Généralités sur les seiches et les ondes de seiches (*)

Problème de leur origine

Preliminary remarks on seiches and seiche waves (*)

The problem of their origin

PAR F. BIESEL ET B. LE MÉHAUTÉ

INGÉNIEURS AU LABORATOIRE DAUPHINOIS D'HYDRAULIQUE (SOGREAH-GRENOBLE)

- *Historique sommaire de l'étude des seiches. Seiches dans les lacs, seiches en mer et dans les ports maritimes. Seiches de densité.*
- *Définitions des seiches (ondes stationnaires) et des ondes de seiches (ondes progressives) par leur place dans le spectre de fréquences (situées entre la houle et la marée).*
- *Origines des seiches. Explication des faibles amplitudes des ondes de seiches. Circonstances dans lesquelles peuvent se produire des seiches d'amplitude notable. Cause initiale des seiches. Causes quasi-périodiques. Causes particulièrement fréquentes (train de houle, "surf-beats").*
- *Aspects théoriques du problème des seiches. Importance des longueurs d'onde par rapport à la profondeur. Importance des phénomènes de résonance et des modes d'oscillations propres des plans d'eau. Non-linéarité des équations et force de Coriolis. Divers types de calculs applicables aux seiches. Plan de l'étude.*

- *Historic summary of the study of seiches occurring in lakes, at sea and in harbours. Density seiches.*
- *Definitions of seiches (stationary waves) and of seiche waves (progressive waves) according to their position in the frequency spectrum (between ordinary sea waves and the tide).*
- *Origins of seiches. Explanation of the low amplitude of seiche waves. Conditions under which seiches of considerable amplitude can occur. Initial cause of seiches. Quasi-periodic causes. Particularly frequent causes. Wave trains, surf-beats.*
- *Theoretical aspects of the seiche problem. Importance of the relationship between wave length and depth. Importance of resonance phenomena and of natural oscillation modes of water surfaces. Non linearity of the equations and Coriolis force. Various types of calculation applicable to seiches. Outline of following chapters.*

CHAPITRE PREMIER

HISTORIQUE SOMMAIRE

Il n'entre pas dans nos intentions de faire une étude historique complète de la question des seiches. Le lecteur, que cet aspect de la question intéresse, trouvera des exposés très documentés dans la bibliographie que nous indiquons à la fin de cet article et, en particulier, dans les ouvrages de CHRYSTAL [1] et THORADE [2].

Notre but est seulement de retracer, rapidement, quelques étapes caractéristiques de l'évo-

lution des idées et des théories sur les seiches dans la mesure où cela nous semble utile pour la clarté de notre exposé.

I. — Seiches dans les lacs Origine du mot seiche

Le mot « seiche » nous vient des bateliers du lac Léman. Ils désignaient par ce mot les oscillations lentes du niveau de l'eau. Celles-ci furent

(*) Cf. *la Houille Blanche*, n° 2, 1955; et n° 3, 1955.

remarquées depuis les temps anciens. C'est ainsi que SCHULTAISS rapporte, dans une chronique de 1549, y avoir observé une amplitude de deux aunes (2,39 m), ("Whunderanloffen des Wassers").

En 1730, l'ingénieur suisse FATIO DE DUILLIER indiquait quelques causes météorologiques possibles; on peut retrouver ses observations dans un mémoire de l'Académie des Sciences de 1747 [3]. En 1755, le tremblement de terre de Lisbonne provoque des seiches de grande amplitude dans les lacs écossais. VAUCHER, en 1803, complète les observations météorologiques de DUILLIER.

Il faut attendre 1869 pour que soient faites les premières observations systématiques sur le lac Léman. Ces premières mesures sont dues au médecin F. A. FOREL [4] que CHRYSTAL a appelé à juste titre « le Faraday des seiches ». Depuis, cette étude s'est développée grâce au travail de nombreux observateurs et théoriciens.

FOREL applique au Léman, moyennant certaines approximations, la formule de MERIAN, établie, en 1828, pour les ondes stationnaires en profondeur constante [5].

$$T = \frac{2l}{\sqrt{gh}}$$

T étant la période d'oscillation, h la profondeur moyenne du lac et l sa longueur.

Cette formule fut modifiée en 1891 par l'ingénieur en chef français DU BOYS pour expliquer la différence entre les observations et les calculs. Il pose alors, pour les lacs allongés, la formule :

$$T = 2 \int_0^l \frac{dx}{\sqrt{gh(x)}}$$

l étant la longueur du thalweg prise dans le sens du mouvement moyen et $h(l)$ la profondeur moyenne de la section normale au thalweg située à une distance x de l'extrémité prise comme origine. Cette formule avait été en fait établie par GREEN, en 1836, mais avec certaines restrictions. Valable en première approximation, elle ramène le cas de lacs fortement allongés à celui d'un problème à deux dimensions. Elle présente évidemment l'inconvénient de ne tenir aucun compte des mouvements transversaux dont l'importance n'est pas toujours négligeable.

On ne peut donner ici une récapitulation des résultats très développés établis par FOREL; nous renvoyons le lecteur aux bibliographies étendues données par celui-ci [4] et par CHRYSTAL [7]. En 1907, ce dernier réalisa un travail considérable en résolvant mathématiquement de nombreux cas de mouvements de seiches contenus dans des bassins à profondeur variable, de

formes géométriques simples. Enfin, STERNECK utilisa, en 1915, les méthodes du calcul numérique dans l'étude des seiches [8].

II. — Les seiches en mer et dans les ports maritimes

Par analogie, on a désigné sous le nom de seiche certaines oscillations lentes du niveau de la mer se produisant dans les ports ou dans les baies. Le balancement d'ensemble périodique de la surface libre d'un port a parfois été appelé « ressac ». Ce mot, comme beaucoup d'autres de l'hydraulique maritime (barre, clapotis, lame), est d'origine populaire et désigne parfois des phénomènes très différents (forte agitation, gifle...). Le terme « ressac » souffrant d'une certaine imprécision nous semble donc moins heureux et nous ne l'utiliserons pas.

Ces seiches marines, généralement masquées par d'autres phénomènes tels que la marée et la houle, n'ont été l'objet d'observations systématiques que bien après les seiches de lacs. Cependant les premières observations qui nous sont parvenues furent faites en mer : la Légende rapporte qu'Aristote s'est noyé de chagrin de ne pouvoir expliquer les courants du canal de l'Euripe qui changent de sens deux ou quatorze fois par jour, suivant les caractéristiques de la marée (*).

Puis ce n'est qu'en 1818 qu'AIRY étudie un balancement de 21 minutes à Malte [9]. Plus tard, en 1908, l'Ecole Japonaise de Honda applique aux baies les théories inventées par WEIERSTRASS (1858), mises au point par lord RAYLEIGH en 1880 et qui sont basées sur les principes élémentaires de la mécanique [10]. Elle réalise les premiers modèles réduits de seiches marines en étudiant systématiquement toutes les baies du Japon, la baie de San Francisco, etc. (fig. 1 et 2).

Les études de seiches dans les ports proprement dits sont encore plus récentes. Les toutes premières observations sur les ruptures d'amarres causées par les seiches semblent dues à THOMAS STEVENSON en 1864 [11]. Il faut citer le travail de BARILLON, en 1935, pour le port de Tamatave, montrant, par une étude sur modèle réduit [12], l'analogie entre les seiches dans les baies et les seiches dans les ports.

Citons encore les études approfondies de WILSON sur le port de Table Bay ([13] à [17]), et

(*) BAYLE affirme, textes à l'appui (saint Grégoire de Nozianze, Julien l'Apostat, Justin) qu'Aristote en serait mort de chagrin. « Ce genre de mort, écrit BAYLE, serait une preuve de l'ardeur immense avec laquelle Aristote aurait fouillé les secrets de la nature. »

FIG. 1 et 2. — Etudes sur modèles réduits des seiches dans les baies d'Aomori et de Nagasaki au Japon. (1903-1906)

l'examen du mouvement d'un navire amarré soumis à une seiche [18].

