

Chapter 30

LE VENT ET LA HOULE, Leur Valeur Maxima

Paul A. GILLE
Ingénieur en Chef du Génie Maritime (R)

Ière PARTIE - LE VENT

Le vent, provoquant la formation de la houle, doit être étudié tout d'abord.

VITESSE DU VENT -

Ce qui importe c'est de connaître les plus grandes vitesses d'un vent susceptible de durer un temps suffisant pour créer une houle. Une rafale violente et très courte lèvera peu de houle, mais peut provoquer le déferlement d'une houle déjà établie. Il peut en résulter un danger grave pour une embarcation, mais beaucoup moindre (sauf avarie locale) pour un navire d'une certaine dimension.

Nous serons donc amenés à ne considérer que les vents dont la moyenne sur quelques heures se maintient élevée; et parmi ceux-ci les plus forts - susceptibles de créer la mer la plus forte à laquelle doivent résister les navires et les ouvrages des côtes.

ECHELLES D'INTENSITE -

On classe communément les intensités des vents suivant des échelles dont les degrés croissent avec la vitesse du vent. La plus répandue est celle de Beaufort, de 12 degrés qui étaient définis par l'action du vent sur la voilure des bateaux.

Il n'est pas besoin d'insister sur ce que cette classification a d'arbitraire et d'imprécis. Aussi est-il nécessaire de la compléter par la vitesse du vent correspondant aux degrés successifs.

Mais, suivant les auteurs, les vitesses correspondantes ne sont pas exactement les mêmes. Nous donnons ci-après celle du Commandant Rouch (Météorologie et Physique du Globe - Payot 1941 Tome III).

| | Vitesse (Mètres seconde) | Manoeuvre correspondante des bateaux à voile |
|--------------------------------------|-----------------------------|---|
| 0 Calme (calm) | 0 à 1 | |
| 1 Presque calme (light air) | 1 à 2 | |
| 2 légère brise (light breeze) | 2 à 4 | |
| 3 Petite brise (Gentle breeze) | 4 à 6 | |
| 4 Jolie brise (moderate b.) | 6 à 8 | |
| 5 Bonne brise (fresh b.) | 8 à 10 | On serre les cacatois |
| 6 Bon frais (strong b.) | 10 à 13 | On serre les perroquets |
| 7 Grand frais (moderate gale) | 14 à 16 | Sous huniers et basses voiles (1 ris) |
| 8 Petit coup de Vent (fresh gale) | 17 à 20 | 2 ris dans les huniers |
| 9 Coup de vent (strong gale) | 20 à 24 | Huniers fixes seuls ; basses voiles au bas ris |
| 10 Fort coup de Vent (whole gale) | 24 à 28 | Cape sous hunier fixe et voile au bas ris |
| 11 Tempête <i>storm</i> | 28 à 32 | Voiles de cape seules |
| 12 Ouragan (Hurricane) | 32 (45 m) | Sec de toile |

On peut en déduire :

a) Les vitesses jusqu'à 9 inclus (24 m/sec.) permettent la navigation à voile. La cape doit être prise pour les vents 10 et 11 (24 à 32 m/sec.); 12 est l'ouragan (vitesses supérieures à 32 m/sec.).

b) D'après le tableau Rouch il n'y aurait donc que les ouragans (plus ou moins exceptionnels) qui donneraient les vitesses supérieures à 32 m/sec. (115 Kilomètres/heure).

Or d'autres classifications donnent des vitesses supérieures:

1/- Czerny (Pet-Mit. 1870), classant les forces 1 à 5 et, en outre, l'ouragan donne :

| | |
|------------------|------------------------------|
| 5 (vent violent) | 28 m. |
| - (ouragan) | <u>45 m. (162 Kilom./h.)</u> |

2/- Des documents provenant de Manuels de la Marine anglaise donnent pour l'échelle de Beaufort :

Vitesse :

| | | | |
|----|------------------------|-------|-----------|
| 9 | 56 milles, soit 85 K/h | ou | 23 m/sec. |
| 10 | 65 " | | |
| 11 | 75 " | 120 " | " 33 |
| 12 | 90 " | 144 " | " 40 |

3/- L'annuaire du Bureau des Longitudes donne une double échelle reliant celle de Czerny et l'échelle de Beaufort :

Vitesses

| | | |
|--|------------------------|--------------------------|
| 5 - Vent violent (brisant les petites branches des arbres) | 9 - coup de vent | 18 à 21 m/sec. |
| | 10 - fort coup de vent | 21 à 25 m/sec. |
| Ouragan (renversant les che- minées, déracinant les arbres) | 11 - Tempête | 25 à 30 m/sec. |
| | 12 - Ouragan | supérieur à 30 m.sec. |

4/- L'étude de Lavanchy (Etudes et construction des lignes aériennes) donne 10 degrés seulement dont :

| | |
|--------------------|----------------------|
| 6 - Grand vent | 20 m/sec. |
| 7 - Tempête | 24 |
| 8 - Grande Tempête | 30 |
| 9 - Ouragan | 36 |
| 10 - Grand ouragan | 45 (162 Kilom/heure) |

RELEVES RECENTS -

Vers 1890, les relevés par anémomètres semblaient indiquer un maximum de vitesse de 128 Km/heure (35,5 m/sec.)

Vers 1899, on enregistra à Porto Rico des maxima de 190 et 220 Kilom/h. (52,5 et 60 m/sec.); mais à ces vitesses les anémomètres cessent de fonctionner.

En fin 1948, une tempête très forte permit d'obtenir les relevés suivants :

| | | | |
|--------------------------------|----------|------|-----------|
| Au Bourget | 108 Km/h | soit | 36 m/sec. |
| A Nantes | 122 " | | |
| A St-Quentin | 133 " | | |
| au sommet de la Tour Eiffel | 144 " | " | 41 m/sec. |

concordants avec un relevé en Angleterre de :
120 Km/h.

4bis/- On aurait relevé en Amérique à Houston (Texas), en Septembre 1943 :
166 Km/h, soit 45 m/Sec.

