

Sur certaines propriétés de la houle
étudiées à l'aide des enregistrements
séismographiques

par

Pierre BERNARD

Docteur ès Sciences

Les séismographes n'enregistrent des phénomènes sismiques proprement dits que pendant une faible fraction de leur durée de fonctionnement, mais ils montrent que le sol est parcouru d'une façon permanente par les ondulations de période généralement bien définie, comprise entre 3 et 10 secondes. L'amplitude de ces ondes varie très fortement d'une minute à l'autre, rappelant le phénomène des battements, et d'un jour à l'autre, en des variations parfois soudaines, comme dans le cas du 18 octobre 1935 où les séismogrammes de toutes les stations européennes ont montré une « tempête microsismique » débutant brusquement vers 20 heures (figure 1).

L'aspect de ces mouvements présente une analogie frappante avec les trains de houle que nous voyons se propager à la surface de la mer : même balancement régulier, mêmes groupes d'ondes d'amplitude croissante, puis décroissante, et l'on a été conduit dès les premières observations à considérer cette « houle terrestre » comme causée directement

par la houle marine. Cependant cette relation n'est devenue évidente que lorsqu'on a eu l'idée de comparer les variations d'amplitude de l'agitation microsismique observée en Europe Occidentale avec les variations de la houle observée sur la côte du Maroc.

Les observations du Maroc, commencées dès 1907 en vue d'établir un service de prévision de la houle protégeant le trafic maritime sur cette

Strasbourg, composante
verticale 18 octobre 1935
10 h. 02

Ondes longues d'un séis-
me d'épicentre 13° N.,
143° E. (Iles Mariannes).

19 h. 04

Ondes microsismiques
provenant d'une dépression
située au sud de l'Islande.
(62° N., 15° W.).

19 octobre 6 h. 22

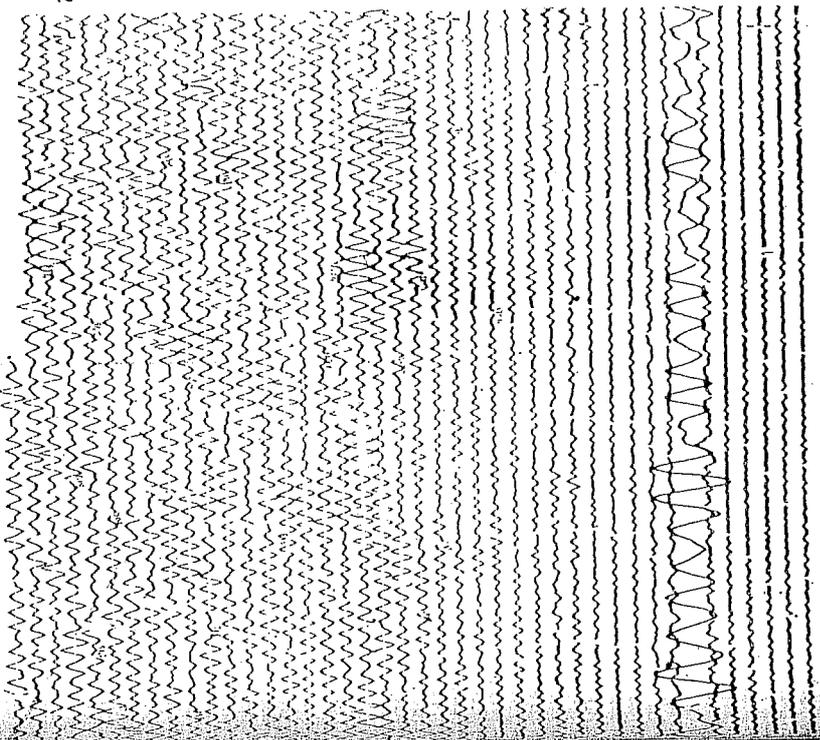


Fig. 1.

côte peu abritée, permettraient en effet de comparer les mouvements microsismiques et ceux de la mer d'un point de vue nouveau, car ces observations portent, non plus sur la grosse mer due à la tempête locale ou voisine, mais sur la *houle libre* qui a souvent parcouru l'Océan sur une

très longue distance avant de parvenir à la côte du Maroc, où les conditions météorologiques sont alors indépendantes de la dépression d'où vient la houle (1).

