ANALYSE ET PRÉVISION DE L'ÉTAT DE LA MER MÉTHODE D.S.A. 5

PAR A. SAVINA * ET C. FONS **

Introduction à l'étude de la prévision de houle

Les problèmes posés par l'état de la mer deviennent chaque jour plus importants pour le marin comme pour l'ingénieur. Qu'il s'agisse de construire des ouvrages portuaires ou de protéger les côtes contre les effets des vagues, de prospector le plateau continental ou de poser des câbles sous-marins, d'effectuer des sondages ou d'établir des plates-formes en mer, de stabiliser un navire ou de permettre à un commandant de choisir une route météorologique optimale, il faut non seulement faire appel à la climatologie maritime, mais aussi pouvoir être capable de prévoir l'état de la mer à plus ou moins brève échéance. Pour faire face à tous ces besoins, la quatrième session de la Commission de Météorologie Maritime réunie à Genève en novembre-décembre 1964 a appelé l'attention de ses membres sur l'urgence des recherches à effectuer dans le domaine des prévisions maritimes, en particulier des prévisions d'état de la mer.

Depuis longtemps déjà, des modèles théoriques de houle avaient été proposés (référence 1) : houle sinusoïdale pure, houle irrotationnelle de Stokes, houle de Gerstner... Ces modèles fournissent des équations différentielles du second ordre, équations qui sont dans le cas général inintégrables ou trop lourdes pour être d'un usage commode en prévision de routine; il devient ainsi nécessaire d'avoir

recours à des modèles semi-empiriques ou à des jeux d'abaques.

Plusieurs services météorologiques appartenant à des pays à vocation maritime se sont déjà penchés sur le problème; citons, pour l'Atlantique Nord, les cartes d'état de la mer publiées par les Etats-Unis, les Pays-Bas et l'Allemagne; si ces cartes ne sont pas à l'abri de tout reproche, elles sont néanmoins suffisamment bonnes pour sortir en exploitation quotidienne.

La Météorologie Française a entrepris depuis le 1^{er} janvier 1965 de tester un modèle d'analyse et de prévision baptisé « DSA » ou modèle des « densités spectro-angulaires ». Le modèle en est actuellement à sa cinquième amélioration.

Quels sont les problèmes que doit résoudre le météorologiste chargé d'une prévision de houle? Il lui faut, connaissant les champs de vent et leur évolution, pouvoir prédire quelles seront les directions, les périodes et les hauteurs de houle et (ou) de la mer du vent en un ou plusieurs points. Mais tout d'abord, comment définir les paramètres caractéristiques d'une mer, phénomènes essentiellement aléatoires comparables au bruit des circuits électroniques.

Nous sommes conduits à définir ces paramètres par des concepts statistiques. La hauteur d'une mer peut, en première approximation, être définie par :

$$H = \sum_n a_n \cos(\omega_n t + \varphi_n)$$

où φ_n est une phase aléatoire comprise entre 0 et 2π , avec en outre une direction de propagation bien déterminée pour chaque composante n ; une image en est donnée par la figure 1.

* Ingénieur Civil des Mines.

** Ingénieur des Travaux Météorologiques.

Si l'on observe n vagues successives, il est possible de classer ces vagues en fonction de leur hauteur, et d'en déduire la statistique des hauteurs; on obtient alors des grandeurs caractéristiques telles que :

H_{moyen} : hauteur moyenne des vagues

$$= \frac{1}{n} \sum H_i;$$

$H_{1/k}$: hauteur moyenne des k vagues les plus hautes;

$H_{1/3}$: hauteur moyenne des $n/3$ vagues les plus hautes;

$H_{1/10}$: hauteur moyenne des $n/10$ vagues les plus hautes.

On pourrait classer de la même manière les périodes T_i . Pratiquement, l'observateur sur un navire chiffre une mer par une hauteur comprise entre $H_{1/3}$ et $H_{1/10}$.

Malheureusement, les grandeurs $H_{1/k}$ et $T_{1/k}$ ne sont pas directement maniabiles. Par contre, il est possible de relier l'écart type σ par une loi simple à l'énergie du mouvement des vagues :

$$E = \delta g \sigma^2 \quad (1)$$

où δ est la masse volumique de l'eau de mer (*) et g l'accélération de la pesanteur.

D'autre part, on peut trouver par le calcul des

probabilités des coefficients permettant de passer de σ^2 à $H_{1/k}$; en particulier on a :

$$H_{1/3} = 4,00 \sigma^2 \quad (2)$$

$$H_{1/10} = 5,09 \sigma^2$$

dans le cas d'une distribution des H_i suivant une loi de Rayleigh, ce qui est grossièrement le cas pour la houle [2].

Si donc on connaît le spectre d'énergie des vagues, on peut en déduire les hauteurs caractéristiques et la période la plus chargée en énergie. En fait, la relation entre E et σ^2 est un peu plus complexe [2] : dans le cas le plus général, elle est de la forme :

$$\delta g \sigma^2 = E \cdot f(\epsilon) \quad (3)$$

avec :

$$0 \leq f(\epsilon) \leq 1$$

où ϵ est un nombre sans dimensions caractérisant l'aplatissement du spectre. Dans les modèles D.S.A. actuels on suppose en première approximation que $f(\epsilon) = 1$, c'est-à-dire que le spectre est infiniment mince (c'est le cas en particulier pour une loi de Rayleigh). Mais le principe même du modèle permettrait de tenir compte de cet effet.

