

METHODES DE PREVISION DE L'ETAT DE MER A COURT TERME

Gil Pagès

CERMA-ENPC, La Courtine, 93167 NOISY-LE-GRAND CEDEX, FRANCE.

RÉSUMÉ

Nous exposons les méthodes sélectionnées ou développées par le CERMA en vue de constituer un système de prévision de l'état de mer à court terme (2 h) fondé sur l'analyse de la houle. Nous partons de l'hypothèse que la houle est assimilable à un processus gaussien stationnaire sur un court laps de temps. Outre l'abandon des familles de spectres finement paramétrées et l'utilisation de méthodes souples d'identification (ARMA notamment), nous préconisons l'emploi de tests séquentiels qualitatifs de détection de changements dans les caractéristiques spectrales de l'état de mer. Nous proposons aussi des méthodes quantitatives de prévision fondées sur l'extrapolation déterministe des spectres de houle. Des validations de ces méthodes sur données réelles sont en cours.

SUMMARY

We explain the methods selected or developed by the CERMA in order to constitute a short-term predicting model of the sea-state based upon waves analysis at a given point. We make the assumption that it is a stationary gaussian process, at least during a brief period of time. We recommend to adopt AR or ARMA identification techniques and to give up finitely parametrized spectra. We propose to use some sequential tests to detect qualitative changes in spectral characteristics of waves. As a quantitative approach we develop some methods of deterministic extrapolation of spectra. Validations on real data are currently processed.

Le but de cet article est de rendre compte brièvement des résultats d'une étude réalisée par le CERMA (Centre d'Enseignement et de Recherche en Mathématiques Appliquées de l'Ecole des Ponts et Chaussées) en coopération avec la société BOUYGUES OffShore et avec le soutien du Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur (décision d'aide n°86F0717 sur le fonds de la recherche et de la technologie). Le thème de cette étude était : Création d'un outil d'aide à la décision d'engager des phases d'installation offshore (cf.[3]).

1. Le contexte.

L'intérêt porté par une entreprise telle que B.O.S. aux problèmes de prévision de l'état de mer à court terme est motivé par deux exigences contradictoires des travaux d'installation offshore : d'une part la nécessité de n'engager une opération d'installation que lors d'une période de grand calme afin d'en assurer le déroulement dans des conditions optimales de sécurité pour les hommes et le matériel et d'autre part l'importance des coûts occasionnés par tout retard pris dans le lancement d'une opération. Sur un plan pratique, les responsables d'opérations sur site sont demandeurs de prévisions de l'état de mer à un horizon de l'ordre d'une à deux heures. C'est dans ce cadre que le CERMA a entrepris ses investigations.



2. La houle comme phénomène aléatoire.

L'action du vent induit une déformation chaotique de la surface libre de la mer. Cette déformation se propage rapidement hors de sa zone de formation, en se "filtrant" sous l'effet régularisant des lois de la mécanique des fluides jusqu'à former la houle réelle. La houle réelle reste néanmoins un phénomène aléatoire. Un certain nombre d'hypothèses simplificatrices portant sur la cambrure des vagues et la profondeur permettent d'assimiler raisonnablement la houle en un point au cours du temps à un processus gaussien stationnaire (X_n) (pour plus de détails consulter [3] ou [4]). En outre les micro-vagues associées à des fréquences supérieures à 1 Hz ne sont porteuses que d'une part négligeable d'énergie. La densité spectrale de la houle (on suppose la mesure spectrale $m \ll \lambda$, mesure de Lebesgue) est donc une fonction de support $[0,1\text{Hz}]$. Le théorème d'échantillonnage de Shannon permet alors, modulo une renormalisation temporelle ad hoc, d'identifier la houle à un processus gaussien stationnaire centré à temps discrets $(X_n)_{n \in \mathbb{Z}}$. L'hypothèse de stationnarité n'est évidemment valide qu'à très court terme (de quelques minutes à 1 heure).

