

# Evènements météo-océaniques extrêmes pour les études d'ingénierie côtière : état des lieux et défis

*Franck MAZAS, ARTELIA*



**De l'océano-météo...**



*Etats de mer*



*Courants*



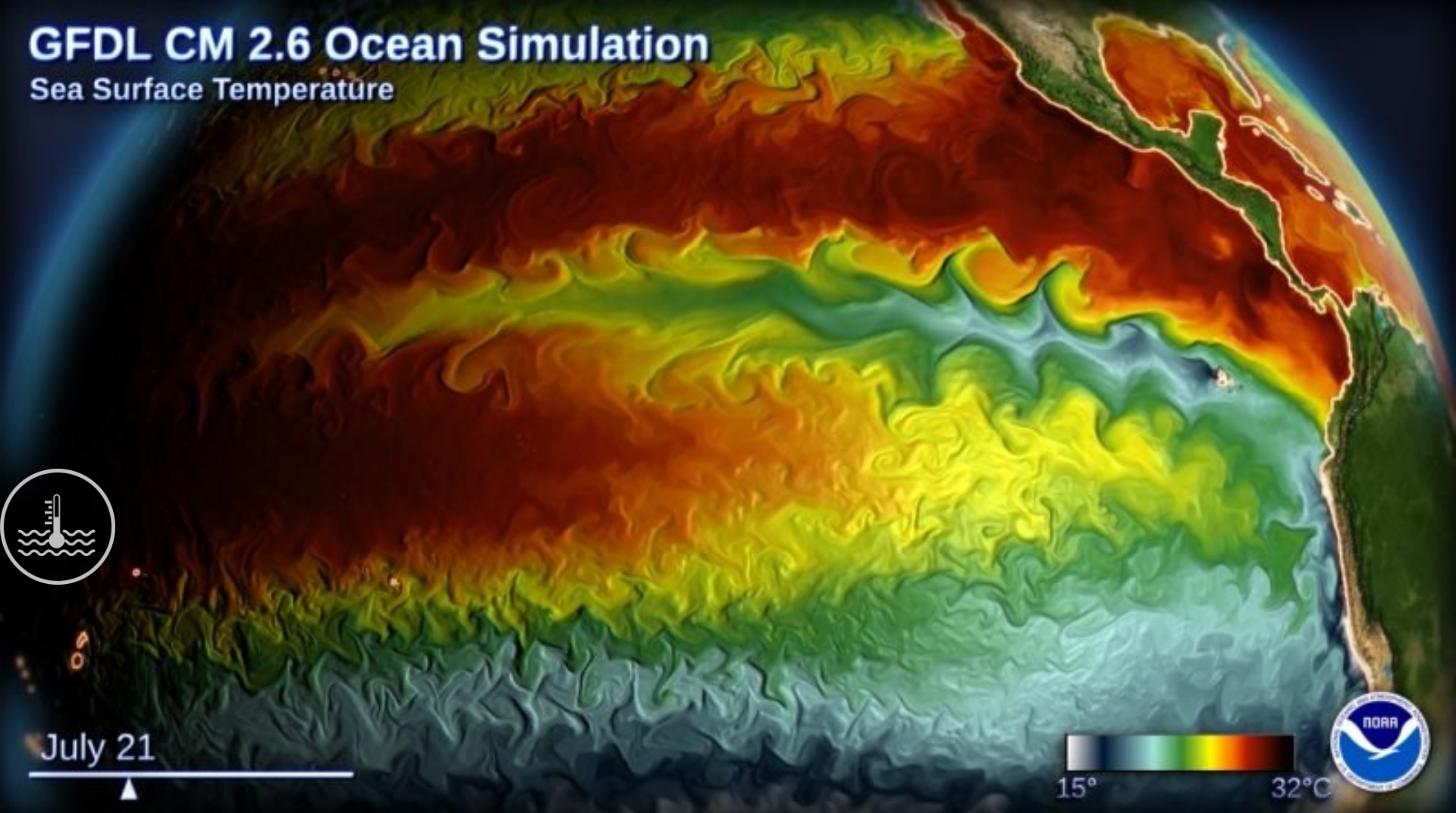
*Niveau marin*



*Vent*

# GFDL CM 2.6 Ocean Simulation

Sea Surface Temperature



*Température de surface de la mer*

**... à l'ingénierie côtière**





*Structures côtières*



*Erosion côtière*



*Structures en mer*



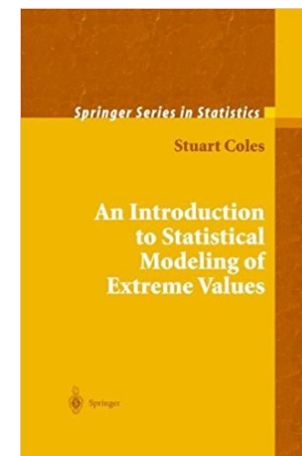
*Submersion marine*

# Evènements extrêmes univariés

# Houles extrêmes : des pics de tempête aux évènements

## Etat de l'art au début du travail de recherche (2007)

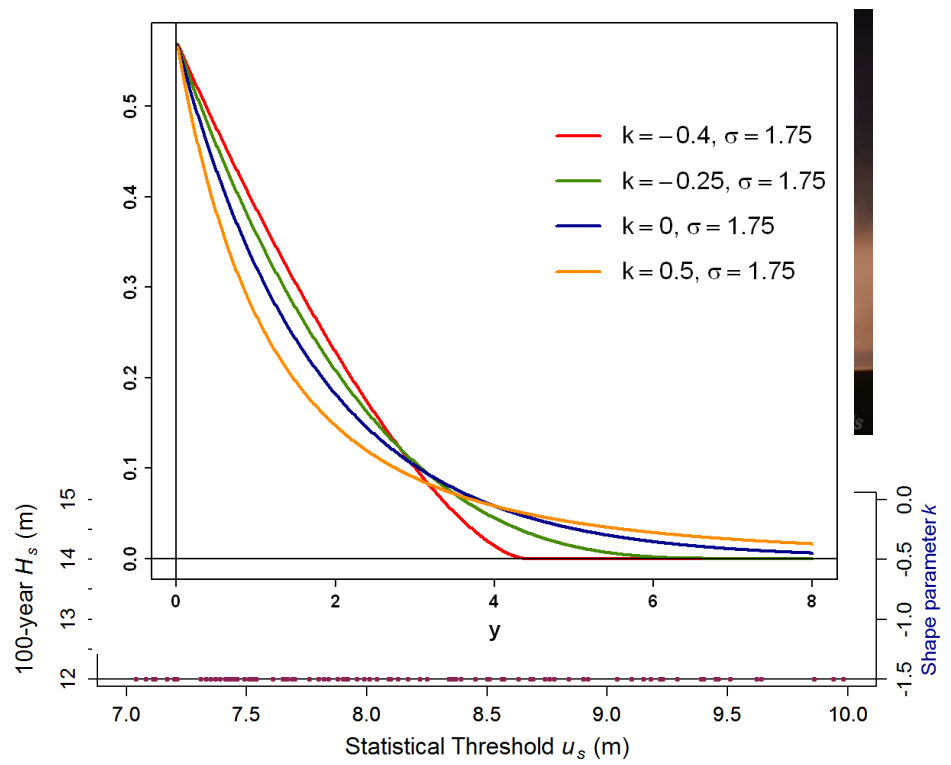
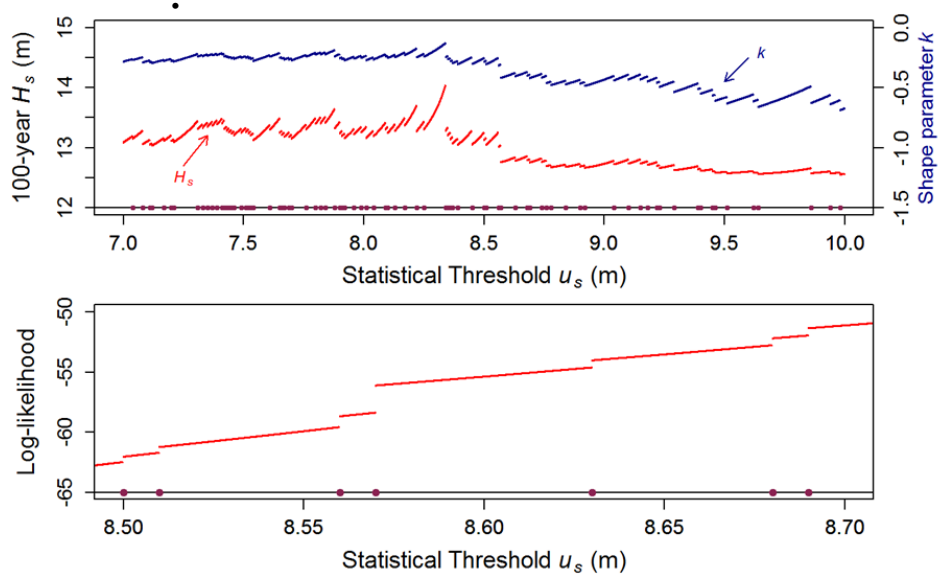
- Communauté des ingénieurs côtiers
  - ✓ identification de secteurs directionnels
  - ✓ Sélection des pics de tempête par la méthode du renouvellement (POT)
  - ✓ choix du seuil basé sur des considérations physiques et météorologiques
  - ✓ ajustement moindres carrés d'une distribution de Weibull aux pics
  - ✓ examen de distributions alternatives
- Théorie des Valeurs Extrêmes
  - ✓ declustering POT
  - ✓ emploi de la Distribution de Pareto Généralisée (GPD)
  - ✓ ajustement par l'Estimateur du Maximum de Vraisemblance (EMV)
  - ✓ évaluation de la qualité de l'ajustement (AIC, BIC...)
  - ✓ intervalles de confiance calculés par la méthode Delta



# Houles extrêmes : des pics de tempête aux évènements

## Estimation des distributions

- Estimateur classique pour la modélisation sub-seuil: **EMV**
- La fonction de densité des distributions est telle que de large variations des paramètres et des quantiles (*virgae*) apparaissent quant le seuil varie entre 2



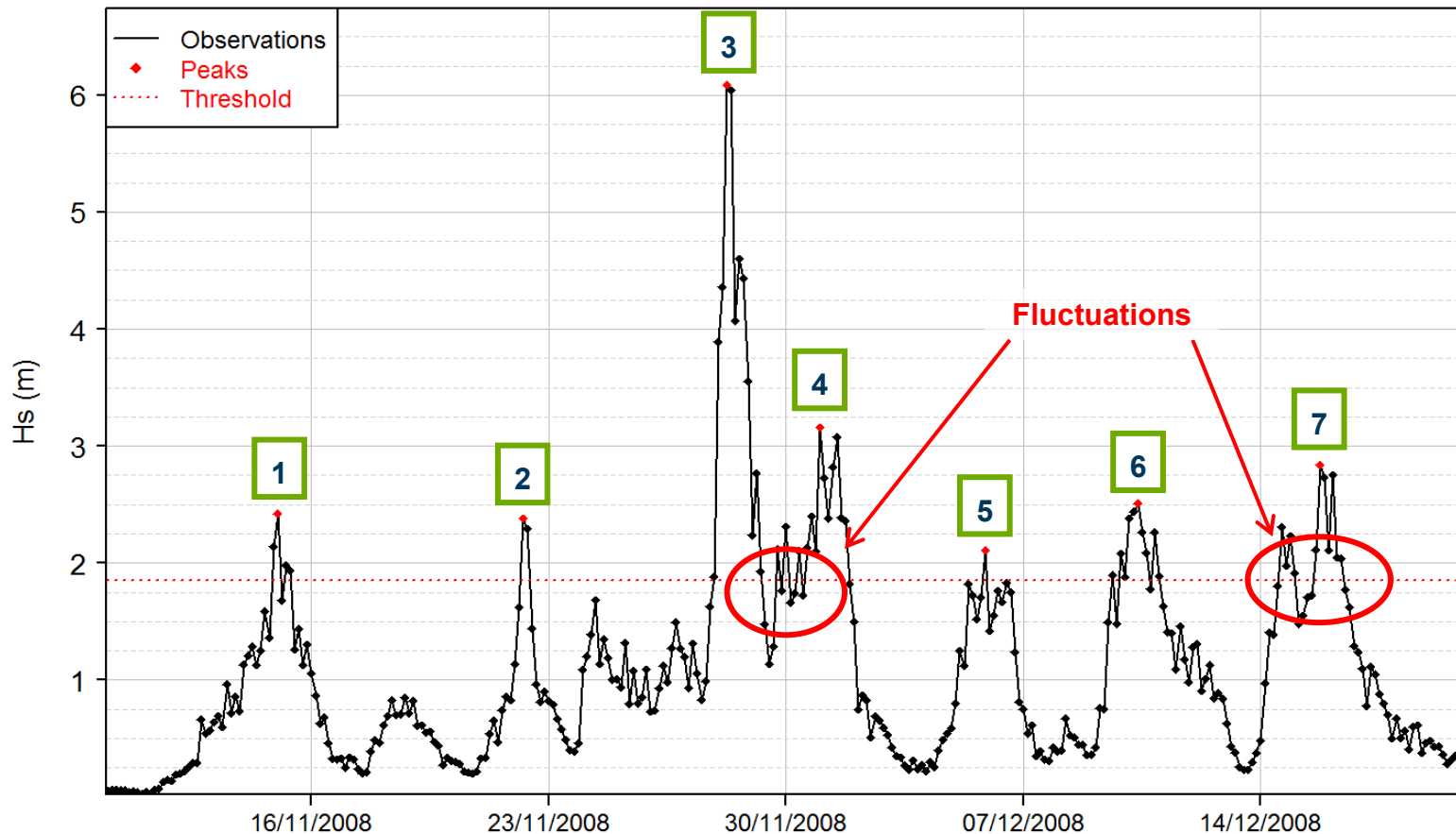
- Solution proposée : emploi de l'**estimateur des L-moments** et d'un paramètre de position  $\mu$  pour fixer l'origine de la distribution

# Houles extrêmes : des pics de tempête aux évènements

## Sélection des pics de tempête

- Les pics de tempête sont **définis** par le dépassement de seuil
  - ✓ distinction entre des tempêtes consécutives : fluctuations, durée minimale, etc.

Bastia Carbonite - Time series of observations - Threshold: 1.85 m

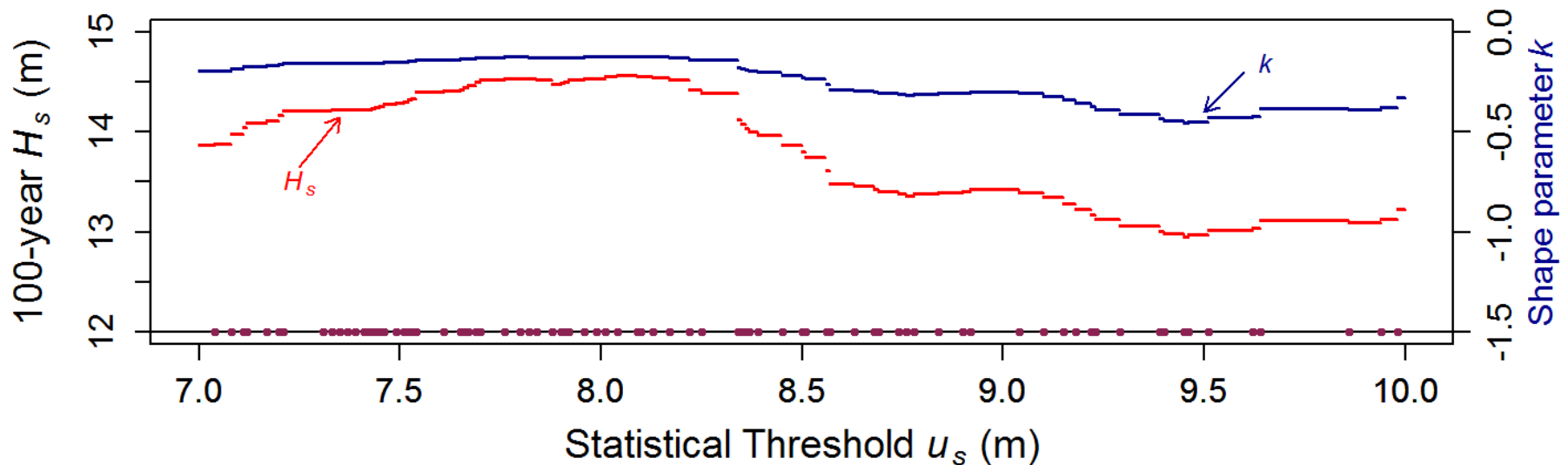




# Houles extrêmes : des pics de tempête aux évènements

## Sélection des pics de tempête

- Les pics de tempête extrêmes sont extrapolés au-dessus d'un seuil donné
  - ✓ → étude de sensibilité au seuil



- → 2 rôles très différents pour le seuil

# Houles extrêmes : des pics de tempête aux évènements

## Introduction du concept d'évènement dans le cas univarié

Autocorrelated time series of observations  $Z(t)$

(Bernardara et

al., 2014)

Sequential variables:

temporal evolution of the environmental variable  $Z$

### Sampling: Physical Declustering

Definition, identification, description  
of independent events

$X$ : Event-describing random variable

i.i.d. sample  $X_i$  (size  $N_T$ )

### Statistical Optimization

Setting a threshold for the convergence of the  $X_i$   
towards the GPD by determining the extreme domain  
in a statistical meaning

GPD-convergent sample  $Y_i = X_i - u_s |_{X_i > u_s}$  (size  $N$ )

Exceedances over the statistical threshold of the « extreme »  $X_i$

Evènement =  
tempête, submersion, vague  
de chaleur, cyclone, crue,  
épisode de pluie...

# Houles extrêmes : des pics de tempête aux évènements

## Introduction du concept d'évènement dans le cas univarié

Autocorrelated time series of observations  $Z(t)$

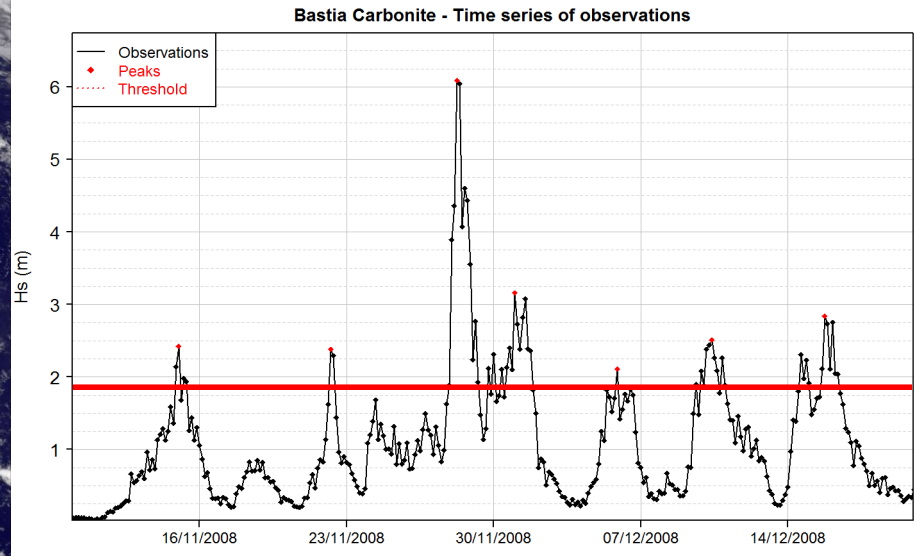
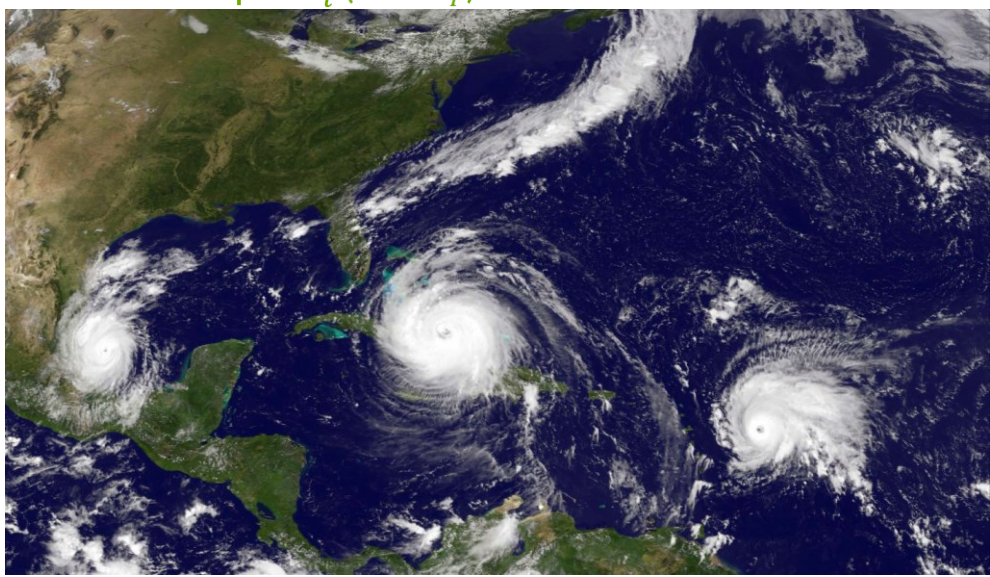
**Sequential variables:**  
temporal evolution of the environmental variable  $Z$

**Sampling: Physical Declustering**  
Definition, identification, description  
of independent events

Seuil physique  
 $u_p$

$X$ : Event-describing random variable

i.i.d. sample  $X_i$  (size  $N_T$ )



## Qu'est-ce qu'un évènement ? Les pistes de l'étymologie

### **D'après l'Académie française :**

*Du latin evenire “sortir, se produire”, lui-même de ex- “de” + venire “venir”*

- 1. Issue, conséquence bonne ou mauvaise d'une action ou d'une situation.*
- 2. Ce qui survient, ce qui arrive, en un temps et un lieu déterminés. PHYS. Tout phénomène se produisant en un point et à un instant donnés. MATH. En calcul de probabilités, résultat éventuel d'un tirage au sort, d'un jeu de hasard, d'un pronostic, etc.*

### **D'après l'Encyclopaedia de Diderot et d'Alembert :**

*Terme par lequel on désigne, ou la production, ou la fin, ou quelque circonstance remarquable et déterminée dans la durée de toutes les choses contingentes. Mais peut-être ce terme est-il un des radicaux de la langue : et servant à définir les autres termes, ne se peut-il définir lui-même ?*

- “ce qui résulte de” ou “ce qui advient” ?
- “en un temps et un lieu déterminés” ou “dans la durée” ?
- Signification physique ou signification probabiliste ?
- Cela peut-il même être défini ?

