



300 ans d'hydrographie

# PRÉDICTION DE MARÉE DANS LE PASSÉ POUR L'ESTIMATION DES SURCOTES HISTORIQUES

Yann Ferret et Gaël André (gael.andre@shom.fr)

## 1 - Contexte

2 méthodes utilisées dans le cadre du GT Tempête pour calculer les prédictions de marées historiques:

A - Utilisation de données marégraphiques **historiques contemporaines à l'événement** pour estimer des composantes harmoniques (CH) et du niveau marin moyen (NM) lors de l'événement.

B - Utilisation des composantes harmoniques **modernes** (CH officielles Shom) estimées par analyse harmonique sur des données marégraphiques récentes

→ ajustement du niveau moyen de la mer en utilisant une tendance linéaire estimée sur les moyennes journalières SONEL ([www.sonel.org](http://www.sonel.org)).

Objectif : Comparer et quantifier les écarts entre les deux méthodes d'estimation des surcotes de PM

en se basant sur :

- Une liste d'événements de tempête (surcotes importantes observées)
- Une étude systématique des 10 surcotes maximales annuelles affectant une station marégraphique

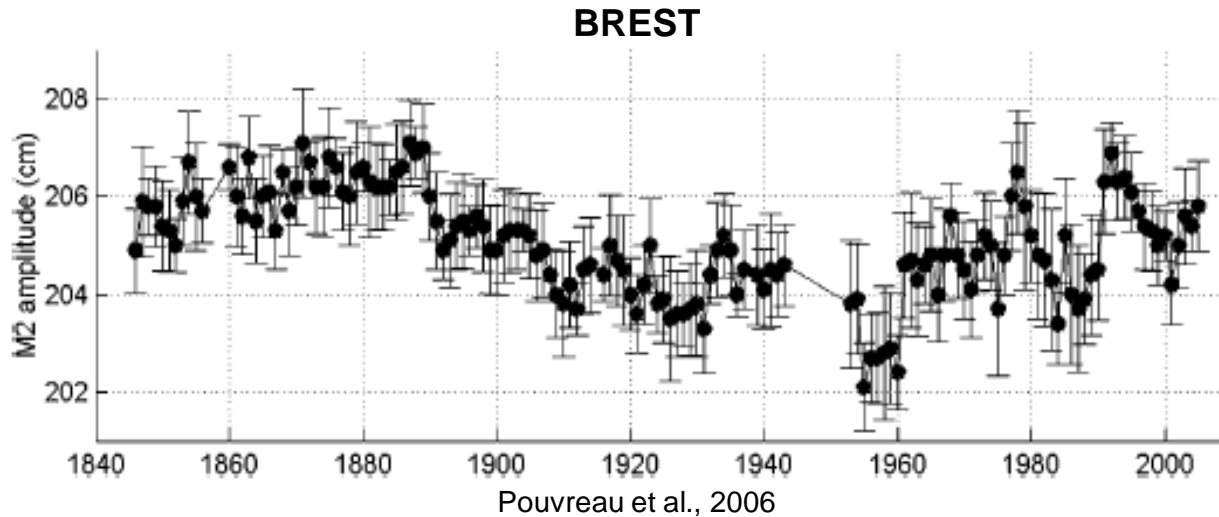
## 2 - Evolution des caractéristiques de la marée au cours du temps

