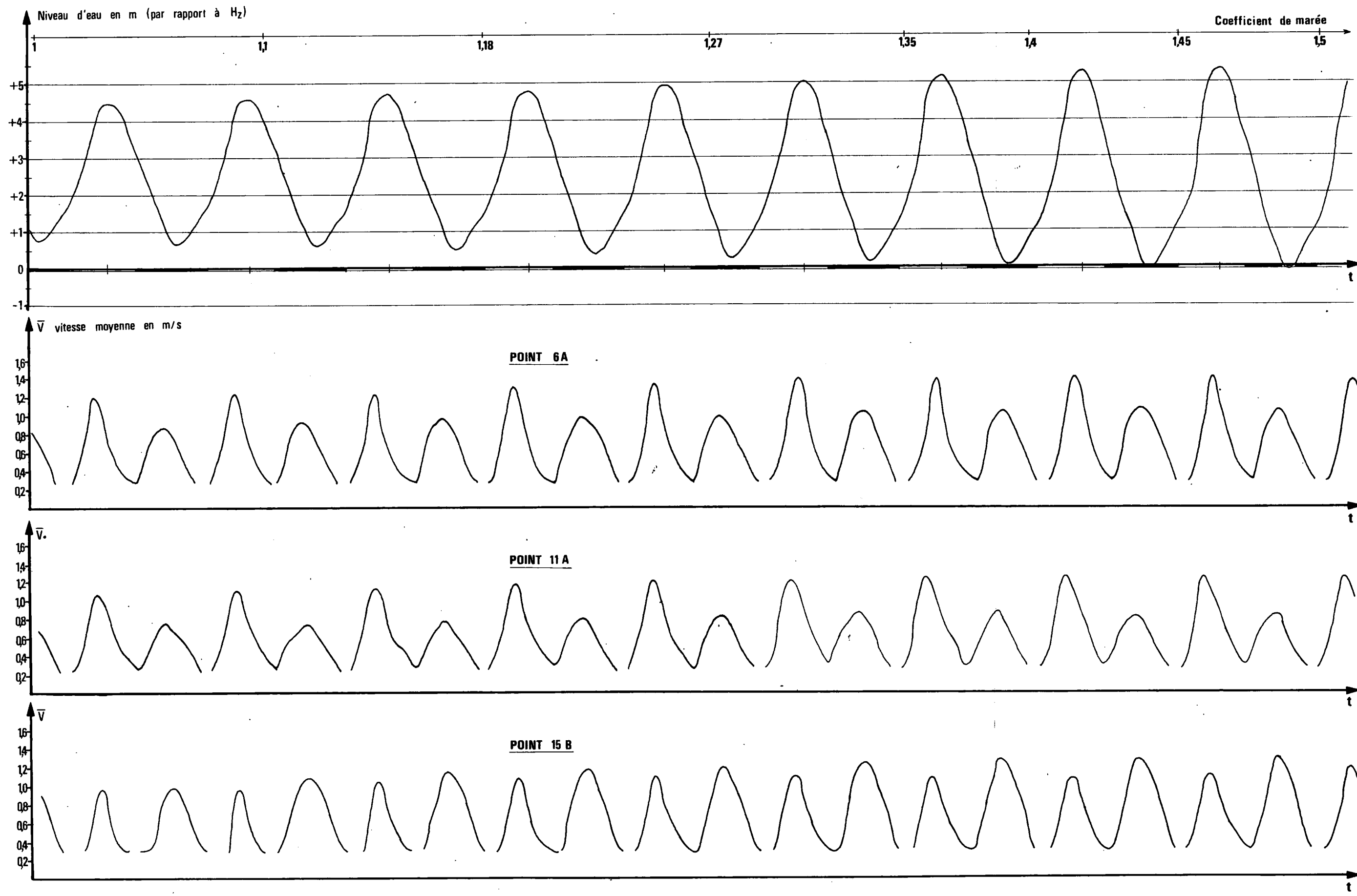
par rapport à PM  
Zeebrugge

modèle



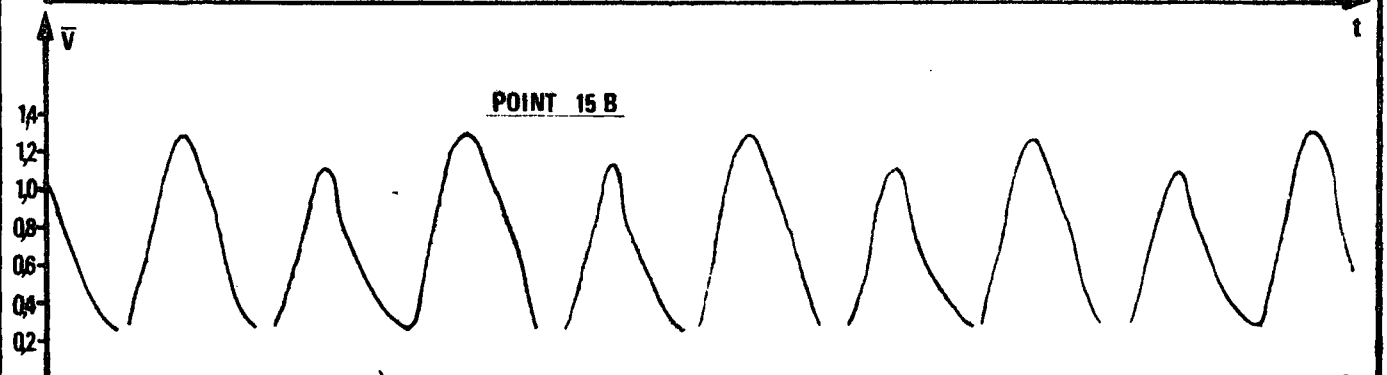
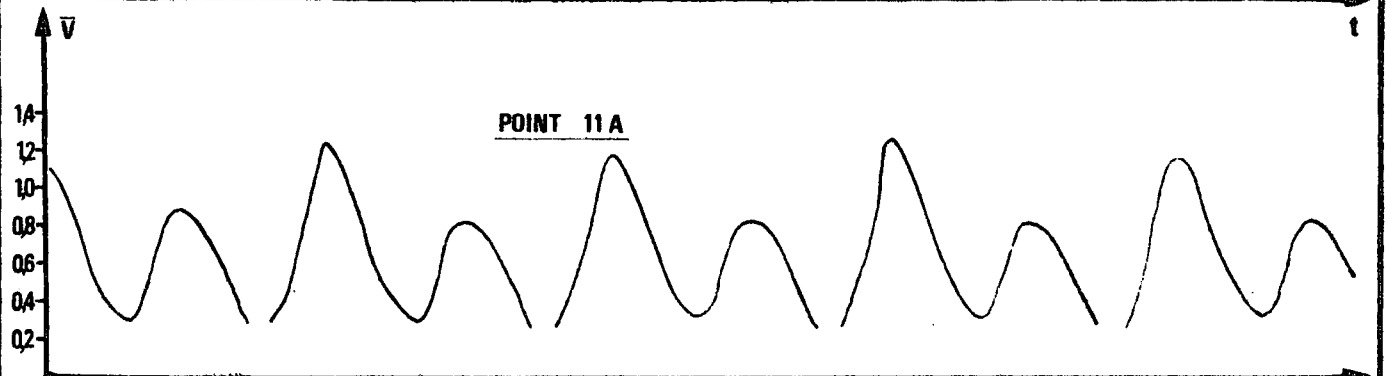
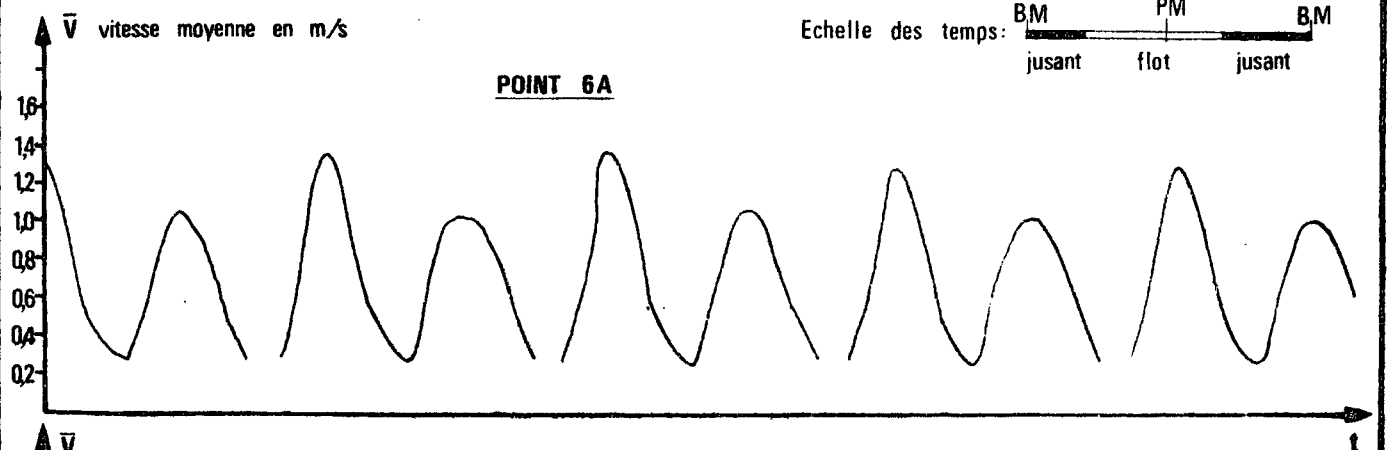
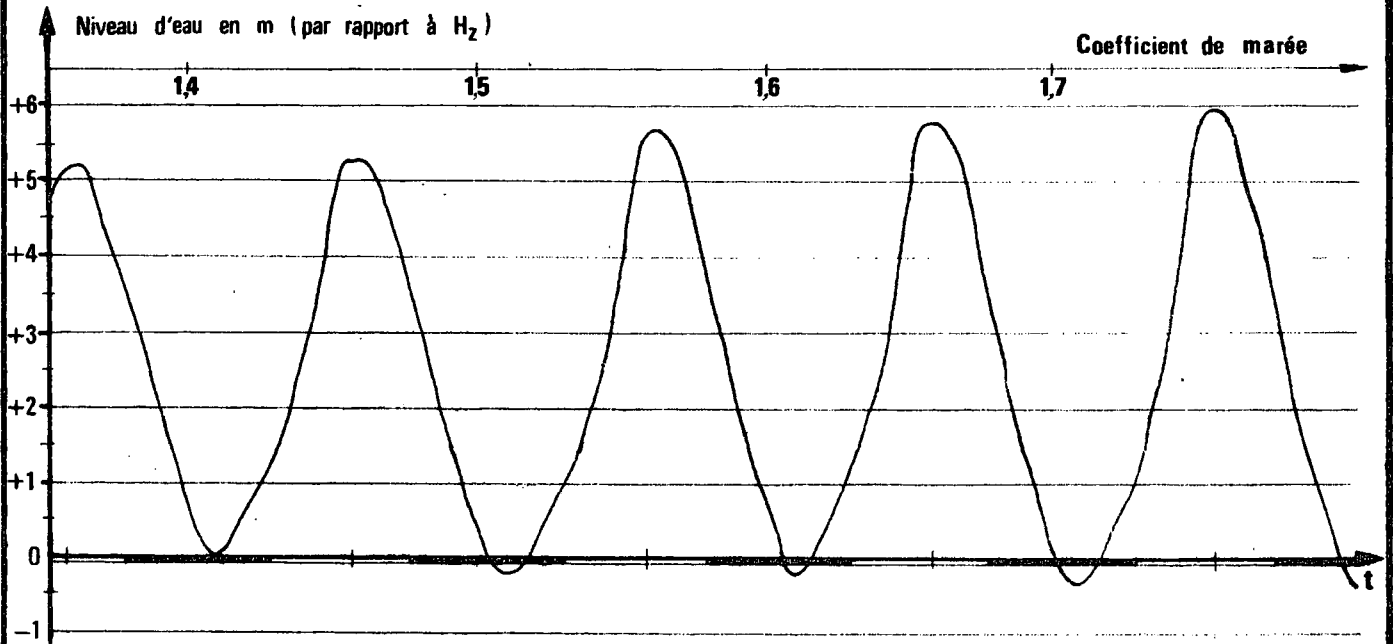


