

---

# Dix ans d'essais en houle aléatoire au Laboratoire national d'hydraulique

*Ten years of tests conducted on random waves  
in the national hydraulic laboratory*

**B. Chaloin    M. Darras    Ph. Donnars**

Laboratoire national d'hydraulique  
Chatou

---

*Le L.N.H. a développé depuis une dizaine d'années environ des moyens d'étude équipés de batteurs à houle aléatoire. L'exposé présente ces moyens et les méthodes d'études utilisées ainsi que les résultats obtenus.*

---

*The L.N.H. has for about ten years been developing experiment facilities equipped with random wave generators fitted with swell beaters. The article describes these devices and the study methods used as well as the results obtained.*

---

Le Laboratoire national d'hydraulique s'est engagé très tôt dans la construction d'un canal d'étude de l'action des éléments houle-vent-courant, dans la perspective d'un développement des études pour le domaine offshore. Les premières études étaient réalisées en 1974, et depuis cette date l'occupation de l'installation d'essai a été permanente. En raison des succès de cette première installation il a été décidé de mettre en œuvre un batteur aléatoire dans une cuve de grande dimension horizontale pour utiliser ces techniques dans les domaines du génie côtier et portuaire. Cette cuve fonctionne depuis 1984. Ces journées sont l'occasion pour nous de faire un bilan de ces dix années d'activité.

## **1. Des installations performantes**

Le Laboratoire national d'hydraulique possède deux installations à houle aléatoire opérationnelles; la grande cuve d'agitation et le canal d'étude de l'action des éléments, dont les vocations sont différentes et complémentaires.

### **1.1. La grande cuve d'agitation**

La vocation principale de cette installation est l'étude des problèmes d'agitation portuaire, de stabilité de structures

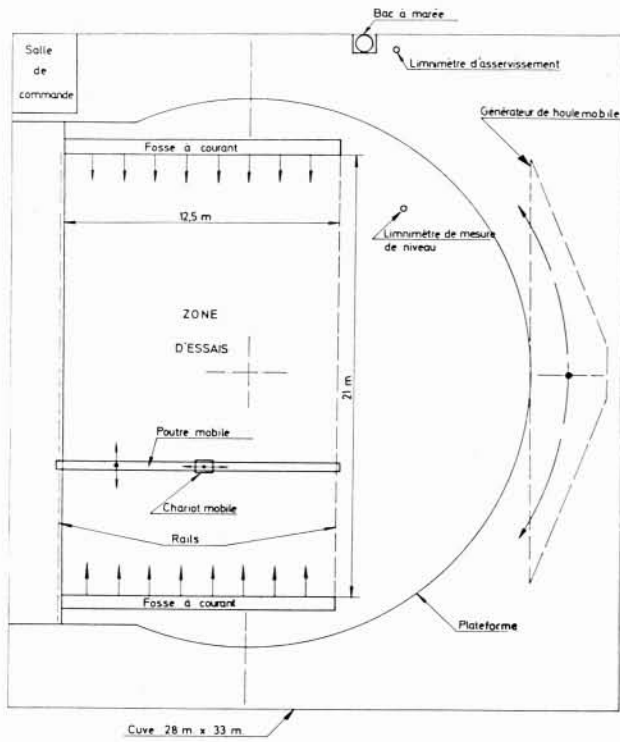


Figure 1. — Plan de la cuve d'agitation

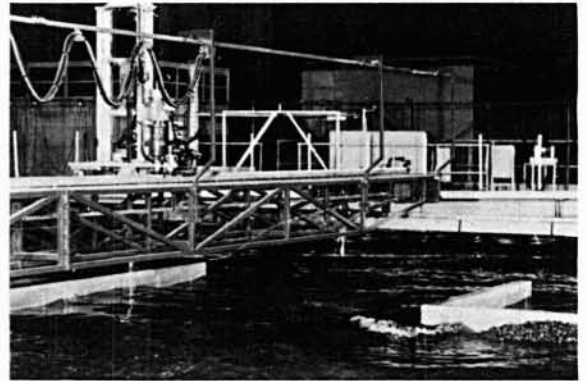


Figure 2. — Poutre pilotable de la cuve d'agitation en cours de relevé d'agitation.



