



**HAL**  
open science

# Récupération de l'énergie des vagues par les systèmes à déferlement

Spiridakis Michaël

► **To cite this version:**

Spiridakis Michaël. Récupération de l'énergie des vagues par les systèmes à déferlement. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Université de Nantes, 1983. Français. NNT: . tel-01493176

**HAL Id: tel-01493176**

**<https://hal.science/tel-01493176>**

Submitted on 21 Mar 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THESE

présentée devant l'UNIVERSITE de NANTES  
pour obtenir le grade de

## DOCTEUR-INGENIEUR

par

**Michaël SPIRIDAKIS**

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE MECANIQUE



"RECUPERATION DE L'ENERGIE DES VAGUES PAR LES SYSTEMES  
A DEFERLEMENT"

Soutenu le 24 Novembre 1983 devant la Commission d'Examen

MM. P. SULMONT

Président

P. GUEVEL  
A. GROVEL  
A. CLEMENT  
G. DAMY

} Examineurs

Monsieur P. SULMONT m'a fait l'honneur de présider le Jury d'examen. Je le prie de bien vouloir trouver ici l'expression de toute ma gratitude.

Monsieur P. GUEVEL a bien voulu me confier cette étude, diriger mes recherches et siéger au Jury d'examen. Je le prie de bien vouloir trouver ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je tiens à remercier très spécialement Monsieur A. CLEMENT, qui a bien voulu participer au Jury, de l'intérêt amical et soutenu qu'il a accordé à cette thèse. Ses conseils et ses encouragements furent pour moi une aide considérable.

J'adresse mes remerciements à Monsieur G. DAMY qui a bien voulu accepter de siéger au Jury, pour l'intérêt particulier qu'il a porté à ce travail et pour les conseils judicieux qu'il m'a prodigués.

Je tiens également à remercier Monsieur A. GROVEL d'avoir bien voulu participer au Jury et de me faire part de ses critiques éclairées.

Je remercie Monsieur J.P. CORDONNIER, Monsieur G. DELHOMMEAU et Monsieur J.M. KOBUS qui m'ont beaucoup aidé pendant l'expérimentation ainsi que dans le domaine numérique.

Je tiens à remercier Monsieur F. AUGER pour tous les moyens techniques qu'il a mis à ma disposition pendant les essais. J'adresse également tous mes remerciements à Monsieur C. PERROT, Monsieur E. SAMSON, Monsieur J.L. TOULARASTEL, pour l'aide qu'ils ont apportée à la réalisation de l'installation expérimentale.

Cette étude a été soutenue par le CNEXO-COB ainsi que par le CROUS. Je les remercie vivement de la confiance qu'ils m'ont accordée.

## S O M M A I R E

1. NOTATIONS
2. INTRODUCTION
  - 2.1. La récupération de l'énergie de la houle dans le contexte des énergies renouvelables
  - 2.2. Méthodes diverses de récupération de l'énergie de la houle
  - 2.3. Domestication de l'énergie de la houle : un problème complexe
3. LES DISPOSITIFS DU TYPE DEFERLANT
  - 3.1. Historique
  - 3.2. Les rampes de déferlement
  - 3.3. Les dièdres à houle
  - 3.4. Les trièdres à houle
  - 3.5. Autres dispositifs du type déferlant
4. PRESENTATION DU SUJET
  - 4.1. Rampes de déferlement simples
  - 4.2. Trièdres à houle
  - 4.3. Analyse énergétique des projets
  - 4.4. Proposition de méthodes de construction
  - 4.5. Analyse économique des projets
  - 4.6. Application à un site donné
5. PHENOMENES PHYSIQUES LIES AU PROBLEME
  - 5.1. Schéma général
  - 5.2. L'énergie de la houle

- 5.3. Le déferlement de la houle
- 5.4. La réflexion partielle
- 5.5. Les courants dus à la houle
- 5.6. Le phénomène de la réfraction de la houle  
Focalisation
- 5.7. L'influence du vent
- 5.8. L'influence de la marée
- 5.9. La hauteur d'ascension
- 5.10. Le franchissement d'un seuil

## 6. L'INSTALLATION EXPERIMENTALE

- 6.1. Le petit bassin à houle du LHN de l'ENSM
- 6.2. Le batteur à houle du type coin
- 6.3. Les maquettes d'essais
- 6.4. Système de mesure et essais préliminaires

## 7. RAMPE DE DEFERLEMENT SIMPLE

- 7.1. Essais définitifs
- 7.2. Représentation analytique des résultats
- 7.3. Application à des cas particuliers

## 8. TRIEDES A HOULE

- 8.1. Essais définitifs
- 8.2. Représentation analytique des résultats
- 8.3. Application dans certains cas

## 9. ANALYSE ENERGETIQUE DES SYSTEMES EXAMINES

- 9.1. Le bilan énergétique des systèmes du type déferlant
- 9.2. Le stockage de l'énergie récupérée
- 9.3. Propriétés énergétiques des systèmes examinées

## 10. LES PROBLEMES DE CONSTRUCTION

10.1. Le choix de matériaux

10.2. Les méthodes de construction appropriées

10.3. Le calcul de différentes parties des installations

## 11. ANALYSE ECONOMIQUE DES SYSTEMES EXAMINES

11.1. Evaluation des principaux paramètres

11.2. Procédure d'optimisation

11.3. Application : étude préliminaire d'une centrale  
houlomotrice du type déferlant sur la côte sud-est  
de l'île de Maré (Nouvelle Calédonie)

## 12. CONCLUSIONS

## 13. ANNEXES

## 14. BIBLIOGRAPHIE

## 1. NOTATIONS

- $a$  ... Amplitude de la houle  
 $a_b$  ... Amplitude du mouvement du coin  
 $a_c$  ... Amplitude de la crête de la vague déferlante au-dessus du niveau de la surface de la mer calme  
 $a_f$  ... Amplitude du creux de la vague déferlante au-dessous du niveau de la surface de la mer calme  
 $a_o$  ... Amplitude de la houle au large  
 $B$  ... Largeur d'un seuil  
 $c$  ... Célérité de la houle  
 $c_g$  ... Vitesse de groupe de la houle  
 $c_o$  ... Célérité de la houle au large  
 $c_{g0}$  ... Vitesse de groupe de la houle au large  
 $C_i$  ... Investissement actuel nécessaire pour la production d'un KWe net  
 $C_p$  ... Prix de revient actuel du KWh  
 $C_{ij}$  ... Capital total investi  
 CNCF ... Bénéfice cumulatif net  
 $d_c$  ... Epaisseur du coin à la surface libre  
 $D_a$  ... Dépenses annuelles d'exploitation  
 $D_{max}$  ... Diamètre maximum des cailloux  
 $e_1$  ... Proportion des coûts de construction imprévus  
 $e_2$  ... Proportion des coûts de construction équivalant aux dépenses pour études et surveillances  
 $E_a$  ... Energie globale annuelle disponible à une région de mer précise

- $E_{rt}$  ... Energie totale fournie au réseau par une centrale hou-  
lomotrice pendant la période  $T_b$
- $E_r$  ... Energie récupérable par le dispositif
- $f$  ... Fréquence
- $F_g$  ... Force globale exercée par la houle sur une structure
- $g$  ... Accélération de la pesanteur
- $G$  ... Poids
- $h$  ... Profondeur d'eau
- $h_d$  ... Profondeur d'eau sous la ligne de déferlement
- $h_i$  ... Profondeur moyenne ( $0.5 > \frac{h_i}{\lambda_o} > \frac{h_d}{\lambda_o}$ )
- $h_{max}$  ... Epaisseur maximum de la couche d'eau sur un plan incliné  
au NMC
- $h_p$  ... Profondeur d'eau au pied de la structure
- $H$  ... Amplitude creux-crête de la houle,  $H = 2a$
- $H_{1/3}$  ... Amplitude significative (creux-crête)
- $H_d$  ... Amplitude creux-crête de la houle au déferlement, ( $H_d = a_c + a_f$ )
- $H_i$  ... Amplitude creux-crête de la houle incidente
- $H_M$  ... Marnage
- $H_o$  ... Amplitude creux-crête de la houle au large,  $H_o = 2a_o$
- $H_R$  ... Amplitude creux-crête de la houle réfléchie
- $H_S$  ... Amplitude creux-crête significative
- $i_a$  ... Taux d'intérêt
- $i_c$  ... Taux d'intérêt pendant la construction
- $K$  ... Nombre d'onde de la houle incidente,  $K = \frac{2\pi}{\lambda}$
- $K_a$  ... Taux d'actualisation
- $K_1$  ... Nombre d'onde en profondeur relative moyenne
- $K_o$  ... Nombre d'onde adimensionnalisé,  $K_o = \frac{2\pi S}{\lambda}$

- $K_r$  ... Coefficient de réfraction de la houle  
 $l$  ... Largeur du bassin d'accumulation  
 $L$  ... Longueur du front d'un dispositif  
 $1/m$  ... Pente de la rampe ou de la base des trièdes  
 $m_s$  ... Coefficient du flux au-dessus d'un seuil  
 $1/n$  ... Pente du fond de la mer devant l'installation  
 $n_d, m_d$  ... Ordre du développement en série  
 $n_v$  ... Proportion des vides  
 $NM$  ... Niveau moyen de la mer  
 $NMC$  ... Niveau de la mer calme  
 $P$  ... Pression  
 $P_a$  ... Flux d'énergie disponible à la sortie des alternateurs  
 $P_b$  ... Flux d'énergie disponible au pied du bassin de stockage, juste avant les turbines  
 $P_d$  ... Flux d'énergie de la houle, juste avant le déferlement  
 $P_i$  ... Flux d'énergie de la houle incidente  
 $P_o$  ... Flux d'énergie disponible au large  
 $P_r$  ... Flux d'énergie récupéré au niveau du bassin  
 $P_t$  ... Flux d'énergie disponible à la sortie des turbines  
 $P_u$  ... Flux d'énergie arrivant au réseau électrique  
 $PBP$  ... Période d'amortissement des coûts de la centrale  
 $PI$  ... Coefficient de profitabilité  
 $Q$  ... Débit d'eau franchissant un seuil  
 $r$  ... Rapport ouverture avant/ouverture arrière des trièdres  
 $R$  ... Rendement hydrodynamique d'une houlomotrice  
 $R_o$  ... Hauteur de la houle pendant le franchissement  
 $R_s$  ... Hauteur d'ascension

- $R_T$  ... Coefficient de réflexion  
 $R_1$  ... Coefficient de réflexion dépendant de la surface  
 $R_2$  ... Coefficient de réflexion dépendant de la houle  
 $RI$  ... Investissement actuel réel  
 $S$  ... Hauteur du seuil de la rampe ou du trièdre  
 $S_p$  ... Profondeur du soubassement au pied de l'ouvrage  
 $S(f)$  ... Densité spectrale de puissance  
 $t$  ... Temps  
 $T$  ... Période de la houle  
 $T_a$  ...  $T_a = \frac{1}{m} \int_0^{\infty} \frac{1}{f} S(f) df$   
 $T_c$  ... Période de construction de la centrale  
 $T_e$  ... Période d'exploitation de la centrale  
 $T_z$  ... Période de passage à zéro  
 $U_B$  ... Vitesse maximum d'une particule d'eau tombant sur la rampe  
 $U_I$  ... Vitesse des courants dus à la houle dans la zone I  
 $U_{II1}$  ... Vitesse des courants dus à la houle dans la zone II.1  
 $U_{II2}$  ... Vitesse des courants dus à la houle dans la zone II.2  
 $V$  ... Vitesse des courants parallèles à la côte  
 $V_c$  ... Vitesse de pilonnement du coin  
 $V_{max}$  ... Vitesse maximum d'ascension d'eau sur la rampe  
 $V_T$  ... Volume d'eau franchissant un seuil de largeur B pendant une période T  
 $\bar{q}_{(u,v,w)}$  ... Vitesse d'une particule d'eau de la houle  
 $X, Y$  ... Coordonnées cartésiennes  
 $X_c$  ... Coûts concernant le dispositif

- $X_d$  ... Distance horizontale entre le pied de l'ouvrage et la ligne de déferlement
- $X_p$  ... Distance de plongée du déferlement
- $Y_c$  ... Coûts de l'ensemble transformation et transmission de l'énergie
- $X_c/Y_c$ ... Coefficient de coûts composés.

\* \* \*

- $\alpha$  ... Angle de la rampe ou de la base des trièdres avec l'horizontale,  $\text{tg}\alpha=1/m$
- $\beta$  ... Angle du fond de la mer devant le dispositif avec l'horizontale,  $\text{tg}\beta=1/n$
- $\gamma$  ... Cambrure de la houle
- $\gamma_0$  ... Cambrure de la houle au large
- $\gamma_c$  ... Cambrure critique pour le franchissement
- $\zeta_0$ ... Angle d'incidence de l'orthogonale de la houle par rapport à l'axe perpendiculaire au dispositif, juste avant le déferlement
- $\zeta$  ... Paramètre de Battjes,  $\zeta=\text{tg}\alpha/\sqrt{H/\lambda_0}$
- $\eta$  ... Rapport entre la vitesse de groupe de la houle et la célérité de la houle individuelle,  $\eta=\frac{c_g}{c}$
- $\bar{\eta}$ ... Direction de l'orthogonale de la houle
- $\lambda$  ... Longueur d'onde de la houle
- $\lambda_0$ ... Longueur d'onde de la houle au large
- $\rho$  ... Densité de l'eau de la mer
- $\tau_t$ ... Rendement des turbines
- $\tau_{tr}$ ... Rendement de la transmission
- $\tau_{tr'}$ ... Rendement des transformateurs

- $\tau_a$  ... Rendement des alternateurs
- $\varphi$  ... Potentiel de vitesse
- $\omega$  ... Fréquence angulaire de la houle,  $\omega = \frac{2\pi}{T}$
- $\omega_a$  ... Taux d'inflation
- $\omega_1$  ... Taux d'augmentation des coûts de construction pendant la période  $T_c$
- $\Omega$  ... Coefficient de direction de l'orthogonale de la houle incidente après réfraction,  $\Omega = \cos \zeta_0$

## 2. INTRODUCTION

### 2.1. L'énergie de la houle dans le contexte des énergies renouvelables

Comme la plupart des énergies naturelles, l'énergie des vagues est dérivée de l'énergie solaire. La chaîne de transformation d'une partie de l'énergie solaire en énergie des vagues passe par l'action du vent.

Des évaluations approximatives du potentiel énergétique mondial de la houle donnent des valeurs entre 1000 GW et 3200 GW ; ordre de grandeur des exigences énergétiques du monde entier, (v. bibl. 29, 41, 18). Le flux d'énergie moyen annuel pour les sites privilégiés vis à vis à l'énergie de la houle est de l'ordre de 40 kW par mètre linéaire de côte, ce qui prouve une importante densité de cette source d'énergie. Bien que ces estimations englobent aussi les périodes de tempête, la densité de l'énergie de la houle est nettement supérieure à la densité d'autres sources d'énergie renouvelable (p.e. de l'énergie solaire :  $\sim 0,20$  kW/m<sup>2</sup>, pour les sites privilégiés).

Pour évaluer le potentiel énergétique de la houle dans un site donné, il faut d'abord connaître la répartition des caractéristiques de la houle dans la région pour toutes les directions, ce qui nécessite des mesures très longues, (pendant un an minimum\*) et coûteuses. Des campagnes systématiques de mesure de houle n'ont été effectuées que dans quelques pays. En Angleterre, des mesures de ce type, entreprises depuis plusieurs années, ont permis l'évaluation du flux énergétique de la houle pour certains sites de la côte Ouest : p.e. 47,4 kW/m<sup>1</sup> à l'Ouest de South Vist (Outer Hebrides), 45,5 kW/m<sup>1</sup> à Foula, (v. bibl. 59). En France des mesures systématiques ont été effectuées à l'Ouest des côtes bretonnes ; elles ont permis l'évaluation du potentiel énergétique de la houle dans la région : 20 kW/m<sup>1</sup>, pour les sites les plus exposés. En général, le potentiel moyen de la façade

\* Les mesures peuvent varier de 25 % d'une année à l'autre (v. bibl. 20).

Atlantique est de 10 à 20 kW/ml. En Suède, l'énergie totale annuelle de la houle est estimée entre 40 et 60 TWh et les experts visent une exploitation de 5 TWh/an, (v. bibl. 6).

Dans la zone des Alizés, la houle est longue et assez régulière ce qui permettrait de repérer des sites privilégiés.

En Méditerranée, l'énergie de la houle annuelle est typiquement inférieure à 280 MWh/ml, tandis que pour certaines régions au NW de l'Ecosse et de l'Irlande, elle est de l'ordre de 570 MWh/ml (v. bibl. 53).

Cette source d'énergie a l'avantage, (par opposition p.e. à l'énergie solaire), d'être globalement en phase avec les demandes énergétiques saisonnières.

Par opposition à l'énergie des marées, elle se prête à des méthodes d'exploitation modulaires. Par contre, c'est une énergie intermittente et cyclique, répartie dans un spectre de fréquences assez large.

Depuis 1860, plus de 350 brevets sur la récupération de l'énergie de la houle ont été déposés en Grande Bretagne (v. bibl. 17) et certainement plus de 1000 pour le monde entier, mais rares sont les projets qui ont dépassé le stade des schémas de principe. Il est caractéristique qu'aucune de ces propositions n'ait encore donné de solutions convaincantes aux multiples problèmes qui s'opposent à ce qu'on exploite cette source d'énergie.

Le débat sur l'exploitation des différentes sources d'énergie renouvelable présente actuellement de nombreuses incertitudes et controverses sur des points essentiels. Il est certain que la domestication de l'énergie de la houle pourrait contribuer à la production d'électricité ou d'eau douce, au pompage (irrigation, bassins d'aquaculture, salines) etc... Mais les facteurs qui conditionnent les possibilités d'applications pratiques dans

ce domaine ne sont pas encore bien maîtrisés : connaissances technologiques, balance coûts-bénéfices, impact sur l'environnement, sécurité, etc. Actuellement, les recherches sont concentrées sur trois points :

- a) Evaluation du potentiel énergétique de la houle dans certains sites
- b) Etude des interactions entre le champ des vagues incidentes et les dispositifs destinés à la captation de l'énergie. Optimisation des dispositifs sur la base des caractéristiques de l'énergie de la houle et des aspects techniques des systèmes
- c) Estimation économique de la réalisation et de l'exploitation des dispositifs.

## 2.2. Méthodes diverses de récupération de l'énergie de la houle

Les principales caractéristiques d'une installation houlomotrice sont :

- a) La méthode de récupération primaire
- b) La méthode de stockage de l'énergie
- c) La méthode de transformation de l'énergie
- d) Le domaine d'utilisation - exploitation
- e) Son emplacement par rapport :
  - au littoral (systèmes côtiers ou off-shore),
  - à la surface de la mer (systèmes immergés ou émergés),
  - au fond de la mer (posés sur le fond ou flottants).

L'ensemble de ces critères est nécessaire pour tenter de classer les centaines des dispositifs proposés.

Depuis quelques années, plusieurs laboratoires dans le monde consacrent des efforts importants à l'étude de quelques systèmes houlomoteurs jugés prometteurs.

Au Japon, le projet KAIMEI, élaboré par le "Japan Marine Science and Technology Center", dès 1976, est basé au principe de la colonne d'eau oscillante, (v. bibl. 13). Ces travaux ont abouti à la construction d'un prototype qui a été testé lors de deux campagnes d'essais en mer. Un deuxième projet KAIMEI n° 2 est en préparation.

En Grande Bretagne, dès 1974, le gouvernement a proposé le développement des recherches au "National Engineering Laboratory" pour l'utilisation éventuelle de l'énergie de la houle disponible autour du littoral Anglais (v. bibl. 37). Après l'examen de plusieurs dispositifs, un système fixe posé sur le fond a été retenu (v. bibl. 22). Plusieurs systèmes continuent à être étudiés en Grande Bretagne : à l'Université de Lancaster, le système à sacs flexibles, les systèmes hydropneumatiques submergés par la société Vickers, le système à rampe de déferlement de la société Gibb and Partners.

Aux Etats-Unis, la compagnie Lockheed a développé le système Dam Atoll.

Les Norvégiens travaillent actuellement sur un système fixe, (canal convergent), associé à des dispositifs de focalisation (v. bibl. 22).

La Suède a également engagé des budgets importants pour des études préliminaires.

En Allemagne, l'organisme "Dornier System", en collaboration avec le "Franziusinstitut der T.U. Hannover" a engagé des études technico-économiques qui ont également démontré l'utilité de l'énergie de la houle et ils ont fixé comme objectif la construction d'un prototype, (v. bibl. 29).

En Italie, la société Technomare a entrepris des activités dans le domaine énergétique et économique.

En France, des travaux systématiques dans le domaine ont débuté en 1979. Une équipe au Laboratoire d'Hydrodynamique Navale de l'ENSM, en collaboration avec le CNEXO, a effectué plusieurs études, (bibliographiques, théoriques, numériques et expérimentales). Actuellement, les travaux portent sur les flotteurs oscillants à récupération externe ou interne et les systèmes à déferlement.

L'élaboration d'un avant projet de prototype pour une île de l'Océan Pacifique (T.O.M.) a démarré en 1983.

### 2.3. Domestication de l'énergie de la houle : un système complexe

L'extraction de l'énergie de la houle suppose l'intégration de diverses technologies qui nécessitent des recherches poussées et un travail de développement. Dans certains pays, les recherches ont dépassé le stade des problèmes spécifiques et visent maintenant l'élaboration des projets technico-économiques. En réalité, les thèmes : houle, dispositif, économie, énergétique doivent être regardés comme un système global (v. bibl. 10, 44).

Dans le Tableau I, nous présentons les différents travaux et préoccupations nécessaires à la réalisation d'une installation

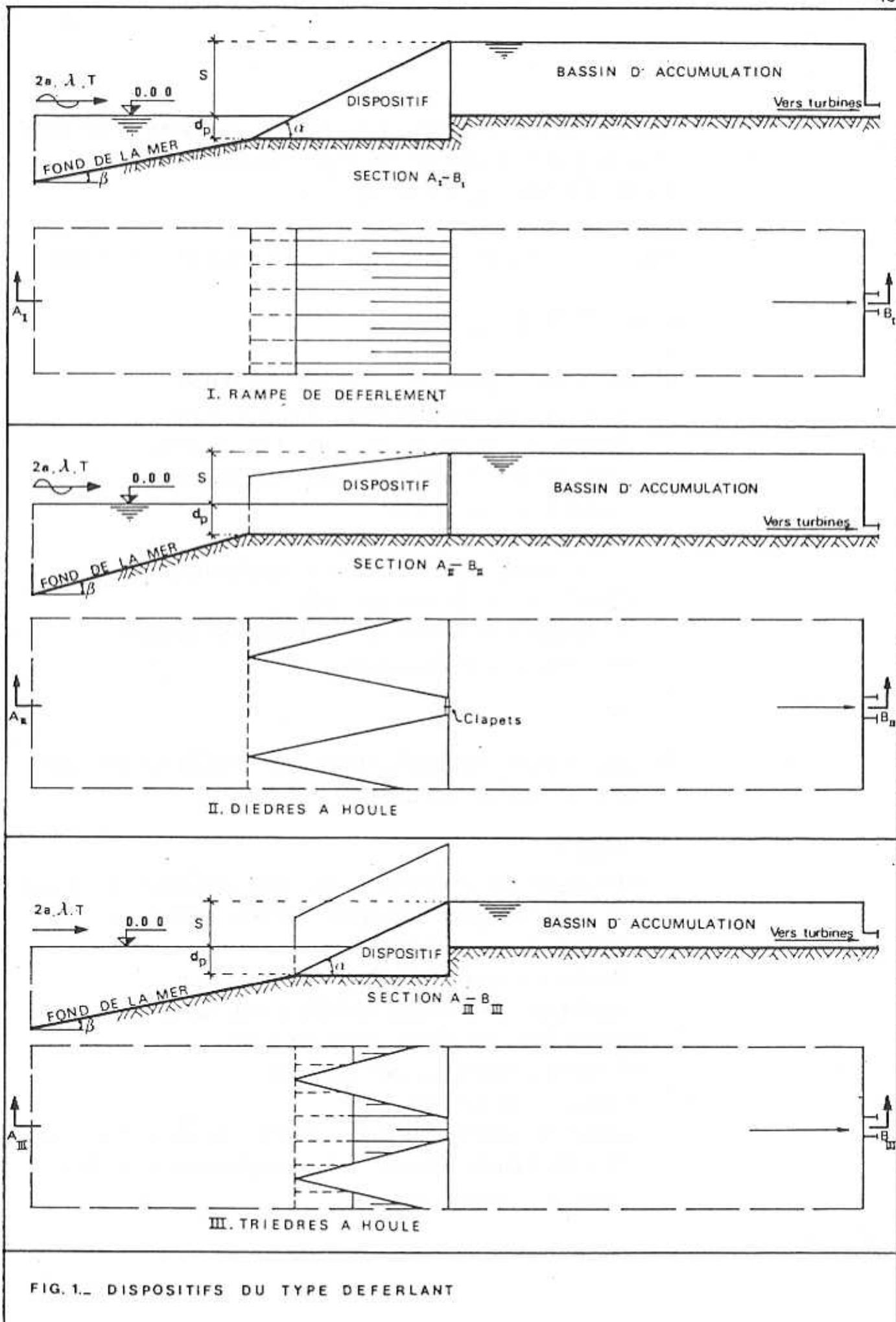


FIG. 1. DISPOSITIFS DU TYPE DEFERLANT

houlomotrice prototype (v. bibl. 28). La complexité du problème envisagé pour le développement d'un système houlomoteur économiquement viable, apparaît clairement.

Parmi les multiples composantes de ce type de projet, citons :

1. Construction et implantation

- Possibilité de construction dans la région
- Disponibilité des matériaux de construction
- Existence d'engins de manutention et de montage
- Robustesse du dispositif pendant le transport de ses éléments et l'exploitation
- Méthode de construction optimale
- Organisation de la procédure de construction
- Simplicité de montage sur place
- Possibilité de transport des pièces préfabriqués
- Simplicité du projet final.

2. Adaptation aux règles de sécurité pendant la construction et aux caractéristiques du site choisi :

- Marées
- Distributions statistiques des caractéristiques de la houle dans la région (amplitude, période, direction)
- Sables, vases, salinité
- Ambiance corrosive
- Conditions climatiques (soleil, pluie, neige)
- Morphologie des côtes, états des fonds
- Structure géologique des sous-sols
- Transport de sédiments
- Sécurité (difficultés dues à l'action des vagues pendant l'installation, entraves à la navigation ou à la pêche, sabotages, signalisation)

- Ecologie (indemnités des dommages provoqués à l'environnement, changement du régime de transport des sédiments, ensablement, bruit, obstacles optiques)

### 3. Nature - efficacité de l'exploitation

- Surveillance et contrôle du système fonctionnant en cadence normale
- Démarrage de la production
- Transport de l'énergie vers les lieux de consommation
- Contrôle des dépenses annuelles
- Groupe et moyennes de réparation (accès, transport)
- Entretien
- Possibilité d'arrêt complet du fonctionnement

### 4. Adaptation au concept général

- Forme de l'énergie
- Caractéristiques diachroniques\* de la production (réglage, stockage)
- Puissance installée

Ces exigences doivent être compatibles avec les demandes énergétiques et les possibilités de développement dans la région.

Malgré les incertitudes et les risques éventuels, la construction d'un prototype est bien la démarche la plus décisive pour le développement des systèmes houlomoteurs.

\* Répartition de l'énergie produite dans le temps, couplage avec les systèmes de base, etc...

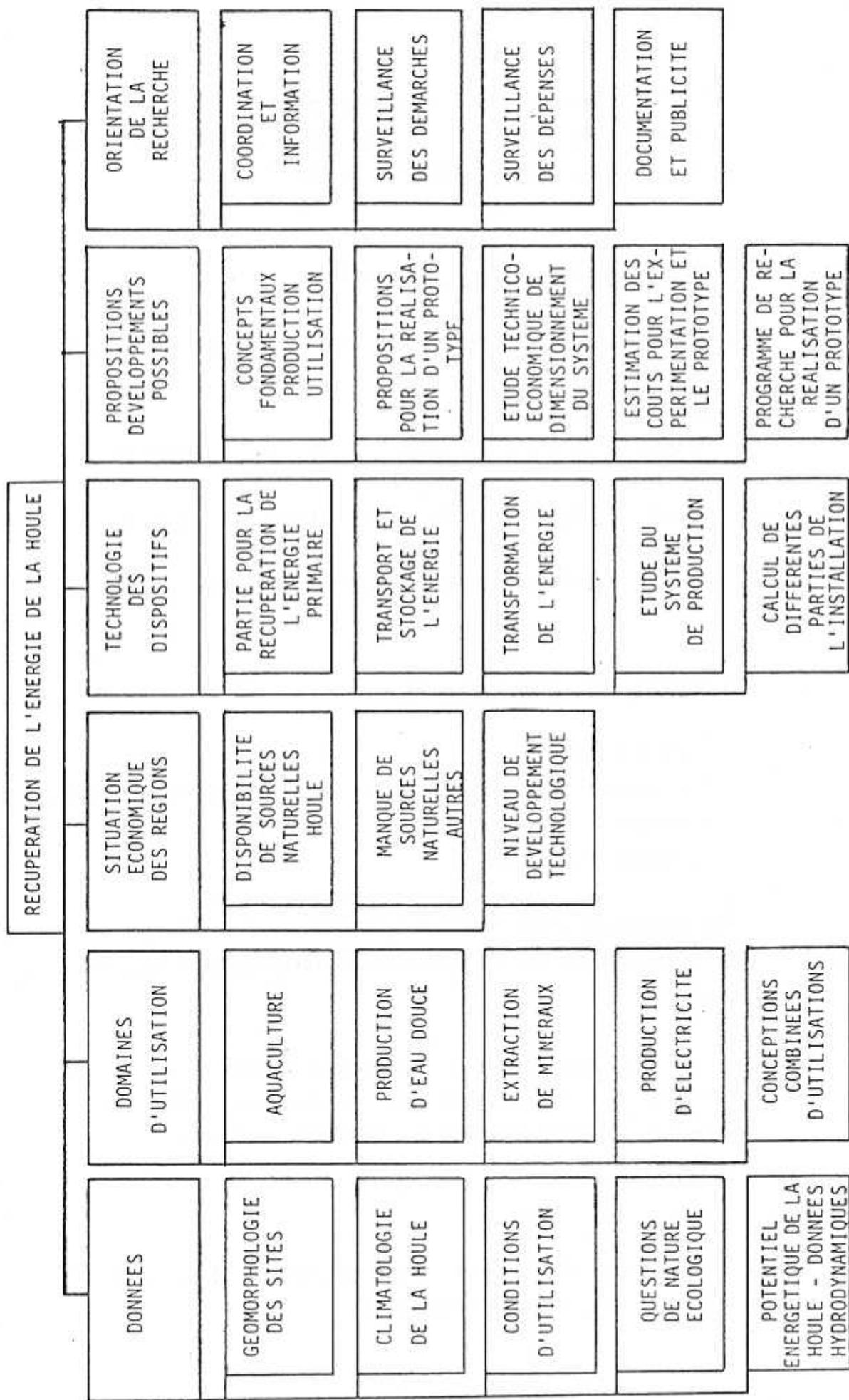


TABLEAU I

PRODUCTION DE L'ENERGIE DE LA HOULE

SCHEMA GENERAL DES TRAVAUX, D'APRES V. ECKENER, FRIEDRICHSHAFEN (v. bibl. 28)

### 3. LES DISPOSITIFS DU TYPE DEFERLANT

#### 3.1. Historique

L'exploitation du phénomène de déferlement des vagues pour la production d'énergie est à la base de la conception de quelques types de houlomotrices fixes. Les vagues déferlent contre une structure formée d'un plan incliné simple ou équipé de convergents, des quantités d'eau remplissent un bassin de stockage surélevé par rapport au niveau moyen de la mer. Ensuite, l'eau accumulée est turbinée à basse chute.

Le premier système de ce type pour la production de l'énergie électrique a été étudié par la société "Sir Alexander Gibb and Partners", sur proposition du "Central Electricity Board", en Angleterre, en 1959, (rampe de déferlement).

Dès 1944, en France, au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique a été étudié un système à dièdres (projet SOMEMA) ; mais ce système n'est pas du type déferlant, proprement dit.

Le système à trièdre développé au Laboratoire d'Hydrodynamique Navale de l'E.N.S.M. est une combinaison de ces deux systèmes, (convergents fixés sur une rampe de déferlement).

L'étude, la réalisation et l'exploitation de ces systèmes sont facilitées par le fait qu'ils présentent beaucoup de caractéristiques communes avec certains ouvrages portuaires externes et les centrales hydrauliques à basse chute.

#### 3.2. Les rampes de déferlement (v. fig. 1, I)

Le système à rampe de déferlement est un des premiers dispositifs pour la récupération de l'énergie de la houle qui ait été

étudié dès les années 50. La conception de ce système est due au "Central Electricity Board, Mauritius, I.O." et son développement au bureau de "Sir Alexander Gibb and Partners". L'étude expérimentale a été faite au Hydraulics Research Station, Wallingford. Après la crise pétrolière de 1973, ce projet s'est révélé, (d'après les auteurs du projet), compétitif par rapport à une installation Diesel. Le site de la centrale se trouve sur la côte sud de l'Ile Maurice, (Océan Indien). La conception du projet est simple et réaliste. La houle déferlant contre une rampe-barrage construite sur un récif corallien, l'eau s'accumule dans un bassin, est stockée\*, puis turbinée à basse chute. Le bassin de stockage est constitué par une partie du lagon entre le récif corallien où la rampe serait installée, la côte de l'Ile et deux barrages latéraux. Les caractéristiques de la centrale sont les suivantes :

- Puissance installée : 20 MW
- Puissance effective : 18 MW
- Production annuelle d'énergie : 103 GW
- Rendement global : R 25 %

L'étude économique de cette centrale (Dec. 1976), a montré un avantage décisif par rapport au Diesel (v. bibl. 81).

Le projet "Ile Maurice", réactualisé en 1978, est toujours considéré comme prometteur : une installation de démonstration de faible puissance est en cours de construction aux Fidji et une prospective sur les possibilités d'application à la Barbade a été déjà réalisée (v. bibl. 22).

En 1981, au Centre Océanologique de Bretagne, a été élaborée une étude préliminaire d'une mini-centrale sur la Côte Est de l'Ile de Tahiti. Cette installation est constituée d'un bassin artificiel dans lequel la houle déverse à l'aide d'une rampe

\* Un stockage supplémentaire est prévu : des turbo-pompes installées sur les barrages latéraux du bassin refoulant des quantités d'eau dans un réservoir surélevé.

de déferlement, pour alimenter ensuite des turbines à basse chute (v. bibl. 74). L'énergie électrique produite serait injectée dans le réseau déjà existant sur l'île. Les principales caractéristiques de cette centrale sont les suivants :

- Puissance installée : 1,50 MW
- Puissance effective : 1,00 MW
- Production annuelle d'énergie : 8,76 GWh
- Rendement global de l'installation : 24,5 %
- Prix du kWh estimé (Août, 1981) : 0,80 FF
- Capital total investi : 60 000 000 FF

Malgré leurs qualités, les systèmes à rampe de déferlement présentent les inconvénients suivants :

- Ils sont sensibles au phénomène de la marée,
- Ils offrent une faible hauteur de chute aux turbines
- Ils nécessitent de bassins de stockage de grande capacité
- Leur rentabilité est étroitement liée aux caractéristiques du site d'implantation.

Les études préliminaires ont également fait ressortir quelques avantages essentiels :

- Leur rendement est intéressant dans une gamme assez large de caractéristiques de la houle
- Ils ne comportent pas de parties mobiles
- Leur construction ne pose pas de problèmes particulièrement compliqués pour les sites bien choisis
- Les analyses économiques préliminaires faites pour ces systèmes, ne sont pas décourageantes.

Au Hydraulics Research Station (Wallingford), ont été effectués des essais pour l'évaluation du rendement des plages de déferlement.

A notre connaissance, les seuls résultats publiés sur le sujet se trouvent dans la figure 7 de l'article de A. Walton Bott, sur le projet Ile Maurice (v. bibl. 81, p. F2-34) qui concernent un cas particulier, (houle de période 6 sec., pente du fond de la mer  $1/1,5$ , pente de la plage  $1/2$ , v. fig. 43).

### 3.3. Les dièdres à houle (v. fig. 1, II)

Depuis la deuxième guerre mondiale des études très serrées de rendement d'installations côtières du type dièdre ont été faites au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique. Ces dispositifs comprennent essentiellement une série de dièdres d'assez grandes dimensions ouverts vers le large et terminés à leur partie arrière qui est très étroite par une ligne de clapets débouchant dans un bassin d'accumulation. Des turbines basse chute entraînant des générateurs électriques font suite à ce bassin (v. bibl. 27).

Les premiers essais en Laboratoire sur un modèle en trois dimensions, comportant une batterie de dièdres, ont montré que ce procédé de la société SOMEMA pourrait donner un rendement jusqu'à 50 %, mais les variations des caractéristiques de la houle avait une très grande importance sur la valeur des rendements obtenus (1944). Une deuxième campagne d'essais effectuée en 1947 avait comme objectif l'évaluation du rendement énergétique des dièdres soumis à des houles de différentes longueurs d'ondes, de différentes amplitudes, en testant aussi l'influence du phénomène de la marée. Plusieurs paramètres ont été testés (convergence des trièdres, dimensions des clapets, hauteur de refoulement dans le bassin etc.).

Pour les houles de grande cambrure, d'une amplitude de 2 m, niveau du bassin d'accumulation à + 4 m, le rendement est de

l'ordre de 35 % (houles du type Méditerranéen). Le même rendement est obtenu pour des faibles cambrures et amplitudes assez grandes avec des refoulements de l'ordre de 5 à 7 mètres, (houle du type océanique).

L'examen de l'influence de la marée a montré que lorsque la profondeur d'eau dans le dièdre augmente, la houle, entretient dans le convergent un clapotis qui a une grande influence (défavorable) sur le rendement.

Ces systèmes présentent les avantages suivants :

- Rendement important
- Leur construction ne pose pas de problèmes insurmontables
- Ils offrent des hauteurs de chute satisfaisantes (4 à 6 m)

Néanmoins, les principaux inconvénients de ces systèmes sont les suivants :

- Ils sont très sensibles au phénomène de la marée
- Ils comportent des parties mobiles (clapets)
- Les analyses économiques faites pour ces systèmes (1947), ont donné un prix par kWh dix fois supérieur de celui d'une centrale hydrodynamique classique, à basse chute.

#### 3.4. Les trièdres à houle (v. fig. 1, III)

Les dispositifs en trièdres, développés au L.H.N. de l'E.N.S.M., sont des systèmes fixes comme combinaison des deux systèmes déjà présentés. Il s'agit de drièdres fixés sur une rampe de déferlement. Nous avons choisi d'étudier cette forme, pour les raisons suivantes :

- la base inclinée des trièdres provoque le déferlement (gonflant), indispensable au bon fonctionnement des convergents,

- il est possible de supprimer la partie mobile des convergents, (clapets),
- si les trièdres conservent, dans la mesure du possible, les avantages de deux systèmes précédents, on arrive à la création d'un dispositif très performant.

A notre connaissance, il n'y a pas d'études antérieures sur ce sujet.

### 3.5. Autres dispositifs du type déferlant

Les centrales "à coup de bélier (1)" sont basées sur un principe bien différent : Larges diffuseurs exposés aux vagues déferlantes, dont le diamètre va diminuant pour aboutir à un tuyau long et fin. Lorsque la vague arrive, une partie de l'eau pénètre dans ces dispositifs, en forme d'entonnoir, puis dans les tuyaux, ce qui confère à cette eau une vitesse importante, d'où elle se déverse dans un réservoir. En sortant de ce réservoir, l'eau actionne des turbines hydrauliques ordinaires. C'est un projet soviétique étudié au début des années 70, mais qui, à notre connaissance, n'a pas eu de suite (v.bibl. 80).

Le dispositif de Lockheed Company "Dam-Atoll", conçu par l'ingénieur Les Wist a la forme d'une lentille partiellement immergée qui tend à faire converger les vagues vers le centre. Au près de leurs points de déferlement, les vagues se dirigent tangentiellement dans un puits vertical au centre du dispositif. La structure voûtée, en béton précontraint, constitue en même temps un système de focalisation de la houle. Dans le puits d'accumulation (1), l'eau entretient une rotation continue en actionnant une turbine spécialement conçue pour le système, située au fond du puits.

(1) Voir aussi travaux de Coyne (Compte rendu des 4ièmes Journées de l'Hydraulique, 1956, Société Hydrotechnique de France.)

Parmis les avantages de ce dispositif, nous citons les suivants :

- concentration considérable de puissance par le phénomène de la réfraction de la houle,
- efficacité omnidirectionnelle,
- rendement intéressant,
- bande passante large,
- production unidirectionnelle, relativement constante (stockage faible en énergie cinétique de rotation, dans le puits).

Par contre, ce système présente des problèmes de nature technico-économique et d'entretien.

## 4. PRESENTATION DU SUJET

### 4.1. Rampes de déferlement

Il s'agit d'une étude expérimentale du rendement hydrodynamique des plans inclinés en houle régulière unidirectionnelle.

Nous essayons de quantifier l'influence des paramètres suivants :

- angle de la rampe  $\alpha$ , supposé égale à l'angle du fond de la mer  $\beta$
- nombre d'onde adimensionnel  $K_o = \frac{2\pi S}{\lambda}$
- cambrure de la houle incidente  $\gamma$

Nous proposons une formule empirique pour chacun des angles examinés .

### 4.2. Trièdres à houle

C'est une étude expérimentale de 7 types de trièdres (au rapport ouverture avant/ouverture arrière  $r = 2.5, 3.0, 3.75, 4.0, 5.0, 7.5$  et  $10.0$ ) pour évaluer leur rendement hydrodynamique en houle régulière unidirectionnelle. Nous examinons l'influence quantitative des paramètres suivants :

- angle de la base des trièdres  $\alpha$
- angle du fond de la mer  $\beta$
- nombre d'onde adimensionnel  $K_o$
- cambrure de la houle incidente  $\gamma$ .

Nous proposons des formules empiriques pour deux cas d'angle de la base du trièdre optimisé.

#### 4.3. Analyse énergétique des projets

Nous examinons les questions suivantes :

- dimensionnement optimal des dispositifs étudiés par rapport aux caractéristiques de la houle d'un site précis,
- moyens d'amélioration du rendement global,
- changements intermédiaires quantitatifs et qualitatifs de l'énergie tout au long de la chaîne énergétique de la centrale,
- domaine d'application des deux systèmes ; leurs spécificités,
- influence énergétique du phénomène de la marée,
- impact du changement des caractéristiques de la houle sur les performances des systèmes étudiés.

#### 4.4. Proposition de méthodes de construction

Nous traitons ici les problèmes particuliers qui se posent à la construction des dispositifs examinés :

- choix des matériaux,
- implantation des ouvrages,
- méthode de construction, organisation des travaux,
- efforts exercés sur les dispositifs,
- calcul des différentes parties des installations,
- difficultés spécifiques aux sites isolés.

#### 4.5. Analyse économique des projets

Les thèmes présentés dans ce chapitre sont les suivants :

- dimensionnement des ouvrages,

- facteurs technico-économiques concernant les installations du type déferlant,
- méthodes d'analyse économique, valables pour les houlomotrices.

#### 4.6. Application à un site donné

Enfin, nous élaborons une étude comparative préliminaire, de deux centrales houlomotrices : l'une à rampe de déferlement, l'autre à trièdres pour le même site de l'île de Maré (N. Calédonie). Dans les deux cas, nous calculons le capital total investi et le prix du kWh fourni au réseau. Nous prenons en considération le phénomène de réfraction de la houle incidente. (redressement des orthogonales - focalisation).

## 5. PHENOMENES PHYSIQUES LIES AU PROBLEME

### 5.1. Schéma général

La houle dans la nature est toujours irrégulière. Le désordre est plus important dans la zone de génération (houle du vent) qu'à plus grande distance où l'irrégularité de la houle (formée) est moins grande. Au voisinage de la côte, l'état de la mer devient encore plus compliqué (diffraction, radiation, pertes d'énergie, création de tourbillons, déferlement).

Les théories mathématiques sur la houle\*, basées sur un certain nombre d'hypothèses, ne peuvent être appliquées avec la même crédibilité dans tous les cas.

Pour cerner le domaine de validité des théories sur la houle progressive, plusieurs vérifications ont été faites par de méthodes théoriques (R. G. Dean, 1970), ou empiriques, (B. Le Mehauté, D. Divoky, A. Lin, 1968).

Il résulte de ces recherches, que pour les petites profondeurs, la théorie cnoïdale et la théorie de Stokes I donnent de résultats satisfaisants, tandis que pour les moyennes et grandes profondeurs ( $\frac{h}{\lambda} \geq 0,128$ ), la théorie d'Airy donne les meilleurs résultats. Néanmoins, dans la zone de déferlement où les hypothèses initiales ne sont plus respectées et les conditions aux limites sont indéterminées, ces théories ne sont plus valables (v. § 5.3).

\* Pour la houle périodique progressive :

- Théorie linéaire, Airy (1845)
- Théories d'amplitude finie :
  - Gerstner (1802)
  - Korteweg et De Vries (1895, Théorie Cnoïdale)
  - Munk (1969, Théorie de houle solitaire),
  - Iwagaki (1968, Théorie hyperbolique) etc, (v. bibl, 33, 73, 82)

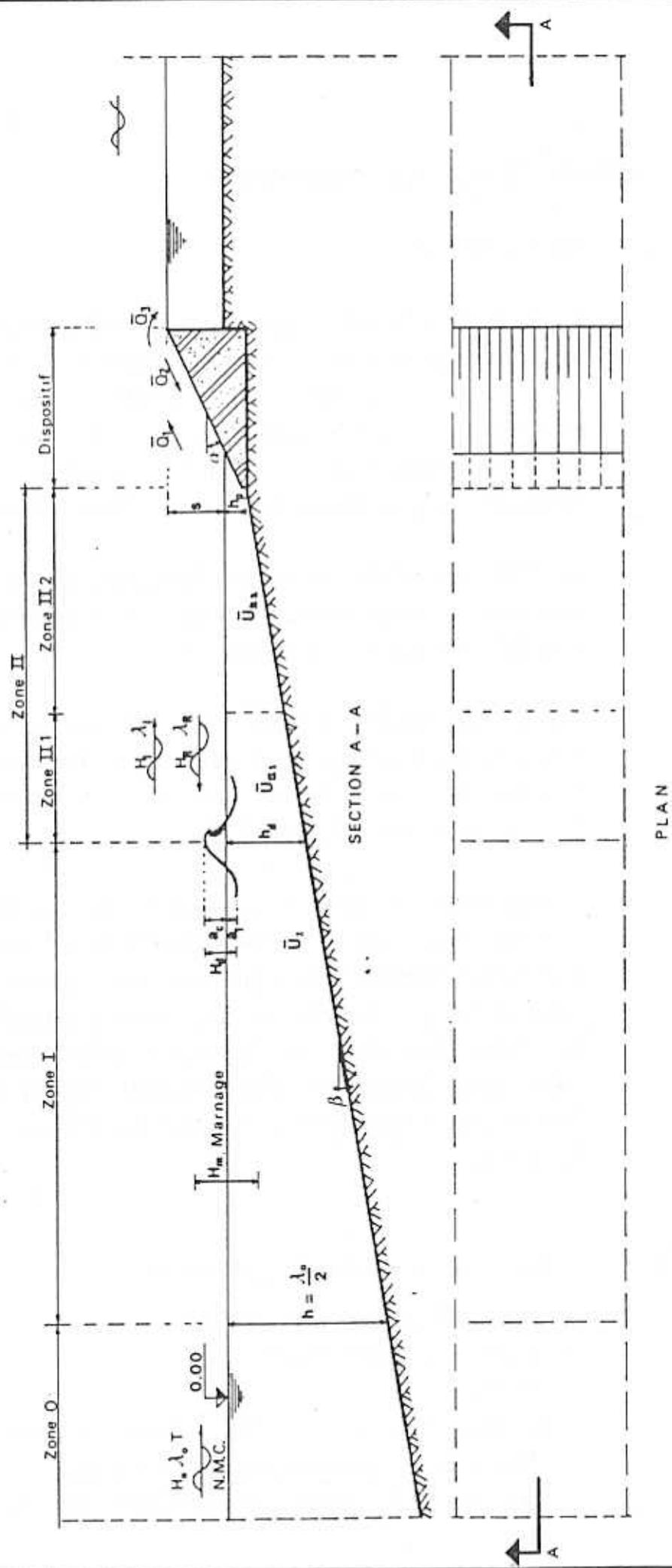


FIG. 2.- SCHEMA GENERAL.-

Dans la figure 2 est schématisé l'état de la mer devant un système du type déferlant ; il est possible de distinguer les zones suivantes :

Zone 0 : Profondeurs relatives grandes,  $\frac{h}{\lambda_s} > 0,50$  ; pratiquement aucune influence du fond de la mer sur les caractéristiques de la houle ( $H_0, \lambda_0, T$ ).

On peut supposer qu'il n'y a pas réflexion de la houle sur le fond.

Dans ce cas, on a :

$$c_0 = \frac{g}{\sigma}, \quad c_{g0} = \frac{c_0}{2}, \quad \lambda_s = \frac{gT^2}{2\pi}$$

Zone I : Profondeurs relatives moyennes  $0,50 > \frac{h_1}{\lambda_s} > \frac{h_b}{\lambda_s}$  où la houle n'a pas encore déferlé. Influence du fond sur la longueur d'onde et l'amplitude de la houle. On suppose que la réflexion de la houle sur le fond est négligeable.

Dans ce cas, on a :

$$\lambda = \lambda_0 \operatorname{th} \frac{2\pi h}{\lambda} \quad (1)$$

$$H = H_0 \left( \frac{\lambda}{\lambda_s} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{1 + \frac{2Kh}{\operatorname{sh} 2Kh}}{1 + \frac{2K_t h_t}{\operatorname{sh} 2K_t h_t}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

La figure 3 nous donne la représentation graphique des (1) et (2) :

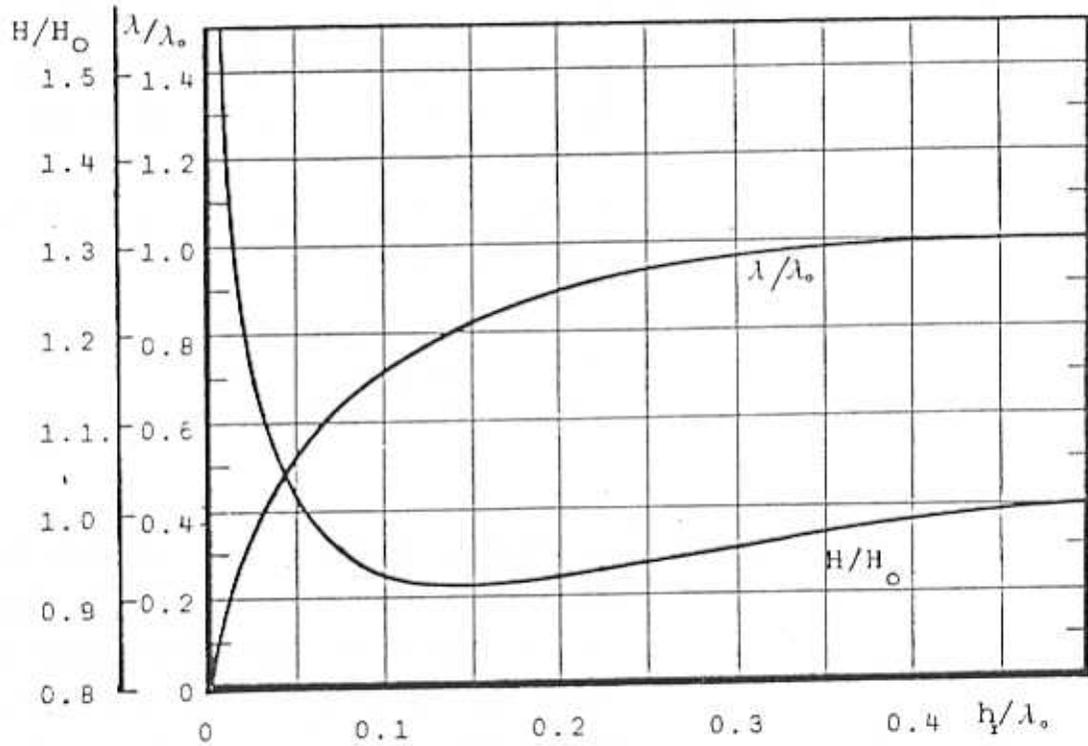


Fig. 3 - Transformations de  $\lambda$  et  $H$  par rapport à la profondeur  $h_1$

Zone II : Profondeurs  $h < h_d$  où  $h_d$  est la profondeur de déferlement (profondeur correspondant à la première ligne des rouleaux). La profondeur de déferlement  $h_d$  dépend de l'amplitude creux-crête  $H_0$  de la houle au large, de la longueur d'onde  $\lambda_d$  et de l'amplitude  $H_d$  des lames déferlantes (v. fig. 4 et 18)

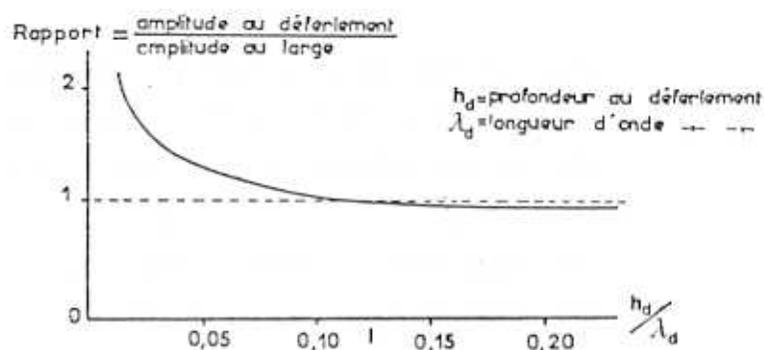


Fig. 4 - Amplitude des lames déferlantes et profondeur de déferlement (d'après LARRAS)

La première partie II 1 de cette zone, où la houle déferle peut être distinguée de la deuxième partie II 2 où la houle a changé de caractéristiques à cause du déferlement. Ensuite on peut avoir plusieurs lignes de rouleau dans la zone II 1.

Par contre, il y a des cas où la houle arrive devant le dispositif sans déferler (absence de la zone II).

La houle attaque le dispositif contre lequel elle déferle en basculant. Les quantités d'eau qui montent sur le dispositif et qui n'arrivent à franchir le seuil refluent périodiquement.

Malgré la complexité évidente du système présenté, ce n'est encore qu'une image simplifiée de la réalité où d'autres facteurs interviennent (vent, irrégularités du fond, etc.). Le dispositif même affecte le champs des vagues incidentes et perturbe considérablement les caractéristiques de la houle dans la région proche.

## 5.2. L'énergie de la houle

Pour estimer le potentiel énergétique de la houle dans une région il faut déterminer la distribution statistique en amplitude et période de la houle pour toutes les directions.

Pour une houle harmonique régulière (v. fig. 5), le potentiel des vitesses peut avoir la forme suivante :

$$\varphi = \frac{ga}{\sigma} \frac{\cosh K(y+h)}{\cosh Kh} \sin(Kx - \sigma t) \quad (3)$$

et l'équation de la surface libre :

$$y_s = a \cos(Kx - \sigma t) \quad (4)$$

$$\text{on a : } \lambda = \frac{2\pi}{K}, \quad T = \frac{2\pi}{\sigma}, \quad H = 2a$$

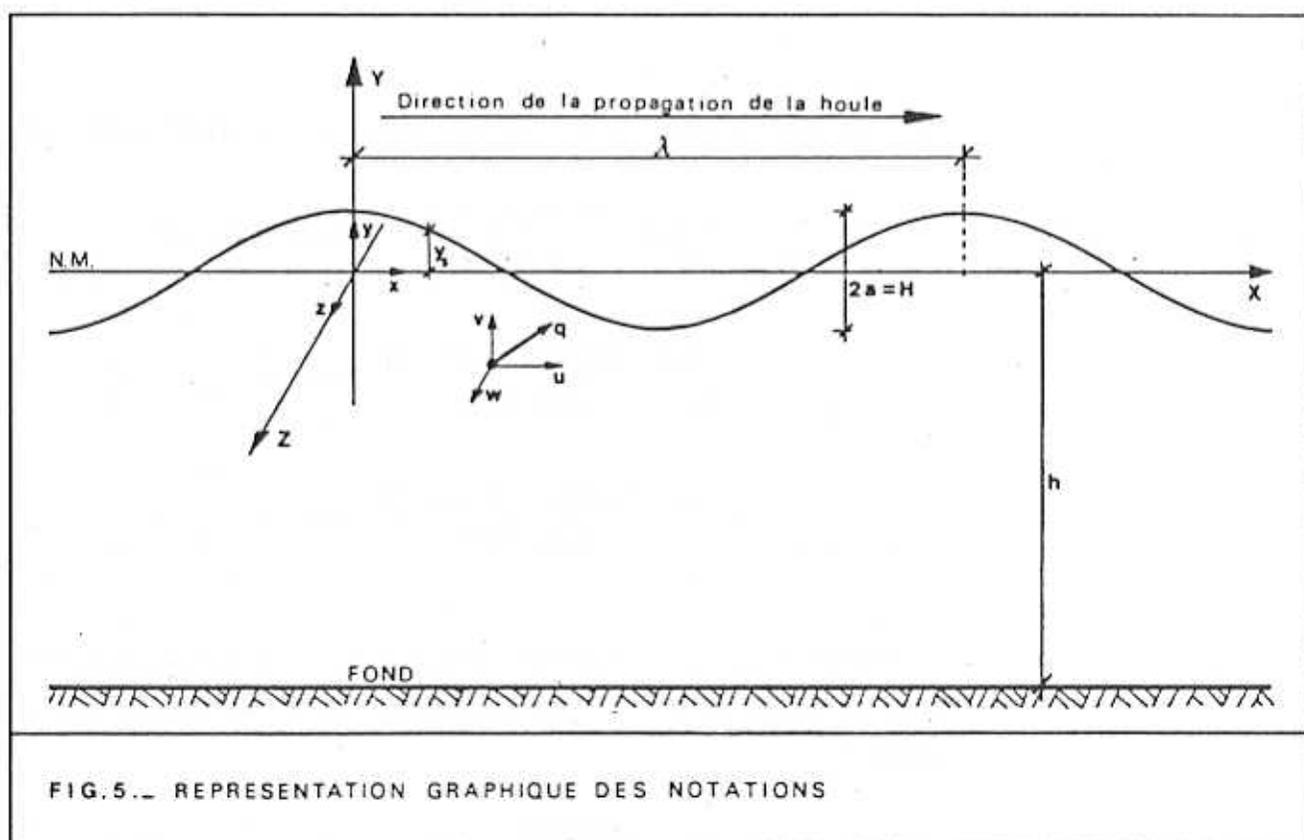
et pour la célérité de la houle

$$c = \frac{\sigma}{K} = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda} = \left( \frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

On obtient :

$$\varphi = \frac{1}{2} Hc \frac{\cosh 2\pi(y+h)/\lambda}{\sinh 2\pi h/\lambda} \sin 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \quad (6)$$

$$\text{et } y_s = \frac{H}{2} \cos 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \quad (7)$$



La composante horizontale de la vitesse d'une particule d'eau est :

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{gaK}{\sigma} \frac{\cosh K(y+h)}{\cosh Kh} \cos(Kx - \sigma t) =$$

$$= \frac{gHT}{2\lambda} \frac{\cosh 2\pi(y+h)/\lambda}{\cosh 2\pi h/\lambda} \cos 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \quad (8)$$

et de (5)  $u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh 2\pi(y+h)/\lambda}{\sinh 2\pi} \cos 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \quad (9)$

La composante verticale de la vitesse de la particule est :

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{gaK}{\sigma} \frac{\sinh K(y+h)}{\cosh Kh} \sin(Kx - \sigma t)$$

$$= \frac{2HT}{2\lambda} \frac{\sinh 2\pi(y+h)/\lambda}{\cosh 2\pi} \sin 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \quad (10)$$

$$= \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh 2\pi(y+h)/\lambda}{\sinh 2\pi} \sin 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \quad (11)$$

La pression sous la surface libre peut être obtenue par l'équation de BERNOULLI, soit en se gardant que les termes du premier ordre :

$$p + \rho g y = \rho g a \frac{\cosh K(y+h)}{\cosh Kh} \cos(Kx - \sigma t) \quad (12)$$

L'énergie cinétique d'une particule du fluide est :

$$\epsilon_c = \frac{\gamma_e}{2g} q^2 dx dy dz$$

où  $\gamma_e = \rho g$  ,  $q^2 = u^2 + v^2 + w^2$  ,  $w = 0$

$$\epsilon_c = \frac{\gamma_e}{2g} (u^2 + v^2) dx dy dz$$

L'énergie cinétique par longueur d'onde et unité de largeur de crête est :

$$\begin{aligned}
 E_c &= \iint_{00}^{\lambda-h} \frac{\gamma_g}{2g} (u^2 + v^2) dx dy = & (13) \\
 &= \iint_{00}^{\lambda-h} \frac{\gamma_g}{2g} \left[ \left\{ \frac{gaK}{\sigma} \frac{\cosh K(y+h)}{\cosh Kh} \cos(Kx - \sigma t) \right\}^2 + \right. \\
 &\quad \left. + \left\{ \frac{gaK}{\sigma} \frac{\sinh K(y+h)}{\cosh Kh} \sin(Kx - \sigma t) \right\}^2 \right] dx dy = \\
 &= \frac{\gamma_g a^2 \lambda}{4} = \frac{\rho g H^2 \lambda}{16} & (14)
 \end{aligned}$$

L'énergie potentielle d'une particule d'un fluide, déplacée à une distance  $y$  du niveau moyen est :

$$\rho g y dx dy dz$$

L'énergie potentielle par longueur d'onde et unité de largeur de crête est :

$$\begin{aligned}
 E_p &= \iint_{00}^{\lambda y_s} \rho g y dx dy \\
 \text{où } y_s &= \frac{H}{2} \cos 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right)
 \end{aligned}$$

$$E_p = \frac{1}{2} \int_0^{\lambda} \rho g y_s^2 dx = \frac{\rho g a^2}{2} \int_0^{\lambda} \cos^2(Kx - \sigma t) dx = \frac{\rho g a^2 \lambda}{4} = \frac{\rho g H^2 \lambda}{16} \quad (15)$$

De (14) et (15) on trouve l'énergie totale de la houle par longueur d'onde et unité de largeur de crête :

$$E = E_c + E_p = \frac{\rho g H^2 \lambda}{8} \quad (16)$$

La puissance de la houle est le produit de la force exercée sur un plan vertical dans le fluide et de la vitesse d'écoulement perpendiculairement à ce plan : (pression) x (aire du plan) x (vitesse normale). La première approximation de la puissance moyenne par unité de largeur de crête est :

$$P_i = \frac{1}{T} \iint_{00}^{T-h} (\rho + \rho g y) u \, dt \, dy \quad (17)$$

où  $\rho + \rho g y$  est la pression variable donnée par l'équation (12). De (12), (17) et (8) on obtient :

$$\begin{aligned} P_i &= \frac{1}{T} \iint_{00}^{T-h} \left[ \rho g a \frac{\cosh K(y+h)}{\cosh Kh} \cos(Kx - \sigma t) \right] \\ &\quad \cdot \left[ \frac{g a K}{\sigma} \frac{\cosh K(y+h)}{\cosh Kh} \cos(Kx - \sigma t) \right] dt \, dy = \\ &= \frac{1}{T} \frac{\rho g^2 a^2 K}{\sigma \cosh^2 Kh} \iint_{00}^{T-h} \cosh^2 K(y+h) \cdot \cos^2(Kx - \sigma t) dt \, dy = \\ &= \frac{1}{2} \rho g a^2 c \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2 K h}{\sinh 2 K h} \right] = \\ &= \frac{\rho g H^2 \lambda}{8 T} \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2 K h}{\sinh 2 K h} \right] \quad (18) \end{aligned}$$

$$\frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2 K h}{\sinh 2 K h} \right] = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4 \pi h / \lambda}{\sinh 4 \pi h / \lambda} \right] = \frac{c_g}{c} = n_g \quad (19)$$

La validité de l'équation (18) a été prouvée expérimentalement par SNYDER, WIEGEL, et BERMEL, 1958, (v. bibl. 82).

De (16), (18), (19) résulte que :

$$P_i = \frac{n_g E}{T} \quad (20)$$

$$n_g = \frac{1}{2} \quad \text{pour l'eau profonde,} \quad \frac{h}{\lambda} > 0,50$$

$$n_g = 1 \quad \text{pour l'eau peu profonde.}$$

Par conséquent, le flux d'énergie d'une houle monochromatique régulière progressive en grande profondeur est :

$$\begin{aligned} P_o &= \frac{E_o}{2T} = \frac{\rho g H_o^2 \lambda_o}{16T} = \frac{\rho g H_o^2 (gT/2\pi)}{16T} = \\ &= \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} = \frac{\rho g^2 a^2 T}{8\pi} \end{aligned} \quad (21)$$

Cette formule permet de calculer le flux énergétique théorique annuel à travers la surface d'un cylindre vertical de 1 m.

Le contenu énergétique théorique annuel d'une surface géographique peut être évalué quand on connaît la distribution du nombre des houles  $N_{jk}$  en classes de  $H_j$  et  $T_k$ , pour toutes les directions (d'après une formule dérivée de (16), après intégrations sur directions et périodes).

Ainsi, nous pouvons constituer des tableaux saisonniers ou annuels qui pour les différentes directions donnent les pourcentages du temps pendant lesquels la puissance de la houle se trouve dans des fourchettes préétablies (v. § 9.1).

### 5.3. Le déferlement de la houle

D'après J. LARRAS, (v. bibl. 46), le déferlement de la houle n'est pas tant l'aboutissement d'une évolution lente du mécanisme interne de la houle que la phase ultime d'une évolution rapide de ce même mécanisme sur une distance assez courte.

D'après M. BIESEL le déferlement résulte de la combinaison de deux effets :

- a) un raidissement de la face avant de la vague dû à la pente du fond, raidissement d'autant plus important à profondeur égale que la pente est plus forte. Cet effet est encore mal connu.
- b) La diminution de profondeur qui produit pratiquement une augmentation de la cambrure.

Quand la houle se rapproche de la forme limite (prédéferlement), l'un ou l'autre effet serait prépondérant, suivant la valeur de la pente.

D'après STOCKER, toute augmentation progressive de l'amplitude de la houle conduit au déferlement des crêtes, mais il n'y aurait pas de solution exacte au problème pour des amplitudes supérieures à une certaine valeur. Le déferlement d'une vague sur un plan incliné est accéléré par le reflux après le déferlement de la vague précédent (v. bibl. 76).

D'après F. SUQUET, le reflux, beaucoup plus important dans le cas d'une pente forte, produit un double effet sur le phénomène : d'une part, le courant de sens contraire à celui de la propagation de la houle, déplace vers le large le point de déferlement, d'autre part, la quantité d'eau ainsi rejetée engendre des ondes ; ce phénomène est inséparable de la réflexion

partielle (v. bibl. 77). Si la période de la houle est faible, le retour de la masse d'eau n'influence pas beaucoup le déferlement de la houle suivante. Pour les périodes les plus élevées, cette masse a le temps de développer une certaine vitesse de retour, ce qui a une grande influence sur le déferlement (v. bibl. 54).

En mer, de nombreux facteurs conditionnent le phénomène de déferlement : La déformation progressive de la houle sur un fond en pente ascendante aboutit à l'apparition d'une première ligne de rouleaux ; on appelle la profondeur correspondante profondeur de déferlement (v. bibl. 82). D'après F. SUQUET, la notion de profondeur de déferlement est bien insuffisante pour caractériser quantitativement le phénomène. Il introduit la notion de "longueur de déferlement", distance entre le début et la fin du déferlement. La longueur de déferlement dépend : de la pente du fond, de la rugosité du fond, du vent, des courants, de la cambrure de la houle, etc.

R. MICHE en 1900 a démontré théoriquement que la limite maximale de la cambrure de la houle avant le déferlement est :

$$\left(\frac{H}{\lambda}\right)_{\max} = \frac{0.142}{\lambda} \tanh 2\pi h$$

Des essais effectués par P. DANIEL en 1952 ont donné des valeurs de l'ordre de 0,12 pour la constante. La pente du fond a aussi une influence sur l'amplitude  $H_d$  et la profondeur  $h_d$  de déferlement. Les formules proposées ont en général la forme suivante :

$$\frac{H_b}{H_0} = \xi \gamma^\delta + \mu \quad (\text{v. bibl. 57})$$

D'après Le Méhauté et Koh :

$$\frac{H_b}{H_0} = 0.76 (\text{tg } \alpha)^{\frac{1}{7}} \cdot (\gamma_0)^{-\frac{1}{4}} \quad (22)$$

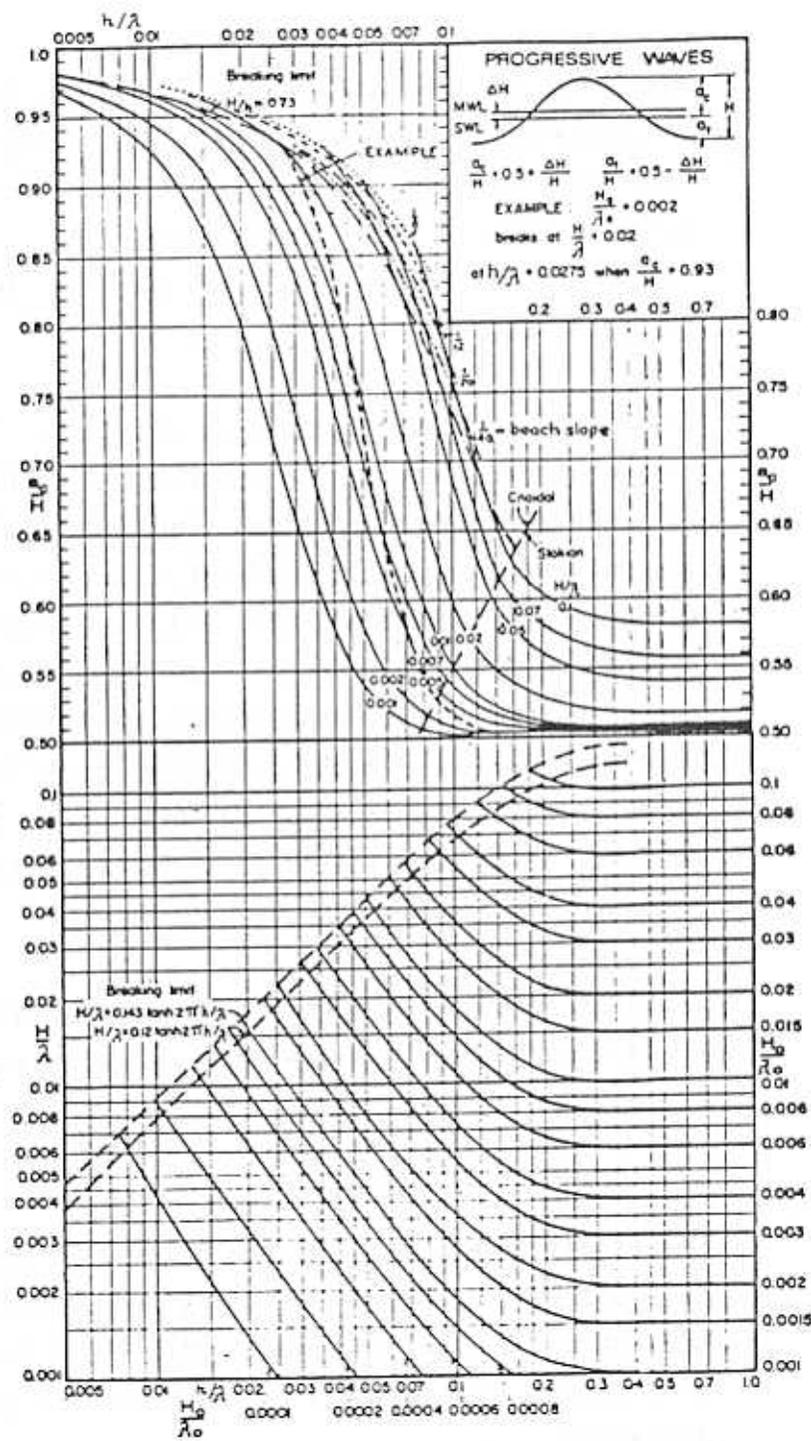


FIGURE 6

CAMBRURE ET ASYMETRIE VERTICALE DES HOULES PROGRESSIVES  
 (d'après SILVESTER)

$$\text{D'après MUNK : } \frac{H_d}{H_o} = 0.3 \gamma_o^{-\frac{1}{3}} \quad (23)$$

D'après WEGGEL :

$$\frac{H_d}{H_o} = D_1 \left[ 1 + \text{tg}\alpha - \frac{D_1(1 + \text{tg}\alpha) - D_2(1.715 - 0.185 e^{-28 \text{tg}\alpha})}{D_1 - D_2} \right] \gamma^{-\frac{1}{3}} + \frac{D_1(1 + \text{tg}\alpha) - D_2(1.715 - 0.185 e^{-28 \text{tg}\alpha})}{D_1 - D_2} \quad (24)$$

$$\text{où } D_1 = (0.01 + 0.5 \text{tg}\alpha)^{\frac{1}{3}}, \quad D_2 = (0.01 + 0.1 e^{-28 \text{tg}\alpha})^{\frac{1}{3}}$$

Un critère différent est proposé par COLLINS :

$$\frac{H_d}{H_o} = 0.72 + 5.6 \text{tg}\alpha \quad (25)$$

Une analyse de données expérimentales faite par WIEGEL et BEEBE en 1956 a prouvé qu'il y a un facteur indépendant de la pente du fond de la mer et de la cambrure de la houle du large :

$$\frac{a_c}{H_b} = C_t = 0.78 \quad (26)$$

où  $a_c$  est l'amplitude de la crête de la houle déferlante au-dessus du niveau moyen, et  $H_b$  l'amplitude creux-crête de la houle au déferlement.

Nous pouvons distinguer trois types principaux de déferlement, (v. fig. 7) :

- a) le déferlement du type déversant (SPILLING BREAKER) est caractérisé par l'apparition d'écume et de turbulence à la crête des vagues ;
- b) le déferlement plongeant (PLUNGING BREAKER), où la vitesse des particules d'eau sur la crête des vagues est plus grande que celle des autres particules ; apparition d'une poche d'air ; il provoque des pressions importantes sur les structures ; déferlement plus stable et régulier ;

- c) le déferlement gonflant, (SURGING BREAKER), est marqué par l'apparition de bulles d'air à la base des vagues ; destruction de la houle par la base ; l'effet de fond et la viscosité jouent un rôle important dans cette destruction ; les pertes en énergie sont relativement petites ; la houle se transforme en un écoulement qui se propage vers la côte ; ce type de déferlement est favorable pour les dispositifs du type déferlant ; il apparaît quand la cambrure au large est petite et la pente du fond forte.

En général, le déferlement du type déversant est associé aux grandes cambrures de la houle, et les faibles pentes du fond de la mer. Le déferlement plongeant concerne les houles de cambrure intermédiaire et les pentes fortes. Le déferlement gonflant arrive quand la cambrure est petite et la pente du fond forte (v. bibl. 82).

Pour la prédiction du type de déferlement sur un plan incliné, BATTJES propose les relations suivantes :

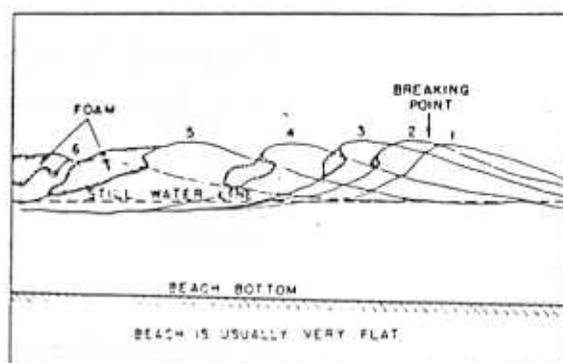
- (27) Si  $\zeta = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{H/\lambda_0}} < 0.5$  le déferlement est du type déversant
- (28) Si  $0.5 < \zeta < 3.3$  le déferlement est plongeant
- (29) Si  $\zeta > 3.3$  le déferlement est gonflant

où  $H$  est l'amplitude des vagues devant le plan incliné

$\lambda_0$  la longueur d'onde de la houle au large (v. bibl. 68)



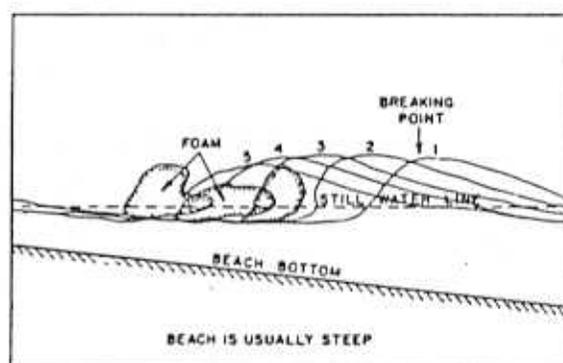
Spilling breaker



General character of spilling breakers



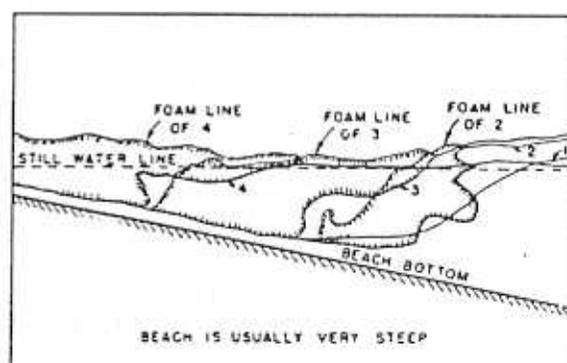
Plunging breaker



General character of plunging breakers



Surging breaker



General character of surging breakers

FIGURE 7

TROIS TYPES DE DEFERLEMENT :

DEVERSANT (SPILLING), PLONGEANT (PLUNGING), GONFLANT (SURGING)

Les schémas indiquent la série des profils de la houle avant, durant et après le déferlement. Les nombres sur les profils correspondent aux temps relatifs (d'après PATRICK et WIEGEL, 1955)

D'après C.J. GALVIN Jr., 1968, les valeurs de transition du déferlement gonflant au déferlement plongeant sont :

$$\frac{H_o}{\lambda_o \text{tg}^2 \alpha} = 0.09 \quad \text{et} \quad \frac{H_d}{g \text{tg} \alpha T^2} = 0.003 \quad (30)$$

et du déferlement plongeant au déferlement déversant :

$$\frac{H_o}{\lambda_o \text{tg}^2 \alpha} = 4.8 \quad \text{et} \quad \frac{H_d}{g \text{tg} \alpha T^2} = 0.068 \quad (31)$$

Dans ces trois types de déferlement, certains auteurs introduisent des variantes (v. bibl. 31).

#### 5.4. La réflexion partielle

La houle arrivant sur un plan incliné subit des distorsions, déferle et se réfléchit partiellement. Dans le cas complexe, aucune théorie ne peut décrire correctement le phénomène. Dans le cas idéal d'une houle monochromatique régulière, nous pouvons supposer pour la houle incidente une équation de la forme :

$$y_{si} = \frac{H_i}{2} \cos 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \quad (32)$$

et pour la houle réfléchie :

$$y_{sr} = \frac{H_r}{2} \cos 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T} \right) \quad (33)$$

où  $H_i$  et  $H_r$  sont les amplitudes creux-crête de la houle incidente et réfléchie. La surface résultante est :

$$y_s = \frac{1}{2} (H_i + H_r) \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \frac{2\pi t}{T} + \frac{1}{2} (H_i - H_r) \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (34)$$

L'amplitude maximale creux-crête  $H_{max} = H_i + H_R$  du clapotis, arrive quand  $x = 0, \lambda/2, \lambda, \dots$  et  $H_{min} = H_i - H_R$  quand  $x = \lambda/4, 3\lambda/4, \dots$

Le coefficient de réflexion est :

$$R_T = \frac{H_R}{H_i} = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max} + H_{min}} \quad (35)$$

(v. bibl. 73, 82 et fig. 8)

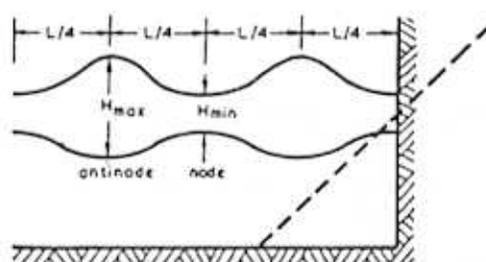


FIGURE 8

SCHEMA D'UN CLAPOTIS PARTIEL (d'après SILVESTER)

Dans la réalité, le coefficient de réflexion  $R_T$  dépend :

- (a) de l'état de la surface du fond ou du plan incliné (rugosité, perméabilité) et de leurs pentes,
- (b) des caractéristiques de la houle incidente au large ( $H_o, \lambda_o, T, \text{direction}$ ).

En général, on pose :  $R_T = R_1 \cdot R_2$

où  $R_1$  dépend de (a) et  $R_2$  de (b) (v. bibl. 56).

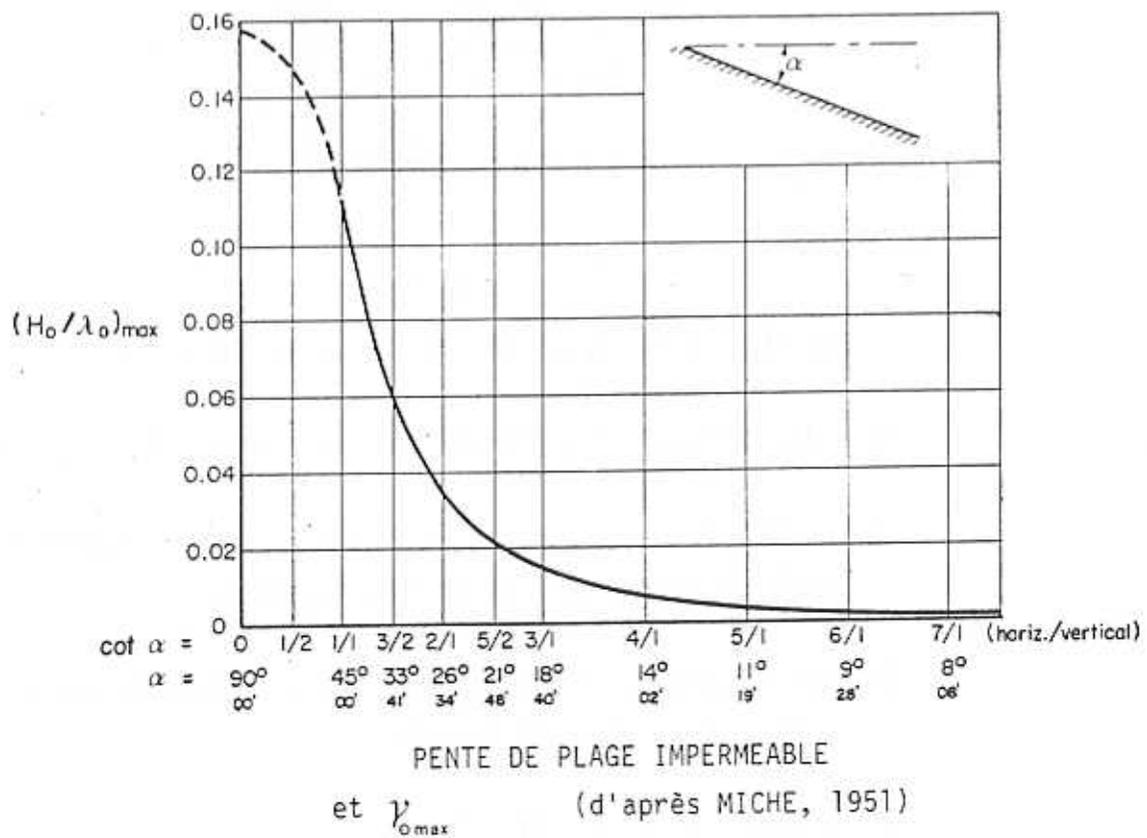
Pour les surfaces lisses et imperméables, MICHE propose  $R_1 \cong 0.8$  et pour les pentes rugueuses et perméables, p.e. enrochements,  $R_1 \cong 0.3$  à  $0.6$

MICHE propose pour la cambrure maximale d'une houle qui est réfléchiée complètement par un plan incliné, la relation suivante :

$$\left(\frac{H_0}{\lambda_0}\right)_{\max} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}} \frac{\sin^2\alpha}{\pi} \quad (36)$$

La fig. 9 nous donne la représentation graphique de (36).

