



PRÉSENTATION D'UN SYSTÈME DYNAMIQUE D'ABSORPTION DE HOULE POUR LES AMÉNAGEMENTS CÔTIERS

P. GUEVEL, D. LAJOIE, A. MANGIN

ACRI S.A. - Villantipolis n°10

473, Route des Dolines - Sophia Antipolis - Valbonne

Abstract

We present a study on the performances of a new kind of floating breakwaters, named ACRIPEL, developed by ACRI in collaboration with SETEC and Ecole Centrale de Nantes. According to the specifications of the site to protect, ACRI has conceived two families of ACRIPEL ; the "floating islands" type, and the "completely submerged tanks" type. In both cases, the principle is to create an anti-wave barrage constituted of several tanks partially filled with water, but floating. The first part of the paper deals with the description of these devices and their ability to protect the coast. A comparison between experimental and numerical results is presented which tend to prove the efficiency of this system. In a second part, a numerical simulation of wave propagation among an existing site was performed with and without ACRIPEL. The result is that these breakwaters seem to be well adapted for the environment protection as a complementary mean of classical constructions.

INTRODUCTION

Une forte demande s'est développée ces dernières années pour la création ou l'extension d'ouvrages côtiers et portuaires à vocation touristique, sportive ou récréative ; en particulier le long de la côte méditerranéenne. Elle s'est concrétisée par l'élaboration de nombreux projets d'aménagements avec ouvrages de protection contre la houle, de type classique, c'est-à-dire par digues ou jetées en enrochements.

Personne ne voulait alors admettre que la prolifération des ouvrages côtiers traditionnels, surtout en Méditerranée, pourrait entraîner des nuisances extrêmement préoccupantes : rupture de l'équilibre de l'écosystème, pollution près des côtes, dégradation de l'esthétique des sites,...

Ce n'est que très récemment, en 1988, qu'un décret ministériel a interdit la réalisation de tout aménagement côtier susceptible d'entraîner une altération sensible de l'état existant sur le plan environnemental et écologique.

Cette décision a très fortement freiné l'essor des activités liées à l'aménagement du littoral.

Un regain d'intérêt pour les atténuateurs de houle "légers" s'est alors manifesté de la part des collectivités locales et des entrepreneurs.

Par ailleurs, de très nombreuses stations balnéaires prestigieuses sont victimes d'un phénomène qui a tendance à s'amplifier : celui du désengraissement des plages de sable. Parmi les causes qui sont à l'origine de cet état de fait, la mise en suspension et le transit des fines induits par le déferlement des houles de tempête

n'est certainement pas l'une des moindres. D'où, une seconde raison du regain d'intérêt pour les dispositifs "légers", susceptibles de réduire sensiblement l'énergie des plus fortes vagues avant que celles-ci n'atteignent la côte.

Toutes ces raisons ont amené la société ACRI-SA, la société SETEC et l'Ecole Centrale de Nantes (E.C.N.) à s'associer en vue de concevoir des dispositifs d'atténuation de la houle réalisant le meilleur compromis entre différentes contraintes, le plus souvent contradictoires :

- assurer des performances élevées du dispositif en tant qu'atténuateur de houle, tout en répondant de sa survie dans les conditions de mer les plus sévères.
- respecter l'esthétique des sites.
- limiter au maximum l'emprise au sol des massifs d'ancrage.
- ne pas entraver la libre circulation des courants naturels et des eaux résiduelles.
- réduire dans toute la mesure du possible les nuisances induites par les travaux en mer.

Les réflexions préliminaires menées au sein du groupement SETEC-ACRI-ECN ont débouché sur la définition de dispositifs dénommés "ACRIPEL" ayant fait l'objet d'un dépôt de brevet industriel en juin 1990.

Les études de faisabilité, menées d'abord par la théorie puis par l'expérimentation sur modèle réduit, ont bénéficié du soutien de l'ANVAR.

