

Modèles en hydraulique maritime

par **Jacques VIGUIER**

Responsable des Études Sédimentologiques

Département Ports et Côtes de SOGREAH Ingénierie

1. Nécessité de la modélisation	C 182 - 2
1.1 Nature des problèmes posés.....	— 2
1.2 Facteurs naturels mis en jeu.....	— 2
1.3 État de la connaissance de ces facteurs naturels.....	— 2
1.4 Nécessité de la modélisation.....	— 2
2. Divers modèles	— 3
2.1 Rappel des lois de similitude.....	— 3
2.2 Propagation de la houle entre le large et la côte	— 3
2.3 Agitation résiduelle dans un bassin portuaire	— 4
2.4 Stabilité des ouvrages maritimes.....	— 5
2.5 Phénomènes courantologiques.....	— 6
2.6 Modèles de qualité des eaux.....	— 7
2.7 Études des évolutions des fonds. Modèles sédimentologiques	— 8
2.8 Modèles hybrides	— 10
2.9 Autres modèles.....	— 11
3. Techniques de reproduction et de mesure des phénomènes sur les modèles réduits physiques	— 11
3.1 Appareillage de reproduction des phénomènes naturels.....	— 11
3.2 Appareillage de mesure	— 11
Pour en savoir plus	Doc. C 182

Le lecteur se reportera utilement à l'article **Mouvements de la mer** [C 4 610] dans ce traité.

1. Nécessité de la modélisation

1.1 Nature des problèmes posés

Le milieu marin est particulièrement inhospitalier pour l'homme, non seulement parce qu'il ne peut y vivre normalement, mais aussi parce que les mers et les océans sont soumis à de très nombreux mouvements dont la violence rend très délicat tout travail à partir de la surface.

L'homme a de tout temps utilisé les mers comme voie de communication et a simultanément été obligé de créer des abris pour assurer la liaison terre-mer. Il a également dû défendre son territoire contre les assauts de la mer.

L'espace littoral fait donc l'objet de nombreuses convoitises et ce d'autant plus que les migrations de populations vers les littoraux sont de plus en plus importantes. L'homme se trouve dans l'obligation de construire des ouvrages portuaires et d'aménager son littoral. Or, cet espace d'interface entre la mer et la terre est fragile, il est le siège d'un équilibre souvent précaire entre différents facteurs naturels ou humains. Ainsi, son importance dans notre environnement et sa sensibilité aux différentes interventions dont il peut être le théâtre font qu'il est nécessaire qu'il soit protégé ou aménagé avec respect (articles *Ouvrages de protection des côtes* [C 4 690] et *Défense du littoral* [C 4 695] dans ce traité).

1.2 Facteurs naturels mis en jeu

La mise au point de tels projets suppose une connaissance approfondie des facteurs naturels et notamment des divers mouvements de la mer.

Ces mouvements de la mer sont très variés car d'origines très diverses. Nous les rappelons brièvement et renvoyons le lecteur, pour plus de détails, à l'article spécialisé du présent traité.

1.2.1 Marées et variations du niveau de la mer

Les phénomènes astronomiques engendrent des oscillations à très longue période (en général 1 à 2 par jour suivant les régions du globe) que l'on appelle les **marées**, mais dont l'amplitude varie sans cesse en un point donné. Les mouvements de l'eau liés à ces oscillations se traduisent également par des **courants alternés**.

1.2.2 Houles

Les phénomènes météorologiques engendrent simultanément, sous l'effet des variations de la pression atmosphérique d'une part, et des vents d'autre part, des variations du niveau moyen de la mer et des courants. De plus, l'effet du frottement du vent sur la surface de la mer engendre des oscillations à courte période (entre 1 et 20 s) appelées la **houle**, qui est constituée en fait par une série de vagues de périodes et de hauteurs différentes. Lorsque ces phénomènes météorologiques atteignent l'intensité d'un **cyclone**, les mouvements ci-dessus deviennent très violents et peuvent provoquer une submersion exceptionnelle du littoral. On les appelle alors communément des **raz de marée**. Les tremblements de l'écorce terrestre peuvent provoquer aussi de fortes oscillations analogues appelées **tsunamis**.

1.2.3 Courants marins

Enfin, les variations de température ou de densité à l'intérieur de la masse liquide, ainsi que la rotation de la terre, engendrent des **courants marins généraux**, distincts des **courants de marée** ou des **courants dus aux vents**.

Ce bref rappel permet de se rendre compte de la variété et de la complexité des facteurs naturels à prendre en compte quand il s'agit d'établir un projet d'ouvrage maritime.

1.3 État de la connaissance de ces facteurs naturels

1.3.1 Marée

La marée est connue de façon assez précise déjà depuis longtemps et les théories élaborées pour analyser ce phénomène ont permis d'établir des annuaires donnant, avec une approximation souvent suffisante, les prévisions de son amplitude pour chaque jour en de nombreux points du globe.

1.3.2 Houle

La houle est, par contre, un phénomène beaucoup plus aléatoire, aussi bien dans le temps qu'en direction et intensité, puisqu'il est lié aux situations météorologiques.

Elle ne peut donc être connue que statistiquement dans une zone donnée. Sa déformation au voisinage des côtes nécessite qu'elle soit mesurée à une certaine distance du rivage. Depuis une vingtaine d'années, plusieurs appareils enregistreurs ont été utilisés.

Malgré l'effort entrepris, hormis certaines zones spécialement explorées, les mesures ne sont souvent que fragmentaires et ne peuvent permettre l'établissement de statistiques fiables. De plus, elles sont la plupart du temps limitées à la hauteur et à la période.

Pour compenser ce manque de mesures systématiques, on utilise :

- les observations effectuées à bord des navires et rassemblées par les organismes météorologiques ;
- les observations des états de la mer effectuées soit à partir des sémaphores, soit visuellement près de la côte par un observateur terrestre, donc relativement imprécises.

Il est aussi possible d'utiliser des modèles de prédiction pour déterminer la houle dans une zone à partir de cartes météorologiques de situations données.

1.3.3 Courants

Les courants marins généraux et les courants de marée sont plus constants, quoique ces derniers varient d'une marée à l'autre, mais leur mesure est plus aisée et leur connaissance en une zone donnée relativement facile à déterminer. Il peut toutefois s'y superposer des courants dus aux vents, dont l'importance relative est très variable d'une zone à l'autre.

■ En définitive, le facteur le plus important dans la plupart des études maritimes est la **houle** et c'est malheureusement le plus difficile à connaître.

1.4 Nécessité de la modélisation

Les ouvrages et aménagements maritimes sont généralement très coûteux ; il est donc nécessaire, avant de les réaliser, de bien prévoir leur fonctionnement.

Ainsi, lors de la mise au point du projet, il faut :

- s'assurer que les objectifs visés seront atteints (par exemple, bassin portuaire bien abrité, pérennité d'une plage et/ou de l'urbanisation située en arrière assurée par un aménagement du littoral, etc.) ;
- s'assurer que les ouvrages seront capables de bien résister aux actions de la mer ;

— prévoir les risques d'ensablement (et/ou d'envasement) d'un port, définir les impacts sur les fonds et littoraux avoisinants et proposer des mesures compensatoires si besoin est ;

c'est-à-dire optimiser le projet tant au point de vue économique, que technique, que de son impact sur l'environnement.

Les phénomènes en jeu étant très complexes, des outils ont été développés pour améliorer la connaissance des processus hydrodynamiques et sédimentologiques et pouvoir ainsi mieux étudier la conception et les impacts des aménagements maritimes. Les modèles constituent l'essentiel de ces outils.

