

2èmes JOURNEES DE L'HYDRODYNAMIQUE

13 au 15 Février 1989 - Nantes

---

**UN MODELE DE REFRACTION-DIFFRACTION  
POUR L'ETUDE DE LA PROPAGATION DE LA HOULE  
EN ZONE COTIERE : RECIF**

**F. DHELLEMMES**

Laboratoire National d'Hydraulique  
6, quai Watier - 78400 CHATOU  
Tél. : 30-71-70-21 - Télex : 696395F

L'équation de Berkhoff parabolisée est utilisée pour modéliser la propagation de la houle en zone côtière.

Cet article présente le code RECIF construit au LNH à partir de cette équation.

Il passe en revue les aspects théoriques, les étapes de validation, les développements très récents ainsi que quelques applications à titre d'exemples.

The parabolised Berkhoff equation is used to predict wave propagation in coastal zones.

This paper deals with the RECIF model, developed at LNH from this equation.

It shows theoretical aspects, validation steps, recent developments as well as some applications presented as examples.

## LA HOULE

La houle est produite en général par le vent soufflant sur la surface de la mer. Elle est un paramètre essentiel à prendre en compte pour différentes applications :

- au large la houle intervient pour le dimensionnement et la conception des navires, des plateformes offshore, ainsi que pour la navigation....
- à la côte, elle intervient pour le dimensionnement et la conception d'ouvrages portuaires, l'aménagement des plages et du littoral de manière générale,
- enfin la houle participe au transport de sédiments, pouvant affouiller le pied d'une digue, déplacer le sable d'une plage, combler un chenal de navigation. On peut s'en défendre, mais également chercher à récupérer son énergie.

L'étude de la propagation de la houle, du large vers la côte notamment, est donc un impératif pour bon nombre d'applications.

L'objet de cet article est la présentation du code de calcul "RECIF" de réfraction-diffraction de la houle développé depuis 1982 au Laboratoire National d'Hydraulique, dans le cadre d'une convention avec le Service Central Technique des Ports Maritimes et Voies Navigables du Secrétariat d'état à la mer (S.C.T.).

## LES PHENOMENES QUI DEFORMENT LA HOULE

La remontée des fonds, les irrégularités de la bathymétrie, les obstacles comme des îles, des récifs, des ouvrages portuaires, la côte ou la présence d'un courant marin modifient notablement la propagation de la houle.

Les principaux phénomènes qui rentrent en ligne de compte sont : la réfraction, la diffraction, la réflexion, le déferlement et le frottement.

## DIFFERENTS MODELES DE HOULE

Dans le cadre des études d'aménagements côtiers, on s'intéresse à la propagation de la houle à l'approche de la côte et à l'entrée des ports.

Différents modèles numériques traitent déjà ce genre de cas. Le Laboratoire National d'Hydraulique dispose en particulier de quatre codes :

- Un code d'ondes longues, non linéaires, traite les houles de forte cambrure, se propageant en profondeur faible (code VAGALAM).

Ce code développé en différences finies prend en compte la réfraction, la diffraction et la réflexion de la houle. Il s'appuie sur l'équation de Boussinesq. Ce code est d'utilisation lourde et coûteuse.

- Un code d'ondes courtes ou longues, linéaire, traite en éléments finis la propagation des ondes monochromatiques peu cambrées (code SEICHE). Il prend en compte la réfraction, la diffraction et la réflexion de la houle en s'appuyant sur l'équation de Berkhoff. Ce code est d'utilisation relativement lourde et est plus spécifiquement adapté à l'étude des seiches ou de l'agitation dans un port avec un petit nombre de points de calcul (quelques milliers de points environ).
- Un code d'ondes courtes, linéaire, traite les houles régulières monochromatiques peu cambrées en profondeur moyenne. Il prend en compte la réfraction seule (code REFRAC).

Il suit la théorie d'Airy et calcule à l'avancement les orthogonales par la méthode des caractéristiques.

- Un code d'ondes courtes, linéaire, calcule la diffraction des houles régulières monochromatiques peu cambrées, en profondeur moyenne constante, à l'intérieur d'un port ou derrière un ouvrage (code DIFRA).

Ce code suit aussi la théorie d'Airy. Le calcul suppose que l'agitation, en chaque point du port, résulte de la superposition linéaire de l'onde diffractée, à l'entrée du port, parvenant directement au point considéré, et des ondes diffractées parvenant au point considéré après une ou deux réflexions sur les ouvrages portuaires intérieurs.

Ces deux derniers codes sont simples et peu coûteux.

Cependant dans une zone côtière de grande emprise, comprenant par exemple des hauts-fonds assez importants, les phénomènes de réfraction et de diffraction apparaissent en même temps et sont tous deux importants.

Dans un tel cas un code non linéaire est trop lourd. Un code de diffraction pure n'est pas du tout adapté puisqu'il ne prend pas en compte la réfraction qui reste tout de même prépondérante. Un code de réfraction pure donne une première idée de la propagation de la houle mais il ne donne pas d'information sur la hauteur derrière un obstacle émergé ; de plus il se produit des croisements d'orthogonales derrière les obstacles immergés rendant l'interprétation difficile (cf. Figure 1).

C'est pour pallier ces inconvénients que l'on a construit le modèle RECIF.

Le but est d'avoir un modèle qui prenne en compte la réfraction et la diffraction et qui soit d'utilisation simple et peu coûteux pour pouvoir fonctionner sur des emprises relativement importantes : de quelques kilomètres de large environ c'est-à-dire quelques dizaines de longueurs d'onde pour une houle de période moyenne (référence 1).

## THEORIE DU MODELE RECIF

Dans un premier temps on fait des hypothèses sur les caractéristiques de la houle dont on étudie la propagation, et sur celles du fluide et de l'écoulement.

- a) On se place dans le cadre de la théorie linéaire qui est valable tant que le paramètre :

$$(H/L)/h \text{ (} 2\pi h/L \text{) est bien inférieur à 1,}$$

où H désigne la hauteur de la houle, L sa longueur d'onde et h la profondeur d'eau.

On se place dans le cadre des ondes courtes, c'est-à-dire en profondeur relative  $h/L$  moyenne ou importante.

- b) On se place dans les hypothèses de fluide parfait, et d'écoulement irrotationnel, d'où l'existence d'un potentiel de vitesse  $\phi$ .

On suppose les mouvements du fluide harmoniques en temps (pulsation constante  $\omega = 2\pi/T$ ).

