



# L'information historique dans les statistiques de niveaux d'eau extrêmes

**T. Bulteau<sup>1</sup>, D. Idier<sup>1</sup>, J. Lambert<sup>1</sup>, M. Garcin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, BP6009, Orléans 45060, cedex 2, France

# Plan

- > **Contexte – origine de la démarche**
- > **Apport des données historiques**
- > **Méthode**
- > **Application : La Rochelle**
  - Données
  - Cas d'étude et objectifs
  - Résultats
- > **Conclusions**

# Contexte – origine de la démarche

Analyse en valeurs extrêmes

*Quoi ?*

*Pourquoi ?*

*Comment ?*

- Analyse fréquentielle

**Dispositifs offshore**



**Ouvrages côtiers**



**Etudes de risque**

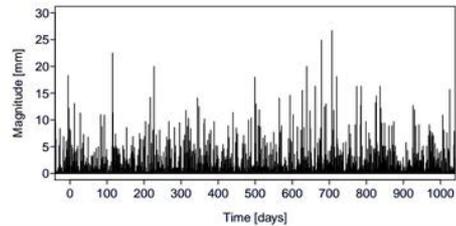


- Théorie des valeurs extrêmes  
- Comportement asymptotique  
- Extrapolation

# Contexte – origine de la démarche

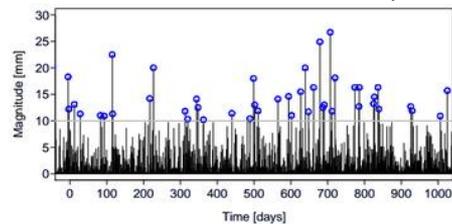
## Analyse en valeurs extrêmes

Série temporelle de la variable d'intérêt



Sélection d'un échantillon de valeurs maximales par la méthode POT

Peaks Over Threshold (POT)



Ajustement d'une distribution de probabilité à l'échantillon obtenu

GPD (*Generalized Pareto Distribution*)

$$P(X \leq x | X > u) = G_{\theta}(x) = G_{(\xi, \sigma)}(x) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \frac{\xi(x-u)}{\sigma}\right)_+^{-\frac{1}{\xi}} & \text{if } \xi \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{(x-u)}{\sigma}\right) & \text{if } \xi = 0 \end{cases} \quad \text{for } x > u$$

$\sigma$ : scale  
 $\xi$ : shape

# Contexte – origine de la démarche

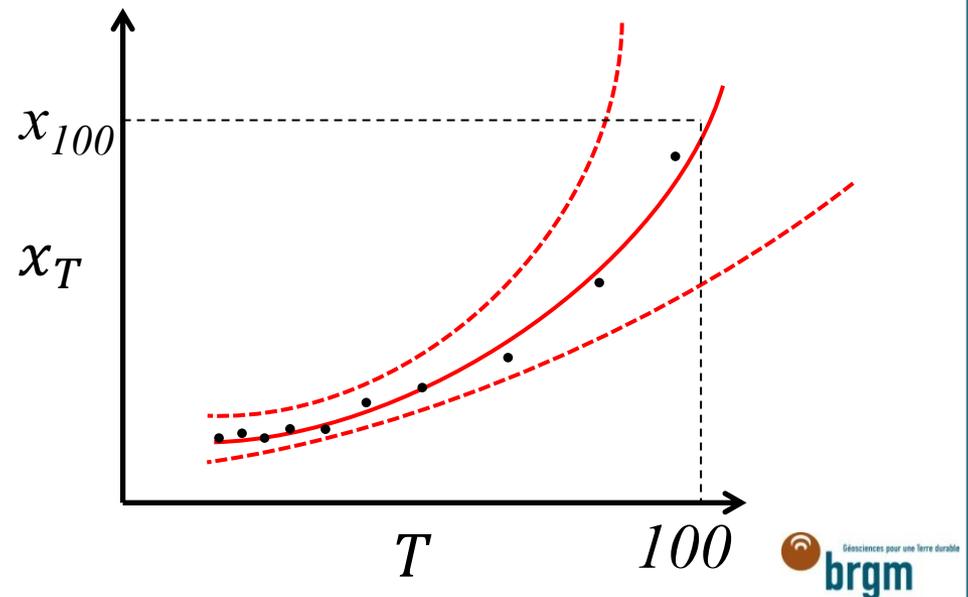
## > Loi GPD

$$P(X \leq x | X > u) = G_\theta(x) = G_{(\xi, \sigma)}(x) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \frac{\xi(x-u)}{\sigma}\right)_+^{-\frac{1}{\xi}} & \text{if } \xi \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{(x-u)}{\sigma}\right) & \text{if } \xi = 0 \end{cases} \quad \text{for } x > u$$

$$\lambda(1 - G_\theta(x_T)) = \frac{1}{T}$$

T: période durant laquelle l'évnt survient en moyenne 1 fois.

$\lambda$  : nombre moyen d'évts par an.