Variation des courants en fonction de la marée. Coefficients de 1 à 1,5



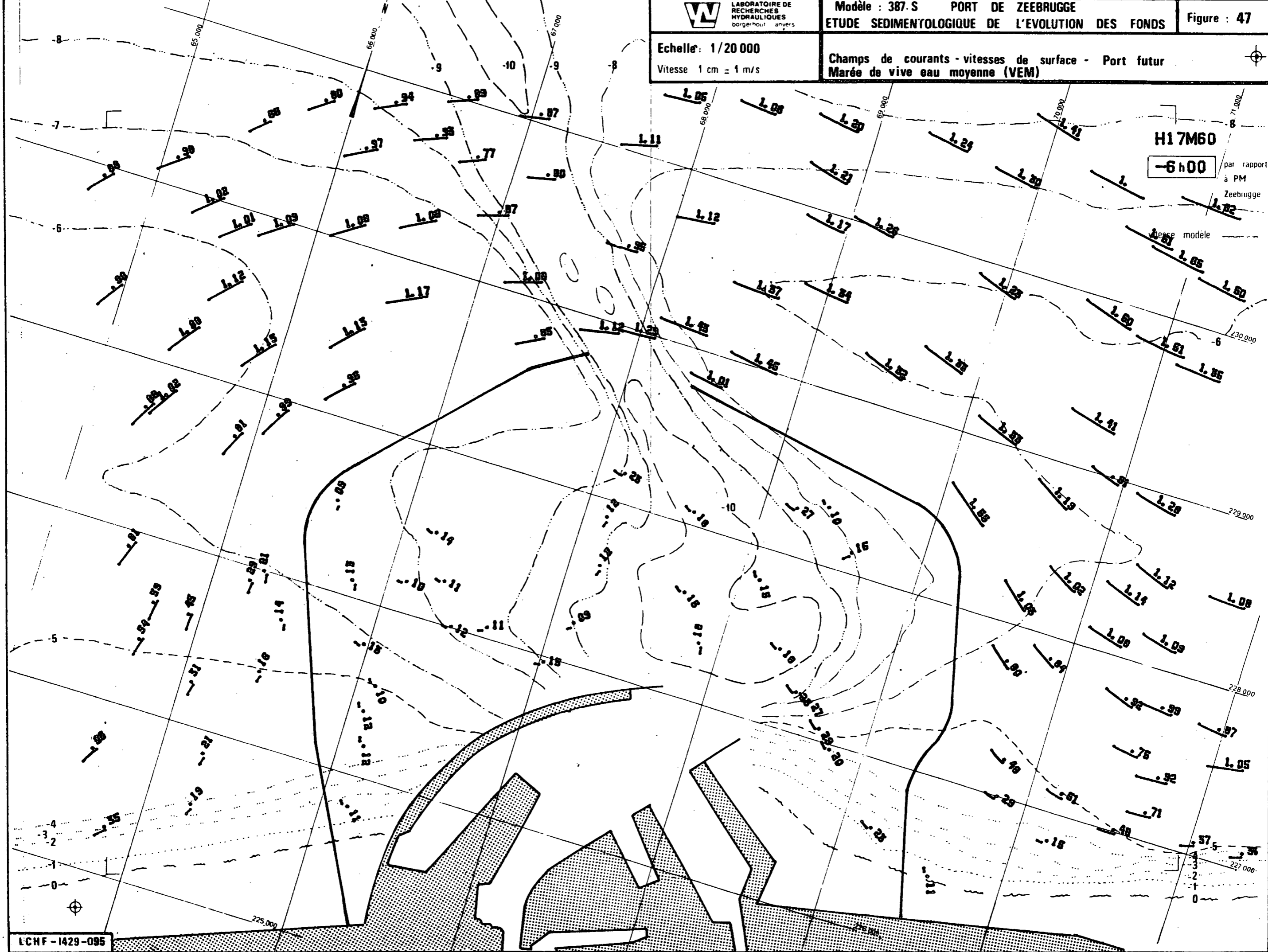


Variation des courants en fonction de la marée. Coefficients de 1,4 à 1,7



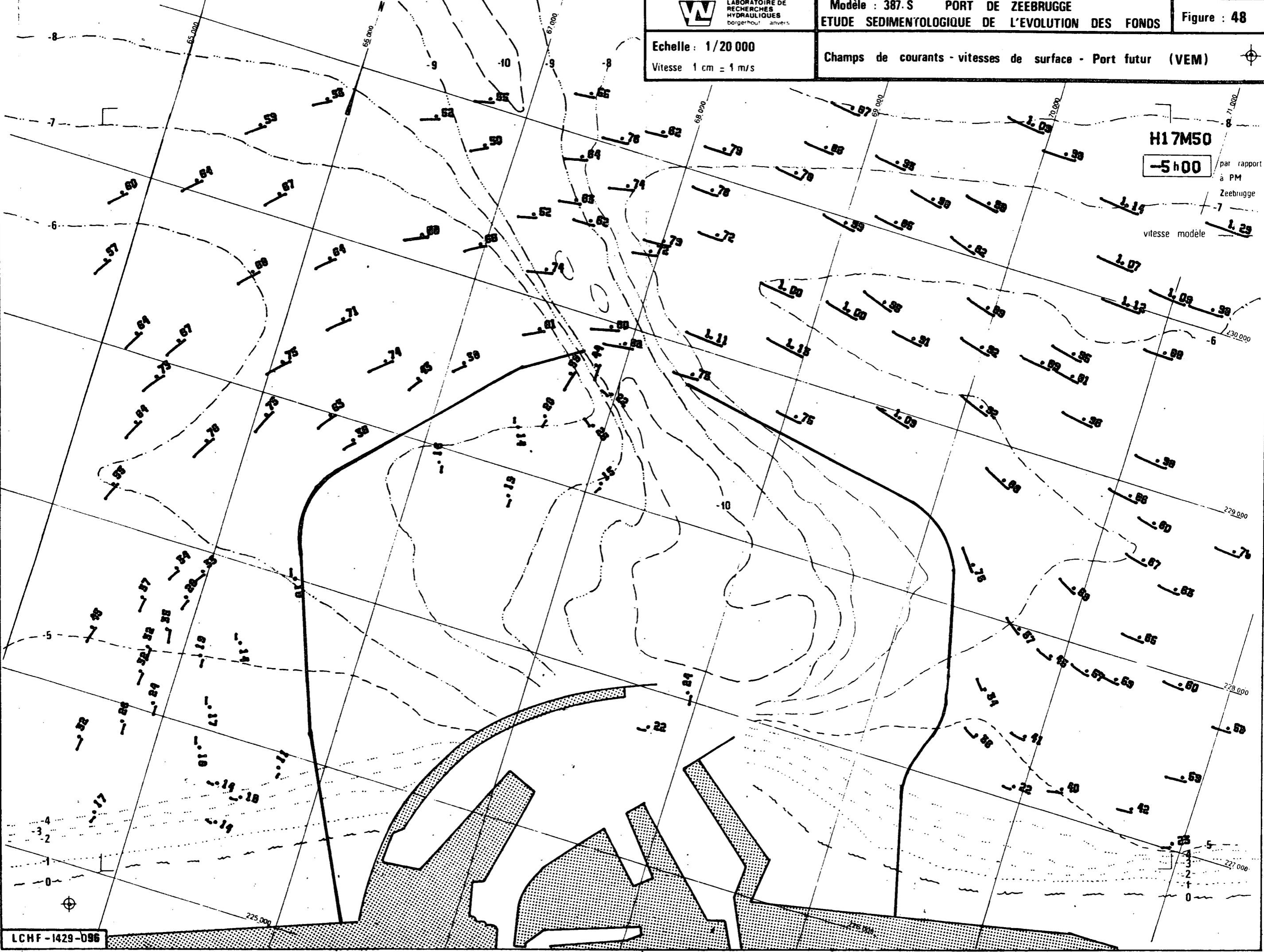
Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - Port futur  
Marée de vive eau moyenne (VEM)