D'autre part, l'orientation de la côte du Maroc l'expose à ressentir l'effet de toutes les perturbations atmosphériques de l'Atlantique Nord se produisant au nord de l'anticyclone des Açores, c'est-à-dire apparte-

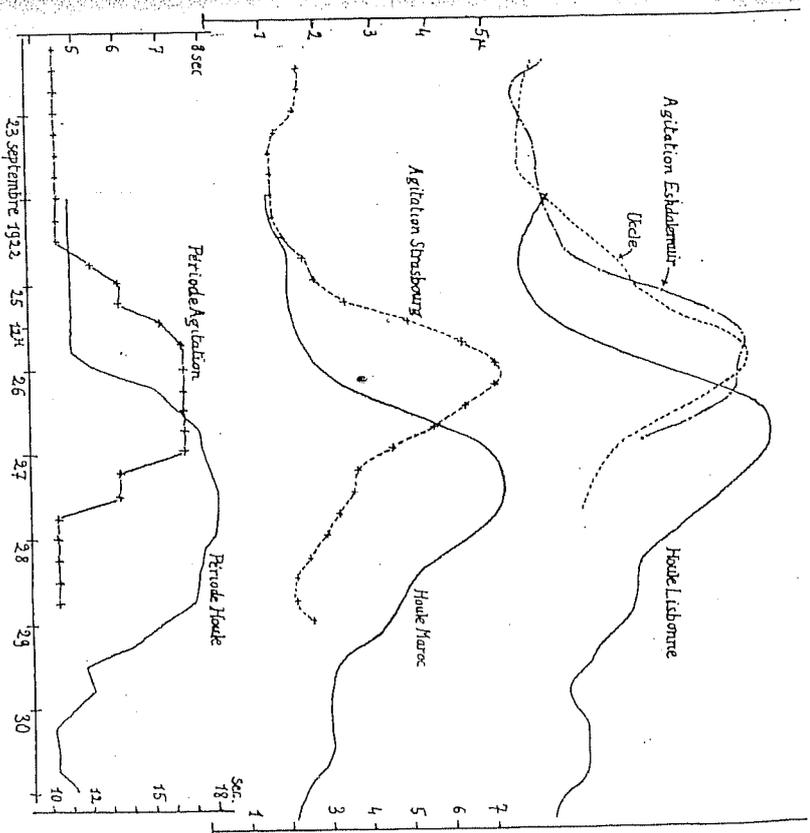


Fig. 2.

nant au front polaire et à ses dérivations, et il n'existe aucune autre côte en Europe dont l'exposition soit similaire.

Si l'on construit, à l'aide de ces observations, la courbe de variation de hauteur de la houle observée sur la côte N.-W. du Maroc et la courbe des variations de l'amplitude de l'agitation à Strasbourg, pendant

1 J. ROUCH. — *La Revue Maritime* n° 167 (nov. 1933), p. 612.

quelques jours où ces variations ont été notables, les deux courbes obtenues présentent un remarquable parallélisme, mais les variations de la houle se produisent avec un retard sur celles de l'agitation.

La figure 2 en présente un cas très démonstratif : l'agitation micro-séismique passe par un maximum le 26 septembre 1922 entre 0 et 6 heures dans toutes les stations de l'Europe Occidentale : à ce moment, une dépression de 965 mb. abordait la pointe S.-W. de l'Irlande. Une augmentation parallèle de l'intensité de la houle se produit le lendemain au Portugal, puis au Maroc, où le maximum est observé avec un retard d'un peu plus de 30 heures sur celui de l'agitation, temps représentant la durée de propagation de la houle entre le centre de la dépression et le Maroc.

Un grand nombre de courbes analogues, portant sur les années 1925 à 1935, ont pu être construites (1)), et l'étude statistique des chiffres réunis : retard de la houle, amplitudes et périodes comparées des deux phénomènes, conduit à un certain nombre de résultats.

1. — *La différence des temps d'arrivée de la houle au Maroc et de l'agitation à Strasbourg* est en rapport avec la distance séparant la dépression origine de la houle et la côte du Maroc : les cas de quasi-simultanéité de la houle et de l'agitation correspondent à des dépressions rapprochées du Maroc, tandis que dans les cas de dépressions très éloignées, passant par exemple entre le Groenland et l'Islande, le maximum de la houle se produit plusieurs jours après le maximum d'agitation.

L'interprétation la plus simple qui se présente à l'esprit est que chaque dépression est la source à la fois de la houle et de l'agitation, et la vitesse de propagation de l'agitation (2 kilomètres par seconde environ (2)) étant très grande par rapport à celle des ondes marines, le maximum de la houle sera observé sur la côte du Maroc avec un retard sur le maximum de l'agitation proportionnel à la distance parcourue et inversement proportionnel à la vitesse de la houle. Celle-ci dépend théoriquement de la période. Si l'on considère alors des cas de houle de même période, en portant en ordonnée la distance du centre de la dépres-

1 P. BERNARD. — Etude sur l'agitation micro-séismique et ses variations. *Annales de l'Institut de physique du globe de Paris*, t. XIX, p. 27 (1941).
2 *Ibid.*, p. 21.

