



DEFORMATIONS DE LA HOULE PRES DES COTES

O.A. Khalifa ; P. Thomas ; Ph Quemeneur

Laboratoire de Génie Civil, ENSM, Nantes
IUT Saint-Nazaire, B.P. 420, 44606 Saint-Nazaire cedex

ABSTRACT

For the management of a coastal sites, the Civil Engineer needs to know the physical factors which will influence the site. This paper concerns itself with the prediction of deformation due to waves, as it is one of the main physical factors involved.

In this light some numerical computer models, RESOL and ROSE have been developed which modelise wave deformation due to the refraction on the sea bed in shallow water. These programs give good refraction wave plans both forward and backward.

If however the sea bed topography is highly variable, the refraction model predicts infinite wave heights. Because of this, a complementary numerical program for wave prediction RED, has been developed which is based on the combined refraction and diffraction theory of Berkhoff(1973), simplified by Radder(1979).

These programs use the numerical technique of finite difference method. Firstly implanted on VAX750, these numerical programs are now adapted for Compatible PC configuration, connected with plotter and digitalizer. They use some graphics routines for drawing wave plans, isophases curves and isoheights curves.

In this paper, some applications of these numericals codes are given for reals sites: the Côtes D'Armor and the Estuary of Loire.

RESUME

Pour aménager un site côtier quelconque, l'ingénieur de Génie civil a besoin de connaître les différents facteurs physiques susceptibles de le solliciter. Dans cette recherche, nous étudions particulièrement les déformations de la houle lors de son approche des côtes et près des ouvrages portuaires.

Dans ce but, nous avons développé deux codes de calculs RESOL et ROSE, basés sur la modélisation de la réfraction de la houle quand elle se propage sur des fonds variables. Cet outil permet d'établir des plans de houle donnant la déformation des crêtes de houle dans l'espace, ainsi que des roses d'orthogonales de houle couvrant le spectre directionnel.

Afin d'avoir des résultats réalistes, il est indispensable de tenir compte des phénomènes dissipatifs qui se produisent à l'interface eau-sol. Dans ce but, une ébauche d'analyse de l'influence de la friction est intégrée à RESOL, en supposant que les fonds restent fixes.

Mais nous nous sommes rendus compte que le champ d'application du modèle de réfraction était limité, car, dès que les fonds deviennent tourmentés, les plans de houle qu'il fournit présentent des croisements d'orthogonales où, théoriquement, les hauteurs de houle y sont infinies. C'est pour cette raison qu'un code de calcul complémentaire, RED, a été conçu. Celui-ci est basé sur un modèle mathématique combinant la réfraction à la diffraction.

SESSION 1

Ces logiciels utilisent la technique numérique des différences-finies.

Précédemment implantés sur VAX750, ces codes de calculs ont été refondus et adaptés à des configurations plus classiques (Compatibles PC). Ils utilisent divers codes infographiques pour les tracés des plans de houle, des courbes d'égales phases et des courbes d'égales hauteurs.

Dans cet article nous présentons quelques unes des applications de ces codes de calculs, dans les sites des Côtes d'Armor et de l'estuaire de la Loire.

MOTS-CLES :

Houle / Vague / Agitation / Déformation / Crêtes Orthogonales / Réfraction / Diffraction / Friction

I INTRODUCTION

La houle est l'un des facteurs physiques les plus prépondérants que l'ingénieur de Génie Civil doit prendre en compte lors du dimensionnement des ouvrages maritimes. En dépit de forts coefficients de sécurité pris lors de ces calculs, on constate que certains ouvrages sont détruits par des tempêtes aussi brutales qu'imprévisibles, et que le littoral subit de profonds bouleversements au gré des saisons.

Cette carence provient moins d'une méconnaissance du comportement intrinsèque du matériau que de la prédiction de l'effort à prendre en compte. En effet, le concepteur doit disposer de données fiables des sollicitations physiques pour pouvoir garantir la pérennité de l'ouvrage. Or ces données sont la plupart du temps impossibles à rassembler, en raison de l'inexistence de mesures et/ou de l'éloignement de ce lieu du site d'intérêt.