En faisant l'hypothèse supplémentaire d'un fond à pente faible, on obtient l'équation de Berkhoff (référence 2) :

$$\text{div} (CCg \text{ grad } \phi) + k^2 C Cg \phi = 0$$

où C est la célérité de phase ( $C = \omega/k$ ).

$$C_g = n C = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2k h}{\text{sh}(2kh)} \right) C \text{ est la célérité de groupe}$$

et  $k$  est le nombre d'onde donné par la relation de dispersion :  $k h = \omega^2/g$ .

Cette équation est précise jusqu'à des pentes frontales de l'ordre de 1 pour 3.

Dans un deuxième temps, puisque l'on s'intéresse à la propagation de la houle du large vers la côte, dans des cas où la réfraction est prépondérante par rapport à la diffraction et à la réflexion, on peut envisager de paraboliser l'équation.

Si l'on projette l'équation elliptique de Berkhoff sur une direction  $x$  proche de la direction moyenne de propagation ou de la direction de l'onde incidente, et si l'on néglige la partie réfléchie, on obtient l'équation parabolisée :

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \left( ik - \frac{1}{2k C C_g} \frac{\partial(k C C_g)}{\partial x} \right) \phi + \frac{i}{2k C C_g} \frac{\partial}{\partial y} \left( C C_g \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)$$

Elle a été modélisée en particulier par A.C. RADDER et N. BOOIJ en 1979 et 1981 (références 3 et 4).

On voit clairement les inconvénients et les avantages de cette équation parabolique :

- a) Cette équation, pour rester valable, ne peut s'appliquer que dans le cas où le potentiel réfléchi est effectivement négligeable par rapport au potentiel transmis.

Ici le potentiel "réfléchi" recouvre à la fois la houle réfléchie c'est-à-dire les vagues se propageant vers les  $x$  décroissants, mais également l'énergie réfléchie c'est-à-dire la diffraction dans cette direction.

On voit donc que la diffraction et la réflexion ne seront pas prises en compte dans la direction  $x$  choisie. Les cas d'obstacles émergés type îles ou jetées seront donc imparfaitement traités.

- b) On choisit la direction  $x$  de l'approximation parabolique (sur laquelle on projette l'équation) dans la direction moyenne de la houle sur la zone étudiée.

Dans des cas de bathymétries irrégulières mais sans obstacle émergé trop important, la réfraction est prépondérante par rapport à la diffraction, et l'approximation parabolique est très intéressante. Elle permet d'éviter le problème des croisements d'orthogonales derrière un haut-fond en effectuant une répartition latérale de l'énergie qui représente mieux ce qui se passe en nature.

Au croisement des orthogonales la théorie de la réfraction pure donne une hauteur de houle infinie ; avec la théorie issue de l'approximation parabolique, on peut calculer la hauteur de houle en tout point du domaine.

L'équation de type parabolique obtenue peut être résolue à l'avancement en différences finies, ligne par ligne, ce qui est très économique en place mémoire et en temps ordinateur (référence 5).

## DOMAINE DE VALIDITE

La parabolisation conduit d'abord à négliger la houle diffractée dans la direction  $x$ .

Des cas tests très complets ont été réalisés dans des cas de diffraction pure pour examiner les limites du modèle RECIF. Les cas d'une jetée puis de cylindres de différents diamètres sur fond plat ont été étudiés (référence 6).

Dans le cas de la jetée les résultats de RECIF dépendent non seulement de l'angle d'incidence de la houle avec la jetée mais aussi de l'angle du maillage avec la jetée. Pour un même angle entre la houle et la jetée on obtient une surestimation ou une sous-estimation de l'agitation dans l'ombre de l'obstacle suivant l'orientation du maillage.

La figure 2 montre le cas d'une jetée inclinée à 45 degrés par rapport à la houle. La figure donne le champ de hauteur de houle et les lignes iso-phase (c'est-à-dire les lignes de crête) issus de RECIF et calculés analytiquement avec le code de diffraction pure DIFRA.

Les résultats sont synthétisés sur la carte d'iso-erreur montrant l'erreur relative de RECIF par rapport à DIFRA en pourcentage. Cette carte montre que RECIF sous-estime la houle dans la zone d'ombre de la jetée.

Dans le cas d'un cylindre sur fond plat, le modèle RECIF néglige la réflexion (cf. paragraphe suivant) sur la face avant de l'obstacle et néglige une partie de la diffraction derrière l'obstacle.

L'agitation derrière le cylindre se trouve sous-estimée quel que soit le diamètre du cylindre. Pour un diamètre de 0,3 longueur d'onde, on sous-estime la houle de plus de 25 pourcent sur une distance d'une longueur d'onde derrière le cylindre ; pour un diamètre de 3 longueurs d'onde on sous-estime l'agitation de plus de 25 pourcent sur 6 longueurs d'onde derrière le cylindre.

La parabolisation conduit aussi à négliger la houle réfléchie se propageant dans la direction des  $x$  décroissants.

Dans le cas d'un obstacle émergé vertical (comme le cylindre cité précédemment), le coefficient de réflexion est de 1, le modèle RECIF sous-estime donc l'agitation de 50 pourcent devant l'obstacle. Pour un obstacle émergé de pente donnée, le coefficient de réflexion peut être obtenu à partir d'abaques. Une digue en enrochements avec une pente à 4/3 par exemple a un coefficient de réflexion compris entre 0,4 et 0,7 suivant la taille des enrochements et la cambrure de la houle incidente; dans ce cas RECIF sous-estime donc l'agitation devant l'ouvrage de 30 pourcent à 40 pourcent. Pour les obstacles immergés les coefficients de réflexion et donc l'erreur faite par RECIF sont beaucoup plus faibles, ils dépendent non seulement de la pente de l'obstacle mais aussi de la profondeur relative. RADDER a exprimé le terme négligé au moment de la parabolisation de l'équation de BERKHOFF en fonction de la pente du fond ( $\tan\alpha$ ) et de la profondeur relative (profondeur rapportée à la longueur d'onde en profondeur infinie). Un graphique (figure 3) tracé à partir de cette théorie montre le domaine de validité de l'équation parabolique ou plus exactement les zones pour lesquelles l'erreur commise est inférieure à 10 pourcent (ou 1 pourcent). On note par exemple que l'erreur reste inférieure à 10 pourcent pour une pente de 0,25 par des profondeurs relatives supérieures ou égales à 0,025 ; ou pour une pente de 0,50 par des profondeurs relatives supérieures ou égales à 0,10.

Ces deux limitations, concernant la prise en compte de la diffraction et de la réflexion, liées à la présence d'obstacles émergés ou immergés par faible profondeur, et de pentes fortes, doivent rester présentes à l'esprit pour une bonne utilisation du modèle RECIF.