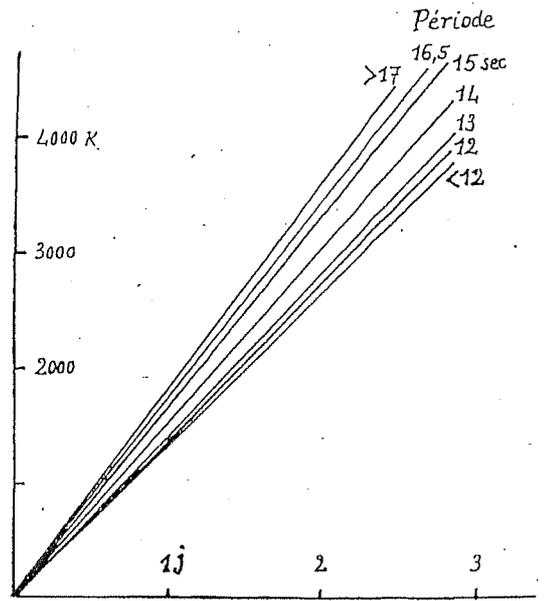


FIG. 4.

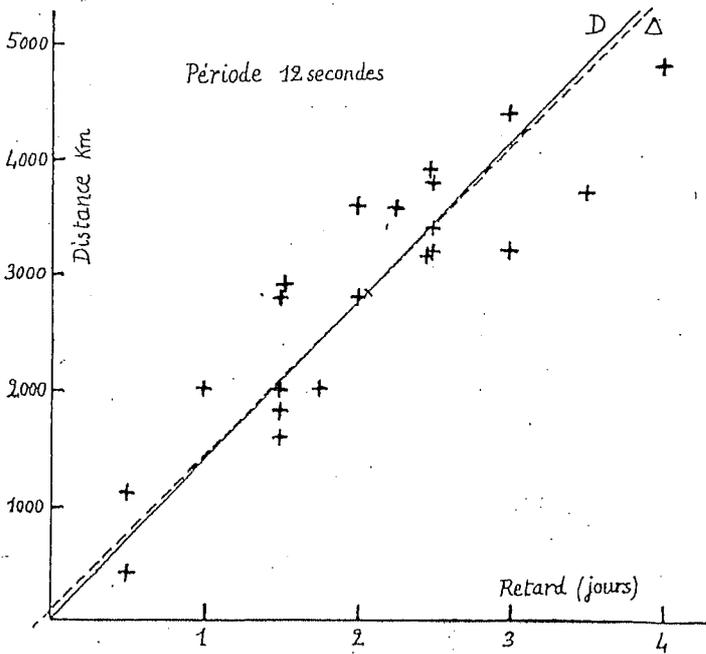


FIG. 3.

sion à Casablanca, et en abscisse le retard de la houle, les points obtenus se répartissent très visiblement le long d'une ligne droite Δ , comme le montre l'exemple de la figure 3 : cette droite, déterminée par la méthode des moindres carrés, passe assez près de l'origine des coordonnées pour être confondue avec la droite D joignant cette origine au point dont les coordonnées sont les valeurs moyennes respectives des retards et des distances.

Nous vérifions donc la proportionnalité de ces deux grandeurs, car l'écart des points représentant les observations par rapport à la droite D est dans la limite des erreurs d'observation : l'agitation est mesurée 4 fois par jour et l'heure où elle est la plus forte est déterminée à 6 heures près ; la houle est observée à 8 heures du matin seulement, avec un résumé sommaire de sa variation dans la journée, de sorte que l'erreur sur le moment de son maximum peut atteindre 12 heures, notamment s'il a lieu pendant la nuit. Les points d'observation peuvent donc présenter par rapport à la droite D des écarts atteignant 18 heures, et les valeurs effectivement observées de ces écarts se répartissent à peu près suivant la loi de probabilité des erreurs accidentelles, la fréquence des écarts observée étant voisine de celle que l'on calcule par la loi de Bernoulli :

Écarts inférieurs à...	3h	6h	9h	12h	15h	18h	22h
Fréquence observée...	0.24	0.49	0.73	0.86	0.93	0.97	1.00
Fréquence calculée...	0.30	0.56	0.75	0.88	0.95	0.98	0.99

Ce tableau utilise un total de 171 observations pour lesquelles la période de la houle n'est pas la même ; les observations ont donc été réparées suivant la période de la houle, et les différents groupes obtenus donnent chacun une droite D de pente différente (figure 4) ce qui traduit l'influence de la vitesse de la houle : *cette vitesse croît avec la période.*

II. — Le parallélisme des variations de l'amplitude de la houle et de l'agitation microsismique, ainsi que les autres relations qualitatives ou numériques qui seront exposées plus loin, montrent qu'une liaison existe certainement entre les deux phénomènes. Cependant on ne peut admettre sans réserve l'idée que la houle est la cause des mouvements du sol se propageant jusqu'à l'intérieur des continents, car les observations faites ci-dessus ne peuvent s'expliquer qu'en plaçant l'origine de l'agi-

tation microsismique dans la partie centrale des dépressions atmosphériques et non en un point quelconque du chemin que la houle doit parcourir pour parvenir à la côte du Maroc.