Examinons maintenant comment il est possible de décrire l'évolution de l'énergie des vagues en fonction de la situation météorologique.

(Photo U.S.I.S.)

Le modèle D.S.A. 5

Ce modèle est basé sur une double décomposition de l'énergie contenue dans un cylindre de section unité et de profondeur infinie : décomposition en périodes (spectre), décomposition en fonction de la direction de la houle (angulaire) conformément au schéma 1. En abrégé, on désignera cette densité ρ par le terme d.s.a.

L'énergie totale permettant de passer aux hauteurs caractéristiques sera le cumul de ces densités spectro-angulaires :

$$E = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \rho(T, \theta) d\theta dT \quad (4)$$

(*) Nous n'utilisons pas ici la notation habituelle ρ , qui nous sert plus loin à désigner la densité spectro-angulaire.

Dans ce qui suit, l'intégration de 0 à ∞ de la variable T se justifie par le fait qu'en dehors d'une bande étroite de périodes, de 3 à 21 s, les énergies des vagues sont négligeables à l'échelle qui nous intéresse, et d'ailleurs ne donnent pas lieu à des vagues, objets de cette étude.

Si l'on considère un vent soufflant pendant un certain temps sur une mer initialement calme, on observe trois phases successives :

- il y a croissance de l'énergie des vagues,
- ces vagues se déplacent dans la direction du vent,
- peu à peu il y a amortissement;

la variation d'énergie dans chaque cas étant proportionnelle au temps. On est donc amené à écrire en un point k :

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} = f_k + \varphi_k + \Psi_k \quad (5)$$

- où :
- f est le terme de propagation;
 - φ est le terme de croissance;
 - Ψ est le terme d'amortissement.

Examinons successivement ces trois termes :

LA PROPAGATION.

La fonction f réalise une propagation ponctuelle : elle prend chaque d.s.a. et la transporte dans sa direction propre avec une vitesse, fonction de la période T , que donne la théorie :

$$V_T = \frac{g}{4\pi} T \quad (6)$$

où g est l'accélération de la pesanteur. Il en résulte qu'à l'instant t , la d.s.a. à considérer au début du calcul au point (x, y) est celle qui vient d'un point voisin, soit :

$$\rho_t(x, y, T, \theta) = \rho_{t-dt}(x - V_T \cos \theta dt, y - V_T \sin \theta dt, T, \theta) \quad (7)$$

soit, sous une forme analytique :

$$f_k = -\vec{V} \cdot \vec{\text{grad}} \rho \quad (8)$$

LA CROISSANCE C .

A priori, sous l'action d'un vent $\vec{W}$, de vitesse W et d'azimut ω , une composante ρ s'accroît par unité de temps d'une quantité fonction de la vitesse du vent, de la valeur absolue de l'angle saillant $|\theta - \omega|$, de la période et de l'état de la mer.

Il est difficile de préciser l'influence de l'état de la mer, mais des exemples simples peuvent le mettre en évidence :

- un vent $\vec{W}$ fournit peu d'énergie à la « fully arisen sea » correspondante, mais en fournit beaucoup à la « fully arisen sea » du vent contraire;
- la présence de composantes moyennes ou longues entrave la formation de composantes courtes, mais, en présence de composantes très longues, les courtes composantes peuvent très bien se développer.

En l'absence de mesures précises et difficiles à faire, on considère que C est la somme de deux fonctions :

$$C = \varphi - F(\rho_i)$$

pour chaque composante ρ_i . F est une fonction de toutes les autres composantes : c'est l'interréaction. Le terme φ sera le terme de « génération simultanée ». On pourra très souvent se contenter de ne considérer que ce terme. On écrira alors :

$$C \approx \varphi[W, |\theta - \omega|, T] \quad (9)$$

Si on admet cette relation, en se plaçant dans un océan de grandes dimensions où le vent reste constant (le terme d'advection est alors nul), et en négligeant l'amortissement, on obtiendra au bout d'un temps t :

$$\rho = t \cdot \varphi[W, |\theta - \omega|, T] \quad (10)$$

d'où une énergie totale :

$$E = t \iint \varphi d\theta \cdot dT$$

et une hauteur :

$$H = k \cdot \sqrt{t} \left[\iint \varphi d\theta \cdot dT \right]^{1/2}$$

On obtient ainsi une courbe de croissance parabolique pour les hauteurs, ce qui est tout à fait en accord avec l'expérience pour de faibles durées (de l'ordre de 18 h). Lorsque t augmente indéfiniment, H tend vers une limite (la « fully arisen sea »). Le rôle de l'amortissement sera de tenir compte des pertes d'énergies (déferlement et turbulence) qui se produisent pour un temps assez long.

Quant à la forme de la fonction φ , elle est déterminée expérimentalement à partir des abaques existants et des conditions aux limites schématiques suivantes :

- pour un vent initialement nul et s'établissant brusquement on a :

$$(T_{\max})_{\text{initial}} \sim 0, 2 W \quad (W \text{ en nœuds});$$

- en régime permanent $T_{\max}$ tend vers $0,33 W$;
- la plus longue période présente dans le spectre est $\sim 0,5 W$.