Dans les convois de l'Arctique, (pendant la guerre), dans les explorations de l'Antarctique (Mission du Charcot), on a eu l'occasion de constater des vitesses considérables :

| | | |
|-----------|------|-----------|
| 60 noeuds | soit | 110 Km/h. |
| 80 " | " | 148 Km/h. |

ce qui confirme la donnée du "Majestic" (Oct. 1954) d'une tempête de 90 noeuds soit 167 Km/h.
et dans l'Arctique, du maximum de 220 Km/h.

Les tornades ou cyclones tropicaux donnent des vitesses encore plus élevées :

| | | | |
|---------------------|------------------|------|----------------|
| En Floride | 250 à 300 Km/h., | soit | 70 à 80 m/sec. |
| Au Mount Washington | 360 Km/h. | soit | 100 m/sec. |
| (Avril 1954) | | | |

Il semble donc que dans les mers occidentales, et partout en dehors des typhons, on ait à compter sur un maximum de :

110 noeuds ou 200 Km/h. soit 55 m/sec.

La fréquence des grands vents étant d'ailleurs en raison inverse de leur intensité.

Il semble en effet que l'on n'ait que :

| | | | |
|--------------------|-------------------|-----------|-------------|
| 1 ou 2 fois par an | une vitesse égale | 30 m/sec. | à Calais |
| 1 fois | | | à Marseille |
| 1 fois | tous les deux ans | | à Brest. |

La vitesse maxima à considérer serait donc :

Grand vent fréquent
permettant la navigation

24 m/sec.

Tempête peu fréquente
(1 fois par an ou tous les 2 ans)

30 m/sec.

Vent exceptionnel

55 m/sec.

EFFET DU VENT -

L'effet du vent se traduit par une pression qui a été étudiée

- a) par des expériences de laboratoire ;
- b) par les résultats des tempêtes sur des objets déplacés ou détruits.

Il n'y a pas eu toujours de rapprochement entre ces deux séries de résultats. Alors que les essais de Borda datent de 1765, ceux de Morin de 1835, le constructeur anglais Thomas Bouch construisait un pont suspendu sur le Tay en le calculant seulement pour un effort de vent de 10 livres par pied carré, soit 48 kgs par mètre carré, ce qui correspondrait, on le verra plus loin, à une vitesse du vent de 25 m/sec.

Le pont fut détruit par une tempête en 1879 et le projet, étudié par Bouch sur des données analogues, pour le Firth of Forth abandonné. Le Board of Trade imposa le calcul du pont sous un effort de 56 lbs/par sq. f., soit 273 Kgs par mètre carré ce qui correspondrait à un vent de 58 m/sec. environ. Actuellement la règle usuelle en Angleterre est de 50 livres au pied carré soit 244 Kgs au mètre carré.

ESSAIS METHODIQUES -

Les essais ont été nombreux et effectués surtout sur des surfaces planes de petite dimension. Les expérimentateurs ont admis en principe la formule :

$$P \text{ (normale)} = KSV^2 \quad (S \text{ surface en m}^2, V \text{ en m/sec.})$$

| | | |
|----------------------------|-----------|---|
| Borda a trouvé, dès 1763 : | K = 0,097 | (plaques mues par un manège) |
| Morin donnait en 1835 : | K = 0,100 | (idem) |
| | 1837 : | K = 0,085 (chute d'un objet dans l'air) |
| Paris 1872 : | K = 0,126 | |
| Proude 1876 : | K = 0,09 | |
| Langley (1) | K = 0,083 | (plaque de 929 cm ²) |

Lavanchy (Ouvrage cité précédemment) rassemble les résultats suivants des divers expérimentateurs :

- (1) Langley (1834-1906), peu connu en France, est donné en Amérique comme l'inventeur de l'aéroplane, par ses nombreux essais qui ont conduit les frères Wright à leur appareil, le premier qui ait volé, en fait, avec succès.

| | | |
|----------------|-------------------|-------------------------------|
| Eiffel | K = 0,070 à 0,079 | (suivant forme du plan) |
| Colonel Renard | K = 0,109 | face plan en avant |
| (1904) | K = 0,0333 | 1/2 sphère convexité en avant |
| | K = 0,0135 | sphère |
| | K = 0,0507 | cylindre |
| Canovetti | K = 0,077 à 0,088 | pour différentes vitesses |
| (1903) | | |

On admet souvent pour le calcul des ouvrages, $K = 0,120$ (Angleterre) ce qui n'a pas d'inconvénient, car on prend, dans ce cas, une limite supérieure qui serait plutôt trop élevée.

D'autre part, il faut distinguer :

- 1/- Les surfaces planes pour lesquelles les résultats précédents indiquent qu'on peut prendre $K = 0,08$
- 2/- Les surfaces arrondies vers l'avant pour lesquelles on peut prendre

| | |
|----------|------------|
| cylindre | $K = 0,05$ |
| sphère | $K = 0,03$ |
- 3/- Les surfaces arrondies en sphère (AV et AR) pour lesquelles on aurait des valeurs encore inférieures, ainsi que pour les surfaces carénées (AV et AR très effilés) pour lesquelles on pourrait tomber à des valeurs encore moindres: 0,01 et au-dessous. (1)

De l'ensemble de ces résultats, on peut déduire les données approximatives suivantes sur les vitesses des vents et les pressions exercées sur une surface plane :

| Echelle de Beaufort | Noeuds | Vitesses Km/h | Mètres/sec. | Pression au m ² |
|---------------------|--------|------------------|-------------|-------------------------------|
| 6 | 24 | 44,5 | 12 | 11 Kg,5 |
| 7 | 30 | 55,5 | 15 | 18 Kg |
| 8 | 37 | 68,5 | 19 | 29 Kg |
| 9 | 44 | 81,5 | 23 | 42 Kg |
| 10 | 52 | 96 | 27 | 58 Kg |
| 11 | 60 | 111 | 31 | 77 Kg |
| { Ouragans | | | | |
| 12 | 90 | 165,7 | 46 | 170 Kg |
| { Vent exceptionnel | 110 | 200 | 55 | 250 Kg |
| Typhons | (135 | 250 | 69 | 380 Kg |
| | (162 | 300 | 80 | 550 Kg |

(1) Noter que les chiffres donnés par M. Rouch (op.cit.) pour les pressions correspondant aux vitesses des divers degrés de vent paraissent trop faibles (moitié environ).