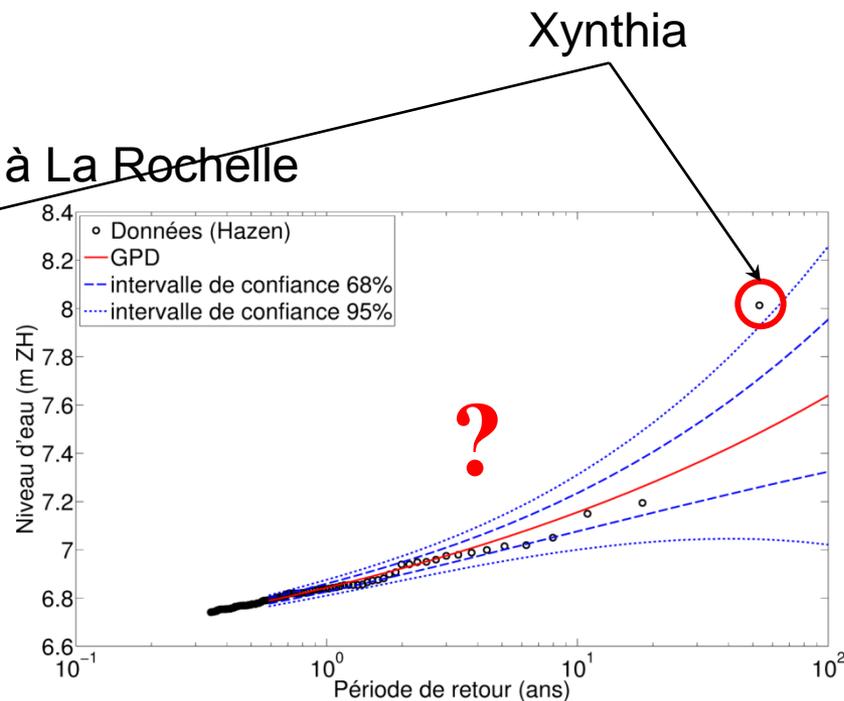
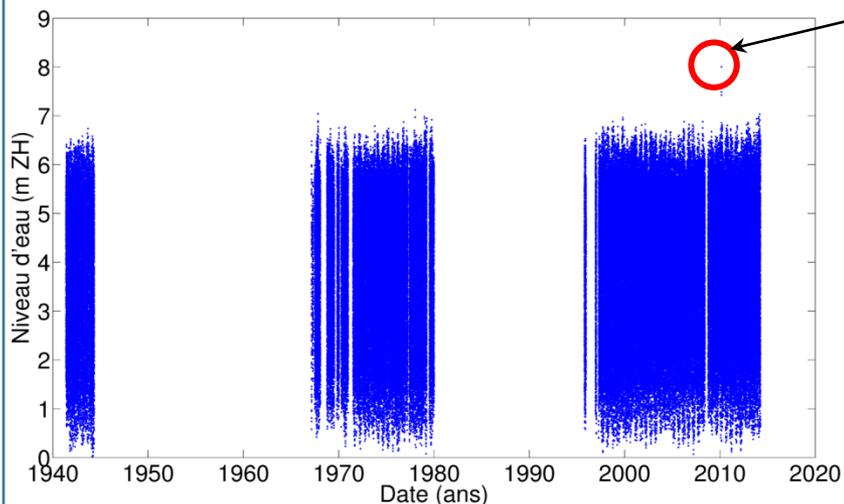
# Contexte – origine de la démarche

## > Problèmes éventuels (mais courants!)

- Séries temporelles courtes (données systématiques) => limité sur T!
- Valeurs aberrantes, horsains
- Données manquantes
- ...

**Incertitudes ↑**

### Niveaux d'eau à La Rochelle



→ Allonger la série, couvrir les trous et augmenter la représentativité du horsain dans l'échantillon systématique.

# Apport des données historiques

- Utiliser des données historiques = augmenter le nombre d'évènements extrêmes dans la série temporelle
- En effet, avant la période de mesures systématiques, de nombreux épisodes violents se sont produits sur les littoraux (traces dans les archives historiques)