Analyse harmonique glissante

→ Evolution des constantes harmoniques

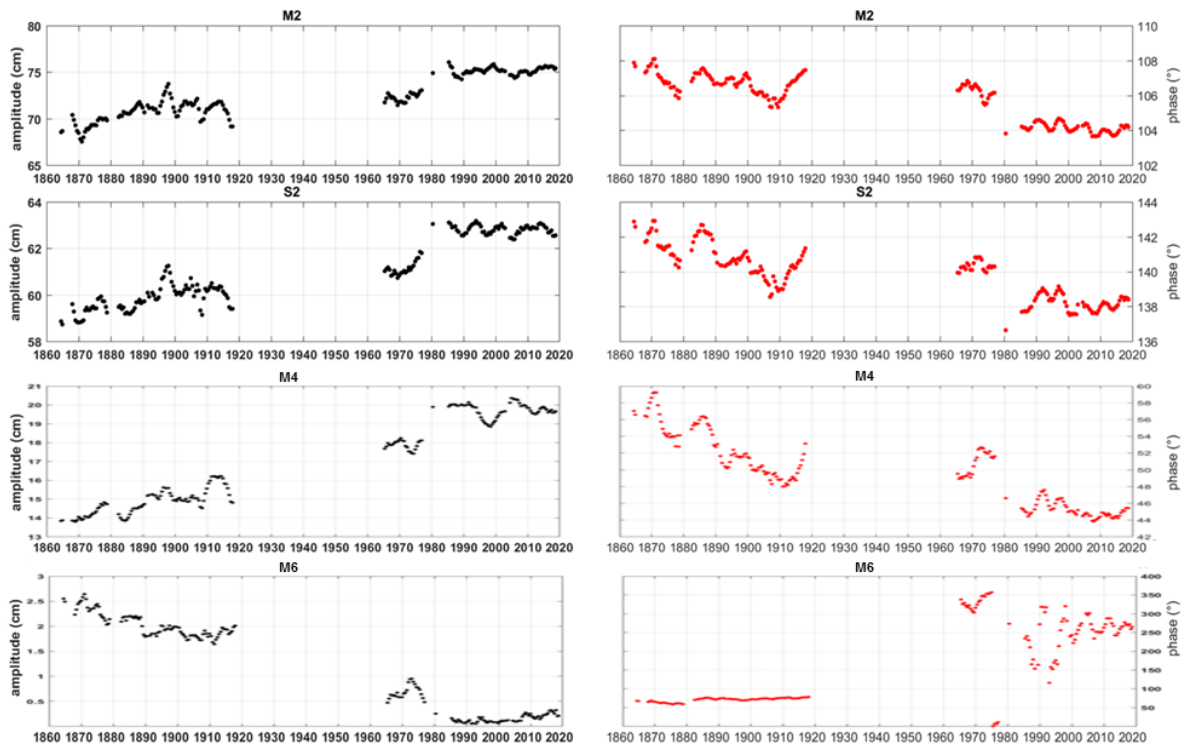
Exemple de Brest

- Variations temporelles pluriannuelles



## 2 - Evolution des caractéristiques de la marée au cours du temps

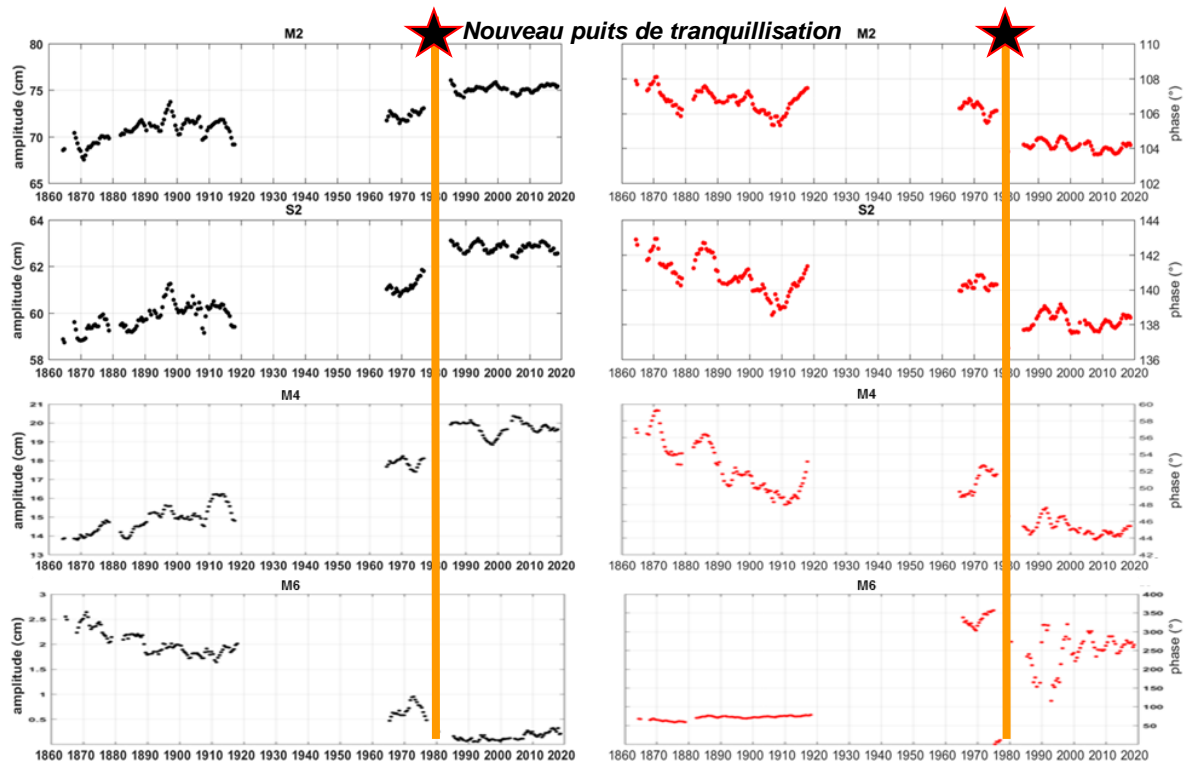
### SAINT-NAZAIRE



- Variations temporelles pluriannuelles

## 2 - Evolution des caractéristiques de la marée au cours du temps

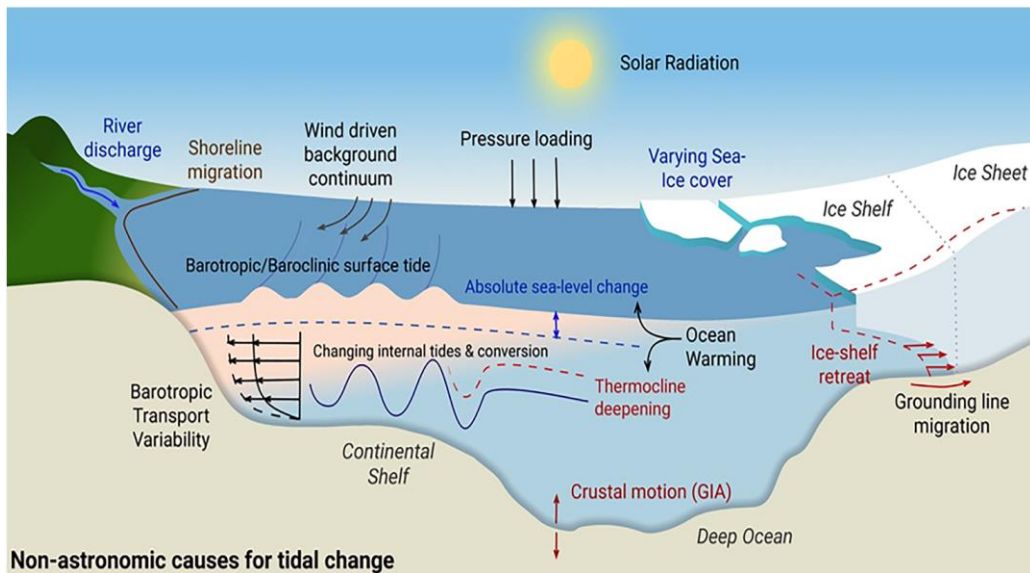
### SAINT-NAZAIRE



- Variations temporelles pluriannuelles
- Influence des caractéristiques de l'observatoire de marée (marégraphe + puits de tranquillisation)

## 2 - Evolution des caractéristiques de la marée au cours du temps

### Causes non-astronomiques des évolutions des caractéristiques de la marée



Haigh et al., 2019

### Causes régionales

eustatisme, cyclicités  
météorologiques / océanographiques  
pluri-annuelles à pluri-décennales, ...

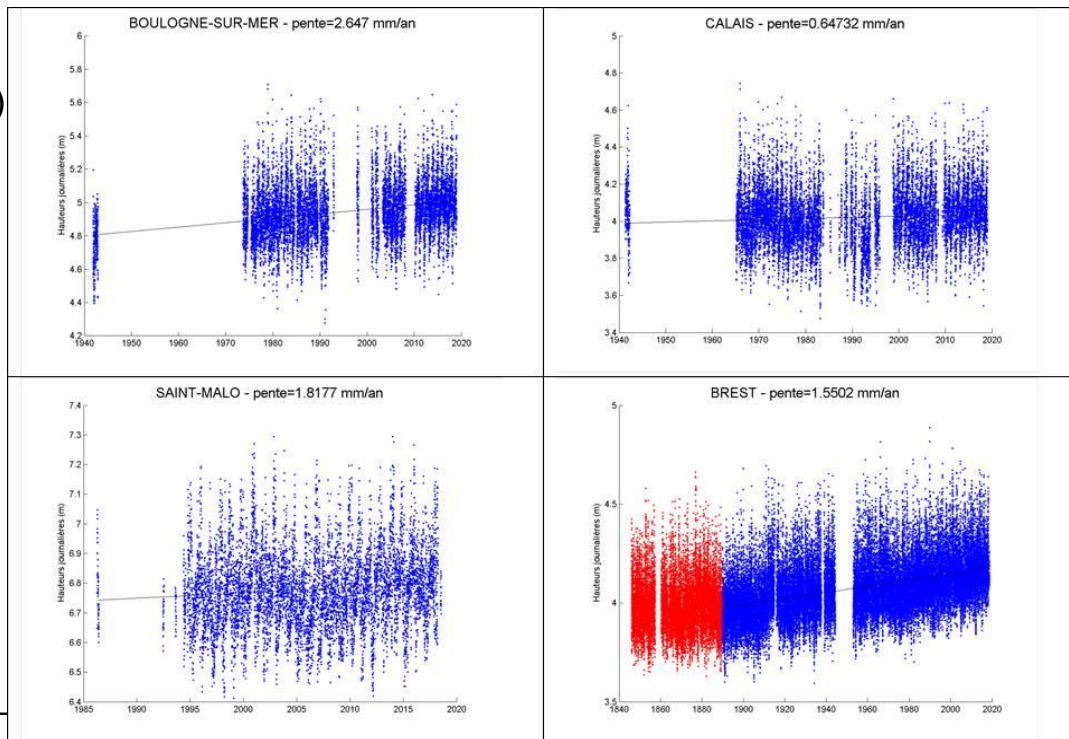
### Locales

dragage, chenalisation en zone  
estuarienne, influence de débits,  
anthropisation, changements  
instrumentaux, ...