Leur objectif est de permettre d'appréhender une nature très complexe en un temps très court par rapport à la durée des phénomènes en nature. À la base, les modèles reposent donc nécessairement sur une analyse des facteurs en présence et une évaluation de l'importance de chacun d'eux dans le processus général à étudier. Cela est fondamental pour définir les facteurs à simuler correctement et ceux qui peuvent, dans une certaine mesure, être négligés. En effet, un modèle est forcément restrictif, il ne peut reproduire toute la complexité des phénomènes naturels.

On distingue :

- les modèles réduits physiques ;
- les modèles mathématiques ;
- les modèles hybrides qui sont la combinaison des deux précédents.

Les modèles réduits sont historiquement les plus anciens et les premiers à avoir été utilisés il y a maintenant plus d'un demi-siècle. Une bonne modélisation physique repose sur la qualité du matériel de reproduction et de mesure des phénomènes naturels, un bon choix des échelles de réduction et la pratique d'un bon réglage. Ces deux derniers sont essentiellement fonction de l'expérience du laboratoire. Une fois le modèle réglé, il simule de lui-même les phénomènes induits sans exiger la connaissance théorique fine des phénomènes.

On peut reprocher au modèle réduit physique :

- une emprise forcément limitée de la zone couverte ;
- son encombrement qui nécessite des halls d'essais de grande superficie et un appareillage spécifique ;
- sa durée de vie limitée, car il est généralement détruit après son exploitation.

Il y a une vingtaine d'années sont apparus les premiers modèles mathématiques qui permettent de résoudre numériquement les équations théoriques régissant le phénomène dans un domaine donné.

Les progrès des modèles mathématiques sont liés à trois aspects imbriqués de la science :

- la connaissance physique et mathématique des phénomènes en croissance rapide sous l'impulsion des besoins et moyens mis en œuvre ;
- les techniques mathématiques (analyses numériques) apparues il y a une trentaine d'années avec l'arrivée des premiers ordinateurs ;
- les moyens de calcul qui deviennent chaque jour plus puissants avec des coûts constamment en baisse, ce qui rend possible des calculs de plus en plus importants et complexes.

Par rapport au modèle physique, le modèle mathématique permet de couvrir des zones géographiques très grandes, son encombrement est nul, son exploitation est plus rapide et il peut être conservé, ce qui permet sa réutilisation ultérieure.

De plus, les techniques modernes de visualisation des résultats, telles que les animations vidéo, permettent des présentations des résultats dont la convivialité se rapproche de celles des modèles réduits physiques.

Toutefois, le modèle mathématique ne constitue pas une panacée. En effet, il ne peut simuler que les phénomènes dont on connaît les lois les régissant. Ce n'est pas toujours le cas, et pour un certain nombre tel, par exemple, que l'action des houles ou des courants sur les sédiments, les lois sont toujours de nature empirique et n'ont pas de caractère universel.

Pour les études d'aménagements maritimes, il existe aujourd'hui toute une panoplie de modèles physiques et mathématiques. Si pour certains types d'études ils sont en concurrence, ils sont souvent complémentaires.

Pour les principaux cas d'étude, il va être examiné quels sont les modèles qui peuvent être mis en œuvre, en faisant apparaître ce qui est du ressort du modèle physique et ce qui peut être traité par une modélisation mathématique.

2. Divers modèles

2.1 Rappel des lois de similitude

Il y a lieu tout d'abord de rappeler que les modèles réduits physiques hydrauliques doivent satisfaire à une similitude géométrique et à une similitude cinématique et dynamique. En effet, le but de tels modèles est de reproduire des mouvements de l'eau et son action sur des obstacles (ouvrages, fonds, etc.).

Sans entrer dans le détail, rappelons que les mouvements d'un fluide réel à surface libre sont le résultat de l'action des forces de gravité et des forces de frottement dues à la viscosité. Les premières sont respectées sur le modèle si les échelles adoptées permettent de conserver le nombre de Froude $Fr = V/\sqrt{gh}$ où V est la vitesse de l'écoulement, g l'accélération de la pesanteur et h la profondeur d'eau.

La reproduction en similitude des forces de viscosité suppose l'invariance du nombre de Reynolds $Re = VD/\nu$, V étant la vitesse, D une longueur caractéristique (la hauteur d'eau généralement) et ν la viscosité cinématique de l'eau.

Théoriquement, l'emploi du même liquide sur le modèle que dans la nature rend impossible le respect simultané de ces deux lois de similitude. Fort heureusement, dans la plupart des cas d'écoulements à surface libre, les forces de pesanteur sont prépondérantes, et dans la nature les écoulements sont turbulents. Il suffit, dans ce cas, que le nombre de Reynolds sur le modèle soit supérieur à une valeur critique correspondant au passage de l'écoulement laminaire à l'écoulement turbulent. Autrement dit, la similitude de Froude est en général possible, la similitude de Reynolds n'intervenant que pour fixer des limites inférieures aux échelles de réduction.

Dans certaines études, la nécessité de reproduire de grandes surfaces conduit à réduire de façon relativement importante les dimensions en plan (échelle en plan comprise le plus souvent entre le $1/150^{\text{e}}$ et $1/400^{\text{e}}$). Pour satisfaire la condition de Reynolds, les hauteurs sont moins réduites (entre le $1/70^{\text{e}}$ et le $1/120^{\text{e}}$), le modèle est alors distordu. Dans le cas de modèle de houle, les modèles sédimentologiques notamment (§ 2.7.2), on applique la similitude dite de Froude généralisée, qui consiste à réduire les longueurs d'onde et les hauteurs des houles à l'échelle des hauteurs. Cela permet de simuler exactement les phénomènes de réfraction ; la diffraction n'est qu'approchée.

2.2 Propagation de la houle entre le large et la côte

Au cours de sa propagation entre le large et la côte, la houle subit des déformations du fait de sa réfraction sur les fonds et des effets de diffraction latérale. Ces déformations dépendent des caractéristiques de la houle au large (période, hauteur et direction de provenance) et du relief des fonds.

La direction de provenance peut être notablement modifiée ainsi que la distribution des hauteurs le long du littoral, avec des zones où celles-ci sont augmentées (zones de concentration d'énergie) ou au contraire diminuées (zones d'atténuation de l'énergie).

La mise au point de tout aménagement côtier nécessite de connaître le régime des houles à la côte et donc d'y transposer le régime des houles au large, qui est généralement connu à partir d'observations de navires.

Cette transposition s'effectue à l'aide de modèles mathématiques de réfraction. Les premiers modèles apparus il y a plus de 20 ans étaient basés sur la théorie linéaire de la houle au premier ordre. Les modèles actuels utilisent des théories non linéaires (houles au 3^e ordre) permettant la prise en compte de l'effet de cambrure de la houle et des effets de diffraction latérale.

De ce fait, ils rendent compte des phénomènes de réfraction dans des cas où le relief est complexe (présence de hauts-fonds, chenaux, etc.) et où les modèles basés sur la théorie linéaire n'étaient plus à même de produire des résultats valides.

Les résultats se présentent soit sous la forme de plans de vagues (tracé des crêtes de vagues et des orthogonales) (figure 1), soit sous la forme de cartes donnant les isohauteurs des vagues.

2.3 Agitation résiduelle dans un bassin portuaire

2.3.1 But des études

Dans le cadre de l'établissement d'un projet portuaire, de telles études ont pour but de s'assurer que le tracé en plan des digues portuaires et de l'aménagement intérieur fera que les critères d'agitation résiduelle admissible dans les différentes zones du port seront satisfaits. Ces critères sont généralement le non-dépassement, pendant des tempêtes, de certaines hauteurs d'agitation pour assurer la sécurité des bateaux (cas des ports de plaisance) ou permettre les opérations de chargement et de déchargement (cas des ports de commerce).