Ces conditions ont conduit à prendre une fonction de la forme :

$$0 \leq T \leq \frac{W}{2}$$

$$\varphi(W, 0, T) = kT^2 (W - 2T)^3 = P(T, W)$$

$$T > \frac{W}{2} \quad \varphi(W, 0, T) = 0$$

K est une fonction de W qui se détermine par un raisonnement sur les équations aux dimensions : supposons que le vent commence à souffler sur une mer initialement calme (donc sans amortissement); on peut écrire :

$$\rho = t \cdot P(T, W)$$

soit par intégration :

$$\delta g \sigma^2 = t \int_0^\infty P(T, W) dT$$

$$H_{1/10} = 0,16 \sqrt{\sigma^2}$$

Les abaques actuellement en usage montrent que :

$$H_{1/10} \sim 5 \cdot 10^{-4} \sqrt{t} \cdot W^{5/2}$$

On en déduit :

$$K(W) \sim \frac{10^{-2}}{2W}$$

(toutes les unités étant exprimées en C.G.S., sauf W qui est donné en nœuds). la figure 2 donne une idée de l'ordre de grandeur de la variation de ϕ en fonction de T pour différentes forces de vent.

2/ La croissance.
Growth.

Dans une dernière étape, il reste à préciser ϕ en fonction de $|\theta - \omega|$: par vent traversier, il est évident que la composante ρ ne reçoit pas d'énergie; l'énergie reçue est d'autant plus grande que $|\theta - \omega|$ est petit. On posera :

$$\phi(W, |\theta - \omega|, T) = P(W, T) \cdot \delta(|\theta - \omega|) \quad (11)$$

avec :

$$\int_0^\pi \delta \cdot d|\theta - \omega| = \frac{1}{2}$$

On adopte comme loi de répartition de δ :

$$\delta(|\theta - \omega|) = \frac{2}{\pi} \cos^2(\theta - \omega) \quad (12)$$

3/ La fonction $\delta(|\theta - \omega|)$ et sa discrétisation pour $T \geq 10$ s.
 $\delta(|\theta - \omega|)$ and its discrete form $T \geq 10$ seconds.

Finalement la fonction ϕ s'écrit :

$$\phi = \frac{1}{\pi} \frac{10^{-2}}{W} T^2 (W - 2T)^3 \cos^2(\theta - \omega) \quad (13)$$

L'AMORTISSEMENT INTERFÉRENTIEL.

Nous ne pouvons donner dans le cadre de cet article tous les raisonnements qui nous ont permis de cerner une forme possible de la fonction Ψ_k . On admet que cet amortissement est :

- proportionnel à l'énergie de la composante (T, θ) ;
- proportionnel à l'énergie totale du spectre;
- proportionnel à l'inverse de la puissance quatrième de la période T considérée.

Soit :

$$\Psi_k = - \frac{A\rho}{T^4} \iint \rho_j dT_j d\theta_j \quad (14)$$

où les variables indicées par j sont les variables d'intégration.

L'équation générale d'évolution de la d.s.a. s'écrit finalement :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \left\{ \begin{array}{l} - \vec{V} \cdot \text{grad } \rho \\ + \frac{10^{-2}}{\pi W} T^2 (W - 2T)^3 \cos^2(\theta - \omega) \\ - \frac{A\rho}{T^4} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \rho_j dT_j d\theta_j \end{array} \right.$$

(15)

Toutes ces équations sont évidemment dépourvues d'une absolue rigueur mathématique : comme il l'a été dit plus haut ce modèle est un modèle semi-empirique qui se trouve justifié par ses résultats.

Voyons maintenant comment cette équation est mise en application pour le calcul sur ordinateur.

(Photo U.S.I.S.)

La discrétisation de l'équation générale d'évolution

Dans la pratique du calcul sur ordinateur, l'équation générale d'évolution doit être modifiée pour passer d'un modèle continu à un modèle à pas discontinu. D'autre part, l'exploitation doit tenir compte d'impératifs tels que la rapidité du calcul, et on est finalement amené à choisir un compromis entre la précision recherchée et la capacité de calcul de l'ordinateur (capacité en mémoires en particulier).

La prévision devant recouvrir une partie assez vaste de l'Atlantique, on a estimé qu'il suffisait de connaître l'énergie de la mer aux nœuds d'une grille de 86 milles nautiques pour avoir une idée suffisante de l'état de la mer. Cette précision est d'ailleurs du même ordre de grandeur que celle du tracé des champs de vent en de nombreuses zones de l'Atlantique.

4/ Décomposition spectrale et angulaire.
Spectrum and angle components.

D'autre part, il a fallu faire un découpage en tranches de périodes et de directions. Pour les périodes on a choisi un pas de 3 s; quant aux directions, on remarque que les vagues de courtes périodes transportent peu d'énergie; on adopte donc un pas angulaire variable, plus grand pour les faibles longueurs d'onde. Finalement, l'état de la mer est décrit en un point par 76 composantes spectrales et angulaires, comme indiqué sur le schéma (4).