Figure 3. — Vue du canal d'études de l'action des éléments.

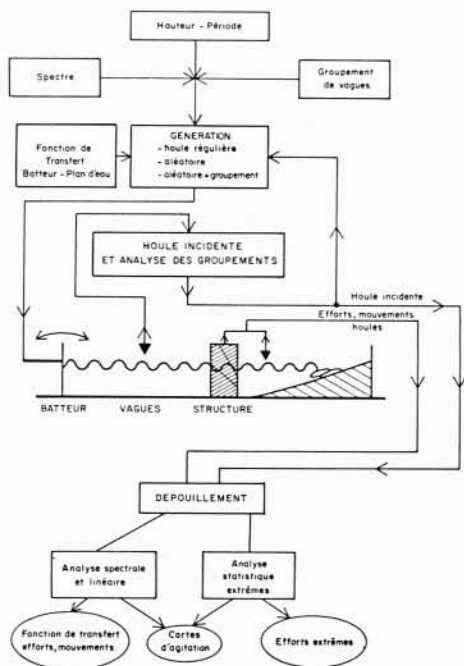


Figure 5. — Organisation des logiciels en houle aléatoire.

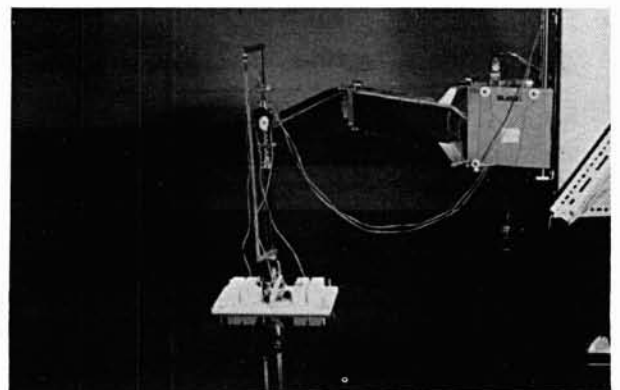


Figure 4. — Bras de mesure des mouvements.

telles que les digues à talus et de sédimentologie côtière. L'ensemble des équipements installés sur cette cuve vise à une automatisation poussée des essais permettant une amélioration de la précision grâce à des moyens de simulation et de mesure performants et un gain de temps grâce à un enchaînement automatique des phases de mesures et de traitements.

La cuve a une longueur de 33 m et une largeur de 28 m (*figure 1*). La plate-forme d'essai a une forme semi-circulaire de 13 m de rayon et un tirant d'eau maximal égal à 0,4 m, ce qui permet d'effectuer les études côtières (profondeur d'eau voisine de 20 m) à des échelles de l'ordre du 1/50<sup>e</sup>.

La cuve est équipée de moyens permettant de générer de la houle, du courant et de la marée. La houle régulière ou aléatoire est générée par un batteur de type volet oscillant à commande hydraulique de 17 m de long. Le batteur est monté sur un rail courbe permettant ainsi de faire varier facilement l'incidence de la houle. Les périodes de houle générées sont comprises entre 0 s et 3 s et les hauteurs peuvent atteindre 15 cm environ au large, pour une profondeur d'eau de 40 cm.

Le courant est injecté aux limites de la plate-forme d'essai par l'intermédiaire de fosses à courants munies de trappes de réglage et peut atteindre un débit de 500 l/s; une pompe complète cet ensemble pour reproduire des variations de niveau (marée).

L'ensemble de l'installation est actuellement piloté par un ordinateur de bureau dont les fonctions principales sont le contrôle du batteur et du chariot de mesure, l'acquisition et le traitement des données. La fonction pilotage du batteur de houle est réalisée en plusieurs étapes successives : après avoir été calculé, le signal de pilotage est stocké sur bande magnétique, puis relu lors de l'essai et transmis sous forme analogique au batteur.

L'acquisition des données se fait grâce à un voltmètre numérique et un scrutateur de voies permettant des mesures simultanées sur 20 voies avec des cadences d'échantillonnage élevées (100 ms). Les informations sont stockées (2 mégaoctets) et ensuite traitées.