Les Portes, 16 février 1941

**1941**



**1940**



21. Chateaufillon - La Plage ravagée par la tempête (août 1912)

**1912**

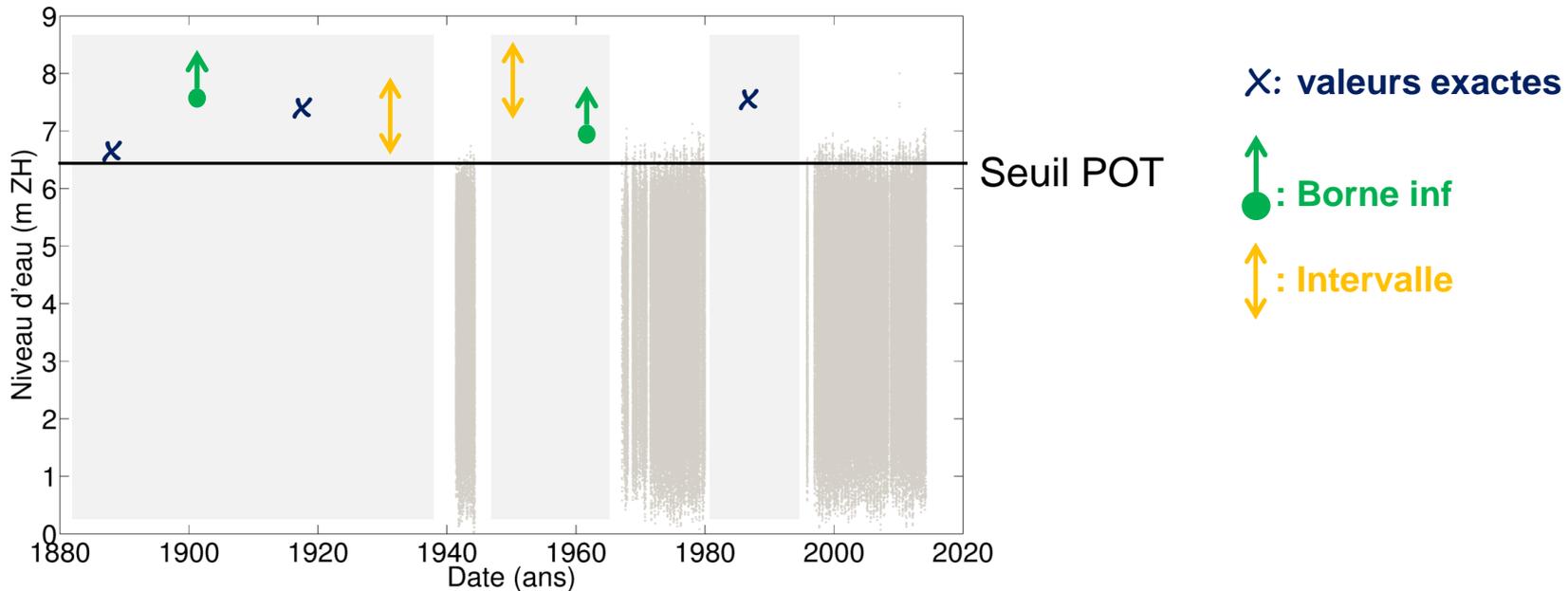


# Apport des données historiques : des photos mais aussi de nombreux textes d'archive

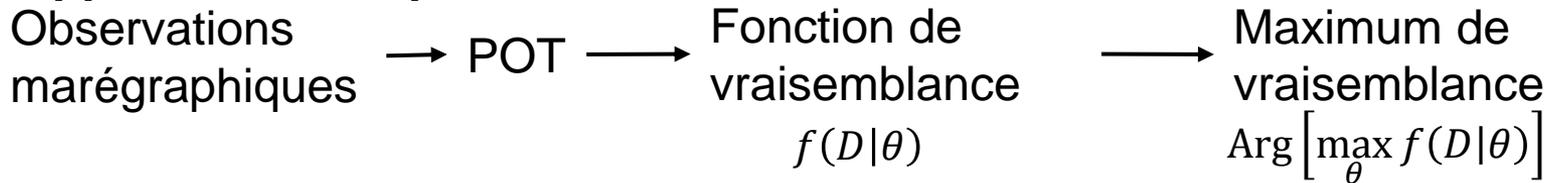
## > La Rochelle – 1890

« C'est dans la nuit dernière (Ndlr, 22) que la bourrasque a redoublé de violence. Poussé par un fort vent d'ouest, **la mer a dépassé de plus de 20 centimètres le couronnement des quais de nos bassins à flot.** Dans la ville, les dégâts occasionnés par le mauvais temps ont été très nombreux. Une quantité de cheminées ont été renversées ; le Mail a été ravagé (...). A Port-Neuf, une maisonnette a été enlevée par la mer. On assure que la nouvelle route de La Verdière a été ravinée à la hauteur de Vaugoin par l'envahissement des eaux de la mer. » (Courrier de La Rochelle, 23-01-1890)

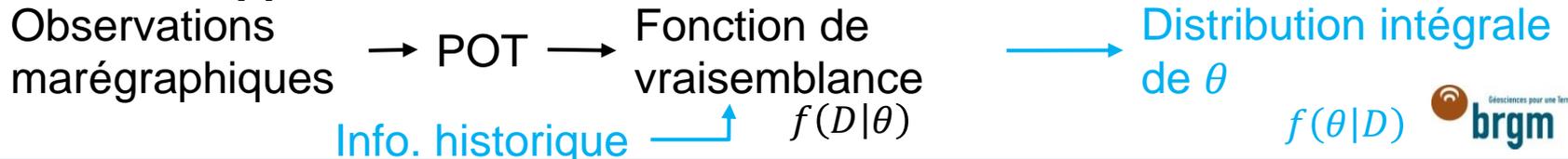
# Méthode: adaptation de travaux sur inondation fluviale



