

# Impacts du changement climatique sur l'éolien en mer en France métropolitaine: focus sur les vagues.

Réultats du projet de R&D 2C NOW

Youen Kervella, France Energies Marines



INSTITUT  
POLYTECHNIQUE  
DE PARIS



## Contexte: éolien en mer

### Situation actuelle:

- 4 parcs en service, puissance installée: 1,5 GW (23 GW onshore)
- 5 parcs en construction (1,5 GW)
- 14 parcs en projet (5 GW).

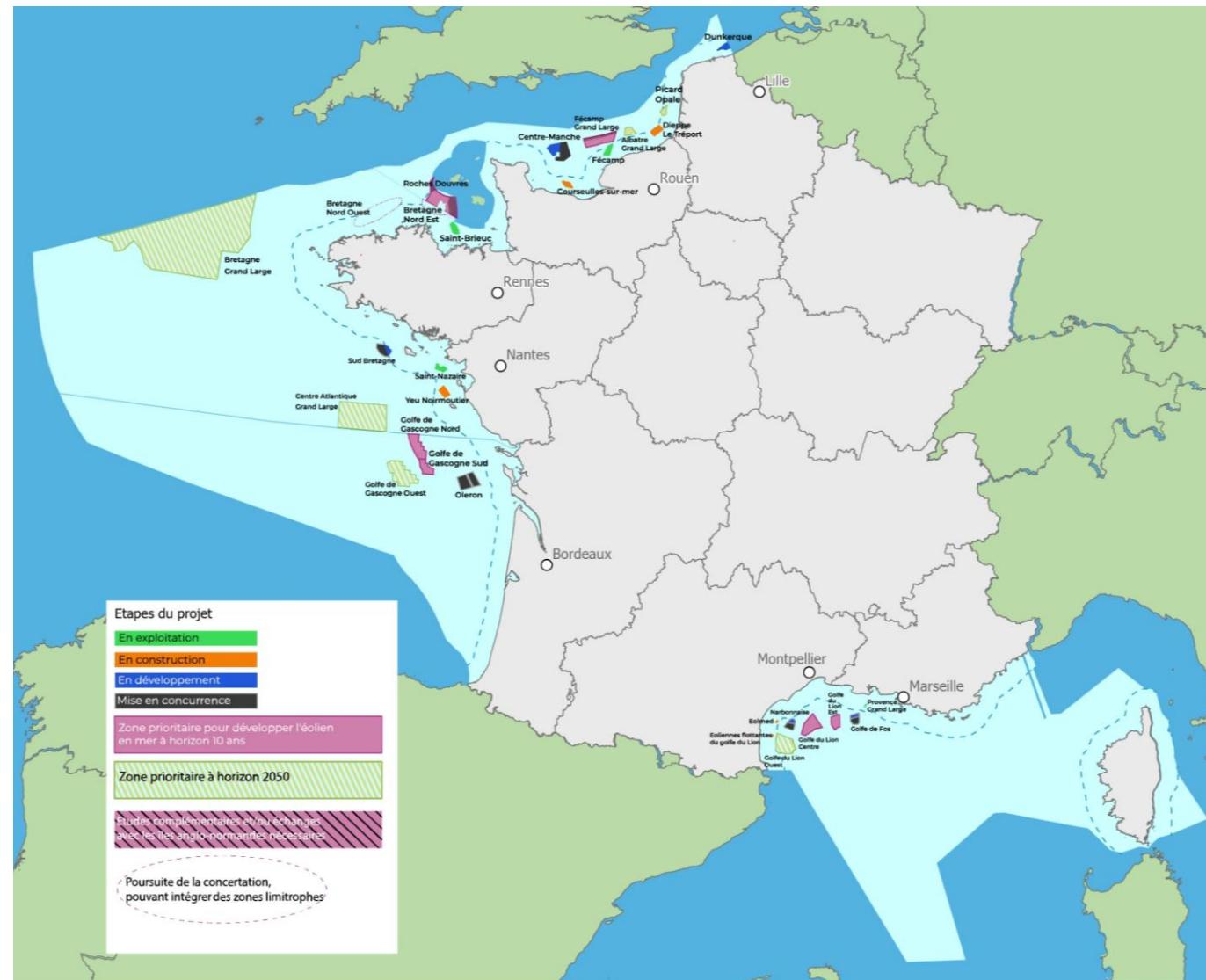
### Objectifs PPE et SNBC:

- 18 GW en 2035 (avec AO10 de 10 GW prévu en 2026)
- 45 GW en 2050 (20 % du mix énergétique)

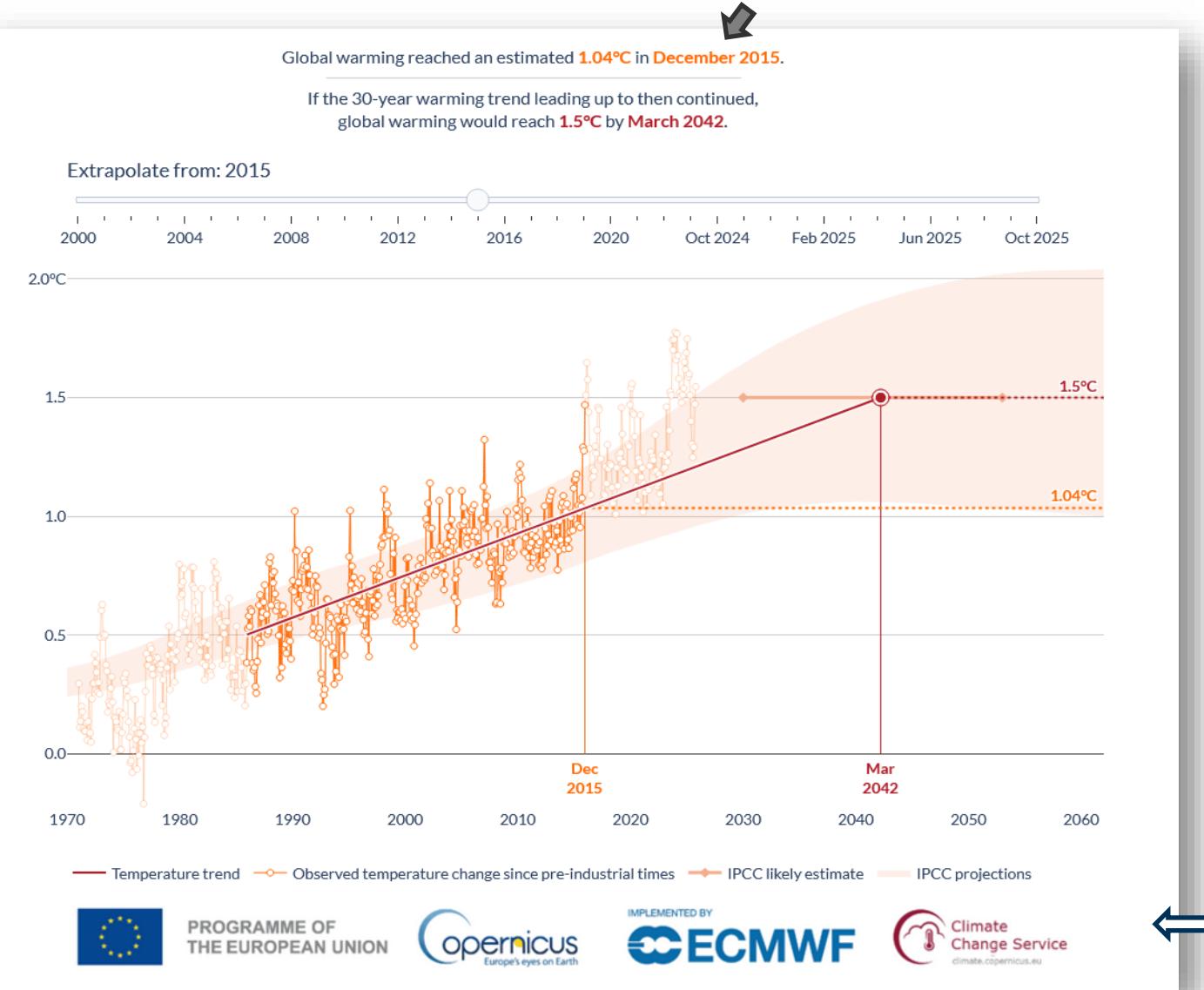
### Durée de vie:

- ~25 ans
- Repowering (+ 10-15 ans ?)

=> Quelles conditions météo-océaniques vers 2050 ou après ?



## Contexte: changement climatique

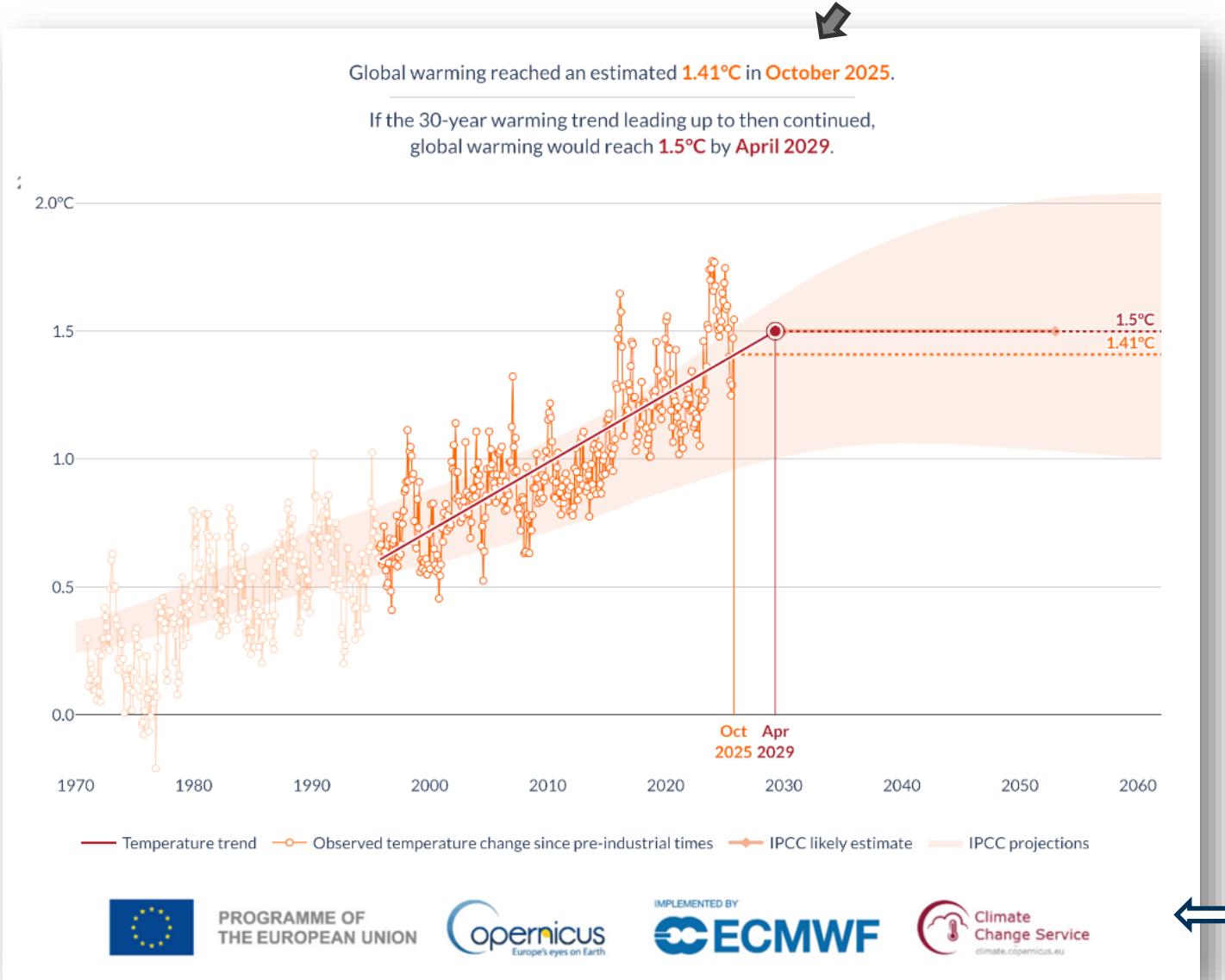


Sur plusieurs décennies, le climat terrestre change.

=> Accords de Paris (2015): limiter le réchauffement à +1,5°C

*Global mean monthly temperature anomaly with respect to the pre-industrial average (1850-1900)  
From the C3S global temperature trend monitor*

## Contexte: changement climatique



Sur plusieurs décennies, le climat terrestre change.

=> Accords de Paris (2015): limiter le réchauffement à +1,5°C

=> Quels impacts sur les conditions météo-océaniques (vent, vagues, etc.) ?

=> Quelles conséquences pour les parcs éoliens en mer et les infrastructures connexes ?

*Global mean monthly temperature anomaly with respect to the pre-industrial average (1850-1900)  
From the C3S global temperature trend monitor*

## Key Numbers

18 months (Oct. 2023 – Apr. 2025)  
€ 725K  
First « 2C » project

## Objectives

To provide the French OW sector with:

- Evolutions of wind resource and energy production
- Evolutions of design conditions
- Associated uncertainties

## Partners



## 2C NOW

### Methodologie



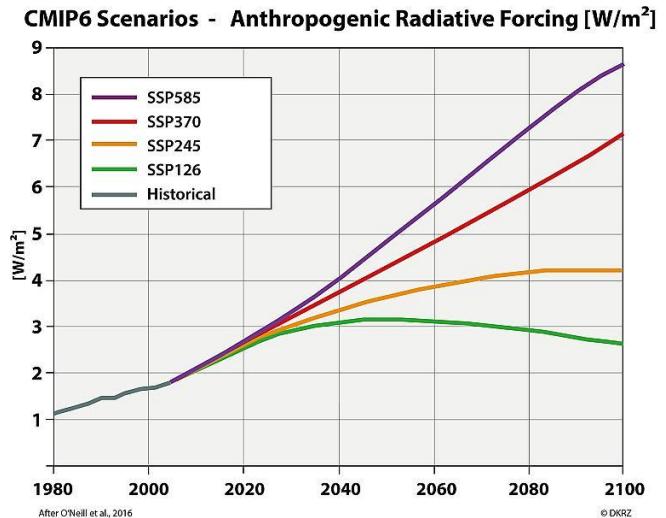
## Methodology deployed in 2C NOW



## Methodology deployed in 2C NOW



- Jeux de données climatiques: historique + projections (future) selon plusieurs scenarios (SSP).
- Plusieurs modèles (GCMs) pour le vent (13 modèles, 4 SSP), les vagues (8 modèles, 2 SSP) et les niveaux d'eau (5 modèles, 1 SSP).

