

DU

CENTRE DE RECHERCHES ET D'ÉTUDES OCÉANOGRAPHIQUES

PUBLIÉES AVEC LE CONCOURS DU SECRETARIAT D'ÉTAT A L'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

1, QUAI BRANLY, PARIS-VII^e

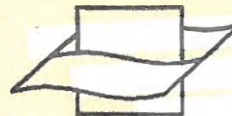
Tél. : Suffren 55-70

LA HOULE A LA CÔTE

PAR

H. LACOMBE,

INGÉNIEUR HYDROGRAPHE PRINCIPAL

Vlaams Instituut voor de Zee
Flanders Marine Institute

Ceux d'entre nous qui ont eu le plaisir d'assister, il y a quinze jours, à la conférence de M. NIZERY, se souviennent de la projection d'une photographie de la mer qui illustre l'allure extrêmement complexe de sa surface, notamment lorsqu'un vent violent souffle sur elle. Cependant lorsqu'on examine la mer sur photographies d'avion, on constate en général que l'apparence de la surface se discipline; il est possible d'y déceler des systèmes d'ondulations à peu près cylindriques dits « à longues crêtes » se propageant dans des directions diverses et dont la superposition provoque les ondulations à « courtes crêtes » apparaissant sur les photographies. En outre, à mesure que les lames « à courtes crêtes » se rapprochent du rivage, elles tendent à s'aligner et à se muer en lames à « longues crêtes », peut-être sous l'effet de la réfraction.

À peu près cylindrique, également, est ce qu'on appelle **la houle** qui est l'agitation résiduelle de la mer provenant d'une dépression météorologique lointaine et sortie de la « zone génératrice », c'est-à-dire de la zone où souffle le vent qui contribue à la former. Dans cette zone des ondulations à courtes crêtes sont présentes mais les systèmes de vagues à longues crêtes, en lesquelles on peut les résoudre, ont des directions de propagation divergentes et, en un point éloigné, un seul système se rencontre: c'est la houle. Fréquemment très régulière, avançant souvent dans une zone sans vent, parfois troublée par un vent traversier, c'est un beau modèle d'oscillation libre de l'eau qui, par bonheur, a depuis longtemps tenté les mathématiciens. On la rencontre au large comme à la côte.

I. — CARACTÉRISTIQUES THÉORIQUES DE LA HOULE

Je dis par bonheur, car il est un fait contre lequel il serait vain de s'insurger; malgré leur difficulté considérable, les calculs sont souvent plus faisables que les observations; la connaissance de la houle que nous avons actuellement doit plus aux mathématiciens qu'aux navigateurs et aux observateurs côtiers de la mer, pourtant bien plus nombreux.

Les caractéristiques essentielles du mouvement oscillatoire des eaux, hors de la présence de vent surtout, nous sont données par l'hydrodynamique théorique. Ces caractéristiques essentielles sont d'une part la période de la houle T , sa longueur d'onde λ , sa célérité C , grandeurs liées par deux relations et dont il suffit d'une (¹), par conséquent, pour avoir les deux autres et d'autre part, l'amplitude ou hauteur totale de la crête au creux $2a$. Nous considérerons aussi la cambrure rapport $2a/\lambda$.

La plus ancienne des solutions mathématiques proposées remonte à GERSTNER (1802). Cette houle se rapporte à la profondeur infinie, pratiquement plus de la moitié de la longueur d'onde en profondeur infinie; nous en dirons seulement que son profil est trochoïdal et à la limite, cycloïdal (cambrure limite $1/\pi$). La célérité ne dépend que de λ (ou T); elle est indépendante de $2a$. Les figures 1, 2, 3 montrent la généra-

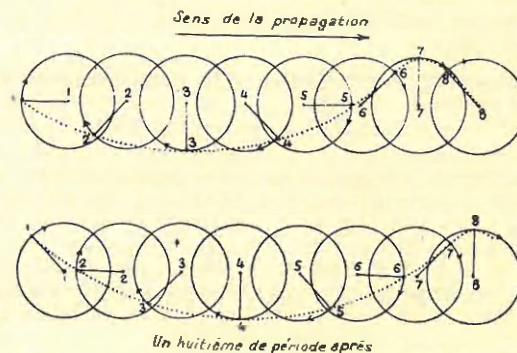


Fig. 1.

tion du profil, les trajectoires des particules qui sont circulaires et fermées, les déformations d'une ligne de particules

(¹) Par profondeur donnée.

verticales au repos; le mouvement s'éteint exponentiellement avec la profondeur.

L'expérience montre qu'en général, les houles peu cambrées du large sont sensiblement trochoïdales.

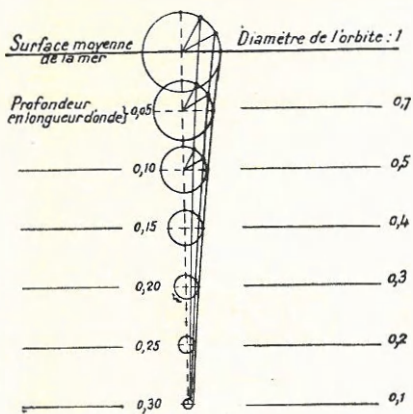


Fig. 2.

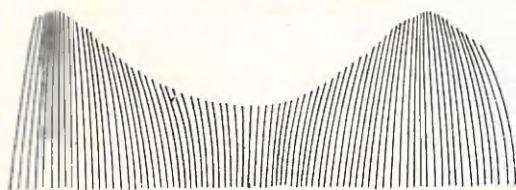


Fig. 3.

Par fonds faibles, mais constants, des indications extrêmement utiles dans la pratique ont été fournies par l'étude des houles irrotationnelles « infiniment petites », c'est-à-dire de très faible cambrure. Leur profil est sinusoidal. Si les expressions du mouvement ne sont exactes qu'au premier ordre d'approximation, elles sont toutefois d'un emploi pratique constant car on a vérifié en gros qu'elles correspondaient à la réalité.

En eau profonde (profondeur $H > \frac{\lambda}{2}$), la célérité, les trajectoires des particules sont les mêmes que dans la houle de GERSTNER.

