

# INCERTITUDES LORS DE L'ESTIMATION DE PRÉDICTION DE MARÉE DANS LE PASSÉ



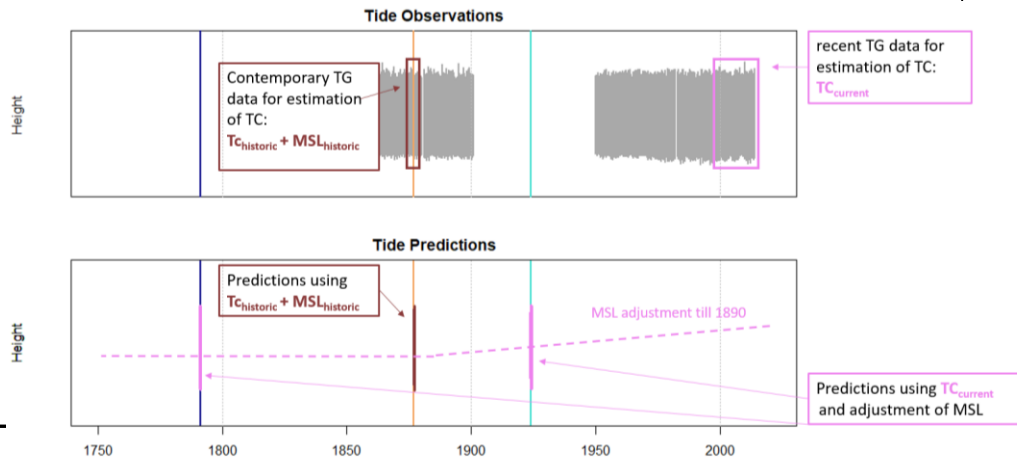
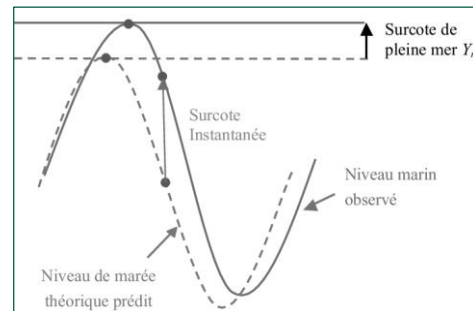
Nathalie Giloy, Alexa Latapy, Gaël André

## Contexte

### Les surcotes de Pleine Mer - variable d'intérêt dans le contexte de la sûreté nucléaire

Actuellement deux méthodes sont utilisées au sein du GT:

1. Utilisation de données marégraphiques **historiques contemporaines à l'événement** pour estimer des composantes harmoniques et du niveau marin moyen lors de l'événement
2. Utilisation des **composantes harmoniques modernes** 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)).



## Contexte

### Les surcotes de Pleine Mer - variable d'intérêt dans le contexte de la sûreté nucléaire

Actuellement deux méthodes sont utilisées au sein du GT:

1. Utilisation de données marégraphiques **historiques contemporaines à l'événement** pour estimer des composantes harmoniques et du niveau marin moyen lors de l'événement
  - + représente l'hydrodynamique contemporaine de l'événement, pas d'effets dus à l'anthropisation du port sur les caractéristiques de la marée
  - + s'affranchit d'une correction du niveau moyen de la mer
  - Variabilité interannuelles non pris en compte si observations trop courtes
  - Nécessite des / assez d'observations disponible autour de l'événement
2. Utilisation des **composantes harmoniques modernes** 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)).
  - + toutes composantes harmoniques résolues (19 ans)
  - + plus de stations disponibles
  - Anthropisation portuaire/littorale au cours du temps et cyclicités climatiques non prises en compte
  - En fonction de la durée des observations la tendance calculée est +/- incertaine

