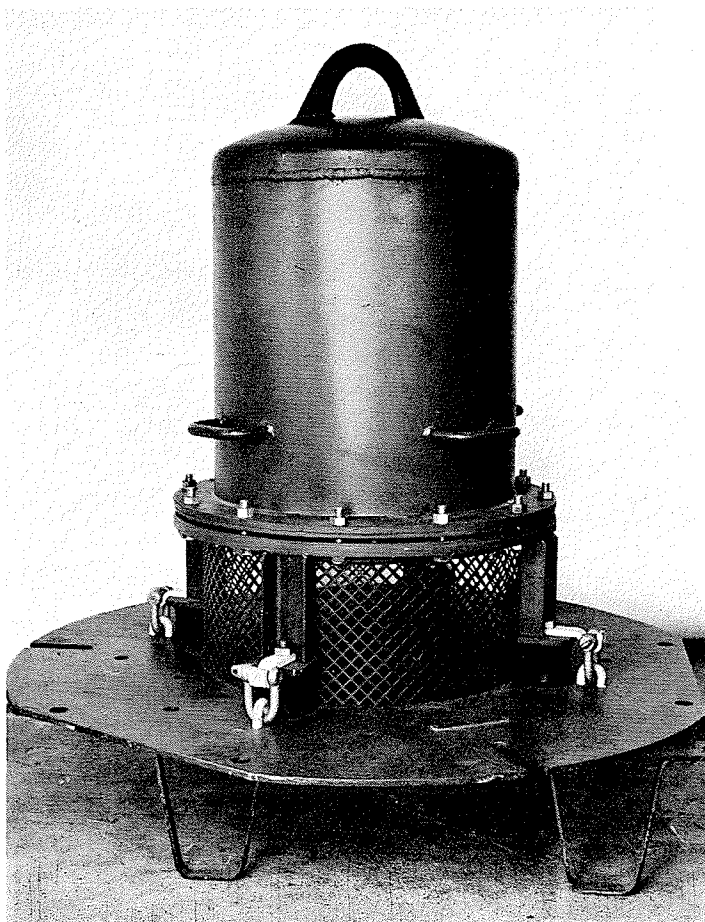
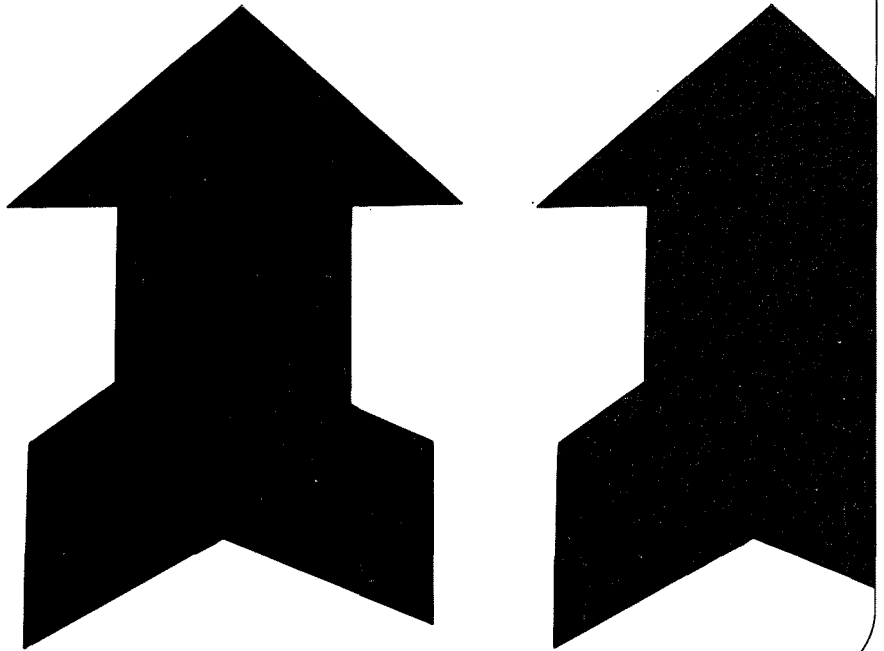


**STATISTIQUES
DES HOULES NATURELLES MESURÉES PAR
LE HOULOGAPHE AUTONOME
TYPE L.N.H.**

**PAR R. BONNEFILLE *,
P. GERMAIN *
ET J.-P. LEPETIT ***



En 1949, J. Valembois commençait à étudier la réalisation d'un houlographe autonome; en 1953, l'appareil était au point **. Actuellement quarante-six appareils ont été construits et ils ont permis d'obtenir une somme importante d'enregistrements de houle.