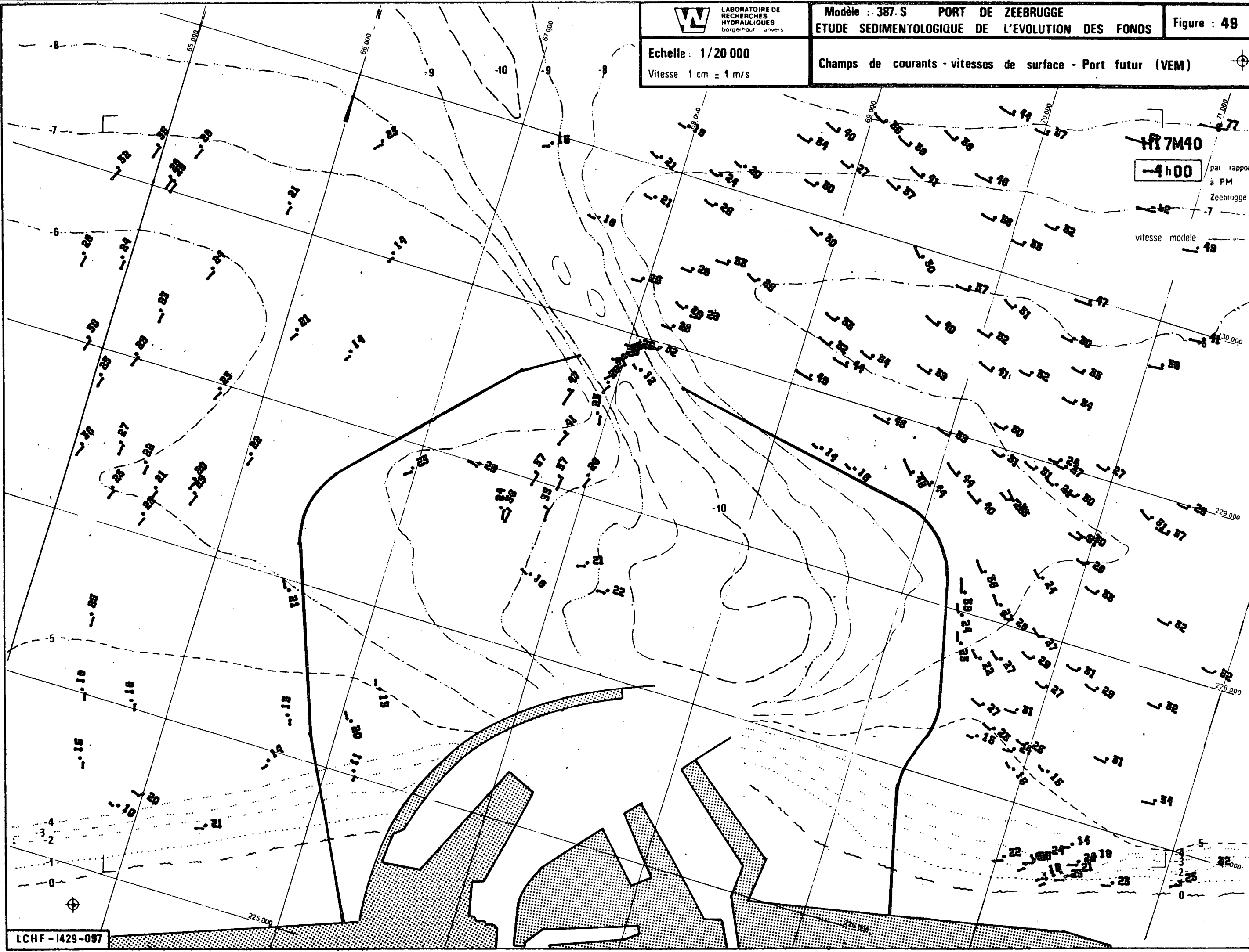
Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - Port futur (VEM)



Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - Port futur (VEM)



1:7M40

-4h00

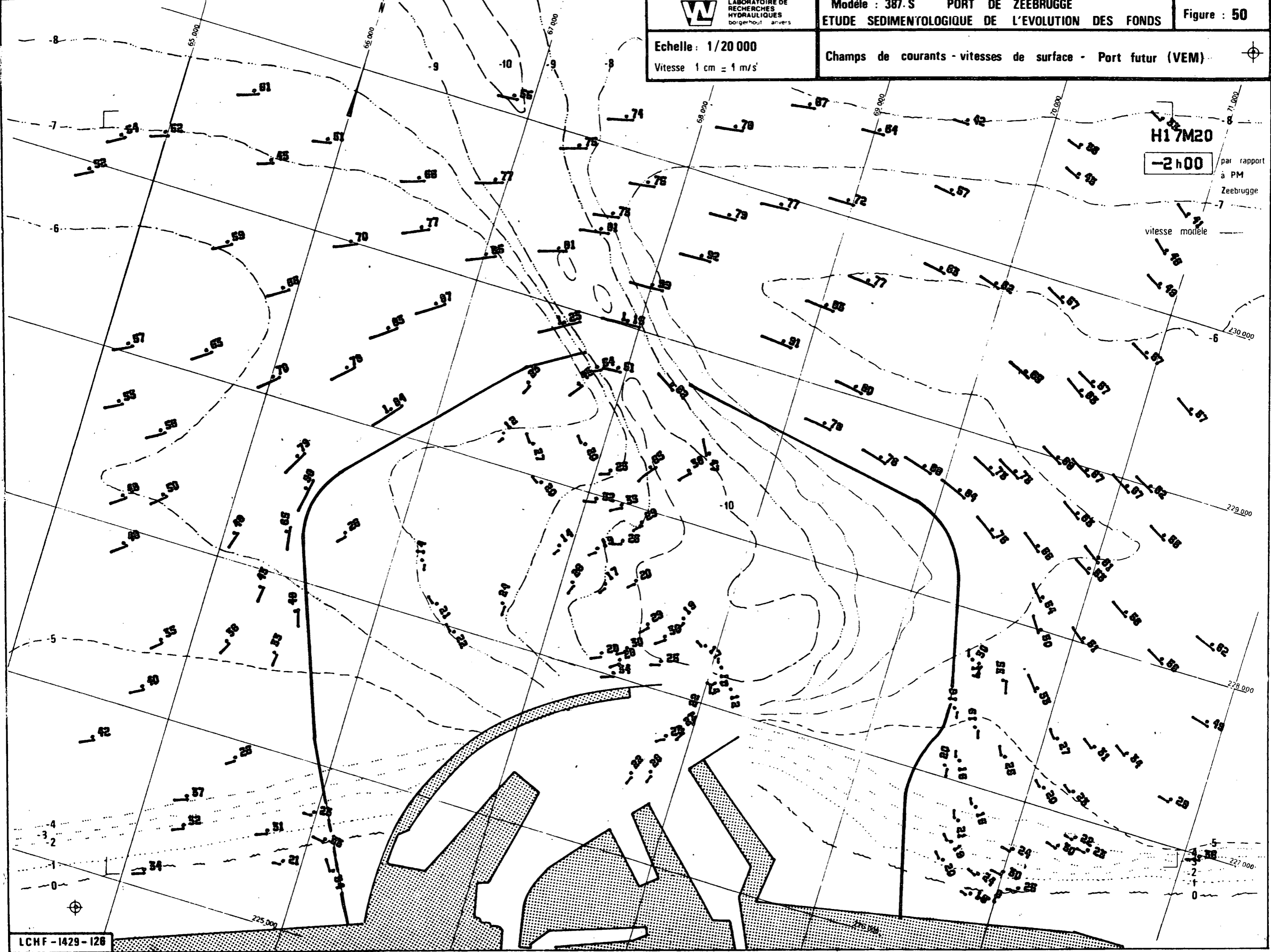
par rapport  
à PM  
Zeebrugge

vitesse modèle  
1.49



Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - Port futur (VEM)



H17M20

-2 h00

par rapport  
à PM  
Zeebrugge

vitesse modele



LABORATOIRE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES borgerhout anvers

Modèle : 387.S PORT DE ZEEBRUGGE  
ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DE L'EVOLUTION DES FONDS

Figure : 51

Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - Port futur (VEM)

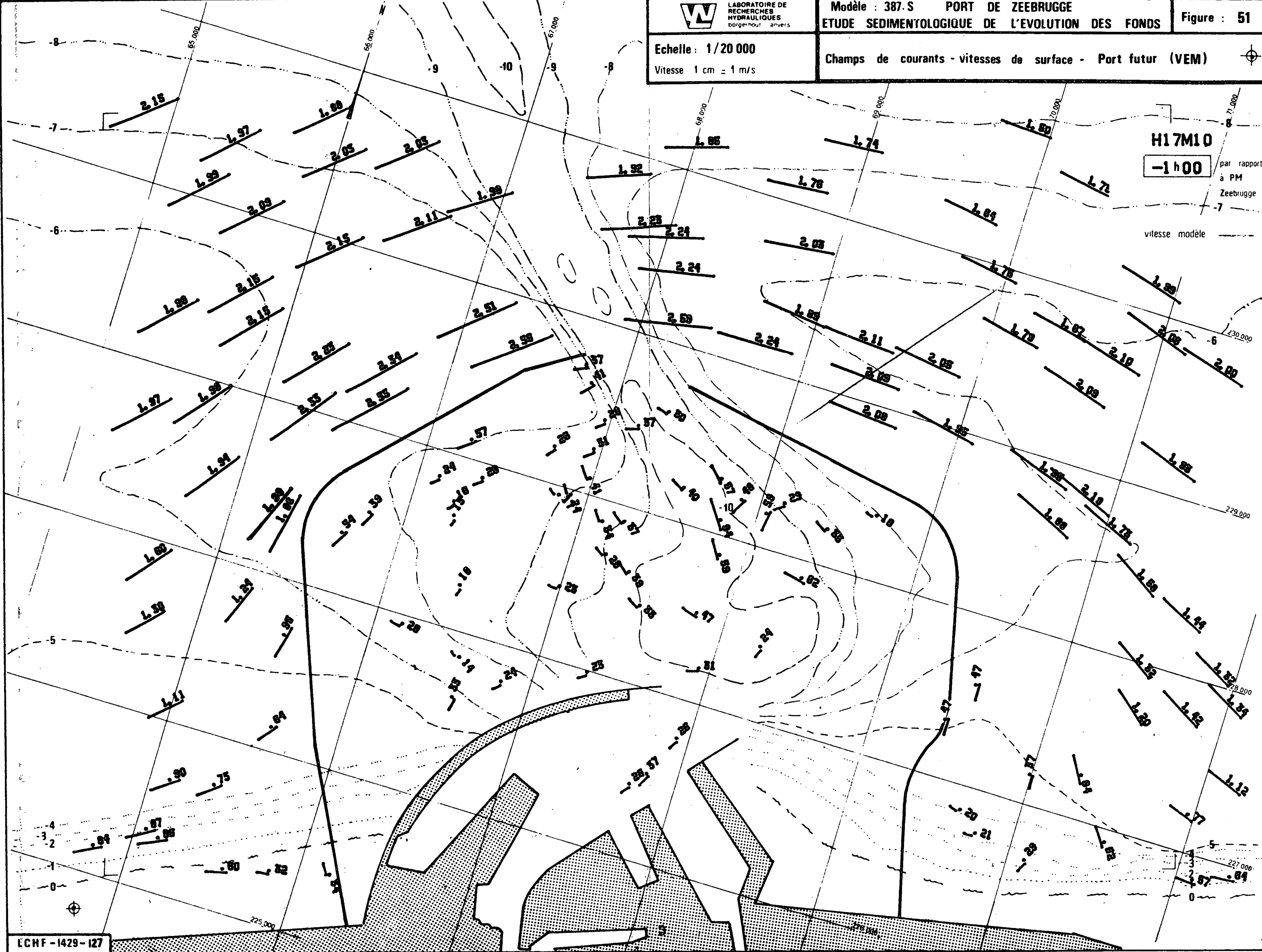


H17M10

-1 h 00

par rapport à PM Zeebrugge

vitesse modèle



Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - Port futur (VEM)