## Contexte

### Les surcotes de Pleine Mer - variable d'intérêt dans le contexte de la sûreté nucléaire

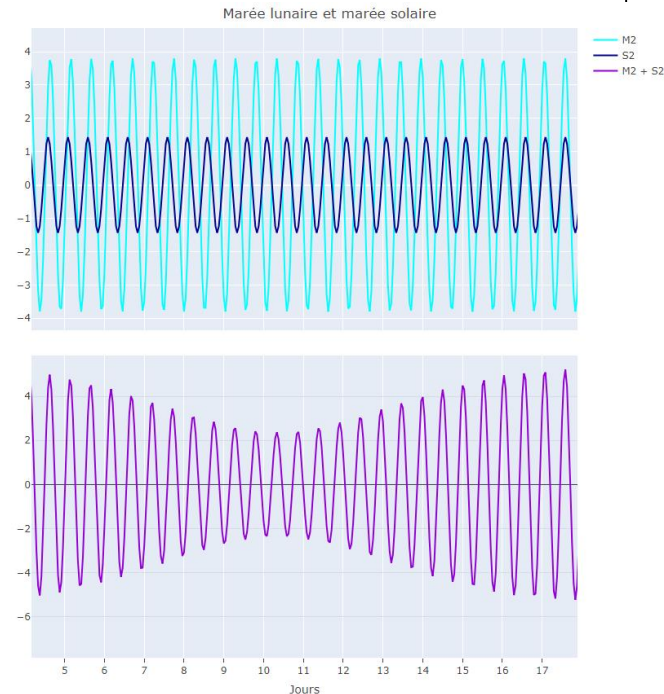
*Qu'est ce qu'une analyse harmonique ?*

Le phénomène de marée peut être perçu comme un **mouvement régulier** (mais pas forcément périodique). C'est par le biais de l'analyse harmonique qu'il est possible de séparer un certain nombre de composantes de marée du signal total (M2, S2, N2, M4, K1,.....) → on obtient des **amplitude et des phases pour chaque onde**, calculés en fonction d'une **référence verticale fixe**. Dans notre cas ici, cette référence est le **niveau moyen de la mer**.

Prédiction de marée : utilisation des composantes de marée (CH) à une station donnée **pour recréer le signal de marée**.

**Problème :**

- **Comment faire quand le niveau de la mer n'est pas constant ?**
- **Ou quand les CH varient ?**
- **Quand on a peu d'observations disponibles ?**



## Contexte

### Les surcotes de pleine mer - variable d'intérêt dans le contexte de la sûreté nucléaire

Objectif de cette étude:

- Analyser les sources d'erreurs possibles lors de l'estimation de surcotes de pleine mer
  - Variabilité de la marée (composantes de marée)
  - Évolution du niveau de la mer
  
- Quantifier les écarts et incertitudes entre les deux méthodes

# Données

## GESLA v3

Séries longues haute fréquence (minimum horaire) avec différents types de régimes de marée et peu de données manquantes

Location of tide gauges

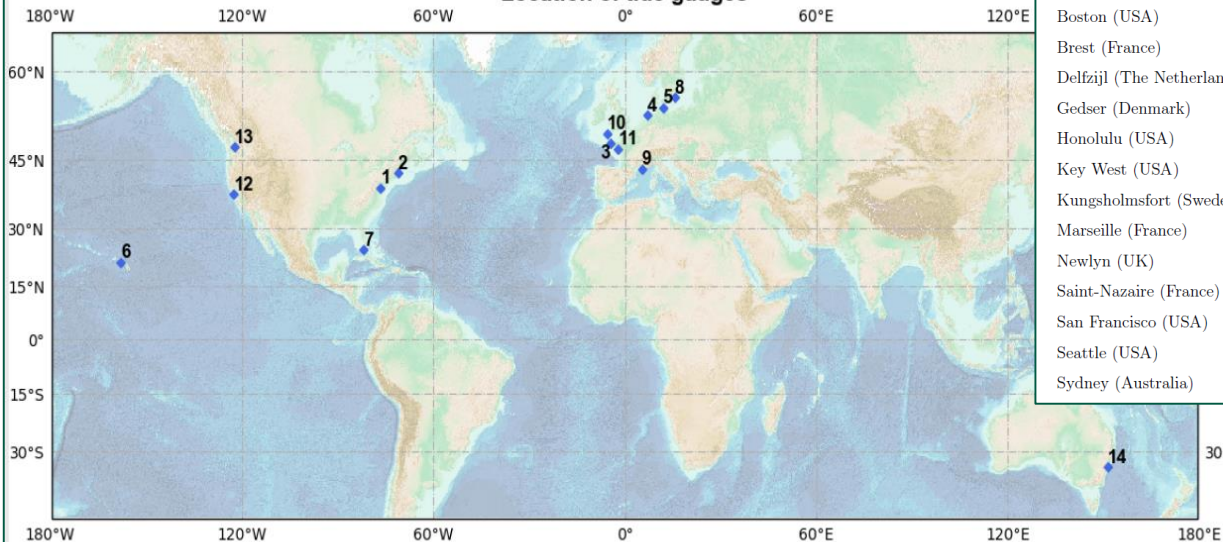


Table 1: Site characteristics and sea level data used in this study.