Le pilotage du déplacement de la poutre de mesure qui peut couvrir une grande partie de la zone d'essais (21 m × 12,50 m) est effectué par l'intermédiaire d'un multiprogrammeur qui gère les mouvements (accélération, vitesse, position) du chariot dans les trois directions. Cette poutre peut être équipée soit de sondes de houles pour les études d'agitation (*figure 2*), soit d'un palpeur de fond pour les études sédimentologiques.

### 1.2. Le canal d'étude de l'action des éléments

Cette installation a pour but principal l'étude du comportement des plates-formes offshore; cependant, elle a également été utilisée pour réaliser des études systématiques sur les digues et des études particulières telles que étude de têtes de rejet ou de submersion de rivage.

Le canal a une longueur de 60 m, une largeur de 5 m et un tirant d'eau maximal de 1,5 m (*figure 3*). Il est équipé de moyens permettant de générer de la houle, du courant et du vent. La houle est générée par un batteur à deux mouvements indépendants : la pelle peut se déplacer en translation ou en rotation par rapport à sa base, en

fonction des conditions de houle à générer; les mouvements sont créés par un système de pompes haute pression et deux vérins. Un circuit de pompage ayant un débit maximal de 1 000 l/s permet de créer un courant permanent uniforme de même sens que la houle ou de sens contraire. Une soufflerie de débit maximal égal à 110 m<sup>3</sup>/s avec simulateur de rafales permet de reproduire un vent de même sens que la houle.

Le canal possède également des moyens de mesure propres à l'étude des structures. Un bras de mouvement (*figure 4*) composé de six potentiomètres de précision et ayant une masse et une inertie faibles permet la mesure des six composantes du mouvement d'une structure (déplacements et rotations autour des trois axes). Une balance hydrodynamique à jauges extensométriques permet de mesurer les six composantes du torseur d'efforts exercé par la houle ou le courant sur une structure fixe.

L'ensemble de l'installation est contrôlée par un mini ordinateur. L'organisation informatique du canal est similaire à celle existant sur la cuve et décrite précédemment.

## 2. Une mise en œuvre automatisée

Pour les études liées à l'action des éléments, et en particulier la houle aléatoire, l'utilisation de moyens informatiques est indispensable tant dans la mise en œuvre de moyens que pour l'analyse des résultats. Ces méthodes permettent d'avoir un contrôle effectif des conditions d'environnement simulées, simulation de plus en plus réaliste. La *figure 5* indique l'organisation qui a été mise en place au LNH; elle est basée sur l'expérience acquise lors de la réalisation de nombreuses études, mais aussi sur une action de recherche permettant une évolution constante des logiciels.

### 2.1. Facilité de mise en œuvre

La disponibilité de mini-ordinateurs sur les installations expérimentales permet une mise en œuvre rapide des modèles physiques, grâce au pilotage automatique des essais et au suivi immédiat des essais grâce à des systèmes d'analyse standards.

Les logiciels de génération de la houle et d'analyse ont été initialement développés sur le canal d'étude de l'action des éléments au début des années 1970. Ils ont évolué au fur et à mesure des études nouvelles et du développement de techniques plus fines de simulation. Avec l'apparition d'une deuxième installation expérimentale la structure générale a changé progressivement. Schématiquement les développements se font maintenant sur les ordinateurs du centre de calcul d'EDF, d'une puissance très supérieure aux calculateurs de modèles, ce qui permet en particulier de tester les nouveaux logiciels par simulation numérique. Lorsque le logiciel est considéré comme fiable et efficace, il est alors mis en place sur les installations expérimentales, sans exiger une immobilisation de l'installation. Dans ces conditions les installations disposent en permanence d'un ensemble de logiciels opérationnels.