Dans les zones où ne se forment pas les typhons, on peut donc considérer le vent à 200 Km/h comme exceptionnel, et les ouragans les plus violents ceux de 165 Km/h.

Ceci concorde avec les règlements pour le calcul des ouvrages à terre (circulaire du 10 Mai 1927) où les surcharges dues à la pression du vent sont prises au maximum à 250 Kg par m² et la pression maxima compatible avec la circulation sur les ouvrages à 150 Kgs au m².

Il faut en conclure :

- 1/- La réglementation en usage quant aux efforts du vent sur les structures sont suffisantes pour les navires naviguant dans les zones occidentales, Côtes N et S Amérique, y compris Arctique et Antarotique. Pour les navires ayant à circuler dans les zones où les typhons sont fréquents il sera prudent de prévoir une résistance des superstructures résistants à des efforts de 400 Kgs au m² au moins.
- 2/- En ce qui concerne l'action de la mer et des houles qui résultent des vents pouvant souffler un certain temps dans la même direction, il semble qu'on ne doive considérer que les vents de 60 à 75 noeuds soit 200 Km/h.

Pour les typhons donnant des conditions de mer spéciales, il y aura lieu de les considérer comme très particulières, sortant des conditions ordinaires des calculs.

2ème PARTIE - LA HOULE

Il existe de nombreux relevés des houles rencontrées par les navigateurs, mais ces relevés ont été, depuis cinquante ans, plus nombreux et plus méthodiques; du fait des travaux d'observateurs ayant recueilli eux-mêmes un grand nombre d'observations, du fait aussi des navigations dont la régularité et la fréquence ont permis de multiplier les observations; enfin de ce que des cas particuliers comme les convois de l'Arctique et les explorations antarotiques, ont favorisé la rencontre d'observateurs avec des circonstances où se formaient des houles jusqu'alors peu connues.

Si l'en considère, par exemple, que le vent de 30 m/sec. (60 nds) ne se rencontre guère que tous les 2 ans dans la région de Brest on peut en déduire que de nombreux marins auront doublé la pointe de la Bretagne sans rencontrer une mer correspondant à un vent de 60 noeuds.

Il n'en est pas moins nécessaire d'étudier le cas d'une mer exceptionnelle et ses effets sur la structure des navires; d'ailleurs nous verrons que les procédés normaux de construction, en usage, actuellement, donnent aux navires une sécurité suffisante. Au contraire dans le cas des anciens navires en bois, la structure facilement déliée était bien moins résistante.

De là on peut déduire la raison des disparitions nombreuses des anciens navires en bois (et à voiles), alors qu'il est très rare aujourd'hui qu'un navire disparaisse "corps et biens". (1)

De toutes ces observations récentes, et surtout celles très nombreuses du Dr. Vaughan Cornish (2), on peut déduire les caractéristiques des houles correspondant aux vitesses du vent.

La Fig. 1 donne les diverses caractéristiques de la houle en fonction des degrés de l'échelle de Beaufort. Les éléments en ont été tirés de l'ouvrage de K.C. Barnaby et traduits en mesures françaises (3). Les principaux éléments en sont résumés comme suit :

| Echelle de Beaufort | Longueur de la houle de crête en crête L | Hauteur de la houle H | Rapport $\frac{L}{H}$ |
|---------------------|--|-----------------------|-----------------------|
| 5 | 60 | 4,5 | 13 |
| 6 | 75 | 5 | 15 |
| 7 | 120 | 6,5 | 18 |
| 8 | 170 | 8,5 | 20 |
| 9 | 250 | 10 | 25 |
| 10 | 350 | 11,5 | 30 |
| 11 | 525 | 13,5 | 38 |
| 12 | 700 | 15,5 | 45 |
| Ouvrages maximum | | 16,5 à 17,5 | |

On constate ainsi que les houles courtes sont creuses

($\frac{L}{H} = 13$ pour $L = 60$ m.)

Les houles longues beaucoup plus plates.

D'après les relevés les plus récents, les grandes hauteurs ne sont connues que dans les mers du Sud ou l'Arctique, correspondant aux grandes longueurs de houle et aux vents violents soufflant pendant des durées très longues.

On peut donc dire que dans les mers d'Atlantique, on rencontrera peu de houles dépassant 13 m. de hauteur et 350 m. de longueur.

Comme il est admis que l'effort maximum, sur une charpente de navire correspond à une houle de longueur égale à celle du navire, il

-
- (1) La T.S.F. permet depuis 40 ans, de prévenir des accidents et d'obtenir des secours, mais n'empêcherait pas la perte d'un navire par insuffisance de résistance de sa charpente métallique.
 - (2) Océan Waves - Cambridge 1934
 - (3) Kenneth C. Barnaby - Basic Naval Architecture - Hutchinson's Publications 1948.

sera raisonnable de prendre :

| | | | | | | | |
|-------------------|-------|--------------|------|----|-------|------------|------------|
| Pour un navire de | 60 m | une houle de | 60 m | et | 4,5 m | de hauteur | |
| " | 75 m | " | 75 | | 5 m | " | (L/H = 13) |
| " | 170 m | " | 170 | | 8,5 m | " | (L/H = 15) |
| " | 250 m | " | 250 | | 10 m | " | (L/H = 20) |
| | | | | | | | (L/H = 25) |

On voit, ce que nous devons retenir par la suite, que les grands navires sont avantagés par rapport aux petits, la houle à considérer étant plus plate que celle à envisager pour les petits navires.

HAUTEUR DES VAGUES - EN FONCTION DU FETCH -

L'état de la mer sous l'action du vent, dépend de la distance sur laquelle il agit librement. La distance entre le point d'observation et la terre la plus proche au vent constitue le Fetch.