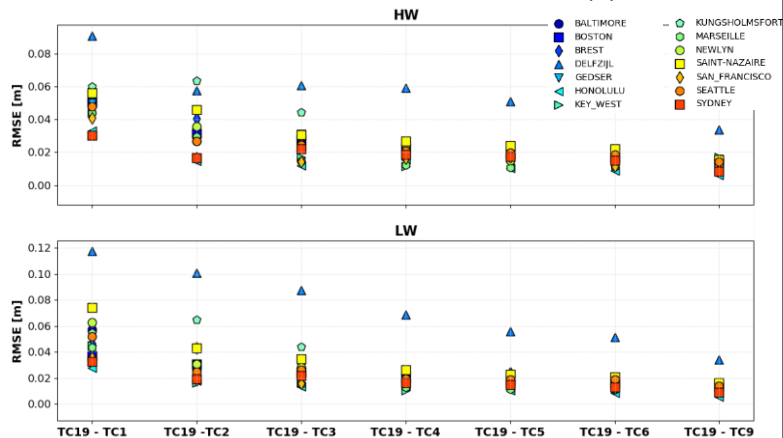
Station Name	Location [°]		Range of years	Number of cumulated years	Type	Spring tide range [m]
	Lon	Lat				
Baltimore (USA)	39.27	-76.58	1902-2021	117.8	Mixed	0.90
Boston (USA)	42.35	-71.05	1921-2018	99.1	Semi-diurnal	4.58
Brest (France)	48.38	-4.50	1846-2020	158.8	Semi-diurnal	7.68
Delfzijl (The Netherlands)	53.33	6.93	1879-2018	139.7	Semi-diurnal	4.18
Gedser (Denmark)	54.57	11.93	1891-2020	122.5	Mixed	0.23
Honolulu (USA)	21.31	-157.87	1905-2018	112.4	Mixed	0.98
Key West (USA)	24.55	-81.81	1913-2021	106.1	Mixed	1.06
Kungsholmsfort (Sweden)	56.11	15.59	1886-2021	133.7	Diurnal	0.15
Marseille (France)	43.28	5.35	1849-2018	103.3	Mixed	0.44
Newlyn (UK)	50.10	-5.54	1915-2021	103.5	Semi-diurnal	5.95
Saint-Nazaire (France)	47.27	-2.20	1821-2020	114.2	Semi-diurnal	6.55
San Francisco (USA)	37.81	-122.47	1898-2021	121.1	Mixed	2.87
Seattle (USA)	47.60	-122.34	1899-2021	122.3	Mixed	5.37
Sydney (Australia)	-33.85	151.23	1914-2019	103.6	Mixed	2.08

# Méthodes et Résultats

## 1. Incertitudes associées à la variabilité composantes harmoniques (CH)

a) Variation de la durée d'observations pour une AH:

Utilisation de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 et 19 an(s)

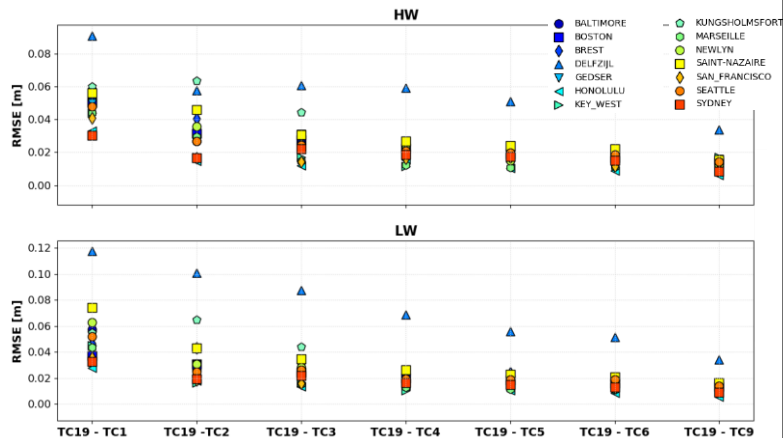


- réduction des erreurs en augmentant le nombre d'années utilisées dans l'AH
- Plus d'écart pour certains sites que pour d'autres (Delfzijl, Kungsholmsfort)