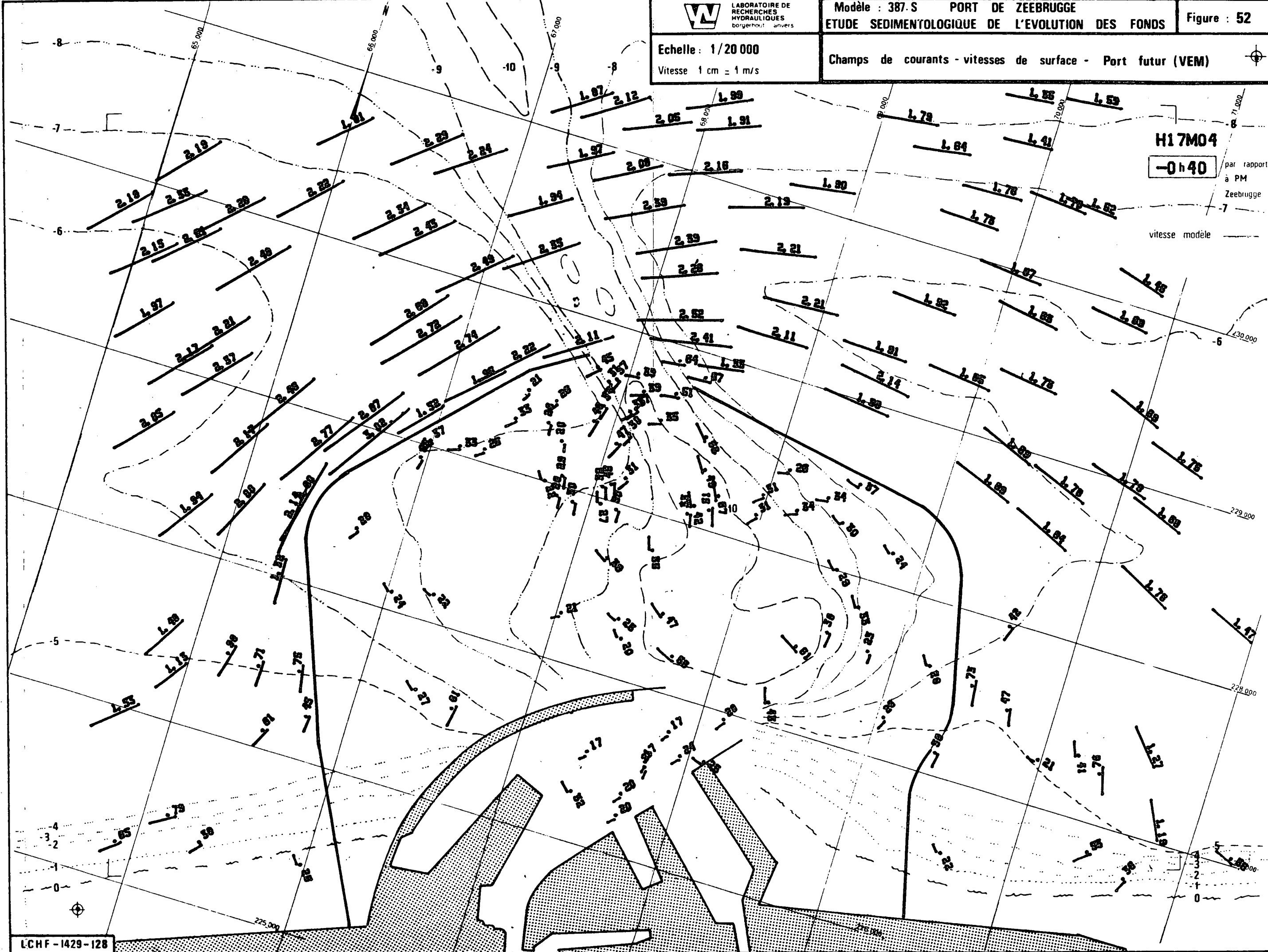


H17M04

-0h40

par rapport à PM Zeebrugge

vitesse modèle





LABORATOIRE DE  
RECHERCHES  
HYDRAULIQUES  
borgerhout anvers

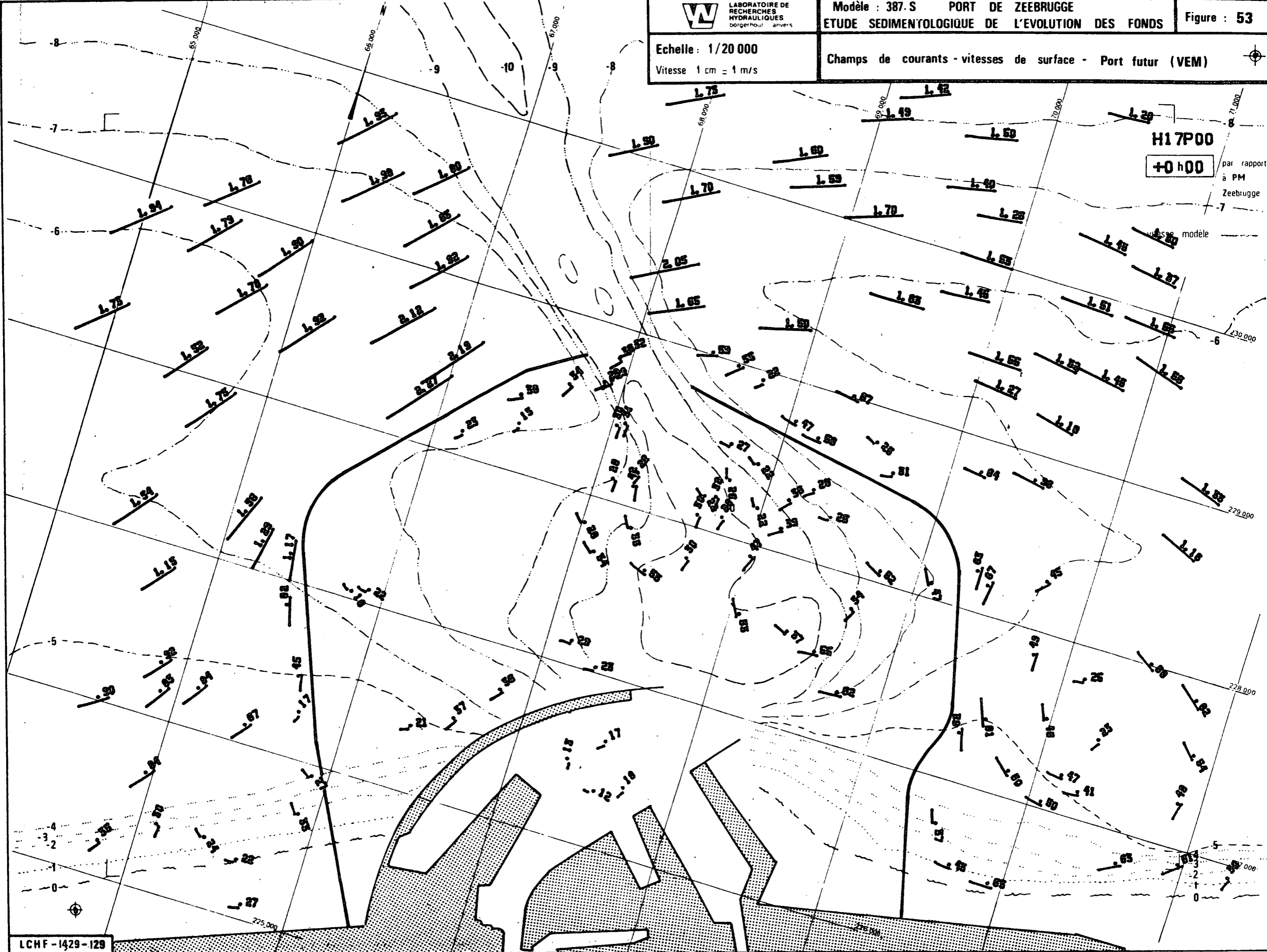
Modèle : 387.S PORT DE ZEEBRUGGE  
ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DE L'EVOLUTION DES FONDS

Figure : 53

Echelle : 1/20 000

Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - Port futur (VEM)



Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - Port futur (VEM)