Les applications visées sont nombreuses et variées ; par exemple :

- la protection d'un site naturel ou d'un ouvrage subissant des dégradations ou des dysfonctionnements provoqués directement par la houle ou, indirectement, par les courants littoraux induits par le déferlement de celle-ci ;
- l'amélioration du confort des ports et des abris naturels ;
- la réduction des dimensions d'une digue en projet de quelque type qu'elle soit ; en particulier, son emprise au sol et la hauteur de son couronnement ;
- la récupération partielle de l'énergie des vagues.

L'exposé qui suit comporte essentiellement deux parties :

- la présentation des atténuateurs de houle du type "ACRIPEL" ;
- les résultats d'une simulation numérique, effectuée dans un cas concret, en exploitant notre logiciel de calcul SIMAC.

I. LES ATTÉNUATEURS DE HOULE DU TYPE "ACRIPEL"

I.1. Disposition générale

Un dispositif du type ACRIPPEL, réalisé selon l'une ou l'autre de ses variantes, constitue toujours un barrage anti-houle dynamique orienté dans une direction sensiblement perpendiculaire à celle des houles dominantes, à une distance de l'ordre de 100 à 200 mètres au large des ouvrages à protéger. Un tel barrage est composé d'une série de caissons, partiellement remplis d'eau de mer, mais dotés d'une flottabilité positive ; ces caissons sont ancrés sur le fond par l'intermédiaire de chaînes, de câbles tendus ou encore de bielles rigides.

L'atténuation de la houle est obtenue en exploitant au mieux l'ensemble des phénomènes physiques mis en jeu, ceux qui résultent de la nature ondulatoire de la houle (la diffraction-radiation) et ceux qui résultent des dissipations d'énergie, externes et internes, induites par les

mouvements oscillatoires que la houle imprime aux flotteurs.

Selon les spécificités du site à protéger, le barrage anti-houle peut être totalement ou partiellement immergé.

I.1.1. Les ACRIPPEL du type "îles flottantes"

Ceux-ci conviennent aux applications pour lesquelles il s'agit seulement d'améliorer le confort d'un port ou d'un abri naturel soumis à des états de mer assez peu sévères ($H_{max} < 3$ m, pour fixer les idées).

Dans de tels cas, la profondeur d'eau est généralement faible et les houles n'ont pas une direction de propagation prédominante. Ainsi, le barrage anti-houle sera-t-il constitué d'une série de flotteurs axisymétriques d'axe vertical, alignés parallèlement à la côte, de préférence selon deux rangées disposées en quinconce (fig. 1).