Dès lors, il devient indispensable de recourir à l'utilisation de modèles mathématiques pour prédire ces sollicitations au droit des ouvrages. Ces modèles sont bien sûr très nombreux et leurs applications variées.

Dans notre laboratoire, nous avons développé certains modèles basés principalement sur des critères pratiques, techniques et économiques. Ils permettent de déduire les caractéristiques de la houle sur un site donné. Pour cela, il est fait appel à divers modèles gigognes, qui permettent par résolutions successives, l'obtention de ces paramètres en un temps de calcul réduit, et donc un coût de revient faible.

Précédemment conçus sur VAX750, l'ensemble de ces logiciels sont aujourd'hui adaptés à des configurations de matériels plus classiques de Compatibles PC.

Dans un premier temps, une approche globale de la propagation de la houle sur le site est analysée grâce à deux codes (RESOL et ROSE), basés sur la théorie de la réfraction de la houle. Ces résultats "grossiers" fournissent les conditions aux limites à un code RED, basé sur la théorie de la réfraction combinée à la diffraction de la houle.

Certains utilitaires infographiques sont connectés en amont de ces codes pour en faciliter la saisie des données de base, et en aval pour une meilleure visualisation des résultats. La configuration de matériel de la version exploitée ici, associée à un ordinateur doté d'un microprocesseur 8087, une table à digitaliser de format A0 et une table traçante de format A1.

Dans cet article, où l'objectif est de donner une idée générale de nos travaux de recherche et des principaux résultats qui en découlent, nous présentons d'abord succinctement les équations de base qui servent aux modèles, avant de donner un descriptif des codes de calculs ainsi que certaines de leurs applications sur des sites réels, tels que les Côtes d'Armor et l'estuaire externe de la Loire.

II MODELISATION DE LA PROPAGATION DE LA HOULE EN FRANGE LITTORALE

II.1. Modélisation de la réfraction.

La réfraction de la houle se traduit, géométriquement par la déformation des crêtes et énergétiquement par une variation des amplitudes de la houle.

Une houle se propageant sur des fonds variables a tendance à être ralentie aux endroits de moindre profondeur. Cette variation des célérités entraîne une rotation des crêtes. La mise en équation de ce principe simple conduit à l'équation différentielle :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial X} \cdot \sin \alpha - \frac{\partial C}{\partial Y} \cdot \cos \alpha \text{ avec } C = \frac{L}{T} \text{ et } L = \frac{gT^2 \text{th} (2\pi d)}{2\pi} \quad (1)$$

et où α est la rotation de la crête; C, la célérité, L la longueur d'onde et (X, Y) un système de coordonnées rectangulaires.

La résolution de cette équation permettra de connaître en tout point la rotation de l'orthogonale.

L'hypothèse fondamentale de cette théorie est que l'énergie contenue entre deux orthogonales se conserve du large jusqu'à la côte. En écrivant

SESSION 1

l'égalité des puissances moyennes entre le large (indice 0) et un point de faible profondeur, il vient :

$$\frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot l_0 \cdot C_{g0} \cdot H_0^2 = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot l \cdot C_g \cdot H^2$$

puisque $\frac{E}{E_0} = 1$, on obtient : $\frac{H}{H_0} = \left(\frac{C_{g0}}{C_g} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{l_0}{l} \right)^{1/2}$ (2)

donnant l'expression de la hauteur relative de la houle (H/H₀) en fonction de :

- K1 = (C_{g0}/C_g)^{1/2}, le rapport des célérités de groupe; ce coefficient est facilement calculable.
- K2 = (l₀/l)^{1/2}, le rapport des écartements entre orthogonales, donné par l'équation différentielle

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} + P(t) \cdot \frac{d\beta}{dt} + Q(t) \cdot \beta = 0 \quad \text{et} \quad K2 = \frac{1}{\sqrt{\beta}} \quad (3)$$

La résolution de cette équation différentielle permet de trouver K2 et par conséquent de calculer H, donné par l'équation (2).

