

PREVISION DE LA HOULE

1957.

LA METHODE DES DENSITES  
SPECTRO-ANGULAIRES

par

R. GELCI, H. CAZALÉ et J. VASSAL

La méthode des densités spectro-angulaires (DSA) est en exploitation au Centre Météorologique de Casablanca, depuis près de deux ans (8)\*.

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence deux catégories de discordances :

a) des discordances aléatoires dues :

- soit à une mauvaise prévision du vent,
- soit à un manque de renseignements météorologiques,
- soit encore à une certaine imprécision dans le tracé des diagrammes de propagation.

b) des discordances systématiques par excès ou par défaut dues :

- soit à la grossièreté des découpages spectral et angulaire,
- soit à l'inexactitude de certaines hypothèses initiales.

S'il est impossible de remédier aux deux premières sortes de discordances aléatoires, par contre, celles qui sont dues à l'imprécision des tracés, ainsi que les erreurs systématiques provenant du découpage angulaire, seront évitées par l'acquisition d'une technique dont nous allons passer en revue certains aspects particuliers.

Les discordances systématiques (autres que celles qui sont dues au découpage spectral) constituent par elles-mêmes une information statistique sur le degré de validité de nos

-----  
\* Les numéros entre parenthèses renvoient à la liste bibliographique placée in fine.

hypothèses initiales, information qui a été utilisée pour améliorer les hypothèses de génération, de dispersion angulaire et d'amortissement.

En conclusion nous comparerons entre elles les représentations spectrales proposées par divers auteurs.

## Chapitre I

### TRACE DES DIAGRAMMES DE PROPAGATION

Considérons tous les points de l'océan de même azimut  $\theta$  par rapport au lieu P de prévision.

Soit W le vent, au temps t, en un point M de cet azimut, à la distance x de P.

Ce vent peut être défini par l'angle  $\theta - \omega$  qu'il forme avec MP et par sa vitesse W.

Sur un diagramme  $(x, t)$  en coordonnées rectangulaires, on inscrira les deux quantités  $\theta - \omega$  et W au point correspondant de coordonnées x et t (figures la et lb).

L'ensemble de ces couples de valeurs permet alors de construire :

a) Les zones "Génératrices"		$ \theta - \omega  < 20^\circ$
"Favorables"	$20^\circ$	$<  \theta - \omega  < 60^\circ$
"Traversières favorables"	$60^\circ$	$<  \theta - \omega  < 90^\circ$
"Traversières contraires"	$90^\circ$	$<  \theta - \omega  < 120^\circ$
"Contraires"	$120^\circ$	$<  \theta - \omega  < 180^\circ$

b) Les diverses lignes  $W = \text{constante}$  (isotaches)

c) En particulier les zones de "calme" où le vent reste inférieur à 10 noeuds.

Nous proposons, pour la clarté des diagrammes, de colorer en jaune les zones de calme, en gris les zones génératrices, en bleu les zones traversières favorables, en violet les zones traversières contraires, en rouge les zones contraires, les zones favorables étant laissées en blanc.

Les isotaches seront tracées en pointillé, de 5 en 5 noeuds.

Les "fronts" météorologiques seront représentés avec leurs notations usuelles.

A chaque azimut issu de P, correspond ainsi un diagramme de propagation. L'ensemble de ces diagrammes constitue une représentation particulière du champ de vent, indépendante de toute méthode de prévision.

On démontre facilement que, dans l'hypothèse d'un déplacement uniforme sans déformation, toute figure tracée sur une carte synoptique météorologique se transforme en une figure affine sur un diagramme de propagation. C'est ainsi que les "fronts" météorologiques conservent sur les diagrammes de propagation leur allure classique d'ondulations.

Nous étudions ci-dessous quelques cas importants pour le tracé :

- a) Figure isobarique à centre traversant (fig. 2a et 2b) ou ne traversant pas (fig. 3a et 3b) l'azimut (planche I).
- b) Déplacement de thalwegs et dorsales (planche II) :
  - thalweg peu marqué (fig. 4a et 4b)
  - thalweg accentué (fig. 5a et 5b)
  - formation de dorsale entre deux thalwegs (fig. 6a et 6b).

## Chapitre II

### LES PREMIERS RESULTATS POUR CASABLANCA

Depuis novembre 1955 (ainsi que pour plusieurs périodes antérieures) sont construits, au centre météorologique de Casablanca, les diagrammes de propagation relatifs à six azimuts de Nord-Ouest.

Ces diagrammes sont utilisés pour une prévision énergétique selon des principes exposés précédemment dans une note (8) à laquelle nous nous référerons constamment.

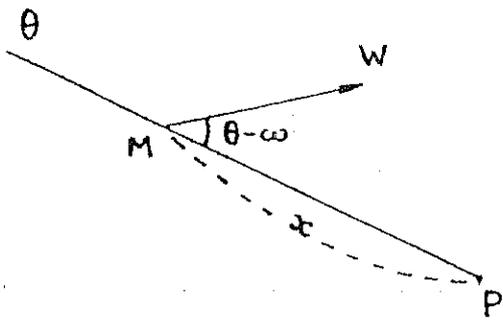


fig. 1a

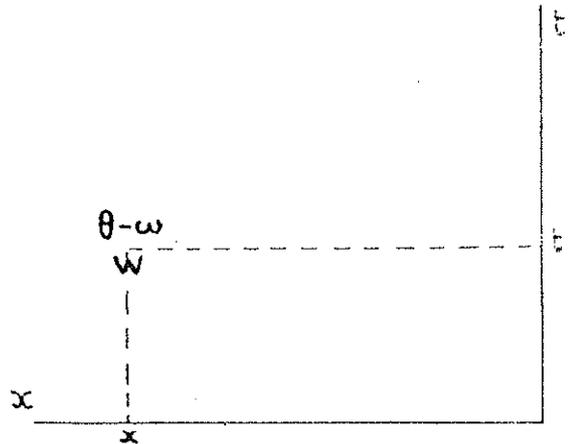


fig. 1b

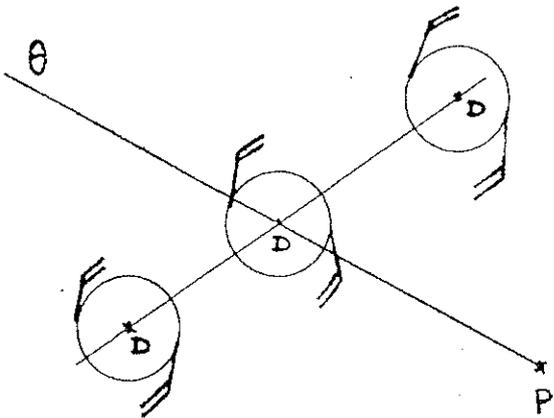


fig. 2a

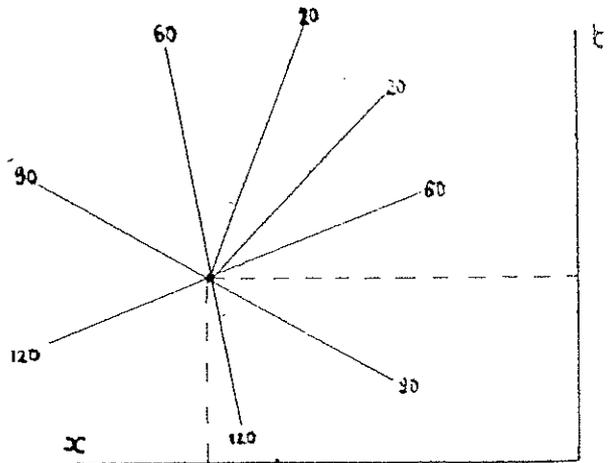


fig. 2b

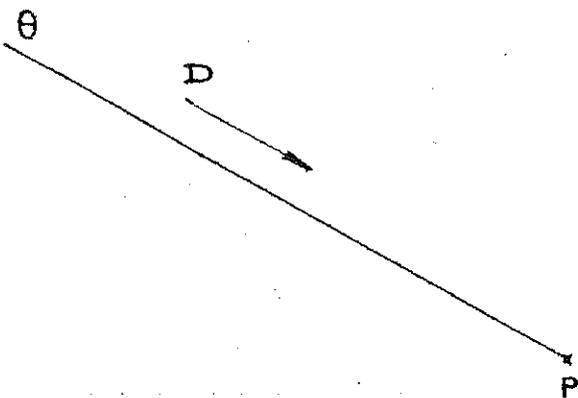


fig. 3a

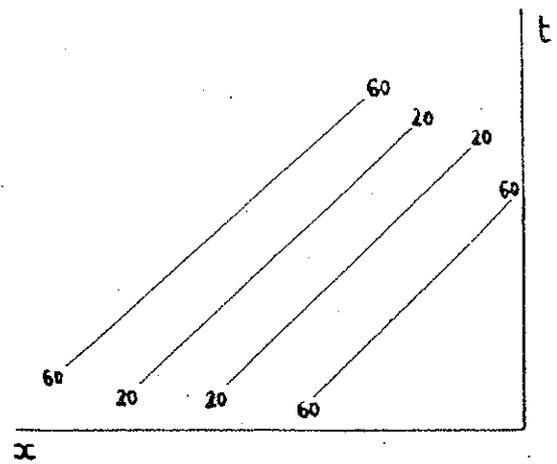


fig. 3b

Les prévisions ont été mises sous forme de graphiques comparatifs (figure 7, planche III) construits de la manière suivante :

- en abscisse : le temps
- en ordonnée :

a) Les amplitudes  $H$  mm  $\neq$   $H$  1/10 effectivement observées, représentées par des croix, accompagnées de la période de la composante prépondérante.

b) L'amplitude prévue  $H$  1/10 =  $2,15\sqrt{\Sigma\Sigma\rho}$  (en trait plein)

c) Les densités d'énergie spectrale moyenne  $\frac{\Sigma\rho_i}{\Delta T}$ , relatives aux diverses composantes, en  $\frac{\text{joules}}{\text{cm}^2 \times \text{sec.}}$  :

1 - La densité d'énergie spectrale moyenne  $\frac{\Sigma\rho_c}{3}$  relative à la composante courte, en pointillé.

2 - La densité d'énergie spectrale moyenne  $\frac{\Sigma\rho_m}{5}$  relative à la composante moyenne, en point-tiré.

3 - La densité d'énergie spectrale moyenne  $\frac{\Sigma\rho_l}{7}$  relative à la composante longue, en tiré.

De nombreuses comparaisons ont ainsi été effectuées avec les spectres obtenus par analyse harmonique des enregistrements.

Quatre discordances typiques ont été mises en évidence.

#### LA DISCORDANCE C :

Elle est caractérisée comme suit :

- a) La prévision est trop forte
- b) La composante courte prévue est prépondérante
- c) Les analyses harmoniques infirment cette prépondérance
- d) Cette discordance est indépendante de l'éloignement de l'aire génératrice.

Un tel exemple est représenté sur la figure 7.