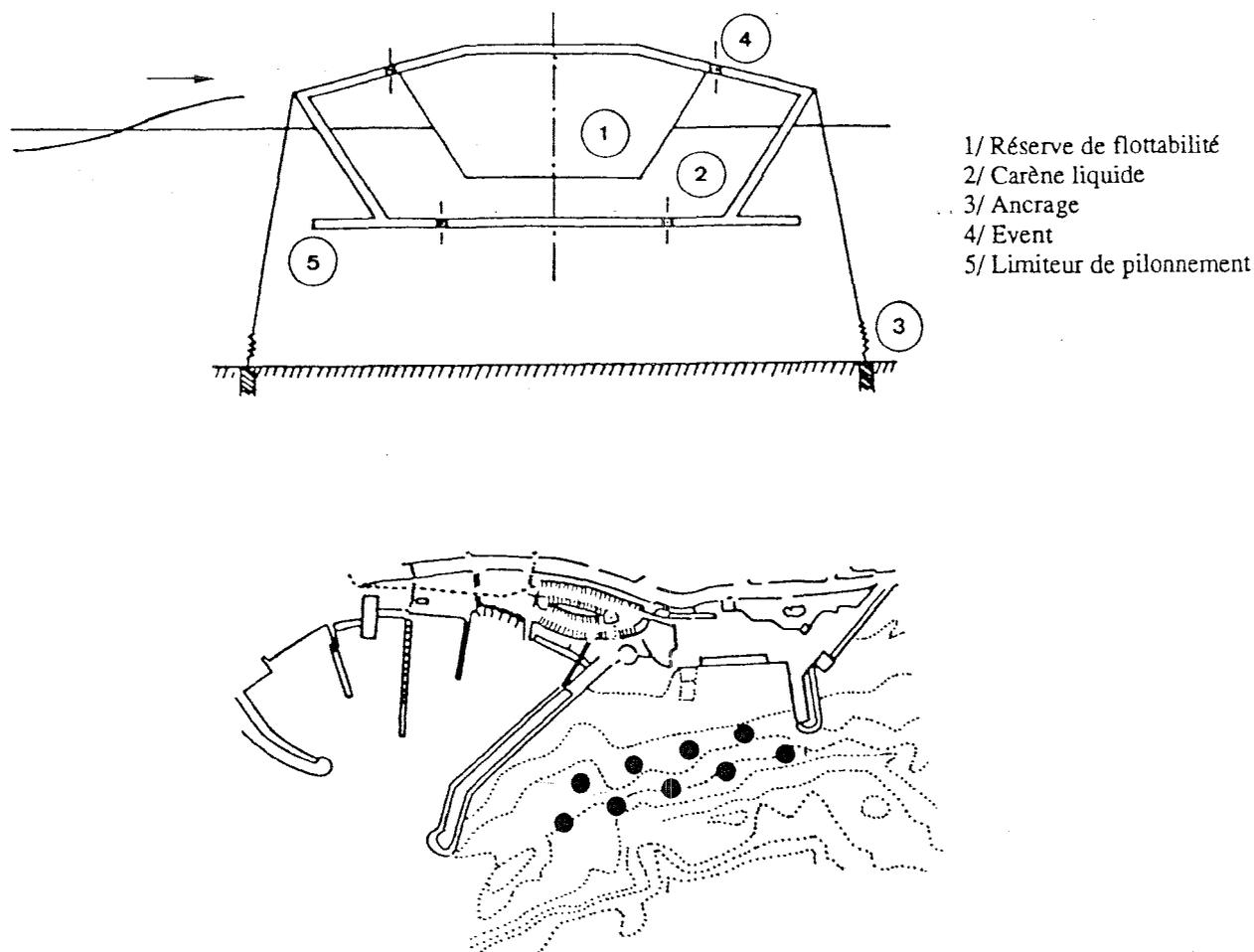


Fig. 1 : Caissons du type île flottante

I.1.2. Les ACRIPPEL du type "caissons prismatiques, entièrement immergés"

Dans le cas où le site à protéger n'est soumis à l'agression de très fortes tempêtes que d'une manière très

épisode, les atténuateurs de houle "légers" ont seulement pour objet d'écrêter les vagues les plus destructrices ; de sorte qu'on n'a pas à se soucier de leurs

performances dans les conditions de mer relativement clémentes.

Aussi est-il préférable d'établir un barrage anti-houle totalement immergé dont les conditions de survie, face aux intempéries, sont plus facilement contrôlables.

Par ailleurs, les houles les plus énergétiques se propagent généralement dans des directions très peu dispersées. On a alors tout intérêt à donner aux caissons des formes prismatiques dont les génératrices seront orientées dans une direction perpendiculaire à celle des houles dominantes (fig. 2).

I.2. Aménagements intérieurs des caissons

La masse d'eau de mer renfermée dans les caissons est compartimentée selon la disposition des citernes antiroulis classiques.

Cela permet d'exploiter le phénomène de ballotement qui s'instaure entre la citerne avant et la citerne arrière, suite au mouvement oscillatoire de cavalement imprimé au caisson par la houle ; une déperdition d'énergie

significative résulte alors des effets de perte de charge induits par des restrictions de section du conduit qui relie les bases des citernes avant et arrière. Dans cet ordre d'idée, on a évidemment intérêt à ce que les mouvements de ballotement soient de très grande amplitude (la déperdition d'énergie est sensiblement proportionnelle au cube de cette amplitude). Pour cela, il convient d'accorder la période propre de la citerne sur la période de la houle qu'on cherche à atténuer.