Il est envisagé, après accord des divers organismes pour lesquels les enregistrements ont été effectués, de publier régulièrement dans *La Houille Blanche* la synthèse des renseignements relatifs à la houle obtenus par ce type de houlographe en divers points du monde. Le but du premier article de cette série est de présenter l'appareil et d'exposer les méthodes de dépouillements utilisées.

* Electricité de France, Direction des Etudes et Recherches, Laboratoire National d'Hydraulique (L.N.H.), 6, quai Watier, 78-Chatou, France.

** Cf. J. VALEMBOIS : Les appareils réalisés à Chatou pour la mesure de la houle naturelle. Proceedings of the Fifth Conference on Coastal Engineering (Grenoble, sept. 1954), p. 170-176.

1/ Le houlographe type L.N.H.
L.N.H. sea wave recorder.

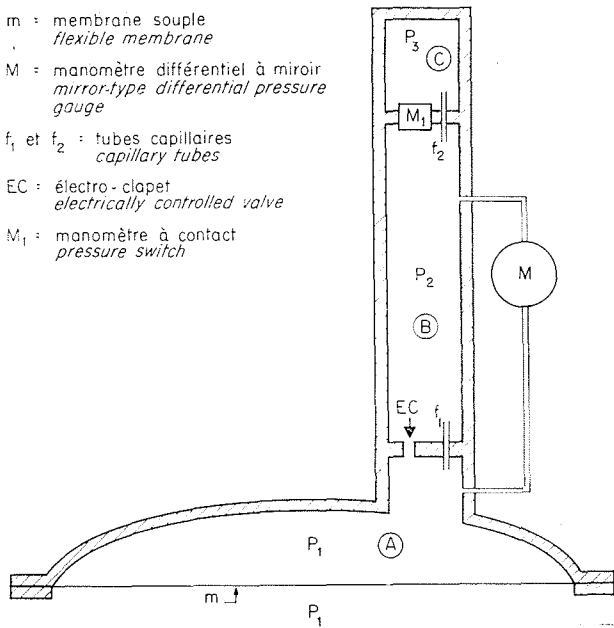
m : membrane souple
flexible membrane

M : manomètre différentiel à miroir
mirror-type differential pressure
gauge

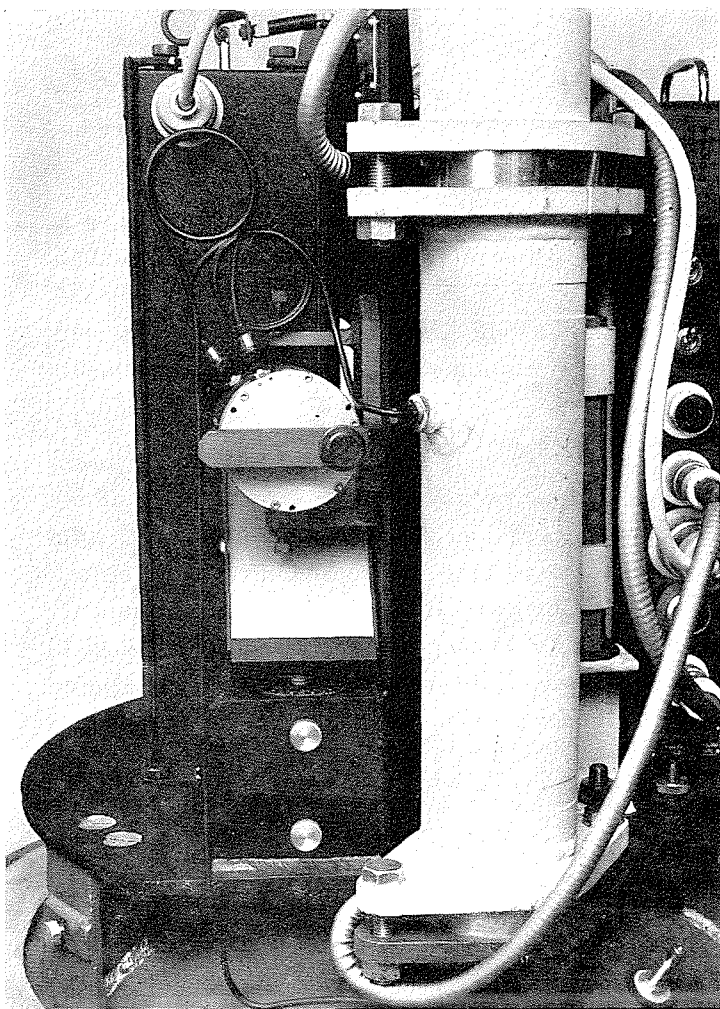
f_1 et f_2 : tubes capillaires
capillary tubes