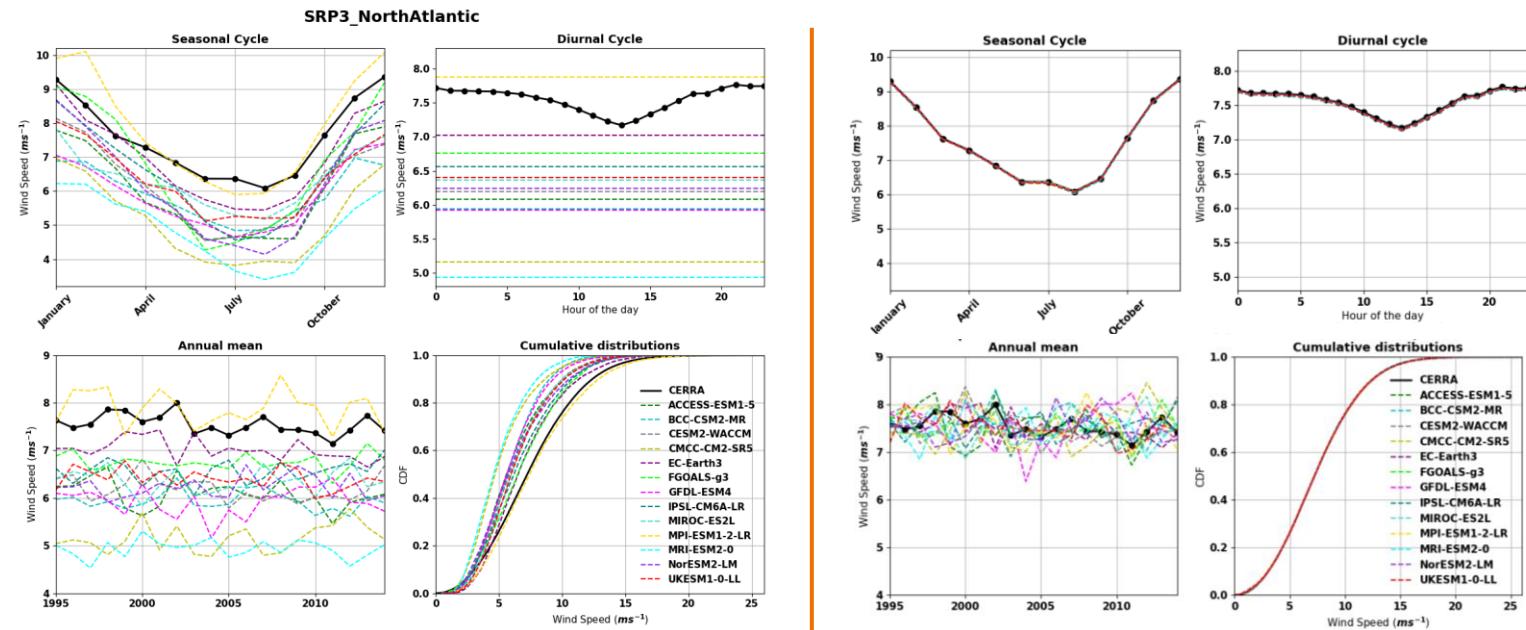


O'Neill, B.C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., et avn Vuuren, D. P., A New scenario Framework for Climate Change Research : The Concept of Shared Socioeconomic Pathways. *Climatic Change* 122 (3) : p. 387 400, 2014

## Methodology deployed in 2C NOW



- Etape 1: contrôle qualité des mesures in-situ
- Etape 2: selection des meilleures réanalyses, en utilisant des scores “climatiques”, pour chaque façade maritime<sup>1</sup>.
- Etape 3: descente d'échelle locale des GCMs via CDF-t<sup>2</sup> en utilisant les meilleures réanalyses.