Le professeur McNOWN, en 1951, effectue des recherches au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique et vérifie expérimentalement, d'une façon remarquable, la théorie des mouvements dans des ports de formes géométriques simples et pouvant être soumis entièrement à l'analyse mathématique [19]. Nous reviendrons d'ailleurs sur tous ces derniers travaux particulièrement importants. Tout récemment, cette étude a été reprise et prolongée par MM. KRAVTCHENKO [20] et APTÉ [21].

III. — Seiches de densité

Il semble également que les premières ondes

internes qui aient attiré l'attention des investigateurs aient été des phénomènes stationnaires de la famille des seiches.

THOULET [22], en 1894, donne une première impulsion restée sans suite. Enfin, en 1904, WATSON relève des oscillations de température dans le Loch Ness à une profondeur de 61 m et les interprète comme des seiches de densité [23].

Depuis 1900, les travaux sur les seiches, tant théoriques qu'expérimentaux, sont considérables et il ne saurait être question de les énumérer ici.

Il est important de signaler l'analogie entre les seiches et certains mouvements de marée. En conséquence, de nombreuses recherches effectuées dans ce dernier domaine ont pu être appliquées avec succès aux phénomènes de seiches et réciproquement.

CHAPITRE DEUXIÈME

DÉFINITIONS DES SEICHES ET DES ONDES DE SEICHES

I. — Les seiches dans la grande famille des ondes de gravité

Le bref tour d'horizon historique que nous venons de faire nous a mis en présence de phénomènes de seiche assez divers. Quels en sont les caractères communs nous permettant d'affirmer leur parenté?

Tout d'abord, il s'agit de mouvements oscillatoires de l'eau. En certains points, les niveaux montent et baissent alternativement; en d'autres, ce sont les courants qui vont tantôt dans un sens tantôt dans l'autre. Mais « le phénomène de seiche » n'est pas suffisamment défini par ce caractère oscillatoire qui se retrouve également dans les vagues, les marées, etc...

Il suffit d'ailleurs de regarder une étendue d'eau un peu importante pour constater que le repos n'y existe pratiquement jamais : lacs ou mers sont soumis à une agitation perpétuelle qui va des petites rides capillaires scintillant au soleil jusqu'aux énormes vagues de tempête ou encore jusqu'au phénomène majestueux de la marée.

Tous ces mouvements sont des « oscillations ». Pour distinguer parmi eux ceux qui sont de la famille des seiches, un autre critère est nécessaire. Ce critère sera la « fréquence » et, pour cela, nous serons amenés à considérer le spectre de fréquences, ou encore de périodes, des mouvements oscillatoires complexes observés dans la nature. On peut en effet considérer ces mouvements comme résultant de la superposition d'un grand nombre de mouvements élémentaires périodiques ayant chacun leur intensité et leur phase.

Si l'on étudie ce spectre en un point d'un océan, on s'aperçoit qu'une gamme de périodes extrêmement étendue est indispensable pour pouvoir représenter ne serait-ce que les phénomènes dont l'observation est la plus facile. Nous trouvons tout d'abord des petites rides capillaires causées, par exemple, par des vents légers. Ces rides ont des périodes d'une fraction de seconde et d'une amplitude de quelques millimètres. On trouve ensuite des ondes atteignant plusieurs mètres d'amplitude dans la gamme des grandes houles marines dont les périodes sont comprises entre quelques secondes et environ une demi-minute.

Une fois cette gamme dépassée, les amplitudes rencontrées redeviennent, en général, extrêmement faibles jusqu'à ce qu'on atteigne la première composante importante de l'onde de marée dont la période est d'environ une demi-

journée. Cette composante peut, elle aussi, atteindre des amplitudes de plusieurs mètres dans certaines localités. Au-delà, on rencontre encore les composantes diurnes qui ont des amplitudes non négligeables. Plus loin encore, il existe certaines ondes de périodes supérieures mais généralement d'amplitude si faible qu'il est possible de les négliger pour presque tous les problèmes pratiques.

Ainsi le spectre de fréquence ou de périodes, nécessaire pour représenter les principales oscillations de la surface des océans, s'étend-il depuis quelques fractions de seconde jusqu'à une journée environ. Dans cette large bande, nous ne trouvons que deux groupes dont l'amplitude est normalement importante : d'une part, les vagues de tempête dont la période est comprise entre quelques secondes et une demi-minute et, d'autre part, les ondes de marée dont les composantes principales sont diurnes et semi-diurnes.

En dehors de ces deux groupes de phénomènes bien caractérisés, il n'y a donc que des mouvements d'amplitude très faibles, sauf cas exceptionnels.

II. — Définitions

La définition que nous proposons d'adopter place les seiches entre ces deux types d'ondes. Nous serons également amenés à proposer d'établir une distinction entre les seiches ayant le caractère d'ondes stationnaires, telles qu'elles se produisent en général dans les lacs ou dans les ports ou baies fermés, et les oscillations ayant un caractère d'ondes progressives mais dont les fréquences sont du même ordre de grandeur. Les premières seront appelées « seiches » et les secondes « ondes de seiches ».

Notre définition sera donc la suivante :

Les seiches et les ondes de seiches sont des mouvements oscillatoires des étendues d'eau rentrant dans la catégorie générale des ondes de gravité et dont la période est comprise entre celle des vagues de tempête les plus longues et celle des marées semi-diurnes. Les ondes de seiches sont la forme progressive de ces oscillations, et les seiches la forme stationnaire se produisant dans des étendues d'eau plus ou moins fermées.

Ainsi que nous l'avons dit, les vagues de tempête de l'océan ont une période maximum de l'ordre de 20 ou 30 secondes; on pourra donc

admettre que la limite inférieure des périodes des ondulations considérées comme des seiches sera, en mer, de cet ordre de grandeur, soit par exemple 30 secondes.

Par contre, dans les lacs, où les vagues de tempête auront des périodes beaucoup plus courtes, la limite inférieure de période des seiches sera plus basse. On pourra, par exemple, être amené à considérer des oscillations de 10 secondes de période comme entrant dans la catégorie des seiches.

Il ressort de la définition même que nous avons donnée, ainsi que de la discussion qui l'a précédée, que l'amplitude des seiches sera, en général, très faible et n'atteindra des valeurs un peu importantes que dans des cas exceptionnels (tremblement de terre, explosion atomique sous-marine, etc...) ou du fait de la disposition particulière d'une localité (résonance). Le fait que les seiches n'aient des amplitudes notables qu'exceptionnellement (en de rares instants ou à de rares endroits) est donc également un des caractères spécifiques de ce genre de phénomènes.

III. — Terminologie complémentaire

Les seiches étant des mouvements oscillatoires, on retrouve ici une terminologie identique à ce type général de mouvement. Les seiches sont :

— Soit des *oscillations libres* provenant d'une perturbation initiale accidentelle et qui vont en s'amortissant par suite du frottement.

— Soit des *oscillations forcées* entretenues lorsque la cause excitatrice est plus ou moins périodique. Lorsque la période de la cause excitatrice approche la période libre du fondamental ou de l'une des harmoniques, le mouvement s'amplifie en « résonance » (les mouvements de seiches en résonance présentent une grande analogie avec les phénomènes acoustiques tant du point de vue analytique que physique).

En fait, le phénomène ne se présente pratiquement jamais dans la nature avec une telle netteté. L'irrégularité des causes excitatrices est telle que les oscillations de seiches ne sont ni des oscillations libres, ni des oscillations forcées. Le phénomène naturel est beaucoup plus complexe : divers mouvements de fréquence différente se superposent d'une façon très irrégulière au gré des forces excitatrices.