Par profondeurs inférieures à la demi-longueur d'onde en eau profonde : la célérité C est fonction à la fois de la longueur d'onde (actuelle) et de la profondeur H ; à mesure que la profondeur décroît, la célérité tend vers \sqrt{gH} ; C est, pour ces houles « infiniment petites », indépendant de l'amplitude; les trajectoires des particules sont des ellipses : le grand axe de ces ellipses est horizontal et diminue de haut en bas, moins vite que le rayon du cercle en profondeur infinie; le petit axe, égal en surface à l'amplitude, est nul au fond, en sorte que là, les molécules effectuent seulement un mouvement de va-et-vient (fig. 4), mais à mesure que la

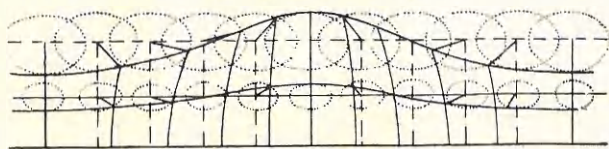


Fig. 4. — Houle par faible profondeur.

profondeur décroît par rapport à la longueur d'onde au large, les vitesses horizontales des particules augmentent et seraient infinies à la rive, s'il n'y avait pas de déferlement. Mais, pour les houles de faible cambrure les vitesses réellement acquises au moment du déferlement sont de l'ordre de deux à trois (1) fois la vitesse horizontale maximum en eau profonde. Quand la longueur d'onde est très grande vis-à-vis de la profondeur, l'onde tend vers « l'onde longue » pour laquelle les vitesses et déplacements horizontaux sont les mêmes à toute immersion.

Si théorique que paraisse cette houle « infiniment petite », les formules qui s'y rapportent sont capables de donner une représentation très proche de la réalité, sous une forme mathématique relativement simple.

Les hydrodynamiciens ne s'en sont toutefois pas tenus là. STOKES, en 1847, a donné le premier les formules d'une houle dite « de STOKES », houle « finie », c'est-à-dire non infiniment petite, en profondeur infinie puis finie; les controverses mathématiques soulevées par l'expression de ces houles n'ont été closes qu'en 1926; cette houle est telle que :

— La célérité croît légèrement avec l'amplitude.

— Crête et creux ne sont pas symétriques: la crête est plus aiguë, le creux plus plat que dans la houle sinusoidale; le niveau moyen, défini comme la moyenne de la crête et du creux, est plus haut que le niveau de repos; mais cette « surélévation du niveau moyen » est un concept purement mathématique.

— Il existe dans ces houles un « courant d'entraînement » ou un « transport de masse » dans la direction de propagation; les trajectoires des particules ne sont pas fermées et il y a un faible mouvement en avant des particules par profondeur infinie; ce courant diminue exponentiellement quand l'immersion augmente, mais moins vite par profondeurs plus faibles. Proportionnel en eau profonde au carré de la cambrure et à la célérité, ce courant doit, lorsque la houle aborde normalement les lignes de niveau d'un fond plan, entraîner un courant de compensation en profondeur qui porte à l'inverse du courant superficiel. Mais l'expérience de la houle en modèle réduit contredit cette compensation simple; le courant d'entraînement existe, mais sa répartition en profondeur n'est pas celle que donne la loi théorique. En outre, quand la houle aborde obliquement un fond incliné, la compensation n'est nécessaire que pour la composante du courant d'entraînement normale aux lignes de niveau; la composante longitudinale peut se développer librement.

La forme de solution (série) qu'a obtenue STOKES l'a amené à penser que cette houle devait présenter à la limite un point anguleux à la crête; ce résultat a été trouvé directement : les tangentes au profil de la houle au point anguleux font entre elles un angle de 120° , qui paraît, toujours pour les houles progressives, correspondre beaucoup mieux à la réalité que le rebroussement cycloïdal de GERSTNER. Cette houle est la « houle limite »; outre le profil anguleux à 120° , cette houle est caractérisée en ce point par une propriété essentielle : la vitesse de la particule de la crête, dans le sens de la propagation, est égale à la célérité de la houle. La cambrure limite en eau profonde est d'environ 14 % (1/7) (fig. 5).

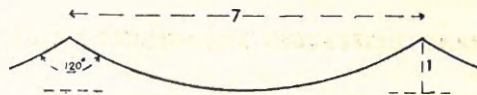


Fig. 5. — Houle limite de Stokes en profondeur indéfinie.

(1) Au maximum, pratiquement.

M. MICHE a généralisé et précisé ces résultats, pour de nombreux types de houle, et donné, en outre, une formule simple exprimant, en profondeur non infinie, la cambrure limite de la houle, ce qui permet de prédéterminer, nous le verrons, la position du point de déferlement (fig. 6).

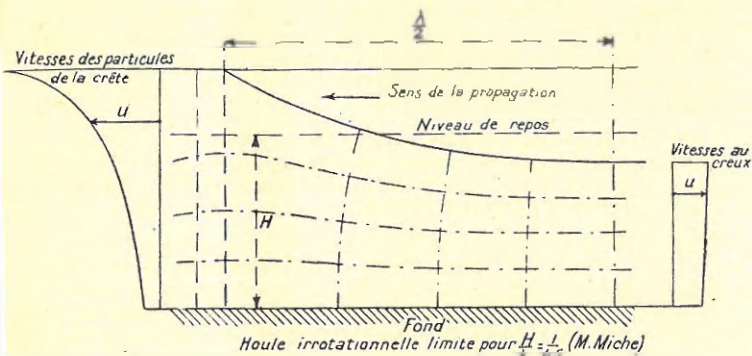


Fig. 6.

Le même auteur a généralisé à toutes les houles, au premier ordre d'approximation un résultat connu pour les houles infiniment petites en profondeur constante, finie ou non, et pour la houle de GERSTNER. Il a donné l'expression de l'énergie moyenne transmise par la houle à travers l'unité de distance comptée parallèlement aux crêtes de houle. On en déduit la valeur de la vitesse de transmission de l'énergie, qui est la vitesse de groupe. La constance nécessaire de cette énergie, à supposer que le fond peu incliné (moins de 10 %) n'en réfléchisse point, sert à étudier les variations de toutes les caractéristiques de la houle en profondeurs décroissantes.