EC : électro-clapet
electrically controlled valve

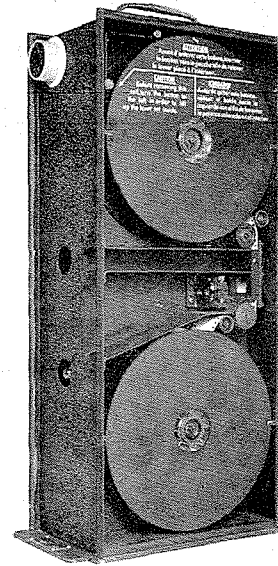
M_1 : manomètre à contact
pressure switch



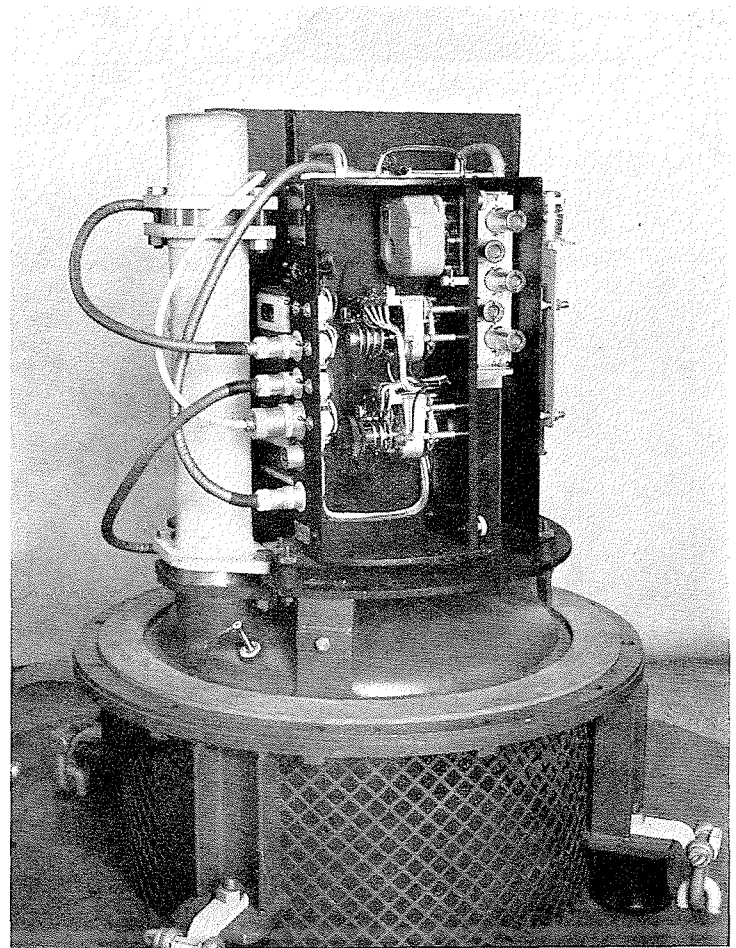
2/



3/ Dispositif de mesure des pressions.
Pressure measurement system.