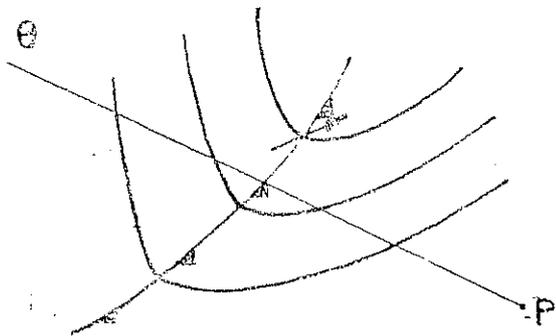


fig. 4a

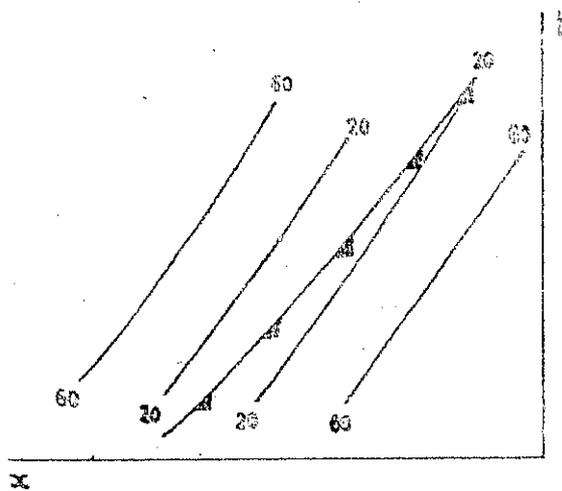


fig. 4b

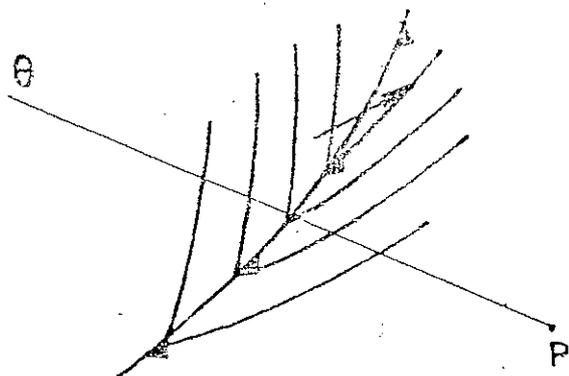


fig. 5a

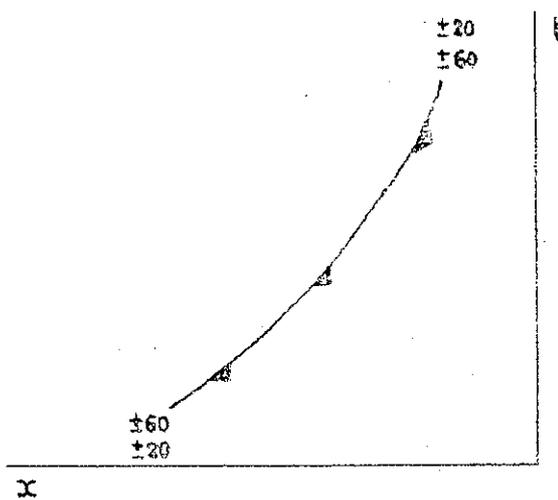


fig. 5b

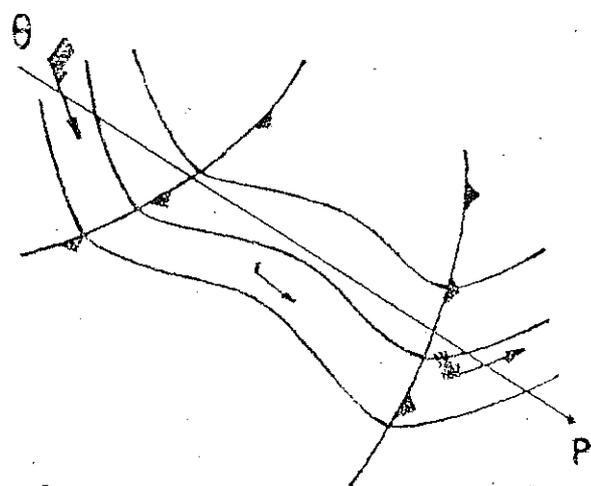


fig. 6a

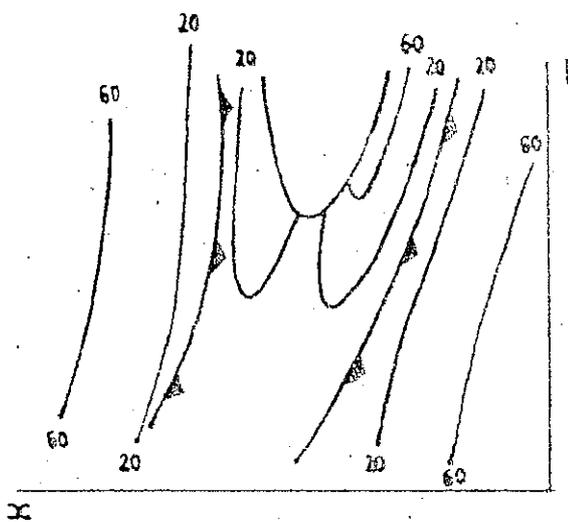


fig. 6b

En particulier, les améliorations sont toujours prévues en retard.

Voici, entre autres, une liste de "discordances C" les plus remarquables :

15 septembre 1951  
 14 décembre 1953  
 17 décembre 1953  
 13 mars 1956 (cf. fig.7)  
 16 mars 1956  
 20 mars 1956  
 23 mars 1956  
 25 mars 1956  
 20 septembre 1956  
 25 septembre 1956  
 3 octobre 1956  
 12 novembre 1956 ...

#### LA DISCORDANCE L :

Elle est caractérisée comme suit :

- a) Une aggravation est prévue trop tôt
- b) La composante moyenne ou longue, prévue, est prépondérante
- c) Les analyses harmoniques infirment cette prépondérance
- d) Les vents générateurs ont été relativement faibles

Voici une liste de "discordances L" :

13 septembre 1951  
 14-15 septembre 1951  
 10 août 1954  
 29 septembre 1956 ...

#### LA DISCORDANCE A :

Elle est caractérisée comme suit :

- a) La prévision est trop faible
- b) Il est apparu, sur l'un au moins des diagrammes, une zone de vent fort "favorable" ( $20^{\circ} < |\theta - \omega| < 60^{\circ}$ ).

Voici une liste de "discordances A" :

28 janvier 1953  
 30 décembre 1955  
 13 janvier 1956  
 10 novembre 1956  
 12 décembre 1956 ...

# MARS 1956

Casablanca  
(Aïn. Diab)

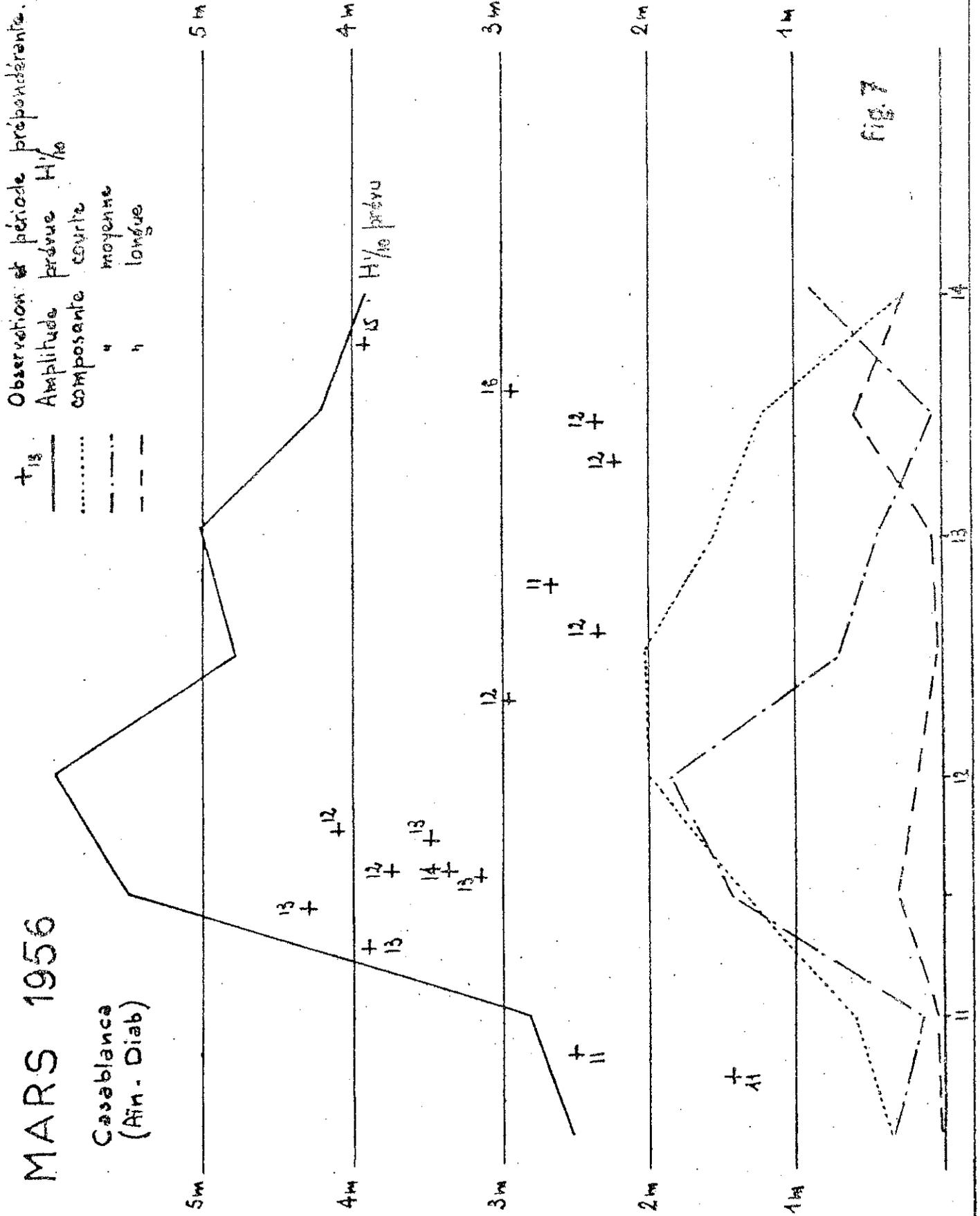
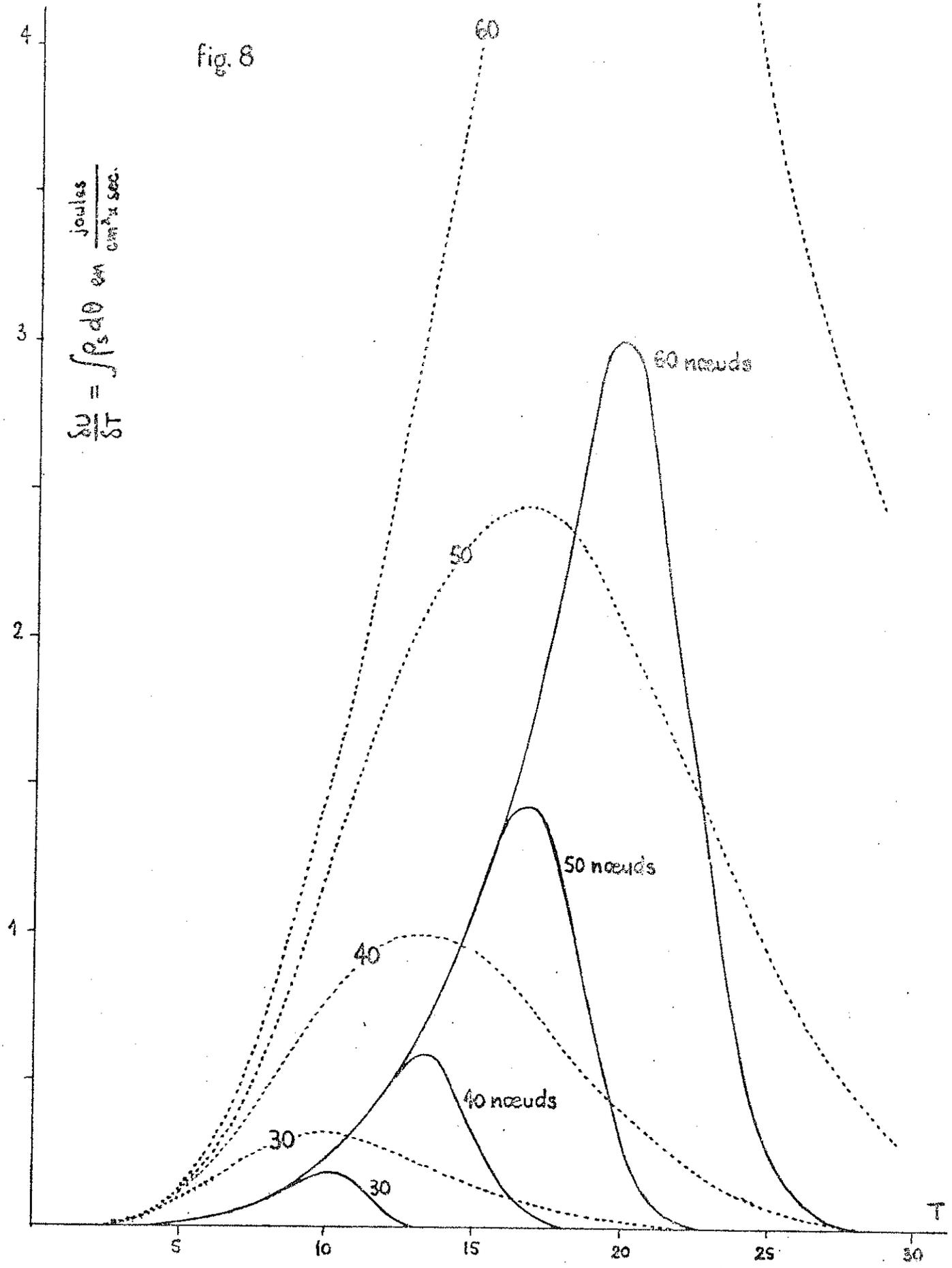


Fig. 7

fig. 8

$$\frac{\delta U}{\delta T} = \int \rho_s d\theta \text{ en } \frac{\text{joules}}{\text{cm}^2 \times \text{sec.}}$$



LA DISCORDANCE S :

Elle est caractérisée comme suit :

- a) La prévision conduit à une aggravation brusque d'une des trois composantes, suivie aussitôt après d'une amélioration brusque, alors que, en réalité, la hauteur observée n'a pas varié sensiblement :
- b) L'aire génératrice est :
  - soit lointaine et de dimensions restreintes
  - soit mince et allongée

Voici une liste de "discordances S" :

16 septembre 1951

26 janvier 1953

11 décembre 1953

SIGNIFICATION DES DISCORDANCES SYSTEMATIQUES :

Il est aisé de vérifier que la "discordance S" n'a pas de signification physique : elle tient simplement au découpage spectral.

Le seul remède serait d'augmenter le nombre de composantes.

Par contre, les trois autres types de discordances ont d'importantes significations physiques :

La "discordance A" montre que les zones "favorables" engendrent elles aussi de l'énergie vers le lieu de prévision et qu'il faut reconsidérer notre hypothèse sur la dispersion angulaire de l'énergie.

La "discordance C" indique que l'importance des composantes courtes est exagérée et doit être considérablement diminuée.

Enfin, la "discordance L" indique que les vents faibles n'engendrent pas de composantes longues et moyennes.

.../...