Voyons maintenant comment chacun des trois termes de l'équation générale se transforme sous forme discrète.

LA PROPAGATION - LA GRILLE.

L'équation (14) peut être adaptée à une grille de calcul quelconque; en particulier, en travaillant en coordonnées sphériques, il serait possible de réaliser une propagation rigoureusement orthodromique; il est inutile d'insister sur la complexité du calcul qui en résulterait, par rapport au calcul sur une grille plane. On a donc choisi de prendre une grille à mailles sensiblement carrées de 86 nautiques de côté (voir fig. 5). La connaissance des d.s.a. aux 1 500 nœuds de la grille suffit pour connaître l'état de la mer sur l'Atlantique.

La fonction f_k réalise une propagation ponctuelle de la d.s.a. : elle prend chaque d.s.a. et la déplace dans sa direction propre avec la vitesse V_T que donne la théorie pour sa période. Si bien qu'en un point k de la grille on remplace la d.s.a. $\rho_{(x,\theta)}^k$ par :

$$\rho_{(x,\theta)}^k = [x - V_T \cos \theta \cdot \Delta t, y - V_T \sin \theta \cdot \Delta t]$$

Mais celle-ci ne provient pas exactement d'un nœud de maille et la machine ignore ce qui se passe en dehors de ceux-ci. C'est pourquoi la d.s.a. propagée est, en fait, celle qui appartient au nœud le plus proche, dont on a conservé, du calcul précédent, la distance qui la séparait de ce nœud (fig. 6). Ainsi, la propagation part toujours des positions vraies. Par contre, la demande d'impression d'une carte attribue toutes les d.s.a. aux nœuds les plus proches.

LA CROISSANCE - LES CHAMPS DE VENT.

On se contente d'appliquer l'équation générale donnant ϕ_k . Néanmoins, on fera une approximation sur la fonction $\delta(|\theta - \omega|)$:

— dans le cas général ($T \geq 10$ s), l'énergie se répartit sur cinq directions, et $\delta(|\theta - \omega|)$ peut avoir l'une des valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} \text{pour } |\theta - \omega| = 0 &, \quad \delta = 0,296 \\ |\theta - \omega| = 22,5^\circ &, \quad \delta = 0,236 \\ |\theta - \omega| = 45^\circ &, \quad \delta = 0,118 \\ |\theta - \omega| > 45^\circ &, \quad \delta = 0 \end{aligned}$$

(voir figure 3),

pour $T = 7$ s, l'énergie se répartit selon trois directions :

$$\begin{aligned} \text{pour } |\theta - \omega| = 0 &, \quad \delta = 0,528 \\ |\theta - \omega| = 45^\circ &, \quad \delta = 0,236 \\ |\theta - \omega| > 45^\circ &, \quad \delta = 0 \end{aligned}$$

— enfin pour $T = 4$ s, la totalité de l'énergie est affectée à la composante la plus voisine de ω .

Quant à l'entrée des champs de vent, elle se fait

5/ La grille, centrée en 45° N, 40° W. On distingue en fond de carte la projection stéréographique de la zone couverte
Grid centre at 45° N, 40° W, with a stereographic projection of the area covered.

6/ La propagation.
Propagation.

Schéma représentant l'étalement de l'énergie avec la propagation
Energy spread during wave propagation

sous une forme codée, qui permet d'attribuer à chaque nœud de maille une direction et une intensité de vent. Le dépouillement des champs de vent analysés et prévus est à l'heure actuelle manuel : il se fait par l'analyse des cartes de situation ou des

cartes prévues; il doit bientôt être rendu automatique par l'emploi d'un lecteur-digitaliseur. L'azimut du vent est rentré en rose de 16 directions, et sa vitesse W est comprise entre 0 et 85 kt. On admet en outre que :

- dans le spectre étudié la croissante est négligeable pour des vents inférieures à 15 kt;
- une précision de 5 kt est suffisante : il suffit alors de prendre des classes de vent : $W = 0,15, 20, \dots 80, 85$ kt.

ORGANISATION PRATIQUE DU CALCUL.

On écrit :

$$\Delta \rho_{T,\theta}^k = [f_k + \varphi_k + \Psi_k] \cdot \Delta t$$

On prend un step de calcul Δt de 3 h : avec un step supérieur et les hypothèses faites, on risque d'avoir des instabilités de calcul.

Ainsi 24 h de traitement sont effectuées au cours de 8 steps successifs. Pour un step sur deux, le champ de vent est reproduit, ce qui permet de limiter le tracé des champs à 4 par jour.

D'autre part, il a fallu s'imposer des conditions aux limites : on admet que les nœuds en bord de grille peuvent recevoir des énergies advectées, mais n'en n'émettent pas. Ainsi, en réalité 874 points sont traités entièrement, et le cycle de calcul comporte donc 8×874 itérations. Pour les nœuds voisins des nœuds périphériques, les variations qui pourraient être dues à une advection venant de l'extérieur sont nulles, mais la croissance en fonction du vent n'est pas modifiée. Enfin, les nœuds « terrestres » identifiés à l'aide d'un champ géographique reçoivent une énergie nulle et par conséquent émettent une énergie également nulle. Tout se passe, en somme, comme si les limites de la grille étaient assimilées à des limites côtières.