### 3 - Evolution des niveaux moyens de la mer

Tendance linéaire :

- entre le 01/01/1890 et le 01/01/2020
- niveaux moyens journaliers ([www.sonel.org](http://www.sonel.org))

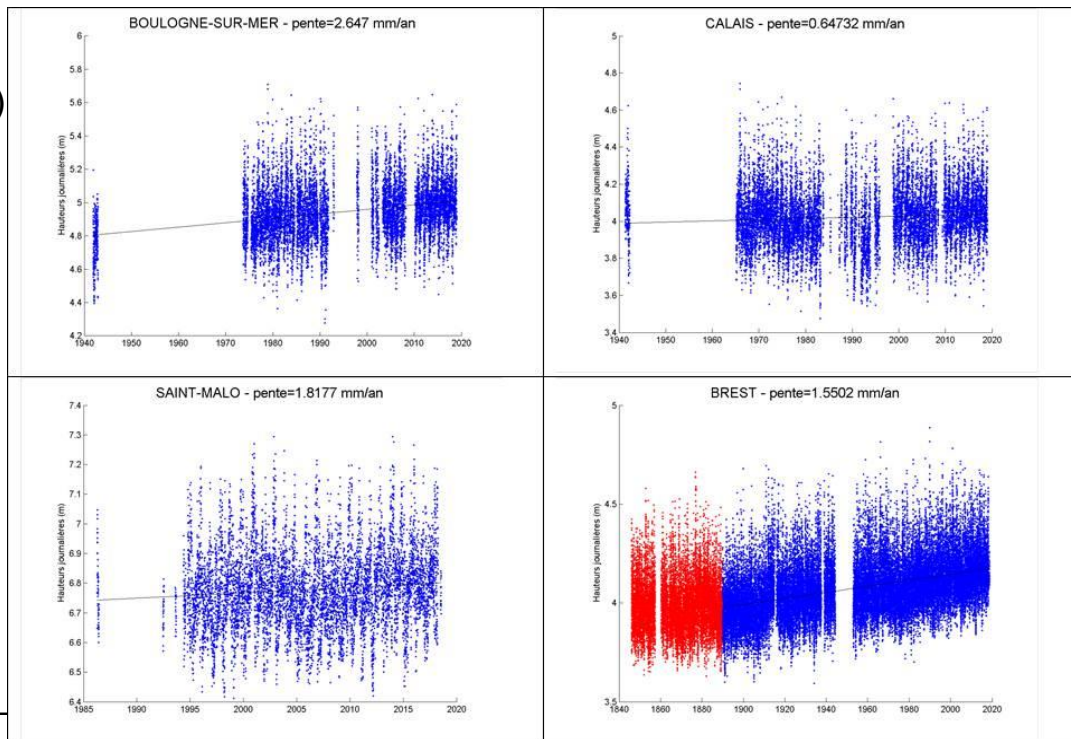


## 3 - Evolution des niveaux moyens de la mer

Tendance linéaire :

- entre le 01/01/1890 et le 01/01/2020
- niveaux moyens journaliers ([www.sonel.org](http://www.sonel.org))

PORT	Tendance mm/an	Incertitude mm/an
SAINT-NAZAIRE	1.552403	0.138426
BOULOGNE-SUR-MER	<b>2.647033</b>	0.175317
CHERBOURG	1.499354	0.134005
LE_HAVRE	1.924234	0.113101
BREST	1.550246	<b>0.033059</b>
DUNKERQUE	1.599719	0.119114
BOUCAU-BAYONNE	1.685433	0.145791
CALAIS	<b>0.647322</b>	0.135818
LA_ROCHELLE-PALLICE	1.916297	0.107866
SAINT-MALO	1.81768	<b>0.386913</b>





## 4 - Prédiction de marées historiques : 2 méthodes

### A - Constantes harmoniques historiques (CST\_Histo)

- Analyse Harmonique (AH) réalisée en considérant les observations marégraphiques historiques
- Prédiction de marée grâce aux CST\_Histo
- Estimation de la surcote de PM (s'affranchit d'un potentiel déphasage)

Nécessité : Avoir assez d'observation disponible autour de l'événement afin de réaliser l'AH

- Contrainte forte car plus on remonte dans le temps, plus ce critère est difficile à remplir

Avantages :

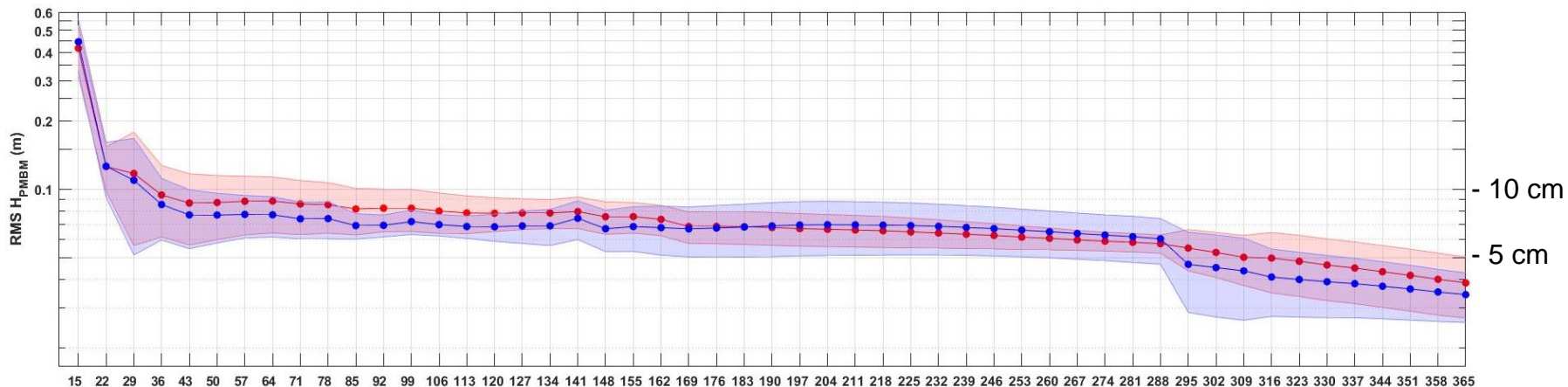
- S'affranchit d'une correction du niveau moyen de la mer
- Possibilité de travailler avec des observations dont des incertitudes quant au calage du 0 instrumental demeurent (flag "M") (hypothèse : le calage est resté le même pendant la période)
- Pas d'effet dû à l'anthropisation du port sur les caractéristiques de la marée