## Chapitre III

LES NOUVEAUX ABAQUESA - LA METHODE UTILISEE

Après une analyse approfondie des répercussions qu'entraînerait, a priori, chaque modification d'abaques, nous avons été amenés, en vue de supprimer les précédentes discordances systématiques :

- 1) à augmenter la dispersion angulaire de l'énergie
- 2) à modifier les croissances de telle sorte qu'un vent donné  $W$  (en noeuds) n'engendre plus qu'une bande relativement mince de composantes, autour de la valeur centrale, inchangée  $T_{\max} = W/3$  (en secondes).

De nouveaux abaques furent ainsi construits et mis en application, tant pour Casablanca que pour divers autres points (Dakar, points I et J).

L'examen des nouveaux résultats fit alors apparaître de nouvelles discordances systématiques, conduisant à de nouvelles modifications, et ainsi de suite.

Cinq systèmes d'abaques furent effectivement utilisés, avant d'en arriver à celui qui est présenté plus loin, sous l'indicatif DSA II.

Une telle méthode d'ajustements successifs est très laborieuse : les discordances systématiques n'apparaissant qu'après de nombreux calculs.

En effet, les discordances systématiques d'un système d'abaques contraire à la réalité peuvent être longues à déceler : les conditions météorologiques qui président à la formation, puis à la propagation de la houle ne sont pas indépendantes, et peuvent conduire à une compensation statistique des erreurs.

Inversement, la signification d'une discordance systématique est souvent ambiguë : c'est ainsi que la "discordance C" dont nous avons parlé au chapitre précédent, pourrait, a priori, être interprétée :

- soit par une génération "trop riche" en composantes courtes
- soit par un amortissement sélectif des composantes courtes.

Comme cette discordance se produit à des distances variables de l'aire génératrice, nous avons d'abord retenu la première interprétation (ce qui d'ailleurs n'exclut pas la seconde comme on verra par la suite).

Enfin, cette suite d'ajustements successifs ne converge pas nécessairement vers un système d'abaque idéal ; il est possible, sinon probable, qu'apparaîtront à la longue des discordances qui infirment les principes de base : indépendance des diverses composantes, propagation orthodromique, caractérisation du vent par un simple scalaire ...

## B - LES DISCORDANCES SYSTEMATIQUES DES ABAQUES INTERMEDIAIRES :

Nous n'exposerons pas ici les systèmes d'abaques intermédiaires qui ont abouti au système d'abaque DSA II, qu'on trouvera plus loin.

Nous nous bornerons à décrire leurs discordances systématiques, ou, plus exactement, les significations intrinsèques de ces discordances qui nous ont conduits aux abaques DSA II.

1 - Le temps d'action d'un vent générateur : Au-delà d'une vingtaine d'heures, l'influence du temps d'action  $t$  d'un vent générateur  $W$ , sur une composante donnée, devient négligeable.

En d'autres termes, l'état de saturation est atteint assez rapidement.

2 - Les courbes de variation d'amplitude de la houle en un point donné (lorsque l'on dispose d'observations quasi-continues) se présentent sous une forme complexe dans laquelle on peut distinguer, en plus de fluctuations lentes, des fluctuations rapides, associées aux divers noyaux de vents générateurs des diagrammes de propagation (figure 18, planche XVIII).

Ces fluctuations rapides, ou "trains partiels" (4), ont une période (en secondes) sensiblement égale au tiers de la vitesse du vent (en noeuds) dans les noyaux générateurs.

L'existence de ces "trains partiels" nous a conduits à supposer qu'un vent  $W$  (en noeuds) engendre une composante privilégiée de période  $T_{\max} \neq W/3$  (en secondes), ayant une énergie proportionnelle à la cinquième puissance du vent (en noeuds).

(Des abaques intermédiaires, dans lesquels l'énergie de cette composante privilégiée avait été choisie proportionnelle à  $W^3$ , puis à  $W^4$ , n'avaient pu rendre compte, ni de l'existence des trains d'onde partiels, ni des amplitudes maxima effectivement atteintes).

3 - Malgré l'utilisation, dans des abaques intermédiaires, de spectres minces, centrés sur la période  $T_{\max} = W/3$ , la "discordance C" n'a pu être complètement éliminée.

Il est alors apparu nécessaire d'introduire un amortissement sélectif satisfaisant aux conditions suivantes :

a) Les vents traversiers favorables (zones bleues) n'amortissent que très peu les composantes moyennes et longues; (mais cet amortissement devient sensible pour les vents forts, ou pour les composantes courtes).

b) Les vents contraires (zones rouges) même relativement faibles (20 noeuds) constituent une "barrière" pratiquement infranchissables pour les composantes courtes (mais non pour les composantes longues).

c) Les vents faibles "générateurs" ou "favorables" n'amortissent pas apparemment les composantes moyennes et longues (a fortiori les composantes courtes qu'ils engendrent).

d) Les composantes courtes, et dans une certaine mesure, les composantes moyennes, sont un peu amorties dans les zones de calme ( $W \leq 10$  noeuds).

D'une manière générale, d'une aire génératrice suffisamment éloignée (1000 milles marins), les composantes courtes ne parviennent que très amorties.

4 - L'utilisation, pour les calculs de houle au large, de spectres minces et symétriques autour de la valeur centrale  $T_{\max} = W/3$  conduit à des amplitudes trop faibles et des périodes trop fortes.

Nous avons donc été conduits à adopter des spectres dissymétriques, plus riches en composantes courtes qu'en composantes longues, autour de la valeur modale  $T_{\max} = W/3$ .

On constate, d'autre part, que, pour un point en mer, une forte augmentation de la vitesse du vent local provoque immédiatement une aggravation de houle comparable (voir à ce sujet WALDEN, réf. 5). Nous avons donc été amenés à adopter une croissance quasi-instantanée des composantes courtes.

Ces résultats, ainsi qu'on le verra au chapitre suivant, confirment, dans une certaine mesure, les résultats de DARBYSHIRE sur la croissance en général (2) et sur les spectres de houle au large (6).

Il faut remarquer que toute prévision au large nécessite la construction de très nombreux diagrammes de propagation (au minimum une douzaine d'azimuts de 10 en 10°). Cette multiplicité des azimuts, en introduisant des vents faibles locaux (ou peu éloignés) dans le calcul total, contribue partiellement à expliquer la différence observée entre amplitudes et spectres à la côte et au large.

En un point d'une côte éloignée de l'aire génératrice (par exemple Dakar et Casablanca), la houle n'arrive en général que de quatre à cinq azimuts (de 10 en 10 degrés).

### C - REPRESENTATION ANALYTIQUE DES NOUVEAUX ABAQUES

Pour la clarté de l'exposition, les anciens abaques et les nouveaux abaques (et leurs représentations analytiques) seront désignés respectivement par les notations DSA I et DSA II.

#### Régime stationnaire limite

Soit  $\frac{\delta U}{\delta T} = \int \rho_s d\theta$  la densité d'énergie spectrale limite en  $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^2 \times \text{sec.}}$ .

Nous avons :

$$\text{DSA I} \quad \frac{\delta U}{\delta T} = 2471 T^4 \exp - 18,42 \frac{T^2}{W^2}$$

$$\begin{aligned} \text{DSA II} \quad \frac{\delta U}{\delta T} &= 209 T^4 && \text{si } T \leq 0,315 W \\ &= 209 T^4 \exp - 329 \left[ \frac{T}{W} - 0,315 \right]^2 && \text{si } 0,315 W \leq T \end{aligned}$$

$T$  étant exprimé en secondes, et  $W$ , vent de surface, en noeuds.

On a, dans les deux familles de spectres (fig.8, Pl.IV):

$$T_{\max} \neq \frac{W}{3}.$$

La vitesse de phase de la composante prépondérante est égale à la vitesse du vent de surface.

Dispersion angulaire de l'énergie :

Soit  $S(\theta-\omega)$  la "fonction de dispersion angulaire" définie comme suit :

$$\begin{aligned} S(\theta-\omega) &= 9/4\pi && \text{pour } |\theta-\omega| < 20^\circ \\ &= 9/8\pi && \text{pour } 20^\circ < |\theta-\omega| < 60^\circ \\ &= 0 && \text{au-delà.} \end{aligned}$$

Avec cette nouvelle répartition angulaire, la densité spectrale angulaire limite est :

a) pour  $|\theta-\omega| < 20^\circ$

$$\rho_s = 150 T^4 \quad \text{si } T \leq 0,315 W$$

$$\rho_s = 150 T^4 \exp - 329 \left[ \frac{T}{W} - 0,315 \right]^2 \quad \text{si } 0,315 W \leq T$$

b) pour  $20^\circ < |\theta-\omega| < 60^\circ$

$$\rho_s = 75 T^4 \quad \text{si } T \leq 0,315 W$$

$$\rho_s = 75 T^4 \exp - 329 \left[ \frac{T}{W} - 0,315 \right]^2 \quad \text{si } T \geq 0,315 W$$

c) pour  $60^\circ < |\theta-\omega|$ .

$$\rho_s = 0.$$

Croissance :

Considérons, pour fixer les idées, une aire génératrice de très grandes dimensions : l'état de la mer étant initialement calme, un vent  $W$  (en noeuds) se met à souffler instantanément et initialement.

1 - Au bout d'un temps relativement court (de l'ordre

de l'heure) la densité d'énergie spectrale a pour expression en ergs par  $\text{cm}^2 \times \text{sec.}$ ) :

$$\rho = 209 T^4 \left[ 1 - \exp - 329 \left( \frac{T}{W} - 0,315 \right)^2 \right] S(\theta - \omega)$$

$$\text{si } T \leq 0,315 W$$

$$\rho = 0 \quad \text{si } 0,315 W \leq T .$$

Nous désignerons par  $\rho_0$  cette fonction de T et W (fig.9, Pl.V).

A l'échelle des cartes météorologiques synoptiques, il revient au même de supposer que ce régime s'établit instantanément.

2 - Par la suite, chaque composante croît linéairement selon la loi :

$$\rho = \rho_0 + \frac{t}{18} 209 T^4 \exp - 329 \left[ \frac{T}{W} - 0,315 \right]^2 S(\theta - \omega)$$

t étant exprimé en heures, et inférieur à 18.

Pour  $18 \leq t$  le régime est stationnaire (fully arisen sea) :

$$\rho_s = \rho_0 + 209 T^4 \exp - 329 \left[ \frac{T}{W} - 0,315 \right]^2 S(\theta - \omega) \text{ soit encore :}$$

$$\rho_s = 209 T^4 S(\theta - \omega) \quad \text{si } T \leq 0,315 W$$

$$\rho_s = 209 T^4 \exp - 329 \left( \frac{T}{W} - 0,315 \right)^2 S(\theta - \omega) \quad \text{si } 0,315 W \leq T$$

L'énergie totale (en ergs/ $\text{cm}^2$ ) est égale à  $\iint \rho \, d\theta \, dT$

On trouve d'abord  $\iint \rho_0 \, d\theta \, dT \neq 0,0610 W^5$  puis

$$\iint \rho \, d\theta \, dT = \left[ 0,0610 + \frac{t}{18} 0,2197 \right] W^5 \quad \text{et enfin :}$$

$$\iint \rho \, d\theta \, dT = 0,2807 W^5$$

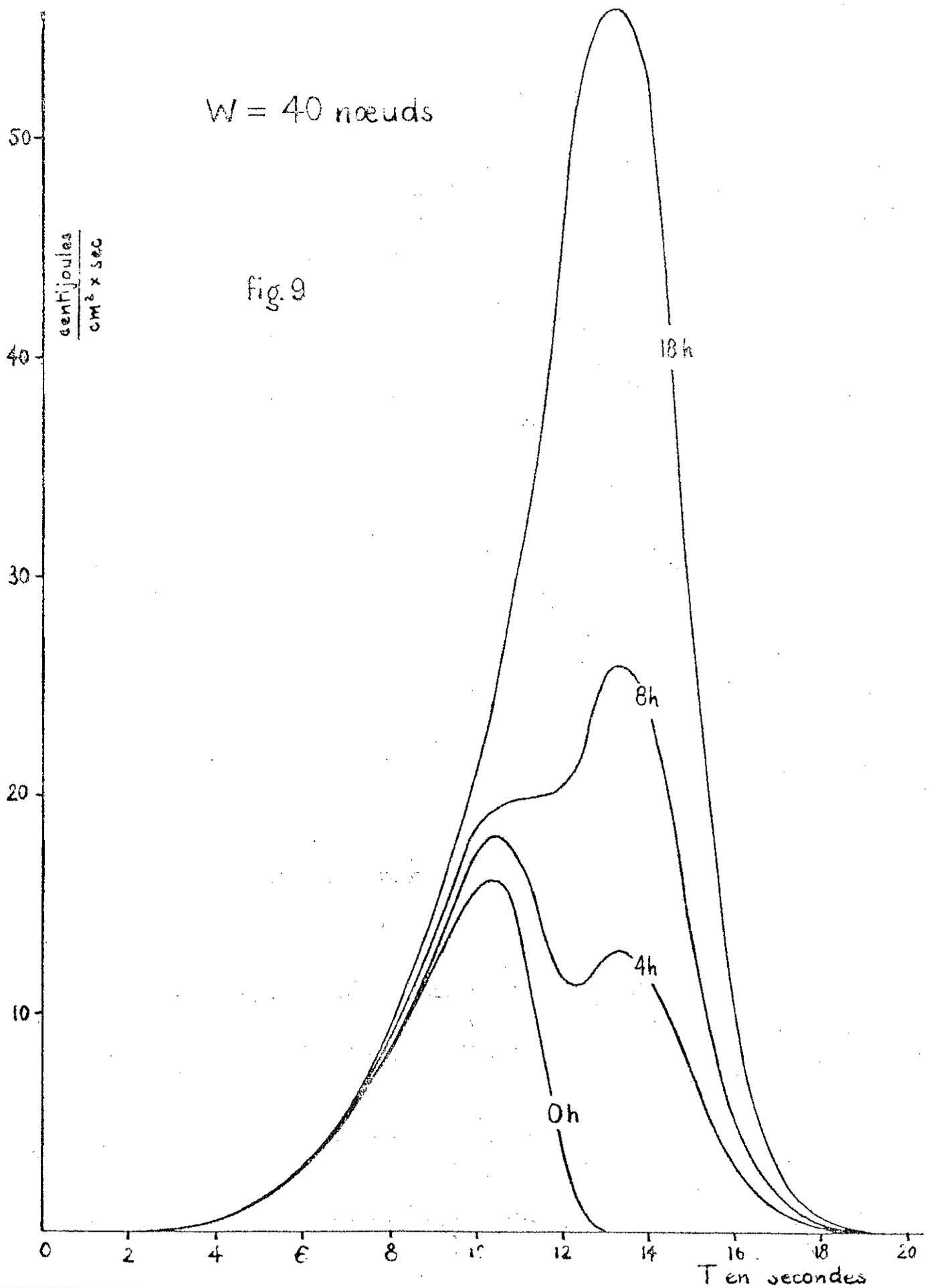
On trouve facilement :

$$H \, 1/10 \approx 0,0395 \sqrt{1 + 3,6 \frac{t}{18}} W^{5/2}$$

(H en cm, t en heures, W en noeuds).