Plus cette distance est grande, plus la hauteur des lames est considérable, on peut l'exprimer par la formule :

$$H \text{ en pieds} = 1,5 F \quad F \text{ fetch en milles nautiques}$$

$$\begin{aligned} \text{Si } F &= 144 \text{ milles, } H = 18 \text{ pieds} = 5 \text{ m, } 50 \\ F &= 400 \text{ milles, } H = 30 \text{ pieds} = 9 \text{ m.} \end{aligned}$$

On donne parfois comme fetch limite :

$$900 \text{ milles, ce qui donnerait : } H = 45' = 13 \text{ m, } 5$$

En Méditerranée, le fetch ne dépasse pas 450 milles, on aura $H = 9 \text{ m}$. ce qui correspond à la mer ayant causé de gros dégâts aux nouvelles jetées du port d'Alger. (On admettait jadis un maximum de 7 à 8 m.)

Si l'on se reporte aux tableaux précédents, on voit que, à ces hauteurs, correspondent des longueurs assez bien déterminées; donc dans des mers, relativement étroites, on aura des mers courtes et creuses: c'est le cas de la Méditerranée, de la Manche, de l'Adriatique.

Là les grands navires ne souffriraient pas, portant sur plusieurs lames; les petits navires sur une houle de leur longueur, très creuse, subiraient des efforts plus importants. Ce qui est conforme à l'expérience.

Pour les houles provenant de vents soufflant sur grandes distances, la hauteur ne paraît plus augmenter à partir d'une certaine valeur de fetch; qu'on prenait ordinairement de 900 milles - ce qui donnerait une hauteur de $H = 45 \text{ pieds} = 13,5 \text{ m}$.

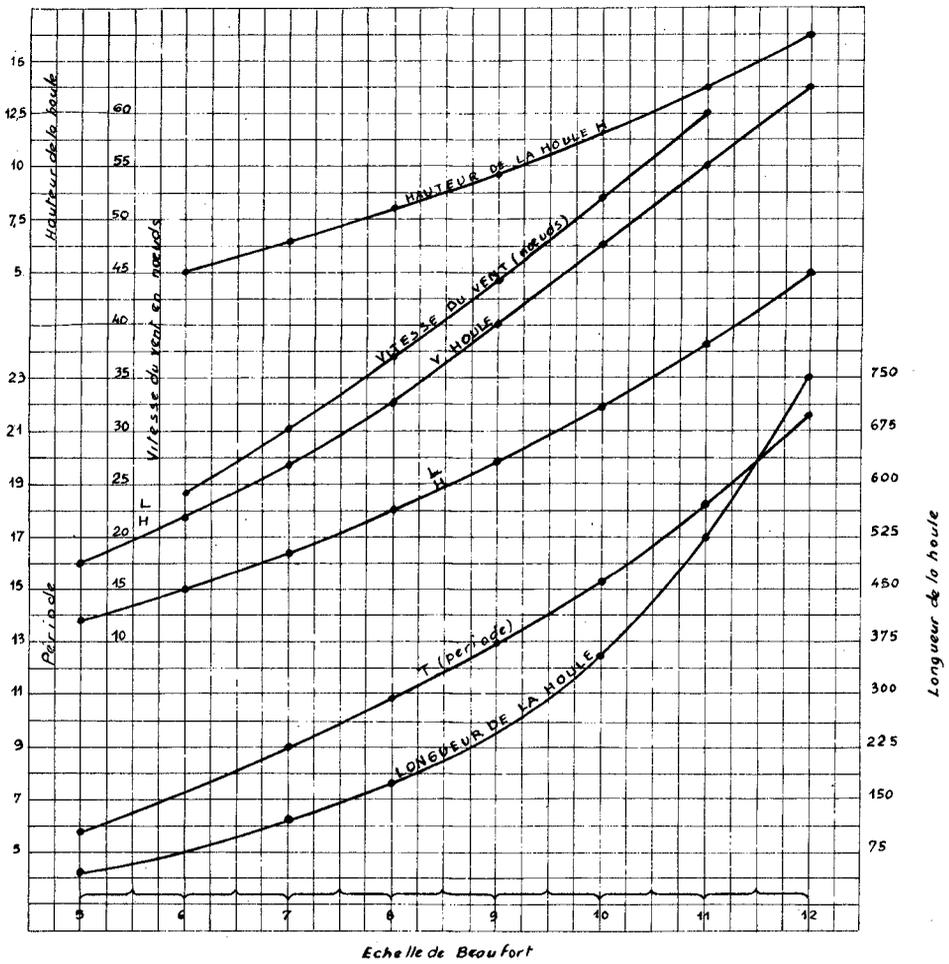


Fig. 1

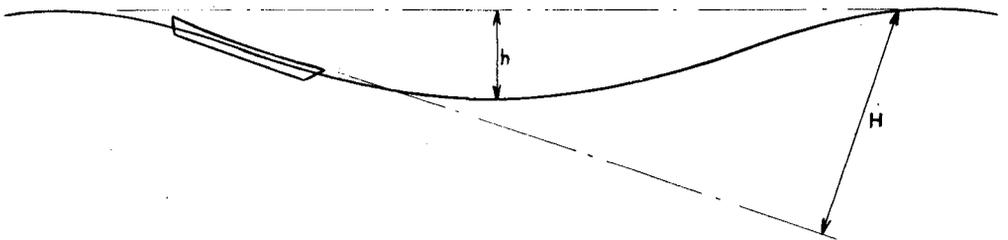


Fig. 2

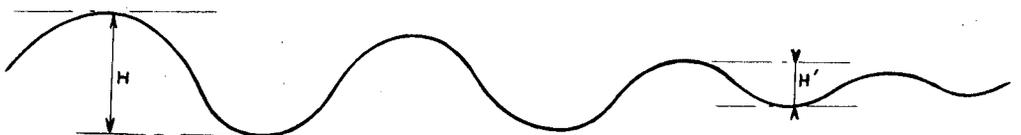


Fig. 3

Ce chiffre paraît faible et doit provenir d'un nombre d'observations insuffisant, surtout dans les zones où les vents atteignent des vitesses très élevées à l'état permanent.

En reprenant la formule : $h = 1,5 F$,
on trouve pour $h = 17,5$ ou $58'$ $F = \underline{1400 \text{ milles}}$

Ce serait donc la distance à partir de laquelle la hauteur des vagues ne croîtrait plus.