Nous retrouvons de même le vocabulaire employé pour caractériser les ondes progressives ou stationnaires : la seiche a ses « nœuds », ses « nodales », ses « ventres » et ses points « amphidromiques » localisés au croisement de deux nodales. La seiche peut être uninodale, par exemple, lorsque le balancement se fait suivant la période fondamentale d'un bassin rectangulaire ou plurinodale lorsque le balancement se fait suivant les périodes des harmoniques. Les mouvements uninodaux et plurinodaux peuvent se superposer suivant un même axe ou suivant deux axes différents. Une seiche uninodale se superposant dans un même plan à une seiche binodale est appelée « dicrote ».

CHAPITRE TROISIÈME

ORIGINES DES SEICHES

I. — Considérations préliminaires

Les ondes de seiches, étant généralement d'amplitude très faible, sont le plus souvent masquées par des phénomènes de plus courtes périodes, en particulier par les vagues dues aux vents. Par conséquent, les appareils conçus pour mesurer ces dernières ne peuvent, en général, permettre de déceler la présence des seiches et il est nécessaire d'utiliser des instruments spéciaux pour les mesurer. Cependant, chaque fois que des mesures de ce genre ont été tentées avec des instruments suffisamment sensibles, elles ont confirmé que la zone du spectre comprise entre les houles de tempête et les ondes de marée était généralement occupée par des oscillations de faible amplitude.

Depuis ces dernières années, le nombre d'enregistrements de seiches à la côte est considérable. Comme l'ont montré les travaux du grand océanographe GOUGENHEIM, il suffit d'installer un appareil enregistreur convenable en mer pour observer des seiches ou des ondes de seiches.

Il n'y a pas lieu de s'étonner de la présence de telles oscillations, car ce qui serait vraiment inattendu et demanderait une explication, c'est que cette zone du spectre soit absolument inoccupée. Pourquoi les étendues d'eau existant à la surface de la terre et soumises à tant de perturbations diverses s'interdiraient-elles d'osciller suivant certains modes?

Il nous semble donc que la question importante n'est pas : « Pourquoi y a-t-il des ondes de seiches? », mais : « Pourquoi y en a-t-il si

peu? » où, pour plus de précision : « Pourquoi leurs amplitudes sont-elles, en général, si faibles par rapport à celles des houles de tempêtes ou des marées? ». C'est à cette dernière question que nous allons nous efforcer de répondre ici.

Ainsi que nous l'avons suggéré dans la question que nous venons de poser, ce n'est pas tellement l'ordre de grandeur absolu des amplitudes des seiches qu'il est nécessaire d'expliquer mais plutôt la disproportion existant entre cet ordre de grandeur et celui relatif aux amplitudes des houles de tempêtes ou des marées. Quels sont donc les éléments qui jouent en faveur de l'accroissement de ces deux derniers types d'ondes et qui ne jouent pas pour les ondes de seiches?

Il est relativement facile de répondre à la question ainsi posée. On sait en effet que les ondes de marées sont dues à des phénomènes astronomiques bien définis qui soumettent tous les objets placés à la surface de la terre et, en particulier, les masses liquides, à des forces dont les principales composantes ont pour période une demi-journée environ. Autrement dit, presque toute l'énergie des marées est concentrée dans une zone très étroite du spectre. On sait d'ailleurs que ces forces astronomiques ont des composantes d'autres périodes qui peuvent se placer dans la zone propre aux seiches. Mais ces composantes harmoniques ont elles-mêmes une faible amplitude et par conséquent ne peuvent exciter, en général, des mouvements d'un ordre de grandeur comparable à celui des marées semi-diurnes par exemple.

En ce qui concerne les houles de tempêtes, chacun sait qu'elle sont dues à l'action du vent. Celui-ci étant loin d'être un phénomène essentiellement périodique, il est nécessaire d'expliquer pourquoi son action génératrice de vagues semble néanmoins se limiter à une bande de périodes relativement étroite, ne dépassant pas 30 secondes, par exemple, pour les océans. Pour bien préciser notre pensée nous allons être amenés à faire une courte digression.

Des considérations théoriques montrent qu'une perturbation quelconque apportée à un plan d'eau engendre des oscillations correspondant à un spectre infiniment étendu, c'est-à-dire allant depuis les ondes les plus courtes dont est susceptible le liquide considéré, jusqu'aux ondes de périodes infiniment grandes. Il va sans dire que presque toute l'énergie de ces mouvements oscillatoires se concentre dans une région limitée de ce spectre, région correspondant à des périodes et à des longueurs d'ondes en rapport avec l'échelle du phénomène considéré et du milieu liquide où il se produit. On cite souvent à l'appui de ce genre de considération les travaux théoriques de CAUCHY et POISSON sur la propagation des ondes causées

par une perturbation localisée ou, plus prosaïquement, on cite l'expérience bien connue des ronds dans l'eau. Dans cette expérience, par exemple, où l'on jette une pierre dans un bassin, il est clair que l'énergie des ondulations produites se trouve correspondre à la zone du spectre pour laquelle les longueurs d'onde sont à peu près celles directement observables. Il se produit, d'autre part, à la surface de l'eau, des petites rides très courtes, qui sont rapidement absorbées par les forces de viscosité et, voire même, des ondes encore plus courtes appartenant au domaine des ondes sonores. Enfin il se produit aussi des ondes beaucoup plus longues, difficilement observables parce que d'amplitude très faible, mais incluant en fait une composante de période infinie, due à la surélévation de la surface du fait de l'adjonction du volume de la pierre dans le bassin.

Si, terminant cette digression, nous revenons au problème des perturbations causées sur les océans par les tempêtes, il semble raisonnable d'admettre que les oscillations susceptibles d'être créées par ces phénomènes, dont l'ampleur atteint souvent des centaines et même des milliers de kilomètres et la durée, des heures, voire des jours, ne seront pas limités à des périodes de l'ordre de quelques dizaines de secondes, mais s'étaleront dans une partie du spectre beaucoup plus étendue en particulier vers les grandes périodes.

Par ces considérations, peut-être un peu sentimentales, mais qu'il serait difficile de préciser sans des études extrêmement complexes, nous sommes amenés à penser que les tempêtes devraient créer des ondes de seiches dont l'amplitude serait au moins comparable à celle des houles. Il faut donc chercher ailleurs la raison de la supériorité de l'amplitude de ces dernières.

Cette raison, nous la trouverons en comparant les vitesses des vents que l'on est susceptible de rencontrer au cours des tempêtes, avec les vitesses de propagation des ondes de différentes périodes. On sait, en effet, que la vitesse de propagation des ondes est une fonction croissante de leurs périodes; en profondeur suffisamment grande, cette fonction est d'ailleurs linéaire.

Par exemple, la vitesse de propagation d'une onde de période de 30 secondes en grande profondeur est environ 170 km à l'heure, c'est-à-dire de l'ordre de grandeur des vents les plus rapides qui peuvent se produire au cours d'une tempête. Lorsqu'une onde de cette période ou d'une période plus grande se trouve fortuitement produite par l'action atmosphérique, elle a en général une célérité supérieure à celle du vent et ainsi, non seulement n'est pas entretenue par celui-ci, mais se trouve même, en fait, dans un vent relatif qui lui est contraire et qui joue à l'encontre de sa croissance. Au contraire, les

houles de périodes inférieures à 30 secondes sont susceptibles d'être accompagnées par le vent tout de suite après leur formation et d'être soumises à des efforts d'entraînement convenablement dirigés qui tendent à les faire croître continuellement. Ainsi, les houles dont la vitesse est inférieure à celle du vent arrivent à atteindre des amplitudes considérables non pas parce que la perturbation initiale favorise cette gamme de période, mais parce que ces houles bénéficient d'un effet d'accumulation des efforts générateurs.