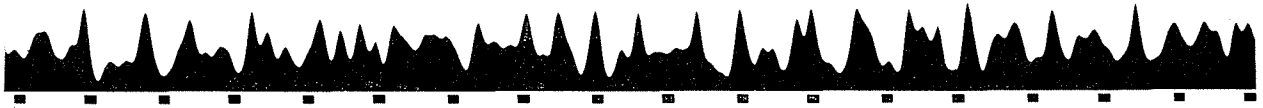


4/ Caméra d'enregistrement.
Recording camera.



5/ Dispositif de commande de l'enregistrement.
Recorder control system.

6/



Description de l'appareil et principe de fonctionnement

L'appareil (fig. 1), posé au fond de la mer, enregistre les fluctuations de pression dues au passage des vagues. La pression totale P_1 est transmise par une membrane souple à de l'air contenu dans la chambre (A); cette dernière communique avec la chambre (B) par un tube capillaire f_1 qui élimine les fluctuations rapides de pression dues à la houle, mais laisse passer les variations lentes de pression (marées, surcotes dues au vent...).

Le manomètre à miroir M (fig. 2 et 3), mesure la différence entre la pression instantanée P_1 dans la chambre (A) et la pression moyenne P_2 dans la chambre (B). Il n'est donc soumis qu'aux seules fluctuations rapides de pression dues par exemple au passage de la houle. Cette disposition permet d'utiliser un manomètre de grande sensibilité, quelle que soit la profondeur du mouillage.

Les déplacements du miroir du manomètre sont enregistrés sur film de 35 mm, de 120 m de longueur (fig. 4), pendant 25 minutes, toutes les 2 heures, ou toutes les 12 heures, ou à chaque pleine mer, ou de façon continue, suivant le programme choisi, qui est réglé par un programmateur (fig. 5). Chaque enregistrement comporte (fig. 6) : la photographie d'une horloge quantième donnant l'instant du début de l'enregistrement, et l'inscription sur le bord du film de tops de temps espacés de 30 secondes. La courbe de variation de la pression en fonction du temps est définie sur le film par la bordure de la plage noire; elle est centrée quelle que soit l'importance du marnage.

Le programme d'enregistrement est défini par une horloge commandant par l'intermédiaire de cames et de relais (fig. 5) :

- les enregistrements (éclairage du manomètre à miroir par un spot lumineux, photographie de l'horloge quantième de référence, avance du film, tops de temps);
- l'ouverture entre chaque enregistrement de l'électro-clapet EC, qui court-circuite le tube capillaire f_1 et permet le mouillage rapide de l'appareil entre les enregistrements.

Un dispositif manométrique M_1 accélère la cadence des enregistrements à un toutes les 2 heures, lorsque le creux des vagues dépasse une valeur fixée avant le mouillage. Ce dispositif, appelé « contact tempête », est commandé à partir de la différence entre la pression dans la chambre (C) et la chambre (B).

L'autonomie de l'appareil est assurée par une batterie d'accumulateurs; la réserve de marche est de 75, 300 ou 1 200 heures, suivant la cadence des enregistrements.

Les caractéristiques principales de l'appareil sont :

- poids total : 450 kg;

- hauteur totale : 115 cm;
- diamètre de la plaque d'embase : 130 cm.

Activité des houlographes

Depuis 1952, la fabrication, sous licence E.D.F., est confiée aux Etablissements Saint-Chamond-Granat. Actuellement, vingt-neuf appareils sont en service, soit appartenant au Laboratoire National d'Hydraulique, soit vendus, le L.N.H. assurant le dépouillement des films; 11 appareils sont détériorés ou perdus; le L.N.H. est sans nouvelles de six appareils vendus.

Depuis 1963, la cadence moyenne de dépouillement des enregistrements de houle s'établit à soixante-cinq films par an. Cinq cent cinquante films ont été analysés de 1954 à 1966.