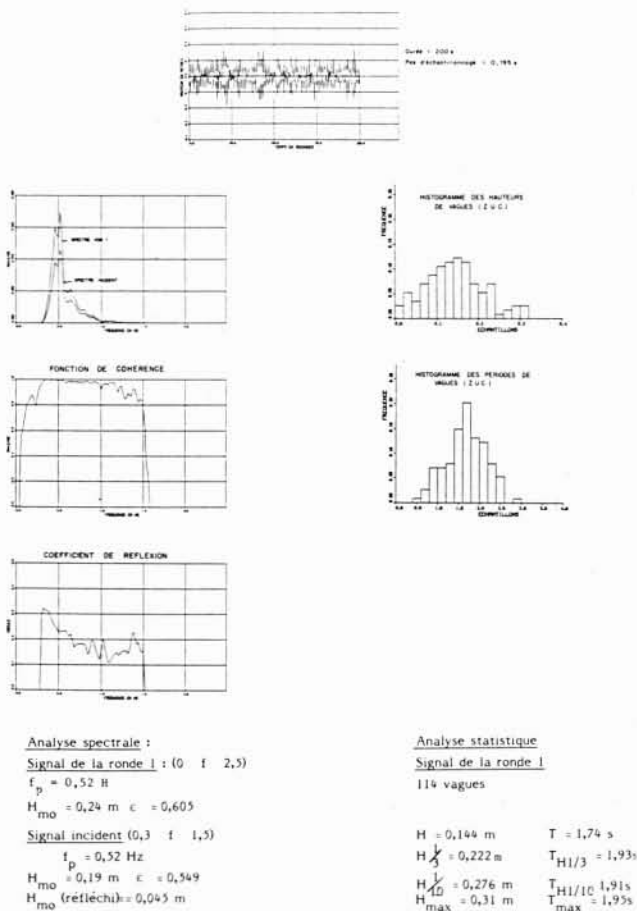


Figure 7. — Exemple de dépouillement d'un signal.

Néanmoins il reste nécessaire de contrôler les vagues générées effectivement. Le contrôle des ondes générées par le batteur doit être effectué avec précision. Cette analyse est rendue difficile par la réflexion des vagues sur la structure et éventuellement sur les plages d'amortissement. Ces ondes réfléchies peuvent même se re-réfléchir sur le batteur et se propager alors dans la même direction que le train d'onde dû directement à l'action du batteur. La méthode, mise en place au LNH dans le milieu des années 1970, consiste à faire l'ajustement de la superposition d'une onde incidente et d'une onde réfléchie pour les mesures obtenues en trois points, cette analyse étant effectuée fréquence par fréquence après une analyse spectrale des signaux de houle. Des tests ont été effectués récemment sur certains cas schématisés en liaison avec un groupe de travail de l'AIHR (Association internationale de recherches hydrauliques); ils ont montré l'efficacité de cette méthode (figure 7).

### 2.3. Analyse des mesures

Il existe essentiellement deux méthodes d'analyse des mesures de houle et de ses effets : l'analyse spectrale et

l'analyse vagues par vagues. La première méthode permet d'analyser fréquence par fréquence par exemple les fonctions de transfert entre la houle et les mouvements d'un navire. Par contre l'analyse statistique est intéressante dès qu'on s'intéresse plus particulièrement aux processus statistiques, à la répartition des maximums et des minimums. Elle s'applique tout particulièrement aux fortes vagues, déferlement, phénomènes non-linéaires, pour lesquels l'analyse linéaire des fonctions de transfert n'est plus directement applicable.

Dans l'organisation des logiciels du LNH, une fois l'acquisition effectuée, il est possible de réaliser simplement l'une ou l'autre des analyses (figure 5). L'analyse statistique fournit l'ensemble des paramètres traditionnels d'étude des états de mer. (Période et hauteur moyenne, période et hauteur significative, répartition des maximums, des minimums...). La méthode d'analyse spectrale, outre qu'elle permet d'obtenir la houle incidente comme nous l'avons indiqué au paragraphe précédent, permet d'obtenir les principales caractéristiques du spectre (période du pic, variance,  $m_0$ , largeur spectrale,  $\epsilon$ , et paramètre de pic,  $Q_p$ ) ainsi que d'étudier le transfert entre différentes mesures, ce qui s'avère particulièrement intéressant pour l'étude des mouvements et des efforts.

