

PRESENTATION DES ATTENUATEURS DE HOULE ET DES RESULTATS OBTENUS DANS LE CADRE DES DEUX PREMIERES ANNEES DU PROJET EUREKA EU 394 QUI LEUR EST CONSACRE

E. LANDEL⁽¹⁾, P. PRUDHOMME ⁽²⁾

⁽¹⁾PRINCIPIA R&D - Port de Brégaillon - 83500 LA SEYNE SUR MER

⁽²⁾OCEANIDE - 83500 LA SEYNE SUR MER

ABSTRACT

A few years ago, the oscillating water wall phenomenon has been found by PRINCIPIA and the Principality of MONACO : a submerged plate can act as a perfect reflector of waves, for particular dimensions and configuration. This kind of attenuator is particularly efficient for the protection of beach against erosion, and has been developed during the european project EUREKA EU 394.

A lot of experiments has been made to complete the knowledge about this system : evolution of the efforts on the plate, efficiency with the main dimension of plates. The effects of 3-D, flow are also study : influence of dotted line of attenuators, influence of the obliquity of wave.

Numerical models are very useful tools to help for the prediction of wave attenuation behind attenuators.

The influence of plates on the protection of beach against erosion was study in a canal and in a wave tank. Comparison between two simulations with and without attenuators shows the efficiency of the system.

1. INTRODUCTION

C'est en 1985, à l'occasion d'études de nouveaux dispositifs de protection contre la houle des aménagements de la Principauté de MONACO, que la Société PRINCIPIA Recherche et Développement, en collaboration avec le Service des Travaux Publics de la Principauté, a mis en évidence le phénomène du "Mur d'Eau Oscillant", qui a fait l'objet d'un brevet commun PRINCIPIA-MONACO (réf. (1), (2)).

Ce phénomène est exploité dans le dispositif "Atténuateurs de Houle" qui consiste en une plaque pleine horizontale, faiblement immergée, fixée aux fonds marins rigidement ou par amarres souples ou tendues (réf.(3)).

Une première installation de deux atténuateurs a été réalisée en mars 1990 devant la ville olympique de BARCELONE pour la protection d'un émissaire d'eaux pluviales en mer (réf. (4)).

Les premiers résultats de modèles mathématiques ou d'essais en canal à houle, obtenus dans le cadre d'un programme initiateur soutenu par l'ANVAR, ont montré l'intérêt général de ce dispositif et conduit à envisager son application pour la défense des littoraux sableux dans les mers sans marée.

En effet, les contraintes de sauvegarde de l'environnement conduisent à rejeter de plus en plus les ouvrages traditionnels en enrochements (épis, brise-lames), certaines législations les interdisant totalement pour assurer la défense d'espèces protégées (posidonies par exemple, en France) (réf. (5)).

Un groupe franco-espagnol de quatre entreprises (EIFFEL CONSTRUCTION METALLIQUE et PRINCIPIA pour la France, FERROVIAL et EUROPROJECT pour l'Espagne) s'est alors constitué pour proposer un projet de développement du procédé au Secrétariat EUREKA de la Communauté Européenne. Le caractère particulièrement innovant du procédé a séduit la Commission EUREKA qui a accepté le projet présenté, dont l'engagement a commencé en novembre 1989.

Les éléments donnés dans le présent article sont le fruit des études et essais réalisés depuis deux ans dans le cadre de ce projet visant la "Protection des Plages contre l'érosion".

2. PRINCIPE DE L'ATTENUATEUR DE HOULE

L'atténuateur de houle est constitué d'une simple dalle horizontale, de faible épaisseur, placée à proximité de la surface libre (Figures 1 et 2). Le principe d'atténuation du système est fondé sur un phénomène purement ondulatoire, "le phénomène d'un mur d'eau oscillant" (Planches 1 et 2).

L'énergie de la houle incidente est réfléchiée sur le système, comme elle le serait sur une paroi verticale.

A ce phénomène de réflexion d'onde, viennent se superposer les effets liés à des élévations de la surface libre, non infinitésimale, comme le suppose la théorie linéarisée. Des déferlements apparaissent au-dessus de la plaque, des décrochements tourbillonnaires sont générés (réf.(6)) ce qui provoque des dissipations d'énergie.