## Approche classique:



## Nouvelle approche:

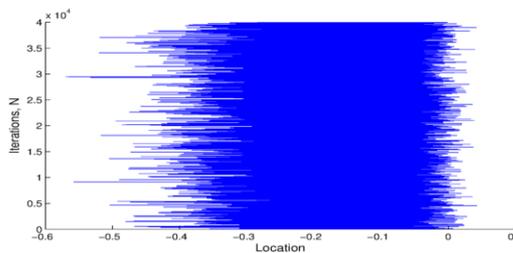
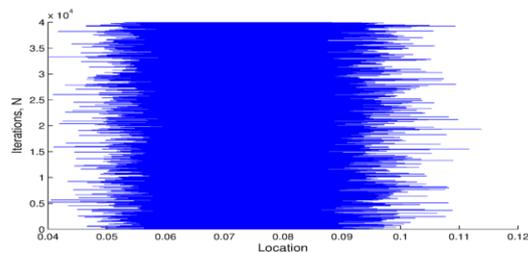
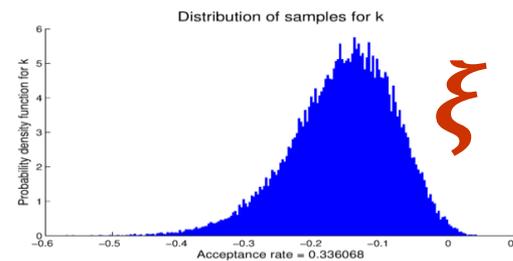
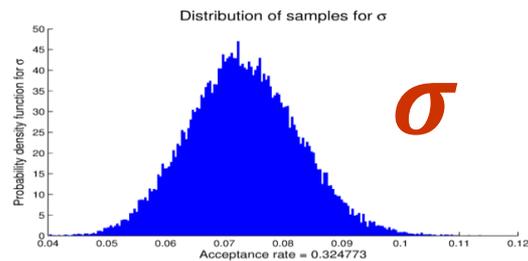


# Méthode

- > **Méthode bayésienne** pour accéder à la distribution intégrale des paramètres de la **loi GPD**

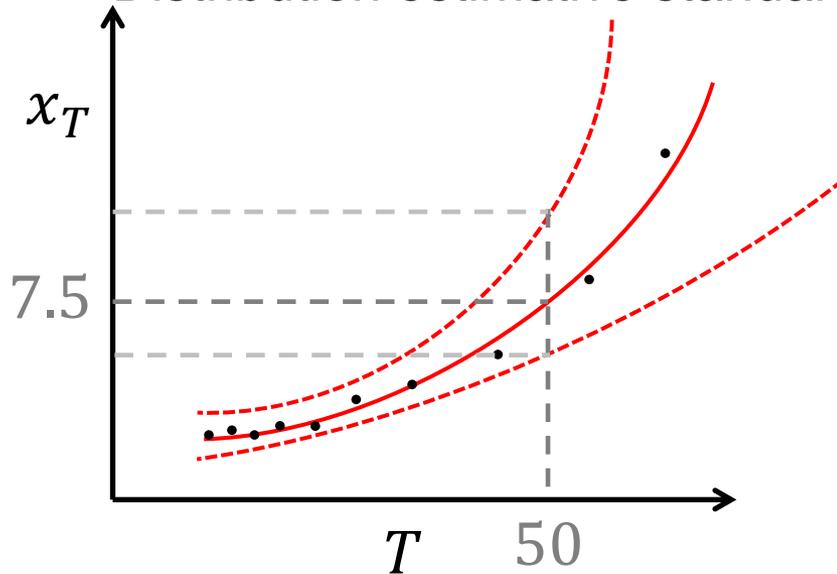
$$f(\theta|D) = \frac{f(D|\theta)f(\theta)}{f(D)}$$

- > **Simulation MCMC** pour échantillonner la distribution a posteriori  $f(\theta|D)$



# Méthode

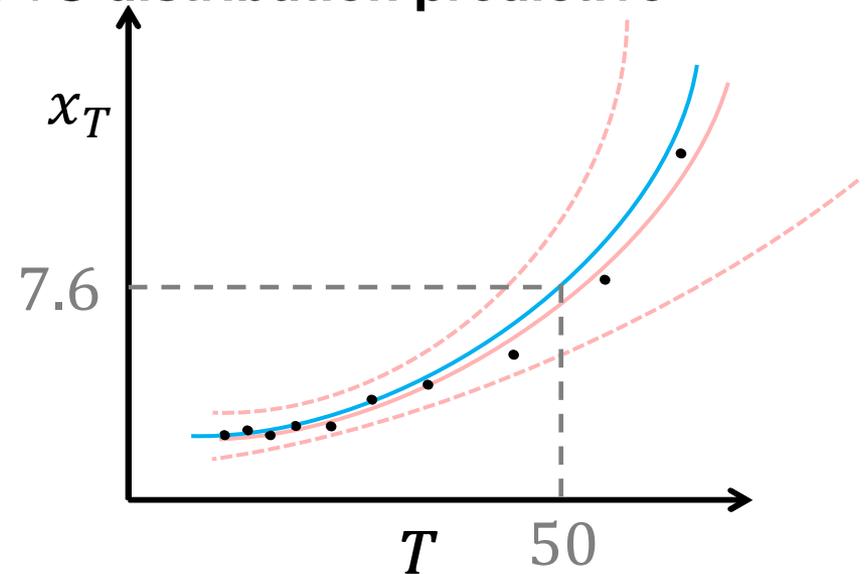
## > Distribution estimative standard VS **distribution prédictive**



$$\lambda(1 - G_\theta(x_T^{est})) = \frac{1}{T_{est}}$$

Meilleure estimation du niveau dépassé en moyenne une fois tous les 50 ans est 7,5 m et un intervalle de confiance à 95% pour ce niveau est [7,3; 8]

**VS**



$$\lambda\left(1 - \int_\theta G_\theta(x_T^{pred})f(\theta|D) d\theta\right) = \frac{1}{T_{pred}}$$

Etant donnée toute l'information disponible, il y a une probabilité 0,02 que le niveau maximum de l'an prochain dépasse 7,6 m.