II.2. Modélisation de la réfraction combinée à la diffraction

Dans cette étude, nous avons emprunté le modèle de **Berkoff** [1973]. Ce modèle a été adapté par **Radder** [1979] à l'étude d'étendues de moyennes importances. Nous présentons ici ces deux modèles avant de décrire le code **RED**.

En partant des équations générales de l'écoulement, **Berkoff** [1973] a supposé que si la pente du fond demeure faible, le profil du potentiel ϕ (X, Y, Z) suivant la verticale peut être assimilé à celui du fond plat. L'étude est ainsi ramenée à la recherche d'un potentiel bidimensionnel ψ (X, Y) où :

$$\phi(X, Y, Z) = Z(h, Z) \cdot \psi(X, Y) \quad \text{avec} \quad Z(h, Z) = \frac{\text{Ch}(Kh + Z)}{\text{Ch}(Kh)}$$

Par intégration des conditions aux limites en surface et au fond, **Berkoff** [1973] aboutit à son équation générale :

$$\text{div} (C \cdot \text{Cg} \cdot \text{grad} \psi) + K^2 \cdot C \cdot \text{Cg} \cdot \psi = 0 \quad (4)$$

En supposant que la houle, sur des fonds à pente faible, se propage suivant une direction moyenne de propagation et que suivant cette direction, la solution est voisine de la propagation pure (négligeant ainsi la diffraction dans le sens de propagation), **RADDER** [1979] introduit ces conditions dans

l'équation générale (4), et aboutit à son équation :

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = \left[i.k - \frac{1}{2k.C.Cg} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (K.C.Cg) \right] \cdot \psi + \frac{i}{2k.C.Cg} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (C.Cg \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x}) \quad (5)$$

Physiquement, cette équation montre que la variation du potentiel $\psi(X, Y)$ résulte de la superposition d'une propagation pure suivant y (sens de propagation) et d'une diffraction suivant x .

Dans l'équation (5), le potentiel est complexe ($\psi = \psi_r + i\psi_i$).

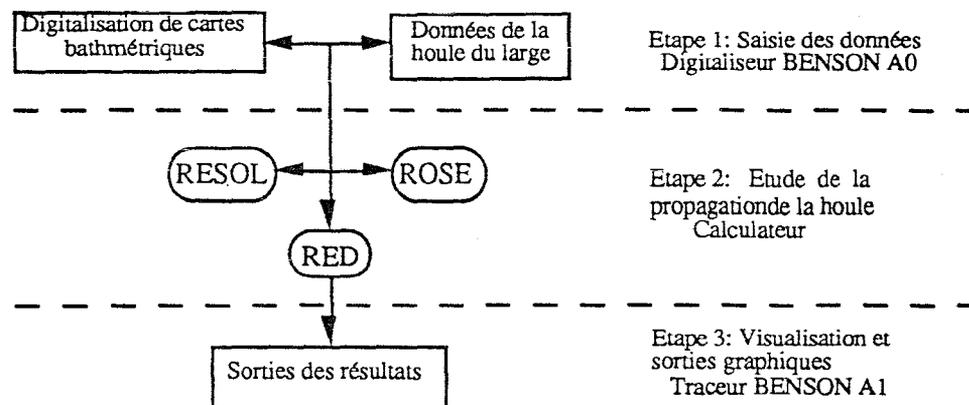
Sa connaissance permettra de trouver les caractéristiques de la houle (hauteur relative et déphasage) : $H/H_0 = \sqrt{\psi_r^2 + \psi_i^2}$ et $\varphi = \text{Arctg}(\psi_i/\psi_r)$.

La résolution de l'équation (5) nécessite la connaissance des conditions aux limites à l'entrée du domaine ainsi qu'aux limites latérales. Ces conditions peuvent être théoriques, en imposant une onde incidente cylindrique à l'entrée et des équations de continuité du fluide ou de réflexion sur les limites latérales du domaine d'étude.

Mais ces conditions aux limites peuvent par ailleurs être déduites du code RESOL ou du code RED lui-même, en étudiant des domaines emboîtés de plus en plus petits, de telle manière que les résultats du domaine étendu servent de conditions aux limites pour le domaine succint.