Le fig. 10 nous donne  $R_2$  d'après MICHE. Beaucoup de résultats expérimentaux ont été faits pour la détermination de l'influence de (a) et de (b) sur le  $R_T$  (v. fig. 10, 11, 12, 13)



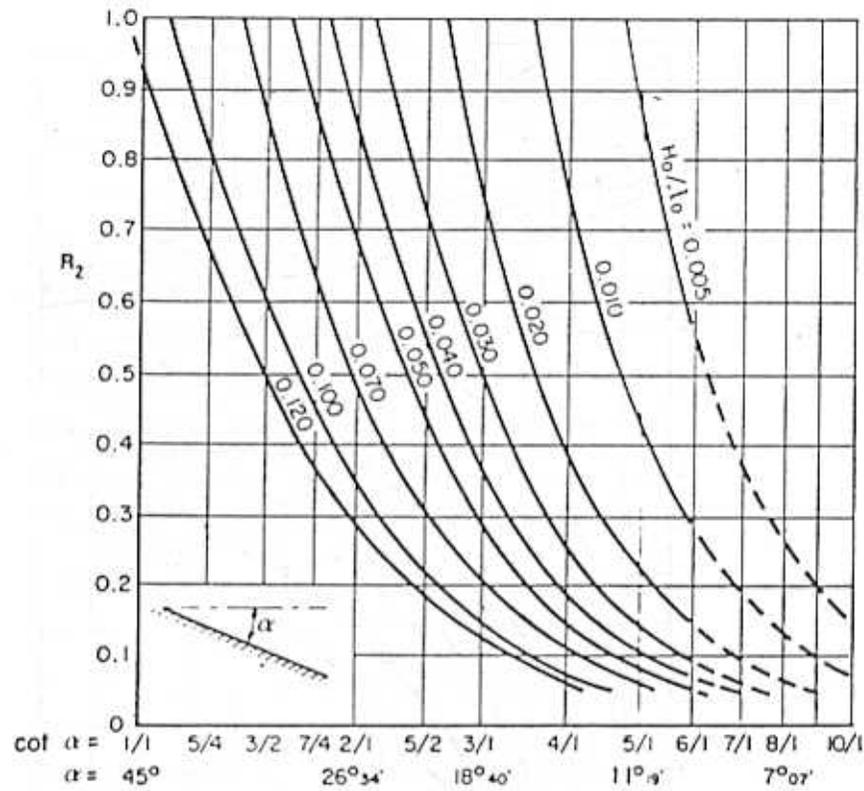


FIGURE 10

COEFFICIENT DE REFLEXION  $R_2$  D'UNE PLAGE IMPERMEABLE  
(d'après MICHE, 1951)

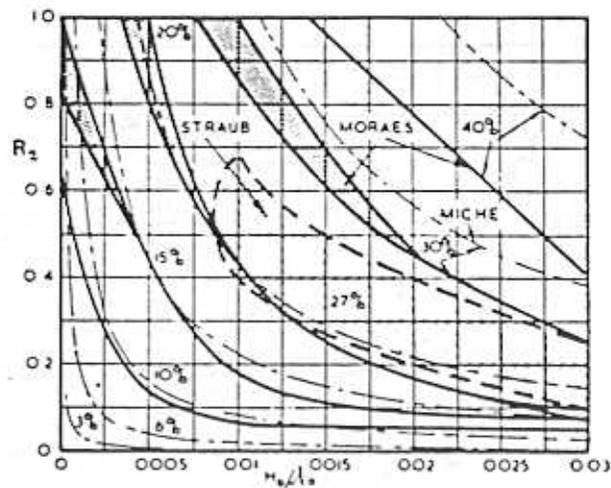


FIGURE 11

VALEURS THEORIQUES ET EXPERIMENTALES DU COEFFICIENT DE REFLEXION  
DE PLANS INCLINES LISSES ET IMPERMEABLES  
(d'après MORAES 1970, et STRAUB 1957)

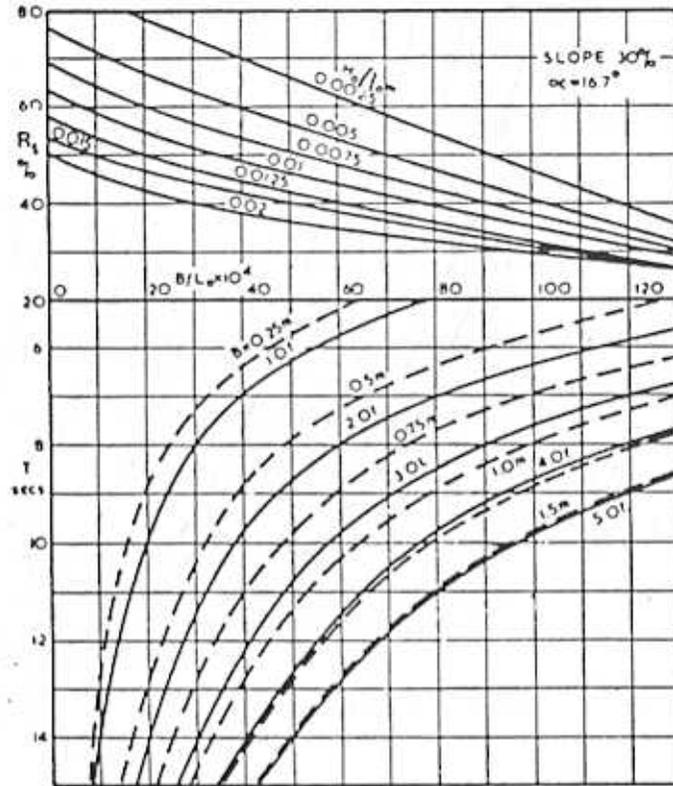


FIGURE 12  
 INFLUENCE DE LA RUGOSITE SUR LE COEFFICIENT DE REFLEXION  
 POUR UNE PENTE DE 30 %  
 (d'après MORAES 1970)

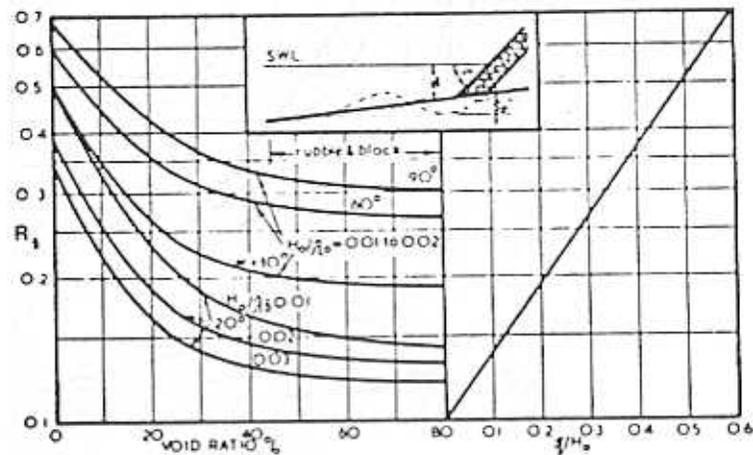


FIGURE 13  
 INFLUENCE DE LA POROSITE SUR LE COEFFICIENT DE REFLEXION,  
 ET SOUBASSEMENTS  $s_1$ , DUS A LA REFLEXION DE LA HOULE  
 (d'après SAWARAGI 1966 et STRAUB 1957)

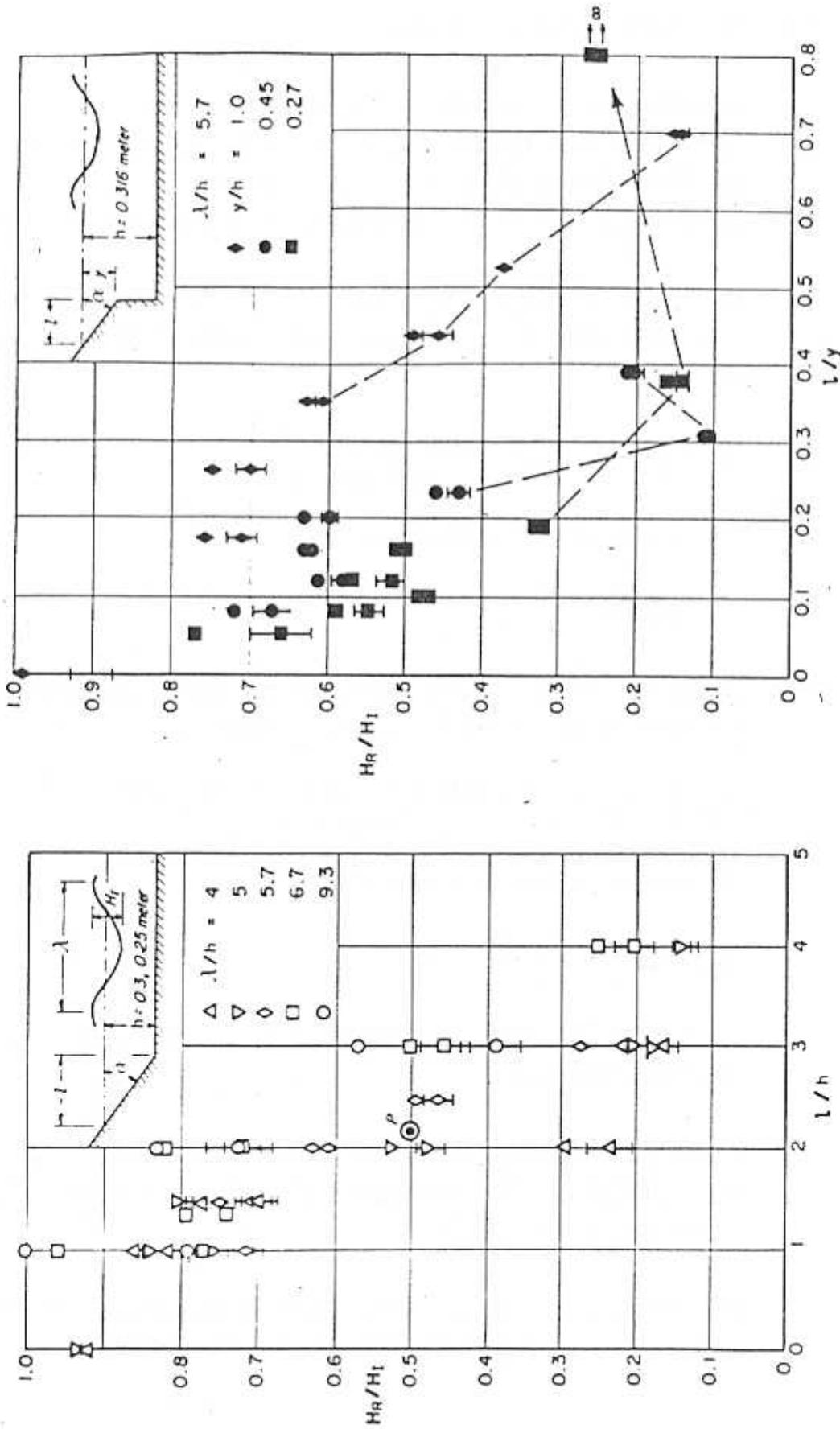


FIGURE 14  
REFLEXION DE LA HOULE SUR DES PLANS INCLINES IMPERMEABLES

(d'après IRIBARREN et NOGALES y OLANO, 1950 ; données expérimentales de SCHOEMAKER et THIJSSSE, 1949)

### 5.5. Les courants dus à la houle

Au voisinage du littoral se forment des courants provoqués par la houle : dans les zones I, II 1, II 2, (v. fig. 2), se produit une élévation du niveau moyen de la surface de la mer et par conséquent un seuil de pression, d'où la création des courants.

La théorie de Stokes (2e ordre), prévoit la création d'un courant dû à la houle, dont la vitesse, (vitesse de transport de masse) est :

$$\bar{U} = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi H}{T} \right) \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh 4\pi(y_0 + h)/\lambda}{\sinh 2\pi h/\lambda} \quad (37)$$

pour les grandes profondeurs on a :

$$\bar{U}_0 = \left( \frac{\pi H}{T} \right) \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) e^{4\pi y/\lambda} \quad (38)$$

URSELL en 1953 en a proposé une démonstration mathématique. Il arrive à la même équation que MICHE (1944) :

$$U_n = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi H}{T} \right) \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh 4\pi(y+h)/\lambda - (\lambda/4\pi h) \sinh 2\pi h/\lambda}{\sinh^2 2\pi h/\lambda} \quad (39)$$

et pour l'eau très profonde :

$$U_{no} = \left( \frac{\pi H}{T} \right) \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \left( e^{4\pi y/\lambda} - \frac{\lambda}{\pi} \right) \quad (40)$$

Des essais en laboratoire (MASON 1941) ont confirmé la validité de l'équation (40).

Des essais effectués en eau peu profonde (CALIGNY, 1878 ; MASON, 1941 ; BAGNOLD, 1947) ont montré que l'équation (37) de STOKES n'est pas satisfaisante.

Pour la zone I, avant le déferlement, l'équation de la vitesse moyenne du courant est donnée par LONGUET-HIGGINS :

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 = & \frac{1}{4} \left( \frac{\pi H}{T} \right) \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{1}{\sinh^2 2\pi h/\lambda} \left\{ 2 \cosh \left[ \frac{4\pi h}{\lambda} \left( -\frac{y}{h} - 1 \right) \right] + \right. \\ & + 3 + \frac{2\pi h}{\lambda} \left( \frac{3y^2}{h^2} + \frac{4y}{h} + 1 \right) \sinh \frac{4\pi h}{\lambda} + \\ & \left. + 3 \left( \frac{\sinh 4\pi h/\lambda}{4\pi h/\lambda} + \frac{3}{2} \right) \left( \frac{y^2}{h^2} - 1 \right) \right\} \end{aligned} \quad (41)$$

Cette équation donne des résultats satisfaisants pour la zone I.

Pour la zone II 1 de déferlement, la vitesse moyenne du courant est calculée à partir de la théorie de propagation de la houle sur un fond peu profond (v. bibl. 56)

$$\bar{U}_{11} = \left[ g(h_d + a_c) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (42)$$

où  $(h_d + a_c)$  est la plus grande dénivellation de la crête de la houle déferlant par rapport au fond sous la première ligne des rouleaux (v. fig. 2).

Dans la zone II 2, après le déferlement, la vitesse moyenne des courants est donnée par LONGUET-HIGGINS et STWART :

$$\begin{aligned} \bar{U}_{12} = & \frac{\pi}{2c_f} u_{\max} \left\{ \frac{5}{16} K^2 \left( \frac{h}{h_d} \right)^{\frac{1}{2}} \sin \beta_b \cos \beta_b \operatorname{tg} \beta + \right. \\ & \left. + \left( 1 + \frac{\eta}{h} \right) \frac{\partial \eta}{\partial z} + \frac{1}{4} K \frac{\partial H}{\partial z} \left( \frac{3}{2} - \cos^2 \beta \right) \right\} \end{aligned} \quad (43)$$

où  $y = \eta(x, z, t)$ ,  $\beta$  l'angle du fond de la mer,  $u_{\max}$  la vitesse max. horizontale des particules d'eau,  $c_f$  un coefficient dépendant de la rugosité du fond,  $\beta_b$  l'angle entre la ligne de la crête de la houle au déferlement et la ligne de la côte.

Une formule simplifiée de (43) peut être donnée :

$$\bar{U}_{12} = 20.7 (g H_d)^{0.5} \operatorname{tg} \beta \sin \beta_b \quad (44)$$

Ces courants constituent une des causes de perte d'énergie de la houle incidente et ils favorisent l'érosion du fond marin (transport des sédiments mis en suspension par l'action des vagues déferlantes).

Les lignes des crêtes des vagues arrivant à la côte, présentent en général un léger angle avec la ligne du littoral (réfraction). De ce fait, il résulte un transport des masses d'eau (courants tout au long de la côte. INMAN et QUINN, en 1952, après avoir analysé des données expérimentales et des mesures in situ, ont proposé la formule suivante pour les courants parallèles à la côte (supposée rectiligne) :

$$V = \left[ \left( \frac{1}{4x^2} + y \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{0.5}{x} \right]^2 \quad (45)$$

où  $V$  = vitesse du courant de littoral (feet/sec)

$$x = (108.3 H_d i \cos \beta_b) / T$$

$$y = C_b \sin \beta_b$$

$$C_b = \sqrt{2.28 g H_d} = \text{vitesse de la houle (feet/sec)}$$

$\beta_b$  = l'angle entre la ligne de la crête de la houle du déferlement et la ligne de la côte

$$i = \text{tg} \beta \quad , \quad \text{où} \quad \beta = \text{l'angle de la pente du fond}$$

#### 5.6. La réfraction de la houle - Focalisation

La forme du fond de la mer près du littoral a une grande influence sur le régime des vagues incidentes :

- a) Les orthogonales de la houle qui se propage sur des profondeurs décroissantes ont la tendance à se redresser perpendiculairement aux isobathes, (réfraction),
- b) Sous certaines conditions, ces orthogonales convergent sur une partie réduite du littoral (focalisation de l'énergie de la houle par réfraction).

La vitesse de la houle approchant du littoral commence à diminuer à partir d'une profondeur voisine à  $\lambda/2$  :

$$c = \frac{gT}{2\pi} \operatorname{tgh} 2\pi h / \lambda$$

tandis que pour les grandes profondeurs est :  $c_0 = \frac{gT}{2\pi}$   
on a alors :

$$\frac{c}{c_0} = \operatorname{tgh} 2\pi h / \lambda = \frac{\lambda}{\lambda_0} \quad (46)$$

Pour la zone I, avant le déferlement, nous pouvons faire les hypothèses suivantes :

- a) La période d'une houle monochromatique régulière reste constante :

$$T^2 = \frac{2\pi\lambda_1}{g} \operatorname{ctgh}\left(\frac{2\pi h_1}{\lambda_1}\right) = \frac{2\pi\lambda_2}{g} \operatorname{ctgh}\left(\frac{2\pi h_2}{\lambda_2}\right) = Ct \quad (47)$$

- b) Conservation de l'énergie transmise, le long des orthogonales)

$$E_1 = \rho \frac{g H_1^2 \lambda_1}{16} \left(1 + \frac{4\pi h_1}{\lambda_1}\right) = \rho \frac{g H_2^2 \lambda_2}{16} \left(1 + \frac{4\pi h_2}{\lambda_2}\right) = Ct \quad (48)$$

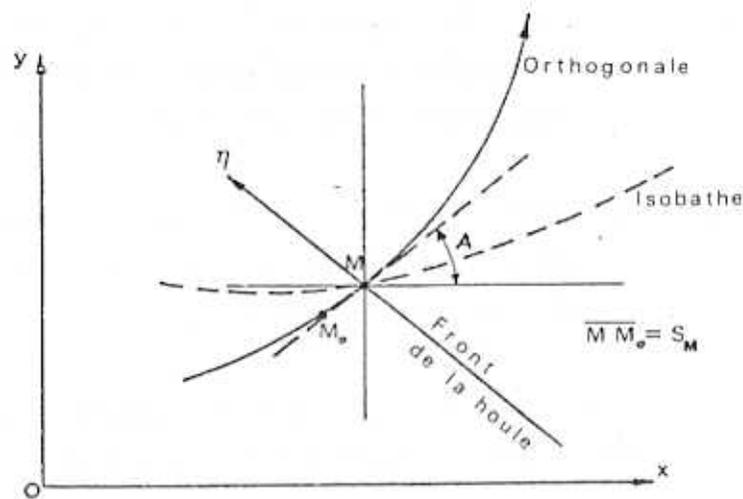


FIGURE 15

REFRACTION DE LA HOULE. EXPLICATION GRAPHIQUE DES NOTATIONS  
(v. bibl. 67)

$$M(x,y), \quad x = x(S_M), \quad y = y(S_M), \quad A = A(S_M)$$

On considère un déplacement de  $S_M$  du front de la houle se propageant sur un fond variable, (v. fig. 15). On a :

$$\frac{dx}{dS_M} = \cos A, \quad \frac{dy}{dS} = \sin A, \quad \frac{dA}{dS} = \frac{1}{c} \frac{dc}{d\eta} \quad (49)$$

où  $c = c(x,y)$  champ de vitesses supposé connu

$$\frac{d}{dS} = \cos A \frac{\partial}{\partial x} + \sin A \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{d}{d\eta} = \sin A \frac{\partial}{\partial x} + \cos A \frac{\partial}{\partial y} \quad (50)$$

de (49), (50), on a :

$$\frac{dA}{dS} = \frac{1}{c} \left( \sin A \frac{\partial c}{\partial x} - \cos A \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (51)$$

Cette équation différentielle des orthogonales est l'expression mathématique du principe suivant : la courbure de l'orthogonale est en chaque point égale au gradient logarithmique de célérité

le long de la crête ; l'orthogonale s'infléchit en direction des zones de plus faible célérité (v. bibl. 48).

Pour intégrer l'équation (51) entre deux isobathes  $y=y_1$  et  $y=y_2$  où les vitesses de propagation de la houle sont  $c_1$  et  $c_2$  nous faisons les hypothèses suivantes :

1. Les isobathes sont des parties de droites parallèles pour un domaine limité.
2. La vitesse  $c$ , change linéairement entre  $y_1$  et  $y_2$  (v. fig. 16).

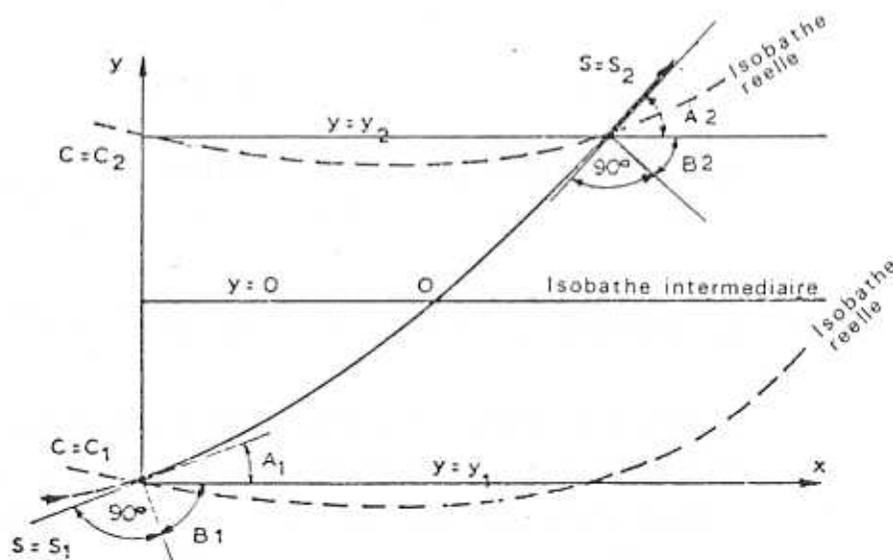


FIGURE 16

REFRACTION DE LA HOULE - SCHEMA EXPLICATIF (v. bibl. 67)

Nous pouvons développer la vitesse  $c$  en série de Taylor :

$$c = c_0 + \frac{\partial c}{\partial y_0} (y - y_0) + \dots \quad (52)$$

Si on néglige les termes d'ordre supérieur, nous avons :

$$\frac{\partial c}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{dc}{dy} = C_t = \frac{\Delta c}{\Delta y} \quad (53)$$

$$\frac{dA}{dS_M} = -\frac{\cos A dc}{c dy} = -\frac{\cos A}{c} \frac{\Delta c}{\Delta y} \quad (54)$$

Si la houle progresse de petites profondeurs vers les plus grandes, on a  $\Delta c > 0$  ; au cas inverse, on a  $\Delta c < 0$  (v. bibl. 67).

De (49) et de (54) on a :

$$\frac{\cos A}{c} = C_t = \frac{\cos A_1}{c_1} = \frac{\cos A_2}{c_2} \quad (55)$$

En mettant  $\sin B_2$  on obtient :

$$\frac{\sin B_2}{c_2} = \frac{\sin B_1}{c_1} \quad \frac{dB}{dS_M} = \frac{\sin B_1}{c_1} \frac{\Delta c}{\Delta y} = C_t = \frac{\Delta B}{\Delta S_M} \quad (56)$$

La relation (56) constitue la loi de DESCARTES, (ou SNELL'S LAW).

A partir de cette loi, on procède à la création des diagrammes de réfraction. Dans ce but, J.P. LEPETIT (1964) a développé un calcul numérique (v. bibl. 48). Ici, nous présentons brièvement une méthode graphique qui sera utilisée au § 11.4. Cette méthode, facile à appliquer, donne des résultats satisfaisants pour une étude préliminaire :

- a) On part de la carte bathymétrique du littoral examiné,
- b) On trace les isobathes du fond,
- c) On choisit les caractéristiques de la houle testée : période et direction. Pour divers rapports  $h_i/\lambda_o$ , à l'aide du diagramme de la figure 17, on calcule les rapports  $c_i/c_o$  et les  $c_i/c_{i+1}$

- d) On trace les isobathes intermédiaires  
 e) On utilise le nomographe de l'annexe L  
 (on distingue deux cas  $B < 80^\circ$  et  $B > 80^\circ$  )

Cette méthode (v. bibl. 67), nous permet de tracer graduellement l'évolution des orthogonales sur la carte. Il faut signaler que la méthode présentée est applicable à des profondeurs supérieures à la profondeur de déferlement  $h_d$ , qui peut être estimé à l'aide du diagramme de la fig. 18.

En général, un diagramme de réfraction se présente comme celui de la fig. 19. Nous pouvons y localiser des régions limitées, où les orthogonales de la houle convergent, (p.e. région 1, fig. 19) et où par conséquent, on aura une forte concentration d'énergie incidente, (promontoires) ; d'autres régions où les orthogonales divergent en dispersant l'énergie incidente (plages concaves).

Il est évident qu'il y a un aspect énergétique de la réfraction, très intéressant pour les systèmes de récupération de l'énergie de la houle installés au voisinage des côtes. D'après J.P. LEPETIT, la variation d'amplitude de la houle le long d'une orthogonale est définie par le coefficient de réfraction égal au rapport de l'amplitude creux-crête  $H$  en un point quelconque de l'orthogonale à la profondeur  $h$  à l'amplitude  $H_0$  au large sur la même orthogonale. Considérons deux orthogonales voisines espacées de  $L_0$  au point A situé au large et de  $L$  au point B situé à la profondeur  $h$  (v. fig. 20). Le flux d'énergie entre les orthogonales au point A d'après les formules 20, 21 et la fig. 20, est :

$$P = \frac{\gamma_e}{8T} \frac{H_0^2}{\lambda_0} L_0 \frac{c_{g0}}{c_0} = \frac{\gamma_e}{8} \frac{H_0^2}{\lambda_0} L_0 c_{g0}$$

$$\text{au point B on a : } P = \frac{\gamma_e}{8T} \frac{H^2}{\lambda} L \frac{c_g}{c} = \frac{\gamma_e}{8} \frac{H^2}{\lambda} L c_g$$

en égalant ces deux quantités on trouve :

$$K_r = \frac{H}{H_0} = \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{c_{g0}}{c_g} \right)^{1/2} \quad (57)$$

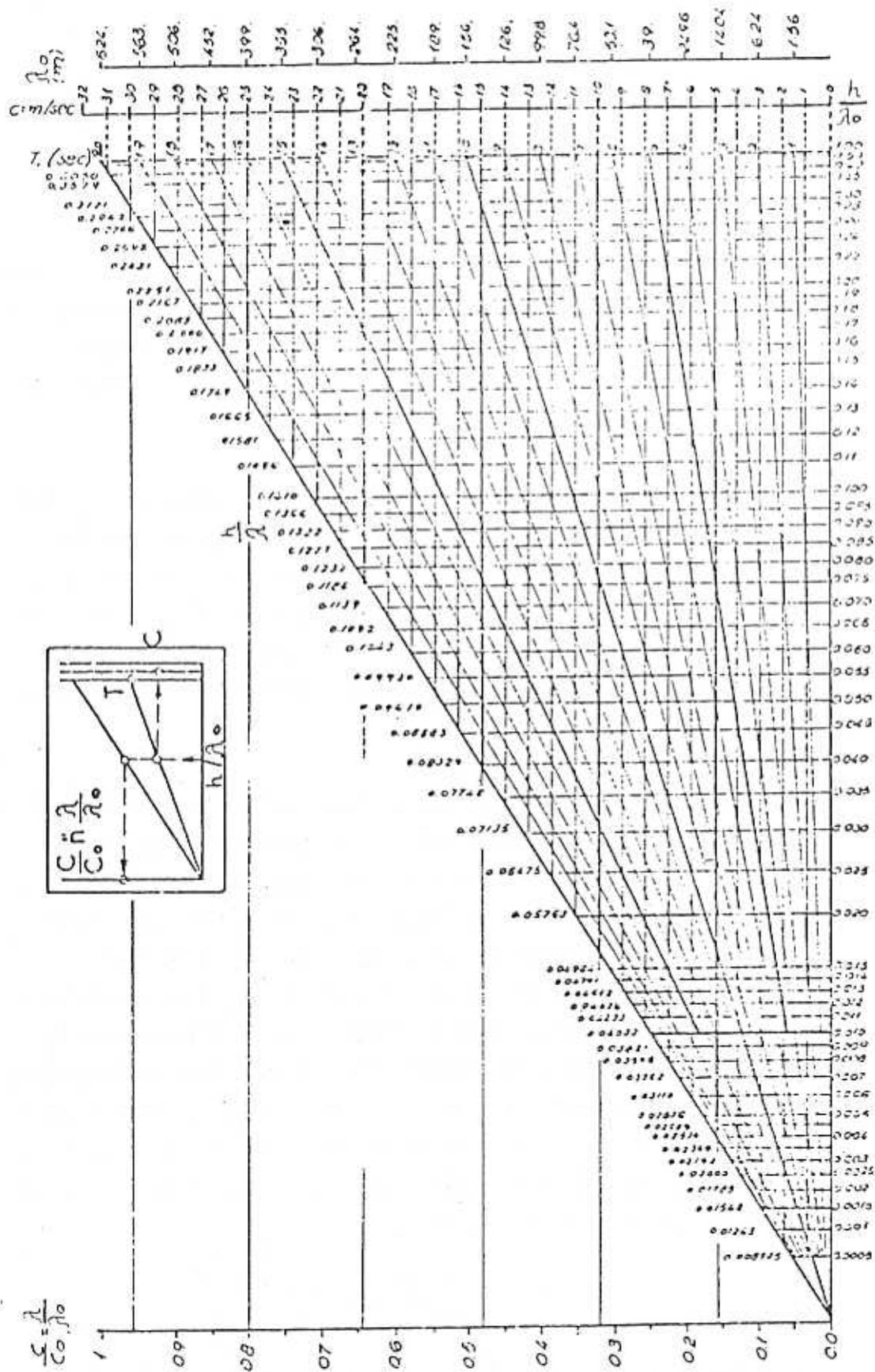


FIGURE 17

TRANSFORMATION DE  $c$  ET  $\lambda$  PENDANT LA PROPAGATION DE LA HOULE VERS DES PROFONDEURS DECREISSANTES  
 (APPLICATION A PARTIR DES DIAGRAMMES DE J.W. JOHNSON, M.P. O'BRIEN, J.D. ISAACS, 1948) (v. bibl. 67)

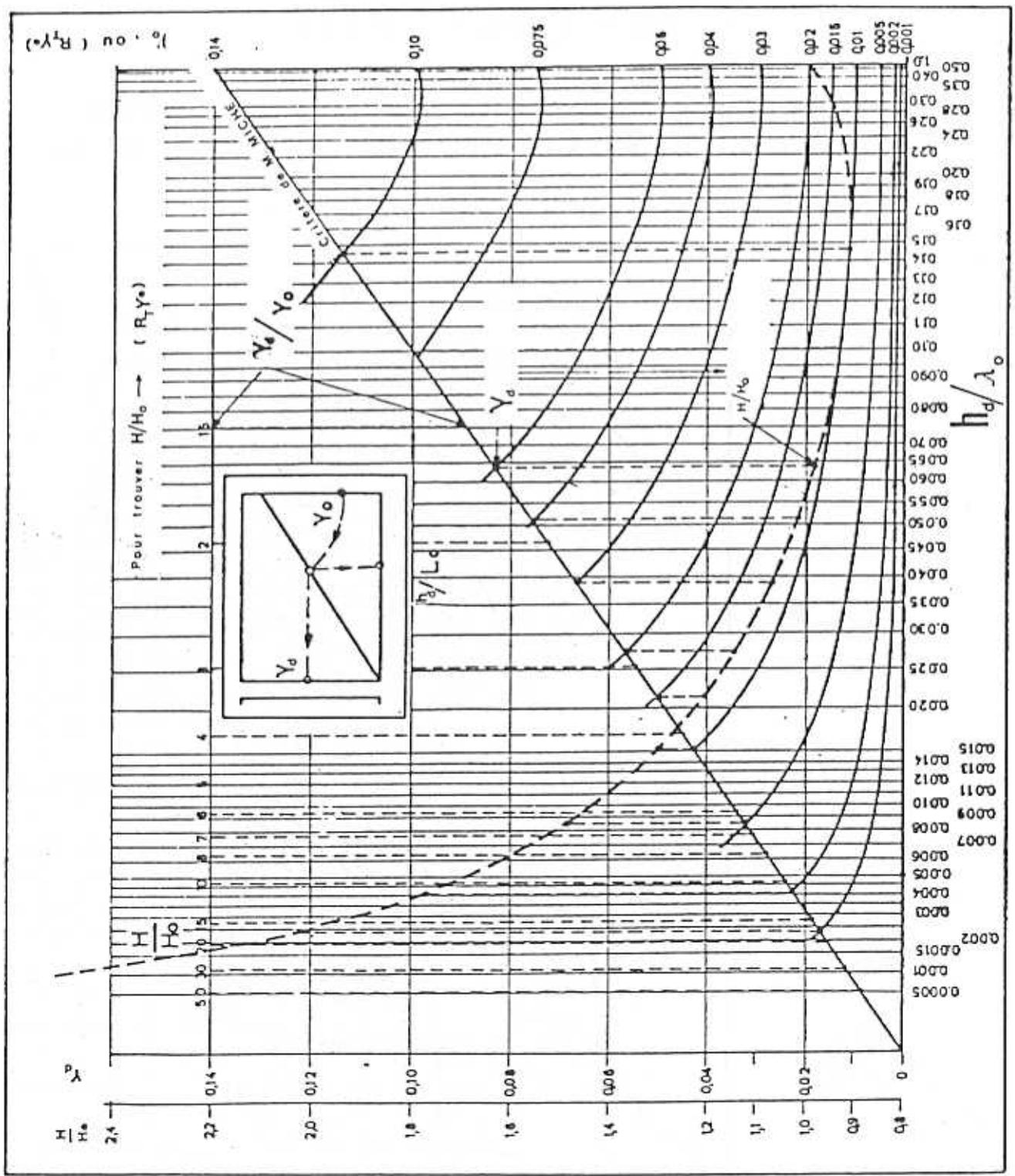


FIGURE 18.  $h_a/\lambda_0$ ,  $Y_0$ ,  $Y_d$  et  $H/H_0$  d'après le critère de M. MICHE (v. bibl. 67)

D'après J.P. LEPETIT, on a :  $K_r = K_{r1} \cdot K_{r2}$  , où

$$K_{r1} = \left(\frac{L_0}{L}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{et}$$

$$K_{r2} = \left(\frac{C_{g0}}{C_g}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{\text{ch}(2\pi h/\lambda)}{[\text{sh}(2\pi h/\lambda)\text{ch}(2\pi h/\lambda) + 2\pi h/\lambda]^{\frac{1}{2}}} \quad (58)$$

Les formules (57) et (58) nous permettent de calculer l'amplitude de la houle dans la région de focalisation, avant le déferlement.

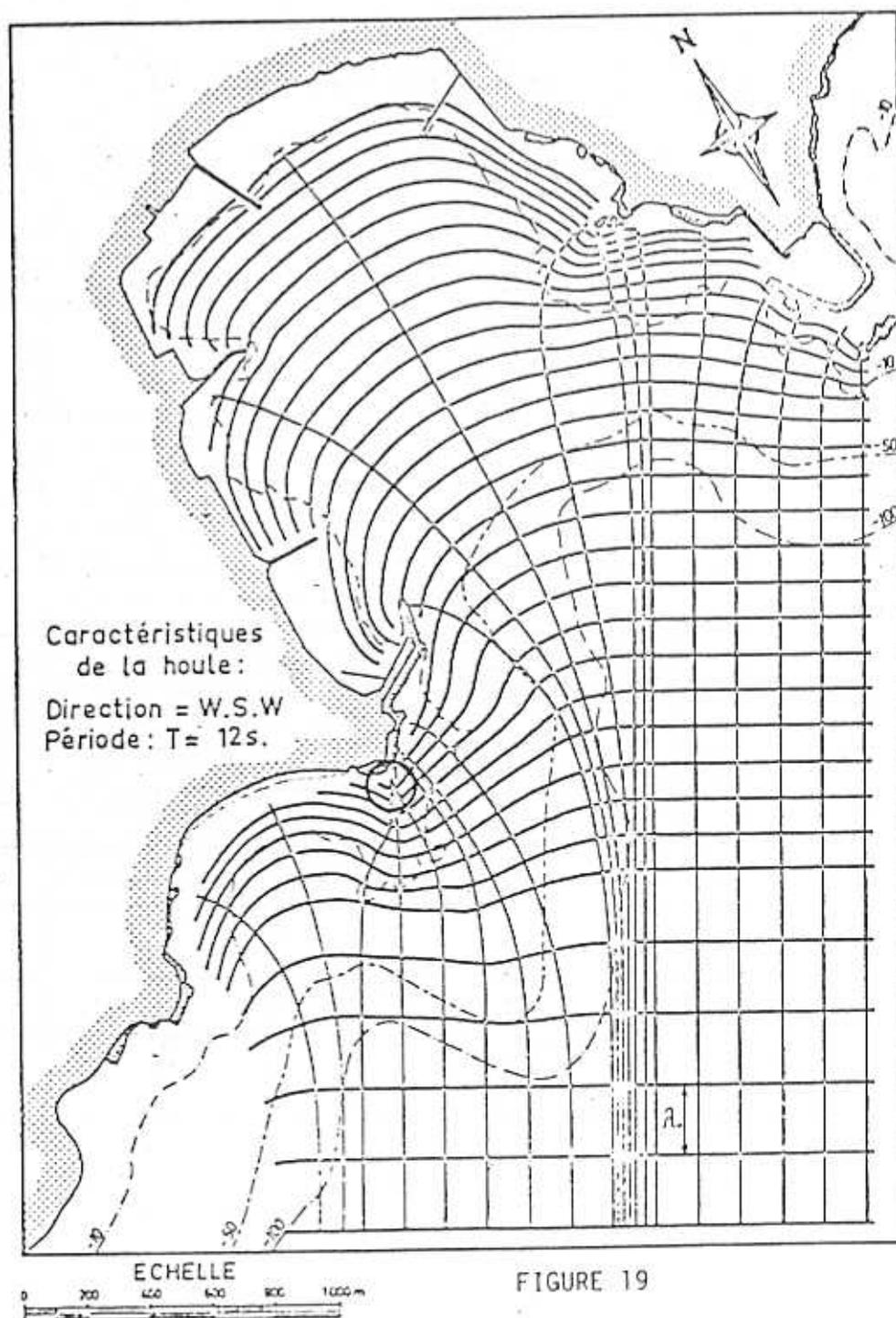


FIGURE 19

REFRACTION DE LA HOULE DANS LE PORT D'AJACCIO  
METHODE GRAPHIQUE (d'après J.P. LEPETIT)

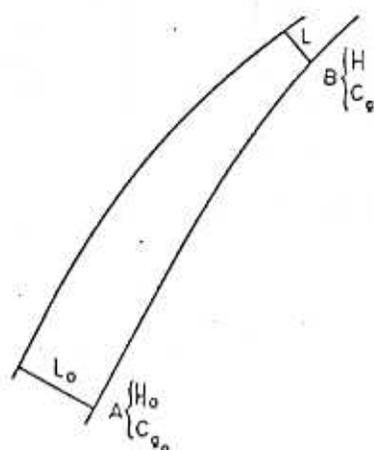


FIGURE 20

### 5.7. L'influence du vent

Des mesures effectuées en mer ont montré que pour la même vitesse de vent, même fetch et conditions atmosphériques identiques, l'amplitude et la période de la houle développée en petites profondeurs diffèrent de la houle générée au large ; la cambrure-limite théorique est inférieure en eau peu profonde, ( $H/\lambda = \frac{1}{7} \operatorname{tgh} 2\pi h/\lambda$ , MICHE, 1944, pertes d'énergie à cause du frottement sur le fond etc.).

Ce phénomène a été examiné en laboratoire dans un canal équipé d'une soufflerie, par SIBUL (1955). BRETSCHNEIDER a analysé dans le même but des mesures effectuées dans le Golfe du Mexique et dans le lac d'Okeechobee (v. bibl. 82).

Le déferlement de la houle est influencé et très souvent provoqué par l'action du vent. Sur les vagues de grandes périodes, des petites vagues se forment, qui se brisent sur la crête des grandes. La vitesse du vent est plus grande sur les crêtes.

Il est possible que les petites houles qui tendent à déferler au niveau des crêtes des grandes houles-porteuses, se propagent avec la vitesse du vent, ce qui signifie une augmentation du contenu énergétique des grandes houles par accélération du mouvement circulaire des particules d'eau sur les crêtes (v. fig. 21).

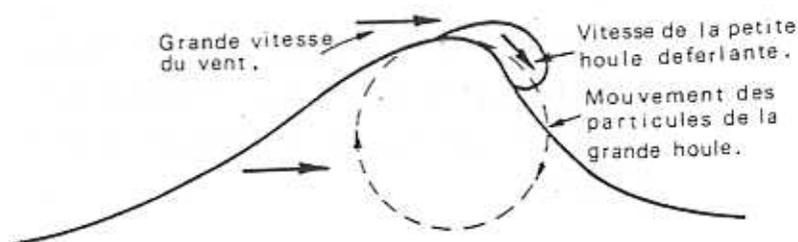
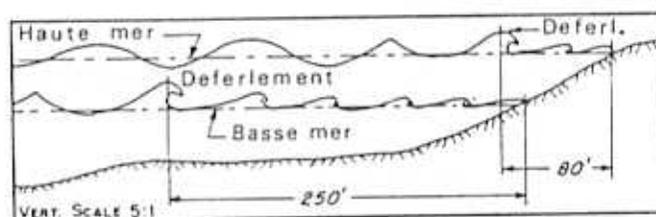


FIGURE 21

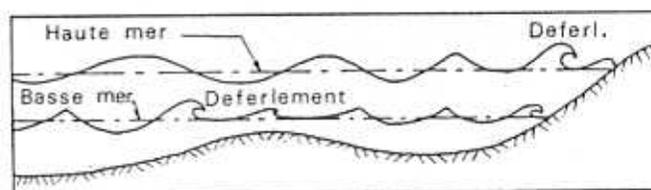
TRANSFERT POSSIBLE D'ENERGIE CINETIQUE DES PETITES HOULES DEFERLANTES  
VERS LES GRANDES HOULES (SILVESTER)

### 5.8. L'influence de la marée

Des changements importants des caractéristiques de la houle près des côtes sont provoqués par la marée. A marée haute la ligne de déferlement se trouve auprès du rivage tandis qu'à marée basse, elle se déplace vers le large. Ce phénomène peut avoir des conséquences importantes sur le régime énergétique de la houle se propageant vers la côte (v. fig. 22).



- (a) A marée haute, la côte a le caractère d'une falaise abrupte avec une zone de déferlement étroite. A marée basse, est comme une plage de fond pratiquement horizontal.



- (b) Présence d'un haut-fond. A marée haute, le déferlement se fait tout près de la côte. A marée basse, on observe deux lignes de déferlement : une sur le haut fond et l'autre sur la côte.

FIGURE 22

EFFET DE LA MAREE SUR LA ZONE DE DEFERLEMENT DE LA HOULE  
(d'après PATRICK et WIEGEL, 1955)

Les courants dus à la marée influencent aussi le déferlement de la houle. En faible profondeur, près de la côte, le courant peut être déphasé par rapport à la marée ce qui provoque parfois la dissipation de grandes quantités d'énergie et le déferlement précoce de la houle (v. bibl. 14).

### 5.9. La hauteur d'ascension

Le phénomène d'ascension des vagues (wave run-up) sur un plan incliné est fortement influencé par l'effet des profondeurs décroissantes.

Quand la profondeur d'eau diminue et que le profil de la houle subit des distorsions importantes, la théorie linéaire n'est plus valable. Dans ce cas, la théorie cnéidale (v. bibl. 82) ou la théorie de la houle solitaire (v. bibl. 73) peuvent être utiles pour l'estimation de l'amplitude. A partir du moment où la houle incidente déferle, nous devons faire appel à des méthodes expérimentales, car dans ce cas, les solutions théoriques nous donnent surtout des informations qualitatives sur le phénomène (v. bibl. 35 et 73).

Le but principal des travaux effectués sur le sujet est la détermination de la hauteur d'ascension des vagues  $R_s$  sur les parois inclinées des structures maritimes non protégées, (v. fig. 23).

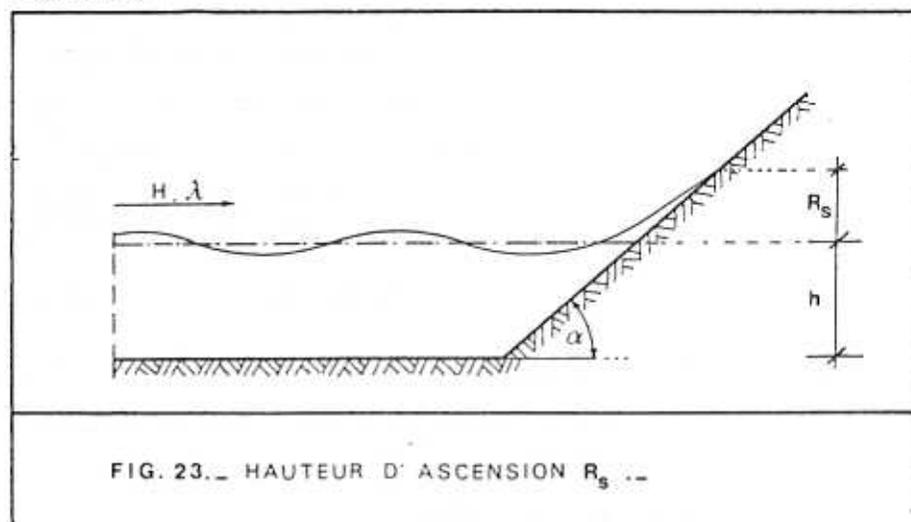


FIG. 23. — HAUTEUR D'ASCENSION  $R_s$  ..

Les principaux paramètres du problème sont :

- la cambrure de la houle incidente  $\gamma = \frac{H}{\lambda}$
- la profondeur relative  $\frac{h}{\lambda}$
- la pente de la paroi inclinée
- la porosité et la rugosité de la paroi

Dès 1953, KENNETH N. GRANTHEM, (Hydraulics Laboratory - University of California) a effectué plusieurs essais pour déterminer les facteurs qui influencent le phénomène d'ascension des vagues sur les structures en plan incliné. Pour examiner ce phénomène il a introduit la hauteur d'ascension relative. Les résultats de ce travail sont présentés dans les fig. 24, 25, 26 (v. bibl. 32).

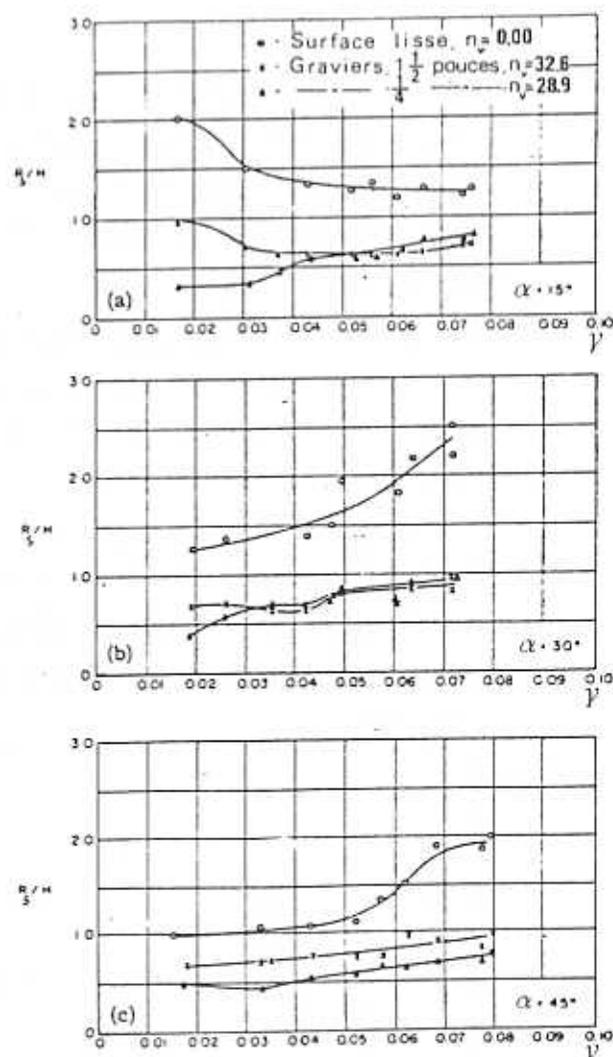


FIG. 24 - HAUTEUR D'ASCENSION RELATIVE  $R_s/H$ , PAR RAPPORT A LA CAMBRURE ET LA POROSITE DE LA STRUCTURE POUR ANGLES DE PENTE  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  AVEC  $h/\lambda = 0.218$   
(d'après K.N. GRANTHEM)

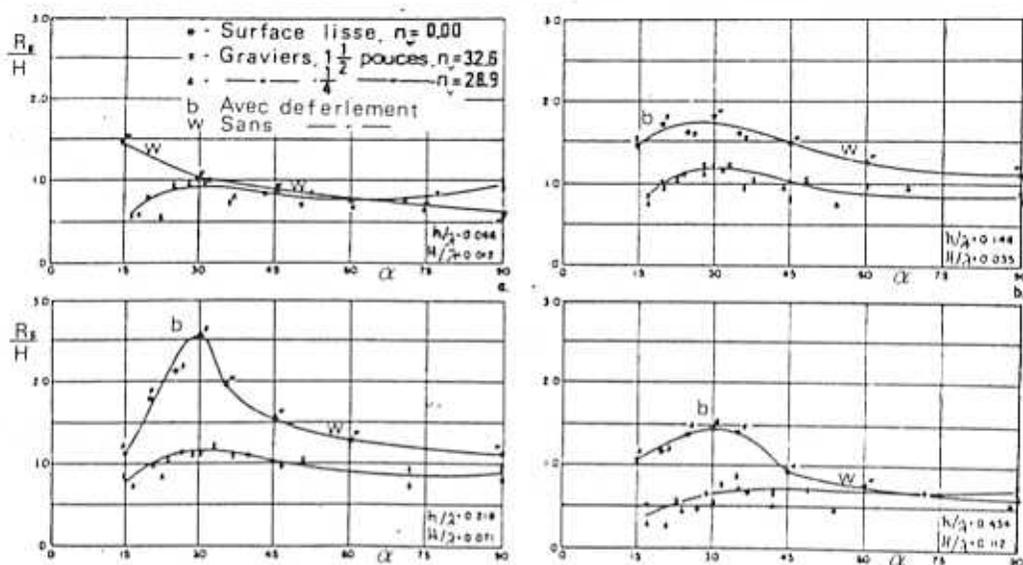


FIGURE 25  
RELATION ENTRE  $R_s/H$  ET L'ANGLE DE LA PENTE,  
POUR QUATRE DIFFERENTS CAS (d'après K.N. GRANTHEM)

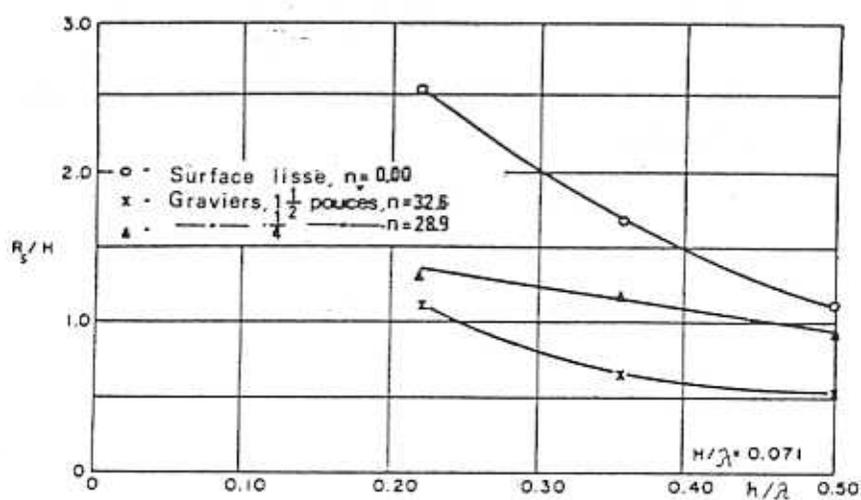


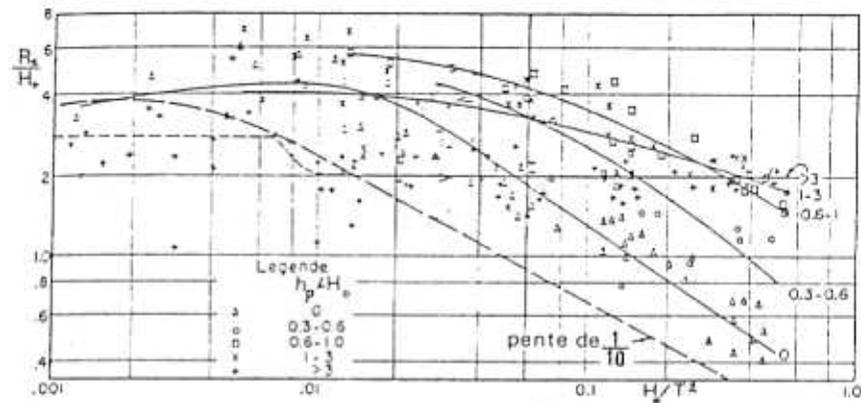
FIGURE 26  
RELATION ENTRE  $R_s/H$  ET PROFONDEUR RELATIVE,  
POUR UNE CAMBRURE CONSTANTE ET UN ANGLE DE PENTE  $30^\circ$   
(d'après K. N. GRANTHEM)

Cette première approche expérimentale du problème a donné des informations très utiles :

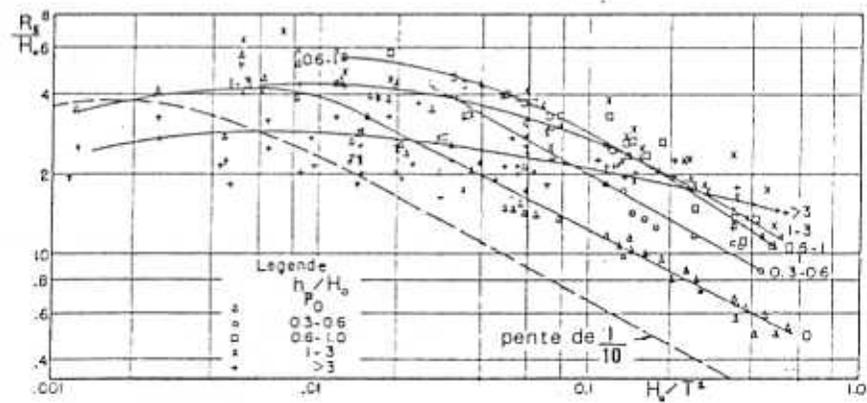
- a) dans plusieurs cas, le non déferlement défavorise la hauteur d'ascension, (grandes pentes, petites cambrures),
- b) autour de l'angle de  $30^\circ$ , pour les mêmes  $\frac{h}{\lambda}$  et  $\frac{H}{\lambda}$  la hauteur d'ascension prend ses valeurs maximales,
- c) la porosité de la structure a une influence défavorable importante sur la hauteur d'ascension,
- d) pour des cambrures  $\gamma > 0.03$ , la hauteur d'ascension augmente. Pour des valeurs de profondeur relative  $\frac{h}{\lambda} < 0.50$  on a une augmentation de la hauteur d'ascension.

De 1952 à 1956, des essais systématiques ont été effectués au Waterways Experiment Station, Mississippi, dirigés par T. Saville, en vue de déterminer la hauteur d'ascension relative  $R_s/H$  par rapport à la cambrure de la houle, la profondeur d'eau, pour divers types de structures, (pentes simples et combinées).

Dans les fig. 27, 28, 29, nous présentons une partie de ces résultats.



- a) Pente de 1/1,50, pente de raccordement 1/10,00 devant la structure



- b) Pente de 1/2,25, pente de raccordement 1/10,00 devant la structure

FIGURE 27  
HAUTEUR D'ASCENSION, PAR RAPPORT A LA PROFONDEUR DU PIED  
DE LA STRUCTURE  $h_p$  ET LA CAMBRURE DE LA HOULE INCIDENTE  
(d'après T. SAVILLE)

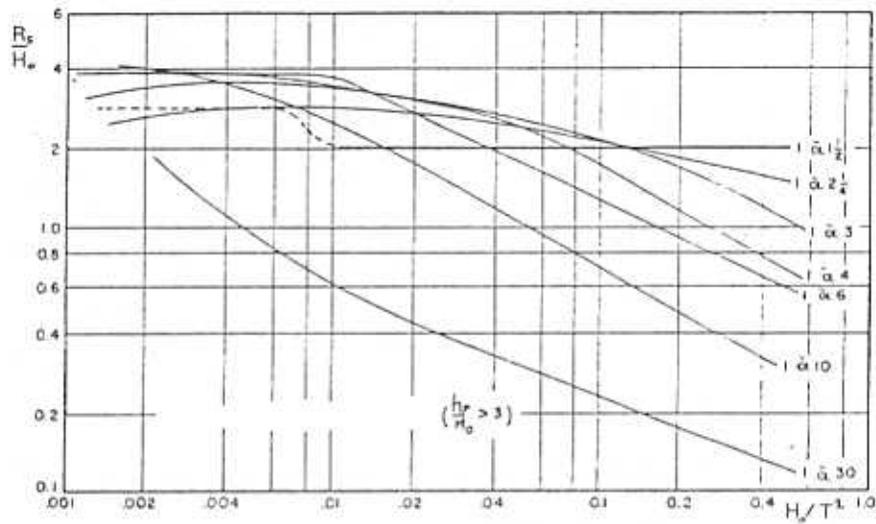


FIGURE 28

HAUTEUR D'ASCENSION RELATIVE POUR GRANDE PROFONDEUR  $h_p$  AU PIED DE LA STRUCTURE (d'après T. SAVILLE)

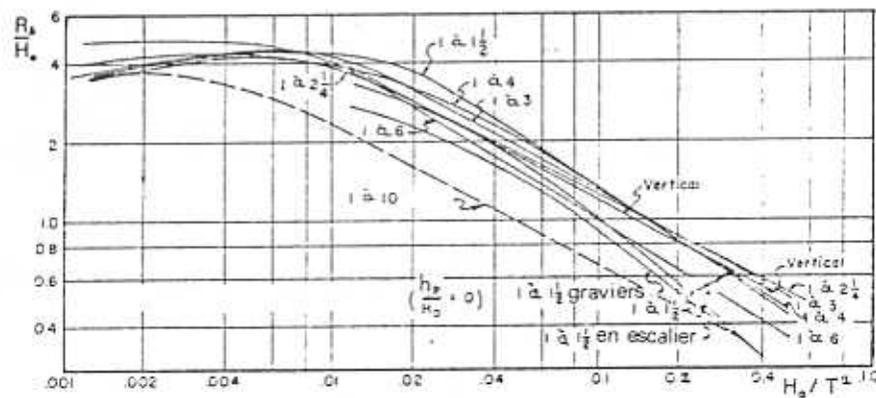


FIGURE 29

HAUTEUR D'ASCENSION RELATIVE POUR LE CAS OU LE PIED DE LA STRUCTURE SE TROUVE AU NIVEAU DE L'EAU CALME (d'après T. SAVILLE)

( $H_s/T$  est lié avec la cambrure  $\gamma$  par la formule

$$\gamma = \frac{2\pi H_s}{h T^2} = \frac{1}{5.12} \frac{H_s}{T^2})$$

De ces résultats, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Il y a une dispersion des résultats typique, assez petite pour les faibles pentes, mais assez importante pour les pentes plus raides,
- Les plus grandes hauteurs d'ascension sont obtenues par les profondeurs petites et les pentes plutôt raides. Pour les pentes douces, c'est l'inverse.
- Pour les petites profondeurs, la pente de 1/1,50 donne les plus grandes hauteurs d'ascension dans une gamme assez large de cambrures  $0.002 < \gamma < 0.04$
- Pour les grandes profondeurs, la pente de 1/2,25 donne des hauteurs d'ascension importantes pour la gamme des cambrures  $0.002 < \gamma < 0.03$

Y. TOMINAGA, H. HASHIMOTO et N. SAKUMA (1966) ont testé plusieurs pentes (fig. 30)

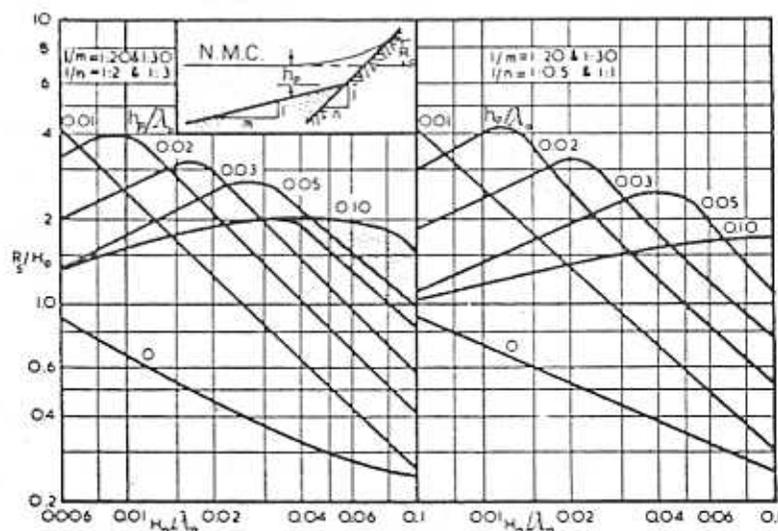


FIGURE 30  
HAUTEUR D'ASCENSION RELATIVE, SUR DES PENTES LISSES  
PAR RAPPORT A LA CAMBRURE DE LA HOULE  
(d'après Y. TOMINAGA)

D'après ces résultats, quand la cambrure  $\gamma_0$  augmente  $R_s/H_0$  diminue, la houle déferlant plus au large et perdant de l'énergie avant d'approcher. Les pentes douces défavorisent la hauteur d'ascension à cause de pertes d'énergie par frottement sur une zone de déferlement plus vaste. Le maximum de hauteur d'ascension est obtenu quand la cambrure de la houle approche de sa valeur critique, juste avant le déferlement).

S. SATO et KISHI (1958) ont étudié, aussi, expérimentalement l'influence de la profondeur d'eau au pied du plan incliné dans un cas particulier (v. fig. 31). Ils ont démontré que les houles longues peuvent donner des hauteurs d'ascension 2 ou 3 fois supérieures de celles des houles courtes.

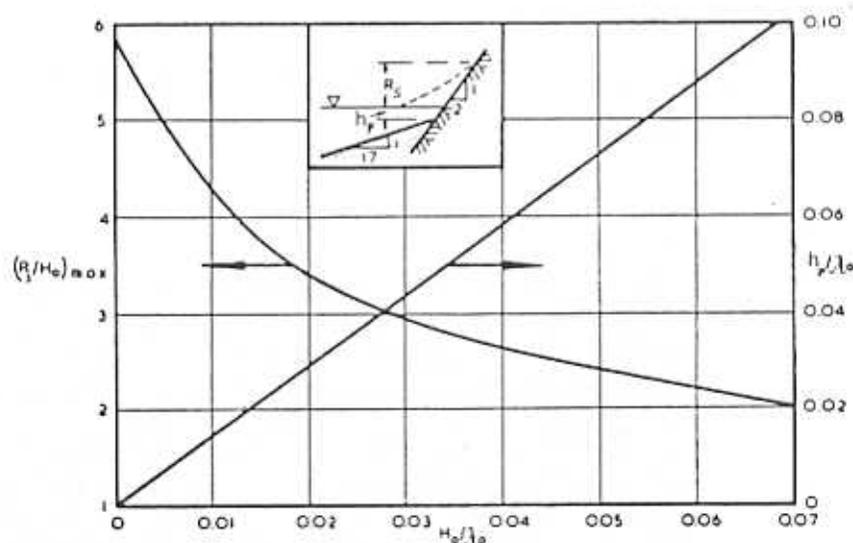


FIGURE 31

VALEURS DE  $(R_s/H_0)_{\max}$  POUR DIFFÉRENTES CAMBRURES  $H_0/\lambda_0$   
 et  $h_p/\lambda_0$  pour la pente de 1/2 sur un fond de 1/17  
 (d'après S. SATO et KISHI)

R. SAVAGE a examiné l'influence de la pente sur la hauteur d'ascension pour différentes cambrures (v. fig. 32). Ces résultats se trouvent en concordance avec les résultats obtenus par GRANTHEM (1953).

Les fig. 33 et 34 donnent les résultats du travail expérimental de SIBUL et TICKNER pour les pentes 1/3 et 1/6, en houles aléatoires.

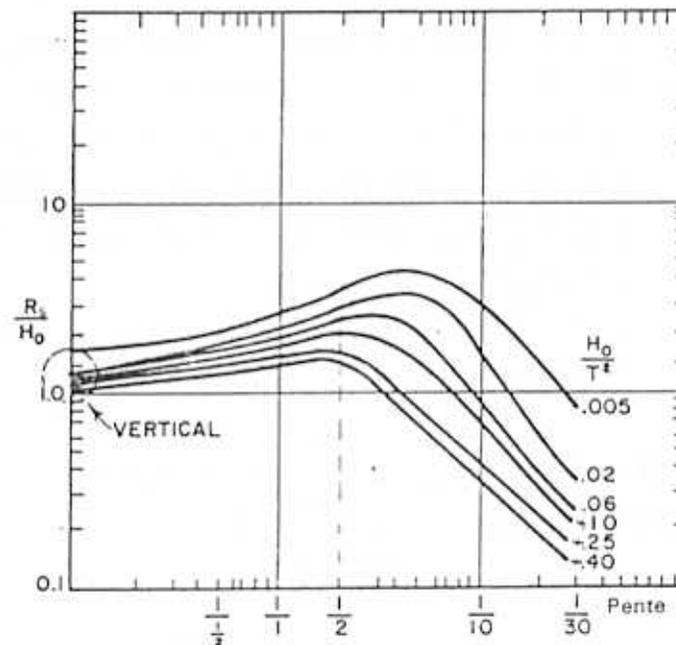


FIGURE 32  
LA HAUTEUR D'ASCENSION SUR PENTES LISSES  
(d'après SAVAGE)

Pour une houle périodique déferlant sur un plan incliné de pente faible ( $\frac{H}{T^2} > \text{tg}^2 \alpha$ ), I.A. HUN a proposé la relation suivante :

$$R_s = 2.3 T \sqrt{H} \text{tg} \alpha \quad (\text{au système foot-sec}), \quad (59)$$

$$\text{ou } R_s = 1.26 T \sqrt{H} \text{tg} \alpha \quad (\text{au système m-sec}), \quad (60)$$

$$g = 32,2 \text{ ft/sec}^2, \quad \lambda_0 = \frac{g T^2}{2 \pi} \quad \text{et de (59) on a :}$$

$$R_s = 0.4 T \sqrt{g H} \text{tg} \alpha = \sqrt{H \lambda_0} \text{tg} \alpha \quad (61)$$

L'équation (61) est purement empirique. Néanmoins, J. BATTJES en donne l'explication suivante, (v. bibl. 3) :

- La vitesse horizontale initiale des particules d'eau qui parcourent la pente doit être du même ordre de grandeur que la vitesse des particules de la vague déferlante, c'est-à-dire :  $O(\sqrt{gH})$ . Le mouvement est périodique, (période T), et le temps d'ascension est de  $O(T)$ . Si l'allure de la courbe vitesse - temps ne dépend pas de la pente et des caractéristiques de la houle, le déplacement sur la pente doit être :  $O(T\sqrt{gH})$   
Or le déplacement vertical (hauteur d'ascension) doit être :  $O(T\sqrt{gH} \operatorname{tg} \alpha)$  v. (59).

BATTJES et ROOS ont également effectué des expériences concernant la hauteur d'ascension et ils en ont déduit les relations suivantes : (v. fig. 35).

$$\frac{h_{\max}}{\sqrt{H} \lambda_0} = 0.08 \left( 1 - \frac{x}{\sqrt{H} \lambda_0} \right) \quad (62)$$

et 
$$\frac{v_{\max}}{\sqrt{gH}} = (0.5 \text{ à } 0.75) \frac{R_s}{H} \quad (63)$$

pour 
$$\frac{x}{\sqrt{H} \lambda_0} < 0.4$$

où  $h_{\max}$  est l'épaisseur maximum de la couche d'eau au point d'abscisse  $x$  et  $v_{\max}$  la vitesse maximale d'ascension, (v. bibl. 68).

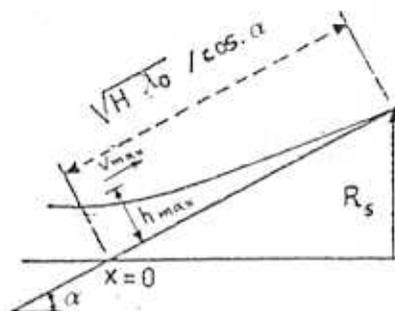


FIGURE 35  
REPRESENTATION GRAPHIQUE DES NOTATIONS

L'examen du phénomène en houle aléatoire a été fait par J.A. BATTJES qui a étudié la distribution de la hauteur d'ascension de la houle sur des plans inclinés. Il a également présenté des mesures effectuées en YSELLAKE DIKE dont la distribution a été comparée à celle de RAYLEIGH (v. bibl. 3).

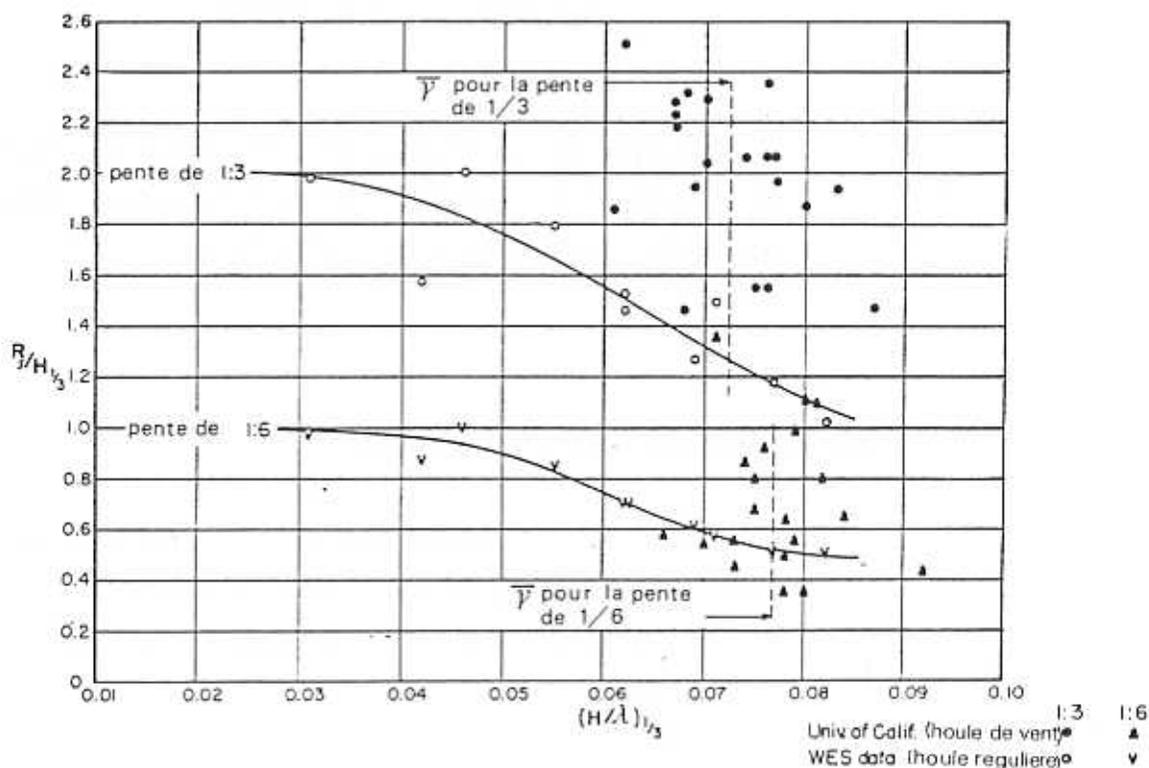


FIGURE 33  
HAUTEUR D'ASCENSION EN FONCTION DE LA CAMBRURE,  
POUR LES PENTES DE 1/3 ET 1/6 (d'après SIBUL ET TICKNER)

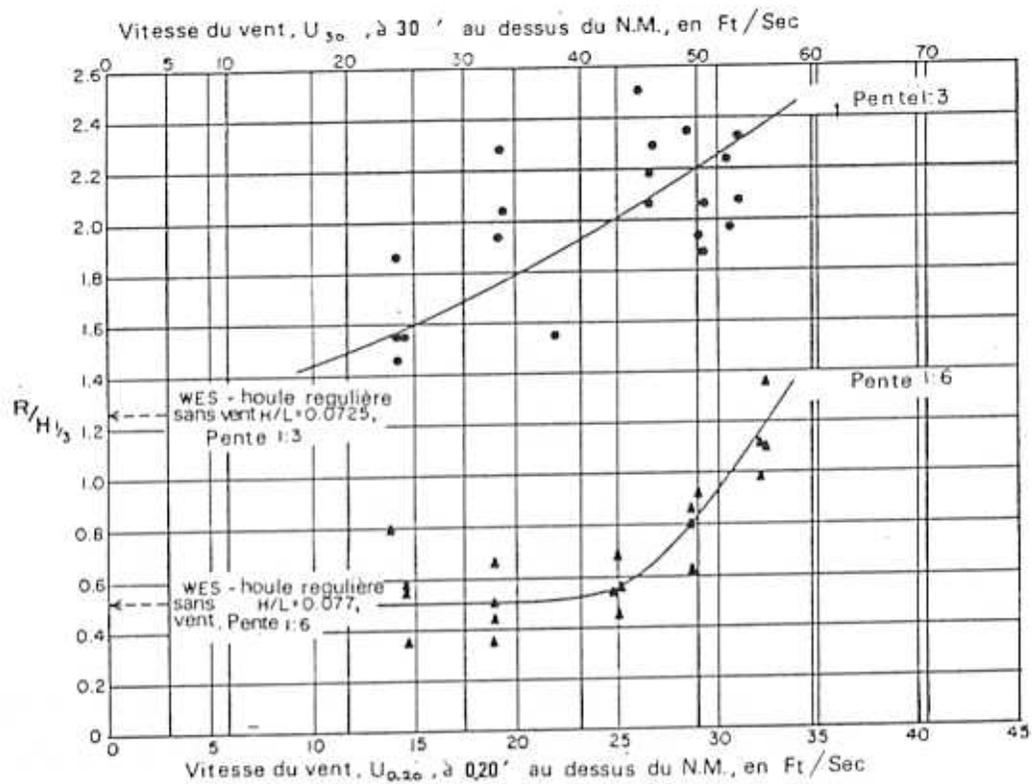


FIGURE 34  
HAUTEUR D'ASCENSION PAR RAPPORT A LA VITESSE DU VENT  
(d'après SIBUL ET TICKNER)

Les résultats de la figure 33 montrent que la houle, accompagnée par du vent, par rapport à la houle régulière, donne des hauteurs d'ascension sensiblement plus élevées.

#### 5.10. Le franchissement d'un seuil

Dans le cas où la hauteur  $S$  d'une structure en plan incliné, au dessus du niveau moyen, est inférieure à la hauteur d'ascension l'eau franchit le seuil avec un débit moyen  $\bar{Q}$  (v. fig.36).

Ce phénomène qui doit être toujours pris en compte pour l'étude des ouvrages portuaires externes, a fait l'objet des plusieurs travaux théoriques et expérimentaux. En 1970, H. KIKKAWA, H. SHI-IGAI, T. KONO, ont proposé une formule pour calculer l'amplitude de la houle  $H$  juste devant la structure et la hauteur de houle  $R_0$  pendant le franchissement se sont supposées connues (v. fig. 36) :

$$\frac{\bar{Q}}{g^{1/2} H^{3/2}} = \sqrt{2} \frac{2}{15} m_s \left( \frac{R_0}{H} \right)^{3/2} \left( 1 - \frac{S}{R_0} \right)^{5/2} \quad (36)$$

$m_s$  étant un coefficient relatif au flux au dessus du seuil. Les mêmes auteurs ont effectué une série d'essais (1968-1970) dont les résultats se trouvent en bonne concordance avec l'équation (64). Néanmoins, cette formule n'est pas facilement applicable ( $R_0$ ,  $H$  et  $m_s$  supposés connus). Les diagrammes de la fig. 36 ont été faits à partir de la formule (64), pour  $m_s$ . Le volume d'eau franchissant le seuil de largeur  $B$  pendant une période  $T$  est :

$$V_T = \bar{Q} T B \quad (65)$$

et la vitesse moyenne  $\bar{v} = 2Q/(R_0 - S)$  (66)  
(v. bibl. 73).

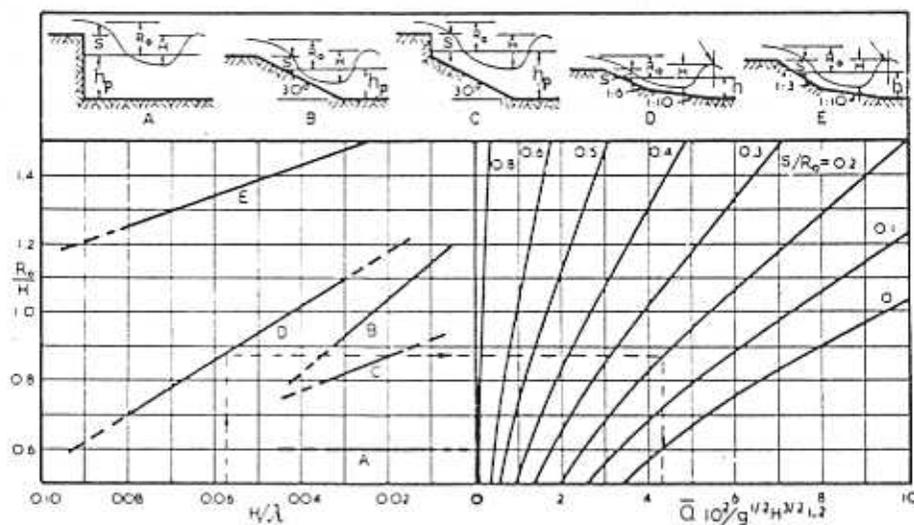


FIGURE 36

FRANCHISSEMENT MOYEN  $\bar{Q}$  AU DESSUS D'UN SEUIL PAR METRE LINEAIRE  
POUR CINQ STRUCTURES DIFFERENTES (d'après H. KIKKAWA)

En 1955, O. SIBUL a présenté les résultats d'une campagne expérimentale faite au WAVE RESEARCH LABORATORY (University of California), concernant le franchissement des pentes 1/2 et 1/3 en houle monochromatique régulière (v. bibl. 72) (v. fig. 37, 38, 39).

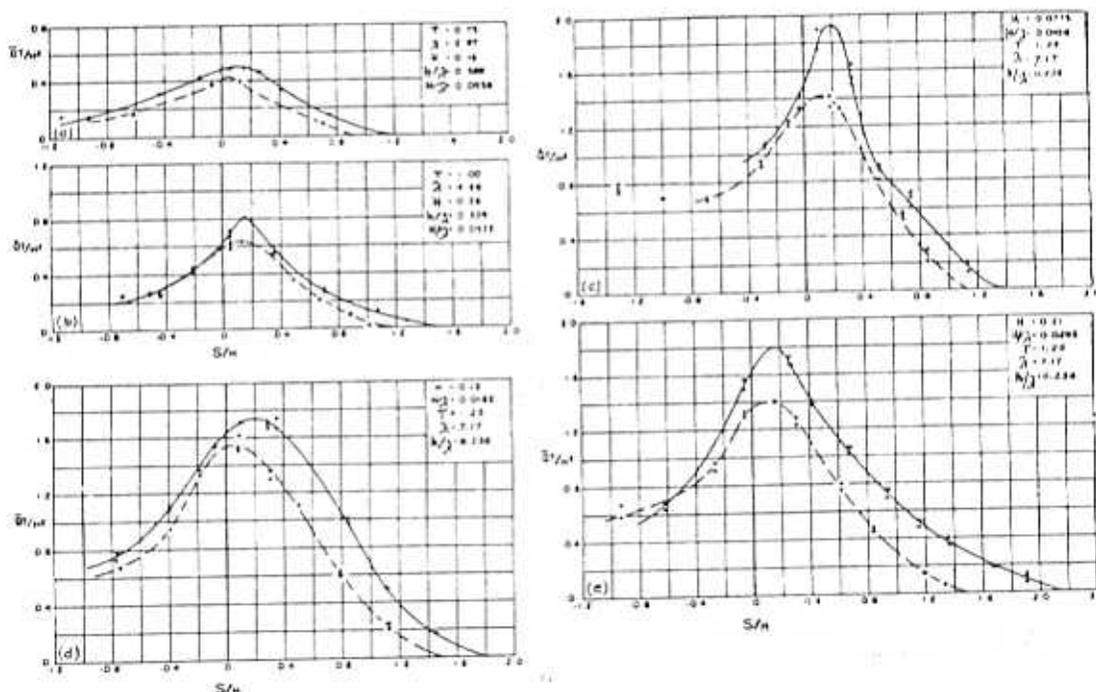


FIGURE 37

## FRANCHISSEMENT DES STRUCTURES EN PENTE

PRONFONDEUR D'EAU 1,69 ft ; ——— SURFACE LISSE

—+— SURFACE RUGUEUSE. (a) et (b) pentes 1/2 et 1/3 respectivement ; (c), (d), (e) pente 1/2, pour trois cambrures différentes (d'après SIBUL)

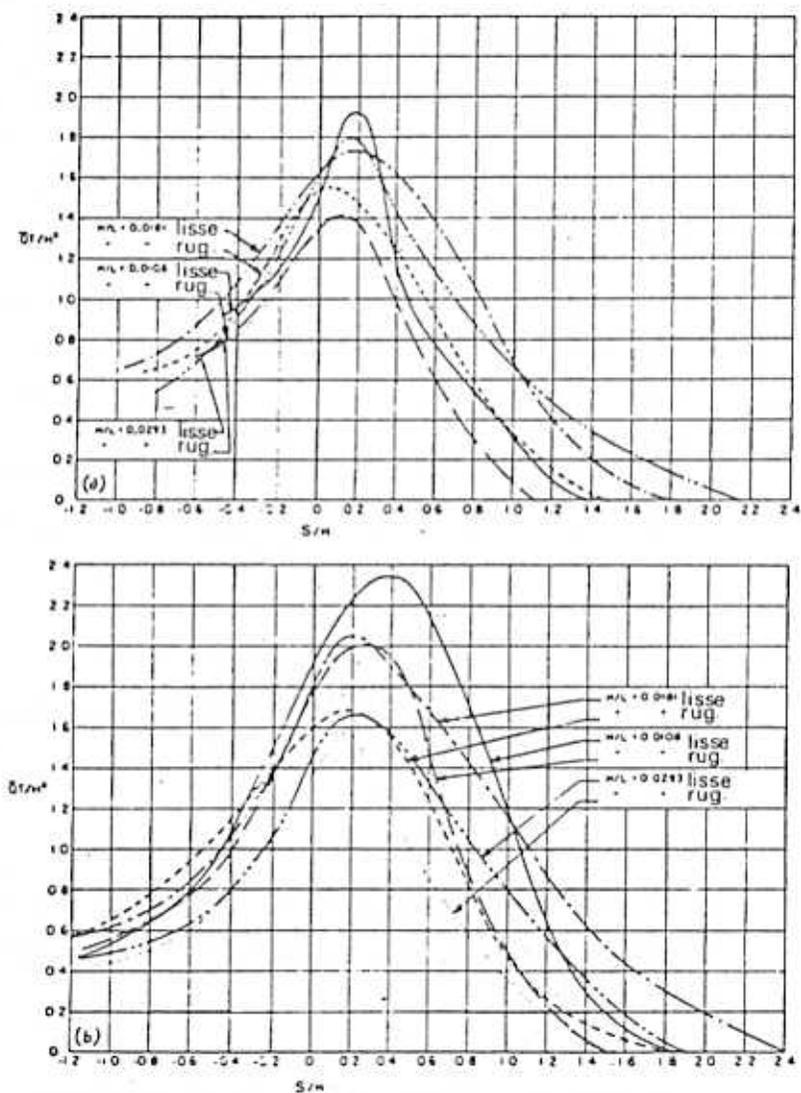


FIGURE 38

FRANCHISSEMENT DES STRUCTURES EN PENTE,  
 PAR RAPPORT A LA CAMBRURE DE LA HOULE INCIDENTE  
 $h = 1.69 \text{ ft}$ ,  $T = 1.25 \text{ sec}$ ,  $\lambda = 7.17 \text{ ft}$ ,  $h/\lambda = 0.236$ , (a)  $1/2$ , (b)  $1/3$

(d'après SIBUL)

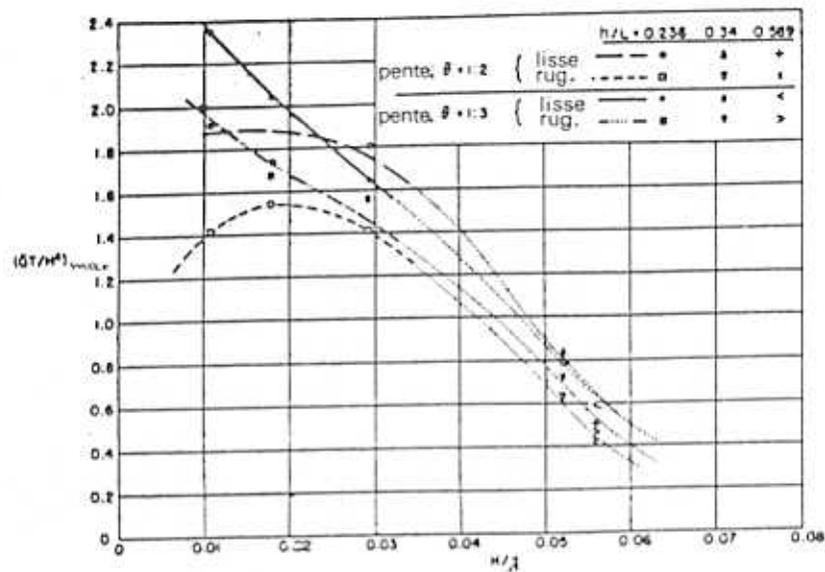


FIGURE 39  
VALEURS MAXIMALES DE  $(\overline{QT}/H^2)$  POUR DIFFERENTES CAMBRURES  
(d'après SIBUL)

Le travail expérimental de O. SIBUL a donné des informations importantes sur le phénomène du franchissement d'une structure en pente :

- Les courbes ont en général la même allure.
- La rugosité de la surface diminue le débit du franchissement jusqu'à 20 %.
- La position de la ligne de déferlement est un facteur important. Si le déferlement se fait sur la structure, le franchissement est important. Si la houle déferle loin devant la structure, des grandes quantités d'énergie se dissipent et le franchissement est relativement petit.

- Il y a toujours une cambrure critique qui donne un maximum de franchissement. Pour la pente de 1/2, cette cambrure critique est plus grande que celle de la pente de 1/3.
- La pente de 1/3 donne des franchissements plus importants que la pente de 1/2.

O. SIBUL et E. TICKNER ont montré expérimentalement que les structures en pente exposées à la houle accompagnées par du vent ont un franchissement supérieures de celui provoqué par des houles régulières (v. bibl. 82).

A. PAAPE a également examiné l'influence du vent sur le franchissement. En 1966, il a effectué des essais systématiques au Laboratoire d'Hydraulique de Delft (Hollande), dans un canal à soufflerie, pour diverses pentes (v. bibl. 6 ), (v. fig. 40,41, 42).