Le cycle complet de calculs à effectuer chaque jour pour avoir la situation à 12 h T.U. comprend :

- le traitement « Hindcast » à l'aide des vents observés aux heures synoptiques principales, donc à l'aide de 4 réseaux de vent pour la période de 24 h précédente;
- le rangement des 76 champs $\rho_{T,\theta}$ à la fin du traitement « Hindcast »;
- le traitement « Forecast » par les quatre champs de vent prévu établis pour les heures synoptiques principales des 24 h à venir;
- une sortie de la carte $H_{1/10}$ à la fin de chaque traitement, et, si on le désire, une sortie des périodes et des directions les plus chargées en énergie.

Un step de calcul comprend successivement les phases : croissance, amortissement, propagation, cumul. Pour chacun des nœuds i , la série des calculs est effectuée en une seule boucle. Par jour, le temps de calcul sur l'ordinateur de la Météorologie Nationale est de l'ordre de 24 mn (analyse et prévision).

La méthode D.S.A. 5 que nous venons d'exposer peut certes être l'objet de nombreuses discussions, en particulier en ce qui concerne la rigueur de certains raisonnements : ces raisonnements ont toujours été faits avec le souci de rester en accord avec les lois classiques régissant l'état de la mer. Mais une méthode de prévision n'est valable que par ses résultats : ce sont ces résultats que nous allons examiner maintenant.

(Photo U.S.I.S.)

Contrôle des résultats

La méthode D.S.A. 5 a, dans un premier temps, été testée pendant la période du 15 septembre au 2 octobre 1964, puis d'une façon continue du 1^{er} janvier au 28 mars 1965.

Ces tests-contrôles ont porté uniquement sur des cartes réelles d'analyse. Depuis le 1^{er} octobre dernier, l'exploitation de la méthode est entrée dans une phase pré-opérationnelle avec les essais de prévision de la houle jusqu'à 30 h d'échéance.

Nous allons voir tout d'abord les possibilités de la méthode D.S.A. 5 avec les résultats de l'exploitation du 1^{er} trimestre 1965, puis nous analyserons les résultats obtenus en carte prévue de houle. Enfin nous envisagerons les possibilités d'utilisation des résultats.

Les résultats en cartes réelles de houle (ou, pour reprendre le jargon professionnel, les cartes d'analyse de houles) nous ont permis d'avoir une idée des possibilités de la méthode. Dans les paragraphes qui vont suivre, nous allons présenter, d'une manière succincte, le travail effectué du 1^{er} janvier au 28 mars.

Pour chaque réseau météorologique principal (et il en existe quatre aux heures « Temps universel » 0, 6, 12 et 18) on dépouille deux réseaux de lignes sur le domaine de l'Atlantique, à savoir le réseau d'égale vitesse de vent (réseau isotache) et le réseau d'égale force de vent (réseau isogone).

Tout ce travail préliminaire se présente sous la forme présentée par les figures 7 et 8. Pour effectuer le contrôle des résultats donnés numériquement par la méthode D.S.A. 5, on a fait une comparaison trihoraire entre les hauteurs observées par les navires stationnaires météorologiques de l'Atlantique et la sortie chiffrée du calculateur.

Pour cette comparaison ponctuelle, nous avons choisi les points fixes stationnaires suivants :

- point « A » par 62° Nord 33° Ouest,
- point « B » par 56°30 Nord 51° Ouest,
- point « C » par 53° Nord 36° Ouest,
- point « D » par 44° Nord 41° Ouest,
- point « E » par 35° Nord 38° Ouest,
- point « I » par 59° Nord 19° Ouest,

Isogone (Rose de 36). 10 décembre 1965. 00 TU /7
Isogonal (Rose de 36)

Isotache en nœud. 10 décembre 1965. 00 TU /8
Nodal isotach

9/ Enregistreur de houle type Tucker du MMS France II.
Tucker-type sea wave recorder on MMS France II.

(Archives photographiques de la Météorologie Nationale
6187.)

- point « J » par 52°30 Nord 20° Ouest,
- point « K » par 45° Nord 16° Ouest,
- point « M » par 66° Nord 2° Est .

Le contrôle graphique des différentes valeurs s'est effectué de la façon indiquée sur la figure 9. Les différentes courbes représentent :

- l'observation tri-horaire de la hauteur de la houle par le bateau stationnaire considéré (courbe $\text{---}\text{---}\text{---}$);
- la solution tri-horaire de la hauteur calculée par la méthode D.S.A. 5 (courbe $\text{---}\text{---}\text{---}$);
- l'enregistrement donné par l'appareil Tucker (fig. 10) (lorsque cet enregistrement existe) (courbe $\Delta\text{---}\text{---}\Delta\text{---}\text{---}\Delta\text{---}\text{---}$);
- la valeur de la solution hollandaise donnée à 12 h T.U. par l'équipe de M. Verploegh, le spécialiste hollandais des questions marines. Cette valeur est schématisée par les points « ● ».

D'autre part, on a indiqué les valeurs enregistrées (ou observées) des éléments de météorologie marine, à savoir la force et la direction des vents ainsi que la (ou les) périodes et la (ou les directions) des trains de houle.