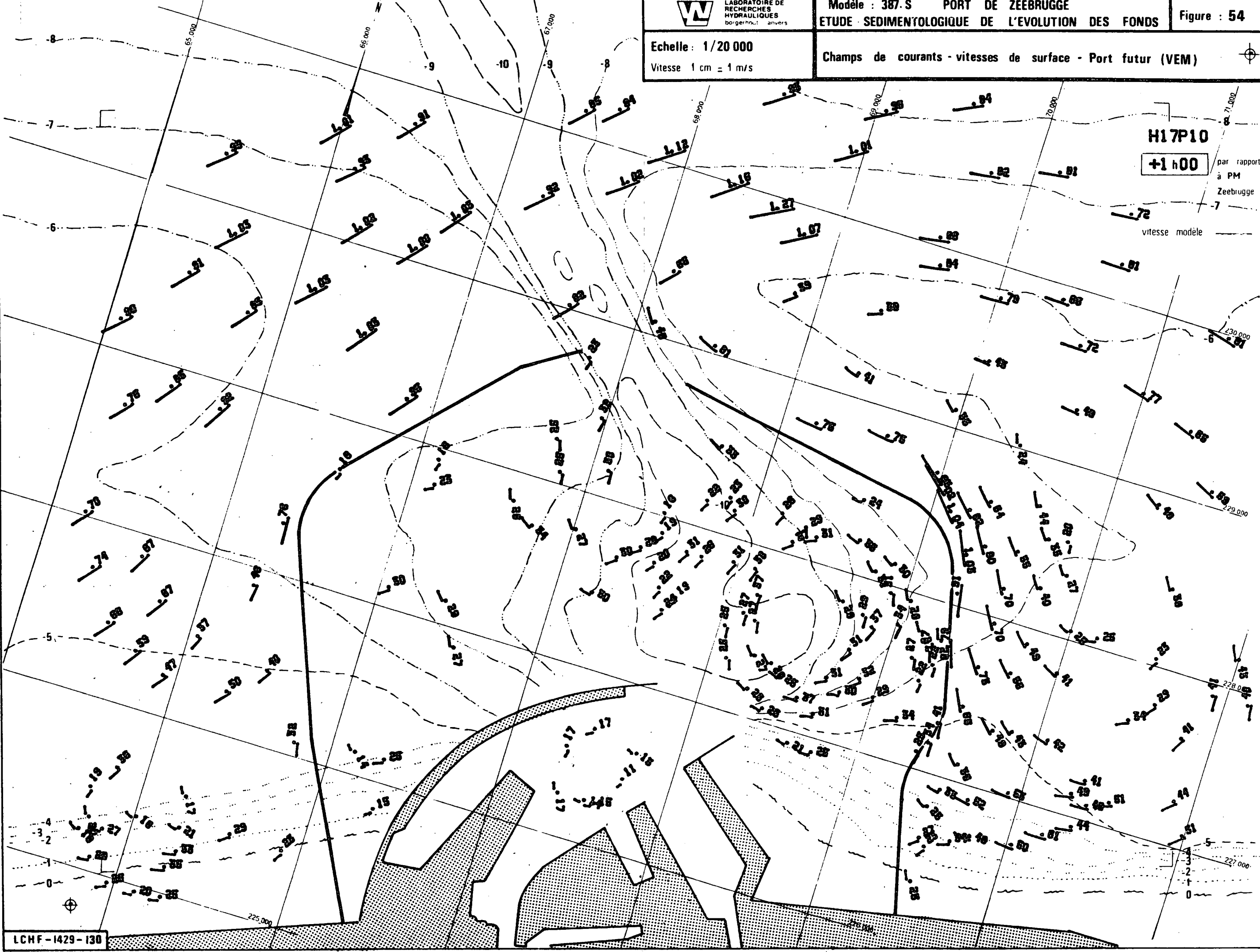


H17P10

+1 h00

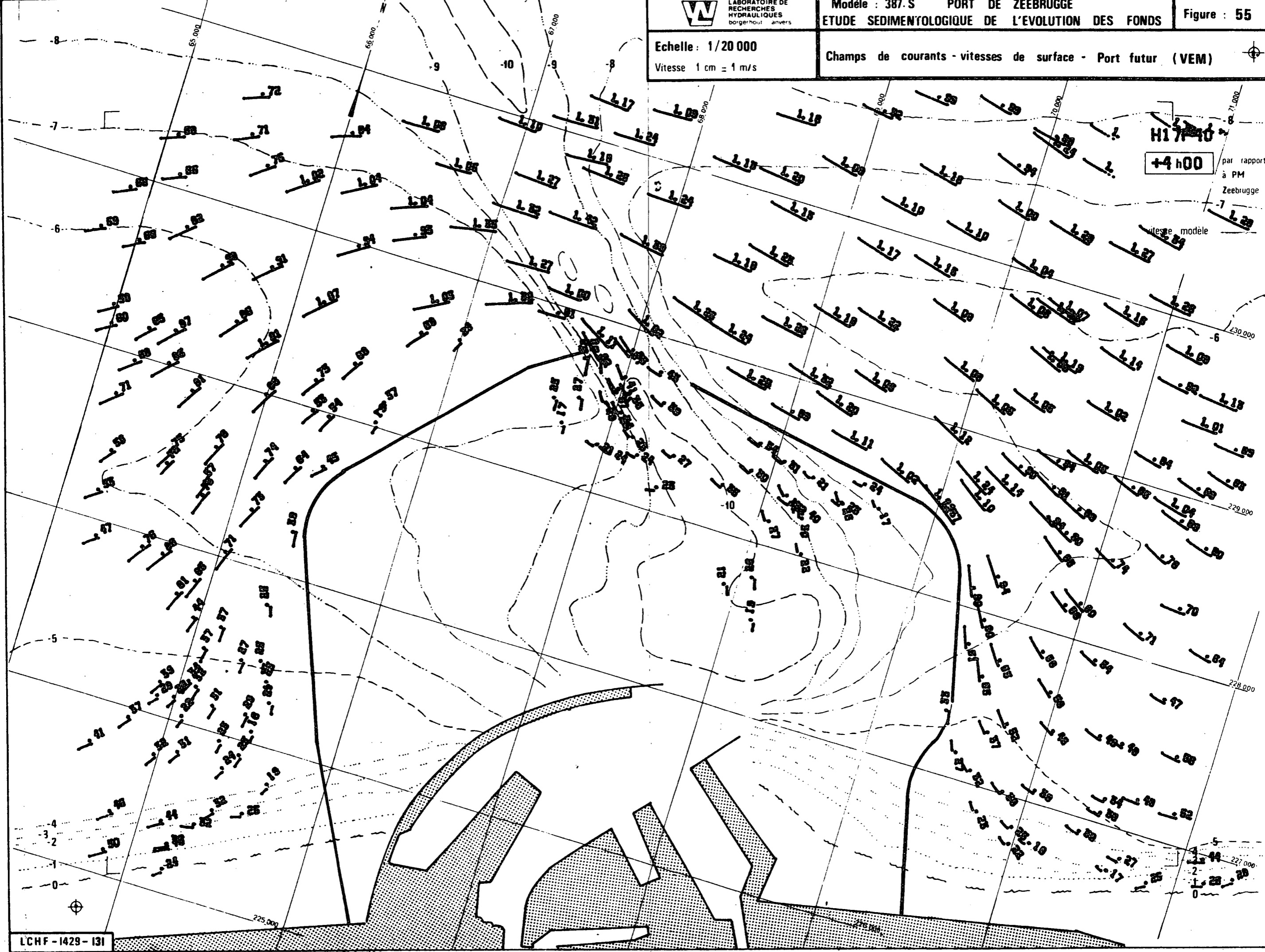
par rapport  
à PM  
Zeebrugge

vitesse modele



Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - Port futur (VEM)



H17740  
+4 h00  
par rapport à PM  
Zeebrugge

vitesse modèle



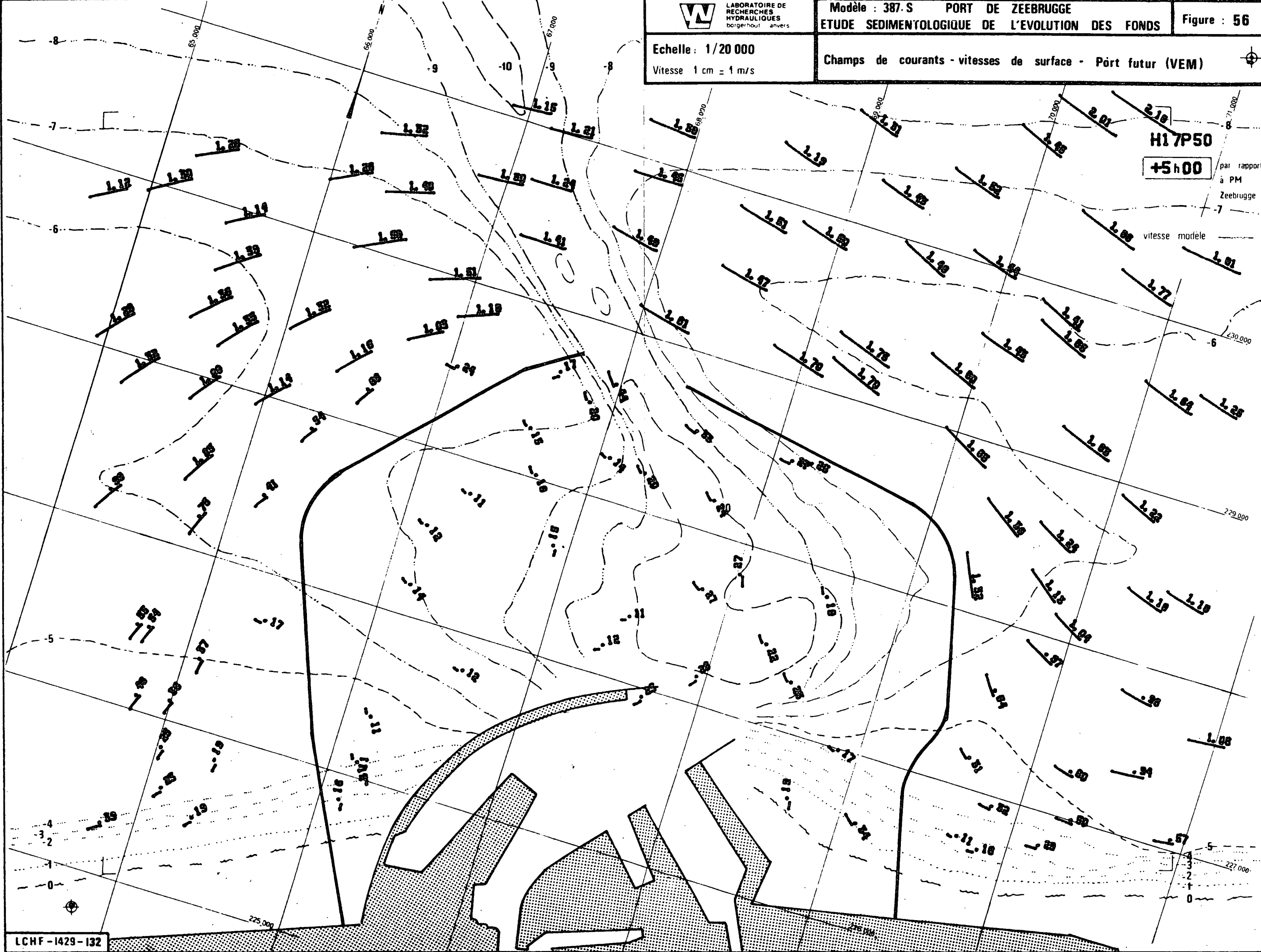
LABORATOIRE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES borgerhout anvers

Modèle : 387-S PORT DE ZEEBRUGGE  
ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DE L'EVOLUTION DES FONDS

Figure : 56

Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - Port futur (VEM)



H17P50

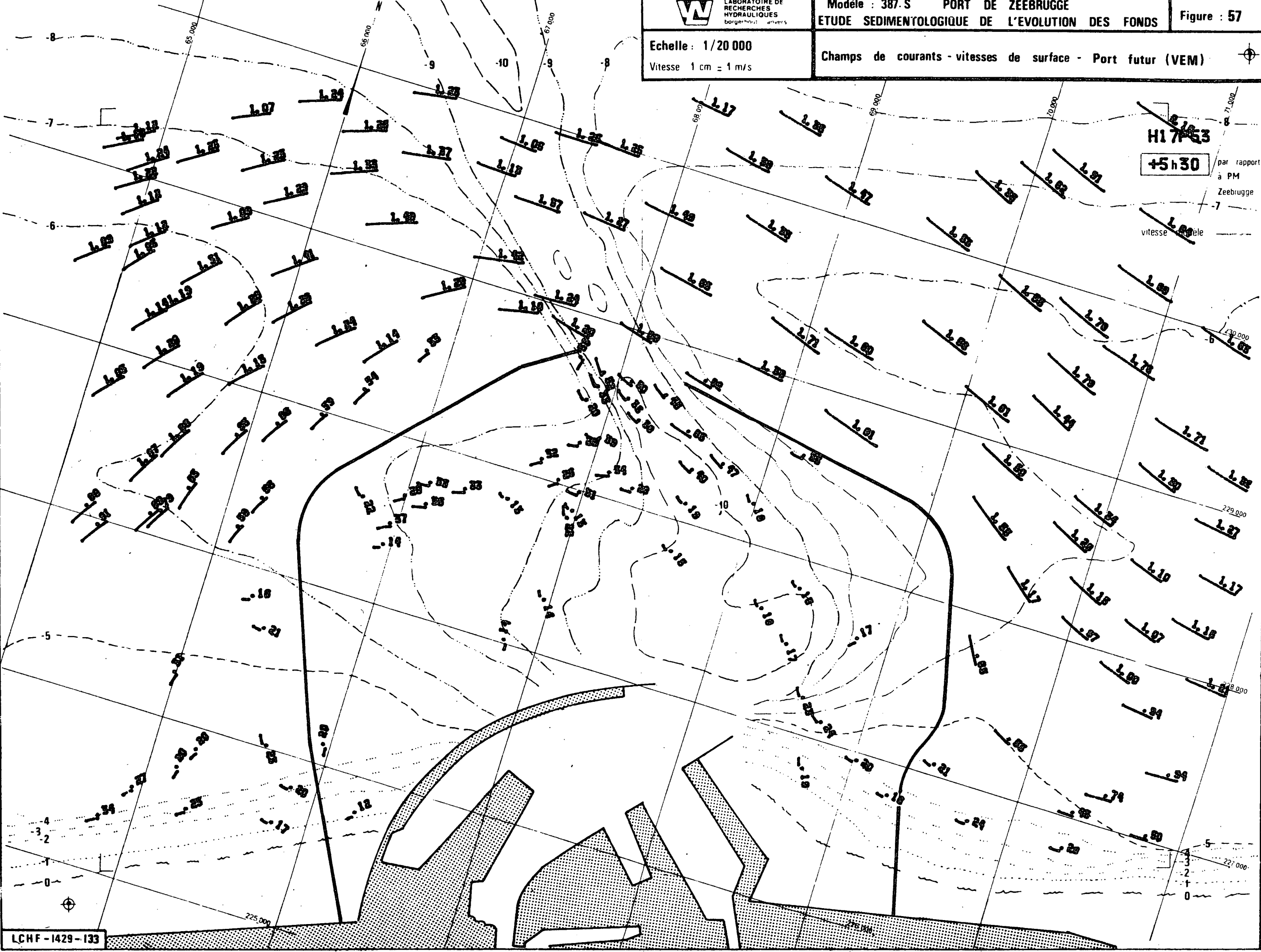
+5h00

par rapport à PM Zeebrugge

vitesse modèle

Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - Port futur (VEM)