Before CDF-t

After CDF-t

## Methodology deployed in 2C NOW

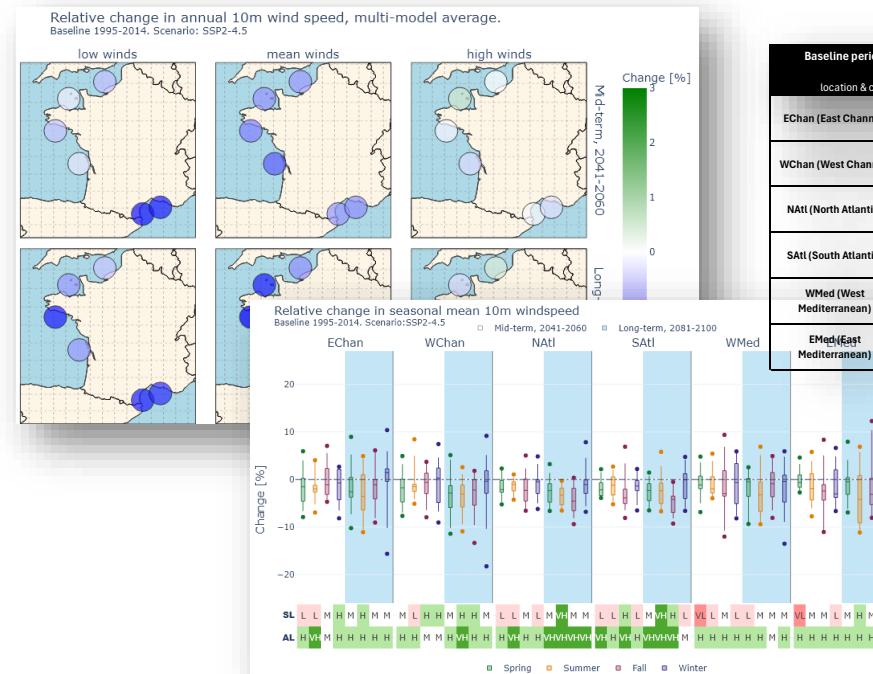
CMIP6 (IPCC)  
Datasets

Statistical  
Downscaling

Statistics on  
metocean changes

Application to  
Offshore Wind

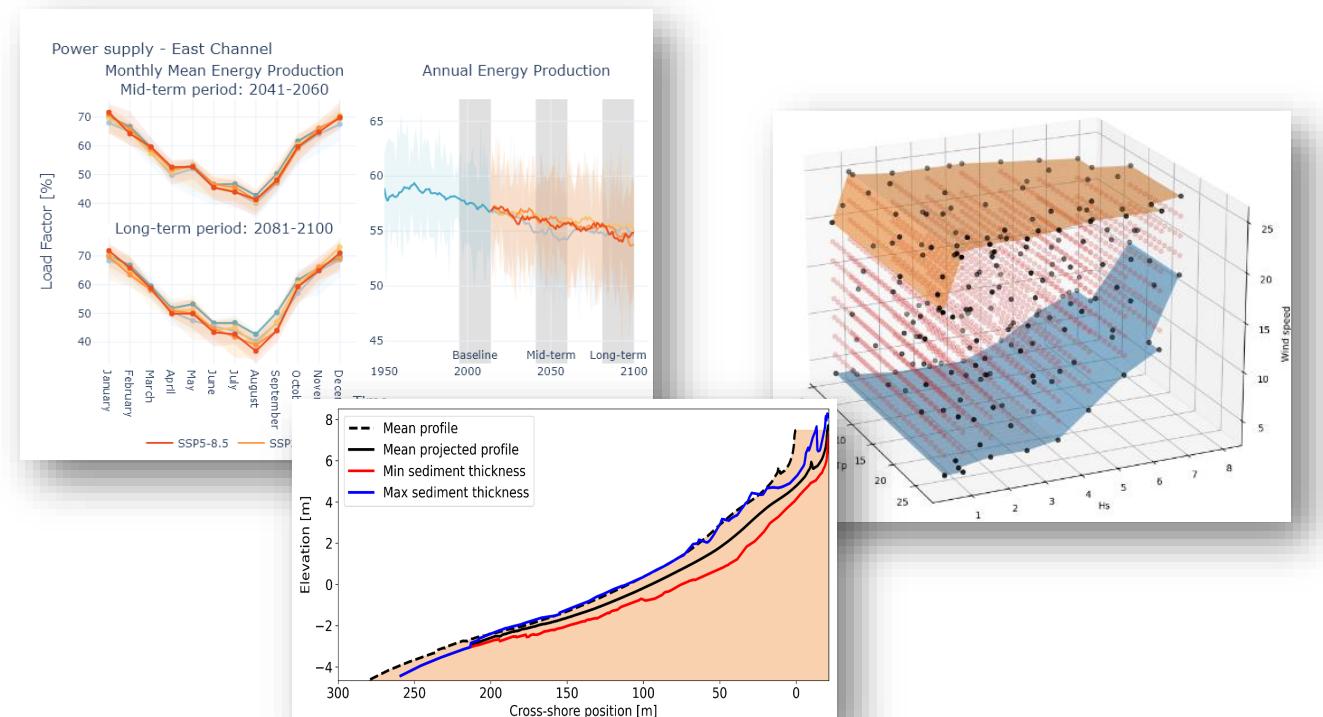
- Statistiques de l'évolution du vent, des vagues et des niveaux d'eau
- Périodes climatiques: période de référence (1995-2014) vs périodes futures (autour de 2050 et 2100).
- Pour chaque SSP
- Prise en compte des incertitudes (variabilité des modèles).



## Methodology deployed in 2C NOW

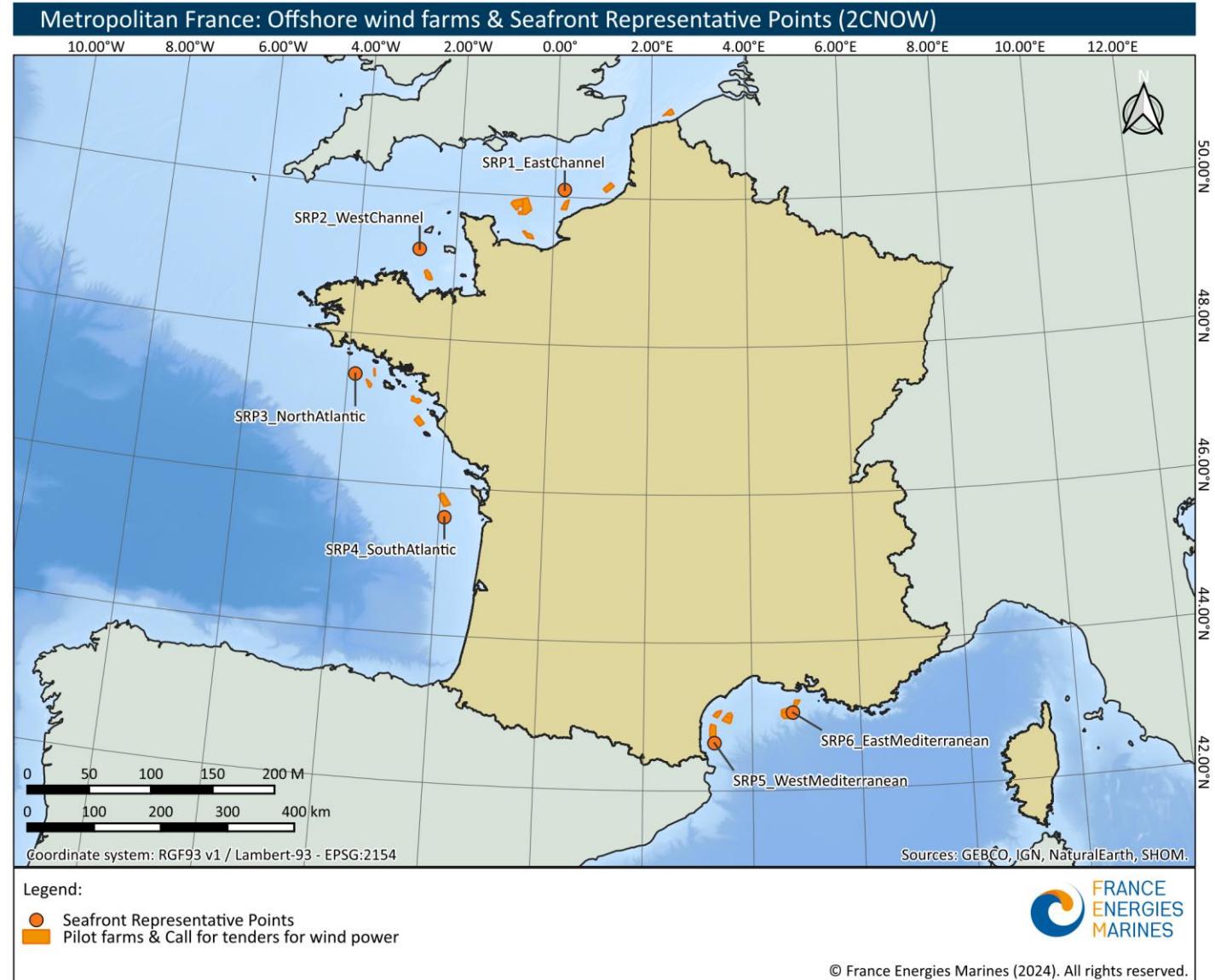


- Impacts sur le productible.
- Impacts sur le dimensionnement (extrêmes, fatigue, O&M, ..)



## Points d'intérêts

- 2 points par façade maritime => 6 points
- Représitatifs des AO éoliens en mer (profondeur, distance à la côte,...)
- + AO pour les partenaires.