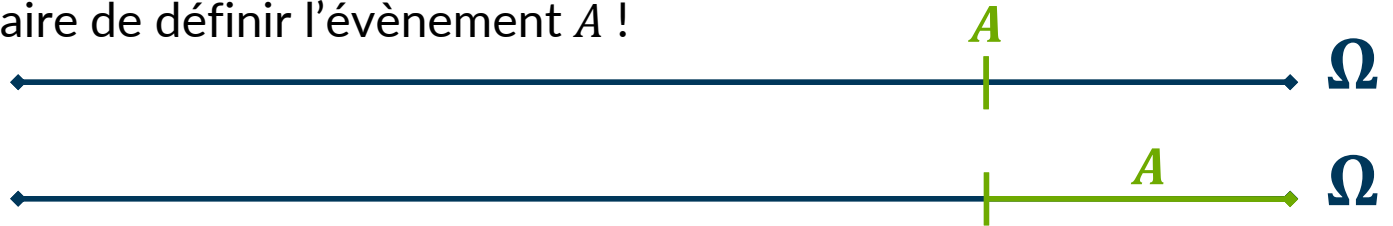
# Définition de l'évènement

## Le point de vue probabiliste

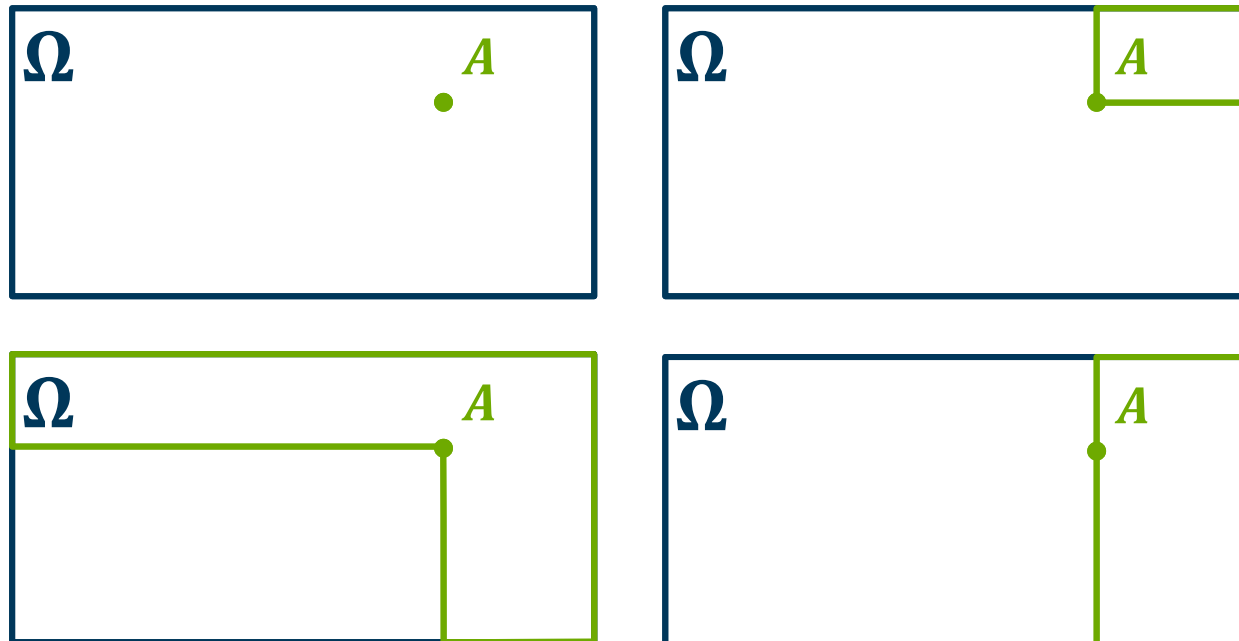
- **Probabilité**: mesure de la **vraisemblance** de l'occurrence d'un **évènement**  $A$ , un sous-ensemble de l'univers des résultats possibles  $\Omega$

- Il est nécessaire de définir l'évènement  $A$  !

✓ 1D:



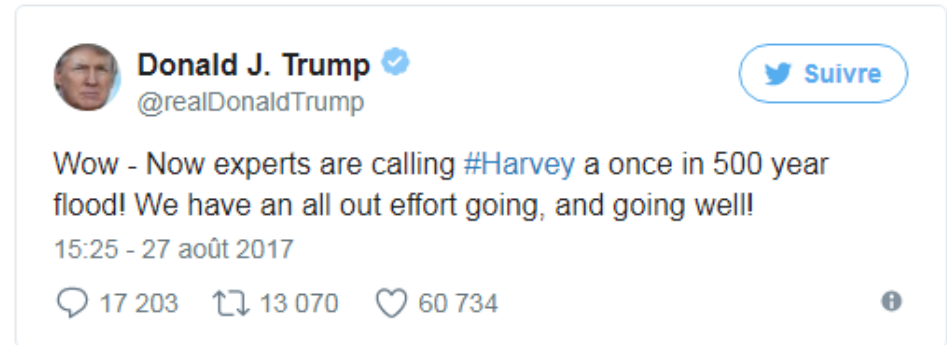
✓ 2D:



# Période de retour

## Définition de base... et mauvaises compréhensions communes

- La “durée moyenne entre deux occurrences de l'évènement” ???...



- ... ou plutôt une **probabilité annuelle de dépassement...**

$$\mathcal{T} = \frac{1}{\lambda P_A}$$

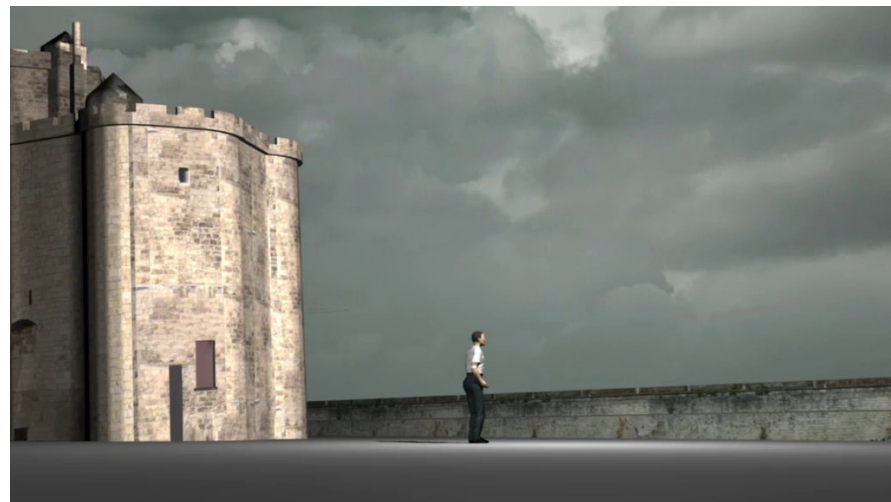
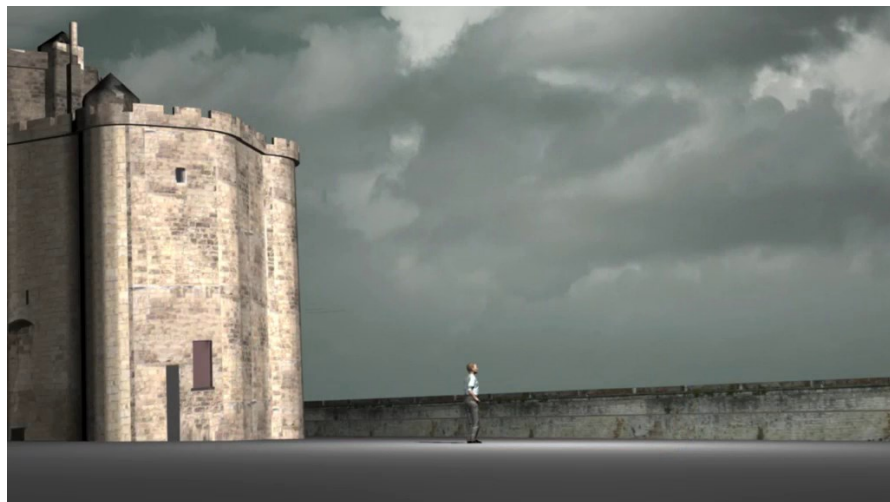
Paramètre de Poisson  $\lambda$ :  
nombre d'évènements / an



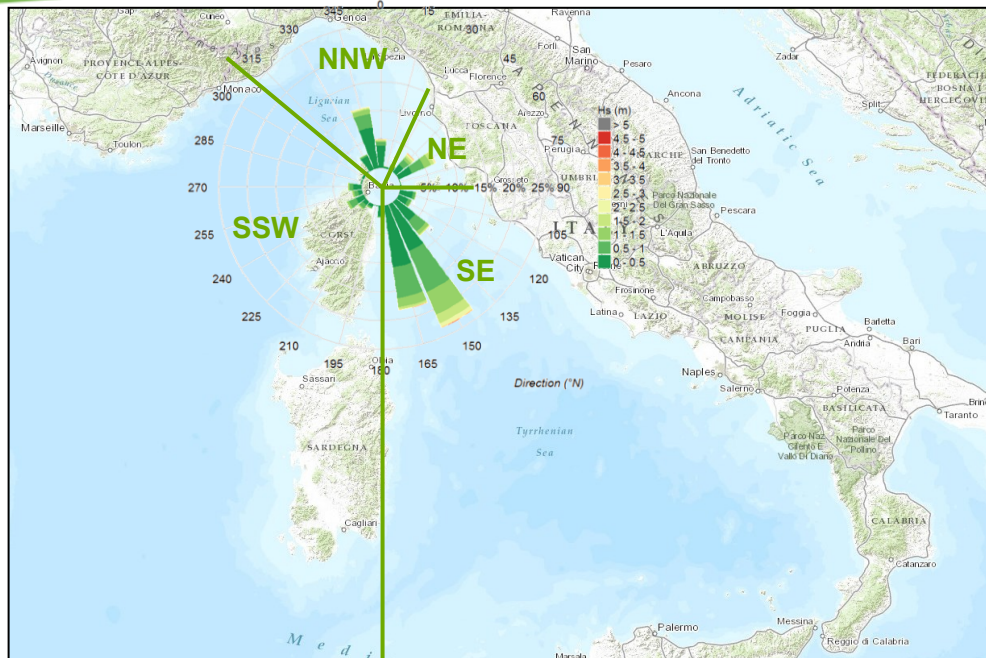
# Période de retour

## *Définition de base... et mauvaises compréhensions communes*

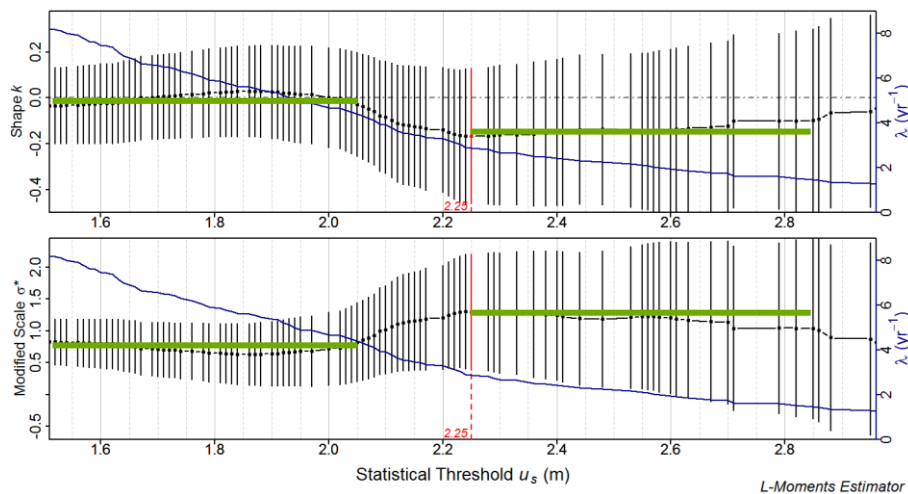
- ... à prendre en compte chacune des années de la durée de vie considérée



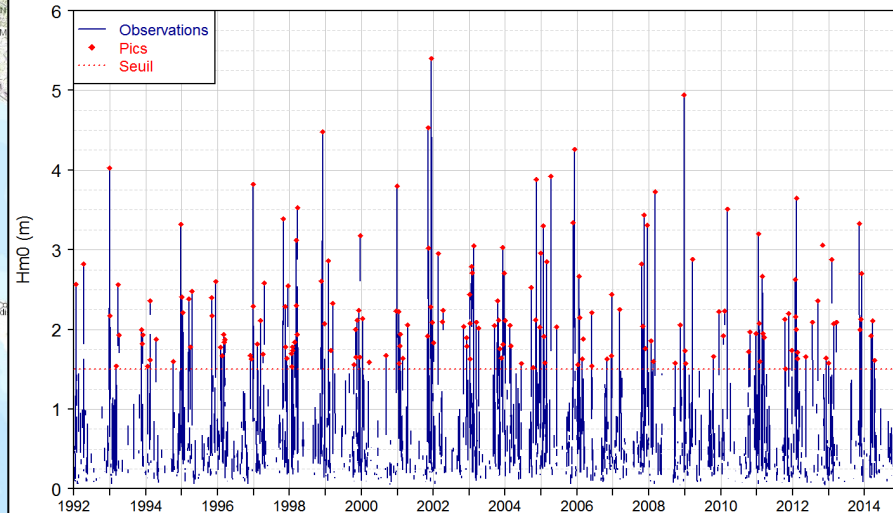
# Une méthodologie complète pour les extrêmes univariés



Bastia Carbonite PL NE - Stability of parameters for law GPD



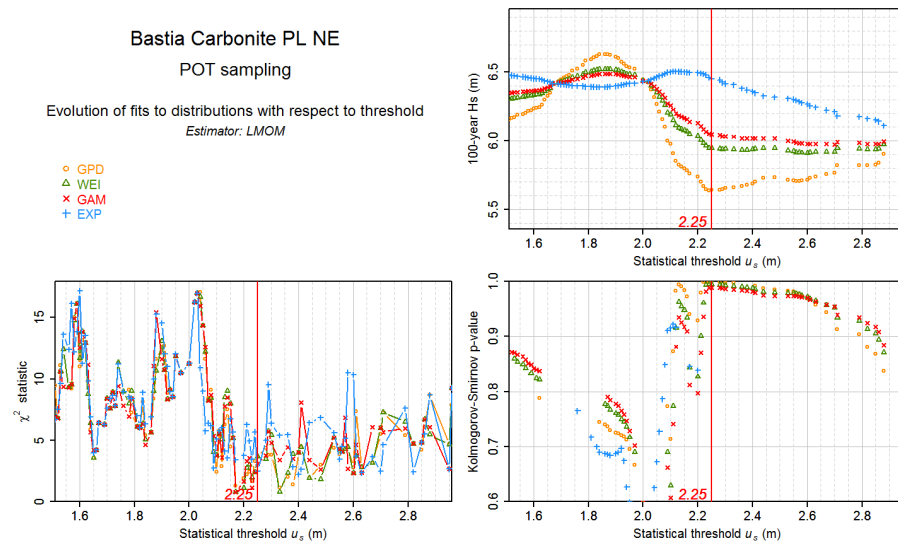
Bastia Carbonite PL NE - Série des observations - Seuil : 1.50 m



