



## ETUDE COMPARATIVE DE DIFFERENTES METHODES UTILISEES EN INGENIERIE COTIERE POUR L'ESTIMATION DE HOULES EXTREMES

P. REGNAULT (1), P. CHARRIEZ (2), M. OLAGNON (3), E. PELTIER (4), A. DEGRAAUW (5) et O. PIET (6)

(1) STNMTE, Plouzané, France, (2) MétéoMer, Puget sur Argens, France, (3) IFREMER, Plouzané, France,

(4) EDF/LNH, Chatou, France, (5) SOGREAH, Grenoble, France, (6) STC, Compiègne, France.

### **Abstract**

*A working group was set up in 1992 to assess the state of the art as to used in coastal development projects. Within this framework, the respective methods of the participants were tested in a "round robin" configuration, for several case studies.*

*The paper presents the characteristics of these different methods, and the results of the comparisons that were performed.*

*Conclusions of high concern to engineers are drawn:*

*- Results may be presented as return periods, but also in terms of distributions of the maximum value over a given duration.*

*- In all cases, engineers need to favor methods that emphasize the goodness of fit on the tail part of the distributions.*

*- Distribution for the extremes of the parameter of interest can be useful in the decision-making process.*

*In the present study, uncertainties related either to sampling procedures or to the representativity of the observation period are larger than the differences between the results of individual methods.*

*However, for future applications, the prediction method should become a key factor in the quality assessment of design waves determination.*

### **Mots-Clés**

**houle extrême - état de mer - tempêtes -  
estimation - extrapolation - ajustement -  
intervalle de confiance**

### **INTRODUCTION**

Dans un projet d'aménagement maritime, le choix des conditions de design constitue toujours une étape importante qui conditionne fortement le coût des ouvrages et leur bonne tenue lors des tempêtes.

En ce qui concerne la hauteur des vagues, ce choix est directement lié à l'estimation des houles extrêmes dont la qualité dépend pour une grande part de celle des données d'agitation disponibles sur le site étudié.

Toutefois, les outils existants pour l'estimation des houles extrêmes sont multiples et mettent en oeuvre des méthodes parfois différentes.

Les services techniques du ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme ont souhaité entreprendre une comparaison systématique de ces outils afin de quantifier les écarts entre estimations occasionnées par l'emploi des différentes méthodes d'extrapolation et de qualifier chacune d'entre elles.

Un groupe de travail réunissant les principales ingénieries françaises a été constitué à cette occasion et a permis de tester quatre logiciels :

- STORM, développé par le Service Technique Central des Ports Maritimes et Voies Navigables (STPMVN),

- EVENAL, développé par le Laboratoire National d'Hydraulique (EDF-LNH) dans le cadre d'une étude suivie par le STNMTE,

- HOULROSE, développé par la SOGREAH,

- STEXOM, développé par l'IFREMER et transféré vers MétéoMer.

Afin de comparer ces outils, les travaux suivants ont été effectués en aveugle :

- estimation des houles annuelle, décennale et centennale sur trois sites distincts où des données étaient disponibles ;

- estimation des houles annuelle, biennale et quinquennale à partir d'une année médiane de mesures in-situ recueillies à Frigg et comparaison avec les 6,44 années de mesures effectives disponibles.

L'article décrit les fondements théoriques des méthodes implémentées dans les logiciels testés et met l'accent sur les différences essentielles observées.

Les résultats des traitements effectués sont présentés et analysés à la lumière des écarts constatés entre les méthodes mises en oeuvre.

Par ailleurs, le traitement d'un cas d'école, destiné à étudier le choix d'une valeur de projet en relation avec la décision de protection d'un ouvrage contre les houles extrêmes, est exposé.

Les travaux réalisés ont mis en évidence l'importance de certaines étapes dans la procédure d'estimation des houles extrêmes ; l'établissement de recommandations relatives à l'emploi des méthodes d'extrapolation devrait attirer l'attention de l'ingénieur projeteur vers ces points fondamentaux.

### **FONDEMENT THÉORIQUE DES DIFFÉRENTES MÉTHODES**

Les logiciels sur lesquels la comparaison a porté peuvent être regroupés en trois catégories selon la méthodologie qu'ils mettent en oeuvre.

#### **Le logiciel HOULROSE**

Le logiciel HOULROSE [2] a été développé par la SOGREAH pour le traitement de fichiers constitués d'observations de navires.

L'extrapolation des houles extrêmes se fait après suppression des doublons (observations simultanées) ; on ne retient que les observations pour lesquelles la grandeur

caractéristique étudiée ( $H_S$  ou  $H_{max}$ ) est supérieure à un seuil donné.

Les hypothèses suivantes sont effectuées :

- les observations de vague sont supposées uniformément distribuées dans le temps,
- chaque observation représente un état de mer donné,
- tous les états de mer sont indépendants les uns des autres.

A l'échantillon ainsi constitué est ajustée une loi qui peut être :

- la loi de Weibull à deux paramètres,
- la loi exponentielle.

L'ajustement se fait à l'aide d'une méthode des moindres carrés pondérée de sorte que les conditions de vagues extrêmes, qui ne sont dépassées que quelquefois durant la période d'observation, aient une faible influence sur le résultat de l'ajustement.

La probabilité d'occurrence des événements extrêmes est exprimée en terme de période de retour.

Moyennant les hypothèses rappelées précédemment, on a :

$$P_0 = 1 - (1 - P_a)^{1/n} \quad (1)$$

où :

	LOGICIEL EVENAL	LOGICIEL STORM
Définition des tempêtes	Deux définitions possibles	( $H_0, C$ ), avec $C = 1$
Lois possibles	Quatre lois	Absence de la loi en carré
Tests	Indépendance des tempêtes successives Ajustement	Aucun test effectué

Tableau 1 - Principales différences entre les logiciels EVENAL et STORM

A partir de la série chronologique des hauteurs significatives  $H_S$  (respectivement hauteurs maximales  $H_{max}$ ) disponibles sur un site, un échantillon de tempêtes est constitué, une tempête étant caractérisée par son début lorsque  $H_S$  (respectivement  $H_{max}$ ) devient supérieur à un seuil  $H_0$  choisi par l'utilisateur et sa fin lorsque  $H_S$  (respectivement  $H_{max}$ ) redevient inférieur au seuil  $C \times H_0$ ,  $C$  étant une constante déterminée par l'opérateur.