W = 40 nœuds

fig. 9



Amortissement :

Il est choisi exponentiel et sélectif :

$$\text{DSA I} \quad 3\ 600\ F = 2 \cdot 10^{-2} W^2 \sin^2 \frac{\theta - \omega}{2} \quad \text{si } 20^\circ < |\theta - \omega|$$

$$3\ 600\ F = 0 \quad \text{si } |\theta - \omega| < 20^\circ$$

$$\text{DSA II} \quad 3\ 600\ F = \frac{100}{T^2} + 10^{-5} 38.416 \left(\frac{W}{T}\right)^4 \sin^2 \left(\frac{3}{4}|\theta - \omega| - \frac{\pi}{4}\right)$$

$$\text{si } 60^\circ < |\theta - \omega|$$

$$3\ 600\ F = 0 \quad \text{si } |\theta - \omega| < 60^\circ \quad \text{et } 10 \text{ noeuds} < W$$

D - PRATIQUE DES CALCULS

Le découpage spectral : Des calculs de houle pour des points en mer nous ont amenés à considérer une nouvelle composante, appelée "composante très courte", correspondant à l'intervalle spectral (5,5 , 8,5 sec.).

Au total, l'ensemble des quatre composantes utilisées couvre un intervalle spectral de 18 secondes (de 5,5 à 23,5 sec.).

Les quatre droites de propagation correspondantes sont représentées sur la figure 10 (planche VI).

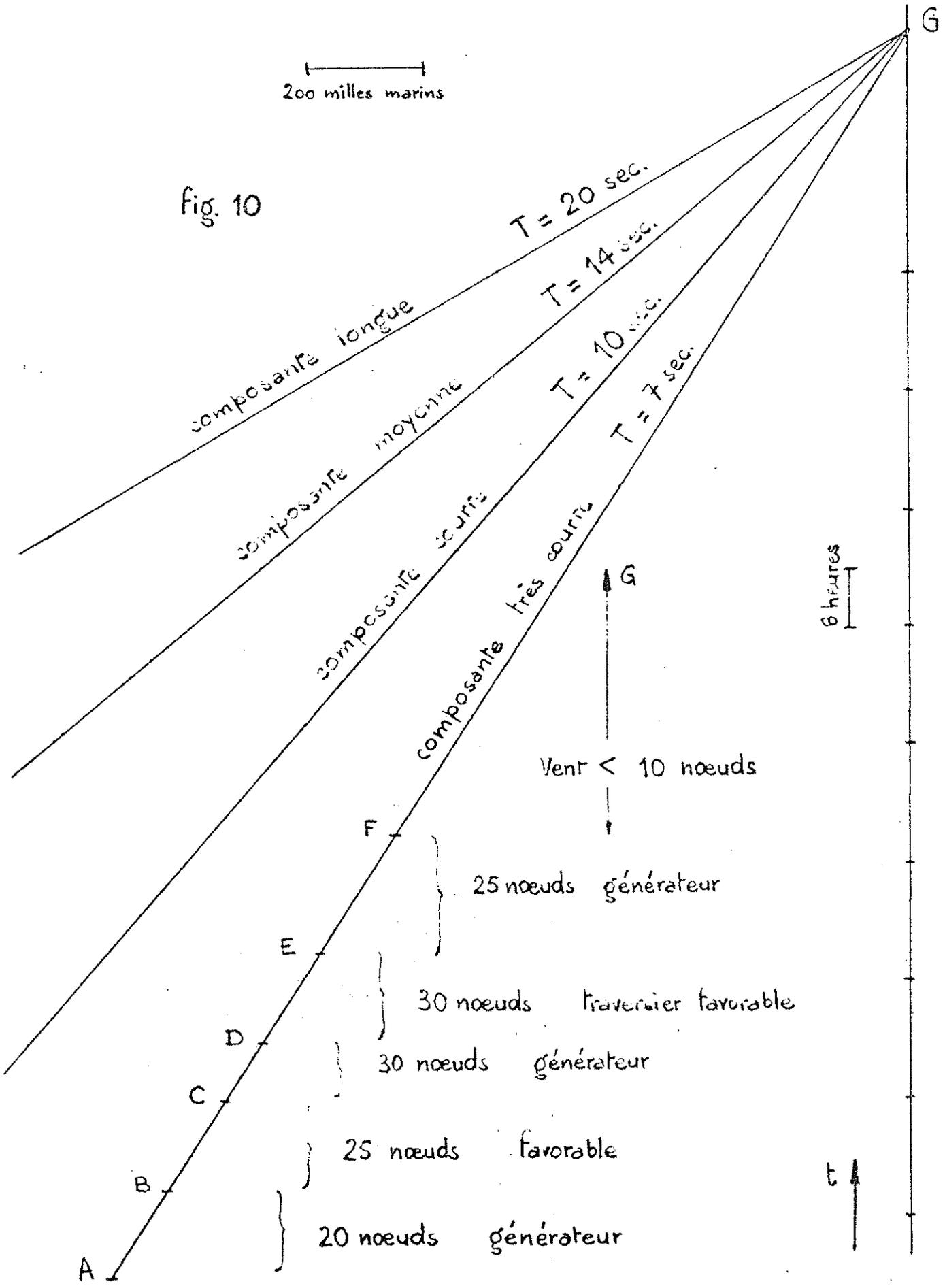
Des essais, tendant à augmenter le nombre de composantes (par resserrement du découpage spectral) n'ont apporté aucune amélioration : il semble qu'on soit limité dans ce sens par la précision même des diagrammes de propagation, par la longueur des calculs, et surtout les erreurs accidentelles de lecture sur chaque droite de propagation.

La génération : On trouvera, sur les planches VII, VIII et IX, les quatre abaques de génération, relatifs aux quatre composantes.

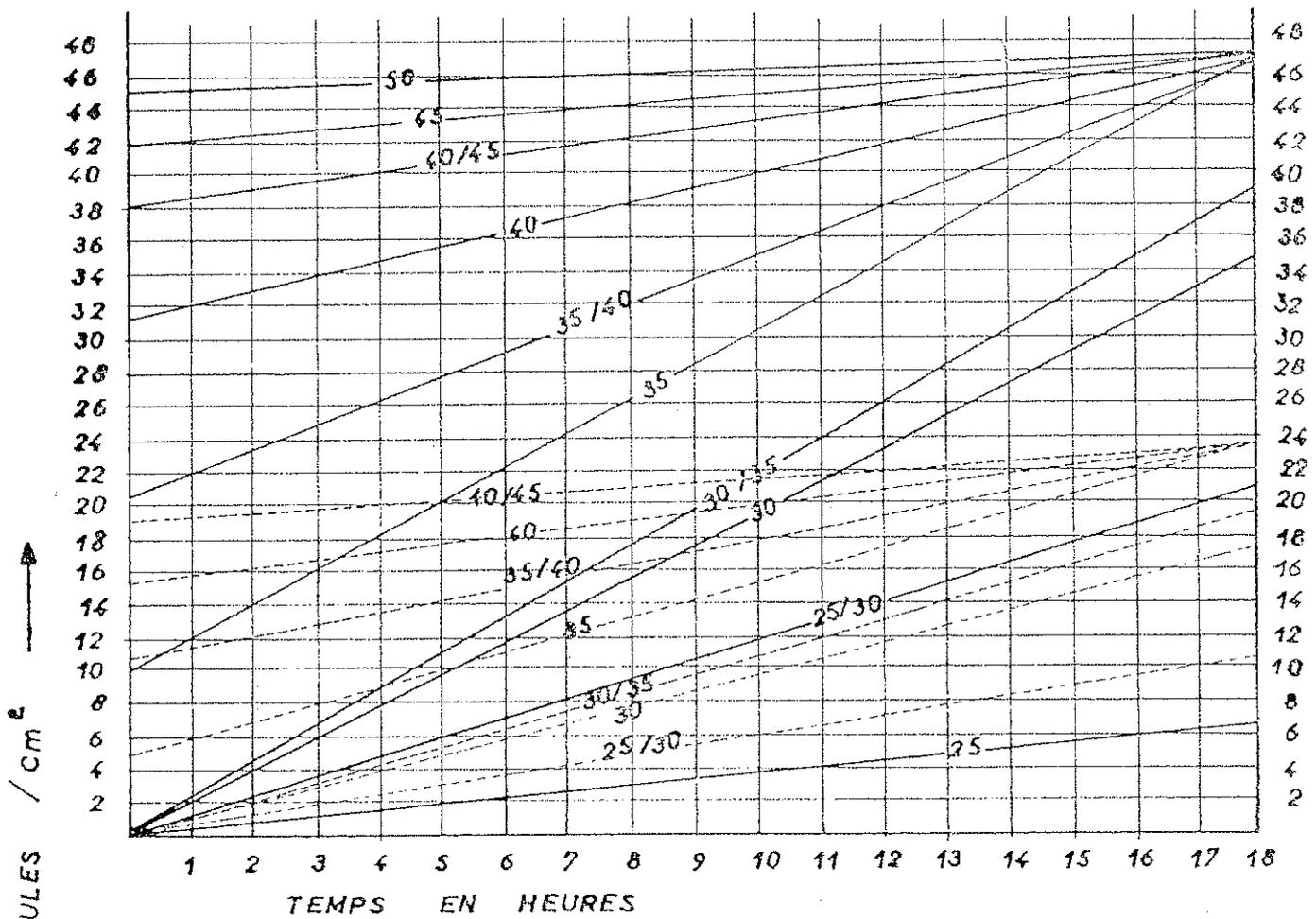
Conformément à ce qui a été exposé, chacun d'eux est constitué par deux familles de droites : une famille en traits continus correspond aux zones "génératrices", l'autre, en pointillé, correspond aux zones "favorables", se déduisant de la première par une affinité de coefficient 1/2.