III DESCRIPTION DES CODES ET PRESENTATION DES RESULTATS

L'étude de la propagation de la houle sur un site réel comporte trois phases principales, présentées schématiquement sur l'organigramme ci-dessous:



III.1. Saisie des données

Ces données sont les caractéristiques de la houle du large ainsi que la bathymétrie du site. La saisie manuelle de la bathymétrie est un travail fastidieux. Dans la configuration matérielle disponible actuellement, les cartes bathymétriques sont saisies sur digitaliseur **BENSON** de format A0.

Certains utilitaires de communications entre le calculateur et le digitaliseur sont utilisés pour rendre cette saisie plus souple et plus fiable. A tout moment, des contrôles peuvent être effectués, et les corrections éventuelles apportées. Ces utilitaires amont permettent la création de véritables bases de données du site d'étude. Ces dernières peuvent être enrichies progressivement.

A titre d'exemple, la base de données de l'estuaire de le Loire est composée de cinq planches de sondages généraux effectués par le **Port Autonome de Nantes - Saint-Nazaire**. Ces utilitaires ont permis la connexion des cinq planches dans une même base de données contenant plus de 6000 informations.

III.2. Etude de la propagation de la houle

Les différentes équations du modèle de réfraction sont résolues suivant la méthode des différences finies par les codes **RESOL** et **ROSE**. Ces programmes sont actuellement implantés sur **HP 86 (Basic)**, **DPS 6/92**, **VAX 750** et **Compatible PC (Fortran IV)**.

La différence entre ces deux codes réside essentiellement en ce que **RESOL** permet d'étudier la propagation de la houle du large à la côte, tandis que **ROSE** permet de définir les éléments nécessaires à une étude spectrale en établissant pour un point déterminé, situé à la côte, une rose d'orthogonales de houles restituées en suivant un cheminement en sens inverse partant de la côte vers le large.

L'équation générale (5) de **Radder [1979]** est résolue dans le code **RED** par la méthode des différences finies. Ce code procède de façon automatique au choix des conditions aux limites.

Ce logiciel est actuellement implanté sur **VAX 750** et **Compatible PC (Fortran IV)**. Sur ce dernier, l'étude d'un site comme celui de l'estuaire externe de la Loire nécessite le calcul sur plus de 20000 nœuds, pour un temps de calcul d'environ 15 minutes.

III.3. Présentation des résultats

Nous allons illustrer les résultats de ces codes essentiellement dans deux sites: les Côtes d'Armor et l'estuaire externe de la Loire. Ces résultats sont extraits d'études déjà effectuées ou en cours de réalisation sur ces sites (Grovel et al (1986) et Khalifa (1987)).

III.3.1.Plans de houle: Code RESOL

Les plans de houle sont donnés par ce code sur table traçante de format A1. Ces plans d'orthogonales permettent d'avoir une idée globale sur l'agitation du site; les orthogonales se concentrant aux endroits agités et divergeant aux endroits calmes. Les hauteurs de houle sont portées sur ces mêmes orthogonales. Dans le cadre de l'agrandissement du port de Dahouet , la **figure 1** illustre la propagation d'une houle d'Ouest de période 12 secondes, sur le plateau des Côtes d'Armor.

Ce modèle donne des résultats satisfaisants, sur un site réel dont la bathymétrie est peu tourmentée. En revanche, les résultats deviennent erronés quand la bathymétrie présente de grandes irrégularités, voire des bancs ou plateaux découvrants.

III.3.2. Rose d'orthogonales de houle : Code ROSE

Dans le cadre de l'étude des houles à la plage de Bonne Anse, la **figure 2** présente la rose d'orthogonales de houles susceptibles d'atteindre ce site pour une période de 10 secondes. On en déduit que pour cette période, seules les houles du large du secteur à peuvent parvenir à la plage de Bonne Anse.