# Méthode

$$f(\theta|D) = \frac{f(D|\theta)f(\theta)}{f(D)} \propto f(D|\theta)$$

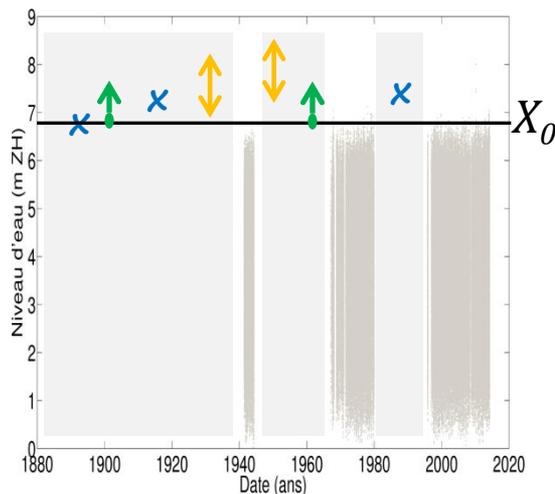
## > Formulation de la vraisemblance

$$f(D|\theta) = \underbrace{f(D_{sys}|\theta)}_{\text{systematic likelihood}} \underbrace{f(D_{his}|\theta)}_{\text{historical likelihood}}$$

## > Données

- $s$  observations marégraphiques systématiques sup.  $u$  ( $x_1, \dots, x_s$ )
- Période historique de  $n_y$  années avec  $h$  évènements ayant dépassé un seuil de perception  $X_0$  ( $X_0 > u$ ). **Exhaustivité requise.**

$h_1$  valeurs exactes,  $h_2$  bornes inf. and  $h_3$  intervalles



$$f(D_{sys}|\theta) = \prod_{i=1}^s g_{\theta}(x_i)$$

$$f(D_{his}|\theta) = \prod_{j=1}^{h_1} g_{\theta}(y_j) (1 - G_{\theta}(X_0))^{h_2} \prod_{l=1}^{h_3} [G_{\theta}(y_l^{ub}) - G_{\theta}(y_l^{lb})]$$

$$\frac{(\lambda n_y)^h}{h!} \exp(-\lambda n_y [1 - G_{\theta}(X_0)])$$

# Méthode

$$f(\theta|D) = \frac{f(D|\theta)f(\theta)}{f(D)} \propto f(D|\theta)$$

## > Formulation de la vraisemblance

$$f(D|\theta) = \underbrace{f(D_{sys}|\theta)}_{\text{systematic likelihood}} \underbrace{f(D_{his}|\theta)}_{\text{historical likelihood}}$$

## > Prise en compte des tendances d'évolution long-terme des extrêmes de niveau d'eau

- Variations similaires à l'élévation du niveau moyen de la mer quasiment partout dans le monde (Woodworth et al., 2011)
- Calcul tendance linéaire sur période systématique et correction de la série temporelle puis rattachement à une année de référence
- Pour période historique, correction nécessaire du seuil de perception  $X_0$  pour chaque année  $m$  de la période historique ainsi que des valeurs exactes et des intervalles

$$f(D_{his}|\theta) = \prod_{m=1}^{n_y} \left[ \prod_{j=1}^{h_{1,m}} g_{\theta}(y_j) (1 - G_{\theta}(X_{0,m})) \right]^{h_{2,m}} \prod_{l=1}^{h_{3,m}} [G_{\theta}(y_l^{ub}) - G_{\theta}(y_l^{lb})] \frac{\lambda^{h_m}}{h_m!} \exp(-\lambda[1 - G_{\theta}(X_{0,m})])$$