## 3. Des résultats dans des domaines variés

### 3.1. La conception des digues à talus

L'introduction de la houle aléatoire dans les essais de comportement de digues a permis de mieux représenter les états de mer réels et de prendre en compte les effets non linéaires. En voici deux exemples.

*Etude générale sur le comportement des digues en houle aléatoire* : à la demande du Service central technique des ports et des voies navigables (Compiègne), le LNH a entrepris dès 1976 des études générales sur les digues ayant, entre autres buts, de comparer la stabilité des ouvrages en houle régulière et aléatoire. Ces essais ont été réalisés sur des carapaces constituées d'enrochements naturels ou de blocs cubiques. Ils ont montré, par utilisation de la formule d'Hudson, que l'action d'une houle aléatoire (de spectre Jonswap) pendant 3 heures était équivalente à celle d'une houle régulière de hauteur égale à la hauteur  $H_{1/10}$  du spectre, ce résultat étant à moduler en fonction de la durée de la tempête. Les essais, dont les résultats sont regroupés dans un ouvrage intitulé « Le Dimensionnement des Digués à Talus » [2] permettent, par l'équivalence rappelée ci-dessus, d'effectuer les études courantes de digues en houle régulière.

*Etude du comportement de la jetée « Punta Tonina »* : Le but des essais était l'étude du rechargement de la jetée de protection du port de l'île Rousse (Corse). Les essais effectués en houle aléatoire ont permis dans un premier temps de reproduire l'historique des dégâts effectivement constatés dans les dix dernières années et ensuite de comparer la stabilité obtenue en rechargement la digue par des blocs cubiques ou des Accropodes. Les essais, effectués dans la grande cuve d'agitation, ont été réalisés sur

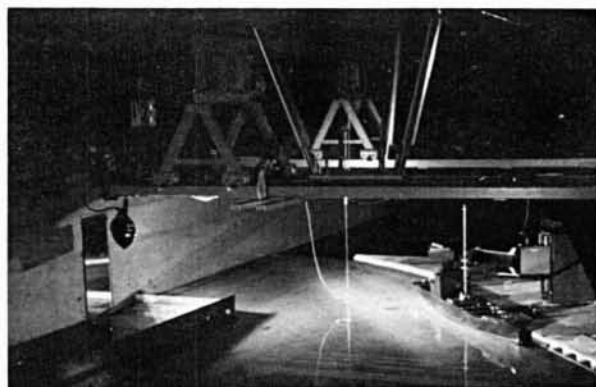


Figure 8. — Port de Basse Terre : Navire porte-conteneur à quai.



Figure 9. — Plateforme de travail (SGE-TPI) en cours d'étude.

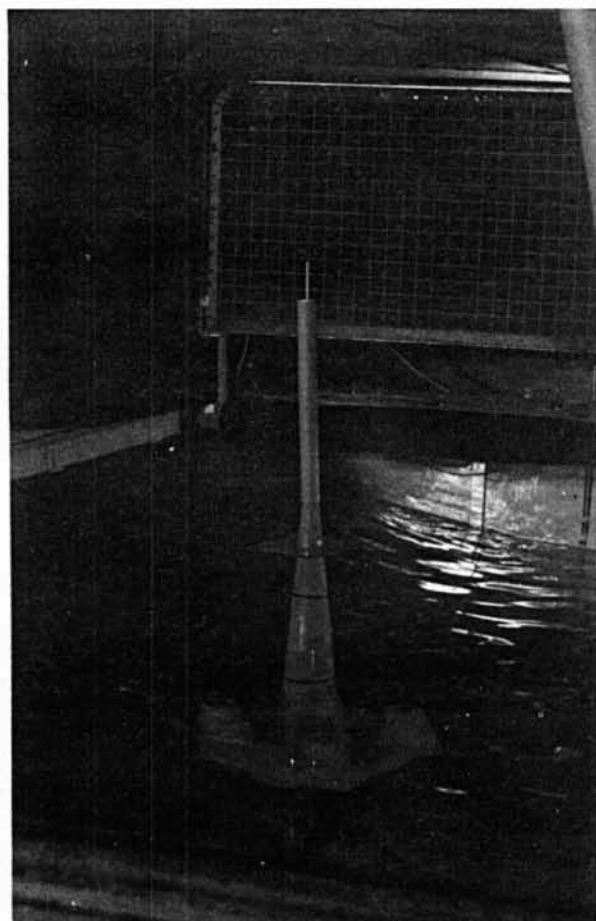


Figure 10. — Projet de phare flottant (C.G. Doris).

deux profils de digues en parallèle afin d'avoir une bonne comparaison entre les différentes solutions.