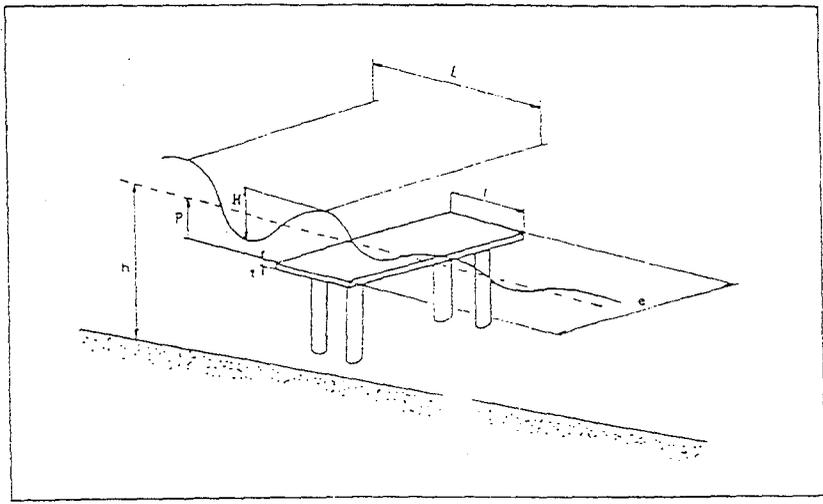


Fig.1 : Atténuateur de houle

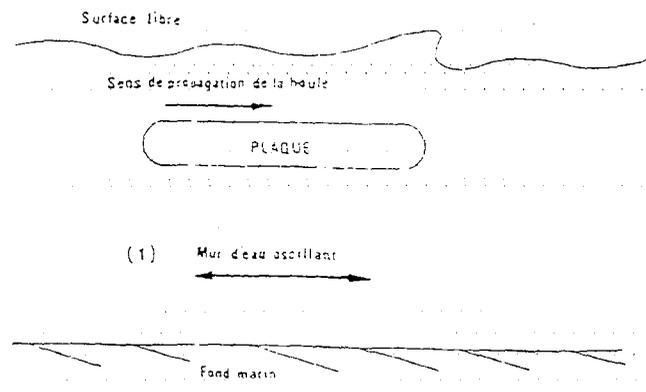
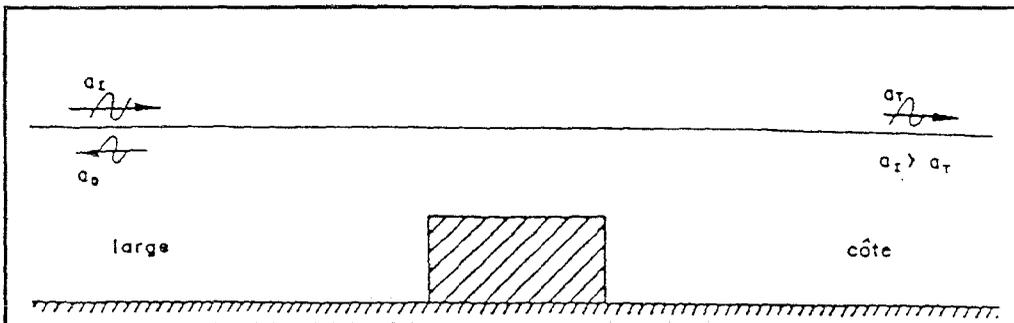
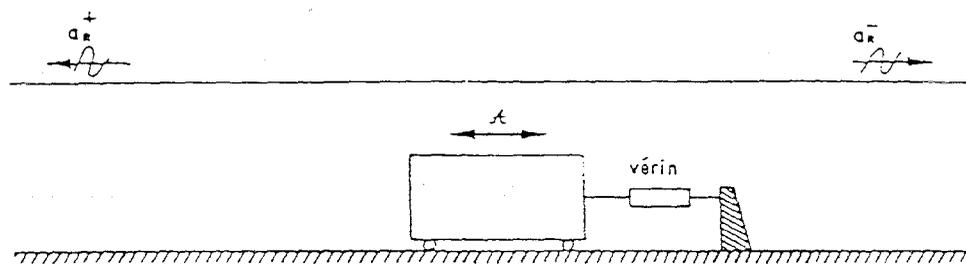


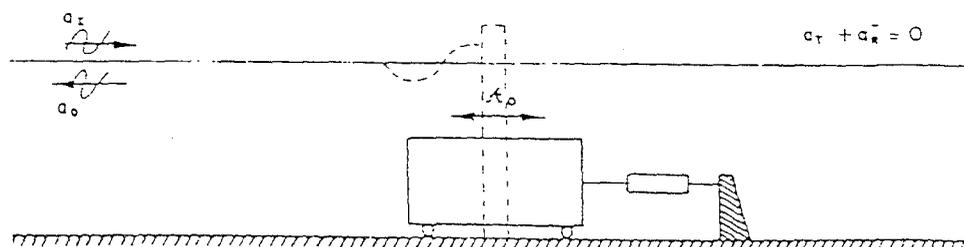
Fig. 2 : Atténuateur de houle - vue en coupe



La houle se réfléchit sur les obstacles qu'elle rencontre (rochers, digues, navires...). Par exemple, si l'on pose un caisson rectangulaire sur le fond, la plus grande de ses dimensions étant parallèle aux vagues, une partie de la houle au large a_l est renvoyée vers le large a_D , et l'autre partie a_T est transmise vers la côte.



En l'absence de houle au large, si l'on anime ce même caisson d'un mouvement oscillatoire horizontal x , il génère de la houle qui se propage vers le large et vers la côte.



En superposant les deux cas précédents, on trouve pour deux périodes de houle différentes, un mouvement x_0 tel que la houle se propageant vers la côte $a_l + a_r$ soit nulle. Le caisson animé du mouvement x_0 se comporte alors comme un mur vertical. Dans ces conditions la houle se propageant vers la côte est très faible sur une large bande encadrant ces périodes.