Le tableau ci-après donne la liste des enregistrements de houle disponibles au Laboratoire National d'Hydraulique. On a indiqué en regard le nombre de films correspondant à chaque point d'immersion. Pour traduire en durée d'exploitation, on peut assimiler un film à un mois d'enregistrement.

Principe du dépouillement des films d'enregistrement

Le but du dépouillement est de caractériser la houle par le plus petit nombre de paramètres. L'enregistrement donne directement les fluctuations de la pression au fond; le problème est de connaître les oscillations correspondantes de la surface libre.

Soit p la valeur mesurée de la fluctuation de pression, et h la hauteur d'eau correspondante, on admet que le creux de la houle en surface H est donné par la relation

$$H = \left(1,25 \operatorname{ch} 2 \pi \frac{d}{L}\right) h$$

dans laquelle :

d est la profondeur,

L la longueur d'onde locale;

$$L = (gT^2/2\pi) \operatorname{th} (2\pi d/L)$$

T la période de la houle.

Le coefficient 1,25 est un terme correctif déterminé expérimentalement.

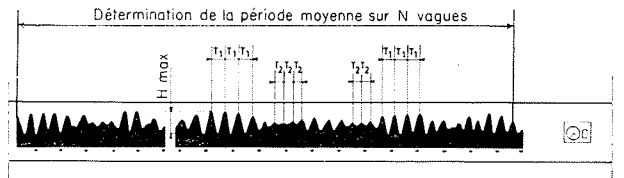
La pression est lue en millimètres sur le film. Connaissant l'étalement du manomètre, cette valeur est convertible en mètres d'eau. Le creux de la houle est ainsi estimé à 10 à 20 % près.

Il est possible d'analyser l'enregistrement vague par vague, en affectant à chacune la longueur d'onde

Enregistrements de houle disponibles au Laboratoire National d'Hydraulique à la date du 1^{er} juillet 1967

EMPLACEMENT	NOMBRE DE FILMS
I. — FRANCE :	
Dunkerque : Ports actuel et futur	58
Boulogne : Port	32
Etaples : Baie de la Canche	3
Le Havre : Port	15
Barfleur (Pointe de Gatteville)	3
Cherbourg (Anse de Vauville)	6
Granville (Anse de Hérel)	11
Baie du Mont-Saint-Michel	37
Pointe du Grouin	15
Estuaire de la Rance	7
Cap Fréhel	2
Brest (Anse de Bertheaume)	7
La Turballe (et Phare du Four)	16
Piriac	3
Saint-Nazaire (Pointe villes Martin)	3
Chenal extérieur de la Loire	14
La Rochelle	2
Pointe de Grave (môle d'escale du Verdon)	10
Biscarosse	17
Embouchure de l'Adour	4
Saint-Cyprien	14
Sète	9
Golfe de Fos :	
— Cap Couronne	24
— Bouée la Balancelle	28
— Lavéra	5
Toulon	5
Nice	21
Cannes	2
Antibes	7
II. — BASSIN MÉDITERRANÉEN :	
Naples (Italie)	6
Beyrouth (Liban)	6
Bougie (Algérie)	4
Arzew (Algérie)	32
Mostaganem-Cap Ivi (Algérie)	8
III. — OCÉAN ATLANTIQUE :	
Agadir (Maroc)	5
Mansour (Mauritanie)	12
Rio Nunez (Guinée)	7
San Pedro (Côte-d'Ivoire)	3
Abidjan (Côte-d'Ivoire)	9
Pointe Noire (Gabon)	4
Saint-Pierre-et-Miquelon	9
Comodoro Rivadavia (Argentine)	2
Estuaire du Gabon	13
IV. — OCÉAN INDIEN :	
Tamatave (Madagascar)	12
Kuwait (Golfe Persique)	9

NOTE. — Nous disposons également de 14 bandes d'enregistrements réalisées au point K au moyen du « seaborne wave recorder » (Tucker).



7/ Détermination of mean period for 'N' waves.

correspondant à la période de la vague mesurée sur le film; mais la méthode est longue et pose des problèmes d'interprétation difficiles en cas de houle très irrégulière.