## 4 - Prédications de marées historiques : 2 méthodes

### A - Constantes harmoniques historiques (CST Histo)

Nécessité : Avoir assez d'observation disponible autour de l'événement afin de réaliser l'AH

Influence de la durée d'observation utilisée pour l'AH : RMS résidus,  $f(\text{durée Obs})...$



=> Un an d'observation sans lacune suffisant pour faire l'AH (RMS < 5cm)

## 4 - Prédications de marées historiques : 2 méthodes

### A - Constantes harmoniques historiques (CST Histo)

**Méthode:** jeu de constantes harmoniques utilisé pour estimer la surcote de PM, issu de plusieurs AH réalisées sur une période d'observation contenant l'évènement.

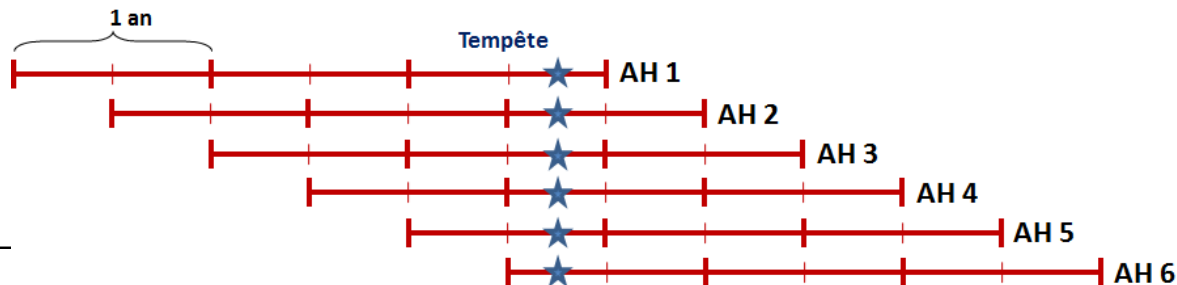
#### **Les AH faites sur 3 ans d'obs (tolérance: 6 mois de lacunes)**

→ permet une bonne estimation des principales CH et de diminuer la variabilité des résultats (diminution de l'impact d'années tempétueuses, ...), tout en permettant de trouver des données historiques.

#### **Estimation variabilité :**

#### **AH glissante avec un pas d'incrémentation de 6 mois.**

Pour un événement de tempête, il est possible d'avoir jusqu'à 6 jeux de constantes et donc 6 estimations de SPM :



## 4 - Prédictions de marées historiques : 2 méthodes

### B - Constantes harmoniques modernes (CST officielles / 2017-2019) avec un niveau moyen ajusté

- Prédictions de marée grâce aux CH modernes (officielles Shom ; 2017-2019)
- Correction du niveau moyen (soustraction de la tendance long-terme du NM SONEL)
- Estimation de la surcote de PM

#### Nécessité :

- Disposer de données récentes (2017-2019) sur le site.
- Disposer de série longue sur le site pour avoir une tendance du NM significative

Avantages : Pas nécessaire d'avoir 1 an d'observations marégraphiques historiques

Limites : - Anthropisation portuaire au cours du temps et cyclicités climatiques non prises en compte  
- En fonction de la durée des observations, la tendance calculée est +/- incertaine

## 5 – Comparaison entre les deux méthodes de prédiction de marée

Etude ponctuelle : Sur une liste d'événements de tempête issus de la BD Tempête pour lesquels des surcotes importantes ont été observées

Date	01/01/1877	01/01/1877	12/03/1967	06/11/1967	22/11/1971	14/12/1973	14/12/1973	08/05/1974	12/12/1978	11/12/1979	15/12/1979	11/12/1982	13/12/1982	02/02/1983	15/10/1987	16/10/1987
PORT	SAINT-NAZAIRE	BREST	SAINT-NAZAIRE	LA ROCHELLE	DUNKERQUE	CALAIS	DUNKERQUE	LE HAVRE	CHERBOURG	BOULOGNE	CHERBOURG	BOUCAU	BOUCAU	BOULOGNE	BREST	BOULOGNE
Heau (m)	7.23	8.02	6.46	6.09	6.71	8.06	7.08	8.79	6.57	8.42	5.93	4.42	4.62	9.79	6.23	7.64
Surcote Histo_An moy +/- std	1.28 +/- 0.17	0.85 +/- 0.16	0.75 +/- 0.07		0.99 +/- 0.05	0.80 +/- 0.099	1.08 +/- 0.06	1.07 +/- 0.08		1.06 +/- 0.105	0.64 +/- 0.07	0.67 +/- 0.147	0.66 +/- 0.139	0.744 +/- 0.03	1.426 +/- 0.15	1.364 +/- 0.15
Surcote CST 2017-2019	1.26-1.30	0.86-0.87	0.80-0.81	0.71-0.73	1.00-1.01	0.75-0.76	1.06-1.08	1.09-1.10	0.52-0.54	1.02-1.04	0.58-0.59	0.61-0.62	0.60-0.61	0.79-0.80	1.38-1.39	1.33-1.34
Surcote CST officielles	1.36-1.40	0.94-0.95	0.88-0.89	0.80-0.81	1.06	0.75-0.76	1.14	1.17-1.18	0.6-0.62	1.08-1.09	0.63-0.64	0.81	0.74	0.84-0.85	1.43	1.34-1.36

## 5 – Comparaison entre les deux méthodes de prédiction de marée

Etude ponctuelle : Sur une liste d'événements de tempête issus de la BD Tempête pour lesquels des surcotes importantes ont été observées

Date	01/01/1877	01/01/1877	12/03/1967	08/05/1974	11/12/1982	02/02/1983
PORT	SAINT-NAZAIRE	BREST	SAINT-NAZAIRE	LE HAVRE	BOUCAU	BOULOGNE
Heau (m)	7.23	8.02	6.46	8.79	4.42	9.79
Surcote Histo_An moy +/- std	1.28 +/- 0.17	0.85 +/- 0.16	0.75 +/- 0.07	1.07 +/- 0.08	0.67 +/- 0.147	0.744 +/- 0.03
Surcote CST 2017-2019	1.26-1.30	0.86-0.87	0.80-0.81	1.09-1.10	0.61-0.62	0.79-0.80
Surcote CST officielles	1.36-1.40	0.94-0.95	<b>0.88-0.89</b>	<b>1.17-1.18</b>	<b>0.81</b>	<b>0.84-0.85</b>

→ Bonne cohérence entre les surcotes CST Historiques et CST 2017-2019 (écarts ~ 5 cm)

→ Surestimation des surcotes avec CST officielles (écarts pouvant atteindre ~15 cm)