### 3.2. Les études d'agitation

L'étude d'agitation est fondamentale pour le développement des installations portuaires puisqu'elle permet de tester la protection offerte par le port projeté. Avec l'amélioration de la connaissance de l'environnement marin, et l'existence de projet de plus en plus ambitieux il est nécessaire de reproduire toute la complexité des situations réelles. L'étude en bassin s'applique particulièrement bien à ces problèmes puisqu'elle permet une bonne modélisation des phénomènes non linéaires intervenant dans ce problème, en particulier la dissipation d'énergie et la réflexion sur les digues à talus.

Nous pouvons prendre deux exemples issus d'essais récents. Dans le premier cas, il s'agit d'étudier les modifications à apporter au môle d'accostage des vedettes de l'île de Sein, afin que celui-ci puisse fonctionner un nombre maximal de jour par an, malgré la présence de houles de Nord-Ouest qui peuvent pénétrer dans le port à travers les hauts-fonds (figure 6). Dans une telle étude

une représentation précise de la bathymétrie est nécessaire, car celle-ci non seulement oriente les vagues par réfraction, mais écrête les plus fortes par déferlement. Cette étude a permis de déterminer la mise en place optimale de caissons absorbants en examinant les cartes d'agitation (figure 6). Simultanément on a pu s'intéresser à un problème de franchissement et de submersion à l'enracinement du môle.

Un autre exemple de la complexité des phénomènes étudiés est le cas du quai à porte-conteneur de Basse Terre (La Guadeloupe) (figure 8). Il s'agissait d'étudier les mouvements des navires à quai, afin de réduire le délai de chargement. Il ne s'agit plus ici de fortes houles, mais de valeurs moyennes ou faibles. Les mouvements du navire sont entravés par son amarrage. Les six composantes du mouvement ont été enregistrées à l'aide du bras de mouvement.

### 3.3. Les essais de comportement des structures

Les essais sur modèles réduits rendus nécessaires par la complexité des phénomènes mis en jeu en complément de modèles mathématiques, peuvent être classés en trois

grandes catégories. Tout d'abord le comportement des structures en cours de remorquage vers les sites d'exploitation. Le remorquage entre Paluel et Flamanville de la plate-forme de travail (SGE-TPI) (*figure 9*) qui sert à poser les têtes de rejet d'eau de refroidissement des centrales nucléaires en est un exemple. Il a été étudié avec des spectres de houle probables dans cette zone; les essais au cours desquels les mouvements de la structure étaient enregistrés, ont permis de définir la couverture météorologique nécessaire pour assurer un remorquage dans de bonnes conditions.

Puis la résistance d'une structure fixe : la structure est fixée à une balance hydrodynamique et l'on mesure les efforts exercés par les houles extrêmes. Ainsi plus d'une dizaine de projet de plate-forme et d'installation d'exploitation pétrolière en mer ont été étudiées au Laboratoire national d'hydraulique sur modèle réduit.

Enfin le comportement d'une structure flottante en exploitation : on enregistre les mouvements de la structure et les efforts dans les amarres ou liaisons pour différents états de mer correspondants à des états d'exploitation normale ou de survie. L'emploi de la houle aléatoire permet d'exciter la structure sur toute une gamme de fréquences et de prendre en compte les comportements non linéaires mis en évidence par l'analyse statistique des résultats. Dans les cas linéaires, les programmes d'analyse spectrale permettent le calcul des fonctions de transfert entre la houle et les mouvements et donc d'apprécier le comportement en fréquences de la structure. Ces techniques ont été appliquées pour l'étude du comportement d'un projet de phare flottant au large d'Ouessant (projet C.G. Doris) (*figure 10*). Cette structure a été testée pour des houles annuelles et centennales et l'ensemble des mouvements et les efforts dans les amarres ont été mesurés.