fig. 10

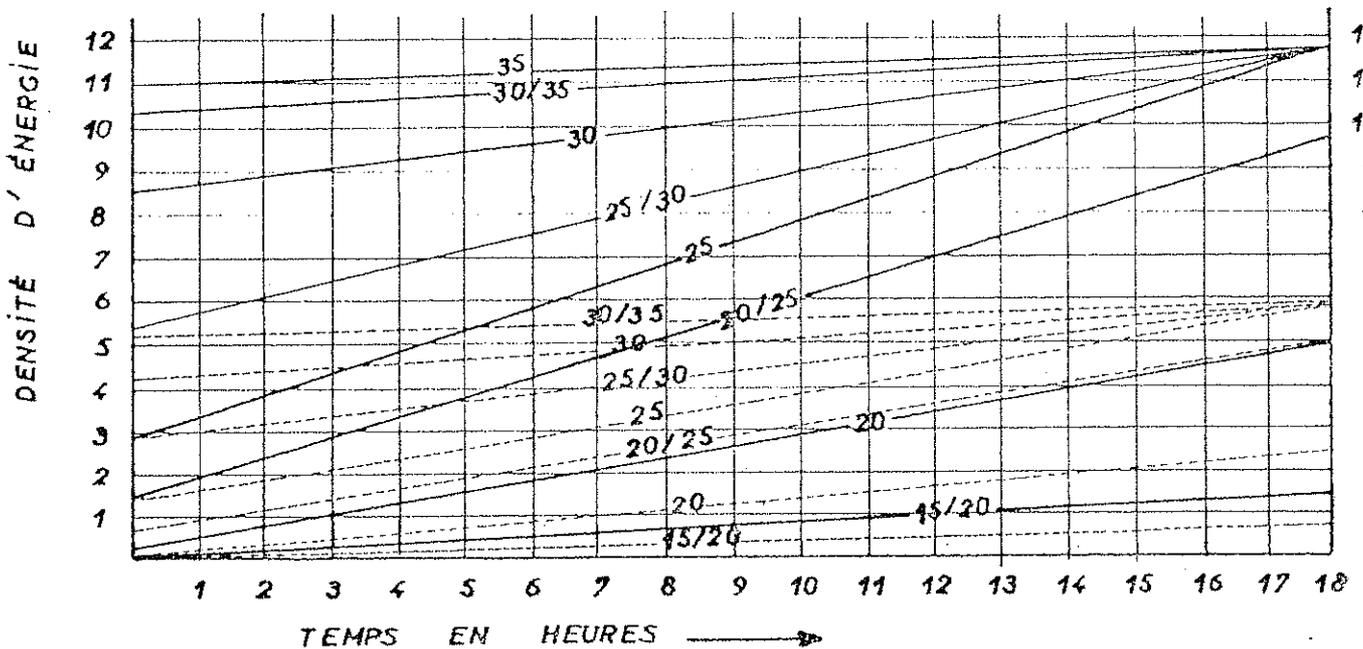
200 milles marins



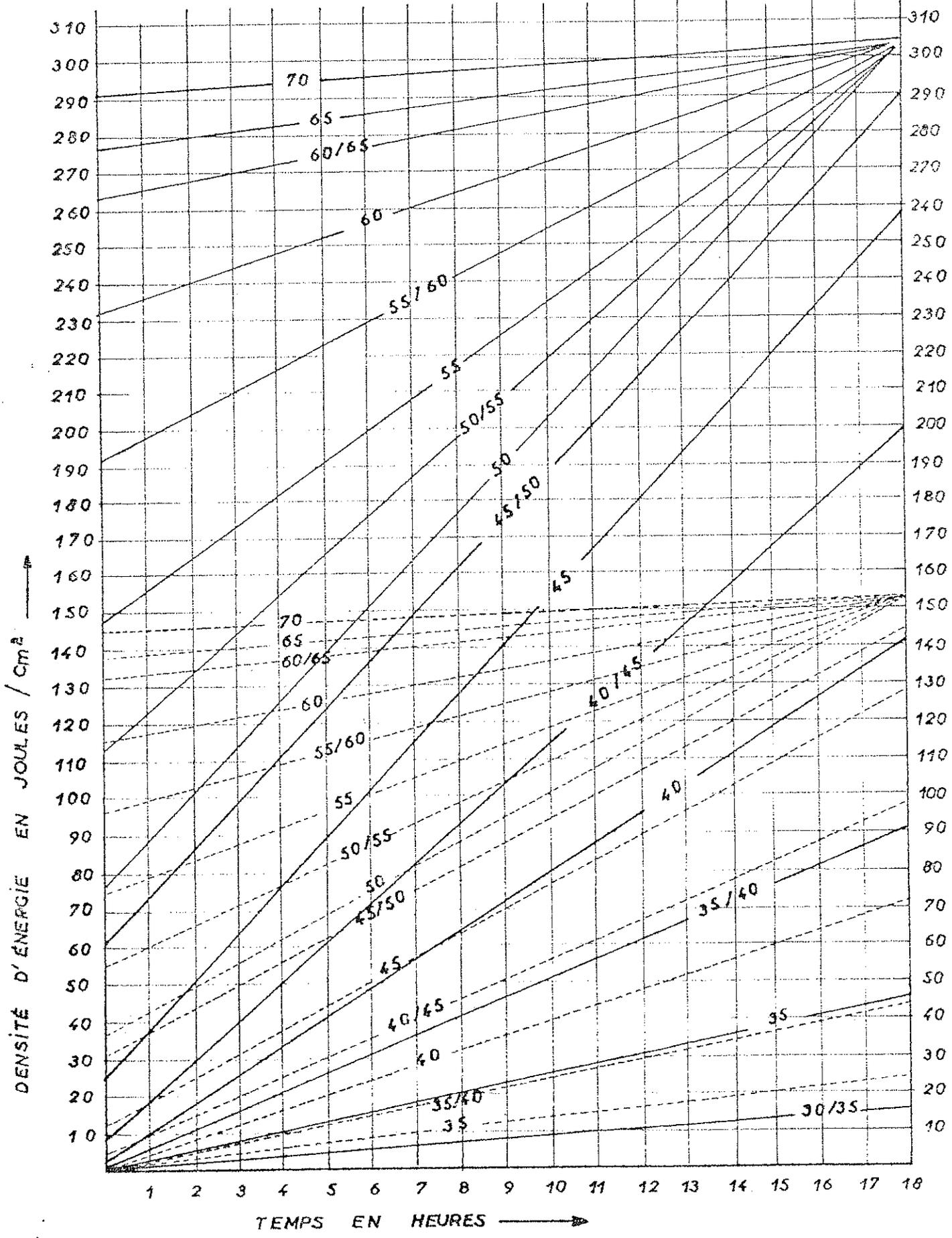
# GÉNÉRATION COMPOSANTE COURTE



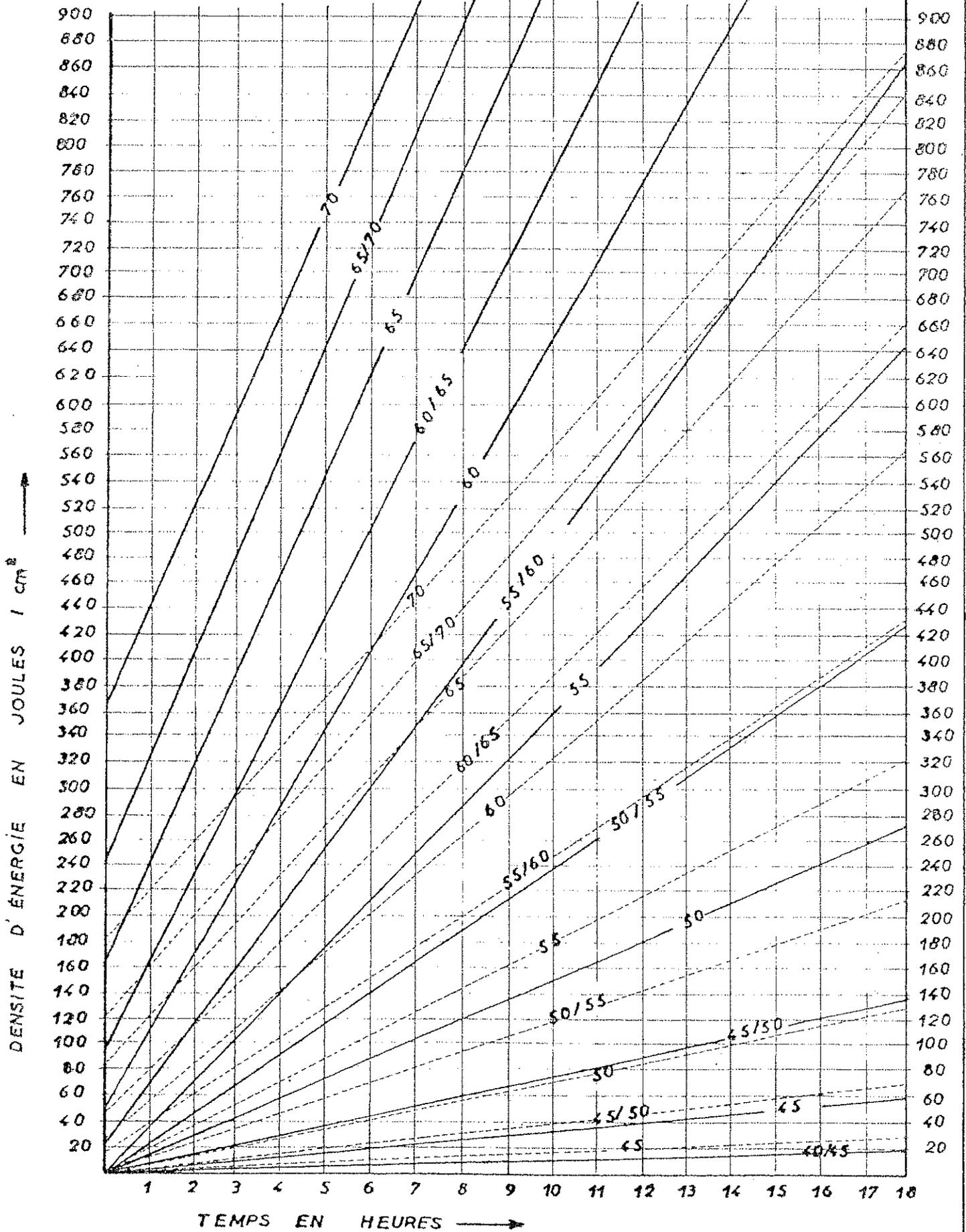
# GÉNÉRATION COMPOSANTE TRES COURTE



GÉNÉRATION      COMPOSANTE      MOYENNE



# GÉNÉRATION COMPOSANTE LONGUE



# AMORTISSEMENT ( COEFFICIENTS )

W <small>Noeuds</small>	TRES COURTE			COURTE			MOYENNE			LONGUE		
	Trav fav	Trav fav	Cont	Trav fav	Trav fav	Cont	Trav fav	Trav fav	Cont	Trav fav	Trav fav	Cont
≤10	2	2	2	1	1	1	1/2	1/2	1/2	1/4	1/4	1/4
10/15	2	3	5	1	1	2	1/2	1/2	1/2	1/4	1/4	1/4
15	2	5	9	1	1/2	3	1/2	1/2	1	1/4	1/4	1/2
15/20	3	7	15	1	2	4	1/2	1	1 1/2	1/4	1/4	1/2
20	3	10	24	1	3	6	1/2	1	2	1/4	1/4	1/2
20/25	4	15	37	1 1/2	4	9	1/2	1 1/2	4	1/4	1/2	1
25	5	21	55	2	6	14	1/2	1 1/2	4	1/4	1/2	1
25/30	6	30	80	2	8	20	1	2	5	1/4	1	1 1/2
30	8	42	∞	2	11	28	1	3	7	1/4	1	2
30/35	10	57	∞	3	14	38	1	4	10	1/4	1	3
35	12	76	∞	3	19	50	1	5	13	1/2	1 1/2	3
35/40	16	100	∞	4	24	66	1 1/2	7	17	1/2	1 1/2	4
40	20	∞	∞	5	31	85	1 1/2	8	22	1/2	2	5
40/45	25	∞	∞	6	40	∞	2	11	28	1/2	3	7
45	30	∞	∞	8	50	∞	2	13	35	1/2	3	9
45/50	37	∞	∞	9	60	∞	3	16	44	1	4	11
50	45	∞	∞	11	75	∞	3	20	54	1	5	13
50/55	55	∞	∞	13	90	∞	4	24	65	1	6	16
55	65	∞	∞	16	∞	∞	4	29	79	1	7	19
55/60	78	∞	∞	19	∞	∞	5	34	94	1 1/2	8	23
60	92	∞	∞	23	∞	∞	6	41	∞	1 1/2	10	27

L'amortissement : On trouvera, planche X, un tableau à trois entrées, fournissant, pour un vent et une composante donnés, les coefficients d'amortissement relatifs aux différentes zones : "traversière favorable", "traversière contraire", et "contraire".

La connaissance du coefficient d'amortissement permet de déterminer un temps fictif d'amortissement avec lequel on entrera dans l'abaque de la planche XI, ainsi qu'il a été précédemment exposé (8).

Marche des calculs : Nous nous bornerons à traiter l'exemple schématisé sur la figure 10 (planche VI). Les isogones et isotaches déterminent, sur la droite de propagation de la composante très courte, divers segments bout à bout AB, BC, CD ... en chacun desquels on peut considérer le vent comme constant (en grandeur et direction).

La densité en A étant supposée nulle, le lecteur retrouvera facilement les résultats numériques suivants (en centijoules par  $\text{cm}^2 \times \text{radians}$ ).

Tout d'abord  $\rho_B = 2,5$ .

Pour calculer la densité  $\rho_C$  en C, on fait un rappel horizontal sur la ligne tiretée cotée 25 noeuds, ligne qu'on suit ensuite pendant 9 heures; on obtient  $\rho_C = 5$ .

De C en D, le vent "30 noeuds, générateur" engendre, en très peu de temps, une densité  $\rho'_C = 8,5 > \rho_C$ , et en 6 heures une densité :  $\rho_D = 9,5$ .

(Tout se passe, en somme, dans ce cas, comme s'il n'y avait pas eu de vent de A en C).

De D en E, le coefficient d'amortissement lu sur le tableau de la planche X est égal à 8. Le temps fictif d'amortissement est donc égal à  $8 \times 9 = 72$  heures.

L'abaque d'amortissement de la planche XI indique alors que la densité diminue progressivement de 9,5 à 4,5.  
 $\rho_E = 4,5$ .

De E en F, le vent "25 noeuds, générateur" augmente la densité jusqu'à  $\rho_F = 10,5$ .

Enfin, de F en G, le vent demeure inférieur à 10 noeuds (calme). Le coefficient d'amortissement est 2, et le temps fictif est  $81 \times 2 = 162$  heures. On trouve  $\rho_G = 2$ .