VAGUES EXCEPTIONNELLES -

Si l'on admet toutes les données précédentes, la hauteur de la plus grande lame sur laquelle peut se trouver un navire serait donc

| | |
|------------------------------------|---------------|
| sur l'Atlantique | 13 m. environ |
| dans les Mers du Sud et l'Arctique | 17 m,5 |
| en Méditerranée | 9 m. |

Ceci écarterait la possibilité de rencontrer les lames de 30 m. qu'avait indiquées Dumont d'Urville, chiffre aigrement contesté à l'époque par Arago.

Cependant des observateurs sérieux ont plusieurs fois à nouveau confirmé des hauteurs analogues à celle de Dumont d'Urville; la plus grande fréquence des transports, dans de très mauvaises mers (Guerre de 40-45) a pu offrir une probabilité accrue de rencontrer des cas exceptionnels.

Il faut cependant tenir compte de divergences d'interprétation dues à une crainte inconsciente de l'observateur, aussi bien qu'au fait que celui-ci, placé sur la pente descendante de la lame peut attribuer à la hauteur une valeur H très supérieure au creux h . (Fig.2)

C'est ainsi que de nombreuses observations dans des tempêtes de l'Atlantique N ont donné des appréciations très diverses de hauteur; les unes de 13,5 à 15 m, alors que d'autres s'élevaient à 21 m.

Il faut donc n'accueillir que les résultats annoncés par des observateurs très sérieux, opérant d'une manière très précise.

Pour les Mers du Sud, les dernières observations (1) faites ne donnent pas de hauteur supérieure à 12 m.

avec des vents de 60 milles
et des longueurs de 200 m.
paraissant d'ailleurs faible, par rapport à la vitesse observée du vent.

(1) Dubard et L.M. Bayle - Le Charcot à la Terre Adélie.

Il reste donc seulement quelques observations à retenir :

- 1/- En 1926, le paquebot Majestic accuse une vague de 90 pieds = 27 m. avec un vent de 90 milles/h.

La hauteur qui semblerait correspondre à ce vent serait de 14 m. d'après les données générales indiquées précédemment.

- 2/- Les observations du RAMAPO (1) donnent, pour une longueur de houle de 360 m. 34 m. et une période de 14 sec,8 ; lame exceptionnelle, mais dans la même tempête, on aurait relevé d'autres de 23 m. 26 m. 33 m. et 36 m.

Or la longueur de 360 m. correspond à une période d'environ 15 sec. alors que la hauteur maxima n'aurait dû être pour cette longueur que de 12 m.

- 3/- Les hauteurs maxima qui résultent d'un grand nombre d'observations semblent donc parfois dépassées et Vaughan Cornish admet lui-même comme digne de foi des observations :

| | |
|---|------------|
| en Octobre 1921 - Pacifique, Sud du Japon | 21 m. |
| en Décembre 1922 - Atlantique Nord | 24 m. |
| et d'autres de | 18 à 27 m. |

Il semble donc bien qu'avec des traversées plus fréquentes dans des mers mauvaises, on ait eu plus d'occasions de rencontrer des hauteurs sensiblement plus fortes.

Y a-t-il donc une discordance inexplicable avec les nombreux relevés donnant les hauteurs limites qui ont été indiquées précédemment et celles, exceptionnelles, qui paraissent cependant se confirmer.

Certains ont, très justement, pensé que la superposition de 2 ondes pouvait donner une amplitude, grosse mode, égale à la somme des 2 amplitudes. C'est ce qui peut-être aisément calculé mathématiquement. On a attribué à un changement d'intensité du vent une nouvelle série d'oscillations venant donner cette superposition.

Il y a lieu de penser aussi que le vent, sans changer de direction, peut croître en violence par paliers donnant des nouvelles séries d'ondulations. On aurait donc superposition de 2 ou 3 séries d'ondulations, dont l'amplitude maxima serait la somme des amplitudes de chaque mouvement périodique.

(1) J. Rouch - Traité d'Océanographie t. II, p. 31.

On sait que la superposition de 2 mouvements oscillatoires qui en acoustique donne le phénomène des battements est calculable mathématiquement de manière simple :

Soient les 2 mouvements oscillatoires définis par :

$$y_1 = a_1 \sin 2 \frac{t}{T}$$

$$y_2 = a_2 \sin 2 \frac{t}{T'} ; \text{ et } \frac{1}{T'} = \frac{1}{T} + \frac{\xi}{T} ;$$

ξ étant petit par rapport à T.

L'amplitude du mouvement résultant à période T sera :

$$A = a_1^2 + a_2^2 + 2 a_1 a_2 \cos 2 \frac{\xi}{T} t$$

A variera de $a_1 - a_2$ à $a_1 + a_2$;

la période des renforcements, si $\xi = 1/10$, sera $\theta = 10 T$.

On aura un mouvement ondulé :

(si $a_1 = a_2$, l'ondulation varie de 0 à 2a)

$$H = 2 a_1 + 2 a_2$$

$$H' = 2 (a_1 - a_2)$$

Si les 2 houles sont de vitesse et intensités voisines, on a :

$H = h_1 + h_2$ soit à peu près $2 h_1$; la houle peut doubler de hauteur par rapport à la houle correspondant au vent correspondant. (Fig. 3)

Pour les houles consécutives à une tempête qui s'exerce par suite de coups de vent à vitesse croissante, le phénomène peut se produire.

Pour les houles moyennes, plus fréquentes, nul de ceux qui ont navigué n'ignore que les hauteurs sont fréquemment variables, qu'à des lames petites succède une série de lames de hauteurs croissantes.

On disait jadis que pour virer de bord une embarcation ou un petit navire, il fallait compter 3 grosses lames et virer, pour se présenter alors par le travers dans les ondulations plus faibles.

Ce vieil usage concorde avec la démonstration qui précède.

Des conclusions importantes sont à tirer de ces considérations.