Nous avons ainsi mis en évidence des mécanismes qui favorisent soit les houles de tempête, soit les marées et leur donnent une place prépondérante dans le spectre des mouvements ondulatoires de la mer. Pour expliquer maintenant que parfois les ondes de seiches ont elles aussi une amplitude notable, il va falloir rechercher quelles sont les circonstances susceptibles de favoriser cette dernière catégorie de mouvements.

II. — Circonstances dans lesquelles peuvent se produire des seiches d'amplitude notable

Nous avons dit plus haut que nous considérons comme évident que des perturbations quelconques d'un plan d'eau, si leur échelle était suffisante, devaient produire des ondes de seiches, mais nous n'avons pas mis en évidence de mécanismes permettant à ces dernières de croître d'une façon comparable à ce qui se passe pour les houles de tempêtes ou pour les marées. Il est cependant observé que des mouvements de seiches importants et même dangereux peuvent se produire exceptionnellement en certains endroits ou à certaines époques.

Les causes de ces comportements exceptionnels peuvent logiquement se diviser en deux catégories :

- 1° Les causes qui forment des ondes de seiches d'amplitude importante dès l'origine;
- 2° Les causes provoquant à partir d'ondes d'amplitude initialement très faible, des mouvements d'amplitude importante par suite de divers phénomènes de renforcement.

Nous allons étudier successivement ces deux catégories de causes.

Des ondes de seiches d'ampleur exceptionnelle à l'origine ne pourront être créées que par des phénomènes d'une amplitude exceptionnelle ou exceptionnellement adaptés à la formation de ce genre d'ondes. Ces phénomènes revêtiront donc, en général, le caractère de véritables cataclysmes. Des exemples typiques sont les tremblements de terre ou les éruptions sous-marines

qui peuvent mettre en jeu des puissances énormes. A l'échelle plus petite de lacs ou de rades relativement limités, des phénomènes moins grandioses peuvent cependant revêtir une importance suffisante pour créer des seiches dangereuses. Ce sont, par exemple, des éboulements de terrain dans un lac ou des explosions de bombes atomiques dans des rades. A une échelle encore plus réduite, par exemple dans des bassins ou des darses, des effets importants peuvent être produits par des coups de vent violents, ou encore par des adductions d'eau brutales, etc...

Ces phénomènes de grande puissance pourront donc produire des seiches qui seront sensibles dans des régions très étendues mais qui, par définition pourrait-on dire, seront exceptionnelles dans le temps.

Il reste maintenant à étudier les circonstances qui peuvent provoquer le renforcement d'ondes de seiches initialement d'amplitude très faible. Parmi ces circonstances, la plus connue est certainement la possibilité de résonance. Chacun sait que lorsqu'on soumet un système possédant une fréquence de résonance à une excitation de fréquence voisine, il peut y avoir une « réponse » d'une amplitude particulièrement grande. Il y a donc là, de toute évidence, un mécanisme susceptible de multiplier par un facteur important l'effet des ondes de seiches. On sait également que lorsque le coefficient de majoration dû à la résonance est très élevé, les mouvements sont pratiquement identiques à ceux résultant des modes d'oscillation libre du système considéré. Cette dernière remarque a pour conséquence que l'étude des seiches se ramènera souvent à celle des modes de résonance propres d'étendues d'eau, au moins en ce qui concerne sa partie descriptive.

Il est à remarquer que les phénomènes d'amplification par résonance pourront jouer un rôle d'autant plus net que l'excitation aura elle-même une fréquence plus caractérisée, c'est-à-dire que son énergie se concentrera dans une zone plus étroite du spectre (ce qui est le cas des marées). Ainsi, une source d'ondes de seiches même particulièrement faible peut-elle devenir relativement plus dangereuse si elle est approximativement périodique et si cette période est susceptible de coïncider avec une des périodes propres d'un port ou d'un lac.

Les phénomènes de résonance ne sont pas les seuls qui soient susceptibles d'amplifier l'effet des ondes de seiches. Il est également important de noter les causes d'amplification suivantes :

La réflexion des ondes venant du large sur des côtes convenablement disposées peut conduire à une concentration analogue à celle qui se produit au foyer d'un miroir concave. En fait, un bon nombre de ports sujets à des seiches impor-

tantes se trouvent situés au voisinage de sections de côtes concaves qui pourraient jouer un tel rôle à leur égard [26].

Une autre cause possible de concentration réside dans les phénomènes de réfraction auxquels sont soumises toutes les ondes liquides circulant dans des profondeurs variables; les ondes longues provenant de certaines sources de perturbation peuvent, en effet, se trouver concentrées sur un point de la côte par un phénomène analogue à celui concentrant les rayons au foyer d'une lentille convergente [26].

Il est clair que les conformations susceptibles de créer des résonances importantes ainsi que de fortes concentrations par réflexion ou réfraction ne se trouveront réalisées qu'en certains points particuliers. En conséquence, ce deuxième type de renforcement est exceptionnel dans l'espace.

Pour conclure cette discussion, il nous semble utile de résumer rapidement les principaux résultats auxquels elle nous a conduits.

N'importe quelle perturbation d'un plan d'eau crée toute une série d'ondes dont certaines sont dans la catégorie que nous avons désignée sous le nom d' « ondes de seiches ». L'importance des ondes de cette catégorie sera proportionnelle à l'importance de la cause perturbatrice.

Les ondes de seiches rayonnent autour de leur lieu de formation ainsi que n'importe quelles autres ondes de gravité. Comme elles vont beaucoup plus vite que les vents les plus rapides, elles ne peuvent être accrues par l'action de ceux-ci au cours de leur propagation ainsi que cela est le cas pour les ondes de tempêtes. Les ondes de seiches ne sont donc d'amplitude notable à leur origine que lorsque leurs causes ont été de véritables cataclysmes.

Les ondes de seiches peuvent être renforcées par divers phénomènes dont les principaux sont : la réflexion, la réfraction et la résonance. Les localités où le renforcement dû à une ou plusieurs de ces causes est suffisamment fort, peuvent alors être soumises à des mouvements de seiches relativement fréquents.

Lorsque, pour une raison quelconque, la cause productrice des seiches comporte un élément de périodicité un peu marqué, les renforcements dus aux résonances peuvent être exceptionnellement importants.

Il est à noter que le schéma : formation des ondes de seiches, transmission de ces ondes, augmentation de leur amplitude par réflexion, réfraction ou résonance, est quelquefois simplifié par suppression de la phase « transmission » lorsque la cause initiale agit directement sur le lieu même de la seiche.

Tout ceci nous permet de préciser à nouveau la différence que nous avons établie entre les ondes

de seiches et les seiches : les ondes de seiches seront la forme « de translation » des oscillations de période comprise dans la gamme des seiches et elles seront caractérisées, sauf cas de cataclysme exceptionnel, par une amplitude relativement très faible qui les rendra en général extrêmement difficiles à observer. Au contraire, les seiches caractérisées se produiront le plus souvent sous une forme quasi stationnaire correspondant, ainsi que nous l'avons dit plus haut, à des modes de vibration de masses d'eau limitées et, du fait de la possibilité de résonance, elles pourront atteindre des amplitudes très notables.

III. — Causes initiales des seiches

Des ondes de seiches de très faible amplitude sont créées par n'importe quelle perturbation de la surface de l'eau. Par conséquent, il est inutile de tenter une énumération, qui serait longue et nécessairement incomplète, de toutes les causes imaginables.

Dans l'état actuel de nos connaissances, il est tout juste possible de donner une énumération des causes de seiches que l'expérience ou le raisonnement a montré comme étant particulièrement importante.