J'ai cru qu'on pourrait trouver la raison de cette particularité dans le caractère que présentent les mouvements de la mer au centre des dépressions cycloniques (1) : la houle s'y dresse en vagues pyramidales constituant un clapotis gigantesque dont les points de plus ample oscillation peuvent être autant de sources de pression périodique sur le fond de la mer, pression qui donnera naissance à un mouvement oscillatoire de même période du sol, s'étendant avec une vitesse en rapport avec sa période et avec les conditions géologiques qu'il rencontre.

Un clapotis analogue, avec oscillations sur place du niveau de l'eau, se produit lorsque la houle libre, se réfléchissant sur un obstacle, vient interférer avec les ondes incidentes : les oscillations sont alors en certains points si amples que le mouvement vers le haut se termine par des projections d'écume (2).

Au contraire, dans le cas d'un train d'ondes de front continu et de déplacement constant, les points où les mouvements sont de phase opposée donneront sur le fond de la mer des pressions de sens contraire, et la longueur d'onde des oscillations microsismiques étant beaucoup plus grande que celle de la houle, les mouvements transmis par le sol à une certaine distance seront pratiquement simultanés, mais opposés, et ils interféreront, de sorte que l'effet total du train de vagues à l'extérieur sera nul.

L'agitation microsismique aura donc son origine aux points où se produiront des interférences de houle dominant de hautes vagues pyramidales, c'est-à-dire dans la zone centrale des cyclones, et d'une façon moins accentuée, aux endroits où se produisent des réflexions de la houle, soit sur une côte abrupte, soit sur des hauts-fonds ou sur le talus continental. Une agitation d'origine locale pourra donc être mise en évidence dans des stations proches d'une côte où se produisent de fortes houles, et éloignée de la région des dépressions. C'est effectivement ce qu'il a été possible de faire sur les séismogrammes de la nouvelle station sismographique de l'Observatoire Averroes, près de Casablanca.

1 CHARCOT. — La mer du Groenland, croisières du « Pourquoi-Pas », p. 162 (1929).

2 J. ROUCH. — La Mer, p. 55 (Paris, 1940).

III. — Dans cette station, les variations d'amplitude de l'agitation correspondent simultanément aux variations de la force de la houle sur l'ensemble de la côte marocaine : sur les courbes tracées (figure 5), les maxima de l'agitation semblent précéder de quelques heures ceux de la houle, mais l'heure de ces derniers n'est pas fixée avec une précision suffisante pour qu'il soit possible d'affirmer la réalité de cette avance.

D'autre part, la période de l'agitation suit étroitement les variations de la période de la houle, comme le montrent les colonnes 3 et 4 du tableau ci-contre, où la période de la houle mesurée chaque jour à 8 heures est mise en regard de la période de l'agitation à Averroes mesurée le même jour entre 6 heures et 12 heures. Pourtant ces périodes ne sont pas égales : celle de la houle est approximativement le double de celle de l'agitation (colonne 5).

L'agitation à Saint-Maur, qui provient du centre des dépressions, comme celle des autres stations d'Europe, précède la houle de 0 à 3 jours suivant la position de la dépression ; sa période, mesurée au moment du maximum correspondant (colonne 9) est en moyenne la même que celle de l'agitation à Averroes.

La houle cause donc, d'abord à proximité immédiate de son origine, puis au moment de son arrivée sur la côte du Maroc, ou un peu avant, des mouvements du sol qui ont dans les deux cas la même période, moitié de celle qu'on observe sur la houle lorsqu'elle aborde le rivage.

Une explication simple de ce fait serait une transformation de la houle lorsqu'elle se propage sur une eau peu profonde, entraînant un doublement de sa période apparente. Quelque invraisemblable qu'un tel phénomène puisse paraître, il n'est pas absolument dénué de probabilité : on sait en effet que la houle observée par les navires au large des côtes ne paraît pas avoir de rapport direct avec la barre observée sur le rivage (1) ; Armand Paris a mesuré au large des périodes de la houle qui, sur tous les Océans, ont des moyennes comprises entre 5 et 10 secondes (2), c'est-à-dire du même ordre que la période de l'agitation micro-séismique dans toutes les stations.

Dans cette hypothèse, la période de l'agitation observée près d'une côte serait celle de la houle au large, et non celle des rouleaux déferlant

sur le rivage lui-même : que la réalité de la transformation supposée se vérifie ou non par la suite, l'étude des enregistrements de séismographes appropriés fournirait certainement des indications utiles sur les propriétés de la houle, surtout si des enregistrements de celle-ci à des distances variables de la côte étaient simultanément réalisés.