### Conclusions

Le Laboratoire national d'hydraulique s'est engagé depuis une dizaine d'années dans les essais en houle aléatoire et a acquis une expérience importante dans ce domaine : deux installations sont actuellement opérationnelles et leur taille « raisonnable » permettent d'effectuer une bonne part des études de génie côtier et maritime pour un coût modéré.

L'utilisation de la houle aléatoire s'avère utile, tout d'abord dans la simulation de comportements non-linéaires (fortes houles, amortissement sur les digues, effets de frottement visqueux) mais aussi pour des simulations plus

réalistes de phénomènes pour lesquels la théorie de la houle linéaire reste valable, comme l'agitation dans les ports sous l'action d'une mer du vent, en permettant de prendre simultanément en compte l'effet de plusieurs périodes de vagues. Cependant l'emploi généralisé de ce type d'études nécessite un développement en parallèle des connaissances de la houle naturelle tant sur le plan de la forme des spectres d'énergie en eau peu profonde ou dans des zones de bathymétrie particulière que sur le plan des caractéristiques statistiques du processus des vagues d'un état de mer donné.

### Bibliographie

- [1] Y. GODA. — Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation. *Rpt of the Port and Harbour Research Institute*, vol. 9, Sept. 1970.
- [2] J. FEUILLET, J. BERNIER, Y. COEFFE, B. CHALOIN. — *Le dimensionnement des digues à talus*. N° 59, Collection de la Direction des Etudes et Recherches — EDF — Eyrolles (à paraître en 1986).

*M. DARRAS* : Je voudrais faire quelques commentaires sur les questions que vous nous aviez posées, car il se trouve qu'une autre société savante, l'A.I.R.H., et en son sein la section d'hydraulique maritime, a organisé un groupe de travail sur les problèmes de modélisation en houle aléatoire. Notre laboratoire fait partie de ce groupe de travail.

Les buts de ce groupe sont d'encourager et de réaliser des échanges sur les méthodes d'analyse et de génération de vague en laboratoire, ainsi que d'établir une liste homogène des paramètres d'états de mer.

Le groupe de travail n'a pas encore déposé son rapport final, cependant je peux vous donner quelques indications. Nous avons fait des tests dans différents laboratoires en Europe du Nord et Amérique du Nord, et des comparaisons de différentes méthodes d'analyse etc... Nous nous sommes aperçus qu'en houle aléatoire, on pouvait obtenir des résultats qui en première analyse semblaient différents, simplement parce que l'on ne précisait pas les conditions d'analyse. C'est donc un premier point. Cela conduit, au niveau de la houle aléatoire, à être très précis sur ce que l'on dit et ce que l'on fait.

En ce qui concerne les méthodes de génération, il semble qu'actuellement il y ait deux grands groupes : le groupe « déterministe » qui génère des vagues de projet de hauteur donnée et le groupe « aléatoire » qui génère plutôt des vagues par une méthode statistique en se disant : « on verra bien quelle vague sera la plus forte ».

En fait, il semble que ces deux approches se rejoignent, mais dans les deux cas il est nécessaire d'avoir un contrôle de l'état de mer que l'on représente et donc je me rapprocherai certainement des chercheurs du L.C.H.F. qui concluent à l'intérêt d'avoir une génération numérique plutôt que physique. Ainsi l'on peut représenter des trains de vagues de spectres donnés avec des caractéristiques de valeurs extrêmes effectivement représentatives d'états de mer réels. On peut ainsi favoriser l'apparition d'états de mer extrêmes de projet qui ne sont peut-être pas courants dans les séries statistiques que l'on obtiendrait par hasard quand on fait de la simulation aveugle.

Enfin, au niveau du génie côtier apparaît un problème qui est celui des ondes longues. Il semble que seules les techniques numériques permettent de réaliser des boucles de contrôle qui assurent que les ondes longues présentes dans un bassin sont voisines des ondes longues présentes dans un état de mer.