- 1/- Des lames exceptionnelles peuvent se produire, par superposition de mouvements de houle de périodes voisines. En ce cas on a des trains d'ondes, d'amplitude variable, avec des lames très hautes, s'affaiblissant jusqu'à être au contraire presque nulles puis croissantes jusqu'à un nouveau maximum.
- 2/- En se reportant au tableau A, les hauteurs maxima pourraient être doublées, on aurait des hauteurs :

| | | |
|--------------------------------|-------|-------|
| par vents voisins de 30 noeuds | | 13 m. |
| " 40 " | | 17,5 |
| " 50 " | | 23 |
| " 60 " | | 27,5 |
| " ouragans | | 33 |

ce qui concorde avec les observations qu'on peut considérer comme dignes de confiance.

- 3/- Ce qui est important à noter c'est qu'au voisinage du maximum, l'ondulation voisine est à une distance déterminée par la période P due à la longueur $2L$ et le rapport $\frac{L}{H}$, devient

$$\frac{L}{2H} ; \text{ l'escarpement de la houle est peut-être doublé.}$$

Le tableau donné précédemment, doit donc être modifié si l'on veut calculer le moment fléchissant auquel est soumis un navire placé sur une houle de même longueur.

| On aura : | Cas ordinaire | | Cas exceptionnel | |
|-------------------|---------------|---------------|------------------|----------------|
| | H | $\frac{L}{H}$ | H' | $\frac{L}{H'}$ |
| Navires de 120 m. | 6,5 | 18 | 13 | 9 |
| 170 m. | 8,5 | 20 | 17 | 10 |
| 250 m. | 10 | 25 | 20 | 12,5 |
| 300 m. | 11 | 28 | 22 | 14 |

Ceci a donc une grande importance et nous serons amenés à en envisager plus loin les conséquences.

EFFETS DES TYPHONS OU CYCLONES -

Le cyclone consiste en un mouvement en tourbillon qui se propage suivant une large courbe (Océanie, Antilles, etc...)

Il est caractérisé par un changement continu de la direction du vent en un point fixe, et un vent très violent.

Il en résulte une grande complexité des oscillations de l'eau de mer, un grand nombre d'ondes de directions différentes se superposant et créant un clapotis gigantesque - vagues très courtes pouvant atteindre 20 à 30 m., donc à pentes très abruptes.

Un grand navire portera sur plusieurs crêtes, mais celles-ci déferleront sur le pont et seront dangereuses, pouvant défoncer des écoutilles, des panneaux et introduire des masses d'eau dans le navire. Sur un petit navire placé sur des oscillations de sa longueur (50 à 60 mètres), pour 20 m. de hauteur, donc avec $\frac{L}{H} = 3$, ce qui provoque le déferlement, la situation peut-être $\frac{L}{H}$ désespérée.

La sécurité du navire ne dépendra que de la solidité et l'é-tanchéité des panneaux, roofs, etc..; pour les petits navires la flexion peut devenir très dangereuse. Il sera indispensable que le navire manoeuvre pour éviter le cyclone ou s'écarte des zones les plus dangereuses; la manoeuvre est connue et facilitée maintenant par les prévisions de marche des cyclones et par l'annonce qui en est faite par radioc.

Mais il est impossible de prévoir une construction de coque de navire susceptible de supporter tous les efforts dus aux cyclones, ceux-ci étant difficilement prévisibles.

Il n'y aura donc, pour le sujet qui nous occupe, qu'à examiner les effets des mers à régime régulier, soulevées par des vents à direction à peu près régulière et les vagues exceptionnelles qui peuvent se présenter dans ce cas.

4/- Faudrait-il prendre en considération les petites longueurs de houle, et les efforts sur les petits navires correspondants ?

On arriverait alors à des houles très creuses, infligeant aux petits navires l'action de moments fléchissants énormes.

On aurait par exemple, pour : L = 60 m. Houle H = 9; $\frac{L}{H} = 6,5$

Mais il semble :

a) que la houle de 9 m. en Méditerranée (accident aux jetées d'Alger) correspondait à une longueur normale (170 m.)

b) que ces houles courtes soient celles des mers fermées (fetch faible); or, dans ces mers, l'amortissement du mouvement oscillatoire est de très courte durée. La houle très vite amortie ne sera pas soumise à une autre houle de période voisine superposée.

En définitive, pour les petits bateaux (inférieurs à 80 m), il

paraît suffisant de considérer les houles du tableau p. 8 et du graphique A.

Pour les grands navires, 100 m. et au-delà, il faudra considérer deux cas, les houles normales et les houles exceptionnelles.

3ème PARTIE - LES NAVIRES SUR LA HOULE

L'action de la houle sur les navires peut être étudiée de plusieurs points de vue :

La tenue du navire, en stabilité, sont particulièrement importantes à envisager, ainsi que les roulis et tangages qu'elles lui impriment.

Nous nous bornerons ici à considérer les efforts que la houle provoque dans la charpente du navire - efforts auxquels la structure doit être établie de manière suffisamment solide pour résister.

En eau calme, chaque tranche transversale est soumise à deux actions opposées: le poids de la tranche, coque et tout ce que renferme la tranche, s'exerçant de haut en bas; la poussée hydrostatique de bas en haut, due au déplacement de la tranche considérée.

Comme les poids ne sont pas exactement équilibrés dans chaque tranche, par le déplacement de la tranche considérée, il existe des efforts résultants donnant des efforts tranchants et un moment de flexion longitudinal qui peut être aisément calculé.

C'est ce calcul qui détermine le choix et la disposition des échantillons de la charpente métallique ainsi que leurs liaisons.

De l'eau calme transportons le navire sur la houle ; les actions hydrostatiques sont différentes, la surface de l'eau n'étant plus horizontale et les déplacements, donc les poussées, dans chaque tranche, se trouvent modifiés. D'où une modification importante des efforts et du moment de flexion, qui généralement est accru.

A cet effort statique s'ajoutent des efforts dynamiques dus aux mouvements du navire et aux actions hydrodynamiques; ceux-ci sont plus difficiles à calculer mais peuvent devenir importants, surtout sur les petits navires (1), ainsi que l'effet des forces d'inertie dans les

(1) Nous nous référons au cours d'Architecture Navale (1948) de l'Ing. en Chef Amiot (actuellement Ing. Gén. du C. Maritime) professeur à l'Ec. Nle Sup. du Génie Maritime.

mouvements de tangage et du pilonnement; celles-ci pourraient sur un torpilleur de 64 mètres et 22 noeuds majorer de 17,8 % le moment statique.