2.3.2 Phénomènes à reproduire

Les phénomènes à reproduire se ramènent essentiellement à la propagation de la houle :

- réfraction sous l'effet des fonds variables ;
- diffraction autour des ouvrages portuaires ;
- réflexions partielles ou totales des houles incidentes sur les ouvrages.

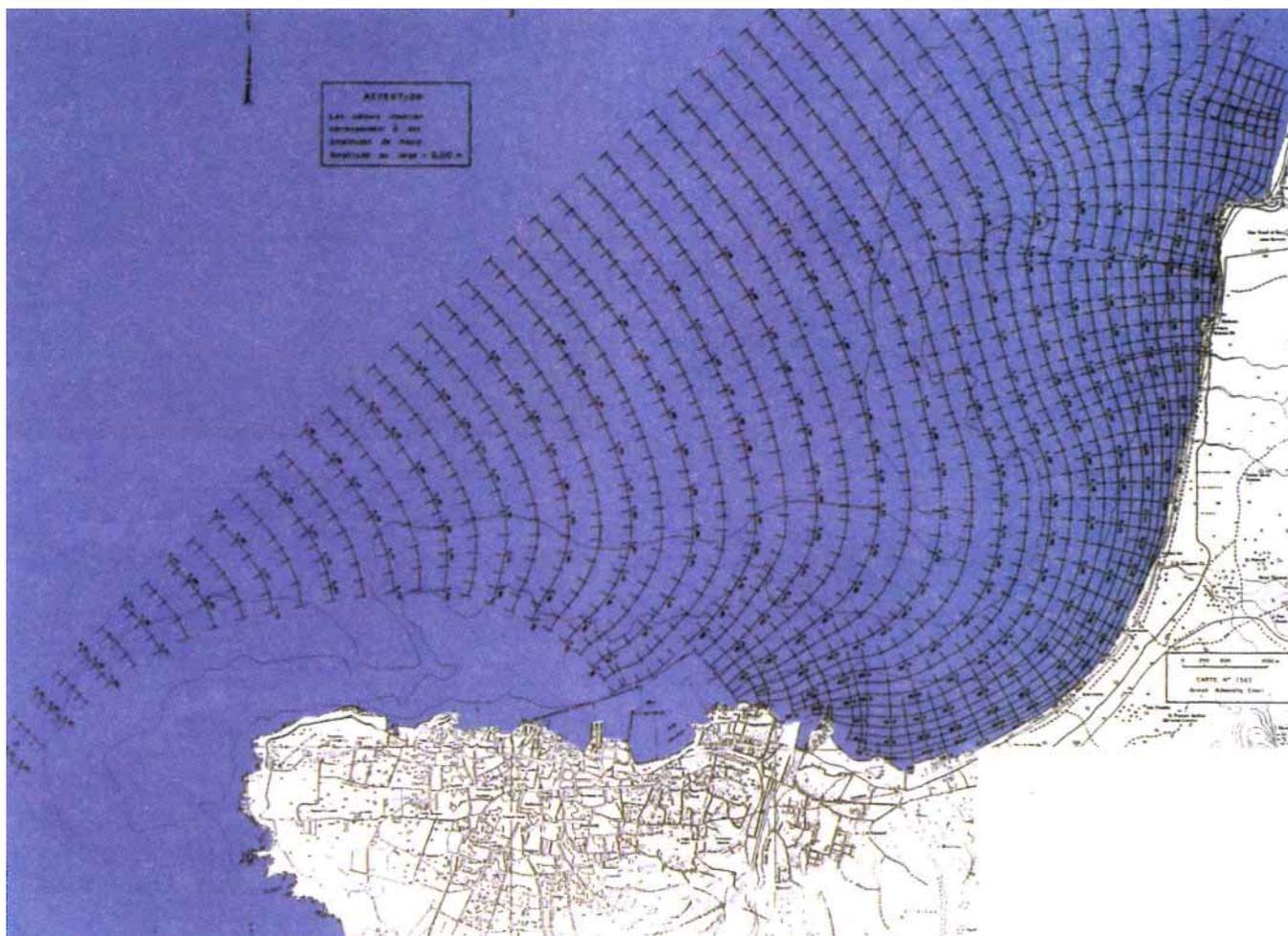


Figure 1 – Plan de vague

Actuellement, dans la plupart des cas, la modélisation mathématique a supplanté la modélisation physique.

2.3.3 Modèles physiques

Ces modèles appliquent la similitude de Froude et ne sont pas distordus afin de reproduire convenablement les phénomènes de diffraction et de réflexion. Les échelles habituellement adoptées sont comprises entre le $1/50^e$ et le $1/150^e$.

Une échelle plus petite que le $1/150^e$ ne peut être adoptée qu'avec précaution, car elle peut entraîner des *effets modèle* tels qu'un amortissement trop important de la houle provoqué par la trop grande importance des forces de viscosité dans la masse d'eau, un frottement excessif sur les fonds, et des phénomènes de tension superficielle à la surface libre.

Ces modèles hydrauliques sont construits dans des cuves à houle équipées d'un générateur de houle en trains d'ondes ou aléatoire dont l'orientation peut être modifiée. La mesure de l'agitation résiduelle s'effectue à l'aide d'un réseau de sondes fixes ou mobiles. Le traitement des données permet d'obtenir des cartes d'iso-agitation.

Les investigations à l'aide de ces modèles sont analogues à celles des modèles mathématiques, elles sont cependant plus lourdes, car elles nécessitent pour toute nouvelle configuration ou modification la reconstruction à l'échelle des ouvrages portuaires.

2.3.4 Modèles mathématiques

Les modèles mathématiques utilisent généralement la théorie linéaire de la houle. Les structures portuaires sont prises en compte par leur configuration géométrique. Des coefficients de réflexion à la houle leur sont attribués ainsi que des coefficients de transmission dans le cas où elles sont submersibles et/ou perméables. Ces coefficients sont connus pour les types d'ouvrages classiques (digue à talus, mur vertical) ou déterminés par des essais ou des calculs spécifiques pour des structures particulières.

La houle incidente est définie par sa hauteur, sa période et sa direction au large immédiat de l'entrée du port. Les résultats se présentent sous forme de cartes d'iso-agitation (figure 2). La direction de la houle locale peut également être indiquée.

Ces modèles, très souples d'utilisation, constituent un excellent moyen d'investigation, car ils permettent de modifier très facilement les structures portuaires (orientation, longueur de digue, aménagements intérieurs) de manière à déterminer le tracé le plus économique répondant aux critères imposés. Ils ne permettent pas de rendre compte de certains problèmes particuliers comme, par exemple, le gonflement de la houle (onde de Mach) qui se produit le long d'une jetée quand celle-ci est attaquée par faible incidence. Pour de tels cas, il est nécessaire d'avoir recours à la modélisation physique.

2.4 Stabilité des ouvrages maritimes

2.4.1 But des études

Il convient, pour tout ouvrage maritime, de s'assurer de la tenue de l'ouvrage, qui doit résister à l'action dynamique de la houle pour les tempêtes les plus fortes à craindre dans le site considéré.

2.4.2 Phénomènes à prendre en compte

Lorsqu'une vague atteint un obstacle, une partie de son énergie se réfléchit et se superpose à l'énergie incidente pour donner naissance au *clapotis*, une autre est transmise derrière l'ouvrage, par exemple en franchissant sa crête, ou encore en se propageant dans le massif en enrochements constituant le corps de la digue.

De très nombreuses études expérimentales ont permis d'observer les processus d'action de la houle sur différents types d'ouvrages (digues verticales, digues à talus, digues mixtes) et de dégager des formules utilisables pour prédimensionner un ouvrage au stade d'avant-projet.