H17/53

+5h30

par rapport  
à PM  
Zeebrugge

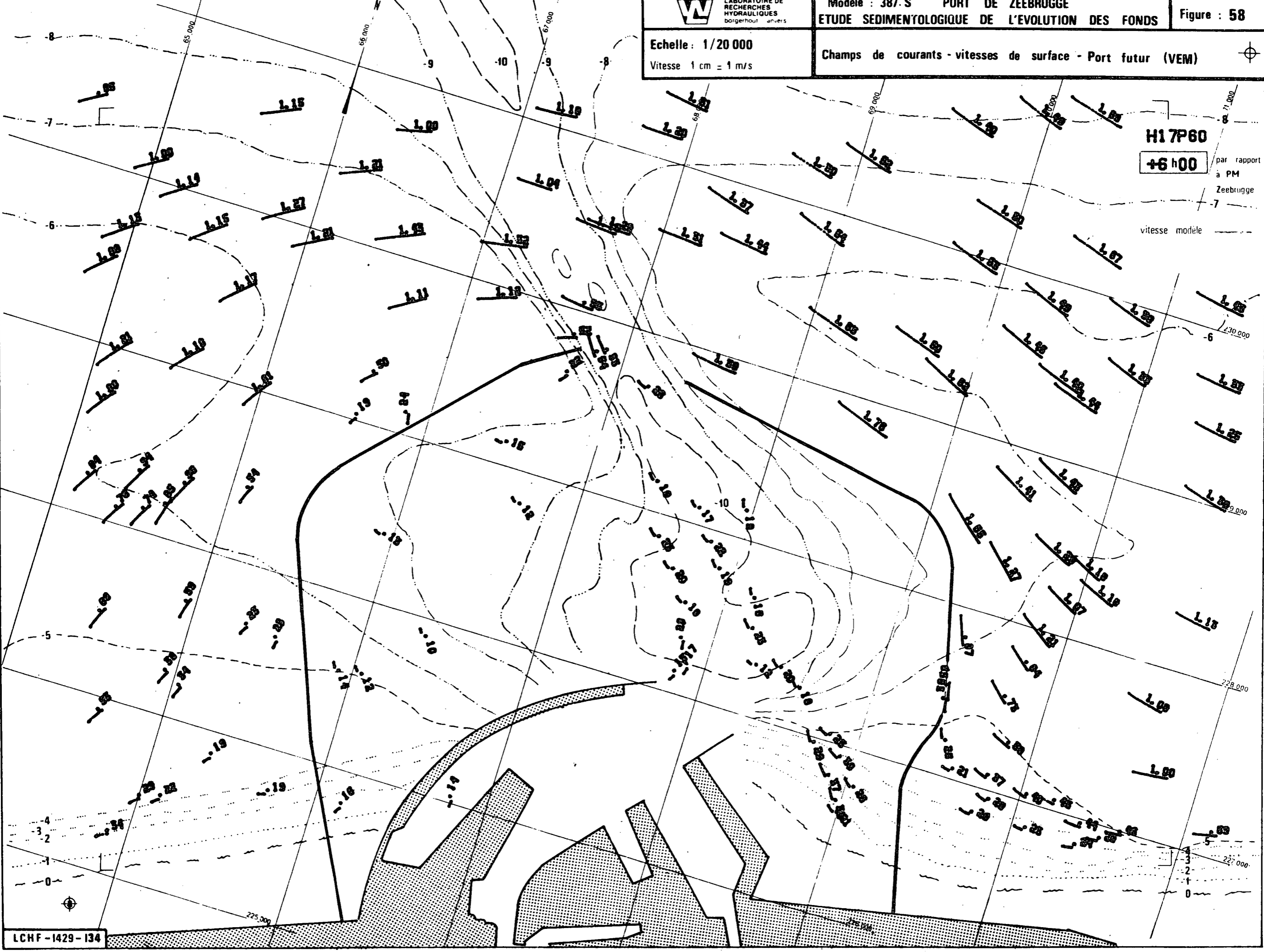
vitesse (m/s)



Echelle : 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

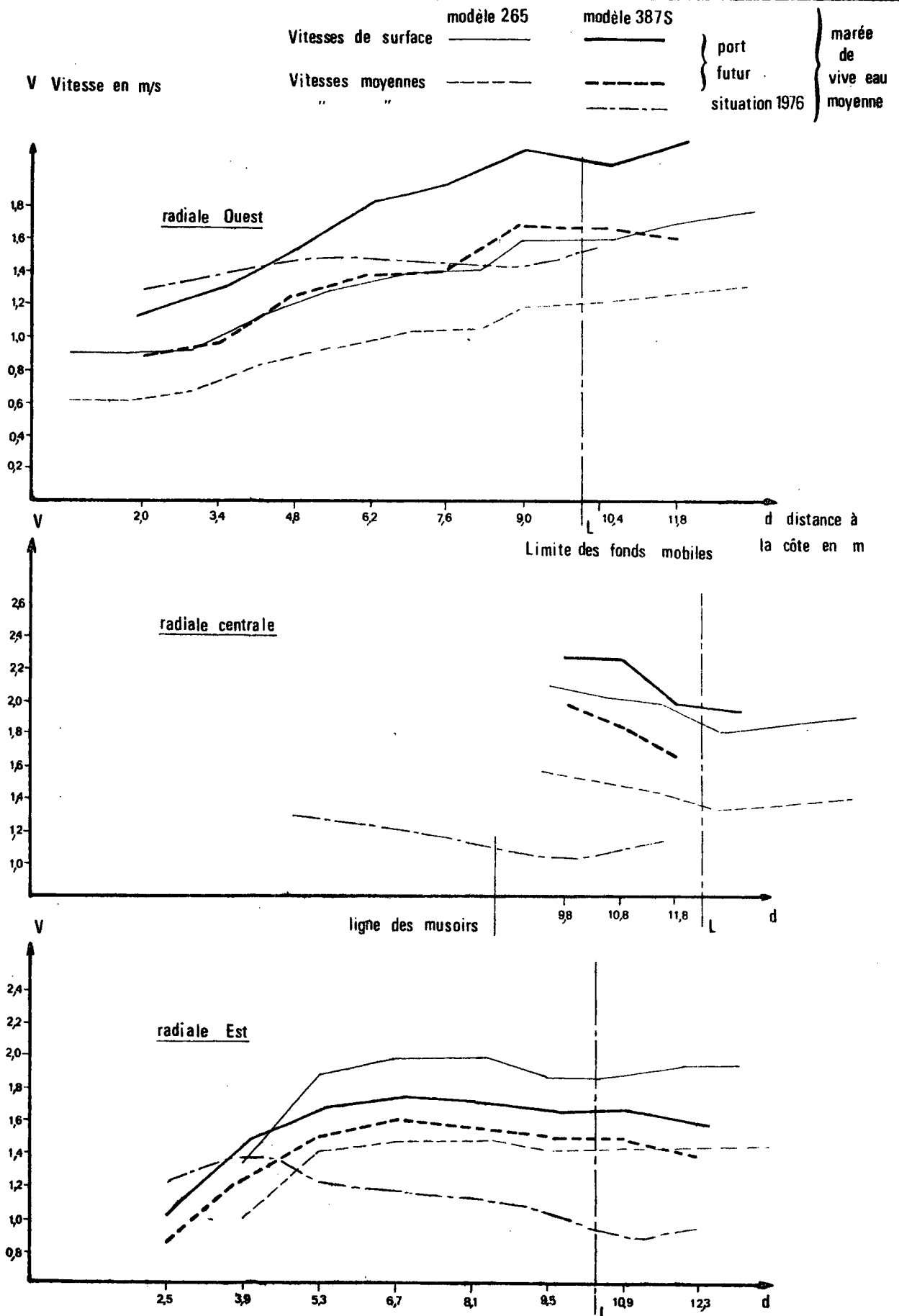
Champs de courants - vitesses de surface - Port futur (VEM)

H17P60  
+6 h00 par rapport à PM Zeebrugge  
vitesse modèle





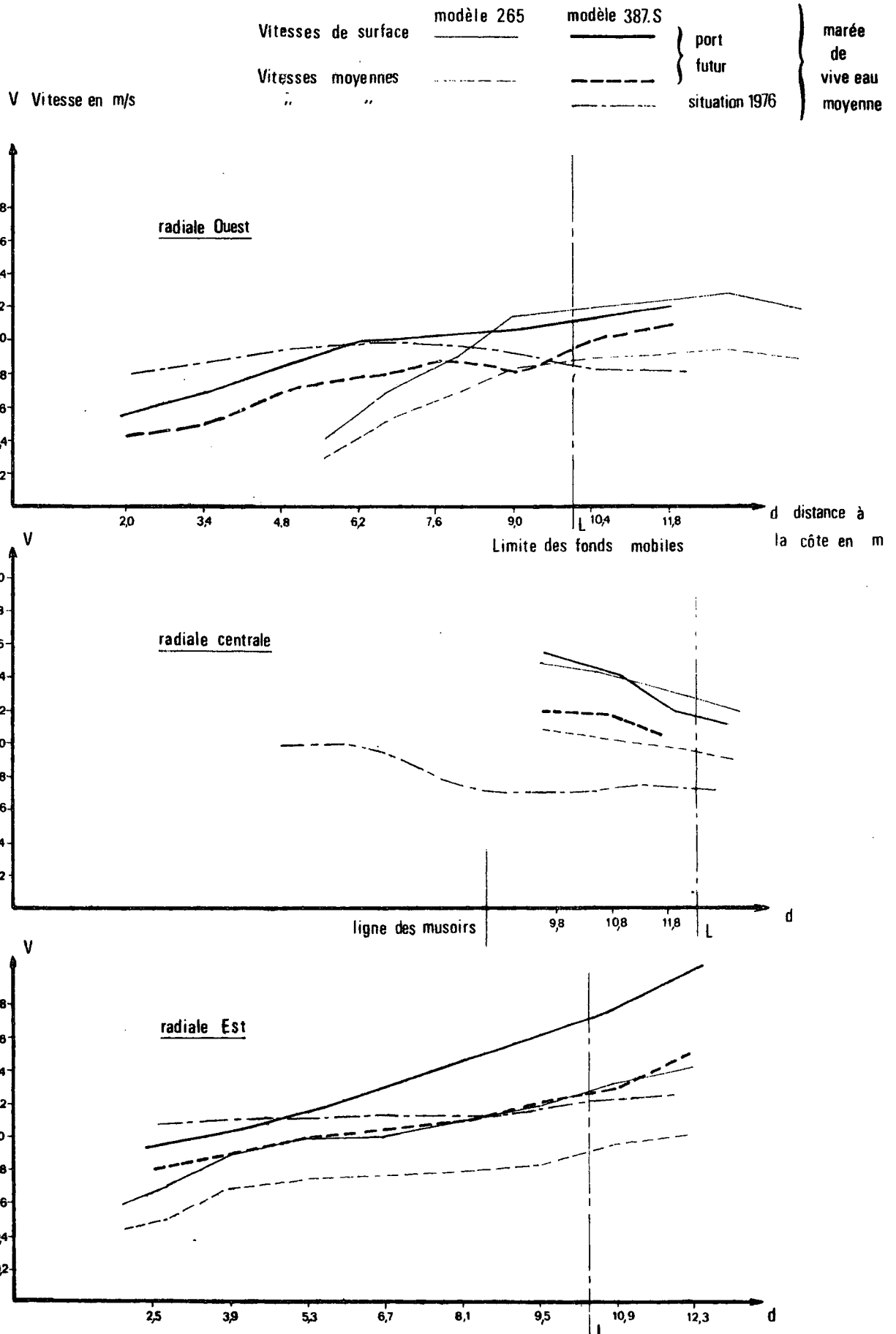
Répartition des vitesses sur les radiales - Port futur  
Maximum de flot