# Méthodes et Résultats

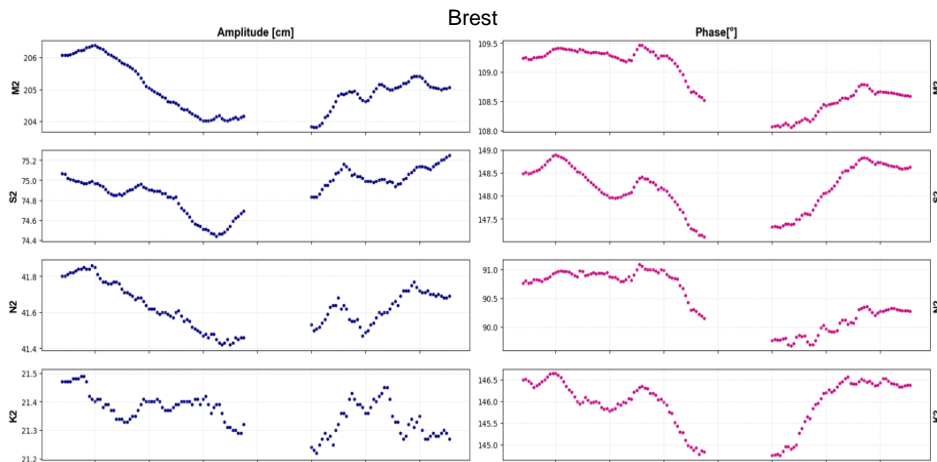
## 1. Incertitudes associées à la variabilité composantes harmoniques (CH)

a) Variation de la durée d'observations pour une AH:  
Utilisation de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 et 19 an



- réduction des erreurs en augmentant le nombre d'années utilisées dans l'AH
- Plus d'écart pour certains sites que pour d'autres (Delfzijl, Kungsholmsfort)

b) AH de 19 ans glissante sur chaque année



→ Variabilité long terme des CH



## Méthodes et Résultats

### 2. Incertitudes associées à l'évolution du niveau de la mer

a) Estimation de tendance linéaire sur 30, 60 et 120 ans

station	linear (mm.yr-1)		
	1900-actu	1960-actu	1990-actu
Baltimore	3.23 ±0.05	3.56±0.13	4.56±0.38
Boston	2.84±0.04	2.96±0.09	4.98±0.25
Brest	1.51±0.04	2.04±0.10	2.92±0.28
Delfzijl	1.97±0.07	2.30±0.22	2.98±0.62
Gedser	1.21±0.05	1.69±0.15	2.25±0.43
Honolulu	1.50±0.02	1.55±0.05	2.48±0.14
Key West	2.53±0.03	3.19±0.07	4.36±0.22
Kungsholmsf	0.01±0.04	0.65±0.14	0.95±0.37
Marseille	1.26±0.03	1.31±0.08	3.89±0.43
Newlyn	1.92±0.04	2.17±0.10	3.96±0.28
Saint-Nazaire	0.95±0.05	1.48±0.12	3.23±0.34
San Franciso	1.94±0.02	1.92±0.07	2.16±0.20
Seattle	2.08±0.03	2.07±0.09	2.13±0.28
Sydney	1.07±0.03	1.26±0.07	2.50±0.20