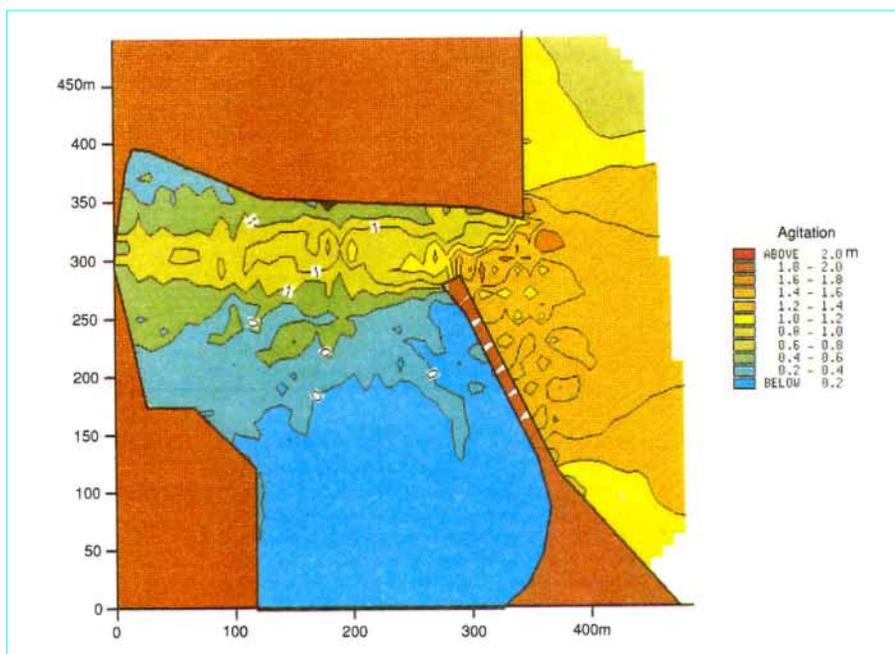


Figure 2 – Calcul de l'agitation résiduelle dans un bassin portuaire

(projet de port de plaisance à Port Joinville, Ile d'Yeu)

Ces formules empiriques sont insuffisantes pour optimiser le dimensionnement des ouvrages. Aussi, le coût élevé de ces ouvrages maritimes justifie-t-il toujours le recours à une modélisation qui, étant donné la complexité des interactions houle-ouvrage, est pour l'instant et probablement pour longtemps encore du domaine des modèles réduits physiques.

2.4.3 Étude à deux dimensions

Habituellement, la mise au point du profil s'effectue d'abord à deux dimensions (crêtes des vagues parallèles à la digue) dans un canal ayant le plus souvent 1 à 2 m de largeur et 50 m au moins de longueur. Ce canal est équipé d'un générateur de houle aléatoire. Le modèle est construit à une échelle suffisamment grande, habituellement comprise entre le 1/30^e et le 1/60^e, pour permettre la construction en similitude de Froude non distortue de tous les éléments constitutifs de l'ouvrage.

La masse volumique de ces derniers sera la même qu'en nature (à une petite correction près du fait que l'eau du modèle est douce).

Le profil est soumis à des houles qui ont généralement des périodes de retour allant de 20 à 100 ans suivant le type d'ouvrage concerné (port de plaisance, grande digue d'un port de commerce).

Certains phénomènes ne sont pas reproduits de façon rigoureuse, comme la transmission de la houle dans le massif. D'autres ne peuvent l'être, comme la résistance des blocs. En toute rigueur, il serait nécessaire d'utiliser sur le modèle des blocs présentant aux échelles de réduction la même résistance mécanique. Autrement dit, les contraintes internes qui sont homogènes à des longueurs devraient être réduites à l'échelle des longueurs. En théorie ce n'est pas absolument impossible, mais cela présente de grandes difficultés pour obtenir de façon fiable et répétitive le degré de résistance et de fiabilité voulu.

Il est par contre possible, sur le modèle, de mesurer à l'aide d'une balance les efforts subis par un bloc ou une partie de la structure (caisson d'une digue par exemple). Par ailleurs, la résistance propre de ces éléments peut être déterminée à l'aide d'essais spécifiques (essais de chute dans le cas de blocs) ou de calculs de résistance dans le cas de structure. Cela permet de s'assurer qu'il y a compatibilité entre les efforts engendrés par la houle et la résistance de la structure.

Les comparaisons qui ont pu être effectuées sur le comportement d'ouvrages dans la nature et sur le modèle sont satisfaisantes, pour autant que ces études soient réalisées par des laboratoires possédant une grande expérience de ce type d'essai.

2.4.4 Études à trois dimensions

Les études à deux dimensions destinées à mettre au point le profil courant d'un ouvrage sont souvent complétées par des études à trois dimensions dans un bassin à houle de grande superficie (400 à 600 m²) (figure 3), afin d'examiner certains problèmes particuliers tels que :

- l'influence des fonds et/ou de l'obliquité des vagues sur les conditions d'attaque de la houle ;
- la stabilité de points singuliers tels que les musoirs d'extrémité, les points anguleux (coudes).

De tels essais peuvent également être utiles pour apprécier les risques de dommages en cas de tempête survenant pendant les phases de travaux et pour rechercher les protections provisoires à prévoir en cas d'annonce de tempête et/ou d'arrêt du chantier.

De telles études sont effectuées aux mêmes échelles que celles à deux dimensions, mais dans un bassin à houle de grandes dimensions qui permet de reproduire un plus grand linéaire d'ouvrage. Par exemple, après étude du profil au 1/50^e dans un canal de 1 m de large, un tronçon de l'ouvrage de plusieurs centaines de mètres de longueur et comprenant le musoir peut être étudié à la même échelle, en général, dans une cuve à houle de 10 à 15 m de large.



Figure 3 – Étude de stabilité en cuve à houle
(projet de port de plaisance à Saint-Hilaire de Riez, Vendée)

2.5 Phénomènes courantologiques

2.5.1 But des études

La mise au point d'un projet peut nécessiter la connaissance des courants dans l'ensemble du site, soit pour préciser l'impact d'aménagements, soit pour examiner, par exemple, l'expansion d'un rejet thermique ou de polluants.

2.5.2 Phénomènes à reproduire

Les phénomènes à reproduire sont essentiellement les variations spatio-temporelles des courants (et éventuellement les niveaux d'eau) engendrés par la marée, les vents, les débits fluviaux (cas des estuaires) et les écarts de densité (coin salé par exemple).

Les grands modèles physiques qui étaient utilisés jadis sont le plus souvent remplacés par des modèles mathématiques qui permettent de couvrir des zones bien plus étendues.

2.5.3 Modèles mathématiques

Les modèles mathématiques courantologiques résolvent les équations dites de Navier-Stokes qui permettent en théorie de décrire et de prédire à peu près tous les mouvements marins.

En pratique, leur résolution est très complexe et l'on est conduit à les simplifier cas par cas pour résoudre chaque problème à un coût raisonnable. Une séparation est effectuée au niveau des fréquences :

- haute fréquence (la turbulence) ;
- mouvements de quelques heures de période (la marée) ;
- mouvements à très long terme (la circulation générale).

On limite aussi le nombre de coordonnées spatiales, et sont ainsi définis :

- les modèles unidimensionnels qui sont adaptés au milieu fluvial et présentent peu d'intérêt dans le milieu marin, sinon pour les estuaires ;
- les modèles bidimensionnels (plans horizontal et vertical) qui constituent actuellement l'outil généralement utilisé dans les études appliquées ; ils sont performants, rapidement mis en œuvre, et précis (tout au moins suffisamment par rapport aux problèmes posés) ;
- les modèles tridimensionnels qui, par rapport aux modèles bidimensionnels, intègrent les distributions verticales.