Ces premiers tests ont été réalisés pour cerner précisément le domaine de validité du modèle RECIF et connaître l'erreur faite dans le cas d'une configuration dépassant un peu son cadre normal d'application.

Il est clair que le code RECIF n'est pas fait pour donner précisément l'agitation derrière une jetée ou à l'intérieur d'un port.

RECIF a été réalisé pour étudier la propagation de la houle dans des zones côtières dont les fonds peuvent présenter des irrégularités importantes ; comme on va le voir, il donne de très bons résultats dans ce genre de configurations.

## ETAPE DE VALIDATION

Tout d'abord des tests de validation du modèle sur des cas de réfraction pure ont permis une comparaison avec le programme REFRAC. Les résultats ont été tout à fait satisfaisants (référence 5).

Dans un deuxième temps on a réalisé des tests plus proches de cas réels. En particulier, le cas d'une bosse immergée sur un fond incliné s'est révélé très intéressant. En effet on dispose pour ce cas de mesures faites sur modèle physique au laboratoire d'Hydraulique de Delft aux Pays-Bas, ainsi que de résultats issus d'un modèle numérique du même type que RECIF. Les résultats de RECIF sont très satisfaisants, ils sont très proches des résultats du modèle physique, mise à part une légère surestimation (de 17 % au maximum) de la hauteur de houle dans l'axe de la bosse. Le champ de phase montre une zone dans laquelle la phase se décale d'une demi longueur d'onde ; la crête de vague se trouve dans l'alignement d'un creux et l'on a apparition de deux points amphidromiques où la phase est indéterminée et la hauteur nulle. Ces points sont bien obtenus par le modèle RECIF (figure 4 et référence 6).

## APPLICATIONS

Après avoir fait l'objet de nombreux tests sur des cas schématisés simples, le code RECIF a été et est utilisé pour de nombreux calculs de propagation côtière de houle, au LNH ainsi qu'au S.C.T.

On présente ici les deux cas les plus récents qui concernent l'agitation en baie de MORLAIX et aux abords du Rio del REY au CAMEROUN.

Pour ces deux cas le modèle de réfraction pure donnait des croisements d'orthogonales. L'utilisation de RECIF était donc nécessaire. La bathymétrie, dans les deux cas, comportait des hauts-fonds ou des irrégularités provoquant des concentrations de houle très bien reproduites par RECIF.

L'agitation dans la baie de MORLAIX a été calculée pour 6 cas de houle : différentes provenances (NW, N, NNE), différentes périodes (8s, 10s, 12s, 14s), et différentes hauteurs de houle au large (6 m, 12 m). Ces calculs ont été réalisés sur des emprises de 8 km sur 7 km avec un maillage de 6,25 m ce qui représente 1280 sur 1120 mailles de calculs. La bathymétrie de la baie comporte des hauts-fonds immergés à marée haute sur lesquels la réfraction et la diffraction de la houle jouent. De plus pour les fortes hauteurs de houle le déferlement intervient, un critère simple de déferlement introduit dans le modèle RECIF, permet d'écarter la houle au fur et à mesure du calcul.

La figure 5 présente quatre calculs effectués pour une même hauteur de houle au large (6 m); chaque résultat est présenté sous forme de champ d'iso-hauteur de houle montrant les zones abritées et les zones agitées. La figure 6 présente une vue instantanée de la surface libre obtenue à partir du champ des hauteurs.

L'étude de la propagation de la houle dans la zone de RIO DEL REY au CAMEROUN a été réalisée à l'aide du modèle REFRAC puis du modèle RECIF. Le modèle REFRAC laisse apparaître des croisements d'orthogonales rendant les résultats inexploitable. Avec RECIF on observe les mêmes zones de convergences de houle avec des hauteurs de houle réalistes. Le cas de calcul présenté ici (figures 7 et 8) a été réalisé sur une emprise de 30 km sur 40 km avec un maillage de 10 m ce qui représente 3000 sur 4000 mailles de calcul. Les résultats sont moyennés sur des carrés de 40 points sur 40 points c'est-à-dire 2,5 longueurs d'onde de côté pour le traitement graphique (cf. figure 8).

## DERNIERS DEVELOPPEMENTS

Les récents développements du code RECIF permettent de prendre en compte la présence d'un courant marin sur l'emprise du domaine de calcul.

La prise en compte du courant a conduit à des modifications importantes du modèle RECIF. D'une part l'équation à résoudre est sensiblement plus complexe. D'autre part dans cette nouvelle équation les grandeurs  $k$ ,  $C$ ,  $C_g$  ne sont plus données par la relation de dispersion. En effet à la célérité de la houle s'est ajoutée la vitesse du courant, par la relation d'effet Doppler (référence 7).

Les études et les mesures faites ont montré que la prise en compte du courant était parfois essentielle pour les calculs de propagation de houle. Les courants permanents, les courants de marée ou les courants d'origine fluviale provenant d'estuaires atteignent, notamment sur les côtes françaises, des intensités susceptibles de modifier la houle : sa hauteur, sa direction, sa longueur d'onde et donc sa cambrure.

On remarque par exemple, qu'un courant de même direction mais de sens opposé à la houle provoque une augmentation de la hauteur de houle et de la cambrure ainsi que des possibilités de déferlement.

Une récente étude de stabilité réalisée pour le port de Sète a montré qu'une telle configuration y apparaissait. Le gonflement de la houle avait même causé la ruine du musoir de la digue.

A l'extrême, lorsque le courant s'oppose à la houle et que son module  $U$  est supérieur à  $C_r$  ( $C_r$  étant la vitesse de phase relative de la houle superposée au courant), la houle se trouve réfléchi.

Des études théoriques et des mesures réalisées sur modèle réduit trouvées dans la bibliographie ont permis de valider le modèle RECIF aussi bien pour des courants parallèles à la houle que pour des courants traversiers.

## CONCLUSION

RECIF permet de calculer la propagation d'une houle monochromatique sur une zone pouvant couvrir quelques centaines de kilomètres carrés. Il prend en compte la réfraction par les fonds et par les courants, la diffraction transversale et éventuellement le déferlement en faible profondeur.

RECIF traite de façon très satisfaisante les cas de bathymétries complexes comportant des hauts-fonds et pour lesquels on obtient des croisements d'orthogonales avec un modèle de réfraction pure.

Des études récentes ont montré l'importance de l'effet du courant sur la houle, ceci est maintenant pris en compte dans RECIF.

Ce modèle est d'emploi simple et fournit une carte d'agitation montrant les zones de concentration de houle et les zones calmes.

RECIF est donc de plus en plus utilisé pour les projets d'aménagements côtiers, il constitue une aide très appréciable au dimensionnement d'ouvrages en mer ou à la côte.