Afin de ne pas trop favoriser les performances du dispositif pour une houle de période donnée, au détriment de ses performances face aux autres houles, la carène liquide sera, en fait, compartimentée selon n citernes antiroulis indépendantes, accordées sur des périodes T_1, T_2, \dots, T_n encadrant la valeur T_p de la période pic de la houle la plus probable. Ce compartimentage sera évidemment plus facile à réaliser avec des flotteurs prismatiques qu'avec des flotteurs axisymétriques.

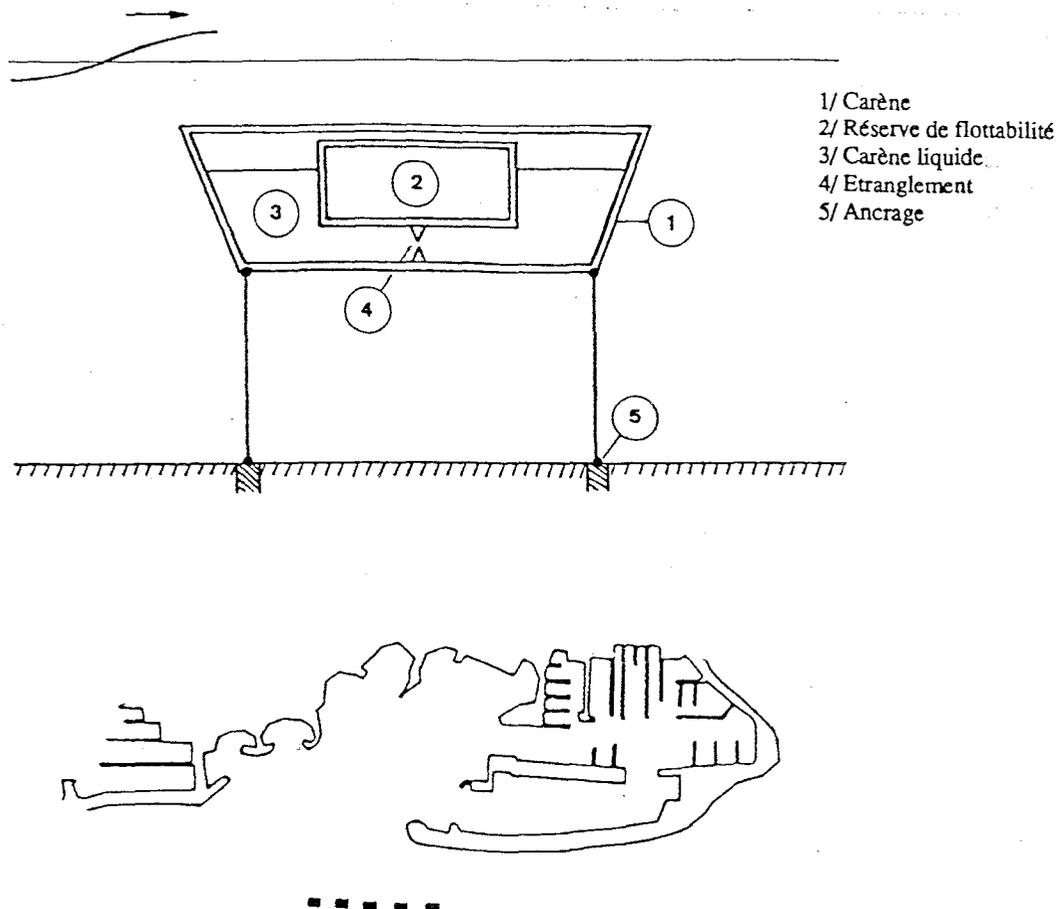


Fig. 2 : Caissons prismatiques entièrement immergés

I.3. Dispositions particulières

Dans le but de réduire les efforts d'ancrage, du moins lorsque cela devient impératif, un dispositif amortisseur constitué d'un empilement de blocs d'élastomères est

inséré entre les brins supérieurs et inférieurs de chacun des câbles d'amarrage ; ce qui permet :

- de diminuer les surtensions dynamiques,
- d'adoucir les éventuelles reprises de tension,

d'assurer une meilleure tenue en fatigue de l'ouvrage,

- de diminuer les surtensions statiques en hautes eaux (sans objet dans le cas des "ACRIPEL" entièrement immergés).