(Notons qu'EVENAL propose une seconde définition de tempête, peu utilisée, qui repose sur le dépassement d'un seuil en hauteur et une durée minimale entre tempêtes successives).

A une tempête ainsi définie, correspondent plusieurs valeurs de  $H_S$  dont la maximale est retenue pour caractériser la tempête. Ce sont ces valeurs de  $H_S$  (respectivement  $H_{max}$ ) sélectionnées qui constituent l'échantillon à partir duquel va se faire l'ajustement.

Le choix des paramètres  $H_0$  et  $C$  de définition des tempêtes résulte d'un compromis entre les trois impératifs suivants :

- constituer un échantillon de taille suffisante,
- rechercher l'indépendance des tempêtes successives,
- favoriser un bon ajustement à la queue de distribution.

L'indépendance des événements est vérifiée à l'aide d'un

- $P_0$  = probabilité de dépassement d'une hauteur de vague donnée pendant une observation (état de mer),
- $P_a$  = probabilité de dépassement d'une hauteur de vague donnée pendant une année avec  $n$  états de mer.

L'équation est résolue pour  $P = \frac{1}{R}$  où  $R$  est la période de retour.

Pour déterminer  $n$ , la durée d'un état de mer est fixée arbitrairement (12 à 24 h en Atlantique, 6 à 12 h en mer du Nord ou en Méditerranée). Cela revient à faire une hypothèse sur la durée de stationnarité d'un état de mer.

Afin de tenir compte des incertitudes sur les estimations, les intervalles de confiance à 50 %, 75 % et 90 % sont calculés. Les valeurs correspondant à la borne supérieure de ces intervalles sont données.

### Les logiciels STORM et EVENAL

Ces deux logiciels mettent en oeuvre la méthode dite de renouvellement. Ils montrent, toutefois, des degrés de sophistication différents.

Nous décrivons ici le logiciel EVENAL [1,4], le tableau 1 indiquant les principales distinctions entre les deux produits.

test portant sur la variable :

$$\alpha = \frac{R\sqrt{\tau}}{\sqrt{1 - R\Delta}}$$

où  $R$  est le coefficient de corrélation des tempêtes successives et le nombre de couples moins deux ayant servi au calcul de  $R$ . suit une loi de Student.

A un couple donné ( $H_0, C$ ) correspond un échantillon auquel sont ajustées quatre lois :

- lois exponentielle, en carré et log-exponentielle, par la méthode des moments,
- loi de Weibull, par la méthode du maximum de vraisemblance.

L'extrapolation des houles extrêmes se fait après que le choix d'un couple ( $H_0, C$ ) de définition de tempêtes et d'une loi ajustée ait été réalisé.

Pour effectuer son choix, l'opérateur dispose de la visualisation graphique des différents ajustements et des résultats des tests d'ajustement du Khi-Deux et d'Anderson-Darling (niveau de risque 5 %...).

Les bornes supérieure et inférieure de l'intervalle de confiance à 90 % sont également calculées.

Afin de déterminer les houles annuelle, décennale et centennale, une période de référence est choisie, de sorte que la durée effective pendant laquelle les  $H_S$  (respectivement  $H_{max}$ ) sont disponibles corresponde à

plusieurs fois la période de référence. On constitue ainsi un échantillon {nk} où nk est le nombre de tempêtes ayant dépassé le seuil  $H_0$  au cours de la kième période de référence.

Lorsque l'on travaille sur des mesures in-situ disponibles sur 4 à 5 années, la période de référence choisie est généralement le mois.

Pour la description de la méthode, on se place dans ce cas. A partir de {nk}, le nombre moyen mensuel de tempêtes, noté n, est calculé.

La loi retenue pour l'ajustement ayant pour fonction de répartition  $F(h)$ , on peut écrire, pour h assez grand (c'est-à-dire  $F(h)$  proche de 1) :

$$\text{Probabilité mensuelle } [H_* > h] \approx n[1 - F(h)] \quad (2)$$

On en déduit la probabilité annuelle :

$$\text{Probabilité annuelle } [H_* > h] \approx 12n[1 - F(h)]$$

Les houles annuelle, décennale et centennale sont obtenues en résolvant :

$$\text{Probabilité annuelle } [H_* > h] = 1, \frac{1}{10}, \frac{1}{100}$$

Tout comme dans le logiciel HOULROSE, la probabilité d'occurrence des événements extrêmes est donc exprimée en terme de période de retour.

### Le logiciel STEXOM

STEXOM utilise la méthode de la "queue de distribution" décrite par J. Labeyrie [3,6].

L'échantillon sur lequel s'effectue le traitement STEXOM est constitué de hauteurs significatives  $H_s$  (respectivement  $H_{max}$ ) représentatives d'états de mer distincts, caractérisés par la propriété de stationnarité suivante [5] :

Les  $H_{si}$  (respectivement  $H_{maxi}$ ) disponibles correspondant à un seul état de mer se mettent sous la forme  $v + \alpha_i$  où  $\alpha_i$  suit une loi de Gauss centrée, d'écart-type  $\sigma$  [ $N(0, \sigma)$ ].

Lorsqu'une transition entre deux états de mer se produit, la loi de  $\alpha_i$  devient  $N(\mu, \sigma)$  avec  $\mu$  différent de 0.

Un détecteur de rupture testant les deux hypothèses  $\alpha_i \equiv N(0, \sigma)$  et  $\alpha_i \equiv N(\mu, \sigma)$  est implémenté.

Pour chaque état de mer ainsi identifié, la valeur maximale est retenue.

Etant donné le procédé de sélection des événements constitutifs de l'échantillon, ceux-ci sont naturellement supposés indépendants.

La méthodologie STEXOM comprend trois étapes :

#### 1 Ajustement d'une loi à l'échantillon

Un grand nombre de lois est disponible (Weibull, Gauss, Fisher-Tippett type I, II ou III, log-normale...), l'ajustement pouvant se faire à l'aide des méthodes des moindres carrés et du maximum de vraisemblance pondérées (c'est-à-dire les écarts sont pondérés par une fonction de la distribution des valeurs).

Le choix d'un seuil en hauteur au-delà duquel les hauteurs significatives (respectivement hauteurs

maximales) sont retenues pour l'ajustement est également possible.