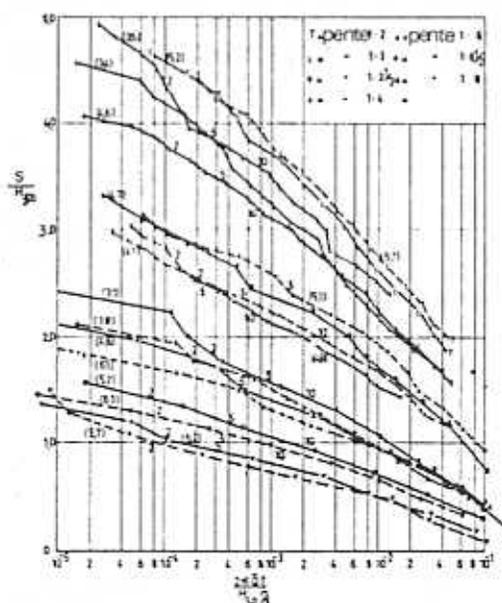


FIGURE 40

FRANCHISSEMENT POUR DIFFERENTES PENTES  
 Nbs ENTRE PARENTHESES INDIQUENT LA CAMBRURE (%).  
 LES AUTRES NBS NOUS DONNENT LE POURCENTAGE DES VAGUES  
 QUI FRANCHISSENT LE SEUIL (d'après A. PAAPE)

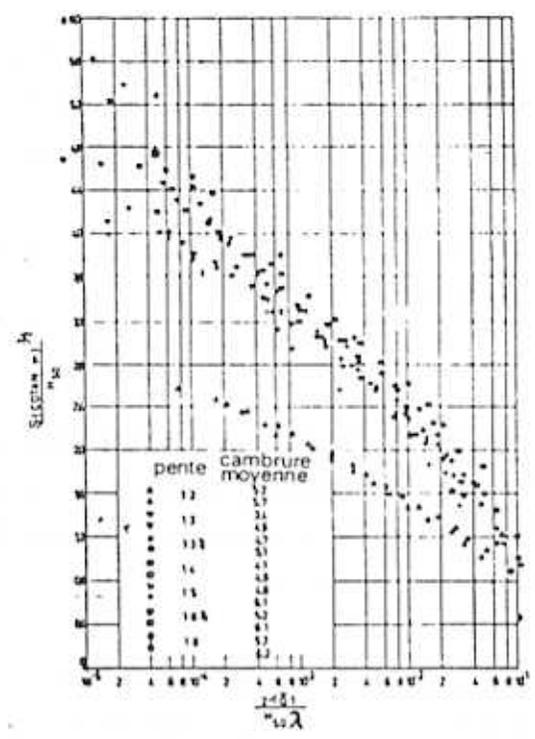


FIGURE 41  
 LE FRANCHISSEMENT COMME FONCTION DE  $\frac{h(\cot \alpha \lambda)}{H_{50}}$   
 $H_{50}$  = L'AMPLITUDE QUI EST DEPASSEE PAR LE 50 % DES HOULES  
 D'UN ENREGISTREMENT (d'après A. PAAPE)

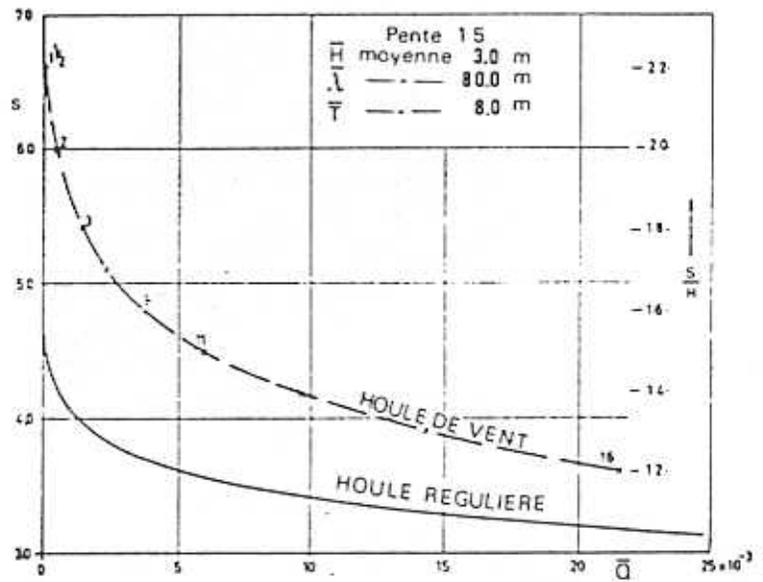


FIGURE 42  
 FRANCHISSEMENT EN HOULE DE VENT ET REGULIERE. LES NOMBRES INDIQUENT  
 LE POURCENTAGE DES VAGUES QUI FRANCHISSENT LE SEUIL (d'après A. PAAPE)

FAMILLE TYPIQUE DE COURBES SUR LA RELATION ENTRE :  
L'AMPLITUDE DE LA HOULE; LA HAUTEUR DU SEUIL DE LA RAMPE; LE DEBIT DE FRANCHISSEMENT.

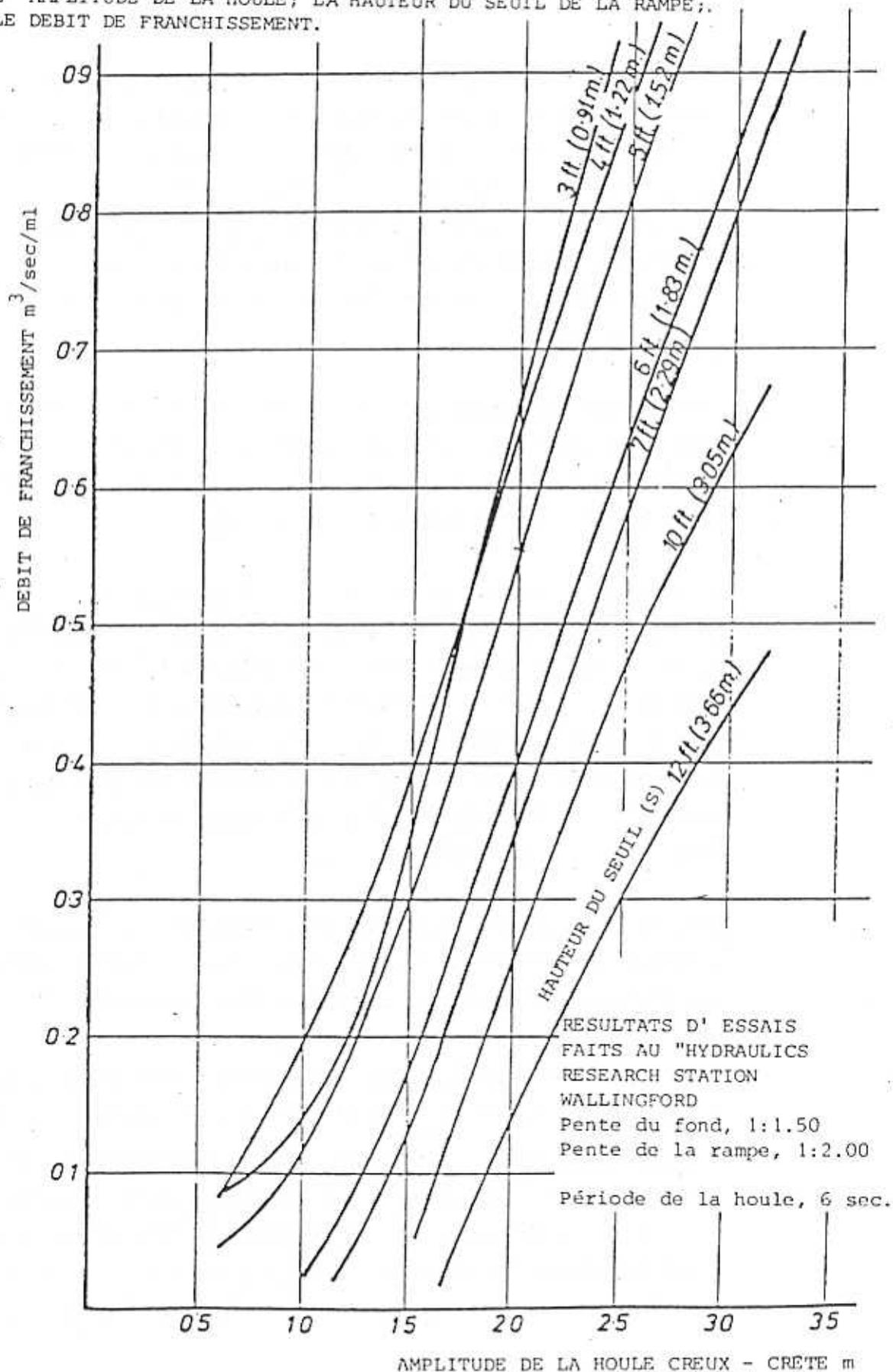


FIGURE 43

DEBITS RECUPERES AU DESSUS DU SEUIL DE LA RAMPE DU PROJET "ILE MAURICE"  
POUR  $T = 6$  sec. (d'après SIR ALEXANDER GIBB and PARTNERS)

A. PAAPE a démontré qu'il y a une forte dépendance entre le phénomène de franchissement du seuil et l'irrégularité de la houle incidente ; cet effet n'était malheureusement pas reproductible en bassin équipé d'un batteur de houle régulière (v. bibl. 60). Il a utilisé le paramètre  $\left(2\pi\bar{Q}T/H_{50}\lambda\right)$  pour traiter le phénomène en houle aléatoire. Il a trouvé que pour  $\text{tga} < 1/3$  le débit moyen franchissant le seuil de la rampe est proportionnel à  $(\text{tga})^{1/3}$ .

L'influence majorative du vent sur le phénomène du franchissement d'un seuil est mentionnée aussi par WIEGEL (v. bibl. 73), et démontrée expérimentalement par O. JULYENSEN et T. SORENSEN (Danish Hydraulic Institute), v. bibl. 48.

A notre connaissance, le seul travail expérimental sur le phénomène ayant pour objectif la récupération de l'énergie de la houle (rampes de déferlement) a été effectué par "Sir Alexander GIBB and PARTNERS" au "Hydraulics Research Station Wallingford" pour le projet Ile Maurice. Les seuls résultats publiés à la suite de cette étude (v. fig. 43) concernent les houles de période 6 sec., la pente de 1/2 pour la rampe et 1/1,50 pour le fond de la mer (v. bibl. 81).

Dans la bibliographie dont nous disposons, il n'y a aucune information concernant le franchissement d'une structure en trièdre (convergents fixés sur une rampe de déferlement).

\* \* \*

La partie bibliographique que nous venons d'exposer nous a permis de dégager, pour la suite de l'étude, les points suivants :

- Choix des systèmes de type déferlant qui méritent une étude systématique : Les rampes de déferlement, dispositifs économiquement intéressants et les trièdres à houle (combinaison des rampes et des dièdres). Pour les premières, les résultats publiés sont limités et sont inexistantes pour les seconds.

- Organisation de l'expérimentation : Choix des paramètres à examiner ; plage des caractéristiques de la houle à balayer ; choix du matériel approprié pour les mesures ; difficultés liées à l'expérimentation à éviter etc...
  
- Influence des phénomènes naturels sur le fonctionnement des dispositifs : marée, vent, courants, exploitation du phénomène de réfraction etc...

## 6. L'INSTALLATION EXPERIMENTALE

### 6.1. Le petit bassin à houle du L.H.N. de l'E.N.S.M.

Les essais ont été effectués sur un canal à houle de 1,40 m de largeur et 9 m de longueur ; la profondeur d'eau est d'environ 1 m. Ce canal est équipé de parois vitrées dans la zone d'essais, et d'une petite fosse centrale pour les maquettes d'engins munis d'appendices à grand tirant d'eau.

### 6.2. Le batteur à houle du type coin

(v. Annexe M)

La longueur du canal étant relativement faible, la qualité principale à rechercher était la génération d'une houle sinusoïdale présentant le minimum d'harmoniques le plus près possible du générateur, (v. bibl. 15).

Les études sur la génération de la houle par un volet plan articulé (v. bibl. 38, 39), ou par un coin triangulaire en pilonnement (v. bibl. 40, 61), montrent que ces deux solutions n'étaient pas bien adaptées vis à vis de ce critère. Nous avons donc recherché un profil plus performant. Nous avons finalement réalisé un batteur coin pilonnant dont la section a été spécialement calculée pour générer le minimum de vagues "proches" (v. bibl. 15). L'équation du rendement du coin est :

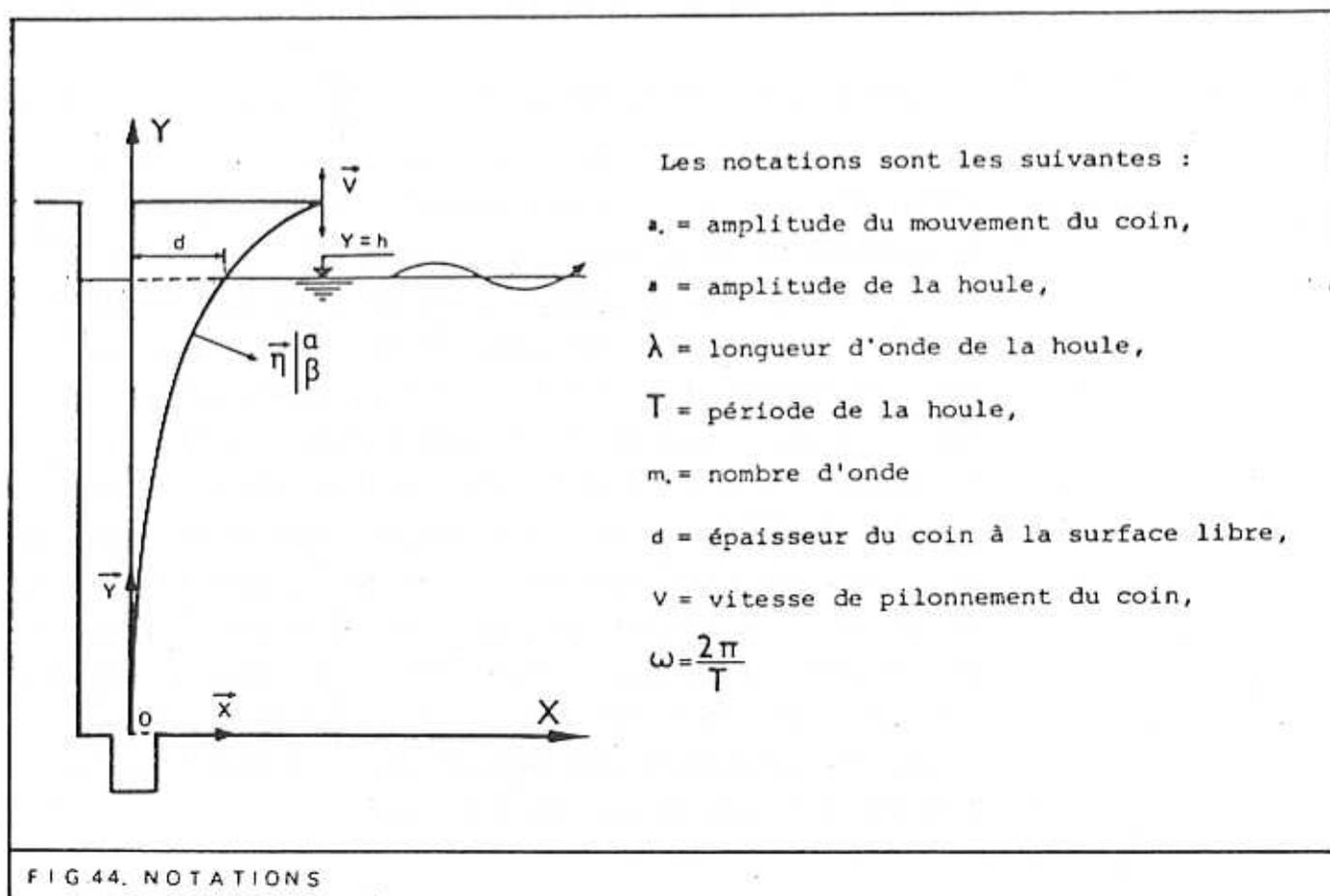
$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \sin Kd_c \quad (67)$$

et l'équation implicite définissant le coin est :

$$f(x,y) = \frac{\text{sh}(Ky)}{\text{sh}(Kh)} - \frac{\sin(Kx)}{\sin(Kd)} = 0 \quad (68)$$

(Pour les notations v. fig. 44).

Il est bien évident que le générateur ainsi défini n'est optimal que pour une période  $T$  précise. Pour des périodes différentes, le champ de vagues comportera nécessairement un certain taux de vagues proches, d'autant plus faible que l'on se rapprochera de la période optimale.



Compte tenu des dimensions du canal, nous avons choisi pour cette période  $T = 0,90$  sec. La forme du coin définie par (68) pour cette période est représentée sur la fig. 45. L'étude du batteur coin, sa construction et son installation dans le petit bassin, ont été effectuées en 4 mois au L.H.N. de l'E.N.S.M.

L'ensemble du batteur est constitué par un chariot-support en acier sur lequel il est possible de fixer des coins différents, ainsi que deux flotteurs d'équilibrage de la flottabilité du système. Le guidage du batteur se fait par 4 groupes de galets.

La course maximum du coin est de  $2 \times 12,5 \text{ cm} = 25 \text{ cm}$ , ce qui théoriquement donne une houle d'amplitude creux-crête de  $2 \times 6,25 \text{ cm} = 12,5 \text{ cm}$ . Le batteur est équipé actuellement d'un moteur à courant continu d'une puissance nominale de 1500 W.

Le rendement du coin installé est de  $\frac{\alpha}{\alpha_0} = 0,5$  pour la période optimale. Sur la figure 45, nous avons reporté les courbes d'étalonnage de la fonction de transfert de ce générateur  $\frac{\alpha}{\alpha_0}(T)$ . La variation de l'épaisseur  $d_c$  du coin à la surface libre est obtenue en faisant varier la hauteur d'eau dans le bassin. Le coin étant entraîné mécaniquement par un système à excentrique, l'amplitude  $\alpha_0$  de son mouvement est déterminée grâce à ces courbes puis ajustée mécaniquement avant l'essai. Le réglage de la période (entre 0,5 et 2 sec) se fait au niveau du variateur alimentant le moteur électrique. Pour la période optimale, nous avons également reporté les points correspondant au calcul théorique d'après (67). On constate un très bon accord des résultats théoriques et expérimentaux (v. fig. 46). Enfin, bien que nous n'ayons pas fait une analyse fine du champ de vagues, les enregistrements de houle nous ont montré que le taux d'harmoniques élevées était faible.

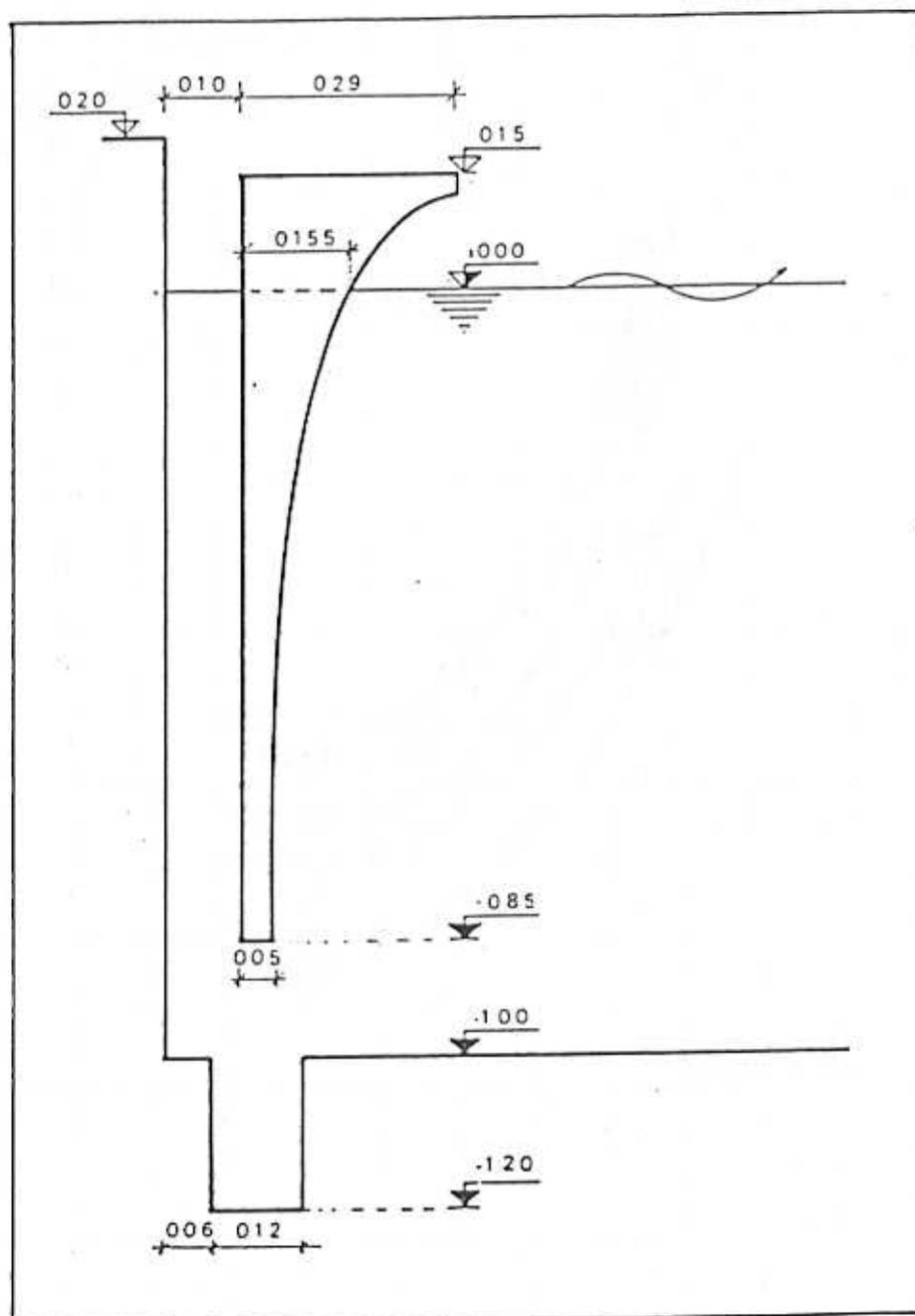
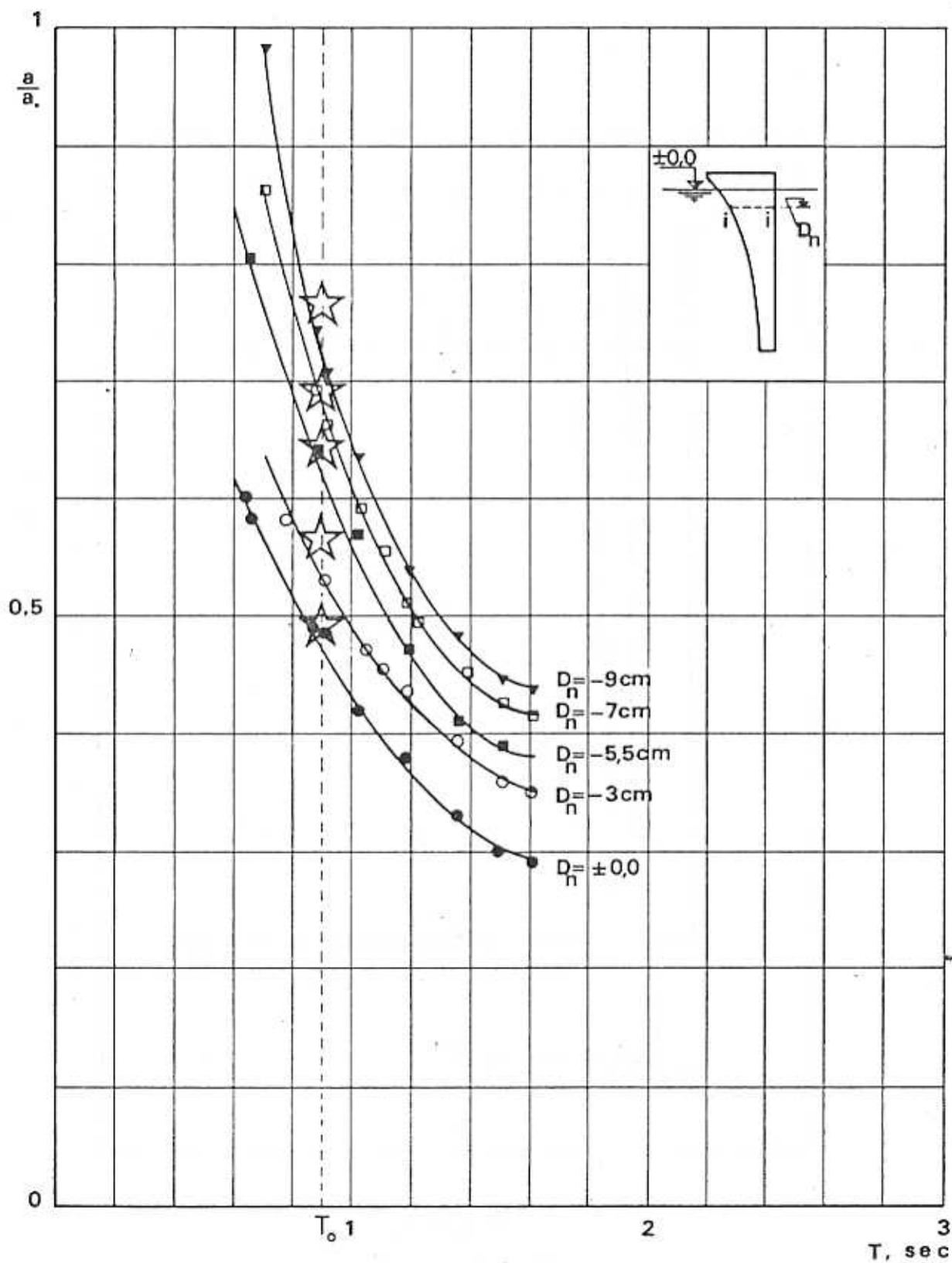


FIGURE 45  
PROFIL DU BATTEUR COIN



### BATTEUR COIN DU PETIT BASSIN A HOULE

Rapport  $a/a_0$  (amplitude de la houle/ampl. de mouv. du coin) et période de la houle, pour différents niveaux  $D_n$  de la ligne de flottaison du coin  $i-i$ .

FIG 46.



Resultats theoriques, v. formule (67).

### 6.3. Les maquettes d'essais (v. Annexe N)

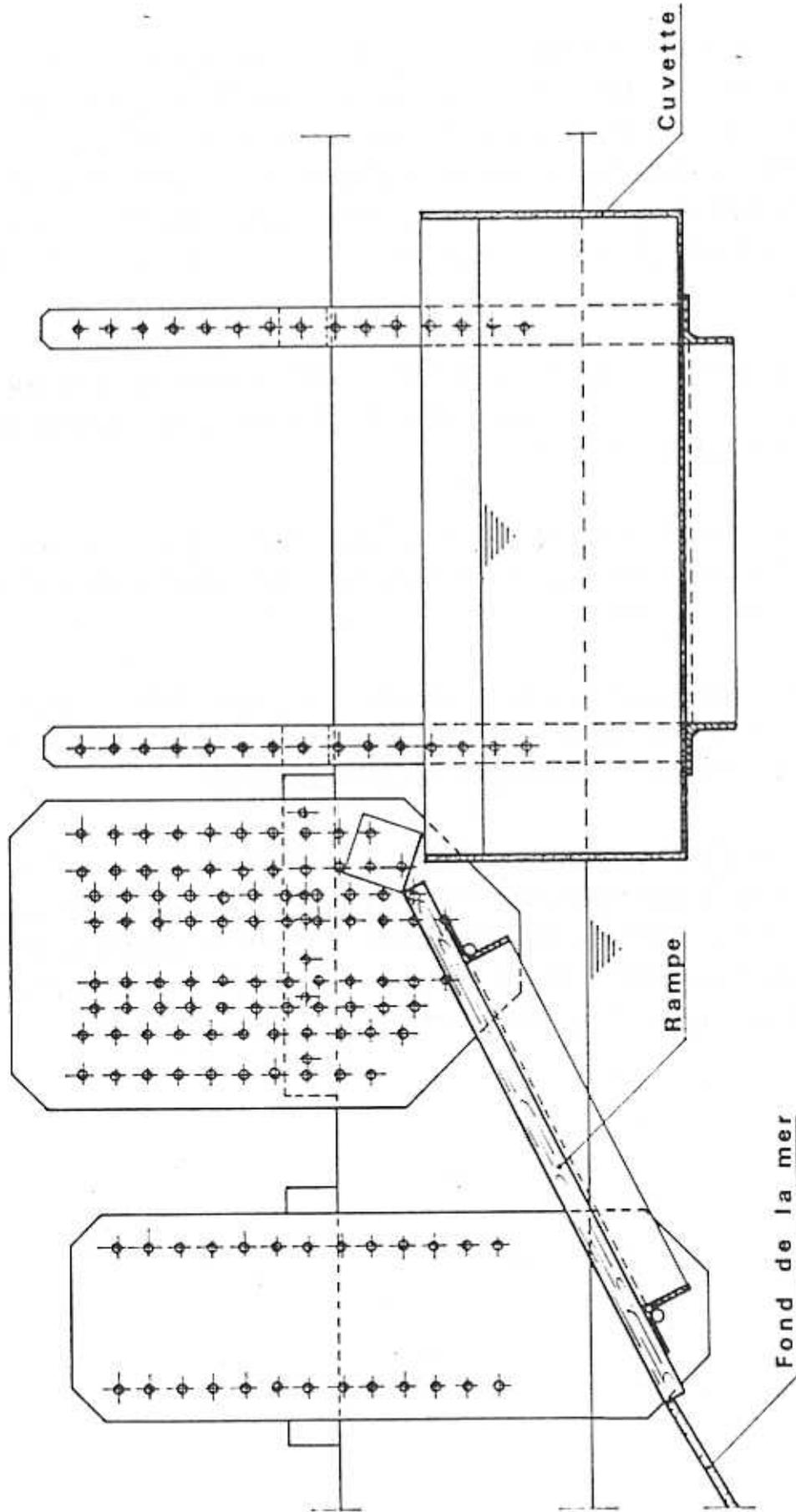
La rampe de déferlement est représentée par une planche plane de contre-plaqué marin fixée sur un cadre métallique rigide. Le plan incliné représentant le fond est une planche plane de P.V.C., fixée sur une cadre en aluminium. Les plans inclinés du fond et de la rampe sont réglables séparément en incidence ( $\alpha$  et  $\beta$ ) et en altitude ( $h_p$  et  $S$ ), v. fig. 1 et 47.

La cuvette servant à recueillir le débit franchissant le seuil est un bac de P.V.C. compartimenté. Son altitude peut être ajustée (v. fig. 47 et 48).

Pour la formation des trièdres, nous avons fixé sur la rampe de déferlement des dispositifs en bois massif convenablement taillé, (v. fig. 49).

Les diverses parties de la maquette, une fois réglées, constituent un ensemble rigide, fixé sur les bords métalliques du bassin à l'aide des boulons et écrous inoxydables.

Au bord de la pente représentant le fond de la mer, un raccordement de courbure assez forte était ménagé, à l'aide d'une tôle d'aluminium épaisse, rabattable, fermant la section du canal jusqu'à son fond. Toutes les surfaces des maquettes sont protégées contre l'oxydation, sont lisses et imperméables.



MAQUETTE D'ESSAIS

Rampe et cuvette d'accumulation.  
Système de réglage.

FIG. 47.- Ech. 1:5

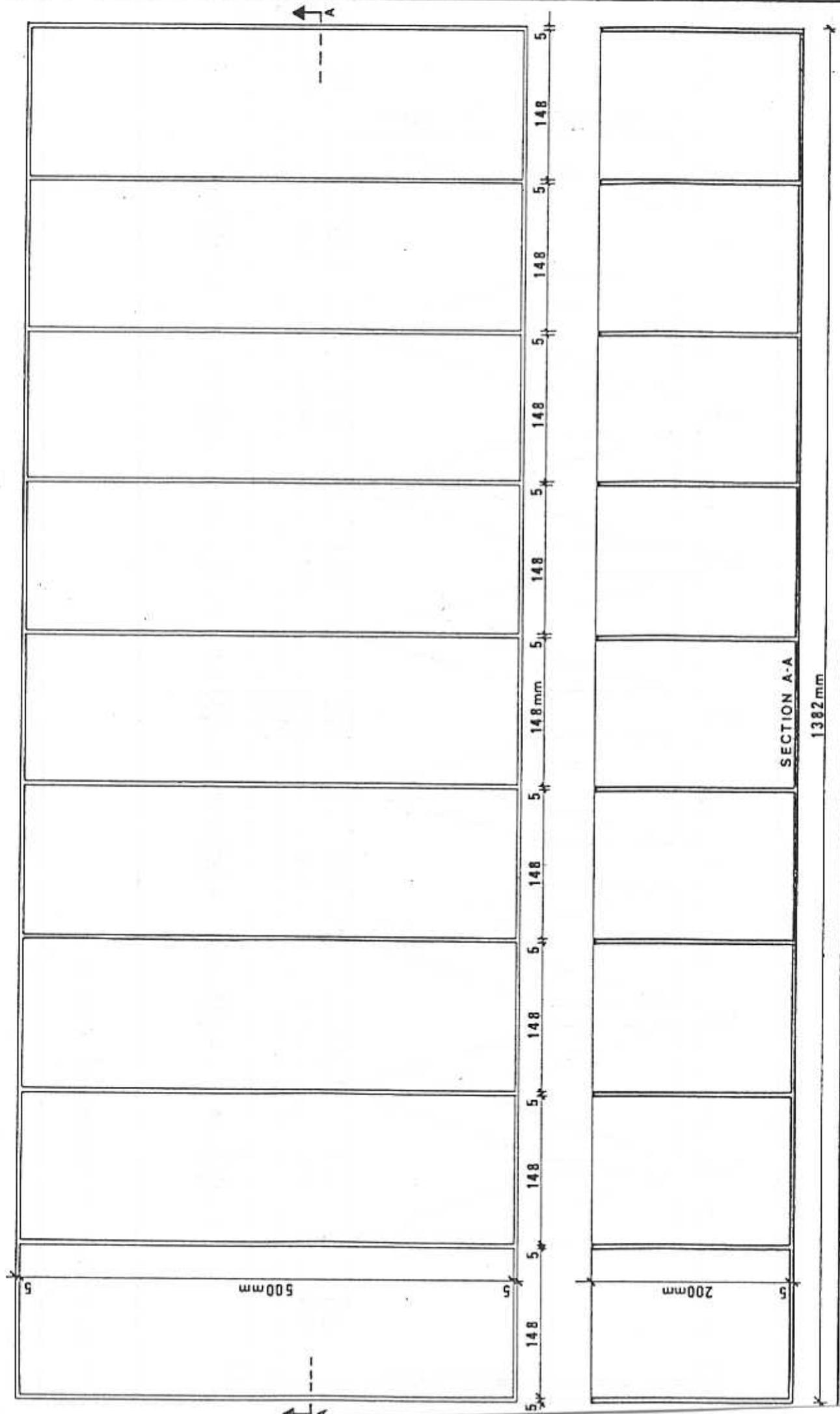
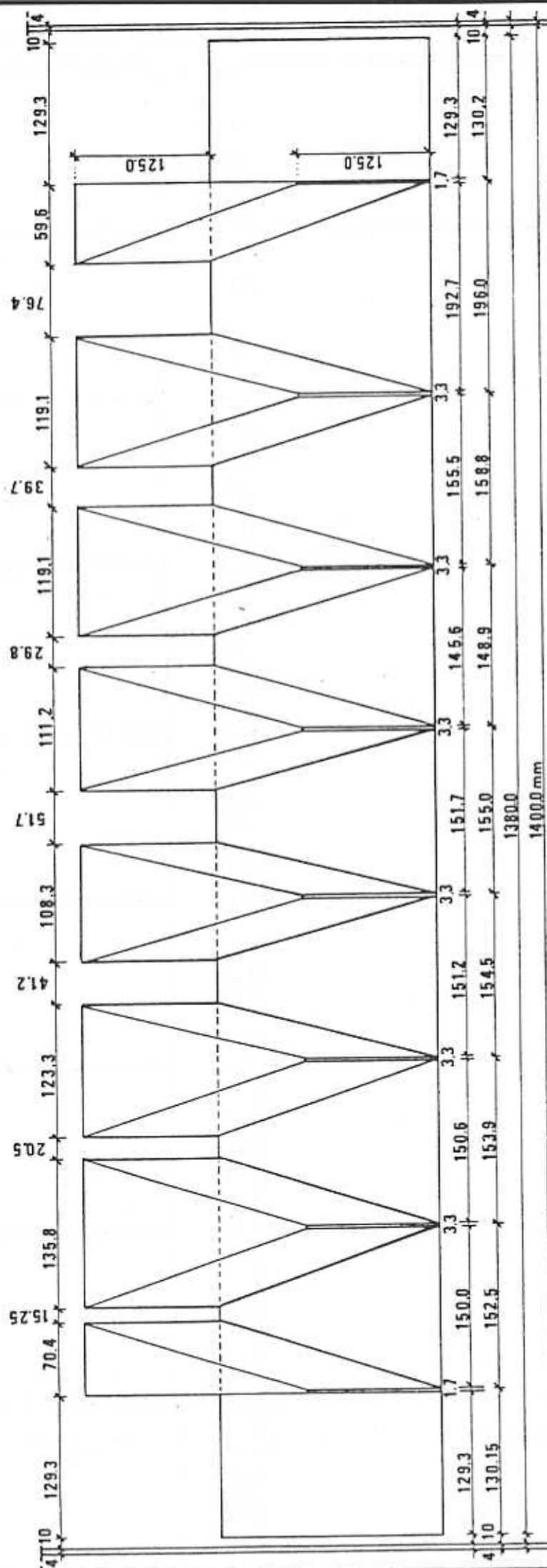


FIG. 48 .- BASSIN D' ACCUMULATION (BAC DE PVC) .-



$$r = \frac{152.5}{16.25} = 10 \quad r = \frac{153.9}{20.5} = 7.5 \quad r = \frac{154.5}{41.2} = 3.75 \quad r = \frac{155.0}{51.7} = 3 \quad r = \frac{148.9}{29.8} = 5 \quad r = \frac{158.8}{39.7} = 4 \quad r = \frac{196.0}{76.4} = 2.5$$

FIG.49 -- MAQUETTE DE TRIÈDRES - VUE FRONTALE --

#### 6.4. Système de mesures et essais préliminaires (v. Annexe N)

La houle incidente (période, amplitude) et le débit entrant dans le bassin d'accumulation ont été mesurés au moyen de sondes lyres de type résistif. Le clapot formé dans le bassin par le remplissage par à-coup a été éliminé de manière à obtenir une mesure correcte du débit entrant.

D'une façon classique, nous avons choisi de quantifier les performances des systèmes examinés par la mesure du rendement défini comme le rapport du flux d'énergie potentielle récupérée sur le flux d'énergie transmis par la houle à l'infini amont. Soit :

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{\rho g Q S / l}{\rho g^2 a^2 T / 8 \pi} \quad (69)$$

avec

Q : débit volumique entrant

S : hauteur du seuil de la rampe par rapport à la surface libre moyenne

l : largeur du bassin de récupération

a : amplitude de la houle à l'infini amont

T : période de la houle

Ce rendement R est à priori fonction d'un grand nombre de paramètres. Le phénomène de déferlement est extrêmement complexe

(v. § 5.3.). Certaines approches théoriques permettent de représenter la cinématique de l'écoulement un peu avant le déferlement, en considérant le fluide comme parfait.

La montée de l'eau sur la plage après le déferlement pourrait peut-être être abordée théoriquement si l'on pouvait connaître des conditions aux limites et initiales. Mais le déferlement lui-même reste pour le moment inabordable par le calcul théorique.

Donc, comme pour tous les essais de modèles sur la houle, nous respecterons, outre la similitude géométrique, la similitude de Froude en conservant le nombre d'onde dans l'extrapolation modèle-réel. Il semble, d'après BATTJES (v. Bibl. 68, 75) que le type de déferlement (déversant, plongeant ou gonflant) ne dépend que du paramètre  $\zeta = \text{tg} \alpha / \sqrt{H/\lambda}$ . Ce paramètre étant conservé dans la similitude, nous avons affaire au même type de déferlement sur la maquette et au réel, ce qui est déjà un point très important pour la validité de l'extrapolation.

Dans ces conditions de similitude, les paramètres dont dépend le rendement  $R$  sont essentiellement (v. fig. 1a et c) :

$a$  : l'amplitude de la houle,

$T$  : la période,

$\alpha$  : l'angle de la rampe sur l'horizontale,

$\beta$  : l'angle du fond sur l'horizontale,

$S$  : la hauteur du seuil de la rampe,

$h_p$  : la profondeur du changement de pente,

$r$  : rapport ouverture avant / ouverture arrière  
(seulement pour les trièdres).

Après avoir évalué le nombre d'essais nécessaire à la prise en compte de l'influence de chacun des paramètres, nous avons décidé d'éliminer  $\beta$  et  $h_p$ , en disposant sur la maquette le fond dans l'alignement de la rampe. (l'influence des paramètres  $\beta$  et  $h_p$  a été testée pour le cas des trièdres, pour un nombre de cas relativement limité).

Pour les rampes de déferlement, le rendement n'est plus fonction que de trois paramètres adimensionnels :

Le nombre d'onde (multiplié par  $S$ ),  $K_o = \frac{\omega^2 S}{g} = \frac{2\pi S}{\lambda}$

La cambrure de la houle,  $\gamma = \frac{2a}{\lambda}$

L'angle de la rampe  $\alpha$

Pour les trièdres on a un quatrième paramètre supplémentaire :

Le rapport ouverture frontale / ouverture arrière du trièdre,

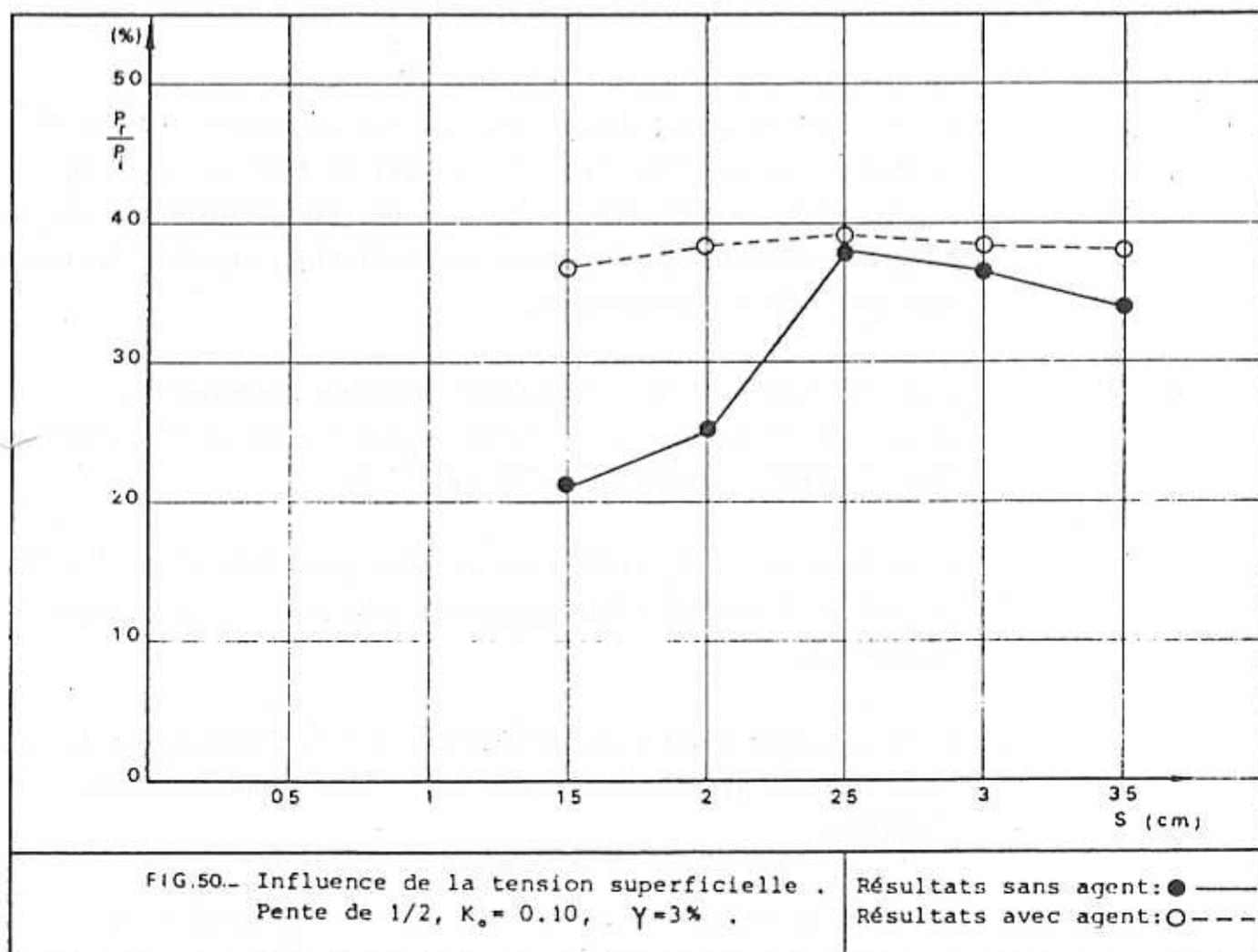
$$r = \frac{L_f}{L_a}$$

Nous avons effectué une première campagne d'essais préliminaires pour la rampe de déferlement avec trois pentes différentes (1/1.5, 1/2, 1/2.5), trois hauteurs de seuil, trois cambrures et en faisant varier systématiquement la période de la houle. Ceci nous a permis d'améliorer la méthodologie pour les essais

définitifs, notamment sur les points suivants :

- La conception mécanique du générateur nous oblige à régler un excentrique pour obtenir une amplitude de houle donnée. Il est alors difficile de travailler à cambrure strictement constante, et il en résulte une grande dispersion si on veut représenter les résultats en fonction du nombre d'onde pour une cambrure donnée.  
Par contre, le nombre d'onde peut être très précisément respecté ( $g$  fixé,  $S$  fixé,  $\omega$  réglé précisément au niveau du variateur).  
Les essais définitifs sont donc faits, pour une pente et un nombre d'onde donné, en faisant varier la cambrure.
- La pente 1/2.5. donne des résultats nettement inférieurs aux deux autres, et ne donne de bons rendements que pour des hauteurs de seuil trop petites pour être pratiquement exploitées (1,50 m environ au réel). De plus, du point de vue de la construction, elle nécessite un plus grand volume de matières premières que les autres. Aussi, nous avons décidé de l'abandonner lors des essais définitifs pour les plages de déferlement, ce qui nous a permis de consacrer plus de temps aux pentes 1/2 et 1/1.5.
- Dans les différentes combinaisons des valeurs choisies des paramètres, certaines se trouvaient être entre elles en similitude de Froude et devaient donc donner le même rendement. L'examen des résultats (points ● sur la fig. 50) fut décevant sur ce point puisque la dispersion atteignait parfois 40 %.  
En observant attentivement la maquette en fonctionnement, nous nous sommes rapidement aperçu que les tensions superficielles au niveau de la limite surface libre-rampe était à l'origine du phénomène.

Après avoir ajouté dans l'eau du canal un agent détergent diminuant ces tensions, nous avons constaté que les résultats devenaient cohérents, et que la similitude de Fronde était presque parfaitement vérifiée (points o sur la fig. 50). Les essais définitifs ont donc été faits en adoptant cette solution.



## 7. RAMPE DE DEFERLEMENT SIMPLE

### 7.1. Essais définitifs

Pour chacune des deux pentes sélectionnées, nous avons fait sept balayages en cambrure correspondant à autant de valeur du nombre d'onde adimensionnalisé  $K_0$  qui caractérise, rappelons-le, le rapport de la hauteur du seuil à la longueur d'onde.

Ces résultats expérimentaux sont présentés sur les fig. 51 (pente 1/2) et 52 (pente 1/1.5).

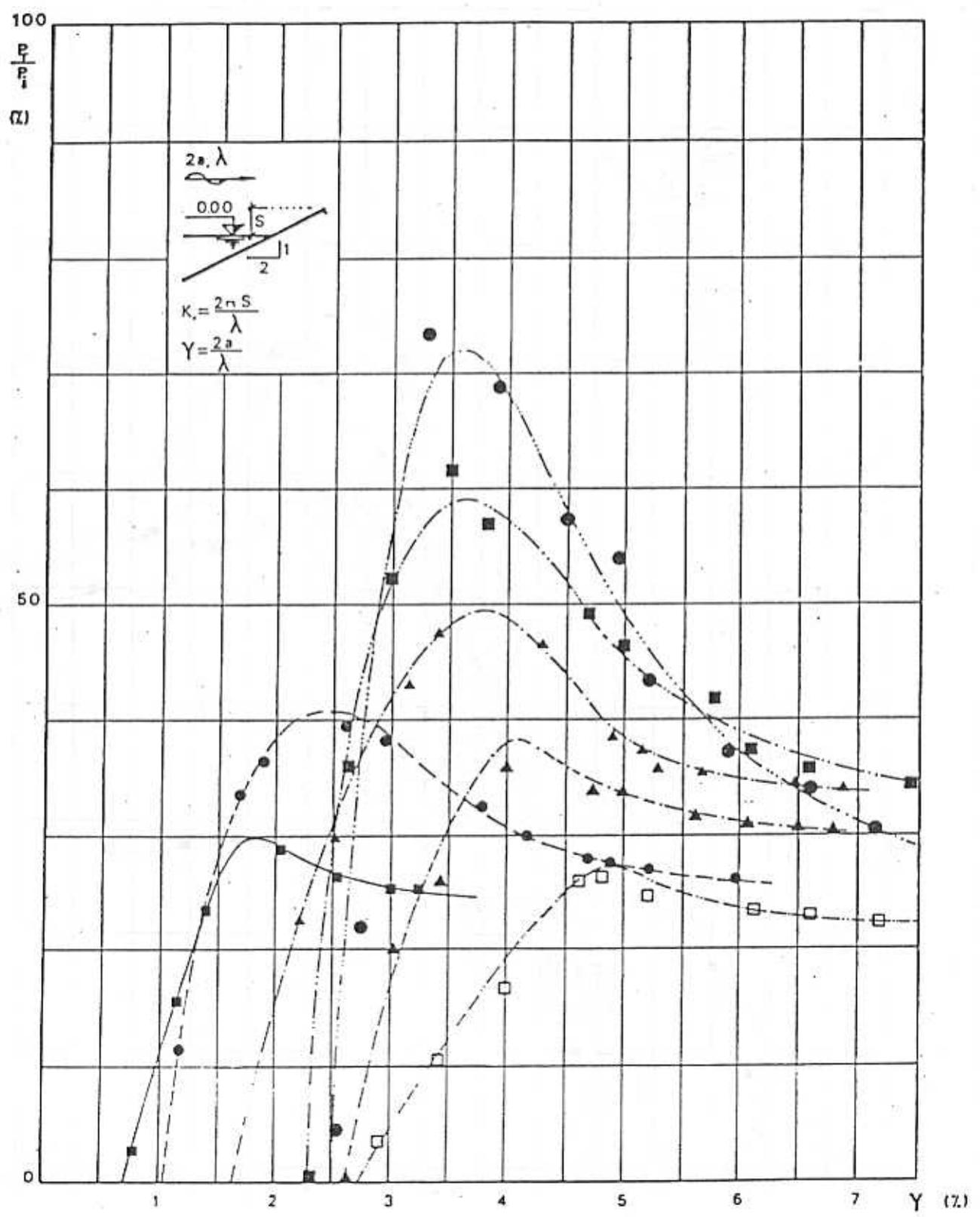
On constate tout d'abord que toutes les courbes  $R(\gamma)$  à  $K_0$  constant ont des allures semblables. Après une zone de rendement nul pour laquelle il n'y a pas de franchissement du seuil par les vagues, les courbes ont une pente très forte atteignant un maximum, puis, après une inflexion, semblent tendre vers une valeur asymptotique.

Pour la pente 1/2, la zone la plus favorable correspond à  $0.03 < \gamma < 0.045$  et  $0.2 < K_0 < 0.4$ ; on obtient alors des rendements compris entre 45 % et 73 %.

Pour la pente 1/1.5, cette zone se situe pour  $0.04 < \gamma < 0.065$  et  $0.4 < K_0 < 0.5$ ; les rendements sont alors compris entre 55 et 75 %.

Si la cambrure de la houle incidente est inférieure de 2,5 %, les rampes de déferlement ne donnent pas des rendements intéressants.

Sur la fig. 53, nous présentons la cambrure en fonction de  $\gamma$  pour les deux pentes 1/2 et 1/1.5. A chaque  $K_0$  correspond une cambrure critique  $\gamma_c$ , de telle façon que pour toute cambrure

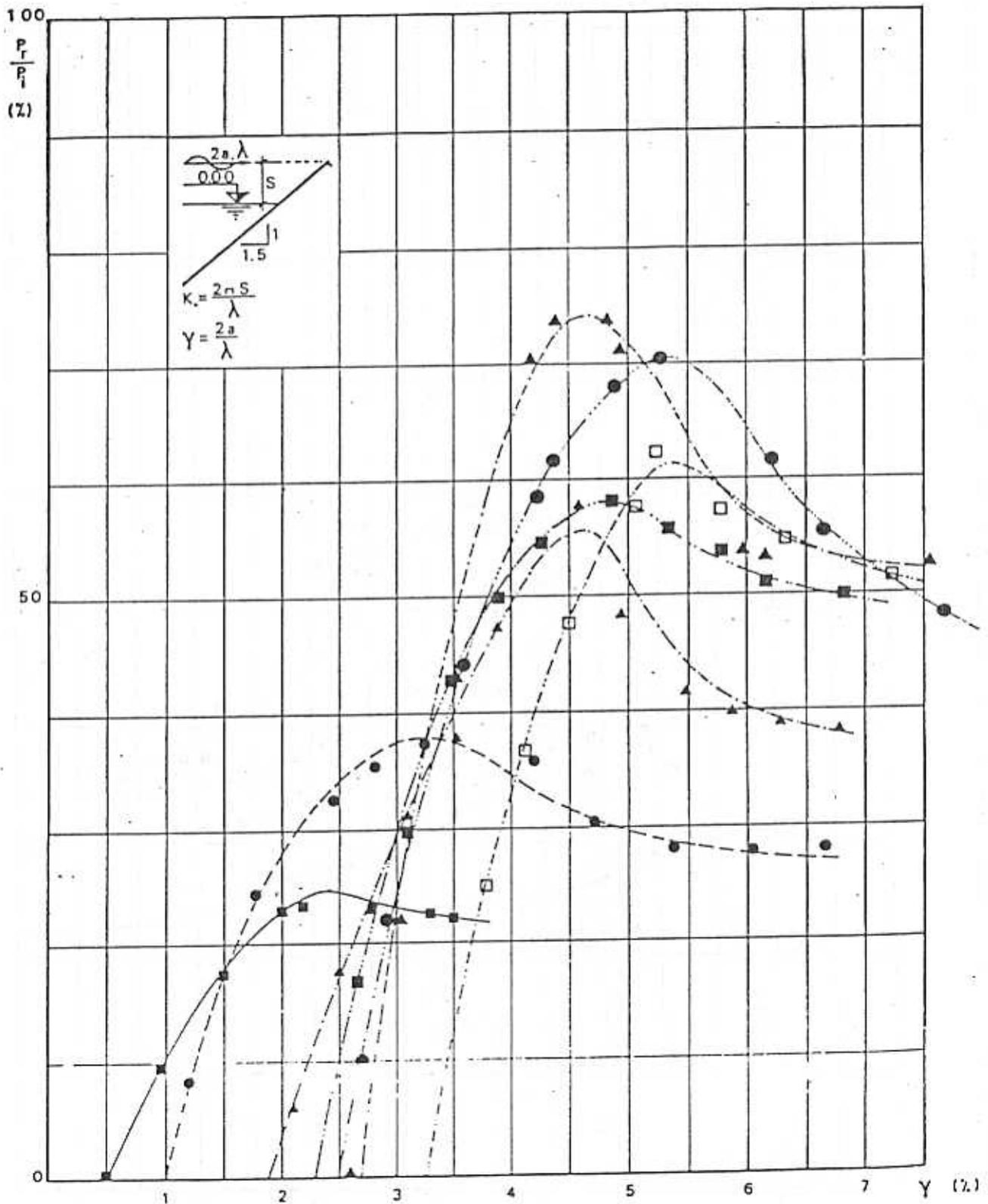


RAMPE DE DEFERLEMENT

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d'énergie récupéré / flux d'énergie incident) et le cambrure de la houle  $\gamma$ , pour différents  $K_s$ .

$K_s = 0.005$  ■     $K_s = 0.010$  ●     $K_s = 0.020$  ▲     $K_s = 0.030$  ▣     $K_s = 0.040$  ●     $K_s = 0.050$  ▲     $K_s = 0.060$  □

FIG. 51.-



## RAMPE DE DEFERLEMENT

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d'énergie récupéré/flux d'énergie incident)  
et, cambrure de la houle  $\gamma$ , pour différents  $K_s$ .

$K_s=0.05$  ■  $K_s=0.10$  ●  $K_s=0.20$  ▲  $K_s=0.30$  ■  $K_s=0.40$  ●  $K_s=0.50$  ▲  $K_s=0.60$  □

FIG. 52.

$\gamma < \gamma_c$  l'eau qui monte sur la pente ne dépasse pas le seuil, tandis que pour  $\gamma > \gamma_c$ , l'eau dépasse le seuil.

Les travaux sur le franchissement d'un seuil présentés en § 5.10 nous donnent, dans certains cas, des résultats comparables à ceux de la fig. 56 (v. Tableau II).

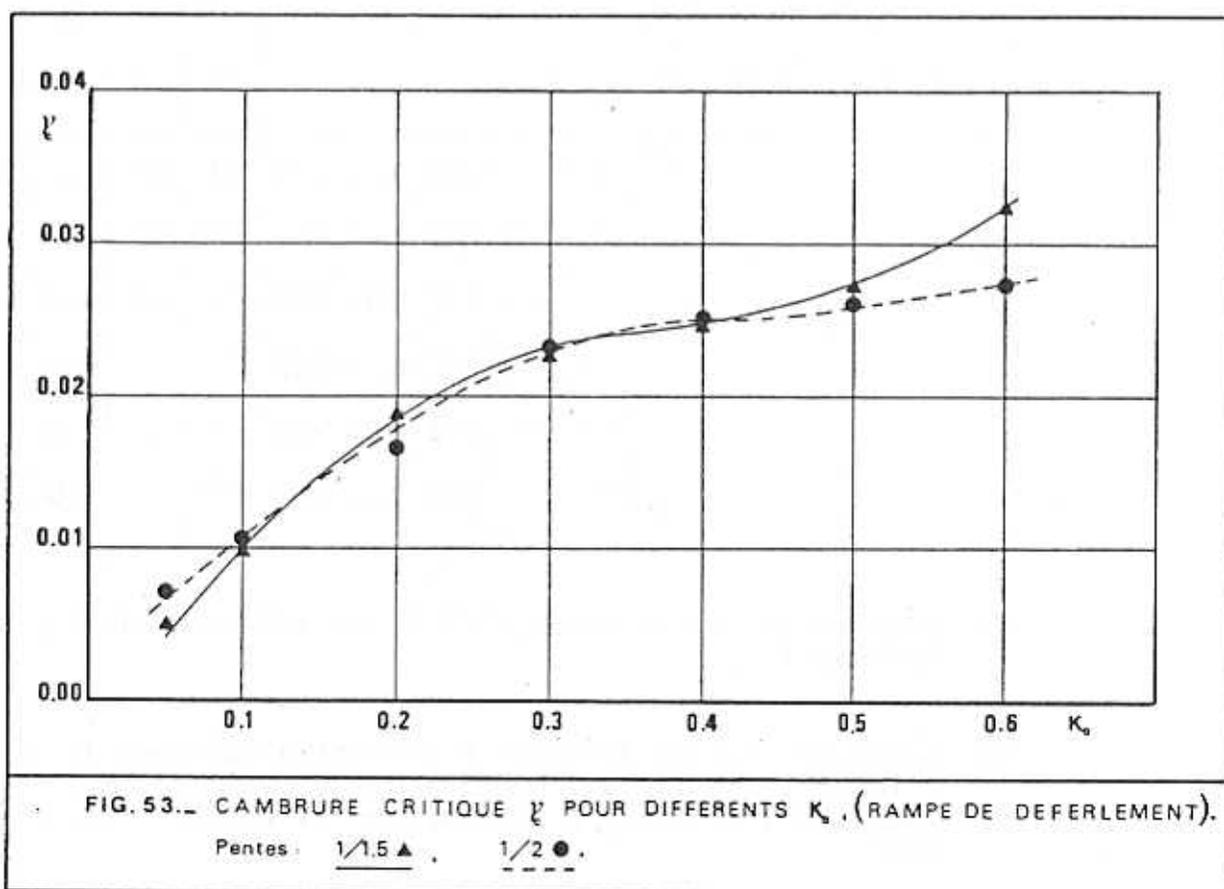


TABLEAU II  
RAMPES DE DEFERLEMENT - DIVERS RESULTATS EXPERIMENTAUX

D'après H.R.S. (1)					D'après O. SIBUL (2)					D'après la fig.56 (3)				
PENTE		$\gamma$	$K_o$	$\frac{P_r}{P_i}$	PENTE		$\gamma$	$K_o$	$\frac{P_r}{P_i}$	PENTE		$\gamma$	$K_o$	$\frac{P_r}{P_i}$
RAMPE	FOND	%			RAMPE	FOND				%	RAMPE			
1/2	1/1.5	5	0,16	29,6						1/2	1/2	5	0,16	36,3
"	"	5	0,19	29,4						"	"	5	0,19	4,00
"	"	5	0,24	34,7						"	"	5	0,24	45,6
"	"	5	0,32	36,4						"	"	5	0,32	51,8
"	"	5	0,38	30,5						"	"	5	0,39	56,8
					1/2	1/2	1,08	0,05	10,5	1/2	1/2	1,08	0,05	13,0
					"	"	1,08	0,10	0	"	"	1,08	0,10	0
					"	"	1,82	0,05	25,7	"	"	1,82	0,05	26,5
					"	"	1,82	0,10	29,7	"	"	1,82	0,10	24,0
					"	"	2,93	0,05	26,9	"	"	2,93	0,05	29,5
					"	"	2,93	0,10	38,4	"	"	2,93	0,10	36,6

- (1) La pente du fond de la mer (1/1.5) est différente de la pente de la rampe (1/2).
- (2) Les essais ont été effectués en profondeur relative  $h/\lambda = 0.236$ . L'influence du fond sur les caractéristiques de la houle incidente a été prise en compte à l'estimation des valeurs  $P_r/P_i$  présentées.
- (3) Ces résultats concernent des rampes lisses. L'effet de la tension superficielle a été pratiquement éliminé par la dissolution d'un agent détergeant dans l'eau du bassin.

## 7.2. Représentation analytique des résultats

Le nombre d'essais effectués, ( $n \cong 300$ ), est relativement faible si l'on tient compte de la complexité du phénomène. Cependant, pour chacune des pentes examinées, nous avons pu tracer les courbes correspondant à des différents  $K_0$ . Constatant la similitude globale de ces courbes, nous en avons cherché une représentation analytique en essayant trois méthodes différentes. Les deux premières (v. bibl. 15) ont donné de bons résultats en ce qui concerne le lissage de chacune des courbes. Ici, nous présentons la troisième méthode. Sur la fig. 54, nous donnons quatre exemples pris parmi les résultats de la fig. 51.

Les courbes montrent le lissage par une expression du type :

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{\gamma - \gamma_c}{10A(\gamma - \gamma_c)^2 + 0.1B} \quad (70)$$

où  $R$  est une fonction de  $\gamma$  et de  $K_0$

$A$  est une fonction de  $K_0$

$B$  est une fonction de  $K_0$

$\gamma_c$  est une fonction de  $K_0$

Les coefficients  $A$ ,  $B$  et  $\gamma_c$  pour chaque courbe sont déterminés par une méthode de moindres carrés (système linéaire surdéterminé). La fig. 53 donne pour chaque pente, l'évolution de  $\gamma_c$  en fonction du nombre d'onde adimensionnalisé  $K_0$ .

Le lissage de ces courbes nous a permis de trouver une expression analytique de  $\gamma_c(K_o)$  pour chacune de deux pentes :

$$\text{Pente de } \frac{1}{2} \cdot \gamma_c = 2.029 K_o^3 - 2.679 K_o^2 + 1.354 K_o \quad (71)$$

$$\text{Pente de } \frac{1}{1,5} \cdot \gamma_c = 2.154 K_o^3 - 2.744 K_o^2 + 1.402 K_o \quad (72)$$

La fig. 55 donne pour chaque pente l'évolution des coefficients A et B en fonction de  $K_o$ . Le lissage de ces coefficients nous a permis de donner les expressions analytiques suivantes :

$$\text{Pente de } \frac{1}{2} \left\{ \begin{array}{l} A = 13.45 - 2.105 \sqrt{14.44 - (10K_o - 3.4)^2} \quad (73) \\ B = 1.13 - 0.244 \sqrt{16.81 - (10K_o - 3)^2} - \frac{0.072}{\text{ch}(30K_o - 12)} \quad (74) \end{array} \right.$$

$$\text{Pente de } \frac{1}{1.50} \left\{ \begin{array}{l} A = 9.7 - 1.6 \sqrt{16.81 - (10K_o - 4.58)^2} \quad (75) \\ B = 0.742 - 0.104 \sqrt{31.36 - (10K_o - 4.65)^2} + \frac{0.05}{\text{ch}(60K_o - 3)} \quad (76) \end{array} \right.$$

Ainsi, pour chaque pente, nous avons tracé les courbes de  $R(\gamma, K_o)$  dans les fig. 56 et 57. Le domaine d'application de ces deux modèles est déterminé par les expressions suivantes :

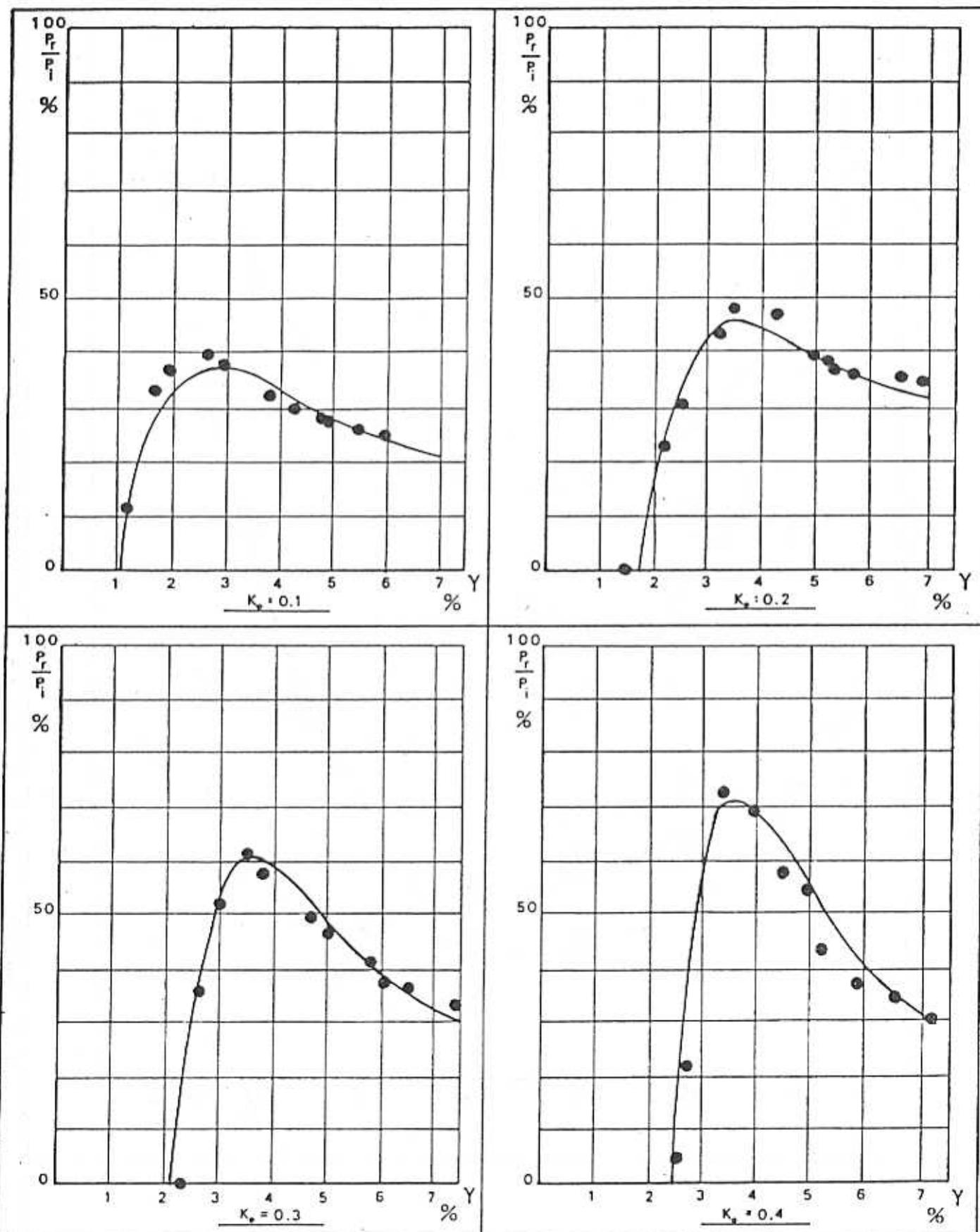


FIG. 54. — RAMPE DE DEFERLEMENT, EXEMPLES DE LISSAGE.

PENTE 1/2. points experimentaux ●.

$$\frac{P_r}{P_i} = \frac{Y - Y_c}{10 A (Y - Y_c)^2 + 0.1B}$$

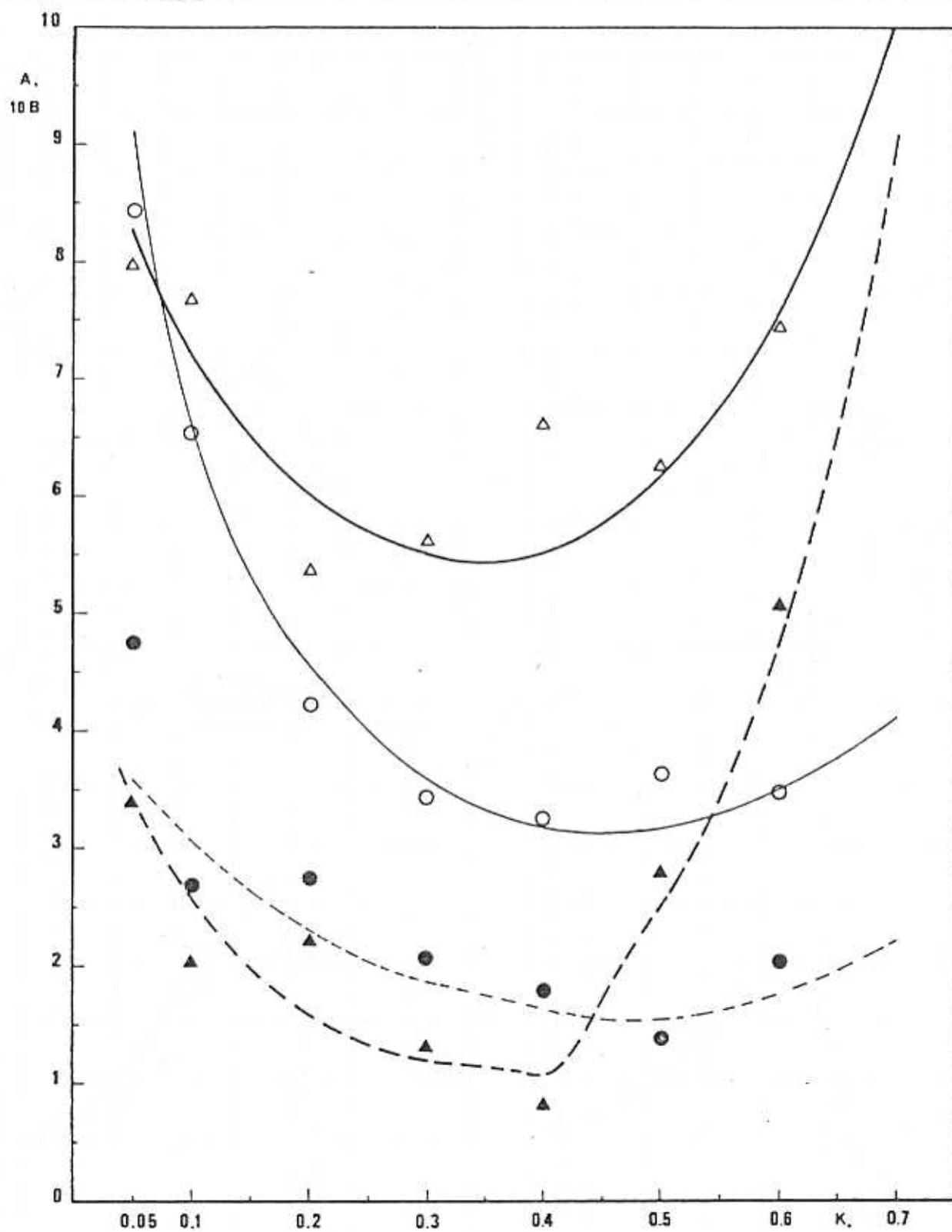
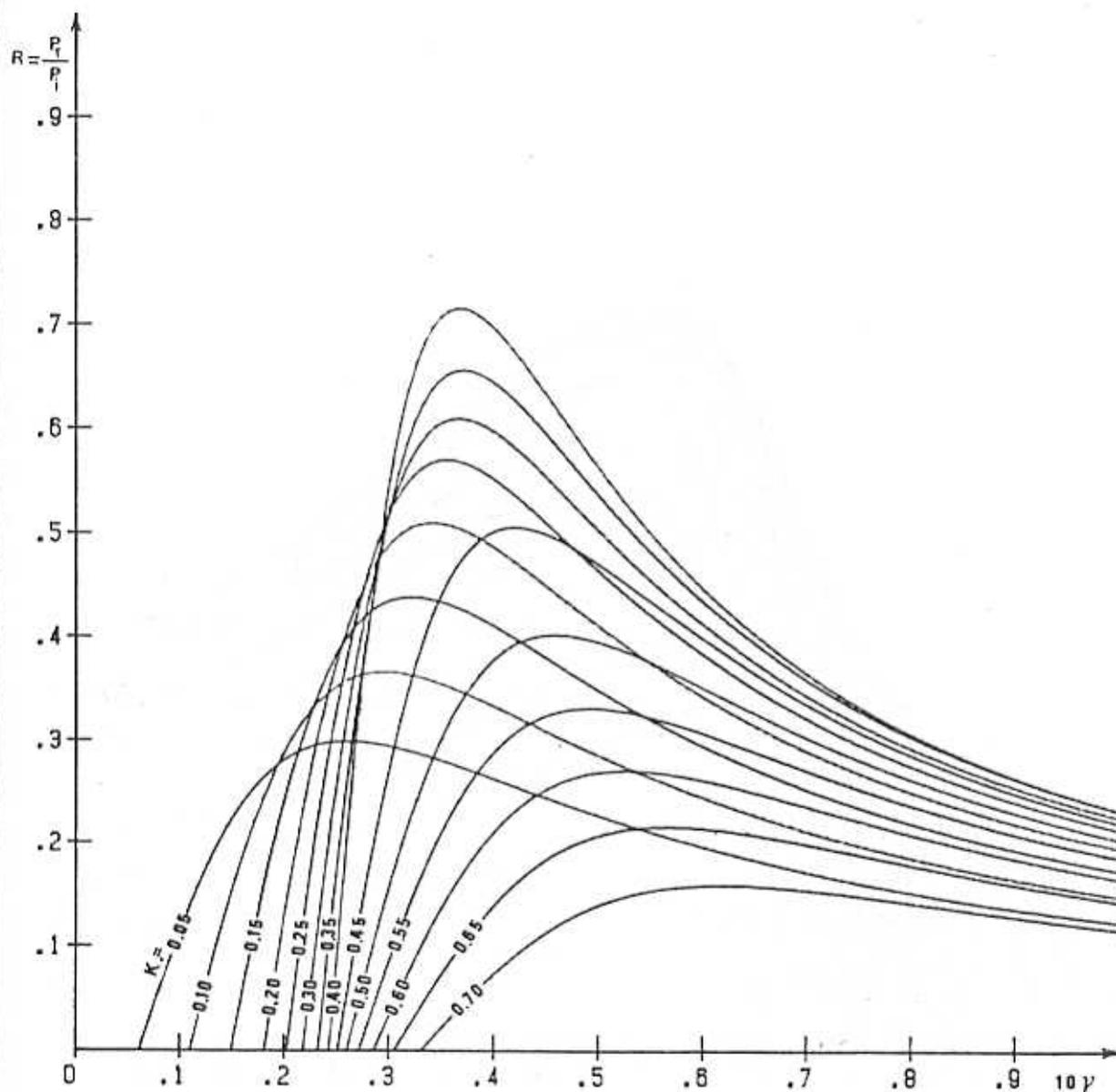


FIG. 55. COEFFICIENTS A ET B. (V. FIG. 56, 57). PAR RAPPORT A K.

PENTE 1/2 A  $\Delta$  ———  
 ——— 10B  $\Delta$  - - - -

PENTE 1/15 A  $\circ$  ———  
 - - - - 10B  $\bullet$  - - - -



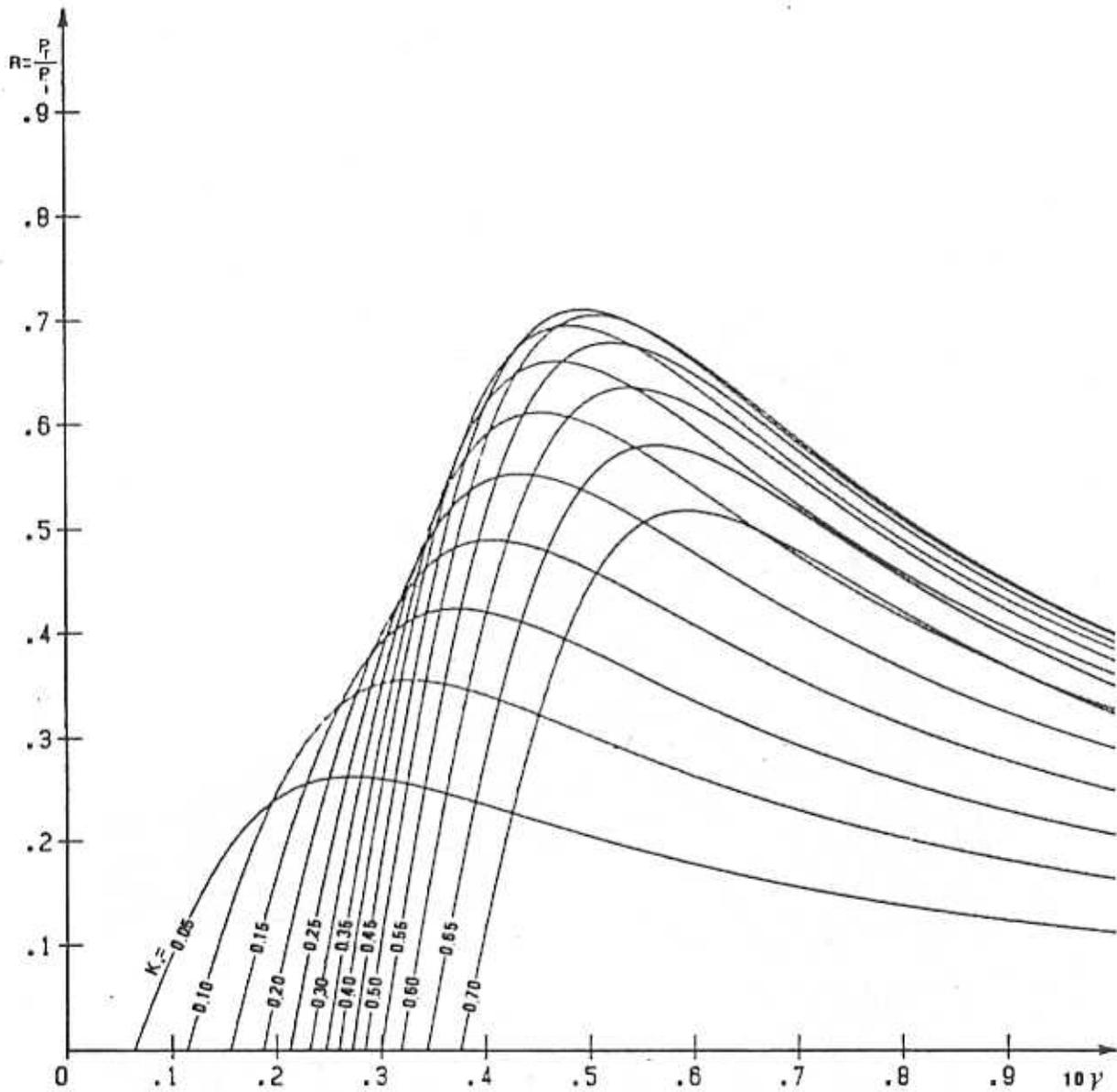
$$\frac{P}{P_1} = \frac{\gamma - \gamma_c}{10 A (\gamma - \gamma_c)^2 + 0.1B}$$

$$\gamma_c = 2.029 K^3 - 2.679 K^2 + 1.354 K.$$

$$A = 13.45 - 2.105 \sqrt{14.44 - (10K - 3.40)^2}$$

$$B = 1.13 - 0.244 \sqrt{16.81 - (10K - 3)^2} - \frac{0.072}{\text{ch}(30K - 12)}$$

FIG. 56. — RAMPE DE DEFFERLEMENT . PENTE 1/2 ;  $R = \frac{P}{P_1}$  par rapport à  $K$ , et  $\gamma$  . .



$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{y - \lambda_c}{10A(y - \lambda_c)^2 + 0.1B}$$

$$\lambda_c = 2.154 K^3 - 2.744 K^2 + 1.402 K$$

$$A = 9.7 - 1.6 \sqrt{16.81 - (10K - 4.58)^2}$$

$$B = 0.742 - 0.104 \sqrt{31.36 - (10K - 4.65)^2} + \frac{0.05}{\text{ch}(60K - 3)}$$

FIG. 57. — RAMPE DE DEFERLEMENT, PENTE 1/15;  $R = \frac{P_1}{P_2}$  par rapport à  $K$ , et  $\gamma$ .

$$0.05 \leq K_0 \leq 0.70, \quad 0 \leq \gamma \leq 0.07 \quad (77)$$

Etant donné que la hauteur du seuil  $S$  des rampes de déferlement est essentiellement comprise entre 2,0 et 6,0 mètres, la cambrure de la houle océanique située pratiquement en dessous de 7 % avec une longueur d'onde intéressante à partir de 30 m, les modèles des fig. 56, 57, peuvent être utilisés facilement pour les pentes de 1/2 et 1/1.5.

### 7.3. Application à des cas particuliers

Nous utilisons ici les résultats précédents pour donner une appréciation chiffrée de l'énergie récupérable par les rampes de déferlement dans des conditions réalistes et évaluer l'influence du phénomène de la marée sur le rendement de ces dispositifs.

Nous avons examiné : 7 hauteurs de seuil (1, 2, 3, 4, 5, 6, et 7 m), deux pentes (1/2 et 1/1,5), en houle régulière d'une période de  $T = 8$  sec, pour les cambrures de 1,5 %, 2,5 %, 3 % et 3,5 %, qui correspondent aux amplitudes creux-crête  $H$  de 1,5, 2,5, 3,0 et 3,5 m.

Les résultats sont consignés dans le Tableau III et représentés sur la fig. 58.

On peut constater que dans le cas examiné ( $T = 8$  sec), la pente de 1/2 donne des résultats nettement plus favorables que la pente de 1/1,5, pour toutes les hauteurs de seuil, de 1 à 7 m.

Les maxima des courbes de la fig. 58 correspondent à des hauteurs de seuil optimales pour chacune des pentes et pour les cambrures examinées, ce qui constitue un élément utile pour le

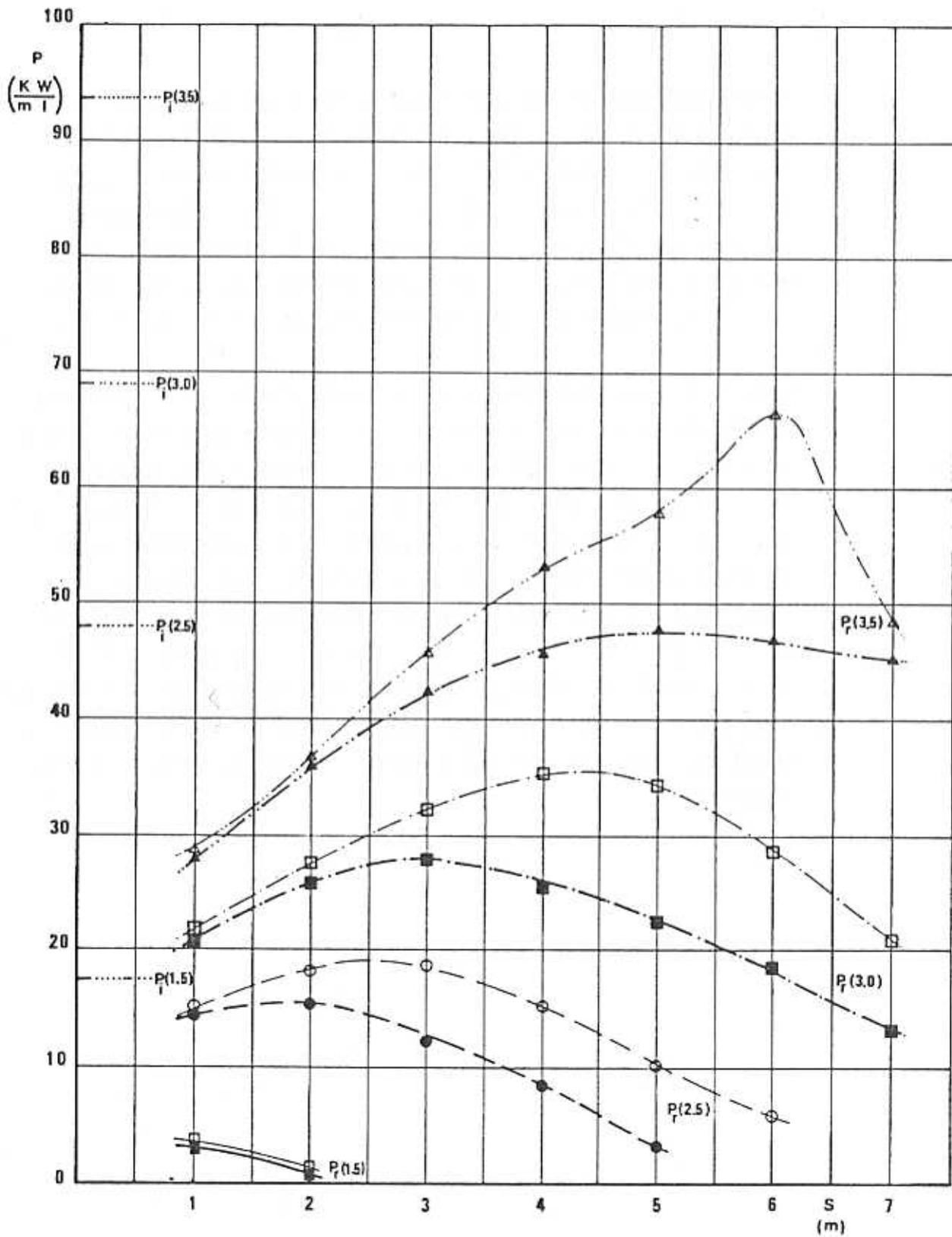


FIG. 58. — RAMPE DE DEFERLEMENT — Application en houle régulière...

Pente 1/1.5	■ —————	● - - - - -	■ - · - · - ·	▲ ······
Pente 1/2	□ —————	○ - - - - -	□ - · - · - ·	△ ······
	H=1.5m. T=8s	H=2.5m. T=8s	H=3m. T=8s	H=3.5m. T=8s

dimensionnement de ces ouvrages P.e. pour une houle monochromatique de  $T = 8$  sec,  $\gamma = 2,5 \%$  la hauteur du seuil optimal  $S_{OPT}$  est 2 m pour la pente de 1/1,50 et 2,5 m pour la pente de 1/2. Si  $T = 8$  sec,  $\gamma = 3 \%$   $S_{OPT} = 3,0$  m pour la pente de 1/2, etc. Ce qui prouve que la pente de 1/2 est mieux adaptée à des hauteurs de seuil plus élevées que la pente de 1/1,50 pour la houle de  $T = 8$  sec et  $1,5 \% < \gamma < 3,5 \%$ .