Par ailleurs, toujours dans le souci de réduire ces efforts d'ancrage, le fond des flotteurs pourra éventuellement être prolongé extérieurement par un écran horizontal ayant pour rôle d'accroître considérablement les effets de masse d'eau ajoutée en pilonnement et en tangage.

Les très faibles mouvements oscillatoires, autorisés selon ces deux degrés de liberté par la très faible élasticité donnée aux câbles, induisent d'importants efforts d'origine inertielle qui soulagent substantiellement les efforts d'ancrage.

1.4. Conduite des études d'adaptation à un site donné

Ces études s'articulent comme suit :

1.4.1. Analyse et synthèse des spécificités locales

Les grandes lignes d'un projet s'établissent en fonction des données naturelles correspondant au site considéré et des exigences formulées par les futurs utilisateurs.

A l'issue de la synthèse de l'ensemble de ces informations, on est déjà en mesure d'émettre un avis sur la faisabilité du projet puis, dans le cas d'un diagnostic favorable, d'établir le plan-masse du type de barrage à houle proposé.

1.4.2. Etudes de prédimensionnement

Celles-ci sont entreprises à partir de considérations heuristiques, relevant essentiellement de l'art de l'ingénieur ; de nombreuses itérations sont évidemment nécessaires avant d'aboutir à une solution réaliste sur le plan technologique et, a priori, satisfaisante sur le plan des performances souhaitées.

1.4.3. Calculs d'optimisation paramétrique

Ces calculs sont effectués en exploitant un ensemble de programmes de calcul, bidimensionnels et tridimensionnels, spécifiques de l'hydrodynamique navale et côtière :

- la diffraction-radiation des ondes autour d'une carène oscillant autour d'une position moyenne, fixe dans l'espace ;
- le ballonnement de liquides dans les cuves anti-roulis ;
- les amortissements du type visqueux, induits par les appendices équipant une carène ;
- la réfraction de la houle près des côtes.

Les études de prédimensionnement sont alors reprises sur des bases plus fiables dans le but de confirmer ou d'infirmier le bien-fondé des choix précédents.

1.4.4 . Essais expérimentaux préliminaires

Etant donnée la très grande complexité des phénomènes qui accompagnent le fonctionnement d'un atténuateur de houle dynamique, on ne peut pas faire entièrement

confiance aux résultats de calculs nécessairement fondés sur des hypothèses simplificatrices.

Aussi, convient-il tout d'abord de s'assurer, par des essais sur modèle réduit, que le dispositif proposé ne présente pas de défauts pathologiques restés insoupçonnés par la théorie : par exemple, un comportement anarchique résultant de l'impact de vagues déferlantes ou encore de phénomènes de couplages non linéaires.

1.4.5. Simulation numérique du comportement du barrage à houle dans son environnement

Les calculs d'optimisation paramétrique, déjà entrepris précédemment sont éventuellement affinés en mettant à profit les enseignements tirés des essais expérimentaux ; en particulier ceux qui ont trait aux valeurs des coefficients d'amortissement d'origine visqueuse (cf. deuxième partie de l'exposé).

1.4.6. Etudes techniques et technologiques

Celles-ci ont pour finalité la rédaction d'un Avant Projet Simplifié (A.P.S.).

1.4.7. Qualification définitive du dispositif par des essais en cuve à houle tridimensionnelle

De tels essais sont extrêmement longs et coûteux ; aussi ne seront-ils entrepris que si la décision de mener le projet à son terme a été prise d'une manière quasi-irrévocable.

1.5. Résultats d'une étude récente concernant le projet d'extension du port de Mandelieu

L'implication d'un dispositif ACRIPPEL dans ce projet résulte de circonstances relevant essentiellement d'impératives contraintes d'ordre esthétique ; ainsi, le musoir de la nouvelle digue ne peut être suffisamment avancé vers le large pour assurer convenablement la protection de l'avant-port par gros temps.