Ayant ainsi calculé les densités relatives à chaque bande, pour chacun des azimuts, on fait la somme  $\sum_T \sum_\theta \rho$

Conversion : l'amplitude H 1/10 est donnée, à partir de cette somme par la formule

$$H \text{ 1/10} \neq 0,215 \sqrt{\sum_T \sum_\theta \rho}$$

dont il est commode de tracer, une fois pour toutes, la parabole représentative (8).

## Chapitre IV

### LES DIVERSES REPRÉSENTATIONS SPECTRALES

Il existe actuellement plusieurs représentations spectrales de la houle, dont nous allons rappeler brièvement les traits essentiels.

LES SPECTRES DE G. NEUMANN (3) :

Dans une aire génératrice de très grandes dimensions, l'action d'un vent constant (en grandeur et direction) aboutit, au bout d'un temps assez long, à un régime stationnaire (fully arisen sea), représenté par les densités :

$$\rho_s = \frac{2}{\pi} 2.471 T^4 \exp - 18,42 \frac{T^2}{W^2} \cos^2 (\theta - \omega)$$

$$\int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \rho_s d\theta = 2.471 T^4 \exp - 18,42 \frac{T^2}{W^2}$$

Dans ces formules (et dans celles qui suivent) W est la vitesse du vent de surface exprimée en noeuds,  $\omega$  est l'azimut de la direction du vent,  $\rho_s$  est la densité spectrale angulaire de saturation en ergs par  $\text{cm}^2 \times \text{sec.} \times \text{radian}$ , dans la direction d'azimut  $\theta$ .

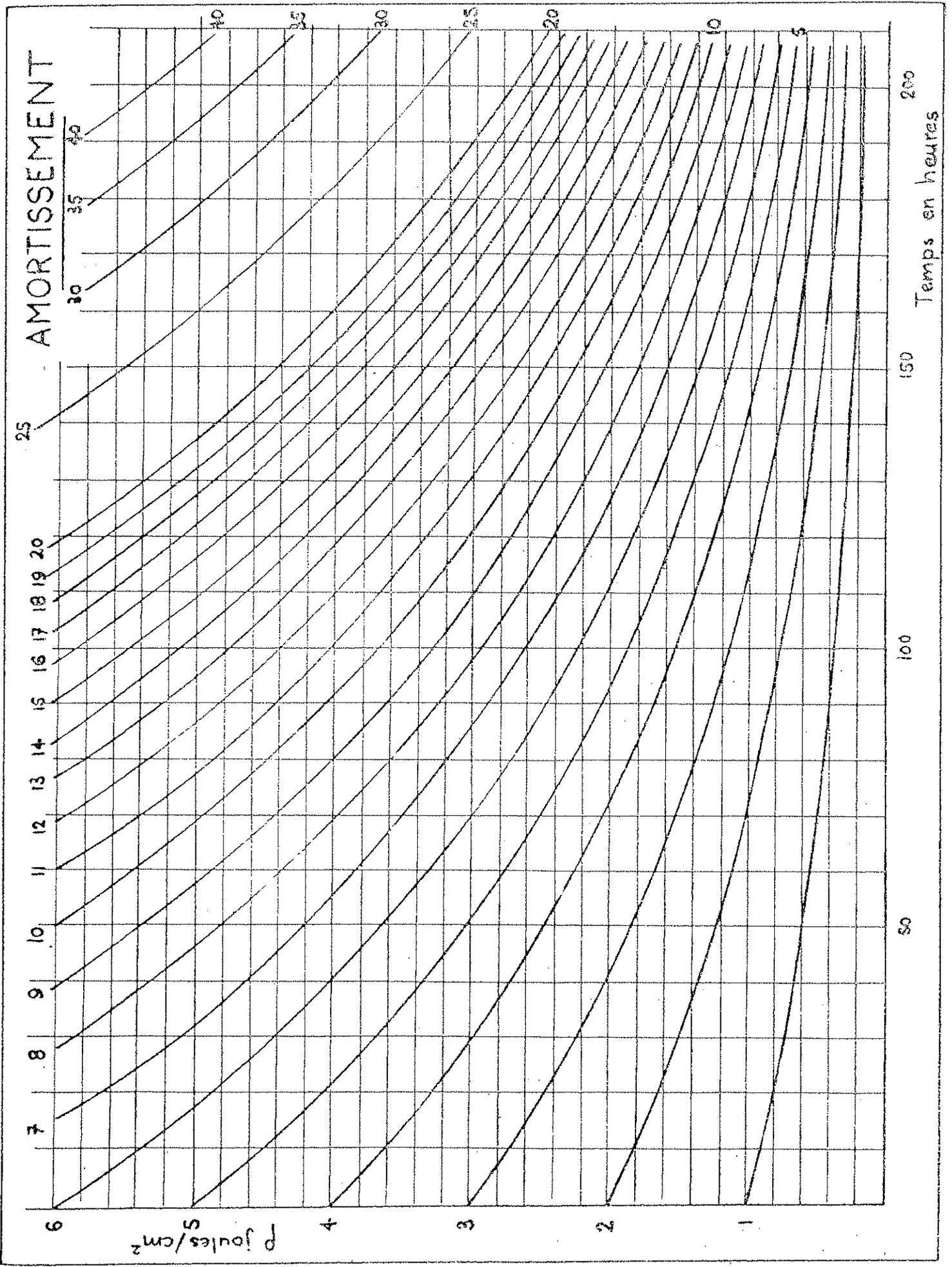


fig 11

W 30 noeuds

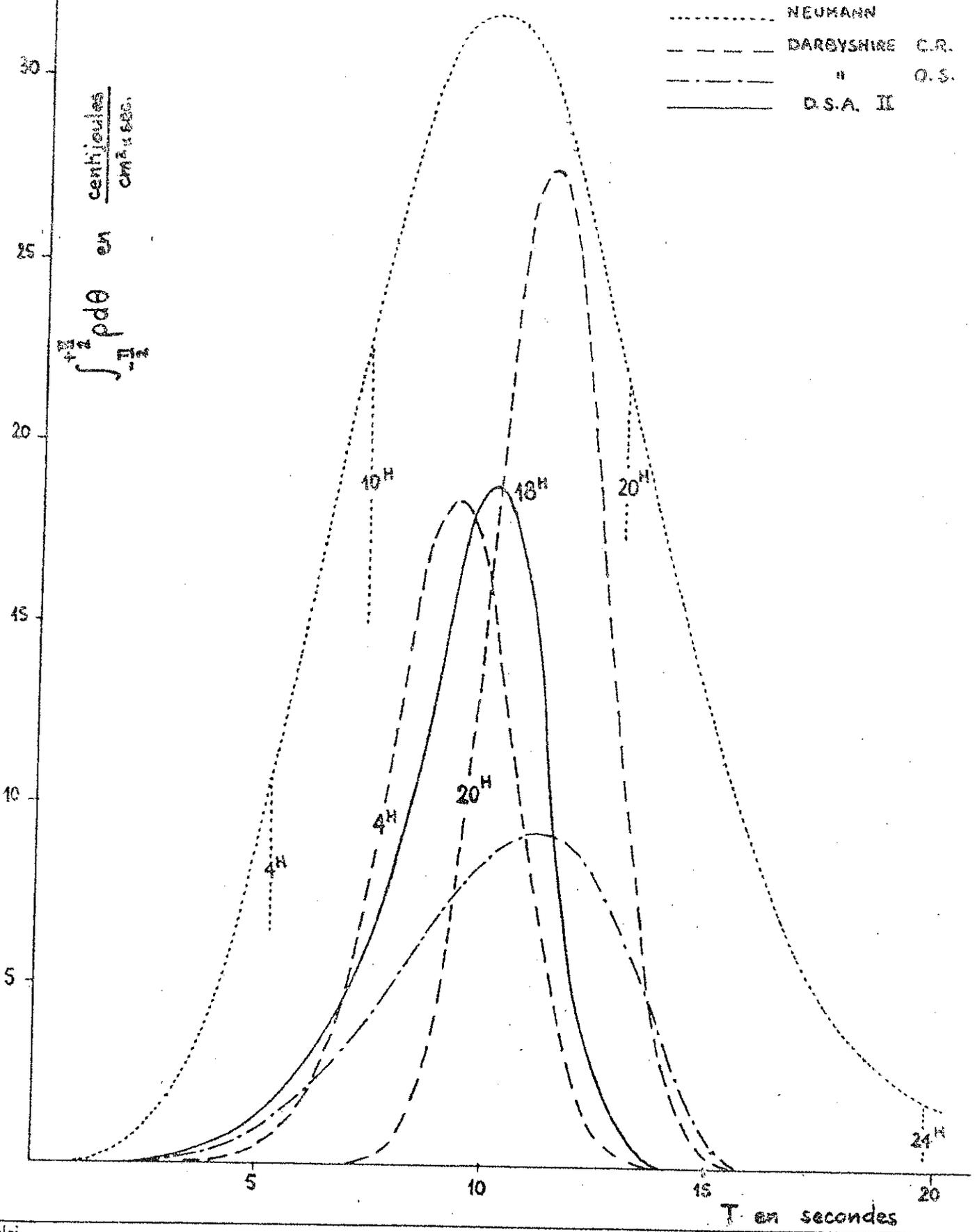


fig 12

W = 40 nœuds

- NEUMANN
- DARBYSHIRE C.R.
- " O.S.
- D.S.A. II

$$\int_{-F_{IN}}^{+F_{IN}} p d\theta \text{ en } \frac{\text{centijoules}}{\text{cm}^2 \times \text{sec.}}$$

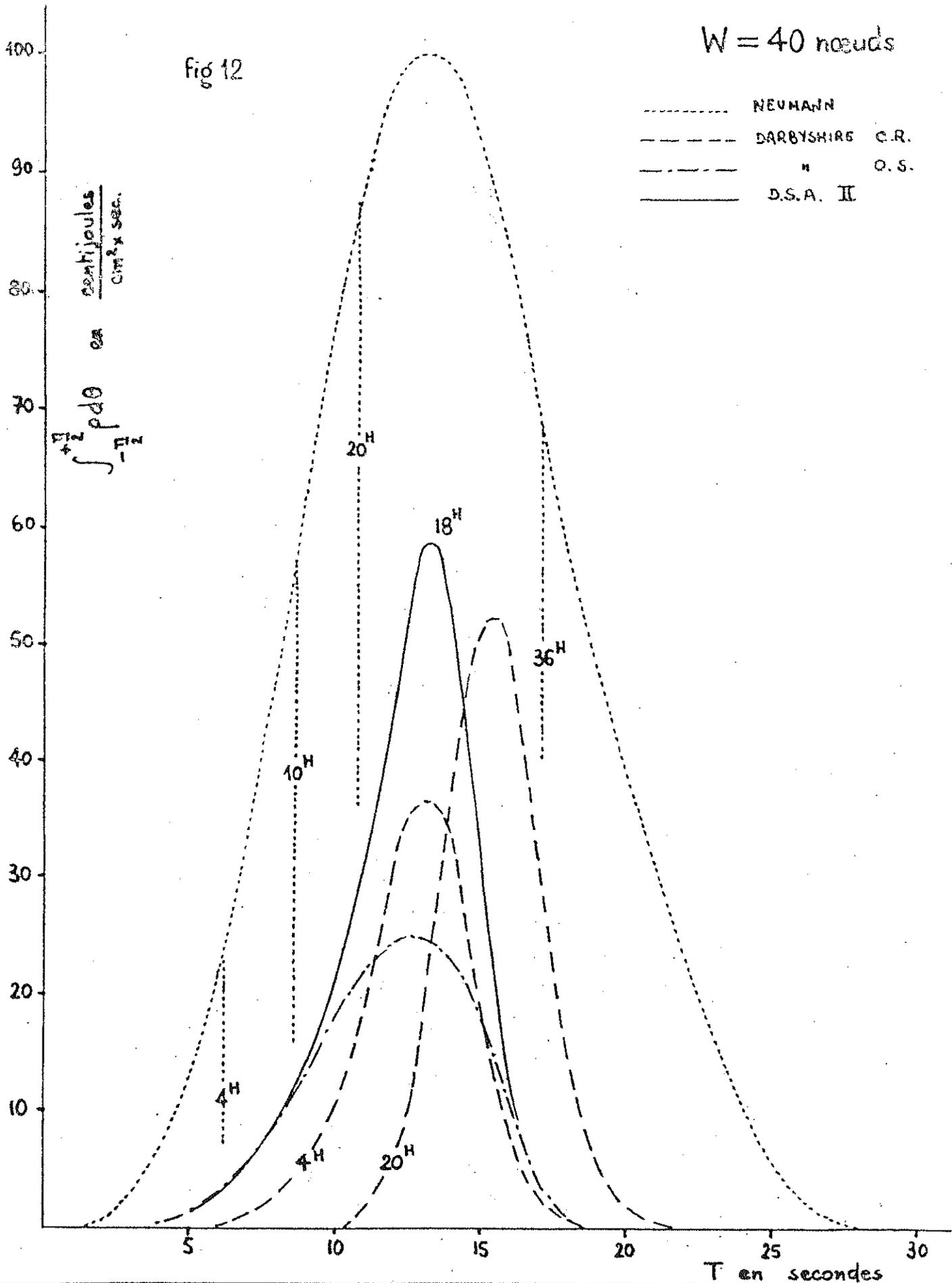
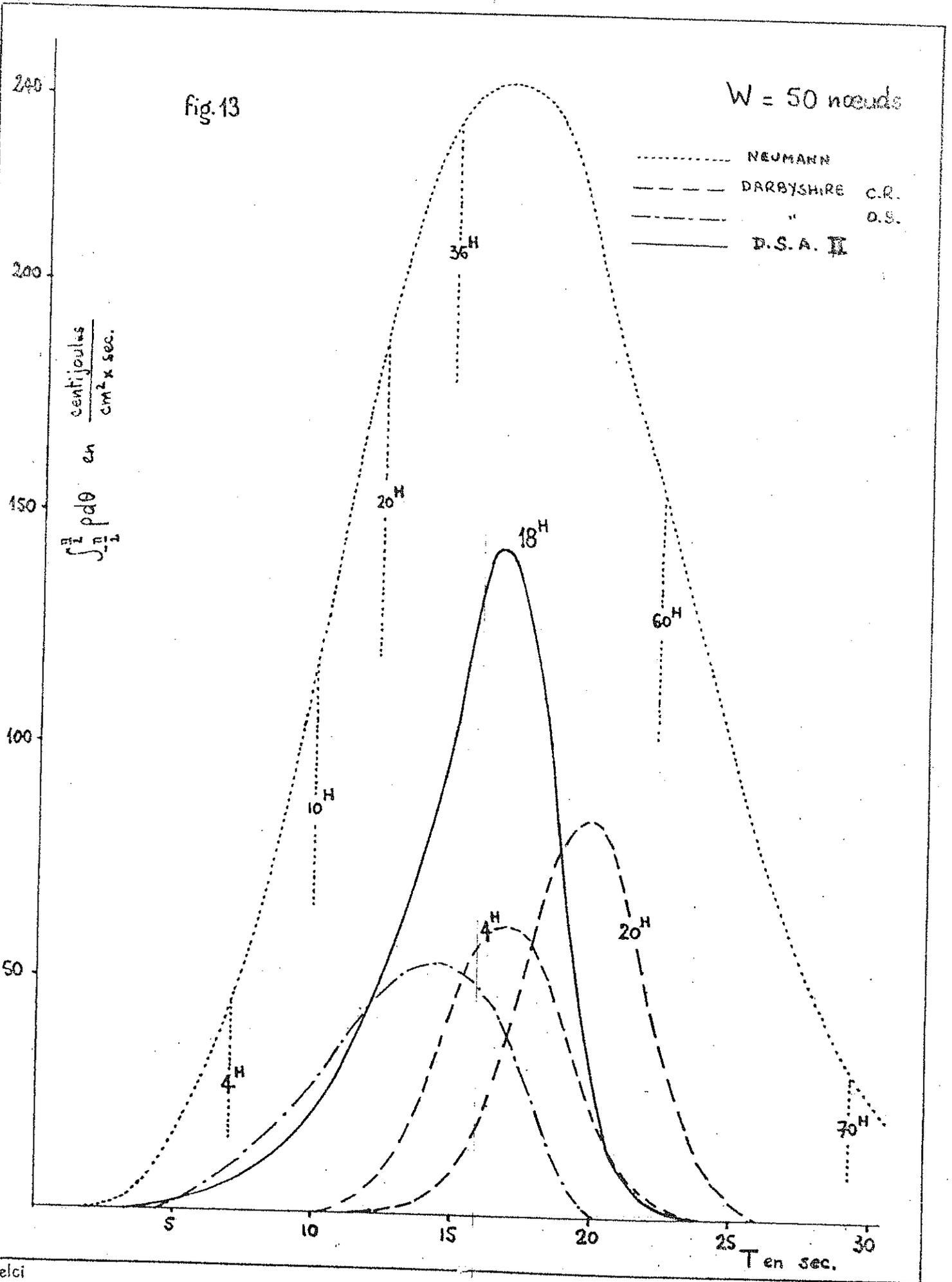