## 2C NOW

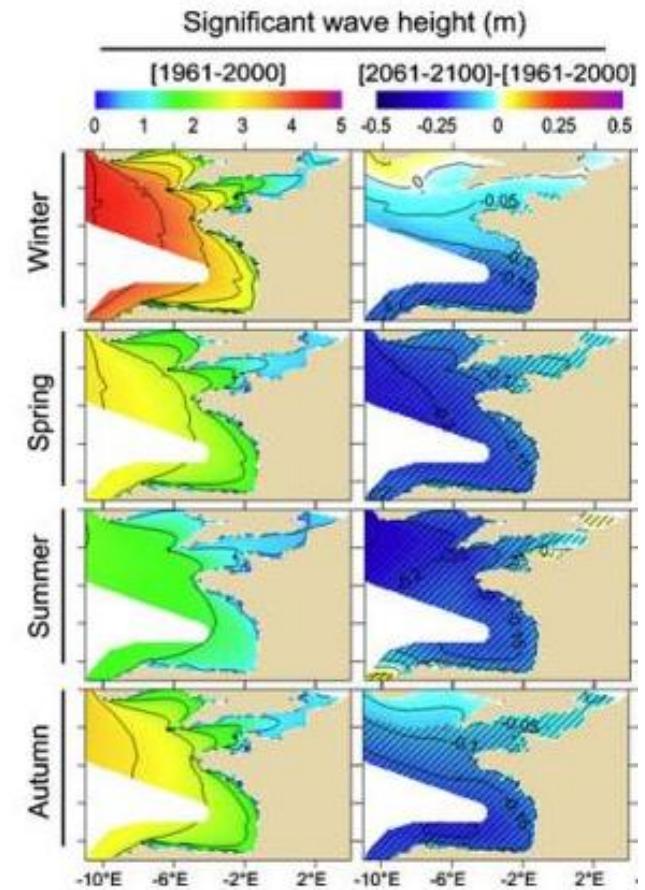
Quelques résultats: impacts du  
changement climatique sur les vagues  
(conditions moyennes)



# Impact du CC sur les vagues: conditions moyennes

## Biblio:

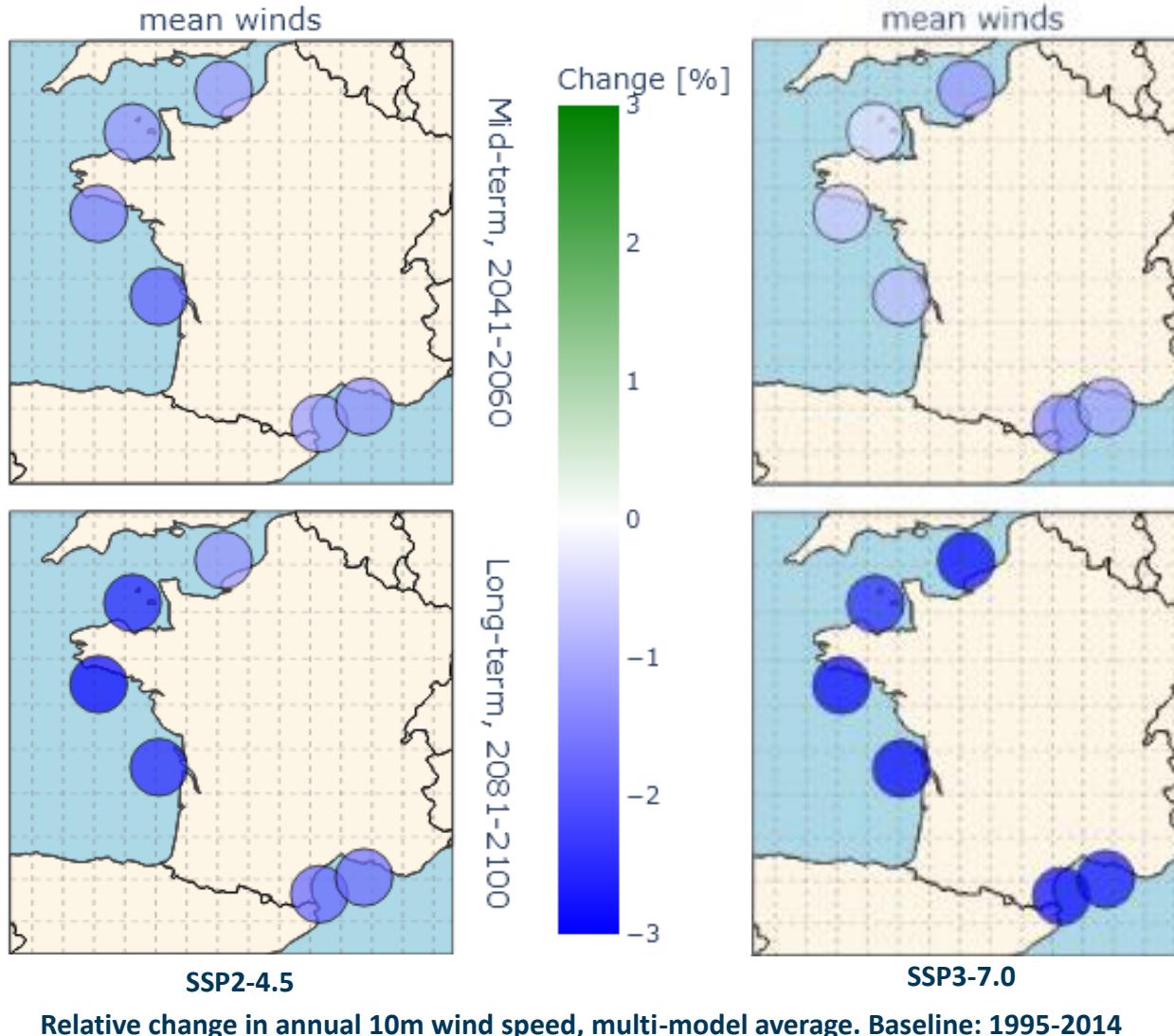
- Historical: **increase**
  - North Atlantic: increase of Hs by 2% since 1950 (Bacon and Carter, 1991); confirmed by Bertin et al. (2013) in the last decade.
  - France : In the Bay of Biscay, increase of Hs (Dodet et al., 2010): 0.19 cm in winter and 0.16 cm in summer. Similar results are found by Charles et al. (2012). Changes of wave direction (Morim et al., 2019). Strong seasonality of waves along French coasts (Dodet at al., 2010; Charles et al., 2012).
- Future: **decrease**
  - North Atlantic: decrease: 2100 => -6% RCP4.5, -10% RCP8.5 (Aarnes et al., 2017)
  - Europe: decrease: 2100 => -0.2m (RCP4.5 & 8.5) (Bricheno and Wolf, 2018)
  - France: Decrease of Hs in Atlantic and Mediterranean (Chaigneau et al., 2023). General decrease in Hs for all seasons in Bay of Biscay (Charles et al., 2012).



(Charles et al., 2012)

# Impact du CC sur les vagues: conditions moyennes

## Quid du vent ?



La TRACC (Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique) explicite le niveau de réchauffement auquel la France devra se préparer (2023). Selon le 6<sup>ème</sup> rapport du GIEC<sup>1</sup>, la TRACC devrait être très proche du SSP2-4.5 à horizon 2050 et entre les scénarios SSP2-4.5 et SSP3-7.0 à la fin du siècle.

Les vents moyens ont tendance à diminuer dans les prochaines décennies: - 1 to -3% sous le scénario SSP2-4.5 pour la période long-terme (et jusqu'à -5% en Méditerranée sous le scenario SSP5-8.5).

Incertitudes dues aux (13) modèles: peut aller jusqu'à 20% sous le SSP2-4.5 pour la période long-terme.

Ces résultats sont cohérents avec le 6<sup>ème</sup> rapport du GIEC<sup>1</sup> et la littérature pour les vents européens (*Carvalho et al., 2017; Carvalho et al., 2021*)

# Impact du CC sur les vagues: conditions moyennes

Pour les vagues, 8 modèles climatiques (Meucci et al., 2024) sous 2 scénarios: SSP1-2.6 et SSP5-8.5.