Ces derniers, plus récents que les modèles bidimensionnels, sont d'utilisation plus complexe et sont surtout plus coûteux ; leur utilisation est généralement réservée à des zones de faible emprise où ils sont en concurrence avec la modélisation physique.

Dans tous les cas, le modèle calcule :

- les courants ;
- les niveaux d'eau ;

en tout point et à tout instant d'un domaine choisi, à la condition de satisfaire aux impératifs suivants :

- connaître les flux d'eau apportés par les fleuves, émissaires, etc., dans le domaine ;
- disposer à chaque instant du niveau de l'eau sur le périmètre du domaine étudié.

Cette dernière condition est très contraignante car les niveaux d'eau sont rarement connus avec la précision suffisante. Si les conditions aux limites sont très proches de la zone d'étude, une très faible erreur sur les niveaux engendre de très fortes erreurs sur les courants. Pour pallier cela, on procède souvent par approches successives selon la méthode des modèles emboîtés.

Un premier modèle de très grande emprise (à l'échelle d'une ou plusieurs mers) utilise pour conditions aux limites la marée au large, un second de taille plus réduite (modèle « régional ») utilise pour conditions aux limites les résultats du précédent, et ainsi de suite. On peut de cette manière déterminer les courants à l'échelle d'une baie ou d'un site portuaire. Il faut remarquer que les résultats des modèles à grande emprise peuvent être utilisés pour déterminer les limites de modèles particuliers à différents sites.

La taille des mailles de calcul peut varier de plusieurs kilomètres (modèles de grande emprise) à quelques mètres (modèles de détail).

Ces modèles permettent de connaître les courants dans l'ensemble d'un domaine donné et de compléter ainsi les *mesures nature* ponctuelles sur lesquelles ils ont été le plus souvent comparés et calés. Cependant, leur principal intérêt réside dans les simulations qu'ils permettent, c'est-à-dire la connaissance d'une situation future résultant de modifications de la géométrie du domaine (création d'un port, creusement d'un chenal, etc.).

Les principaux phénomènes physiques qui peuvent être modélisés sont les suivants.

■ **Courants de marée** : la marée est le phénomène le plus facile à simuler, car elle est totalement déterministe et les lois sont bien connues. De plus, la marée agit de manière quasiment uniforme sur l'ensemble de la couche d'eau et les modèles bidimensionnels rendent bien compte des courants qu'elle induit (la Manche en est un exemple typique).

■ **Courants engendrés par le vent** : les courants engendrés par le vent peuvent être simulés par la prise en compte des contraintes de cisaillement qu'il induit à la surface de l'eau.

En toute rigueur, l'utilisation de modèles tridimensionnels serait nécessaire du fait des mouvements verticaux induits. Cependant, les modèles bidimensionnels sont encore le plus souvent utilisés du fait de leur moindre coût et de leur facilité d'utilisation. Les résultats sont, en partie, erronés.

■ **Courants engendrés par la houle** : ces courants peuvent être simulés par la prise en compte des contraintes de radiations induites par la houle. Comme pour le vent, les modèles tridimensionnels seraient nécessaires, mais en pratique l'utilisation de modèles bidimensionnels prédomine.

■ **Courants de densité** : ces courants sont engendrés par le mélange de deux fluides ayant des densités différentes (eau douce, eau salée, eau claire, eau turbide, etc.). Leur représentation nécessite des modèles tridimensionnels ou tout au moins des modèles ayant plusieurs points sur la même verticale (modèles multicouches).

● **Forme des résultats**

Ces modèles fournissent des fichiers des courants et niveaux de l'eau à des intervalles de temps réguliers. Ces fichiers sont traduits sous forme de cartes où la direction et la vitesse du courant sont matérialisées par une flèche orientée dans le sens du courant et dont la longueur est proportionnelle à la vitesse (figure 4). Ces fichiers peuvent être traités de façon à créer une animation qui permet de visualiser les écoulements.

2.5.4 Modèles physiques

Les modèles physiques purement courantologiques ne sont plus utilisés que pour des études de détail où les phénomènes tridimensionnels prédominent (champ proche d'un rejet, structures complexes), domaine où jusqu'à présent ils ne sont pas surpassés (ni techniquement, ni économiquement) par les modèles mathématiques.

Ils viennent souvent en complément d'un modèle mathématique qui couvre le site considéré et avec lequel il échange des données (modélisation dite *hybride*).

De tels modèles physiques sont non distortus (ou très peu) avec des échelles de réduction comprises entre le 1/40^e et le 1/100^e.

L'exploitation de tels modèles conduit à la mesure des courants et des niveaux d'eau (marée) pour diverses configurations et marées types.

2.6 Modèles de qualité des eaux

Cette catégorie recouvre les modèles qui permettent de suivre le champ de concentration de toute substance diluée ou dissoute dans l'eau (polluant, phytoplancton, composant chimique ou organique, matières en suspension).

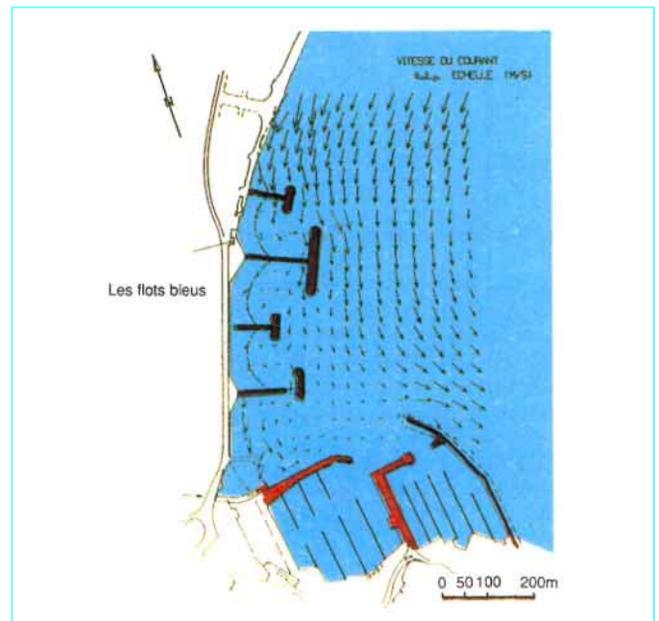


Figure 4 – Calcul d'un champ de courants engendré par le vent (15 m/s, NE) (Cavalair)

Le plus souvent, il y a :

- le rejet caractérisé par sa géométrie, son débit, la nature et la concentration du polluant ;
- le milieu récepteur caractérisé par son régime hydrodynamique (marées, courants, houles, vents), son pouvoir dispersif.

On distingue :

- le champ proche, où dominent les caractéristiques hydrodynamiques du rejet ;
- le champ lointain, où dominent les caractéristiques du milieu récepteur.

Les modèles mathématiques sont, la plupart du temps, utilisés ; les modèles physiques sont parfois utilisés pour l'étude des champs proches.

2.6.1 Modèles mathématiques

Ces modèles résolvent les équations de convection et de diffusion d'un champ de concentration en prenant éventuellement en compte les relations de modifications chimiques ou biologiques au cours du temps.

Ils sont généralement indépendants du calcul des caractéristiques hydrauliques des écoulements, qui ont dû être déterminées auparavant par des modèles purement hydrauliques (§ 2.5).

Ces modèles peuvent être bidimensionnels ou tridimensionnels.

Les modèles bidimensionnels, plus souples à mettre en œuvre, peuvent être utilisés dans la mesure où la diffusion turbulente est suffisante pour assurer une concentration uniforme le long de la verticale (comme par exemple dans les zones côtières soumises à un mouvement de marée) (figure 5). Le modèle bidimensionnel du champ lointain peut être couplé à un modèle du champ proche, lequel peut être un modèle physique (procédure utilisée, par exemple, pour les rejets d'eau chaude des centrales nucléaires étudiées au cours des années 70 et 80) ou un modèle mathématique.