Bastia Carbonite PL NE

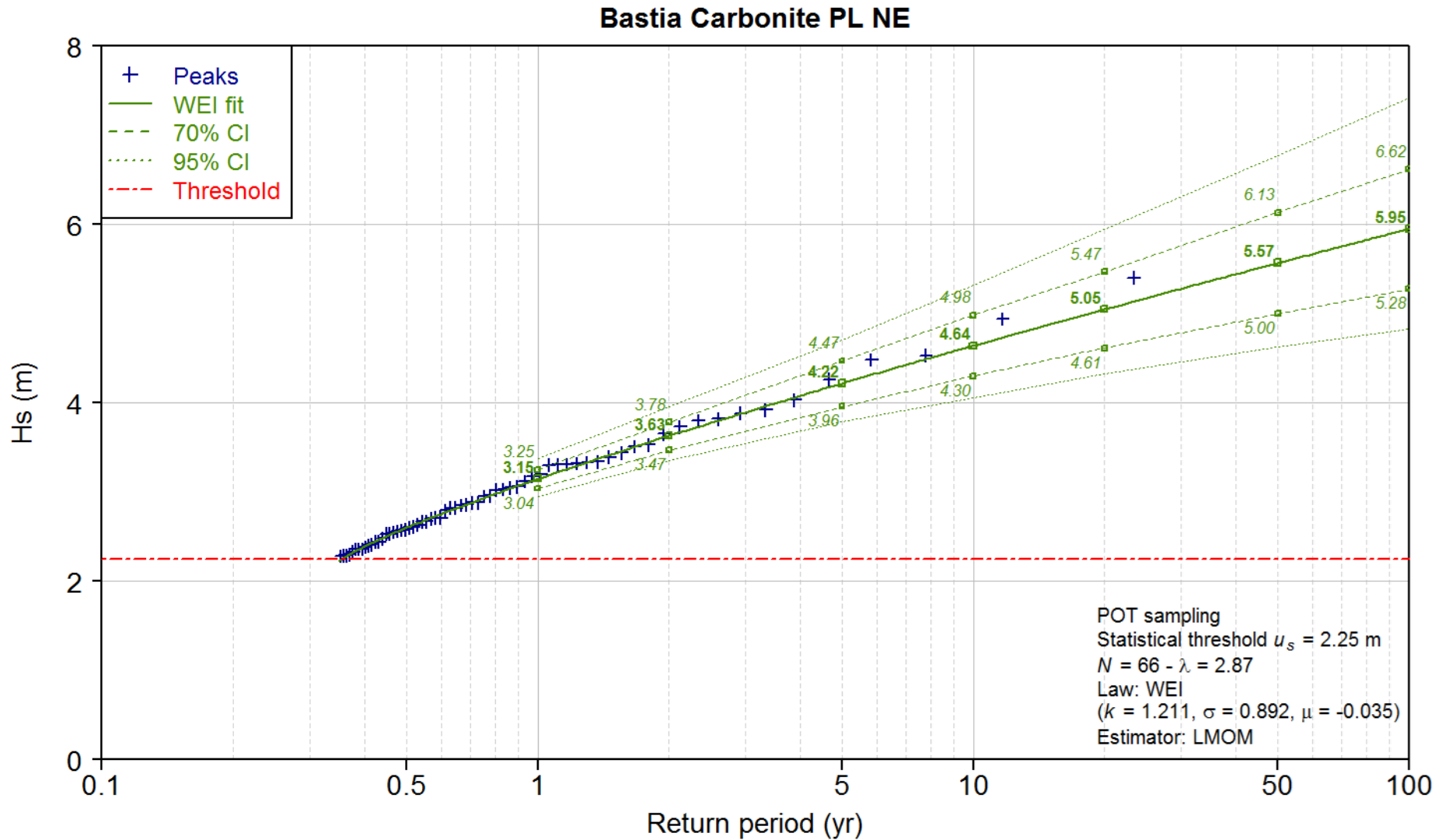
POT sampling

Evolution of fits to distributions with respect to threshold  
Estimator: LMOM





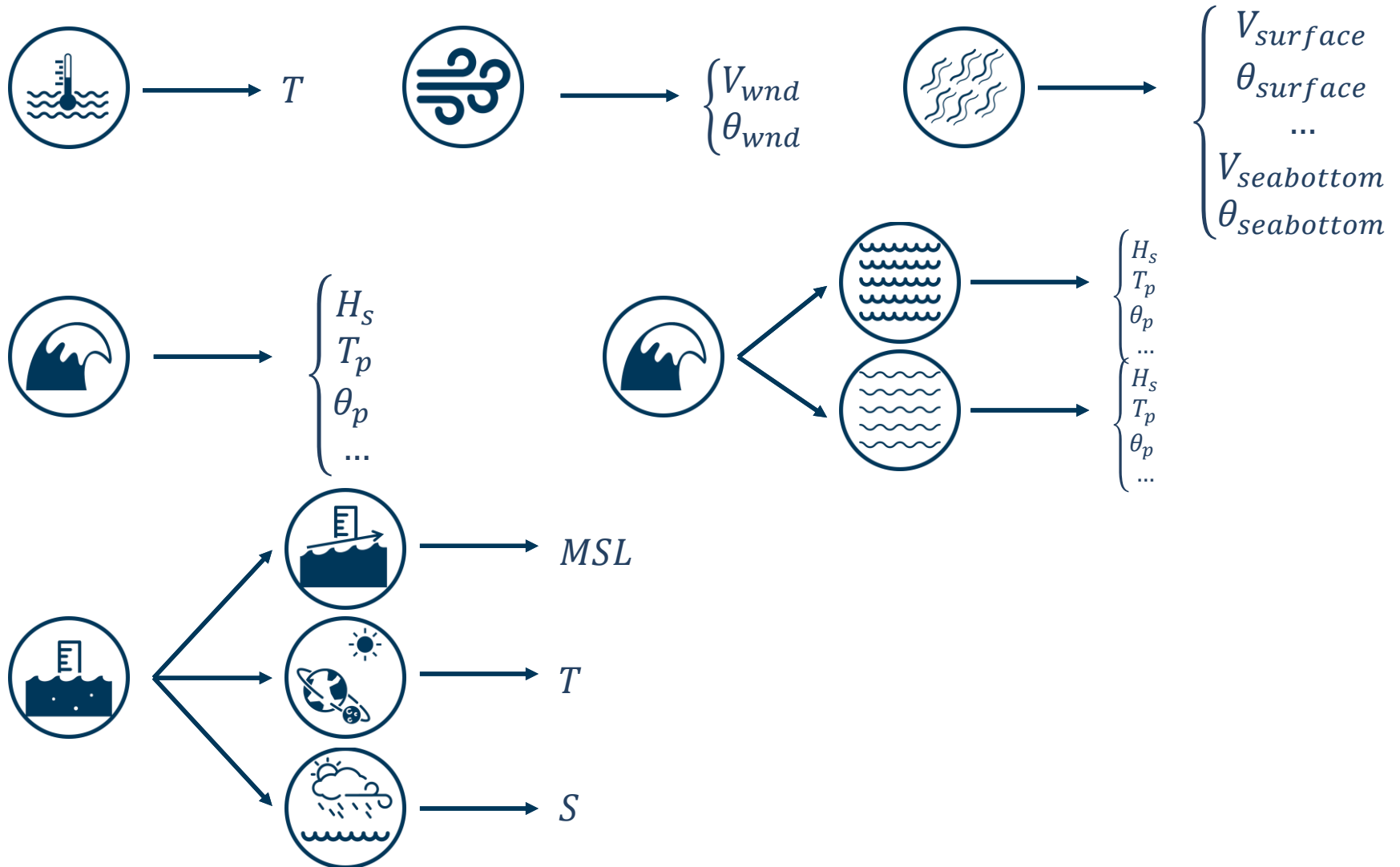
# Une méthodologie complète pour les extrêmes univariés



# Evènements extrêmes multivariés

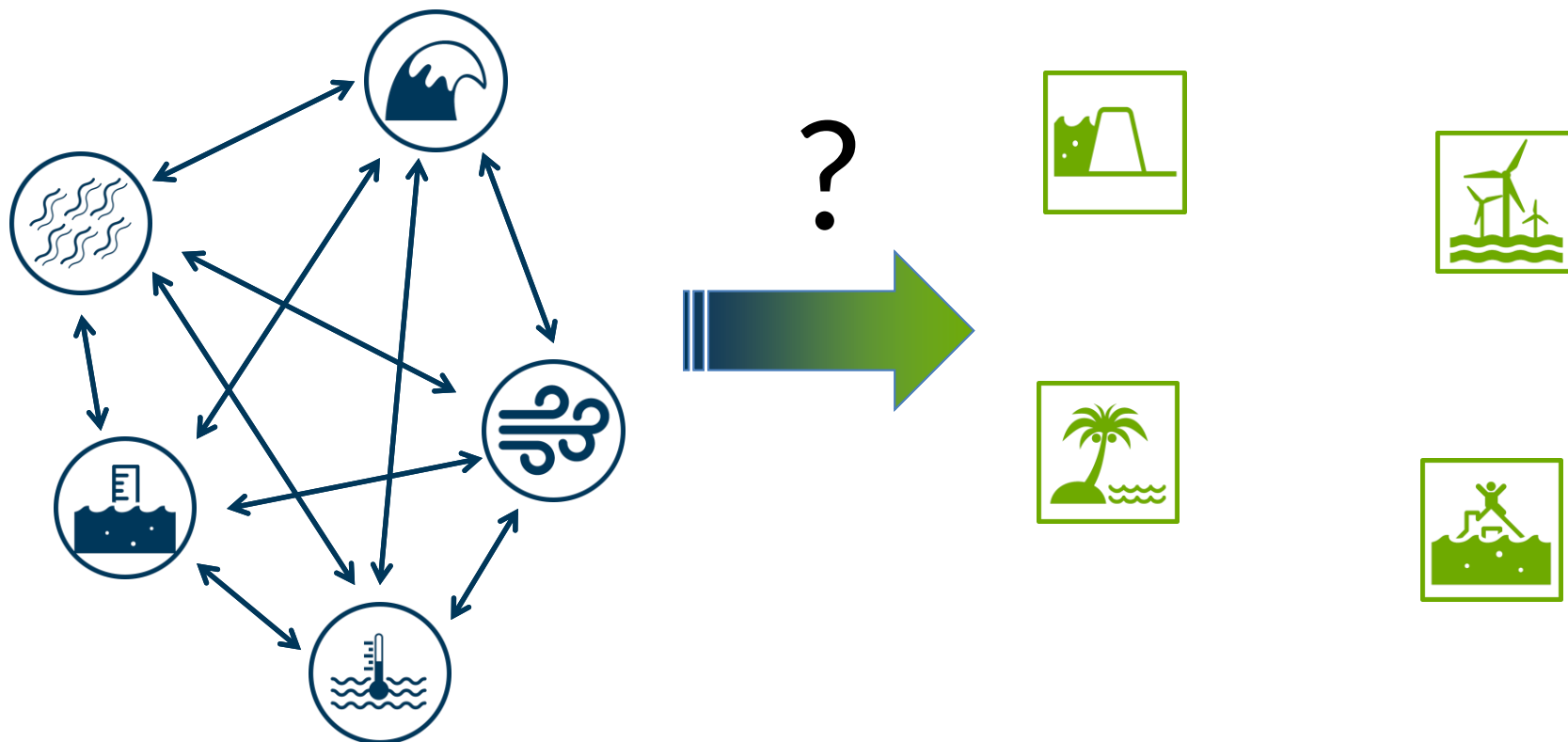
# Evènements multivariés : définition

## Phénomènes météo-océaniques : description et composantes



# Evènements multivariés : définition

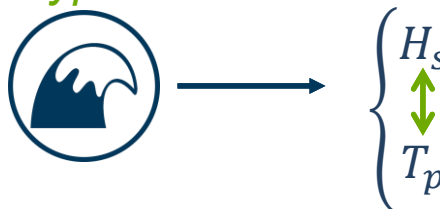
## Combinaisons



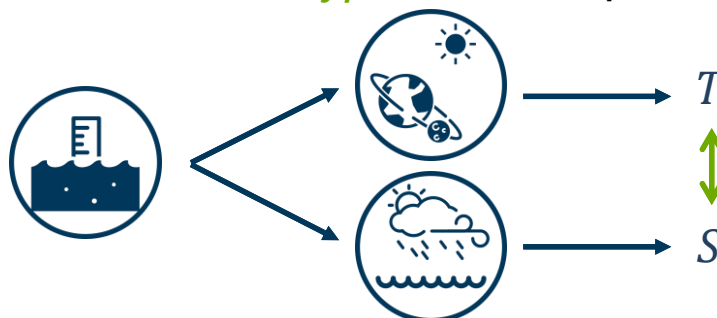
# Evènements multivariés : définition

## Une classification pour les analyses multivariées

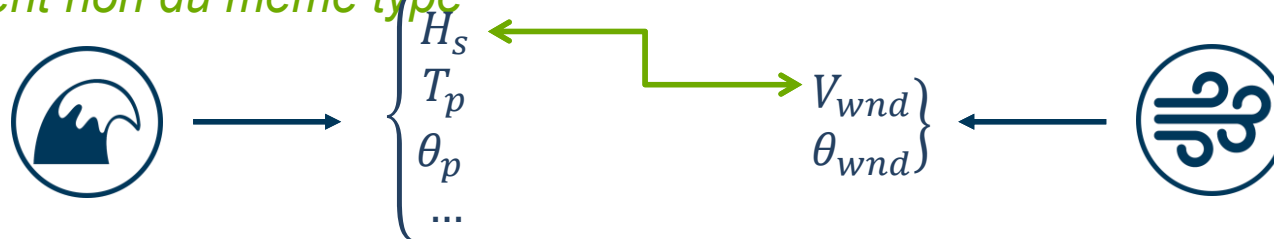
- **Type A** : un *phénomène unique* décrit par différentes *quantités physiques*, *possiblement non du même type*



- **Type B** : un *phénomène* comprenant différentes *composantes*, décrites par des *quantités physiques du même type* d'un composant à l'autre



- **Type C** : plusieurs *phénomènes* décrits par des *quantités physiques*, *possiblement non du même type*



# Définition de l'évènement et échantillonnage

## *Un choix à faire en fonction de l'objectif de l'étude*

- Définition de l'évènement :
  - ✓ Type A: choix d'une *event-defining variable* → méthodes univariées (POT / AMM...)
  - ✓ Type B: peut généralement être facilement défini sur chaque composant et sur le phénomène global → méthodes univariées (POT / AMM...)
  - ✓ Type C: choix à faire entre plusieurs *phénomènes source (actions)* et un possible *phénomène de réponse*
- Un exemple de visualisation : l'approche Source-Receptor-Pathway



- La définition de l'évènement découle de l'échantillonnage

# Evènements multivariés: échantillonnage

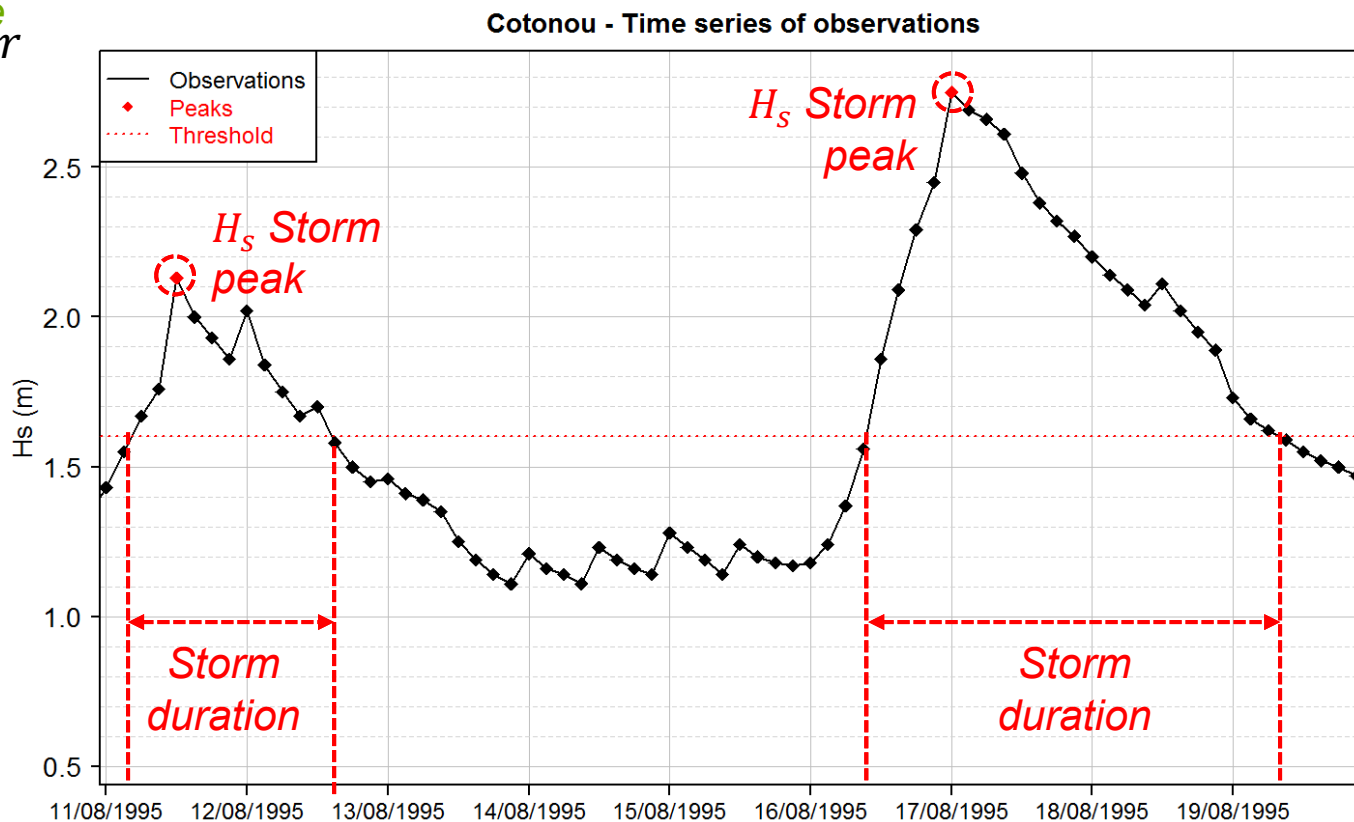
Type A : declustering POT d'une « event-defining variable » choisie

■ Echantillonnage = **définition**, **identification** et **description** de l'évènement

✓ *Définition de l'évènement* : fortes valeurs de hauteur de vagues  $H_s$

✓ *Identification de l'évènement* : seuil physique, paramètres temporels pour l'indépendance...

Ex :  $H_s$  /  $Dur$

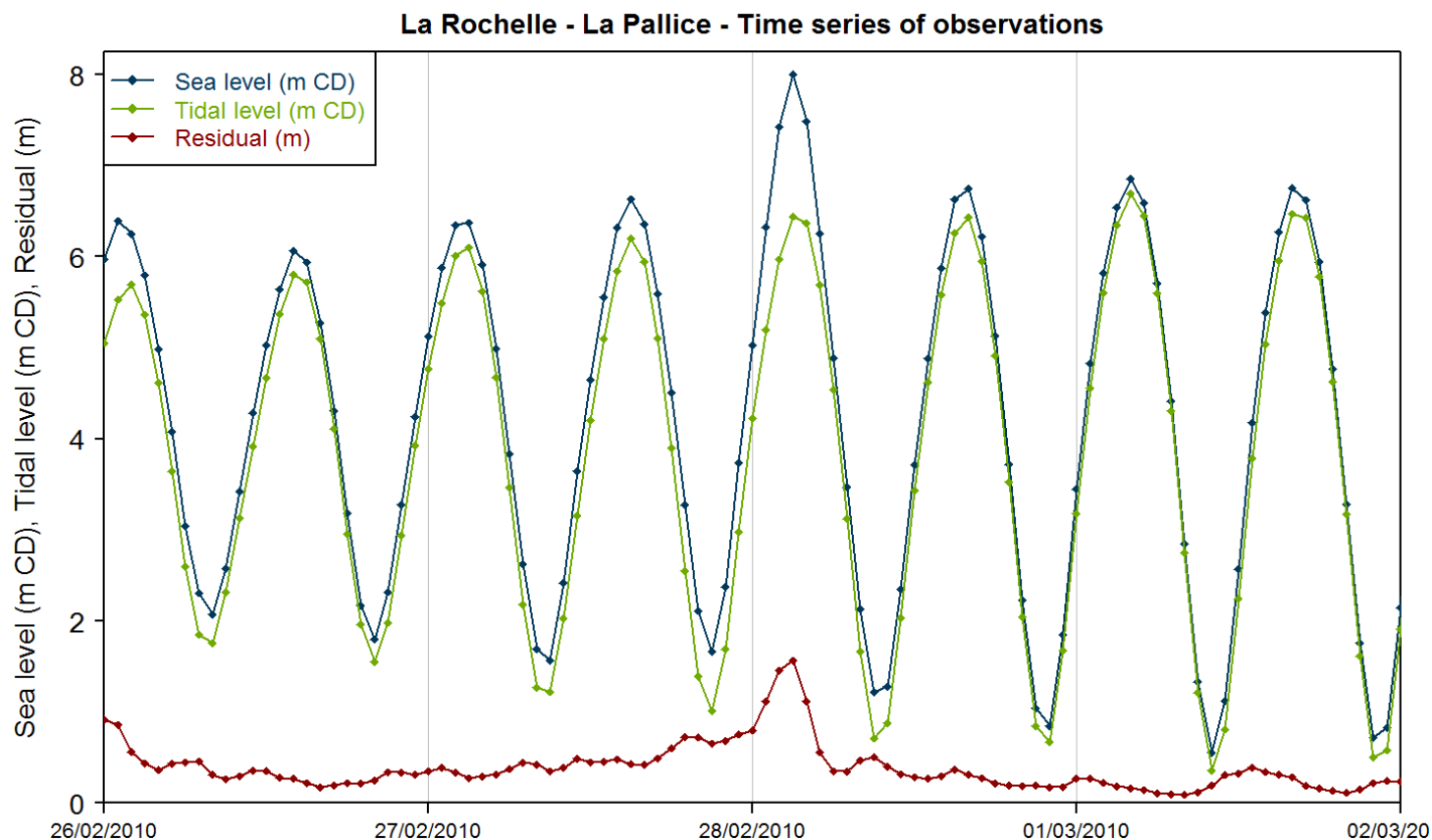


J pic...