D'où, l'idée d'assurer une certaine continuité de cette digue par un barrage à houle, entièrement immergé, constitué d'une série de caissons prismatiques.

Les premières études ont été menées conformément aux indications données ci-dessus dans les alinéas 1.4.1, 1.4.2 et 1.4.5 afin de prédéterminer les caractéristiques principales des caissons (forme et dimension, profondeur d'immersion, aménagement des carènes liquides, amplitude des débitements horizontaux, efforts d'ancrage, performances en ce qui concerne l'atténuation de la houle).

La solution apparue la plus intéressante à l'issue des investigations théoriques a fait ensuite l'objet d'essais expérimentaux ; lesquels ont été effectués à l'Ecole Centrale de Nantes sur un modèle réduit instrumenté, réalisé à l'échelle 1/20ème.

Ces essais ont, dans l'ensemble, assez bien confirmé les prévisions de calcul.

Cependant, quelques distorsions sont apparues entre les résultats théoriques et expérimentaux. Celles-ci ont pu être expliquées par le fait que les amortissements d'origine visqueuse ont été sous-estimés par le calcul.

En fait, les essais ont été rassurants sur tous les points pouvant soulever des inquiétudes :

- les hauteurs des houles résiduelles mesurées sont généralement inférieures à celles fournies par la modélisation numérique (cf. rendement énergétique de l'atténuateur sur la figure 3).
- les paramètres dimensionnants - l'amplitude des excursions horizontales des caissons, les efforts

d'ancrage - sont sensiblement inférieurs à ceux prévus, surtout pour les plus fortes houles ;

- les caissons restent totalement immergés en toute circonstance, ce qui dissipe les craintes qu'on pouvait avoir en ce qui concerne l'apparition de phénomènes brutaux et anarchiques.

Etant ainsi assurées des qualités intrinsèques des caissons proposés, les études ont été poursuivies en vue de déterminer les performances du barrage à houle dans son environnement.