Ces principales causes seraient : les variations de pression atmosphérique, les vents et leurs variations d'intensité ou de direction, les variations éventuelles d'intensité de précipitations, les perturbations sismiques proches ou lointaines, provoquant ou non un tsunami, une adduction d'eau brutale ou une immersion d'un grand volume (éboulement...), les harmoniques supérieures des ondes de marées, l'irrégularité de la houle, les instabilités de certains écoulements marins ou côtiers.

a) CAUSES QUASI PÉRIODIQUES

Nous avons vu que l'importance d'une source d'ondes de seiches ne dépend pas seulement des amplitudes créées ou de l'énergie totale émise, mais aussi de la plus ou moins grande concentration de cette énergie dans une zone donnée du spectre. En effet, les phénomènes de résonance risquent d'être particulièrement importants pour les excitations ayant une périodicité marquée.

Notons tout d'abord les harmoniques des ondes de marée qui sont rigoureusement périodiques.

Signalons ensuite certains phénomènes d'instabilité de courants tels que les tourbillons alternés qui, non seulement peuvent être sensiblement périodiques, mais peuvent aussi adapter leurs périodes à celle d'un système résonnant placé au voisinage. Ce mode particulier d'excitation nous a été signalé par M. Albert EINSTEIN, au cours d'un de ses passages à Grenoble, à la suite d'expé-

riences qui auraient été faites à l'Université de Californie.

MOHLMANN rapporte un cas analogue sur la Weser où la seiche pourrait être provoquée par le courant de la Weser sur un canal dérivé entre

FIG. 3. — Les tourbillons alternés provoqués par le courant de la Weser à l'embouchure du canal de navigation y induisent une seiche.

l'embouchure de celui-ci et un refuge où peuvent se réfléchir les ondes de seiches (fig. 3) [22].

Cette forme d'excitation ne saurait être surprenante étant donné qu'il suffit d'une énergie excessivement faible pour provoquer, à la résonance, un mouvement de seiche très violent, l'énergie incidente n'ayant alors pour but que de vaincre les frottements. Nous pouvons envi-

FIG. 4. — Les tourbillons alternés derrière l'île peuvent provoquer par résonance une seiche dans la darse voisine.

sager cette excitation sous diverses formes; par exemple :

- 1° des tourbillons alternés de périodes excessivement grandes sont provoqués par le courant de marées contournant une île au voisinage d'un port (fig. 4);
- 2° la veine fluide passe alternativement de part et d'autre du musoir de la jetée limitant le port. On trouve une analogie étroite avec les cavités sonores (fig. 5).

Les perturbations atmosphériques peuvent également revêtir un quasi-périodicité par suite de phénomènes analogues. C'est un fait bien connu des aviateurs que le passage du vent au-

dessus d'accidents du relief tel que falaises abruptes, etc., soit susceptible de provoquer des tourbillons alternés provoquant une certaine fluctuation de pression à l'aval. Ces fluctuations peuvent à leur tour agir sur un plan d'eau et si leur fréquence concorde avec celle de ce dernier, la résonance peut devenir importante. Toutefois, il est vraisemblable que la réaction des mouvements du plan d'eau sur les masses atmosphériques ne serait pas suffisante pour provoquer un accord entre la fréquence propre de l'eau et celle du phénomène aérien; par conséquent, les chances de résonance sont beaucoup plus réduites avec ce genre d'excitation que

FIG. 5. — Les tourbillons alternés provoqués par le courant du large de part et d'autre de la jetée induisent par résonance une seiche dans la darse. On ne saurait trouver meilleure analogie acoustique.

dans le cas de tourbillons alternés provenant d'un courant liquide.

b) CAUSES PARTICULIÈREMENT FRÉQUENTES

Les causes initiales ayant une périodicité moins marquée peuvent néanmoins être importantes si elles se manifestent relativement souvent. Dans cette catégorie il importe essentiellement de mentionner les variations de la pression atmosphérique, du vent et de la houle.

En ce qui concerne les variations de la pression atmosphérique et du vent, il est très difficile de faire des évaluations d'ordre de grandeur faute d'une connaissance suffisante de la « structure fine » des perturbations atmosphériques usuelles.

La création d'ondes de seiches de 2 minutes de périodes par exemple (ondes qui ont environ 20 km de longueur par très grands fonds) est particulièrement sensible, soit aux fluctuations des pressions ou des vents ayant une période de cet ordre en un point donné, soit aux différences de pression ou de vent existant entre des points distants d'une dizaine de kilomètres par exemple. Il faudrait donc avoir des enregistrements quasi continus des perturbations atmosphériques et

ceci en de très nombreux points pour que l'on puisse en tirer une philosophie valable sur l'importance de cette source d'ondes de seiches.

Une telle densité d'enregistrements semble trop éloignée des possibilités techniques actuelles, si bien qu'il ne nous semble pas utile de poursuivre plus avant la discussion de cette cause. Contentons-nous donc de souligner notre grande ignorance des caractéristiques des ondes de seiches susceptibles d'être produites directement par des perturbations atmosphériques.

La houle régulière n'est pas à proprement parler une cause de seiche dans le sens où nous avons défini ce mot dans la première partie. Par contre, la houle irrégulière, comme l'a observé FRIBARREN, peut être une source de phénomènes de seiches dont la période est celle des trains de houle [23].

Pour expliquer ce phénomène, il est nécessaire de revenir sur la notion de spectre de périodes que nous avons utilisée plus haut.

Les houles et plus généralement les ondes de gravité peuvent être considérées en *première approximation* comme des phénomènes linéaires, c'est-à-dire des phénomènes qui peuvent se superposer par simple addition. Ce caractère permet de définir le spectre de la houle comme l'ensemble des ondes de gravité de période bien définie (ou « monochromatiques ») dont la « somme », la superposition, reproduit la houle initiale.

Il est aussi possible d'étudier séparément l'action de chacune de ces ondes élémentaires sur l'agitation dans un port et il est clair que l'agitation résultante ne saurait avoir d'autres périodes que celles des ondes élémentaires considérées.

Si ce caractère linéaire des ondes de gravité était rigoureux, il ne serait pas possible d'expliquer que des houles, même variables, puissent produire des oscillations de période supérieure à celles des ondes élémentaires de leur spectre. Par exemple, dans le cas d'un battement simple (constitué par la superposition de deux houles rigoureusement périodiques, de fréquences voisines), on ne devrait constater dans toute l'étendue d'eau que la superposition des effets dus séparément à chaque composante, c'est-à-dire des mouvements résultant de l'addition de deux oscillations harmoniques des périodes considérées. On retrouverait donc des battements plus ou moins accusés mais jamais, à proprement parler, de composante (au sens d'une décomposition en série de Fourier) ayant une fréquence autre que celles des deux ondes élémentaires constituant le battement.

En réalité, les ondes ne sont linéaires qu'en première approximation. La notion de spectre de houle, telle que nous l'avons définie, repose sur

cette approximation. On peut montrer, qu'en deuxième approximation, il n'est pas possible de réaliser la superposition de deux ondes rigoureusement périodiques (et, *a fortiori*, de n ondes) sans provoquer des mouvements dont les fréquences sont égales à la somme, ou à la différence, des fréquences constituantes (prises deux à deux dans le cas de n ondes élémentaires) [24]. On sait d'ailleurs que la différence des fréquences constituantes est précisément celle du « battement », c'est-à-dire celle des trains de houle. On conçoit ainsi que, par suite de l'existence de ces effets du second ordre, il soit possible à une houle irrégulière d'exciter des seiches dont la période soit de l'ordre de grandeur de celle des trains de houle. Ce phénomène est bien connu des spécialistes de la marée qui, partant de trois ou quatre composantes astronomiques de fréquence bien définie, sont amenés à décomposer les mouvements observés suivant une vingtaine d'« harmoniques » dont les fréquences sont des sommes et des différences des précédentes. L'importance des phénomènes non linéaires pour la marée est d'ailleurs telle que ces harmoniques vont bien au-delà du second ordre (qui n'implique que des sommes ou des différences deux à deux).