III.3.3. Courbes d'égales phases et d'égales hauteurs: code RED

L'étude de l'agitation de la houle dans l'estuaire de la LOIRE, permet de mettre en valeur la capacité du code RED à étudier un site complexe. La **figure 3** permet de constater la complexité de ce site, renforcée par la présence des plateaux de la Banche et de la Lambarde et par la taille du chenal artificiel de navigation. La **figure 4** présente les crêtes de houle pour une direction Ouest et une période de 10 secondes. Pour cette même houle du large, la **figure 5** restitue le champ de hauteurs sous forme de courbes d'égales hauteurs. On y remarque que pour cette houle, le chenal de navigation n'est pas intéressé par la zone de calme qui se forme en aval. Afin de mettre encore plus en évidence l'agitation du chenal, les utilitaires infographiques utilisés permettent d'extraire

SESSION 1

automatiquement le profil des hauteurs de houle le long de l'axe du chenal, présenté en figure 6.

IV CONCLUSIONS

Cet outil d'Hydraulique Maritime Appliquée a pour but de permettre à l'ingénieur de Génie Civil de modéliser l'agitation de la mer provoquée par la propagation de la houle sur des sites côtiers. Cette modélisation permet par la suite de déduire les efforts que cette agitation induit sur une structure marine quelconque.

L'outil se présente sous forme d'un ensemble de codes de calculs interdépendants, RESOL, ROSE et RED, implantés sur micro-ordinateur Compatible PC avec Microprocesseur 8087. Ces codes de calculs modélisent la propagation de la houle sur des sites réels en se basant d'une part sur la refraction de la houle, et d'autre part, sur la réfraction combinée à la diffraction. Les périphériques utilisés pour nos applications, sont une table à digitaliser de format A0 et une table traçante de format A1. Certains utilitaires de communications entre ces différents périphériques, réduisent considérablement le travail de l'opérateur.

Ces codes de calculs sont en cours d'être complétés par un modèle qui permet la prise en compte du transfert du large jusqu'à la côte, du spectre de houle complet en période-direction (Townend et al. 1985)

Le principal axe de développement de ces codes sera leur intégration dans un modèle général d'études des contraintes induites par l'agitation de la houle sur un site côtier.

REFERENCES

- BERKHOFF, J.C.W.; "Computation of combined refraction-diffraction"; *Proc. 13th Coast. Eng. Conf.*, Vancouver, ASCE, vol. 1; 1973; pp. 471-490.
- GROVEL, A.; O.A. KHALIFA, M.A.; RIOU, Y.; *Projet d'implantation d'un port de plaisance dans la baie de St-BRIEUC*; Contrat CETE-ENSM; 1986; p. 32; Nantes.
- O.A. KHALIFA, M.A.; *Calcul automatique des déformations de la houle, réfraction, diffraction, friction*; Thèse de Doctorat; ENSM; 1987; Nantes.
- RADDER, A.C., "On the parabolic equation method for water-wave propagation"; *J. Fluid. Mech.*; Vol. 95; Part. 1; 1979; pp. 159-176.

THOMAS, P.; *Estimation des comportements des interfaces air-eau et eau-sol dans un estuaire externe aménagé*; Thèse de Doctorat-es-Sciences (en préparation); Université de Nantes.

TOWNEND I.H., SAVELL L.A.; "The Application of Ray Methods to Wave Refraction Studies"; SIR WILLIAM HALCROW AND PARTNERS; Rapport interne; 1985

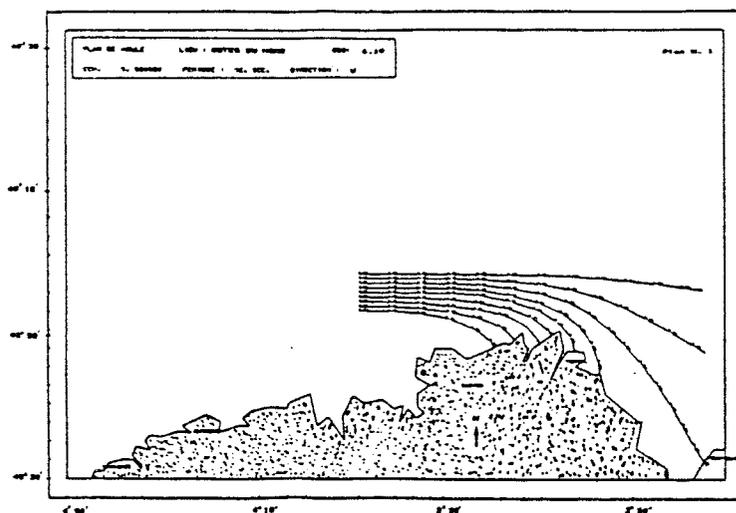


Figure 1 : Plan d'orthogonales de houle d'Ouest, Période: 12 s
Port de Dahouet : Côtes d'Armor