## REFERENCES

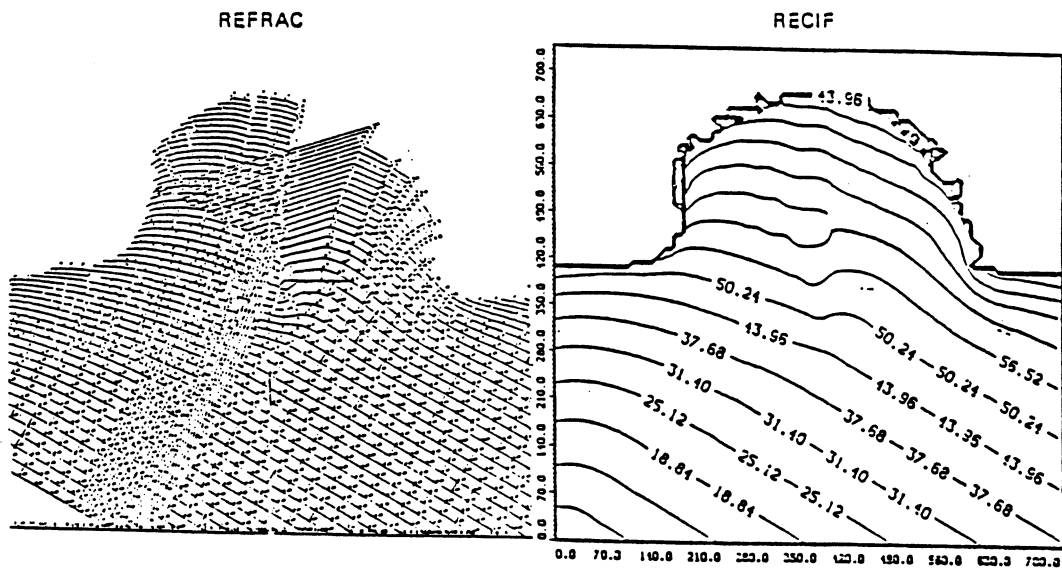
- (1) A. HAUGUEL  
Modèle de réfraction-diffraction de la houle. Approches possibles.  
Rapport LNH (HE42/81.21) (1981).
- (2) J.C.W. BERKOFF  
Mathematical models for simple harmonic linear water waves.

Delft hydraulics laboratory publication n° 163, April 1976.

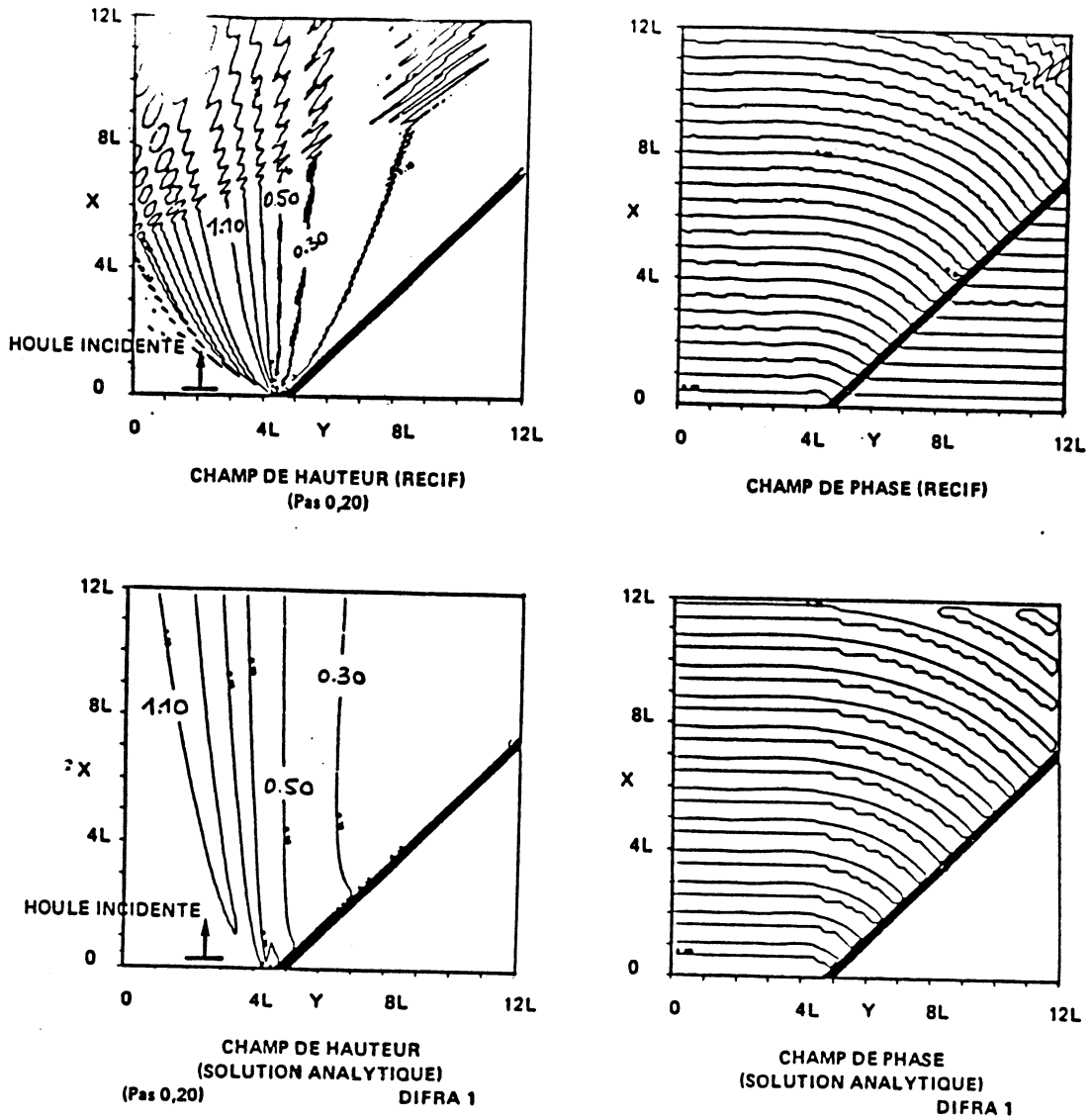
- (3) A.C. RADDER  
On the parabolic equation method for water-wave propagation.  
Journal of fluid Mechanics vol. 95, part 1, 1979, pp. 159-176.
- (4) N. BOOIJ  
Gravity waves on water with non-uniform depth and current.  
Communications on hydraulics department of civil engineering Delft University of  
technology. Report n° 81.1.
- (5) F. DHELLEMMES  
Modèles de réfraction-diffraction de la houle. Description du code RECIF.  
Rapport LNH (HE42/82.25) (1982).
- (6) F. DHELLEMMES  
Modèle de réfraction-diffraction de la houle. Validation du modèle RECIF.  
Rapport LNH (HE42/85.02) (1985).
- (7) F. DHELLEMMES  
Effet du courant sur la houle - Analyse bibliographique et introduction du courant dans  
RECIF.  
Rapport LNH (HE42/86.18) (1987).