Pour tester la méthode, nous avons arbitrairement fixé des seuils d'écarts entre Observation et Calcul au-delà desquels les erreurs sont trop grandes pour être acceptables :

- de 1 à 4 m observés (borne supérieure non comprise) écart acceptable de $\pm 0,50$ m;
- de 4 à 10 m observés (borne supérieure non comprise) écart acceptable de ± 1 m;
- au-dessus de 10 m observés écart acceptable ± 2 m.

Il faut remarquer que les fourchettes d'erreurs admises sont sévères.

Pour les 87 jours exploités en contrôle, nous avons établi un certain nombre de catégories de causes d'erreurs lorsque les écarts entre sortie calculée et hauteur observée dépassaient les seuils

indiqués plus haut. On a groupé toutes les erreurs en :

- erreurs que l'on peut éviter directement;
- erreurs que l'on peut éviter avec aménagement de la D.S.A. 5;
- erreurs accidentelles inévitables.

Le tableau I ci-dessous donne une vue d'ensemble de ces erreurs.

Tableau 1

Résumé des contrôles, du 1^{er} janvier au 28 mars 1965

87 jours d'exploitation; 9 nombre de navires stationnaires; soit au total : 783 journées d'observations, 6 264 points de comparaison (8 réseaux/jour).

Résultats globaux

CLASSES D'ERREURS	NOMBRE	TOTAL	%
1. Erreurs que l'on peut éviter directement :			
— analyse.	107		
— pointage.	8		
— observation.	209		
— chiffrement.	2	326	5,2
2. Erreurs dues au modèle de calcul (que l'on pourrait éviter avec des aménagements de programme) :			
— dispersion.	26		
— méthode (reconduction des champs)..	77	103	1,6
3. Erreurs inévitables accidentelles :			
— calculateur.	10		
— transmissions.	5	15	0,24
4. Sans étiquette.	31	31	0,47
Cumul.	475	475	7,6

Nous allons voir plus en détail les différents groupes d'erreurs.

PREMIER GROUPE; il se décompose en :

1° Erreurs dues à l'analyse des vents :

La vaste surface de l'Atlantique Nord n'est pas uniformément pourvue de renseignements météorologiques. De plus, le réseau de 6 h T.U. est pour nous un réseau creux car il ne donne guère d'observations. Cela implique de considérer la continuité avec les réseaux antérieurs plus denses en observations météorologiques sur l'Atlantique.

Mais cette extrapolation entraîne quelquefois des erreurs dans les forces et dans les directions des vents.

En l'absence d'observations météorologiques, on est obligé de prendre le vent du gradient isobarique sur mer. Or ce vent ne correspond pas toujours avec le vent réel observé.

On a détecté 107 erreurs d'analyse des vents au cours du trimestre d'exploitation.

2° Erreurs dues au pointage des vents :

Il arrive, assez rarement du reste, que le renseignement marine pointé sur la carte soit faussé :

- par une mauvaise position pointée du bateau,
- par un mauvais pointage des éléments météorologiques observés;

8 erreurs semblables ont été décelées.

3° Erreurs dues aux observations météorologiques :

Nous abordons là un point délicat et très controversé. L'observation visuelle de phénomène physique, en l'absence d'enregistreur, est toujours délicate. Le problème du contrôle s'aggrave car de nombreuses causes peuvent entacher d'erreur l'observation : mauvaise position du poste d'observation, caractéristiques du bateau et son comportement à la mer, hauteurs et périodes des houles, facteur humain.

Ce problème de la confiance à accorder aux mesures de houle a été étudié par M. Verploegh qui a pu dresser la figure 11, donnant une idée de l'erreur commise dans l'observation d'une mer. Ces résultats ont été obtenus en considérant un grand nombre de couples de navires voguant l'un près de l'autre.

10/ Enregistreur de houle type Tucker du MMS « France II ». Tucker-type sea wave recorder on MMS « France II ».

(Archives photographiques de la Météorologie Nationale.)

11/ Confiance à accorder aux observations de houle. Observed wave error.

Pour simplifier notre travail de comparaison, nous avons considéré, pour lever d'éventuels doutes, les corrélations qui existent entre la hauteur de la houle, la force du vent et la durée d'action en faisant abstraction de la notion de « fetch » (c'est-à-dire de la notion de la surface de la mer où le vent est générateur de houle).

A l'aide d'abaques de croissance des vagues en fonction de la force du vent et de sa durée d'action, on a éliminé toutes les observations qui présentaient un doute. Au total 209 observations douteuses ont été retenues (fig. 12).

12/ D.S.A. 5.

La répartition suivant les points stationnaires est la suivante :

— point A.	28
— point B.	15
— point C.	32
— point I.	12
— point J.	18 (*)
— point K.	29
— point M.	16
— point D.	34
— point E.	25

Il est difficile d'établir un degré de confiance pour chaque navire stationnaire car il y a une rotation entre différents points fixes suivant la responsabilité des diverses nations intéressées.

Enfin, il faut remarquer que l'observation de l'état de la mer par gros temps est très difficile à faire.

4° Erreurs dues au chiffrage des messages :

Malgré un contrôle sévère afin de déceler d'éventuelles erreurs de chiffrage des messages codés d'entrée des données au calculateur, deux erreurs se sont introduites et ont entraîné des perturbations pendant plus de 24 h.