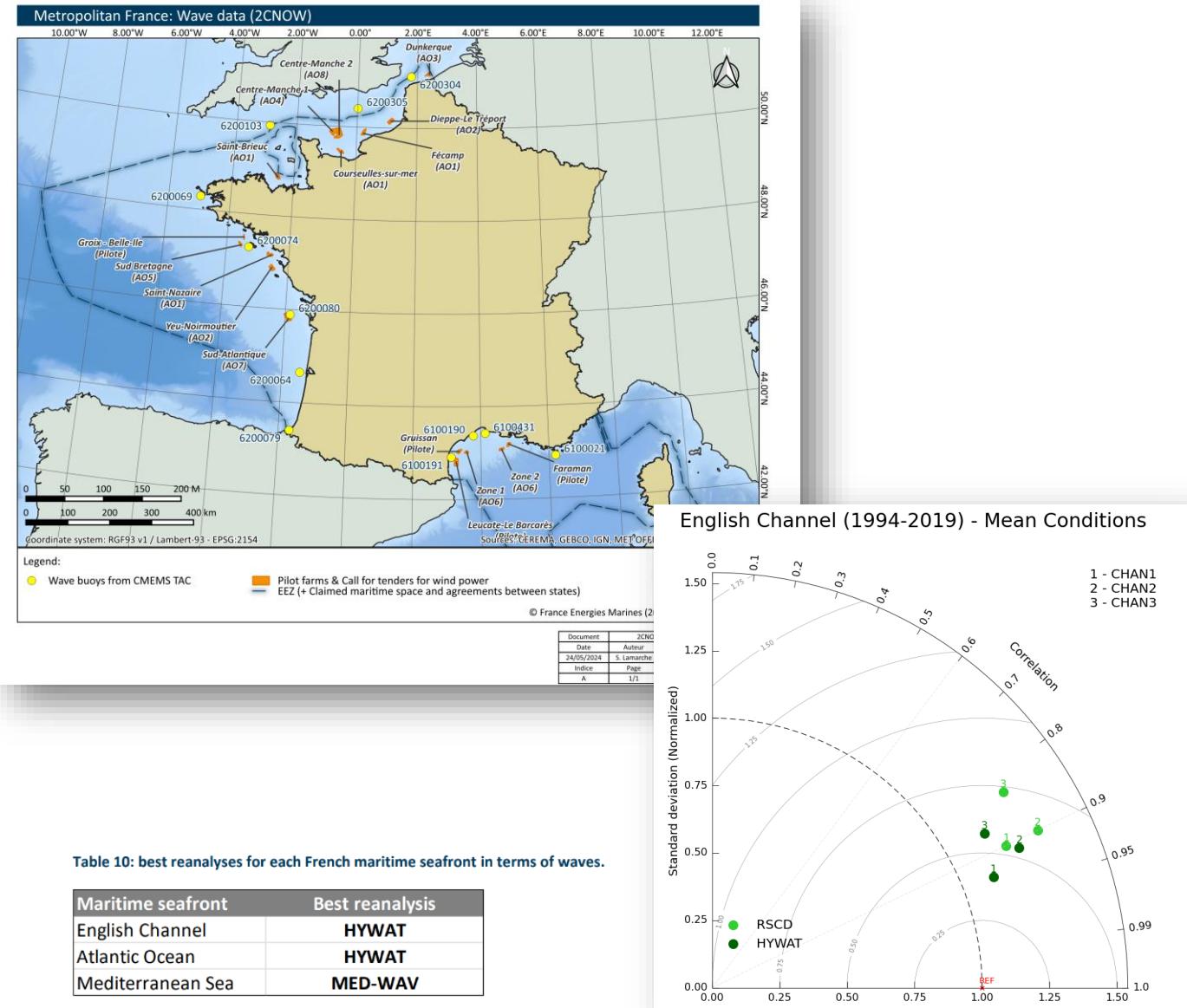
2 périodes:

- historique: 1985-2014
- Futur: 2071-2100

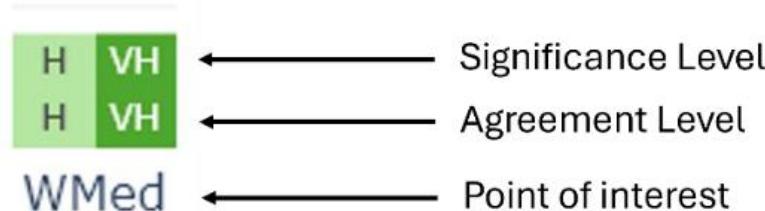
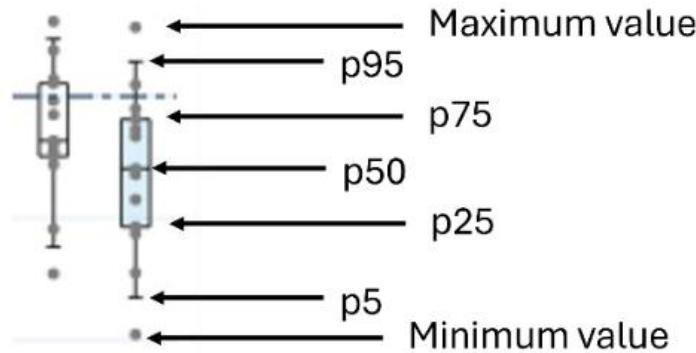
Downscaling statistique via CDF-t<sup>1</sup>, en utilisant les meilleures réanalyses (sélection via bouées CANDHIS notamment: 3 en Manche, 4 en Atlantique et 4 en Méditerranée<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Michelangeli et al., 2009.

<sup>2</sup> Poppeschi et al., 2025: <https://www.france-energies-marines.org/wp-content/uploads/2025/10/2CNOW-Comparisons-and-corrections-waves-and-water-levels.pdf>



- Boxplots are used to provide a synthetic view of the behavior of the different models and the spread of future changes (IPCC, 2021)