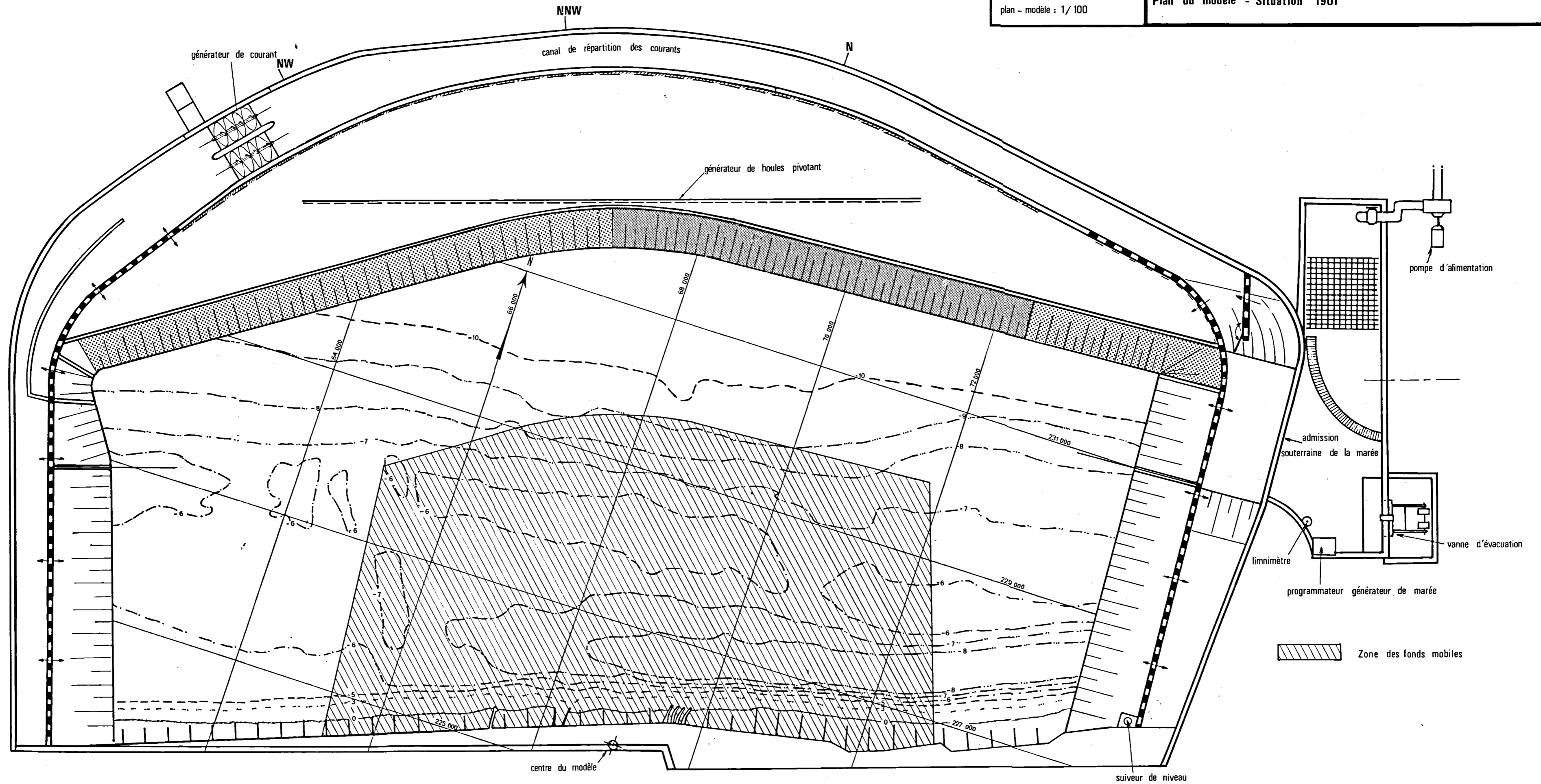
Répartition des vitesses sur les radiales - Port futur

Maximum de jusant



Echelle :  
plan - modèle : 1/100

Plan du modèle - Situation 1901





LABORATOIRE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES borgerhout antwerp

Modèle : 387.S PORT DE ZEEBRUGGE  
ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DE L'ÉVOLUTION DES FONDS

Figure : 62

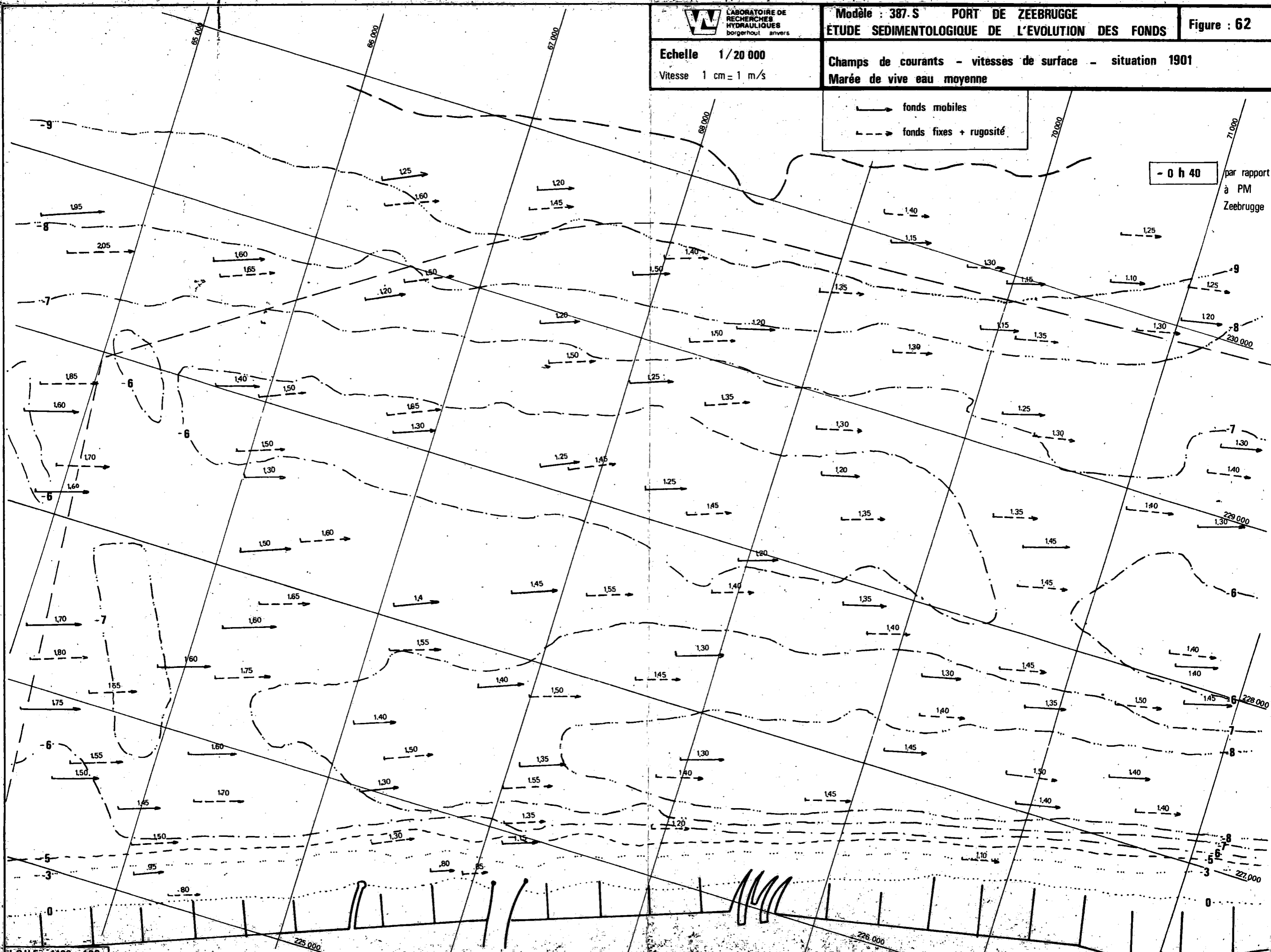
Echelle 1/20 000

Vitesse 1 cm = 1 m/s

Champs de courants - vitesses de surface - situation 1901  
Marée de vive eau moyenne