La pondération intervenant dans l'ajustement ainsi que le traitement d'un échantillon seuillé permet de privilégier un bon ajustement à la queue de distribution, parfois au détriment de son corps.

Le choix d'une loi se fait de façon visuelle et au vu des résultats de tests d'ajustement.

#### 2 Détermination de la loi de la grandeur caractéristique étudiée maximale sur la durée d'observation

Cette seconde étape repose sur le fondement théorique suivant :

Si  $X_1, \dots, X_n$  est une séquence de variables aléatoires indépendantes identiquement distribuées de fonction de répartition  $F$  relativement à la durée d'observation  $T_{Obs}$ , alors la loi de

$$Z_n = \text{Max}_{1 \leq i \leq n} x_i \quad \text{est} \quad F^n(x)$$

(n = nombre d'états de mer observés).

Lorsque n croît  $F^n(x)$  converge vers une loi limite correspondant à l'un des trois types suivants :

- Type 1 : exponentielle double ou loi de Gumbel,
- Type 2 : exponentielle simple ou loi de Frechet.,
- Type 3 : Weibull Max, bornée supérieurement.

On dit encore que  $F$  appartient au bassin d'attraction de l'une de ces trois lois.

La seconde étape consiste donc à identifier le type de loi limite vers lequel la distribution observée converge le plus vraisemblablement.

Le choix entre les différents modèles est davantage commandé par le sens commun et des considérations physiques sur les données que par des tests automatiques ; il est ainsi laissé à l'opérateur. Un examen visuel permet également à l'opérateur de vérifier que le modèle approxime correctement la dynamique, ou le taux de variation, des grandes valeurs.

Les tests automatiques sont d'hypothèses, l'hypothèse principale étant :

$H_0$  : loi limite de type 1 (Gumbel),

les hypothèses alternatives étant :

$H_1$  : loi limite de type 2 (Frechet),

$H_2$  : loi limite de type 3 (Weibull Max).

Par ailleurs, un résultat dit que si  $F$  admet un bassin d'attraction, alors, pour des seuils élevés, la queue de distribution de  $F$  est proche d'une loi de Pareto.

Le test d'hypothèses est donc complété par l'ajustement à la queue de distribution des lois de Pareto 1, 2 et 3 sachant qu'on a l'équivalence :

Ajustement à la queue de distribution	Loi de $H_s$ (respectivement $H_{max}$ sur $T_{Obs}$ )
Pareto 1	Gumbel
Pareto 2	Frechet
Pareto 3	Weibull Max

Au vu des résultats des tests d'hypothèses et des ajustements graphiques est déterminée la loi de  $H_{smax}$  (respectivement  $H_{maxmax}$ ) sur la durée d'observation.

### 3 Détermination de la loi de la hauteur significative maximale (respectivement $H_{\text{max,max}}$ ) sur la durée d'extrapolation

Si  $G$  est la loi de  $H_S$ max (respectivement  $H_{\text{max,max}}$ )

sur la durée d'observation et a le rapport entre la durée d'extrapolation et la durée d'observation, alors la loi de  $H_S$ max (respectivement  $H_{\text{max,max}}$ ) sur la durée d'extrapolation est  $G^a$ .

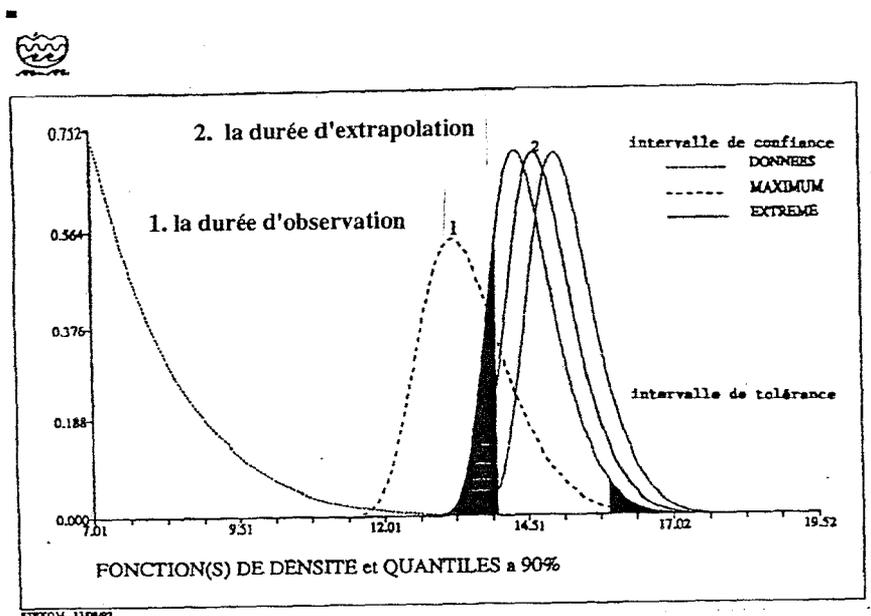


Fig. 1 : Densité de probabilité de  $H_S$ max à Halten Banken

La difficulté de cette étape réside dans le calcul de  $a$  ou bien encore de la durée d'observation ; cela nous conduit au calcul de la durée de stationnarité moyenne  $T_{\text{stat}}$  d'un état de mer sur le site étudié, sachant qu'on a :

$$T_{\text{obs}} = n T_{\text{stat}}$$

où  $n$  est le nombre d'états de mer observés.

Le résultat de STEXOM n'est pas simplement une valeur, mais une distribution statistique du maximum sur la durée étudiée. Les intervalles de confiance sont calculés au moment de l'ajustement de modèles aux données et ils conduisent à des distributions encadrantes pour le maximum à un certain niveau de confiance. Cela permet de distinguer intervalles de tolérance, traduisant la variabilité naturelle de la variable estimée  $H_{S,\text{max}}$ , et intervalles de confiance exprimant les incertitudes sur l'estimation des paramètres de la loi ajustée (fig.1).

Les valeurs de période de retour égale à la durée de projet dans STEXOM sont à comparer au fractile 0,368 de la distribution retenue.

#### DES APPROCHES DIFFÉRENTES

La présentation des méthodes implémentées dans les logiciels testés fait apparaître des différences d'approche importantes.

Les distinctions essentielles concernent :

- la constitution de l'échantillon de départ,
- la procédure d'ajustement d'une loi à la distribution observée,
- la procédure d'extrapolation aux houles extrêmes.

Nous revenons plus loin sur ces points.