Pour la houle monochromatique examinée, l'effet de la marée ne semble pas avoir une importance significative pour des marnages de 1 à 3 m (v. fig. 58). P.e pour la pente de 1/2, une houle de  $T = 8$  sec et  $\gamma = 3 \%$ , entre  $S = 2,5$  m et  $S = 5,80$  m (marnage  $H_m = 3,30$  m) le changement des caractéristiques de la houle en combinaison avec le phénomène de la marée a une répercussion importante sur l'énergie récupérée. P.e si on passe de  $\gamma = 2,5 \%$  à  $\gamma = 3,0 \%$  ( $T = 8$  sec, pente de 1/2) le changement de l'énergie récupérée par le même marnage  $H_m = 3,30$  peut atteindre 500 %. Par conséquent, le choix de la hauteur du seuil doit se baser sur des données de houle et de marées très complètes.

## 8. TRIEDRES A HOULE

### 8.1. Essais définitifs

Dans le cas où la pente de la base des trièdres  $\alpha$  et la pente du fond de la mer  $\beta$  sont les mêmes, nous avons examiné les 7 types de trièdres, (v. fig. 49), en houle régulière unidirectionnelle. Ces essais ont été effectués pour 3 pentes différentes (1/2,5, 1/2, 1/1,5) et 7 nombres d'onde adimensionnalisés  $K_0$  (0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7), en balayant systématiquement en cambrure.

Ces résultats expérimentaux sont présentés sur les figures :

59 à 65 pour la pente de 1/2,5,

66 à 72 pour la pente de 1/2,

73 à 79 pour la pente de 1/1,5.

Sur les figures 80 à 86, nous faisons la comparaison entre les performances des 7 types des trièdres et des rampes de déferlement, pour certaines valeurs de  $K_0$  et pour les pentes de 1/2 et 1/1,5.

Pour tester l'influence du changement de la pente du fond de la mer, (la pente de la base des trièdres restant fixe), sur le rendement, nous avons testé les 7 types des trièdres en houle régulière unidirectionnelle dans le cas où  $K_0 = 0.4$ . Cette série d'essais a été faite pour les trois pentes de la base des trièdres en changeant la pente du fond de la mer de 1/1 et 1/4, avec balayage systématique en cambrure. Ces derniers résultats sont présentés sur les figures :

87 à 93 pour la pente de la base des trièdres 1/2,5

94 à 100 pour la pente de la base des trièdres 1/2

101 à 107 pour la pente de la base des trièdres 1/1,5

Les courbes du rendement  $R(\gamma)$  à  $K_0$  constant présentent pour toutes les pentes des allures semblables à quelques exceptions près : après une zone de rendement nul, les courbes présentent une pente (d'autant plus forte que  $K_0$  est petit), atteignant un maximum, puis, après une inflexion ont une tendance asymptotique.

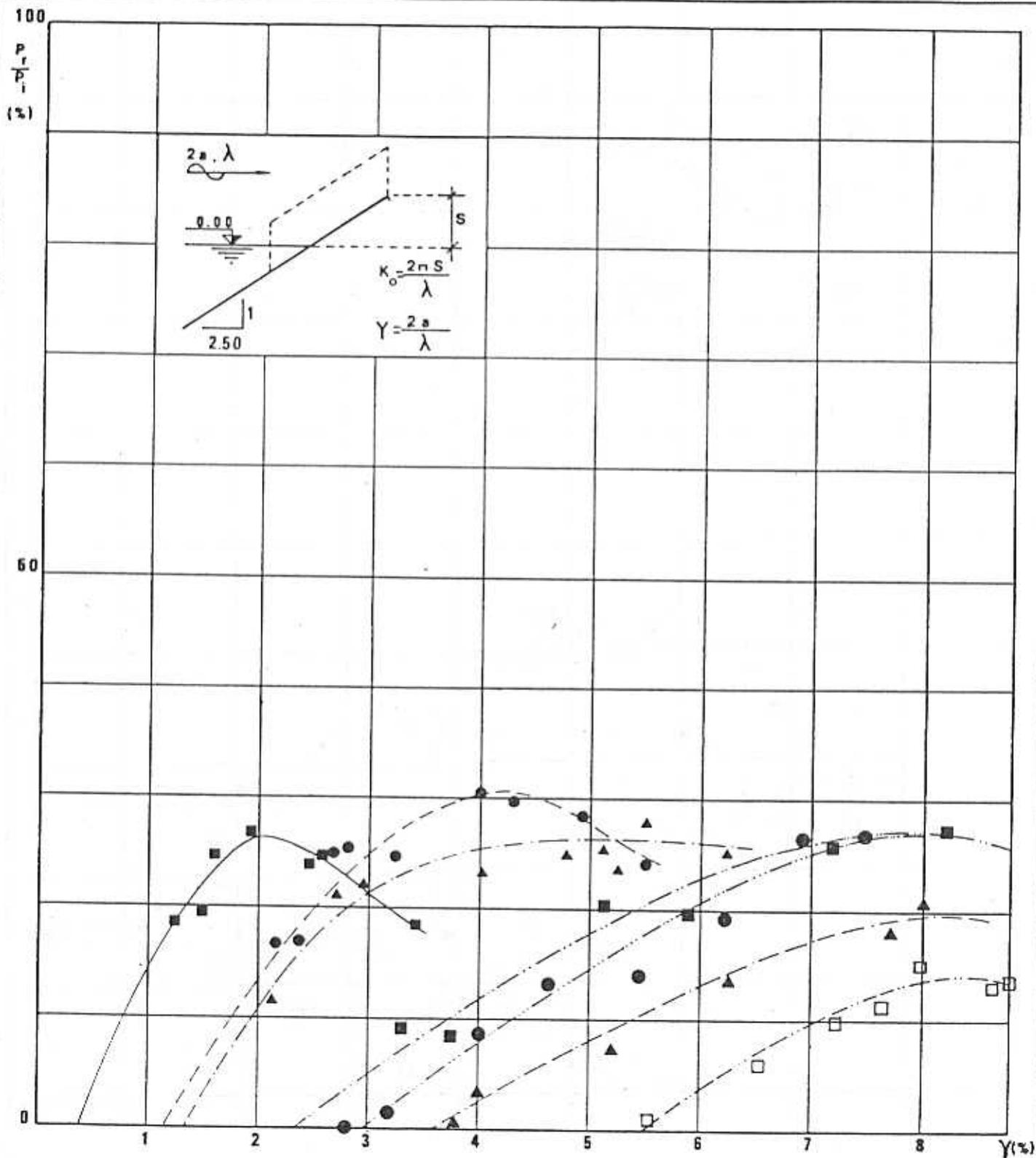
- Pour la pente de la base des trièdres 1/2,50, la zone la plus favorable correspond à  $0,02 \leq \gamma \leq 0,05$  pour  $0,2 \leq K_0 \leq 0,3$ , pour tous les types de trièdres ( $r = 2,5$  à 10). La pente de la première partie des courbes correspondant à  $K_0 < 0,30$  est la plus forte que celle des courbes à  $K_0 > 0,30$ .

Cette particularité est probablement due au changement du type de déferlement (gonflant pour  $K_0 < 0,3$ , plongeant si

$K_0 > 0,3$ ). Dans le meilleur des cas (trièdres  $r = 5$ ,  $K_0 = 0,2$ ,  $\gamma = 0,03$ ), le rendement est de l'ordre de 50 %. Le trièdre de  $r = 5$  est en général le plus favorable, tandis que celui à  $r = 10$  est le moins intéressant, offrant des rendements typiquement inférieurs à 25 % (v. fig. 59 à 65).

- Pour la pente de 1/2 la zone des meilleurs rendements correspond à  $0,015 \leq \gamma \leq 0,045$  pour  $0,1 \leq K_0 \leq 0,4$  et  $3 \leq r \leq 5$ . La distinction en deux familles de courbes, ( $K_0 < 0,30$ ,  $K_0 > 0,30$ ) est valable, comme au cas de la pente 1/2,50. Le trièdre à  $r = 5$  donne les meilleurs rendements atteignant 68 % pour  $\gamma = 2,6\%$  et  $K_0 = 0,300$ . Le trièdre à  $r = 10$  donne des rendements constamment inférieurs à 40 % (v. fig. 66 à 72).

- Pour la pente de 1/1,5, la zone la plus favorable est déplacée vers des cambrures plus grandes  $0,03 \leq \gamma \leq 0,06$



### TRIEDRES A HOULE

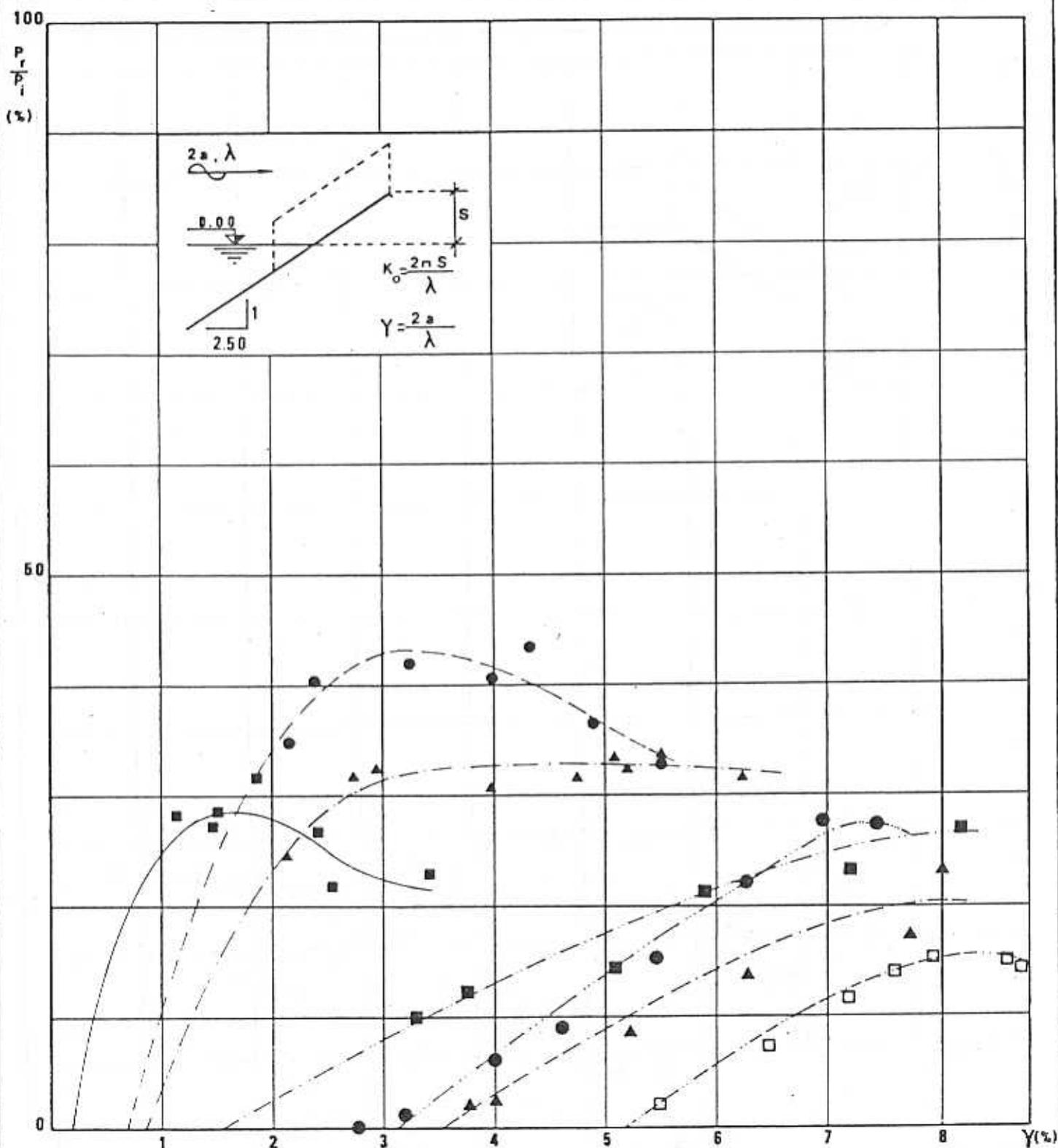
Rapport  $\frac{P_r}{P_i}$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r=2.50$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

$K_0=0.100$     $K_0=0.200$     $K_0=0.300$     $K_0=0.400$     $K_0=0.500$     $K_0=0.600$     $K_0=0.700$

■   ●   ▲   ■   ●   ▲   □

FIG. 59.



### TRIEDRES A HOULE

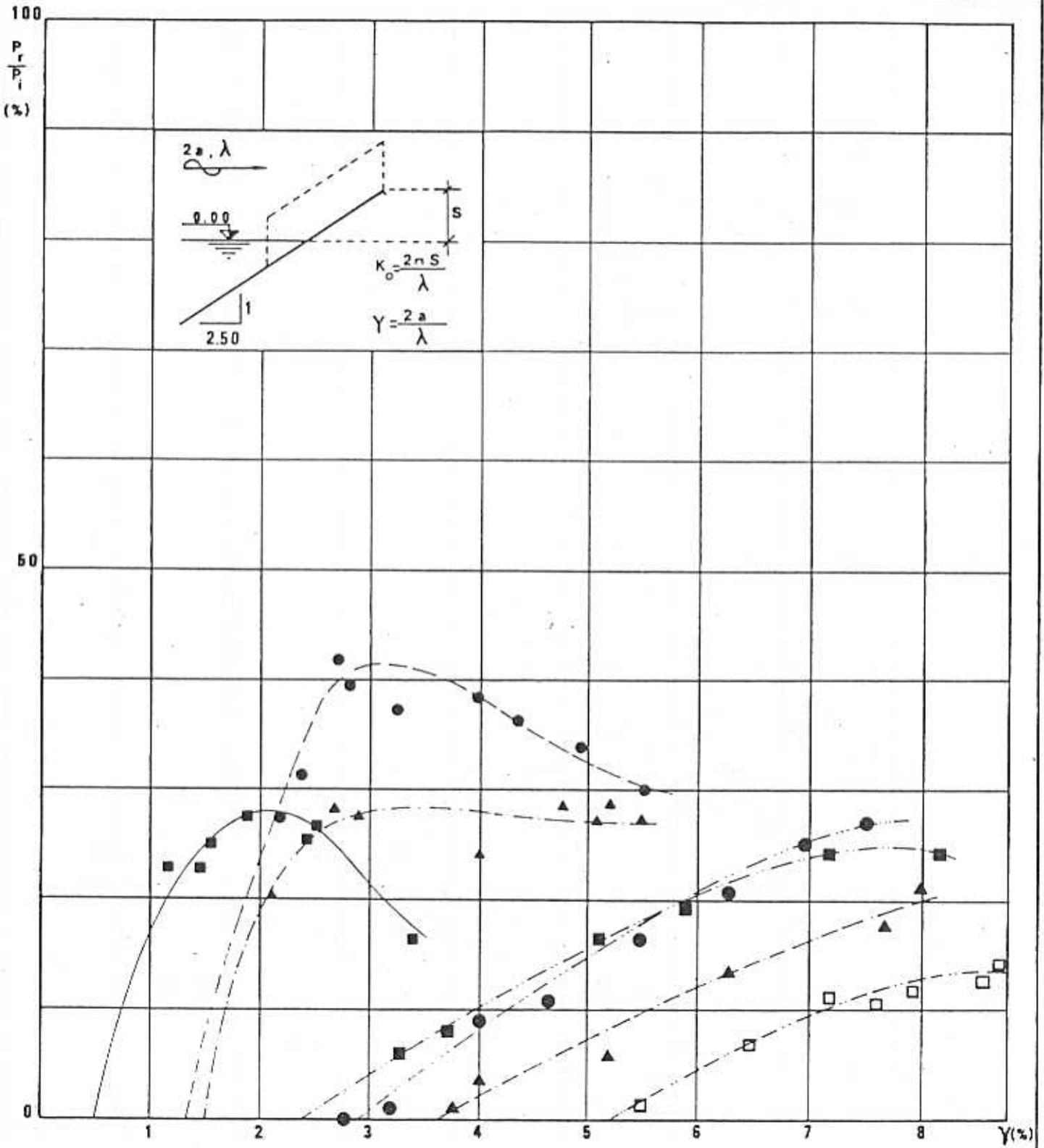
Rapport  $\frac{P_r}{P_i}$  (flux d'énergie récupéré/flux d'énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r=3.00$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

$K_0=0.100$   $K_0=0.200$   $K_0=0.300$   $K_0=0.400$   $K_0=0.500$   $K_0=0.600$   $K_0=0.700$

■ ● ▲ ■ ● ▲ □

FIG. 60. \_



TRIEDRES A HOULE

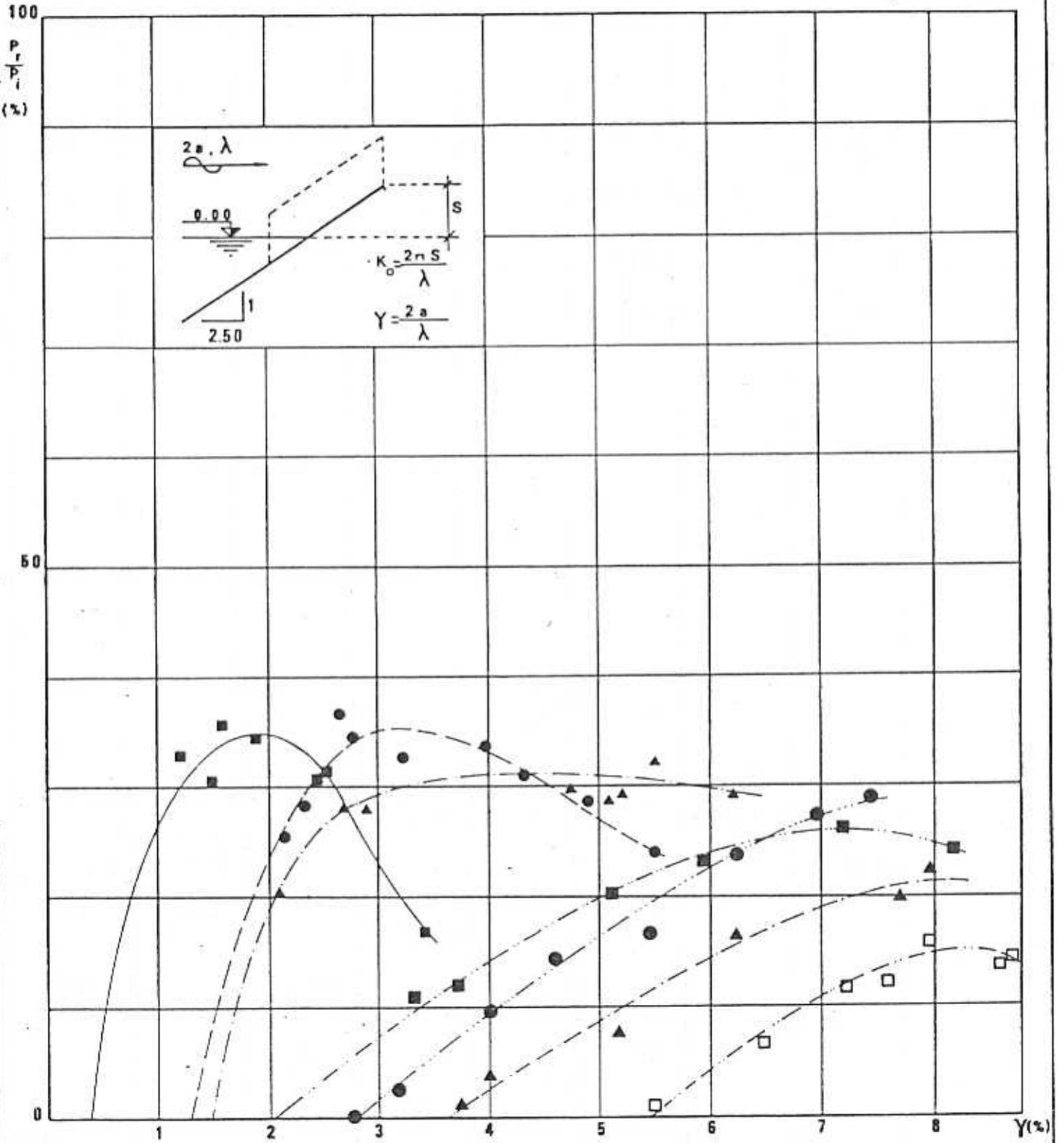
Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r=3.75$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

$K_0=0.100$   $K_0=0.200$   $K_0=0.300$   $K_0=0.400$   $K_0=0.500$   $K_0=0.600$   $K_0=0.700$

■ ● ▲ ■ ● ▲ □

FIG. 61..



TRIEDRES A HOULE

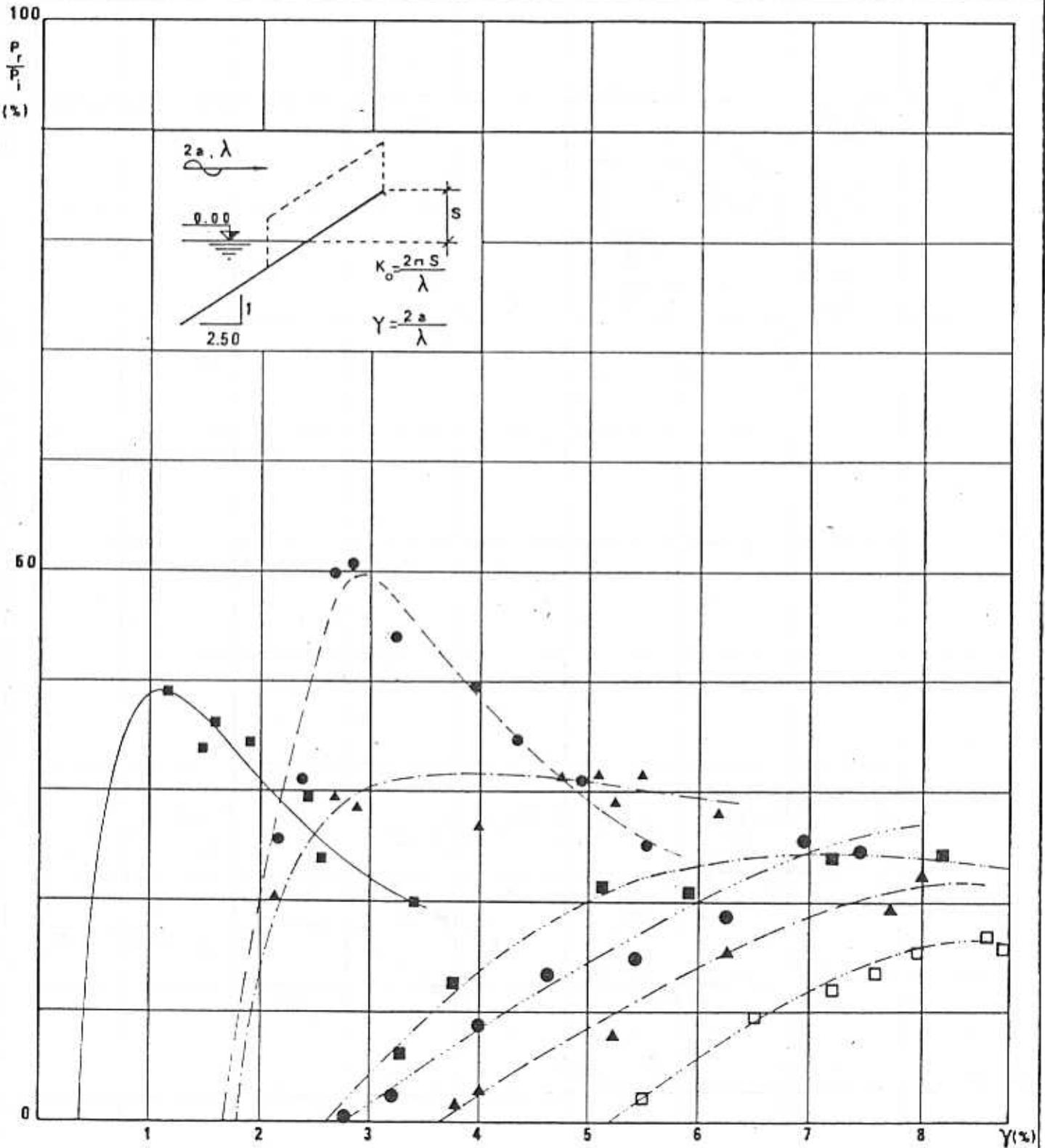
Rapport  $\frac{P_r}{P_i}$  (flux d'énergie récupéré/flux d'énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r=4.00$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

$K_0=0.100$     $K_0=0.200$     $K_0=0.300$     $K_0=0.400$     $K_0=0.500$     $K_0=0.600$     $K_0=0.700$

■   ●   ▲   ■   ●   ▲   □

FIG. 62. -



TRIEDRES A HOULE

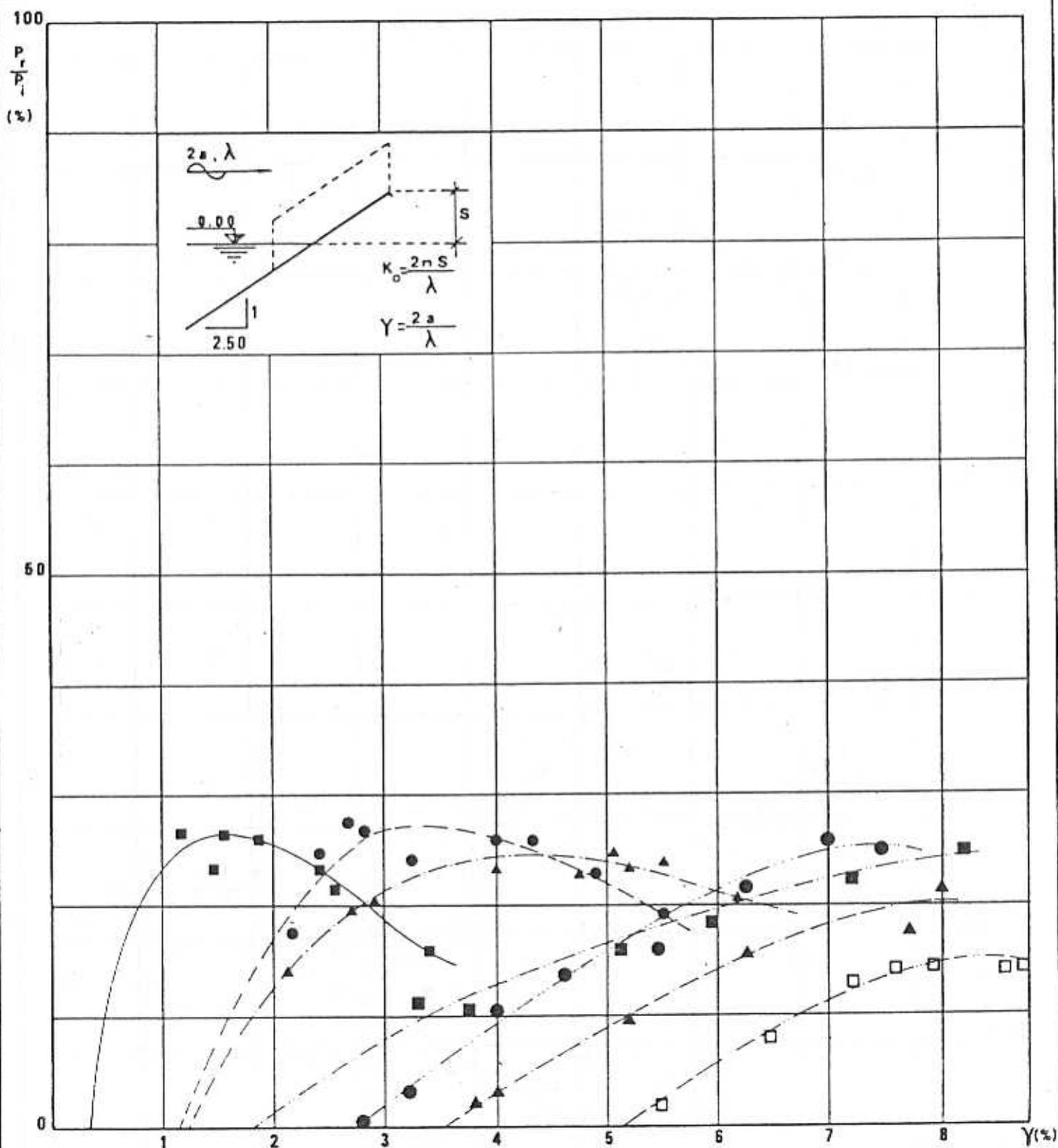
Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r=5.00$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

$K_o=0.100$     $K_o=0.200$     $K_o=0.300$     $K_o=0.400$     $K_o=0.500$     $K_o=0.600$     $K_o=0.700$

■   ●   ▲   ■   ●   ▲   □

FIG. 83. —



### TRIEDRES A HOULE

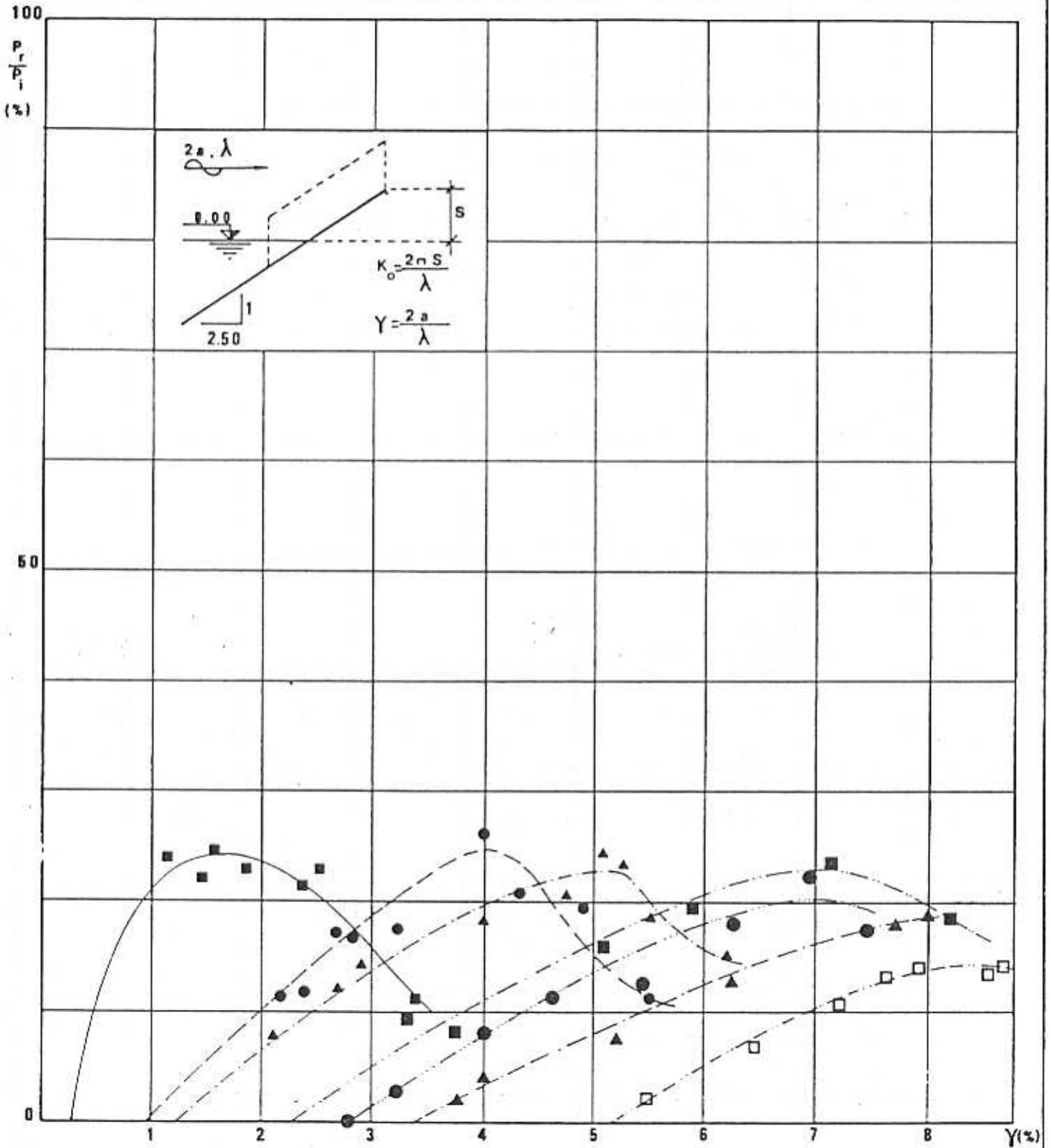
Rapport  $\frac{P_r}{P_i}$  (flux d'énergie récupéré/flux d'énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r=7.50$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

$K_0 = 0.100$     $K_0 = 0.200$     $K_0 = 0.300$     $K_0 = 0.400$     $K_0 = 0.500$     $K_0 = 0.600$     $K_0 = 0.700$



FIG. 64..



TRIEDRES A HOULE

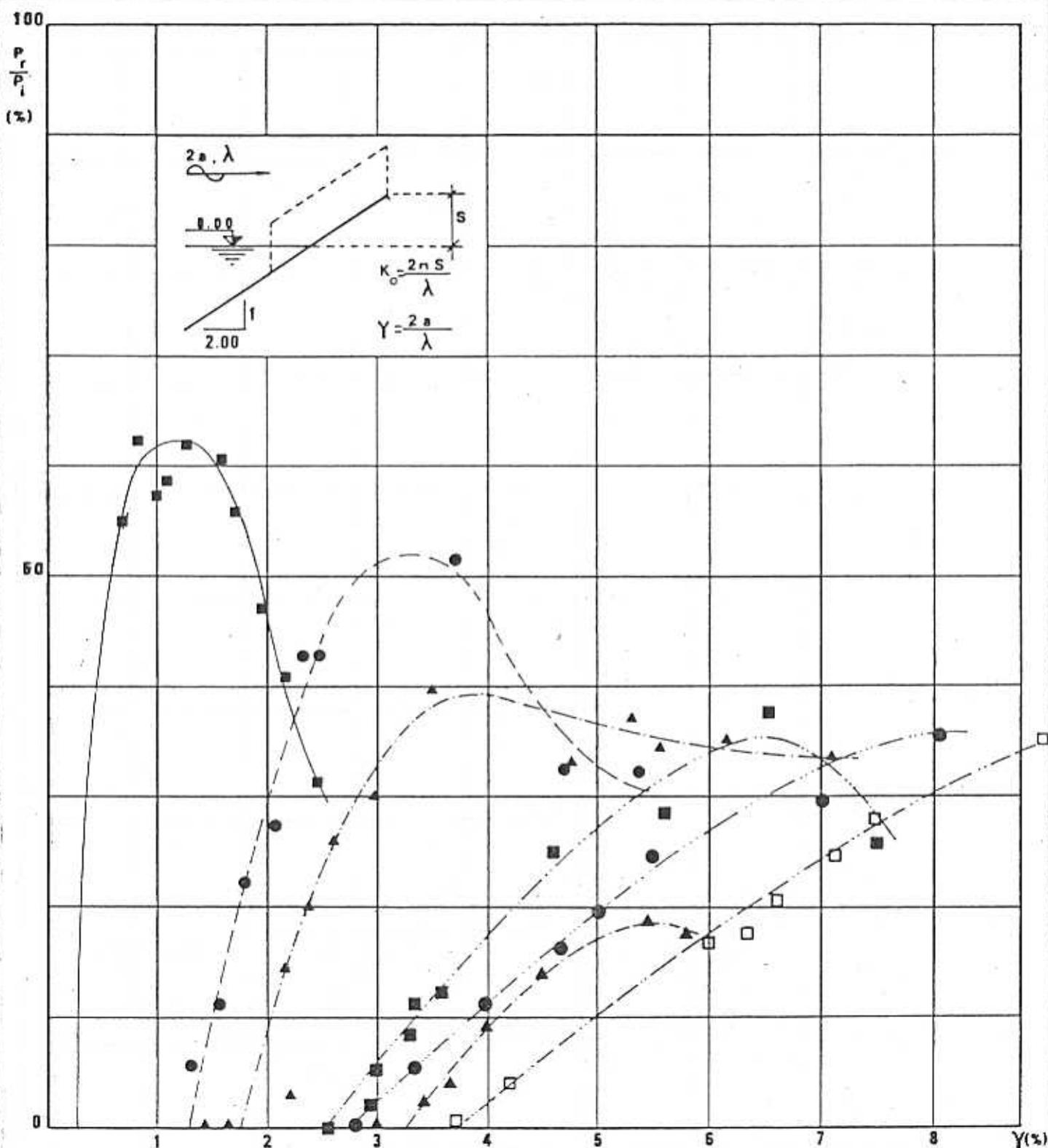
Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r=10.00$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

$K_o = 0.100$     $K_o = 0.200$     $K_o = 0.300$     $K_o = 0.400$     $K_o = 0.500$     $K_o = 0.600$     $K_o = 0.700$

■   ●   ▲   ■   ●   ▲   □

FIG.65..



### TRIEDRES A HOULE

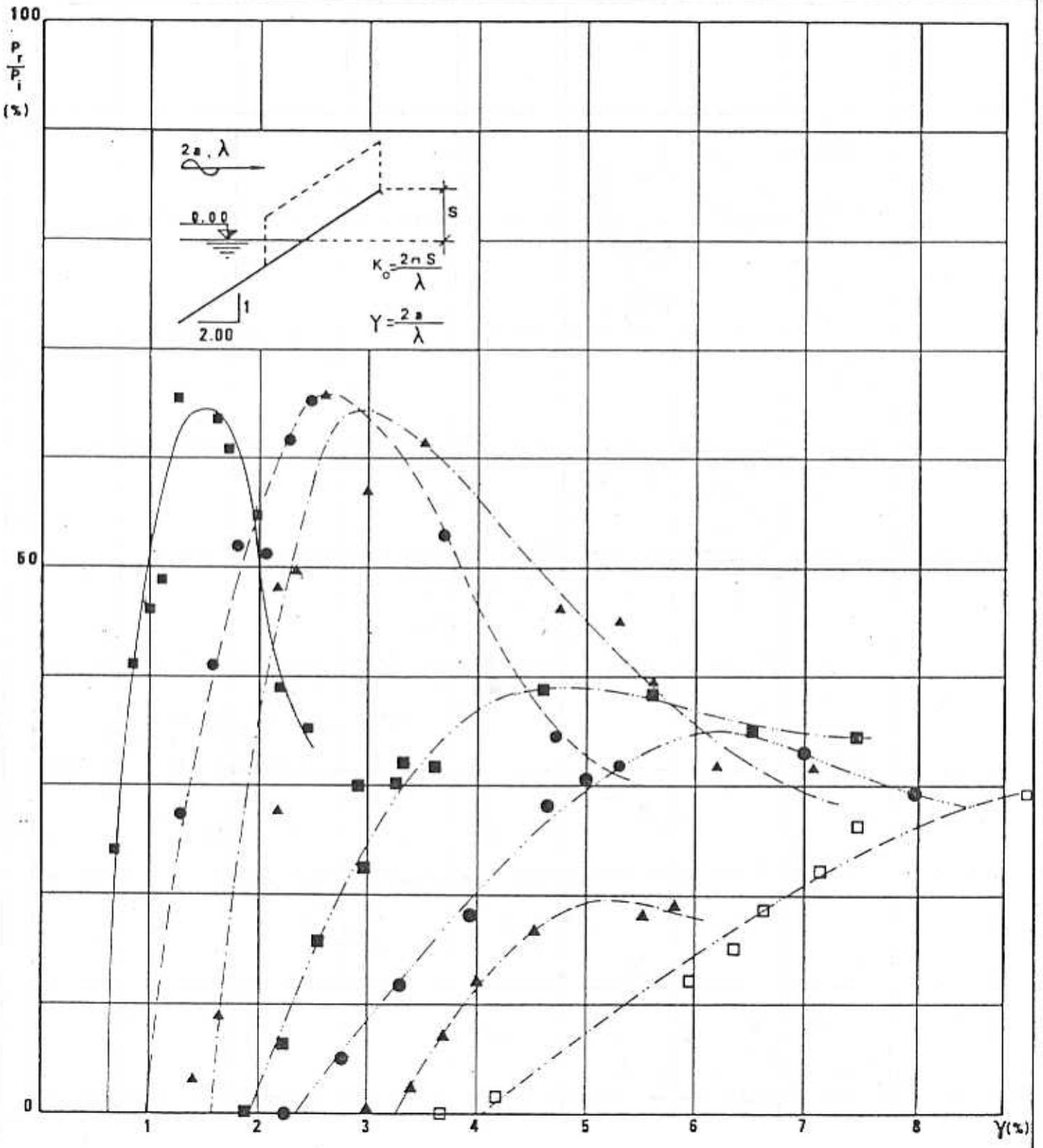
Rapport  $\frac{P_r}{P_i}$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r=2.50$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

$K_0=0.100$   $K_0=0.200$   $K_0=0.300$   $K_0=0.400$   $K_0=0.500$   $K_0=0.600$   $K_0=0.700$

■ ● ▲ ◼ ● ▲ □

FIG. 66.



TRIEDRES A HOULE

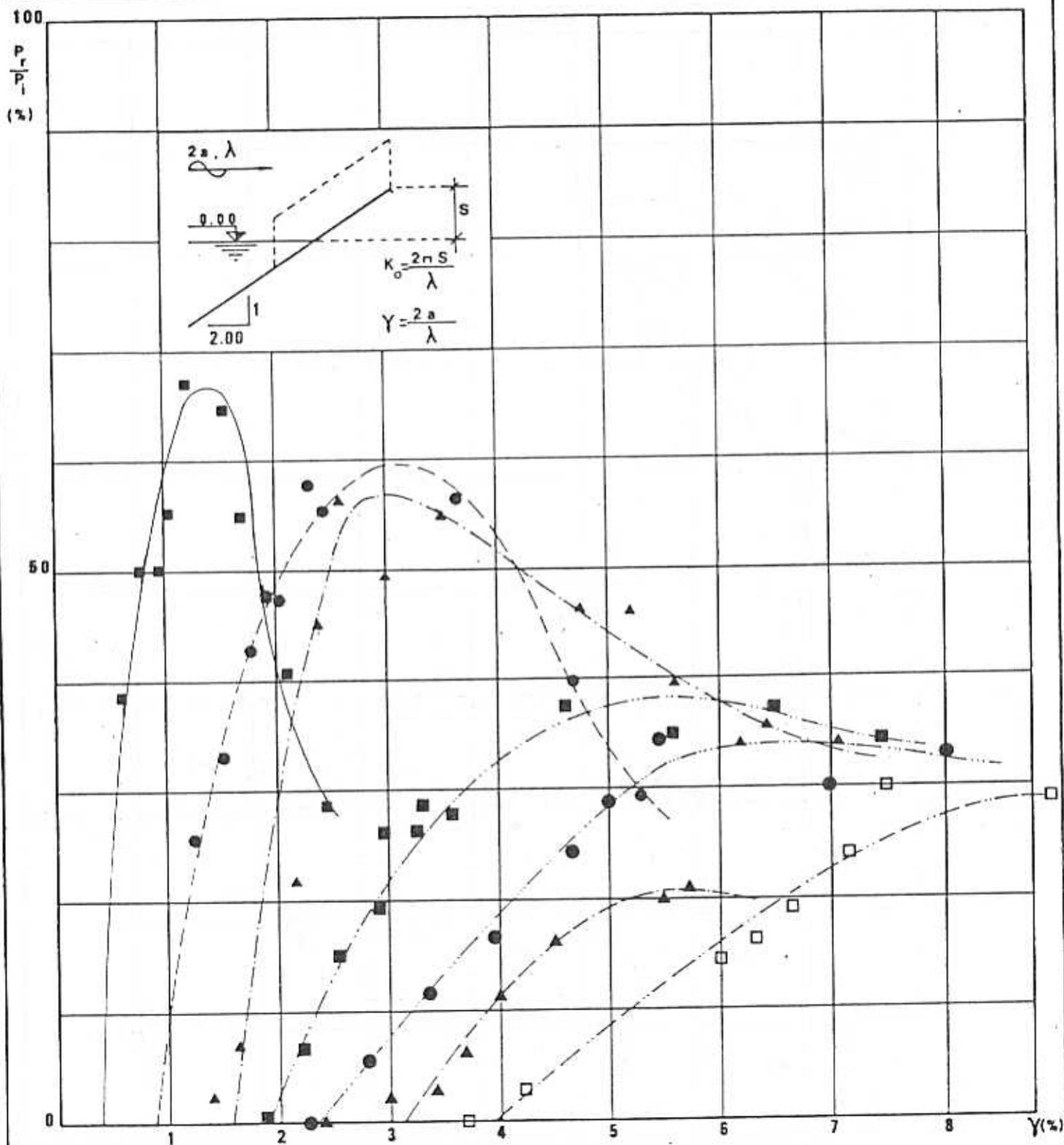
Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r=300$

$$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$$

$K_0=0.100$   $K_0=0.200$   $K_0=0.300$   $K_0=0.400$   $K_0=0.500$   $K_0=0.600$   $K_0=0.700$



FIG.67..



### TRIEDRES A HOULE

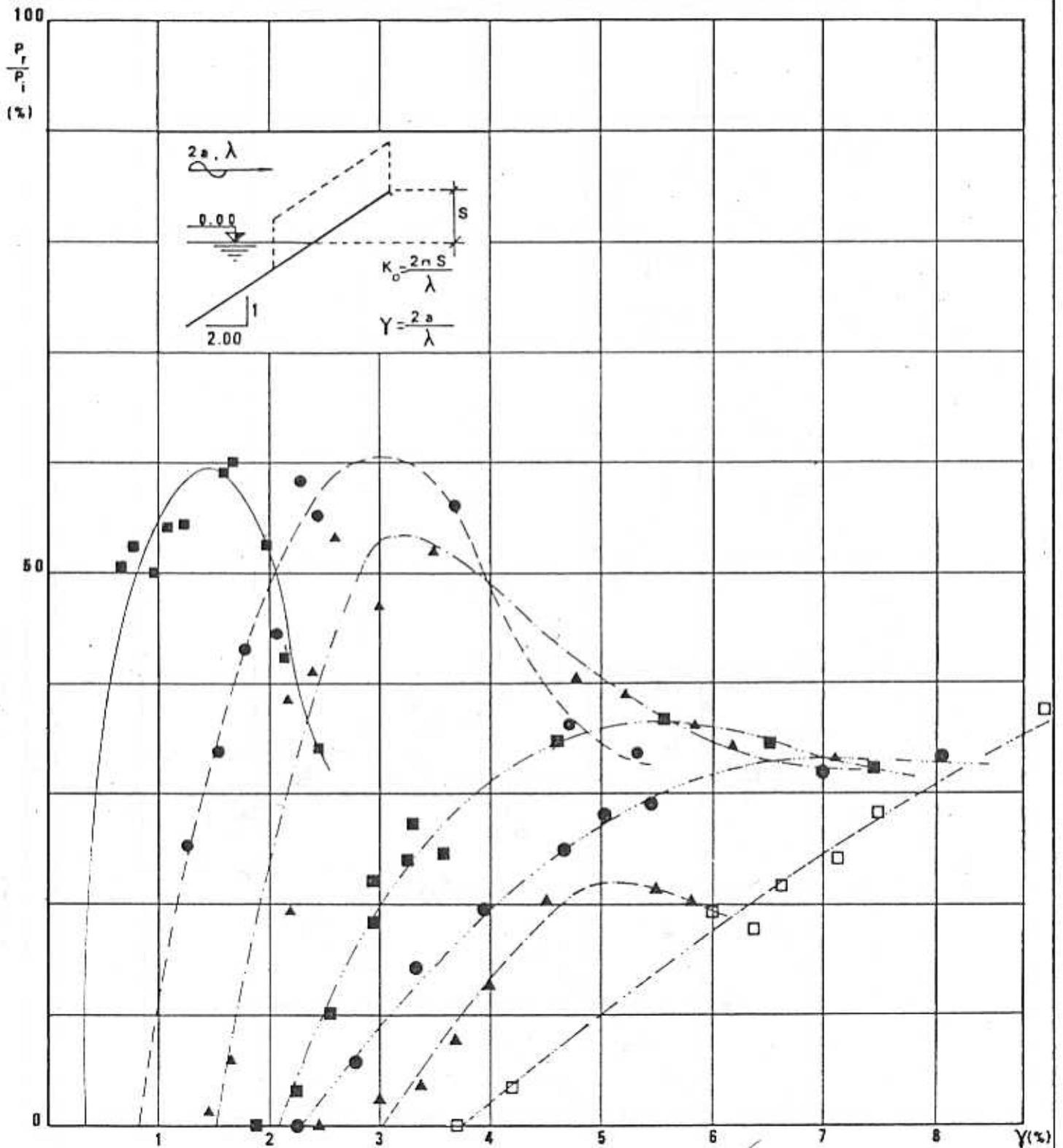
Rapport  $\frac{P_r}{P_i}$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r = 3.75$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

$K_0 = 0.100$     $K_0 = 0.200$     $K_0 = 0.300$     $K_0 = 0.400$     $K_0 = 0.500$     $K_0 = 0.600$     $K_0 = 0.700$

■   ●   ▲   ■   ●   ▲   □

FIG. 68..



### TRIEDRES A HOULE

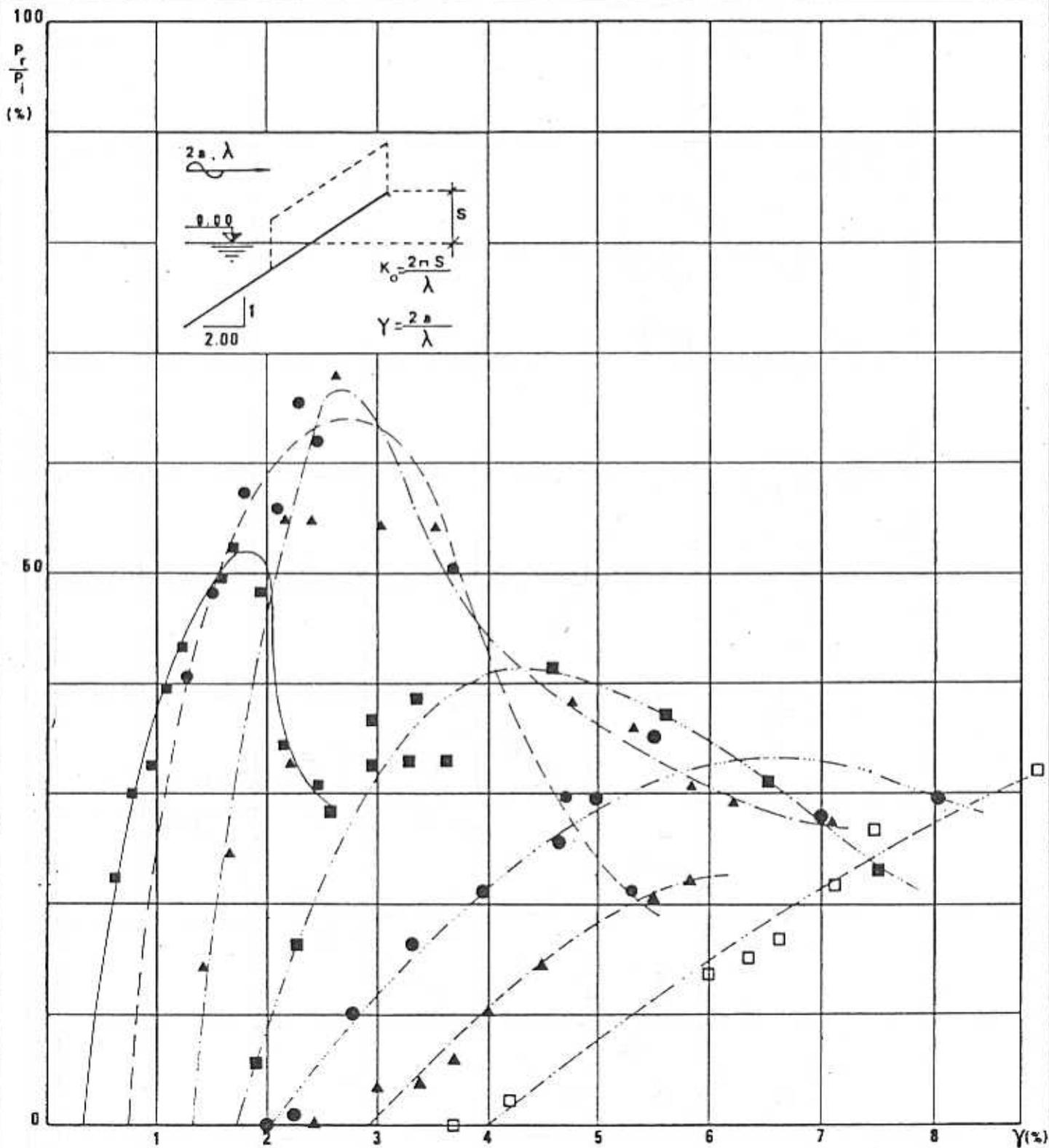
Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r = 4.00$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

$K_o = 0.100$     $K_o = 0.200$     $K_o = 0.300$     $K_o = 0.400$     $K_o = 0.500$     $K_o = 0.600$     $K_o = 0.700$

■   ●   ▲   ■   ●   ▲   □

FIG. 69.-



### TRIEDRES A HOULE

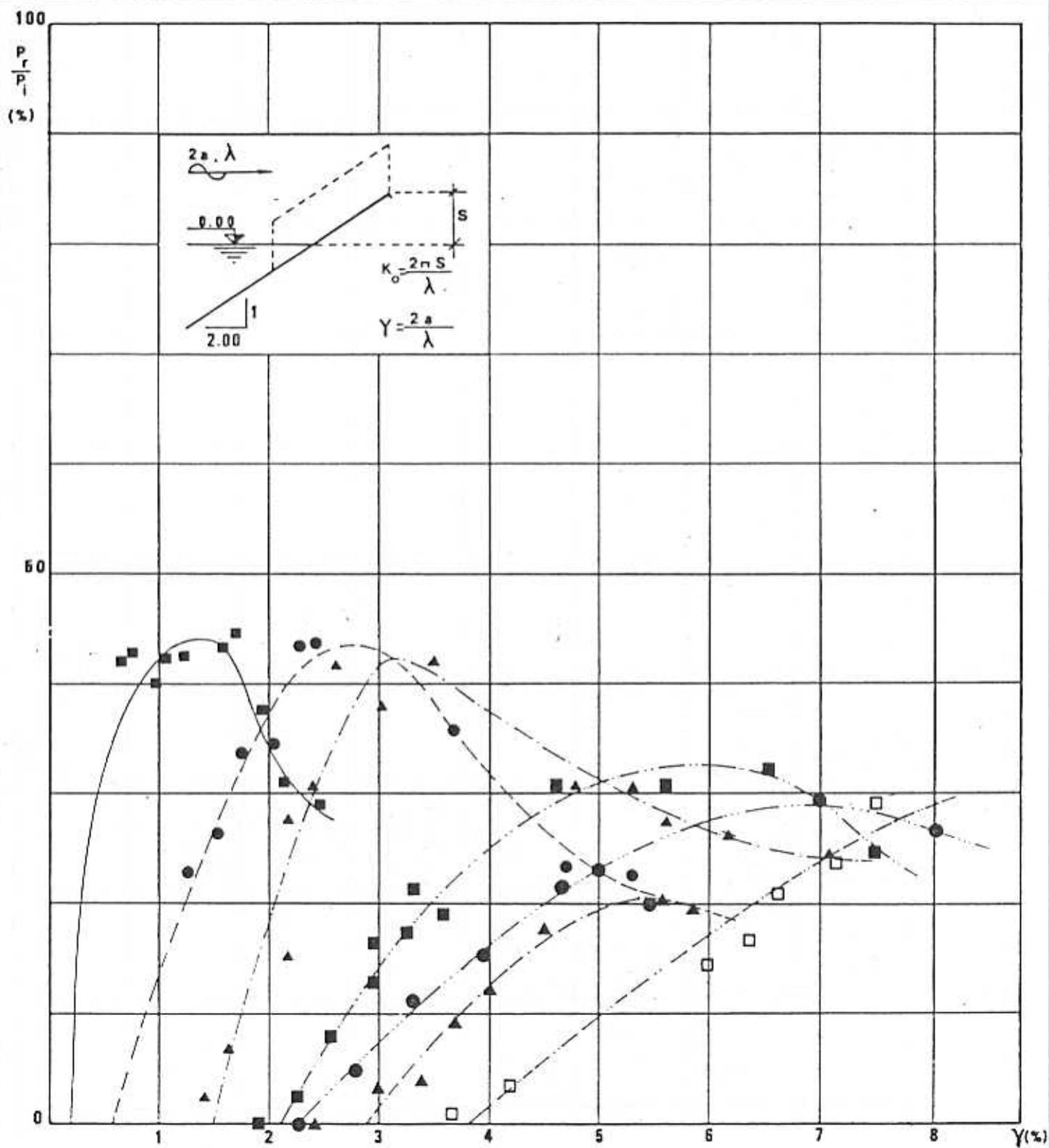
Rapport  $P_r/P_i$  (flux d'énergie récupéré/flux d'énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r = 5.00$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

$K_0 = 0.100$     $K_0 = 0.200$     $K_0 = 0.300$     $K_0 = 0.400$     $K_0 = 0.500$     $K_0 = 0.600$     $K_0 = 0.700$

■   ●   ▲   ■   ●   ▲   □

FIG.70.



### TRIEDRES A HOULE

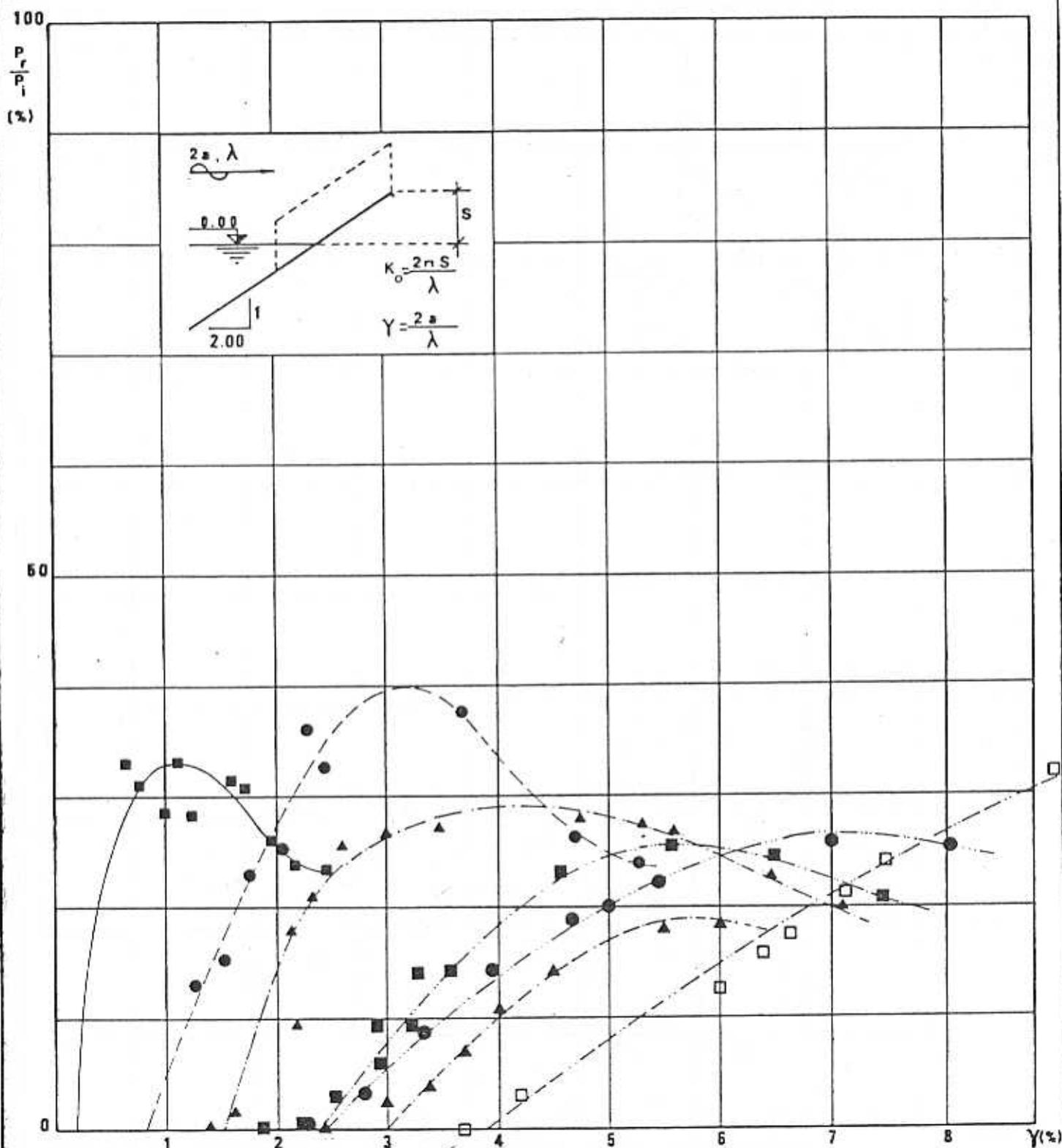
Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r = 7.50$

$$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$$

$K_0 = 0.100$     $K_0 = 0.200$     $K_0 = 0.300$     $K_0 = 0.400$     $K_0 = 0.500$     $K_0 = 0.600$     $K_0 = 0.700$



FIG. 71..



### TRIÈDRES A HOULE

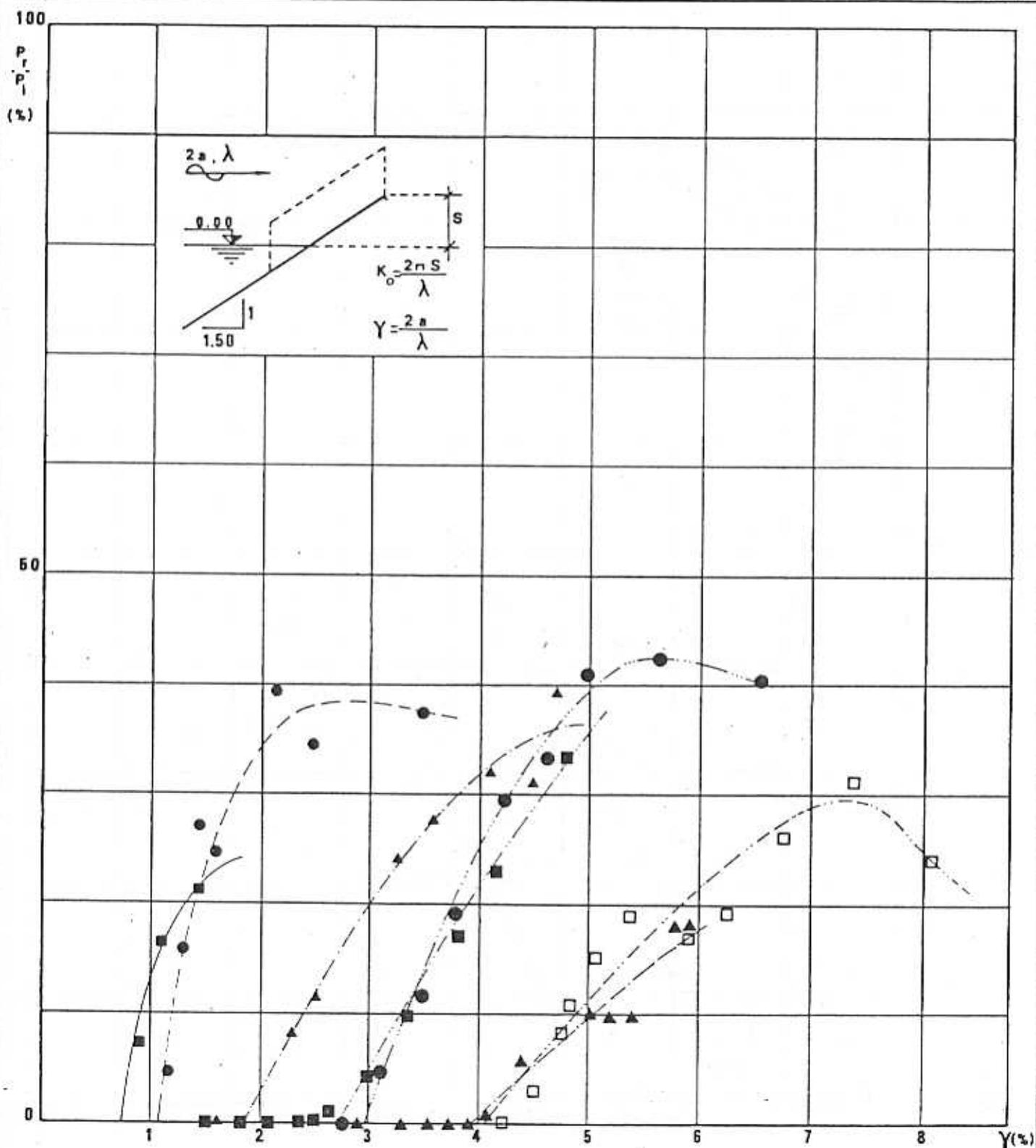
Rapport  $\frac{P_r}{P_i}$  (flux d'énergie récupéré/flux d'énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r=10.00$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

$K_0=0.100$   $K_0=0.200$   $K_0=0.300$   $K_0=0.400$   $K_0=0.500$   $K_0=0.600$   $K_0=0.700$

■ ● ▲ ■ ● ▲ □

FIG.72..



### TRIEDRES A HOULE

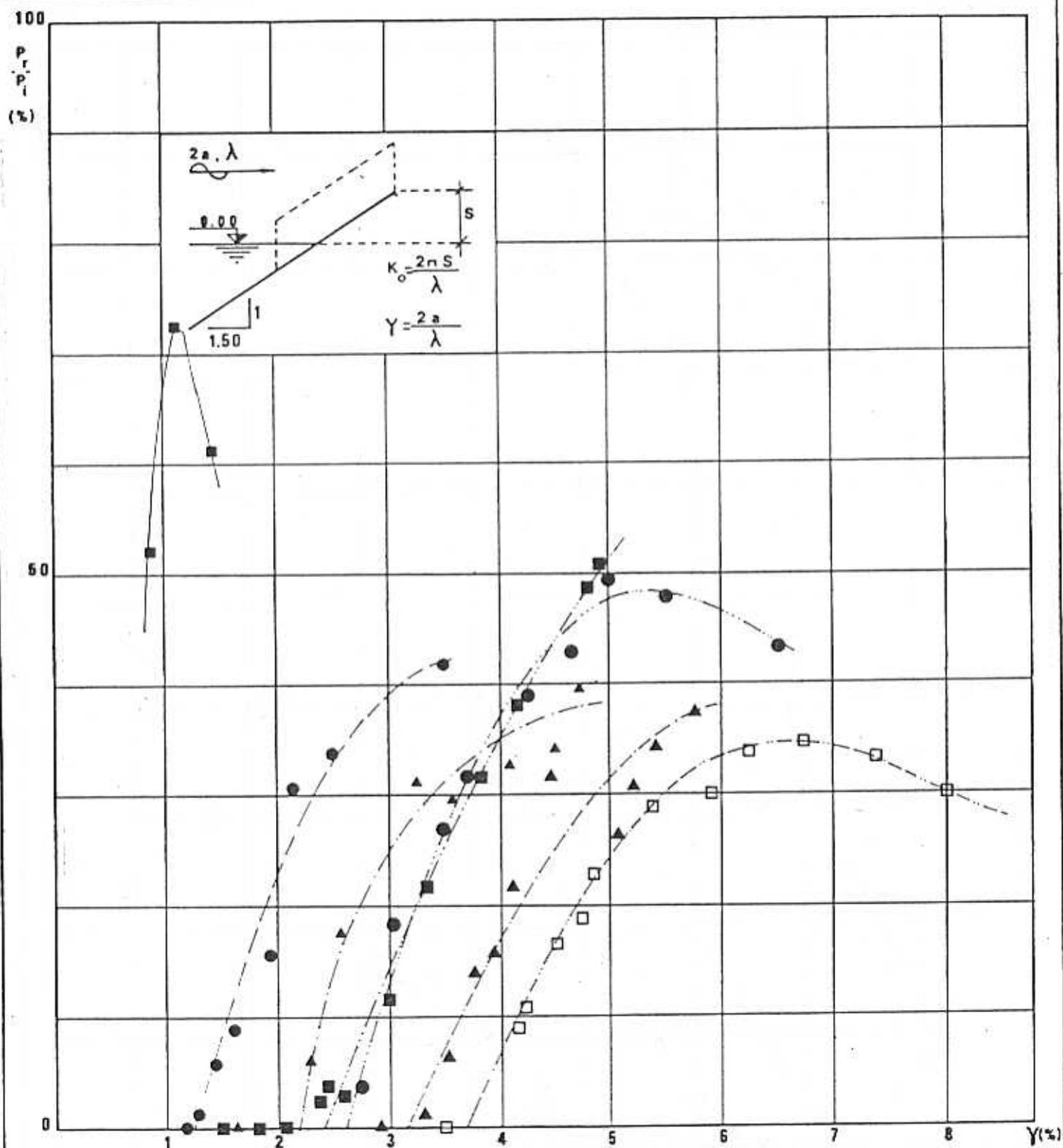
Rapport  $P_r/P_i$  (flux d'énergie récupéré/flux d'énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r=2.50$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

$K_o=0.100$   $K_o=0.200$   $K_o=0.300$   $K_o=0.400$   $K_o=0.500$   $K_o=0.600$   $K_o=0.700$

■      ●      ▲      ■      ●      ▲      □  
 —      - - -      - · - · -      - · - · -      - · - · -      - · - · -      - · - · -

FIG. 73..



### TRIEDRES A HOULE

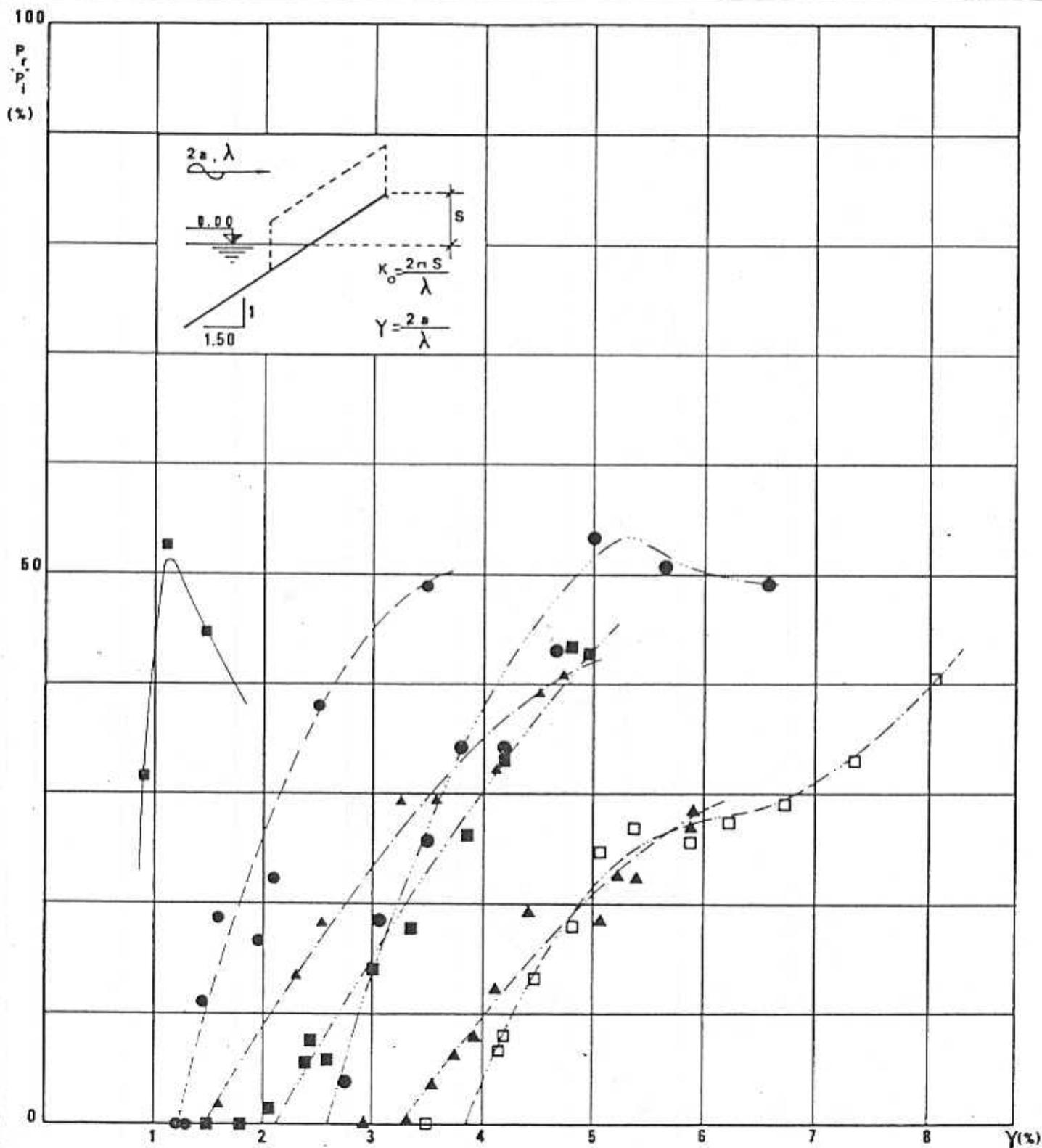
Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r=3.00$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

$K_o = 0.100$     $K_o = 0.200$     $K_o = 0.300$     $K_o = 0.400$     $K_o = 0.500$     $K_o = 0.600$     $K_o = 0.700$



FIG. 74. \_



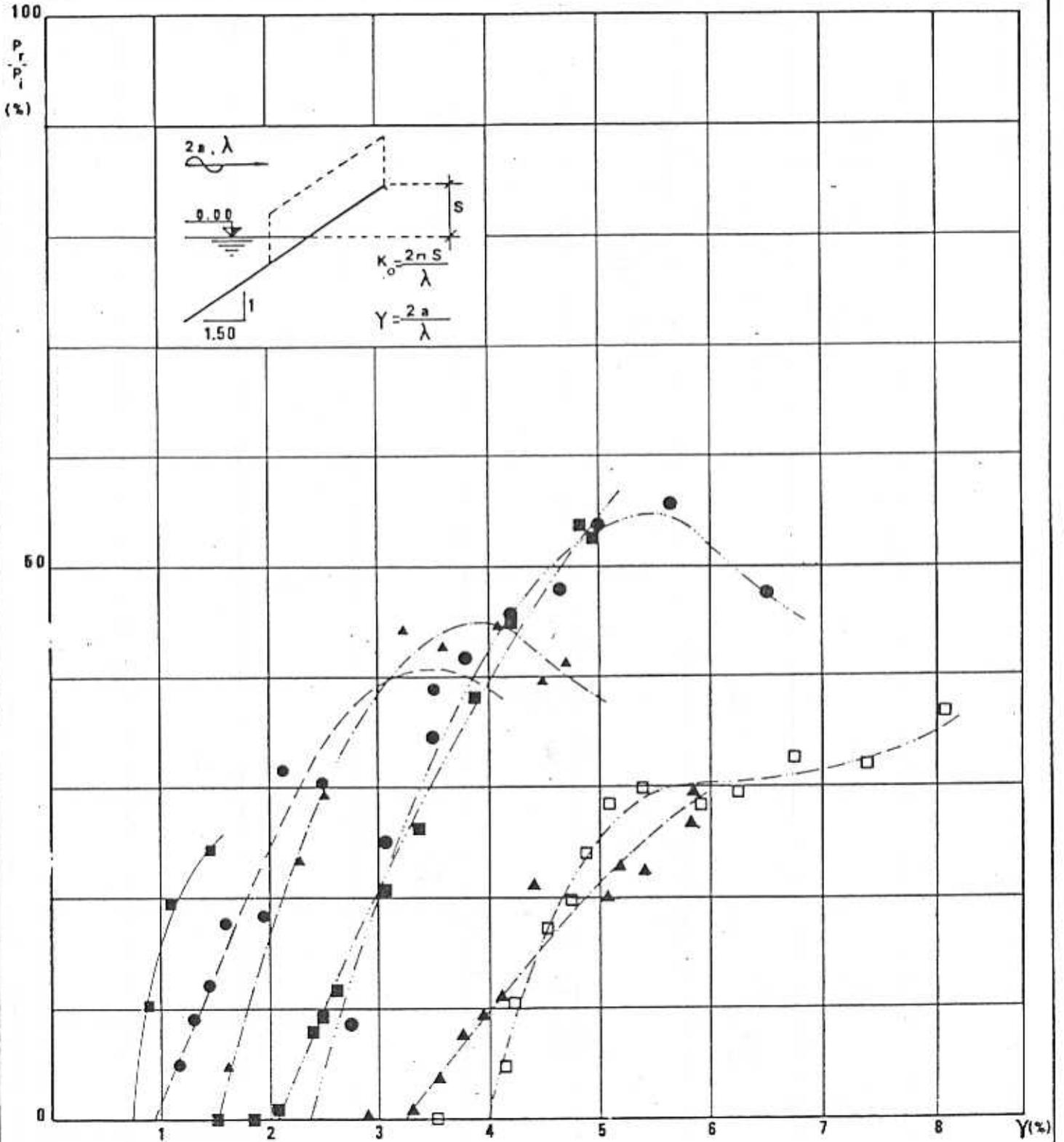
### TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d'énergie récupéré/flux d'énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r = 3.75$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

$K_0 = 0.100$     $K_0 = 0.200$     $K_0 = 0.300$     $K_0 = 0.400$     $K_0 = 0.500$     $K_0 = 0.600$     $K_0 = 0.700$

FIG. 75..



TRIEDRES A HOULE

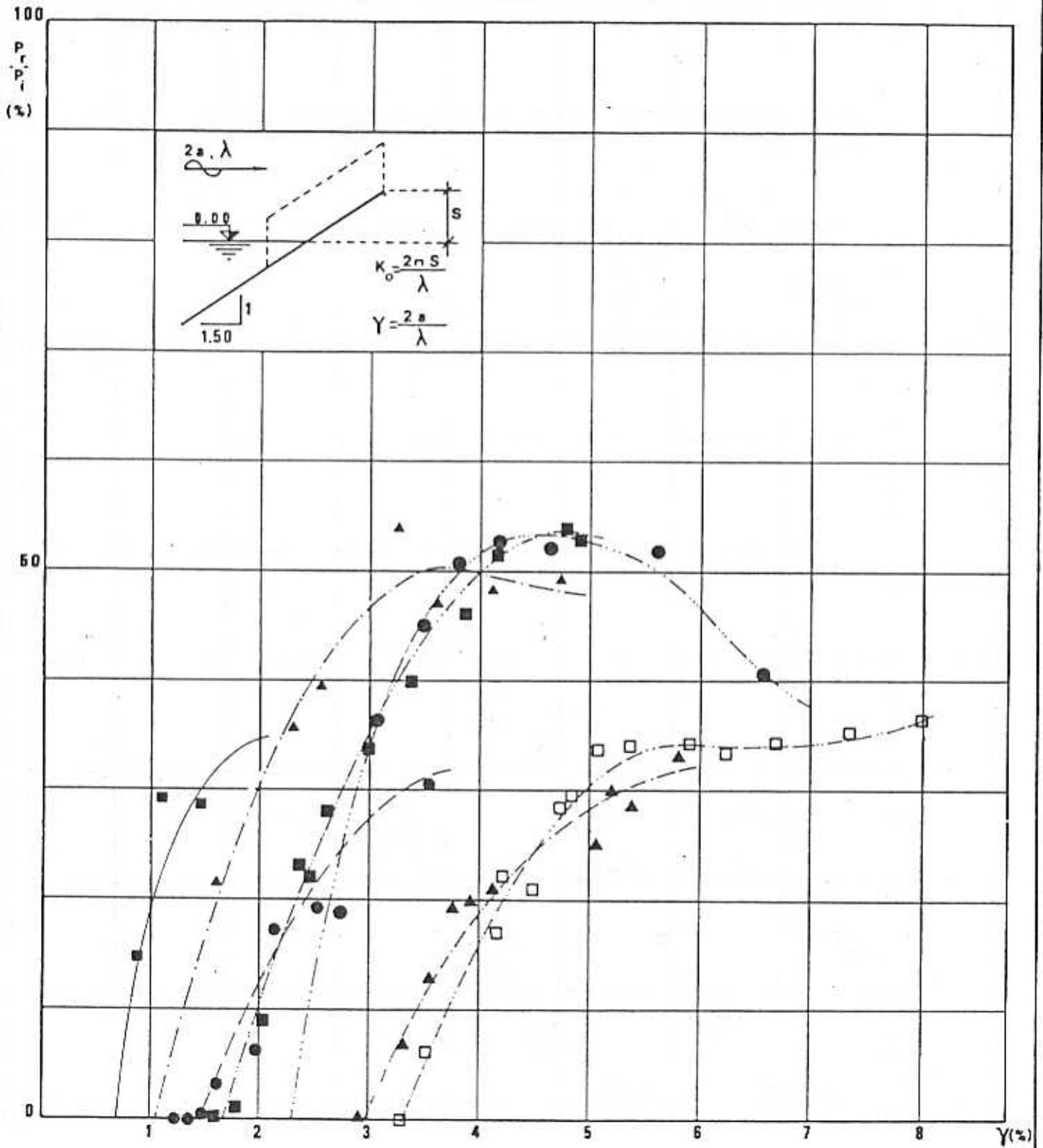
Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r = 4.00$

$$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$$

$K_0 = 0.100$     $K_0 = 0.200$     $K_0 = 0.300$     $K_0 = 0.400$     $K_0 = 0.500$     $K_0 = 0.600$     $K_0 = 0.700$



FIG. 76..



TRIEDRES A HOULE

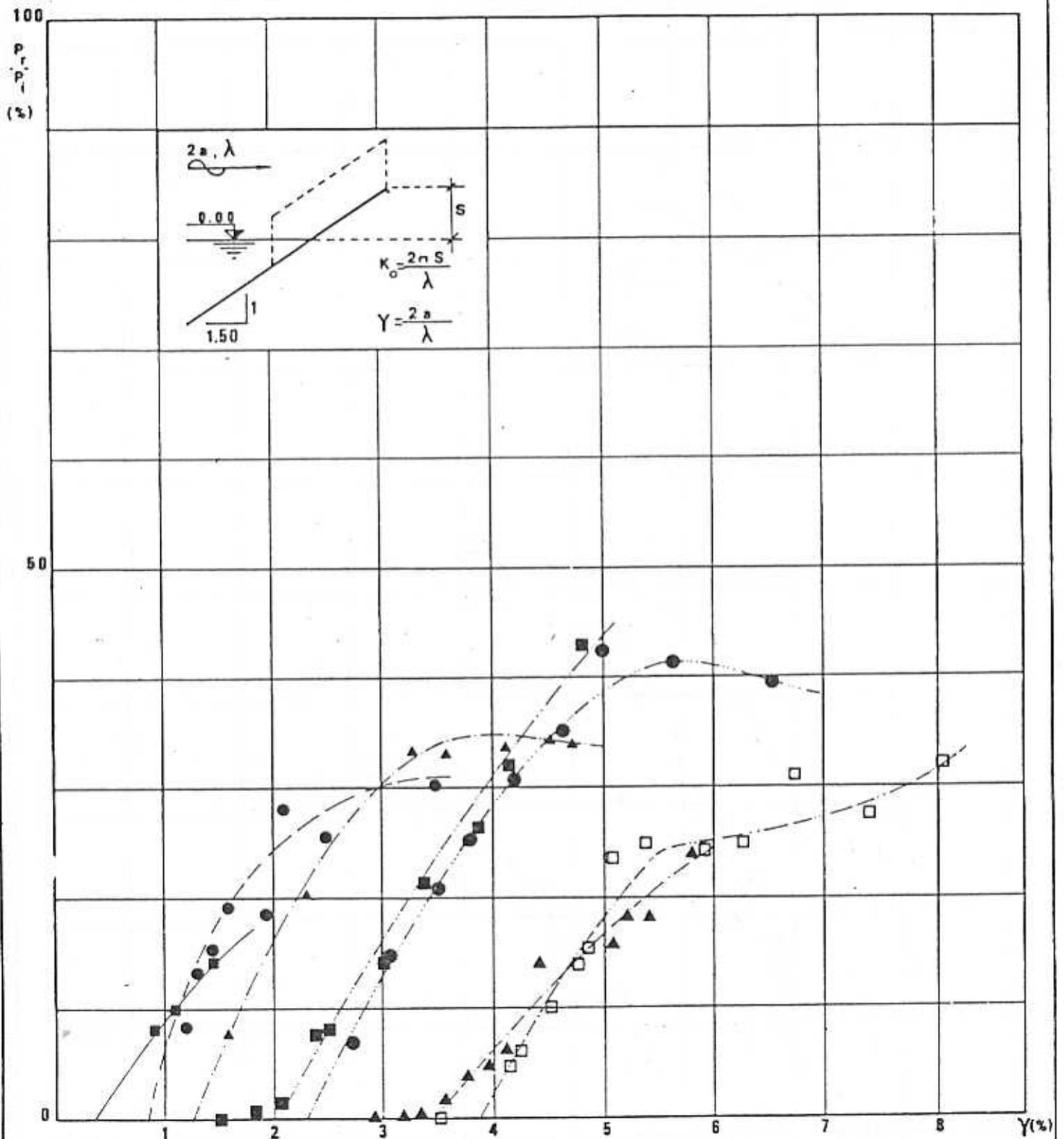
Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r = 5.00$

$$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$$

$K_o = 0.100$     $K_o = 0.200$     $K_o = 0.300$     $K_o = 0.400$     $K_o = 0.500$     $K_o = 0.600$     $K_o = 0.700$



FIG. 77...



### TRIÈDRES A HOULE

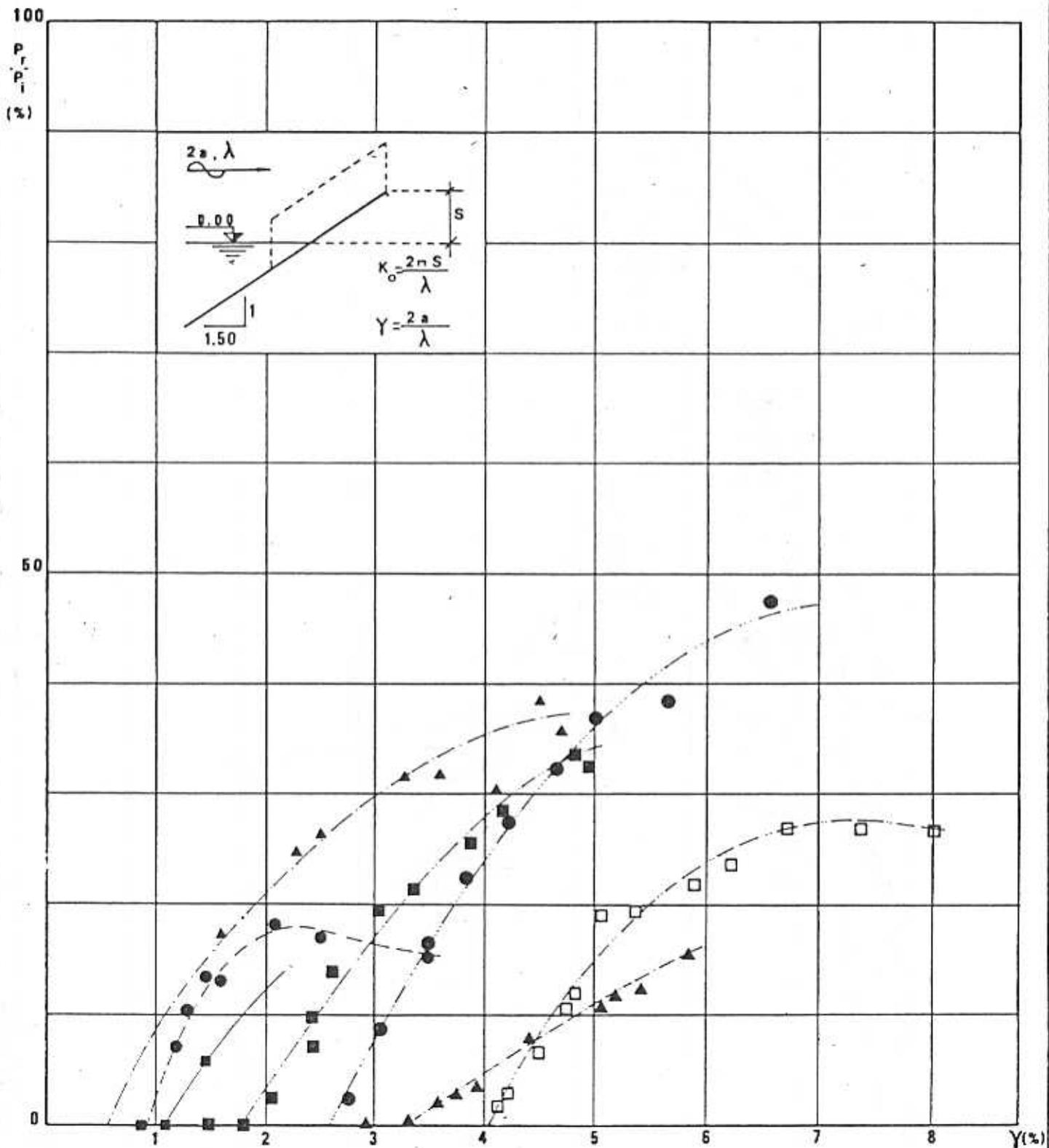
Rapport  $P_r/P_i$  (flux d'énergie récupéré/flux d'énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r = 7.50$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

$K_0 = 0.100$     $K_0 = 0.200$     $K_0 = 0.300$     $K_0 = 0.400$     $K_0 = 0.500$     $K_0 = 0.600$     $K_0 = 0.700$

■   ●   ▲   ■   ●   ▲   □

FIG. 78..