→ fonds mobiles  
- - - fonds fixes + rugosité

- 0 h 40 par rapport à PM Zeebrugge

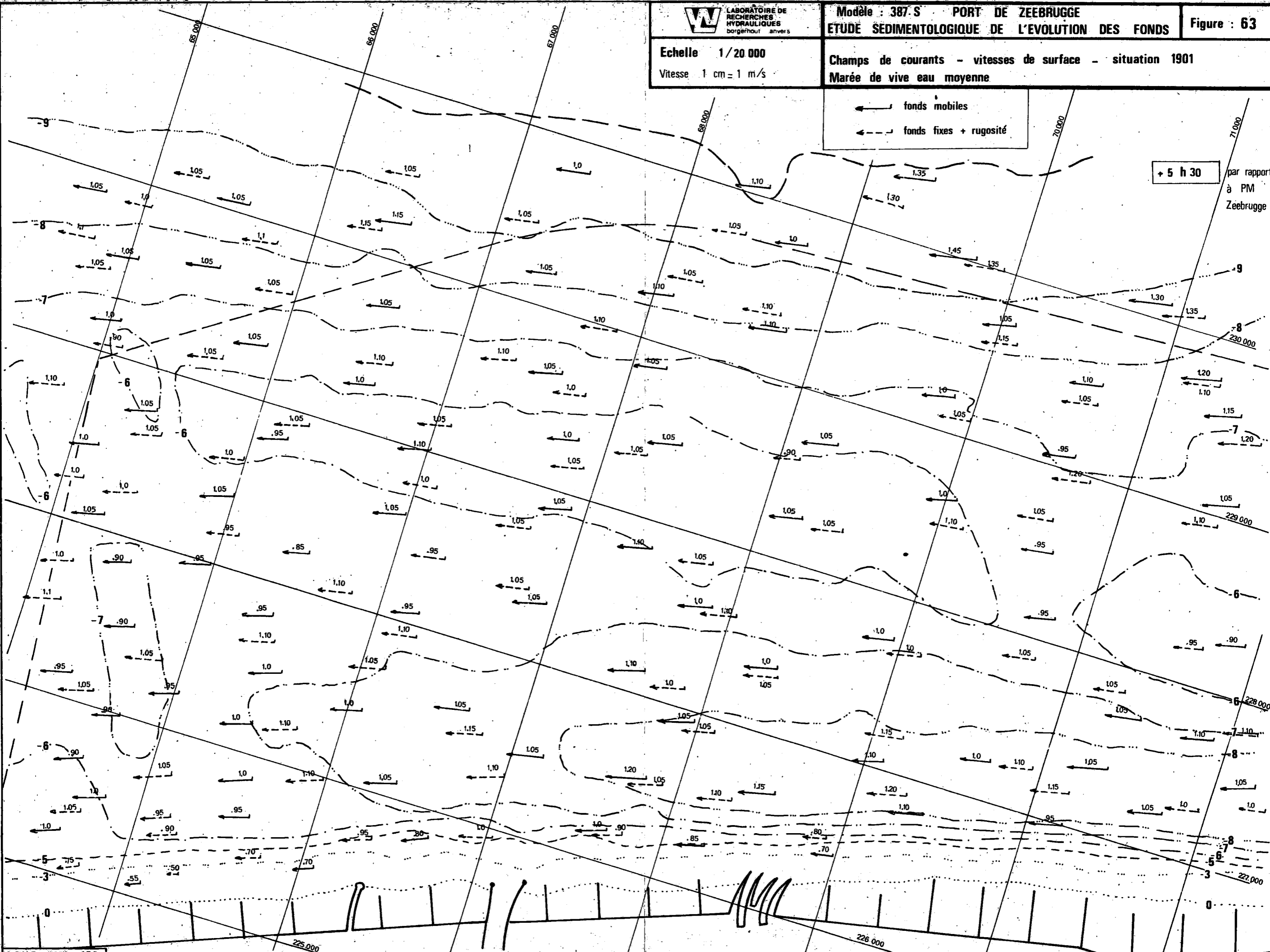


Echelle 1/20 000  
Vitesse 1 cm = 1 m/s

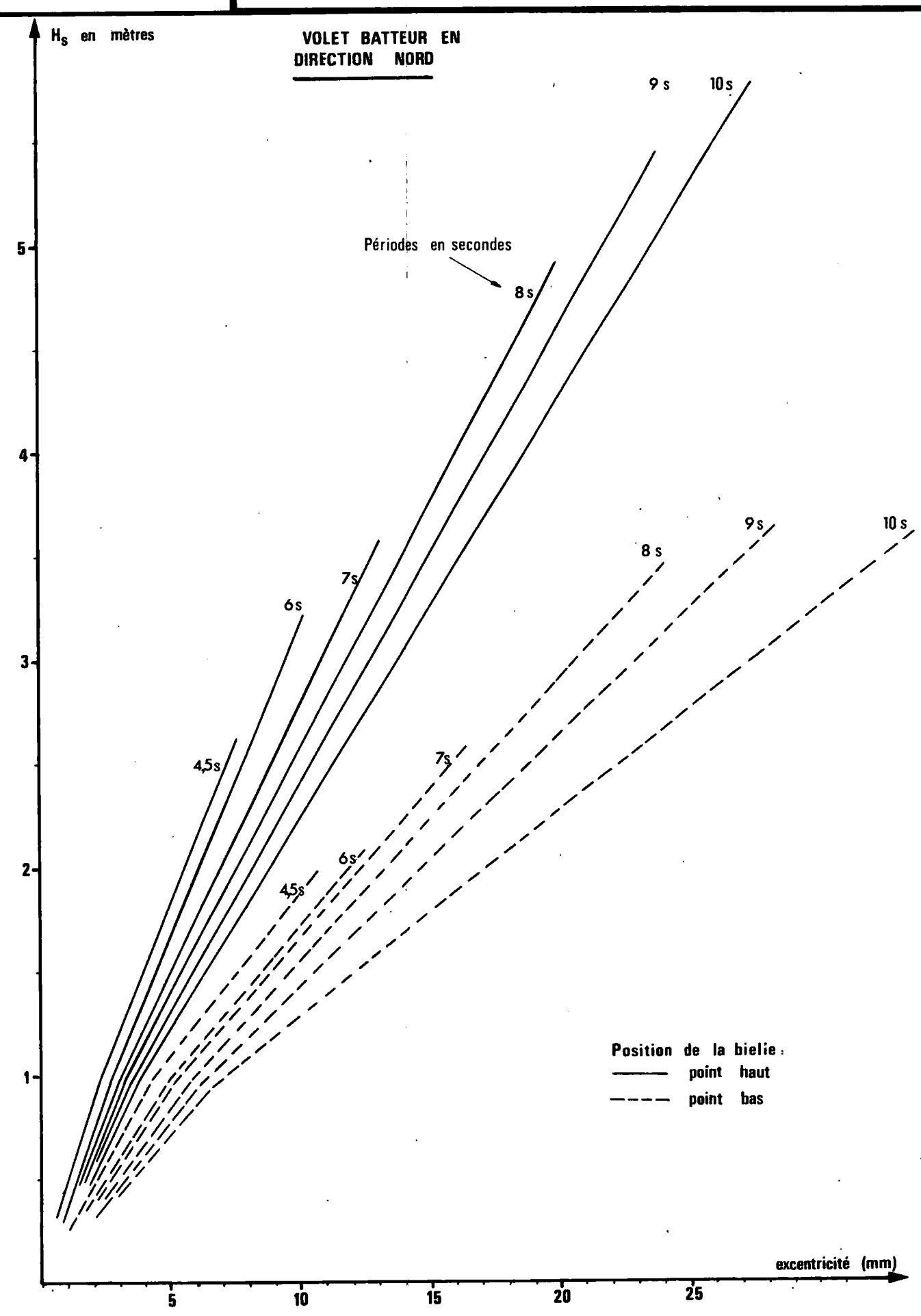
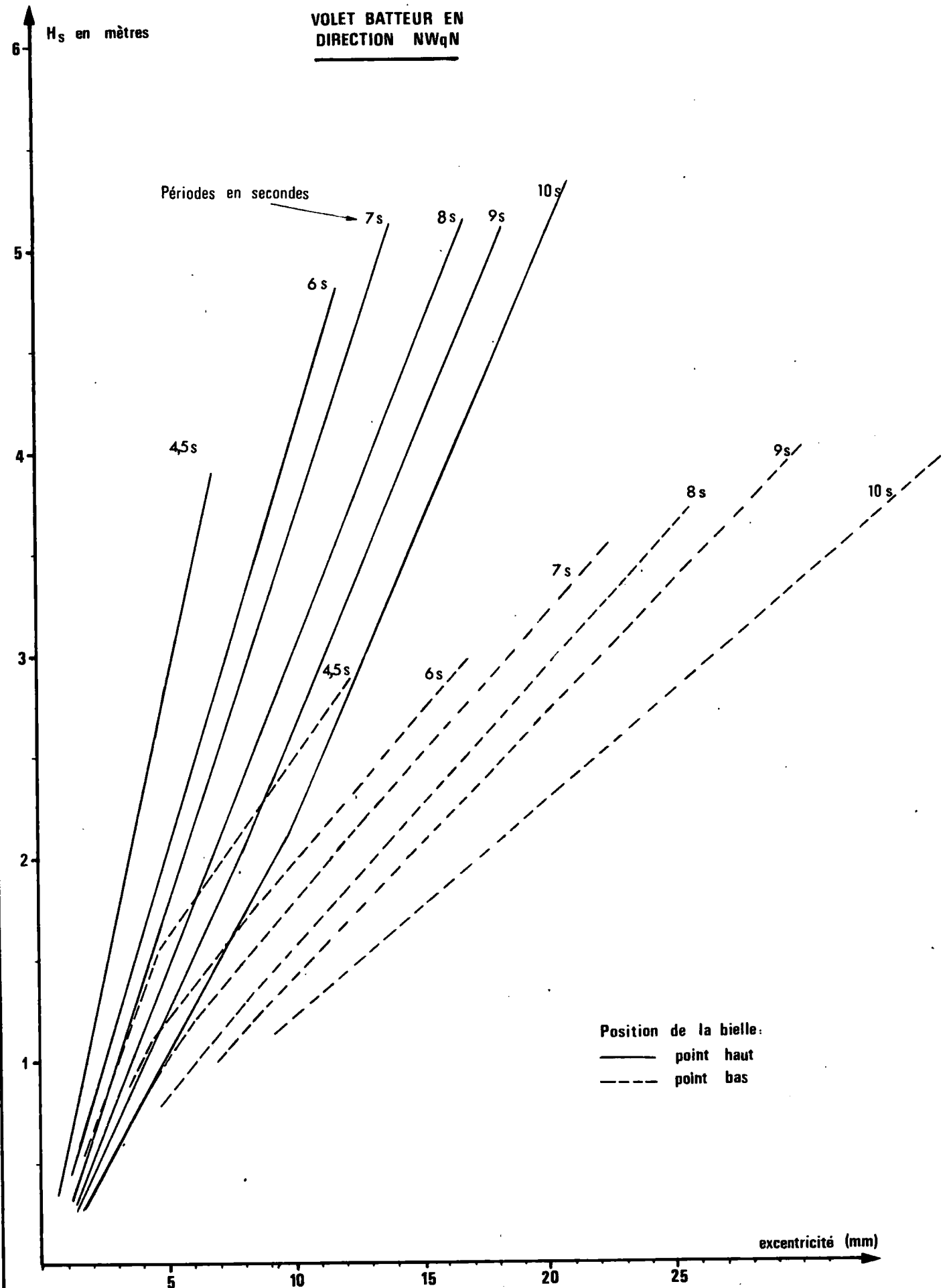
Champs de courants - vitesses de surface - situation 1901  
Marée de vive eau moyenne

← fonds mobiles  
← fonds fixes + rugosité

+ 5 h 30 par rapport à PM Zeebrugge



Courbes d'étalonnage du générateur de houles



LABORATOIRE DE RECHERCHES  
édition HYDRAULIQUES

BERCHEMLEI 115  
2200 BORGERHOUT  
BELGIQUE  
TELEPHONE: 031/36.18.50.