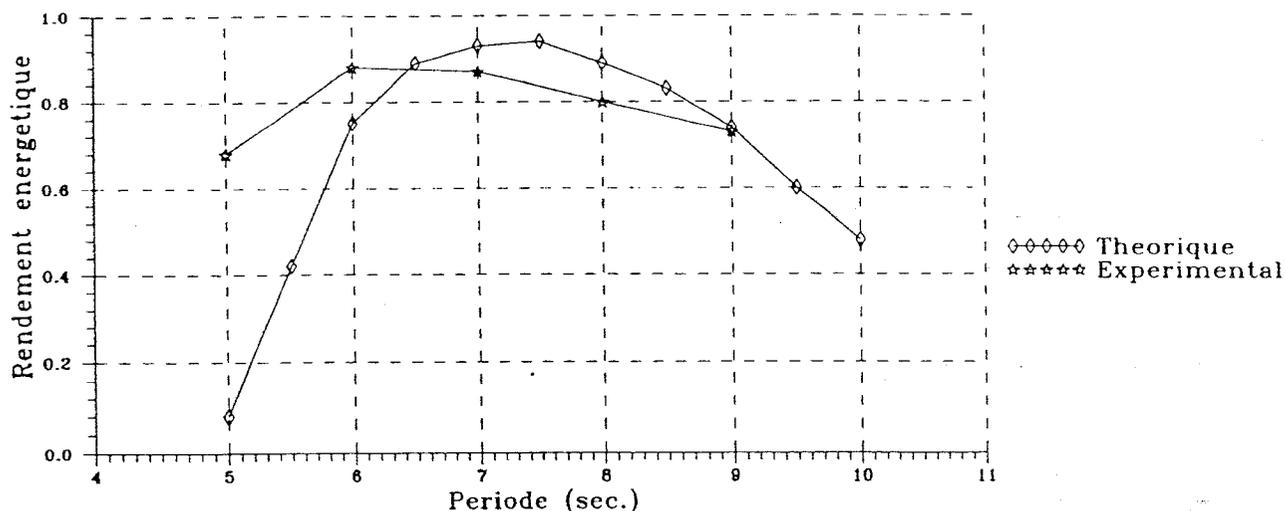


Figure 3 : Rendement énergétique pour H=3 mètres

II. SIMULATION NUMÉRIQUE DU FONCTIONNEMENT D'UN DISPOSITIF ACRIPÉL DANS UN ENVIRONNEMENT RÉEL

Il s'agit ici de rechercher la meilleure disposition à donner aux caissons devant constituer un barrage à houle complet destiné à protéger au mieux un site donné. Le calcul du champ de vagues est effectué en exploitant le logiciel SIMAC, basé sur une technique de décomposition du domaine d'études par des frontières cylindriques d'axe vertical (fig. 4); on distingue ainsi :

- Le domaine (Ω_1), extérieur à une frontière fictive (Σ) disposée au large.
- Le domaine (Ω_2), compris entre (Σ) et une nouvelle frontière fictive (S), entourant le barrage à houle
- Le domaine (Ω_3) intérieur à (S).

Dans chacun de ces domaines, le problème posé est résolu par une méthode spécifique:

- Une méthode de raies, traitant le problème de réfraction dans le domaine (Ω_1).
- Une méthode d'éléments finis, fondée sur l'application de l'équation d'onde de BERKOFF, pour traiter les problèmes de réfraction-diffraction-réflexion dans le domaine (Ω_2); l'hypothèse des faibles pentes du fond permet de ramener le problème tridimensionnel à un problème bidimensionnel dans le plan horizontal, dont la résolution nécessite seulement de mailler la surface libre.
- Une méthode de singularités, du type "sources et

doublets de RANKINE", pour traiter le problème tridimensionnel de diffraction-radiation dans le domaine (Ω_3).

Les agitations du plan d'eau dans chacun des domaines considérés n'étant évidemment pas indépendantes les unes des autres, il convient de réaliser le couplage des solutions valables de part et d'autre des frontières fictives (Σ) et (S); c'est à dire faire en sorte que le potentiel φ ainsi que sa dérivée normale $\partial\varphi/\partial n$, soient continus sur chacune de ces frontières. Cela implique de devoir traiter dans le domaine (Ω_3) une suite de N problèmes élémentaires en s'imposant sur chacun des éléments de discrétisation (s_j) de (S), les conditions de DIRICHLET suivantes :

$$\varphi_j = a_j \operatorname{ch}(k(z + h_j)); \quad \varphi_i = 0, \text{ pour } i \neq j$$

A l'issue de ces calculs, on détermine les coefficients a_j , inconnus jusqu'ici, en identifiant sur le contour (C) de (S) les valeurs de $\partial\varphi_2/\partial n$ et $\partial\varphi_3/\partial n$, φ_2 , et φ_3 désignant respectivement les déterminations du potentiel φ dans les domaines (Ω_2) et (Ω_3). Cette manière d'opérer n'est valable que si la frontière fictive (S) est assez éloignée du barrage à houle pour qu'on soit assuré que les vagues proches induites par celui-ci sont bien devenues évanescentes sur (S); en général, on donne au contour (C) de cette surface la forme d'une ellipse.

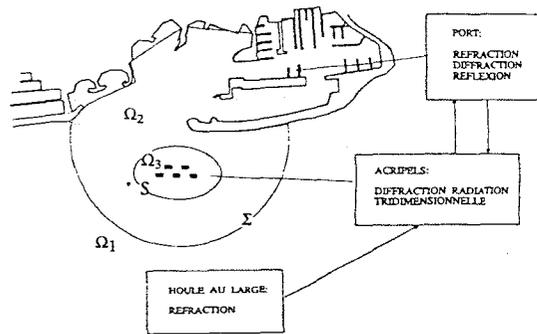


Figure 4: Modèle du futur port de Mandelieu-La Napoule.

Les maillages utilisés dans la configuration du futur port de Mandelieu-La Napoule sont présentés sur la figure 5.