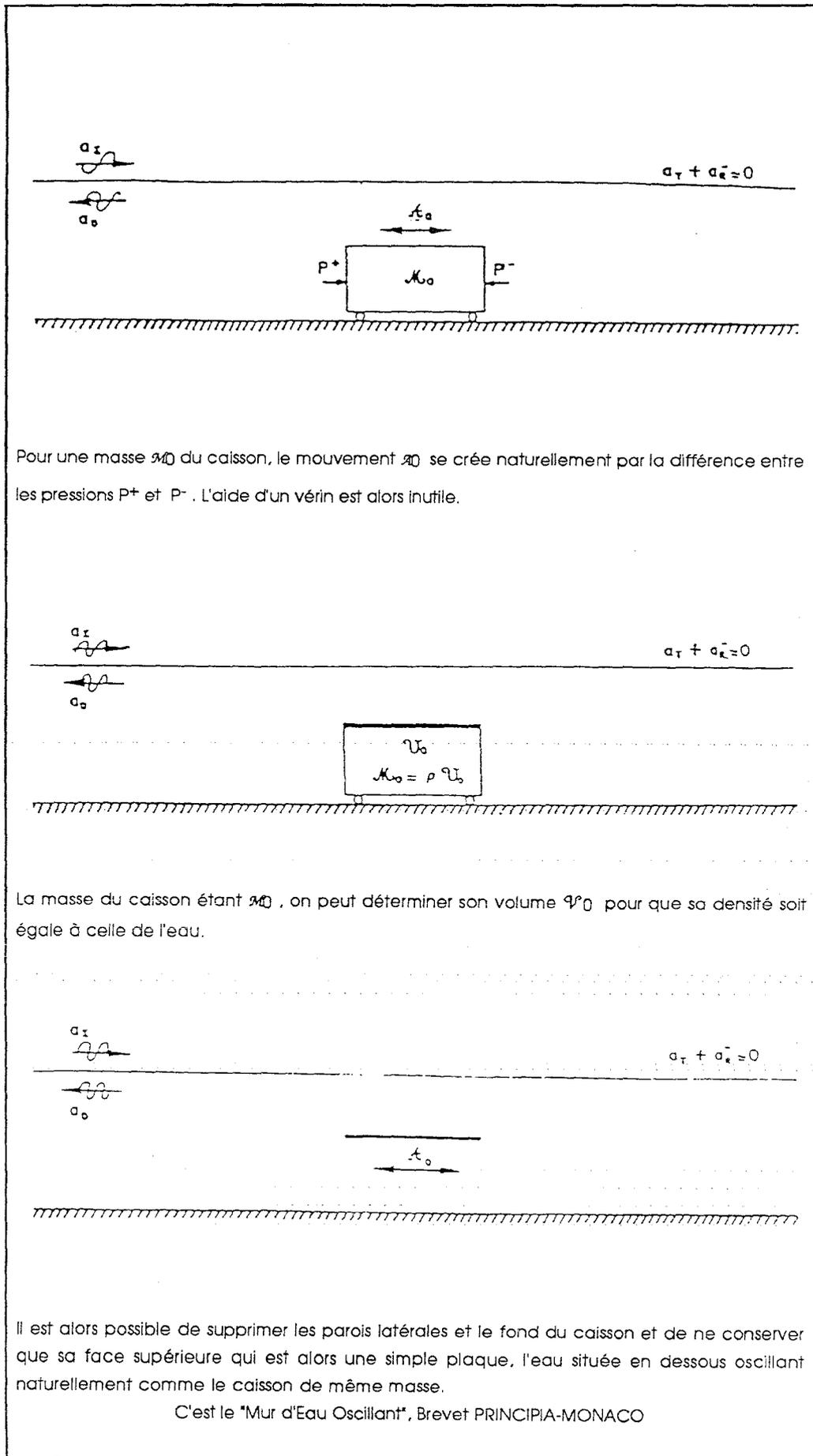


PLANCHE 2 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES ATTENUATEURS DE HOULE

3. ATTENUATION DE LA HOULE

Comme souligné en introduction, les résultats donnés ci-après proviennent d'un vaste ensemble d'études et d'essais menés dans le cadre du projet EUREKA - EU 394, dont l'objectif est l'application des "Atténuateurs de Houle" à la protection des plages.

D'importantes séries d'essais (1 500 au total) en canal et en cuve à houle ont permis d'évaluer les deux paramètres essentiels du dimensionnement des plaques :

- efforts sur les structures (plaques, pieux ou amarres) ;
- rendement énergétique de l'atténuateur qui caractérise le pourcentage d'énergie non transmis au delà de celui-ci.

1. Efforts verticaux

La figure 3 donne l'évolution de l'effort maximal vertical ascendant sur la plaque, en fonction de l'énergie de la houle incidente.

Il ne faut pas être surpris de voir, sur cette figure, des écarts sensibles entre divers résultats. Ceux-ci proviennent à la fois d'instabilités importantes qui perturbent les phénomènes et de conditions d'essais variées. La figure regroupe les résultats portant sur des plaques de 8 à 16 mètres de dimension dans le sens de propagation de la houle, fixées rigidement dans des fonds variables de 3,5 mètres à 10 mètres, pour des conditions d'immersion variables également de 0,5 à 2 mètres.

L'effort maximal vertical est exprimé, sur cette figure, en tonne par m² de plaque. Cet effort doit être repris par les systèmes d'ancrage de la plaque au fond (pieux fichés dans le sol, ou amarres).

Dans ces petits fonds, il convenait de vérifier que l'efficacité des atténuateurs n'était pas trop fortement altérée par les variations du niveau moyen marin dues à des surcotes barométriques. En effet, dans de tels fonds, la variation du niveau moyen engendre une modification du rapport entre les masses d'eau véhiculant au dessus et en dessous de l'atténuateur, alors que ce rapport est moins affecté pour un atténuateur implanté par fonds de 10 à 20 mètres.