2.6.2 Modèles physiques

Ce sont des modèles hydrauliques (courants et houle) non ou faiblement distordus, à des échelles comprises entre le 1/50^e et le 1/100^e fonctionnant en similitude de Froude.

L'effluent est simulé par un fluide (l'eau généralement) dont la température et la concentration peuvent être fixées (chaudière permettant de chauffer les eaux pour la température et adjonction de sel pour adapter la concentration). L'ajout de colorant permet de visualiser le rejet. Les mesures sont effectuées par des sondes de température et de salinité placées sur des supports mobiles couvrant le modèle.

L'exploitation du modèle consiste à mesurer l'extension et la concentration de la tache de l'effluent au cours du temps pour des conditions océanographiques caractéristiques. Diverses configurations de rejet peuvent être examinées. Par exemple, dans le cas d'une centrale électrique, il sera recherché les configurations conduisant à minimiser la recirculation des eaux chaudes.

2.7 Études des évolutions des fonds. Modèles sédimentologiques

2.7.1 But des études

Cette catégorie d'études concerne l'action de la houle et des courants sur les sédiments marins et l'évolution des fonds qui en découle (article *Ouvrages de protection des côtes* [C 4 690] dans ce traité).

Elle recouvre un grand nombre de problèmes, comme :

- l'ensablement et/ou l'envasement des ports et de leurs accès ;
- l'érosion et la protection du littoral ;
- l'impact d'ouvrages sur les fonds et sur le littoral ;
- la création ou la restauration de plages.

Encore aujourd'hui, la modélisation physique est le moyen privilégié d'étude.

La modélisation numérique fait l'objet de recherches importantes. Pour certains types de problèmes, relativement simples, des modèles mathématiques sont d'ores et déjà opérationnels.

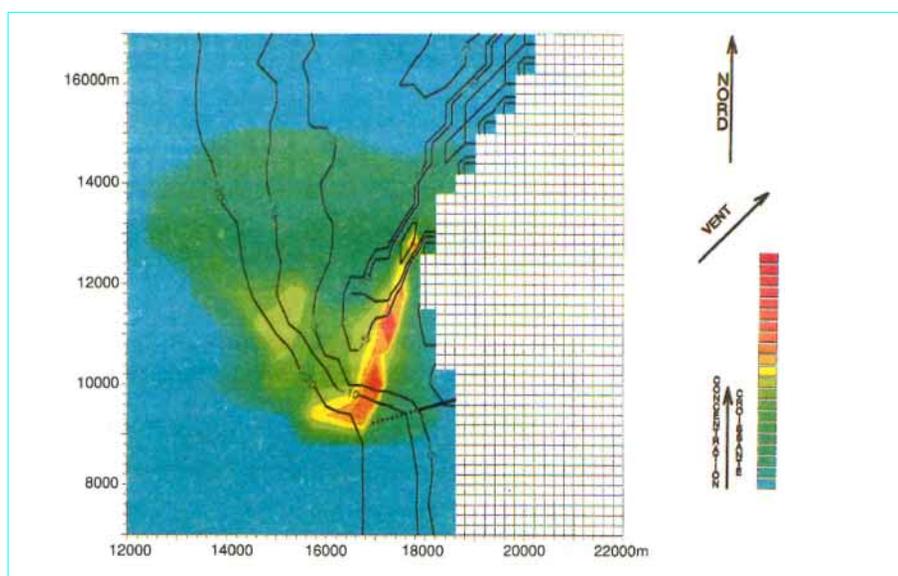


Figure 5 – Calcul de l'extension en mer d'un rejet de polluants

2.7.2 Modèles réduits sédimentologiques

Ces modèles, véritablement opérationnels, ont près d'un demi-siècle d'existence. Ils ne nécessitent pas la connaissance fine des phénomènes. Le fait que le modèle, une fois bien réglé, simule de lui-même les phénomènes suffit à valider son exploitation, à condition que les essais soient réalisés dans le même domaine (par exemple un modèle étalonné uniquement sur des processus de sédimentation ne peut, en toute rigueur, être utilisé pour examiner des processus d'érosion).

Ces modèles doivent simuler la dynamique hydrosédimentaire d'un site donné, c'est-à-dire qu'ils doivent reproduire à la fois les phénomènes hydrauliques (houles, marées, courants) et les phénomènes sédimentologiques (la reprise, le transport et le dépôt des sédiments).

La similitude de Froude doit être complétée par une *similitude sédimentologique*, qui permet entre autres de définir le matériau (densité et granulométrie) et de simuler le sédiment naturel et l'échelle des temps sédimentologiques (rapport entre les durées *modèle* et *nature* pendant lesquelles, sous des actions hydrauliques homologues, se produisent des évolutions de fond analogues).

La similitude hydrodynamique repose sur des lois physiques universelles découlant de la mécanique des fluides. Par contre, la similitude sédimentologique repose sur des formules empiriques (critères de début d'entraînement, transport et dépôt de sédiments) ayant des caractéristiques spécifiques suivant le type d'action hydraulique (courants, houles), la nature du sédiment (sable, galet, vase). Par ailleurs, il n'existe, pour simuler le sédiment naturel, qu'une gamme limitée de matériaux techniquement et économiquement utilisables (matières plastiques, bakélite, nacre artificielle, poudre de bois, vase naturelle traitée, sable). Ainsi, il n'y a pas une, mais des similitudes sédimentologiques, et chaque laboratoire a développé ses méthodes propres basées sur son expérience, laquelle est finalement le garant de la qualité de l'étude. Malgré cette diversité, les laboratoires sont arrivés à des approches dont les grandes lignes sont finalement peu différentes.

2.7.2.1 Principales caractéristiques des modèles

Pour fixer les idées, nous allons indiquer ci-après les principales caractéristiques des modèles sédimentologiques maritimes.

Ces modèles doivent permettre d'étudier des longueurs de côte généralement comprises entre 3 et 6 km et s'étendant vers le large sur 2 à 4 km.

Ces modèles sont construits en maçonnerie à partir des levés des fonds dans des cuves à houle ayant 700 à 1 500 m² de surface. Ces cuves sont équipées de l'appareillage de reproduction des phénomènes naturels (générateurs de houle, de marée et de courant).

Une étude sur modèle réduit sédimentologique comprend les phases successives suivantes :

- construction du modèle ;
- réglage hydraulique : reproduction des phénomènes hydrodynamiques du site (houles, marées, courants,...) ;
- réglage sédimentologique : mise au point d'un cycle annuel qui est la succession schématisée des houles naturelles (hauteurs, périodes et directions) telle qu'elle a pu être observée sur le site lors d'une année moyenne, c'est-à-dire avec des périodes de tempête et des périodes de beau temps ;
- reproduction des évolutions des fonds observées par le passé (méthode historique) ; cette phase est la plus importante, car elle va valider le modèle quant à sa capacité à reproduire la dynamique du site ;
- essais, avec généralement des essais de recherche qui permettent de tester les aménagements étudiés sur des périodes de 3 à 5 ans, et un essai final au cours duquel l'aménagement retenu à l'issue des différents essais de recherche est étudié sur une longue période (8 à 10 ans ou plus).

2.7.2.2 Principaux types de modèles réduits sédimentologiques

On peut distinguer trois types de modèles qui sont directement fonction de la nature du sédiment simulé (galets, sables et vases).

■ **Cas des cordons de galets** : dans ce cas, le modèle n'est pas ou peu distordu ; l'échelle en plan est de l'ordre du 1/100^e, le matériau simulant les galets est le plus souvent du sable (figure 6) dont les grains sont déduits de ceux du galet par application de l'échelle géométrique (au 1/100^e, un galet de 100 mm est représenté par un grain de sable de 1 mm). En moyenne, 8 à 16 h de fonctionnement du modèle permettent de représenter une évolution des fonds équivalant à une *année nature*.