Les résultats des calculs, illustrés sur la figure 6, correspondent à la meilleure configuration apparue après de nombreuses simulations numériques. Dans cette configuration, le barrage est constitué de 5 caissons, disposés en quinconce et immergés sous 3 mètres d'eau,

par vingt mètres de fond. Chacun de ces caissons, d'une envergure de 30 mètres, a une section trapézoïdale, de hauteur $h=4$ mètres, dont les bases supérieures et inférieures B et b , sont respectivement égales à 18 et 14 mètres ; ceux-ci ont été échantillonnés pour résister à des houles de 6 mètres de creux. On constate sur cette figure 6 que la mise en place des ACRIPELS serait susceptible d'améliorer très sensiblement le confort du port.

Fig. 5 : Maillage des modèles d'agitation et de diffraction radiation tridimensionnelle

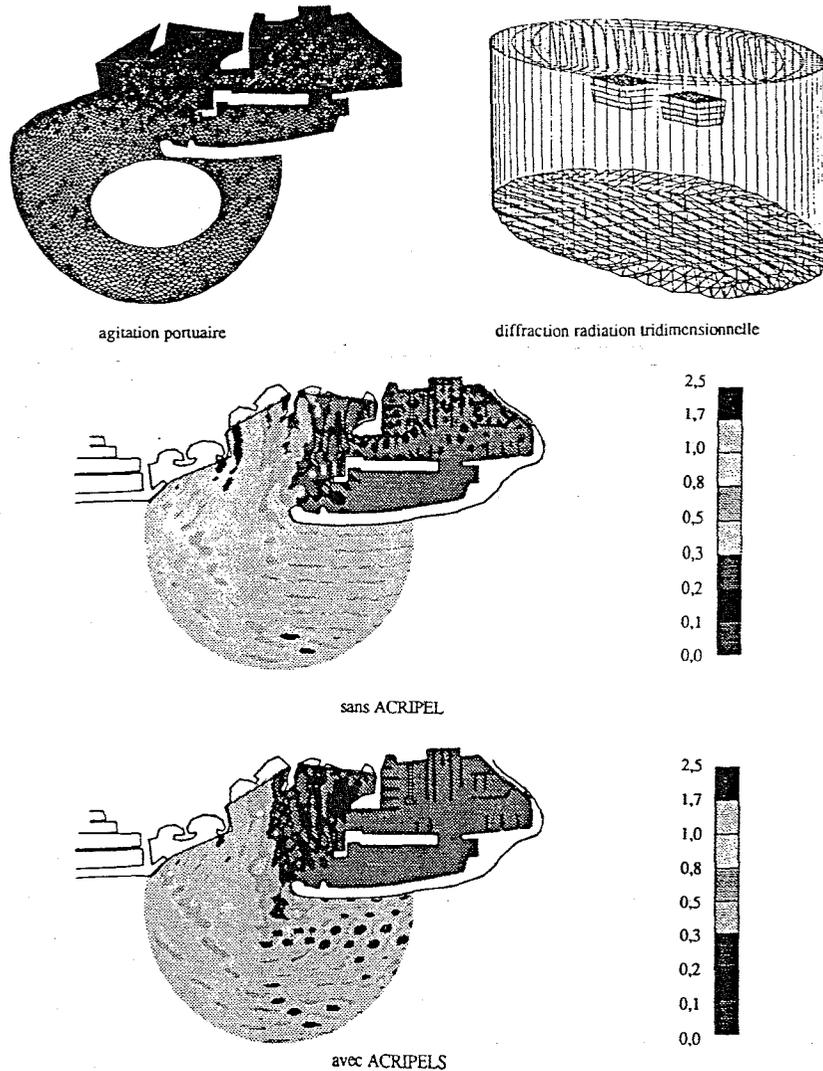


Fig. 6 : Coefficients d'amplification maximale sur l'ensemble du plan d'eau. Mise en évidence de l'effet d'un dispositif de cinq ACRIPELS en quinconce.