# Evènements multivariés: échantillonnage

## Type B : declustering POT sur une seule variable

- Cas des niveaux marins extrêmes = marée astronomique + surcote météo :
  - ✓ *Marée astronomique* : variable déterministe → pas besoin d'échantillonnage
  - ✓ *Surcote météorologique* : declustering POT classique

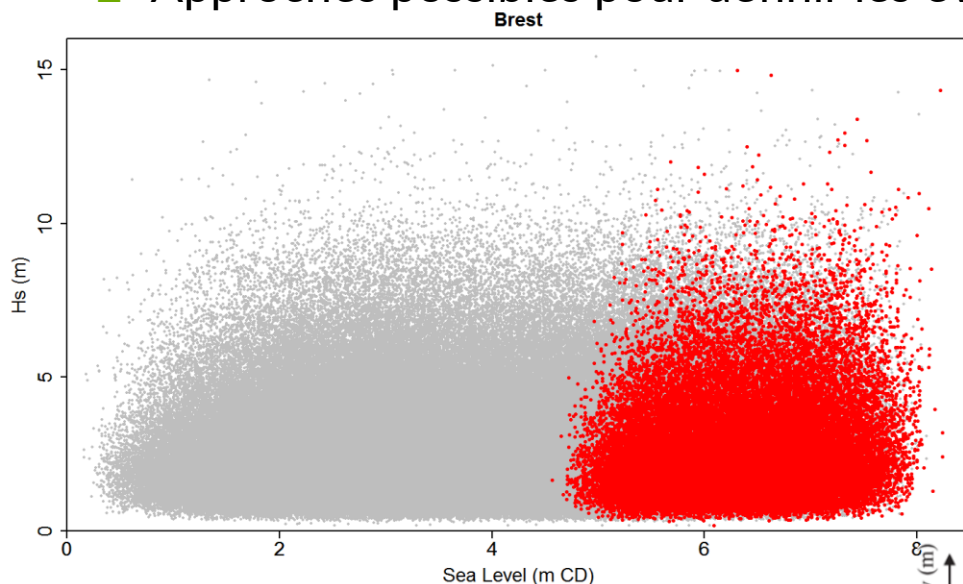




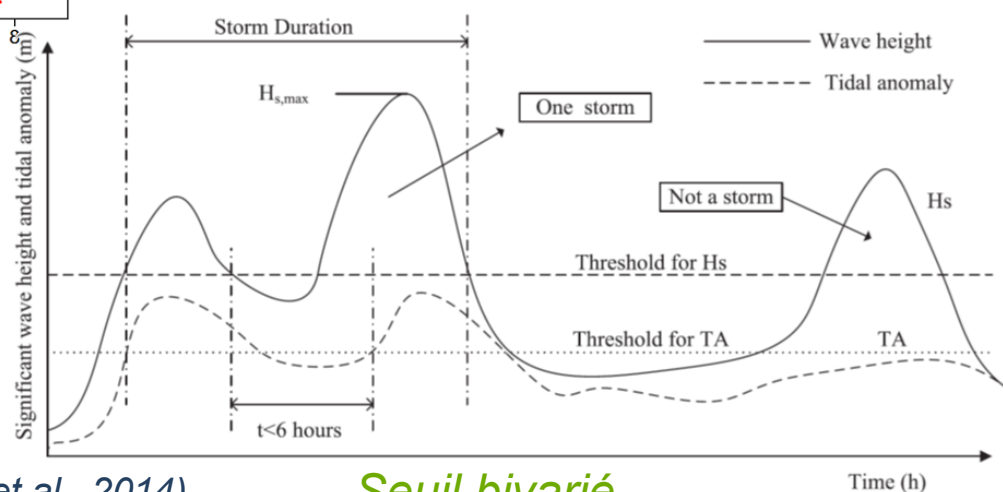
# Evènements multivariés: échantillonnage

## Type C

- Approches possibles pour définir les évènements par échantillonnage :



*Echantillonnage à pleine mer*



(Li et al., 2014)

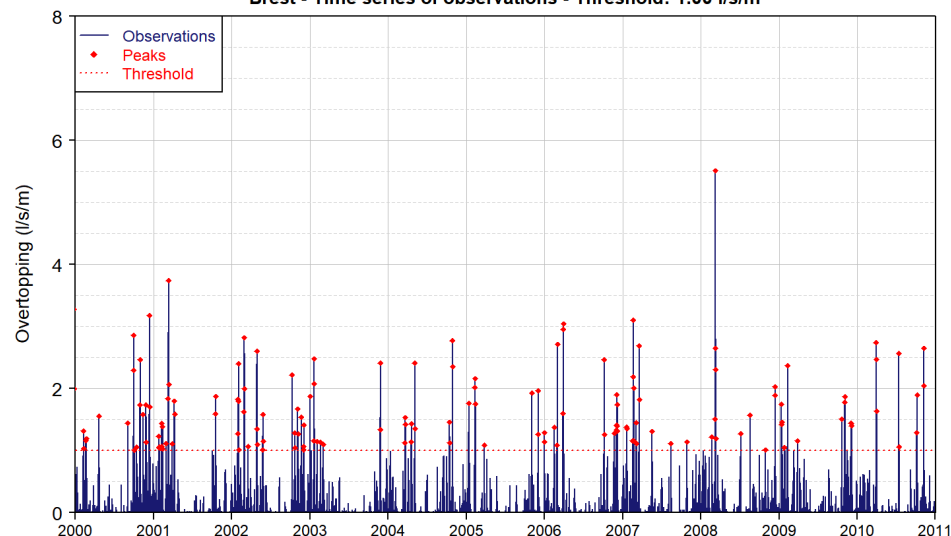
*Seuil bivarié*

# Evènements multivariés: échantillonnage

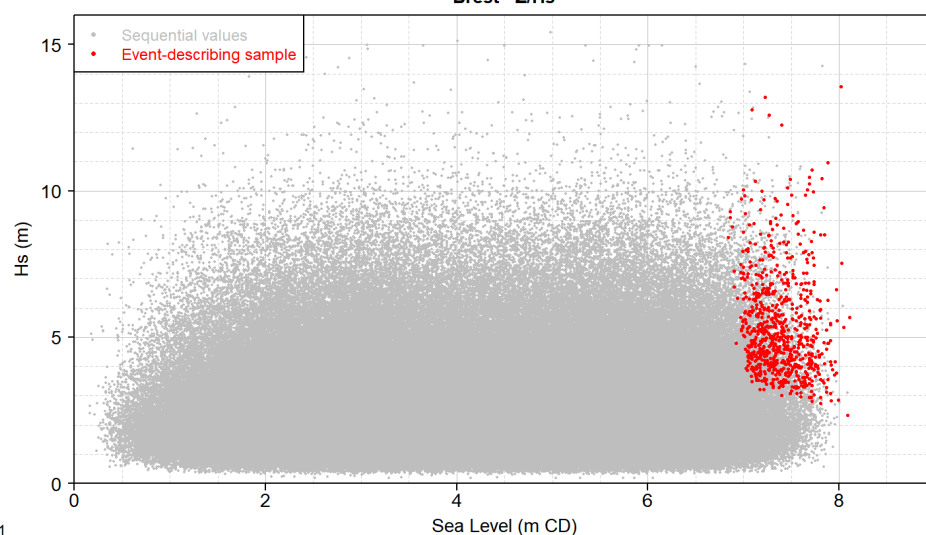
## Type C

- Approches possibles pour définir les évènements par échantillonnage :

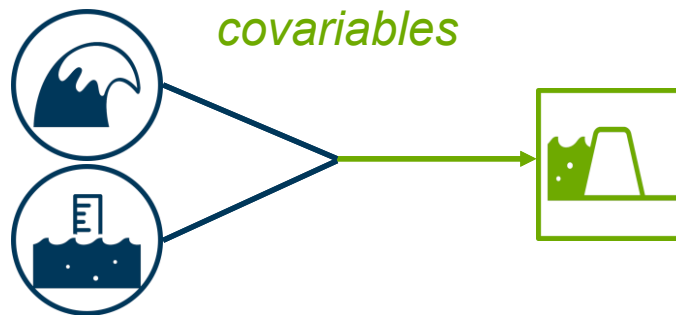
Brest - Time series of observations - Threshold: 1.00 l/s/m



Brest - Z/Hs



*Echantillonnage à partir d'une fonction univariée de réponse combinant les variables sources (actions) et possiblement les covariables*



# Evènements multivariés: distribution

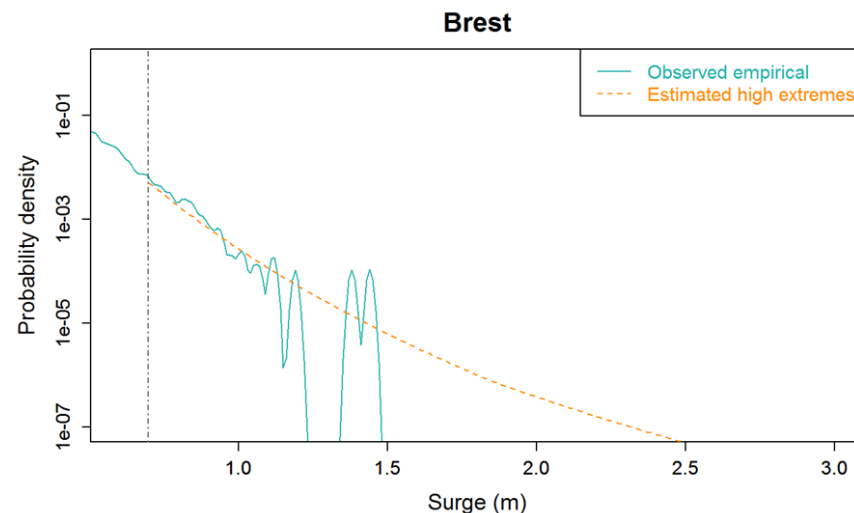
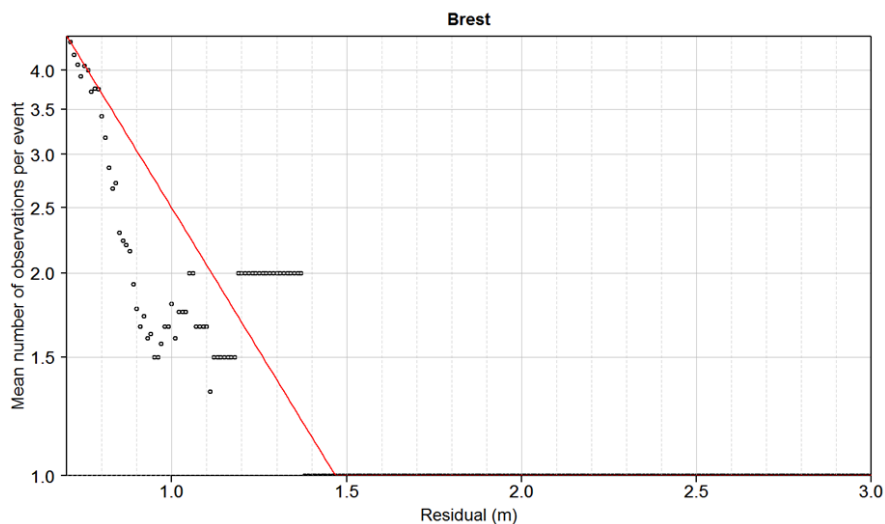
## Type B : quantités physiques du même type – approche indirecte

### ■ Besoin d'une distribution mixte pour les pics et les valeurs séquentielles :

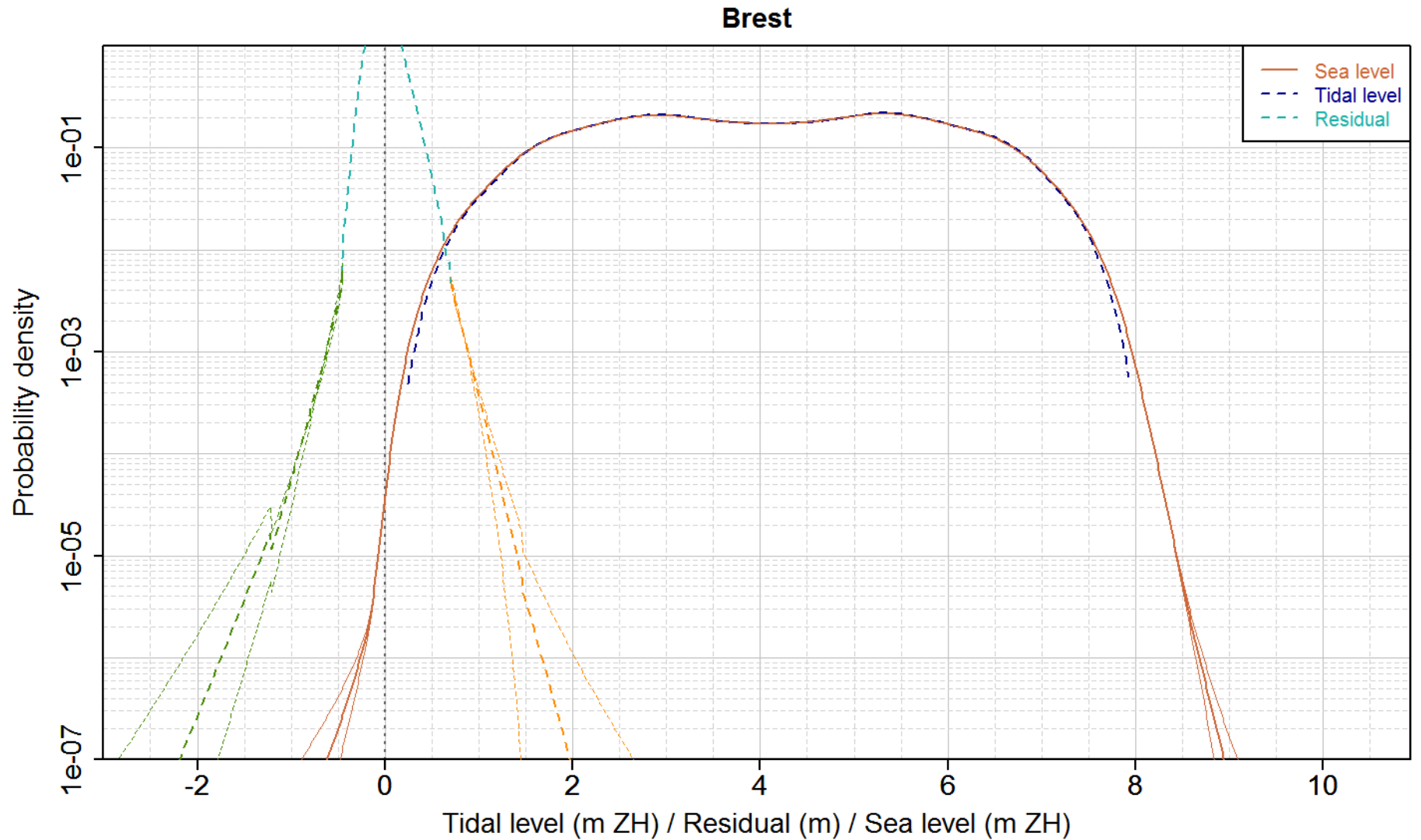
- ✓ 1. extrapolation des pics de surcote extrêmes ;
- ✓ 2. distribution des valeurs séquentielles de surcote ;
- ✓ 3. distribution des valeurs séquentielles de marée astronomique ;
- ✓ 4. distribution des valeurs séquentielles de niveau marin par convolution ;
- ✓ 5. distribution des pics de niveau marin extrêmes.

### ■ Adaptation de l'indice extrémal aux analyses POT :

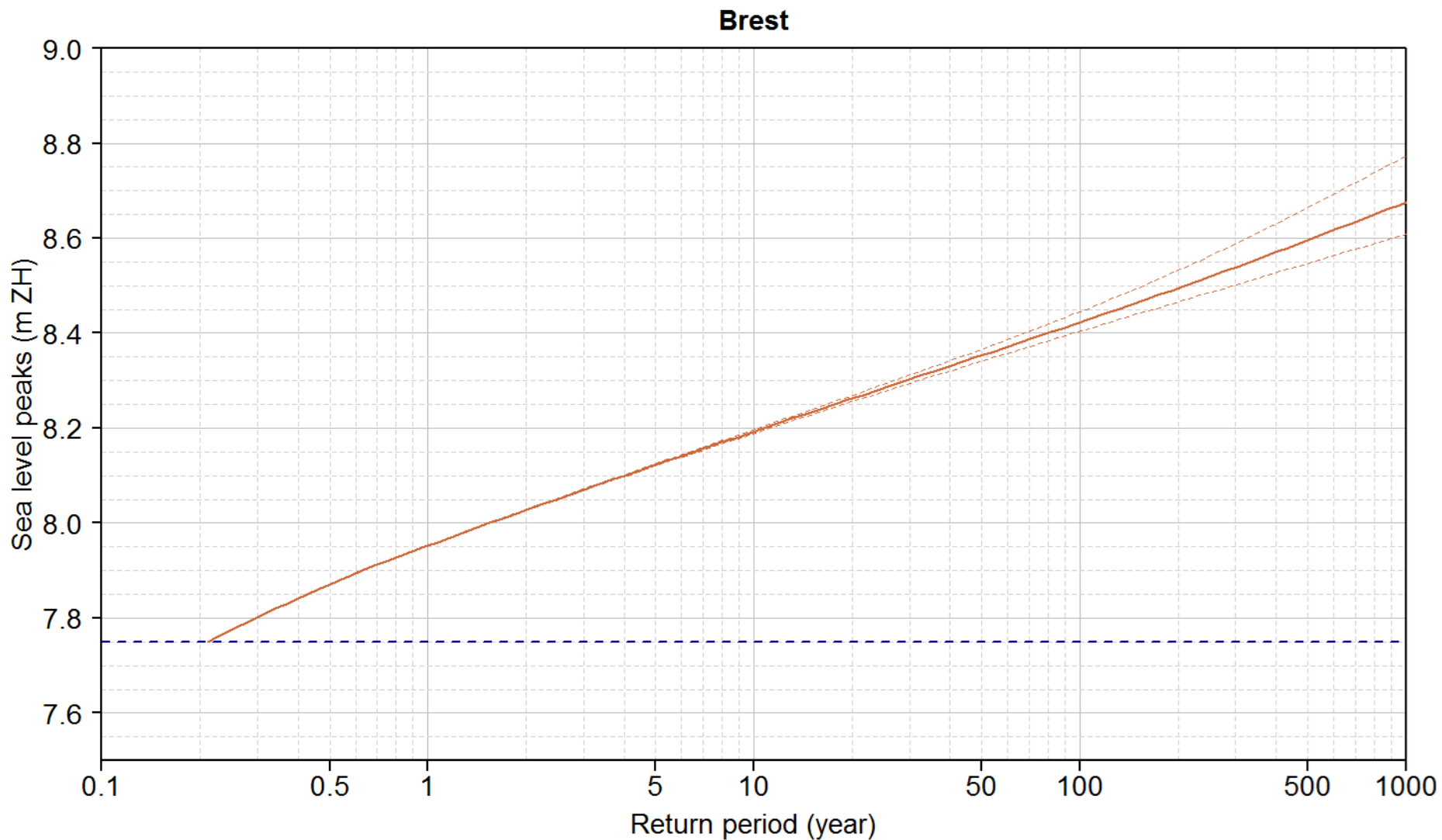
$$F_S(s) = 1 + \frac{N}{vK} d_S(s) [G_{PS}(s) - 1]$$



# Evènements multivariés: distribution



# Evènements multivariés: distribution

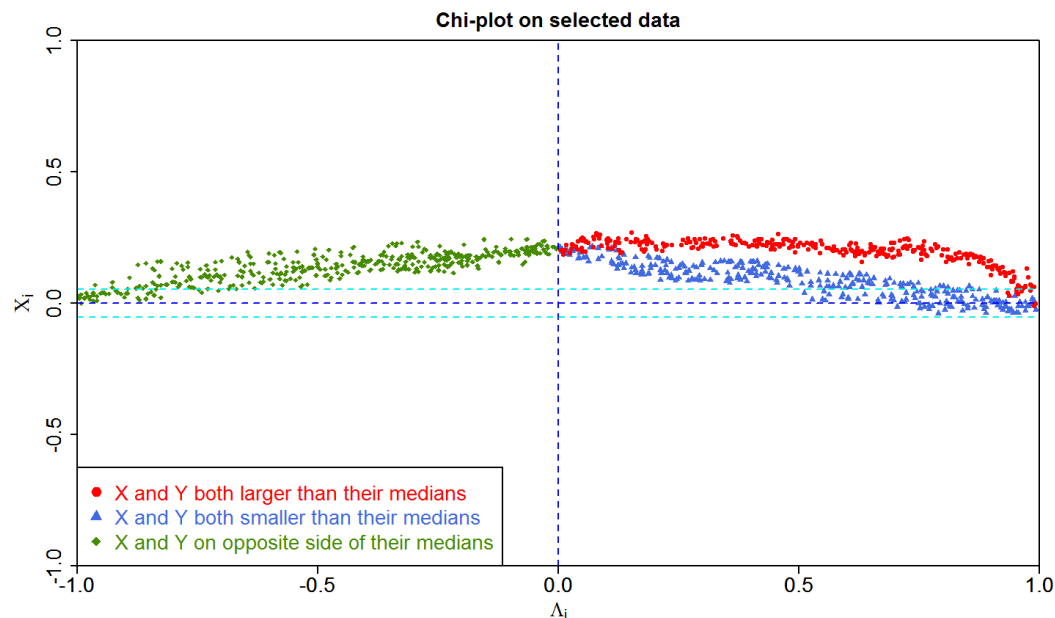
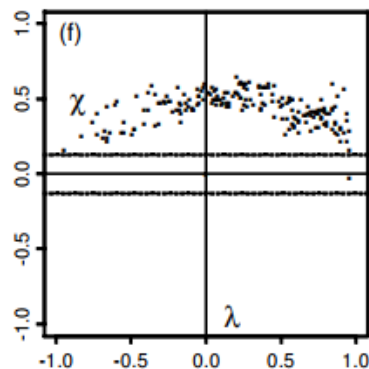
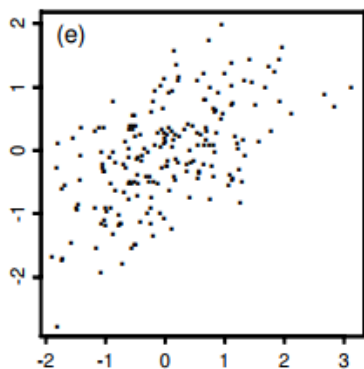


# Evènements multivariés: distribution jointe

Type A & C : quantités physiques de type différent

■ Evaluation de la dépendance :