C'est M. MICHE enfin qui a obtenu ce résultat fort important que, sur des fonds de pente faible (inférieure à 10 % ou même 20 %) « les lois du clapotis et de la houle, sur fond peu incliné, sont sensiblement celles des mouvements correspondants de même profondeur moyenne, en profondeur constante ».

On ne peut que rendre hommage au très important travail de M. MICHE qui a mis sur pied une méthode de calcul portant sur toute une série de houles possibles. Ces houles dépendent, au deuxième ordre d'approximation, d'une fonction arbitraire dont l'existence fait concevoir que les divers vents suscitent des houles différentes. En particulierisant cette fonction on retrouve les houles classiques de GERSTNER et de STOKES. M. MICHE a également étudié la houle et le clapotis en profondeur variable; son travail est véritablement une « somme » sur la houle.

Après ce préambule un peu long, dont je m'excuse, mais qui me paraissait nécessaire, nous allons examiner d'abord pour une houle abordant de front les lignes de niveau du fond, c'est-à-dire en l'absence de réfraction, les fluctuations des caractéristiques de la houle sur fond peu incliné, puis le déferlement et la profondeur de déferlement. Nous examinerons ensuite les houles abordant obliquement les lignes de niveau du fond et, par conséquent, la réfraction; combinant les effets de la réfraction aux résultats précédemment acquis, nous verrons qu'on est en état de prédéterminer, au moins théoriquement, les caractéristiques de la houle au rivage dans tous les cas; nous achèverons la réfraction en disant quelques mots des « courants de houle ».

Après avoir cité quelques cas particuliers de propagation en eau animée d'un mouvement d'ensemble, nous dirons quelques mots de la réflexion puis de la diffraction de la houle.

II. — VARIATION DES CARACTÉRISTIQUES DE LA HOULE EN PROFONDEUR LENTEMENT DÉCROISSANTE, EN L'ABSENCE DE RÉFRACTION

Un fait d'observation domine la question : la période de la houle (supposée unique) reste inchangée. Il en résulte que les variations relatives de célérité et de longueur d'onde sont égales. Elles dépendent seulement de la valeur du rapport H/λ de la profondeur actuelle H à la longueur d'onde du large λ ; C'/C et λ'/λ (1) décroissent avec H/λ , suivant la loi donnée par la figure 7. Par fonds de 10 m, une houle de

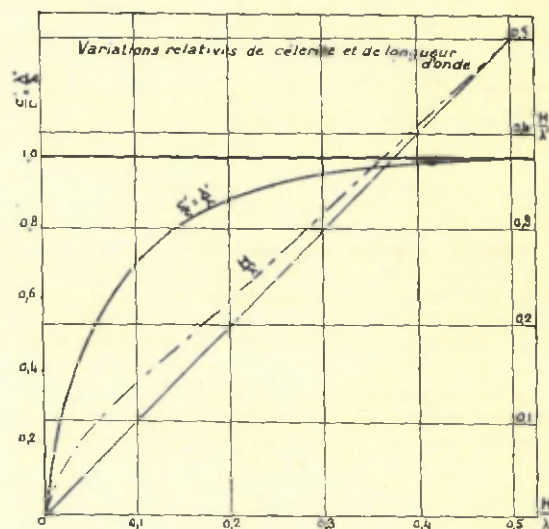


Fig. 7.

50 m de longueur d'onde au large ($T = 5,7$ s environ) a subi la même diminution relative de longueur qu'une houle de 200 m ($T = 11$ s environ) par fonds de 40 m. On voit que la diminution relative de longueur, d'abord lente, devient très rapide quand H/λ descend au-dessous de 0,15; on conçoit donc que, si l'on veut déterminer la profondeur d'après la longueur d'onde ou la vitesse d'une houle donnée, la précision soit d'autant plus grande, pour une profondeur donnée, que la longueur d'onde est plus grande. La détermination de H n'est plus possible dès que H devient supérieur à $\lambda/4$, puisque, au delà, λ ne varie presque plus avec H pour une houle donnée.

La variation relative d'amplitude de la houle a'/a , qui se déduit de la nécessaire constance de l'énergie moyenne transmise à travers une parallèle aux crêtes, n'est également fonction que de H/λ . La courbe (fig. 8) donne cette variation; on prévoit (et constate) ce phénomène curieux de l'existence d'un minimum de a'/a égal à 0,913 pour $H/\lambda = 16\%$. L'amplitude relative repasse par la valeur 1, en croissant, au point dit « isométrique » pour lequel H/λ vaut 5,7 % environ. Au delà a'/a croît rapidement; mais cette croissance s'arrête au déferlement. On assiste dans cette zone à une augmentation très importante de la vitesse horizontale des particules. Il est à peine besoin d'ajouter que cette variation théorique néglige le frottement qui, d'ailleurs, on le constate, n'a que peu d'influence, sauf sur fonds presque horizontaux.

(1) Dans ce qui suit, les lettres affectées d'un signe « prime » se rapportent à la caractéristique locale par faible profondeur; la lettre sans « prime » se réfère à la caractéristique en eau profonde.

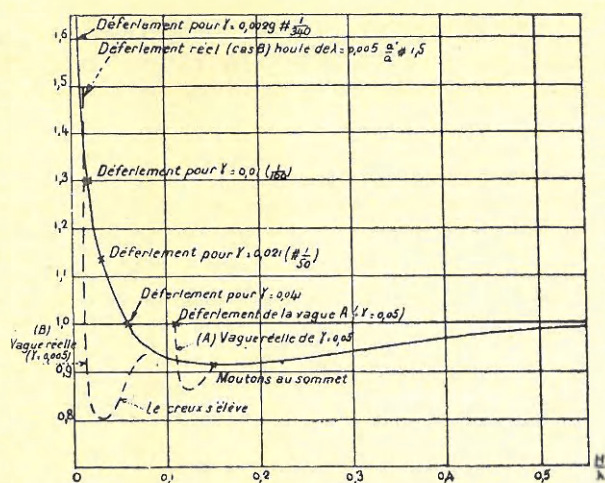


Fig. 8. — Variation de l'amplitude.