## Méthodes et Résultats

### 2. Incertitudes associées à l'évolution du niveau de la mer

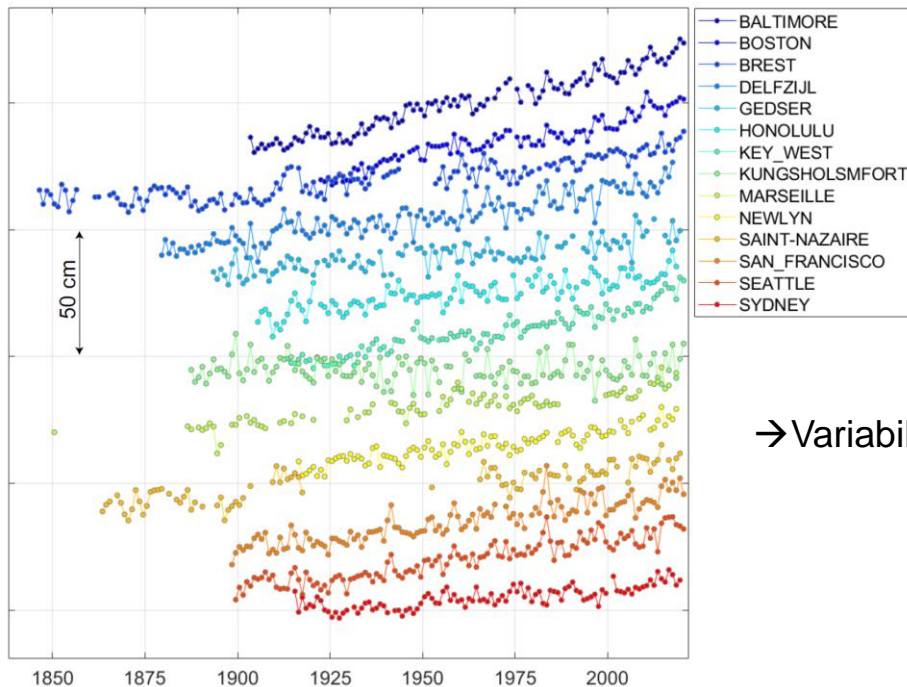
a) Estimation de tendance linéaire sur 30, 60 et 120 ans

b) Estimation de tendances polynomiales

station	linear (mm.yr-1)			acceleration mm.y-2		
	1900-actu	1960-actu	1990-actu	1900-actu	1960-actu	1990-actu
Baltimore	3.23 ±0.05	3.56±0.13	4.56±0.38	0.0083 ±0.0016	0.0703 ±0.0088	0.2191 ±0.0495
Boston	2.84±0.04	2.96±0.09	4.98±0.25	-0.0036 ±0.0016	0.1148 ±0.0056	-0.0689 ±0.0331
Brest	1.51±0.04	2.04±0.10	2.92±0.28	0.0083 ±0.0012	0.0862 ±0.0066	-0.0122 ±0.0369
Delfzijl	1.97±0.07	2.30±0.22	2.98±0.62	0.0095 ±0.0024	0.0191 ±0.0142	0.0810 ±0.0841
Gedser	1.21±0.05	1.69±0.15	2.25±0.43	0.0053 ±0.0017	0.0374 ±0.0096	-0.0148 ±0.0540
Honolulu	1.50±0.02	1.55±0.05	2.48±0.14	-0.0045 ±0.0006	0.0336 ±0.0033	0.1747 ±0.0190
Key West	2.53±0.03	3.19±0.07	4.36±0.22	0.0137 ±0.0011	0.0627 ±0.0047	0.4787 ±0.0280
Kungsholmsf	0.01±0.04	0.65±0.14	0.95±0.37	0.0194 ±0.0016	0.0045 ±0.0090	0.2990 ±0.0498
Marseille	1.26±0.03	1.31±0.08	3.89±0.43	0.0005 ±0.0010	0.1441 ±0.0060	-0.1601 ±0.0861
Newlyn	1.92±0.04	2.17±0.10	3.96±0.28	0.0115 ±0.0016	0.0841 ±0.0065	-0.0673 ±0.0370
Saint-Nazaire	0.95±0.05	1.48±0.12	3.23±0.34	0.0191 ±0.0016	0.0808 ±0.0084	-0.3359 ±0.0445
San Francisco	1.94±0.02	1.92±0.07	2.16±0.20	0.0050 ±0.0008	0.0012 ±0.0046	0.4888 ±0.0251
Seattle	2.08±0.03	2.07±0.09	2.13±0.28	0.0090 ±0.0011	0.0055 ±0.0063	0.3599 ±0.0359
Sydney	1.07±0.03	1.26±0.07	2.50±0.20	0.0156 ±0.0011	0.0487 ±0.0044	0.2078 ±0.0251

# Méthodes et Résultats

## 2. Incertitudes associées à l'évolution du niveau de la mer



→ Variabilité interannuelles visibles

## Méthodes et Résultats

### 3. Comparaison des deux méthodes

- a) Estimation de surcotes avec méthode 1 : AH glissante sur 1, 2, 5 et 19 ans sur tous les ans
- b) Estimation de surcotes avec méthode 2: CH sur période 2000-2020, puis correction du NM avec tendance sur 60 ans