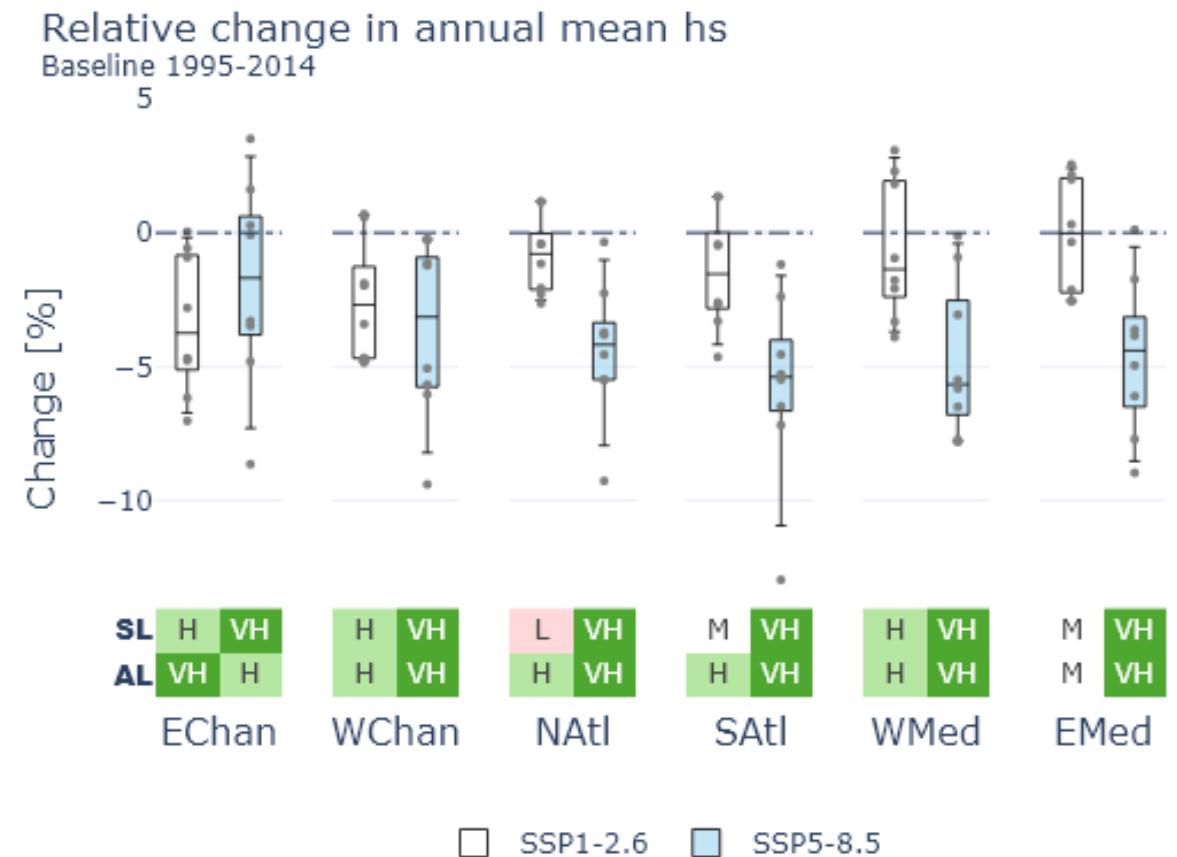
SL = Significance Level				
AL = Agreement Level				
VL	L	M	H	VH
[0;20%[	[20%;40%[	[40%;60%[	[60%;80%[	[80%;100%[

## 2 Confidence levels :

- The Significance Level ("SL"): it indicates the percentage of models that present a significant change in the sense of the Cramer Von Mises test
- The Agreement Level ("AL"): it indicates the percentage of models that agree on the sign of the change (increase or decrease).

## Impact du CC sur les vagues: conditions moyennes

Résultats pour les 6 points représentatifs, sous 2 SSP.  
Différences relatives (en %) entre la période future (2071-2100)  
et la période de référence (1995-2014).

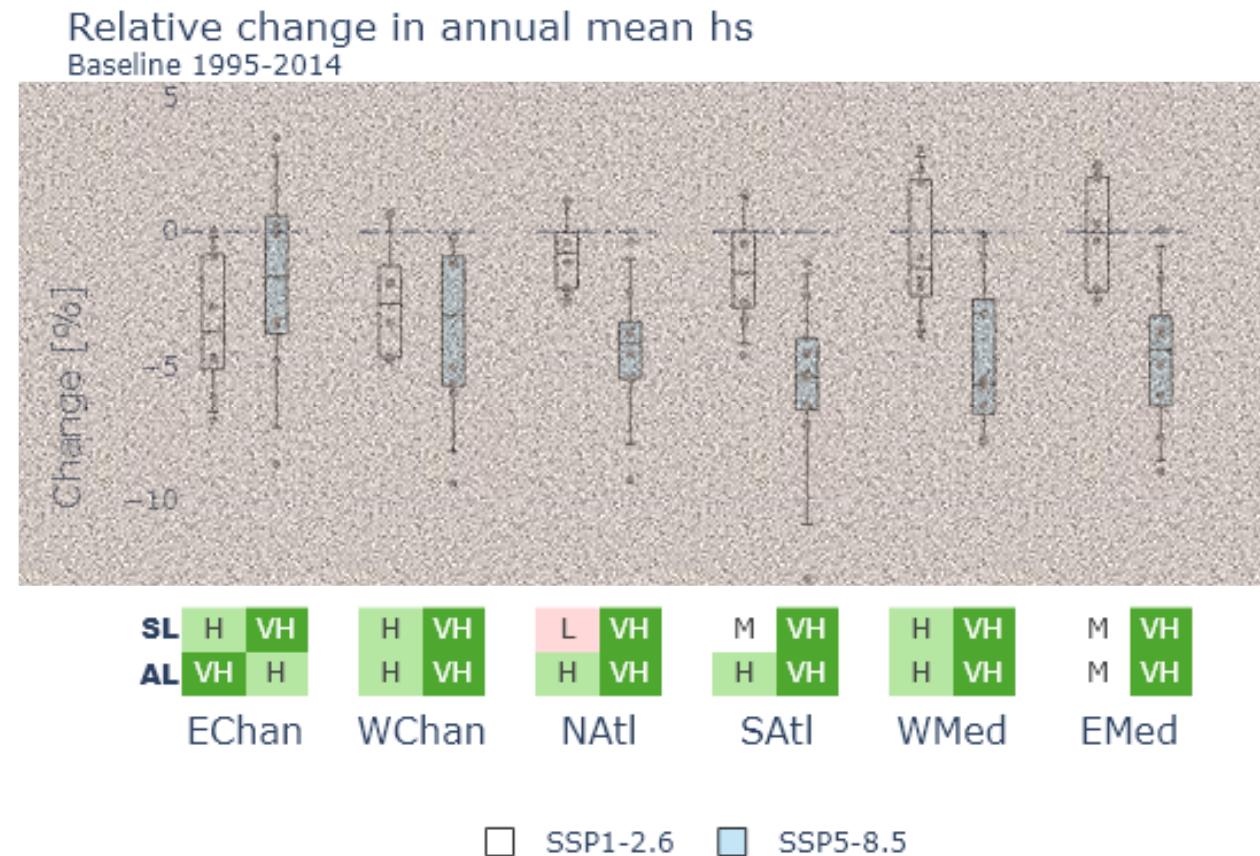


SL = Significance Level				
AL = Agreement Level				
VL	L	M	H	VH
[0;20%[	[20%;40%[	[40%;60%[	[60%;80%[	[80%;100%[

# Impact du CC sur les vagues: conditions moyennes

Résultats pour les 6 points représentatifs, sous 2 SSP.  
Différences relatives (en %) entre la période future (2071-2100)  
et la période de référence (1995-2014).

Indices de confiance: niveaux de significativité et d'accord entre les modèles plus importants sous le SSP5-8.5.