3. Principe général de la méthodologie adoptée.

Les méthodes de prévision classiques développées pour les séries temporelles par exemple sont clairement inadaptées à notre problème : la meilleure estimation à deux heures de l'élévation de la surface libre c'est évidemment 0, i.e. le calme plat! En outre cette quantité en tant que telle est de peu d'intérêt.

Par contre le spectre, qui caractérise la répartition énergétique des fréquences de la houle, est porteur des informations utiles au chef de barge. Ceci nous a conduit à définir notre mode de prévision de l'état de mer à court terme comme la prévision du spectre de la houle par extrapolation à horizon donné de spectres de houle identifiés dans un passé proche.

Pour se prémunir contre d'éventuelles instabilités de ces extrapolations et en renforcer la validité nous les avons associées à des tests de détection qualitatifs de changements des caractéristiques spectrales.

L'adoption d'un tel point de vue impliquait l'abandon des méthodes classiques d'identification fondées sur l'emploi de spectres préformés finement paramétrés (Pierson-Moskowitz, JONSWAP, etc) au profit de méthodes plus souples d'identification : FFT, ARMA en particulier.

4. Modèles et méthodes proposés.

En l'état actuel des choses nous avons testé nos modèles et nos algorithmes sur des houles simulées sur ordinateur à partir de spectres obtenus sur site lors d'opérations conduites par BOS. Des validations sur données réelles sont en cours.

a. Identification : Nous avons testé en concurrence des méthodes ARMA, AR pures et FFT sur des échantillons de 1000 valeurs (équivalent à 8mn 40s d'enregistrement). Toutes trois sont satisfaisantes, néanmoins l'identification AR apparaît comme le meilleur compromis qualité/coût CPU (hors de tout recours à des machines dédiées à la FFT) d'autant que sa robustesse à l'ordre d'autorégression est apparemment importante sur ce type de données.

b. Test de détection : Nous avons repris les tests de détection développés à l'IRISA de Rennes dans le cadre de travaux sur l'analyse de la parole (cf.[1]). Soit $(\epsilon_n)_{n \in \mathbb{Z}}$ un bruit blanc gaussien. On suppose que (X_n) vérifie :

$$\begin{array}{ll} \text{Modèle } (H_0) & X_n = \beta_0 \epsilon_n - \sum_{1 \leq k \leq p} \alpha_k X_{n-k} \quad \text{si } n \leq \tau \\ \text{Modèle } (H_1) & X_n = \beta_0 \epsilon_n - \sum_{1 \leq k \leq p} \alpha_k X_{n-k} \quad \text{si } n > \tau \end{array}$$

On pose $T_n = - (\beta_0/\beta_0)^2 (2 \beta_0 e_n \underline{e}_n/\beta_0 - (1 + (\beta_0/\beta_0)^2) e_n^2 + (\beta_0/\beta_0)^2 - 1)/2$

avec $e_n = (X_n + \alpha \cdot X^n)/\beta_0$, $\underline{e}_n = (X_n + \alpha \cdot X^n)/\beta_0$

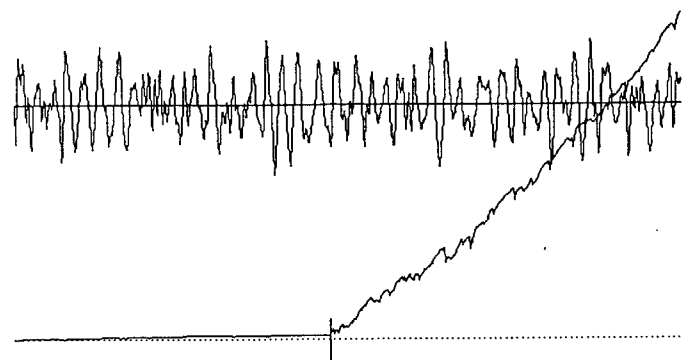
et $X^n = (X_{n-1}, \dots, X_{n-p})$, $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_p)$, $\underline{\alpha} = (\underline{\alpha}_1, \dots, \underline{\alpha}_p)$.

T_n n'est autre que la différence des Log-vraisemblances sous les hypothèses (H_0) et (H_1) .