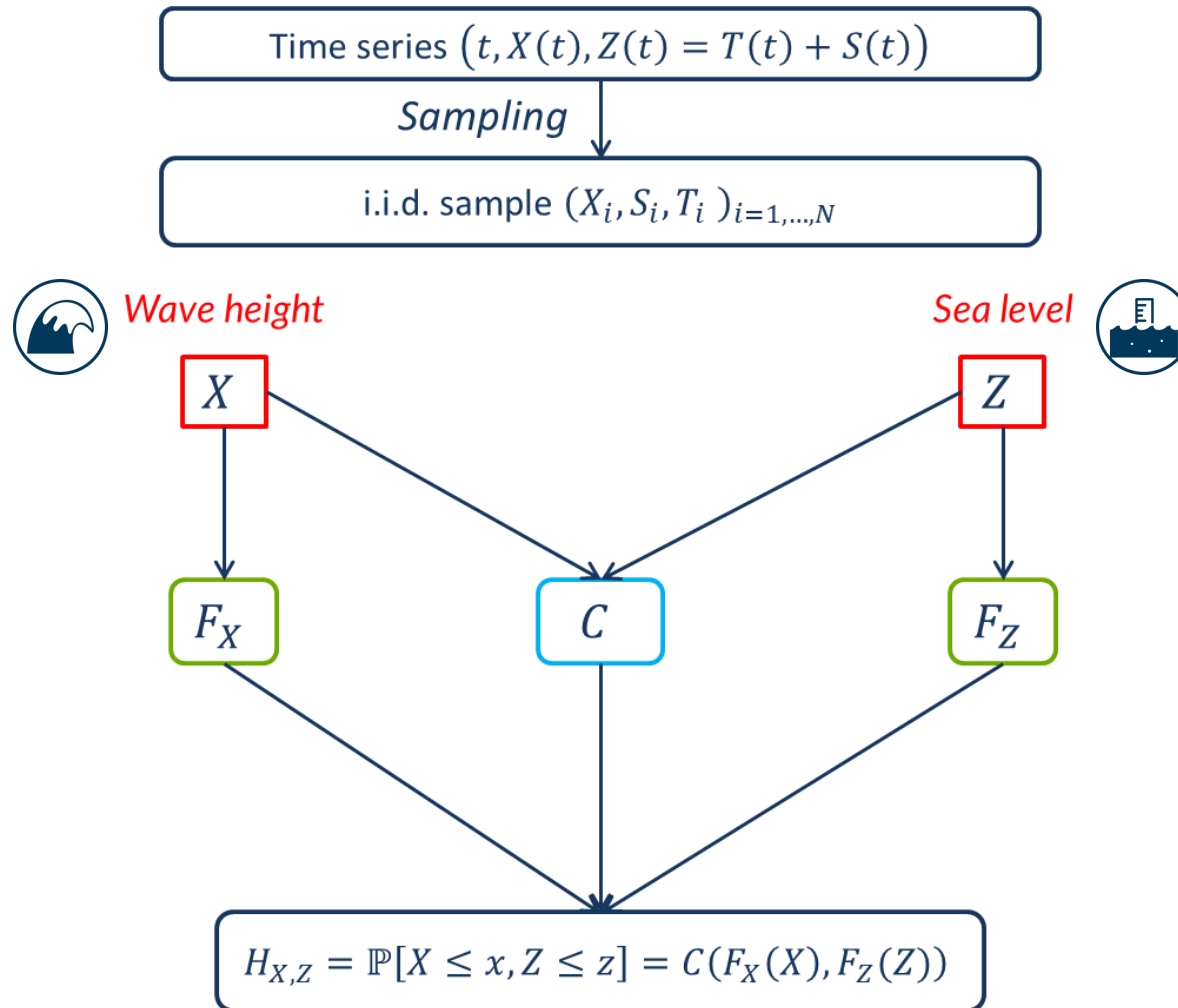
✓ Chi-plot



✓ upper tail dependence coefficient  $\lambda_U = \lim_{t \rightarrow 1^-} \mathbb{P}[F_X(x) > t | F_Y(y) > t]$

# Evènements multivariés: distribution jointe

Type A & C : quantités physiques de type différent



# Evènements multivariés: distribution jointe

## Type A & C : quantités physiques de type différent

- Distribution conjointe : emploi des copules des valeurs extrêmes

- ✓ copule de **Gumbel-Hougaard** (logistique) :

$$C_{\theta}(u, v) = \exp \left\{ - \left( (-\log u)^{\theta} + (-\log v)^{\theta} \right)^{\frac{1}{\theta}} \right\}$$

- ✓ copule de **Galambos** (logistique négative) :

$$C_{\theta}(u, v) = u \times v \times \exp \left\{ \left( (-\log u)^{-\theta} + (-\log v)^{-\theta} \right)^{-\frac{1}{\theta}} \right\}$$

- ✓ copule de **Hüsler-Reiss** :

$$C_{\theta}(u, v) = \exp \left\{ -\tilde{u} \Phi \left( \frac{1}{\theta} + \frac{\theta}{2} \log \left( \frac{\tilde{u}}{\tilde{v}} \right) \right) - \tilde{v} \Phi \left( \frac{1}{\theta} + \frac{\theta}{2} \log \left( \frac{\tilde{v}}{\tilde{u}} \right) \right) \right\}$$

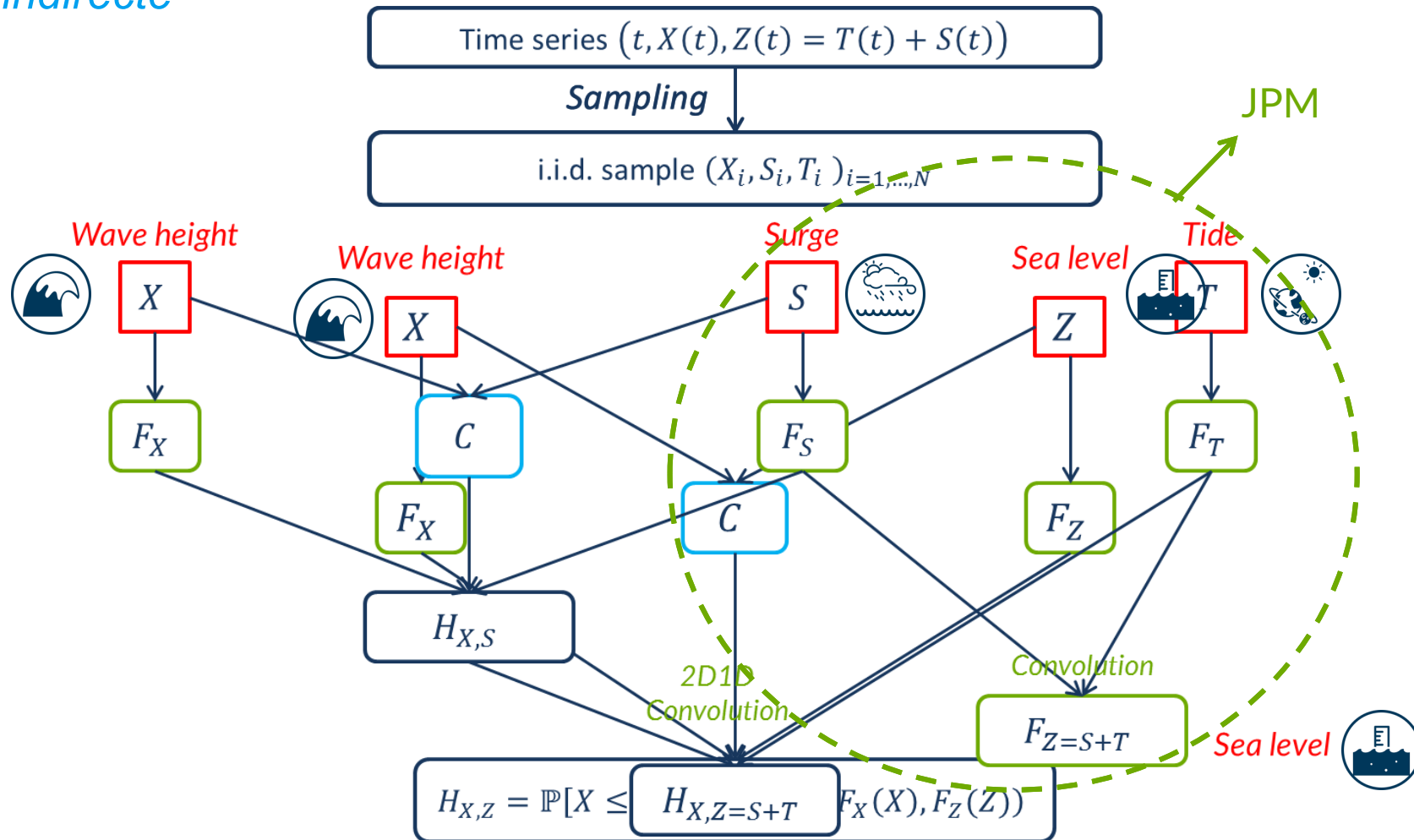
- Estimateur :

- ✓ **Canonical Maximum Likelihood** (CML)
- ✓ estimation par  $\lambda_U$
- ✓ ...



# Evènements multivariés: distribution jointe

Cas des états de mer et du niveau marin : introduction de l'approche indirecte

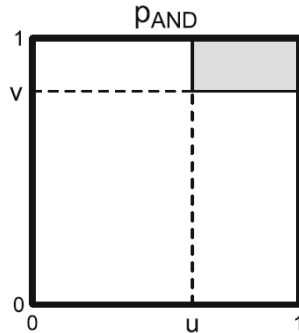


# Période de retour

## Définitions possibles dans le cas bivarié

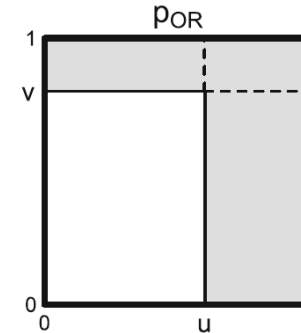
- 2D: peut être défini par la probabilité de...

- ✓ Dépassement conjoint



$$p_{AND} = \mathbb{P}[U > u \cap V > v] = \frac{1}{\lambda \mathcal{J}_{AND}}$$

- ✓ Dépassement par au moins une variable



$$p_{OR} = \mathbb{P}[U > u \cup V > v] = \frac{1}{\lambda \mathcal{J}_{OR}}$$

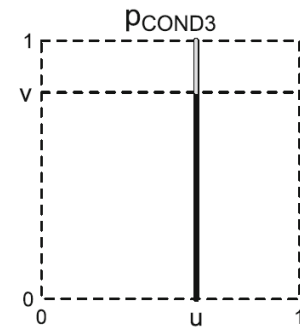
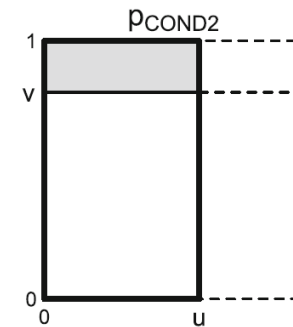
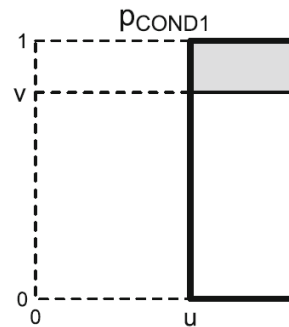
(Serinaldi, 2015)

- ✓ ... ou autres

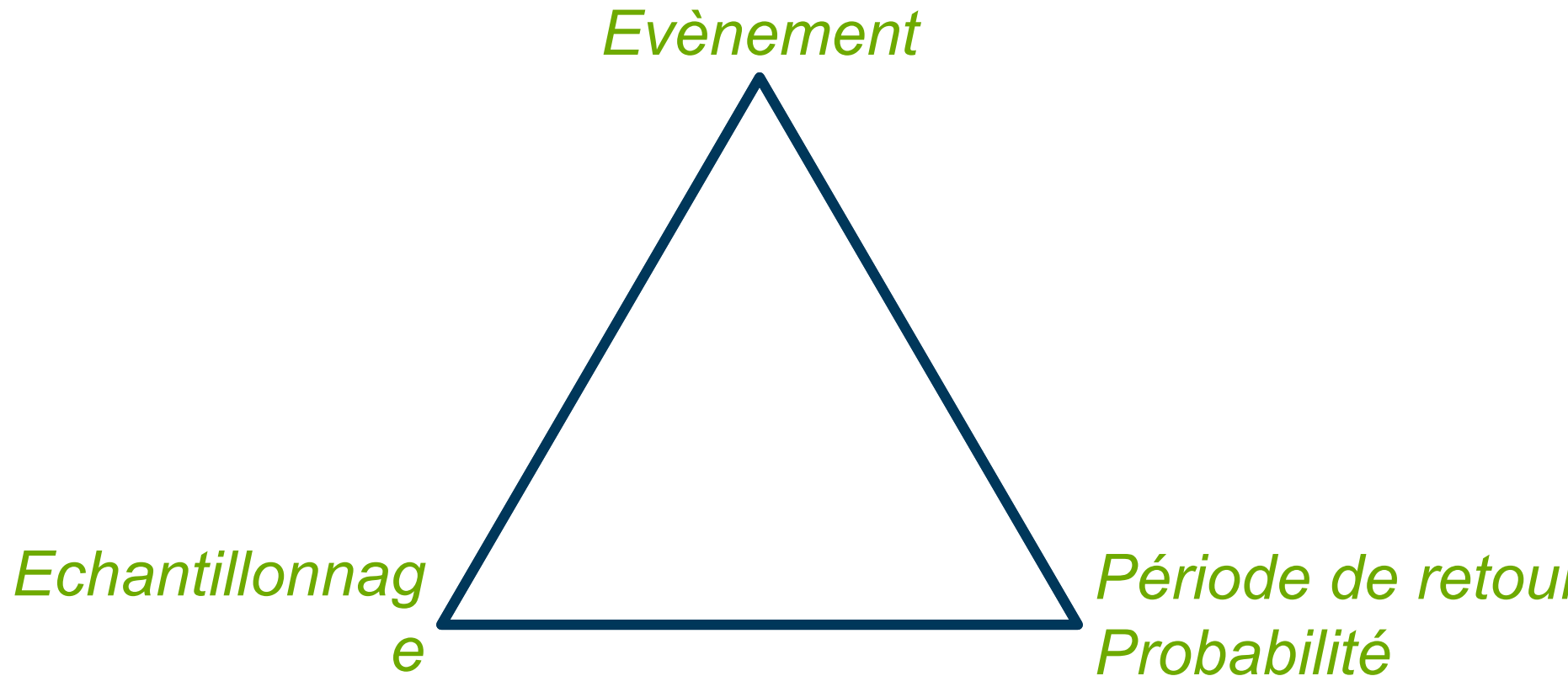
$$p_{COND1} = \mathbb{P}[V > v | U > u] = \frac{1}{\lambda \mathcal{J}_{COND1}}$$

$$p_{COND2} = \mathbb{P}[V > v | U \leq u] = \frac{1}{\lambda \mathcal{J}_{COND2}}$$

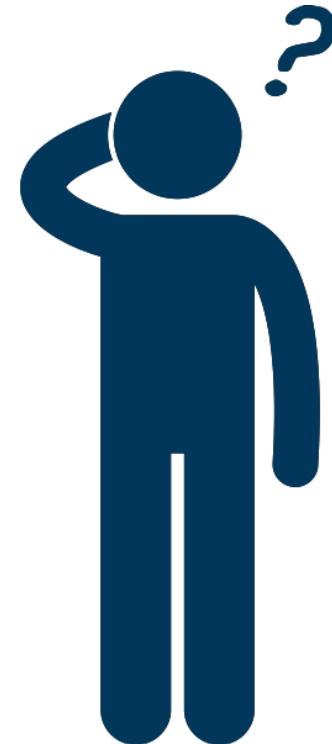
$$p_{COND3} = \mathbb{P}[V > v | U = u] = \frac{1}{\lambda \mathcal{J}_{COND3}}$$



$$\mathcal{J}_{OR} \leq \min(\mathcal{J}_X, \mathcal{J}_Y) \leq \max(\mathcal{J}_X, \mathcal{J}_Y) \leq \mathcal{J}_{AND} \leq \mathcal{J}_{COND1}$$



*“Please provide the 100-year contours of waves and sea levels.”*



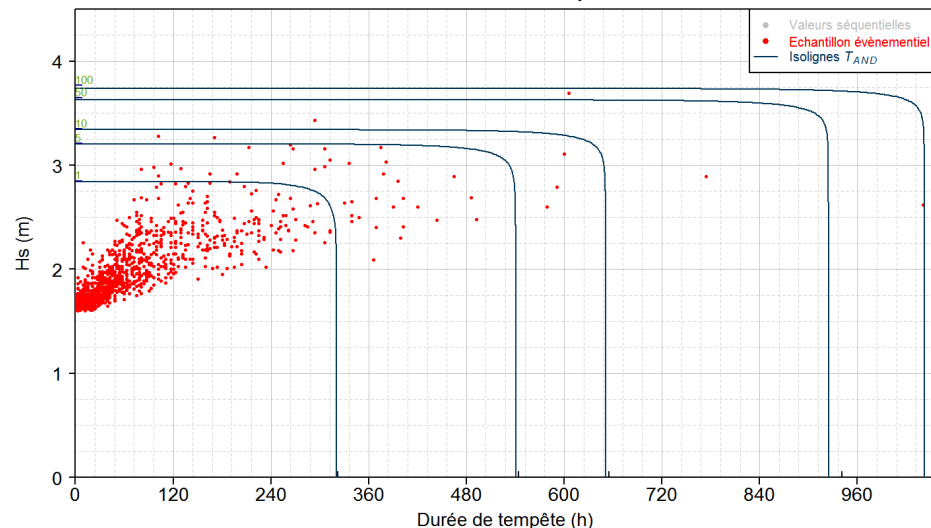
# Analyses extrêmes bivariées

## Exemples - Type A: $H_s$ / Durée de tempête

- Variables évènementielles seulement (pas d'équivalent séquentiel pour la durée de tempête)



Cotonou - Durée de tempête/ $H_s$

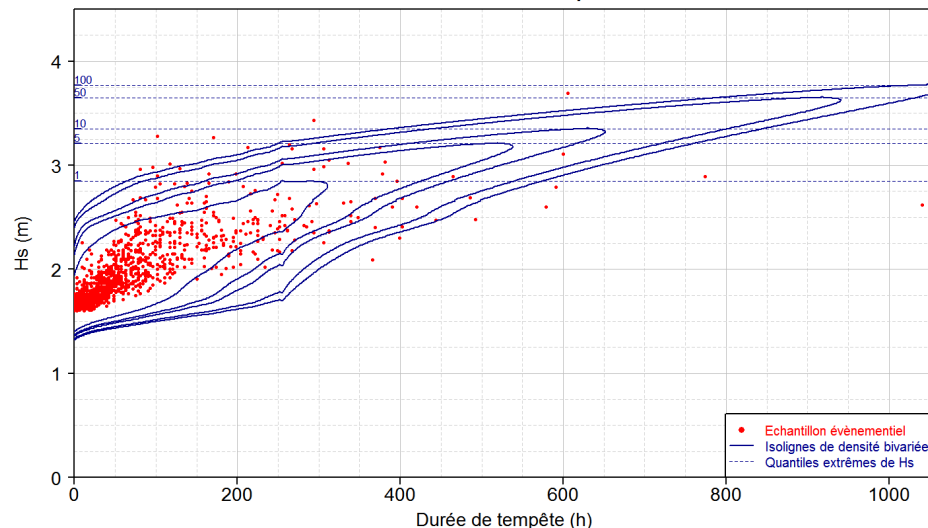


$\mathcal{T}_{AND}$

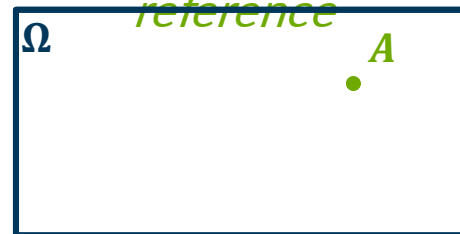
Probabilité de dépassement conjoint



Cotonou - Durée de tempête/ $H_s$



Contours d'iso-densité à partir de la distribution marginale de la variable de référence

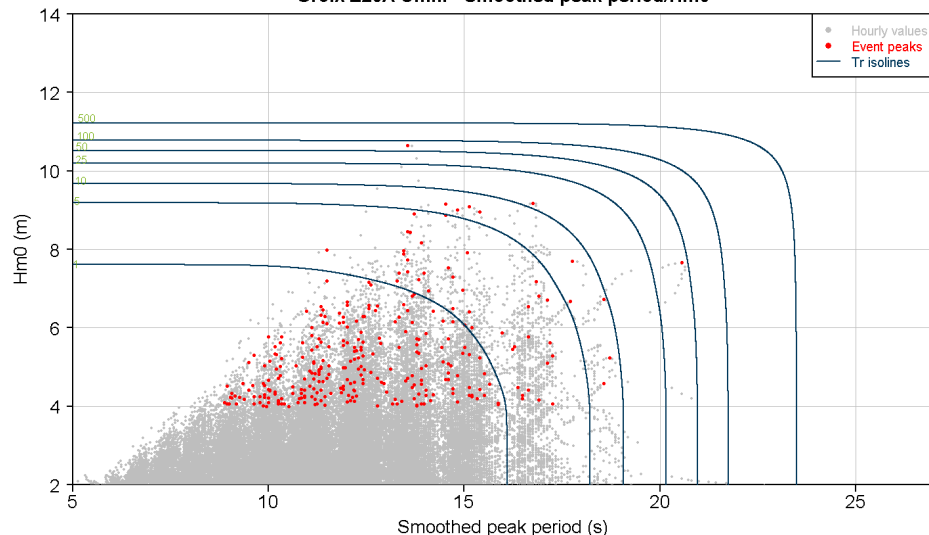


# Analyses extrêmes bivariées

Exemples - Type A :  $H_s / T_p$  

- Analyse sur la variable événementielle ou sur la variable séquentielle ?