DEUXIÈME GROUPE; la méthode D.S.A. 5 est perfectible en modifiant :

1° La dispersion :

Elle nous a posé beaucoup de problèmes de contrôle. En effet, la propagation étant ponctuelle,

(*) Le Point « J » a eu au mois de janvier une vacation exceptionnelle. En effet, durant 20 jours, la houle est restée supérieure à 5 m avec des maximums de l'ordre de 16 m pendant 24 h.

il arrive qu'au bout de plusieurs « Steps » de 3 h, on ait une concentration de l'énergie initiale en certains points privilégiés. On trouve donc des « trous » d'énergie en dispersion. On ne peut arriver à la dispersion idéale uniforme dans toutes les directions. Mais par des palliatifs on peut réduire les concentrations énergétiques afin de se rapprocher le plus possible de la situation idéale (but du modèle D.S.A. 5 M, avec une « dispersion artificielle »).

Durant l'exploitation nous avons 26 cas de dispersions inacceptables.

2° La reconduction :

Le problème de la reconduction tri-horaire des réseaux de base doit également être amélioré. En effet, pour combler le manque d'information aux heures 3, 9, 15 et 21 T.U. on a arbitrairement reconduit les réseaux de 0, 6, 12 et 18 T.U. Pour justifier cette reconduction, nous avons supposé que l'inertie du système marin pouvait permettre des steps de 6 heures. Or cette hypothèse s'est révélée erronée dans des cas particuliers de croissance ou de décroissance de la force du vent pendant le step de 6 h. La sortie calculée de la hauteur des vagues est alors soit surestimée, soit sous-estimée par rapport à l'observation.

Nous avons eu 77 erreurs dans cette catégorie.

TROISIÈME GROUPE.

Les erreurs accidentelles dues au calculateur ou aux transmissions des messages sont difficilement repérables; cependant on a pu, grâce à divers renseignements annexes, trouver 15 erreurs de ce genre au cours du contrôle.

Enfin, malgré la diversité des différentes sources d'erreurs possibles, il nous est apparu indispensable de classer 31 divergences importantes entre sortie calculée et observation, dans une catégorie à part. De causes difficilement définissables, ces divergences font l'objet d'études particulières.

Parallèlement à la comparaison ponctuelle des points stationnaires, nous avons fait une comparaison d'ensemble entre la carte d'analyse de houle donnée par la méthode D.S.A. 5 et la carte hollandaise d'état de la mer. En général ces comparaisons sont satisfaisantes.

Depuis le 1^{er} octobre 1965, la méthode D.S.A. 5 est utilisée en prévision à échéance de 12, 18, 24 et 30 h.

Pour avoir une sortie prévue d'état de la mer, il faut au préalable prévoir quatre cartes d'isogones et d'isotaches sur l'Atlantique.

Les cartes prévues à l'heure actuelle ont les échéances précipitées. Notre carte de base étant celle du jour J à 00 TU, on prévoit J à 12 TU, J à 18 TU, J + 1 à 0 TU, J + 1 à 6 TU. On obtient ainsi une carte de hauteur de vagues prévue à 30 heures pour 06 TU. On obtient ainsi une carte de hauteur de vagues prévue à 30 h pour 06 TU.

Pour l'instant nous ne possédons pas le recul nécessaire pour juger efficacement des résultats de prévision. Il est bien entendu qu'aux imperfections de la D.S.A. 5 s'ajouteront celles de la méthode de prévision du vent. Mais d'ores et déjà, on peut penser que la méthode donne des résultats acceptables, en prévisions, de l'ordre de 70 % (voir fig. 13 à 20).

Réelle. 28 octobre 1965. 06 TU /13/ True.

Prévue 30 h pour 28 octobre 1965 06 TU /14/ Forecast 30 h. for october 28th., 1965. 06 TU

Réelle, 29 octobre 1965. 06 TU /15/ True.

Prévue 30 h pour 29 octobre 1965. 06 TU /16/ Forecast.

Prévue 30 h pour le 30 octobre 1965. 06 TU /18/ Forecast.

Réelle. 30 octobre 1965. 06 TU /17/ True.

Réelle. 31 octobre 1965. 06 TU /19/ True.

Prévue 30 h pour le 31 octobre 1965. 06 TU /20/ Forecast.

Voici donc un nouvel outil de travail qui sera prochainement proposé à tous ceux qui s'occupent de près ou de loin aux problème maritimes.

La D.S.A. 5 peut donner, à l'heure actuelle, deux genres de renseignements :

- soit la carte (réelle ou prévue) de la houle sur l'Atlantique;
- soit la sortie spectrale pour des points grilles choisis à l'avance. Cette sortie se présente sous la forme du tableau II ci-dessous. Pour chaque tranche de période, et pour les directions de propagation, on obtient l'énergie pour le numéro de maille considéré. Ce résultat peut être fort utile suivant les travaux à effectuer.