Des différences d'une autre nature ont été constatées. Elles concernent les méthodes numériques retenues, tant pour l'estimation des paramètres des lois que pour tester les ajustements.

D'une manière générale, les tests, qu'ils soient d'indépendance, d'ajustement ou d'hypothèses, ont des limites connues des opérateurs et dont ils doivent tenir compte.

Quant aux méthodes d'ajustement, les connaissances actuelles ne permettent pas de privilégier l'une par rapport à l'autre.

Aussi les différences observées entre estimations de houles extrêmes s'expliqueront davantage par des différences d'approche que par l'emploi de méthodes numériques distinctes pour effectuer un calcul de même nature.

#### La constitution de l'échantillon de départ

Selon les méthodes utilisées, les événements constitutifs de l'échantillon n'ont pas la même définition.

Pour HOULROSE et STEXOM, il s'agit d'états de mer. Dans le premier cas, chaque observation est représentative d'un état de mer auquel est associée une durée de stationnarité égale à l'intervalle de temps entre deux observations consécutives.

Dans le second cas, un état de mer est identifié à l'aide d'un critère de rupture dans la série chronologique des  $H_S$  (respectivement  $H_{\text{max}}$ ) et caractérisé par la moyenne des  $H_S$  (respectivement  $H_{\text{max}}$ ) observés lors de son déroulement. Une durée de stationnarité lui est associée. La durée moyenne de stationnarité peut cette fois être

différente de celle qui s'écoule entre deux observations consécutives.

La méthodologie retenue dans STORM et EVENAL introduit la notion de tempêtes caractérisées par les hauteurs significatives maximales observées lors de leur déroulement. Les durées de ces tempêtes n'interviennent pas dans le raisonnement conduisant à l'estimation des houles extrêmes.

### Ajustement à l'échantillon

Dans le logiciel HOULROSE, un seuil en hauteur est retenu de façon à éliminer de l'échantillon les très faibles hauteurs. Sur l'échantillon restant est ajustée une loi, la procédure d'ajustement favorisant un bon ajustement au corps de distribution, les fortes hauteurs n'étant pas observées en nombre suffisant.

### Principe d'extrapolation

A partir des données observées, deux méthodes bien distinctes sont utilisées pour extrapoler vers les houles extrêmes.

Dans les logiciels STORM, EVENAL et HOULROSE, il s'agit simplement de prolonger vers les faibles probabilités une loi ajustée sur l'échantillon observé.

Quant à lui, le logiciel STEXOM ajuste une loi à la distribution empirique observée sans qu'une prolongation vers les faibles probabilités soit effectuée.

A partir de la loi ajustée, est déterminée la loi de la hauteur significative maximale (respectivement  $H_{\max}$  maximale) sur la durée d'observation.

Puis en tenant compte du rapport entre la durée d'extrapolation et la durée d'observation, la loi de la hauteur significative maximale (respectivement  $H_{\max}$  maximale) sur la durée d'extrapolation est déduite.

Les logiciels HOULROSE, EVENAL et STORM utilisent une définition de la houle extrême fondée sur la notion de période de retour, tandis que STEXOM estime la distribution du maximum de la grandeur caractéristique étudiée sur la période concernée.

La quantité  $Q_R$  de période de retour  $R = N \times A$ , où  $A$  est le nombre moyen d'occurrences de  $Q$  en une année, est définie par :

$$P(Q \geq Q_R) = \frac{1}{N \times A}$$

( $N$  = période de retour exprimée en années,  $R$  étant exprimé en nombre d'occurrences).

La probabilité que  $Q_R$  ne soit pas dépassée pendant la période  $R$  vaut :

$$[P(Q \geq Q_R)]^{N \times A} = \left(1 - \frac{1}{N \times A}\right)^{N \times A}$$

La limite de cette quantité lorsque  $N \times A$  tend vers l'infini vaut  $1/e$ , soit 0,368.

La quantité de période de retour  $R$  s'identifie donc, pour de grands nombres d'événements, au fractile  $1/e$  de la loi de distribution du maximum sur une durée  $R$ . Elle a donc près de deux chances sur trois d'être dépassée sur une période continue quelconque de durée égale à  $R$ .

On montre ainsi que les notions de valeur maximale la

plus probable sur  $N$  années et valeur de durée de retour  $N$  peuvent être déduites l'une de l'autre mais qu'elles sont généralement différentes.

Lorsque la distribution retenue dans STEXOM est du type Fisher-Tippett 1, la valeur de période de retour donnée et la valeur modale du maximum sur cette période sont égales.

### APPLICATION À DES CAS TESTS

Afin de comparer les logiciels, ceux-ci ont été utilisés en aveugle sur plusieurs cas tests.

Le premier exercice a consisté à estimer les hauteurs significatives annuelle, décennale et centennale ainsi que les intervalles de confiance à 90 % associés à partir de trois jeux de données de nature et de provenance distinctes :

- Mesures in-situ recueillies lors d'une campagne réalisée par le STNMTE au large de Belle-Ile (France) du 22/02/85 au 29/12/90. Le fichier traité est constitué de grandeurs caractéristiques d'états de mer calculées à partir de séquences d'acquisition de 20 minutes toutes les trois heures en deça d'un certain seuil en hauteur significative, toutes les demi-heures au-delà ;

- Données de hind-cast sur le site de Kodiak (Alaska) reproduisant la période 1956-1975. Les données disponibles correspondent aux hauteurs significatives maximales observées lors des tempêtes reconstituées caractérisées par le dépassement de la hauteur significative seuil de 6,00 m.

- Série temporelle de hauteurs significatives couvrant la période 1980-1988 correspondant au site de Halten-Banken (Norvège). Il s'agit de données provenant alternativement de mesures in-situ et de modèles de hind-cast. Il en résulte une série temporelle où les intervalles de temps entre valeurs successives d'une même variable ne sont pas réguliers.

Les opérateurs des différents logiciels ont été :

1. le STC pour le logiciel STORM,
2. la SOGREAH pour le logiciel HOULROSE,
3. le STNMTE pour le logiciel EVENAL,
4. la société MétéoMer pour le logiciel STEXOM.

Les résultats des traitements des données de Kodiak et Halten-Banken ont pu être comparés à ceux résultant de travaux de même nature engagés au sein de l'AIRH et auxquels contribue le LNH.