IV. — *La comparaison des périodes de l'agitation et de la houle* a été poussée plus loin à l'aide des observations de Strasbourg déjà utilisées pour l'étude des variations de l'amplitude : dans la liste des 171 observations de maxima correspondants de la houle et de l'agitation, la période de l'agitation au moment du maximum d'amplitude varie de 3,5 à 9,2 secondes, et la période de la houle dont la valeur moyenne est, nous l'avons vu, double de la précédente, varie de 6 à 20 secondes.

Au sujet de ce matériel d'observation, on peut faire les remarques suivantes :

a) Il ne comporte qu'un petit nombre d'observations de courtes périodes, soit sur la houle, soit sur l'agitation. En effet les maxima d'amplitude sont généralement accompagnés de périodes supérieures à la moyenne, et ces maxima peuvent être mis en relation avec des dépressions océaniques, origine probable des deux phénomènes ; par contre il n'est nullement évident que la houle observée au moment où sa force passe par un minimum ait la même provenance que l'agitation mesurée au moment du « minimum correspondant » de la courbe des amplitudes. Aussi les seuls cas de correspondance retenus entre courtes périodes sont ceux où la période est restée faible lors d'un maximum d'amplitude.

b) La période de l'agitation micro-séismique résulte d'une mesure portant sur une seule onde, choisie pour sa forte amplitude et la symétrie de son tracé, et qui peut avoir une période différente de celle des autres ondes enregistrées aux instants voisins : la période de l'agitation ne peut donc pratiquement pas être définie à moins d'une demi-seconde près.

c) La même observation peut être faite sur les mesures de la période de la houle : les intervalles entre les rouleaux de houle sont parfois très variables, et les chiffres publiés sont des valeurs maxima moyennes (arrondies à la seconde entière).

Les erreurs de mesure ne suffisent cependant pas à expliquer la dispersion des valeurs de la période de la houle correspondant à une même valeur de la période de l'agitation : aux cas d'agitation de 6 secon-

1 J. ROUCH. — *La Revue Maritime*, nov. 1933, p. 614.

2 A. PARIS. — *Ibid.*, t. 31 (1871), p. 119.

des correspondent des houles de 8 à 19 secondes; réciproquement, les houles de période 14 secondes sont en relation avec des agitations de 5 à 8 secondes; c'est le sens de déplacement des dépressions origine de la houle qui intervient pour produire ces différences considérables. En effet

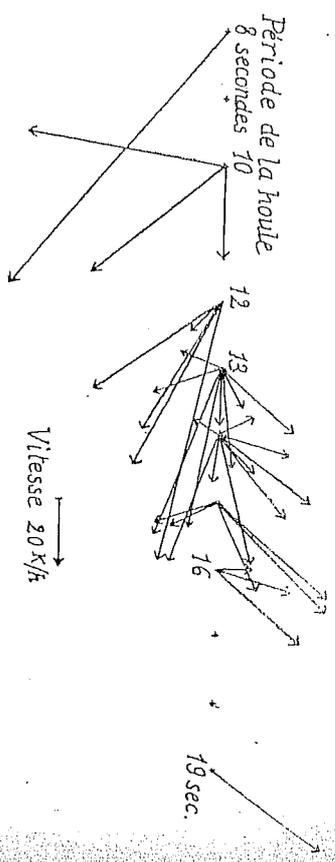


FIG. 6. — Direction et vitesse de déplacement des dépressions accompagnées d'agitations micro-séismiques de 6 secondes, en fonction de la période de la houle correspondante.

les dépressions s'éloignant du Maroc envoient, toutes choses égales d'ailleurs, des houles de période plus longue que les dépressions qui s'en rapprochent. La figure 6 illustre ce résultat: pour les cas d'agitation micro-séismique de période 6 secondes, la vitesse de la dépression correspondante est représentée par un vecteur dont l'origine (sur l'axe des abscisses) est déterminée par la période de la houle, et dont la direction est telle qu'un déplacement sur l'arc de grand cercle qui joint le centre de la dépression à Casablanca soit représenté par une flèche verticale vers le haut pour un éloignement, et vers le bas pour une dépression se dirigeant vers le Maroc.

Il existe donc sur la houle un effet analogue à ce qu'on appelle phénomène de Doppler pour le son et effet Doppler-Fizeau pour la lumière. Cet effet se vérifie d'ailleurs quantitativement si l'on mesure sur les cartes la composante de la vitesse de déplacement de chaque dépression sur la direction qui joint son centre à l'observateur marocain: le rapport de la période de la houle à celle de l'agitation varie linéairement avec cette composante de vitesse, et cette variation est plus rapide pour les houles à courte période, dont la vitesse de propagation est plus

faible, que pour les houles à grande période (1), tous résultats conformes au théorème de Doppler.