# Méthodes et Résultats

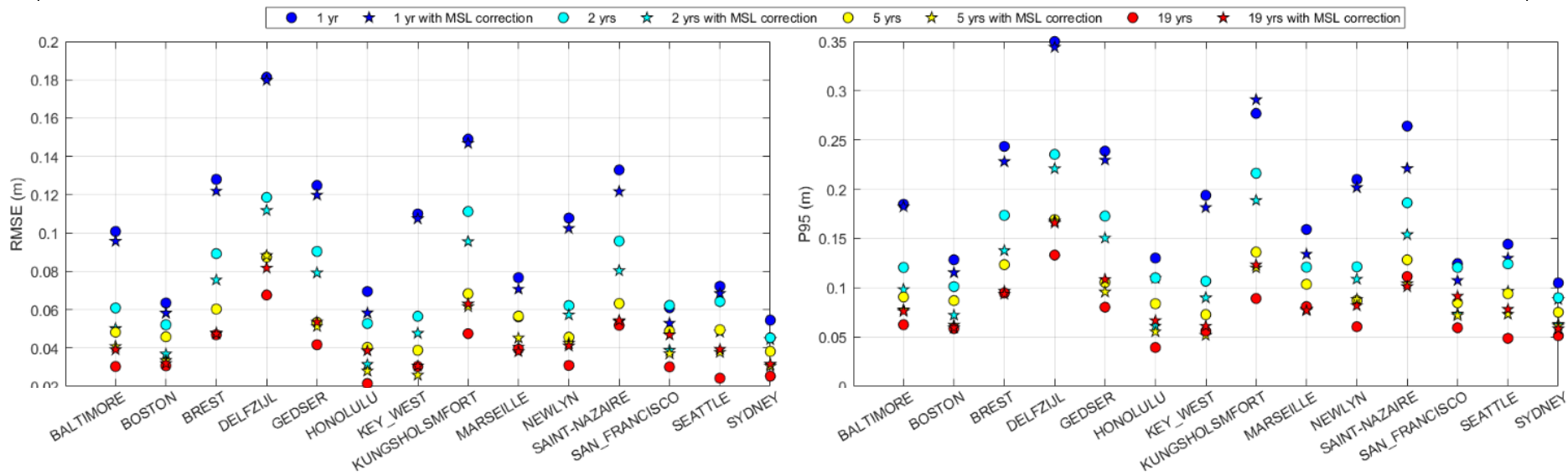
## 3. Comparaison des deux méthodes

a) Estimation de surcotes avec méthode 1 : AH glissante sur 1, 2, 5 et 19 ans sur tous les ans

b) Estimation de surcotes avec méthode 2: CH sur période 2000-2020, puis correction du NM avec tendance sur 60 ans

● ajustement de niveau moyen avec tendance linéaire estimée entre 1960- aujourd'hui

★ correction de la variation interannuelle du niveau moyen



## Discussion

### Sources d'erreurs et ordre de grandeurs

#### 1. Variabilité de la marée

- 1 an d'observation permet de résoudre des CH, qui sont potentiellement influencées par le climat de l'année (année tempétueuse ou pas) – et MSL faussé par variations interannuelles
  - Augmenter le nombre d'année d'observation permet de lisser ces effets; utilisation de 19 ans de données permet de résoudre toutes les ondes (et le cycle nodal)
  - Au cours de la période d'observation la marée peut fortement évoluer due à des changements naturels et/ou anthropique
- Problème: dans le passé on a souvent peu / pas de données d'observations

#### 2. Évolution du niveau de la mer

- Si l'on utilise une tendance estimée sur trop peu d'année, les incertitudes sont fortes et cette tendance risque de ne pas être représentative de l'évolution séculaire
- tendance polynomiale fortement dépendante des années de début / fin, et sensible aux lacunes