La variation relative de cambrure γ'/γ est, de même, fonction de H/λ seulement, moyennant notre hypothèse d'un fond peu incliné. La cambrure relative γ'/γ présente un minimum, à peine marqué (98,5 %) lorsque H/λ vaut environ 33 % (fig. 9). On peut naturellement particulariser les valeurs de

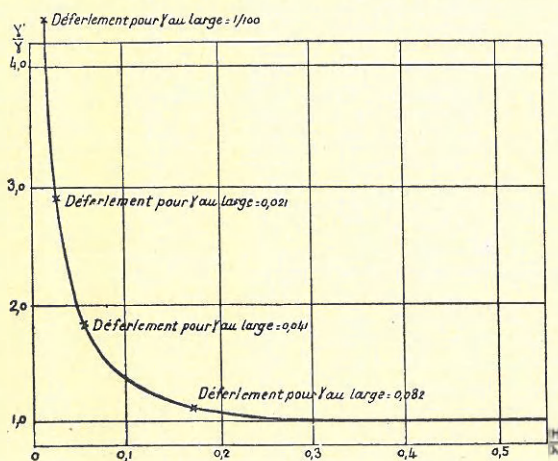


Fig. 9. — Variation de la cambrure.

la cambrure au large γ et obtenir ainsi les γ' correspondants. L'augmentation de cambrure relative est d'autant plus grande que la cambrure initiale était plus faible. Nous reparlerons de ce point à propos du déferlement.

Déferlement. — Si nous nous reportons au classique ouvrage de JOHNSON, « Shore processes and shoreline development », nous ne trouvons guère d'explication du déferlement. On a d'abord attribué le phénomène au frottement, puis reconnu que ce frottement ne pouvait rendre compte des formes observées. On a fait appel ensuite à une disproportion croissante entre la vitesse (croissante) des molécules et le « volume d'eau disponible » décroissant en raison de la diminution de profondeur ; le raisonnement n'est guère convaincant, ou, au moins, pas très clair.

Ne peut-on pas expliquer le déferlement autrement ? Nous nous tournerons une fois de plus vers les résultats des études

théoriques pour proposer une explication, qui n'est pas admise partout d'ailleurs (1). Nous avons indiqué que pour les « houles limites » présentant un point anguleux à 120° dans leur profil, la vitesse des particules se trouvant à la crête (vitesse orbitaire plus vitesse d'entraînement) était égale à la célérité locale. On conçoit que toute diminution subséquente de la profondeur entraîne l'écroulement de la crête vers l'avant. Cette explication qui n'est peut-être pas exacte, confirme en tout cas cette impression de « creusement » devant la crête qu'ont signalé les observateurs. Donc au delà de la « houle limite » il y aurait déferlement.

M. MICHE a donné comme critère de déferlement la valeur de la cambrure limite γ'_d de la houle limite, sous la forme d'une expression approchée, en fonction de H/λ' où λ' est la longueur d'onde actuelle (et non celle du large). Mais on passe facilement de λ' à λ (fig. 7).

Or, en fonction du paramètre H/λ nous connaissons la variation relative de cambrure, donc la cambrure réelle γ' pour les diverses valeurs de la cambrure au large γ . Si sur un même graphique (fig. 10) nous portons la courbe γ'_d et la

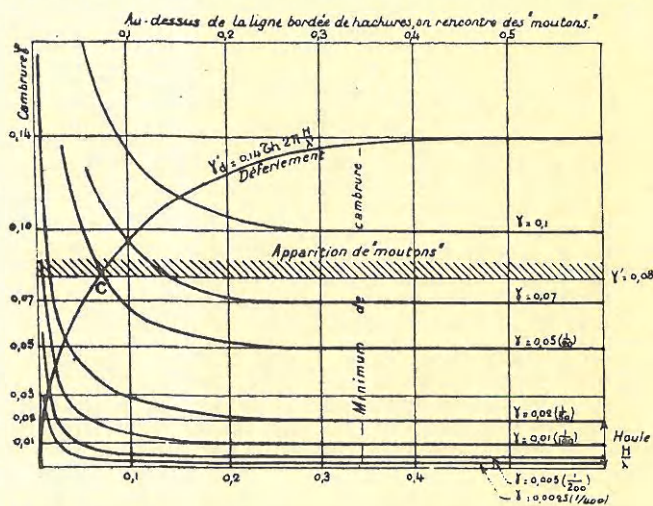


Fig. 10. — Variation de la cambrure en fonction de la cambrure au large.

courbe γ' pour diverses valeurs de γ , leur intersection figure le point de déferlement de la houle correspondante γ et la valeur H/λ qui s'y rapporte se relève sur le graphique. Il ressort nettement de cette figure que l'augmentation de cambrure est d'autant plus grande, toutes choses égales d'ailleurs, que la cambrure initiale γ est plus faible. Ayant la valeur de H/λ relative aux points de déferlement de houles de diverses cambrures initiales on en déduit par la courbe a'/a (fig. 8) l'augmentation relative de hauteur au déferlement, c'est-à-dire la hauteur relative des brisants, qu'on peut tracer en fonction de γ . On voit que les houles de cambrure supérieure à 0,04 environ (fig. 11), c'est-à-dire en gros des vagues de vent, donnent une hauteur de brisants qui ne dépasse pas la hauteur de la houle au large. Au contraire, les houles de cambrure initiale inférieure donnent des hauteurs de brisants qui peuvent dépasser considérablement la hauteur de la houle au large ; il peut donc y avoir sur une plage de forts rouleaux dus à une houle qui, en raison de sa faible cambrure, passe inaperçue au large et la mise au point d'enregistreurs de pressions sous-marines a montré l'existence fréquente de

(1) Que le déferlement puisse être attribué à d'autres causes, notamment à un long trajet sur des fonds faibles mais constants, paraît possible ; ce serait une analogie avec le mascaret.