La méthode simplifiée utilisée est basée sur les hypothèses suivantes :

— l'enregistrement, qui dure 20 minutes, contient assez d'oscillations pour avoir un sens statistique (200 vagues de 6 secondes ou 100 vagues de 12 secondes);

— le spectre d'énergie du train de houle est assez étroit pour qu'on puisse assimiler le spectre de répartition des creux à un spectre de Rayleigh :

$$f(H) = \frac{H}{H_0^2} e^{-H^2/2H_0^2}$$

$f(H) dh$ étant la probabilité d'occurrence du creux H dans l'intervalle $H, H + dH$, et H_0 le creux le plus probable.

Il en découle les relations suivantes, entre les paramètres caractéristiques du train de N vagues :

— creux moyen :

$$\bar{H} = 1,25 H_0;$$

— creux significatif (*) :

$$H_s = 2 H_0 = 1,6 \bar{H};$$

— creux maximal :

$$H_{\max} = \bar{H} \sum_{i=1}^{i=N} (-1)^{i+1} \frac{N!}{(N-i)! i! \sqrt{i}} = H f(N)$$

Pour obtenir \bar{H} , H_s ou H_0 , il suffit donc de connaître H_{\max} et N .

Pratiquement, le dépouillement consiste à compter les vagues de la séquence étudiée, repérer l'oscillation de pression de plus grande amplitude, en déduire H_{\max} en lui affectant, comme période, la période apparente de l'oscillation.

La période moyenne \bar{T} s'obtient facilement en divisant la durée de la séquence par le nombre de vagues; cette valeur très accessible est généralement dépourvue de signification (voir fig. 7).

Dans la plupart des cas, apparaissent deux périodes privilégiées dans les trains de vagues, désignées par T_1 et T_2 ($T_1 > T_2$); souvent T_1 est associée avec H_{\max} .

(*) On appelle creux significatif H_s ou $H_{1/3}$ d'un train de houle de N vagues, la moyenne des creux des $N/3$ plus grandes vagues du train de houle considéré.

Etude statistique des enregistrements de houle

Les résultats du dépouillement simplifié sont mis sous forme d'un fichier de cartes perforées, à raison d'une carte perforée par séquence, identifiée par la date et l'heure de l'enregistrement. Les cartes « séquence » sont groupées par mouillage, chaque mouillage formant une suite continue d'observations espacées au maximum de 24 heures. Un mouillage est identifié par le lieu et les dates de début et de fin d'immersion du houlographe.

Un programme classe les séquences en creux et périodes de houle. L'intervalle de classement en creux est de 0,2, 0,4, 0,6 ou 0,8 m suivant que l'amplitude la plus grande rencontrée est inférieure à 3, 6, 9 ou 12 m; l'intervalle en période est de 1 seconde. Les séquences correspondant à des

amplitudes maximales inférieures à 0,25 m sont classées dans une rubrique intitulée « calme plat ».