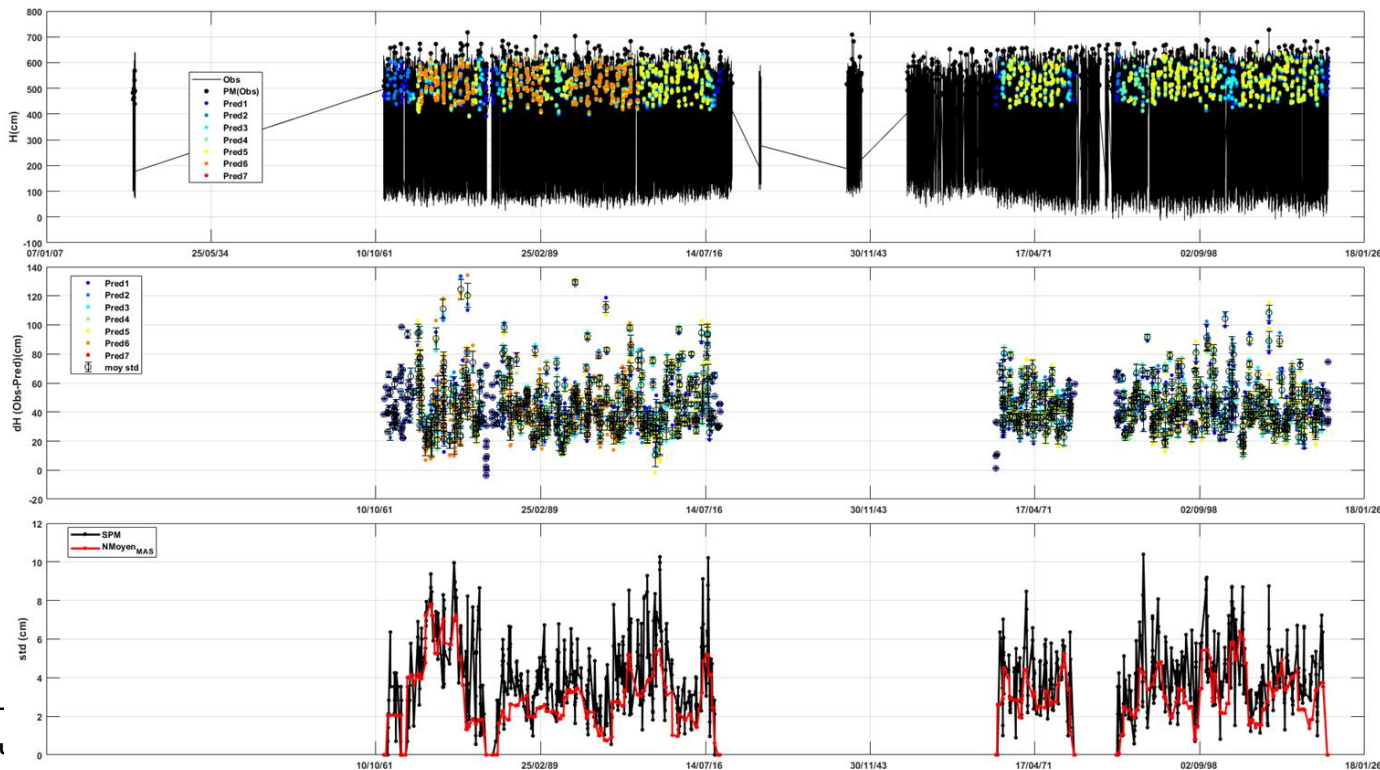
- NM des CST officielles dépend de la période d'observations utilisée pour l'AH

## 5 – Comparaison entre les deux méthodes de prédiction de marée

### Etude systématique : 10 surcotes maximales annuelles

SAINT-NAZAIRE

Séries temporelles des hauteurs et surcotes de PM



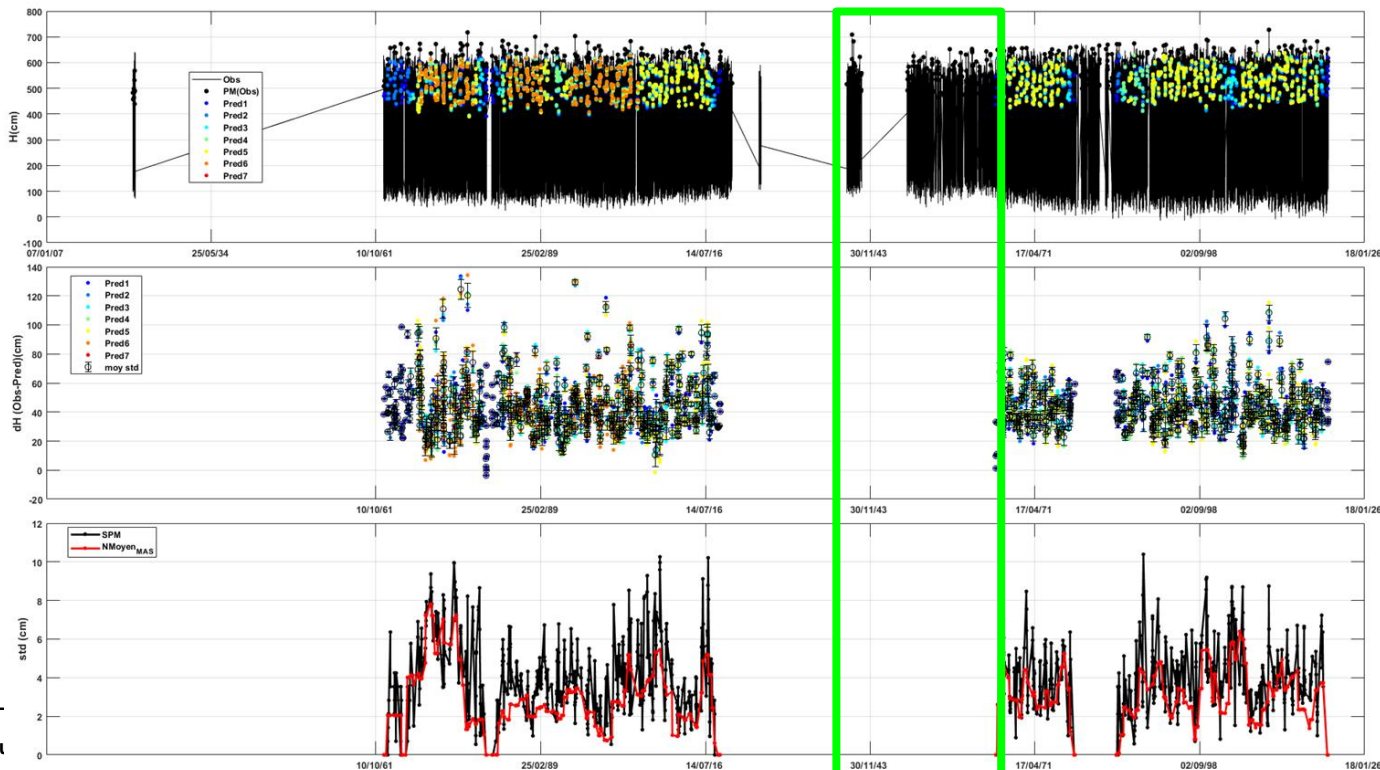
## 5 – Comparaison entre les deux méthodes de prédiction de marée