# Discussion

## Influence des CH surcotes extrêmes

écarts SPM max > 10 cm

Station	CH sur 1 an			CH sur 2 ans			CH sur 5 ans			CH sur 19 ans		
	P99	Date SPM max	Hauteur	P99	Date SPM max	Hauteur	P99	Date SPM max	Hauteur	P99	Date SPM max	Hauteur
Baltimore	0.39	19/09/2003 14:00	1.9	0.42	24/08/1933 04:00	1.94	0.47	24/08/1933 04:00	2.02	0.42	24/08/1933 04:00	1.93
Boston	0.35	07/02/1978 02:52	1.25	0.36	07/02/1978 02:52	1.26	0.39	07/02/1978 02:52	1.33	0.34	07/02/1978 02:52	1.27
Brest	0.35	15/10/1987 23:08	1.22	0.35	15/10/1987 23:08	1.37	0.38	15/10/1987 23:08	1.4	0.38	15/10/1987 23:08	1.37
Delfzijl	0.9	13/01/1916 17:14	3.33	0.95	01/11/2006 05:24	3.2	1.0	01/11/2006 05:26	3.42	0.99	13/01/1916 17:14	3.43
Gedser	0.59	30/12/1913 20:32	1.8	0.61	30/12/1913 20:32	1.84	0.63	30/12/1913 20:25	1.87	0.62	30/12/1913 20:25	1.86
Honolulu	0.09	23/05/1960 11:48	0.65	0.1	23/05/1960 11:48	0.69	0.15	23/05/1960 11:48	0.6	0.15	23/05/1960 11:48	0.63
Key West	0.1	24/10/2005 07:24	0.86	0.12	24/10/2005 07:24	0.86	0.15	24/10/2005 07:24	0.82	0.14	24/10/2005 07:24	0.74
Kungsholmsfort	0.44	09/01/1914 18:43	1.27	0.43	21/02/1962 02:06	1.0	0.49	21/02/1962 01:58	1.13	0.5	21/02/1962 03:00	1.1
Marseille	0.26	07/03/1917 16:52	0.85	0.27	07/03/1917 16:52	0.76	0.31	14/01/1895 20:45	0.78	0.32	09/12/1886 05:22	0.74
Newlyn	0.31	05/01/1936 13:54	0.84	0.31	27/10/2004 16:08	0.81	0.36	16/12/1989 19:18	0.91	0.34	16/12/1989 19:18	0.88
Saint-Nazaire	0.43	01/01/1877 04:52	1.31	0.43	12/11/1894 14:51	1.31	0.49	01/01/1877 04:52	1.32	0.47	11/11/1875 02:01	1.35
San Francisco	0.22	06/02/1998 15:47	0.74	0.21	06/02/1998 15:47	0.61	0.24	06/02/1998 15:47	0.71	0.23	06/02/1998 15:47	0.7
Seattle	0.35	27/01/1983 12:34	0.73	0.33	27/01/1983 12:34	0.73	0.35	27/01/1983 12:34	0.89	0.33	27/01/1983 12:34	0.79
Sydney	0.23	06/07/1931 14:13	0.49	0.22	09/06/1974 12:57	0.49	0.22	09/06/1974 12:57	0.49	0.23	06/02/1988 15:47	0.57