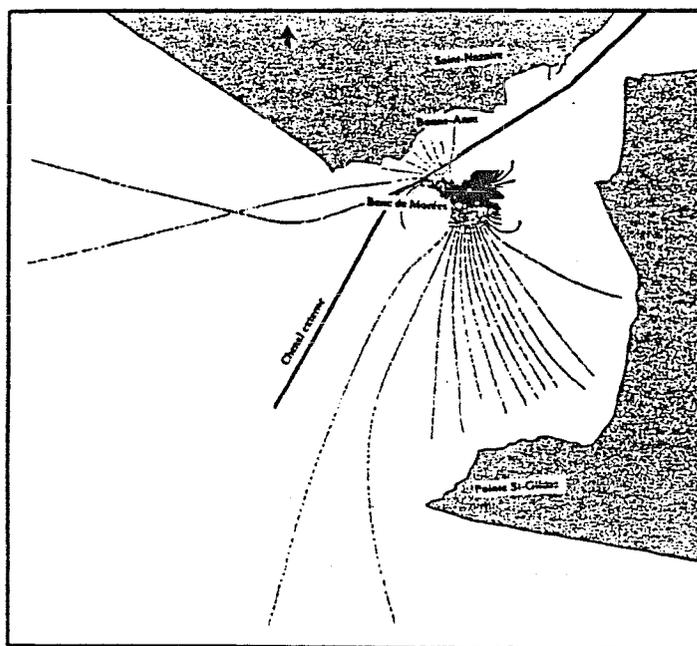


Figure 2 : Rose d'orthogonales de houle,
Estuaire externe de la Loire
Position du point: X= 253600 ; Y= 257600