■ **Cas de fonds sableux** : le modèle doit être distordu pour assurer une représentation correcte des pentes de plages ; l'échelle en plan peut être comprise entre le 1/50^e et le 1/400^e, celle des hauteurs entre le 1/75^e et le 1/100^e. Le sable est représenté par un matériau [nacre artificielle, bakélite (figure 7)] de masse volumique comprise entre 1 200 et 1 400 kg/m³ (2 600 kg/m³ pour le sable), c'est-à-dire 4 à 8 fois plus léger sous l'eau et dont les grains sont 1,5 à 1,8 fois plus gros que le sédiment naturel.

Une évolution équivalant à une année nature est obtenue entre 4 et 8 h de fonctionnement du modèle.



Les galets naturels sont simulés par des sables.

Figure 6 – Modèle sédimentologique d'un projet de port de plaisance (Barachois, La Réunion)



Figure 7 – Modèle sédimentologique de protection du littoral (Abidjan, Côte-d'Ivoire)

■ **Cas des vases** : les modèles concernant ce type de sédiment sont généralement relatifs aux zones estuariennes où les actions des courants sont prépondérantes.

Ce type de modèle est fortement distordu ; l'échelle en plan est souvent comprise entre le 1/400^e et le 1/800^e, alors que celle en hauteur varie entre le 1/70^e et le 1/100^e.

La vase est simulée par de la vase naturelle traitée chimiquement afin de lui donner des caractéristiques physiques (vitesse de chute, cohésion et concentration des dépôts, et conditions de reprise de ces derniers par les courants) adéquates.

Sur de tels modèles, une année nature est représentée par une durée de fonctionnement du modèle de 8 à 24 h.

2.7.3 Modèles mathématiques sédimentologiques

Pour une grande partie des problèmes concernant les phénomènes sédimentologiques, il n'existe pas de modélisation mathématique permettant de se substituer entièrement à la modélisation physique. Cependant, pour un certain nombre de cas (par exemple littoral ne présentant pas de singularité comme une flèche sédimentaire, l'existence de platiers rocheux,...) ou pour l'examen d'un phénomène spécifique, comme l'évolution du profil de plage en un endroit spécifique, des modélisations mathématiques sont opérationnelles.

Trois groupes de modèles peuvent être distingués : les modèles de trait de côte, les modèles de profil de plage, les modèles d'évolution des fonds.

2.7.3.1 Modèles de trait de côte

Ils s'appliquent aux littoraux constitués de sédiments non cohésifs (sables et galets). Leur objectif est de prévoir l'évolution du trait de côte sous l'action de la houle, suite à la mise en place d'un aménagement sur le littoral (ports, épis, brise-lames, emprunts ou dépôts de sédiments).

Ces modèles reposent sur le calcul du transit littoral (formulations globales). Ils prennent en compte la réfraction des houles sur les fonds et la diffraction autour des ouvrages (de façon empirique).

Ces modèles sont unidimensionnels. Le profil de plage est identique sur tout le littoral considéré et reste inchangé au cours du temps. Cela limite leur utilisation à des cas simples où les fonds littoraux ne présentent pas de singularités (bancs, platiers rocheux).

Une fois calés sur des évolutions passées et connues, de tels modèles permettent d'examiner les tendances évolutives de zones littorales étendues (un à plusieurs kilomètres) pendant de longues périodes (quelques années à plusieurs dizaines d'années).

2.7.3.2 Modèles de profil de plage

Ces modèles ont pour but d'examiner l'évolution du profil de plage pendant une courte période (tempête par exemple).

Ils prennent en compte les actions de la houle, en particulier lors de son déferlement. Si de tels modèles existent depuis 1980 environ, des recherches importantes sont actuellement menées. Elles consistent à décrire plus finement les facteurs hydrodynamiques et les interactions houle-sédiment et à prendre en compte des distributions aléatoires des houles.

De tels modèles permettent, en particulier, de prévoir le recul du littoral, qui est susceptible de se produire lors de circonstances exceptionnelles (tempêtes).

2.7.3.3 Modèles d'évolution des fonds

Ce sont ces modèles qui seront susceptibles de remplacer à plus ou moins long terme les modèles physiques.

Ces modèles comportent trois modules :

- un pour le calcul de l'hydrodynamique ;
- un deuxième pour le transport de sédiments ;
- un troisième pour les évolutions de fonds.

Le calcul de l'hydrodynamique doit prendre en compte les houles (réfraction, diffraction, déferlement,...) et les courants dans toute l'emprise de la zone étudiée. Cette modélisation doit, d'une part, être très fine car elle doit permettre de descendre au niveau de la couche limite où se passent les interactions avec les sédiments et, d'autre part, très précise car de faibles différences d'actions hydrodynamiques se traduisent par de grandes différences sur les mouvements sédimentaires. Par ailleurs, le calcul des conditions hydrodynamiques doit être refait dès que les évolutions des fonds qui se sont produites sont suffisantes pour les modifier.

Cela conduit à des calculs très longs (et donc coûteux), facteur qui a freiné jusqu'à maintenant le développement de tels outils.

Leur développement est aussi limité par une connaissance théorique insuffisante des phénomènes à modéliser. On peut citer à cet égard :

- les lois de reprise et de transport des sédiments, de nature empirique : en pratique, il existe toute une batterie de formules qui ont des domaines d'application limités ; il n'y a pas de loi universellement reconnue ;
- les processus hydrodynamiques de la houle, l'interaction houle-sédiment au déferlement, aspects qui nécessitent d'être décrits plus finement (rappelons que c'est dans la zone de déferlement que se passe l'essentiel des mouvements sédimentaires).

D'importantes recherches théoriques et expérimentales ainsi que des mesures *in situ* sont menées actuellement pour améliorer la connaissance des processus en jeu.

Les premiers modèles opérationnels couvrent les cas courant-sable et courant-vase et concernent essentiellement les zones estuariennes ou les zones où l'action de la houle peut être négligée.

2.8 Modèles hybrides

Ils sont constitués par l'utilisation conjointe d'un modèle mathématique et d'un modèle réduit physique, ce qui permet d'utiliser au mieux les potentialités de chacun.

Trois types de modèles hybrides peuvent être distingués :

- un modèle mathématique fournit des informations à un modèle physique ;
- un modèle physique fournit des informations à un modèle mathématique ;
- les modèles interagissent en temps réel en se transmettant réciproquement des données.

Le premier type est relativement classique. Par exemple, les conditions aux limites (houles, marées, courants) d'un modèle physique courantologique de détail ou d'un modèle sédimentologique sont données par un modèle mathématique de plus grande emprise.

Le deuxième type est, par exemple, dans le cas de modèle de qualité des eaux, la détermination du champ proche sur un modèle physique, le champ lointain étant déterminé sur modèle mathématique à partir des résultats du modèle physique.

Le troisième cas, qui constitue en fait le véritable modèle hybride, est plus complexe à mettre en œuvre. Il nécessite une interface qui assure la transmission entre les deux modèles. Il présente un intérêt, comme par exemple celui du débouché en mer d'un fleuve où toute la partie estuarienne, qui peut être très grande, pourra être représentée sur un modèle mathématique courantologique qui fournira au modèle physique les conditions aux limites. Ce dernier reproduira l'évolution sédimentaire de l'estuaire et donnera de nouvelles conditions aux limites au modèle mathématique, lequel calculera l'impact sur les courants et niveaux d'eau.