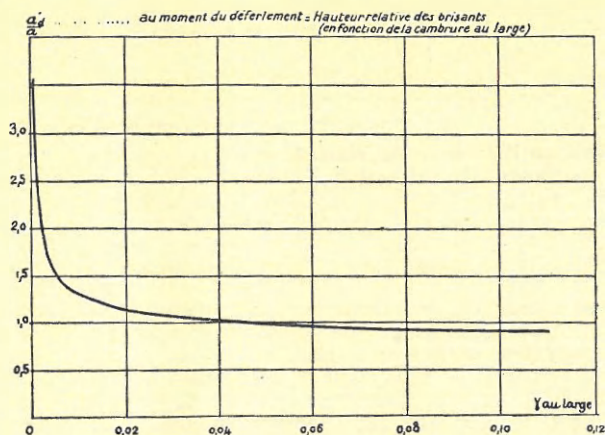


Fig. 11.

houle de longue période (20 s) et de faible amplitude. Ne sont-ce pas les « lames de fond » responsables de nombreux accidents sur les plages ?

Connaissant la cambrure du large γ , donc aussi γ'/d et H/λ au moment du déferlement, on passe aisément de là, à la valeur du rapport $H/2a'$ de la profondeur à la hauteur totale actuelle de la houle; ce rapport varie de 1,5 à 1,14, en pratique; la valeur inférieure 1,14 se rencontre pour les houles déferlantes dont la cambrure au large était très faible (pratiquement moins de 1%). L'observation avait montré que ce rapport était voisin de 1; il semble que, sauf cas exceptionnels, les valeurs théoriques trouvées soient, pour des fonds de pente faible, conformes à la réalité (fig. 12).

La formule donnée par M. MICHE est donc très féconde; elle permet de prédéterminer la position du point de déferlement et la hauteur des brisants, quand la houle du large est connue, ce que la prédiction peut fournir à partir des éléments météorologiques.

La considération de tous ces facteurs est essentielle pour les opérations amphibies; d'une part, indirectement, par les méthodes de détermination de profondeur fondées sur la variation des longueurs et célérités de la houle, ce qui constitue une opération préliminaire à l'action; d'autre part, en raison des conditions de tenue à la mer et de déchargement, du personnel et du matériel des chalands. Enfin, la zone de déferlement joue, on le sait, un grand rôle dans la formation des barres sous-marines, notamment dans les mers sans marée. La présence de ces barres peut être désastreuse pour une opération de débarquement.

Cependant les résultats atteints ne sont que théoriques.

L'observation des conditions pratiques de déferlement à la côte a montré que, si les lois théoriques étaient en gros

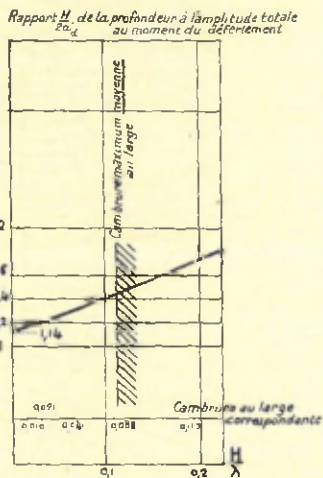


Fig. 12.

suivies, elles ne l'étaient pas jusqu'au déferlement; tout au moins le point de déferlement changerait de position de façon appréciable. Les autres caractéristiques de la mer déferlante seraient voisines de ce que donne la théorie. Une lame de cambrure forte, 5% par exemple, abordant un fond de pente faible a une amplitude relative qui suit la courbe théorique jusqu'en son point bas. Là, un peu d'écume apparaît au sommet, ce qui entraîne une diminution marquée d'amplitude, puis celle-ci croît brusquement et le déferlement se produit pour une hauteur à peu près égale à celle du large, mais plus au large que ne voudrait la théorie (processus A en tireté sur la figure 8). Au contraire, une lame de cambrure au large égale à 0,005 suit la courbe théorique plus longtemps; le point figuratif dépasse le point du minimum relatif d'amplitude; celle-ci augmente donc légèrement puis, brusquement, l'aspect de la lame se modifie, le creux s'élève et devient plat. La crête prend une section triangulaire où l'énergie paraît se concentrer. Il en résulte une nouvelle diminution d'amplitude due surtout à l'élévation du creux de la lame; ensuite la crête s'élève très rapidement et le déferlement se produit à peu près pour la valeur théorique de a'/a . Voir tracé B en tireté de la figure 8.

Les résultats théoriques cités ne sont donc qu'une première approximation. Mais une grande précision n'est-elle pas illusoire? La variabilité de hauteur des lames successives entraîne nécessairement des fluctuations importantes de toutes les caractéristiques des lames par petites profondeurs et une grande précision dans les prédictions serait donc inutile. On admet généralement que les valeurs peuvent osciller de $\pm 1/3$ autour de leur valeur moyenne. Voilà qui renforce l'intérêt de la « première approximation ».

Du point de vue théorique, il est certain que la pente du fond, sa rugosité, sa perméabilité, la nature des matériaux ou des végétations qui le recouvrent ont une influence appréciable; mais elle n'a pas encore été, à notre connaissance, chiffrée avec précision. Quelques résultats peuvent être considérés comme acquis: une forte pente du fond fait déferler la houle par profondeurs supérieures aux profondeurs théoriques relatives au fond peu incliné. $H/2a'$ vaudrait près de 2 pour les pentes fortes. En outre, des phénomènes fort importants et qui pourraient aider la recherche sont constatés dans la nature, mais non expliqués. Je rappellerai ici la propriété constatée près des îles Kerkennah en Tunisie; sur les fonds de pentes extrêmement faibles (1/500) recouverts de végétations particulières, la houle du large est, en quelque sorte, absorbée sans déferler. Voilà un amortissement naturel curieux, obtenu sans brisants et que les ingénieurs seraient fort aises de voir se réaliser sur les digues... Là le frottement doit jouer un rôle appréciable, sinon essentiel.

Dans la pratique, ce déferlement ne se produit pas toujours de la même façon, même en un jour donné sur une plage donnée. Tantôt la crête de la houle se recourbe, en formant une volute très nette: c'est le déferlement plongeant (plunging) ou en volute. Tantôt la crête semble devenir très aiguë et s'écroule seulement vers l'avant sans former de volute: c'est le déferlement qualifié de « spilling » par les Américains. Aucune traduction de ce terme n'a encore été, à ma connaissance, adoptée.