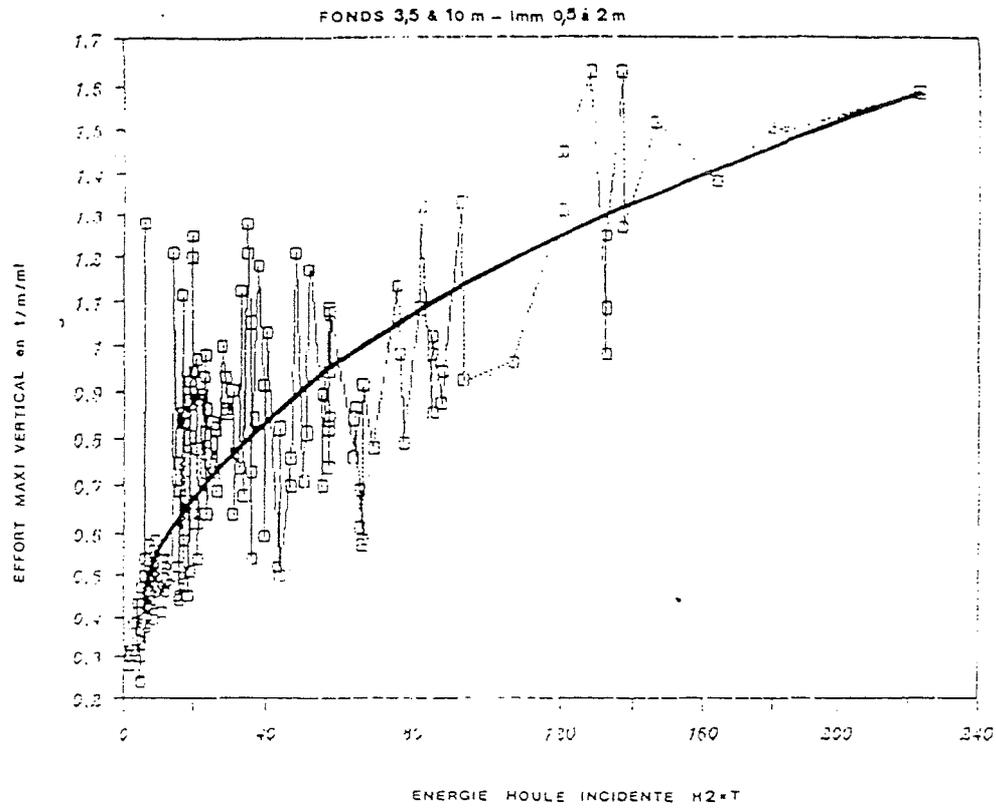


Fig.3 : Plaques de 8 à 16m dt 1&5 P cuve

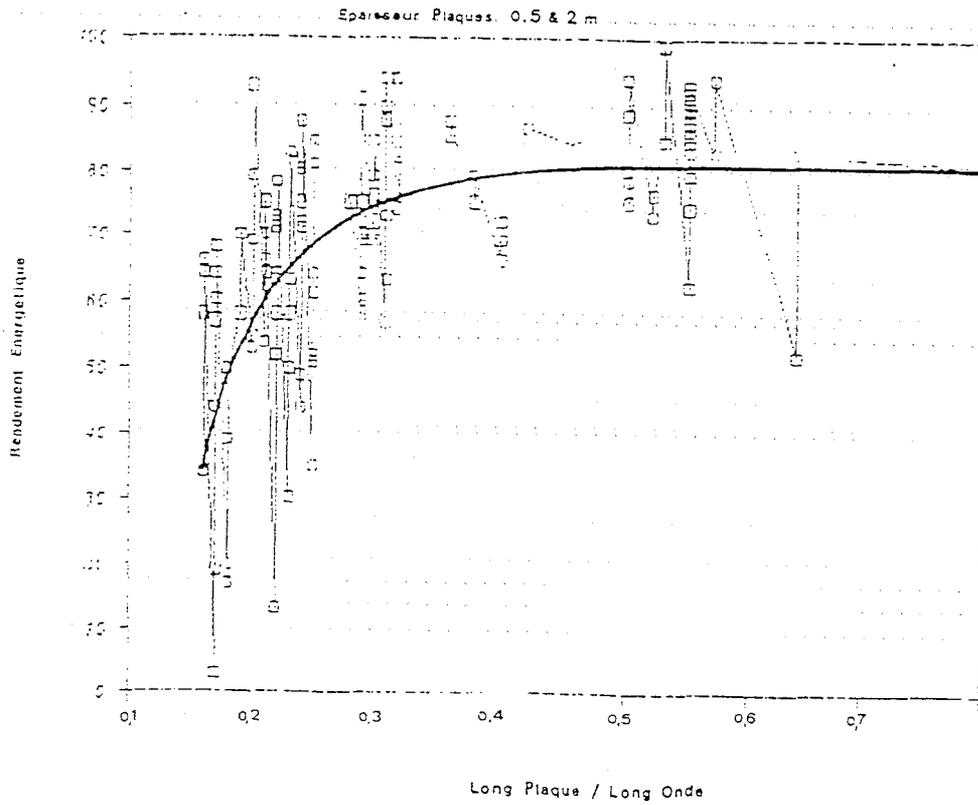


Fig. 4 : Plaques de 8 à 16m - fonds de 3,5 à 10

2. Rendement énergétique

La figure 4 exprime la variation de l'efficacité des atténuateurs de houle :

$$r = 1 - \frac{\text{énergie transmise}}{\text{énergie incidente}}$$

en fonction du rapport de la longueur de la plaque l ramenée à la longueur d'onde de la houle L .

On constate que la longueur de plaque opposée à la propagation de la houle doit avoir une dimension d'au moins 0,25 fois la longueur d'onde de la houle. Ce résultat milite en faveur d'une implantation par petits fonds où, pour une période donnée, la longueur d'onde se trouve réduite par rapport aux fonds plus importants.

3. Efforts d'envergure des atténuateurs

La figure 5 reproduit l'effet d'un écartement entre les atténuateurs, disposés en rangée, sur la propagation de la houle.

Les résultats proviennent d'essais en bassin à houle qui reproduisaient les phénomènes tridimensionnels. Les graphiques représentent :

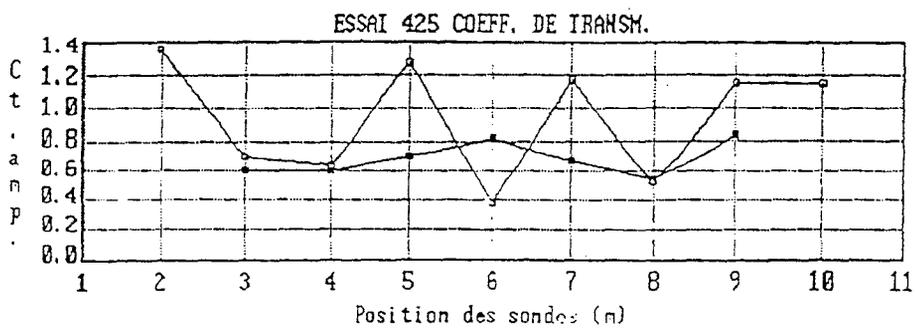
- en abscisses, la position des sondes de mesures implantées dans le bassin selon les schémas figurant à côté des graphiques.
- en ordonnées, les valeurs du rapport de la hauteur de la houle transmise au delà de la rangée d'atténuateurs / la hauteur de la houle incidente

On constate que l'écartement étudié réduit considérablement l'efficacité des atténuateurs puisque d'un rapport de 0,4, on passe à 0,6-0,7, soit une hauteur de houle au delà de l'atténuateur qui reste de l'ordre de 65% de la hauteur incidente, la valeur énergétique n'étant toutefois plus que 42% de l'incidente.