Un autre exemple pris dans un domaine technique différent achèvera sans doute de préciser la nature des principes en cause. Les radio-électriciens savent provoquer la résonance d'un circuit à la fréquence de battement (différence des fréquences) de deux ondes imposantes. C'est le principe des postes super-hétérodynes, deux ondes « haute fréquence » étant combinées dans une lampe dite « mélangeuse » pour obtenir une onde « moyenne fréquence ». Dans l'analogie hydraulique, les houles sont la haute fréquence et les seiches la moyenne fréquence; la non-linéarité des ondes de gravité correspond aux courbures de caractéristiques indispensables pour une lampe mélangeuse.

L'étude mathématique au second ordre des houles irrégulières permet de préciser le mécanisme des phénomènes; en particulier, elle permet de mettre en évidence l'existence d'une « onde d'accompagnement » ayant la longueur et la vitesse de propagation des trains de houle [24]. Elle permet également de calculer la grandeur des courants dus à la présence de cette onde et, en particulier, de montrer qu'ils sont plus grands lorsque la profondeur relative est faible, ce qui est évidemment important pour l'étude des installations portuaires.

La théorie est malheureusement muette à ce jour sur l'influence des variations de profondeur, sur la progression des houles irrégulières. Il est probable que lorsqu'une telle houle rencontre des hauts fonds, il se superpose à la houle d'accompagnement une houle *libre* de même

FIG. 6. — Vue d'ensemble du modèle réduit du port de la Calle. Le déferlement périodique des trains de houles à l'entrée du port y provoque des seiches d'amplitude exceptionnelle.

période que celle-ci, mais de vitesse de propagation différente. Cependant, tout cela reste encore du domaine qualitatif et il est difficile d'en tirer des conclusions valables pour la pratique, *a fortiori* pour ce qui se passe lorsqu'il y a déferlement.

Cependant on sait que les ondes longues se réfléchissent très facilement même sur une côte très plate. Le coefficient de réflexion est une fonction de la cambrure et de la pente. Une onde de 0,005 de cambrure peut se réfléchir avec 80 % de son amplitude sur une plage de pente 1/10. Nous reviendrons, d'ailleurs, sur ce sujet lors de l'étude de la distorsion des modèles réduits.

On peut donc admettre que les ondes d'accompagnement et les ondes libres de même période se réfléchissent relativement bien sur les plages où les houles elles-mêmes sont détruites. Les « surf-beats » ont été attribués à de telles réflexions [25]. Il est probable néanmoins que les fluctuations de niveau mesurées sous ce nom résultent, d'une part de la superposition d'ondes d'accompagnement et d'ondes libres existant indépendamment du déferlement et, d'autre part,

des ondes réfléchies par la zone même du déferlement.

Quoique ces deux types de phénomènes soient d'origine semblable (non-linéarité des ondes liquides) il y a intérêt à conserver la distinction entre les ondes du second ordre en l'absence de déferlement d'une part et les surf-beats proprement dits d'autre part, car ils obéissent à des lois sensiblement différentes. En particulier, les ondes du second ordre sont proportionnelles au carré de l'amplitude des houles incidentes tandis que les ondes « surf-beats » sont théoriquement proportionnelles à une puissance fractionnaire de cette amplitude. Il se trouve d'ailleurs que la combinaison des deux observée jusqu'ici a une allure à peu près proportionnelle à l'amplitude.

Les « surf-beats » comme les ondes du second ordre sont une cause probable de seiches. Signalons, d'ailleurs, à ce propos que certaines seiches peuvent aussi être provoquées dans les ports par effet direct par suite du déferlement périodique des trains de houles de tempête à l'entrée du port. C'est le cas typique du port de La Calle qui a été étudié sur modèle réduit (fig. 6) au

FIG. 7. — Variation de l'amplitude des seiches mesurée sur le modèle réduit de la Calle en fonction du rapport du temps d'émission des houles θ' sur le temps de la période du train de la houle θ . On constate que l'amplitude est, dans une large mesure, indépendante du temps d'émission du générateur d'ondes.

Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, pour le compte de la Circonscription des Ponts et Chaussées de Bône et sous la direction de M. l'Ingénieur en chef COLIN et de M. l'Ingénieur POGGI.

La production de la seiche a été obtenue par le moyen suivant : les trains d'une houle de

période et d'amplitude constantes comportant un certain nombre de crêtes sont produits à des intervalles de temps réguliers définissant la période θ du train de houle. Les paramètres influençant l'amplitude de la seiche sont : la période θ du train de houle, la durée θ' ($\theta' < \theta$) d'émission de chaque train de houle, l'amplitude et la période des houles émises.

La courbe 7 donne l'amplitude de la seiche en fonction du temps relatif de fonctionnement θ'/θ du générateur de houle. Les courbes 8 donnant l'amplitude dans le port en fonction de la fréquence du train de houle mettent facilement en évidence les périodes de résonance du port : le fondamental de 42 secondes, l'harmonique 3 de fréquence 15 secondes, correspondent respectivement aux périodes de 420 et 150 secondes dans la nature.

Enfin, les courbes 9 et 10 mettent en évidence la période d'oscillation libre et l'amortissement des seiches après suppression de la cause excitatrice pour les périodes de 420 et 150 secondes, amortissement excessivement lent comme on peut le constater.

IV. — Etude dans la nature et sur le modèle

Nous avons maintenant terminé notre étude des principales causes des seiches telles que nous les connaissons, étude qui a plutôt le caractère d'une énumération et d'un cadre général que celui d'un exposé exhaustif. Il serait certainement très utile de reprendre une à une les discussions des causes que nous avons mentionnées et d'y ajouter également celles que l'avenir pourra révéler être importantes. Il serait également intéressant d'établir, à la fois par des calculs théoriques, par des expériences sur modèles et surtout

FIG. 8. — Amplitude de l'agitation en fonction de la période du train de houle. La résonance fondamentale et l'harmonique 3 sont particulièrement marquées.

Période fondamentale : $T = 420$ s. — Amplitude verticale : $Ag = 1,80$ m.

Période harmonique 3 :
 $T = 150$ s
Amplitude verticale :
 $Ag = 1,50$ m

Fig. 9 et 10. — Seiches dans le port de La Calle (Algérie)

Enregistrement de l'agitation pour une excitation correspondant aux périodes fondamentales et harmonique 3, et amortissement de l'agitation après suppression de l'excitation.

(Seul le tracé le plus foncé est valable; le tracé clair correspondant aux traces d'un essai précédent.)

par des corrélations d'observations météorologiques, hydrographiques et limnologiques, quelle est l'importance de chaque cause possible de seiche et quelles sont l'amplitude et la probabilité des perturbations qu'elle est susceptible de fournir. Il est évident qu'il est indispensable d'avoir des idées nettes sur l'origine d'un phénomène avant de songer à étudier les moyens de s'en protéger. Par conséquent, nous ne pouvons que vivement souhaiter que de telles études soient effectuées.

Nous croyons cependant que le tableau d'ensemble que nous avons tracé, dans la mesure où il est suffisamment complet, peut donner les éléments nécessaires pour aborder l'étude sur modèle réduit de la plupart des cas qui peuvent se poser. De ce point de vue un peu particulier, il semble en effet que l'on ne doive nécessairement distinguer que deux classes de mode d'excitation : l'excitation lointaine et l'excitation locale.

Dans le premier cas, quelle que soit la source des ondes de seiches, elles atteindront le port ou le point particulier de la côte après une transmission par rayonnement suivant les lois propres à la propagation des ondes de gravité. On se trouvera donc dans un domaine où les problèmes relatifs aux études sur modèle réduit ont été résolus depuis longtemps, au moins sur le plan théorique. Il n'est pas douteux qu'un certain effort sera nécessaire, tant sur le plan

théorique que sur le plan pratique, pour adapter les règles valables pour des ondes de gravité du type « houle » à l'étude des ondes du type « seiche », étant donné que bien des ordres de grandeur sont complètement transformés. Nous traitons de cette question dans le chapitre relatif à la similitude des modèles réduits [26].