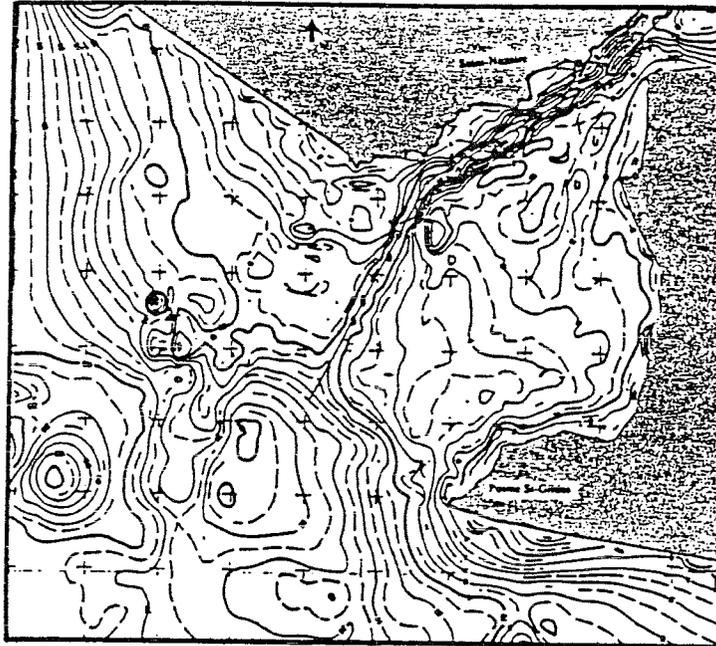


Figure 3 : Courbes bathymétriques
Estuaire externe de la Loire

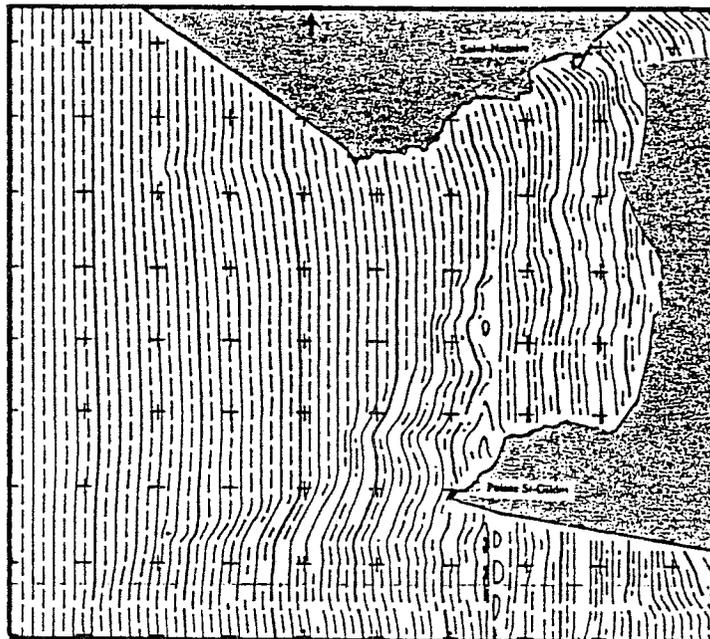


Figure 4 : Crêtes de houle d'Ouest, Période: 10 s
Estuaire externe de la Loire

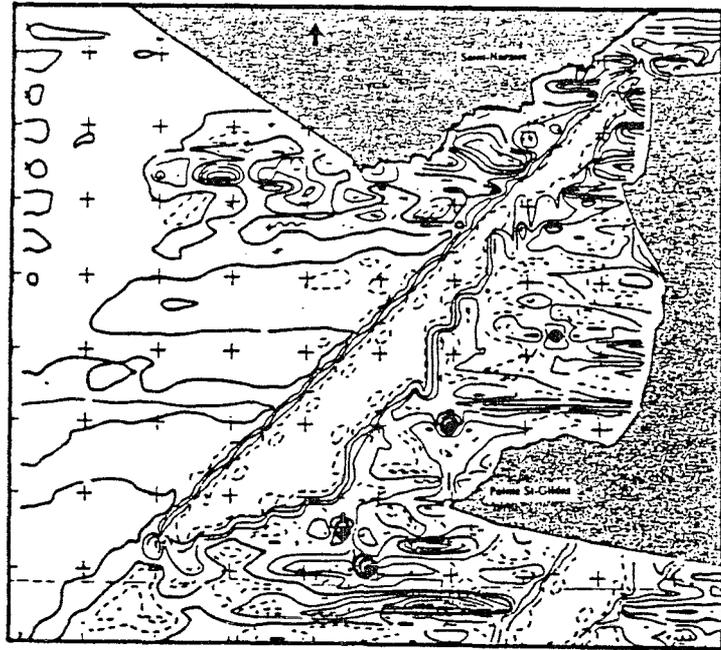


Figure 5 : Courbes d'égales hauteurs, Houle d'Ouest, Période: 10 s
Estuaire externe de la Loire

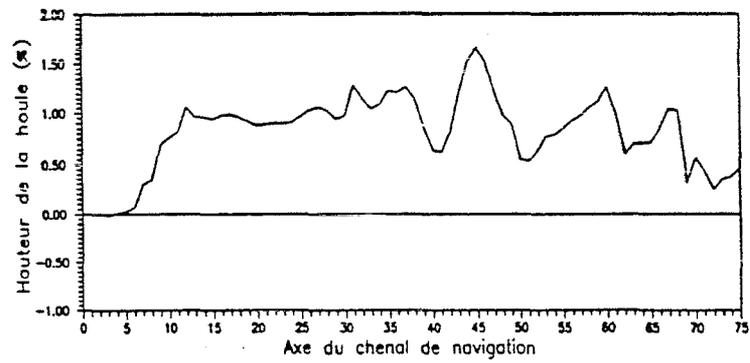


Figure 6 : Profil de la houle le long du Chenal , Houle d'Ouest, Période: 10 s
Estuaire externe de la Loire