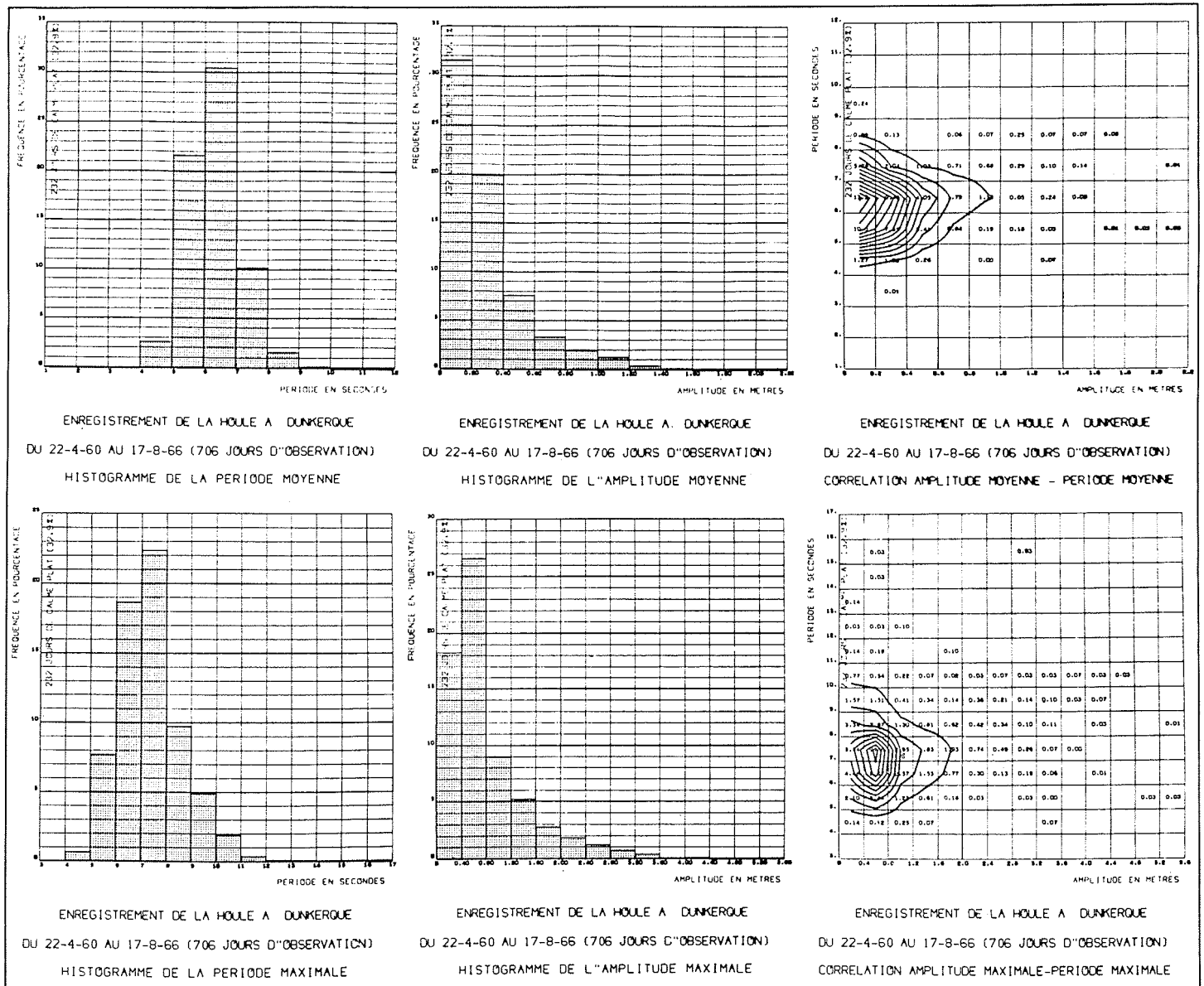
Deux classements sont constitués : l'un concerne le creux moyen et la période moyenne, l'autre le creux maximal et la période maximale des trains de vagues.

Les séquences classées dans un même intervalle de creux et de période sont sommées en affectant à chaque séquence un poids égal à l'intervalle de temps sur lequel elle est supposée s'appliquer. Par exemple si t_{n-1} , t_n , t_{n+1} sont les époques de trois séquences successives $n-1$, n et $n+1$, le temps affecté à la séquence n est :

$$t = \frac{t_n - t_{n-1}}{2} + \frac{t_{n+1} - t_n}{2} = \frac{t_{n+1} - t_{n-1}}{2}$$

A la première et à la dernière séquence d'un mouillage sont affectés les temps :

$$t = t_2 - t_1 \quad \text{et} \quad t = t_n - t_{n-1}$$



8/ Résultats statistiques du dépouillement de la houle enregistrée à Dunkerque.
Statistical observed wave data for Dunkirk.

Le classement et la sommation des séquences sont effectués pour un ensemble de mouillages couvrant tout ou partie de la période analysée. Chaque mouillage est traité indépendamment en ignorant la période entre deux mouillages successifs. Les temps élémentaires des séquences sont cumulés afin d'obtenir le temps total auquel s'appliquent les observations effectuées. Les durées mentionnées dans les tableaux de classement en période et creux sont divisées par ce temps total pour obtenir la fréquence en pourcentage.