4. Effet d'obliquité de la houle

La figure 6 donne le résultat d'un essai de détermination de l'effet de l'obliquité de la houle attaquant la rangée d'atténuateurs.

On constate que l'atténuation de la houle n'est pas sensiblement affectée par l'obliquité, si ce n'est par la réduction de la largeur du front de houle se présentant en face du dispositif de protection



Houle T=5,7s H=1,6m et 1,8m

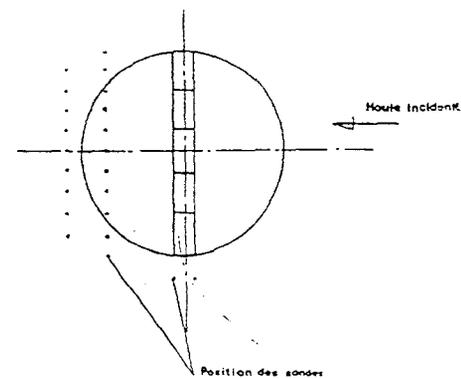
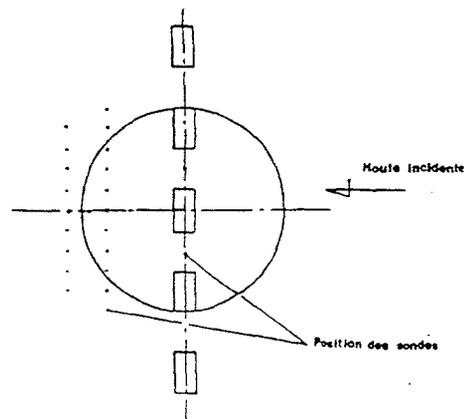
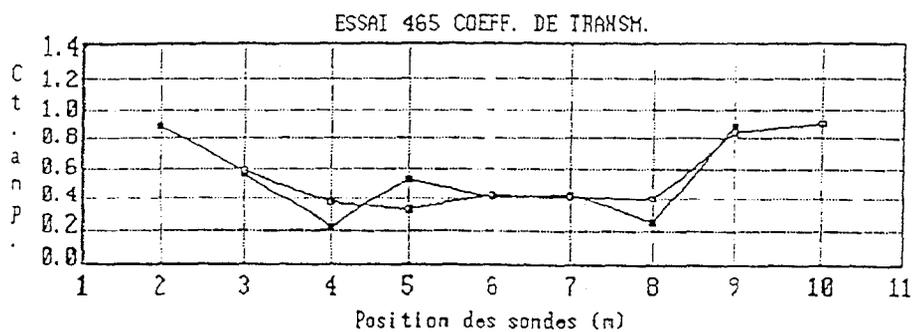
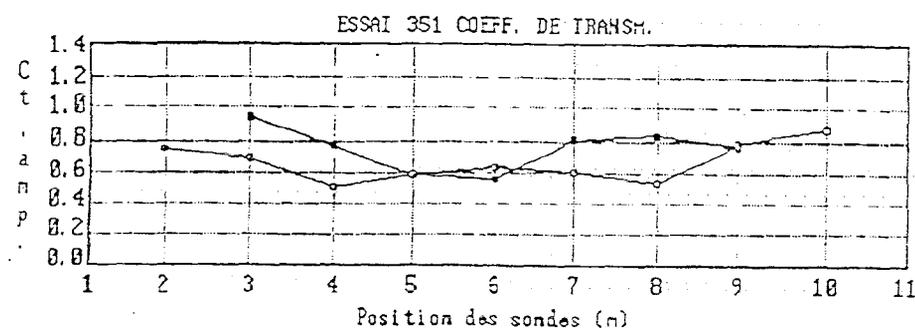