TRIEDRES A HOULE

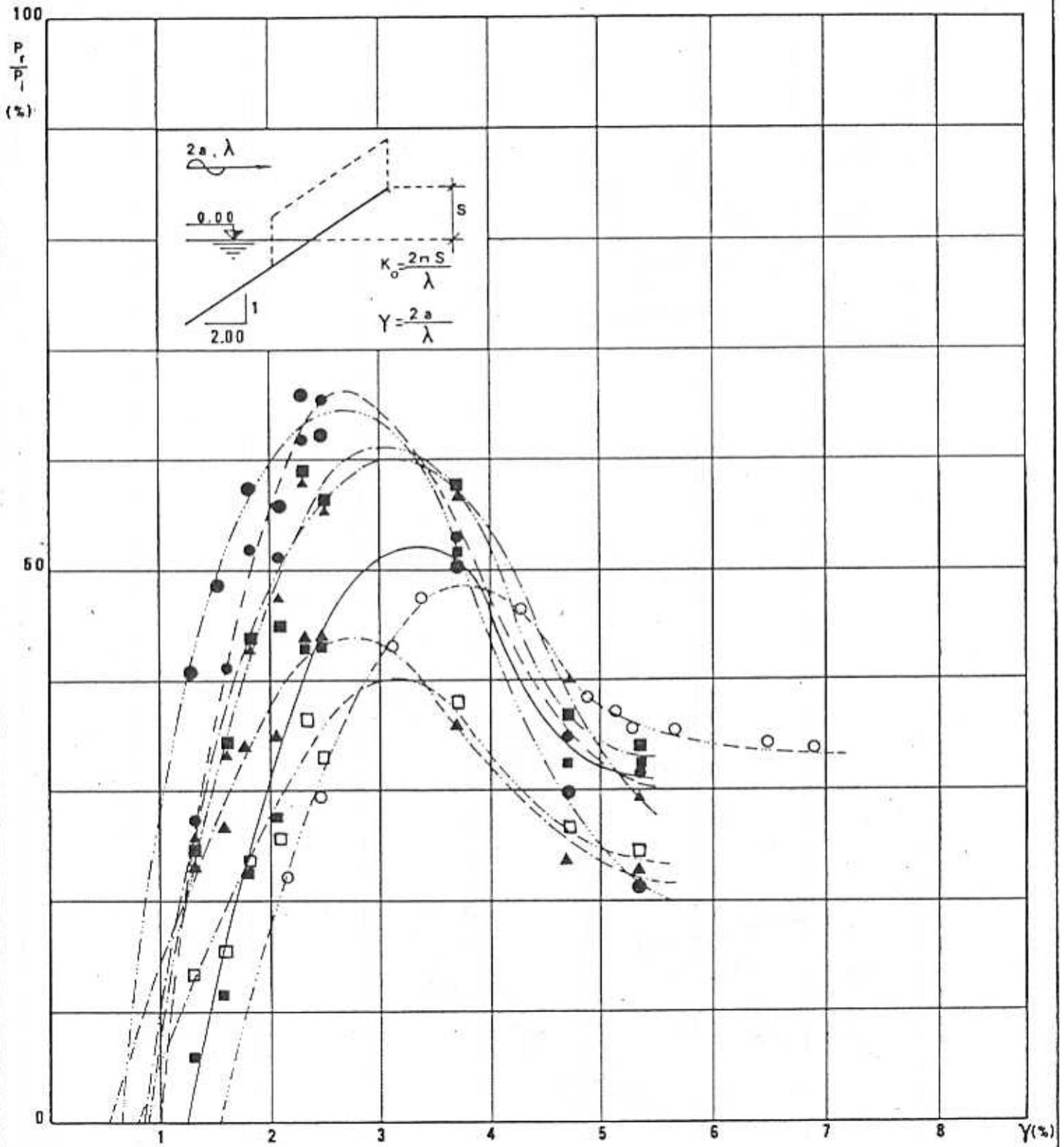
Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $r= 10.00$

$\gamma = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

$K_o=0.100$   $K_o=0.200$   $K_o=0.300$   $K_o=0.400$   $K_o=0.500$   $K_o=0.600$   $K_o=0.700$

■ ● ▲ ■ ● ▲ □

FIG.79..



TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0 = 0.200$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

Rampe simple: - - - - - ○

$r=2.50$

$r=3.00$

$r=3.75$

$r=4.00$

$r=5.00$

$r=7.50$

$r=10.00$

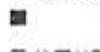
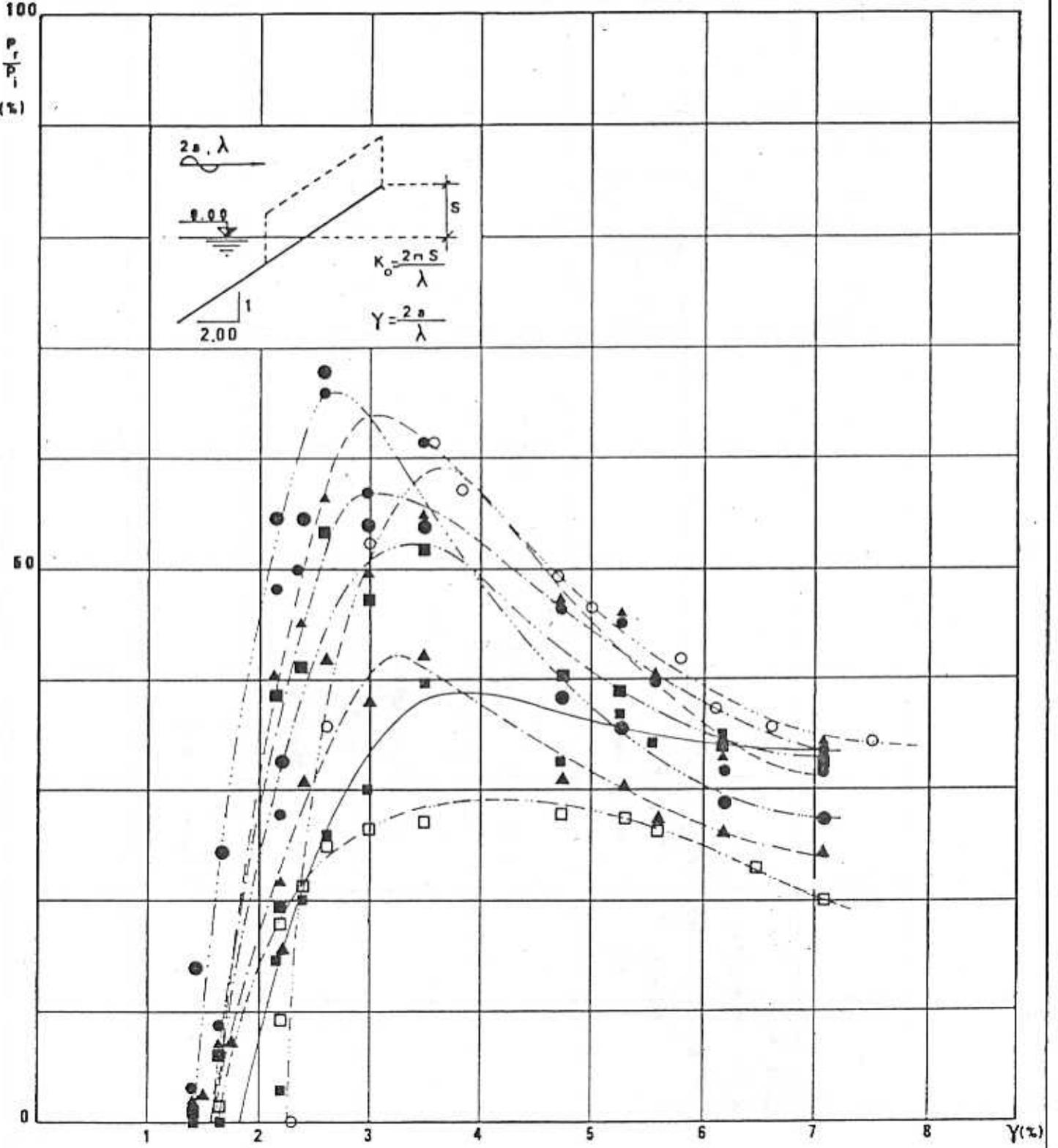


FIG. 80.



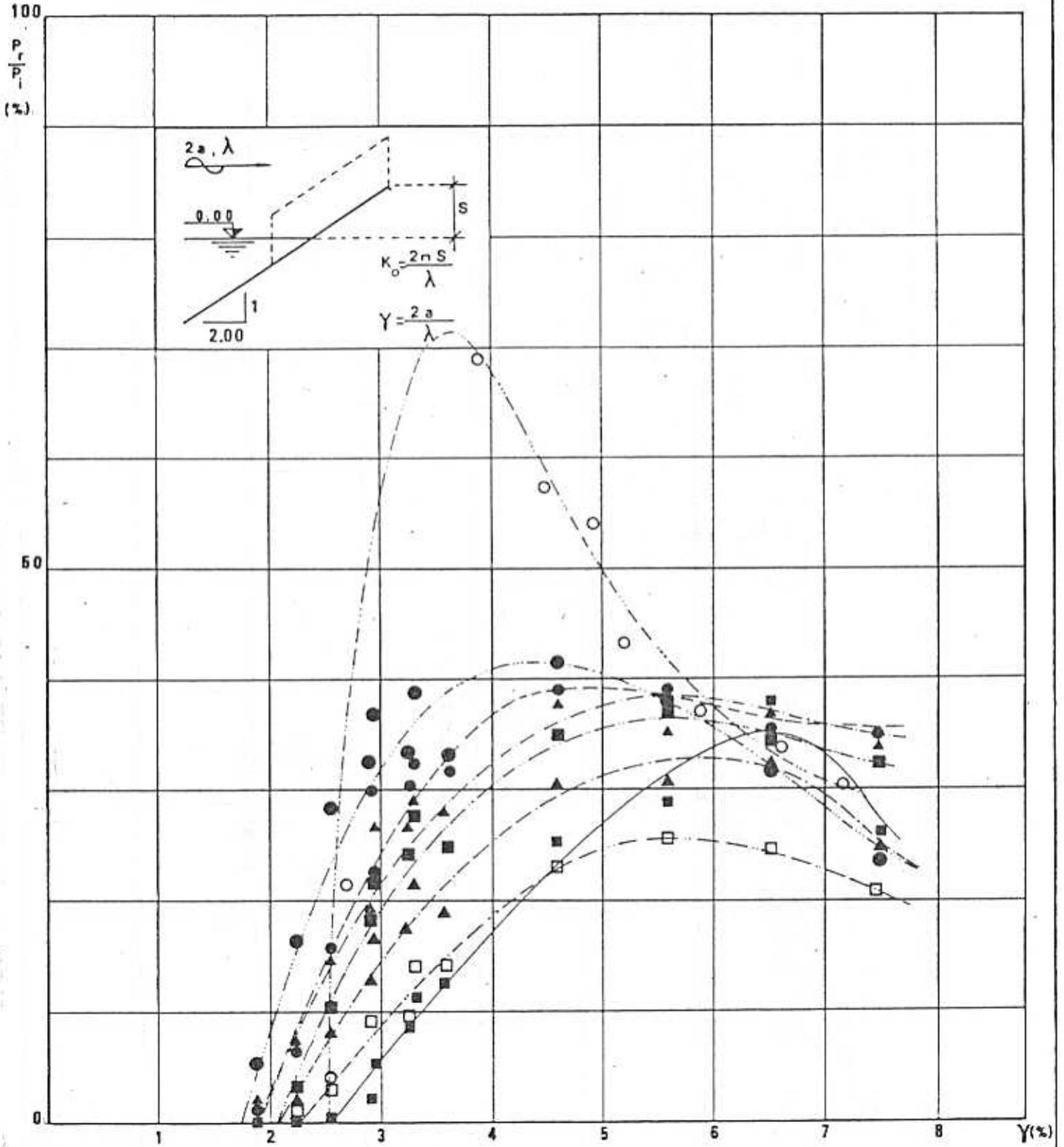
TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0=0.300$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$       Rampe simple: - - - - - ○

$r=2.50$	$r=3.00$	$r=3.75$	$r=4.00$	$r=5.00$	$r=7.50$	$r=10.00$
■	●	▲	■	●	▲	□
—	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -

FIG. 81..



TRIEDRES A HOULE

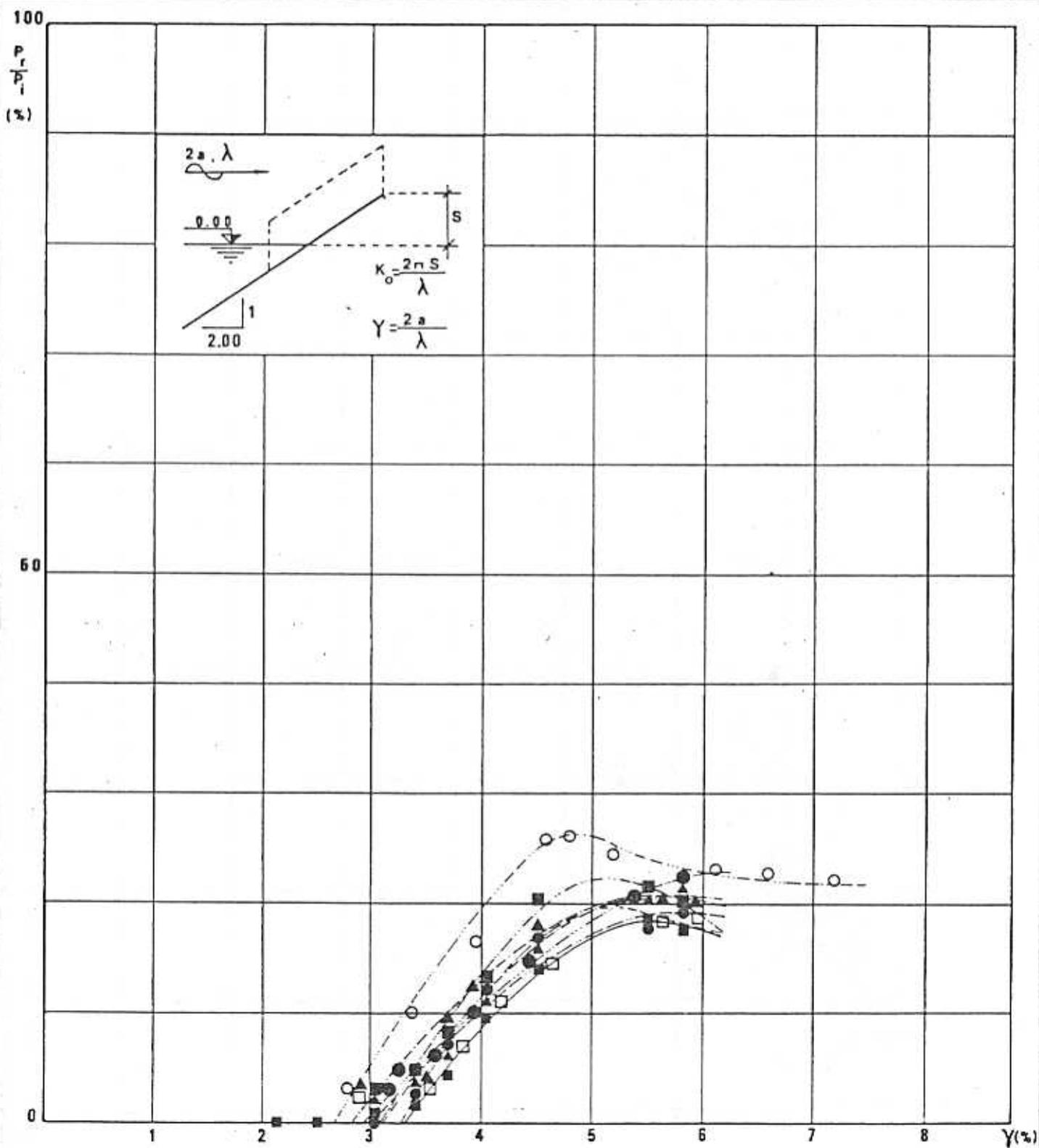
Rapport  $\frac{P_r}{P_i}$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0 = 0.400$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

Rampe simple: - - - - - O

- |        |        |        |        |        |        |         |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| r=2.50 | r=3.00 | r=3.75 | r=4.00 | r=5.00 | r=7.50 | r=10.00 |
| ■      | ●      | ▲      | ■      | ●      | ▲      | □       |
| —      | - - -  | - - -  | - - -  | - - -  | - - -  | - - -   |

FIG. 82..



### TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d'énergie récupéré/flux d'énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0 = 0.600$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

Rampe simple: - - - - - ○

$r=2.50$

$r=3.00$

$r=3.75$

$r=4.00$

$r=5.00$

$r=7.50$

$r=10.00$

■

●

▲

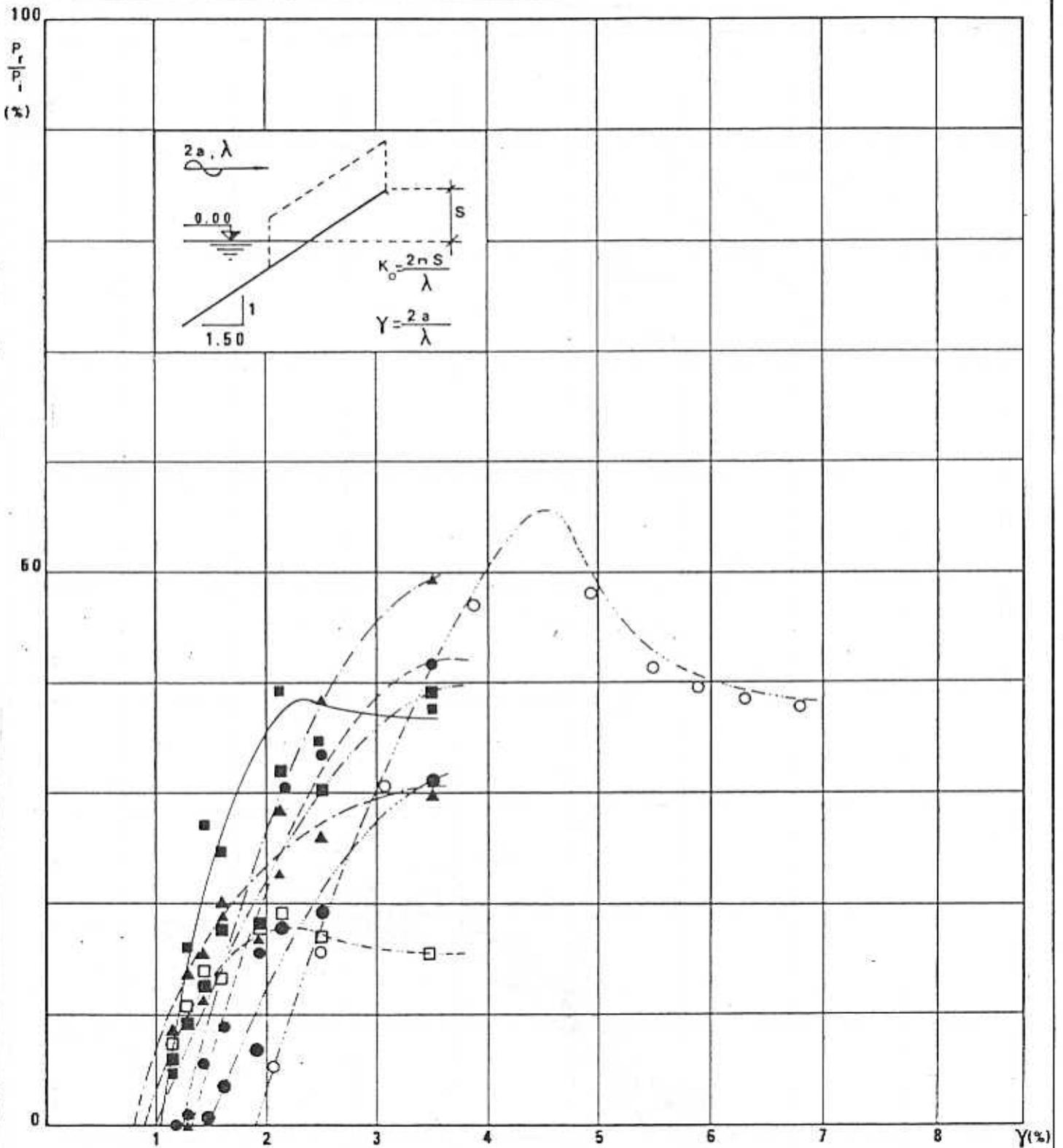
■

●

▲

□

FIG. 83.



### TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0 = 0.200$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

Rampe simple: - - - - - ○

$r=2.50$

$r=3.00$

$r=3.75$

$r=4.00$

$r=5.00$

$r=7.50$

$r=10.00$

■

●

▲

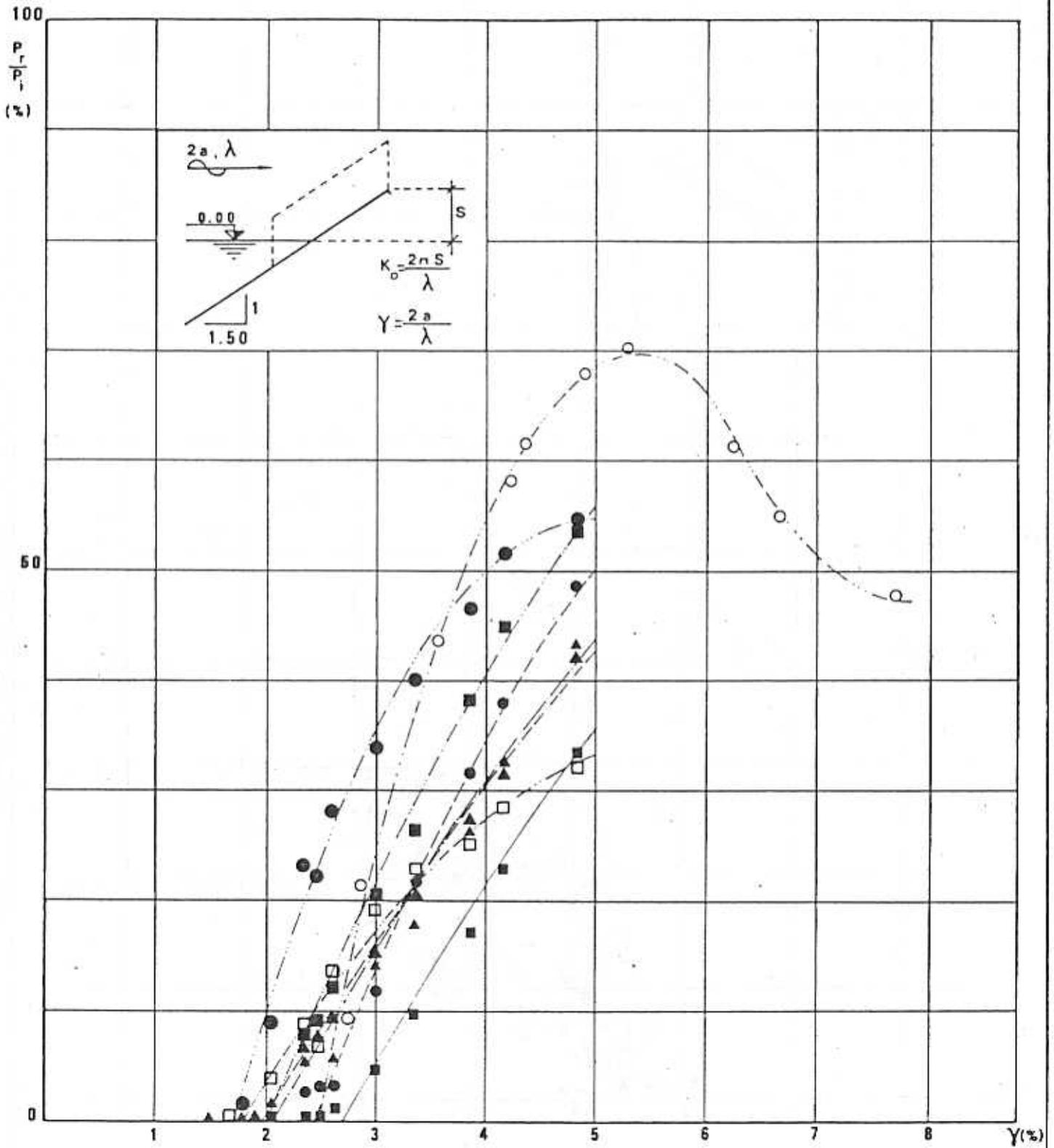
■

●

▲

□

FIG. 84..



TRIEDRES A HOULE

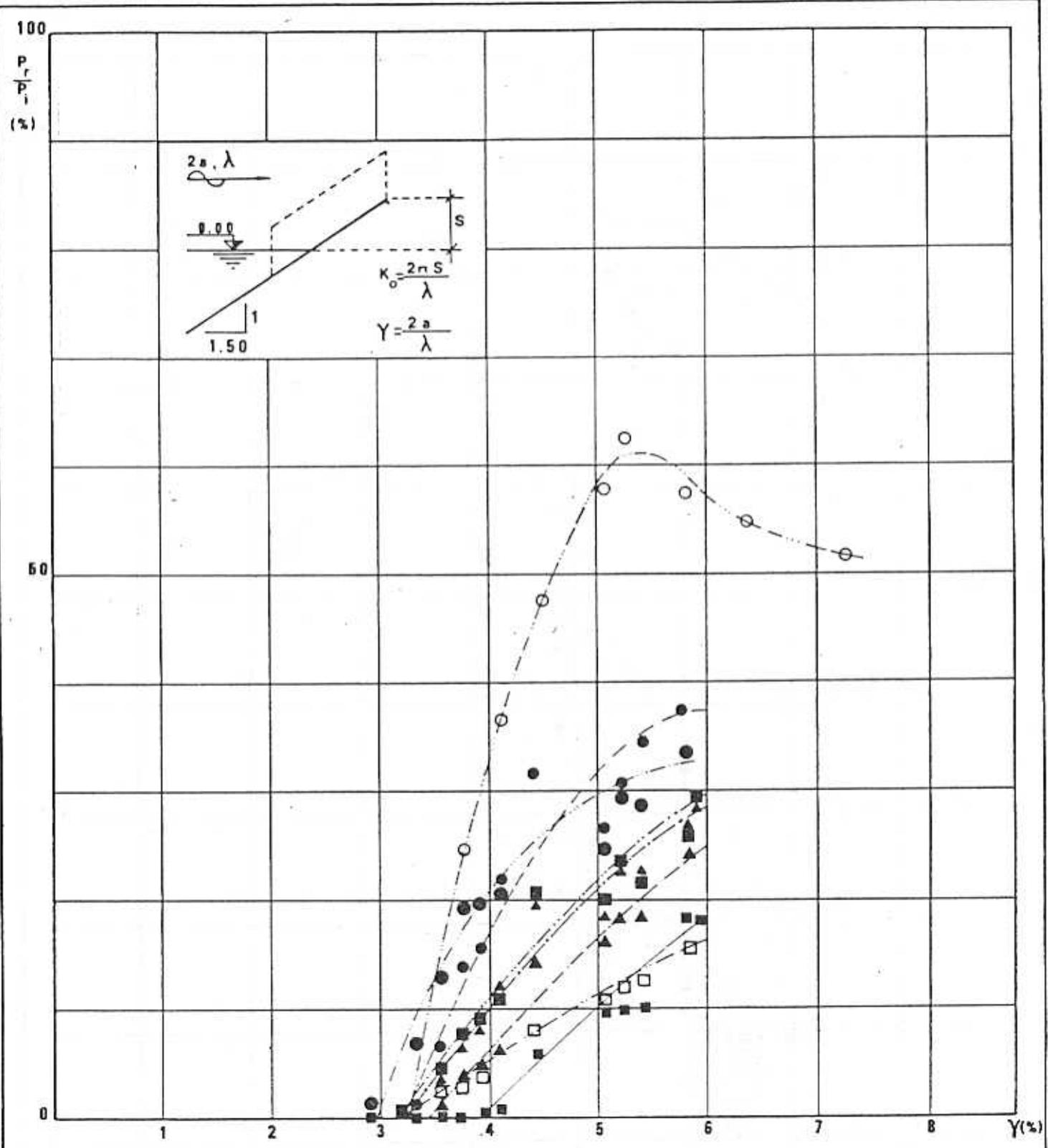
Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0 = 0.400$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

Rampe simple: - - - - - ○

- |          |          |           |           |           |           |           |
|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $r=2.50$ | $r=3.00$ | $r=3.75$  | $r=4.00$  | $r=5.00$  | $r=7.50$  | $r=10.00$ |
| ■        | ●        | ▲         | ■         | ●         | ▲         | □         |
| —        | - - -    | - · - · - | - · - · - | - · - · - | - · - · - | - · - · - |

FIG. 85..



TRIEDRES A HOULE

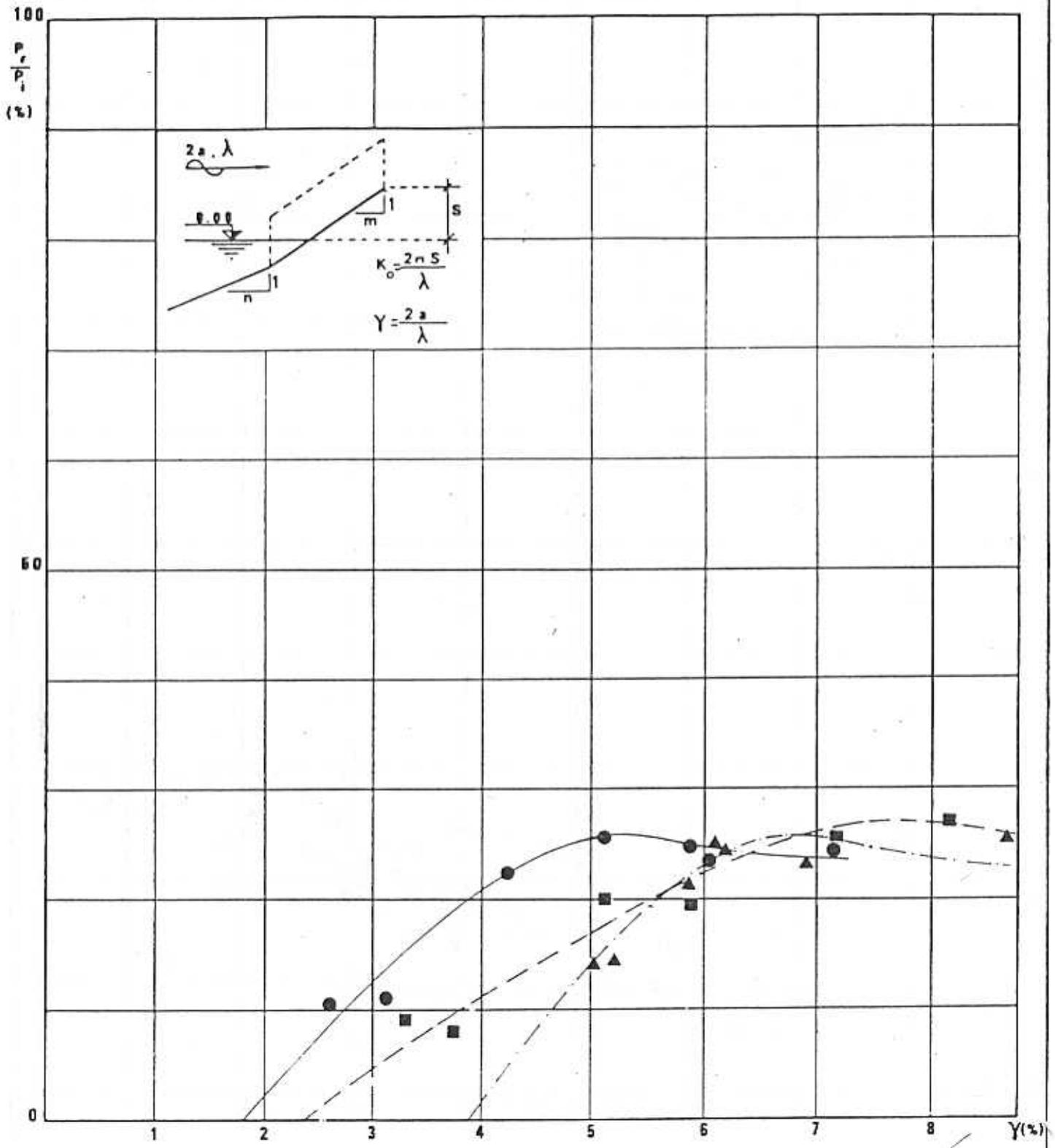
Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0 = 0.600$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}}$

Rampe simple: - - - - - ○

$r=2.50$  ■     $r=3.00$  ●     $r=3.75$  ▲     $r=4.00$  ■     $r=5.00$  ●     $r=7.50$  ▲     $r=10.00$  □

FIG. 86 ..



TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0 = 0.400$

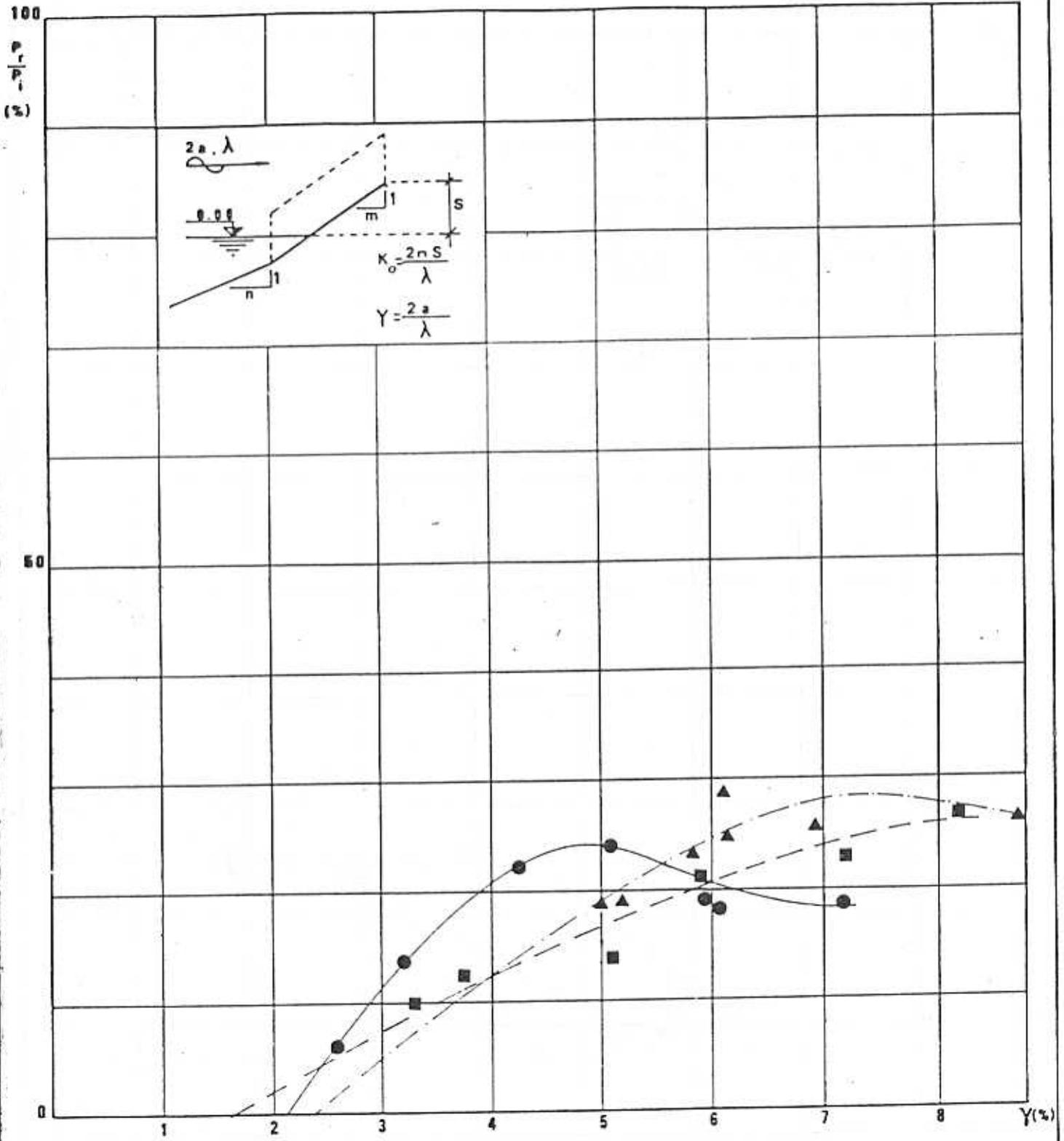
$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 2.50$

$m = 2.50$      $n = 1.00$   
 ● —————

$m = 2.50$      $n = 2.50$   
 ■ - - - - -

$m = 2.50$      $n = 4.00$   
 ▲ - - - - -

FIG. 87.



TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0=0.400$

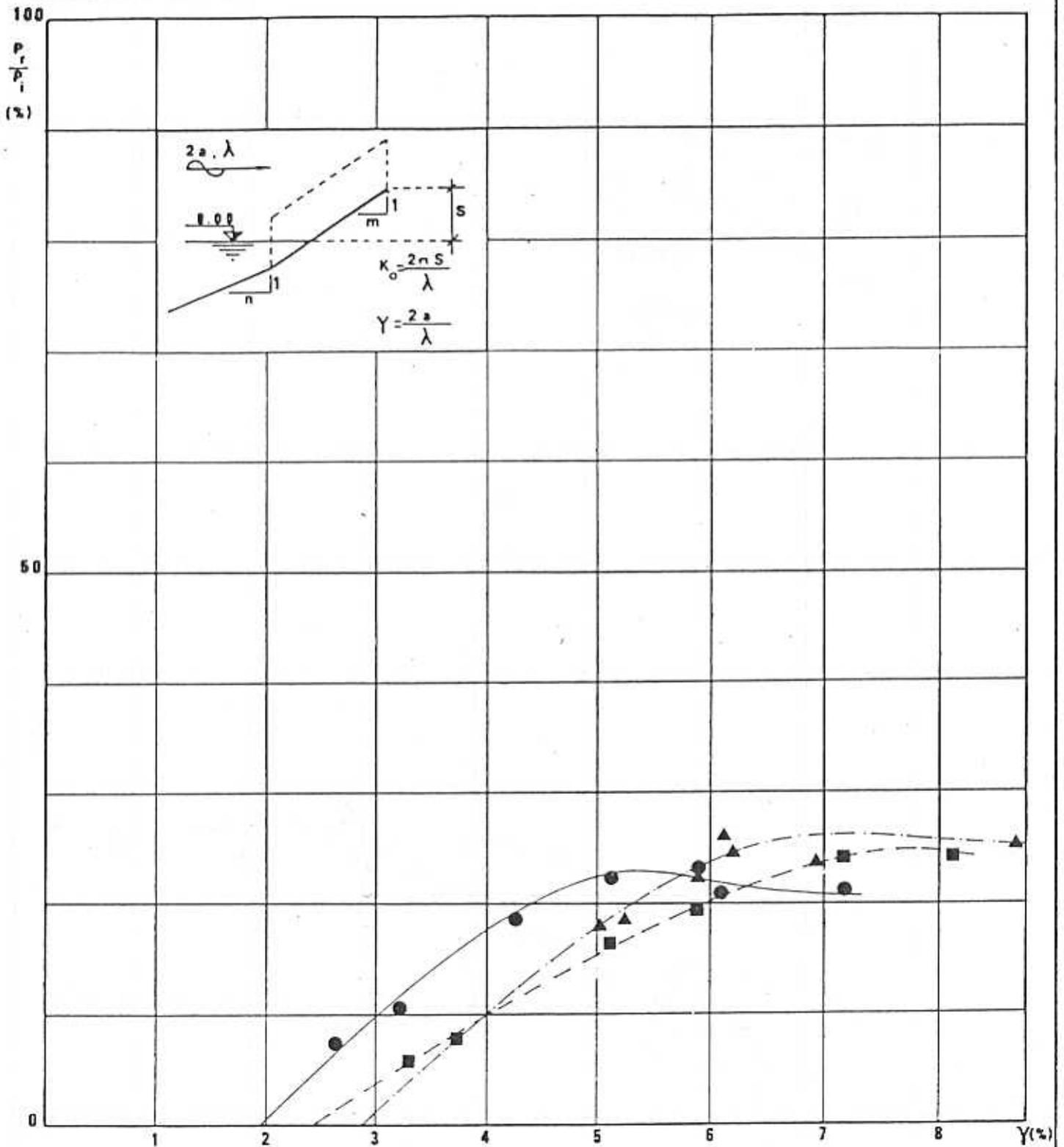
$\Gamma = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 3.00$

$m = 2.50$      $n = 1.00$

$m = 2.50$      $n = 2.50$

$m = 2.50$      $n = 4.00$

FIG. 88.



TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0=0,400$

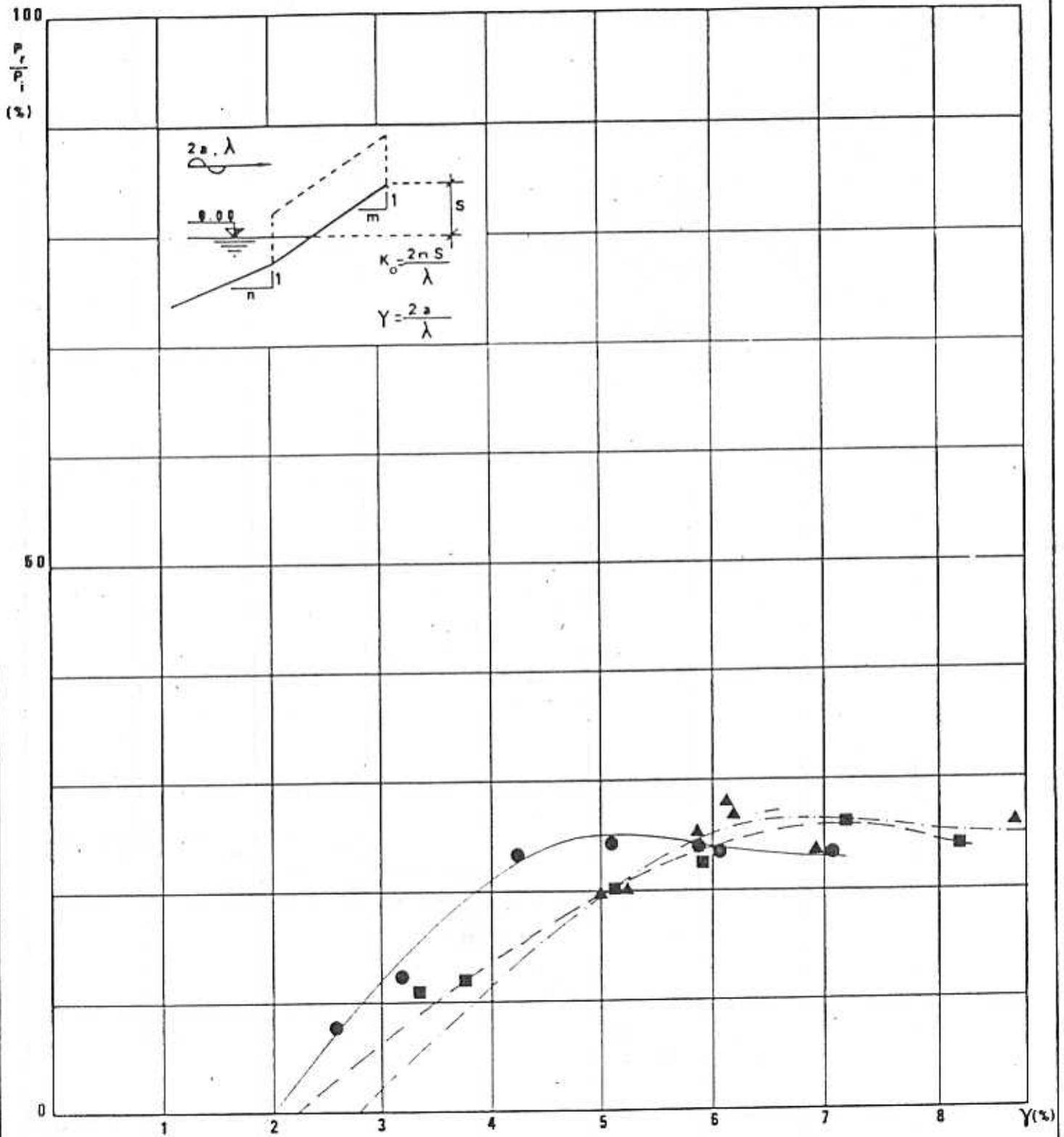
$$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 1,75$$

$m = 2,50$      $n = 1,00$   
 ● —————

$m = 2,50$      $n = 2,50$   
 ■ - - - - -

$m = 2,50$      $n = 4,00$   
 ▲ - - - - -

FIG. 89..



### TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d'énergie récupéré/flux d'énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0 = 0.400$

$\gamma = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 4.00$

$m = 2.50$      $n = 1.00$



—

$m = 2.50$      $n = 2.50$



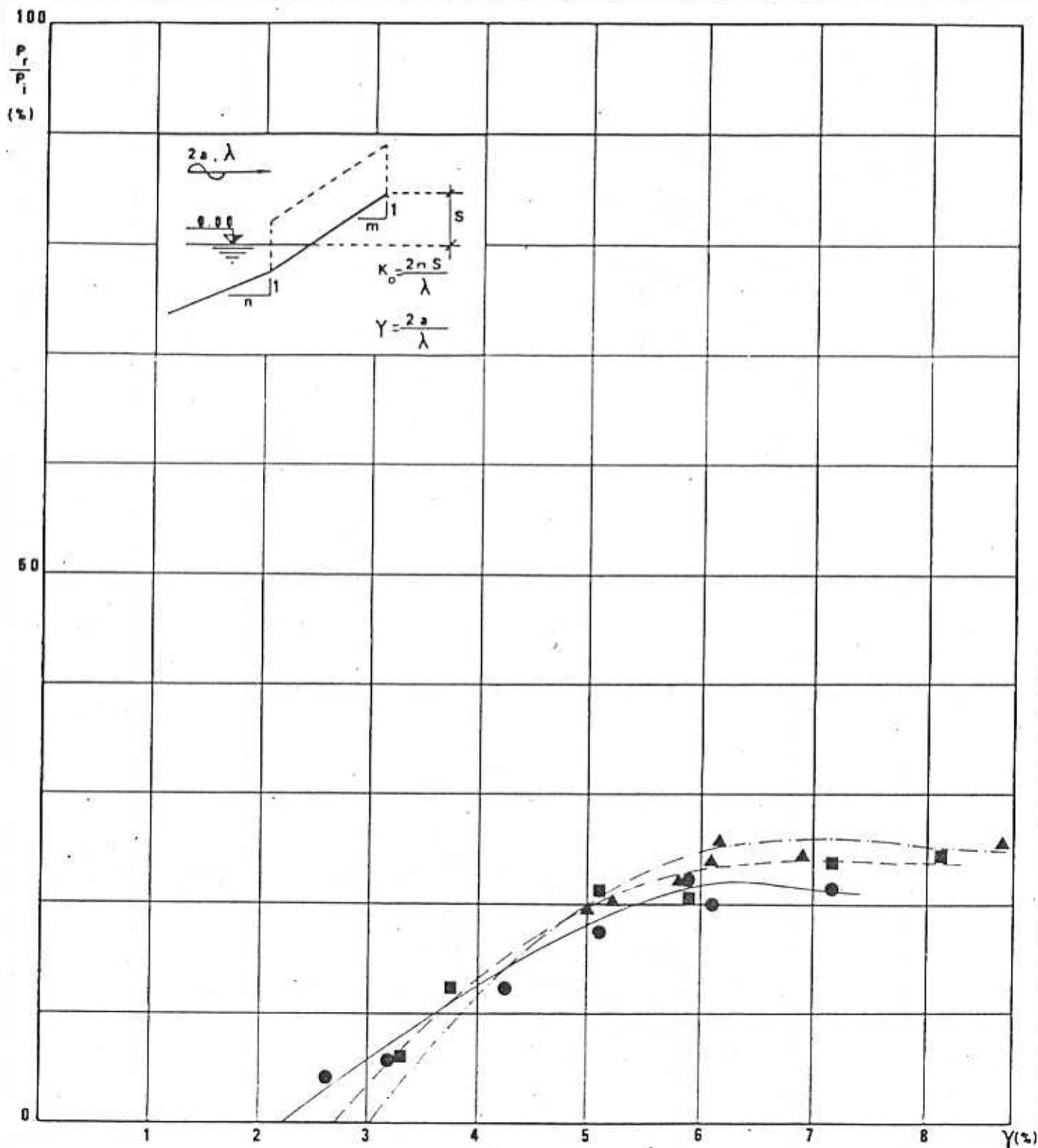
- - -

$m = 2.50$      $n = 4.00$



- · - · -

FIG. 90..



### TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0 = 0.400$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 5.00$

$m = 2.50$      $n = 1.00$

●

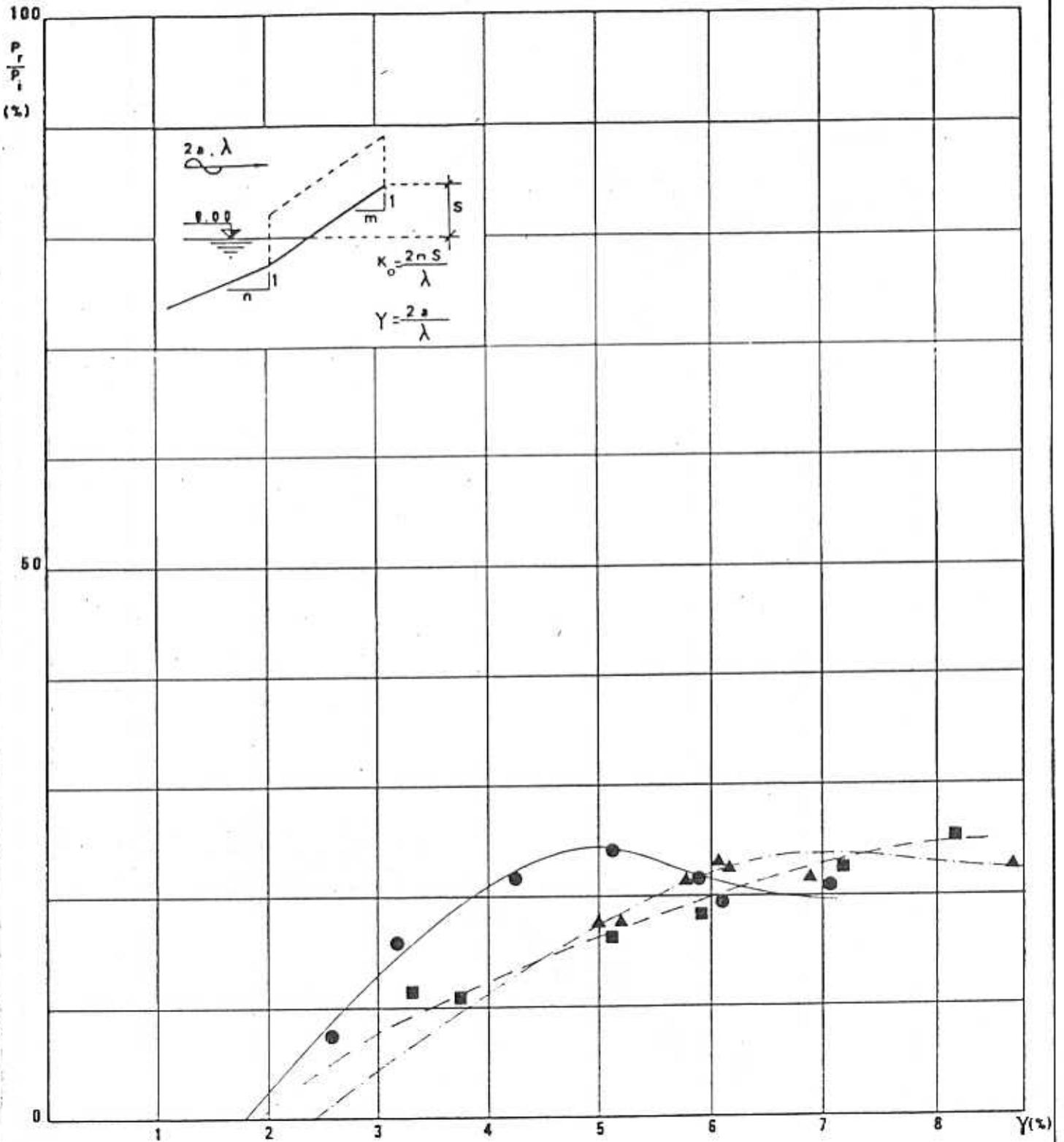
$m = 2.50$      $n = 2.50$

■

$m = 2.50$      $n = 4.00$

▲

FIG. 91...



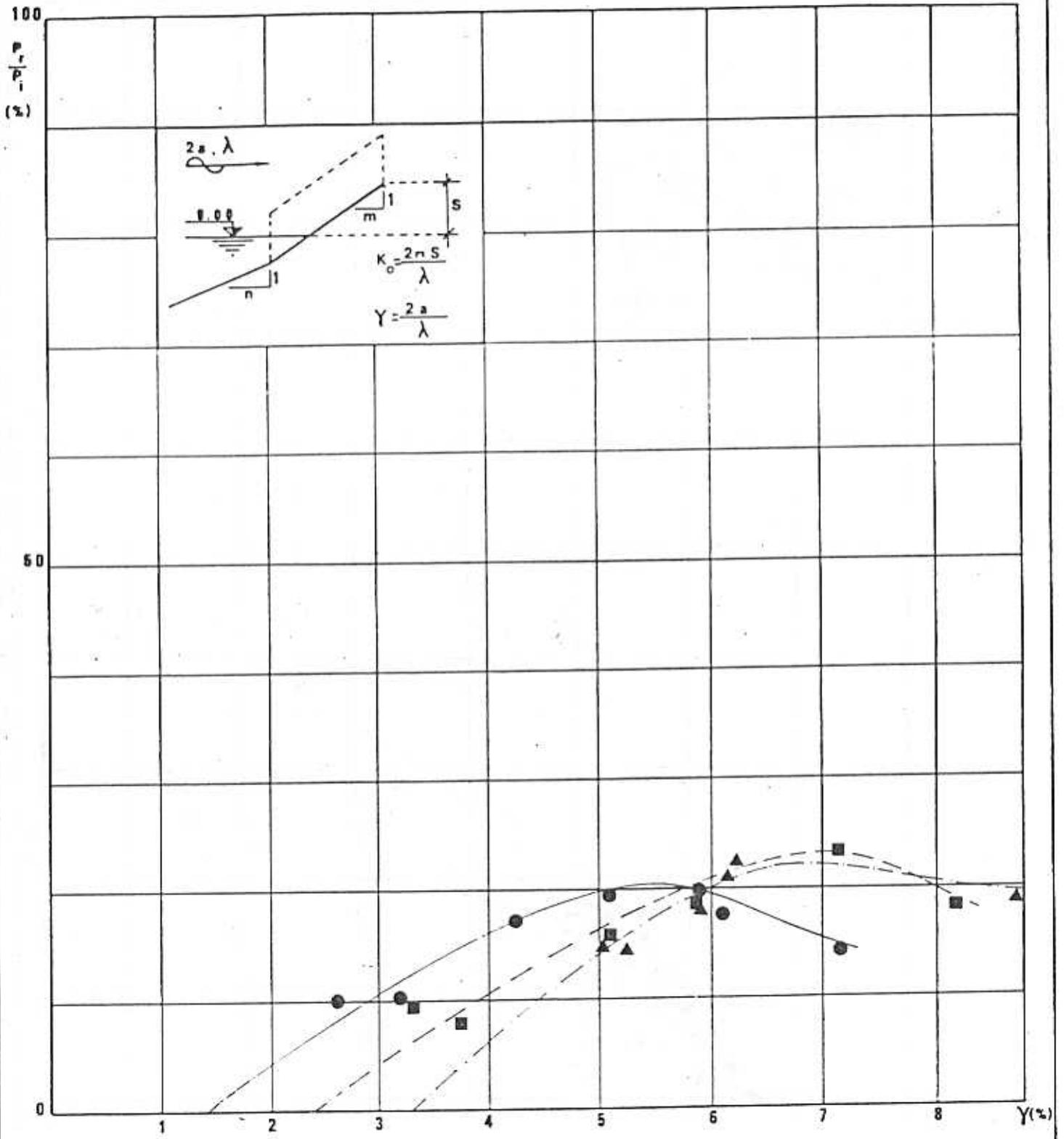
TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0 = 0.400$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 1.50$

$m = 2.50$ $n = 1.00$	$m = 2.50$ $n = 2.50$	$m = 2.50$ $n = 4.00$
● —————	■ - - - - -	▲ - - - - -

FIG. 92..



TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d'énergie récupéré/flux d'énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0=0.400$

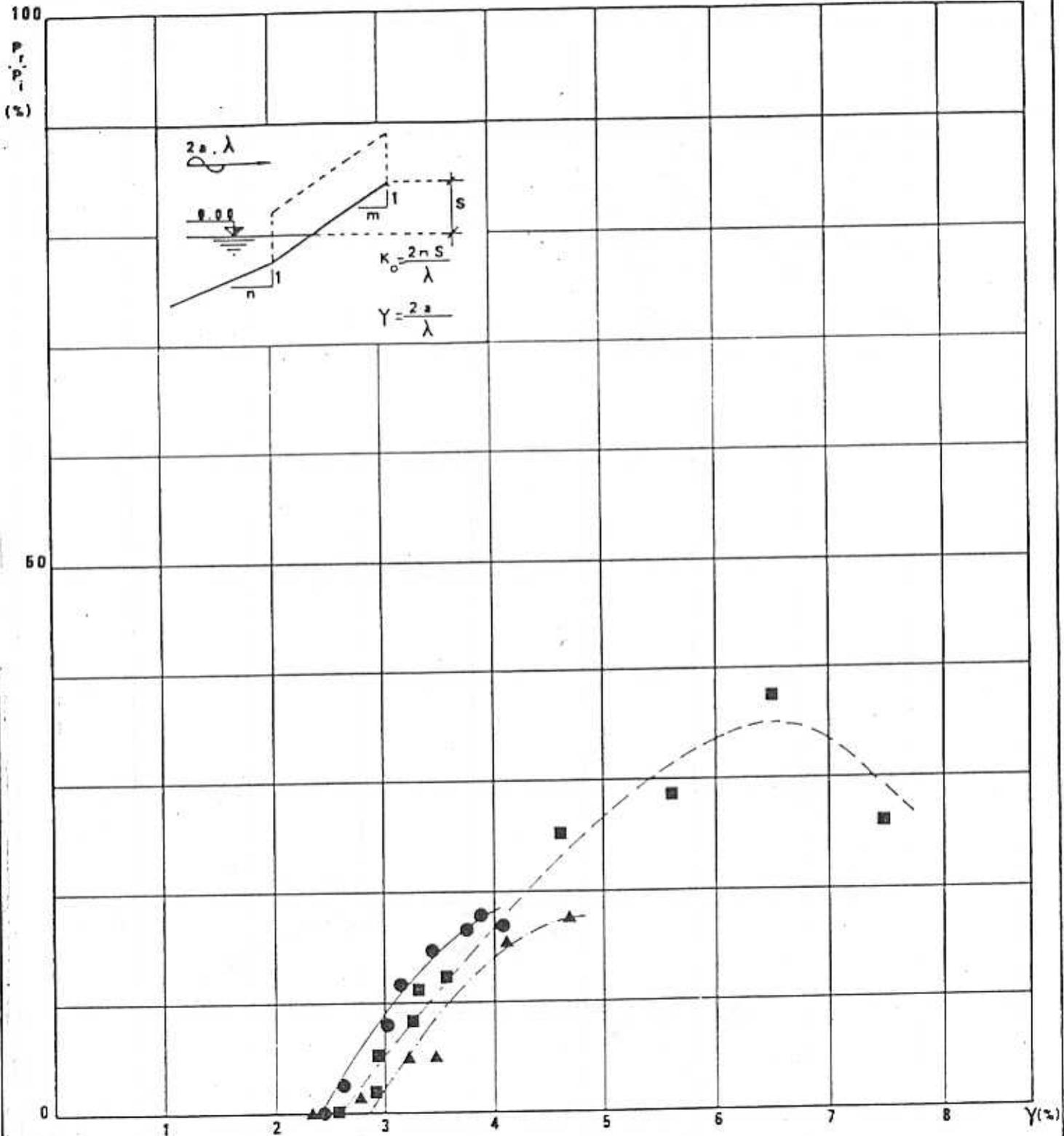
$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 10.00$

$m = 2.50$      $n = 1.00$   
 ———

$m = 2.50$      $n = 2.50$   
 - - - - -

$m = 2.50$      $n = 4.00$   
 - · - · -

FIG. 93.



TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0=0.400$

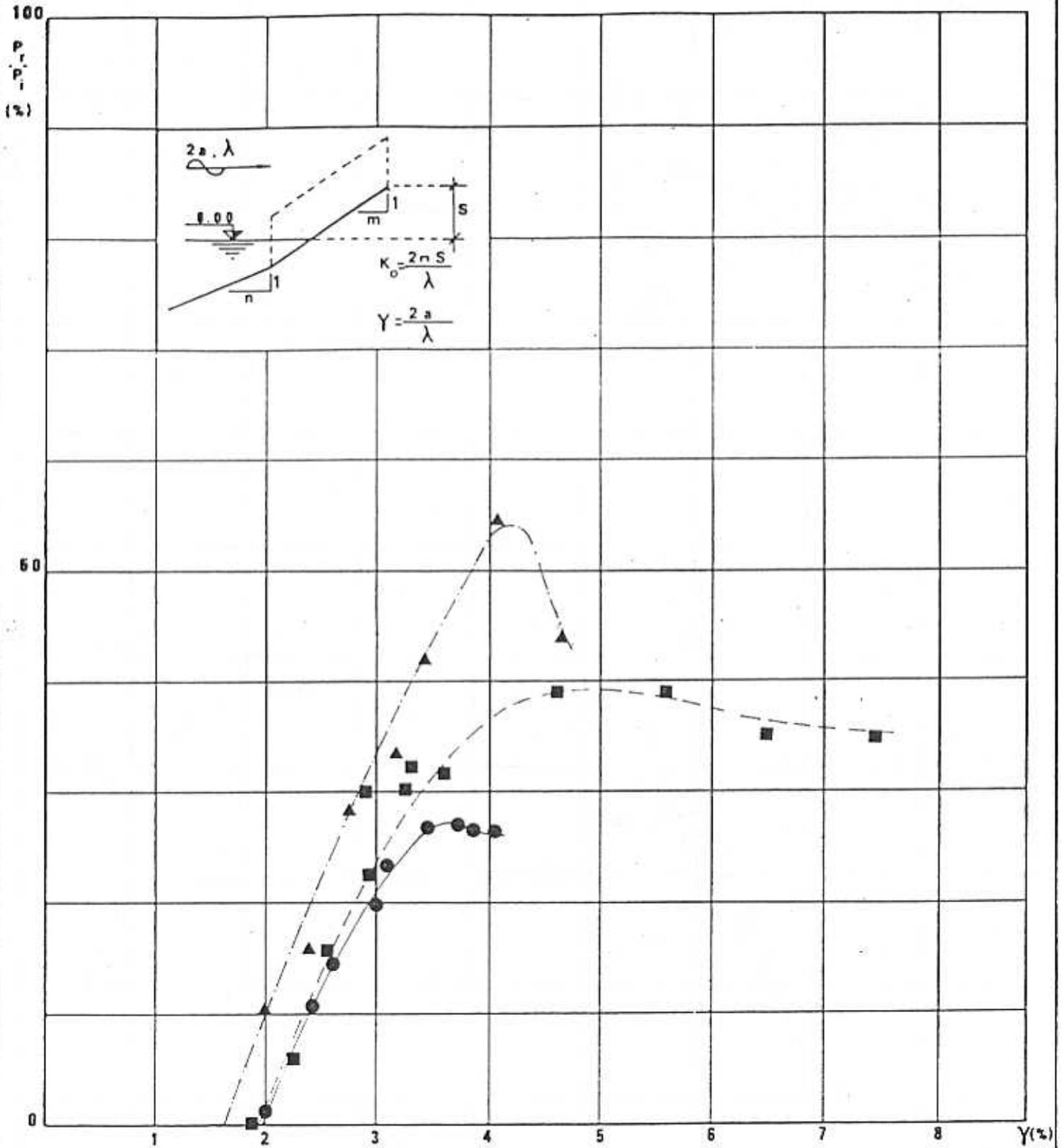
$$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 2.50$$

$m = 2.00$      $n = 1.00$

$m = 2.00$      $n = 2.00$

$m = 2.00$      $n = 4.00$

FIG. 94...



TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0=0.400$

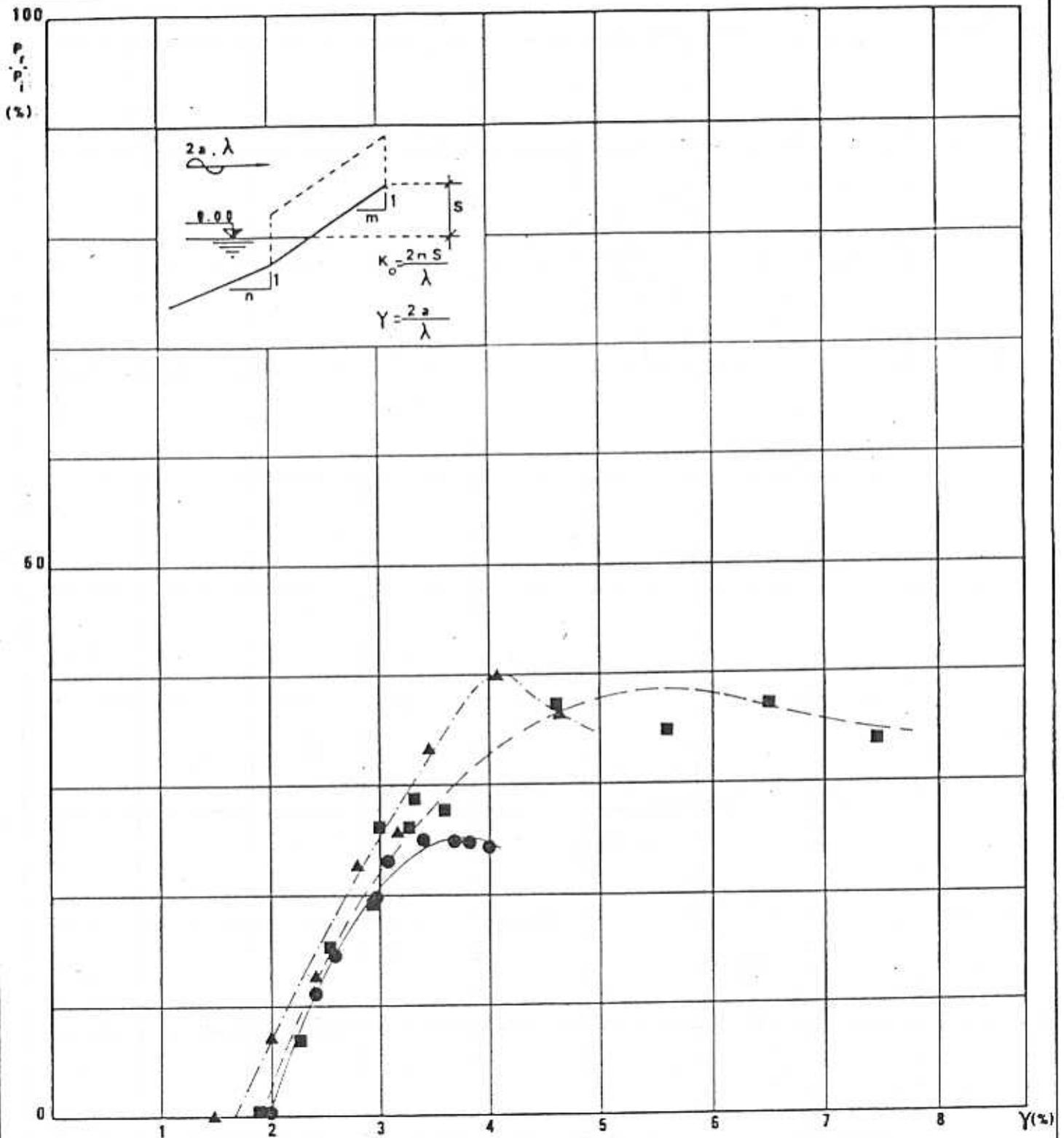
$$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 3.00$$

$m=2.00$      $n=1.00$   
● —————

$m=2.00$      $n=2.00$   
■ - - - - -

$m=2.00$      $n=4.00$   
▲ - · - · -

FIG. 95.



### TRIÈDRES À HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d'énergie récupéré/flux d'énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0=0.400$

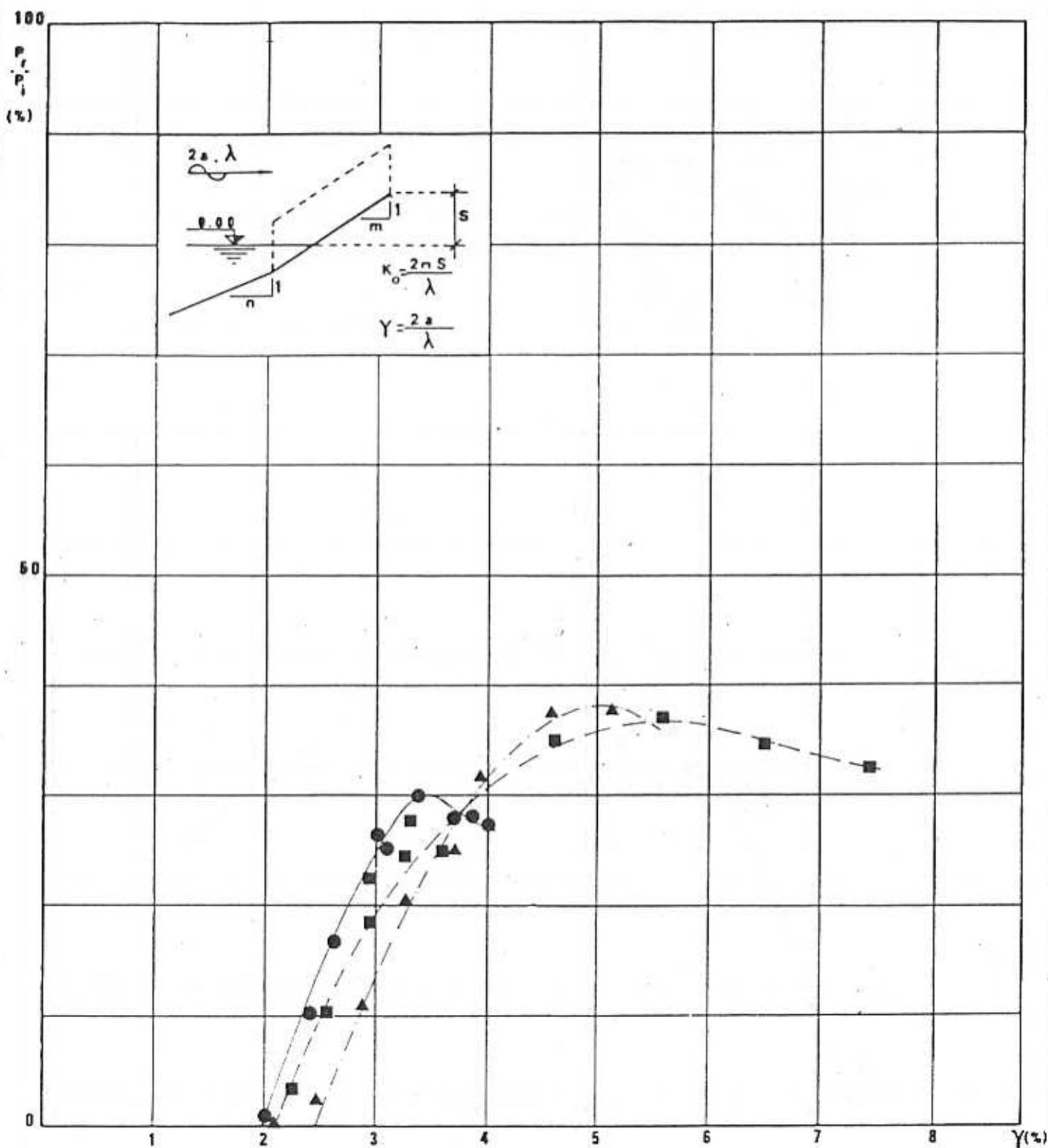
$$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 1.75$$

$m = 2.00$      $n = 1.00$   
 ● —————

$m = 2.00$      $n = 2.00$   
 ■ - - - - -

$m = 2.00$      $n = 4.00$   
 ▲ - - - - -

FIG 96.



### TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0=0.400$

$$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 4.00$$

m = 2.00    n = 1.00

●

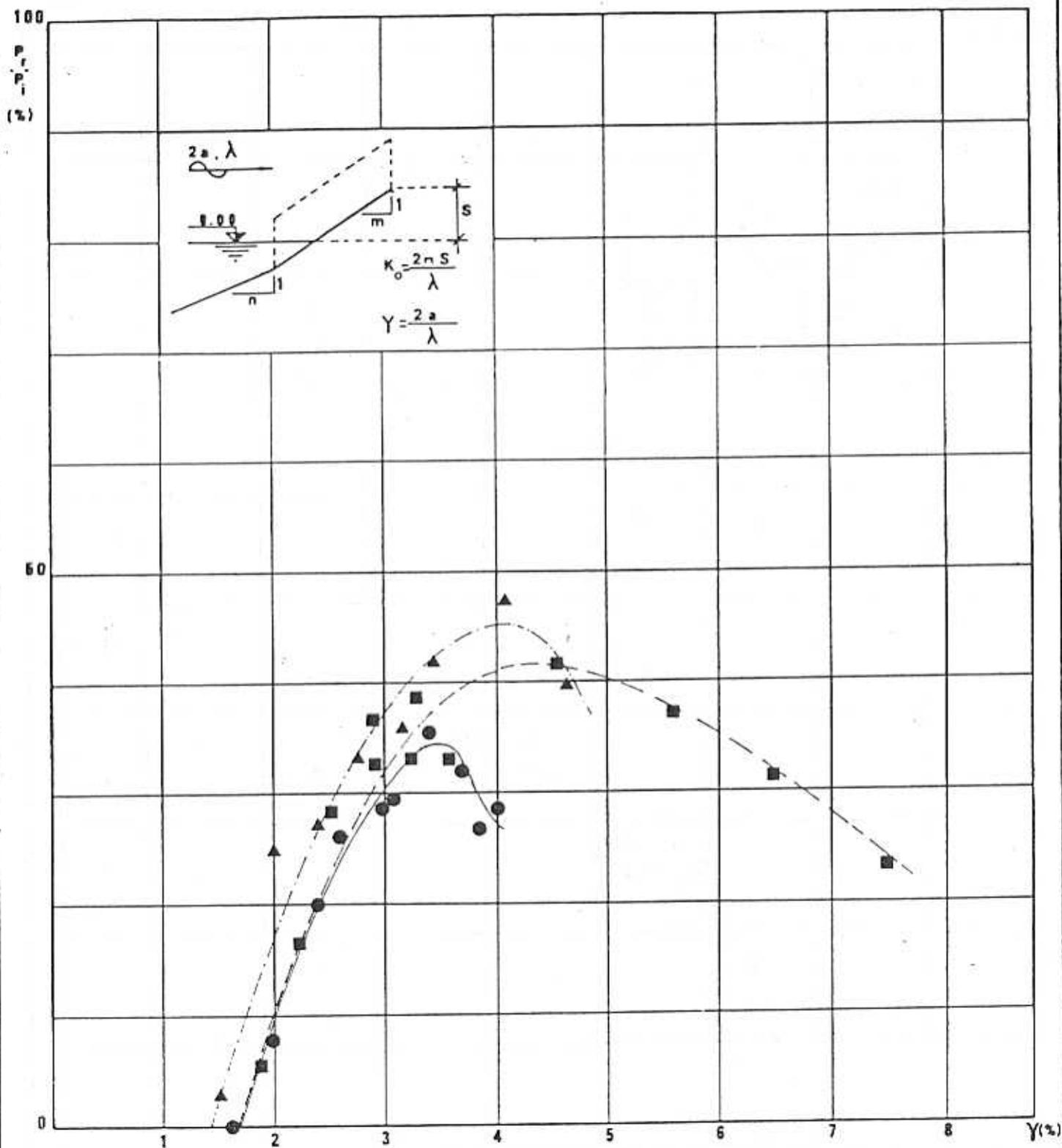
m = 2.00    n = 2.00

■

m = 2.00    n = 4.00

▲

FIG. 97...



### TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d'énergie récupéré/flux d'énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0=0.400$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 5.00$

$m = 2.00$      $n = 1.00$



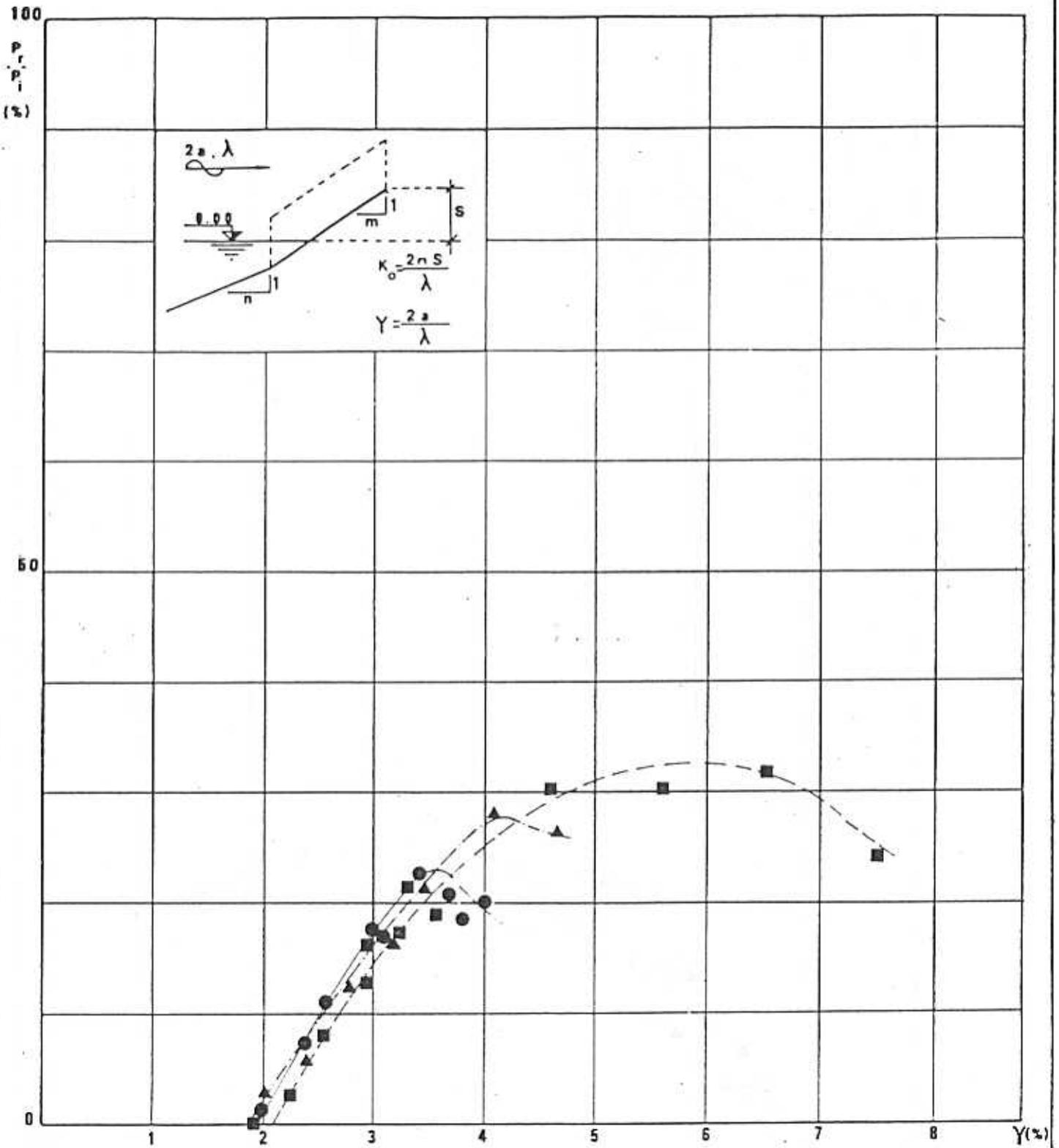
$m = 2.00$      $n = 2.00$



$m = 2.00$      $n = 4.00$



FIG. 98..



TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0=0.400$

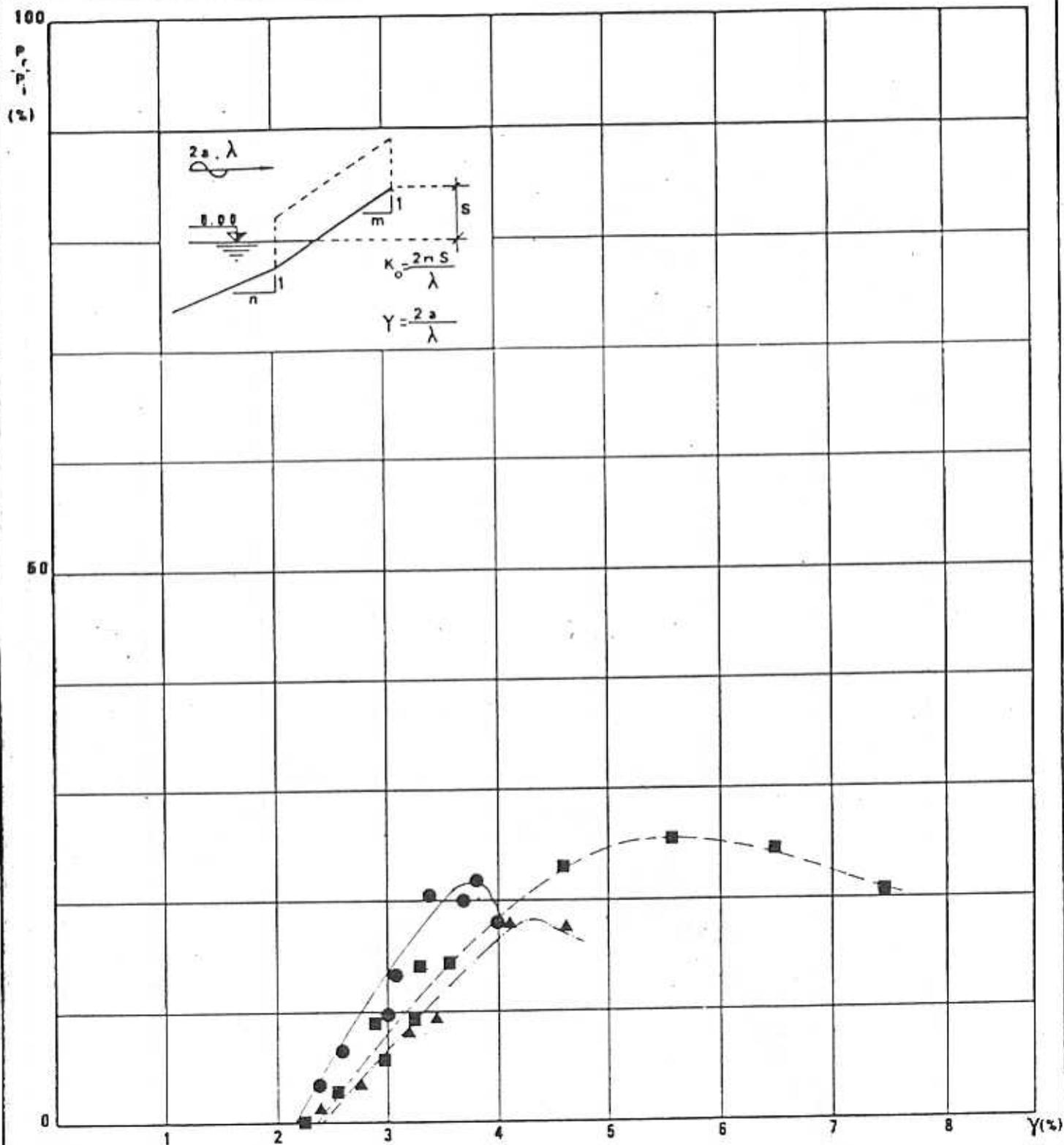
$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 7.50$

$m=2.00$      $n=1.00$

$m=2.00$      $n=2.00$

$m=2.00$      $n=4.00$

FIG. 99 .



### TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d'énergie récupéré/flux d'énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0 = 0.400$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 10.00$

$m = 2.00$      $n = 1.00$



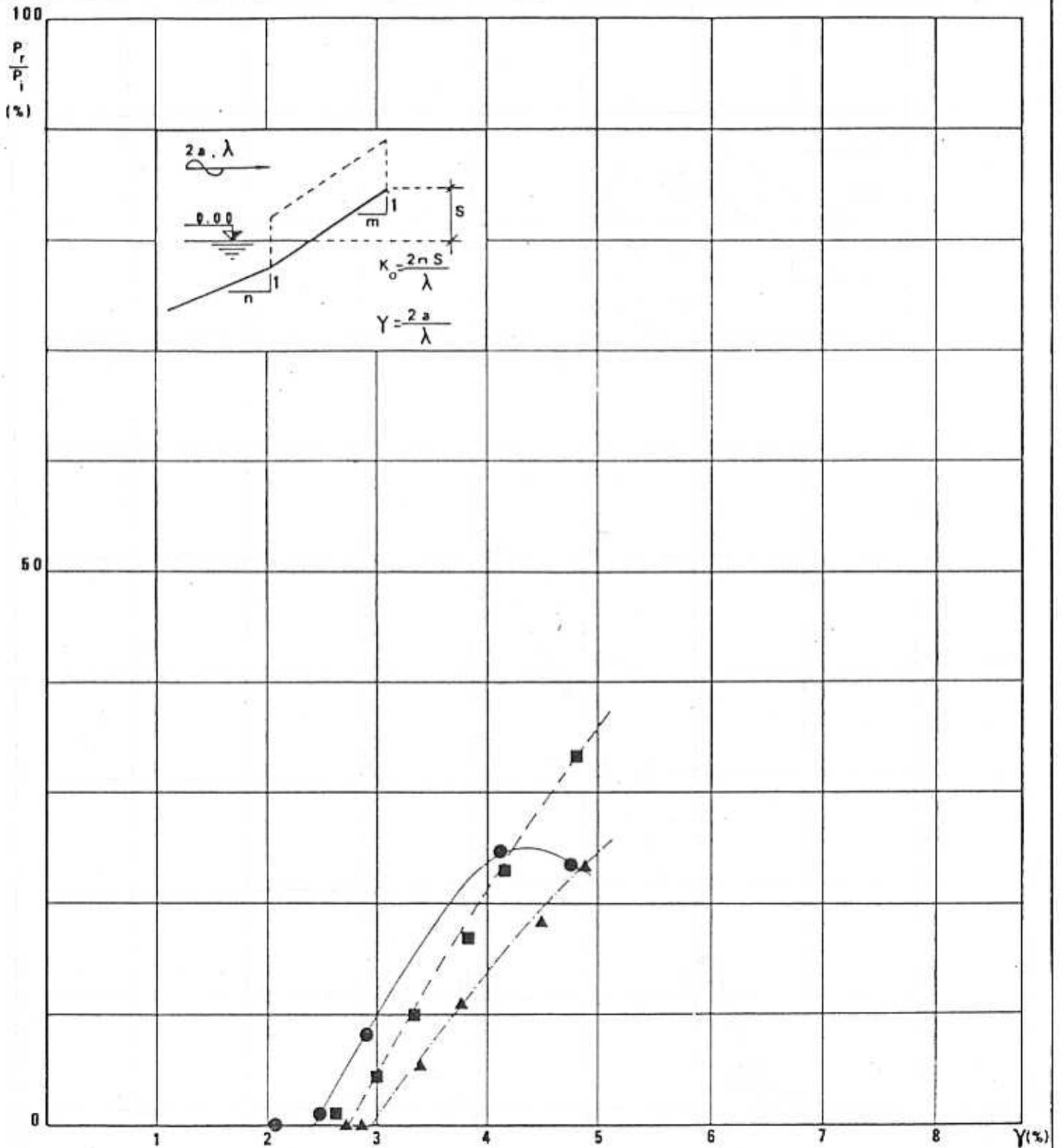
$m = 2.00$      $n = 2.00$



$m = 2.00$      $n = 4.00$



FIG. 100..



TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0=0.400$

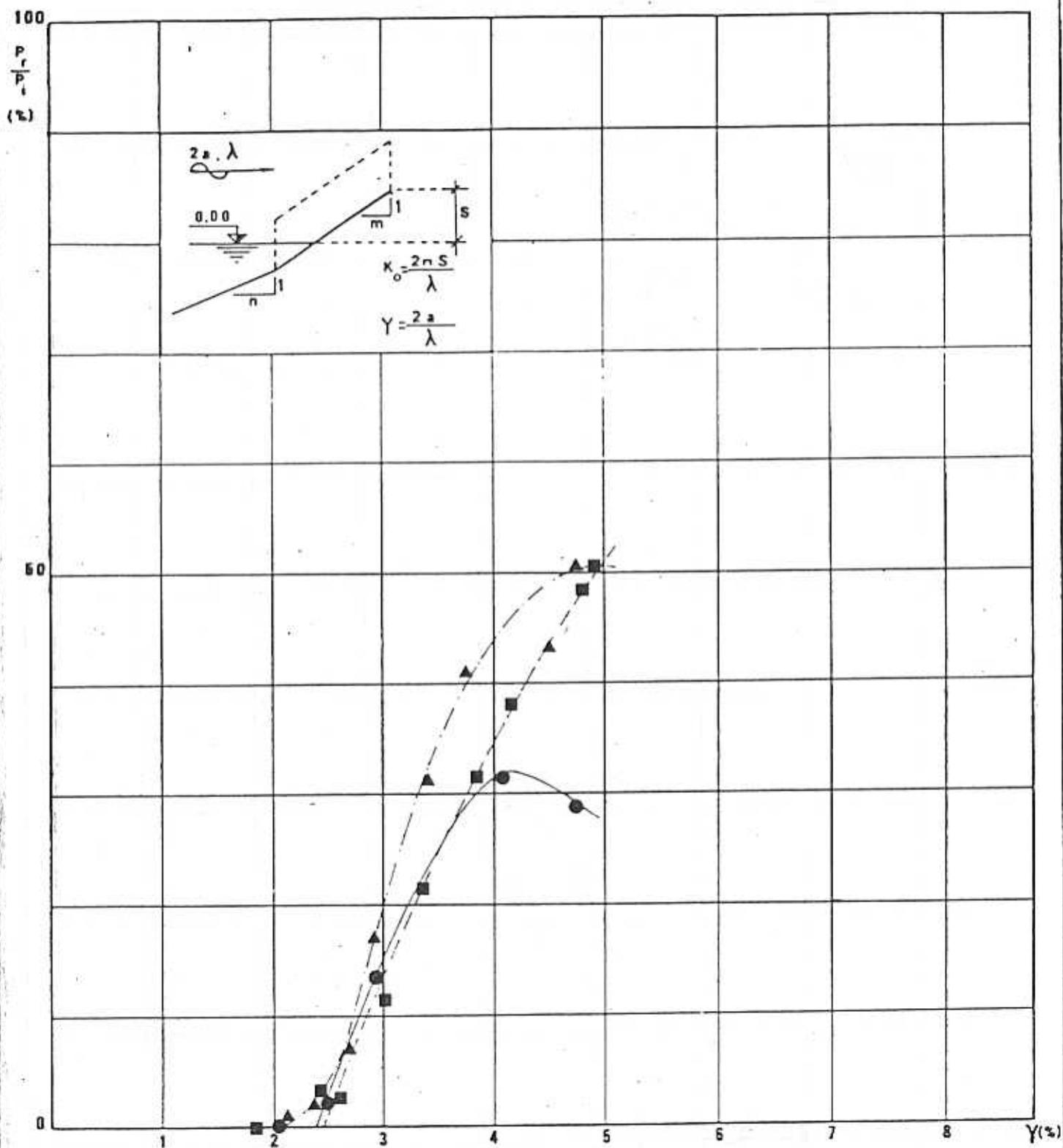
$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 2.50$

$m=1.50$      $n=1.00$   
● —————

$m=1.50$      $n=1.50$   
■ - - - - -

$m=1.50$      $n=4.00$   
▲ - · - - -

FIG. 101...



### TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d'énergie récupéré/flux d'énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0=0.400$

$$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 3.00$$

m = 1.50      n = 1.00

●

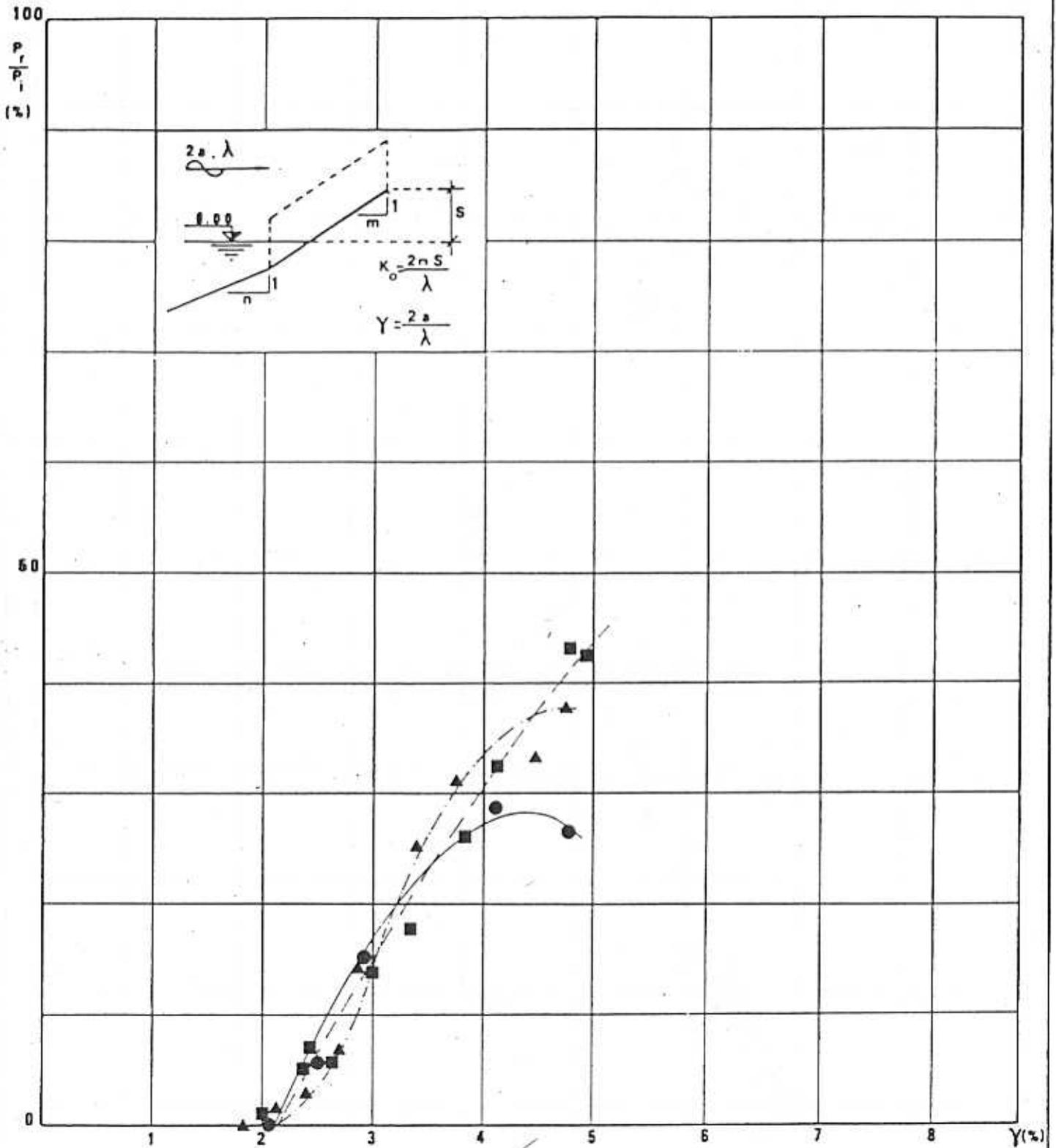
m = 1.50      n = 1.50

■

m = 1.50      n = 4.00

▲

FIG. 102..



### TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d'énergie récupéré/flux d'énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0=0.400$

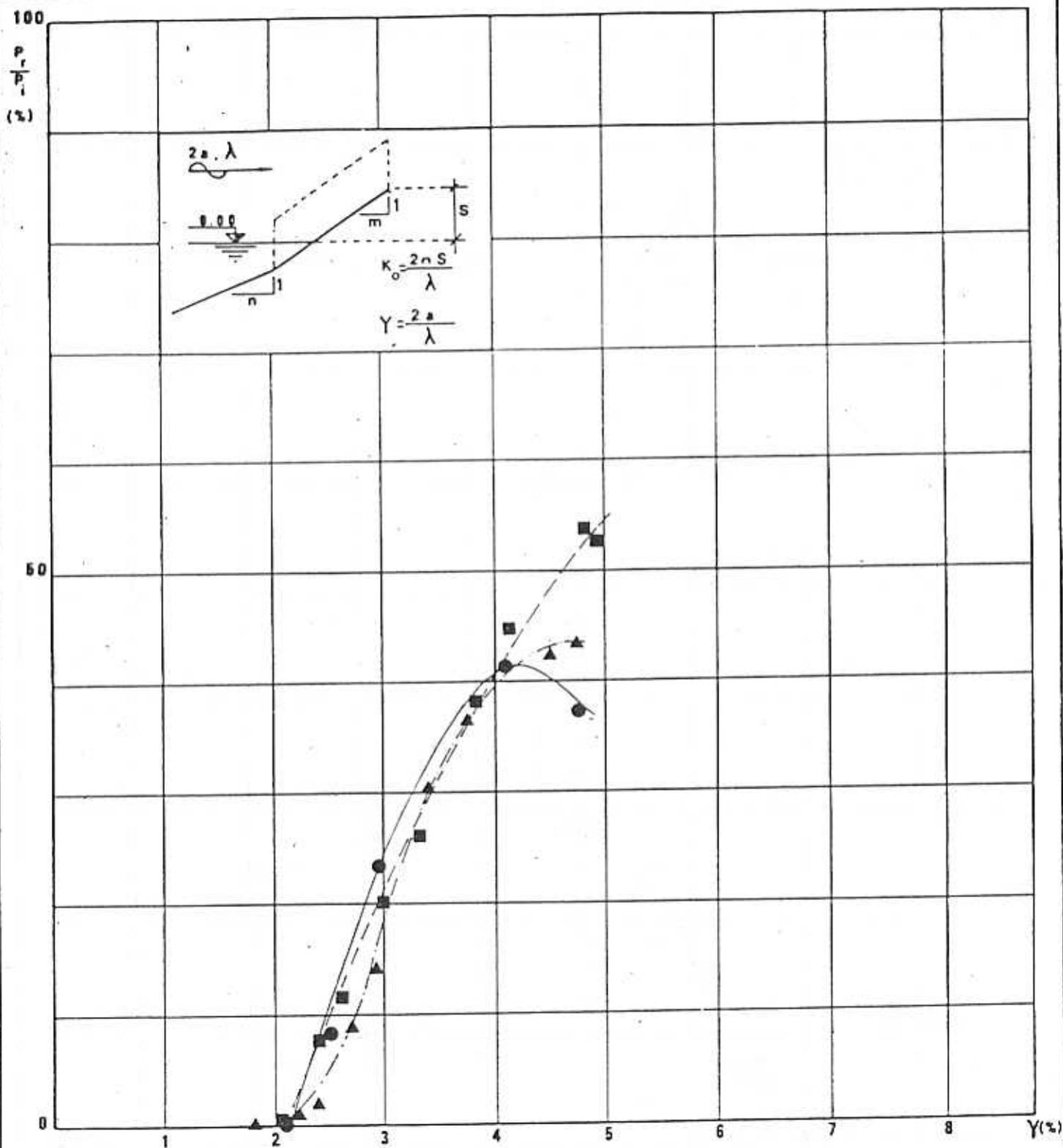
$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 3.75$

$m=1.50$      $n=1.00$   
 ● —————

$m=1.50$      $n=1.50$   
 ■ - - - - -

$m=1.50$      $n=4.00$   
 ▲ - - - - -

FIG. 103..



### TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0=0.400$

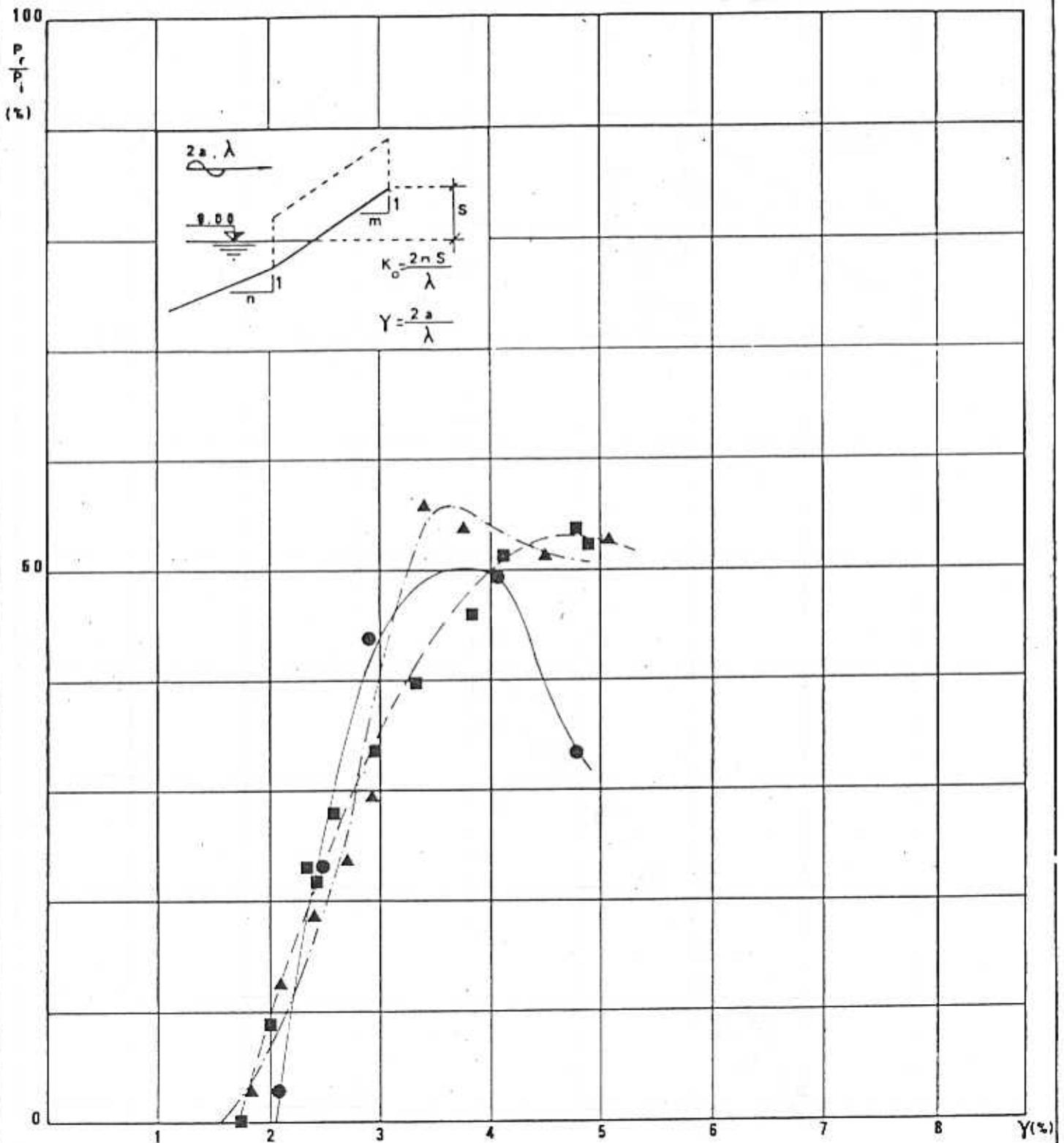
$$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 4.00$$

$m=1.50$      $n=1.00$   
● ———

$m=1.50$      $n=1.50$   
■ - - - -

$m=1.50$      $n=4.00$   
▲ - - - -

FIG. 104.



### TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0=0.400$

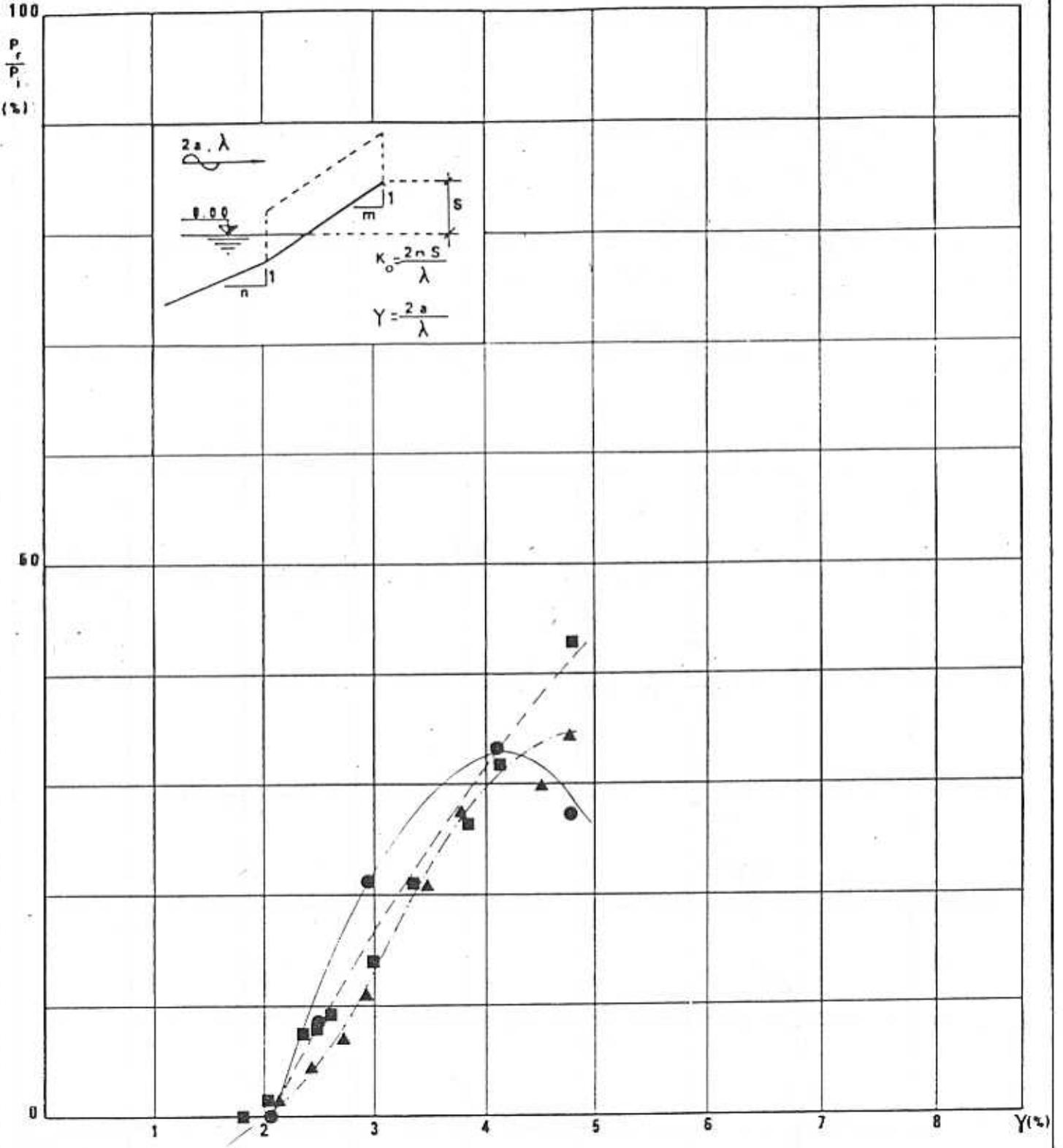
$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 5.00$

$m=1.50$      $n=1.00$   
● ———

$m=1.50$      $n=1.50$   
■ - - - -

$m=1.50$      $n=4.00$   
▲ - · - · -

FIG. 105..



TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0=0,400$

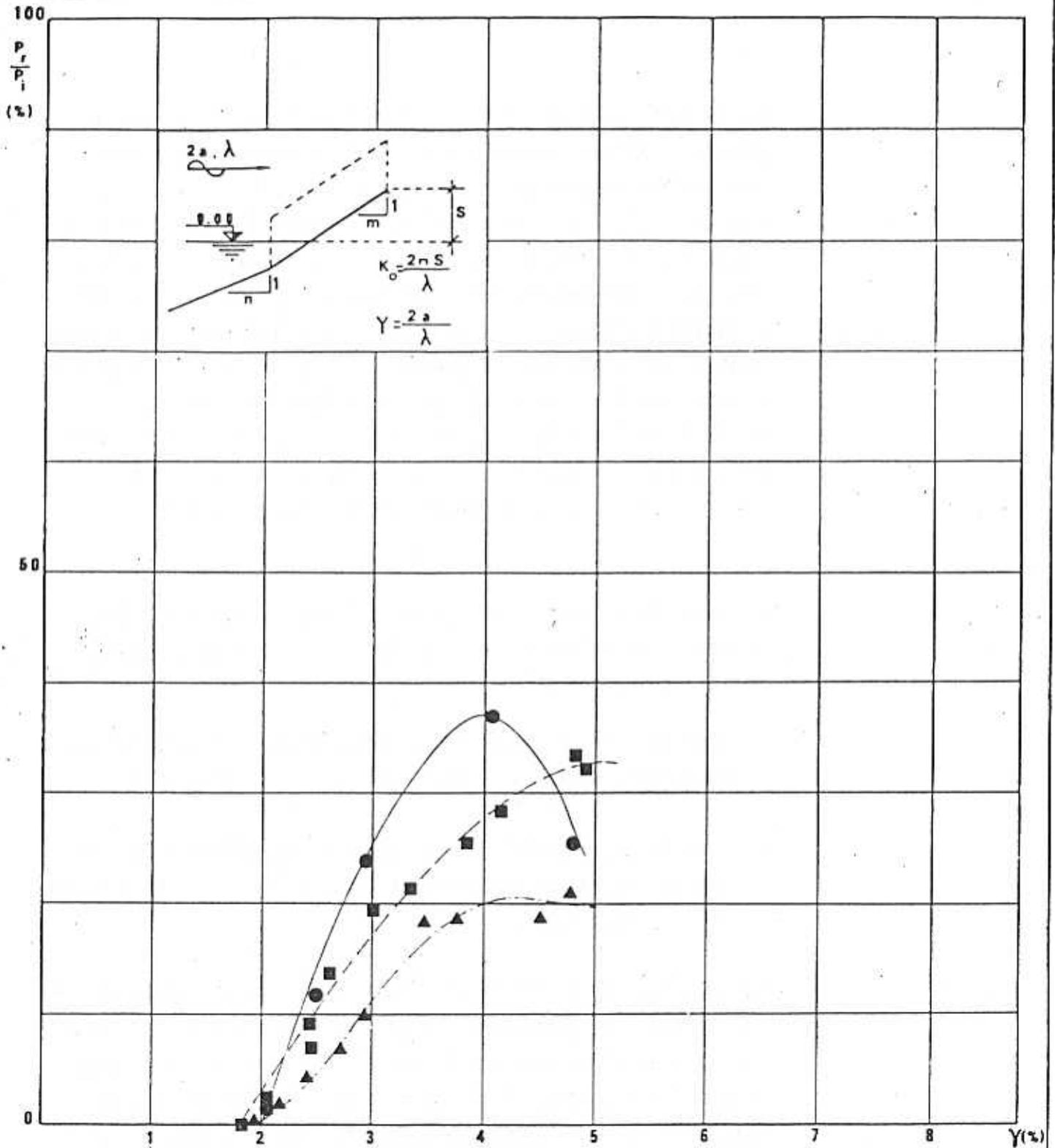
$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 7,50$

$m=1,50$      $n=1,00$   
 —————

$m=1,50$      $n=1,50$   
 - - - - -

$m=1,50$      $n=4,00$   
 - - - - -

FIG. 106.



TRIEDRES A HOULE

Rapport  $P_r/P_i$  (flux d' énergie récupéré/flux d' énergie incident) et cambrure de la houle  $\gamma$  pour  $K_0=0.400$

$r = \frac{\text{ouverture avant du trièdre}}{\text{ouverture arrière du trièdre}} = 10.00$

$m=1.50$      $n=1.00$   
● —————

$m=1.50$      $n=1.50$   
■ - - - - -

$m=1.50$      $n=4.00$   
▲ - - - - -

FIG. 107..

pour  $0,2 \leq K_0 \leq 0,5$  et  $4 \leq r \leq 5$ . Ici, nous pouvons constater aussi une distinction entre deux types des courbes mais pour  $K_0 < 0,5$  et  $K_0 > 0,5$ . Pour le cas de  $K_0 = 0,7$  nous observons une particularité intéressante : pour les trièdres à  $3,75 \leq r \leq 7,50$ , les courbes, après un point d'inflexion à  $\gamma = 0,065$ , ont une tendance ascendante vers un deuxième maximum local correspondant à une cambrure très grande ( $\gamma = 0,08$ ). Ce phénomène pourrait être exploité par les systèmes de focalisation de la houle (v. § 9.). Le trièdre à  $r = 5$  est en général le plus favorable et les trièdres à  $r = 2,5$  et  $r = 10$  les plus défavorables (v. fig. 73 à 79).

. La comparaison des résultats des trièdres avec celles des rampes de déferlement (v. fig. 80 à 86), conduit aux constatations suivantes :

- 1) Pour la pente de  $1/2$ , les trièdres donnent les meilleurs rendements pour  $\gamma < 0,04$  et  $K_0 \leq 0,30$ .
- 2) Pour la pente de  $1/1,5$  les rampes de déferlement donnent les meilleurs rendements dans les cas où  $\gamma \geq 0,035$  et  $K_0 > 0,20$ .

Par conséquent, si le spectre de la houle du site examiné est centré vers les petites cambrures (de 1,5 % à 3 %), la solution des trièdres à pente de  $1/2$  et  $r = 5$  semble la plus propice. Par contre, si le spectre de la houle est centré vers les grandes cambrures, la solution d'une rampe de déferlement (plutôt d'une pente de  $1/1,5$ ) sera la meilleure.

. L'examen de l'influence du changement de la pente du fond de la mer par rapport à celle de la base des trièdres a donné

les résultats suivants :

1) Pente de la base des trièdres de 1/2,5 :

si la pente du fond de la mer devant le dispositif est plus abrupte (1/1), le rendement est meilleur (que si la pente était la même) au moins jusqu'à la cambrure de 6 %, pour tous les types des trièdres. Si la pente du fond est plus douce (1/4) l'influence est plutôt défavorable pour les petites cambrures et légèrement favorable pour les plus grandes cambrures (v. fig. 87 à 93, pour  $K_0 = 0,4$ ).

2) Pente à la base des trièdres de 1/2 : jusqu'à une cambrure de 4 %, l'influence de la pente du fond (1/1 ou 1/4) n'est pas importante.

Pour le seul cas  $r = 3,0$ , la pente de 1/4 a une répercussion favorable. Pour  $\gamma > 5$  %, le changement de la pente du fond a toujours une influence défavorable sur le rendement. (v. fig. 94 à 100 pour  $K_0 = 0,4$ ).

3) Pente de la base des trièdres de 1/1,5 :

Pour les trièdres de  $r = 3$  à 7,5 et jusqu'à la cambrure de  $\gamma = 4$  %, le changement de la pente du fond de la mer dans la gamme de 1/1 et 1/4 n'a pratiquement pas d'influence sur le rendement des trièdres. Pour les trièdres de  $r = 2,5$  et  $r = 10$ , la pente du fond 1/1 a une influence défavorable jusqu'à  $\gamma = 4$  %. Au-delà de cette cambrure, le changement de la pente du fond a une répercussion défavorable (v. fig. 101 à 107, pour  $K_0 = 0,40$ ).

Sur la fig. 108, nous présentons la cambrure critique en fonction de  $K_0 = \frac{2\pi S}{\lambda}$  pour les trièdres à  $r = 5$  et les pentes de 1/2 et 1/1,5. A chaque  $K_0$  correspond une cambrure critique  $\gamma_c$  telle que pour  $\gamma < \gamma_c$ , on

n'a pas de franchissement du seuil, tandis que pour  $\gamma > \gamma_c$ , l'eau qui entre dans le trièdre franchit le seuil. Sur la même figure, nous avons rapporté les courbes pour les rampes de déferlement (v. fig. 53).

Nous pouvons constater que pour la même pente et le même  $K_0$ , la cambrure critique des trièdres est sensiblement inférieure de celle des rampes de déferlement. Par conséquent, les trièdres présentent l'avantage, vis-à-vis des rampes simples de même pente, qu'une houle d'amplitude et de longueur d'onde données peut franchir un seuil, parfois deux fois plus élevé avec les trièdres qu'avec les rampes simples :

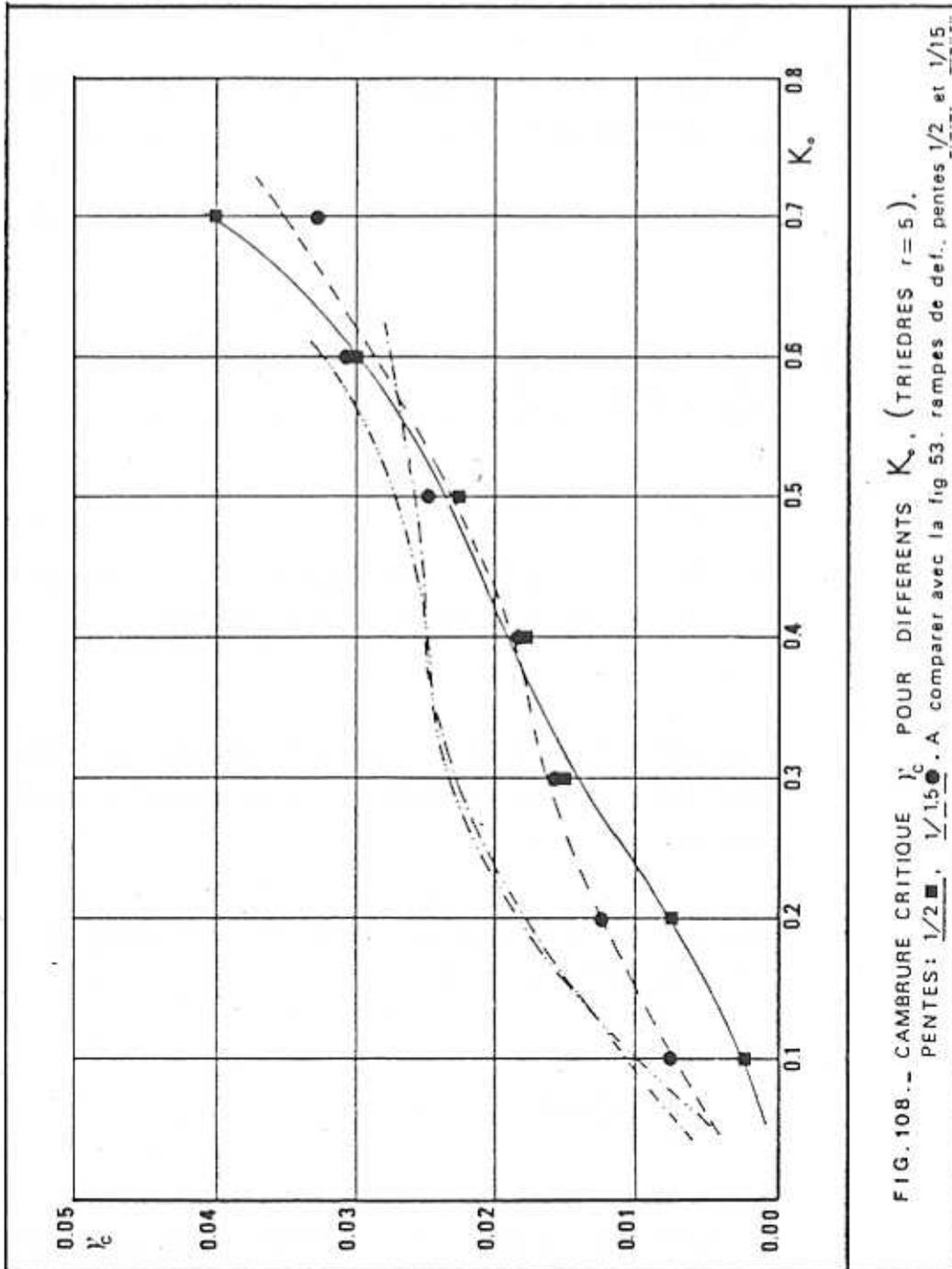
P.e. si  $\lambda = 100$  m,  $H = 2,00$  m, ( $\gamma = 2\%$ )  
cette houle peut franchir un seuil :

$$S \leq \frac{\lambda K_0}{2\pi} \frac{100 \times 0,23}{2\pi} = 3,66 \text{ m} \quad \text{pour une}$$

rampe de déferlement de pente 1/2

et  $S \leq \frac{100 \times 0,42}{2M} = 6,68 \text{ m}$  pour les  
trièdres de  $r = 5$  ayant la pente de base à 1/.2 également.

De ce point de vue, pour les trièdres de  $r = 5$ , la pente 1/2 semble plus favorable que celle de 1/1,5 pour des  
 $K_0 < 0,4$  et plus défavorable si  $K_0 > 0,4$ .



## 8.2. Représentation analytique des résultats

Pour les trièdres à  $r = 5$ , nous avons cherché une représentation analytique en essayant la méthode présentée en § 7.2.

Sur la fig. 109, nous donnons quatre exemples pris parmi les résultats de la fig. 70.

Les courbes montrent le lissage par une expression du type :

$$\frac{P_r}{P_i} = R = \frac{Y - Y_c}{A(Y - Y_c)^2 + B} \quad (78)$$

où  $R$  est une fonction de  $\gamma$  et de  $K_0$  ;  
 $A, B, Y_c$  sont des fonctions de  $K_0$ .

Les coefficients  $A, B$  et  $Y_c$  pour chacune des courbes sont déterminés par une méthode de moindres carrés (système linéaire surdéterminé).

Les courbes de la fig. 108 montrent le lissage de  $Y_c(K_0)$  par un polynôme du type :

$$Y_c = c_1 K_0^3 + c_2 K_0^2 + c_3 K_0 \quad (79)$$

pour chacune des deux pentes. Ainsi, nous avons trouvé les expressions analytiques de  $Y_c(K_0)$  :

Pour la pente 1/2 :

$$Y_c = 0.0546 K_o^3 - 0.0146 K_o^2 + 0.0404 K_o \quad (80)$$

Pour la pente 1/1,5 :

$$Y_c = 0.1811 K_o^3 - 0.1797 K_o^2 + 0.0896 K_o \quad (81)$$

La fig. 110 donne pour chacune des pentes examinées, l'évolution des coefficients A et B en fonction de  $K_o$ . Le lissage de ces coefficients nous a permis de donner les expressions analytiques suivantes :

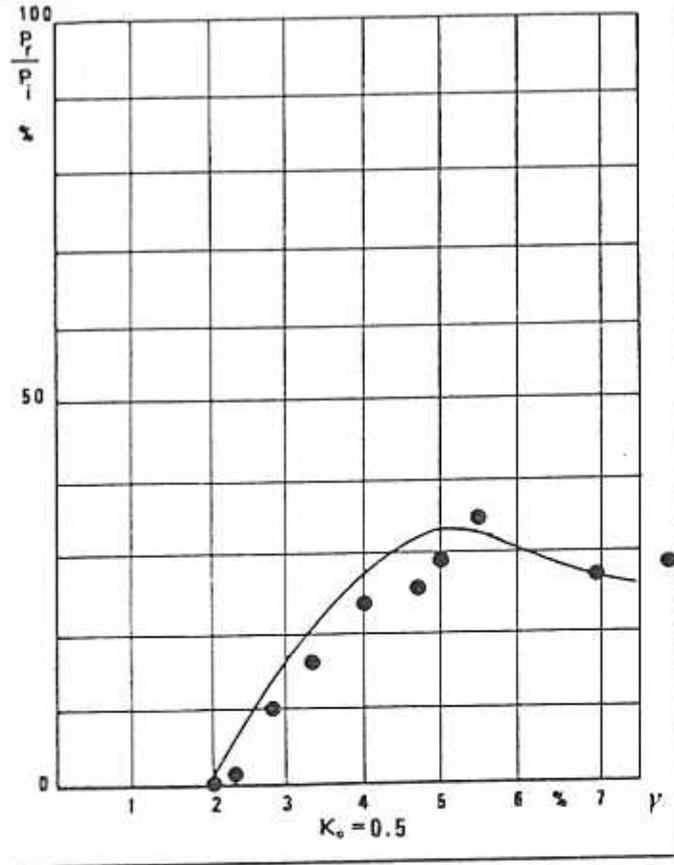
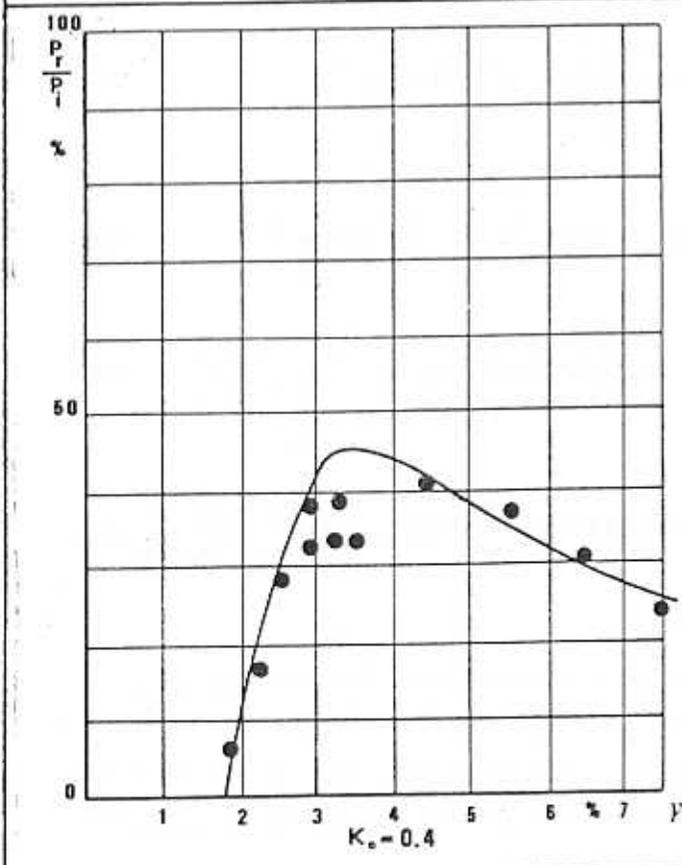
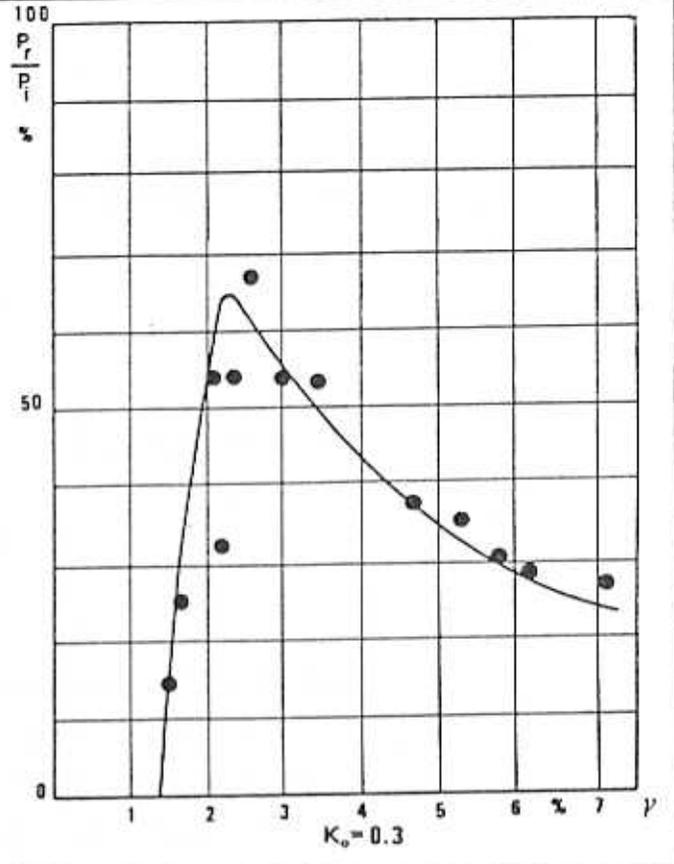
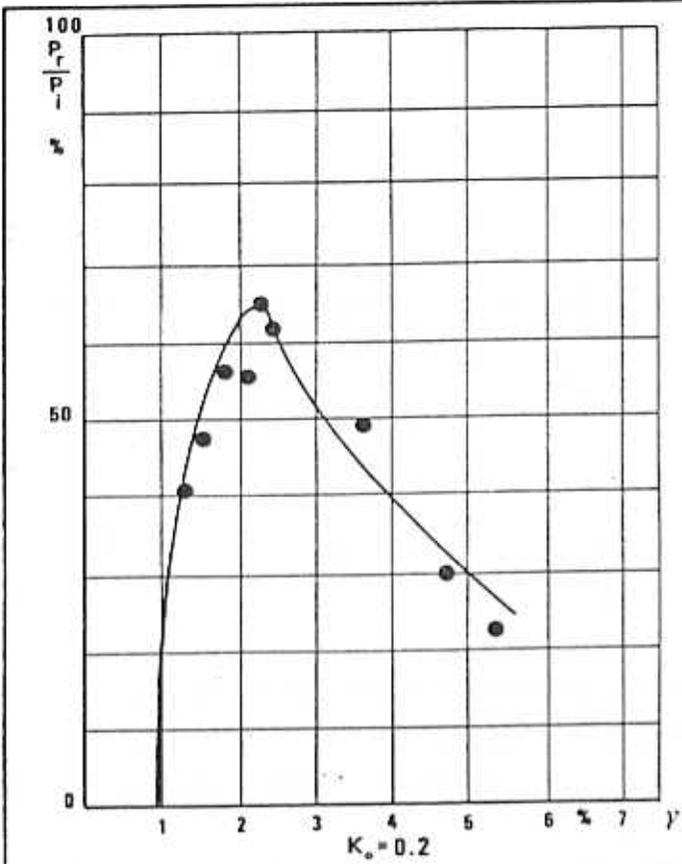
$$\text{Pente de } 1/2 \left\{ \begin{array}{l} A = 170.58 \sqrt{0.1806 - (K_o - 0.285)^2} \quad (82) \\ B = 0.1825 - 0.3571 \sqrt{0.24 - (K_o - 0.25)^2} \quad (83) \end{array} \right.$$

$$\text{Pente de } 1/1,5 \left\{ \begin{array}{l} A = -12.5 + 140 \sqrt{0.2025 - (K_o - 0.5)^2} + \frac{26.6}{\text{ch}(50K_o - 5)} \quad (84) \\ B = 0.205 - 0.417 \sqrt{0.2025 - (K_o - 0.45)^2} - \frac{0.041}{\text{ch}(40K_o - 4)} \quad (85) \end{array} \right.$$

A partir de ces formules, nous avons tracé les courbes de

$R(\gamma, K_o)$  pour la pente de 1/2, fig. 111 et pour la pente de 1/1,5, fig. 112. Ces deux modèles peuvent être appliqués dans le domaine déterminé par les expressions suivantes :

$$0,01 \leq K_o \leq 0,7 \text{ et } 0,00 \leq \gamma \leq 0,07.$$



TRIEDRES A HOULE, (r=5).

EXEMPLES DE LISSAGE, (pente 1/2).

Points expérimentaux: ●

$$\frac{P_r}{P_i} = \frac{\gamma - \gamma_c}{A(\gamma - \gamma_c)^2 + B}$$

FIG. 109.

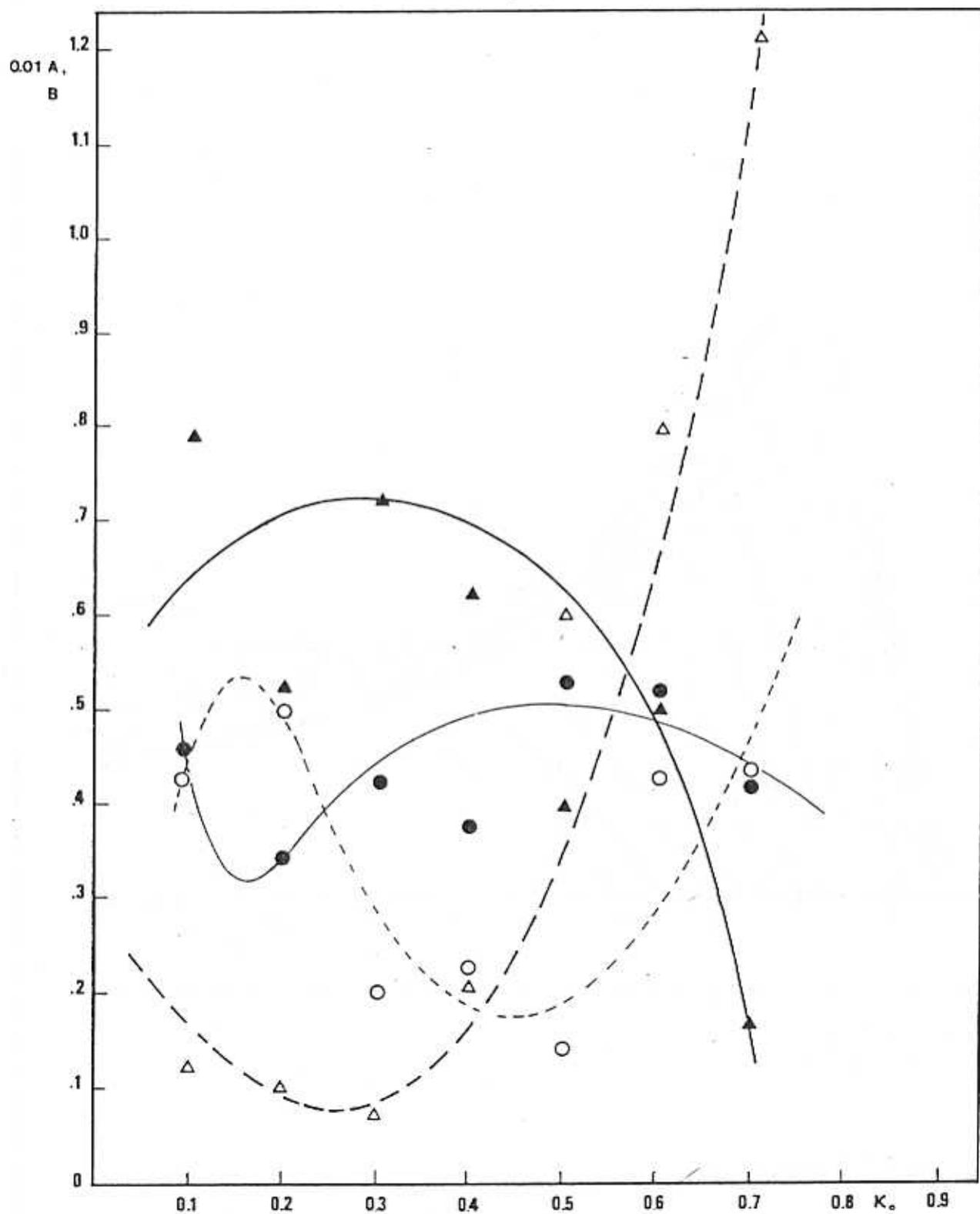


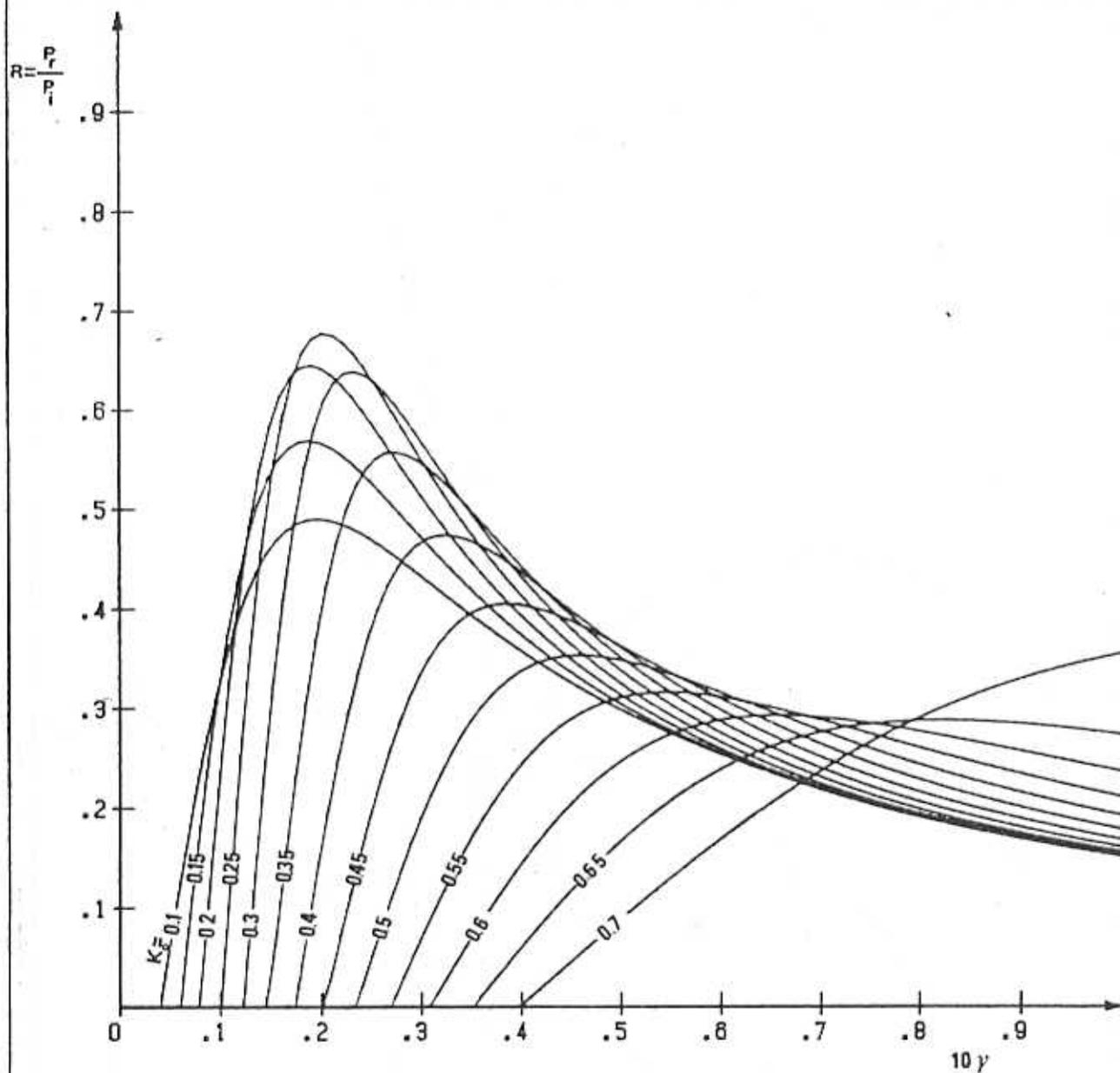
FIG.110.- COEFFICIENTS A ET B, (V. FIG.111, 112), PAR RAPPORT A  $K_0$ ; TRIEDRES  $r=5$ .

PENTE 1/2 001A ▲ ———

—//— B △ - - - - -

PENTE 1/15 ● ———

—//— ○ - - - - -



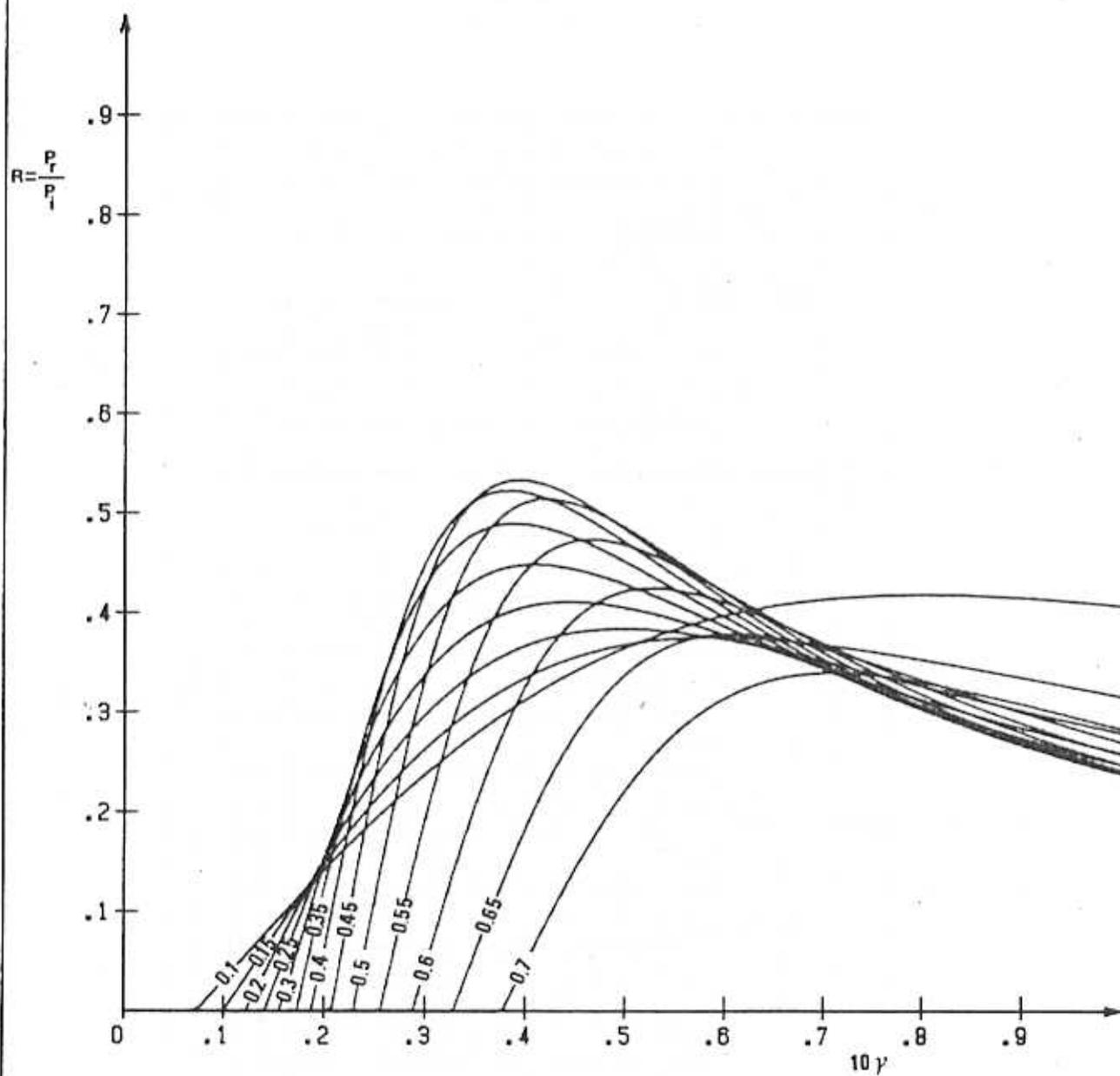
$$\frac{P_r}{P_i} = \frac{r - \gamma_c}{A(r - \gamma_c)^2 + B}$$

$$\gamma_c = 0.0546 K_0^3 - 0.0146 K_0^2 + 0.0404 K_0$$

$$A = 170.58 \sqrt{0.1806 - (K_0 - 0.285)^2}$$

$$B = 0.1825 - 0.3571 \sqrt{0.24 - (K_0 - 0.25)^2}$$

FIG. 111.— TRIEDRES,  $r=5$ , pente  $1/2$ ;  $R = \frac{P_r}{P_i}$  par rapport à  $K_0$  et  $\gamma$  ..



$$\frac{P_r}{P_i} = \frac{Y - Y_c}{A(Y - Y_c)^2 + B}$$

$$Y_c = 0.181 K_0^3 - 0.1797 K_0^2 + 0.0896 K_0$$

$$A = -12.5 + 140.0 \sqrt{0.2025 - (K_0 - 0.50)^2}$$

$$B = 0.205 - 0.417 \sqrt{0.2025 - (K_0 - 0.45)^2}$$

FIG. 112. — TRIEDRES,  $r=5$ , pente  $\sqrt{15}$ ;  $R = \frac{P_r}{P_i}$  par rapport à  $K_0$  et  $\gamma$ .



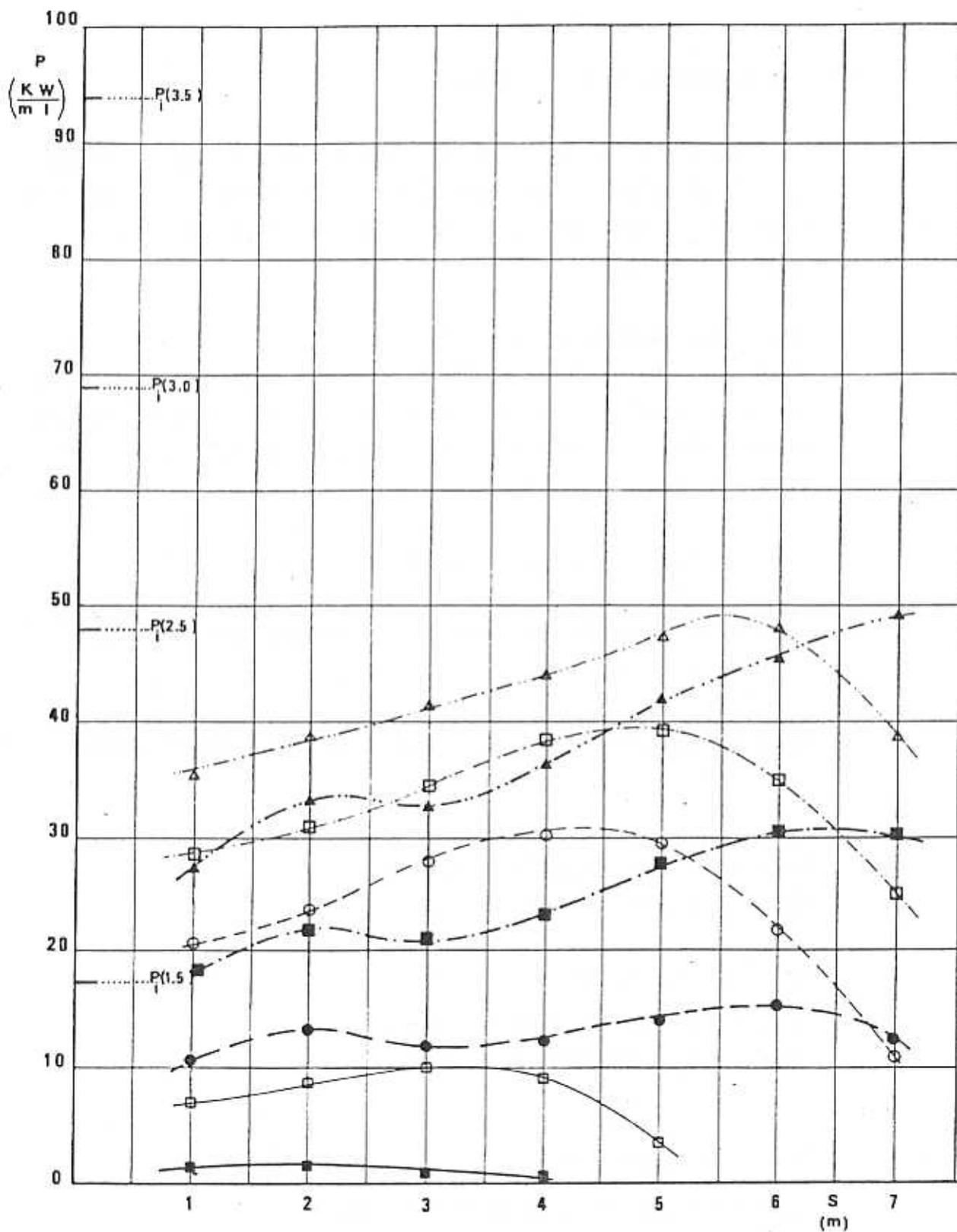


FIG. 113.- TRIEDRES,  $r = 5$  ; application en houle régulière...

Pente 1/1.5	■ —————	● - - - - -	■ - . . . . .	▲ - . . . . .
Pente 1/2	□ —————	○ - - - - -	□ - . . . . .	△ - . . . . .
	H=1.5m, T=8s	H=2.5m, T=8s	H=3m, T=8s	H=3.5m, T=8s

### 8.3. Application dans certains cas

Nous avons utilisé les résultats précédents pour estimer l'énergie récupérable par les trièdres à  $r = 5$  dans des conditions réalistes et évaluer l'influence de la marée sur le rendement de ces dispositifs.

Nous avons examiné : 7 hauteurs de seuil, (1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 m), deux pentes, (1/2 et 1/1,5) en houle régulière de période  $T = 8$  sec pour les cambrures de 1,5 %, 2,5 %, 3 % et 3,5 %, qui correspondent aux amplitudes creux-crête  $H$  de 1,5 , 2,5 , 3,0 et 3,5 m.

Les résultats se trouvent dans le Tableau III, et la fig. 113.

Pour le cas examiné, la pente de 1/2 donne de meilleurs résultats que la pente de 1/1,5 (v. § 7.3.).

Nous pouvons constater que la hauteur du seuil optimale pour  $T = 8$  sec ,  $\gamma = 1,5$  % est :

$S_{opt} = 2$  m pour la pente de 1/1,5 et  
 $S_{opt} = 3$  m pour la pente de 1/2.

Si  $\gamma = 2,5$  %, on a :

$S_{opt} = 6$  m pour la pente de 1/1,5 et  
 $S_{opt} = 4,30$  m pour la pente de 1/2.

Si  $\gamma = 3,0$  %, on a :

$S_{opt} = 6,5$  m pour la pente de 1/1,5 et  
 $S_{opt} = 4,80$  m pour la pente de 1/2.

Si  $\gamma = 3,5 \%$ , on a :

$S_{opt} = 7,00$  m pour la pente de  $1/1,5$  et

$S_{opt} = 5,50$  m pour la pente de  $1/2$  (v. fig. 113).

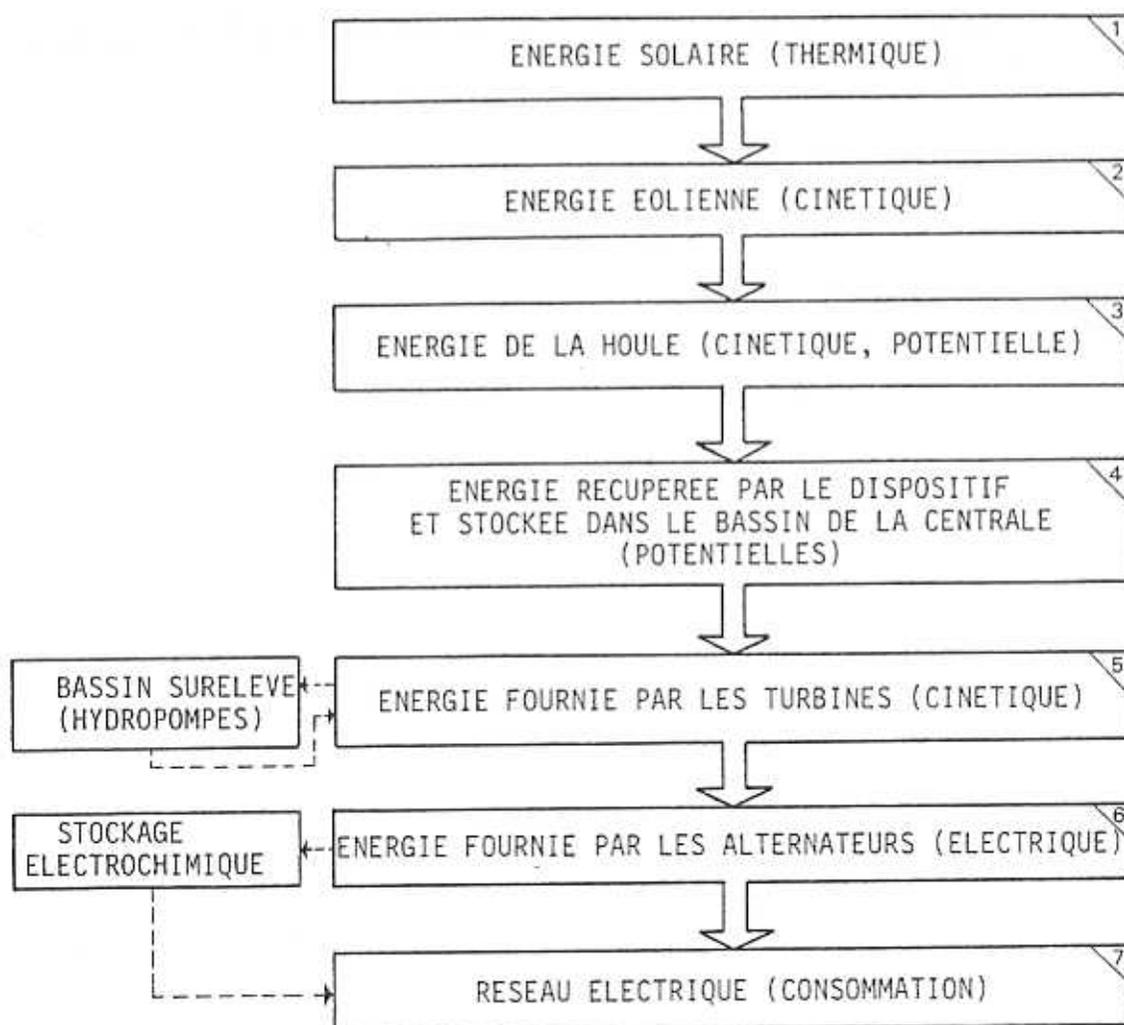
Pour la houle monochromatique examinée la marée n'a pas de répercussions considérables sur l'efficacité des trièdres :

P.e. pour la pente de  $1/2$ , une houle de  $T = 8$  sec et  $\gamma = 3 \%$ , entre  $S = 3$  m et  $S = 6$  m (marnage  $H_m = 3,00$  m), la variation d'énergie récupérée,  $P_r(3,0)$ , ne dépasse pas  $15 \%$  (v. aussi § 7.3.).

## 9. ANALYSE ENERGETIQUE DES SYSTEMES EXAMINES

### 9.1. Bilan énergétique des systèmes à déferlement

C'est l'énergie solaire qui à la suite d'une série de transfert est à l'origine de l'énergie électrique fournie au réseau par la centrale houlomotrice



A partir du niveau 3. de cette chaîne énergétique, nous pouvons distinguer les flux d'énergie caractéristiques suivants :

- . Le flux d'énergie par mètre de crête au large,  $P_0$  suivant la direction  $\bar{\eta}$  de l'orthogonale de la houle.  $P_0$  est une fonction de  $H$  et  $T$ . S'il s'agit d'une houle régulière unidirectionnelle, le flux d'énergie  $P_0$  est donné par la formule (21).  $P_0$  est en réalité une fonction de temps : les caractéristiques de la houle ( $H, T, \bar{\eta}$ ) changent constamment. Si on a des enregistrements de la houle pour une région donnée pendant une période, on peut y distinguer des classes de houles ( $H_i, T_j, \bar{\eta}_k$ ), donc les flux moyens d'énergie  $P_0(H_i, T_j, \bar{\eta}_k)$  et les durées  $\Delta t_{ijk}$  correspondantes. Dans ce cas pour chaque direction  $\bar{\eta}_k$  nous pouvons estimer l'énergie disponible par mètre linéaire de crête (v. formule 21).

$$E_k = \frac{\rho g^2}{32\pi} \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{m_j} H_i^2 T_j \Delta t_{ijk} \quad (86)$$

- . Le flux d'énergie par mètre de crête juste avant le déferlement  $P_d$ . A cause de l'influence du fond de la mer et par le phénomène de la réfraction, la houle incidente change de caractéristiques ( $H, \lambda, \bar{\eta}$ ), v. formules (1), (2), en conservant pratiquement son énergie. Par contre, ce phénomène modifie considérablement la direction des orthogonales de la houle. Dans ce cas, pour trouver les nouvelles directions  $\bar{\eta}_k$  nous devons tracer les diagrammes de réfraction du site donné pour toutes les directions  $\bar{\eta}_k$  et périodes de la houle  $T_j$ , au large (v. § 5.6.).

- Le flux d'énergie récupéré  $P_r$ , dans le bassin d'accumulation, v. formule (69) est susceptible de diminutions dues à l'abaissement du niveau moyen de la surface de l'eau stockée, (fuites, débordements par dessus du couronnement des barrages latéraux etc.). On pourra estimer que l'eau récupérée en fait 80 % à 90 % de  $P_r$  (v. bibl. 29 et 74).

- Le flux d'énergie arrivant au réseau électrique de distribution,  $P_u$ , dépend des rendements :

des turbines, (  $\tau \cong 90 \%$  )

de la transmission (  $\tau \cong 92 \%$  )

des alternateurs (  $\tau \cong 96 \%$  )

et des transformateurs (  $\tau \cong 98 \%$  )

(v. bibl. 8, 58).

## 9.2. Stockage de l'énergie récupérée - Régulation

Les variations du flux d'énergie des vagues sont fonction des fluctuations des caractéristiques de la houle au large. Ces variations imposent la nécessité de stockage de l'énergie récupérée à un ou plusieurs niveaux de la chaîne énergétique des installations houlomotrices.

Le bassin d'accumulation constitue le dispositif essentiel de stockage pour les systèmes à déferlement. Néanmoins, des procédés complémentaires peuvent être utilisés pour améliorer

l'adaptation et la régulation de la fourniture d'énergie, suivant les variations de la charge :

- Remplacement d'un nombre de turbines par des turbopompes, refoulant des quantités d'eau dans des réservoirs surélevés qui assurent l'alimentation d'autres turbines en période d'accalmie. Ce procédé est prévu pour l'installation de l'Ile Maurice (v. bibl. 81).
- Batteries. Ce procédé, très coûteux, est pourtant très efficace pour des installations à puissance installée faible. Le Tableau IV nous donne une idée des batteries nécessaires pour une centrale de 50 KW.

	DUREE D'ACCALMIE		
	1 minute	1 heure	24 heures
Capacité des batteries pour une centrale de 50 KW	0,833 KWh	50 KWh	1200 KWh
Masse des batteries	27,8 kg	1677 kg	40.000 kg
Volume des batteries	0,0167 m <sup>3</sup>	1 m <sup>3</sup>	24 m <sup>3</sup>

TABLEAU IV  
STOCKAGE ELECTROCHIMIQUE POUR UNE  
INSTALLATION DE 50 KW  
(d'après U. ECKENER et T. KRÖGER, v. bibl. 29)

- Air comprimé (P.e. cavités souterraines, stockage thermique (eau chaude des salines, fusibles), combustibles liquides ou gazeux (Hydrogène). Ces types de stockage sont difficilement adaptables aux systèmes à déferlement.

La compensation des variations saisonnières de l'énergie fournie par les houlomotrices est pratiquement impossible.

La seule solution est la combinaison avec des centrales conventionnelles.

### 9.3. Propriétés énergétiques des systèmes examinés

L'efficacité énergétique d'une installation du type déferlant dépend essentiellement des caractéristiques de la houle incidente et de la marée ; paramètres dont les valeurs changent dans le temps.

Sur le Tableau V, nous présentons en termes de rendement et d'énergie récupérable la "réponse énergétique" des rampes de déferlement et des trièdres à  $r = 5$ , vis-à-vis de combinaisons réalistes des principaux paramètres (nous avons utilisé les résultats des § 7 et § 8). Cette phase de l'étude nous a aidé à cerner les domaines d'application optimale de ces systèmes du point de vue énergétique.

Nous pouvons constater que dans tous les cas où la cambrure est petite ( $\gamma \leq 2\%$ ) les trièdres à  $r = 5$ , pente de 1/2 donnent les meilleurs résultats de tous les dispositifs examinés (ainsi que pour des cambrures plus élevées,

$\gamma \cong 3\%$ , à condition que  $K_s \leq 0,3$ ).

Les trièdres à  $r = 5$  de pente 1/1,5 n'offrent presque dans aucun cas les rendements les plus intéressants.

Les rampes de déferlement, pente de 1/2 sont les plus performantes pour les grandes cambrures,  $\gamma \geq 4\%$  dans le cas

où  $K_s \geq 0,30$ . Dans le cas où  $K_s \leq 0,2$  et

$\gamma \geq 4\%$ , les rampes de pentes 1/1,5 présentent le plus d'intérêt.

			RAMPES DE DEFERLEMENT				TRIEDRES A HOULE ( r = 5 )				
			PENTE 1/2		PENTE 1/1,5		PENTE 1/2		PENTE 1/1,5		
			R (%)	Pr $\frac{KW}{m}$	R (%)	Pr $\frac{KW}{m}$	R (%)	Pr $\frac{KW}{m}$	R (%)	Pr $\frac{KW}{m}$	
K <sub>0</sub> = 0,2	$\lambda = 40$ m S = 1,27 m	Y = 2 %	12,4	0,4	5,3	0,16	64,1	2,0	15,7	0,5	
		Y = 3 %	48,7	3,4	39,4	2,75	51,2	3,6	30,4	2,1	
		Y = 4 %	48,8	6,05	48,9	6,06	39,3	4,9	37,3	4,6	
	$\lambda = 80$ m S = 2,54 m	Y = 2 %	12,4	2,2	5,3	0,9	64,1	11,3	15,7	2,8	
		Y = 3 %	48,7	19,3	39,4	15,6	51,2	20,30	30,4	12,1	
		Y = 4 %	48,8	34,3	48,9	34,4	39,3	27,7	37,3	26,2	
	$\lambda = 120$ m S = 3,82 m	Y = 2 %	12,4	6,0	5,3	2,6	64,1	31,2	15,7	7,6	
		Y = 3 %	48,7	53,3	39,4	43,1	51,2	56,1	30,4	33,3	
		Y = 4 %	48,8	95	48,9	95,2	39,3	76,5	37,3	72,6	
	K <sub>0</sub> = 0,3	$\lambda = 40$ m S = 1,91 m	Y = 2 %	0	0	0	0	60,3	1,86	15,1	0,47
			Y = 3 %	50,8	3,55	34,1	2,4	56,8	4,0	38,5	2,70
			Y = 4 %	59,9	7,40	58,8	7,3	43,2	5,35	44,8	5,55
$\lambda = 80$ m S = 3,82		Y = 2 %	0	0	0	0	60,3	10,6	15,1	2,65	
		Y = 3 %	50,8	20,1	34,1	13,5	56,8	22,5	38,5	15,2	
		Y = 4 %	59,9	42,1	58,8	41,4	43,2	30,4	44,8	31,5	
$\lambda = 120$ m S = 5,73		Y = 2 %	0	0	0	0	60,3	29,4	15,1	7,3	
		Y = 3 %	50,8	55,6	34,1	37,3	56,8	62,2	38,5	42,1	
		Y = 4 %	59,9	116,6	58,8	114,4	43,2	84,1	44,8	87,2	
K <sub>0</sub> = 0,4		$\lambda = 40$ m S = 2,54	Y = 2 %	0	0	0	0	16,2	0,5	7,1	0,22
			Y = 3 %	54,0	3,8	24,3	1,7	46,6	3,3	45,4	3,2
			Y = 4 %	69,8	8,6	62,6	7,8	43,7	5,4	52,1	6,5
	$\lambda = 80$ m S = 5,09	Y = 2 %	0	0	0	0	16,2	2,85	7,1	1,25	
		Y = 3 %	54,0	21,4	24,3	9,6	46,6	18,45	45,4	18,0	
		Y = 4 %	69,8	49,1	62,6	44,1	43,7	30,8	52,1	36,7	
	$\lambda = 120$ m S = 7,64	Y = 2 %	0	0	0	0	16,2	7,9	7,1	3,4	
		Y = 3 %	54,0	59,1	24,3	26,6	46,6	51,0	45,4	49,7	
		Y = 4 %	69,8	135,8	62,6	121,8	43,7	85,0	52,1	101,4	

TABLEAU V - EFFICACITE ENERGETIQUE DES SYSTEMES DU TYPE DEFERLANT

En général, si le spectre de la houle incidente est centré vers les petites cambrures ( $\gamma \cong 2\%$ ), les trièdres à  $r = 5$ , pente  $1/2$ , donnent les meilleurs rendements. Si ce spectre est centré vers des cambrures plus élevées ( $\gamma \cong 4\%$ ), les rampes de déferlement, pente toujours  $1/2$  sont les plus prometteuses. Pour les cambrures très élevées, les rampes de pente  $1/1,5$  donnent les meilleurs résultats (v. § 7.).

Dans le Tableau V, nous présentons également les valeurs de l'énergie récupérable, ( $P_r$ ), dans tous les cas examinés.

## 10. LES PROBLEMES DE CONSTRUCTION

### 10.1. Le choix des matériaux

Les rampes de déferlement et les trièdres à houle doivent être à la fois des structures très étendues, en raison de la densité moyenne faible de l'énergie disponible et très résistantes en raison de la violence des tempêtes.

Par conséquent, les matériaux de construction doivent être bon marché et avoir une grande longévité en milieu marin.

Cette double exigence est satisfaite par le béton et le béton armé (v. bibl. 26). Le béton a la réputation d'être un matériau de grande durée de vie sans nécessiter d'entretien et d'un coût relativement peu élevé. D'après J.A. HUDSON, le béton et l'acier seront utilisés massivement dans la construction des dispositifs de récupération de l'énergie des vagues. L'expérience (pour ces matériaux) que l'on a sur les structures marines (jetées, navires, plateformes en mer) pourra être favorablement utilisée (v. bibl. 37).

Plusieurs problèmes de matériaux de construction rencontrés dans d'autres domaines de la technologie maritime, (fatigue, corrosion, fouling de mer, impacts, rupture) se présentent pour ces houlomotrices.

De plus, ces phénomènes interfèrent largement, ce qui multiplie encore les problèmes (p.e. fouling et corrosion).

Les effets les plus gênants du fouling sur les dispositifs du type déferlant sont :

## 10. LES PROBLEMES DE CONSTRUCTION

### 10.1. Le choix des matériaux

Les rampes de déferlement et les trièdres à houle doivent être à la fois des structures très étendues, en raison de la densité moyenne faible de l'énergie disponible et très résistantes en raison de la violence des tempêtes.

Par conséquent, les matériaux de construction doivent être bon marché et avoir une grande longévité en milieu marin.

Cette double exigence est satisfaite par le béton et le béton armé (v. bibl. 26). Le béton a la réputation d'être un matériau de grande durée de vie sans nécessiter d'entretien et d'un coût relativement peu élevé. D'après J.A. HUDSON, le béton et l'acier seront utilisés massivement dans la construction des dispositifs de récupération de l'énergie des vagues. L'expérience (pour ces matériaux) que l'on a sur les structures marines (jetées, navires, plateformes en mer) pourra être favorablement utilisée (v. bibl. 37).

Plusieurs problèmes de matériaux de construction rencontrés dans d'autres domaines de la technologie maritime, (fatigue, corrosion, fouling de mer, impacts, rupture) se présentent pour ces houlomotrices.

De plus, ces phénomènes interfèrent largement, ce qui multiplie encore les problèmes (p.e. fouling et corrosion).

Les effets les plus gênants du fouling sur les dispositifs du type déferlant sont :

- l'augmentation de la rugosité des surfaces,
- leur déformation,
- le blocage des ouvertures (pour les trièdres).

Par conséquent, des installations de nettoyage doivent être prévues.

La teneur en ciment du béton utilisé doit être supérieure à 420 kg/m<sup>3</sup> (ouvrages dans la zone de déferlement, v. bibl. 26). Les armatures doivent être protégées par des enveloppes de béton d'une épaisseur minimum de 75 mm (v. bibl. 2, 4, 69).

## 10.2. Les méthodes de construction appropriées

Les sites choisis pour l'implantation des dispositifs examinés sont exposés à la houle déferlante. Les périodes de mer relativement calme, étant très rares et de courte durée, ces installations nécessitent une grande rapidité de construction. Par conséquent, la méthode de préfabrication, pour la plus grande partie de ces ouvrages, est presque imposée s'ils existent les moyens de manutention nécessaires. Le béton se prête très bien à ce mode de construction et permet souvent d'effectuer des économies sur le budget de construction de 30 % (v. bibl. 26). Les éléments principaux des dispositifs peuvent être fabriqués sur la côte et ensuite transportés et posés par des engins flottants (p.e. barges autoélévatrices) ou par des grues côté terre. Les travaux supplémentaires doivent être effectués sur place.

Les dispositifs du type déferlant peuvent être des ouvrages

de gravité, qui sont à la fois simples, robustes et en général économiques. Il serait prudent de ne pas faire appel à des méthodes plus compliquées (p.e. ancrages à l'aide de câble de précontrainte) ; ces procédés, parfois utiles là où les moyens le permettent deviennent impraticables là où les conditions de travail posent des problèmes inhabituels.

### 10.3. Le calcul de différentes parties des installations

Le calcul des dispositifs du type déferlant présente des difficultés, surtout en ce qui concerne l'estimation des efforts exercés sur ces installations côté mer. L'estimation de ces efforts n'est possible que par le biais de l'expérimentation. Néanmoins, pour l'établissement d'une étude préliminaire, nous pouvons utiliser les méthodes destinées au calcul de certains ouvrages portuaires externes, implantés dans la zone de déferlement des vagues.

Pour ce type d'ouvrages, la houle de projet est définie comme étant la plus grande vague déferlant directement sur la structure. Pour obtenir une expression de l'amplitude maximale de déferlement à laquelle la structure est soumise, il est nécessaire de trouver une relation entre :

- l'amplitude de déferlement creux-crête,  $H_d$  ,
- la profondeur d'eau sous la ligne de déferlement,  $h_d$
- la pente du fond de la mer,  $1/m$
- la cambrure de la houle au déferlement,  $\gamma_d$

- et la profondeur de l'eau au pied de la structure,  $h_p$  ,  
(v. bibl. 31).

WEGGEL, 1970, propose la formule suivante :

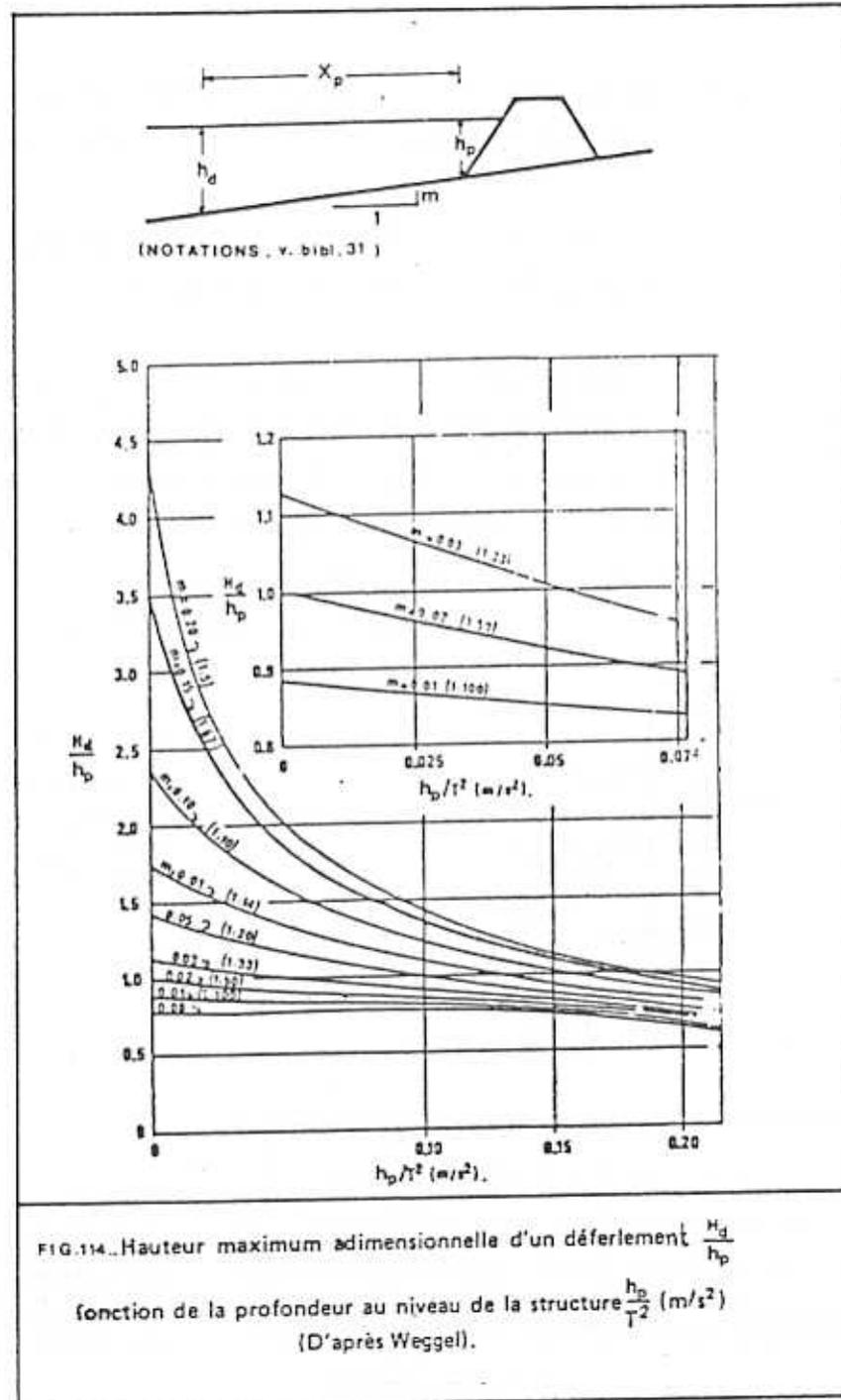
$$(87) \quad \frac{H_d}{h_p} = \frac{1}{m a_1 \Phi (18.5m-8)} \left\{ a_1 + \frac{1}{(h_p/T^2)} (1+9.25 m^2 b_1 \Phi - 4m b_1 \Phi) - \sqrt{\left[ a_1 + \frac{1}{(h_p/T^2)} (1+9.25 m^2 b_1 \Phi - 4m b_1 \Phi) \right]^2 - \frac{4m b_1 a_1 \Phi}{(h_p/T^2)} (9.25m-4)} \right\}$$

$$\text{où} \quad a_1 = 4.46 (1 - e^{-19m}), \quad b_1 = \frac{1}{0.64 (1 + e^{-19.5m})}, \quad \Phi = \frac{X_d}{X_p}$$

$X_p$  est la distance de plongée de déferlement et  
 $X_d$  la distance entre le pied de l'ouvrage et la  
ligne de déferlement (v. fig. 114).