L'étude des causes d'excitation locale peut poser des problèmes relativement plus nouveaux, surtout si l'on s'attache à reproduire les causes excitatrices d'une façon assez fidèle. On pourrait être amené dans ce dernier cas à simuler des sautes de vent sur un modèle de lac par exemple, ou encore des variations de pression atmosphérique grâce à l'emploi de ventilateurs ou de sources d'air comprimé convenablement utilisées. On pourra également simuler des averses locales de durée limitée ou encore des éboulements de terrain dans un lac, voire même des secousses sismiques, etc...

En ce qui concerne plus spécialement les ports maritimes, la cause locale la plus importante à reproduire serait certainement celle due à l'influence des changements de profondeur sur les phénomènes du second ordre accompagnant les houles irrégulières. Ainsi que nous l'avons signalé, la théorie est défailante sur ce point et les techniques expérimentales doivent en conséquence s'inspirer d'une grande prudence. Ce problème sera étudié dans un chapitre consacré à la similitude.

CHAPITRE QUATRIÈME

ASPECTS THÉORIQUES DU PROBLÈME DES SEICHES

Comme nous l'avons déjà indiqué, les seiches font partie de la grande famille des ondes de gravité et en tant que telles obéissent aux lois générales établies pour ce type d'onde. En particulier, toutes les équations établies pour la houle et le clapotis sont directement applicables aux ondes de seiches et aux seiches [27]. Cependant, le rapport de la profondeur à la longueur d'onde est souvent très faible, en particulier dans les ports. Ces équations se simplifient alors car il devient possible de négliger les termes d'accélération verticale. Notons encore que le rapport des amplitudes horizontales aux amplitudes verticales sera particulièrement élevé. Sa valeur est donnée par :

$$\frac{T}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{h}}$$

T étant la période du mouvement et h la profondeur.

I. — Importance des phénomènes de résonance et des modes d'oscillations propres des plans d'eau.

Nous avons vu que les seiches d'amplitude importante résultaient le plus souvent d'une excitation d'amplitude relativement faible combinée à divers phénomènes de renforcement dont le plus caractéristique était peut-être celui de la résonance.

Ainsi que nous l'avons rappelé plus haut, l'étude de la résonance se ramène pratiquement à celle des oscillations propres des systèmes considérés : aussi se trouve-t-on, sur ce point, dans un domaine relativement bien connu et ne présentant pas les difficultés considérables du problème de l'origine des seiches. Avec certaines complications, en particulier lorsque la profondeur varie d'un point à un autre, le problème des oscillations propres d'une masse d'eau à surface libre se ramène théoriquement à un type d'équations aux dérivées partielles classiques. L'étude descriptive des seiches susceptibles de s'établir dans un plan d'eau fermé se ramène alors à l'étude des modes d'oscillations d'un milieu à deux dimensions, analogue par exemple à l'étude des oscillations d'une membrane. Nous avons vu que l'on retrouve les mêmes notions de ligne nodale, de nœud, de ventre, usuelles à ce genre de théorie. Parfois, les circonstances permettent certaines simplifications, par exemple si

la profondeur est constante, ou varie d'une façon régulière et agréable aux dieux des Mathématiques, ou encore si les formes sont suffisamment régulières pour pouvoir être assimilées à des formes géométriques simples.

L'étude des phénomènes de résonance montre qu'à la notion de coefficient d'amplification vient s'ajouter celle de sélectivité d'une part, et la notion de temps de mise en résonance d'autre part. Corrélativement, parmi les caractéristiques des ondes de seiches il faudra compter non seulement la fréquence et l'amplitude moyennes, mais aussi la largeur de spectre et la durée des phénomènes d'excitation.

II. — Non linéarité des équations et force de Coriolis

La plupart des problèmes de seiches ne peuvent être abordés qu'à condition de négliger les termes quadratiques des équations hydrodynamiques. Il est important de signaler que ces termes ne sont cependant pas toujours négligeables. Leur importance est d'ailleurs liée à celle du produit de la cambrure par le cube de l'inverse de la profondeur relative. Si le premier de ces facteurs est toujours faible, par contre, nous savons qu'il n'en est pas de même du second.

Il est aussi un autre aspect de la non-linéarité des phénomènes, dans l'excitation des phénomènes de résonance, dû au fait que les vitesses dans les passes d'entrée des ports sont parfois assez importantes. Cependant, nous nous limiterons pour l'instant à l'étude des phénomènes linéaires qui nous permettent d'obtenir des résultats par des calculs relativement simples.

Il est utile de mentionner également que l'effet de la force de Coriolis est en général négligé dans l'étude des seiches. Ceci ne serait pas admissible dans le cas des seiches maritimes les plus longues, telles que nous les avons définies, c'est-à-dire dont la période approche une demi-journée, mais est parfaitement justifié dans le cas des seiches relativement courtes, c'est-à-dire d'une période de quelques minutes qui, ainsi que nous le verrons par la suite, sont les plus gênantes pour l'exploitation des ports. On sait, en effet, que les perturbations introduites par la force de Coriolis ne sont importantes que si le rapport de la période du mouvement à celle de la rotation de la terre n'est pas trop petit.

III. — Types divers de calculs applicables aux seiches — Plan de l'étude

Les considérations qui précèdent nous permettent maintenant de tracer un tableau sommaire des principaux types d'études théoriques que l'on peut faire à propos des seiches.

En toute rigueur, les problèmes de seiches sont toujours des problèmes à trois dimensions. Cependant il est presque toujours possible d'éliminer l'une de celles-ci, à savoir : la profondeur. C'est ainsi que l'on arrive, comme nous l'avons signalé plus haut, à établir une analogie entre les oscillations d'une masse d'eau à surface libre et celles d'un milieu à deux dimensions tel qu'une membrane.

En outre, il arrive parfois que l'on puisse réduire encore le nombre de dimensions à considérer, par exemple lorsque l'essentiel du mouvement se fait parallèlement à un plan vertical donné. En ce cas, le mouvement physique est pratiquement « à deux dimensions », mais on peut l'étudier comme un milieu à une dimension et, si on le désire, comparer les oscillations de l'eau à celles d'une corde tendue ou encore à celles d'une masse d'air contenue dans un tuyau sonore. Notons en passant que ces deux derniers exemples concernent des phénomènes qui sont en toute rigueur également tri-dimensionnels.

En pratique, l'élimination de la profondeur peut toujours se faire, si bien que cela est une source de confusion car on a souvent tendance à considérer l'élimination de la profondeur comme allant de soi et ainsi à parler d'oscillations à deux dimensions pour désigner les oscillations les plus générales d'un plan d'eau (c'est-à-dire tri-dimensionnelles). Cette expression s'applique évidemment tout aussi logiquement au deuxième cas considéré plus haut où les oscillations sont effectivement à deux dimensions et où, grâce à l'élimination de la profondeur, on traitera le problème avec une théorie à une dimension sans que toutefois on emploie l'expression « oscillations à une dimension » qui, pour quelque raison obscure, semble moins heureuse.

Nous pensons qu'il suffit d'attirer l'attention du lecteur sur cette ambiguïté possible de langage pour éviter toute confusion dans la suite de cette étude.

Les bases des théories sur les seiches sont bien connues puisque ces dernières font partie de la famille des ondes de gravité dont l'étude constitue un chapitre important de l'hydrodynamique classique. L'étude des ondes de seiches, c'est-à-dire de la forme progressive des oscillations, est, comme nous l'avons déjà remarqué, pratiquement identique à celle de toutes les autres ondes liquides de gravité, et l'on retrouve les mêmes résultats aux ordres de grandeur près. Au

contraire, l'étude des seiches elles-mêmes, c'est-à-dire des formes stationnaires, est, ainsi que nous venons de le voir, tout à fait essentielle, et, par conséquent, il est nécessaire de la pousser plus loin que cela n'est fait habituellement pour les ondes liquides telles que les houles de tempête.