Fig.5



Houle T=7,6s H=1,7m et 1,5m

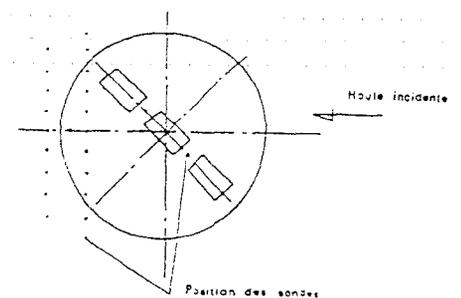
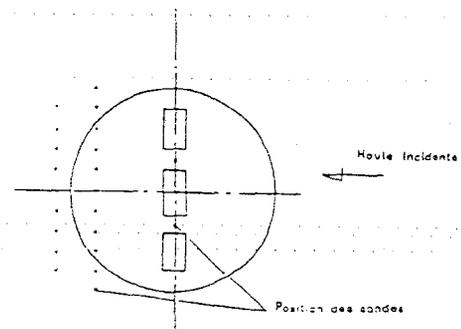
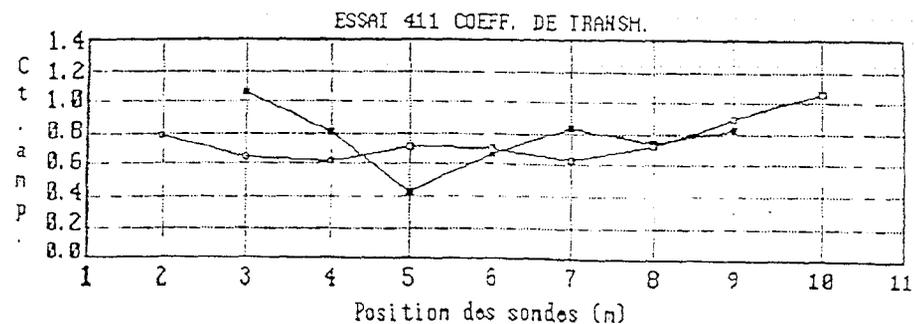
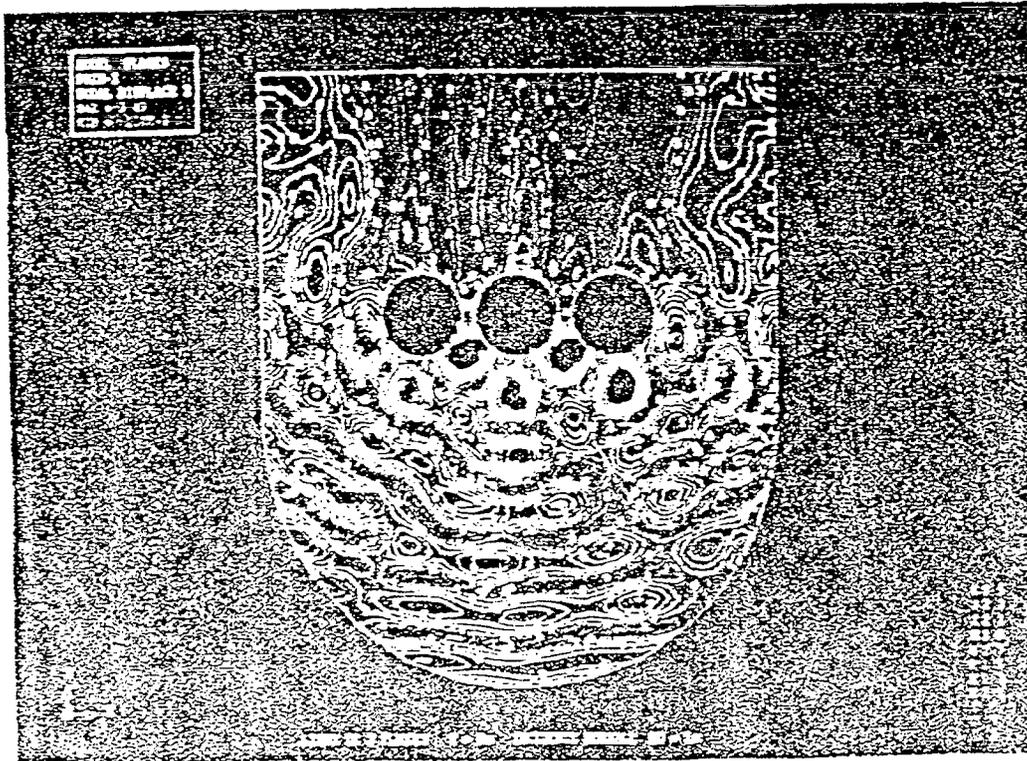


Fig.6

5. Modélisation mathématique de l'effet des atténuateurs (figure 7)

Dans le cadre du projet EUREKA - EU 394, des outils mathématiques permettant l'intégration facile des atténuateurs ont été développés en exploitant des techniques ayant fait leur preuve en "Acoustique".

La figure 7 montre un exemple d'application de ce type de modèle : un modèle aux éléments finis utilisant des résultats expérimentaux pour décrire le comportement des atténuateurs, au nombre des trois dans cet exemple. En amont des plaques, les courbes d'iso élévation de la surface libre présentent les caractéristiques d'une forte réflexion de la houle, alors qu'à l'aval, il apparaît une atténuation significative.



— Hauteur, $T=9s$, $H_0=1m$, Dir=Normale —

Hauteur, $T = 9s$, $H_0 = 1m$, Dir = Normale

Fig.7

4. EFFETS SUR LE LITTORAL

D'une façon générale, le déplacement des sédiments à la côte est directement lié à l'énergie de la houle attaquant le littoral. Toutefois, l'ensemble des mécanismes est complexe et il convenait de vérifier directement l'impact des atténuateurs sur le trait de côte et le profil de plage.

Des essais ont été réalisés à cette fin en canal et cuve à houle.

1. Essais en canal à houle

Ils ont été réalisés sur un profil de plage exposé dont on prévoyait le rechargement par une carapace de graves roulées de diamètre 5/8mm, c'est-à-dire des matériaux grossiers.

Le profil réalisé en modèle à une échelle de 1/20e était constitué de sables de 0,8 à 1mm, dont le comportement, à l'échelle retenue, est voisin de celui des graves envisagées en nature.

Des houles "de tempête" à forte cambrure correspondant à des situations possibles du site ont sollicité le modèle pendant des durées correspondant à un jour "nature".

La figure 8 reproduit l'état comparatif de l'évolution du profil en fin d'essai, pour une houle en nature $T = 5s$, $H = 2m$ avec une surcote de 0,5m du plan d'eau moyen.

Partant du profil initial (en trait plein sur la figure), on constate :

a) en l'absence de protection (trait pointillé sur la figure), les effets suivants :

- . fort creusement de la plage qui atteint 2m dans sa partie émergée et se traduit par un recul du trait de côte de l'ordre de 15m.
- . une accumulation de matériaux dans les fonds inférieurs à 1,50 m, trop profonds pour espérer que ceux-ci soient remontés par des houles de "beau temps" peu cambrées.

b) en présence d'une protection par une rangée continue d'atténuateurs, alignée parallèlement à la côte, les effets suivants :

- . le creusement de la plage ne dépasse pas 0,50m de fond et l'on note même une remontée de matériaux vers le haut de plage ; le trait de côte n'a reculé que de 2m environ,
- . les matériaux érodés se sont déposés dans 0,5m de fond permettant de les remonter vers la plage par des houles de "beau-temps".