Ici nous nous bornerons à examiner la majoration au moment de flexion en passant de l'eau calme à la houle.

En calculant les effets de celle-ci, on trouve que l'action de la houle est maxima pour une houle de longueur voisine de celle du navire; le navire peut être posé sur cette houle dans deux positions différentes :

1) Crête au milieu; le navire est soulevé par le milieu, l'avant et l'arrière tendant à tomber, la flexion (arc) tend à courber le navire avec convexité vers le haut.

2) Creux en milieu; le navire est surélevé par les extrémités, les déformations sont inverses des précédentes (contr'arc).

(le premier cas est la "hogging position" des Anglais, la seconde "sagging position").

On admet que, pour les grands paquebots, les efforts (statiques) dus à la houle sont les mêmes dans ces deux cas. Il suffira donc de les étudier pour un seul d'entre eux.

HOULES A CONSIDÉRER -

L'étude des actions de la houle sur le navire est donc faite sur une houle de longueur égale à celle du vaisseau.

Quant à la hauteur, on prend généralement une houle de hauteur égale à 1/20 de la longueur.

En réalité cette règle serait insuffisante pour les petits navires (houles courtes) et trop sévères pour les grands navires (houles longues).

Il faudrait donc en réalité, prendre des houles proportionnelles beaucoup plus raides pour les petits navires.

En fait, pour les grands bâtiments, on estime que pour un navire déterminé (dimensions et chargement) la variation de hauteur, de 1/16 à 1/25 de la longueur donne une variation du moment de flexion de $\pm 10\%$.

Pour étudier l'importance, d'après ce que nous avons dit précédemment, des houles de hauteur exceptionnelle, nous en avons fait l'application à une carène théorique de paquebot de 240 m. de longueur, donc à une houle de cette longueur et de hauteur $\frac{240}{20} = 12$ m.

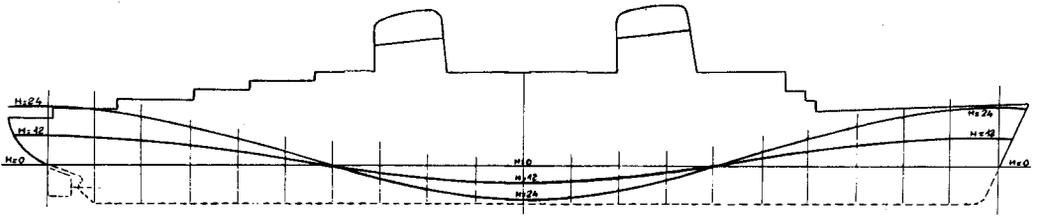


Fig. 4 paquebot de 240 m

Courbes des aires des couples
d'un Navire de 240 m.

En eau calme $H=0$
Sur houle de 12m $H=12$
Sur houle de 24m $H=24$

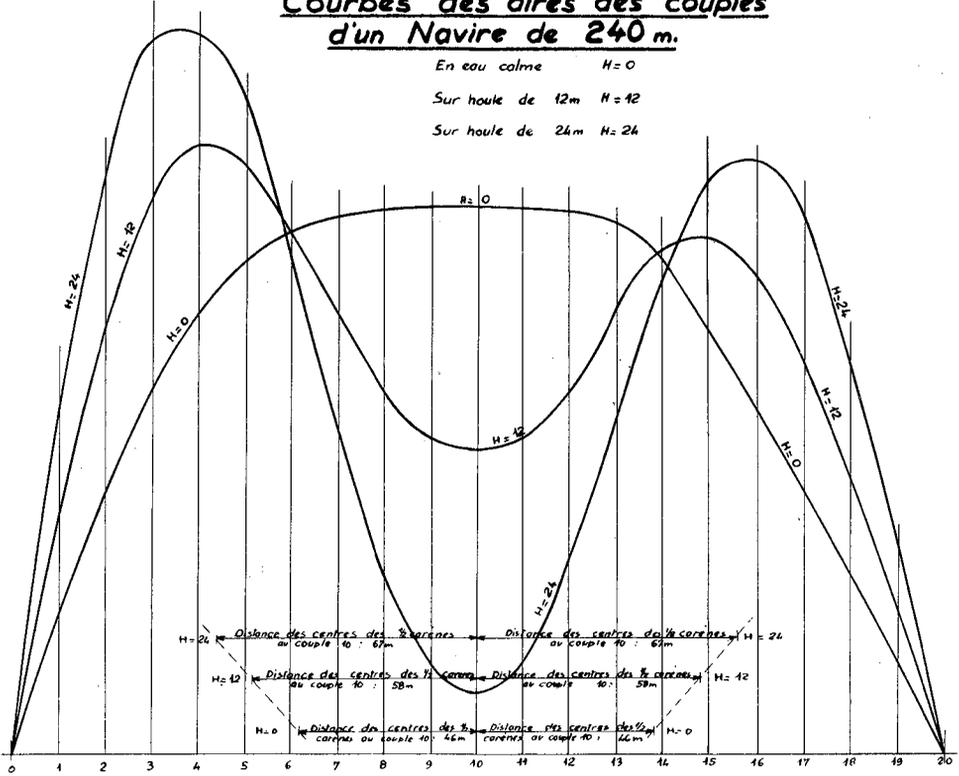


Fig. 5

qu'on peut trouver dans de fortes tempêtes sans qu'elle soit fréquente, mais doit être considérée comme très possible.

Au contraire, la houle de hauteur double: 24 m. sera une houle non impossible, mais exceptionnelle, qu'un même navire peut ne jamais rencontrer au cours de son existence. Cependant, du fait même de sa possibilité, même exceptionnelle, il nous paraît utile d'en étudier les effets sur le navire en question.