Les tableaux 3a, 3b et 3c synthétisent, pour chacun des sites, les estimations des hauteurs significatives décennale et centennale obtenues à l'aide des différents outils.

Le programme HOULROSE de la SOGREAH n'a pu être utilisé sur ces jeux de données.

Les constations suivantes peuvent être faites :

- Selon les cas traités, les écarts entre estimations à l'aide des différents modèles peuvent s'avérer importants ou, au contraire, "négligeables". Ainsi, dans le cas de Belle-Ile, les estimations des hauteurs significatives décennale et centennale obtenues à l'aide des logiciels EVENAL et STEXOM ne diffèrent pas de plus de 20 cm.

	STEXOM	EVENAL (STNMTE)	EVENAL (LNH)	STORM
Borne inférieure de l'intervalle de confiance à 90% (m)	9,85	8,90		8,09
Hs décennale (m)	9,92	9,80		8,83
Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 90 % (m)	9,99	11,60		9,56
Borne inférieure de l'intervalle de confiance à 90 % (m)	11,43	10,40		9,19
Hs centennale (m)	11,52	11,70		10,32
Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 90 % (m)	11,61	14,00		11,44

Tabl. 3a : Estimation des hauteurs significatives décennale et centennale à Belle-Ile

	STEXOM	EVENAL STNMTE	EVENAL (LNH)	STORM
Borne inférieure de l'intervalle de confiance à 90% (m)	10,71	9,60	9,60	9,60
Hs décennale (m)	10,84	10,30	10,50	10,41
Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 90 % (m)	10,98	10,90	11,40	11,22
Borne inférieure de l'intervalle de confiance à 90 % (m)	12,57	10,60	11,20	11,05
Hs centennale (m)	12,73	11,80	12,60	12,31
Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 90 % (m)	12,91	13,00	14,00	13,56

Tabl. 3b : Estimation des hauteurs significatives décennale et centennale à Kodiak

	STEXOM	EVENAL STNMTE	EVENAL (LNH)	STORM
Borne inférieure de l'intervalle de confiance à 90% (m)	13,02	11,60	11,90	11,28
Hs décennale (m)	13,30	12,40	12,90	12,32
Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 90 % (m)	13,62	13,20	14,00	13,35
Borne inférieure de l'intervalle de confiance à 90 % (m)	14,34	12,20	13,30	12,97
Hs centennale (m)	14,65	13,70	15,00	14,54
Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 90 % (m)	14,99	15,10	16,70	16,11

Tabl. 3c : Estimation des hauteurs significatives décennale et centennale à Halten

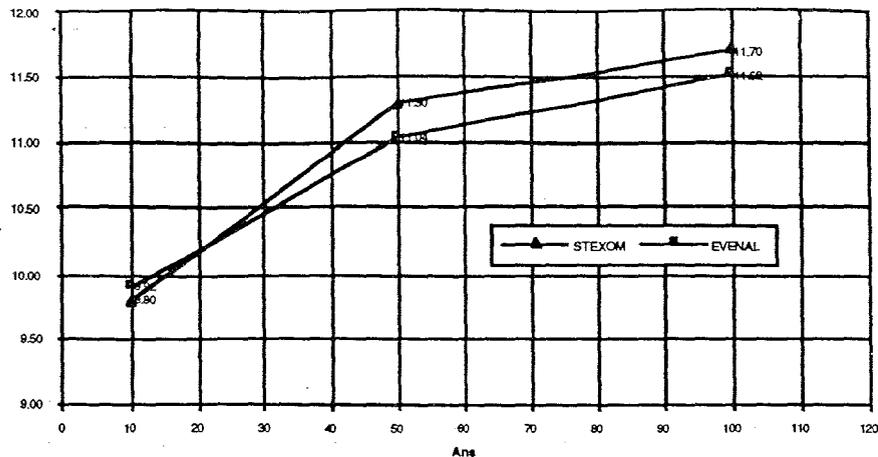


Fig. 2 : Estimations de H<sub>s</sub> 10, 50 et 100 ans à Belle-Ile

En revanche, le traitement du cas de Halten Banken montre que les différences entre estimations de hauteurs significatives décennales peuvent dans certains cas atteindre un mètre.

- Un modèle peut donner une estimation de condition décennale inférieure à ce que donne un autre modèle et conduire à une estimation supérieure des conditions centennales (fig. 2).

- Les résultats de la mise en oeuvre du logiciel EVENAL sur les cas de Kodiak et Halten Banken mettent en évidence l'importance de l'opérateur dans la méthodologie implémentée.

- L'intervalle de confiance calculé dans STEXOM est considérablement réduit par rapport à celui obtenu à l'aide des autres logiciels.

- Les écarts entre estimations de houles extrêmes à l'aide des différents logiciels ne semblent pas être corrélés au rapport existant entre durée effective d'observation et durée d'extrapolation.

La comparaison des traitements effectués des cas de Kodiak et Halten Banken avec les traitements réalisés dans le cadre de l'AIRH (tabl. 4) conduit au constat suivant :

- Les estimations des conditions centennales à l'aide des différents logiciels sont du même ordre de grandeur bien que les méthodes mises en oeuvre diffèrent.

	HALTEN BANKEN	KODIAK
a	15.4	12.5
b	14.4	13.0
c	15.8	12.9
d	15.3	12.5
e	15.8	12.9
f	14.5	12.7
g	15.0	12.6
h	14.4	12.0

Tableau 4 - Estimation de H<sub>s</sub> centennale  
Travaux de l'AIRH

De cette première phase de comparaison se dégage une conclusion intermédiaire rassurante.

Les comparaisons effectuées entre valeurs centennales estimées montrent des écarts n'excédant pas 10 % de la valeur estimée.

Ces écarts semblent davantage dépendre de l'information contenue dans les données observées que du rapport entre durée d'observation et durée d'extrapolation.

A ce stade des travaux, il a semblé intéressant aux membres du groupe de tenter de qualifier les estimations faites à l'aide des différents logiciels.

Pour cela, l'exercice suivant a été réalisé :

- Estimation des hauteurs significative et maximale biennale, quinquennale et décennale sur le champ de Frigg à partir d'une année de mesures in-situ et comparaison de ces estimations avec les hauteurs équivalentes calculées à partir de l'ensemble des données mesurées in-situ (soit, 6,44 années effectives).

Il est, par ailleurs, apparu aux membres du groupe qu'il était difficile de dissocier l'estimation d'une houle extrême de son utilisation projetée.