fig. 13

W = 50 nœuds



La composante prépondérante a pour période :  $T_{\max} = \frac{W}{3}$ .

L'énergie totale est  $\int_0^{\infty} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \rho_S d\theta dT = 1,128 W^5$  et correspond à l'amplitude limite  $H_{1/10} = 0,17 W^{5/2}$  (en centimètres).

Les états intermédiaires, ou transitoires, sont représentés par le même spectre limité à droite par une verticale d'abscisse  $T_U$ , fonction du temps. Les spectres successifs sont donc imbriqués.

Il en résulte que la composante de période  $T$  ne peut croître tant que toutes les composantes de périodes inférieures n'ont pas atteint leur densité limite. Il y a donc interdépendance des diverses composantes.

#### LES SPECTRES DE J. DARBYSHIRE POUR LES REGIONS COTIERES (2) :

Au bout d'un temps assez court (environ 10 heures), l'état de la mer est représenté par l'expression :

$$\int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \rho d\theta = 22.365 T^2 \exp - 329 \left[ \frac{T}{W} - 0,36 \right]^2$$

d'où l'on tire :  $\int_0^{\infty} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \rho d\theta dT = 286 W^3$ , et :

$$H_{1/10} = 2,70 W^{3/2}$$

On a enfin :  $T_{\max} = 0,37 W$ .

On trouvera sur les figures 11, 12 et 13 (Pl. XIII, XIII et XIV) l'allure des spectres successifs correspondant à des durées d'action de 4 heures et 20 heures.

On remarquera que le spectre croît d'abord très rapidement, puis se déplace lentement vers les longues périodes. Il n'y a pas, à proprement parler, de régime stationnaire limite, mais plutôt un régime lentement variable que nous appellerons "quasi fully arisen sea", à partir d'une dizaine d'heures. C'est ce régime qui est représenté par les équations précédentes.

Le déplacement du spectre implique que, sous l'action prolongée du vent, il y a transformation progressive de chaque

composante en composante plus longue : il y a donc encore inter-dépendance des diverses composantes.

LES SPECTRES DE J. DARBYSHIRE POUR LE LARGE (6) :

J. DARBYSHIRE propose, pour le large, une "quasi fully arisen sea" correspondant à l'expression :

$$\int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \rho d\theta = 2.187 W 10^{-3} \left[ 1 - \frac{0,43}{\sqrt{W}} \sqrt{\frac{2}{3}} T \right]^2 T^5$$

d'où l'on déduit :

$$\int_0^{\infty} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \rho d\theta dT = 6,95 W^4$$

$$H_{1/10} = 0,42 W^2 \quad (\text{en centimètres})$$

$$\text{et enfin } T_{\max} = 2,03 \sqrt{W} .$$

COMPARAISONS GRAPHIQUES :

Sur la figure 8 (planche IV) sont représentés simultanément :

- en pointillé, les spectres de G. NEUMANN (fully arisen sea), correspondant à des vents de surface de 30, 40 et 50 noeuds,

- en trait plein, les mêmes spectres selon DSA II.

Sur les figures 11, 12 et 13 (planches XII, XIII et XIV) sont représentés simultanément :

- en pointillé, les spectres de G. NEUMANN pour des vents de surface de 30, 40 et 50 noeuds, correspondant à des durées d'action de 4 heures, 10 heures, 20 heures ...

- en tireté, les spectres de J. DARBYSHIRE, pour les régions côtières, pour des durées d'action de 4 heures et 20 heures,

- en trait plein, les spectres DSA II (fully arisen sea),

- enfin, en point-tireté, le spectre de la "quasi fully arisen sea" de J. DARBYSHIRE pour le large.

Sur les figures 14, 15 et 16 (planches XV, XVI et XVII) sont représentées simultanément les différentes valeurs de  $H_{1/10}$  (moyenne de la plus haute dixième vague) en fonction de la durée d'action  $t$ , dans une aire génératrice de très grandes dimensions, pour des vents de surface de 30, 40 et 50 noeuds:

- en pointillé, d'après G. NEUMANN,
- en tireté, d'après J. DARBYSHIRE (pour les régions côtières),
- en trait plein, d'après DSA II,
- en point tireté d'après C.T. SUTHONS (1)

Les valeurs de  $H_{1/10}$  correspondant aux "quasi fully arisen sea" de J. DARBYSHIRE, pour le large, sont également représentées.

Ces graphiques appellent les remarques suivantes :

1 - Les énergies limites croissent semblablement, en fonction du vent (selon la même puissance de  $W$ ), pour G. NEUMANN et pour DSA II.

Elles croissent moins rapidement selon J. DARBYSHIRE (pour le large) et encore moins rapidement selon J. DARBYSHIRE (pour les régions côtières).

2 - Elles sont cependant beaucoup plus fortes (pour un vent donné) pour G. NEUMANN que pour tous les autres auteurs. Cet excès est dû, selon H. WALDEN, à une valeur trop forte de la constante de G. NEUMANN ( $C = 2.471$ ).

3 - On constatera cependant qu'on ne pourrait pas déduire les spectres DSA II des spectres de G. NEUMANN par une simple réduction de cette constante; les premiers sont "échancrés", par rapport aux seconds, pour les composantes courtes et surtout pour les composantes longues (discordances  $C$  et  $L$ ).

Par contre l'"étalement" des spectres DSA II et de J. DARBYSHIRE (pour le large) est du même ordre.

4 - Pour un vent donné, les composantes longues n'apparaissent que très tardivement, selon G. NEUMANN (8, page 179).

5 - Insistons sur le fait que la définition du vent n'est pas la même selon les diverses méthodes.

- G. NEUMANN adopte un vent de surface moyen, dans le temps et l'espace.

- C.T. SUTHONS adopte le vent du gradient, calculé d'après le tracé isobarique.

- J. DARBYSHIRE adopte la composante, dans la direction de la station d'observation, du vent géostrophique.

- La méthode DSA II utilise directement les observations des navires. Nous avons tenu compte de ces différentes définitions, dans ce qui précède, par la relation:

$$\text{vent de surface} = 2/3 \text{ vent géostrophique}$$

#### LA CONCEPTION DE L'AIRE GÉNÉRATRICE :

En réalité, la considération des diagrammes de propagation construits suivant la technique exposée au chapitre I entraîne une définition précise du vent, beaucoup plus précise que celle qui est basée sur la considération des cartes synoptiques successives.

Si, par exemple, on trace les diagrammes de propagation de ce qu'il est convenu d'appeler une "aire génératrice de 35 noeuds" (figure 17, planche XVIII); on constate qu'en réalité cette aire est composée de un ou plusieurs "noyaux" de vent fort, entourés de zones de vent plus faible.

Au total, une assez grande diversité de vents concourt à la formation de la houle.

C'est probablement pour cette raison que les spectres de G. NEUMANN sont si riches de composantes : on doit les considérer comme une somme pondérée de spectres plus minces, correspondant, dans le cas considéré, à toute une gamme de vents, de 0 à 40 noeuds.

Remarquons, dans le même ordre d'idées, que les aires génératrices dites secondaires ne peuvent être négligées : c'est pourquoi les diagrammes de propagation doivent être construits pour de nombreux azimuts.

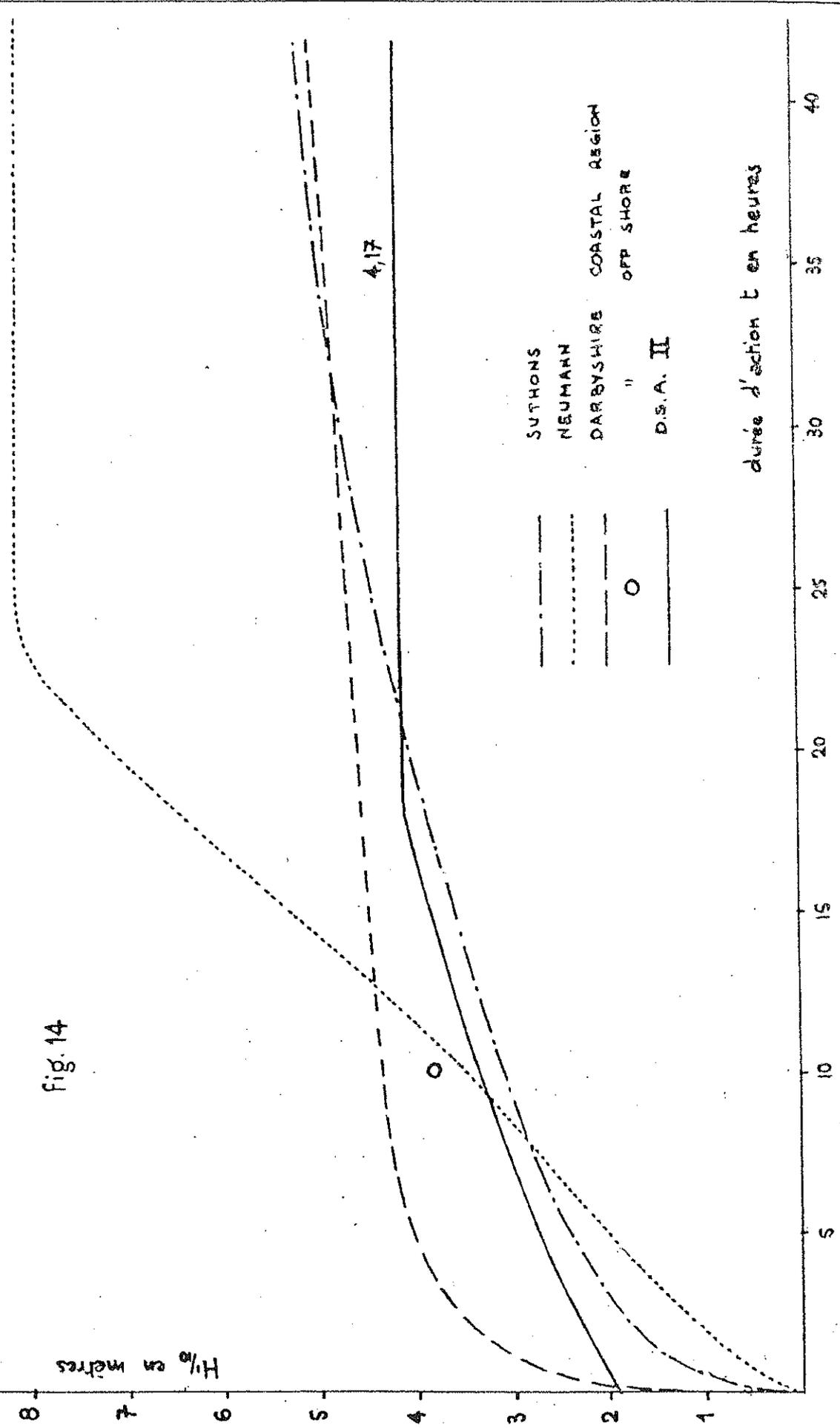
En particulier, le vent local, en mer, revêt une importance considérable, quelle que soit sa direction : il est rarement calme, et l'on peut lui attribuer, en partie, les courtes périodes qui précèdent l'aggravation.