Tableau 2

le 26-08-6 à 12,00 heures

PÉRIODE s	DIRECTION	NUMÉROS DES MAILLES (points stationnaires)								
		691	492	558	392	248	773	700	705	934
04	00	4	10				7			
04	08	7					4			3
04	04			7						4
04	12			1		21		22		
07	00							22	15	
07	04			1						
07	12				16	1		18		
07	02		1				1	7		
07	10			1				3		
07	14		3					29		
10	00								3	
10	01						2	7		
10	02							3		
10	10			3						
10	11			20				3		
10	12			2				8		
10	13							13		
10	14							7		
10	15							3		
13	00								3	
13	01								1	
13	11			1						
13	12							1		
13	13							1		
13	14							1		
16	09		1							
Total énergie		11	16	37	16	22	14	158	22	7
Hauteur (en dm)		13	16	24	16	18	15	50	18	10

Avec les futurs perfectionnements du modèle, on pourra donner le déplacement des noyaux de houle et également on pourra traiter les cyclones, phénomènes ponctuels que la D.S.A. 5 ne peut analyser. (En particulier le modèle D.S.A. 5 M permettra l'analyse numérique de la houle dans les mers fermées.)

Avec l'exploitation continue de la D.S.A. 5 sur l'Atlantique, on sera en mesure de dresser une climatologie marine pour la force et la direction des vents.

Enfin, en repoussant l'échéance de prévision au-delà de 24 h (au détriment de la qualité de la prévision), de nombreux utilisateurs seront encore intéressés par les sorties numériques de D.S.A. 5.

En conclusion, que peut-on attendre de la méthode D.S.A. 5 après les améliorations qui seront faites?

Dans les meilleures conditions, elle restera valable, pour les cartes d'analyse, à environ 90 %. Les résultats encourageants que nous avons obtenus jusqu'ici permettent d'envisager l'avenir d'une manière assez optimiste.

(Photo U.S.I.S.)

Bibliographie

Cours de dynamique des Mers, par H. LACOMBE (Cours de l'Ecole d'Application du Service Central Hydrographique, 1960).

Statistical Distribution of the Maximum of a Random Function, par CARTWRIGHT et LONGGET-HIGGINS, *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 237 (1956).

Bell System Technical Journal, 23, 282 (1944) et 24, 46 (1945) : articles de RICE.

Les Energies de la Mer, compte rendu des IV^{es} Journées de l'Hydraulique, 1956, publié par *La Houille Blanche*.

Notes de l'Etablissement d'Etudes et de Recherches de la Météorologie : n° 109, 112, 121, 126, 166, 179, 205, 211. Direction de la Météorologie Nationale, Paris.

PIERSON, NEUMANN et JAMES. — Practical methods for observing and forecasting ocean waves by mean of wave spectra and statistics. *H.O. Publications* n° 603, *Hydrographic Office, U.S. Navy* (1955).

D'autres documents ont été publiés tant sur la méthode D.S.A. 5 que sur les autres modèles de prévision de l'état de la mer. Les documents de base concernant la D.S.A. 5 sont constitués par la série des notes de l'E.E.R.M.

Abstract

Analysing and forecasting states of sea by the D.S.A. 5 method

by A. SAVINA * and C. FONS **

The French Meteorological Service's method of forecasting states of sea is described. As so many different parameters are involved (coordinates, wind at various points, etc.) a suitable model for routine computer calculations has had to be developed. The theoretical model is described, and an account is given of the initial analysis and forecasting results obtained.

The first part of the article shows how a basic differential equation was chosen. The characteristic heights $H_{1/k}$ for the state of sea are defined, then the relationship between wave energy, standard deviation and height $H_{1/k}$ (Eqs. 1, 2 and 3). The D.S.A. 5 model is one for which sea and swell are considered from their energy aspect; wave energy changes with direction and period are studied (hence the idea of "spectro-angular density", i.e. French "densités spectro-angulaires", whence 'D.S.A.') Variation of 'D.S.A.' (ρ_k) at point k is given by $\partial \rho_k / \partial \tau$ and is a function of the three following terms (Eq. 5):

- (i) An energy propagation term f_k (Eqs. 6, 7 and 8, Fig. 6);
- (ii) A term φ_k for growth of energy with wind and considered 'D.S.A.' period (Eqs. 9, 10, 11 and 12, Fig. 3);
- (iii) A damping term Ψ_k (Eq. 14).

These adequately represent the three phases of wave evolution.

The discrete expression of the basic differential equation (15), is then discussed, considering the new approximations made to adapt the calculation to computer treatment, by choice of appropriate wave period and direction bands (Fig. 14), the right calculation grid (Fig. 5), suitable numerical constants, and by practical organisation of the calculation procedure.

The second part of the article deals with the analysis results obtained for the Atlantic Ocean during the first three months of 1965. It is found that errors fall within four categories (Table 1), namely avoidable errors due to the human factor, errors due to the model, accidental errors, and unspecified errors. A few examples of state of sea charts (Fig. 13 to 20) are given in the form in which they will shortly be appearing in the facsimile network. The first forecasting results are then examined and it is found that the reliability of the forecasts is about the same as by forecasts based on surface wind fields for the same period. A few improvements are suggested for the model which has already given most promising results as regards both analysis and forecasting.

* Ingénieur Civil des Mines.

** Ingénieur des Travaux Météorologiques.

(Photo P. Duplessis.)