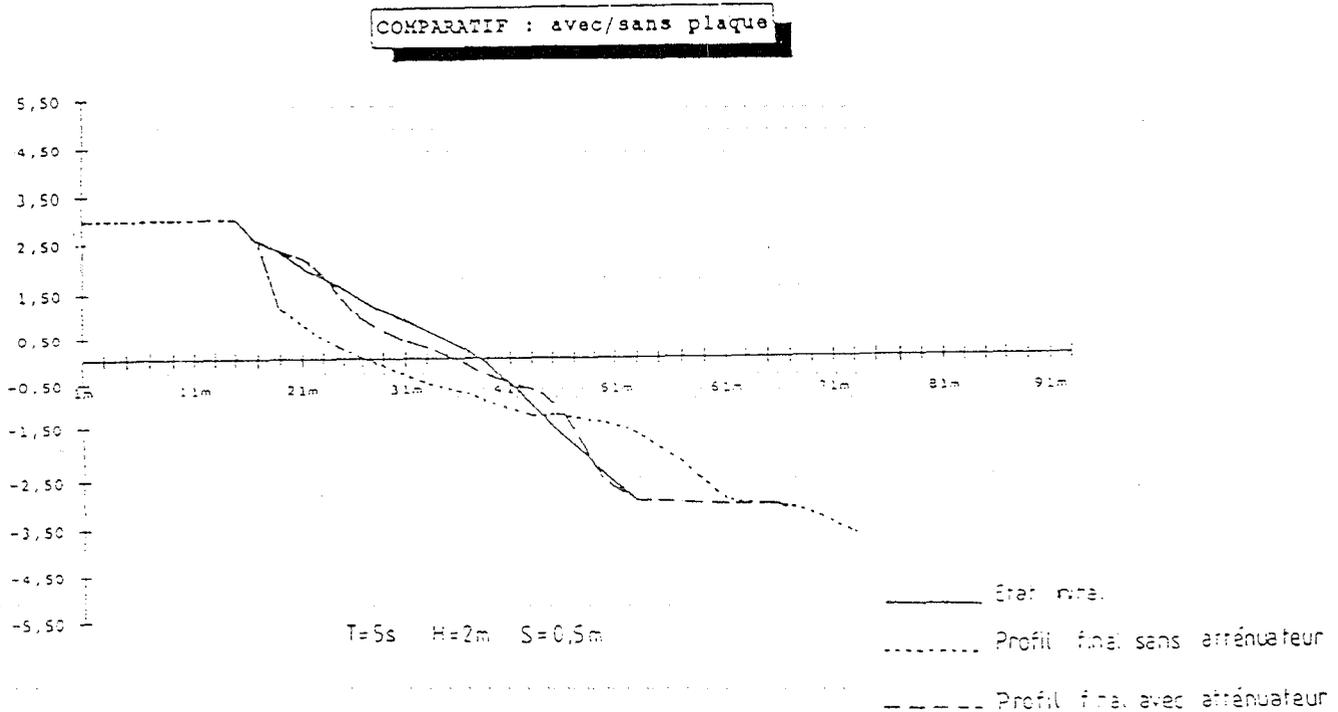


Fig.8 : Essai sédimentologique en canal

2. Essais en cuve à houle

Leur objectif est de prendre en compte l'effet tridimensionnel des phénomènes.

Ils ont été conduits en utilisant un matériau plus léger que les sables pour permettre une meilleure reproduction des phénomènes sédimentologiques, qui exigent un compromis entre la similitude de Froude (phénomènes hydrodynamiques) et la similitude de Reynolds (phénomènes de viscosité et d'entraînement des matériaux).

Les figures 9 et 10 reproduisent l'évolution d'un profil de plage constituée de sables grossiers, de l'ordre de 2mm de diamètre soumis à une succession de houles frontales de beau temps (faible cambrure) et de houles de tempêtes (forte cambrure) :

- la figure 9 est le résultat, à l'issue d'un certain cycle, sans atténuateur,
- la figure 10 donne l'évolution, à la même étape du cycle, avec protection centrale par une ligne continue d'atténuateurs, parallèle à la côte.

On constate que la protection a permis de conserver un profil de plage régulier dans la zone centrale protégée par les atténuateurs. A l'opposé, sans protection, le profil est très perturbé avec des creusements et remontées des matériaux qui témoignent de la vulnérabilité de celui-ci.

Notons (Figure 10) que les parties latérales du profil de plage, non protégées par les atténuateurs, sont l'objet d'une érosion et d'un remaniement des petits fonds.