Une autre observation vient à l'appui de notre conclusion: nous avons admis que la période de l'agitation à Aveiros est celle de la houle au large de la côte marocaine; cette période est restée, du 14 janvier au 4 février 1937, constamment égale ou supérieure à la période de l'agitation correspondante à Saint-Maur (colonne 20 du tableau), sauf le 15 janvier, date où arrive la houle due à la dépression du 12 janvier, qui a passé vers le S.-E. entre le Groenland et l'Islande, donc en se rapprochant nettement du Maroc; toutes les autres dépressions ont eu au contraire un mouvement perpendiculaire à la direction du Maroc, ou un mouvement d'éloignement: cette observation confirme que la faible agitation due à l'arrivée de la houle sur la côte a une période dépendant de celle de la houle, tandis que le rapport de cette dernière à la période de l'agitation provenant de la zone centrale des dépressions dépend du sens de déplacement de la source par rapport au point d'observation de la houle.

V. — On sait la difficulté que présente la mesure de la vitesse de la houle à bord d'un navire: elle nécessite deux observateurs et des calculs correctifs tenant compte de la vitesse du navire. Les valeurs de la vitesse de la houle données par ces mesures directes ont généralement été de l'ordre de grandeur prévu par la formule de Gerstner ($V = \frac{gT}{2\pi}$) mais en raison notamment de la nécessité d'utiliser les moyennes de nombreuses observations, la relation de proportionnalité qui lie théoriquement la vitesse à la période n'a pas été confrontée avec l'observation. Or les résultats de la comparaison de la houle et de l'agitation micro-séismique permettent d'étudier la vitesse de la houle de deux manières différentes.

1°. Le rapport du retard de la houle à la distance de son origine au Maroc dépend évidemment de sa vitesse de propagation: on peut donc, à partir de la pente des droites de la figure 4, calculer la vitesse de la houle. Les observations étant classées suivant la période, on obtient pour la vitesse les différentes valeurs suivantes:

Période de la houle.....	< 14 sec	14 et 15	> 14 sec
Nombre d'observations.....	72	61	71
Période moyenne (secondes).....	11.4	14.5	16.2
Force moyenne.....	3.6	5.3	6.0
Vitesse (moyenne pondérée en km/h).....	57.5	66.4	70.9

1 P. BERNARD, loc. cit, p. 43.

Encore que ces chiffres ne soient pas très différents de ceux que donne la formule de Geisner, il saute immédiatement aux yeux qu'ils ne sont pas proportionnels à la période (figure 7, courbe I). Il est donc probable que dans la propagation de la houle interviennent des facteurs dont la théorie ne tient pas compte.

Parmi ceux-ci, on pourrait d'abord songer à la hauteur de la houle : les houles de grande amplitude se propagent théoriquement plus vite que les houles faibles (Stokes). Or les grandes périodes se trouvent généralement associées aux houles les plus fortes, et si la hauteur influait sur la fonction vitesse/période, ce devrait être dans le sens contraire de celui que nous observons.

La profondeur de la mer est un facteur dont l'influence paraît à première vue plus probable. Si l'on se reporte à une carte bathymétrique de l'Atlantique Nord, on constate que les profondeurs inférieures à 1000 m. se trouvent toutes (sauf au voisinage des Açores) à l'est d'une ligne passant par 35° N. et 9° W. Gr. à une extrémité et 65° N., 28 W. à l'autre. Parmi les dépressions étudiées, 64 ont leur centre à l'ouest de cette ligne, et la propagation de la houle entre ce centre et le Maroc se fait constamment en eau profonde. Or si l'on calcule la vitesse de cette propagation de la même manière que plus haut, on obtient les chiffres suivants :

Période.....	< 14	14-15	> 14
Vitesse	59.1	66.9	72.1

Ces chiffres sont très légèrement supérieurs aux précédents, mais la proportionnalité à la période n'est pas améliorée.

Enfin on peut envisager une action du vent sur la propagation de la houle : malgré bien des travaux, le rôle du vent probablement très complexe est encore mal connu et ne peut guère être étudié à l'aide des documents utilisés ici. Il n'est donc pas possible actuellement de déterminer avec certitude la cause de la divergence entre la théorie et l'observation en ce qui concerne la vitesse de la houle.

2° L'influence du déplacement de la source sur la période de la houle dépend également de la vitesse de propagation de celle-ci. En effet, la période observée de la houle T est liée à celle que donnerait une source immobile T₀ par la formule $T = T_0 \left(1 + \frac{v}{V}\right)$.