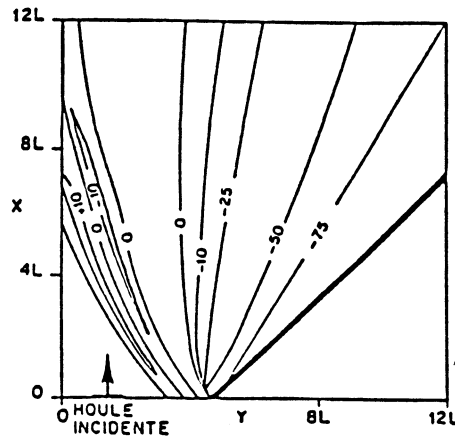
Figure 1 : BAIE DEFORMEE  
LIGNES DE CRETES



Cas de bathymétrie complexe pour lequel un programme de réfraction pure donne des croisements d'orthogonales, et pour lequel RECIF donne des résultats satisfaisants.



**DIFRACTION DE LA HOULE DERRIERE UNE JETEE**  
 Houle à 45 degrés par rapport à la jetée



CARTE D'ISO-ERREUR RELATIVE  
 (en pourcentage)

Figure 2

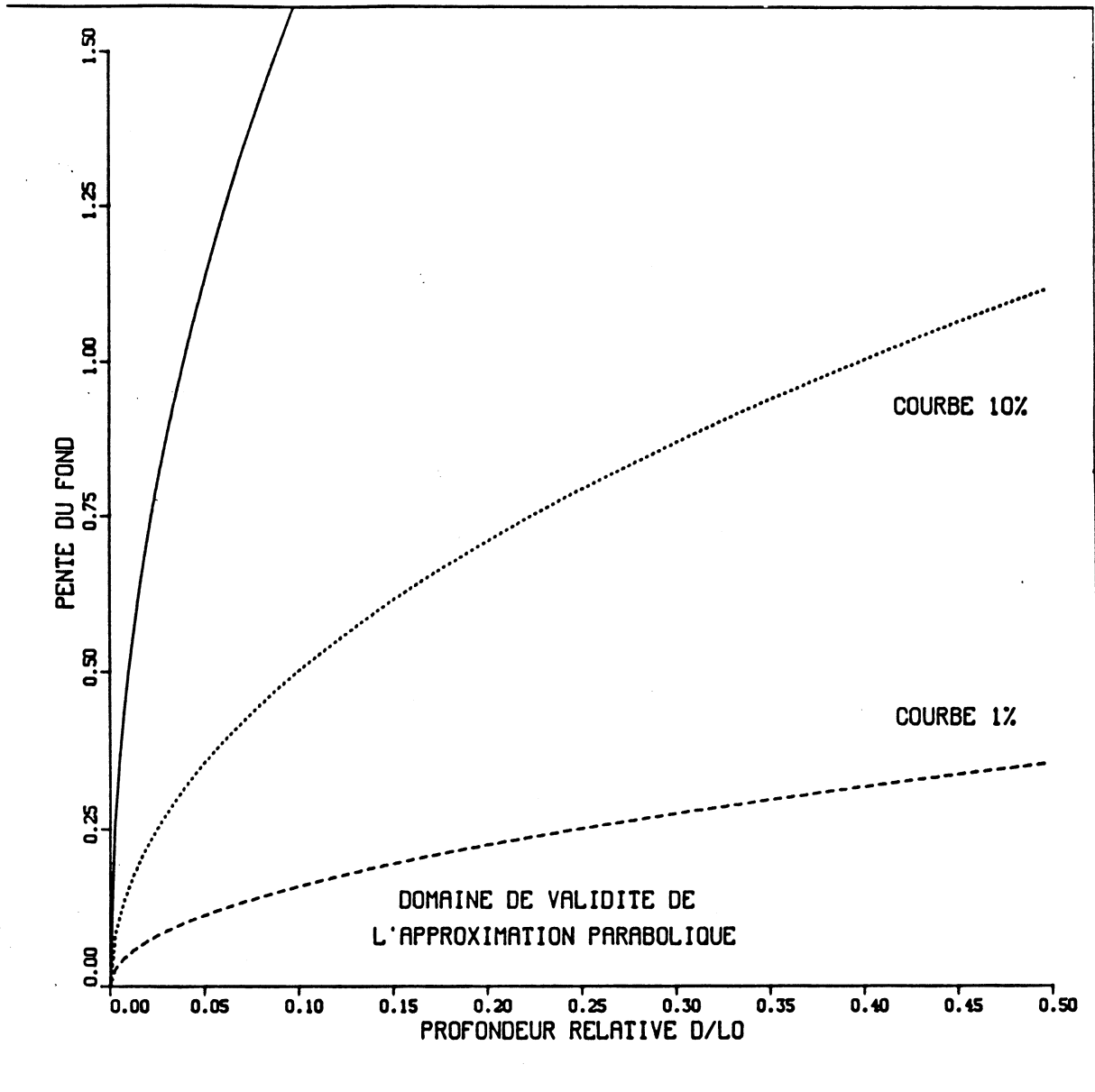
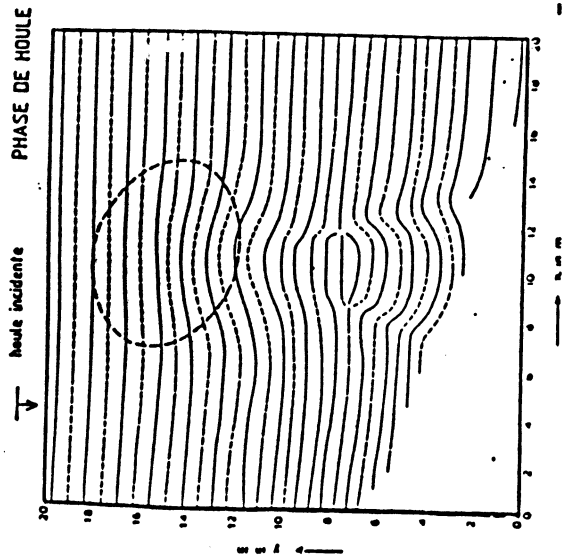
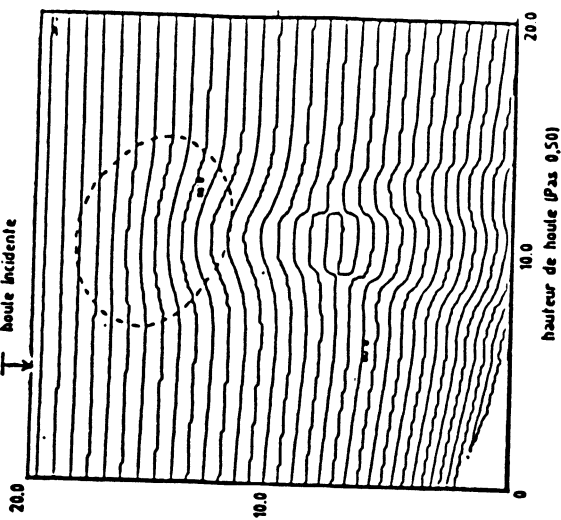