Aussi a-t-il été décidé de traiter un cas réel de détermination de conditions de projet permettant d'intégrer la prise en compte de critères économiques dans le processus conduisant au choix d'une houle de projet. Nous revenons sur cet exercice un peu plus loin dans le texte.

#### Traitement du cas de Frigg

Les données traitées correspondent à des mesures in-situ, deux séquences de mesures successives étant espacées de quatre heures.

Les logiciels STEXOM, EVENAL et HOULROSE ont été mis en oeuvre dans le cadre de cet exercice.

Les tableaux 5a et 5b reprennent les résultats obtenus à l'aide des deux premiers, pour les hauteurs significative et maximale et les comparent aux grandeurs calculées (biennale et quinquennale) et estimée (décennale) à partir des 6,44 années de mesures effectives disponibles.

	STEXOM	EVENAL	HOULROSE	IFREMER (référence)
Hs biennale (m)	10.19	9.60	9.25	10.75
Hs quinquennale (m)	11.06	10.60	10.30	11.70
Hs décennale (m)	11.72	11.10	11.20	12.40

Tableau 5a - Estimation des hauteurs significatives à Frigg

	STEXOM	EVENAL	IFREMER (référence)
Hs biennale (m)	16.45	15.40	17.40
Hs quinquennale (m)	17.90	16.80	18.85
Hs décennale (m)	19.00	17.70	20.00

Tableau 5a - Estimation des hauteurs maximales à Frigg

La démarche retenue par la SOGREA H pour traiter ce cas a été la suivante :

Frigg étant située en mer du Nord, il a été considéré qu'il se produisait quatre états de mer par jour (petites mers). Le fichier de mesures a ainsi été épuré. Le traitement n'a porté que sur les hauteurs significatives.

A la distribution empiriques résultante ont été ajustées les lois semi-logarithmique et de Weibull.

La loi ajustée retenue est celle donnant les valeurs les plus élevées.

Les intervalles de confiance associés à 50 %, 75 % et 90 % sont calculés et visualisés graphiquement (bornes supérieures).

C'est la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 50 % pour la loi semi-logarithmique qui est donnée comme résultat formel dans le cadre de cet exercice (tabl. 6).

PERIODE DE	INTERVALLE DE CONFIANCE			
	50%		90%	
RETOUR/WEIBULL	SEMILOG	WEIBULL	SEMILOG	
2 ans	8.30	9.25	8.80	10.10
6 ans	9.10	10.30	9.90	11.80
10 ans	9.40	11.20	10.70	13.00

Tableau 6 - Application de HOULROSE aux données Hs de Frigg

Afin de mettre en parallèle des grandeurs comparables, le tableau 7 reprend les limites supérieures des intervalles de confiance à 90 % exprimées en mètres associés à l'estimation des hauteurs significatives biennale, quinquennale et décennale :

Période de retour	STEXOM (+confiance)	STEXOM (+tolérance)	EVENAL	HOULROSE	REFERENCE (tolérance)
2 ans	10.32	13.20	11.60	10.10	13.80
5 ans	11.22	14.10	12.80	11.80	14.70
10 ans	11.89	14.80	13.50	13.00	15.40

Tableau 7 - Estimation des Hs à Frigg au niveau de confiance 90%

On constate que les modèles STEXOM et EVENAL conduisent à des estimations sensiblement différentes des hauteurs significatives, alors que les hauteurs maximales estimées par les deux outils sont proches l'une de l'autre.

De façon générale, les estimations restent éloignées des valeurs calculées à l'aide des 6,44 années de mesures effectives. Cela s'explique par le fait que l'année de mesure utilisée pour l'extrapolation n'est pas représentative de ce qu'est une année moyenne à Frigg.

Le logiciel HOULROSE est difficilement comparable aux autres produits en ce sens qu'il calcule des grandeurs de nature différente et laisse une grande part au travail d'interprétation des résultats effectué par l'opérateur.

## INTERPRETATION DES RESULTATS

Les travaux réalisés ont permis de mettre en évidence des différences importantes entre les méthodes d'estimation de houles extrêmes existantes qui se traduisent parfois par des écarts conséquents entre estimations d'une même grandeur.

Afin de nous aider dans la phase d'interprétation des résultats, nous avons fait appel à deux experts : MM. Labeyrie, ingénieur-chercheur à l'IFREMER et Bernier, ingénieur conseil auprès du LNH.

Les principaux résultats sont repris et interprétés ci-après :

- Les écarts entre estimations d'une même grandeur peuvent atteindre 1 m sur une hauteur significative décennale en un site et ne pas dépasser 20 cm sur une hauteur significative centennale en un autre site. De plus, cet écart ne dépend pas du rapport Durée d'observation/Durée d'extrapolation.

Le traitement du cas de Frigg a montré que deux méthodologies distinctes appliquées à une même banque de données, peuvent conduire à des estimations de hauteurs significatives différentes alors que les estimations de hauteurs maximales sont comparables.

Les experts reconnaissent qu'un préalable indispensable à une bonne extrapolation consiste à privilégier la queue de distribution dans la phase d'ajustement d'une loi à l'échantillon.

Les logiciels STEXOM et EVENAL mettent en oeuvre des méthodes qui diffèrent (considérablement) en ce qui concerne les points suivants :

- nature de l'échantillon traité,
- focalisation sur la queue de distribution au cours de la phase d'ajustement.

L'échantillon traité dans STEXOM est constitué de grandeurs caractéristiques d'états de mer considérés comme indépendants.

L'échantillon traité dans EVENAL est constitué de grandeurs caractéristiques de tempêtes dont un test permet de vérifier l'indépendance.

Dans la pratique, une tempête identifiée dans EVENAL correspond à plusieurs états de mer distincts dans la méthodologie STEXOM. Par conséquent, les queues de distribution étudiées dans les deux méthodes sont de nature différente.

Par ailleurs, STEXOM offre un plus large catalogue de lois pour réaliser l'ajustement. Les lois ajustées ne sont donc pas nécessairement les mêmes. Ces raisons suffisent à expliquer des différences pouvant parfois être grandes après extrapolation.

La méthodologie STEXOM consiste à rechercher la loi de  $H_{3max}$  sur la durée d'observation.