Les principaux cas à étudier sont les suivants :

a) MOUVEMENTS A DEUX DIMENSIONS

Lorsque le mouvement réel est approximativement à deux dimensions, il peut se traiter, après élimination de la profondeur, comme un mouvement d'oscillation à une dimension, ce qui introduit des simplifications considérables et permet d'en faire une analyse particulièrement détaillée dont les résultats peuvent parfois s'extrapoler aux problèmes plus complexes à trois dimensions. Cette catégorie de problèmes sera traitée en détail dans la deuxième partie du présent travail. C'est également dans cette partie que l'on trouvera la discussion des conditions qui doivent être satisfaites pour que l'on puisse effectivement considérer que les théories relatives aux oscillations à une dimension peuvent s'appliquer. Pour l'instant, nous nous contenterons d'indiquer les subdivisions principales de l'étude.

Nous avons comparé tout à l'heure ce genre de problème à celui concernant l'étude des oscillations de l'air dans un tuyau sonore. De même que, pour ce dernier exemple, la nature de l'ouverture du tuyau sur le milieu ambiant a une grande importance sur le phénomène acoustique, de même l'on sera conduit à distinguer les plans d'eau complètement ouverts, complètement fermés ou n'ayant qu'une ouverture partielle. Ces considérations nous ont amenés à faire, à titre préliminaire, une étude assez poussée du franchissement par la houle d'obstacles partiels tels que ceux qui peuvent constituer la fermeture d'un plan d'eau allongé [26].

b) MOUVEMENTS A TROIS DIMENSIONS :

En ce qui concerne les mouvements à trois dimensions, nous serons ramenés, après élimination de la profondeur, à l'examen d'un problème d'oscillations à deux dimensions. Alors que l'étude des oscillations stationnaires dans un domaine à deux dimensions fermé est relativement poussée pour différents modèles mécaniques, il n'en est pas de même des études concernant des surfaces non entièrement fermées, comme cela est le cas en général des ports et surtout des baies soumis à l'action des seiches. Nous devons donc explorer le domaine encore inconnu des oscillations de milieux à deux dimensions reliés par une certaine partie de leur con-

tour à un milieu extérieur plus vaste présentant des propriétés analogues et susceptible d'être parcouru par des mouvements oscillatoires de type progressif.

L'étude se subdivisera donc tout d'abord en celle des plans d'eau fermés, puis en celle des plans d'eau ouverts qui eux-mêmes se répartiront en deux catégories : plans présentant une faible ouverture et plans présentant une ouverture plus ou moins large. Cette étude fera l'objet de la troisième partie.

Dans une quatrième partie, nous étudierons plus spécialement, à la lumière des conclusions des études théoriques, le problème de la protection des ports contre les seiches et en particulier l'influence des seiches sur les navires en fonction de leurs conditions d'amarrage. Enfin, dans une cinquième partie, nous verrons leur application à la conception et à l'exploitation des modèles réduits qui constituent un des moyens les plus puissants pour lutter contre les effets néfastes des seiches [26].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CHRYSTAL. — On the hydrodynamical Theory of seiches.
Transactions of the Royal Society of Edimburg. Vol. XLI, part. III, pp. 555, 612 et 644 à 649.
- [2] THORADE. — Problemes der Wasserwellen, pp. 99 à 117.
- [3] FAÏO DE DUILLIER. — Seiches ou flux et reflux du lac de Genève.
Hist. Ac. Roy. des Sciences, année 1742, Amsterdam 1747, pp. 26-31.
- [4] FOREL. — Le Léman, tome II.
- [5] MERIAN. — Über die Bewegung tropfbarer Flüssigkeiten in Gefässen.
Basle, 1828.
- [6] DU BOYS. — Sur le mouvement de balancement rythmé de l'eau des lacs (seiches).
Compte rendu de l'Académie des Sciences. Paris, CXII, 1891, p. 1202.
- [7] CHRYSTAL. — On the hydrodynamical theory of seiches.
Proceedings of the Royal Society of Edimburg. 1903-1906.
- [8] STERNECK. — Hydrodynamische theorie der halbtägigen gezeiten des Mittelmeers.
Sitz. K. Akad. Wiss. Wien. Math. Natur. K1, V. 129. Vienne, 1915.
- [9] AIRY. — Tides and Waves.
Encyclopaedia Metropol., p. 241. Conden, 1842.
- [10] HONDA, TERADA, YOSHIDA, ISITANI. — An investigation on the secondary undulations of oceanic tides.
Journal of the College of Science. University of Tokio, n° 24, 1908-1903-1906.
- [11] STEVENSON T. — The design and construction of harbours.
Edimburgh, 1864.
- [12] BAILLON. — Mouvement de seiche dans une baie.
Revue Générale de l'Hydraulique, janv.-fév. 1936, p. 3.
- [13] WILSON. — Generation of long period seiches in Table Bay, Cape Town, by barometric oscillations.
Transactions American Geophysical Union, vol. 35, n° 5.
- [14] — The mechanism of seiches in Table Bay Harbor, Cape Town.
Proceedings of Fourth Conference on Coastal Engineering. Chicago, Illinois, october 1953, p. 52.
- [15] — Harbour Surging at Cape Town, South Africa, General conclusions of Recent Researches.
The dock and harbour Authority, vol. XXXIV, n° 401, p. 329.
- [16] — Table Bay as an oscillating basin.
International Association for Hydraulic Research, Proceedings. Minnesota, 1953, p. 201.
- [17] — Oscillations of the sea and the phenomena of range.
The dock and harbour Authority, n° 392, vol. XXXIV, pp. 41, 73 et 169.
- [18] — Ships response to range action in harbor basins.
Proceedings A.S.C.E., separate n° 41, vol. 76.
Transactions A.S.C.E., vol. 116.
- [19] MAC NOWN. — Sur l'entretien des oscillations des eaux portuaires sous l'action de la haute mer.
Publications scientifiques et techniques du ministère de l'Air, 1951.
- [20] KRAVTCHEK et MAC NOWN. — Seiches in rectangular Ports.
Quarterly of Applied Mathematics, tome 13, n° 1, 1955.
- [21] APTE. — Recherches théoriques et expérimentales des mouvements des liquides pesants avec surfaces libres.
Thèse, présentée à la Faculté des Sciences de Grenoble, 4 juin 1955.
- [22] MOHLMANN. — Contrôle par des essais sur modèle des observations en nature relatives aux oscillations relevées de la flottaison du canal.
Congrès International de Navigation. Rome, Section 1. *Navigation intérieure*. Question 1, 1953, pp. 60 à 77.
- [23] IRIBARREN. — Courants et oscillations dus au ressac à l'intérieur des ports.
Revista de Obras Publicas, avril 1948.
- [24] BIESEL. — Equations générales au second ordre d'une houle irrégulière.
La Houille Blanche, n° 3, mai-juin 1952, pp. 372-376.
- [25] MUNK. — Surfs beats.
Transactions American Geophysical Union, vol. 30, n° 6, déc. 1948.
- [26] BIESEL et LE MÉHAUTÉ. — Aperçus sur la similitude des modèles réduits de seiches.
La Houille Blanche, mai-juin 1955.
- [27] Formulaire de l'Ingénieur hydraulicien.
La Houille Blanche, juin 1954, juillet-août 1954, mars-avril 1955.
- [28] BIESEL et LE MÉHAUTÉ. — Etude théorique de la réflexion de la houle sur certains obstacles.
La Houille Blanche, mars-avril 1955.