T₀ étant connu d'après les observations de dépressions de vitesse relative nulle ayant donné des agitations de même période, et v, vitesse de déplacement de la dépression par rapport à l'observateur de la houle,

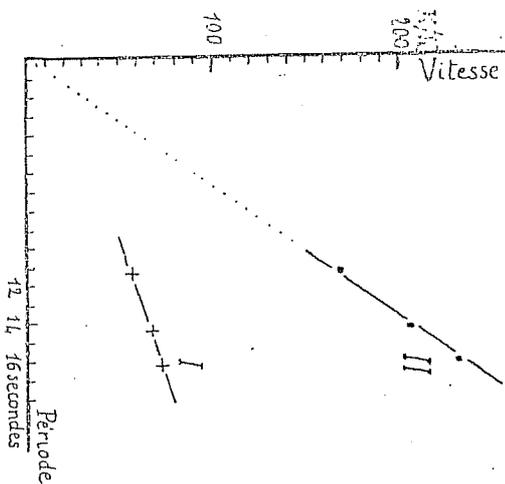


Fig. 7.

pouvant être mesuré sur les cartes, on peut alors calculer V, vitesse de propagation de la houle : en répartissant les observations suivant les mêmes groupes de période que plus haut, on obtient pour V les chiffres suivants :

Période.....	< 14 sec	14-15	> 14
Nombre d'observations .. .	48	52	56
V moyenne (km /h)	167	203	227

qui sont, cette fois, proportionnels à la période (courbe II, figure 7) : ce résultat n'est pas surprenant : le nombre V représente la vitesse de phase de la houle à proximité immédiate de son origine. Aucun des facteurs envisagés plus haut n'a donc encore influé sur cette vitesse. Par contre la valeur de V obtenue est environ 3 fois plus grande que celle obtenue par le premier procédé. Une partie de cette différence pourrait s'expliquer en remarquant que l'effet Doppler dépend de la vitesse dite de phase, tandis que la propagation de l'intensité de la houle se fait avec la vitesse

de groupe, qui, pour des vitesses proportionnelles à la période, est la moitié de la vitesse de phase. L'excès de V qui subsiste sur le double de la vitesse de groupe et sans doute imputable à une surestimation de v : si le clapotis qui se produit au centre d'une dépression se déplace d'un mouvement d'ensemble parallèle à celui de la dépression, il est possible que ce soit avec une vitesse inférieure, ou encore que le déplacement d'une dépression ne se fasse pas avec une vitesse uniforme, la formation d'une houle régulière étant favorisée au moment où ce déplacement est le moins rapide.

VI. — Enfin l'amortissement des ondes microsismiques et des ondes de houle se fait sentir par l'influence de la distance des dépressions sur le rapport des amplitudes respectives des deux phénomènes : pour chaque maximum d'intensité, le rapport de l'amplitude moyenne des deux composantes N.-S. et E.-W. du mouvement microsismique à Strasbourg à la plus grande force de la houle correspondante a été calculé, et les

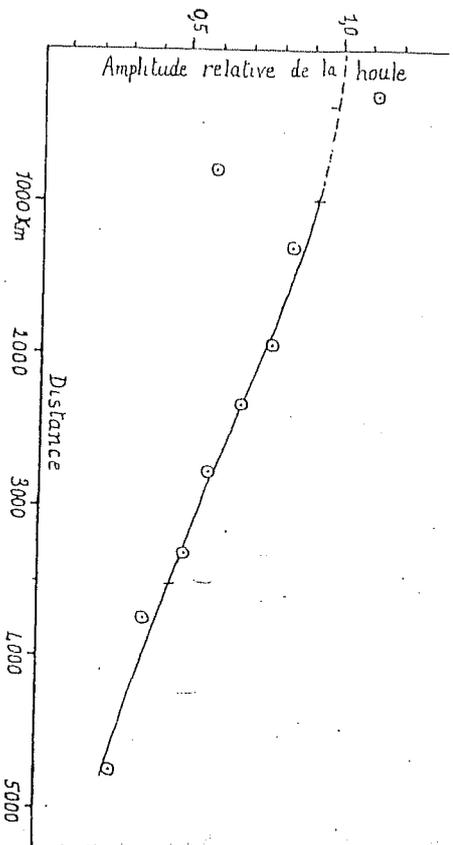


FIG. 8.

nombres obtenus ont été classés d'après les distances respectives du centre de la dépression à Casablanca et à Strasbourg.

Le tableau à double entrée que l'on obtient ainsi permet de constater que pour la même distance des dépressions au Maroc, le rapport moyen

des amplitudes diminue à mesure que la distance à Strasbourg augmente ; réciproquement, pour une distance constante à Strasbourg, ce rapport croît avec la distance au Maroc. Répartissons par exemple les dépressions en groupes où la distance à Casablanca varie de 500 en 500 km., et calculons le rapport moyen des amplitudes pour chaque groupe, puis faisons la même opération en prenant la distance à Strasbourg. On peut alors, par des approximations successives, éliminer de la première série de chiffres l'influence de la distance à Strasbourg, et obtenir la variation du rapport de l'amplitude de l'agitation à celle de la houle pour une distance constante et égale à 2000 km. des dépressions à l'observatoire sismographique.