### Etude systématique : 10 surcotes maximales annuelles

SAINT-NAZAIRE

Séries temporelles des hauteurs et surcotes de PM

Importance de la durée d'obs. considérée lors de l'AH : Obs non utilisable si trop de lacunes et/ou trop courtes





## 5 – Comparaison entre les deux méthodes de prédiction de marée

### Etude systématique : 10 surcotes maximales annuelles

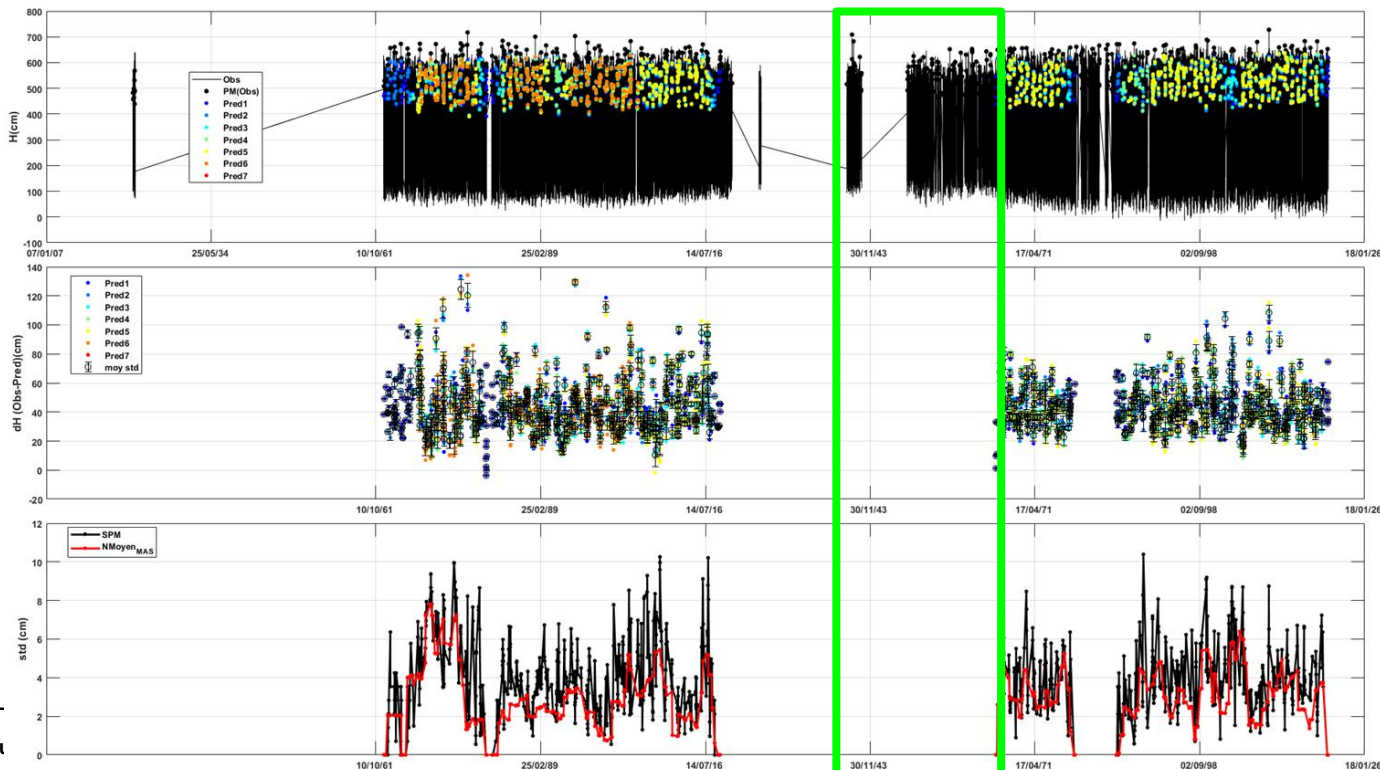
#### SAINT-NAZAIRE

Séries temporelles des hauteurs et surcotes de PM

Importance de la durée d'obs. considérée lors de l'AH : Obs non utilisable si trop de lacunes et/ou trop courtes

Variabilité des SPM corrélée à celle des NM

→  $\sigma(\text{SPM}) \approx \sigma(\text{NM})$



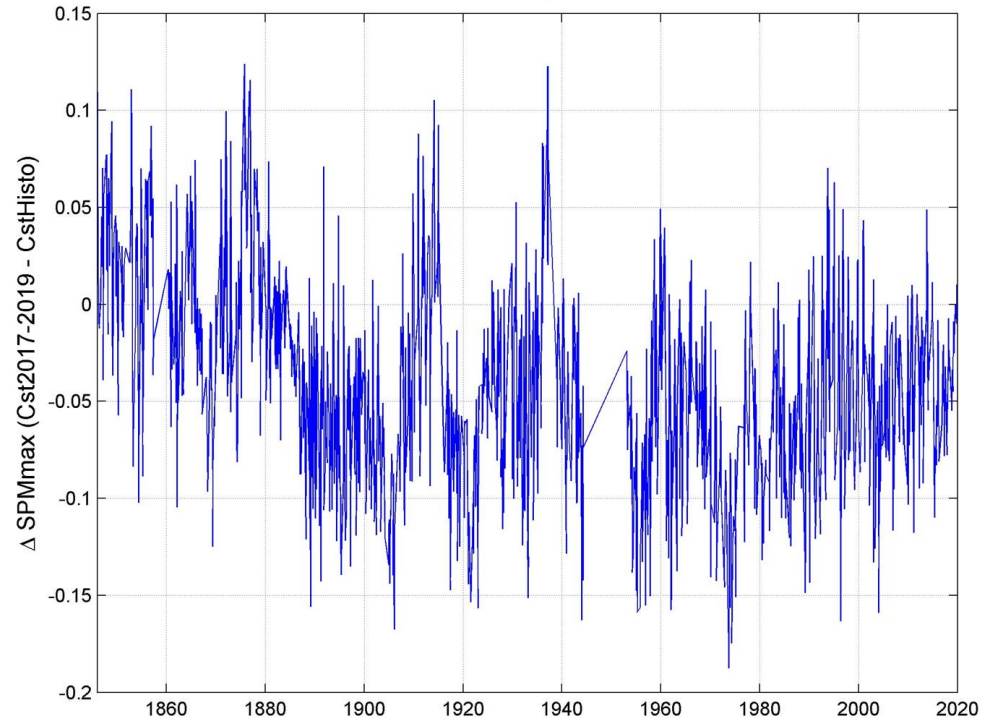
## 5 – Comparaison entre les deux méthodes de prédiction de marée