Figure 3 : GRAPHIQUE TRACE D'APRES LA THEORIE DE RADDER, MONTRANT LE DOMAINE DE VALIDITE DE RECIF EN FONCTION DE LA PENTE DU FOND ET DE LA PROFONDEUR RELATIVE

Figure 4 : RESULTATS DU MODELE PHYSIQUE DE DELFT



RESULTATS DE RECIF  
 programme recif (15 p/s par longueur d'onde)  
 phase de houle  
 houle incidente



- BOSSE IMMERGEE SUR FOND INCLINE -

HAUTEUR DE HOULE (Pas 0,25)

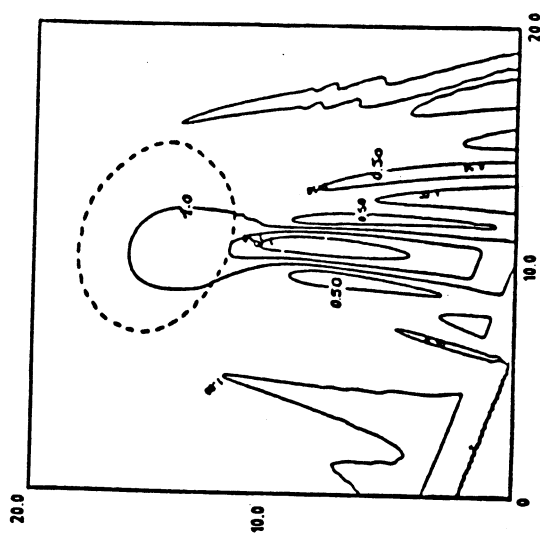
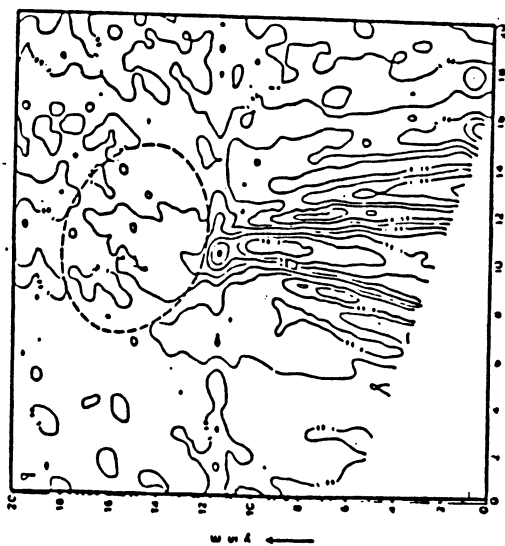