Distance au Maroc.	0-500k	500-1000	1000-1500	1500-2000	2000-2500	2500-3000	3000-3500	3500-4000	>4000
Nombre de cas....	3	6	9	25	38	34	43	9	3
Distance moyenne.	300	820	1300	1930	2310	2780	3240	3740	4740
Rapport des amplitudes...	0.43	(0.87)	0.60	0.64	0.75	0.86	1.03	1.40	2.1

La représentation graphique de ces nombres montre, à une exception près, qu'ils augmentent très régulièrement avec la distance parcourue par la houle : la force de celle-ci diminue avec l'éloignement. Quand les dépressions sont très rapprochées du Maroc, ce qui les place toujours à une distance de Strasbourg voisine de 2000 km., le rapport des amplitudes tend vers 0,50 ; il ne peut tendre vers 0, car la hauteur de la houle a une limite lorsqu'on se rapproche du centre de la dépression ; prenons cette limite pour unité : les quotients de 0,50 par les rapports obtenus ci-dessus représentent l'amplitude relative de la houle aux différentes distances de son origine (courbe de la figure 8).

D'après cette courbe, l'amplitude de la houle est, à 3500 km., la moitié de ce qu'elle est à 1000 km. des centres dépressionnaires : elle diminue donc un peu plus vite que l'inverse de la racine carrée de la distance. En effet, la formule classique de la variation d'amplitude des ondulations superficielles est $a = a_0 \frac{1}{\sqrt{d}}$ e $-kd$: le résultat précédent s'accorde avec cette formule en donnant à k la valeur 0,027 par 1000 km.

La faiblesse de ce coefficient d'amortissement était prévue théoriquement : Boussinesq, pour la variation de hauteur de la houle due à la seule viscosité de l'eau, donne la formule suivante (1) :

$$H = H_0 e^{-\alpha l} \quad \text{avec } \alpha = \frac{16 \pi^3 \eta}{\rho \lambda^2 v}$$

En remplaçant dans cette formule le coefficient de frottement intérieur η par sa valeur à 10° : 0,0133 (unité cgs) ; ρ par 1,026, densité moyenne de l'eau de mer à 10° ; la longueur d'onde λ et la vitesse v de la houle par les valeurs 65 m. et 11,2 m./sec., moyennes des observations de Paris dans l'Atlantique-Nord, on obtient $\alpha = 0,0043$ par 1000 km.

α théorique et k observé, sans être égaux, sont d'ordres de grandeur suffisamment voisins pour prouver qu'une influence autre que celle de la viscosité qui pourrait être envisagée sur la hauteur de la houle, celle du vent, est éliminée dans la moyenne d'un grand nombre d'observations, comme on pouvait s'y attendre puisqu'elle dépend de la direction relative du vent et de la houle.

Résumé. — L'étude de la houle se heurte à la difficulté de réunir sur cet élément des observations synoptiques aussi bien organisées que celles des autres grands phénomènes météorologiques. Or l'utilisation des mesures de l'agitation microscopique apporte un progrès dans cette voie en raison de leur équivalence à une observation supplémentaire de la houle faite au voisinage de son origine. De fait, la comparaison des caractères de la houle et de l'agitation, si elle s'est surtout montrée féconde dans la recherche de l'origine et de la cause de ce dernier phénomène, conduit également à des constatations intéressantes touchant les propriétés de la houle elle-même. La plus certaine est l'analogie frappante des ondes de gravité de la surface liquide avec les ondes sonores et lumineuses qui résulte de l'existence d'un effet Doppler dû au déplacement relatif de la source et de l'observateur. On peut également obtenir — pour la première fois sur de longs trajets — une valeur de la vitesse de la houle qui n'est qu'assez grossièrement d'accord avec la valeur théorique. L'explication

1 T. BOUSSINESQ. — Lois de l'extinction d'une houle simple en haute mer. C. R., t. 121, p. 16 (1895).

d'autres points, tels que la différence du simple au double des périodes de l'agitation et de la houle, nécessite des hypothèses dont la vérification demanderait des observations directes ou des enregistrements de la houle. Ces expériences ne pourraient être entreprises que par des établissements spécialisés, tandis que l'étude de documents exposée dans ces quelques pages a été entièrement exécutée à l'Institut de physique du globe de Paris, dirigé par M. le Doyen Maurain. Je tiens à remercier M. le Professeur Rouch de l'intérêt bienveillant avec lequel il a suivi cette utilisation des observations marocaines dont les premières études (en 1919) sont dues à son impulsion. En raison de mon peu d'expérience personnelle des choses maritimes, j'ai été heureux de pouvoir profiter de ses conseils.