Ainsi sont établis deux tableaux de corrélation creux-période, donnant dans chaque case la fréquence des observations situées dans des intervalles de creux et de période donnés. Des lignes d'égale fréquence visualisent cette corrélation. La sommation de ces tableaux par ligne, c'est-à-dire par intervalle en période, donne l'histogramme des périodes. La sommation par colonne, c'est-à-dire par intervalle en creux, donne l'histogramme des amplitudes.

L'ensemble des résultats, tableaux de corrélation et histogrammes, est présenté directement sous forme de figures au moyen du traceur de courbes Stromberg Carlson 4020 à écran cathodique. La figure 8 donne un exemple relatif au port de Dunkerque.

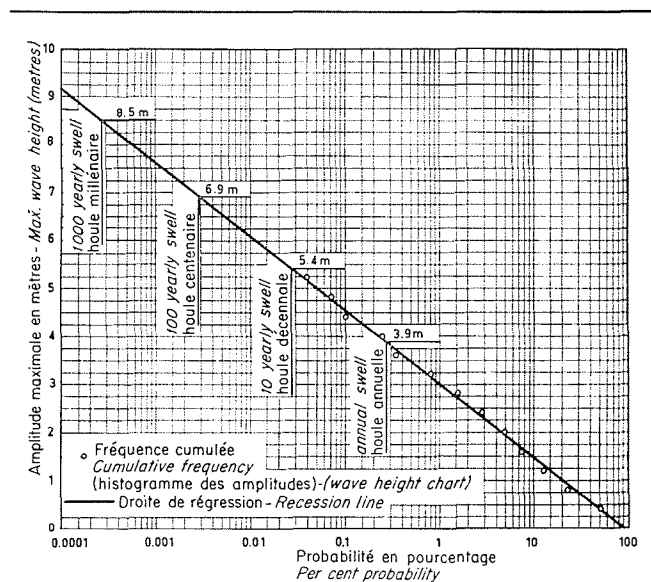
Application de l'étude statistique à l'évaluation de la houle « centenaire » ou « millénaire »

Le but de l'étude est la connaissance des plus grandes houles « annuelle », « décennale », « centenaire » ou « millénaire » c'est-à-dire les houles de probabilité 1/365, 1/3 650, 1/36 500 ou 1/365 000.

A partir de l'histogramme de l'amplitude maximale, on peut déterminer, pour chaque valeur H du creux, le pourcentage de temps pendant lequel le creux dépasse cette valeur. Si le nombre d'observations est suffisant et si les observations sont relativement continues, on peut considérer ce pourcentage comme la probabilité de dépasser cette valeur donnée.

Si on connaissait la loi de répartition statistique P(H), on pourrait en déduire les creux des houles « annuelles », « décennales », etc. J. Larras a proposé la forme mathématique simple suivante qui s'ajuste assez bien aux résultats d'observation et qui permet l'extrapolation jusqu'aux probabilités désirées.

$$P(H) = e^{-(H/A)}$$



9/

A est un paramètre à déterminer pour chaque point de mesure à partir des observations. Le creux de probabilité P donnée est donc :

$$H = -A \text{ Log } P$$

Les creux des houles « décennale », « centenaire », « millénaire » sont alors liés à celui de la houle annuelle par des relations simples :

- houle décennale. 1,39 × houle annuelle,
- houle centenaire. 1,78 × houle annuelle,
- houle millénaire. 2,17 × houle annuelle.

La figure 9 donne un exemple d'application relatif au port de Dunkerque.

Conclusion

Les enregistrements du houlographe autonome type L.N.H. se prêtent à l'étude statistique de la houle naturelle; une fois l'ensemble du fichier de données constitué sur cartes perforées, on peut obtenir très facilement les résultats relatifs à différentes années, saisons ou mois.

En traitant l'ensemble des observations relatives à un lieu donné, on peut en déduire par extrapolation la houle décennale, centenaire, millénaire, à condition que la période d'observation soit suffisamment longue (deux à trois ans) et que la loi des probabilités soit de la forme :

$$H = -A \text{ Log } P$$