Groix Z20A Omni - Smoothed peak period/Hm0

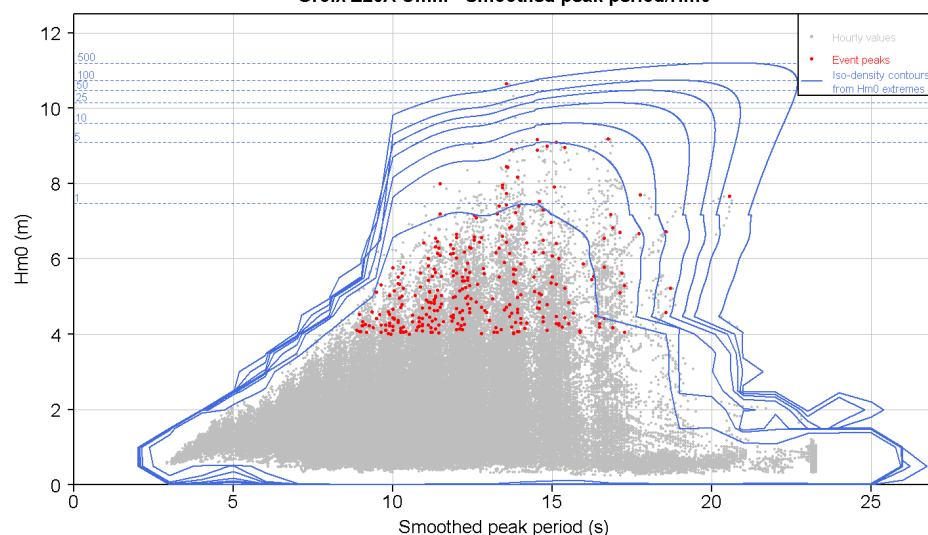


$\mathcal{T}_{AND}$

Probabilité de dépassement conjoint



Groix Z20A Omni - Smoothed peak period/Hm0

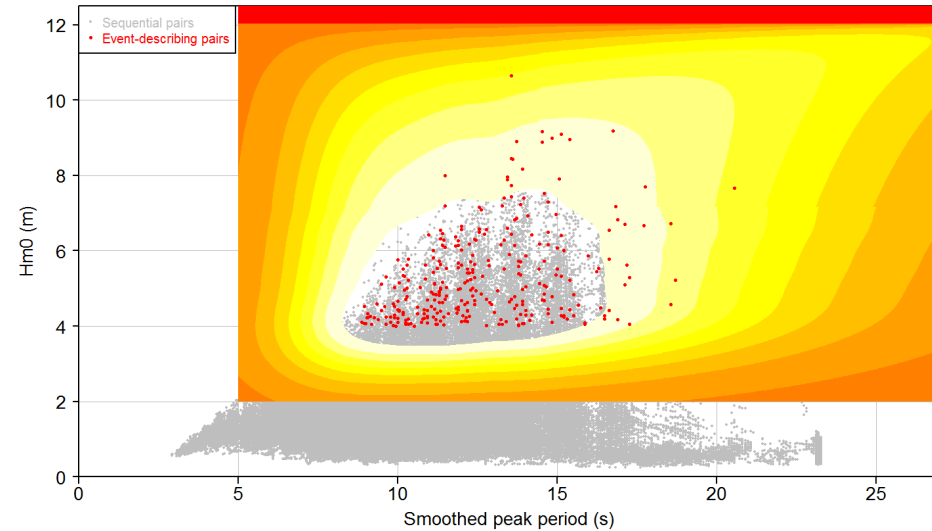


Contours d'iso-densité à partir de la distribution marginale de la variable de référence

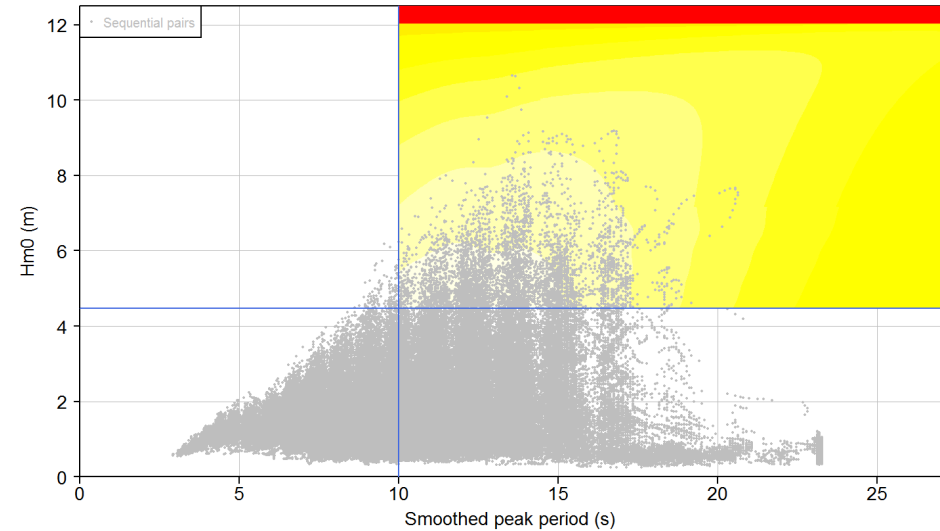


# Analyses extrêmes bivariées

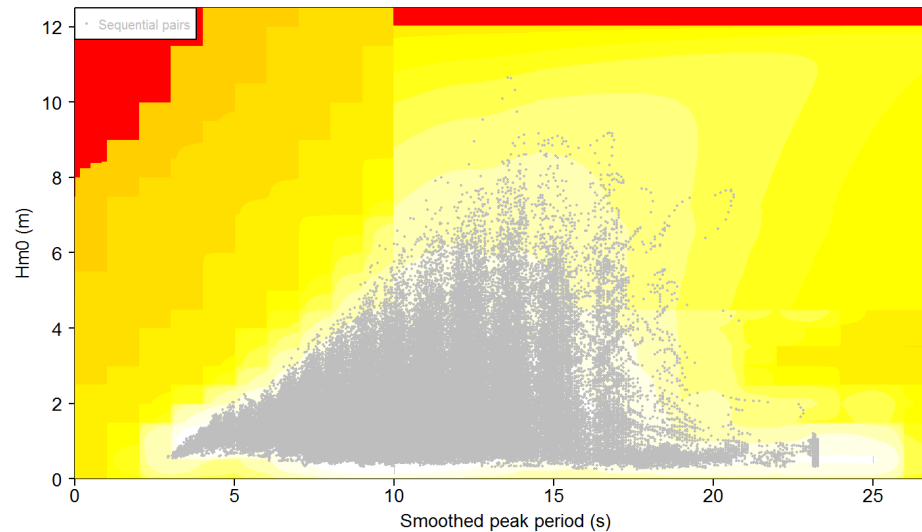
Groix Z20A Omni - Smoothed peak period/Hm0

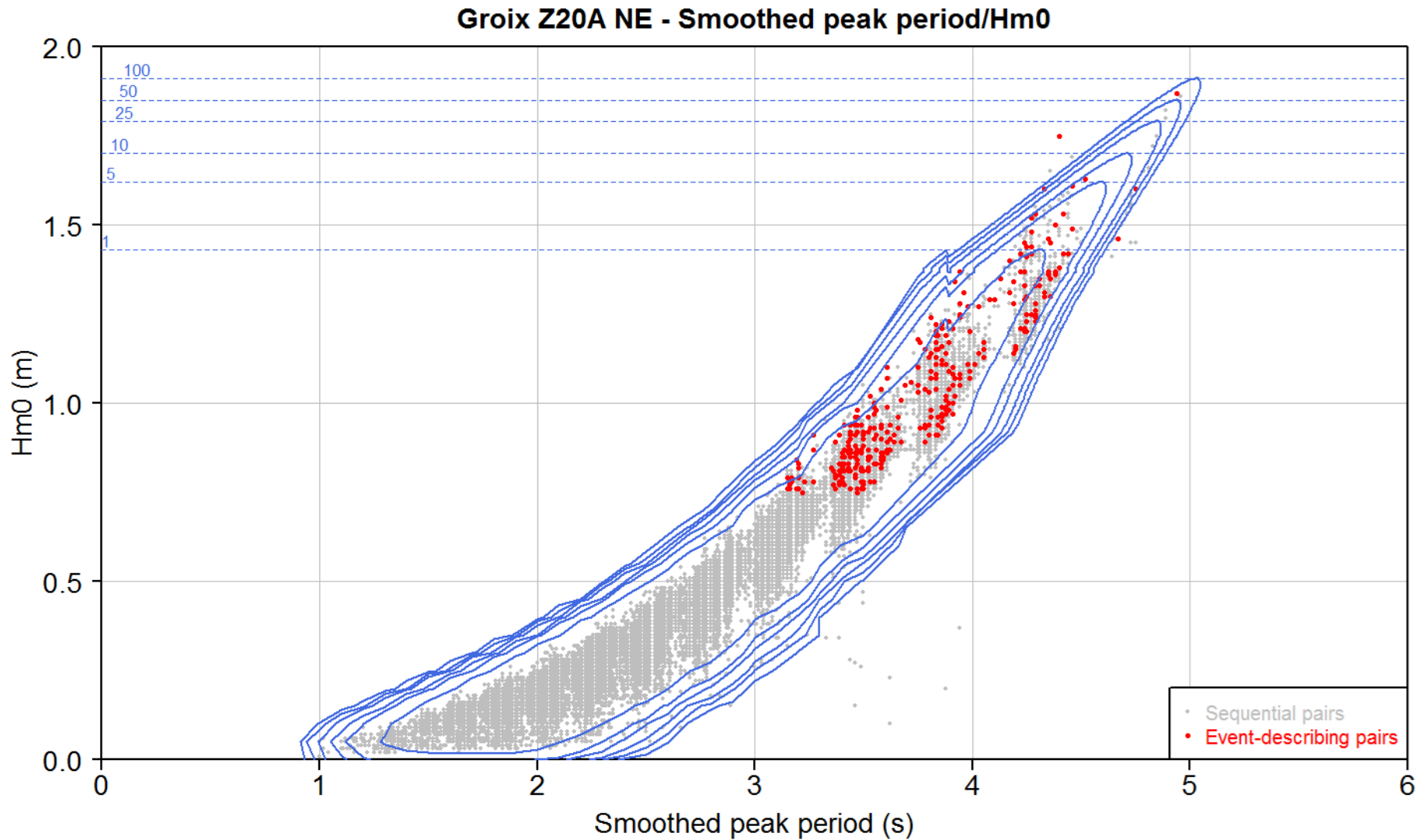


Groix Z20A Omni - Smoothed peak period/Hm0



Groix Z20A Omni - Smoothed peak period/Hm0





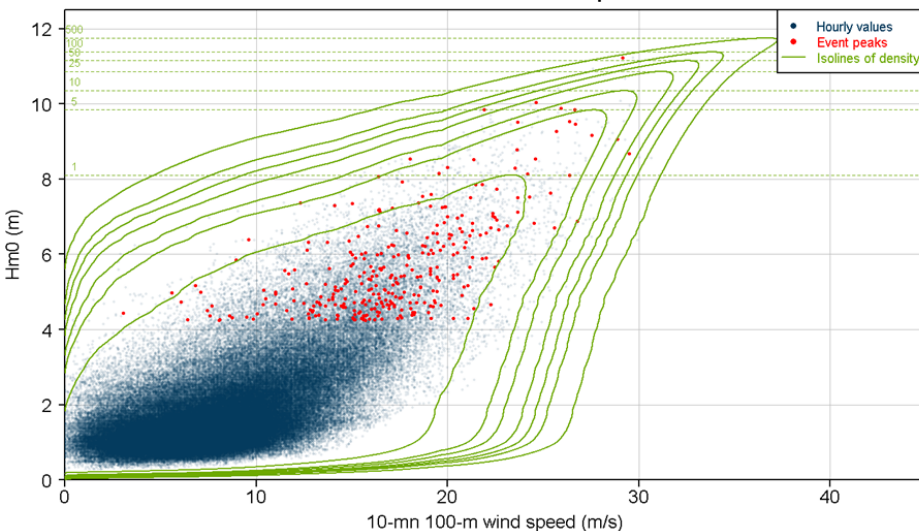


# Analyses extrêmes bivariées

Exemples - Type C:  $H_s / W_s$   ↔ 

■ Choix de la **event-defining variable** ?

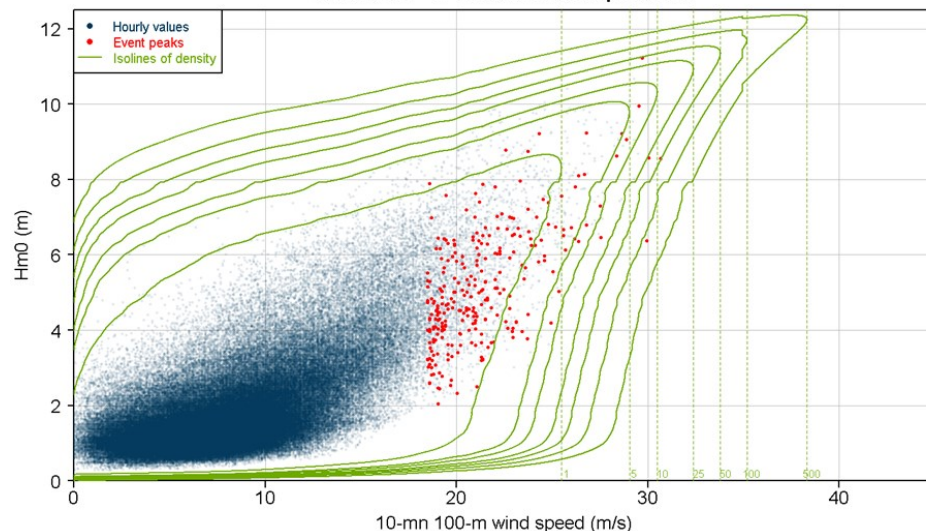
Groix Z20E - 10-mn 100-m wind speed/Hm0



*Evènements définis par les pics de  $H_s$*

*Contours d'iso-densité à partir des extrêmes marginaux de hauteur de vague*

Groix Z20E - 10-mn 100-m wind speed/Hm0



*Evènements définis par les pics de  $W_s$*

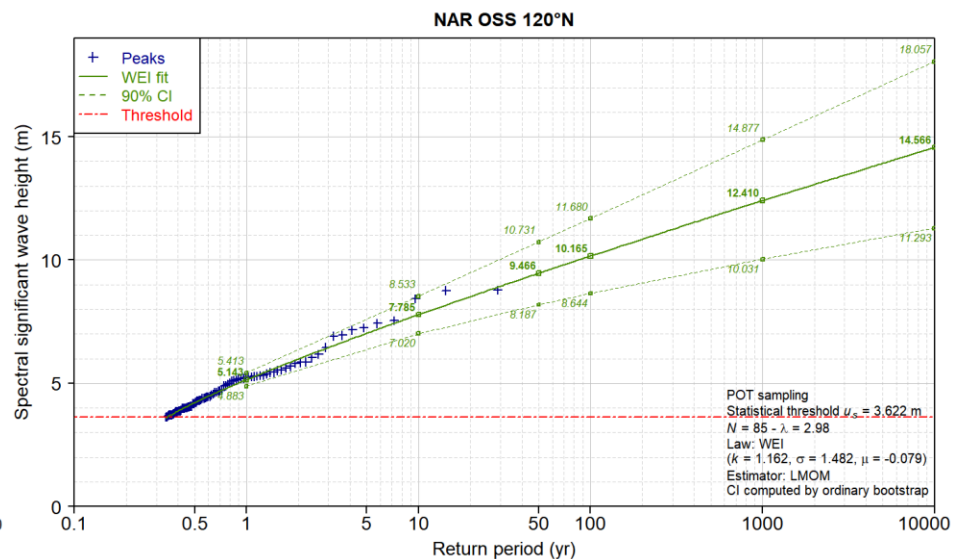
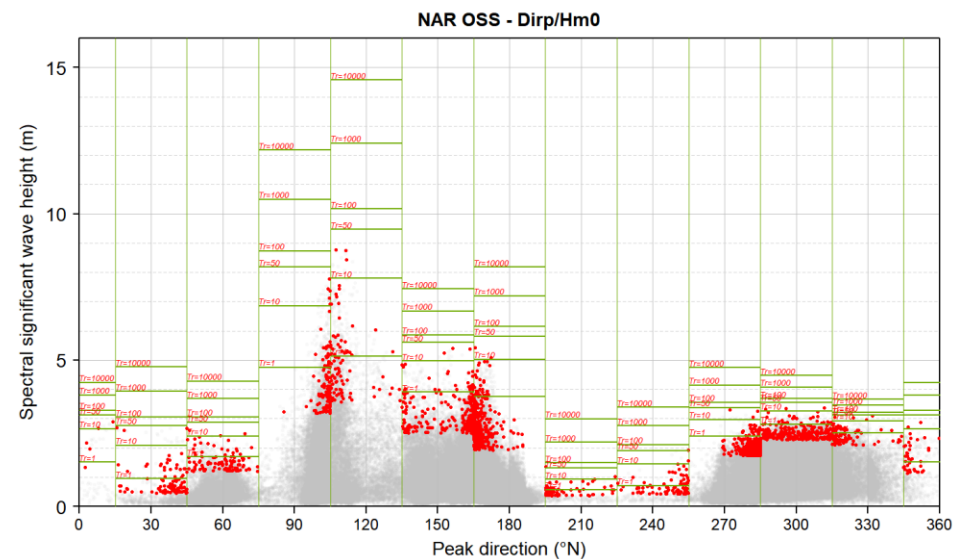
*Contours d'iso-densité à partir des extrêmes marginaux de vitesse de vent*

# Les défis

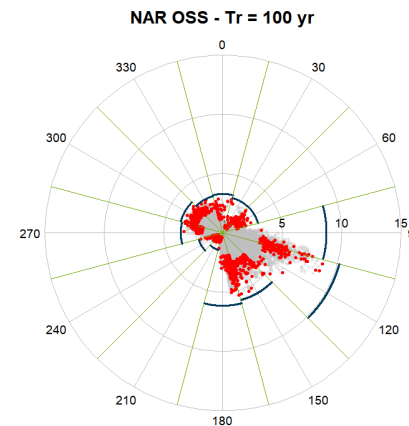
## Méthode "brutale"