→ Faire varier la durée d'observation sur les CH peut avoir une influence

→ sur la date des SPM max

→ sur SPM max > 10 cm

# Discussion

## Influence du MSL sur surcotes extrêmes

écarts SPM max > 10 cm

écarts P99 > 10 cm

Station	Tendance sur 30 ans			Tendance sur 60 ans			Tendance sur 120 ans			Tendance polynomiale sur 120 ans		
	P99	Date SPM max	Hauteur	P99	Date SPM max	Hauteur	P99	Date SPM max	Hauteur	P99	Date SPM max	Hauteur
Baltimore	0.52	24/08/1933 04:00	2.07	0.45	24/08/1933 04:00	1.98	0.43	24/08/1933 04:00	1.95	0.48	24/08/1933 04:00	1.99
Boston	0.49	07/02/1978 02:52	1.34	0.37	07/02/1978 02:52	1.25	0.37	07/02/1978 02:52	1.25	0.4	07/02/1978 02:52	1.28
Brest	0.55	15/10/1987 09:29	1.44	0.44	15/10/1987 09:29	1.41	0.38	15/10/1987 09:29	1.39	0.4	15/10/1987 09:29	1.42
Delfzijl	1.06	13/01/1916 05:29	3.37	0.99	30/10/2006 16:16	3.34	0.96	30/10/2006 16:16	3.33	0.98	30/10/2006 16:16	3.34
Gedser	0.69	29/12/1913 10:00	1.96	0.65	29/12/1913 10:00	1.9	0.62	29/12/1913 10:00	1.84	0.64	29/12/1913 10:00	1.86
Honolulu	0.21	22/05/1960 00:32	0.62	0.14	22/05/1960 00:32	0.57	0.14	22/05/1960 00:32	0.57	0.16	22/05/1960 00:32	0.59
Key West	0.25	23/10/2005 19:53	0.81	0.16	23/10/2005 19:53	0.79	0.13	23/10/2005 19:53	0.78	0.18	23/10/2005 19:53	0.84
Kungsholmsfort	0.51	21/09/1912 12:23	1.34	0.49	11/09/1912 13:23	1.31	0.45	07/02/1913 11:30	1.24	0.49	11/09/1912 02:33	1.28
Marseille	0.54	07/03/1917 16:52	1.13	0.3	07/03/1917 16:52	0.87	0.3	07/03/1917 16:52	0.87	0.33	07/03/1917 16:52	0.9
Newlyn	0.49	05/01/1936 13:54	1.03	0.37	16/12/1989 19:18	0.91	0.36	16/12/1989 19:18	0.9	0.38	16/12/1989 19:18	0.93
Saint-Nazaire	0.66	11/11/1875 02:01	1.67	0.49	16/11/1940 16:27	1.43	0.45	16/11/1940 16:27	1.38	0.46	16/11/1940 16:27	1.42
San Francisco	0.24	22/12/1982 23:42	0.7	0.23	22/12/1982 23:42	0.69	0.23	22/12/1982 23:42	0.69	0.25	22/12/1982 23:42	0.71
Seattle	0.34	27/01/1983 12:36	0.82	0.34	27/01/1983 12:36	0.81	0.34	27/01/1983 12:36	0.82	0.36	27/01/1983 12:36	0.84
Sydney	0.32	06/07/1931 14:13	0.66	0.23	09/06/1974 12:57	0.56	0.22	09/06/1974 12:57	0.55	0.24	09/06/1974 12:57	0.58

→ Faire varier le nombre de moyenne annuelles utilisées pour l'estimation de tendance peut avoir une influence

- Sur la date de SPM max
- sur SPM max > 10 cm
- mais également sur le P99



## Discussion

### Point d'attentions

- Kungsholmsfort est situé en mer Baltique, donc très peu de marnage, les ondes sont petites et plus difficiles à détecter (forte variabilité notamment des phases): au lieu de travailler sur les surcotes, travailler avec les niveaux marins totaux ?
- Utilisation d'une analyse harmonique classique, pas adaptée à tous les sites notamment en zone estuarienne : cela pourrait expliquer les résultats moyens à Delfzijl (NL) (Dangendorf et al, 2018)
- Pour les sites choisis aucune analyse de l'interaction marée surcote à été réalisée: Key West semble sujet à ces interactions (Santamaria-Aguilar and Vafeidis, 2018)
- Les sites présentés dans l'étude sont relativement stable et peu / pas affectés par des mouvements verticaux terrestres abruptes (séismes) ou anthropiques (subsidence suite à extraction massive d'eau souterraines)

## Conclusion

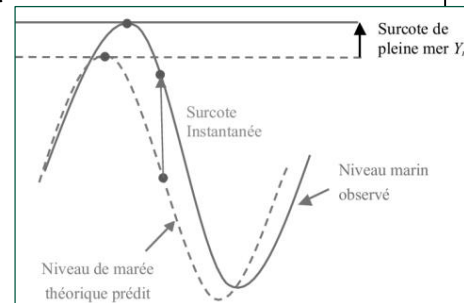
La surcote est dépendante des prédictions de marée

- Il n'existe pas de méthode parfaite pour estimer ces prédictions, il y aura forcément une incertitude associée à la surcote
- Il est cependant possible de donner un ordre de grandeur de ces incertitudes, dépendant de la méthode utilisée:

Si l'on exclue Delfzijl et Kungsholmsfort on a une RMSE / P95 entre les deux méthodes

- inférieure à 12 cm / 20 cm avec des CH sur 2 ans
- inférieure à 7 cm / 15 cm avec des CH sur 5 ans
- environ 5 cm / 10 cm avec des CH sur 19 ans

- 30 ans pour l'estimation d'une tendance ne sont pas suffisant, surtout dans contexte actuel, 60 ans mieux (écarts > 10 cm)
- Analyse de sensibilité dans le cadre d'une analyse fréquentielle afin de voir l'impact de ces incertitudes sur les grandes périodes de retours





**Merci de votre attention**