Nous examinerons le navire dans les cas suivants :

- 1) Eau calme
- 2) Houle de 12 m. et 12 m. de hauteur,
- 3) Houle de 24 m. et 24 m. de hauteur,

Pour obtenir le résultat cherché, c'est-à-dire l'accroissement du moment de flexion dans les cas (2) et (3) par rapport au cas (1), nous prendrons la courbe des aires des couples du navire (équivalente à la courbe des déplacements de chaque tranche du navire; dans les 3 cas; eau calme et les deux houles, la surface de celles-ci devant limiter une carène de même déplacement qu'en eau calme.)

Nous figurons sur un même schéma les 3 courbes, prises dans le cas où le milieu du navire est dans un creux. (Fig. 4)

On voit sur ce graphique la modification de la courbe des déplacements qui, ce qui est naturel, se creuse au milieu, les déplacements croissant à l'AV et à l'AR.

Prenant les deux moitiés AV et AR, le centre de poussée des deux parties AV et AR se déplace vers l'avant et les moments de flexion dus aux poussées sont modifiés.

On a, en effet, en prenant les centres de poussée des déplacements AV et AR du navire considéré :

| | | |
|----------------|--------------------|-------|
| eau calme | distance au milieu | 46 m. |
| houle de 12 m. | | 58 m. |
| houle de 24 m. | | 67 m. |

EFFORTS SUR LE NAVIRE -

On admet généralement que le moment de flexion résultant de l'action d'une houle de longueur égale à celle du navire, de hauteur $\frac{L}{20}$, soit ici celle de 12 m., donne un moment de flexion = $\frac{\text{Déplacement} \times \text{longueur}}{30} = \frac{PL}{30}$

Ici nous pouvons considérer les 3 cas (Fig. 5).

Houle de 12 m. $\frac{PL}{30} =$ moment des poussées hydrost.- moment des poids

$$\frac{PL}{30} = \frac{P}{2} \times 56 \text{ m.} - \frac{P}{2} \lambda, \text{ ce qui nous donnera :}$$

$$8 = \frac{1}{2} (58 - \lambda) \text{ et } \lambda = 42 \text{ m.}$$

Le moment de flexion en eau calme sera :

$$\frac{PL}{x} = \frac{P}{2} (46 - 42), \text{ ou } x = \underline{120}$$

Le moment en eau calme sera, pour le navire considéré : $\frac{PL}{120}$
ce qui est dans les limites généralement admises.

Houle de 24 m. La houle exceptionnelle de 24 m. donnera :

$$\frac{PL}{y} = \frac{P}{2} (67 - 42), \text{ ou } y = \frac{480}{25} = \underline{19,2}$$

Le moment (hydrostatique) sur houle de 24 m. exceptionnelle, sera donc :

$$\frac{PL}{19,2}, \text{ accru dans la proportion } \frac{30}{19,2} = 1,56 \text{ soit } 56 \%.$$

Si l'on veut se rappeler que sur les grands paquebots modernes, le calcul d'efforts sur la charpente, avec moment $= \frac{PL}{30}$, atteint 20 Ks la charge passerait à 31 K,6,

chiffre qu'il faut encore majorer des efforts d'inertie, considérables dans le cas du passage d'un navire sur une houle aussi creuse; la majoration devient analogue à celles des structures de petits navires sur houles de courte longueur, creuses par conséquent.

On peut admettre une majoration de 15 % des efforts sont ici de 4,75, donnant un effort calculé total de 36,15 Ks.

On peut de cet exposé tirer les conclusions suivantes :

- a) houles de hauteur maxima normales :
Les calculs usuels sont justifiés et donnent vraisemblablement des résultats qu'on peut adopter avec une sécurité suffisante.
- b) Si l'on veut envisager les houles de hauteur maxima-maximarum qui sont rares et peuvent ne jamais être rencontrées par un navire déterminé, il faut compter une majoration d'efforts de 80 %. Mais en raison de la rareté même de ces rencontres possibles, on pourra

admettre des coefficients de sécurité réduits, tout en restant cependant au-dessous des limites élastiques des matériaux et toujours au-dessous des limites de flanchement des éléments des structures.

RESUME

WIND AND MAXIMUM WAVE HEIGHT

P. Gille

1. The height of waves depends on the strength of the wind; it is necessary to know the maximum wind speed in order to know the wave pattern. The data on winds are given by scale (Beaufort's scale), by speed (in nautical miles, or kilometers per hour and meters per second, and the maximum wind speed, typhoons excluded, seems to be 110 miles (nautical). In typhoons the wind speed exceeds these values very much; on the other hand, in the mid-Atlantic zone between the United States and Europe, there are often speeds of 55 miles per hour but greater speeds are exceptional. The experiments on the pressure due to the wind against a body give results which confirm the usual rules of calculations as used in public works, bridges, etc.
2. The wave speed is always less than that of the originating wind. To the wind speed, for a sufficient continuance, a maximum height of wave might be expected. This height depends on the length of open water over which the wind has been blowing, the "fetch", i.e., the distance between two lands measured along the wind direction. From a given distance, the height remains the same; corresponding maximum heights seem to be 30 ft. in the Mediterranean, 40 ft. in the Northern Atlantic, and 58 ft. in the Southern Atlantic.

There is a relation between wave length, wave speed and period. The ratio (L/H) of wave length to maximum wave height increases with increase of wave length; it varies from 10 to 30.

Wave heights from 80 to 100 ft. have been described by some sailors, but have not been considered to be possible. Recent and careful observations, however, are confirming these heights. These exceptional heights are explained by superposition of two undulations of approximately the same period, a phenomenon well known in acoustics. The study of these waves is of great interest; the wave length remains that of a single wave, accordingly the height is doubled, with the steepness very much increased.

3. In studying stresses on the structure of ships, the usual calculations appear generally to be justified. The bending moment taken as $1/30$ (displacement \times length) seems sufficient, and it corresponds to the same wave length as the length of the ship, with a height of $1/20$ of the wave length. For the case of exceptional waves, it will be cautious to increase the results by eighty per cent. In typhoons waves are very high and very strong. They result from a meeting of swells coming from various directions. The soundness of a ship depends on the firmness of hatches, scuttles, doors, etc., but also on the sailors' skillfulness in avoiding the most dangerous conditions.