On conçoit aisément que lorsque la dynamique des grandes valeurs est présente dans l'échantillon la loi, ajustée à la queue de distribution dans EVENAL, soit proche de la loi recherchée dans STEXOM. Cela est d'autant plus vrai quand celle-ci est du type Weibull Max et que EVENAL a conduit à considérer la loi de Weibull comme la mieux ajustée.

L'utilisation de EVENAL par deux opérateurs distincts sur les cas de Kodiak et Halten Banken a conduit à des écarts pouvant atteindre 50 cm entre estimations de  $H_3$

décennale et 1 m entre estimations de  $H_S$  centennale.

La difficulté dans l'emploi du logiciel EVENAL réside dans le choix du seuil de définition de tempêtes que l'on souhaite prendre suffisamment élevé pour capter l'information présente dans la queue de distribution, mais que l'on est conduit à retenir suffisamment bas pour constituer un échantillon de taille convenable pour que les tests d'ajustement aient des résultats significatifs et que la variabilité statistique associée aux estimations soit limitée. Dans le déroulement de cette phase, l'influence de l'opérateur est grande.

Par ailleurs, le choix d'une loi se fait pour une grande part en visualisant les différents ajustements graphiques. Il est parfois difficile d'établir son choix et c'est bien souvent l'expérience de l'utilisateur qui conduit à retenir une loi plutôt qu'une autre.

Les experts reconnaissent que les aides au choix proposées dans EVENAL pourraient être améliorées. C'est cette limitation actuelle qui explique l'influence de l'utilisateur sur les résultats.

- On constate que les intervalles de confiance associés aux estimations obtenues avec STEXOM sont beaucoup plus faibles que ceux calculés par les autres logiciels.

Le logiciel STEXOM fournit des densités de probabilité de la grandeur estimée maximale sur la durée d'observation, puis sur la durée d'extrapolation. Les intervalles de confiance annoncés sont ceux correspondant aux modes de ces densités de probabilité.

Les intervalles de confiance calculés sont d'autant plus faibles que la taille de l'échantillon étudié est grande. L'échantillon des grandeurs caractéristiques d'états de mer étudié dans STEXOM est de taille plus importante que l'échantillon des grandeurs caractéristiques de tempêtes étudié dans EVENAL et STORM.

C'est la raison essentielle des différences observées et c'est aussi l'illustration de la principale divergence de vue entre experts.

En effet, la méthodologie STEXOM repose sur le principe de quasi-linéaire invariance.

Cela signifie que tout changement de type affine sur les mesures se traduit par le même changement sur la valeur prédite ; sont sous-entendus l'indépendance des observations et l'identité de leur distribution respective.

Monsieur Bernier considère que l'indépendance des événements dans STEXOM n'est vraisemblablement pas vérifiée et que ce qui est énoncé comme un principe n'est en fait qu'une hypothèse. Le non respect de cette hypothèse se répercute, selon lui, sur le calcul de l'intervalle de confiance.

Monsieur Labeyrie lui oppose que la connaissance d'un état de mer à un instant donné ne permet pas de prédire quel sera le prochain état de mer et que par conséquent, l'hypothèse d'indépendance, si on ne peut la vérifier, paraît justifiée.

Les concepteurs de l'outil STEXOM reconnaissent, toutefois, que les intervalles de confiance calculés sont étonnamment faibles. Cela pourrait être du à une erreur de programmation qui n'a pas été décelée jusque là.

- Les différences observées entre estimations de grandeurs centennales obtenues à l'aide de différents logiciels sont au plus de l'ordre de 10 % de la grandeur estimée. Cela est bien en deçà de l'intervalle de confiance

associé aux estimations obtenues à l'aide de EVENAL ou STORM (environ 20 % de la grandeur estimée).

L'exercice réalisé sur Frigg a montré que les erreurs dues à la non-représentativité de la période d'observation peuvent être beaucoup plus importantes.

Ainsi, si les méthodes diffèrent, les résultats obtenus vont plutôt dans le bon sens puisqu'ils mettent en évidence que les différences entre estimations obtenues en mettant en oeuvre des méthodes distinctes restent inférieures aux incertitudes liées à l'échantillonnage et aux erreurs dues à la non-représentativité de la durée d'observation.

## CRITÈRE ÉCONOMIQUES ET CHOIX D'UNE HOULE DE PROJET

Les logiciels STEXOM et EVENAL ont été comparés afin d'établir la répercussion de l'emploi d'une méthode plutôt qu'une autre sur le choix d'une valeur de projet en relation avec la décision de protection d'un ouvrage contre les houles extrêmes.

L'exercice effectué a pour énoncé :

*"Soit un ouvrage à construire à Belle-Ile... Le coût de la construction de l'ouvrage est évalué à  $H_S \max$  MF, où  $H_S \max$  est la valeur de  $H_S$  qui sera retenue comme valeur de projet. La durée de vie prévue est de 10 ans. Le coût total de la ruine de l'ouvrage, si elle survenait avant la fin des 10 ans est de 20 MF. Quelle valeur de  $H_S \max$  conseillez-vous au maître d'ouvrage, sachant qu'il souhaite minimiser l'espérance du coût ?"*

Il s'agissait bien évidemment d'un cas d'école qui a permis toutefois de mettre en évidence certains points intéressants.

### Solution analytique de l'exercice :

Cette solution a été présentée par Monsieur Bernier. En notant C le coût unitaire de construction en MF et D le coût de ruine en MF, on suppose que l'occurrence de la ruine est liée à l'évènement E associé à la variable aléatoire : houle significative maximale annuelle  $H_{AS}$ .

E :  $H_{AS} > H_{S \max}$  dont la probabilité p est telle que :

$$p = 1 - F(H_{S \max}) \quad \text{où}$$

F() est la fonction de répartition de la houle significative maximale annuelle.

L'investissement permettant d'éviter la ruine de l'ouvrage est  $CH_{S \max}$  et il doit être comparé à l'espérance du dommage pour déterminer le seuil de rentabilité, solution de la question posée. Le calcul de l'espérance de ce dommage donne :

$$D[1 - (1 - p)10] = D[1 - F(H_{S \max})^{10}] \quad (3)$$

La valeur critique de  $H_{S \max}$  à partir de laquelle l'investissement dépasse l'espérance du dommage évité est solution de l'équation :

$$CH_{S \max} = D [1 - F(H_{S \max})^{10}] \quad (4)$$

Au-delà des solutions numériques, les conclusions tirées de cet exercice sont les suivantes :

- C'est la distribution complète de la loi de probabilité (annuelle) de la grandeur physique indicatrice du niveau de dommage qui s'avère nécessaire à l'établissement du choix d'une houle de projet.