# Application: La Rochelle

## > Données

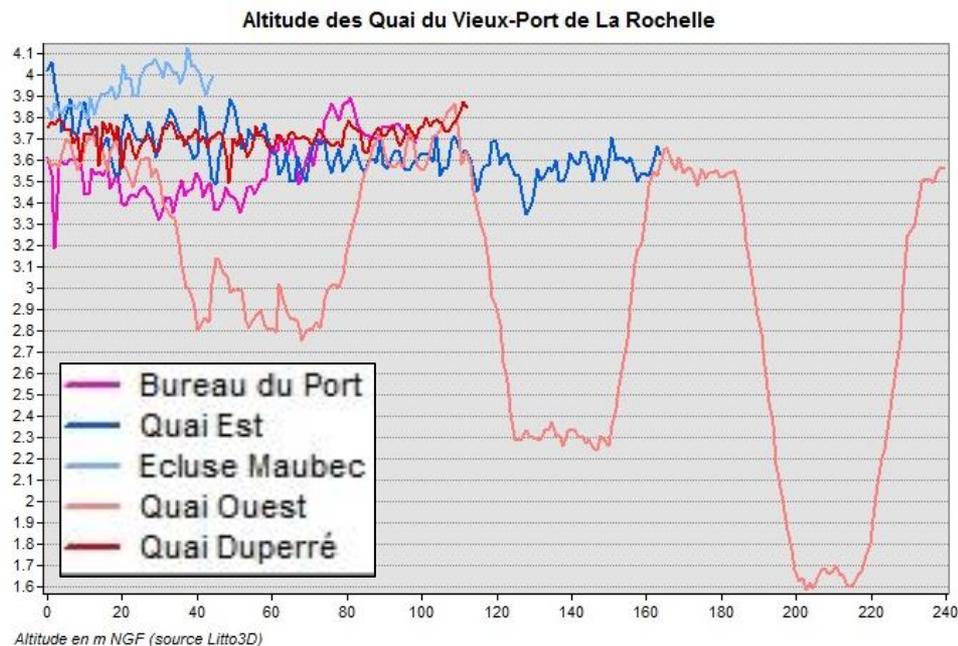
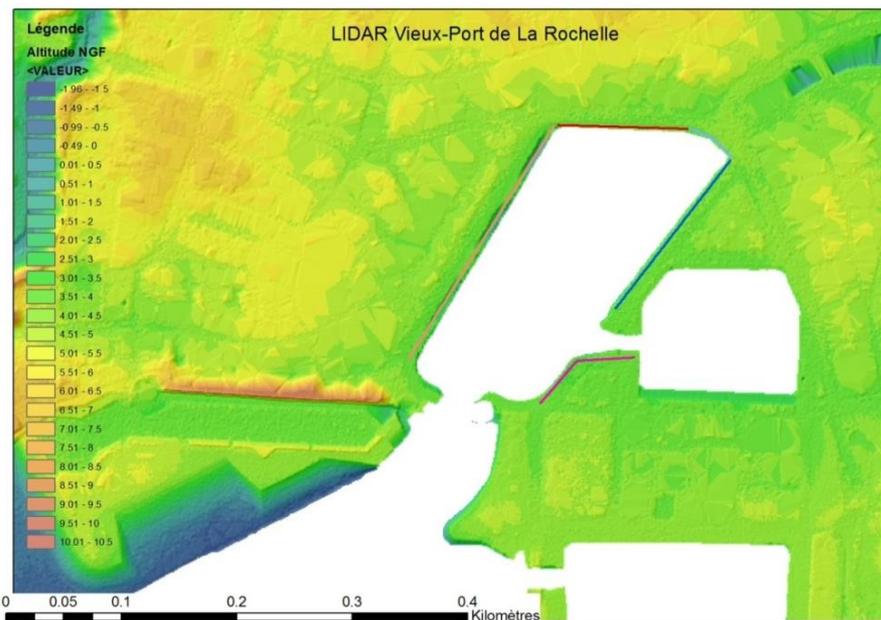
- Période systématique: 30 ans de données cumulées de 1941 à 2013 (REFMAR, <http://data.shom.fr/#donnees>)
- Période historique: 8 événements historiques ayant submergé le vieux port de La Rochelle depuis 1890. Seuil de perception = altitude du quai du vieux port de La Rochelle

Date (dd/mm/yyyy)	Sources
22-23/01/1890	Garnier et Surville (2010); Lambert (2014)
10-11/02/1895	Garnier et Surville (2010); Lambert (2014)
08-09/01/1924	Garnier et Surville (2010); Lambert (2014)
10/11/1931	Lambert (2014)
13-14/03/1937	Lambert (2014)
16/11/1940	Garnier et Surville (2010); Lambert (2014)
16/02/1941	Garnier et Surville (2010); Lambert (2014)
15/02/1957	Garnier et Surville (2010)

# Application: La Rochelle

## > Données

- Quelle altitude du quai du vieux port de La Rochelle ?



- Moyenne sur 457 points = 7.1 m  $\pm$  0.1 m ZH (ou 3.6 m NGF)