Le test est alors défini par :

$$U_n = (\sum_{1 \leq k \leq n} T_k) - vn/2 > h$$

Les seuils v et h doivent ensuite être ajustés en fonction du niveau d'alarme souhaité.



Exemple de test de détection (cas d'un changement brusque avec $v=0$)

c. Extrapolation spectrale : Considérons deux spectres S_0 et S_1 obtenus aux instants T_0 et T_1 . Le problème est d'en déduire une estimation S_2 du spectre à l'instant T_2 . Une extrapolation linéaire fréquence par fréquence des spectres n'est pas envisageable car elle conduirait à des spectres extrapolés ayant des valeurs négatives. En l'absence de modèles validés d'évolution de la houle, considérée non plus comme un processus stationnaire mais comme un processus quasi-stationnaire (en un sens à déterminer), plusieurs voies sont envisageables. Celle-ci ne pourront être discriminées que sur des données réelles. En voici deux de nature assez différentes :

- Extrapolation linéaire des logarithmes des spectres. Ce mode d'extrapolation correspond à une modélisation de la non-stationnarité de la houle par un processus Accélééré-Amorti :

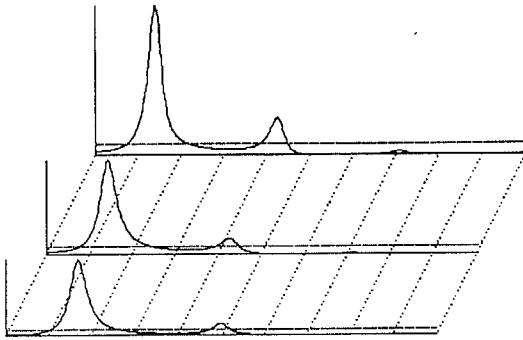
$$\forall f \in [0,1] \quad \text{Log}(S_2(f)) = (T_1 - T_2)/(T_1 - T_0) \text{Log}(S_0(f)) + (T_2 - T_0)/(T_1 - T_0) \text{Log}(S_1(f))$$

Les processus AA se caractérisent par un spectre non plus porté par l'axe imaginaire pur " $2i\pi f$ " mais par une courbe du plan complexe " $2i\pi f + \epsilon(f)$ " proche de l'axe imaginaire (cf. [2]). Ils constituent une sous-classe des processus de Karhunen.

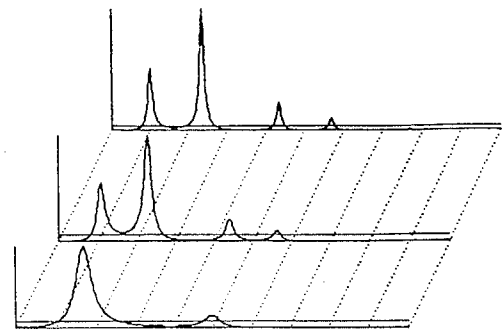
- Extrapolation linéaire des coefficients AR (ou ARMA) :

$$\forall k \in \{1, \dots, p\} \quad a_{2,k} = (T_1 - T_2)/(T_1 - T_0) a_{0,k} + (T_2 - T_0)/(T_1 - T_0) a_{1,k}$$

Cette extrapolation ne préserve pas la stabilité de la décomposition autorégressive. Ce problème reste secondaire si l'on ne s'intéresse qu'à l'allure du spectre.



Exemple d'extrapolation AA



Exemple d'extrapolation AR

REFERENCES

- [1] A. BENVENISTE, M. METIVIER, P. PRIOURET, Algorithmes adaptatifs et approximations stochastiques, Paris, Masson, 1987, 367 p.
- [2] N. BOULEAU, Processus non stationnaires associés aux opérateurs normaux, Cahiers du Cerma, 7, 1987, pp.90-115.
- [3] CERMA, Création d'un outil d'aide à la décision d'engager des phases d'installation offshore, Rapport de fin d'étude M.R.E.S., 270 p. P.
- [4] KREE, C. SOIZE, Mécanique aléatoire, Paris, Dunod, 1983, 638 p.