Figure 5 : HAUTEURS DE HOULE OBTENUES A L'AIDE DU CODE RECIF  
POUR DIFFERENTES PROVENANCES ET PERIODES

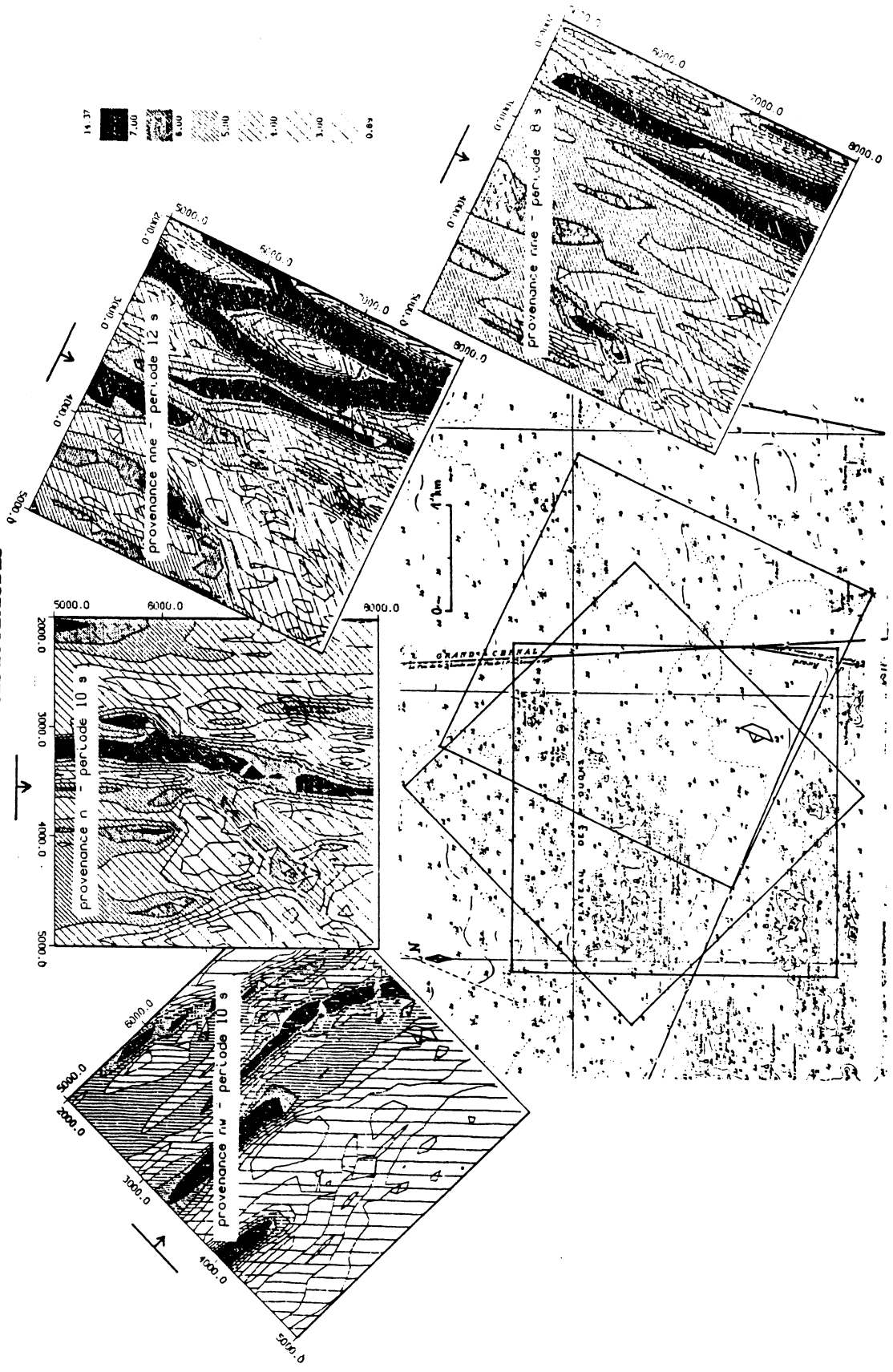
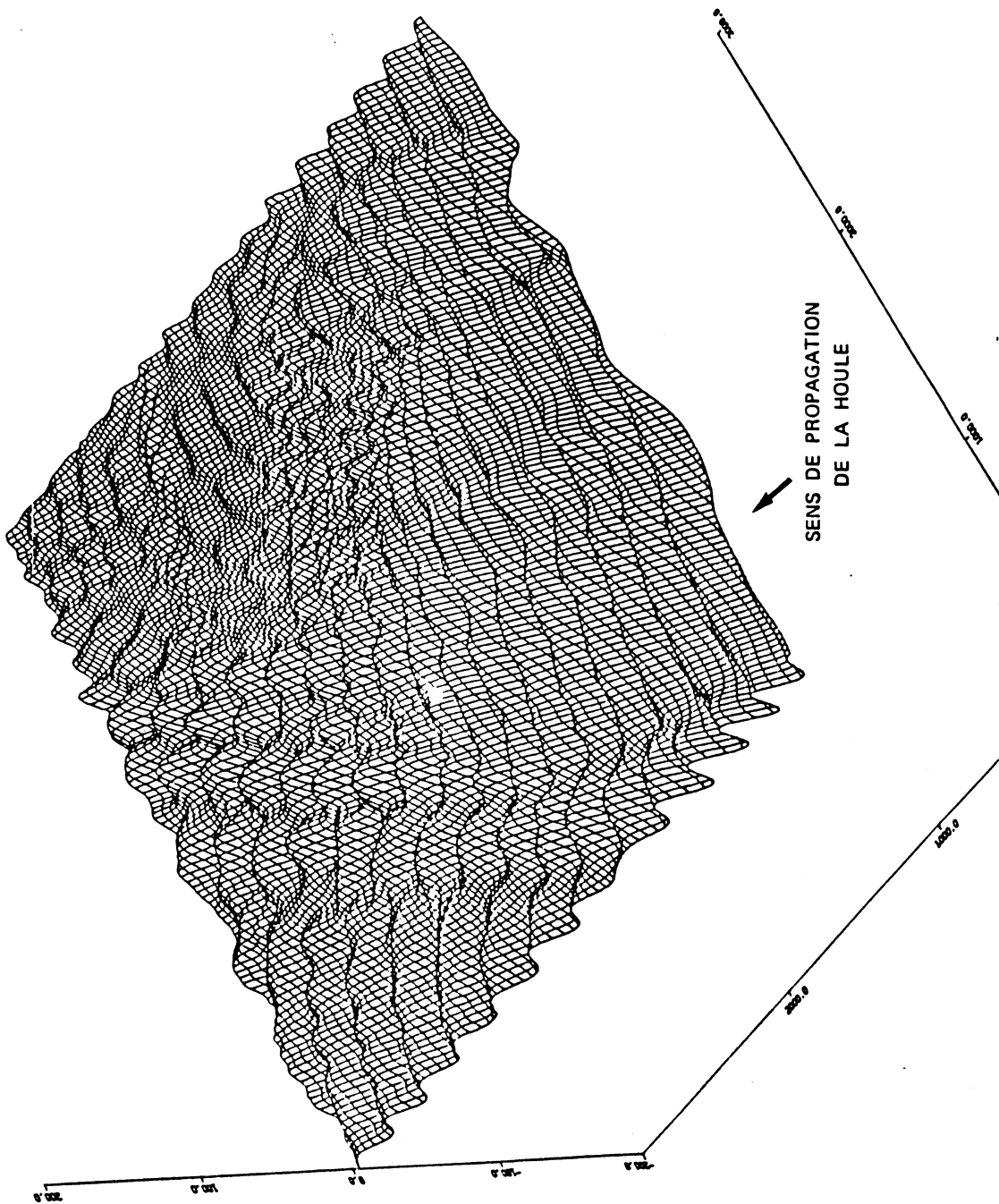