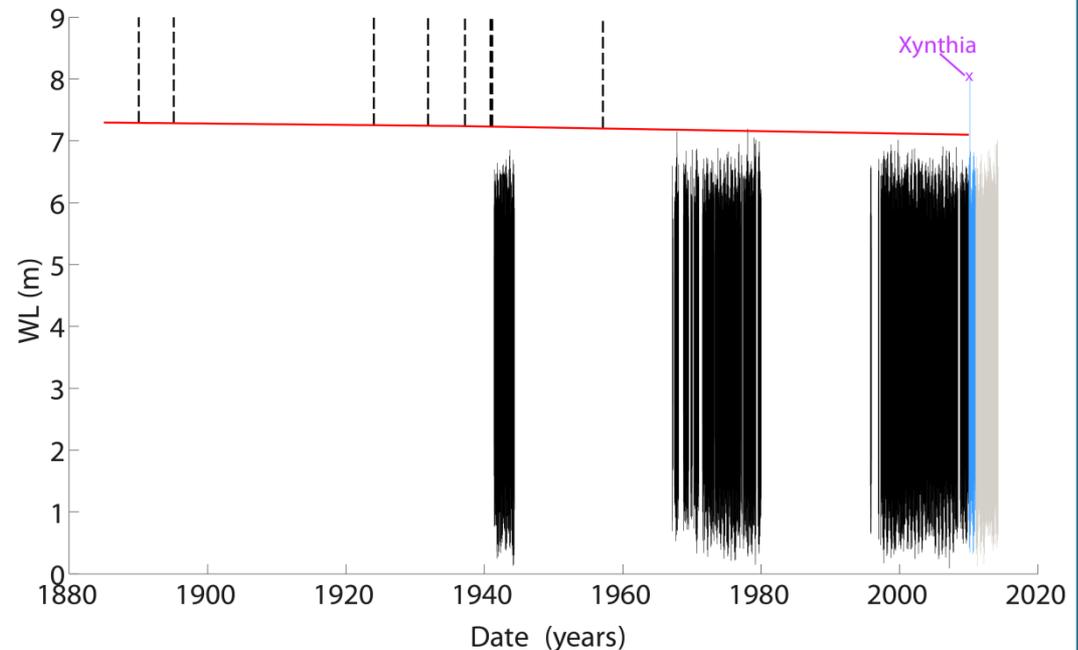
# Application: La Rochelle

## > Données

- Tendence linéaire élévation niveau moyen 1,9 mm.an<sup>-1</sup> calculée sur période 1941-2013
- Hypothèse: tendance à La Rochelle similaire à tendance globale.
- Tendence 1890-1935: 1,1 mm.an<sup>-1</sup> (Church & White, 2011)
- Tendence 1936-2013: 1,9 mm.an<sup>-1</sup>

Exemple correction seuil de perception historique:

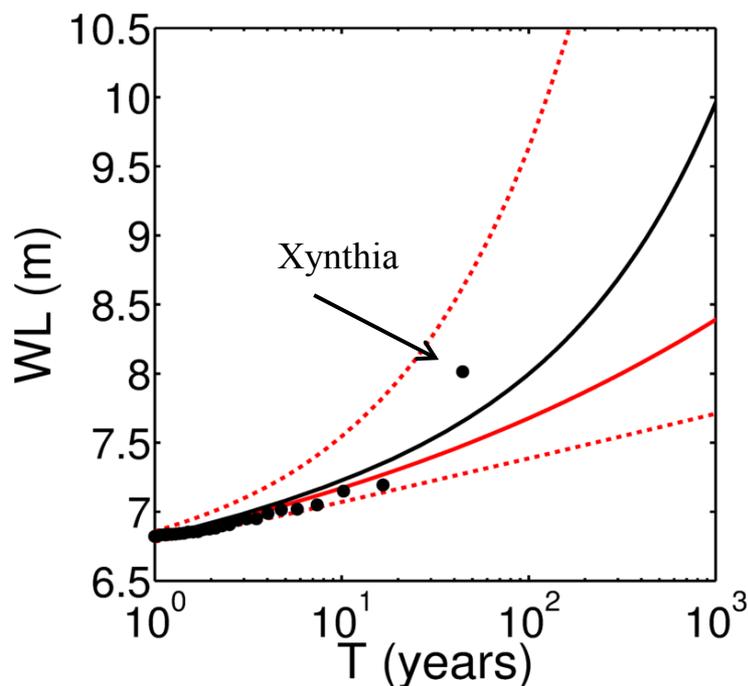
7.1m ZH en 1890 devient  
 $7.1 + 0.0019(2010 - 1936) + 0.0011(1936 - 1890) = 7.29\text{m}$   
en 2010



# Application: La Rochelle

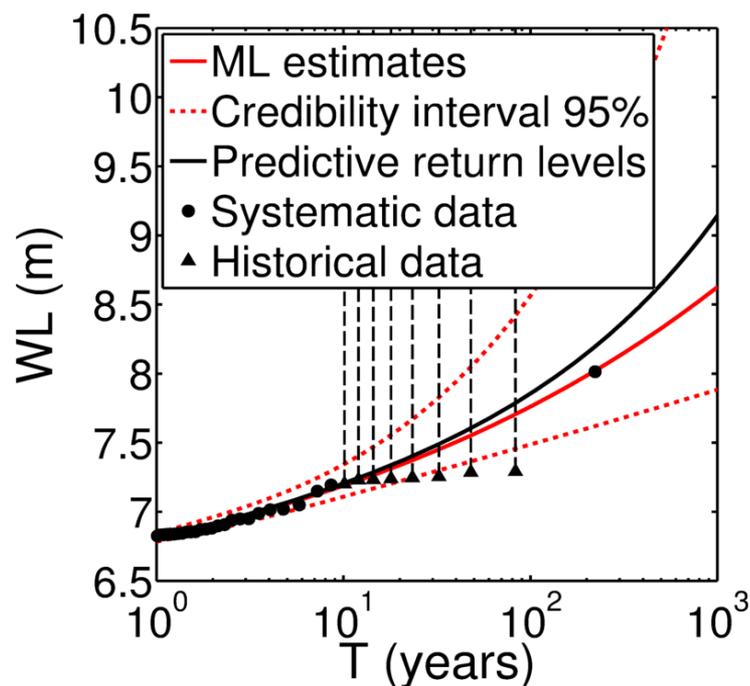
## > Objectifs et résultats (simulation de 50000 paramètres GPD $\theta$ )

- (Q1) Le niveau d'eau atteint pendant Xynthia à La Rochelle est-il réellement un horsain ?