• (4) s'exprime en fonction de la distribution de la houle significative maximale sur 10 ans. Celle-ci est estimée dans la méthodologie STEXOM qui permet donc de répondre directement à un problème de dimensionnement intégrant des critères de coût. EVENAL permet d'y répondre également de façon moins directe.

• Le logiciel STEXOM fournit les distributions encadrantes de la loi du  $H_s$  max sur la période désiré. Il permet donc d'associer un intervalle de confiance à l'estimateur solution du problème posé.

## CONCLUSION

Quatre logiciels utilisés pour l'estimation de houles extrêmes ont été comparés sur plusieurs jeux de données. Il s'agit des logiciels EVENAL, STEXOM, STORM et HOULROSE.

Ils mettent en oeuvre des méthodes distinctes qui nous ont conduit à les classer en trois catégories :

- STEXOM, fondé sur la théorie de Fisher-Tippett,
- EVENAL et STORM, dans lesquelles est implémentée la méthode dite de renouvellement,
- HOULROSE qui ajuste à l'ensemble des observations une loi de type Weibull ou semi-logarithmique.

La première catégorie repose sur la notion de valeur maximale la plus probable sur N années, tandis que les deux autres reposent sur la notion de valeur de durée de retour N.

Or, il a été montré que ces deux notions sont différentes, même si elles peuvent se déduire l'une de l'autre.

Il paraît donc nécessaire de ne pas employer indifféremment les termes de houles significatives décennale, centennale,... et de distinguer dans la terminologie la façon dont ces grandeurs ont été obtenues. Dans tous les cas, l'ingénieur ne peut se contenter de valeurs de projet ; il se doit d'obtenir des précisions sur la méthode utilisée pour les obtenir.

Les logiciels d'estimation de houles extrêmes peuvent être distingués suivant un autre critère : l'importance qu'ils accordent à la queue de distribution dans la phase d'ajustement.

Quelle que soit la méthodologie mise en oeuvre, l'ingénieur, désireux d'obtenir les estimations les plus fiables possibles des conditions extrêmes, devra toujours privilégier le logiciel favorisant un bon ajustement à la queue de distribution.

Par ailleurs, c'est la distribution complète de la loi de probabilité de la grandeur physique indicatrice du niveau de dommage de l'ouvrage étudié qui devra lui être précisée afin qu'il établisse son choix d'une houle de projet en fonction des critères de coût.

Tous les logiciels ne fournissent pas les mêmes résultats de traitement.

Outre la notion d'intervalle de confiance, le logiciel STEXOM introduit la notion d'intervalle de tolérance qui traduit le caractère aléatoire de la grandeur estimée. En donnant les lois de probabilités des grandeurs étudiées maximales respectivement sur la durée d'observation et la durée d'extrapolation, il répond de manière plus directe

que les autres logiciels aux interrogations de l'ingénieur ayant à tenir compte de critères économiques dans le choix d'une houle de projet.

Si l'unanimité semble se dégager autour de la théorie de Fisher-Tippett dans le secteur off-shore, il semble que deux courants distincts coexistent en ingénierie côtière : l'un remettant en cause l'hypothèse d'indépendance faite sans laquelle la théorie de Fisher-Tippett est inapplicable aux phénomènes de houle, l'autre remettant en cause le mode d'extrapolation qui consiste à prolonger vers les faibles probabilités une loi ajustée sur des données observées.

Bien qu'ayant des fondements théoriques distincts, les logiciels testés ont conduit à des estimations de valeurs centennales ne différant pas de plus de un mètre. Cet écart, s'il est non négligeable, reste inférieur aux incertitudes sur les estimations dues à l'échantillonnage ou à la représentativité de la période d'observation.

A la vue des résultats de l'étude comparative, il apparaît difficile d'établir une qualification des méthodes employées et seul l'avis de multiples experts devrait nous permettre de nous faire notre propre opinion.

Toutefois, il semble que le niveau de développement des logiciels de traitement est directement lié à la qualité des données habituellement traitées (cf HOULROSE et observations de navires).

Cette qualité augmentant sans cesse, il paraît dès lors prévisible que la nature des outils utilisés pour l'extrapolation deviennent rapidement un facteur essentiel de qualité des estimations de houles extrêmes.

## Remerciements

Cette étude n'aurait pu se faire sans la collaboration de :

- la société Elf qui a mis à notre disposition les données de Frigg ;
- l'Association Internationale de Recherche en Hydraulique par le biais de laquelle nous avons pu disposer des données de Kodiak et Halten Banken.

Nous tenons à remercier également Messieurs Labeyrie et Bernier pour l'éclairage qu'ils ont su apporter dans la phase d'interprétation des résultats, ainsi que Monsieur Maroini, du Bureau Véritas, pour sa participation informelle aux travaux du groupe.

Les travaux exposés dans cet article devraient conduire à l'établissement de recommandations à l'usage des ingénieurs maritimes pour la détermination de houles de projet.

## Références

- [1] Bernier J & Braff M. Méthodes d'estimation de la houle de projet avec données incomplètes, rapport d'études LNH, HE/42/83.34.
- [2] De Graauw A, "Wave Statistics Based on Ship's Observations", Coastal Engineering, 10 (1986) pp.105-118.
- [3] Doucet Y, Labeyrie J & Thebault J, "Validation of Stochastic Environmental Design Criteria on Frigg Field", Modelling the offshore Environment (1987) S.U.T. (ed), London, pp45-49.
- [4] Graff M, Coeffe Y, Bernier J & Delannoy B,

"Notice d'utilisation du programme EVENAL", rapport d'étude du LNH, HE/42/84.35.

[5] Labeyrie J, "Stationary and transient states of random seas", Marine Structures, 3-1 (1990) pp 43-58.

[6] Labeyrie J, "Time Scales and Statistical Uncertainties in the Prediction of Extreme Environmental Conditions", Reliability Engineering and Safety, 32 (1991) pp 243-266.

[7] Tiago de Oliveira J & Ivette Gomes M, "Two Test Statistics for Choice of Univariate Extreme Models", Statistical Extremes and Applications, NATO ASI Series, REIDEL Pub (1984) pp 651-668.