- Découpage de la série en fonction de la direction sans considérations



- Echantillons réduits – ajustements moins fiables



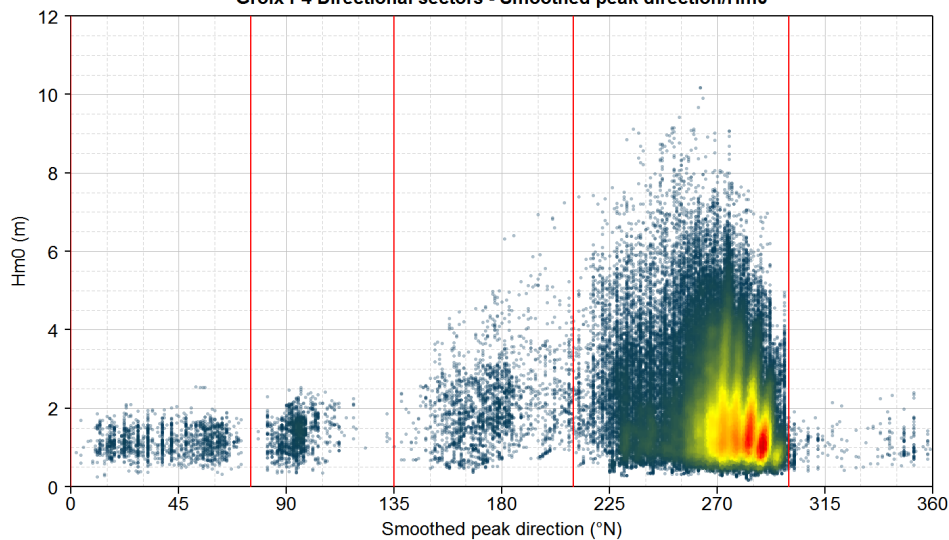
# Analyses directionnelles

## Alternative explorée

- Découpage par secteurs directionnels « physiques », découpés en classes



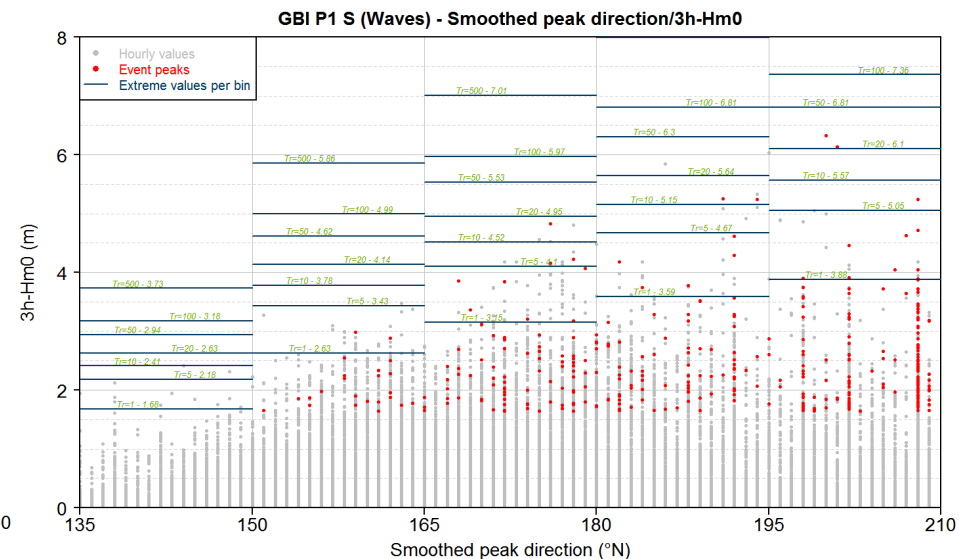
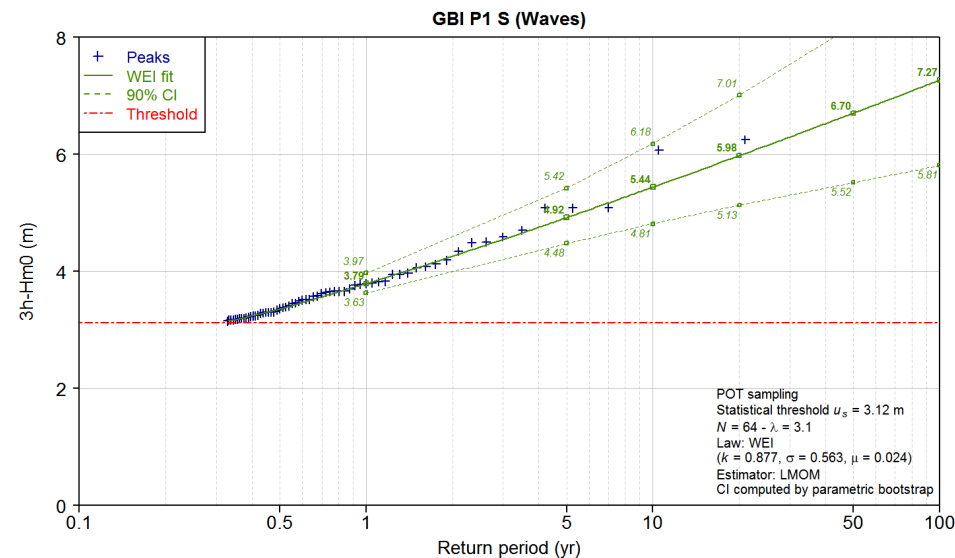
Groix P4 Directional sectors - Smoothed peak direction/Hm0



## Alternative explorée

- **Extrapolation par secteur** puis **modulation** des résultats par un facteur reposant sur la moyenne des valeurs élevées au sein de chaque classe

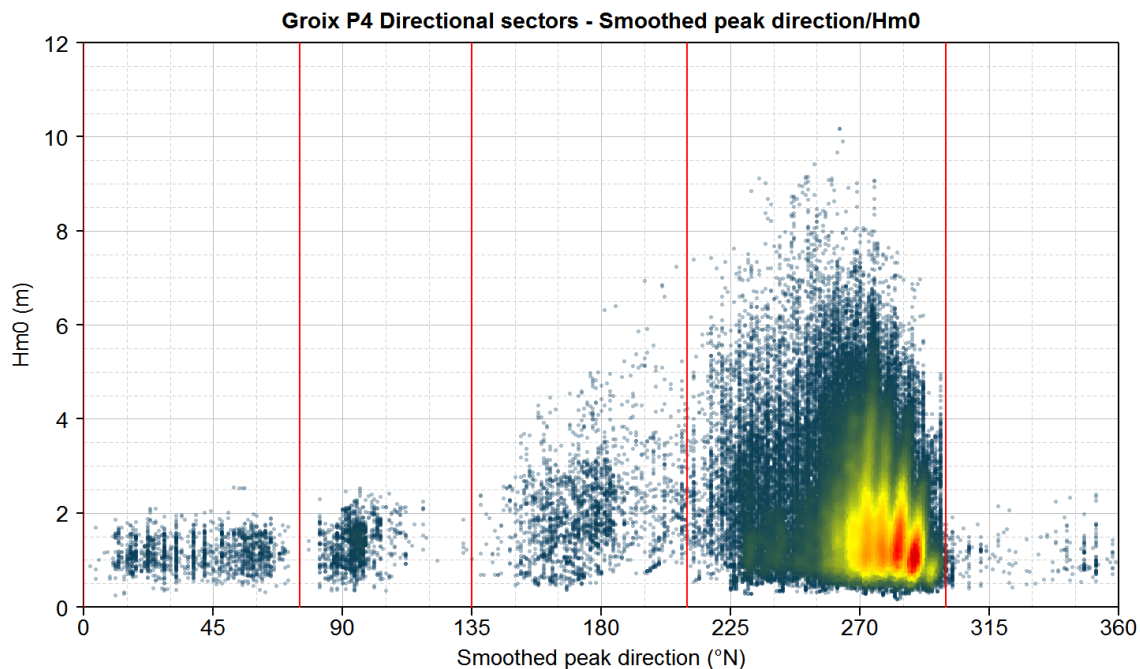
$$f_i = \frac{H_{m0|H_{m0} \geq q_{99\%} \text{ of bin } i}}{\max_{i \in \text{sector}} H_{m0|H_{m0} \geq q_{99\%} \text{ of bin } i}}$$



# Analyses directionnelles

## *Problématiques restantes*

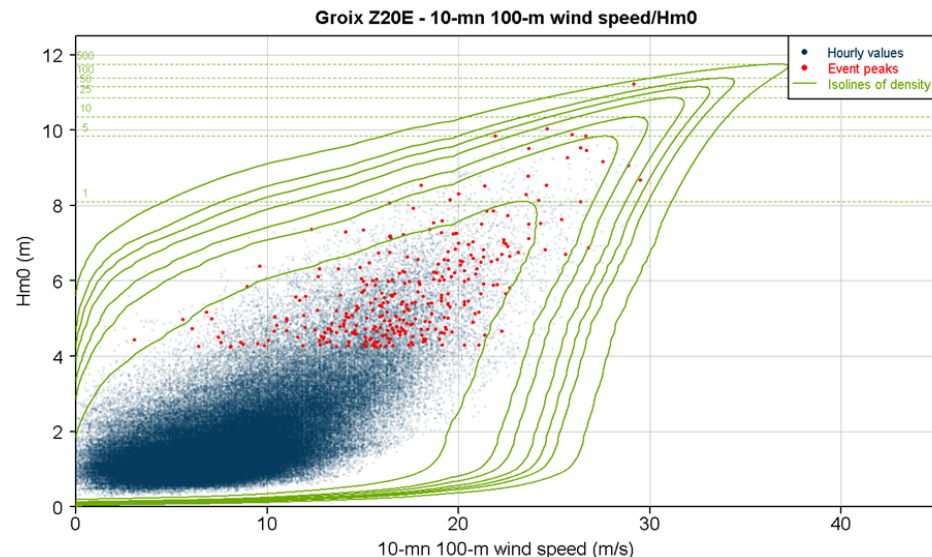
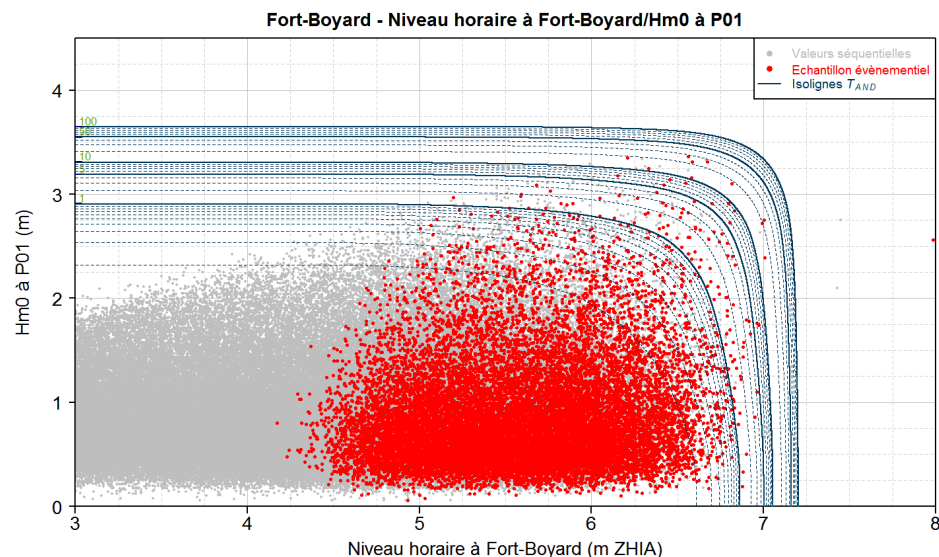
- Modulation semblant peu efficace
- Normaliser les valeurs avant extrapolation ?
- Problème des classes vides ou presque
- Quelle signification de la **période de retour directionnelle** ? Quel paramètre de Poisson utiliser ?



# Choix de la structure de dépendance

## Quels outils utiliser en fonction des phénomènes étudiés ?

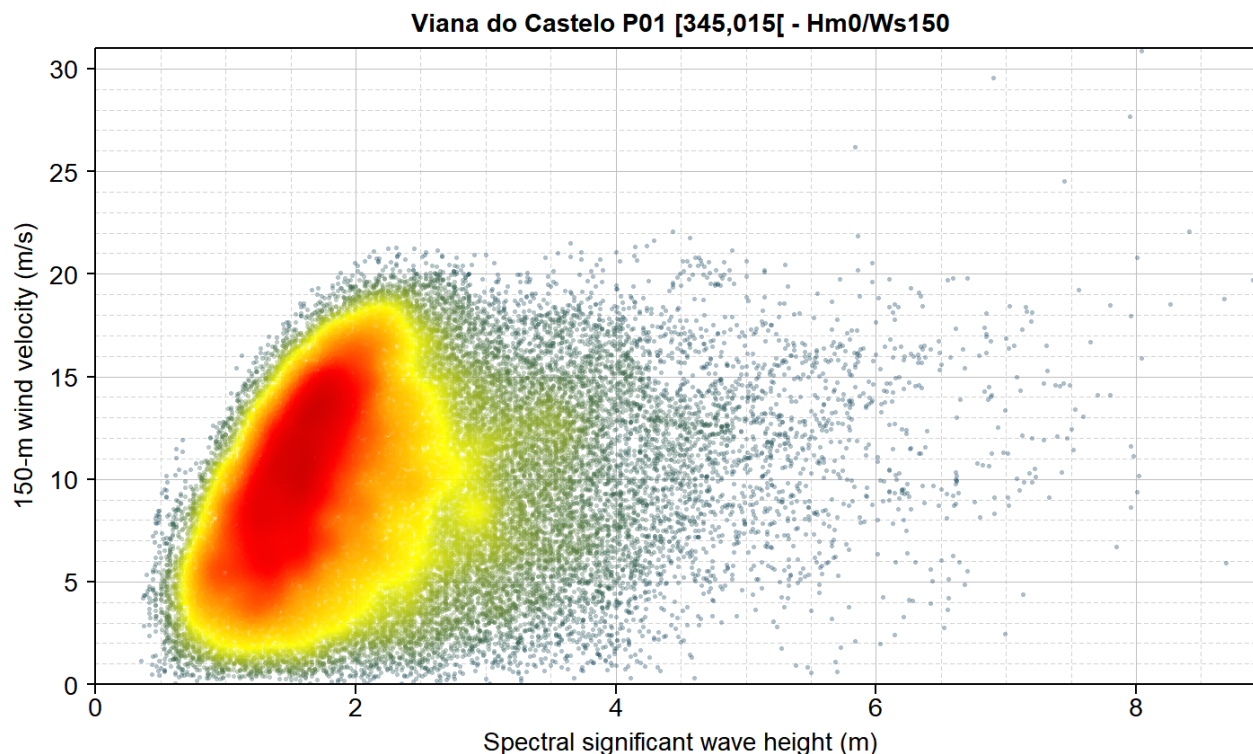
- Analyses de Type C (ex. houle / niveau ou houle / vent) : **copules des valeurs extrêmes** semblent donner des résultats plus ou moins acceptables quand la **structure de dépendance** est simple...



# Choix de la structure de dépendance

*Quels outils utiliser en fonction des phénomènes étudiés ?*

- ... mais la dépendance des phénomènes océano-météo est très **complexe** !

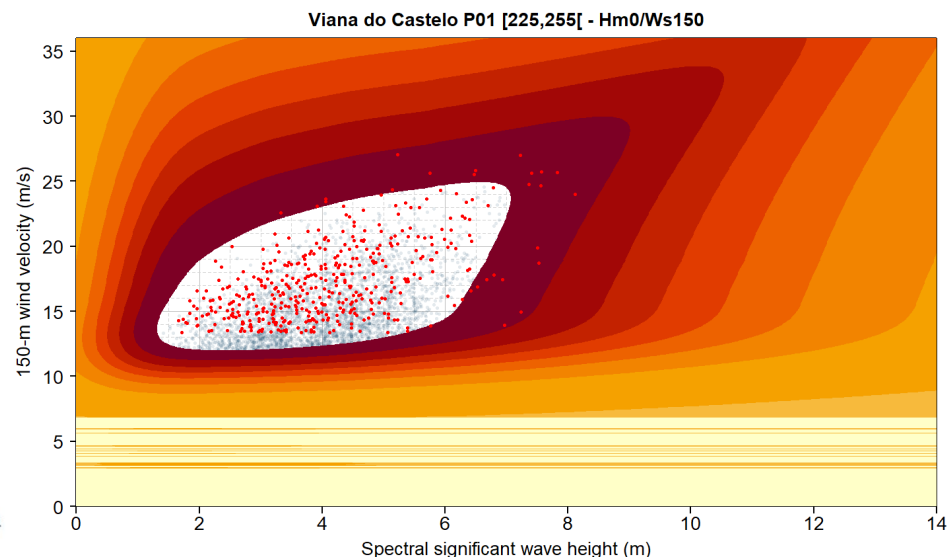
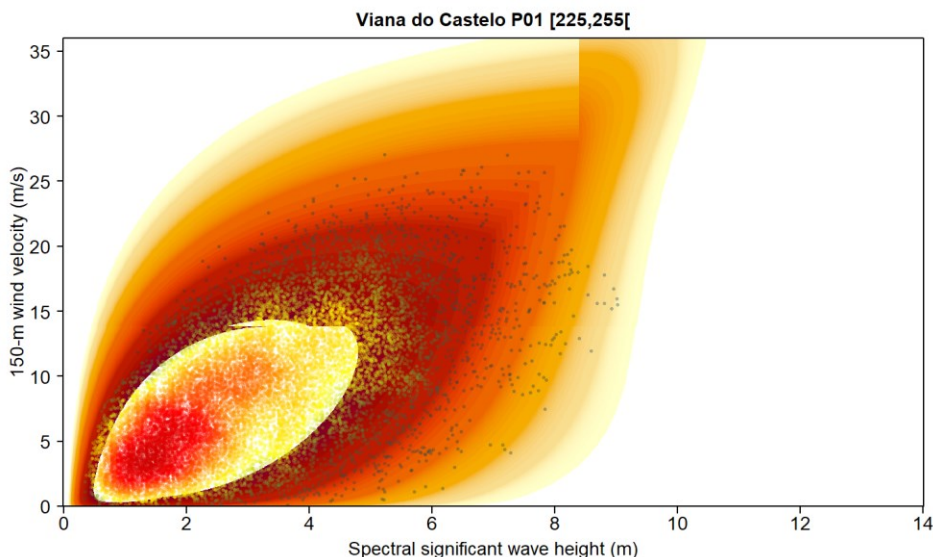




# Choix de la structure de dépendance

*Quels outils utiliser en fonction des phénomènes étudiés ?*

- On peut tenter un **modèle hybride** avec des dépendances différentes pour les **valeurs séquentielles fréquentes** (*bulk*) et les **variables évènementielles**



*Modèle de dépendance :*

*Loi de Weibull pour la marginale de  $W_s$*

*Distribution conditionnelle LONOWE pour  $H_s$*

*Modèle de dépendance :*

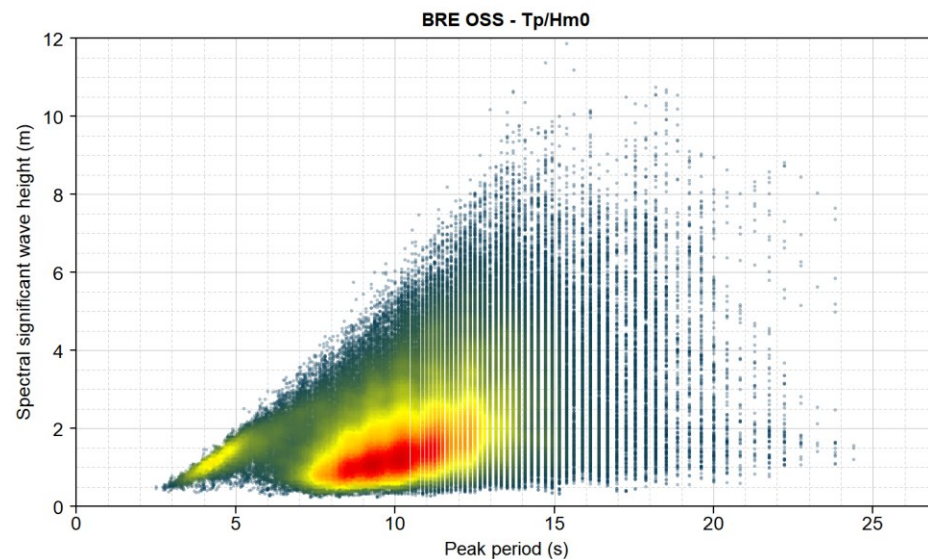
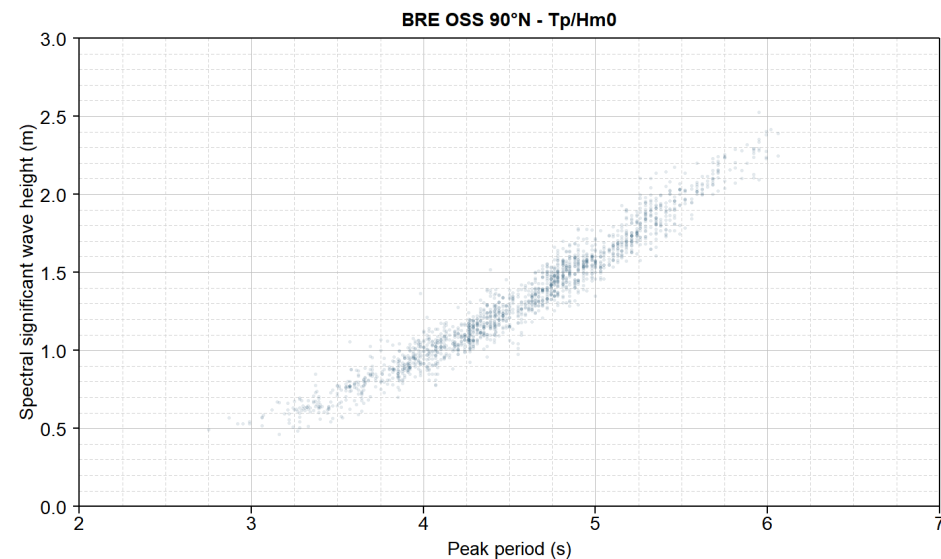
*Copule des valeurs extrêmes*

# Choix de la structure de dépendance

*Quels outils utiliser en fonction des phénomènes étudiés ?*



- Cas de la dépendance  $H_s/T_p$  (Type A) : doit prendre en compte les mers de vent, les houles, et toutes les populations intermédiaires...