Les conditions pratiques dans lesquelles ont lieu ces deux espèces de déferlement ne sont pas encore bien connues; sur les fonds de pente relativement forte, et toutes choses égales d'ailleurs, les « plunging » sont plus fréquents; les houles à longues crêtes le favorisent aussi, comme l'absence de réfraction (crêtes parallèles au rivage), la régularité du fond, l'absence de houle d'autre direction et de vagues de vent; enfin, les grosses lames tendent à « plonger ». Sur une plage donnée et pour une houle au large donnée, l'eau revenant vers le rivage après déferlement d'une lame a un effet certain sur la nature du déferlement de la lame suivante.

Au delà du déferlement que se passe-t-il ? On peut considérer en gros que le déferlement constitue un déversement d'eau dans la partie de la mer située à terre du point de déferlement. Il doit donc se passer un phénomène analogue à celui qu'on constate quand on introduit brusquement une certaine masse d'eau dans un canal : il se forme une onde de translation à condition toutefois que le déferlement n'ait pas lieu très près d'un rivage à pente appréciable, auquel cas l'eau est projetée vers l'avant et constitue le « jet de rive » qui vient mourir sur la plage et est ensuite renvoyée vers la mer par la pente. Si donc le fond a une pente faible, l'onde de translation formée est d'abord constituée par une ligne d'eau bouillonnante ; puis une quantité suffisante d'énergie ayant été dissipée pour que l'onde devienne stable (hauteur de l'ordre de la profondeur locale d'après BAZIN, 1865), une onde de translation sans écume se propage à la côte pour déferler à nouveau, etc. Au passage d'une telle onde les particules d'eau subissent une translation en avant sans retour en arrière.

Il existe souvent sur une plage plusieurs lignes d'eau bouillonnante ; un premier groupe au large formé de gros « rouleaux » : c'est la « barre » formée de trois ou quatre rouleaux ; le premier rouleau du large dont l'emplacement dépend de la hauteur de la lame se déplace en fonction de cette hauteur ; on peut donc normalement rencontrer deux lignes de houles limitées au large des lignes de rouleaux. Plus à terre peut exister un autre groupe de rouleaux formé par le déferlement des ondes de translation ; mais ils sont de hauteur relativement faible.

III. — RÉFRACTION DE LA HOULE

La houle, mouvement ondulatoire ayant une vitesse de phase déterminée (célérité), se réfracte quand elle passe obliquement sur des profondeurs modifiant sa vitesse de propagation ; les lois qu'elle suit sont les mêmes que celles de l'optique : $\sin i/C = \text{constante}$. Cet effet n'est appréciable, pratiquement, que lorsque la profondeur devient inférieure à la demi-longueur d'onde du large. Les crêtes ont tendance à s'aligner sur les courbes de niveau.

Si la variation de vitesse de la houle est brutale (élévation brutale du fond) une partie de l'énergie est réfractée, l'autre est réfléchi (voir plus bas). Mais très souvent, la réfraction est progressive, comme la variation de profondeur et la célérité. On sait que, en optique, on peut obtenir, à partir d'une surface d'onde initiale, la forme des surfaces d'onde suivantes en effectuant la construction d'HUYGHENS : on porte à partir de nombreux points de la surface d'onde origine une distance proportionnelle à la célérité et on prend l'enveloppe des cercles obtenus ; c'est une nouvelle surface d'onde ; on répète la construction à partir de celle-ci, etc. De même, pour la houle, à partir de points d'une crête origine, qui est une crête en eau profonde, on porte une longueur proportionnelle à la célérité ; l'enveloppe des cercles obtenus est une nouvelle crête. Naturellement dans l'appréciation des célérités, il faut tenir compte de la hauteur d'eau instantanée et par conséquent majorer les profondeurs de la carte marine des hauteurs d'eau dues à la marée. De proche en proche on obtient ainsi le **plan de vagues** ou le **diagramme de réfraction des vagues**. De la forme de crêtes on déduit les trajectoires « orthogonales », qui sont les pendents des « rayons » lumineux normaux aux surfaces d'onde. Mais ce tracé peut être délicat et comme, nous le verrons, on se fonde sur la distance réciproque des orthogonales pour apprécier les fluctuations d'amplitude dues à la seule réfraction, on peut aussi tracer directement les orthogonales passant par des points équidistants de l sur la crête origine. Tant qu'on a affaire à des modifications graduelles de la profondeur, on

peut admettre qu'aucune énergie ne franchit les orthogonales ; donc l'énergie transmise entre deux orthogonales initialement écartées de l est constante. Si les orthogonales se resserrent, l'énergie se concentre ; si elles s'épanouissent, l'énergie s'épanouit aussi. Si l'écartement local des orthogonales est l' , l'amplitude de la houle, **par rapport à ce qu'elle serait en l'absence de réfraction**, varie comme $\sqrt{l/l'}$; c'est le **coefficient de réfraction**. Comme l'amplitude relative a'/a varie aussi en l'absence de réfraction en fonction de H/λ , on l'a vu, on obtient l'amplitude réelle en multipliant le a'/a relatif à la même houle sans réfraction par le coefficient de réfraction. De même pour la cambrure relative.

Par conséquent, la considération des fluctuations d'amplitude de la houle en l'absence de réfraction et celle du coefficient de réfraction déduit du « plan de vagues » permettent de prédéterminer la façon dont se répartira à la côte l'énergie d'une houle au large constatée ou prédite. Le « plan de vagues » est donc un instrument essentiel pour l'ingénieur, comme pour les États-majors d'opérations amphibies. La diversité du tracé des orthogonales, selon la forme des fonds est extrême. Le plan de vagues de Long Beach (Californie) montre, pour une houle de 20 s du S.-S.-E., l'extraordinaire concentration de l'énergie sur la jetée et son épanouissement considérable sur la plage voisine. La forme des orthogonales concourant sur la jetée rappelle la convergence au foyer d'un système optique de rayons parallèles incidents. Une houle invisible au large et sur la plage a détruit la jetée (fig. 13).