La distance  $X_d$  à laquelle se produit le déferlement  
le plus dangereux, d'après WEGGEL, est égale à  $X_p$ . ( $\Phi = 1$ )  
La fig. 114 nous donne, dans ce cas, pour différentes pentes  
du fond de la mer, la relation entre  $X_d$ ,  $h_p$  et  
 $h_p/T^2$

A. GRAILLOT a essayé de déterminer expérimentalement  $\Phi$ .  
Pour les déferlements déversants, il a trouvé  $\Phi = 0,88$   
et pour les déferlements plongeants  $\Phi = 1,02$   
(v. bibl. 31).



Les pressions exercées par les vagues, sur un ouvrage fondé dans la zone de déferlement, sont particulièrement élevées. Les enregistrements de ces pressions présentent une allure typique :

- une pointe de pression extrêmement brutale et de très courte durée qui correspond au début du déferlement (gifle),
- une variation de pression continue de plus longue durée (bourrage), (v. bibl. 46 et fig. 115).

Pour les structures en plan incliné (pente 1/4), SKLADNEV et POPOV (1969) ont effectué des essais dont les résultats sont présentés sur la fig. 116. Les auteurs ont estimé l'échelle minimale du modèle pour obtenir une similitude convenable des pressions :

$$H_{\text{mod}}/H_{\text{prot}} = 0,5$$

ou  $H_{\text{mod}} \geq 50 \text{ cm}$  (v. bibl. 73).

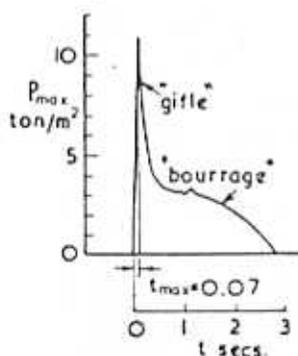


FIGURE 115 - Enregistrement typique des pressions exercées sur une surface par la houle déferlante (Port de Hoboro, d'après Y. MURAKI 1966).

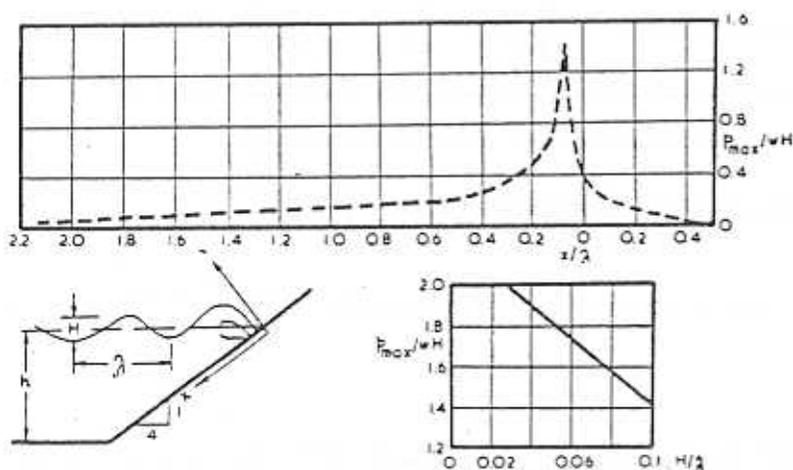


FIGURE 116 - Pressions dues à la houle déferlante sur des structures en plan incliné (pente de 1/4, d'après SKLADNEV et POPOV).

La fig. 116 semble montrer que les structures en plan incliné minimisent le "bourrage".

Pour la houle déferlante sur les rampes de  $\alpha = 30^\circ$  sur un fond de 1/10, CARR (1954) a effectué plusieurs séries d'essais. Les résultats sont présentés dans la fig. 117.

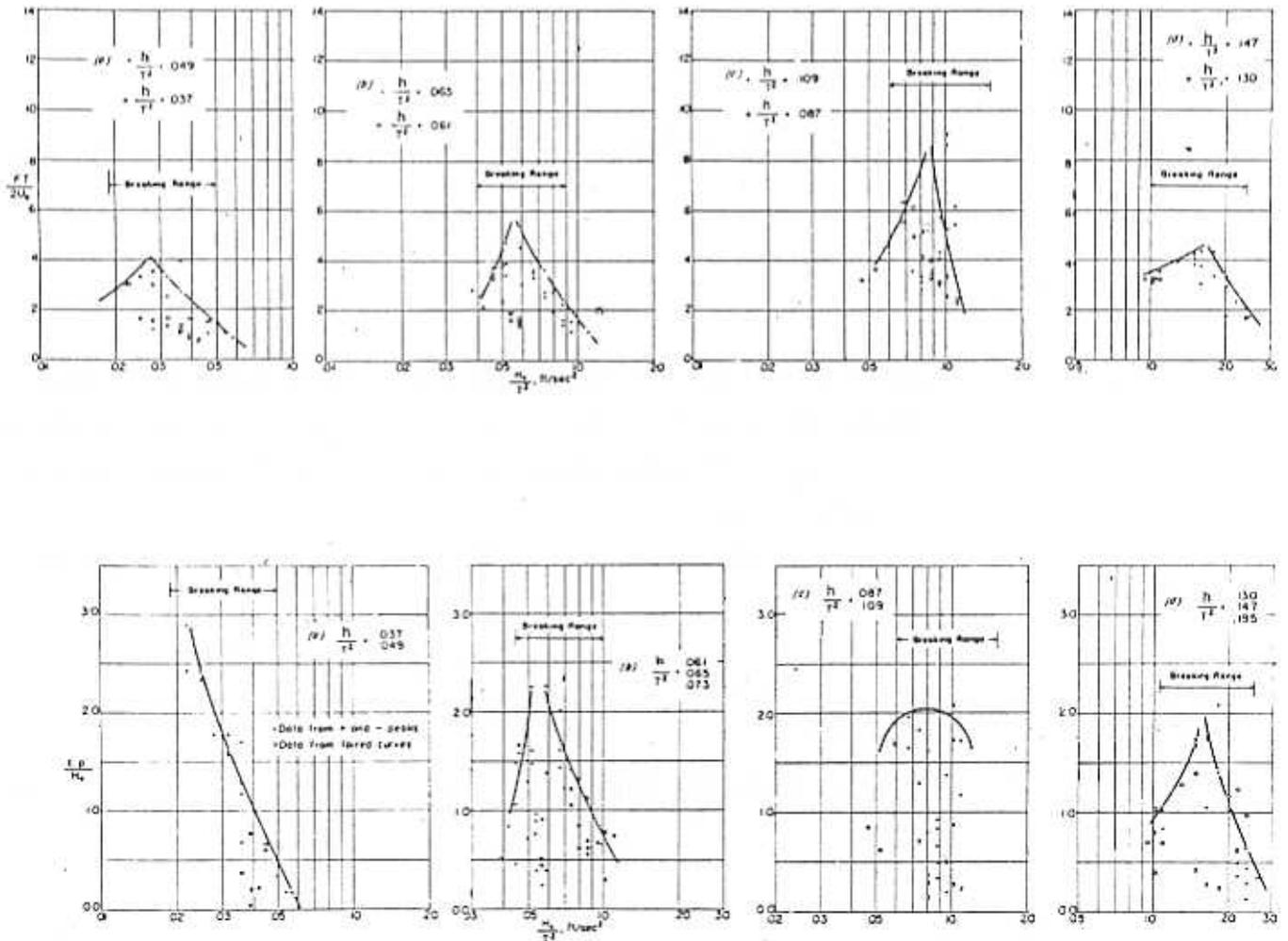


FIGURE 117

Représentation adimensionnelle des efforts (A) et des c.p. (B) dûs à la houle déferlante sur des structures en pente de 1/1,73, pente du fond 1/10, (d'après CARR 1954).

F = Force exercée  $U_b = 5.5 H_d^{5/2}$  (ft/sec)  $H_d = H_0 / 3.3 \sqrt{H_0 / \lambda_0}$  (ft)  
 c.p. = Distance du point où s'exerce la force F au-dessus du pied de la structure.

Ces derniers résultats peuvent nous donner une idée des efforts qui peuvent être exercés sur les dispositifs du type déferlant.

Pour le calcul de la pression maximale exercée par la houle déferlante sur une rampe d'angle  $\alpha$  par rapport à l'horizontale, N.N. DJUNKOVSKY (v. bibl. 43) propose la formule suivante :

$$P_{\max} = \rho \frac{u_b^2}{2} \cos^2 \varphi_v \quad (88)$$

où  $u_b$  est la vitesse maximale de la particule d'eau attaquant la surface de la rampe,  $\rho$  la densité d'eau ; et  $\varphi_v$  l'angle entre la direction de la vitesse et la normale sur la rampe.

D'après le même auteur,  $P_{\max}$  peut avoir l'expression suivante :

$$P_{\max} = f\left(\alpha, \frac{H}{\lambda}\right) \rho u^2 \quad (89)$$

où  $u$  est une vitesse caractéristique de la houle. En égalant la formule empirique (89) à celle de (88), nous pouvons en déduire une expression pour  $f\left(\alpha, \frac{H}{\lambda}\right)$

KRYLOV V.V. et SELIVANOV L.V. ont essayé de vérifier la validité des (88) et (89), expérimentalement. Les valeurs de

mesurées présentent une grande dispersion occupant une zone assez large (v. bibl. 43).

Les considérations précédentes font apparaître la difficulté des études sur modèles réduits. Il est nécessaire que le modèle reproduise non seulement les phénomènes hydrodynamiques, mais également les rigidités relatives du dispositif et de l'infrastructure. Les essais effectués à Sogréah pour les parois verticales ont montré que l'effet de gifle se produisait davantage en houle irrégulière qu'en houle régulière ; mais les pressions correspondantes ont une distribution aléatoire et leur évaluation exige un très grand nombre d'enregistrements (v. bibl. 14).

Le contrôle de stabilité des dispositifs du type déferlant contre le glissement et le renversement doit être effectué :

- dans le cas où la houle de projet provoque la force maximale, quand le bassin de stockage est vide.
- dans le cas où la houle devant la structure présente un creux et on a une houle résiduelle dans le bassin attaquant la structure côté bassin.

Le moment de stabilité des dispositifs par rapport aux extrémités de la surface d'appui sur les fondations doit valoir au moins le double du moment maximum de renversement sous l'action des pressions. Les forces qui tendent à faire ripper les dispositifs sur les fondations ne doivent pas dépasser la moitié du poids apparent de la partie susceptible de ripper (v. bibl. 46, 75).

## 11. ANALYSE ECONOMIQUE DES SYSTEMES EXAMINES

### 11.1. Evaluation des principaux paramètres

Les méthodes d'analyse économique des centrales hydrauliques basse chute et l'expérience sur les estimations des coûts des travaux portuaires externes, constituent des sources d'information utiles à l'estimation de la viabilité économique des projets de tels systèmes.

Dans le Tableau VI est présentée une procédure d'évaluation du capital investi et dans le Tableau VII figurent les dépenses annuelles d'exploitation (v. bibl. 58, 74).

Le temps de construction,  $T_c$ , de la centrale a une répercussion sur les coûts. Les dépenses annuelles dépendent surtout de la durée de vie des différentes parties de la centrale. Pour les systèmes du type déferlant, nous pouvons accepter les chiffres suivants :

- Durée de vie utile des dispositifs et barrages : - 35 ans
- Durée de vie utile des bâtiments : - 35 "
- Durée de vie utile des bétons divers : - 35 "
- Durée de vie utile des turbines et alternateurs : - 15 "
- Durée de vie des transformateurs : - 20 "
- Durée de vie des lignes de transport : - 30 "

(v. bibl. 58, 63, 74).

Pour les centrales examinées, nous pouvons estimer une période d'amortissement de 35 ans.

TABLEAU VI - CAPITAL TOTAL INVESTI ( dispositif... )

N°	DESCRIPTION DES COUTS	COUTS (FF. 1983)
1	Total partiel pour la construction (v. annexe D)	
2	Augmentation des coûts pendant la construction (1) x $\omega_1$ , ( $\omega_1 = \dots$ % )	
3	Total partiel pour la construction + augmentation	
4	Dépenses imprévues (1) x $e_1$ , ( $e_1 = \dots$ % )	
5	Etudes et surveillances (1) x $e_2$ , ( $e_2 = \dots$ % )	
6	Total partiel (3) + (4) + (5)	
7	Taux de capital pendant la période de construction (6) x $i_1$ ( $i_1 = \dots$ % )	
8	CAPITAL TOTAL INVESTI (6) + (7)	.....

TABLEAU VII - COUTS ANNUELS ( dispositif )

N°	DESCRIPTION DES COUTS	COUTS (FF. 1983)
1	Dépenses annuelles de fonctionnement, d'entretien et de réparation, (CAPITAL TOTAL INVESTI) x ... %	
2	Remplacement des turbines, alternateurs et vannes régulatrices, (durée de vie : ... ans)*	
3	Remplacement de l'équipement de la sous-station (durée de vie : ... ans)*	
4	Total partiel (1) + (2) + (3)	
5	Charges annuelles actualisées de l'investissement ( $K_a = \dots$ %)	
6	TOTAL DES COUTS ANNUELS	.....

\* Période d'exploitation de la centrale :  $T_e$  ans

La prévision de l'énergie fournie au réseau par la centrale pourrait être effectuée d'après la procédure exposée au § 9 à l'aide des résultats des § 7 ou § 8.

L'estimation de  $\omega_1$ ,  $e_1$ ,  $e_2$ , et  $i_1$  dépend de plusieurs facteurs technico-économiques ; en général ils se situent entre 5 et 15 % (v. bibl. 10, 58).

Mais de tous les facteurs économiques examinés, c'est le taux d'actualisation  $K_a$  (%) qui a la plus grande importance. C'est un instrument d'arbitrage entre le présent et l'avenir. Il oriente les choix d'investissements (v. bibl. 11).  $K_a$  est l'expression chiffrée de la préférence pour le présent. Il signifie que 1F actuel "vaut"  $(1 + K_a)$ F de l'année prochaine. Par ailleurs, il faut distinguer  $K_a$  du taux d'intérêt qui dans notre économie est lié au taux d'inflation  $\omega_a$  :

$$i_a = K_a + \omega_a \quad (90)$$

$K_a$  compense, d'une certaine façon, les doutes concernant les bénéfices futurs d'une opération.

Pour les équipements de durée de vie très longue (au-delà de 20 ans) le Commissariat Général du VIIe Plan suggère d'effectuer des tests de sensibilité en prenant un taux d'actualisation de 7 % à partir de 1990. Par prudence, nous retenons la valeur de 8 à 9 % pour le  $K_a$ . (v. bibl. 11).

## 11.2. Procédure d'optimisation

Les analyses économiques concernant les installations houlomotrices ont montré que l'optimisation de ces systèmes doit être une procédure itérative.

A. BLANDINO , A. BRIGHENTI, P. VIELMO de la Société Technomare basent l'évaluation de la rentabilité de ces systèmes sur les critères suivants :

$$\begin{aligned} \text{CNCF} &> 0 \\ \text{PI} = \frac{\text{CNCF}}{0} &> 0 && (91) \\ \text{PBP} &< T_e \end{aligned}$$

CNCF , (Cumulative Net Cash Flow) est la valeur actuelle, au début de la production,  $t = 0$ , de ce qui reste après la compensation des coûts par les revenus, pendant la période d'exploitation de la centrale.

PI , (Profitability Index) représente la profitabilité globale du capital pendant la période

RI , (Real Investment), valeur actuelle au moment  $t = 0$  de l'investissement

PBP , (Pay-Back Period), période nécessaire pour l'égalisation des coûts et des revenus.

L'estimation des CNCF, PI, RI et PBP nécessite de connaître tous les paramètres exposés en § 11.1. (v. bibl. 10).

D'après J.E.J. COTTRILL, (Departement of Energy, U.K.), les paramètres économiques d'un système houloporteur, peuvent être divisés en deux groupes :

- Coûts concernant le dispositif (  $X_c$  ) dépendant de la longueur du front exploité, qui peuvent s'exprimer en termes de FF/ml.
- Coûts de l'ensemble de la transformation et de transmission de l'énergie (  $Y_c$  ) exprimés en FF/KW.

Pour l'optimisation du facteur annuel de charge, il a utilisé le rapport  $X_c/Y_c$  , appelé "coefficient des coûts composés" ; la fig. 118 nous donne une idée de relation entre ces deux paramètres (v. bibl. 19).

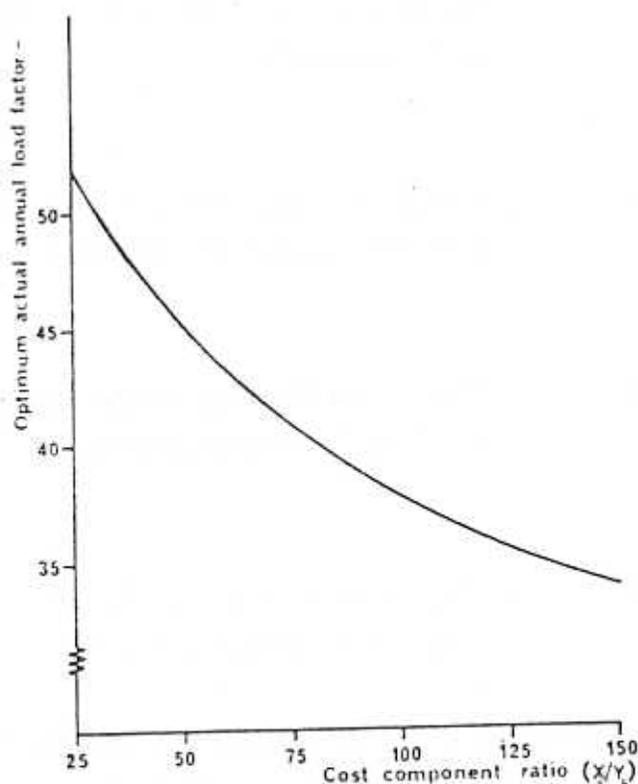


FIGURE 118  
FACTEUR DE CHARGE ANNUEL OPTIMAL PAR  
RAPPORT AU COEFFICIENT DES COÛTS COMPOSÉS

Pour estimer l'efficacité d'une installation houlomotrice, nous devons calculer :

- l'investissement actuel nécessaire pour la production d'un KWe net ( $C_i$ ) en FF/KWe,
- le prix de revient actuel du KWh ( $C_p$ ) en FF/KWh.

Ces deux critères sont utiles pour l'établissement des études de viabilité des systèmes de production d'énergie électrique.

L'évaluation du  $C_i$  peut être effectuée à l'aide du Tableau VI. Le calcul du  $C_p$  est possible par l'application de la méthode du Taux de Rentabilité Interne en utilisant aussi les données du Tableau VII :

$$C_p = \frac{1}{Ert} \left\{ D_a + \frac{C_{ti}}{1 - (1 + Ka)^{-Te}} \right\} \quad (92)$$

où  $T_e$  est la période d'exploitation du système houlomoteur, en ans.

$C_{ti}$  est le capital total investi en FF.

$D$  sont les dépenses annuelles d'exploitation en FF.  
v. tableau VII  $D_a = (1) + (2) + (3)$  ).

$E_{rt}$  est l'énergie totale fournie au réseau pendant la période  $T_e$ , en KWh.

$K_a$  est le taux d'actualisation, ( % ).

Si  $T_e$  est grand, comme c'est le cas des centrales examinées,  $C_p$  devient très sensible au taux d'actualisation  $K_a$ .  
(v. bibl. 11).

### 11.3. Application : étude préliminaire d'une centrale houlomotrice du type déferlant sur la côte Sud-est de l'île de Maré (Nouvelle Calédonie)

Nous examinons ici la faisabilité technologique et la viabilité économique des rampes de déferlement et des trièdres à houle ( $r = 5$ ) dans le cadre d'un site donné : la côte sud-est de l'île de Maré.

Maré appartient aux îles Loyauté en Nouvelle-Calédonie (T.O.M.) La superficie de l'île est de  $820 \text{ km}^2$  et sa population 3400 habitants (v. fig. 119).

Le site retenu, à l'ouest du cap Boyer ( $21^\circ 38' \text{ S}$ ,  $168^\circ 6' 20'' \text{ W}$ ) présente un lagon d'une largeur de  $\sim 20 \text{ m}$  dont le fond se trouve à environ 1 m au-dessus du niveau des basses mers. Le

récif à sommet plat est surelevé à environ 3 m au-dessus du niveau des basses mers. Il existe des passes d'environ 20 m tous les 50 ou 100 m.

L'île ne possède pour l'instant que des groupes électrogènes isolés. Prochainement est prévue la construction d'une centrale diesel à Tadine (côte Ouest). Le raccordement de l'installation houlomotrice nécessiterait environ 7 km de lignes supplémentaires (v. bibl. 23).

La marée semi-diurne : de 1,3 m en ME à 1,6 m en VE.

La direction de la houle se trouve essentiellement dans la fourchette E-SE-S. L'estimation de l'énergie de la houle incidente annuelle, qui suit, est basée sur les données de houle présentées dans la bibl. 21, p. 56 (v. Annexe C).

A partir des données de l'Annexe C nous avons calculé la probabilité des classes de houle (direction, période, amplitude) pendant une période d'une année (v. Tableaux X à XIX, colonnes 1 et 5). Nous avons examiné toutes les combinaisons possibles des cas suivants :

Directions : NE, E, SE, S, SW.

Périodes : 5, 6.5, 8.5, 10.5, 12.5, 15 sec.

Amplitudes creux-crête : 1.25, 2.25, 3.25, 4.75 m.

Les dispositifs examinés sont :

(a) Rampe de déferlement :  $S = 3,50$  m,  $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \beta = 1/2$

(b) Trièdres à houle :  $r = 5$ ,  $S = 3,50$  m,  $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \beta = 1/2$ .

Le rendement hydrodynamique  $R$  de ces systèmes a été calculé d'après les modèles de la fig. 56 pour (a) et de la fig. 111 pour (b).

L'influence du phénomène de la réfraction de la houle incidente (rederesement des orthogonales - focalisation) a été prise en compte par l'application de la méthode exposée en § 5.6.

La carte bathymétrique utilisée pour ce but (v. fig. 120) est approximative étant donné que cette zone n'est en fait pas hydrographiée.

Dans le Tableau VIII, nous avons calculé les changements successifs des célérités  $C_i/C_{i+1}$  pour les périodes examinées en tenant compte de l'influence du fond de la mer.

A l'aide du nomographe de l'annexe B et la carte bathymétrique de la fig. 120, nous avons tracé l'évolution des orthogonales de la houle incidente pour les directions examinées (v. fig. 121 pour  $T = 5$  sec ; fig. 122 pour  $T = 6,5$  sec ; fig. 123 pour  $t = 8,5$  sec ; fig. 124 pour  $T = 10,5$  sec ; fig. 125 pour  $T = 12,5$  sec ; et fig. 126 pour  $T = 15$  sec.).

Les fig. 121 à 126 nous ont permis par la suite de trouver l'incidence  $\zeta_0$  de la houle juste avant le déferlement, par l'intermédiaire de la profondeur de déferlement  $h_d$  (v. Tableaux IX). Le coefficient  $\Omega = \cos \zeta_0$  (v. colonne 11 des Tableaux X à XIX) corrige le rendement  $R_i$  qui est donné pour une houle frontale devant le dispositif ( $\zeta_0 = 0^\circ$ ,  $\Omega = 1$ ). Ainsi nous avons calculé le flux d'énergie récupéré au niveau du bassin  $P_r$  dans tous les cas examinés. L'énergie récupérable dans ce cas est calculée dans la colonne 14 des Tableaux X à XIX, en tenant compte de la distribution des données  $t$  (colonne 2) et des probabilités des périodes  $T$  (colonne 5).

Dans le Tableaux XX nous avons présenté l'énergie globale annuellement récupérable par les dispositifs examinés au niveau du bassin d'accumulation, par mètre linéaire de front. Nous pouvons constater que l'énergie récupérable par les trièdres est de 28,3 % supérieure à celle des rampes de déferlement, pour le cas examiné.

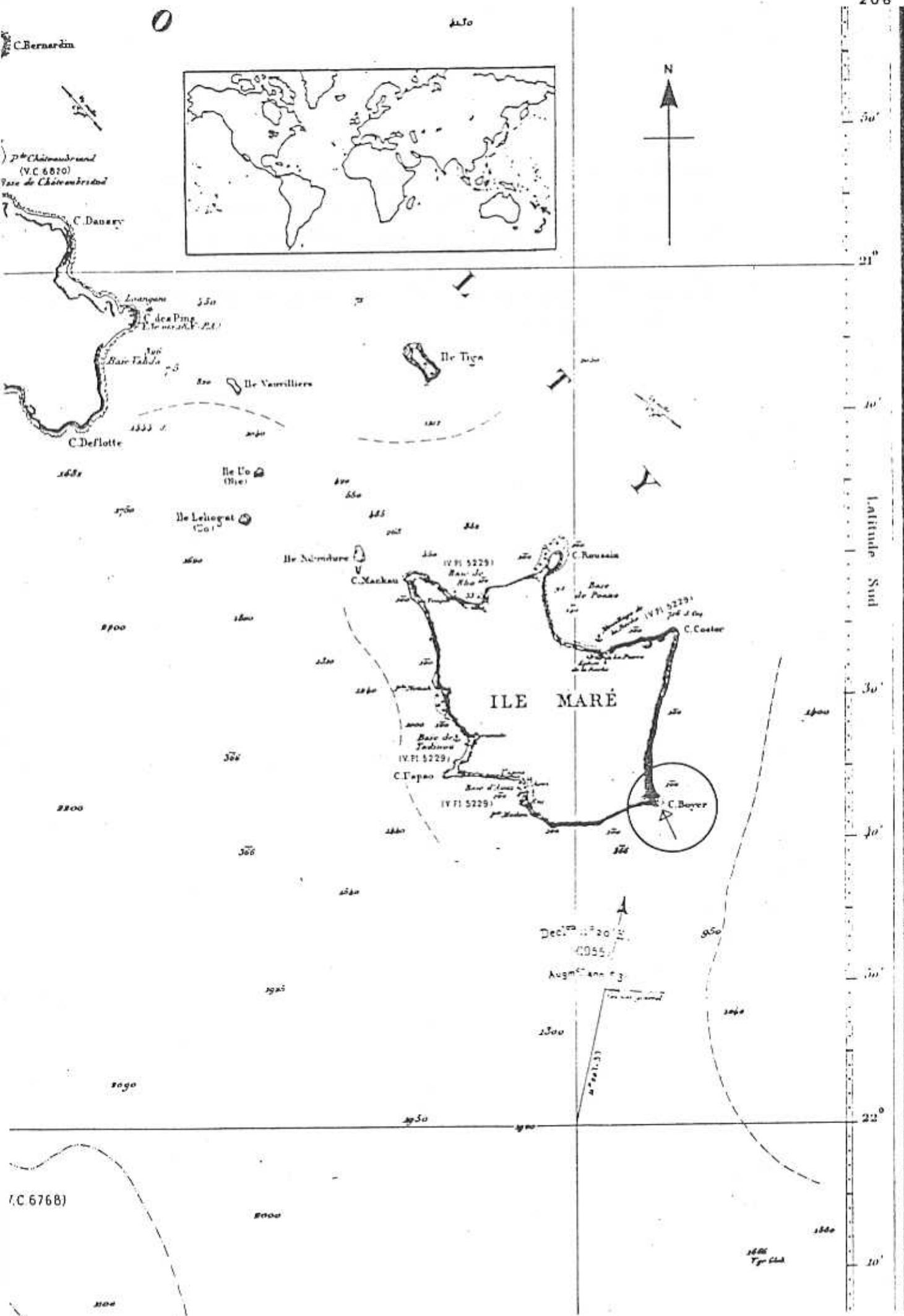
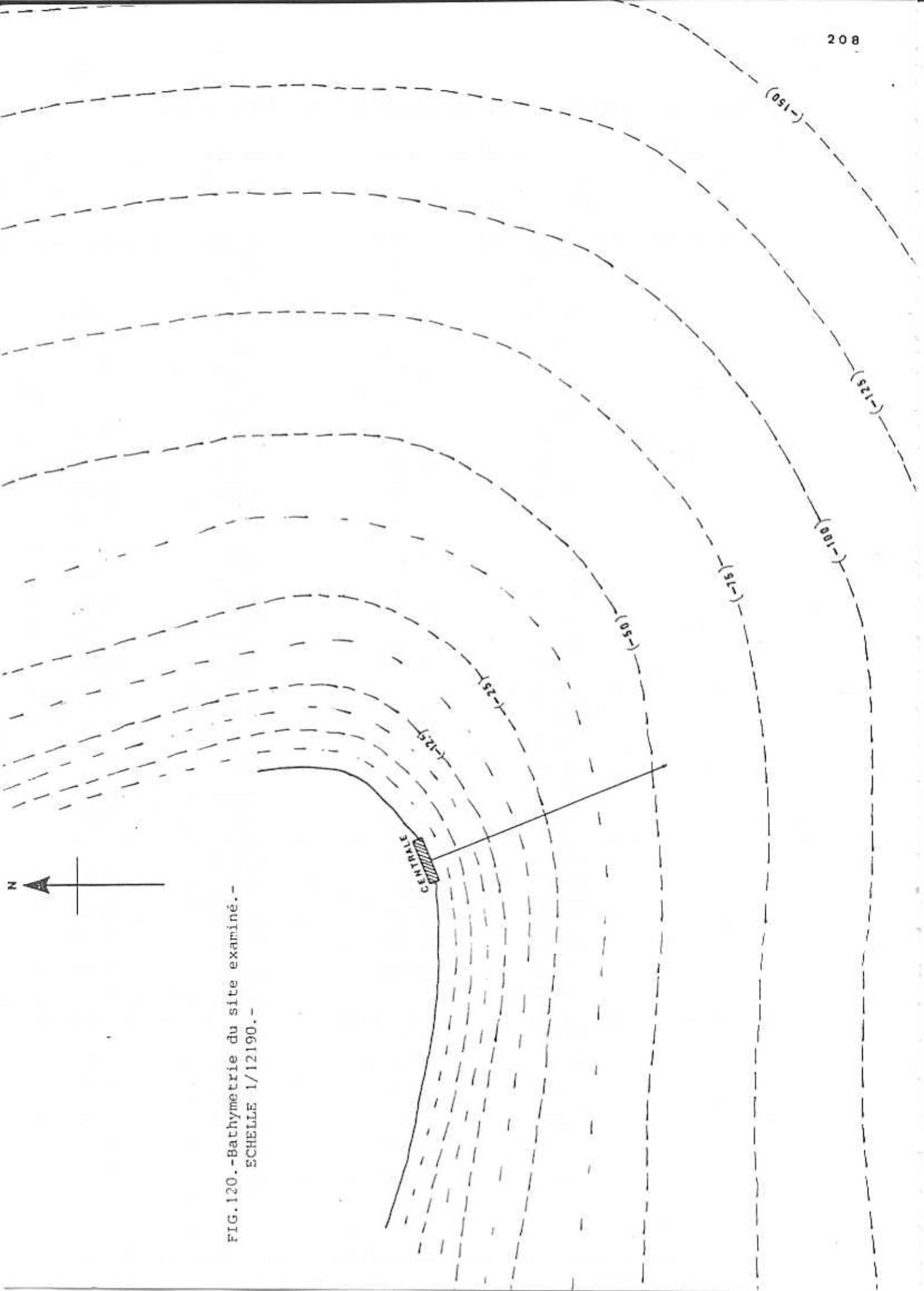


FIG. 119.-Ile Maré.- ECHELLE 1/609530.-

TABLEAU VIII - REDRESSEMENT DES ORTHOGONALES - CALCUL DES  $C_i / C_{i+1}$ 

T (sec)	$\lambda$ (m)	h (m)	$h/\lambda$	$C_i / C_0$	$C_i / C_{i+1}$
5	39	25,00	0,64	1,000	
		18,75	0,48	0,995	1,005
		12,50	0,32	0,965	1,031
		6,25	0,16	0,840	1,14
		3,12	0,08	0,650	1,29
6,5	65,9	37,50	0,57	1,000	
		25,00	0,38	0,980	1,02
		12,50	0,19	0,870	1,126
		6,25	0,095	0,690	1,26
		3,12	0,047	0,505	1,366
8,5	112,7	75,00	0,66	1,000	
		50,00	0,44	0,990	1,01
		25,00	0,22	0,910	1,088
		12,50	0,11	0,740	1,23
		6,25	0,505	0,555	1,33
10,5	172	100,00	0,58	1,000	
		50,00	0,29	0,955	1,047
		25,00	0,145	0,815	1,17
		12,50	0,073	0,635	1,28
		6,25	0,036	0,460	1,38
12,5	243,7	125,00	0,51	1,000	
		100,00	0,41	0,985	1,015
		50,00	0,205	0,895	1,100
		25,00	0,102	0,720	1,240
		12,50	0,051	0,535	1,346
6,25	0,026	0,390	1,370		
15	351	175,00	0,50	1,000	
		100,00	0,285	0,980	1,02
		50,00	0,142	0,810	1,21
		25,00	0,071	0,625	1,30
		12,50	0,036	0,460	1,36
6,25	0,018	0,335	1,37		



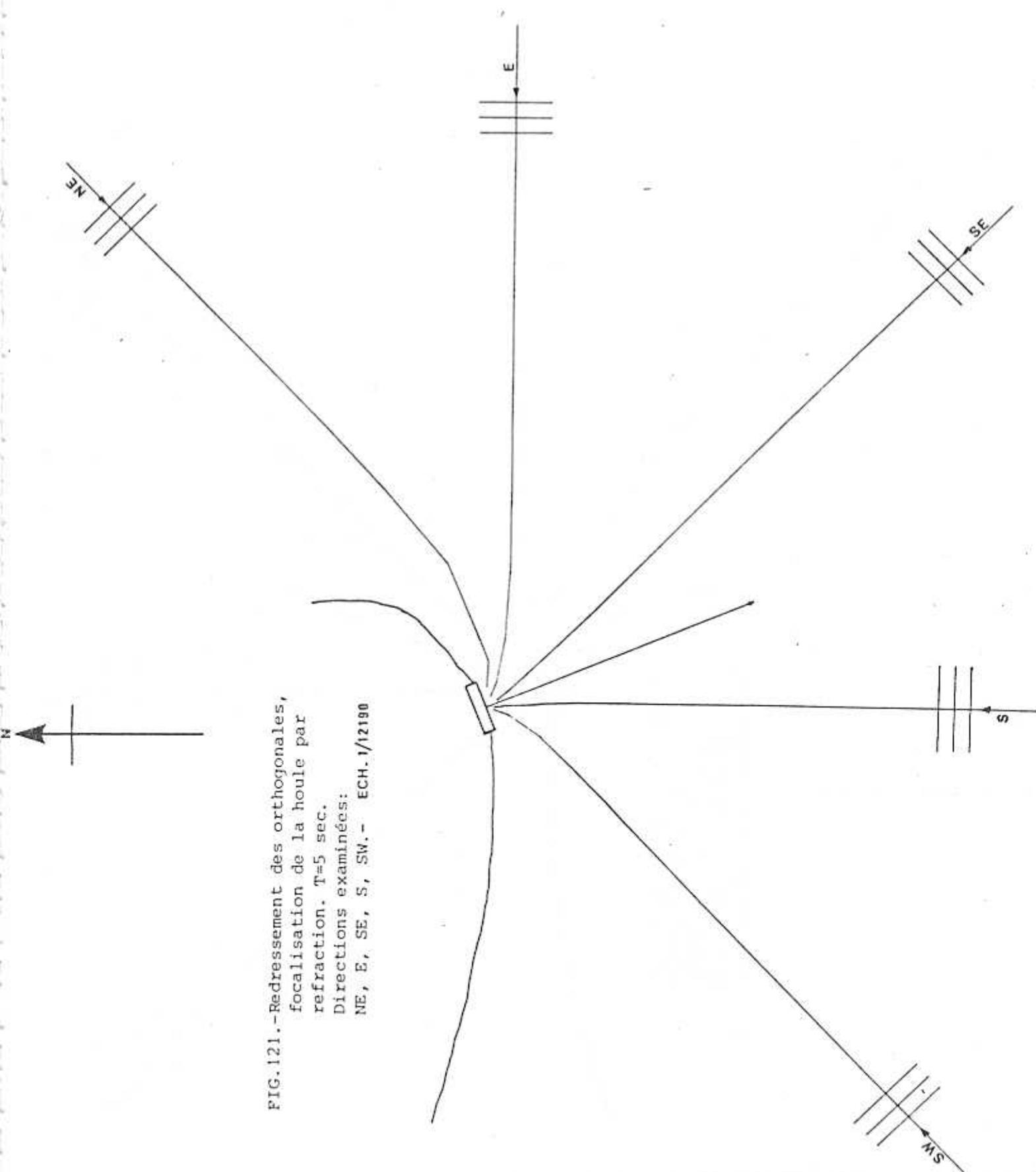


FIG. 121.-Redressement des orthogonales,  
focalisation de la houle par  
refraction.  $T=5$  sec.  
Directions examinées:  
NE, E, SE, S, SW.- ECH. 1/12190

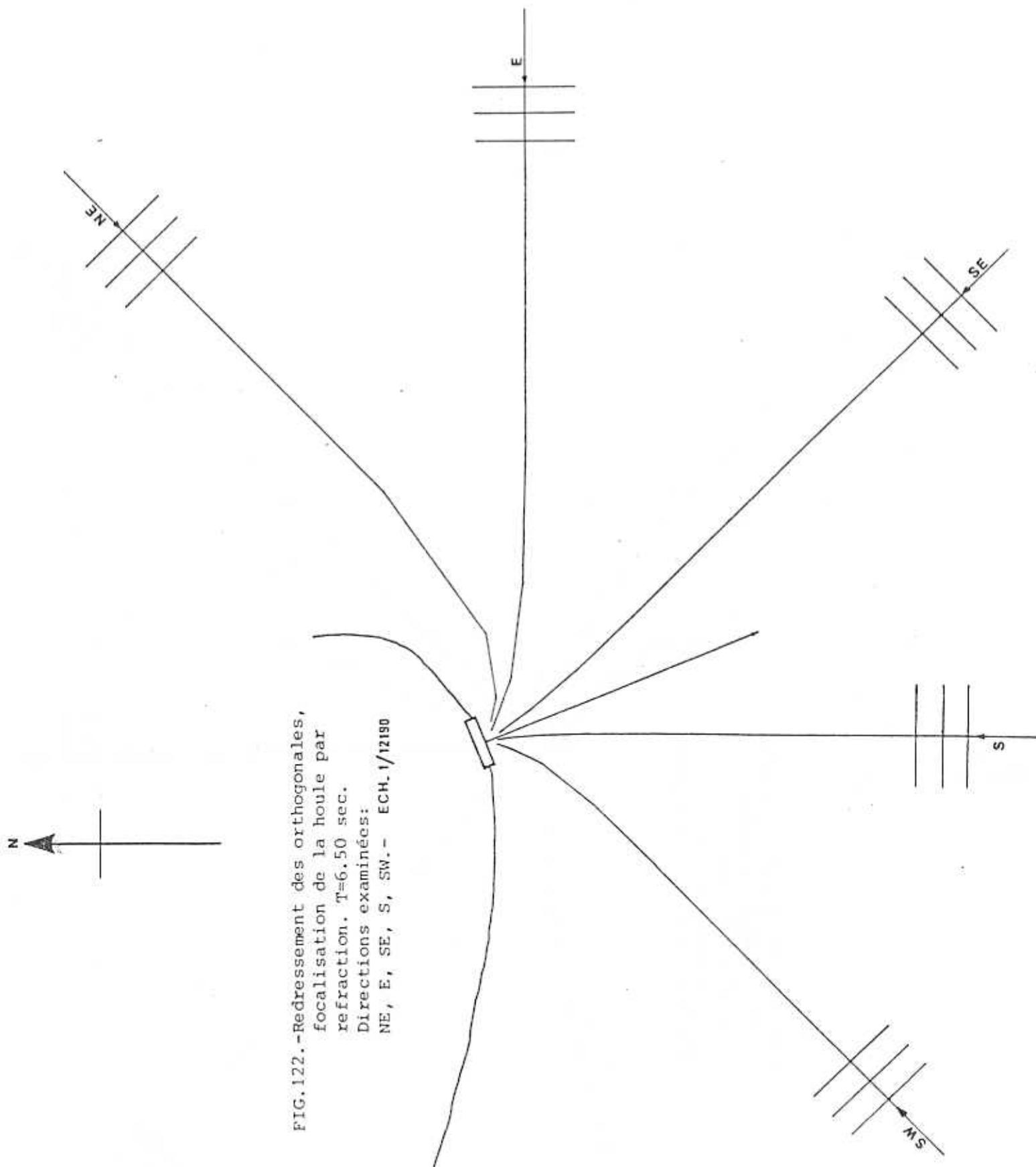


FIG. 122. -Redressement des orthogonales,  
focalisation de la houle par  
refraction.  $T=6.50$  sec.  
Directions examinées:  
NE, E, SE, S, SW.- ECH. 1/12190

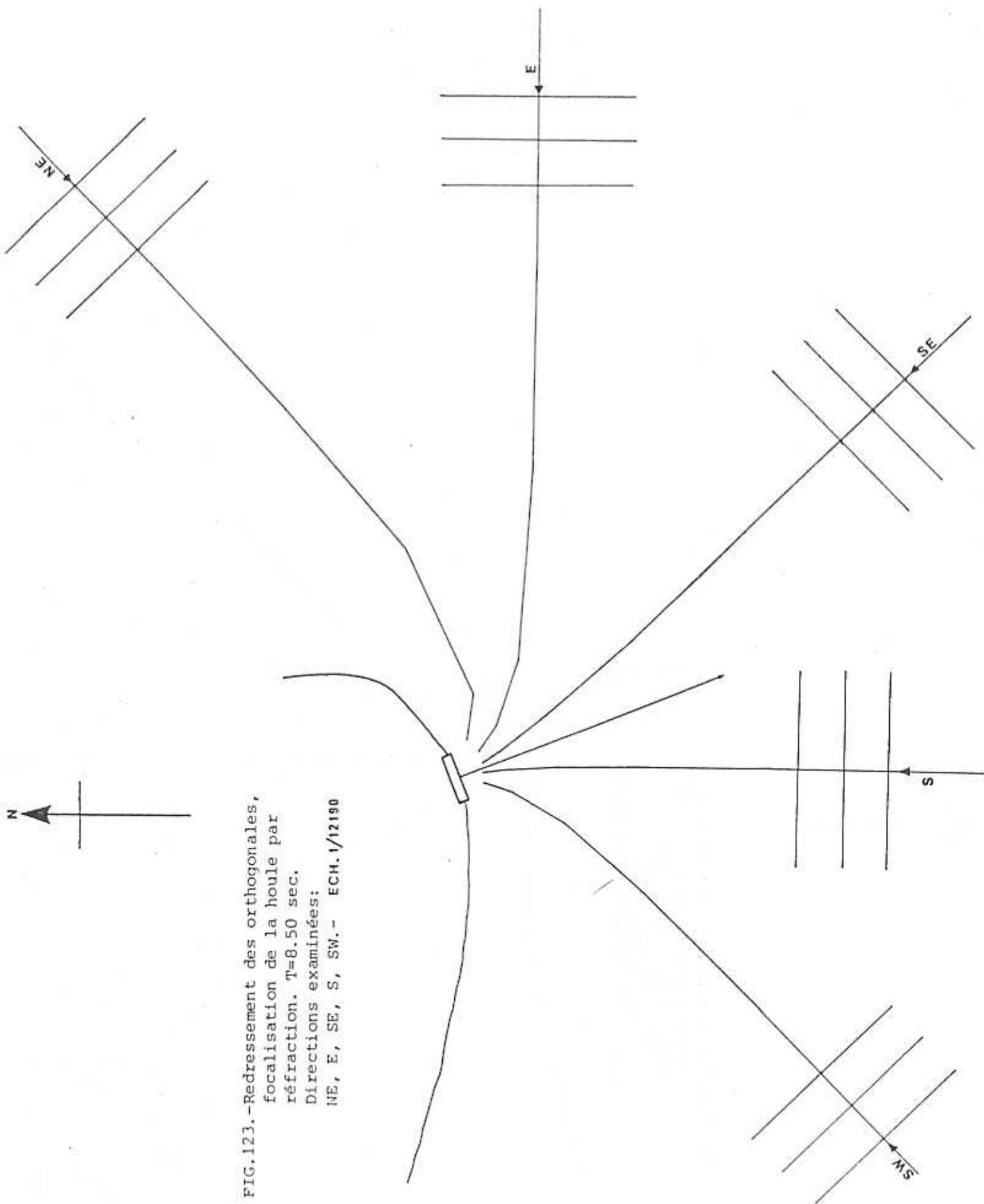


FIG.123.-Redressement des orthogonales,  
focalisation de la houle par  
réfraction. T=8.50 sec.  
Directions examinées:  
NE, E, SE, S, SW. - ECH. 1/12190

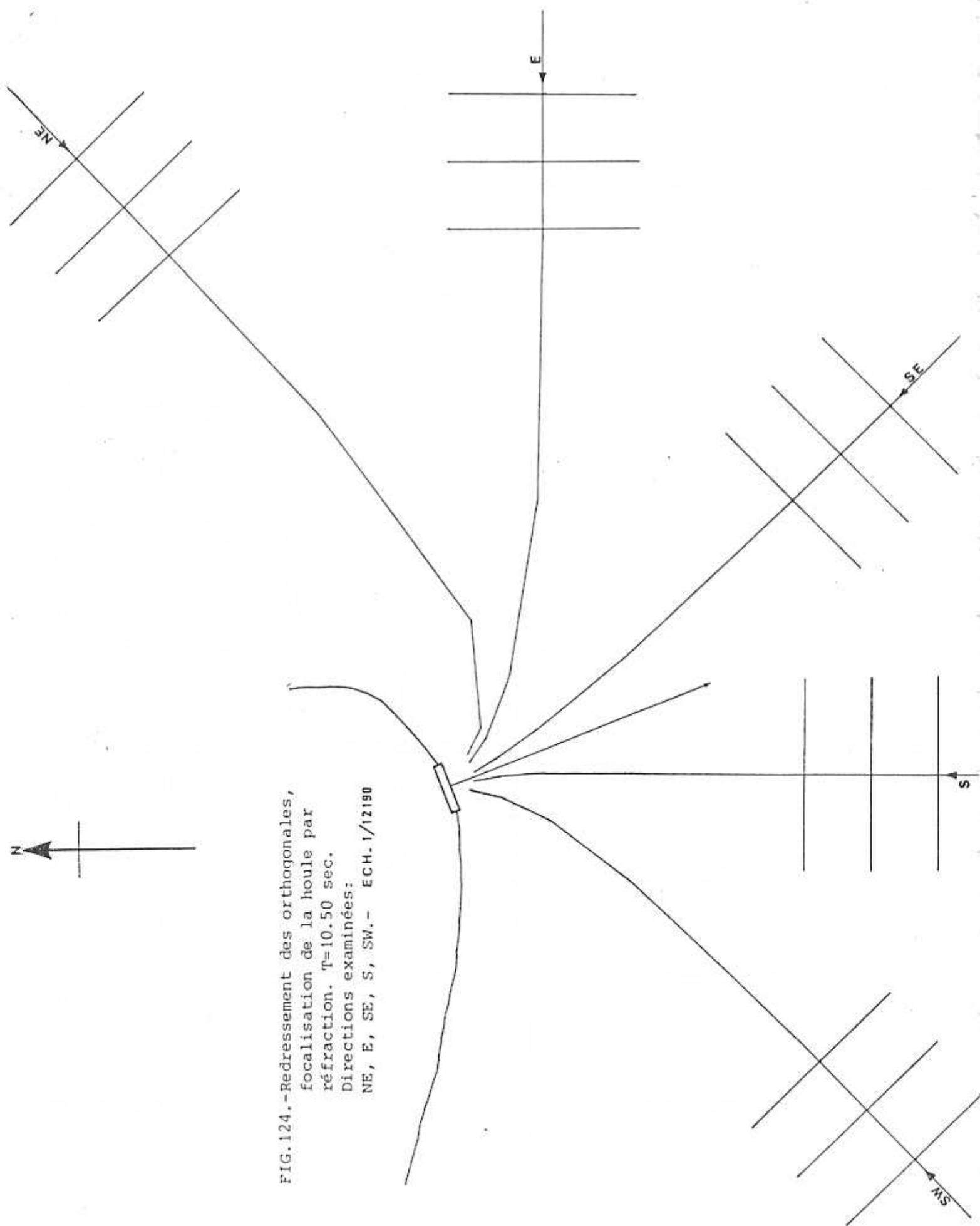


FIG.124.-Redressement des orthogonales,  
focalisation de la houle par  
réfraction. T=10.50 sec.  
Directions examinées:  
NE, E, SE, S, SW.- ECH. 1/12190

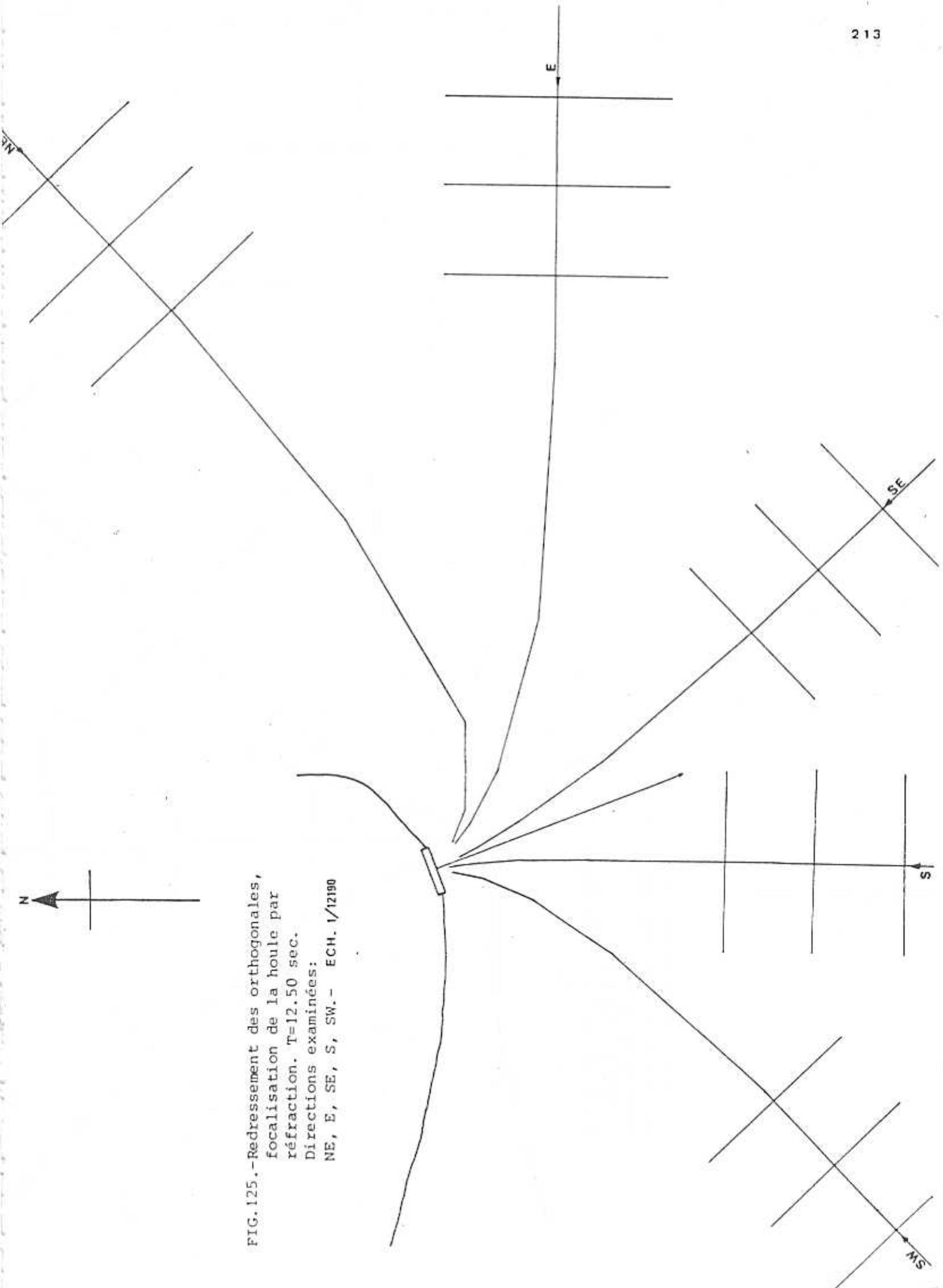


FIG. 125.-Redressement des orthogonales,  
 focalisation de la houle par  
 réfraction.  $T=12.50$  sec.  
 Directions examinées:  
 NE, E, SE, S, SW.- ECH. 1/12190

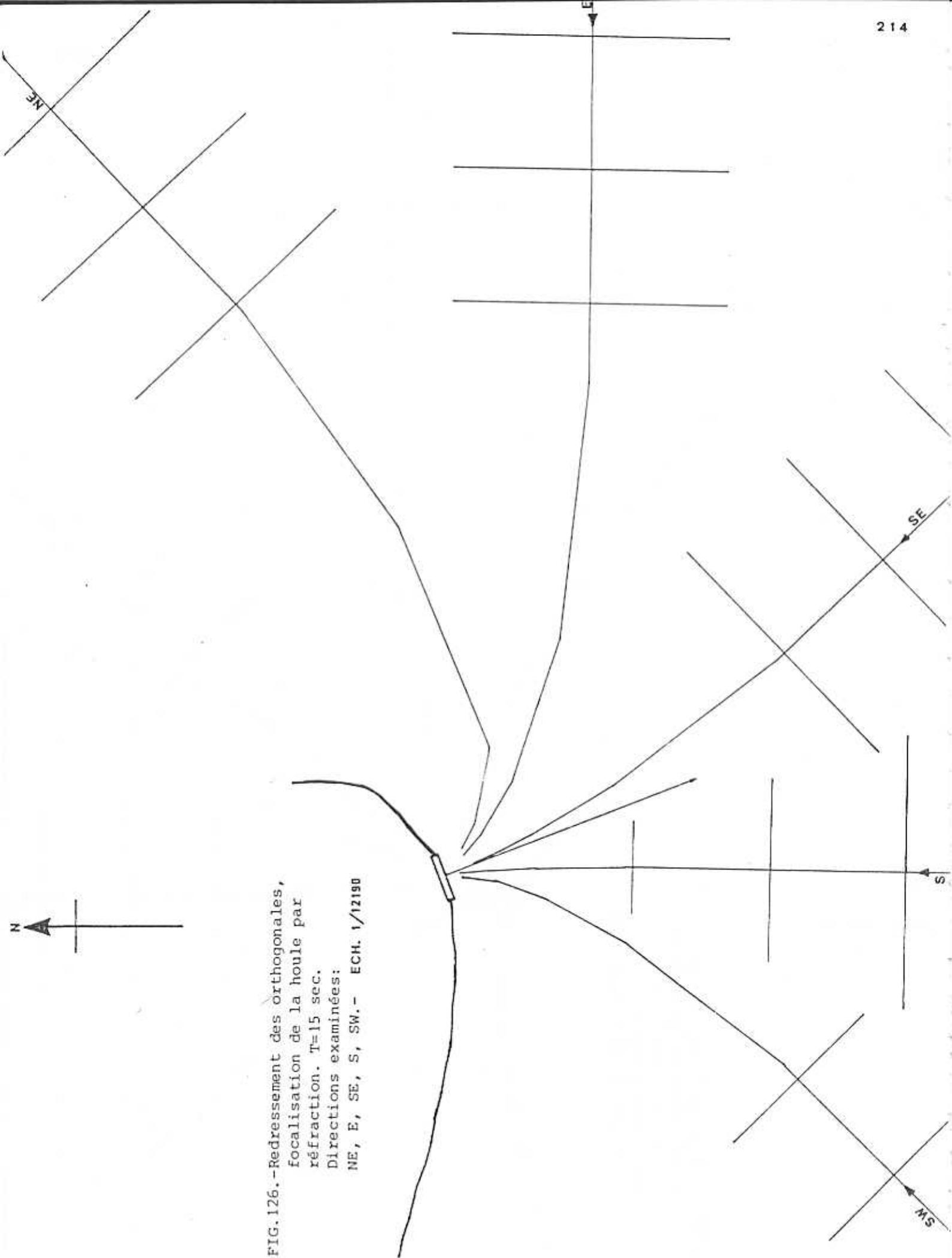


FIG. 126.-Redressement des orthogonales,  
focalisation de la houle par  
réfraction.  $T=15$  sec.  
Directions examinées:  
NE, E, SE, S, SW.- ECH. 1/12190

TABLEAU IX - CALCUL DE LA PROFONDEUR DE DEFERLEMENT\*  $H_d$  POUR TOUTE LA GAMME DE CAMBRURES  $\beta_0$  DE LA HOULE INCIDENTE ET POUR LES DIRECTIONS EXAMINEES - ESTIMATION DE  $\zeta_0$  ET  $\Omega$ .

$H_0$ (m)	$T_0$ (sec)	o (%)	o (m)	d (%)	d (m)	$\zeta_0$ (en degrés)					$\Omega = \cos \zeta_0$				
						NE	E	SE	S	SW	NE	E	SE	S	SW
1,25	5	3,2	39,0	4,1	1,60	42	23	15	13	39	0,743	0,92	0,966	0,974	0,777
	6,5	1,9	65,9	2,7	1,80	55	47	13	8	37	0,819	0,68	0,974	0,99	0,798
	8,5	1,1	112,7	1,6	1,80	61	34	10	12	39	0,485	0,829	0,984	0,978	0,777
	10,5	0,7	172,0	1,1	1,90	41	31	8	9	34	0,755	0,857	0,99	0,988	0,829
	12,5	0,5	243,7	0,88	2,15	41	31	5	12	31	0,755	0,857	0,996	0,978	0,857
	15	0,4	351,0	0,70	2,45	39	27	1	15	28	0,777	0,891	0,999	0,966	0,883
2,25	5	5,8	39,0	7,5	2,90	42	23	15	13	39	0,743	0,92	0,966	0,974	0,777
	6,5	3,4	65,9	4,4	2,90	55	47	13	8	37	0,819	0,68	0,974	0,99	0,798
	8,5	2,0	112,7	2,75	3,10	61	34	10	12	39	0,485	0,829	0,984	0,978	0,777
	10,5	1,3	172,0	1,90	3,30	41	31	8	9	34	0,755	0,857	0,99	0,988	0,829
	12,5	0,9	243,7	1,45	3,40	41	31	5	12	31	0,755	0,857	0,996	0,978	0,857
	15	0,6	351,0	0,97	3,40	39	27	1	15	28	0,777	0,891	0,999	0,966	0,883
3,25	5	8,3	39,0	11,3	4,40	42	23	15	13	39	0,743	0,92	0,966	0,974	0,777
	6,5	4,9	65,9	6,25	4,10	55	47	13	8	37	0,819	0,68	0,974	0,99	0,798
	8,5	2,9	112,7	3,75	4,20	61	34	10	12	39	0,485	0,829	0,984	0,978	0,777
	10,5	1,9	172,0	2,60	4,50	41	31	8	9	34	0,755	0,857	0,99	0,988	0,829
	12,5	1,3	243,7	1,90	4,60	41	31	5	12	31	0,755	0,857	0,996	0,978	0,857
	15	0,9	351,0	1,45	5,10	39	27	1	15	28	0,777	0,891	0,999	0,966	0,883
4,75	5	12,2	39,0	22,3	8,70	91	64	21	20	66	-	0,438	0,933	0,939	0,407
	6,5	7,2	65,9	9,4	6,20	77	64	21	16	47	0,22	0,438	0,933	0,961	0,682
	8,5	4,2	112,7	5,4	6,10	61	34	10	12	39	0,485	0,829	0,985	0,978	0,777
	10,5	2,76	172,0	3,7	6,40	73	48	17	17	48	0,292	0,667	0,956	0,956	0,669
	12,5	1,95	243,7	2,70	6,60	69	40	10	15	44	0,358	0,766	0,985	0,965	0,719
	15	1,35	351,0	1,95	6,85	58	38	6	19	42	0,530	0,788	0,995	0,945	0,743

\* v. fig. 18 et fig. 121 à 126.

TABLEAU X - ESTIMATION DE L'ENERGIE ANNUELLE RECUPEREE PAR LA RAMPE DE  
 DEFERLEMENT -  $S = 3,5$  m,  $tg \alpha = 1/2$ ,  $tg \beta = 1/2$   
 DIRECTION DE LA HOULE AU LARGE : NE  
 (v. Tableau IX, et Fig. 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126)

DUREE		$H_0$ (m)	PERIODE DE LA HOULE		$\lambda_0$ (m)	$\gamma_0$ (%)	$K_0$	$P_i$ $\frac{KW}{m^2}$	R (%)	$\Omega$ (%)	R. $\Omega$ (%)	$P_r$ $\frac{KW}{m^2}$	$E$ $\frac{KWh}{m^2 \cdot an}$
PROBA- BILITE (%)	t (heures)		T (sec)	PROBA- BILITE (%)									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1,0	88	1,25 (1 - 1,50)	$\begin{matrix} 5 \\ (< 5) \end{matrix}$	40	39,0	3,2	0,56	4,3	12,3	74,3	9,1	0,4	14
			$\begin{matrix} 6,50 \\ (6 - 7) \end{matrix}$	37	65,9	1,9	0,33	5,60	0	81,9	0	0	0
			$\begin{matrix} 8,50 \\ (8 - 9) \end{matrix}$	14	112,7	1,1	0,195	7,30	0	48,5	0	0	0
			$\begin{matrix} 10,50 \\ (10 - 11) \end{matrix}$	5	172,0	0,7	0,128	9,00	0	75,5	0	0	0
			$\begin{matrix} 12,50 \\ (12 - 13) \end{matrix}$	3	243,7	0,5	0,090	10,70	0	75,5	0	0	0
			$\begin{matrix} 15 \\ (> 13) \end{matrix}$	1	351,0	0,4	0,063	12,90	0	77,7	0	0	0
			TOTAL PARTIEL										
3,8	333	2,25 (2 - 2,50)	$\begin{matrix} 5 \\ (< 6) \end{matrix}$	14	39,0	5,8	0,56	13,90	30,5	74,3	22,7	3,15	147
			$\begin{matrix} 6,50 \\ (6 - 7) \end{matrix}$	33	65,9	3,4	0,33	18,10	57,1	81,9	46,7	8,45	929
			$\begin{matrix} 8,50 \\ (8 - 9) \end{matrix}$	35	112,7	2,0	0,195	23,70	13,7	48,5	6,6	1,55	181
			$\begin{matrix} 10,50 \\ (10 - 11) \end{matrix}$	11	172,0	1,3	0,128	29,20	0	75,5	0	0	0
			$\begin{matrix} 12,50 \\ (12 - 13) \end{matrix}$	5	243,7	0,9	0,090	34,80	0	75,5	0	0	0
			$\begin{matrix} 15 \\ (> 13) \end{matrix}$	2	351,0	0,6	0,063	41,80	0	77,7	0	0	0
			TOTAL PARTIEL										
2,7	236	3,25 (3 - 3,50)	$\begin{matrix} 5 \\ (< 6) \end{matrix}$	8	39,0	8,3	0,56	29,0	22,3	74,3	16,6	4,82	91
			$\begin{matrix} 6,50 \\ (6 - 7) \end{matrix}$	24	65,9	4,9	0,33	37,7	53,5	81,9	43,8	16,53	936
			$\begin{matrix} 8,50 \\ (8 - 9) \end{matrix}$	34	112,7	2,9	0,195	49,4	47,0	48,5	22,8	11,26	903
			$\begin{matrix} 10,50 \\ (10 - 11) \end{matrix}$	19	172,0	1,9	0,128	61,0	23,1	75,5	17,4	10,62	476
			$\begin{matrix} 12,50 \\ (12 - 13) \end{matrix}$	10	243,7	1,3	0,090	72,6	10,2	75,5	7,7	5,59	132
			$\begin{matrix} 15 \\ (> 13) \end{matrix}$	5	351,0	0,9	0,063	87,1	4,7	77,7	3,6	3,13	37
			TOTAL PARTIEL										
0,7	61	4,75 (4 - 5,50)	$\begin{matrix} 5 \\ (< 6) \end{matrix}$	9	39,0	12,2	0,56	62,0	14,4	-	0	0	0
			$\begin{matrix} 6,50 \\ (6 - 7) \end{matrix}$	29	65,9	7,2	0,33	80,7	34,3	22,0	7,5	6,05	107
			$\begin{matrix} 8,50 \\ (8 - 9) \end{matrix}$	29	112,7	4,2	0,195	105,5	46,7	48,5	22,6	23,83	422
			$\begin{matrix} 10,50 \\ (10 - 11) \end{matrix}$	18	172,0	2,76	0,128	130,3	39,5	29,2	11,5	14,98	164
			$\begin{matrix} 12,50 \\ (12 - 13) \end{matrix}$	9	243,7	1,95	0,090	155,1	27,5	35,8	9,8	15,20	83
			$\begin{matrix} 15 \\ (> 13) \end{matrix}$	6	351,0	1,35	0,063	186,1	17,4	53,9	9,4	17,50	64
			TOTAL PARTIEL										
TOTAL												4686	

TABLEAU XI - ESTIMATION DE L'ENERGIE ANNUELLE RECUPEREE PAR LA RAMPE DE DEFERLEMENT  
 $S = 3,5 \text{ m}$ ,  $\text{tg } \alpha = 1/2$ ,  $\text{tg } \beta = 1/2$   
 DIRECTION DE LA HOULE AU LARGE : E  
 (v. Tableau IX, et Fig. 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126)

DUREE		$H_0$ (m)	PERIODE DE LA HOULE		$\lambda_0$ (m)	$\gamma_0$ (%)	$K_0$	$P_i$ $\frac{\text{KW}}{\text{ml}}$	R (%)	$\Omega$ (%)	$R \cdot \Omega$ (%)	$P$ $\frac{\text{KW}}{\text{ml}}$	$E$ $\frac{\text{KWh}}{\text{ml/an}}$		
PROBA- BILITE (%)	t (heures)		T (sec)	PROBA- BILITE (%)											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
1,8	158	1,25 (1 - 1,50)	$\left( \begin{smallmatrix} 5 \\ < 5 \end{smallmatrix} \right)$	40	39,0	3,2	0,56	4,3	12,3	92,0	11,3	0,5	32		
			$\left( \begin{smallmatrix} 5,50 \\ (6 - 7) \end{smallmatrix} \right)$	37	65,9	1,9	0,33	5,60	0	68,0	0	0	0	0	
			$\left( \begin{smallmatrix} 8,50 \\ (8 - 9) \end{smallmatrix} \right)$	14	112,7	1,1	0,195	7,30	0	82,9	0	0	0	0	
			$\left( \begin{smallmatrix} 10,50 \\ (10 - 11) \end{smallmatrix} \right)$	5	172,0	0,7	0,128	9,00	0	85,7	0	0	0	0	
			$\left( \begin{smallmatrix} 12,50 \\ (12 - 13) \end{smallmatrix} \right)$	3	243,7	0,5	0,090	10,70	0	85,7	0	0	0	0	0
			$\left( \begin{smallmatrix} 15 \\ > 13 \end{smallmatrix} \right)$	1	351,0	0,4	0,063	12,90	0	89,1	0	0	0	0	0
			TOTAL PARTIEL												32
10,3	902	2,25 (2 - 2,50)	$\left( \begin{smallmatrix} 5 \\ < 6 \end{smallmatrix} \right)$	14	39,0	5,8	0,56	13,90	30,5	92,0	28,0	3,90	492		
			$\left( \begin{smallmatrix} 5,50 \\ (6 - 7) \end{smallmatrix} \right)$	33	65,9	3,4	0,33	18,10	57,1	68,0	38,8	7,02	2090		
			$\left( \begin{smallmatrix} 8,50 \\ (8 - 9) \end{smallmatrix} \right)$	35	112,7	2,0	0,195	23,70	13,7	82,9	11,3	2,68	846		
			$\left( \begin{smallmatrix} 10,50 \\ (10 - 11) \end{smallmatrix} \right)$	11	172,0	1,3	0,128	29,20	0	85,7	0	0	0	0	
			$\left( \begin{smallmatrix} 12,50 \\ (12 - 13) \end{smallmatrix} \right)$	5	243,7	0,9	0,090	34,80	0	85,7	0	0	0	0	
			$\left( \begin{smallmatrix} 15 \\ > 13 \end{smallmatrix} \right)$	2	351,0	0,6	0,063	41,80	0	89,1	0	0	0	0	
			TOTAL PARTIEL												3428
8,8	771	3,25 (3 - 3,50)	$\left( \begin{smallmatrix} 5 \\ < 6 \end{smallmatrix} \right)$	8	39,0	6,3	0,56	29,0	22,3	92,0	20,5	5,95	367		
			$\left( \begin{smallmatrix} 5,50 \\ (6 - 7) \end{smallmatrix} \right)$	24	65,9	4,9	0,33	37,7	53,5	68,0	36,4	13,74	2542		
			$\left( \begin{smallmatrix} 8,50 \\ (8 - 9) \end{smallmatrix} \right)$	34	112,7	2,9	0,195	49,4	47,0	82,9	39,0	19,26	5049		
			$\left( \begin{smallmatrix} 10,50 \\ (10 - 11) \end{smallmatrix} \right)$	19	172,0	1,9	0,128	61,0	23,1	85,7	19,8	12,08	1770		
			$\left( \begin{smallmatrix} 12,50 \\ (12 - 13) \end{smallmatrix} \right)$	10	243,7	1,3	0,090	72,6	10,2	85,7	8,7	6,31	486		
			$\left( \begin{smallmatrix} 15 \\ > 13 \end{smallmatrix} \right)$	5	351,0	0,9	0,063	87,1	4,7	89,1	4,2	3,66	141		
			TOTAL PARTIEL												10355
2,8	245	4,75 (4 - 5,50)	$\left( \begin{smallmatrix} 5 \\ < 6 \end{smallmatrix} \right)$	9	39,0	12,2	0,56	62,0	14,4	43,8	6,3	3,90	86		
			$\left( \begin{smallmatrix} 5,50 \\ (6 - 7) \end{smallmatrix} \right)$	29	65,9	7,2	0,33	80,7	34,3	43,8	15,0	12,10	860		
			$\left( \begin{smallmatrix} 8,50 \\ (8 - 9) \end{smallmatrix} \right)$	29	112,7	4,2	0,195	105,5	46,7	82,9	38,7	40,82	2900		
			$\left( \begin{smallmatrix} 10,50 \\ (10 - 11) \end{smallmatrix} \right)$	18	172,0	2,76	0,128	130,3	39,5	66,7	26,3	34,26	1511		
			$\left( \begin{smallmatrix} 12,50 \\ (12 - 13) \end{smallmatrix} \right)$	9	243,7	1,95	0,090	155,1	27,5	76,6	21,0	32,57	718		
			$\left( \begin{smallmatrix} 15 \\ > 13 \end{smallmatrix} \right)$	6	351,0	1,35	0,063	186,1	17,4	78,8	13,7	25,50	375		
			TOTAL PARTIEL												6450
TOTAL												20.265			

TABLEAU XII - ESTIMATION DE L'ENERGIE ANNUELLE RECUPEREE PAR LA RAMPE DE DEFERLEMENT  
 $S = 3,5 \text{ m}$ ,  $\text{tg} \alpha = 1/2$ ,  $\text{tg} \beta = 1/2$   
 DIRECTION DE LA HOULE AU LARGE : SE  
 (v. Tableau IX et Fig. 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126)

DUREE		$H_0$ (m)	PERIODE DE LA HOULE		$\lambda_0$ (m)	$\gamma_0$ (%)	$K_0$	$P$ $\frac{\text{KW}}{\text{m}}$	$R$ (%)	$\Omega$ (%)	$R \cdot \Omega$ (%)	$P$ $\frac{\text{KW}}{\text{m}}$	$E$ $\frac{\text{KWm}}{\text{an}}$
PROBA- BILITE (%)	t (heures)		T (sec)	PROBA- BILITE (%)									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1,50	131	1,25 (1 - 1,50)	$\frac{5}{( < 6)}$	40	39,0	3,2	0,56	4,3	12,3	96,6	11,9	0,51	27
			$\frac{6,50}{(6 - 7)}$	37	65,9	1,9	0,33	5,60	0	97,4	0	0	0
			$\frac{8,50}{(8 - 9)}$	14	112,7	1,1	0,33	5,60	0	97,4	0	0	0
			$\frac{10,50}{(10 - 11)}$	5	172,0	0,7	0,128	9,00	0	99,0	0	0	0
			$\frac{12,50}{(12 - 13)}$	3	243,7	0,5	0,090	10,70	0	99,6	0	0	0
			$\frac{15}{( > 13)}$	1	351,0	0,4	0,063	12,90	0	99,9	0	0	0
			TOTAL PARTIEL										
10,1	885	2,25 (2 - 2,50)	$\frac{5}{( < 6)}$	14	39,0	5,8	0,56	13,90	30,5	96,6	29,4	4,09	507
			$\frac{6,50}{(6 - 7)}$	33	65,9	3,4	0,33	18,10	57,1	97,4	55,6	10,07	2941
			$\frac{8,50}{(8 - 9)}$	35	112,7	2,0	0,195	23,70	13,7	98,4	13,5	3,20	991
			$\frac{10,50}{(10 - 11)}$	11	172,0	1,3	0,128	29,20	0	99,0	0	0	0
			$\frac{12,50}{(12 - 13)}$	5	243,7	0,9	0,090	34,80	0	99,6	0	0	0
			$\frac{15}{( > 13)}$	2	351,0	0,6	0,063	41,80	0	99,9	0	0	0
			TOTAL PARTIEL										
9,6	841	3,25 (3 - 3,50)	$\frac{5}{( < 6)}$	8	39,0	8,3	0,56	29,0	22,3	96,6	21,5	6,24	420
			$\frac{6,50}{(6 - 7)}$	24	65,9	4,9	0,33	37,7	53,5	97,4	52,1	19,67	3970
			$\frac{8,50}{(8 - 9)}$	34	112,7	2,9	0,195	49,4	47,0	98,4	46,2	22,81	6522
			$\frac{10,50}{(10 - 11)}$	19	172,0	1,9	0,128	61,0	23,1	99,0	22,8	13,91	2223
			$\frac{12,50}{(12 - 13)}$	10	243,7	1,3	0,090	72,6	10,2	99,6	10,1	7,33	616
			$\frac{15}{( > 13)}$	5	351,0	0,9	0,063	87,1	4,7	99,9	4,7	4,10	172
			TOTAL PARTIEL										
3,3	289	4,75 (4 - 5,00)	$\frac{5}{( < 6)}$	9	39,0	12,2	0,56	62,0	14,4	93,3	13,4	8,31	216
			$\frac{6,50}{(6 - 7)}$	29	65,9	7,2	0,33	80,7	34,3	93,3	32,00	25,81	2163
			$\frac{8,50}{(8 - 9)}$	29	112,7	4,2	0,195	105,5	46,7	98,4	45,9	48,41	4057
			$\frac{10,50}{(10 - 11)}$	18	172,0	2,75	0,128	130,3	39,5	95,6	37,7	49,11	2555
			$\frac{12,50}{(12 - 13)}$	9	243,7	1,95	0,090	155,1	27,5	98,5	27	41,87	1089
			$\frac{15}{( > 13)}$	6	351,0	1,35	0,063	186,1	17,4	99,5	17,3	32,20	558
			TOTAL PARTIEL										
T O T A L												29027	

TABLEAU XIII - ESTIMATION DE L'ENERGIE ANNUELLE RECUPEREE PAR LA RAMPE DE DEFERLEMENT

$$S = 3,5 \text{ m. } \operatorname{tg} \alpha = 1/2, \operatorname{tg} \beta = 1/2$$

DIRECTION DE LA HOULE AU LARGE : S

(v. Tableau IX et Fig. 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126)

DUREE		H <sub>0</sub> (m)	PERIODE DE LA HOULE		$\lambda_0$ (m)	$\gamma_0$ (%)	K <sub>0</sub>	P $\frac{\text{KW}}{\text{ml}}$	R (%)	$\Omega$ (%)	R $\cdot\Omega$ (%)	P $\frac{\text{KW}}{\text{ml}}$	E <sub>r</sub> $\frac{\text{KWh}}{\text{ml/an}}$		
PROBA- BILITE (%)	t (heures)		T (sec)	PROBA- BILITE (%)											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
1,0	88	1,25 (1 - 1,50)	5 ( < 6)	40	39,0	3,2	0,56	4,3	12,3	97,4	12,0	0,51	18		
			6,50 (6 - 7)	37	65,9	1,9	0,33	5,60	0	99,0	0	0	0	0	
			8,50 (8 - 9)	14	112,7	1,1	0,195	7,30	0	97,8	0	0	0	0	
			10,50 (10 - 11)	5	172,0	0,7	0,128	9,00	0	98,8	0	0	0	0	0
			12,50 (12 - 13)	3	243,7	0,5	0,090	10,70	0	97,8	0	0	0	0	0
			15 ( > 13)	1	351,0	0,4	0,063	12,90	0	96,6	0	0	0	0	0
			TOTAL PARTIEL												18
7,8	683	2,25 (2 - 2,50)	5 ( < 6)	14	39,0	5,8	0,56	13,90	30,5	97,4	35,6	4,95	473		
			6,50 (6 - 7)	33	65,9	3,4	0,33	18,10	57,1	99,0	56,5	10,22	2303		
			8,50 (8 - 9)	35	112,7	2,0	0,195	23,70	13,7	97,8	13,4	3,17	758		
			10,50 (10 - 11)	11	172,0	1,3	0,128	29,20	0	98,8	0	0	0	0	
			12,50 (12 - 13)	5	243,7	0,9	0,090	34,80	0	97,8	0	0	0	0	
			15 ( > 13)	2	351,0	0,6	0,063	41,80	0	96,6	0	0	0	0	
			TOTAL PARTIEL												3534
7,0	613	3,25 (3 - 3,50)	5 ( < 6)	8	39,0	8,3	0,56	29,0	22,3	97,4	21,7	6,30	309		
			6,50 (6 - 7)	24	65,9	4,9	0,33	37,7	53,5	99,0	53,0	20,00	2942		
			8,50 (8 - 9)	34	112,7	2,9	0,195	49,4	47,0	97,8	45,9	22,56	4723		
			10,50 (10 - 11)	19	172,0	1,9	0,128	61,0	23,1	98,8	22,8	13,91	1620		
			12,50 (12 - 13)	10	243,7	1,3	0,090	72,6	10,2	97,8	9,9	9,10	558		
			15 ( > 13)	5	351,0	0,9	0,063	87,1	4,7	96,6	4,5	3,92	120		
			TOTAL PARTIEL												10272
2,4	210	4,75 (4 - 5,50)	5 ( < 5)	9	39,0	12,2	0,56	62,0	14,4	93,9	13,5	8,38	158		
			6,50 (6 - 7)	29	65,9	7,2	0,33	80,7	34,3	96,1	33,0	26,62	1621		
			8,50 (8 - 9)	29	112,7	4,2	0,195	105,5	46,7	97,8	45,6	48,09	2929		
			10,50 (10 - 11)	18	172,0	2,76	0,128	130,3	39,5	95,6	37,7	49,11	1856		
			12,50 (12 - 13)	9	243,7	1,95	0,090	155,1	27,5	96,5	26,5	41,10	777		
			15 ( > 13)	6	351,0	1,35	0,063	186,1	17,4	94,5	16,4	30,52	385		
			TOTAL PARTIEL												7726
TOTAL												21550			

TABLEAU XIV - ESTIMATION DE L'ENERGIE ANNUELLE RECUPEREE PAR LA RAMPE DE DEFERLEMENT

$$S = 3,5 \text{ m}, \text{tg } \alpha = 1/2, \text{tg } \beta = 1/2$$

DIRECTION DE LA HOULE AU LARGE : SW

(v. Tableau IX et Fig. 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126)

DUREE		H <sub>0</sub> (m)	PERIODE DE LA HOULE		$\lambda$ (m)	$\gamma$ (%)	K	P $\frac{\text{KW}}{\text{mT}}$	R (%)	$\Omega$ (%)	R. $\Omega$ (%)	P $\frac{\text{KW}}{\text{mT}}$	E <sub>a</sub> $\frac{\text{KWh}}{\text{mT/an}}$
PROBA- BILITE (%)	t (heures)		T (sec)	PROBA- BILITE (%)									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1,0	88	1,25 (1 - 1,50)	$\frac{5}{(< 5)}$	40	39,0	3,2	0,56	4,3	12,3	77,7	9,50	0,40	14
			$\frac{5,50}{(5 - 7)}$	37	65,9	1,9	0,33	5,60	0	79,8	0	0	0
			$\frac{6,50}{(8 - 9)}$	14	112,7	1,1	0,195	7,30	0	77,7	0	0	0
			$\frac{10,50}{(10 - 11)}$	5	172,0	0,7	0,128	9,00	0	82,9	0	0	0
			$\frac{12,50}{(12 - 13)}$	3	243,7	0,5	0,090	10,70	0	85,7	0	0	0
			$\frac{15}{(> 13)}$	1	351,0	0,4	0,063	12,90	0	88,3	0	0	0
			TOTAL PARTIEL										
3,8	333	2,25 (2 - 2,50)	$\frac{5}{(< 5)}$	14	39,0	5,8	0,56	13,90	30,5	77,7	23,7	3,30	154
			$\frac{5,50}{(5 - 7)}$	33	65,9	3,4	0,33	18,10	57,1	79,8	45,5	8,24	905
			$\frac{6,50}{(8 - 9)}$	35	112,7	2,0	0,195	23,70	13,7	77,7	10,6	2,50	291
			$\frac{10,50}{(10 - 11)}$	11	172,0	1,3	0,12	29,20	0	82,9	0	0	0
			$\frac{12,50}{(12 - 13)}$	5	243,7	0,9	0,090	34,80	0	85,7	0	0	0
			$\frac{15}{(> 13)}$	2	351,0	0,6	0,063	41,80	0	88,3	0	0	0
			TOTAL PARTIEL										
3,2	280	3,25 (3 - 3,50)	$\frac{5}{(< 6)}$	8	39,0	8,3	0,56	29,0	22,3	79,7	17,3	5,02	112
			$\frac{5,50}{(6 - 7)}$	24	65,9	4,9	0,33	37,7	53,5	79,8	42,7	16,11	1082
			$\frac{6,50}{(8 - 9)}$	34	112,7	2,9	0,195	49,4	47,0	77,7	36,5	18,02	1716
			$\frac{10,50}{(10 - 11)}$	19	172,0	1,9	0,128	61,0	23,1	82,9	19,1	11,65	620
			$\frac{12,50}{(12 - 13)}$	10	243,7	1,3	0,090	72,6	10,2	85,7	8,7	6,31	177
			$\frac{15}{(> 13)}$	5	351,0	0,9	0,063	87,1	4,7	88,3	44,1	3,57	50
			TOTAL PARTIEL										
1,8	158	4,75 (4 - 5,50)	$\frac{5}{(< 6)}$	9	39,0	12,2	0,56	62,0	14,4	40,7	5,8	3,60	51
			$\frac{5,50}{(6 - 7)}$	29	65,9	7,2	0,33	80,7	34,3	68,2	23,4	18,87	865
			$\frac{6,50}{(8 - 9)}$	29	112,7	4,2	0,195	105,5	46,7	77,7	36,3	38,28	1754
			$\frac{10,50}{(10 - 11)}$	18	172,0	2,76	0,128	130,3	39,5	66,9	26,4	34,39	978
			$\frac{12,50}{(12 - 13)}$	9	243,7	1,95	0,090	155,1	27,5	71,9	19,8	30,70	437
			$\frac{15}{(> 13)}$	6	351,0	1,35	0,063	186,1	17,4	74,3	12,9	24,01	228
			TOTAL PARTIEL										
T O T A L												9434	

TABLEAU XV - ESTIMATION DE L'ENERGIE ANNUELLE RECUPEREE PAR LES TRIEDRES A HOULE  
 $S = 3,5 \text{ m}$ ,  $\text{tg } \alpha = 1/2$ ,  $\text{tg } \beta = 1/2$ ,  $r = 5$   
 DIRECTION DE LA HOULE AU LARGE : NE  
 (v. Tableau IX et Fig. 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126)