### Etude systématique : 10 surcotes maximales annuelles

BREST

Comparaison des surcotes maximales annuelles  
CST 2017-2019 - CST Historiques

(cm)	Mean( $\Delta$ )	Mean(  $\Delta$  )	Std( $\Delta$ )
BREST	-3,944	5,588	5,482

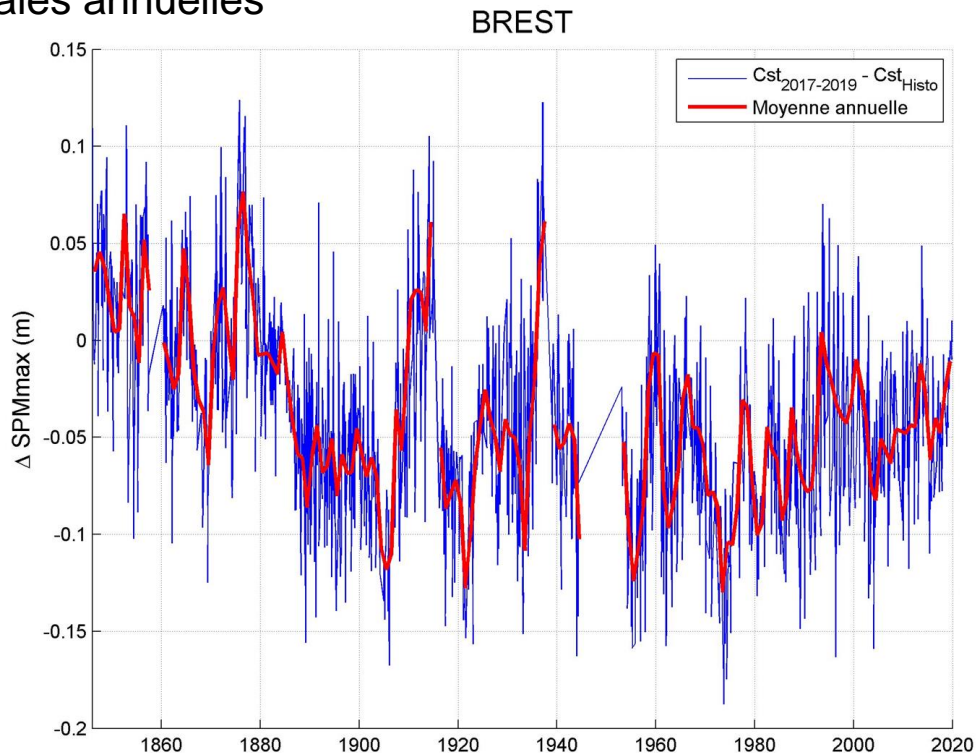


## 5 – Comparaison entre les deux méthodes de prédiction de marée

### Etude systématique : 10 surcotes maximales annuelles

Comparaison des surcotes maximales annuelles  
CST 2017-2019 - CST Historiques

(cm)	Mean( $\Delta$ )	Mean(  $\Delta$  )	Std( $\Delta$ )
BREST	-3,944	5,588	5,482



## 5 – Comparaison entre les deux méthodes de prédiction de marée

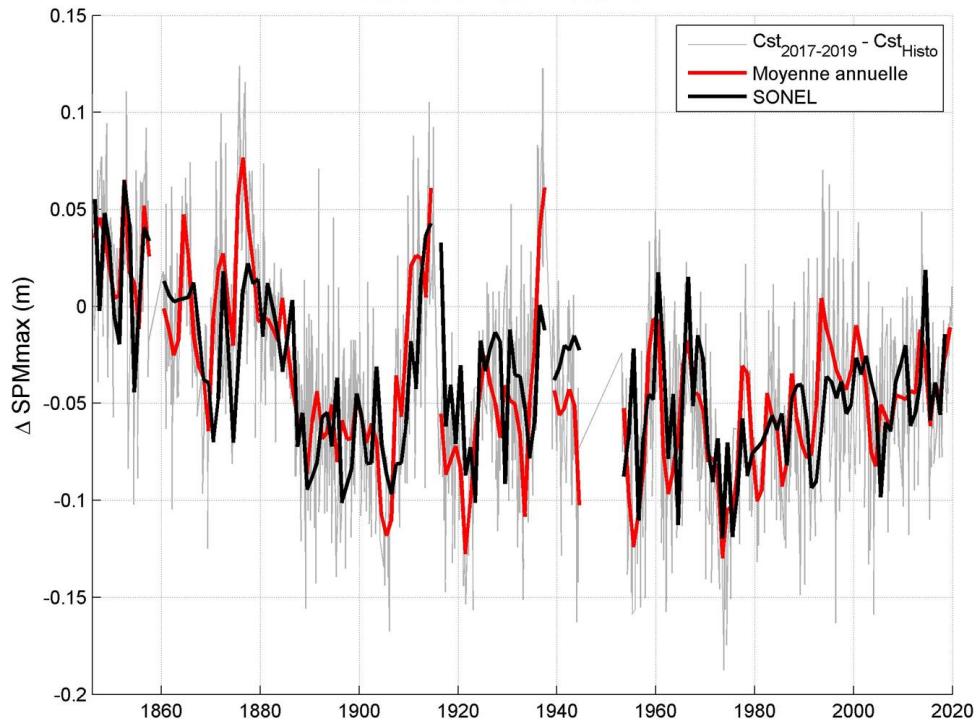
### Etude systématique : 10 surcotes maximales annuelles

BREST - corr=0.69374

Comparaison des surcotes maximales annuelles  
CST 2017-2019 - CST Historiques

NM annuel SONEL soustrait de la tendance  
linéaire long-terme

(cm)	Mean( $\Delta$ )	Mean(  $\Delta$  )	Std( $\Delta$ )
BREST	-3,944	5,588	5,482