Figure 6 : CALCUL RECIF - VUE INSTANTANEE DE LA SURFACE DE LA MER  
SUR UNE ZONE COTIERE



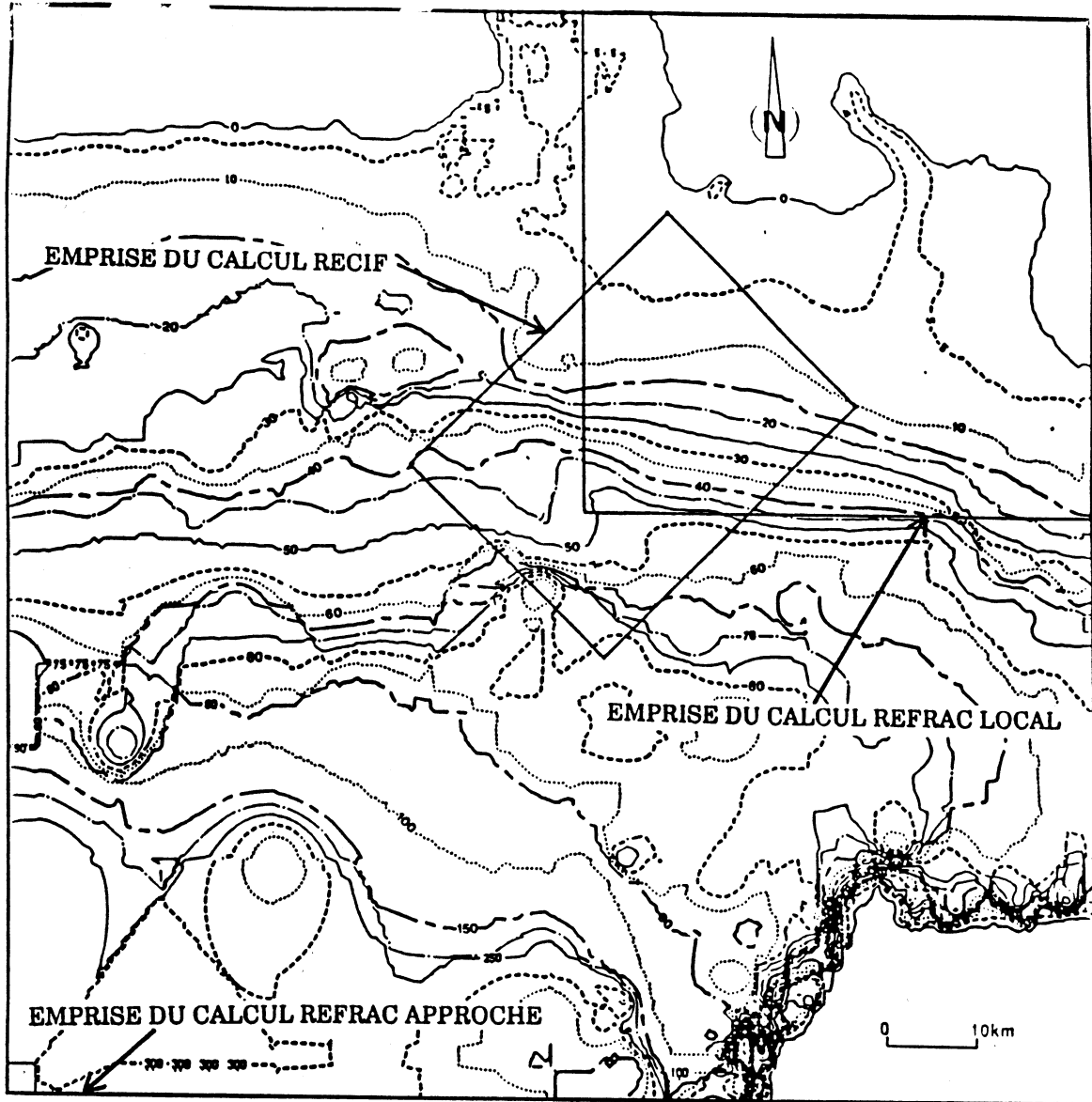


Figure 7 : EMPRISE DES CALCULS DE HOULE ET BATHYMETRIE DANS LA ZONE DE RIO DEL REY AU CAMEROUN

# HOULE AU LARGE DE RIO DEL REY

hauteur moyenne  
houle sw 10 s.

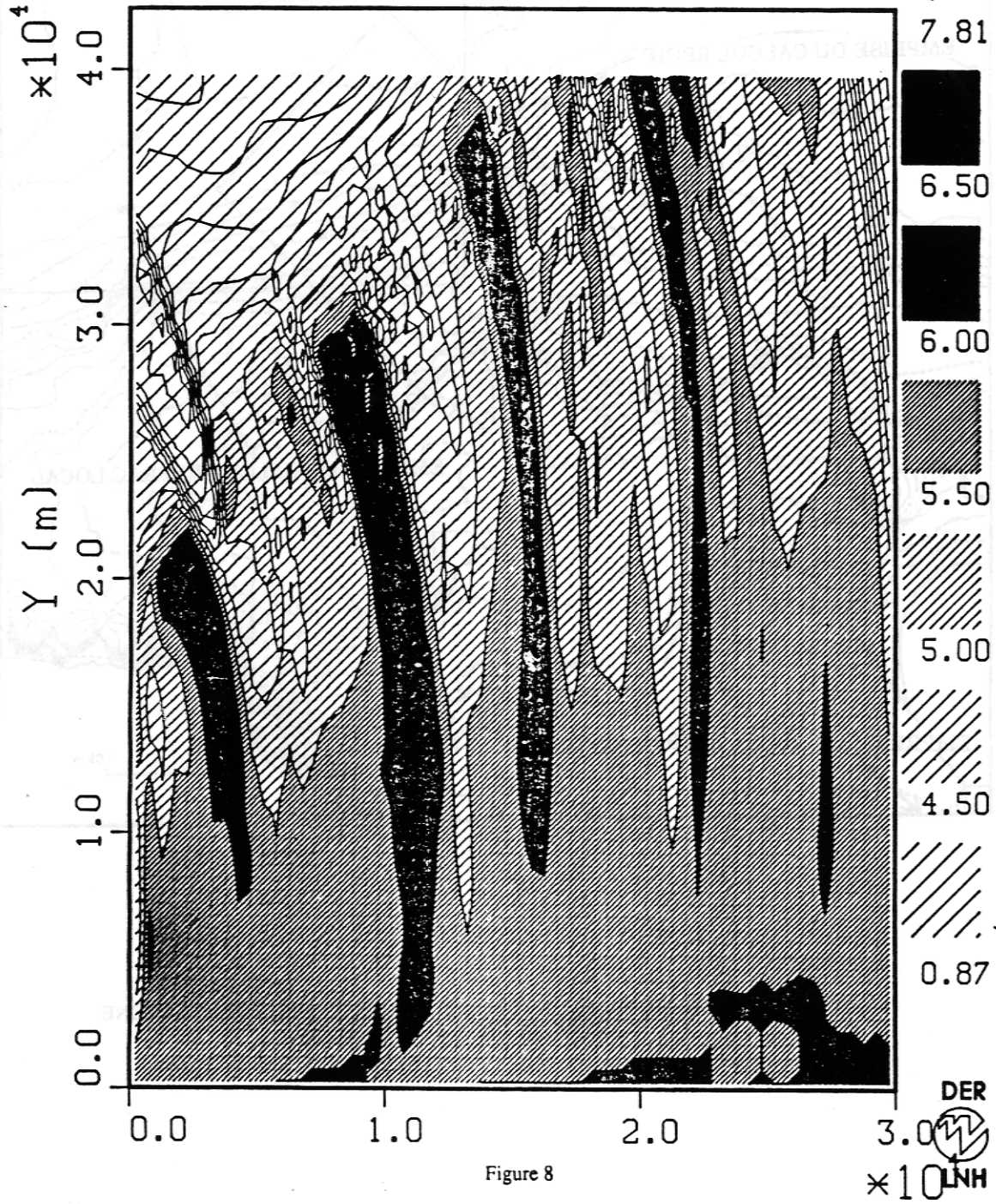
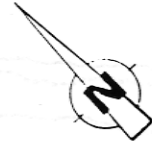


Figure 8