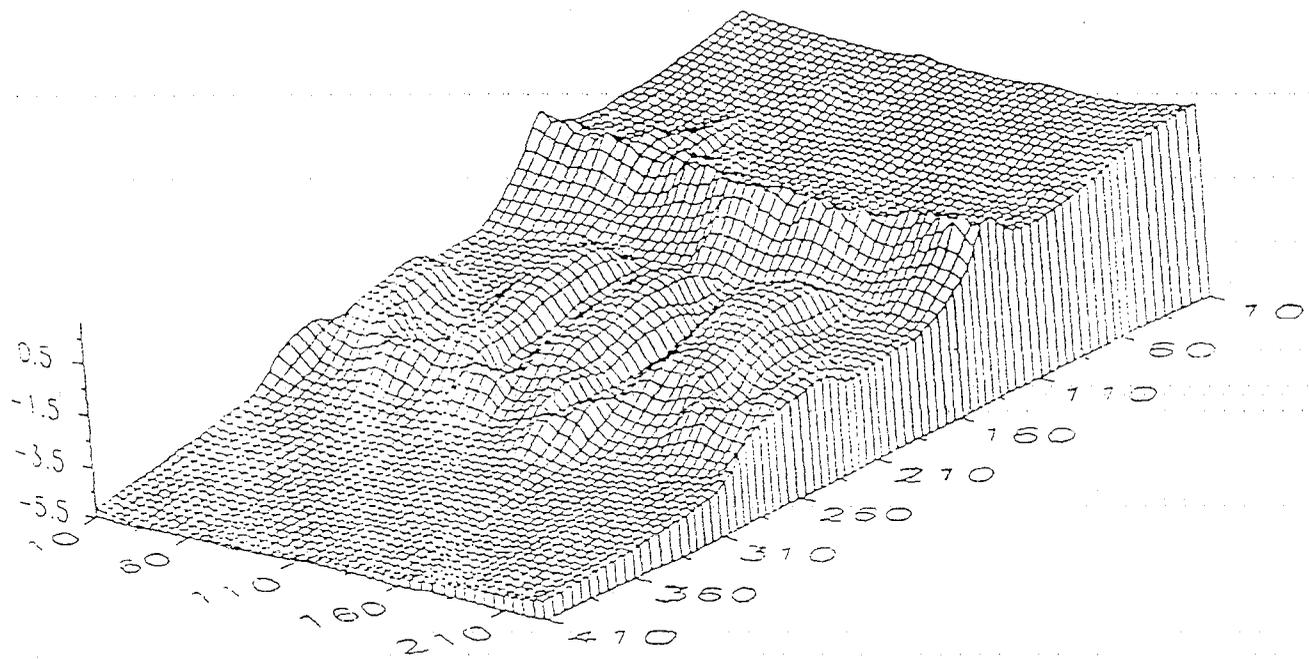


Fig.9

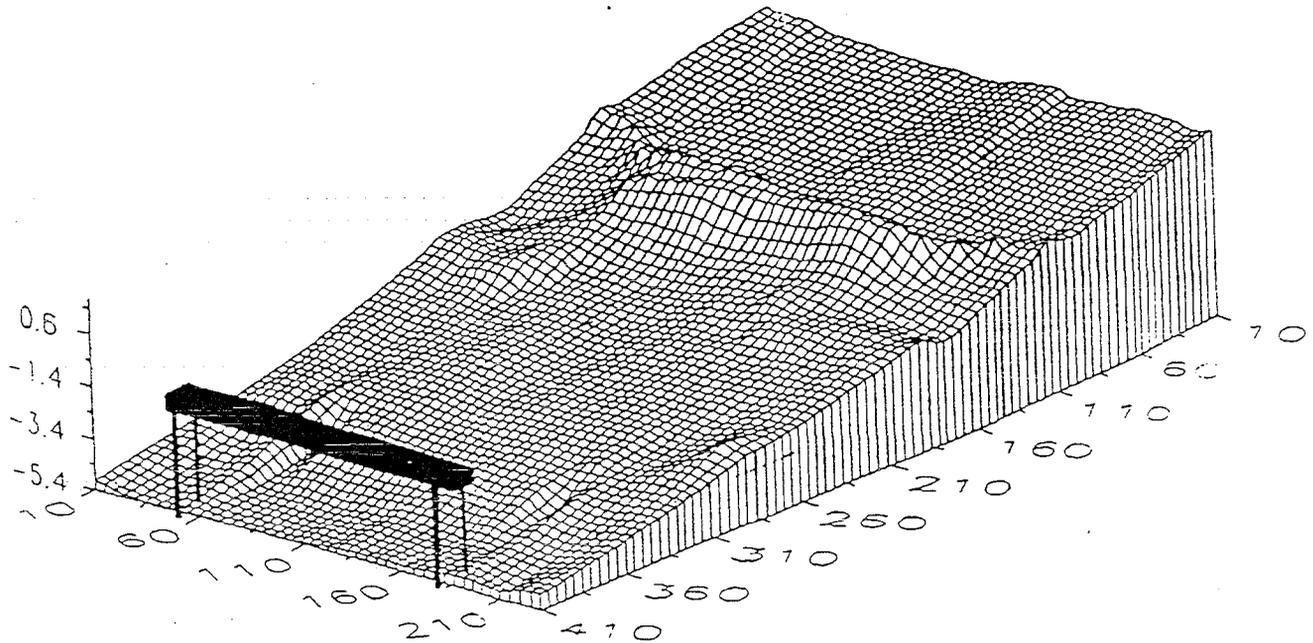


Fig.10

5. INTERET DES ATTENUATEURS

Contrairement aux ouvrages traditionnels en enrochements, les atténuateurs de houle ont peu d'impacts négatifs sur l'Environnement, certains étant au contraire bénéfiques comme le développement d'une vie intense sous les plaques immergées :

- *impact visuel* : la structure n'apparaît pas directement, seul apparaît un déferlement des vagues lorsque celles-ci atteignent une certaine hauteur au large ;

- *cloisonnement des plages* : inexistant puisque les atténuateurs sont installés en mer dans une configuration à peu près équivalente à celle des brise-lames ;

- *blocage des courants* : transparence totale aux courants, laissant ainsi dans l'état les échanges entre le large et la bordure littorale ;

- *impact sur l'environnement marin* :

- pas de travaux directs sur les fonds en dehors du "fichage" de pieux, de quelques dizaines de centimètres de diamètre, écartés d'une dizaine de mètres les uns des autres,

- . faible empreinte au sol : pieux uniquement
- . une augmentation de la surface immergée qui est favorable au développement de moules, d'algues et à la présence de bandes de poissons qui viennent se réfugier sous les plaques (observations faites sur les atténuateurs mis en place à Barcelone pour la protection d'un émissaire en mer).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) P. GUEVEL, E. LANDEL, R. BOUCHET, J.M. MANZONE, "Le phénomène d'un mur oscillant et son application pour protéger un site côtier sous l'action de la houle", ATMA, 1985.
- (2) E. LANDEL, "Etude de deux dispositifs hydrodynamiques-Générateur de houle résonant, atténuateur de houle mettant à profit le phénomène du mur oscillant", Thèse de docteur ingénieur, ENSM, 1986.
- (3) A. DROUIN, "Etude expérimentale de plaques mobiles utilisées comme moyen de protection contre la houle" Thèse de Maître de sciences, Université LAVAL, 1988.
- (4) J. F. COUDERT, "Les atténuateurs de houle PRINCIPIA - MONACO" Licence CFEM, Application au site de la ville olympique de Barcelone", 2^e Congresso AIOM, 1989.
- (5) P. PRUDHOMME, R. E. QUELENNEC, "Erosion des plages, situation en EUROPE et intérêt des atténuateurs de houle". OSATES, 1991.
- (6) J. BROSSARD, "Propagation d'une onde sur une plaque immergée", 1^{ères} journées Inter-Universitaires Génie Côtier - Génie Civil, Le Havre, 1990.