## 5 – Comparaison entre les deux méthodes de prédiction de marée

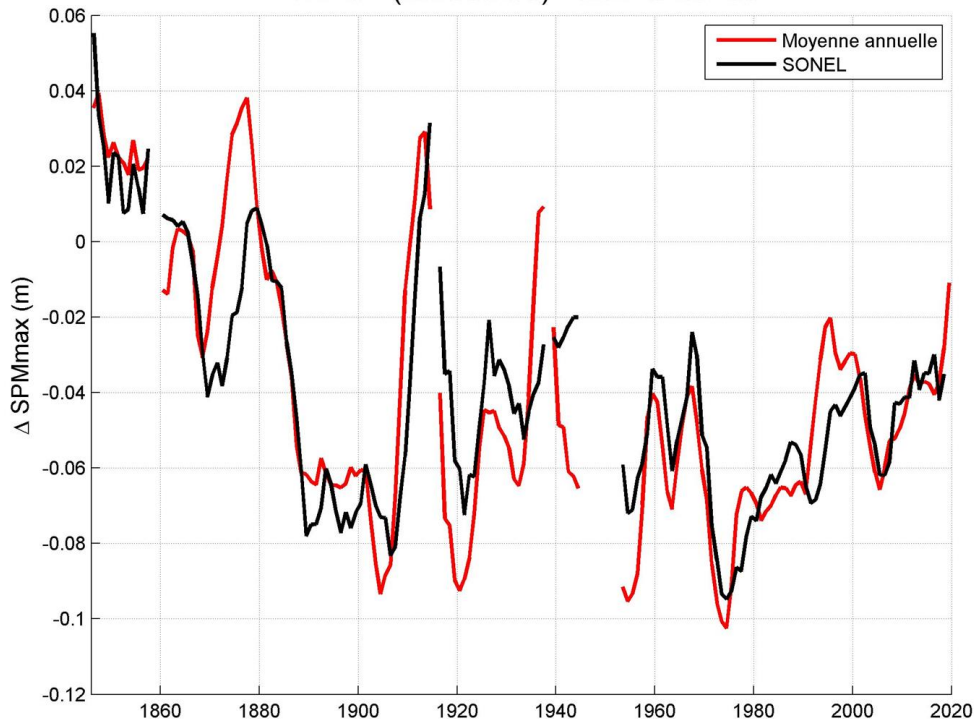
### Etude systématique : 10 surcotes maximales annuelles

BREST (Smoothed) - corr=0.85263

Comparaison des surcotes maximales annuelles  
CST 2017-2019 - CST Historiques

NM annuel SONEL soustrait de la tendance  
linéaire long-terme

(cm)	Mean( $\Delta$ )	Mean(  $\Delta$  )	Std( $\Delta$ )
BREST	-3,944	5,588	5,482

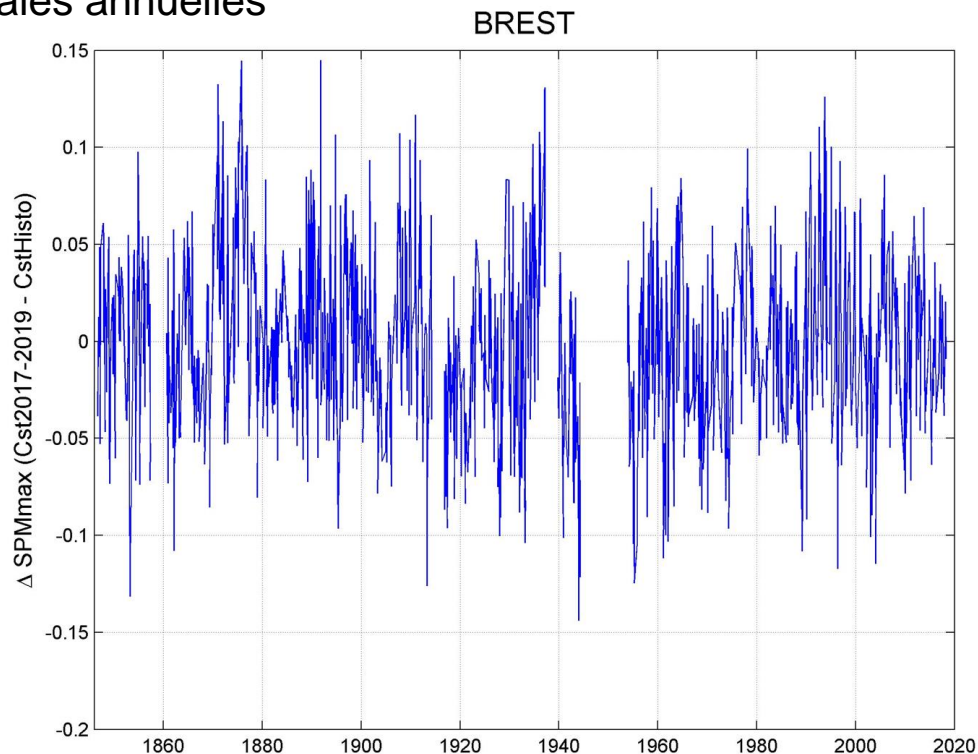


## 5 – Comparaison entre les deux méthodes de prédiction de marée

### Etude systématique : 10 surcotes maximales annuelles

Comparaison des surcotes maximales annuelles  
CST 2017-2019 - CST Historiques  
**corrigées des NM annuels SONEL**

(cm)	Mean( $\Delta$ )	Mean(  $\Delta$  )	Std( $\Delta$ )
BREST	-3,944	5,588	5,482
<b>Correction NM</b>	<b>-0,072</b>	<b>3,548</b>	<b>4,462</b>



## 5 – Comparaison entre les deux méthodes

### Etude systématique :

Comparaison des surcotes maximales annuelles  
CST 2017-2019 - CST Historiques

**corrigées des NM annuels SONEL**

**=> La prise en compte de la variabilité  
pluriannuelle du NM dans les prédictions faites  
avec la méthode CST\_modernes permet de  
réduire les écarts entre les 2 méthodes**

(cm)	Mean( $\Delta$ )	Mean(  $\Delta$  )	Std( $\Delta$ )
BREST	-3.944	5.588	5.482
<b>Correction NM</b>	<b>-0.072</b>	<b>3.548</b>	<b>4.462</b>
SAINT-NAZAIRE	-2.129	5.996	7.082
<b>Correction NM</b>	<b>0.0207</b>	<b>4.678</b>	<b>5.927</b>
CHERBOURG	-5.860	6.720	5.641
<b>Correction NM</b>	<b>-0.338</b>	<b>4.325</b>	<b>5.544</b>
LE HAVRE	-4.449	5.562	5.397
<b>Correction NM</b>	<b>-0.182</b>	<b>4.078</b>	<b>5.233</b>
DUNKERQUE	-2.617	4.830	5.369
<b>Correction NM</b>	<b>-0.076</b>	<b>4.158</b>	<b>5.134</b>
CALAIS	-8.202	9.196	8.537
<b>Correction NM</b>	<b>-0.167</b>	<b>6.128</b>	<b>7.630</b>

## 5 – Conclusions

### Etude ponctuelle :

- Bonne cohérence entre les surcotes CST Historiques et CST 2017-2019 (mais écarts ~ 5 cm)
- insuffisante pour tirer des conclusions générales sur les écarts entre les 2 méthodes

### Etude systématique :

- Bonne cohérence d'ensemble entre les deux méthodes
- Variabilité pluriannuelle des différences, corrélée avec la variabilité du NM
- ⇒ **Utiliser de préférence la méthode CST\_Histo lorsque c'est possible (avoir suffisamment d'obs.)**

### Correction de la tendance linéaire de l'élévation du NM n'est pas suffisante

- ⇒ **prise en compte de la variabilité pluriannuelle du NM dans les prédictions historiques**
  - réduction des écarts entre les 2 méthodes (pas possible pour de nombreux sites)
  - utiliser des index régionaux (Haigh et al., 2009; Woodworth et al. 2009)



**Merci de votre attention**