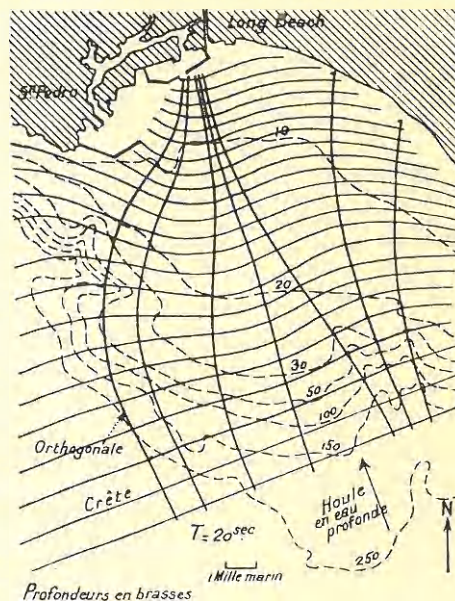


Fig. 13.

La réfraction permet évidemment de prévoir la diminution d'agitation à la plage à hauteur d'une vallée sous-marine (fig. 14) comme le Gouf de Cap-Breton, la concentration de l'énergie sur les caps ou les hauts fonds, l'épanouissement de l'énergie dans les baies, ce qui est contraire à l'opinion courante qui veut que la houle « s'engouffre » dans une baie aux abords convergents et doive s'y gonfler. La réfraction, on le voit, aide la mer à contourner les obstacles et à propager l'agitation en des zones qu'on pourrait croire abritées ; la houle contourne les musoirs des jetées si leurs parois sont inclinées, etc. La réfraction fait ressortir les petites profondeurs sur les photographies aériennes ; on y rencontre, en effet,

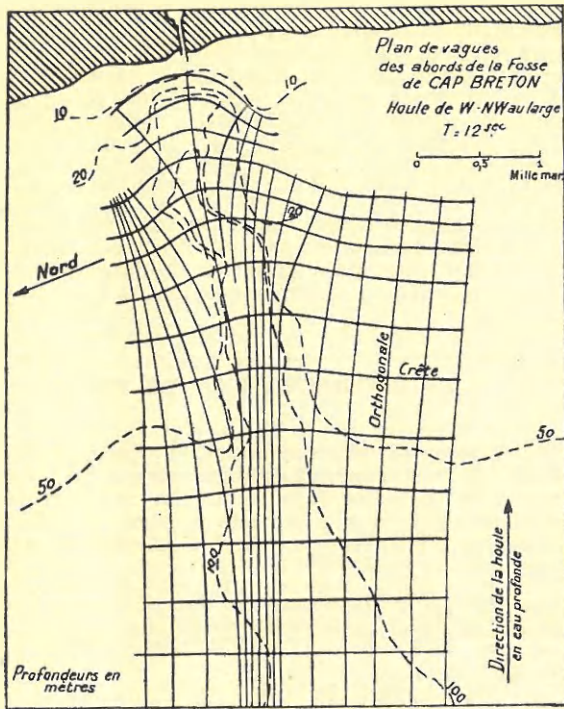


Fig. 14.

des houles croisées dues aux lames abordant le haut fond de part et d'autre; de très belles figures, souvent, sont dessinées par les crêtes.

Les courants de houle. — On a, depuis quelques années, constaté sur modèle réduit, l'existence de courants longitudinaux coexistant avec une houle brisant obliquement sur une plage et dont le sens coïncide avec celui de la composante selon le rivage de la célérité des lames.

Ces courants ont été dénommés « courants de houle ». Ils ont été constatés dans la nature, mais leur domaine exact d'existence n'a pas encore, à ma connaissance, été délimité. Ils ont été reconnus dans la zone de déferlement de la houle et à terre de cette zone. Ils jouent un rôle fort important dans les transports côtiers de matériaux.

Sans prétendre en donner une explication, il ne paraît pas inutile de faire le point de ce qu'on peut en dire.

Il est d'abord essentiel de bien cerner le problème et, en particulier, de s'assurer, dans la nature, que le courant constaté en présence de houle ou de vagues de vent n'est pas le fait d'une circulation littorale des eaux océaniques due, par exemple, à un vent local ou au vent plus ou moins lointain qui a levé la houle.

Ceci étant, on connaît depuis longtemps le « cheminement en dents de scie » des matériaux de la plage sous l'effet des houles obliques déferlantes; il est clair que le cheminement doit coexister avec un courant longitudinal plus ou moins fort qui doit se faire sentir par continuité et viscosité jusqu'à une certaine distance du rivage. Mais ce courant n'a pas de raison d'être cantonné au voisinage immédiat de la plage; en effet, au moment où la houle déferle, ce qui se produit par profondeur de plusieurs mètres pour une houle de plusieurs mètres d'amplitude locale, les molécules d'eau cessent, pour un temps au moins, d'obéir aux lois de la mécanique des fluides pour suivre celles des points matériels; elles sont projetées

en avant d'une certaine hauteur avec une vitesse qui est probablement égale à la célérité locale de l'intumescence. La quantité de mouvement acquise par ces molécules à une composante longitudinale aussitôt que la houle déferle obliquement par rapport à la côte; cette quantité de mouvement se retrouverait en partie dans le mouvement en avant des molécules, au passage de l'onde de translation en laquelle se résout le brisant; sans doute une grande partie de cette quantité de mouvement est-elle dissipée sous forme de turbulence, mais il n'est pas interdit de penser qu'une part de la composante longitudinale en demeure, puisqu'une part de la composante transversale est constatée. Pour celle-ci une compensation profonde est nécessaire, mais non par celle-là. Des « courants de houle » sont donc prévisibles dans toute la zone de déferlement sous l'effet de la cause mentionnée, qui n'exclut nullement d'autres causes éventuelles.

Mais un tel courant ne peut-il exister plus au large encore? Nous avons indiqué que de nombreuses houles, au second ordre d'approximation, comportaient un courant d'entraînement dans le sens de la propagation. Quand les crêtes sont parallèles aux lignes de niveau, on admet qu'une compensation se fait dans le liquide, le courant superficiel étant opposé à un courant profond. Mais si la crête est oblique, par rapport aux lignes de niveau, la composante longitudinale peut se développer librement. Comme la vitesse d'entraînement est proportionnelle au carré de la cambrure et à la célérité de la houle, on doit s'attendre à des courants longitudinaux croissant comme ces facteurs et le sinus de l'angle entre la crête et la ligne de niveau; le courant doit être particulièrement fort pour les longues houles dont la cambrure croît considérablement à la côte. Or, au large, ce courant atteindrait 2,5 nœuds pour une houle de cambrure 10 % et de 100 m de longueur.