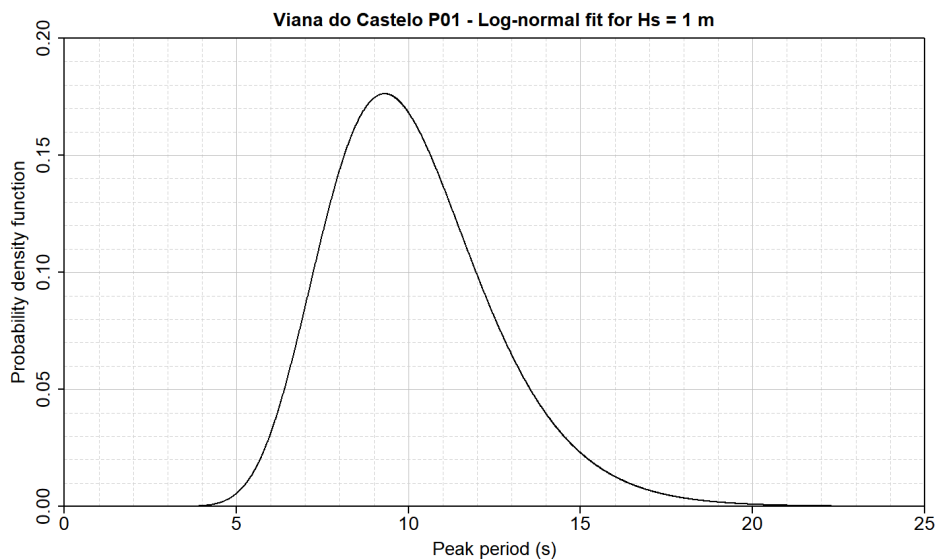
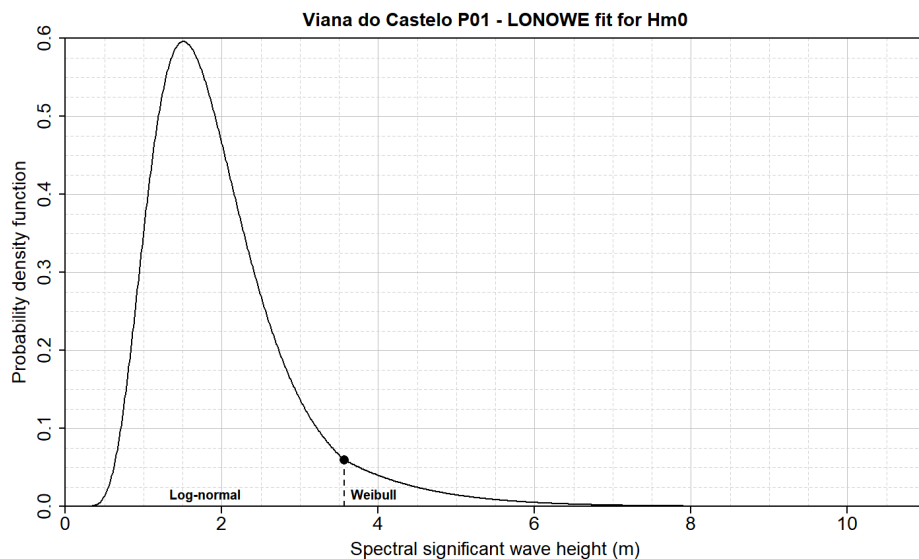
# Choix de la structure de dépendance

Quels outils utiliser en fonction des phénomènes étudiés ? 

- Doit représenter les valeurs fréquentes et extrêmes
- Méthode de Drago et al. (2013) :
  - ✓ distribution mixte log-normal / Weibull (LONOWE) pour la marginale de  $H_s$
  - ✓ distribution conditionnelle de type log-normal,  $\sigma$  et  $\mu$  dépendant de  $H_s$

$$f_{H_s, T_p}(H_s, T_p) = f_{H_s}(H_s) \cdot f_{T_p|H_s}(T_p|H_s)$$

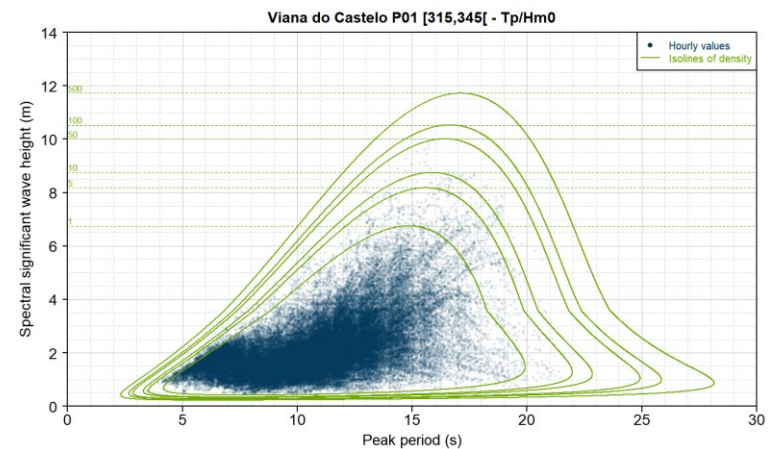
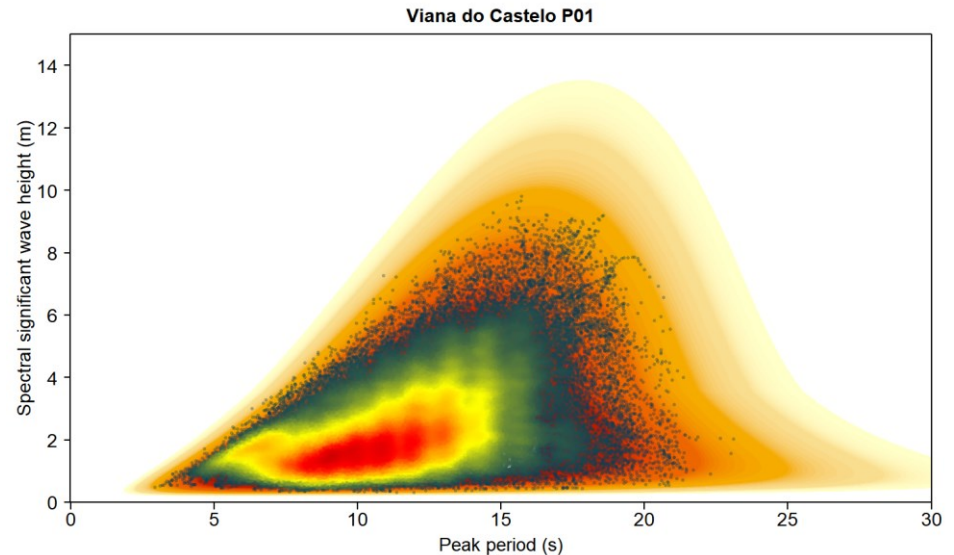
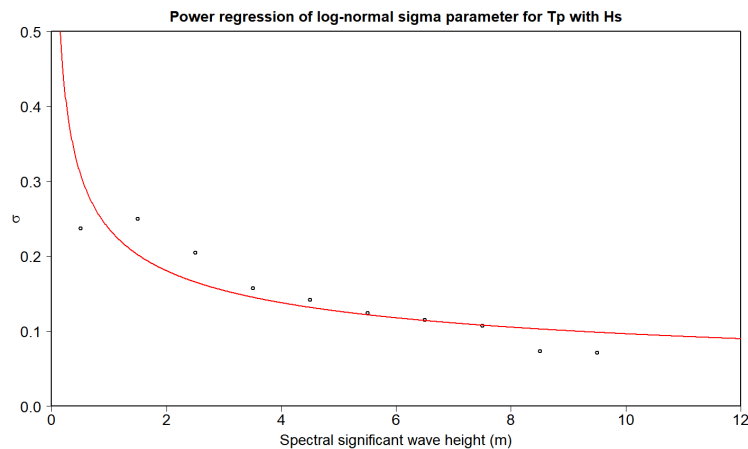
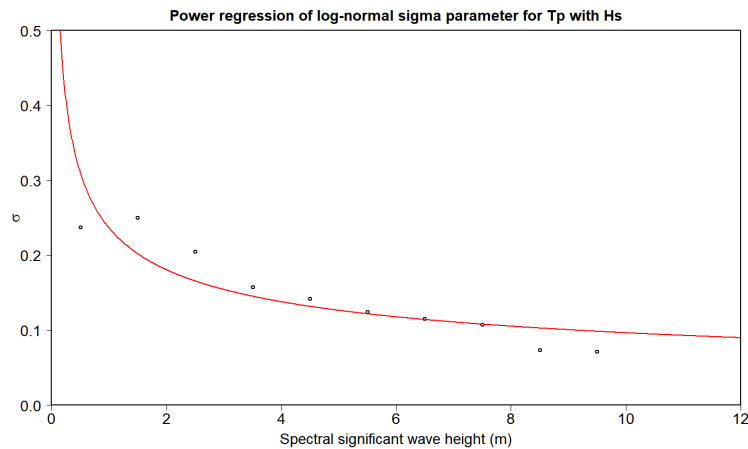
$$f_{T_p|H_s}(T_p|H_s) = \frac{1}{\sigma T_p \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln T_p - \mu]^2}{2\sigma^2}\right\}$$



# Choix de la structure de dépendance

Quels outils utiliser en fonction des phénomènes étudiés ? 

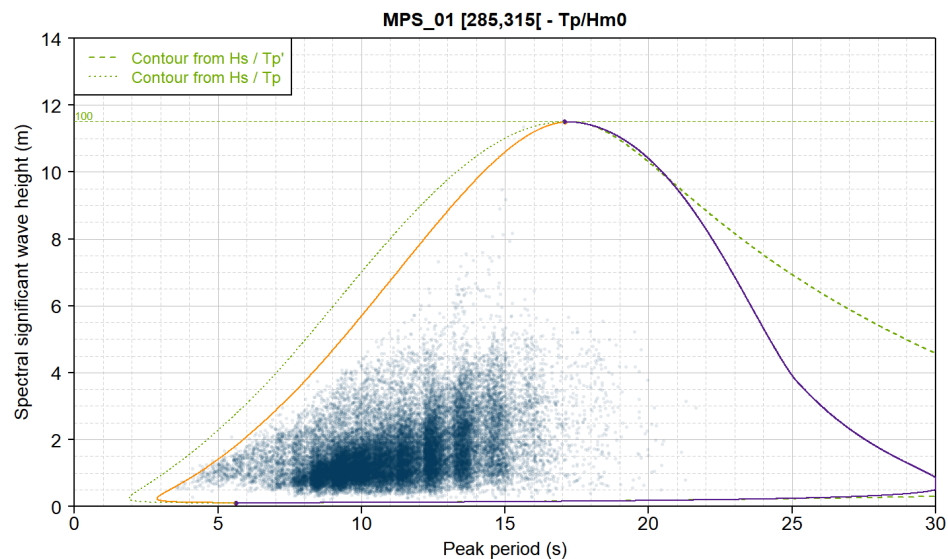
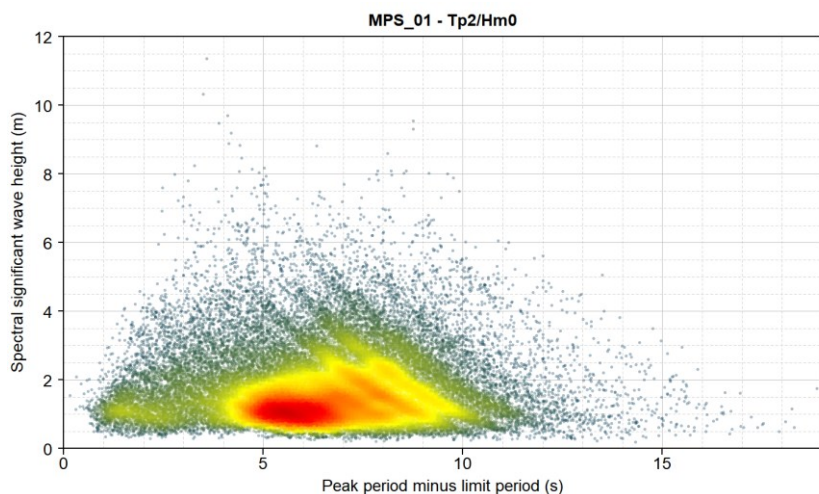
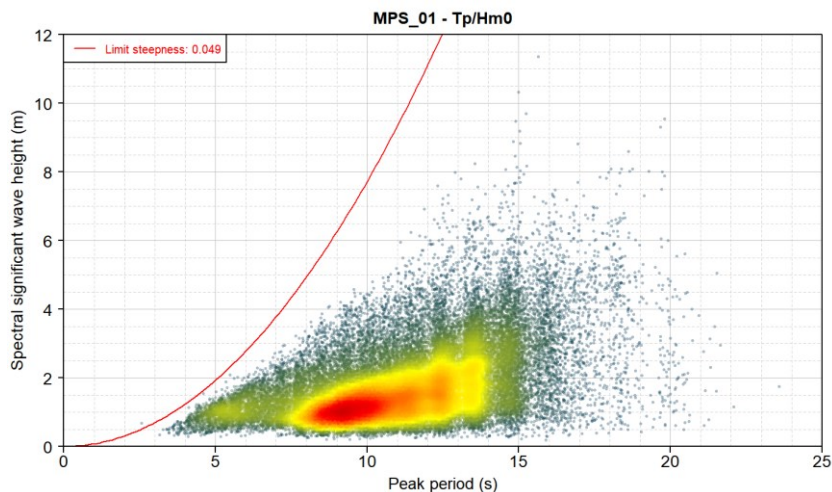
- Comment faire évoluer la distribution conditionnelle en fonction de  $H_s$  ?



# Choix de la structure de dépendance

Quels outils utiliser en fonction des phénomènes étudiés ? 

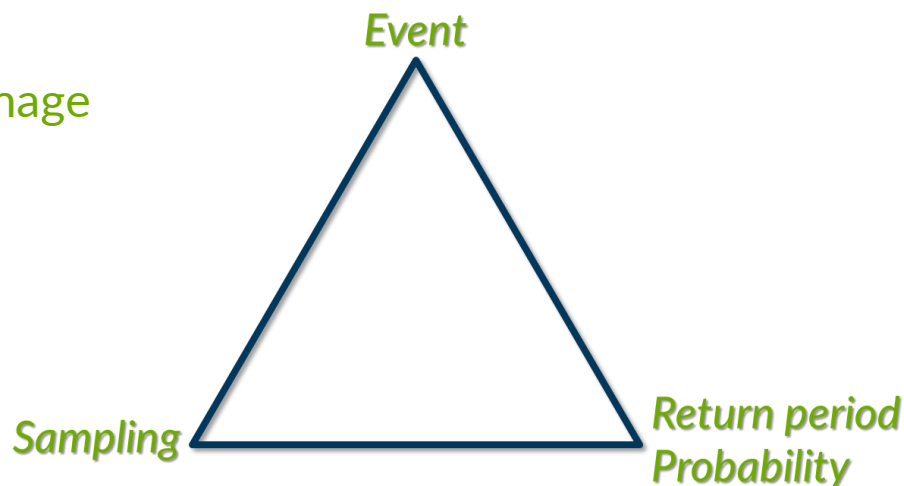
- Méthode hybride pour mieux prendre en compte la **cambrure limite**



# Conclusions

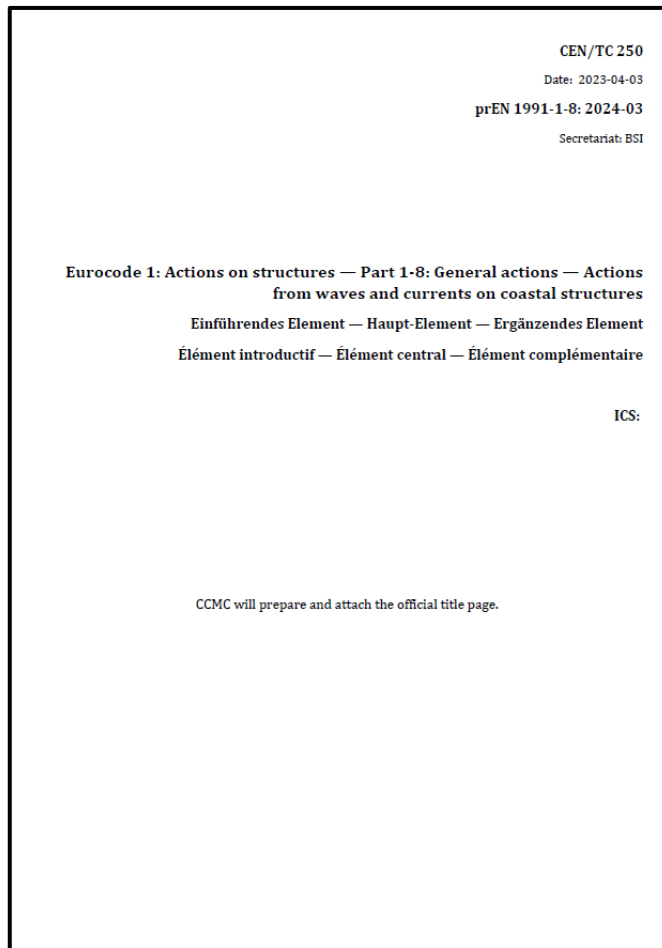
## *Les évènements : un cadre pour les analyses extrêmes*

- Combine l'analyse physique et la modélisation probabiliste
- Cas univarié : redéfinition du rôle du seuil ( $u \rightarrow u_p, u_s, \mu$ )  
modélisation sub-seuil  $\rightarrow$  extrapolation événementielle
- Distinction valeurs séquentielles / variables événementielles pour l'application des distributions, des modèles de dépendance et du choix des contours
- une intrication entre la définition de l'évènement, l'échantillonnage et la période de retour
- une application directe à l'hydrologie, à tous les extrêmes environnementaux, et autres (finance...)



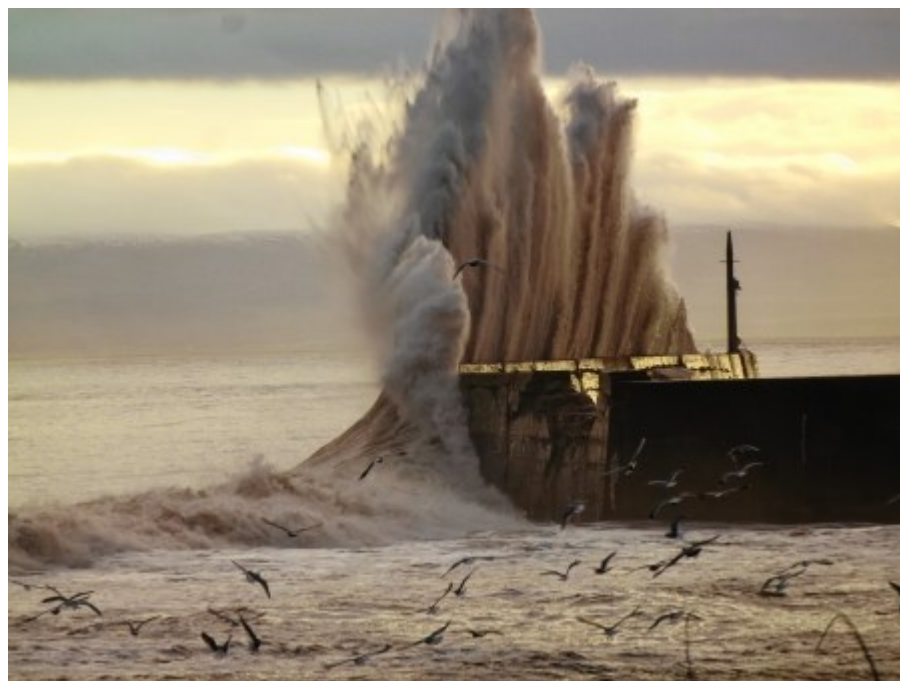
## *Les évènements : un cadre pour les analyses extrêmes*

- Un cadre cohérent avec les nouveaux Eurocodes 1990-1-8 (distingo action / réponse, échantillonnage, modèle de dépendance...)



*Mais une longue liste d'améliorations à apporter !*

- Analyses **extrêmes directionnelles** (échantillonnage, normalisation, période de retour...)
- **Choix du modèle de dépendance** en fonction des analyses et des couples étudiés (copules des valeurs extrêmes, renormalisation, distributions conditionnelles...)
- Représentation **des valeurs fréquentes et rares** (dans tout l'hyperplan)  
Modèles hybrides ?
- Choix des **contours**
- ...
- ...





Merci pour votre attention !