DUREE		$H_0$ (m)	PERIODE DE LA HOULE		$\lambda_0$ (m)	$\gamma_0$ (%)	$K_0$	$P$ $\frac{\text{KW}}{\text{ml}}$	$R$ (%)	$\Omega$ (%)	$R.\Omega$ (%)	$\frac{P}{\text{KW}}$ m <sup>3</sup>	$\frac{E}{\text{KWH}}$ ml/an
PROBA- BILITE (%)	t (heures)		T (sec)	PROBA- BILITE (%)									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1,0	88	1,25 (1-1,50)	$\frac{5}{(< 6)}$	40	39,0	3,2	0,56	4,3	9,1	74,3	6,8	0,3	10
			$\frac{6,50}{(6-7)}$	37	65,9	1,9	0,33	5,60	44,3	81,9	36,3	2,03	66
			$\frac{8,50}{(8-9)}$	14	112,7	1,1	0,195	7,30	34,7	48,5	16,8	1,22	15
			$\frac{10,50}{(10-11)}$	5	172,0	0,7	0,128	9,00	14,6	75,5	11,0	0,99	0
			$\frac{12,50}{(12-13)}$	3	243,7	0,5	0,090	10,70	8,3	75,5	6,3	0,68	2
			$\frac{15}{(> 13)}$	1	351,0	0,4	0,063	12,90	7,1	77,7	5,5	0,71	1
			TOTAL PARTIEL										
3,8	333	2,25 (2-2,50)	$\frac{5}{(< 6)}$	14	39,0	5,8	0,56	13,90	31	74,3	23,0	3,2	149
			$\frac{6,50}{(6-7)}$	33	65,9	3,4	0,33	18,10	51,3	81,9	42,0	7,6	835
			$\frac{8,50}{(8-9)}$	35	112,7	2,0	0,195	23,70	63,5	48,5	30,8	7,29	850
			$\frac{10,50}{(10-11)}$	11	172,0	1,3	0,128	29,20	45,9	75,5	34,6	10,11	370
			$\frac{12,50}{(12-13)}$	5	243,7	0,9	0,090	34,80	28,5	75,5	21,5	7,48	125
			$\frac{15}{(> 13)}$	2	351,0	0,6	0,063	41,80	16,2	77,7	12,6	5,26	35
			TOTAL PARTIEL										
2,7	236	3,25 (3-3,50)	$\frac{5}{(< 6)}$	8	39,0	8,3	0,56	29,0	25,6	74,3	19,0	5,52	104
			$\frac{6,50}{(6-7)}$	24	65,9	4,9	0,33	37,7	35,4	81,9	29,0	10,85	615
			$\frac{8,50}{(8-9)}$	34	112,7	2,9	0,195	49,4	52,2	48,5	25,3	12,50	1003
			$\frac{10,50}{(10-11)}$	19	172,0	1,9	0,128	61,0	53,3	75,5	40,2	24,53	1100
			$\frac{12,50}{(12-13)}$	10	243,7	1,3	0,090	72,6	41,2	75,5	31,1	22,57	533
			$\frac{15}{(> 13)}$	5	351,0	0,9	0,063	87,1	27,7	77,7	21,5	18,73	221
			TOTAL PARTIEL										
0,7	61	4,75 (4-5,50)	$\frac{5}{(< 6)}$	9	39,0	12,2	0,56	62,0	17,5	-	0	0	0
			$\frac{6,50}{(6-7)}$	29	65,9	7,2	0,33	80,7	22,9	22,0	5,0	4,03	71
			$\frac{8,50}{(8-9)}$	29	112,7	4,2	0,195	105,5	37,3	48,5	18,1	19,09	338
			$\frac{10,50}{(10-11)}$	18	172,0	2,76	0,128	130,3	47,5	29,2	13,9	18,10	199
			$\frac{12,50}{(12-13)}$	9	243,7	1,95	0,090	155,1	47,5	35,8	17,0	26,36	148
			$\frac{15}{(> 13)}$	6	351,0	1,35	0,063	186,1	38,8	53,9	20,9	38,90	142
			TOTAL PARTIEL										
T O T A L												6936	

TABLEAU XVI - ESTIMATION DE L'ENERGIE ANNUELLE RECUPEREE PAR LES TRIEDRES A HOULE

S = 3,5 m,  $\text{tg } \alpha = 1/2$ ,  $\text{tg } \beta = 1/2$ ,  $r = 5$ 

DIRECTION DE LA HOULE AU LARGE : E

(v. Tableau IX et Fig. 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126)

PROBA- BILITE (%)	DUREE t (heures)	H <sub>0</sub> (m)	PERIODE DE LA HOULE		$\lambda_0$ (m)	$\gamma_0$ (%)	K <sub>0</sub>	P $\frac{\text{KW}}{\text{ml}}$	R (%)	$\Omega$ (%)	R. $\Omega$ (%)	P $\frac{\text{KW}}{\text{ml}}$	E <sub>r</sub> $\frac{\text{KWh}}{\text{ml/an}}$
			T (sec)	PROBA- BILITE (%)									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1,8	158	1,25 (1-1,50)	$\frac{5}{(<5)}$	40	39,0	3,2	0,56	4,3	9,1	92,0	8,4	0,36	23
			$\frac{6,50}{(6-7)}$	37	65,9	1,9	0,33	5,60	44,3	68,0	30,1	1,68	98
			$\frac{8,50}{(8-9)}$	14	112,7	1,1	0,135	7,30	34,7	82,9	28,8	2,10	46
			$\frac{10,50}{(10-11)}$	5	172,0	0,7	0,128	9,00	14,6	85,7	12,5	1,12	9
			$\frac{12,50}{(12-13)}$	3	243,7	0,5	0,090	10,70	8,3	85,7	7,1	0,76	4
			$\frac{15}{(>13)}$	1	351,0	0,4	0,063	12,90	7,1	89,1	6,3	0,81	1
			TOTAL PARTIEL										
1,03	902	2,25 (2-2,50)	$\frac{5}{(<6)}$	14	39,0	5,8	0,56	13,90	31	92,0	28,5	3,96	500
			$\frac{6,50}{(6-7)}$	33	39,0	5,8	0,56	13,90	51,3	68,0	34,9	6,32	1881
			$\frac{8,50}{(8-9)}$	35	112,7	2,0	0,195	23,70	63,5	82,9	52,6	12,44	3927
			$\frac{10,50}{(10-11)}$	11	172,0	1,3	0,128	29,20	45,9	85,7	39,3	11,48	1139
			$\frac{12,50}{(12-13)}$	5	243,7	0,9	0,090	34,80	28,5	85,7	24,4	8,48	382
			$\frac{15}{(>13)}$	2	351,0	0,6	0,063	41,80	16,2	89,1	14,4	6,02	109
			TOTAL PARTIEL										
8,8	771	3,25 (3-3,50)	$\frac{5}{(<6)}$	8	39,0	8,3	0,56	29,0	25,6	92,0	23,5	6,82	421
			$\frac{6,50}{(6-7)}$	24	65,9	4,9	0,33	37,7	35,4	68,0	24,1	9,10	1684
			$\frac{8,50}{(8-9)}$	34	112,7	2,9	0,195	49,4	52,2	82,9	43,3	21,38	5605
			$\frac{10,50}{(10-11)}$	19	172,0	1,9	0,128	61,0	53,3	85,7	45,7	27,88	4084
			$\frac{12,50}{(12-13)}$	10	243,7	1,3	0,090	72,6	41,2	85,7	35,3	25,62	1975
			$\frac{15}{(>13)}$	5	351,0	0,9	0,063	87,1	27,7	89,1	24,7	21,52	830
			TOTAL PARTIEL										
2,8	245	4,75 (4-5,50)	$\frac{5}{(<6)}$	9	39,0	12,2	0,56	62,0	17,5	43,8	7,6	4,72	104
			$\frac{6,50}{(6-7)}$	29	65,9	7,2	0,33	80,7	22,9	43,8	10,0	8,07	574
			$\frac{8,50}{(8-9)}$	29	112,7	4,2	0,195	105,5	37,3	82,9	30,9	32,60	2316
			$\frac{10,50}{(10-11)}$	18	172,0	2,76	0,128	130,3	47,5	66,7	31,7	41,30	1821
			$\frac{12,50}{(12-13)}$	9	243,7	1,95	0,090	155,1	47,5	76,6	36,4	56,45	1245
			$\frac{15}{(>13)}$	6	351,0	1,35	0,063	186,1	38,8	78,8	30,6	56,96	837
			TOTAL PARTIEL										
TOTAL												29615	

TABLEAU XVII - ESTIMATION DE L'ENERGIE ANNUELLE RECUPEREE PAR LES TRIEDRES A HOULE  
 $S = 3,5 \text{ m}$ ,  $\text{tg } \alpha = 1/2$ ,  $\text{tg } \beta = 1/2$ ,  $r = 5$   
 DIRECTION DE LA HOULE AU LARGE : SE  
 (v. Tableau IX et Fig. 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126)

DUREE		$H_0$ (m)	PERIODE DE LA HOULE		$\lambda_0$ (m)	$\gamma_0$ (%)	$K_0$	$P_1$ $\frac{\text{KW}}{\text{m}^2}$	R (%)	$\Omega$ (%)	R. $\Omega$ (%)	$\frac{P}{\text{KW}}$ /m	$\frac{E}{\text{KW/h}}$ /m <sup>2</sup> /an
PROBA- BILITE (%)	t (heures)		T (sec)	PROBA- BILITE (%)									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1,50	131	1,25 (1-1,50)	$\frac{5}{(< 6)}$	40	39,0	3,2	0,56	4,3	9,1	96,6	8,8	0,38	20
			$\frac{6,50}{(6-7)}$	37	65,9	1,9	0,33	5,60	44,3	97,4	43,1	2,40	116
			$\frac{8,50}{(8-9)}$	14	112,7	1,1	0,195	7,30	34,7	98,4	34,1	2,49	46
			$\frac{10,50}{(10-11)}$	5	172,0	0,7	0,128	9,00	14,6	99	14,4	1,30	9
			$\frac{12,50}{(12-13)}$	3	243,7	0,5	0,090	10,70	8,3	99,6	8,2	0,88	3
			$\frac{15}{(> 13)}$	1	351,0	0,4	0,063	12,90	7,1	99,9	7	0,90	1
			TOTAL PARTIEL										
10,1	885	2,25 (2-2,50)	$\frac{5}{(< 6)}$	14	39,0	5,8	0,56	13,90	31	96,6	29,9	4,16	515
			$\frac{6,50}{(6-7)}$	33	65,9	3,4	0,33	18,10	51,3	97,4	49,9	9,03	2637
			$\frac{8,50}{(8-9)}$	35	112,7	2,0	0,195	23,70	63,5	98,4	62,4	15,76	4572
			$\frac{10,50}{(10-11)}$	11	172,0	1,3	0,128	29,20	45,9	99	45,4	13,26	1291
			$\frac{12,50}{(12-13)}$	5	243,7	0,9	0,090	34,80	28,5	99,6	28,3	9,84	435
			$\frac{15}{(> 13)}$	2	351,0	0,6	0,063	41,80	16,2	99,9	16,1	6,72	119
			TOTAL PARTIEL										
9,6	841	3,25 (3-3,50)	$\frac{5}{(< 6)}$	8	39,0	8,3	0,56	29,0	25,6	96,6	24,7	7,17	482
			$\frac{6,50}{(6-7)}$	24	65,9	4,9	0,33	37,7	35,4	97,4	34,4	12,99	2622
			$\frac{8,50}{(8-9)}$	34	112,7	2,9	0,195	49,4	52,2	98,4	51,3	25,33	7243
			$\frac{10,50}{(10-11)}$	19	172,0	1,9	0,128	61,0	53,3	99,0	52,7	32,15	5137
			$\frac{12,50}{(12-13)}$	10	243,7	1,3	0,090	72,6	41,2	99,6	41,0	29,76	2503
			$\frac{15}{(> 13)}$	5	351,0	0,9	0,063	87,1	27,7	99,9	27,6	24,05	1011
			TOTAL PARTIEL										
4,75	4-5,50	4,75 (4-5,50)	$\frac{5}{(< 6)}$	9	39,0	12,2	0,56	62,0	17,5	93,3	16,5	10,11	263
			$\frac{6,50}{(6-7)}$	29	65,9	7,2	0,33	80,7	22,9	93,3	21,3	17,18	1440
			$\frac{8,50}{(8-9)}$	29	112,7	4,2	0,195	105,5	37,3	98,4	36,7	38,70	3243
			$\frac{10,50}{(10-11)}$	18	172,0	2,76	0,128	130,3	47,5	95,6	45,4	59,15	3077
			$\frac{12,50}{(12-13)}$	9	243,7	1,95	0,090	155,1	47,5	98,5	46,8	72,58	1888
			$\frac{15}{(> 13)}$	6	351,0	1,35	0,063	186,1	38,8	99,5	38,6	71,85	1246
			TOTAL PARTIEL										
TOTAL												39919	

TABLEAU XVIII - ESTIMATION DE L'ENERGIE ANNUELLE RECUPEREE PAR LES TRIEDRES A HOULE  
 $S = 3,5 \text{ m}$ ,  $\text{tg } \alpha = 1/2$ ,  $\text{tg } \beta = 1/2$ ,  $r = 5$   
 DIRECTION DE LA HOULE AU LARGE : S  
 (v. Tableau IX et Fig. 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126)

DUREE		$H_D$ (m)	PERIODE DE LA HOULE		$\lambda_0$ (m)	$\gamma_0$ (%)	$K_0$	$P$ $\frac{\text{KW}}{\text{m}}$	R (%)	$\Omega$ (%)	R. $\Omega$ (%)	$P$ $\frac{\text{KW}}{\text{m}}$	$E_r$ $\frac{\text{KWh}}{\text{m}^2/\text{an}}$
PROBA- BILITE (%)	t (heures)		T (sec)	PROBA- BILITE (%)									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1,0	88	1,25 (1-1,50)	$\begin{matrix} 5 \\ (< 6) \end{matrix}$	40	39,0	3,2	0,56	4,3	9,1	97,4	8,8	0,38	13
			$\begin{matrix} 5,50 \\ (5 - 7) \end{matrix}$	37	65,9	1,9	0,33	5,60	44,3	99,0	43,8	2,45	80
			$\begin{matrix} 8,50 \\ (8 - 9) \end{matrix}$	14	112,7	1,1	0,195	7,30	34,7	97,8	33,9	2,45	30
			$\begin{matrix} 10,50 \\ (10 - 11) \end{matrix}$	5	172,0	0,7	0,128	9,00	14,6	98,8	14,4	1,30	6
			$\begin{matrix} 12,50 \\ (12 - 13) \end{matrix}$	3	243,7	0,5	0,090	10,70	8,3	97,8	8,1	0,87	2
			$\begin{matrix} 15 \\ (> 13) \end{matrix}$	1	351,0	0,4	0,063	12,90	7,1	96,6	6,8	0,88	1
			TOTAL PARTIEL										
7,8	683	2,25 (2-2,50)	$\begin{matrix} 5 \\ (< 6) \end{matrix}$	14	39,0	5,8	0,56	13,90	31	97,4	30,2	4,20	402
			$\begin{matrix} 5,50 \\ (6 - 7) \end{matrix}$	33	65,9	3,4	0,33	18,10	51,3	99,0	50,8	9,20	2074
			$\begin{matrix} 8,50 \\ (8 - 9) \end{matrix}$	35	112,7	2,0	0,195	23,70	63,5	97,8	62,1	14,70	3514
			$\begin{matrix} 10,50 \\ (10 - 11) \end{matrix}$	11	172,0	1,3	0,128	29,20	45,9	98,8	45,3	13,23	994
			$\begin{matrix} 12,50 \\ (12 - 13) \end{matrix}$	5	243,7	0,9	0,090	34,80	28,5	97,8	27,9	9,70	331
			$\begin{matrix} 15 \\ (> 13) \end{matrix}$	2	351,0	0,6	0,063	41,80	16,2	96,6	15,6	6,51	89
			TOTAL PARTIEL										
7,0	613	3,25 (3-3,50)	$\begin{matrix} 5 \\ (< 6) \end{matrix}$	8	39,0	8,3	0,56	29,0	25,6	97,4	24,9	7,23	355
			$\begin{matrix} 5,50 \\ (5 - 7) \end{matrix}$	24	65,9	4,9	0,33	37,7	35,4	99,0	35,0	13,21	1943
			$\begin{matrix} 8,50 \\ (8 - 9) \end{matrix}$	34	112,7	2,9	0,195	49,4	52,2	97,8	51,0	25,19	5250
			$\begin{matrix} 10,50 \\ (10 - 11) \end{matrix}$	19	172,0	1,9	0,128	61,0	53,3	98,8	52,7	32,15	3745
			$\begin{matrix} 12,50 \\ (12 - 13) \end{matrix}$	10	243,7	1,3	0,090	72,6	41,2	97,8	40,3	29,25	1793
			$\begin{matrix} 15 \\ (> 13) \end{matrix}$	5	351,0	0,9	0,063	87,1	27,7	96,6	26,7	23,27	713
			TOTAL PARTIEL										
2,4	210	4,75 (4-5,50)	$\begin{matrix} 5 \\ (< 6) \end{matrix}$	9	39,0	12,2	0,56	62,0	17,5	93,9	16,4	10,17	192
			$\begin{matrix} 5,50 \\ (5 - 7) \end{matrix}$	29	65,9	7,2	0,33	80,7	22,9	96,1	22,0	17,75	1081
			$\begin{matrix} 8,50 \\ (8 - 9) \end{matrix}$	29	112,7	4,2	0,195	105,5	37,3	97,8	36,5	38,49	2344
			$\begin{matrix} 10,50 \\ (10 - 11) \end{matrix}$	18	172,0	2,76	0,128	130,3	47,5	95,6	45,4	59,15	2236
			$\begin{matrix} 12,50 \\ (12 - 13) \end{matrix}$	9	243,7	1,95	0,090	155,1	47,5	96,5	45,8	71,03	1342
			$\begin{matrix} 15 \\ (> 13) \end{matrix}$	6	351,0	1,35	0,063	186,1	38,8	94,5	36,6	68,12	858
			TOTAL PARTIEL										
T O T A L												29388	

TABLEAU XIX - ESTIMATION DE L'ENERGIE ANNUELLE RECUPEREE PAR LES TRIEDRES A HOULE

S = 3,5 m,  $tg\alpha = 1/2$ ,  $tg\beta = 1/2$ , r = 5

DIRECTION DE LA HOULE AU LARGE : SW

(v. Tableau IX et Fig. 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126)

DUREE		H <sub>0</sub> (m)	PERIODE DE LA HOULE		λ <sub>0</sub> (m)	γ <sub>0</sub> (%)	K <sub>0</sub>	P $\frac{KW}{m^2}$	R (%)	Ω (%)	R.Ω (%)	P $\frac{KW}{m^2}$	E <sub>r</sub> $\frac{KWh}{m^2/an}$
PROBA- BILITE (%)	t (heures)		T (sec)	PROBA- BILITE (%)									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1,0	88	1,25 (1-1,50)	$\frac{5}{( < 6)}$	40	39,0	3,2	0,56	4,3	9,1	77,7	7,0	0,30	10
			$\frac{6,50}{(6 - 7)}$	37	65,9	1,9	0,33	5,60	44,3	79,8	35,3	1,97	64
			$\frac{8,50}{(8 - 9)}$	14	112,7	1,1	0,195	7,30	34,7	77,7	27,0	1,97	24
			$\frac{10,50}{(10 - 11)}$	5	172,0	0,7	0,129	9,00	14,6	82,9	12,1	1,09	5
			$\frac{12,50}{(12 - 13)}$	3	243,7	0,5	0,090	10,70	8,3	85,7	7,1	0,76	2
			$\frac{15}{( > 13)}$	1	351,0	0,4	0,063	12,90	7,1	88,3	6,2	0,80	1
			TOTAL PARTIEL										
3,8	333	2,25 (2-2,50)	$\frac{5}{( < 6)}$	14	39,0	5,8	0,56	13,90	31	77,7	24,0	3,34	156
			$\frac{6,50}{(6 - 7)}$	33	65,9	3,4	0,33	18,10	51,3	79,8	40,9	7,40	813
			$\frac{8,50}{(8 - 9)}$	35	112,7	2,0	0,195	23,70	63,5	77,7	49,3	11,66	1359
			$\frac{10,50}{(10 - 11)}$	11	172,0	1,3	0,128	29,20	45,9	82,9	38,0	11,10	407
			$\frac{12,50}{(12 - 13)}$	5	243,7	0,9	0,090	34,80	28,5	85,7	24,4	8,48	141
			$\frac{15}{( > 13)}$	2	351,0	0,6	0,063	41,80	16,2	88,3	14,3	5,97	40
			TOTAL PARTIEL										
3,2	280	3,25 (3-3,50)	$\frac{5}{( < 6)}$	8	39,0	8,3	0,56	29,0	25,6	77,7	19,9	5,77	129
			$\frac{6,50}{(6 - 7)}$	24	65,9	4,9	0,33	37,7	35,4	79,8	28,2	10,64	715
			$\frac{8,50}{(8 - 9)}$	34	112,7	2,9	0,195	49,4	52,2	77,7	40,5	20,00	1904
			$\frac{10,50}{(10 - 11)}$	19	172,0	1,9	0,128	61,0	53,3	82,9	44,2	26,97	1435
			$\frac{12,50}{(12 - 13)}$	10	243,7	1,3	0,090	72,6	41,2	85,7	35,3	25,62	717
			$\frac{15}{( > 13)}$	5	351,0	0,9	0,063	87,1	27,7	88,3	24,4	21,26	298
			TOTAL PARTIEL										
1,8	158	4,75 (4-5,50)	$\frac{5}{( < 6)}$	9	39,0	12,2	0,56	62,0	17,5	40,7	7,1	4,40	63
			$\frac{6,50}{(6 - 7)}$	29	65,9	7,2	0,33	80,7	22,9	68,2	15,6	12,58	576
			$\frac{8,50}{(8 - 9)}$	29	72,7	4,2	0,195	105,5	37,3	77,7	29,0	30,59	1402
			$\frac{10,50}{(10 - 11)}$	18	172,0	2,75	0,128	130,3	47,5	66,9	31,8	41,43	1178
			$\frac{12,50}{(12 - 13)}$	9	243,7	1,95	0,090	155,1	47,5	71,9	34,1	52,88	752
			$\frac{15}{( > 13)}$	6	351,0	1,35	0,063	186,1	38,8	74,3	28,8	53,60	508
			TOTAL PARTIEL										
TOTAL												12699	

TABLEAU XX - ENERGIE ANNUELLE RECUPEREE DANS LE BASSIN DE STOCKAGE

Dispositif	RAMPE DE DEFERLEMENT	TRIEDRES A HOULE
Direction		
NE	4.686 KWh/ml/an	6.936 KWh/ml/an
E	20.265 "	29.615 "
SE	29.027 "	39.919 "
S	21.550 "	29.388 "
SW	9.434 "	12.699 "
	84.969 KWh/ml/an	118.557 KWh/ml/an

Pour le calcul de l'énergie incidente  $P_i$  (v. colonne 9 des Tableaux X à XIX), on a considéré que l'amplitude  $H_o$  utilisée était égale à l'amplitude caractéristique  $H_c$  et  $T_o$  à  $T_z$  (période de passages à zéro). Dans ce cas,  $P_i = 0,55 H_c^2 T_z$ , (v. annexe B).

L'énergie totale récupérée dans le bassin de stockage subit des pertes dues :

- . à l'abaissement du niveau moyen de la surface d'eau dans le bassin de stockage (fonctionnement, houle résiduelle, débordements, fuites) estimées à 15 %.
- . à la surélévation du niveau moyen de la mer aux endroits d'évacuation des eaux turbinées, estimées à 10 %.

En admettant le rendement :

$$\tau_t = 90 \% \quad (\text{turbines})$$

$$\tau_{tr} = 92 \% \quad (\text{transmission}),$$

$$\tau_a = 96 \% \quad (\text{alternateurs}),$$

$$\tau_{tt} = 98 \% \quad (\text{transformateurs}),$$

nous pouvons estimer l'énergie électrique annuelle arrivant au réseau par mètre linéaire du dispositif utilisé.

Pour la rampe de déferlement :

$$84.962 \times 0,85 \times 0,90 \times 0,90 \times 0,96 \times 0,98 = \underline{50.630 \text{ KWh/ml/an}}$$

Pour les trièdres à houle :

$$118.557 \times 0,85 \times 0,90 \times 0,90 \times 0,92 \times 0,96 \times 0,98 = \underline{70.650 \text{ KWh/ml/an}}$$

La fig. 127 A présente une section de la rampe de déferlement. Les fig. 127 B, C, D présentent respectivement une section une vue du dessus et une vue de face des trièdres, à  $r = 5$ . Des sacs à béton posés contre les parois des dispositifs, côté bassin, assurent l'étanchéité. La préparation de la surface des fondations nécessite des déroctages importants.

Les dispositifs sont construits par juxtaposition des éléments préfabriqués en béton armé. Le manque de moyen de manutention important sur le site pourrait être compensé par la méthode de construction suivante :

Des caissons en béton armé préfabriqués d'un poids inférieur à 50 t sont posés vides sur place ; ils sont ensuite remplis de béton coulé in situ (pompage).

Les barrages latéraux et arrières sont formés de blocs de béton juxtaposés. Des joints spéciaux remplis de béton bitumeux coulé in situ assurent l'étanchéité des barrages (v. fig. 128 A, section, B vue de haut en bas).

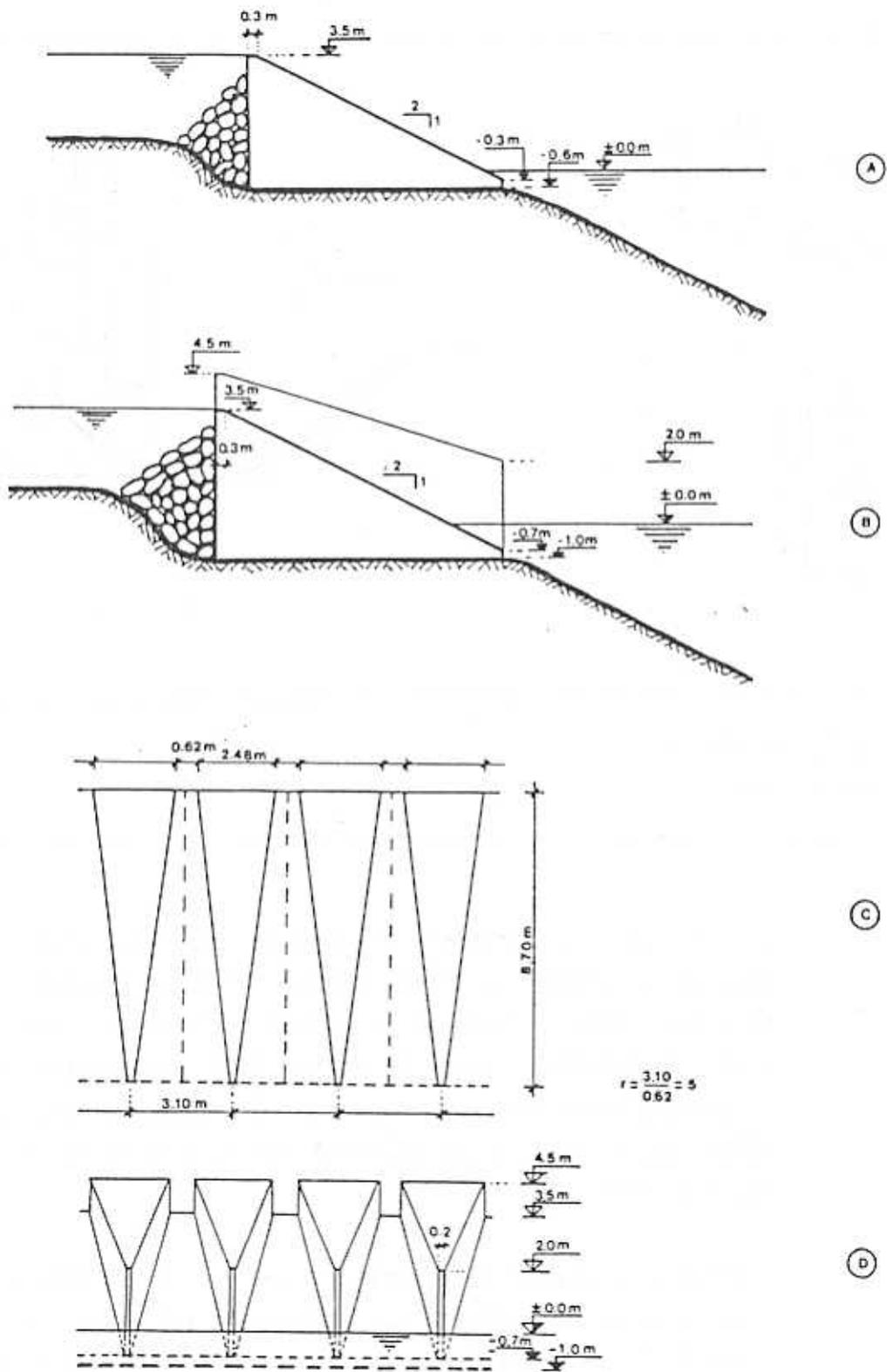
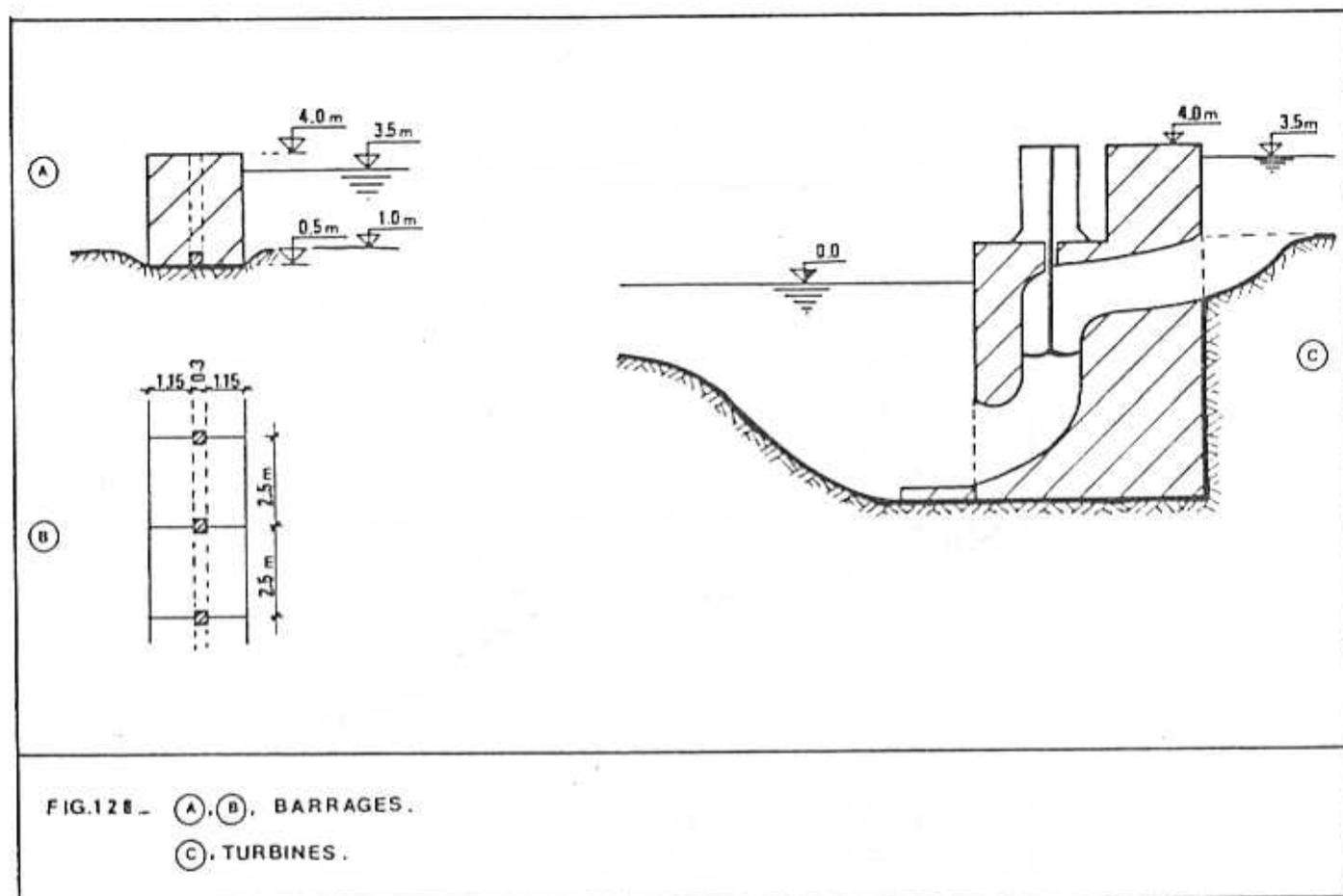


FIG.127 - (A) . RAMPE DE DEFERLEMENT -

(B) . (C) . (D) . TRIEDRES -

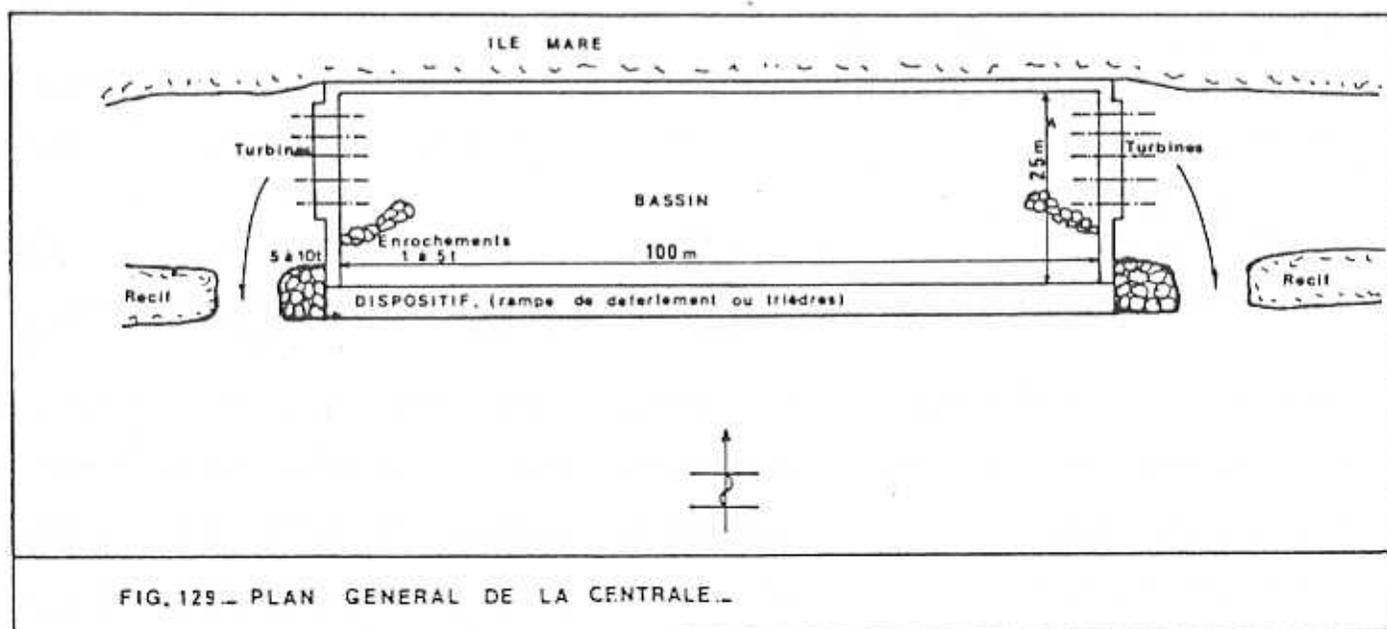


La fig. 128 C présente une section de l'ensemble des turbines. La structure est en béton coulé in situ. L'évacuation des eaux turbinées se fait par les passes naturelles d'une largeur d'environ 20 m, dans le récif. Si la topographie du site le permet, nous pourrions supprimer le barrage arrière, le bassin étant dans ce cas délimité par la falaise de l'île (v. fig. 129).

D'après ce que nous connaissons, il n'existe pas de méthodes pour calculer les efforts dus à la houle déferlante sur les plans inclinés franchis par la houle. Les résultats expérimentaux de Carr (v. § 10.3.) qui concernent les parois inclinées (pente de 1/1,73) sur un fond de 1/10, peuvent nous donner un ordre de grandeur de ces efforts.

L'expérimentation est indispensable pour contrôler la stabilité des structures proposées et optimiser le dimensionnement. Le calcul de la stabilité des dispositifs et des barrages au glissement et au renversement dûs aux pressions côté bassin (bassin plein, houle résiduelle dans le bassin, marée basse) peut être effectuée par la méthode de Saintflou (v. bibl. 67, 74).

La centrale houlomotrice examinée a une longueur de front de 100 m, avec une largeur utile du bassin de stockage de 25 m. Les turbines sont disposées sur les barrages latéraux. L'évacuation des eaux turbinées se fait par des ouvertures naturelles du récif (v. fig. 129).



Les extrémités de l'ouvrage sont protégées par des enrochements. Les prises d'eau sont également protégées contre la houle résiduelle du bassin.

CARACTERISTIQUES	TAUX D'ACTUALISATION Ka = 8 %		TAUX D'ACTUALISATION Ka = 9 %	
	RAMPE	TRIEDRES	RAMPE	TRIEDRES
Période d'exploitation de la centrale	35 ans	35 ans	35 ans	35 ans
Durée de vie des turbines, alternateurs et vannes régulatrices	15 ans	15 ans	15 ans	15 ans
Durée de vie de l'équipement de la sous-station	20 ans	20 ans	20 ans	20 ans
Longueur de front de la centrale	100 m	100 m	100 m	100 m
Energie électrique annuelle arrivant au réseau	5063000 KWh	7065000 KWh	5063000 KWh	7065000 KWh
Puissance moyenne annuelle de la centrale	578 KW	807 KW	578 KW	807 KW
Puissance moyenne annuelle utile par m.l. du front de la centrale	5,78 KW/ml	8,07 KW/ml	5,78 KW/ml	8,07 KW/ml
Puissance installée	750 KW	1000 KW	750 KW	1000 KW
Coefficient d'exploitation (Capacity Factor)	0,77	0,807	0,77	0,807
Capital total investi	30.785.400 FF.	41.979.320 FF.	31.070.450 FF.	43.368.020 FF.
Investissement par KW produit	53260 FF/KW	52050 FF/KW	53755 FF/KW	52500 FF/KW
Investissement par KW installé	41000 FF/KWI	42000 FF/KWI	51000 FF/KWI	52000 FF/KWI
Coûts annuels totaux	3.531.400 FF	4.804.300 FF	3.824.200 FF	5.204.600 FF
Prix de revient du KWh	0,70 FF/KWh	0,68 FF/KWh	0,755 FF/KWh	0,736 FF/KWh
Rendement global *	15,83 %	22,1 %	15,83 %	22,1 %

TABLEAU XXI - COMPARAISON DES SYSTEMES EXAMINES

\* EN. TOTALE disponible annuellement devant l'installation : 320.000 KWh/ml  
et puissance moyenne disponible : 36,52 KW/ml.

L'annexe D nous donne l'évaluation des quantités et des coûts des différents travaux et matériaux de construction pour les deux centrales houlomotrices examinées.

Chacun de deux systèmes est examiné avec deux valeurs différentes du taux d'actualisation :  $K_a = 8\%$  (optimiste)  $K_a = 9\%$  (pessimiste). Par conséquent, le capital total investi et les coûts annuels sont calculés dans les cas suivants :

- $K_a = 8\%$  , rampes de déferlement (v. annexes E et F)
- $K_a = 8\%$  , trièdres à houle (v. annexes G et H)
- $K_a = 9\%$  , rampes de déferlement (v. annexe I et J)
- $K_a = 9\%$  , trièdres à houle (v. annexes K et L).

La comparaison des performances énergétiques et économiques des rampes et des trièdres examinés est présentée dans le Tableau XXI.

Nous pouvons constater que pour ce site particulier, les trièdres à houle se présentent plus prometteurs que la rampe de déferlement simple :

- du point de vue énergétique (puissance moyenne annuelle utile, par m.l. de front de la centrale).
- du point de vue économique (investissement par KW fourni ; prix de revient du KWh produit), mais à ce stade de précision du projet, la différence est trop faible pour être significative .

## 12 . CONCLUSIONS

Le travail présenté dans ce mémoire nous a permis de préciser quelques caractéristiques énergétiques et technicoéconomiques des systèmes houlomoteurs du type déferlant et de chiffrer leurs performances.

Le rendement hydrodynamique des dispositifs examinés en houle régulière unidirectionnelle est intéressant dans une gamme de caractéristiques de la houle incidente suffisamment vaste.

Les rampes de déferlement présentent un intérêt énergétique plutôt pour les moyennes et grandes cambrures (  $\gamma > 3 \%$  ).

La pente de 1/2 est plus intéressante pour les cambrures moyennes et la pente de 1/1,5 pour les grandes cambrures. La construction des rampes est en général plus simple et plus économique que celle des trièdres de même hauteur de seuil S.

Les trièdres à houle offrent des rendements intéressants même dans la zone des petites cambrures (  $\gamma < 2 \%$  ). Cette propriété permet l'exploitation d'une partie plus vaste du spectre énergétique de la houle incidente, surtout dans le cas de la houle océanique. De tous les trièdres examinés, c'est celui qui a un rapport d'ouverture de 5 sur une pente de 1/2 qui donne les meilleurs résultats.

Dans la fourchette de 1/4 à 1/1, l'influence de la pente du fond de la mer sur le rendement des trièdres (  $r = 5$ , pente 1/2 ou 1/1,5) est relativement limitée.

Un marnage inférieur à 3 m n'affecte pas sensiblement l'efficacité énergétique des systèmes examinés.

Etant persuadés que les houlomotrices constituent des systèmes complexes dont l'efficacité dépend de plusieurs paramètres (spectre de houle, caractéristiques du dispositif de captation de l'énergie primaire, constantes énergétiques, technicoéconomiques, etc.), nous avons essayé d'appliquer les résultats obtenus et les méthodes exposées dans le cas d'un site donné (Ile Maré). Pour cette étude préliminaire, nous avons pris en considération le redressement des orthogonales de la houle incidente par réfraction. Cet exemple a permis la comparaison de deux systèmes (rampes et trièdres) du point de vue efficacité énergétique et viabilité économique. Pour le site choisi, le système à trièdres s'est révélé être le plus intéressant.

Notons enfin que le prix de revient du kWh obtenu en considérant toujours les valeurs les plus pessimistes des différents paramètres (rendements, taux d'actualisation, etc) reste très compétitif par rapport à d'autres types de production de l'électricité en site isolé.

## 13 . ANNEXES

## ANNEXE A

Calcul de la puissance disponible  $P_i$  par mètre de longueur de crête, en fonction des paramètres:

$H_s$  (  $\cong H_{1/3}$  ) : amplitude significative (creux-crête)

$T_z$  : période de passage à zéro

Par définition, on a :

$$H_s = 4\sqrt{m_s} \quad \text{et} \quad m_s = \int S(f) df \quad (A1)$$

où  $f$  est la fréquence et  $S(f)$  la densité spectrale de puissance

$$P_i = \frac{\rho g^2}{4\pi} m_s T_a \quad (A2)$$

où

$$T_a = \frac{1}{m_s} \int_0^{\infty} \frac{1}{f} S(f) df$$

Pour lier  $T_a$  et  $T_z$ , il faut prendre en considération la forme du spectre de la houle. Si le spectre est du type Pierson-Moskowitz :

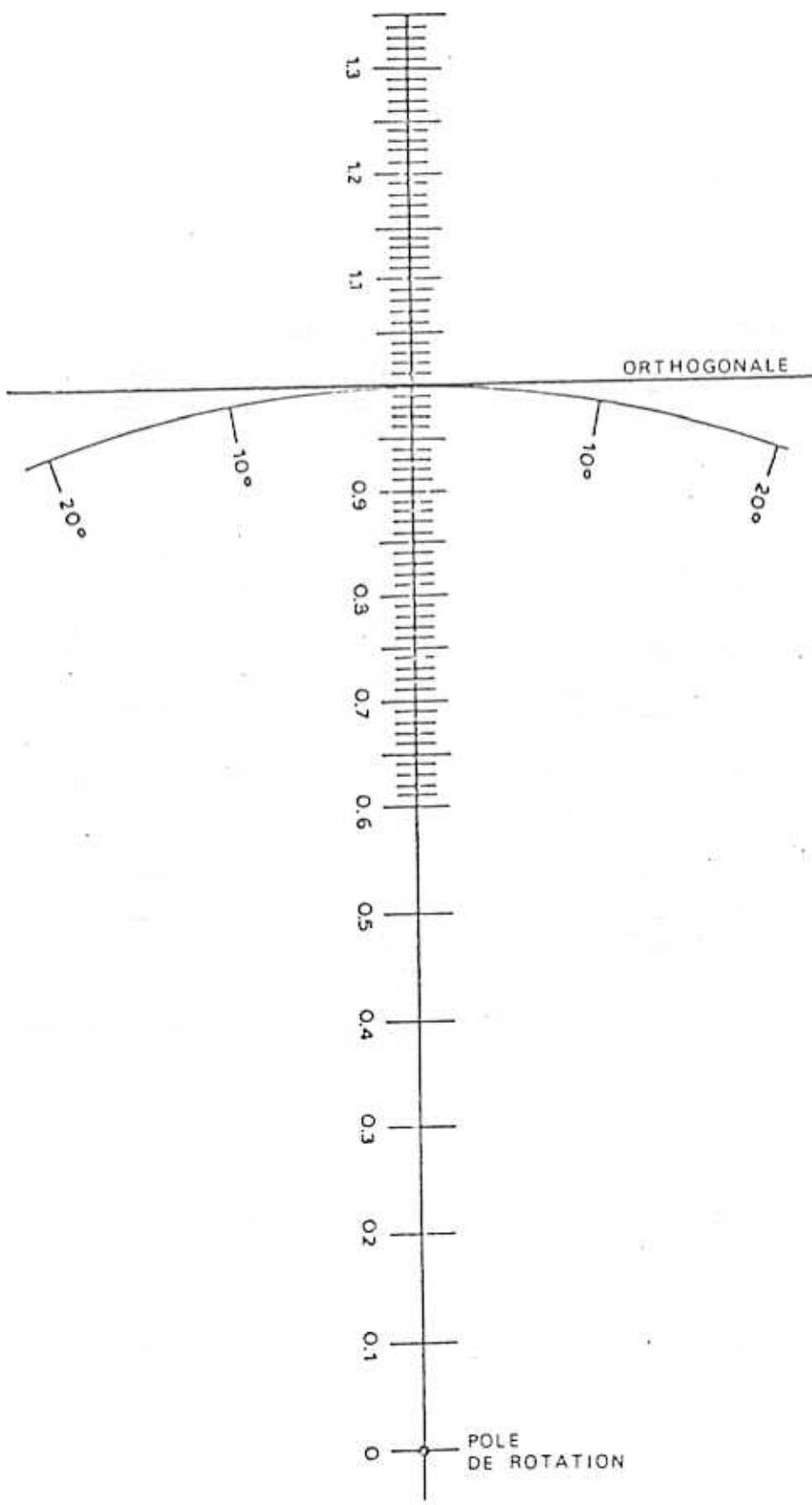
$$S(f) = a \frac{1}{f^5} e^{(-b \cdot f^{-4})}$$

$$\text{On a } T_a = 1,12 T_z \quad (A3)$$

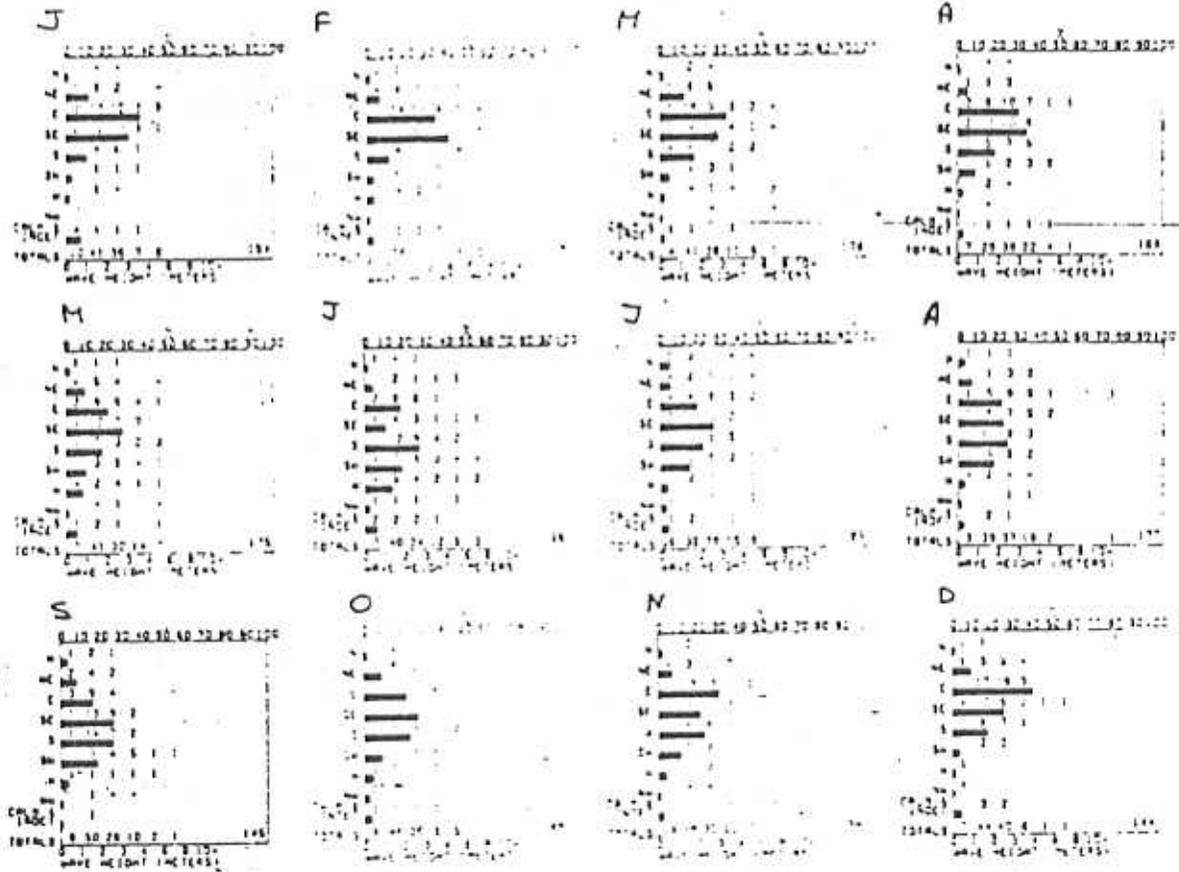
De (A1), (A2), (A3), on a :

$$P_i = 1,12 \times 0,49 H_s^2 T_z \cong 0,55 H_s^2 T_z$$

(v. bibl. 20, 24, 56)



ANNEXE B. NOMOGRAPHE POUR LE TRAÇAGE DES ORTHOGONALES, UTILISABLE A TOUTE ECHELLE. (v. bibl. 67)



ANNEXE C. DONNEES SUR LA HOULE. SITE: N. CALEDONIE. (v. bibl. 21)

TRAVAUX ET MATERIAUX	Unité	Prix par unité * (FF,83)	RAMPE DE DEFERLEMENT		TRIEDRES A HOULE	
			Quantité	Coûts (FF, 83)	Quantité	Coûts (FF, 83)
Derogtages	m3	600	2250	1350000	2700	1620000
Amélioration de l'étanchéité du fond du bassin de stockage	m2	100	2500	250000	2500	250000
Barrages latéraux (béton)	m3	1800	270	486000	270	486000
Barrages latéraux (béton bitumeux)	m3	3000	8	24000	8	24000
Barrage arrière (béton)	m3	1800	830	1494000	830	1494000
Barrage arrière (béton bitumeux)	m3	3000	20	60000	20	60000
Dispositif (béton armé des caissons)	m3	3500	500	1750000	850	2975000
Dispositif (béton coulé in situ)	m3	1600	1300	2080000	3050	4880000
Dispositif (sacs à béton)	m3	2000	300	600000	400	800000
Aménagements (prises d'eau, évacuation)	L.S.	-	-	200000	-	200000
Protection des extrémités du dispositif (enrochements de 5 à 10 t)	m3	400	600	240000	600	240000
Protection des prises d'eau (enrochements de 1 à 5 t)	m3	300	400	120000	400	120000
Aménagements autour de la centrale	L.S.	-	-	200000	-	200000
Bâtiments divers	L.S.	-	-	500000	-	500000
Station de production (structure)	m3	2000	700	1400000	700	1400000
Station de production (équip. auxiliaire)	L.S.	-	-	600000	-	800000
Turbines (0,25 MW)	Pièce	2000000	3	6000000	4	8000000
Vannes régulatrices	Pièce	350000	3	1050000	4	1400000
Alternateurs	Pièce	800000	3	2400000	4	3200000
Sous-station (structure)	L.S.	-	-	500000	-	500000
Sous-station (équipements)	L.S.	-	-	1000000	-	1200000
Installations provisoires	L.S.	-	-	500000	-	500000
			TOTAL	2280400	TOTAL	30849000 =====

\* Prix conseillés par des ingénieurs ayant travaillé aux DOM-TOM et par une société de fabrication des turbines hydrauliques.

N°	DESCRIPTION DES COUTS	COUTS (FF 1983)
1	Total partiel pour la construction (v. annexe D)	22.804.000
2	Augmentation des coûts pendant la construction (1) x $w_1$ , ( $w_1 = 5\%$ )	1.140.200
3	Total partiel pour la construction + Augmentation	23.944.200
4	Dépenses imprévues (1) x $e_1$ , ( $e_1 = 10\%$ )	2.280.400
5	Etudes et surveillances (1) x $e_2$ , ( $e_2 = 10\%$ )	2.280.400
6	Total partiel (3) x (4) + (5)	28.505.000
7	Taux de capital pendant la période de construction * (6) x $i_1$ ( $i_1 = 8\%$ )	2.280.400
8	CAPITAL TOTAL INVESTI (6) + (7)	<u>30.785.400</u>

\* Période de construction de la centrale : 1an

## ANNEXE F - COUTS ANNUELS (RAMPE DE DEFERLEMENT)

N°	DESCRIPTION DES COUTS	COUTS (FF 1983)
1	Dépenses annuelles de fonctionnement, d'entretien et de réparation, (CAPITAL TOTAL INVESTI) x 2 %	616.000
2	Remplacement des turbines, alternateurs et vannes régulatrices (durée de vie : 15 ans)*	255.600
3	Remplacement de l'équipement de la sous-station, (durée de de vie : 15 ans)*	18.400
4	Total partiel (1) + (2) + (3)	890.000
5	Charges annuelles actualisées de l'investissement ( $K_a = 8\%$ )	2.641.400
6	TOTAL DES COUTS ANNUELS (4) + (5)	<u>3.531.400</u> =====

\* Période d'exploitation de la centrale : 35 ans.

Energie électrique annuelle arrivant au réseau

: 5,063 GWh

Puissance moyenne annuelle de la centrale

: 578 KW

Investissement par KW produit

: 53.260 FF/KW

Prix de revient du KWh

: 0,70 FF/KWh

## ANNEXE G - CAPITAL TOTAL INVESTI (TRIEDRES A HOULE)

N°	DESCRIPTION DES COUTS	COUTS (FF. 1983)
1	Total partiel pour la construction (v. annexe D)	30.849.000
2	Augmentation des coûts pendant la construction (1) x $w_1$ ( $w_1 = 5\%$ )	1.542.450
3	Total partiel pour la construction + Augmentation	32.391.450
4	Dépenses imprévues (1) x $e_1$ , ( $e_1 = 10\%$ )	3.239.145
5	Etudes et surveillances (1) x $e_2$ , ( $e_2 = 10\%$ )	3.239.145
6	Total partiel (3) + (4) + (5)	38.869.740
7	Taux de capital pendant la période de construction* (6) x $i_1$ ( $i_1 = 8\%$ )	3.109.580
8	CAPITAL TOTAL INVESTI (6) + (7)	<b>41.979.320</b> =====

\* Période de construction de la centrale : 1 an

## ANNEXE H - COUTS ANNUELS (TRIEDRES A HOULE)

N°	DESCRIPTION DES COUTS	COUTS (FF. 1983)
1	Dépenses annuelles de fonctionnement, d'entretien et de réparation, (CAPITAL TOTAL INVESTI) x 2 %	839.600
2	Remplacement des turbines, alternateurs et vannes régulatrices (durée de vie : 15 ans)*	340.800
3	Remplacement de l'équipement de la sous-station, (durée de vie : 20 ans)*	22.100
4	Total partiel (1) + (2) + (3)	1.202.500
5	Charges annuelles actualisées de l'investissement ( $K_a = 8\%$ )	3.601.800
6	TOTAL DES COUTS ANNUELS (4) + (5)	<b>4.804.300</b> =====

\* Période d'exploitation de la centrale : 35 ans  
Energie électrique annuelle arrivant au réseau  
Puissance moyenne annuelle de la centrale  
Investissement par KW produit  
Prix de revient du KWh

: 7,065 GWh  
: 807 KW  
: 52.050 FF/KW  
: 0,68 FF/KWh

N°	DESCRIPTION DES COUTS	COUTS (FF. 1983)
1	Total partiel pour la construction (v. annexe D)	22.804.000
2	Augmentation des coûts pendant la construction (1) x $w_1$ , ( $w_1 = 5\%$ )	1.140.200
3	Total partiel pour la construction + Augmentation	23.944.200
4	Dépenses imprévues (1) x $e_1$ , ( $e_1 = \%$ )	2.280.400
5	Etudes et surveillances (1) x $e_2$ , ( $e_2 = \%$ )	2.280.400
6	Total partiel (3) + (4) + (5)	28.505.000
7	Taux de capital pendant la période de construction * (6) x $i_1$ ( $i_1 = 9\%$ )	2.565.450
	CAPITAL TOTAL INVESTI (6) + (7)	31.070.450 =====

\* Période de construction de la centrale : 1 an

## ANNEXE J - COUTS ANNUELS (RAMPE DE DEFERLEMENT)

N°	DESCRIPTION DES COUTS	COUTS (FF. 1983)
1	Dépenses annuelles de fonctionnement, d'entretien et de réparation, (CAPITAL TOTAL INVESTI) x 2 %	621.400
2	Remplacement des turbines, alternateurs et vannes régulatrices (durée de vie : 15 ans)*	245.500
3	Remplacement de l'équipement de la sous-station, (durée de vie : 20 ans)*	16.900
4	Total partiel (1) + (2) + (3)	883.800
5	Charges annuelles actualisées de l'investissement ( $K_a = 9\%$ )	2.940.400
6	TOTAL DES COUTS ANNUELS	3.824.200 =====

\* Période d'exploitation de la centrale : 35 ans

Energie électrique annuelle arrivant au réseau	: 5,063 GWh
Puissance moyenne annuelle de la centrale	: 578 KW
Investissement par KW produit	: 53.755 FF/KW
Prix de revient du KWh	: 0,755 FF/KWh

N°	DESCRIPTION DES COUTS	COUTS (FF. 1983)
1	Total partiel pour la construction (v. annexe D)	30.849.000
2	Augmentation des coûts pendant la construction (1) x $w_1$ , ( $w_1 = 5\%$ )	1.542.450
3	Total partiel pour la construction + Augmentation	32.391.450
4	Dépenses imprévues (1) x $e_1$ , ( $e_1 = 10\%$ )	3.239.145
5	Etudes et surveillances (1) x $e_2$ , ( $e_2 = 10\%$ )	3.239.145
6	Total partiel (3) + (4) + (5)	38.869.740
7	Taux de capital pendant la période de construction * (6) x $i_1$ ( $i_1 = 9\%$ )	3.498.280
8	CAPITAL TOTAL INVESTI (6) + (7)	42.368.020 =====

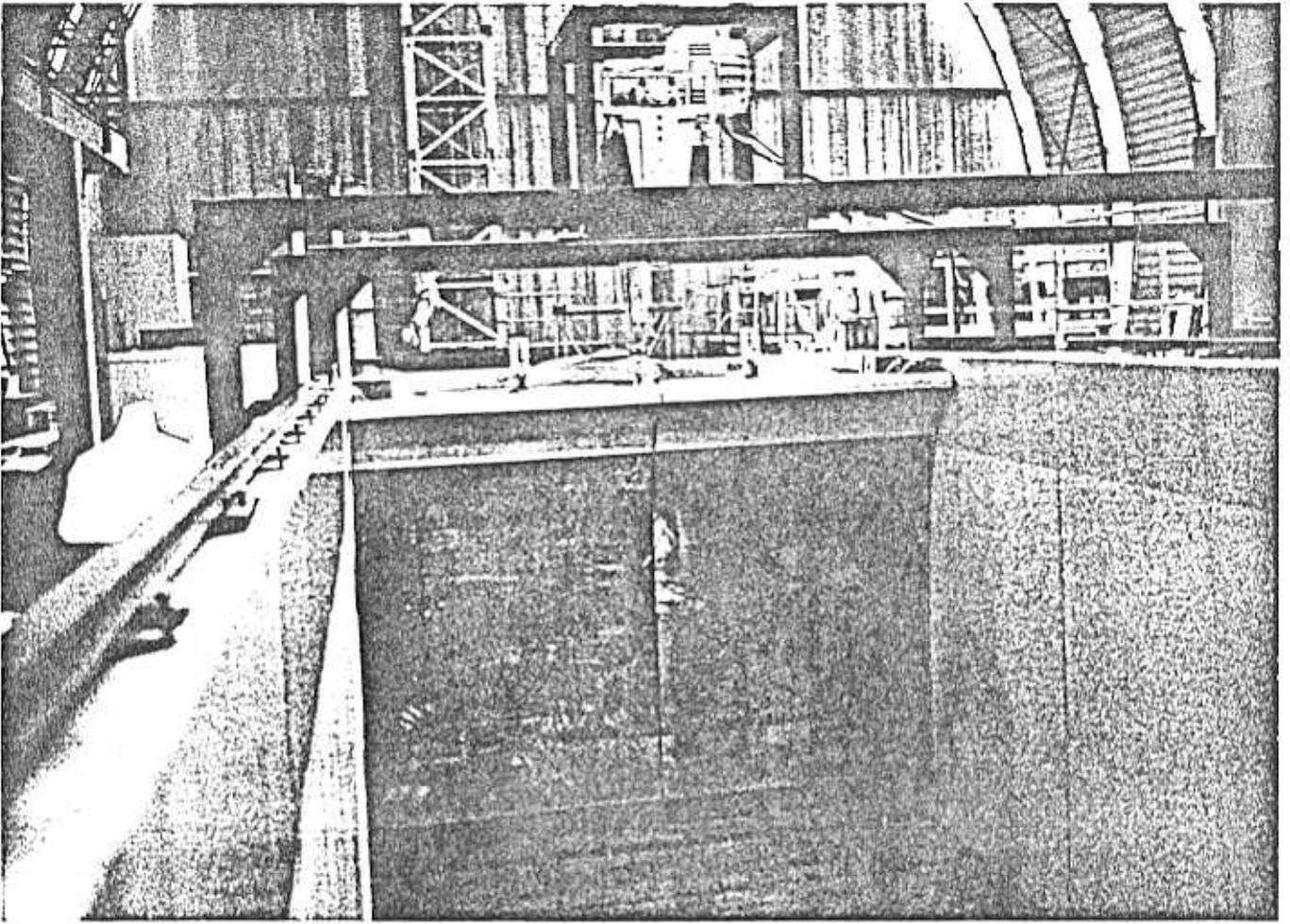
\* Période de construction de la centrale : 1 an

## ANNEXE L - COUTS ANNUELS (TRIEDRES A HOULE)

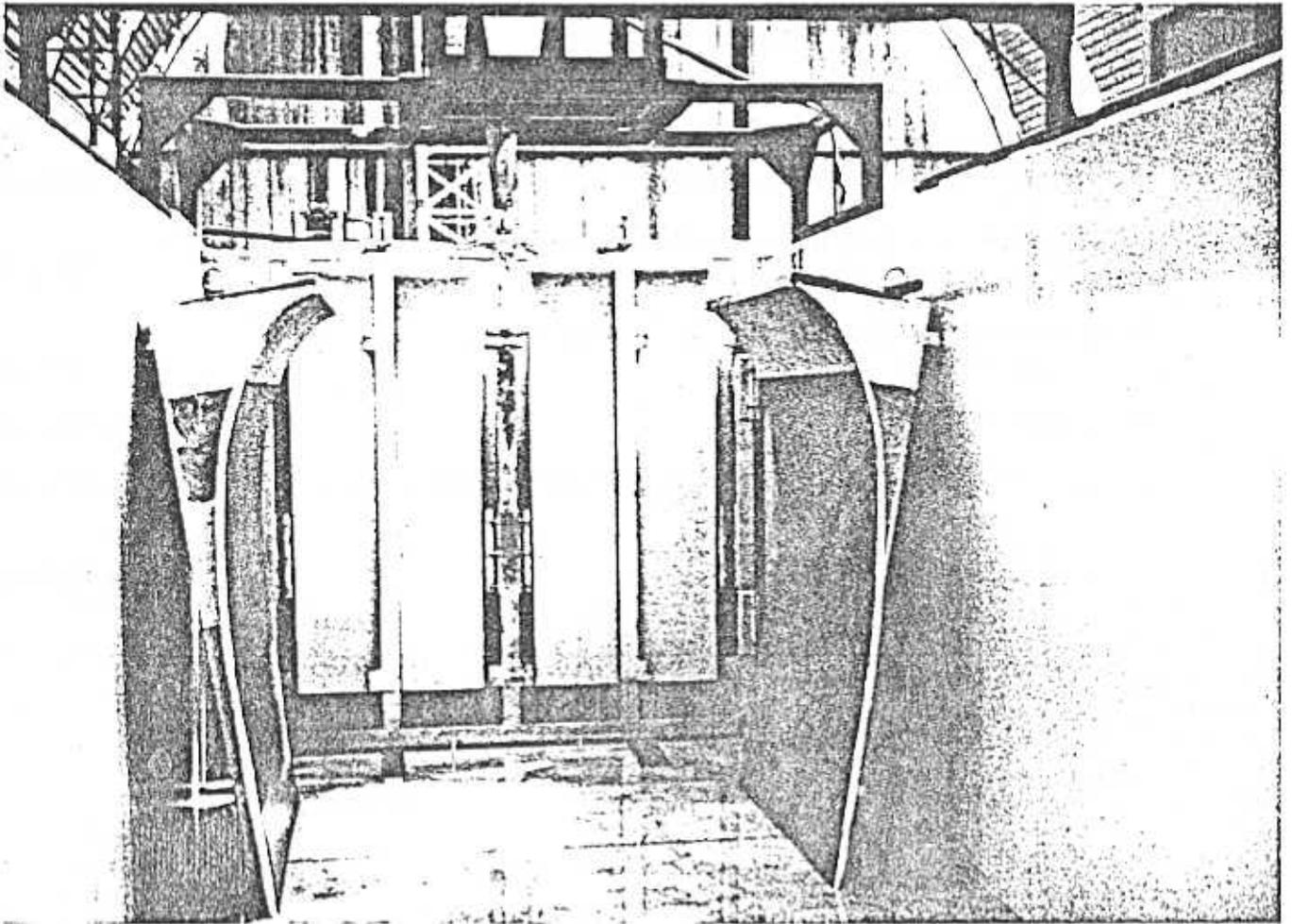
N°	DESCRIPTION DES COUTS	COUTS (FF. 1983)
1	Dépenses annuelles de fonctionnement, d'entretien et de réparation, (CAPITAL TOTAL INVESTI) x 2 %	847.400
2	Remplacement des turbines, alternateurs et vannes régulatrices (durée de vie : 15 ans)*	327.400
3	Remplacement de l'équipement de la sous-station (durée de vie : 20 ans)*	20.300
4	Total partiel (1) + (2) + (3)	1.195.100
5	Charges annuelles actualisées de l'investissement ( $K_a = 9\%$ )	4.009.500
6	TOTAL DES COUTS ANNUELS	5.204.600 =====

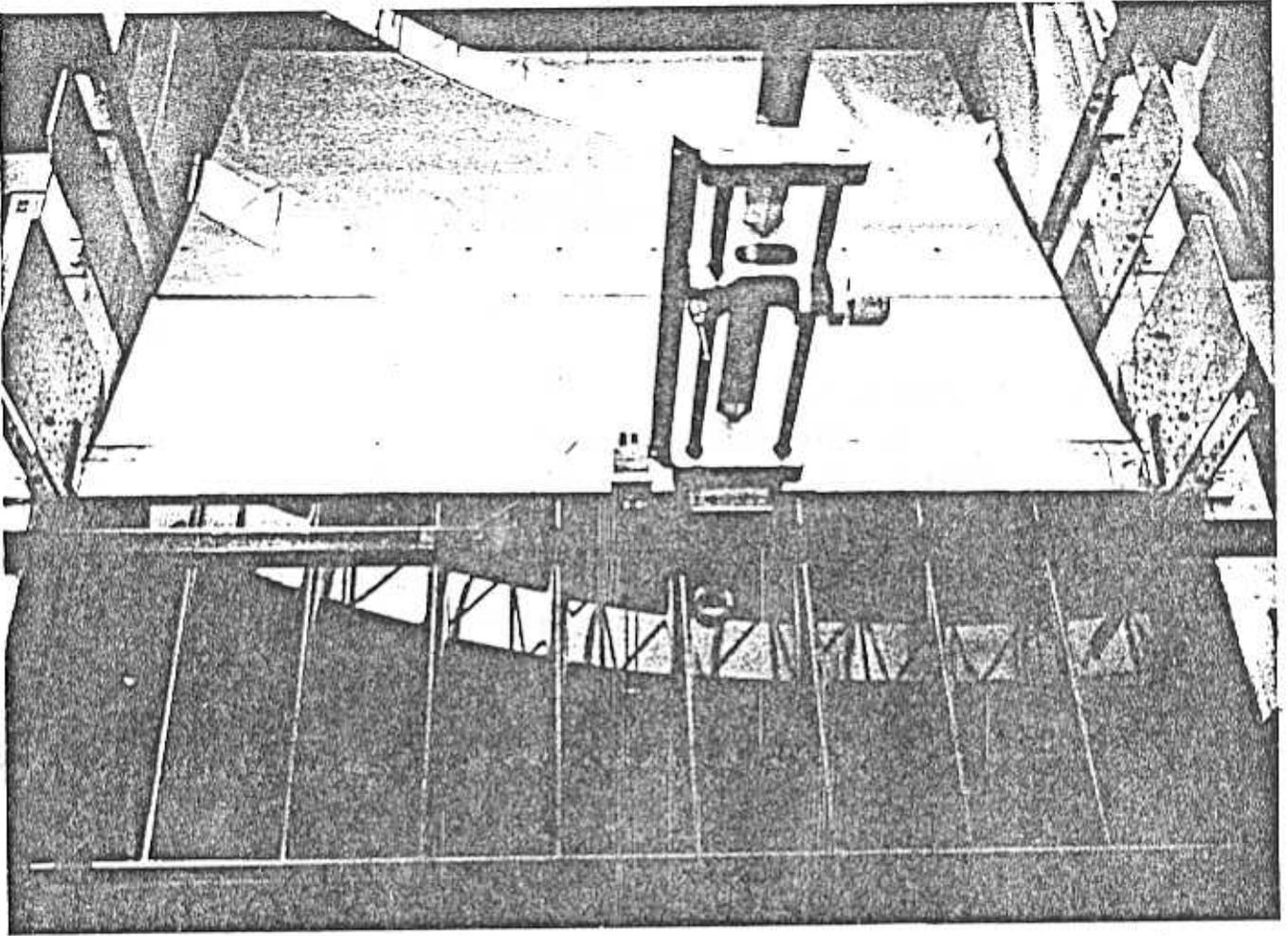
\* Période d'exploitation de la centrale : 35 ans

Energie électrique annuelle arrivant au réseau	: 7,065 GWh
Puissance moyenne annuelle de la centrale	: 807 KW
Investissement par KW produit	: 52.500 FF/KW
Prix de revient du KWh	: 0,736 FF/KWh

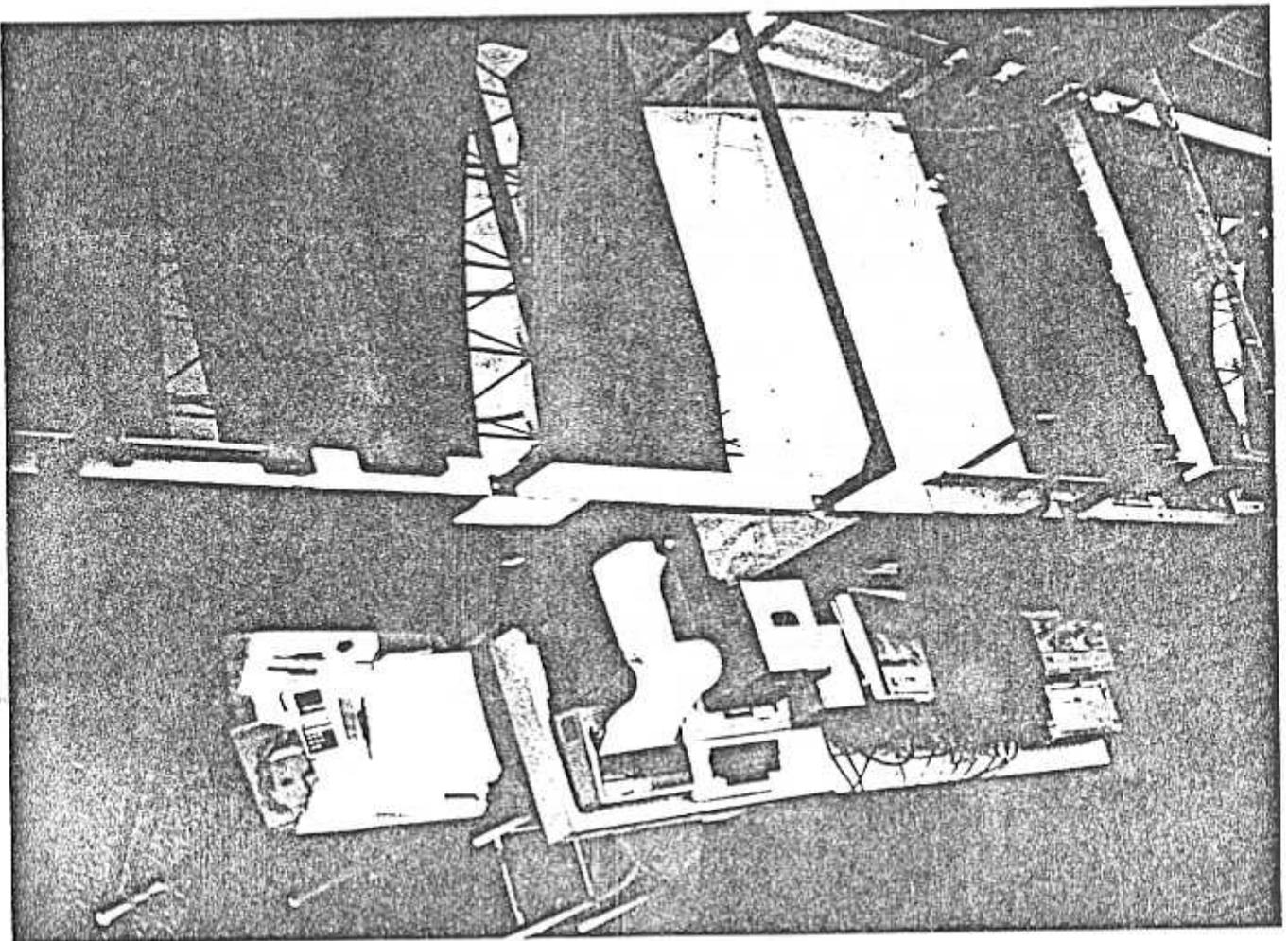


ANNEXE M. LE BATTEUR COIN DU L.H.N. DE L' ENSM.





ANNEXE N. MAQUETTE DE LA RAMPE DE DEFERLEMENT  
MAQUETTE DES TRIEDRES ET LA CHAINE DE MESURES



## 14 . BIBLIOGRAPHIE

1. BACHMANN, J.  
"Standardizing small turbines"  
Water Power and Dam Construction, 1980, July.
2. BANNISTER, J.L.  
"Fatigue and corrosion fatigue of Torbar reinforcement"  
The Structural Engineer, 1978, Mars, Vol. 56 A, n° 3.
3. BATTJES, J.A.  
"Run up distributions of waves breaking on slopes"  
Waterways, Harbors and coastal engineering division, ASCI,  
1971, Febr.
4. BEEBY, A.W.  
"Corrosion of reinforcing steel in concrete and its relations  
to cracking"  
The Structural Engineer, 1978, Mars, Vol. 56 A, n° 3.
5. BEHRENDT, V.  
"Energie aus Meereswellen - ein Beitrag zur Energieversorgung ?"  
Meerestechnik, mt (8), 1977, Nr 2, April.
6. BERGDAHL, L., CLAESON, L. - FALKEMO, C. - FORSBERG, J. -  
RYLANDER, A.  
"The Swedish wave energy research programme"  
Wave Energy Symposium, 1979, Göthenburg.
7. BERGER, V. - KOHLHASE, S.  
"Mach-reflection as a diffraction problem".

8. BERNARD, J. - MANCOZ S.  
"Microcentrales hydrauliques"  
Le G.R.E.T.
9. BETTESS, P. - ZIENKIEWICZ, O.C.  
"Diffraction and refraction of surface waves using finite and infinite elements"  
Int. J. for numerical methods in Engineering, 1977, vol.11, 1271-1290.
10. BLANDINO, A. - BRIGHENTI, A. - VIELMO, P.  
"Tecnomares contribution to sea wave energy exploitation"  
Wave Energy Symposium, 1979, Göthenburg.
11. BOITEUX, M.  
"Le taux d'actualisation : principes et pratique".  
E.D.F.
12. BONNEFILLE, R.  
"Cours d'hydraulique maritime"  
Masson, 1976.
13. BUTTERWORTH, J.  
"The Kaimei Project" in 24
14. CHAPON, J.  
"Travaux maritimes"  
Tomes I, II, Eyrolles
15. CLEMENT, A. - SPIRIDAKIS M.  
"Etude expérimentale de la récupération de l'énergie de la houle par les systèmes à rampe de déferlement".  
ATMA, 1983.

16. COKELET, E.D.  
"Breaking Waves - The Plunging Jet and interior Flow - Field"  
in Mechanics of wave induced forces on cylinders, SHAW, I.L.  
Editor.
17. COLE, H.A.  
"Wellenergie - Wandler und ihr mögliches Potential"  
Meerestechnik DEU, 1979, 10, N° 4, 109-116.
18. CONSTANS, J.  
"Present and future possibilities of energy production from  
marine sources. A eurocean industrial assesment"  
Int. Symp. on Wave and Tidal Energy, 1978.
19. COTTRILL, J.E.J.  
"System economic optimisation for wave energy".  
I.E.E. Conf. Publ. G.BR., 1979, N° 171, 126-129.
20. CRISP, G.N. -SCOTT, M.  
"The spacial distribution of wave power on the Western U.K. coast".  
2nd Symposium of Wave and Tidal Energy, Cambridge, England,  
September, 1981.
21. DAMY, G.  
"Développements possibles des houlomotrices dans les DOM/TOM"  
Rapport CNEXO/COB, 1981.
22. DAMY, G.  
"Bilan provisoire après 2 ans de déroulement du programme :  
production d'énergie à partir de la houle"  
CNEXO-COB.
23. DAMY, G.  
Projet "Houlomotrice" Reconnaissance des sites  
Rapport de mission non publié  
CNEXO/COB, 1983.

24. DAMY, G. - GAUTHIER, M.  
"Production d'énergie à partir de la houle".  
CNEXO/COB.
25. DAUBISSE, J.C.  
"Some results on approximation by exponential series applied  
to hydrodynamic problems".  
3rd Int. Conf. on Num. Ship Hydrod. Paris, 1981, Juin.
26. DERRINGTON, J.A.  
"Marine structures for energy conversion".  
I.E.E. Conférence Publication Nv 171  
Future Energy Concepts.
27. DHAILLE, R.  
"Technique et rentabilité des dièdres à houle"  
in 24
28. ECKENER, V.  
"Energie aus Meereswellen - Technologie und Nutzung".  
Jb. Schiffbautech. Gesellsch. DEU, 1978, publ. 1979,  
n° 72, 39-44.
29. ECKENER, V. - KRÖGER, T.  
"Nutzung der Wellen-energie Durchführungskonzept einer  
Prototypanlage".  
Schiff, Maschine, Meerestechnik, Int. Aust. Kongress / 1978/  
Hamburg - DEU. - S.I. Hamburg Mess und Congress S.d. 57-74
30. GHIA, V. SHIN, C.T., - GHIA, K.N.  
"Analysis of a breaking free-surface wave using boundaryfitted  
coordinates for regions including reentrant boundaries".

31. GRAILLOT, A. - TENAUD, R.  
"Ouvrages de protection dans la zone de déferlement de la houle"  
La Houille Blanche, N° 7/8, 1975.
32. GRANTHEM, K.N.  
"Wave run-up on sloping structures".  
Transactions, American Geophysical Union, V. 34, N° 5,  
1953, Oct.
33. GUEVEL, P. - DELHOMEAU G.  
"Théorie des ondes de gravité"  
E.N.S.M., 1978.
34. HAFNER, E.  
"Energie aus Meereswellen - Entwicklung von Wandlersystemen"  
Wasserwirtschaft, 70, 1980, 9.
35. HIBBERD, S. - PEREGRINE, D.H.  
"Surf and run-up on a beach : a uniform bore"  
J. Fluid Mech., 1979, Vol. 95, part. 2, p. 323-345.
36. HIRT, C.W.  
"The numerical simulation of viscous incompressible fluid flows"  
7th Symp. of Naval Hydrodynamics.
37. HUDSON, J.A. - PHILLIPS, D.C. - WILKINS J.M.  
"Review. Materials aspects of wave energy converters"  
Journal of materials science, 1980, 15, p. 1337-1363
38. HUDSPETH, R.T. - CHEN, M.C.  
"Design Curves of hinged wavemakers theory"  
J. of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 107, N° HYS, 1981, Mai.

39. HYUN, J.M.  
"Theory for Hinged wavemakers of finite draft in water of constant depth".  
J. Hydronautics, Vol. 10, n° 1, 1976, Jan.
40. HYUN, J.M.  
"Simplified Analysis of a Plunger type wavemaker performance"  
J. Hydronautics, Vol. 10, N° 3, 1976, Juillet.
41. ISAACS, J.D.  
"Ideas and some developments of wave-power conversion, dynamic wave absorption, and deep-sea mooring"  
Wave Energy Symposium, 1979, Göthenburg.
42. JUULJENSEN, O. - SORENSEN, T.  
"Overspilling / Overtopping of rubble-mound breakwaters. Results of studies, useful in design procedures".  
Coastal Engineering, 1979, 3, p. 51-65.
43. KRYLOV, V.V. - SELIVANOV, L.V.  
"Wave pressure acting on structures of sloping type".  
The tenth conference on coastal engineering. Tokyo, Japan, 1966, Sept, 5-8.
44. LACHMANN, B.  
"EUROCEAN Marine Energy Programme"  
Wave Energy Symposium 1979, Göthenburg.
45. LACOMBE, H.  
"Les énergies de la mer"  
PUF, 1968.

46. LARRAS, J.  
"Cours d'hydraulique maritime et de travaux maritimes".  
DUNOD, 1961.
47. LARRAS, J.  
"Physique de la houle et des lames"  
EYROLLES.
48. LEPETIT, J.P.  
"Etude de la réfraction de la houle monochromatique par le  
calcul numérique".  
Bul. du Centre de recherche et d'essais de Chatou, 1964, n° 9.
49. LIAUTAUD, J.  
"Energies nouvelles. La récupération de l'énergie de la houle"  
ATMA, 1981.
50. MAYO, H.A.  
"Tube turbine keeps costs down"  
Water power and Dam construction, 1980, July.
51. Mc CORMIC, M.E.  
"Ocean Engineering Wave Mechanics".
52. MC ILHAGGER, D.S.  
"Option and constrains in the use of wave power"  
I.E.E. Conference Publication, Nr 171, FUTURE ENERGY CONCEPTS.
- ✓ 53. MERLOT, L. (Trad.)  
"Dictionnaire de l'énergie".  
S.C.M.

54. MOUTZOURIS, C.  
"Contribution à l'étude de la propagation, des déformations et du déferlement de la houle sur une plage".  
Thèse de Docteur-Ingénieur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1977.
55. MOUTZOURIS, C.  
"Sam Scaling Parameters of loading from wave Breaking on Rigid Inclined Structures"  
in Mechanics of wave induced forces on cylinders, SHAW, I.L. ed.
56. MOUTZOURIS, C.  
"Hydraulique Maritime et Travaux Portuaires"  
(en grec), 1980.
57. MOUTZOURIS, C. - MARCOU, C.  
"Action d'une structure côtière inclinée sur la houle : description déterministe du déferlement".  
La Houille Blanche, 1978, n° 6.
58. NICOLAOU  
"Travaux Hydrodynamiques" (en Grec)  
2 Tomes, Ecole polytechnique d'Athènes.
59. ORME, G.R.  
"Aspects of sedimentation in the coral reef environment".  
in Biology and Geology of Coral Reefs, ACADEMIC PRESS, INC.
60. PAAPE, A.  
"Experimental data on the overtopping of seawalls by waves".  
Proc. 7th Conf. Coast. Eng., 1961, p. 674-681.

61. PATEL, M.H. - IONNAU, P.A.  
"Comparative Performance Study of Paddle and Wedge - type Wave Generators".  
J. Hydronautics, Vol. 14, N° 1, 1980, Jan.
62. PEREGRINE, D.H.  
"Breaking Waves on beaches"  
Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, 149,78.
63. PEREGRINE, D.H.  
"Mechanics of Breaking Waves - A Review of Euromech 102".
64. PHILLIPS, O.M.  
"Wave Interactions".
65. RANCE, P.J.  
"The development of the HRS rectifier".  
Hydraulics Research Station, 1978, Nov.
66. RANCE, P.J.  
"The Rectifier"  
Hydraulics Research Station, 1979, Dec.
67. ROGAN, A.  
"Hydraulique Maritime et Travaux Portuaires" (en grec)  
Ecole Polytechnique d'Athènes, 1981.
68. SABATON, M.  
"Etude de stabilité des digues à talus"  
1976.
69. SAVILLE, T.  
"Wave run-up on shore structures".  
J. Waterways and Harbors Division  
ASCE, V. 82, WW2, April, 1956.

70. SHARP, J.V.  
"Review. The use of steel and concrete in the construction of N. Sea oil production platforms".  
Journal of Materials Science, 1979, 14, p. 1773-1799.
71. SHI-IGAI, H. - KONO, T.  
"Analytical approach on wave overtopping on levees".  
Proc. 12 th Conf. Coast. Eng. 1970, 1, 563-574.
72. SIBUL, O.  
"Flow over reefs and structures by wave action".  
Transactions, Am. Geoph. Union, V. 36, N° 1, 1955, Feb.
73. SILVESTER, R.  
"Coastal Engineering I, II"  
Devel. in Geot. Engineering 4A, 1974.
74. SPIRIDAKIS, M.  
"Examen des différents systèmes des houlomotrices fixes. Avant-projet d'une mini-centrale sur la côte Est de l'île de Tahiti".  
Rapport de stage, CNEXO, 1981.
75. SPIRIDAKIS, M.  
"Récupération de l'énergie des vagues par les dispositifs du type déferlant".  
Analyse bibliographique. Rapport pour CNEXO, 1982, LHN-ENSM.
76. STOCKER, J.J.  
"Water waves"  
Publ. Interscience Publishers Inc. N.Y., 1957.
77. SUQUET, F.  
"Etude expérimentale du déferlement de la houle"  
La Houille Blanche, Mai-Juin 1950.

78. SUSBIELLES, G. - BRATU, Ch.  
"Vagues et ouvrages pétroliers en mer"  
I.F.P. - ED. TECHNIP.
79. TOMINAGA, Y., - HASHIMOTO, H.  
"Wave run-up and overtopping on coastal dikes".  
The Tenth Conference on Coastal Engineering - Tokyo, 1966.
80. VASSILIEV, M.  
"La conquête de l'énergie".  
MIR, 1971.
81. WALTON, A. - HAILEY, J. - HUNTER, P.  
"The Mauritius wave energy project research, results and  
proposed outline design".  
Int. Symp. on Wave and Tidal Energy, 1978.
82. WIEGEL, R.L.  
"Oceanographical Engineering"  
Prentice - Hall Int. Series, 1964.