Cette explication ne peut être considérée comme une démonstration car nous ignorons l'expression de la vitesse d'entraînement dans la houle réfractée. J'ajoute que d'autres explications ont été proposées, notamment fondées sur la « surélévation de niveau moyen » ou à des surpressions dues à ces houles. Elles ne semblent pas encore parfaitement convaincantes en l'absence de traitement mathématique de la houle par profondeur variable selon la direction de propagation et selon les crêtes.

Des phénomènes plus ou moins analogues à la réfraction, en ce sens que les conditions dans lesquelles on les constate ont un effet sur la célérité de la houle, se rencontrent dans divers cas particuliers.

Lorsqu'un courant coule en sens inverse de la propagation de la houle, on montre que l'amplitude et la cambrure des lames croissent très rapidement lorsque la vitesse du courant devient appréciable vis-à-vis de la célérité de la houle en eau calme (15 à 20 %) (fig. 15). Il en résulte que les vagues se cambrent très vite et déferlent. Ce phénomène est fréquent dans les cas où le « vent est contre le courant » (raz Blanchart); quand le vent (et la mer) est dans le sens du courant, cambrure et amplitude décroissent lentement et il y a tendance à l'accalmie. Il se produit des phénomènes de cet ordre

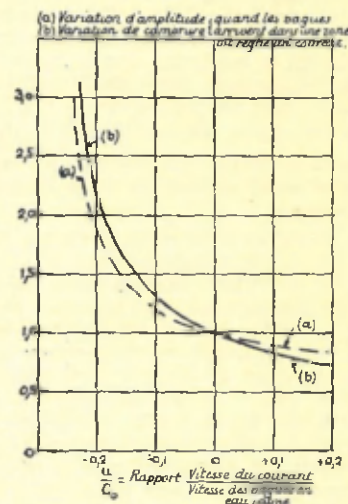


Fig. 15.

PUBLICATIONS

DU

CENTRE DE RECHERCHES ET D'ÉTUDES OCÉANOGRAPHIQUES

I. — CIRCULAIRES

a) Renseignements techniques et bibliographiques (R. T. B.) :

	F
N° 1. — Les flotteurs et les courantomètres (bibliographie).....	100
N° 2. — Liste des principaux fournisseurs français et étrangers de matériel océanographique (première liste).....	50
N° 3. — Remarques sur la statistique granulométrique dans l'étude des sables (L. BERTHOIS).....	250
N° 4. — Dosage dans les eaux naturelles des composés minéraux du phosphore (bibliographie).....	150
N° 5. — Les thermomètres et les thermographes (bibliographie).....	100
N° 6. — Dosage de l'oxygène dissous dans les eaux naturelles (bibliographie).....	150

b) Instructions techniques (I. T.) :

N° 1. — Technique du dosage de l'oxygène dissous dans l'eau basée sur la méthode de Winkler (B. DUS-SART et C. FRANCIS-BŒUF).....	150
N° 2. — Note sur la construction graphique de la spirale d'Ekman (L. BERTHOIS et U. COLETTE).....	70
N° 3. — Réalisation d'une loupe de lecture sans parallaxe, son application aux mesures océanographiques (M. MÉNACHÉ).....	70
N° 4. — Procès-verbaux de carénage (G. DECHAUX)....	200
N° 5. — Identification de salissures marines (B. CALLAME)	200
N° 6. — Instructions pour l'emploi du courantomètre de P. Idrac (V. ROMANOVSKY).....	<i>Sous presse</i>

II. — CAHIERS

	F
N° 1. — Recherches océanographiques dans la mer de Norvège à la station météorologique M (H. MOSBY).	150
N° 2. — Les remontées des eaux profondes dans la baie de Villefranche (V. ROMANOVSKY).....	150
N° 3. — I. Contribution à l'étude lithologique des galets du fond de la Manche (L. BERTHOIS). II. A propos des conditions de fixation des organismes sur les câbles sous-marins (B. CALLAME)...	200
N° 4. — Notes sur les faciès biologiques du bassin d'Arcachon en rapport avec les conditions physico-chimiques du milieu (B. CALLAME).	<i>Sous presse</i>

III. — CONFÉRENCES (Cycle 1950)

N° 1. — Les fonds de pêche du plateau continental (J. LE GALL).....	<i>Sous presse</i>
N° 2. — Problèmes de défense des côtes (A. DE ROUVILLE).....	200
N° 3. — Exploration des canyons sous-marins du Golfe du Lion (J. BOURGART).....	200
N° 4. — L'utilisation des scaphandres autonomes dans les recherches océanographiques (exemples) (P. DRACR).....	<i>Sous presse</i>
N° 5. — Liaisons entre la météorologie et l'océanographie (P. QUENEY).....	100
N° 6. — La productivité de l'eau de mer (B. DUS-SART).	150
N° 7. — Les marées à la côte (A. GODGENHEIM).....	200
N° 8. — Problèmes de corrosion et de salissures marines (G. DECHAUX).....	100
N° 9. — Le laboratoire d'hydraulique au service de l'océanographie (A. NIZERY).....	<i>Sous presse</i>
N° 10. — Problèmes de bactériologie marine (A. PRÉVÔT).	150
N° 11. — La houle à la côte (H. LACOMBE).....	200
N° 12. — La prospection géophysique sous-marine (L. MIGAUX).....	<i>Sous presse</i>

PRIX PAR ABONNEMENT

Abonnement à 12 Circulaires (indifféremment R. T. B. ou I. T. dans l'ordre de parution)...	1 500 F
Abonnement à 12 Cahiers	2 000 F
Abonnement à 12 Conférences (cycle 1950).....	2 000 F

— Une réduction de 20 % est accordée aux membres du C. R. E. O.

— L'ensemble des Conférences est envoyé gratuitement aux membres du C. R. E. O.

— Paiement par chèque bancaire barré, ou virement au C. C. P. 7012-06 Paris (C. R. E. O., 1, quai Branly, Paris-VII^e).

12.701-3-51

ARRAULT ET CIE

— TOURS (France) —

Dépôt légal : 1^{er} trim. 1951

(Reproduction interdite)

Le Gérant : V. ROMANOVSKY