Jusqu'à la fin de l'année 2010

Sans information historique



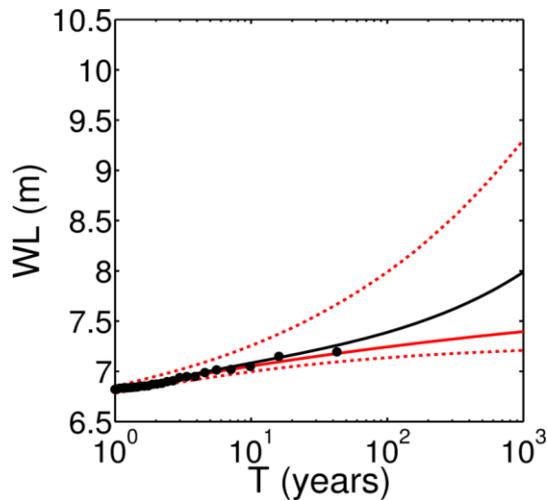
Jusqu'à la fin de l'année 2010

Avec information historique

# Application: La Rochelle

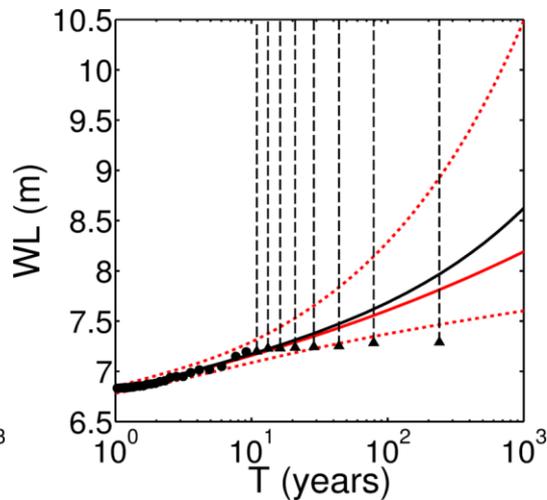
## > Objectifs et résultats (simulation de 50000 paramètres GPD $\theta$ )

- (Q2) Aurait-on pu prédire la probabilité annuelle de dépassement d'un tel niveau d'eau avant 2010 ?



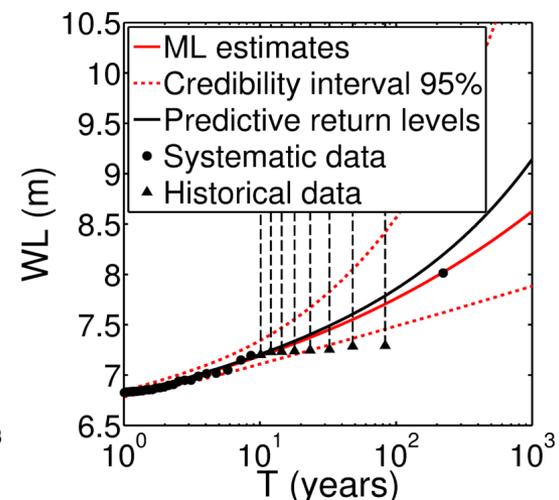
Jusqu'à la fin de 2009

Sans information historique



Jusqu'à la fin de 2009

Avec information historique



Jusqu'à la fin de l'année 2010

Avec information historique

# Conclusion

- > **L'utilisation de l'information historique permet de relativiser le caractère d'horsain du niveau d'eau enregistré pendant Xynthia à La Rochelle ; les incertitudes statistiques ont été réduites**
- > **Sans Xynthia, l'utilisation de l'information historique disponible permet de prédire le bon ordre de grandeur de la probabilité annuelle de dépassement d'un tel niveau.**
- > **Limites/incertitudes**
  - On suppose que la série marégraphique au port de La Pallice et l'information historique au niveau du vieux port de La Rochelle sont comparables
  - Estimation du seuil de perception
  - Choix du seuil  $u$  de la loi GPD
  - Variabilités saisonnière et interannuelle non prises en compte



# Conclusions

## > Perspectives

- Quantifier offset entre La Pallice et le vieux port de La Rochelle
- Utiliser l'approche bayésienne dans le cadre d'un calcul indirect des niveaux d'eau extrêmes (séparation surcote/marée)
- Intégrer diverses sources de données (sorties de modèle, séries marégraphiques, info historique...) avec leurs incertitudes
- Prise en compte de la variabilité interannuelle
- ...

# MERCI POUR VOTRE ATTENTION



Bulteau et al. (2015) - How historical information can improve estimation and prediction of extreme coastal water levels: application to the Xynthia event at La Rochelle (France), Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 15, 1135-1147.