Aire génératrice de grandes dimensions

W = 30 nœuds

Fig. 14

H/10 en mètres



durée d'action t en heures

Aire génératrice de grandes dimensions

W = 40 noeuds

H<sub>10</sub> en mètres

fig. 15

8,55

- SUTHONS
- ..... NEUMANN
- - - - - DARBYSHIRE COASTAL REGION
- OFF SHORE
- D.S.A. II

durée d'action t en heures

15  
14  
13  
12  
11  
10  
9  
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1

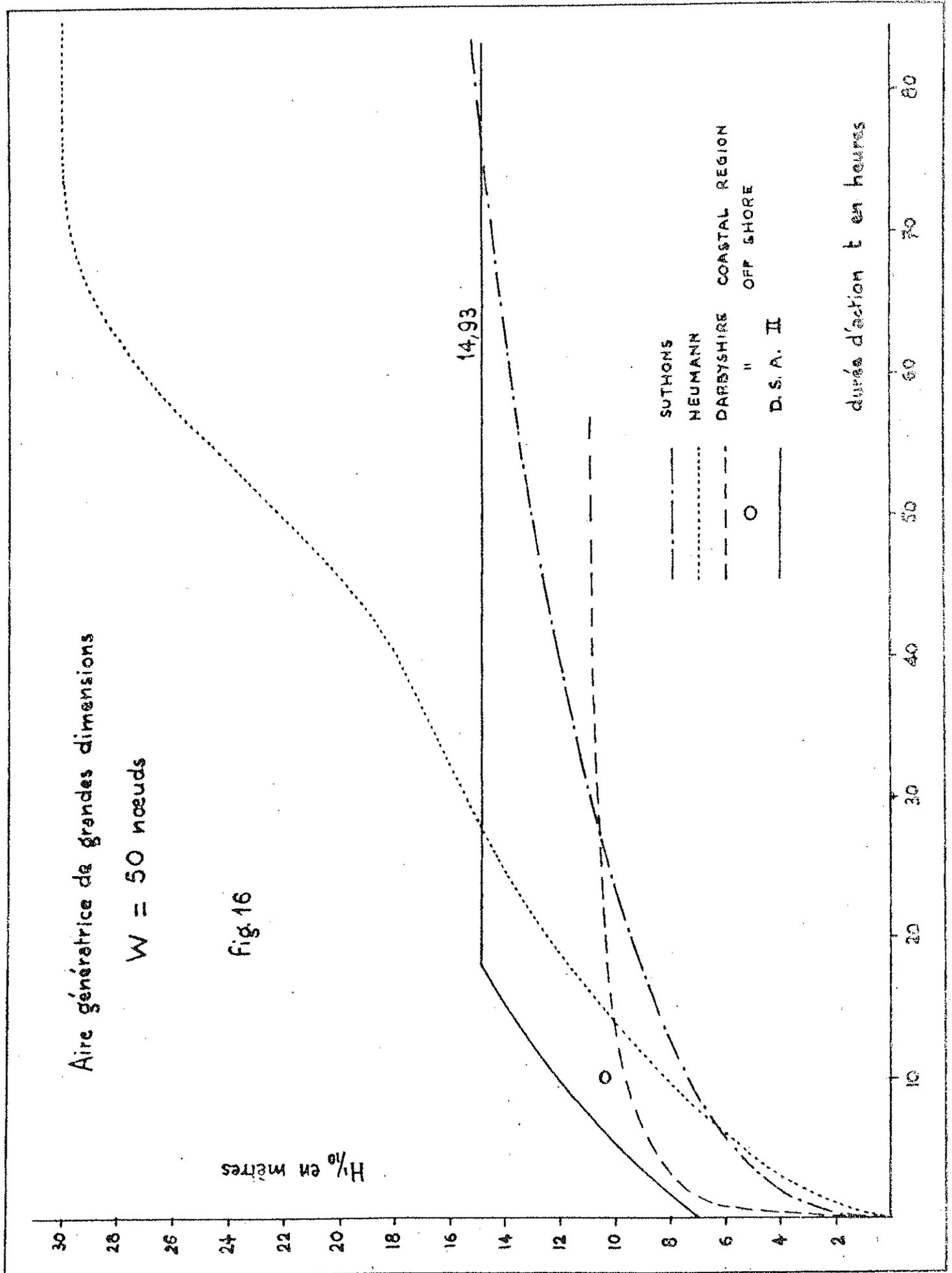
10 20 30 40

Aire génératrice de grandes dimensions

W = 50 nœuds

fig.16

$H_{10}$  en mètres



durée d'action  $t$  en heures

Fig. 17

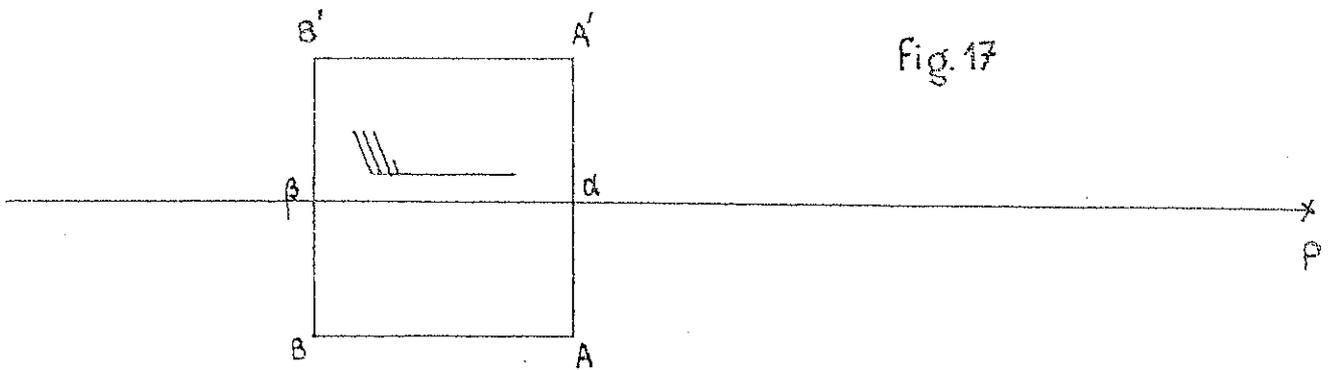
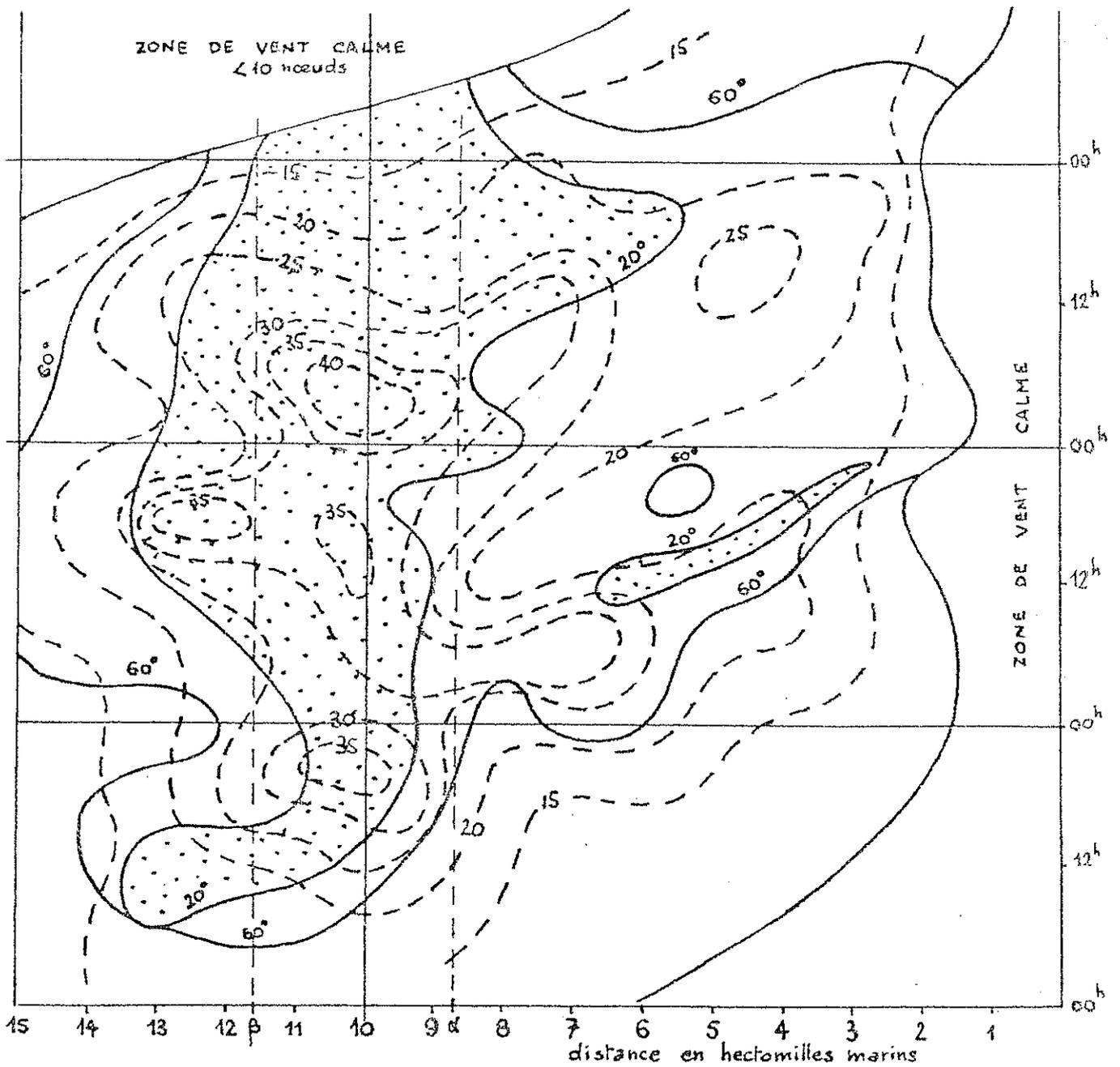


Fig. 18



L'importance du vent local, à la côte, lorsqu'il vient de terre, est négligeable : elle se traduit simplement par un amortissement supplémentaire des houles incidentes.

En définitive, les différences entre les représentations spectrales dérivent en partie des différentes conceptions du vent.

Quoi qu'il en soit, la connaissance de la houle, dans sa complexité réelle, nécessite la détermination, aussi exacte que possible, des champs de vents réels.

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 - C.T. SUTHONS - 1945 - The forecasting of sea and swell - Naval meteorological Branch - Hydrographic Department - Memo n°135/45.
- 2 - J. DARBYSHIRE - 1952 - The generation of waves by wind - Proceedings of the Royal Society A Volume 215, p.299.
- 3 - G. NEUMANN - 1953 - On ocean wave spectra and a new method of forecasting wind generated seas. Beach erosion Board. Technical memorandum n°43.
- 4 - R. MICHE - 1953 - Propriétés des trains d'ondes océaniques et de laboratoire - Publication n°135 du Comité Central d'Océanographie et d'Etude des côtes (p.236).
- 5 - H. WALDEN - 1954 - Über die Dünung aus einem neu gebildeten Sturmfeld - Sonderdruck aus der Deutschen Hydrographischen Zeitschrift. Band 7. Heft 5/6.
- 6 - J. DARBYSHIRE - 1955 - An investigation of storm waves in the North Atlantic Ocean. Proceedings of the Royal Society. A Volume 230 pp. 560-569.
- 7 - H. WALDEN - 1956 - Vorschlag zur Änderung der Neumannschen Konstanten C bei der Berechnung der Wellenhöhe aus der Windstärke - Sonderdruck aus der Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Band 9 - Heft 1 - 1956.
- 8 - R. GELCI - H. CAZALE - J. VASSAL - 1956 - Utilisation des diagrammes de propagation à la prévision énergétique de la houle.

Bulletin d'Information du Comité Central d'Océanographie et d'Etude des Côtes, VIIIème Année, n°4, avril 1956.