2.9 Autres modèles

Les modèles mentionnés ci-avant sont ceux utilisés le plus fréquemment en hydraulique maritime côtière. Il existe bien d'autres modèles que l'on ne peut présenter ici.

Nous citerons deux types de modèles, très utiles pour la mise au point de projets portuaires :

- les modèles physiques de tenue à poste d'un navire (mouvements du navire, efforts sur les amarres) ;
- les modèles mathématiques de simulation des trajectoires de navires qui, à partir, d'une part, de l'environnement maritime (houles, vents, courants) et, d'autre part, des caractéristiques du navire (taille, puissance,...), permettent d'apprécier les conditions de manœuvrabilité du navire lors de son approche au port.

3. Techniques de reproduction et de mesure des phénomènes sur les modèles réduits physiques

Nous donnons ci-après un aperçu succinct des dispositifs les plus couramment employés pour simuler, d'une part, la houle et, d'autre part, la marée et les courants sur les modèles réduits physiques.

3.1 Appareillage de reproduction des phénomènes naturels

3.1.1 Générateur de houle

On dispose aujourd'hui de toute une panoplie de générateurs de houle adaptés aux besoins :

- **générateur de houle** régulière comportant essentiellement un système oscillant dans l'eau (volet à axe réel ou virtuel, plongeur,...) ; ce type de générateur n'est pratiquement plus utilisé ;
- **générateur de trains d'ondes** pour les études d'agitation et, surtout, pour la grande famille de modèles réduits sédimentologiques. Dans ce dernier cas, le générateur peut être entièrement programmable en direction (volet se déplaçant sur rails circulaires), en période (moteur à variateur de vitesse) et en hauteur (excentrique télécommandé). La programmation informatisée à partir d'un micro-ordinateur donne une grande souplesse au procédé ;
- **générateur de vagues aléatoires cylindriques** utilisé pour les études de stabilité d'ouvrages (digues verticales et à talus, plates-formes off-shore, navires...) pouvant fournir de vraies tempêtes avec des vagues de 50 cm à plus d'un mètre de hauteur pour certains laboratoires spécialisés. Ces générateurs reproduisent soit des séries de vagues effectivement enregistrées, soit des vagues *aléatoires* relevant de spectres d'énergie déterminés, soit des vagues de vent par emploi d'une soufflerie. Il faut retenir que ces trains réguliers peuvent obéir à une loi spectrale déterminée ; il est probable que, dans l'avenir, cette génération sera utilisée sur les modèles sédimentologiques ;
- **générateur de houles multidirectionnelles**. Ce type de générateur est composé de toute une série d'éléments (50 à 100 de 0,40 à 0,60 m de longueur) ayant chacun sa commande hydraulique propre, le pilotage informatique de l'ensemble permettant de gérer leur déphasage et d'obtenir ainsi des répartitions spectro-angulaires déterminées. La houle générée par ce type d'appareil est celle qui se rapproche le plus de la houle réelle. Tous les grands laboratoires disposent d'au moins un générateur de ce type qui est essentiellement utilisé pour les études de stabilité et la recherche.

3.1.2 Générateurs de marée et de courants

De caractère également oscillatoire, le phénomène de la marée est beaucoup plus lent que celui de la houle, et sa reproduction sur modèle se réalise habituellement en imposant aux limites de celui-ci soit des variations de niveau, soit des variations de débit.

Les organes de réglage du niveau ou du débit sont télécommandés et préalablement étalonnés pour obtenir, sur le modèle, des lois de variation du niveau et du spectre des courants tout au long de la marée. Dans certains cas, comme dans l'étude d'un estuaire, la variation du spectre des courants dans la partie mer du modèle au cours de la marée ne peut être obtenue qu'en disposant plusieurs organes de réglage de niveau ou de débit synchronisés.

Dans tous les cas, un appareil régulateur de niveau, appelé *pilote de la marée*, est nécessaire pour comparer à tout instant le niveau dans le modèle au niveau désiré et effectuer la correction en agissant sur une vanne de réglage.

3.2 Appareillage de mesure

3.2.1 Mesure de la houle

Les mesures de la houle sont habituellement effectuées par des capteurs (sondes) qui transforment la variation rapide du niveau en variation de capacité ou de résistance d'un fil spécial. Le traitement numérique des signaux obtenus permet de déterminer les caractéristiques de la houle au point de mesure (histogrammes des hauteurs, des périodes, spectres,...). Plusieurs sondes sont le plus souvent utilisées simultanément.

Les générateurs de houles multidirectionnelles ont nécessité la mise au point de sondes spécifiques qui sont généralement constituées de capteurs de vitesse électromagnétique à deux composantes horizontales et d'un capteur capacitif pour les variations de niveau.

Des logiciels de traitement des signaux permettent d'accéder aux caractéristiques multidirectionnelles.

3.2.2 Relevés de fond sur les modèles à fonds mobiles

Les procédés utilisés naguère, qui consistaient à photographier des fils de laine disposés suivant les courbes de niveau des fonds pendant la vidange du modèle, ont été remplacés par des dispositifs ultrasonores. Une sonde à ultrasons solidaire d'un chariot permet de couvrir l'ensemble du modèle.

La carte des fonds et la comparaison des fonds entre deux états sont obtenues à partir de logiciels analogues à ceux utilisés pour les levés des fonds en nature.

3.2.3 Autres appareils de mesure

Parmi les autres appareils de mesure, on peut citer :

- les balances d'effort à six composantes, qui donnent les efforts sur une structure ;
- un accéléromètre à six composantes, qui peut permettre après intégration de suivre les six mouvements principaux d'un navire ;
- les micromoulinets, qui donnent en continu la vitesse des écoulements en un point ;
- la trajectométrie, qui permet de traiter les images vidéo du modèle et de reconstituer les trajectoires des écoulements ;
- les suiveurs de niveau, qui fournissent les variations de niveau lentement variable (marée) ;
- les turbidimètres, qui donnent en continu la variation (en un point) des matières en suspension (vases) dans l'eau.

Modèles en hydraulique maritime

par **Jacques VIGUIER**

Responsable des Études Sédimentologiques
Département Ports et Côtes de SOGREAH Ingénierie

Bibliographie

Shore protection manual. Department of the US Army. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers. Coastal Engineering Research Center (1984).

BONNETON (M.) et GAILLARD. – *Numerical calculation of wave-induced currents.* Proc. 21st IAHR Congress. Melbourne (1985).

CUNGE (J.A.), BENQUE (J.P.), FEUILLET (J.), HAUGAL (A.) et HOLLY (F.M.). – *New method for tidal computation* ASCE, Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division. n° WW3, août 1982.

GAILLARD (P.). – *Numerical modelling of wave-induced currents in the presence of coastal structures.* Coastal Eng. 12,63.81.

USSEGLIO-POTALERA (J.M.), GAILLARD (P.) et HAMM (L.). – *Numerical modelling of the interactive influence of wind, waves and tides on currents in shallow water.* International Conference on Computer Modelling in Ocean Engineering. Venise. Balkema publ. Rotterdam. p. 265 à 272, sept. 1988.

YALIN (M.S.). – *Theory of hydraulic models.* Published by The Macmillan Press Ltd. London (1971).

GALICHON (P.). – *Les modélisations de la dynamique côtière.* Revue Géologues n° 97. p. 49 à 53, avril 1992.

DEMENET (P.F.) et QUETIN (B.). – *Méthodes et outils utilisés pour l'étude des rejets en mer.* La Houille Blanche n° 3/4 (1990).

Principaux laboratoires européens

Delft Hydraulic. Delft (Pays-Bas).

Hydraulics Research Ltd. Wallingford (Grande-Bretagne).

Laboratoire National d'Hydraulique. Chatou (France).

SOGREAH Ingénierie. Échirolles (France).