SL = Significance Level				
AL = Agreement Level				
VL	L	M	H	VH
[0;20%[	[20%;40%[	[40%;60%[	[60%;80%[	[80%;100%[

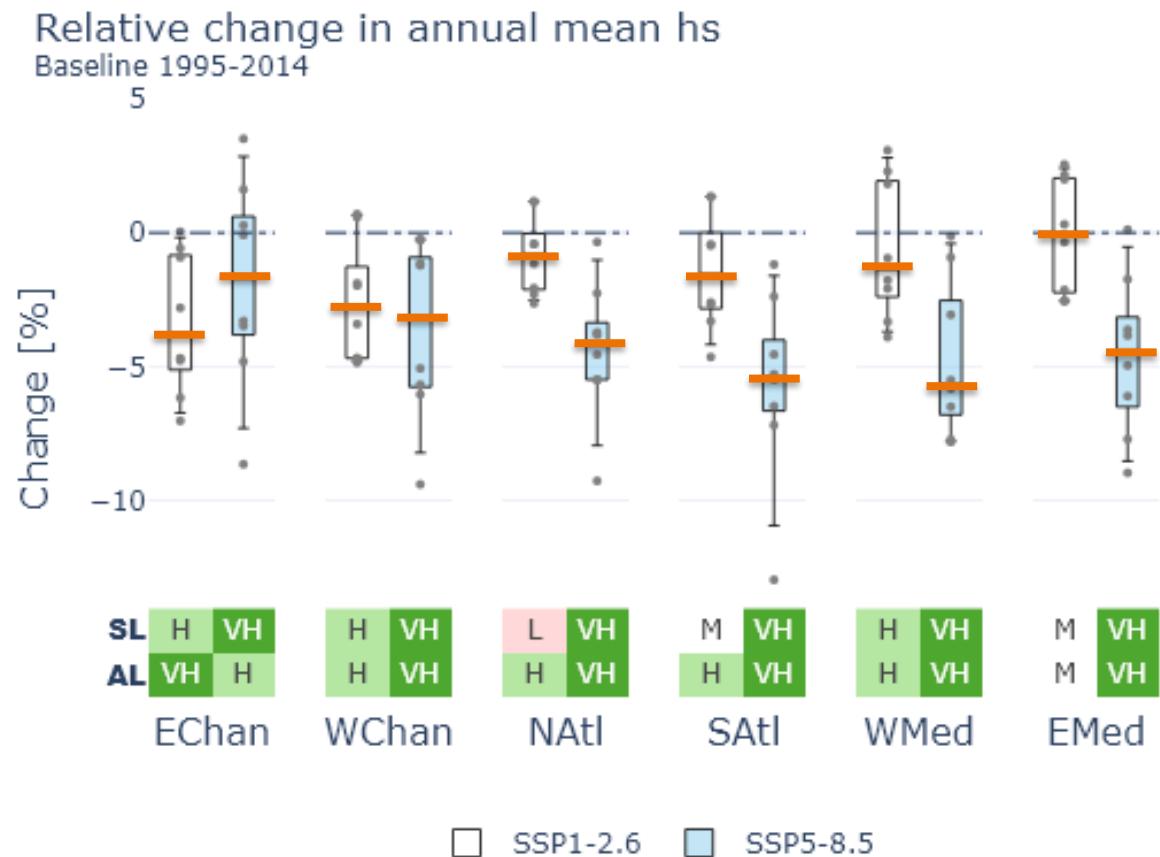
# Impact du CC sur les vagues: conditions moyennes

Résultats pour les 6 points représentatifs, sous 2 SSP.  
Différences relatives (en %) entre la période future (2071-2100)  
et la période de référence (1995-2014).

Indices de confiance: niveaux de significativité et d'accord entre les modèles plus importants sous le SSP5-8.5.

Changements médians: baisse sous les 2 SSP (sauf Emed pour SSP1-2.6).

Entre -4% et -6% pour l'Atlantique et la Méditerranée pour SSP5-8.5, entre -2% et -4% pour la Manche.



SL = Significance Level				
AL = Agreement Level				
VL	L	M	H	VH
[0;20%[	[20%;40%[	[40%;60%[	[60%;80%[	[80%;100%[

# Impact du CC sur les vagues: conditions moyennes

Résultats pour les 6 points représentatifs, sous 2 SSP.  
Différences relatives (en %) entre la période future (2071-2100)  
et la période de référence (1995-2014).

Indices de confiance: niveaux de significativité et d'accord entre les modèles plus importants sous le SSP5-8.5.

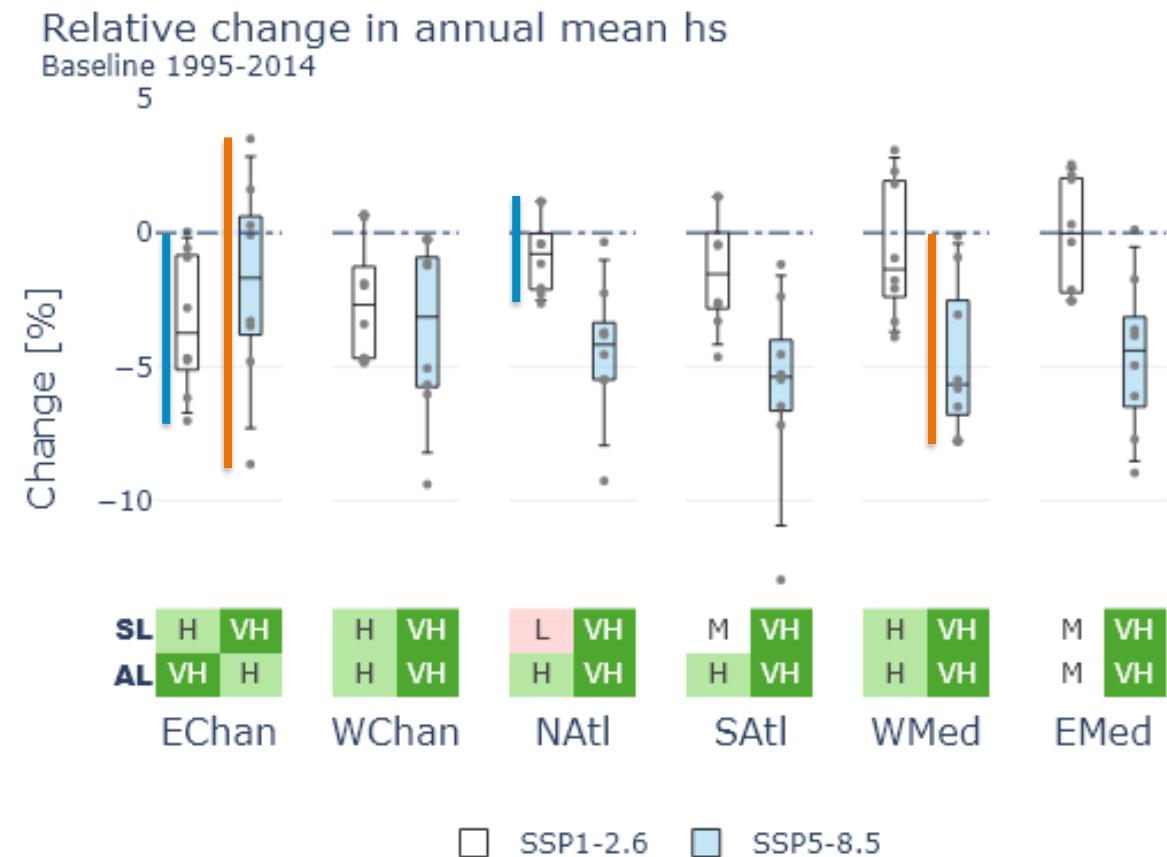
Changements médians: baisse sous les 2 SSP (sauf Emed pour SSP1-2.6).

Entre -4% et -6% pour l'Atlantique et la Méditerranée pour SSP5-8.5, entre -2% et -4% pour la Manche.

Incertitudes modèles:

De 4% à 7,5% sous le SSP1-2.6.

De 7,5% à 15% sous le SSP5-8.5.

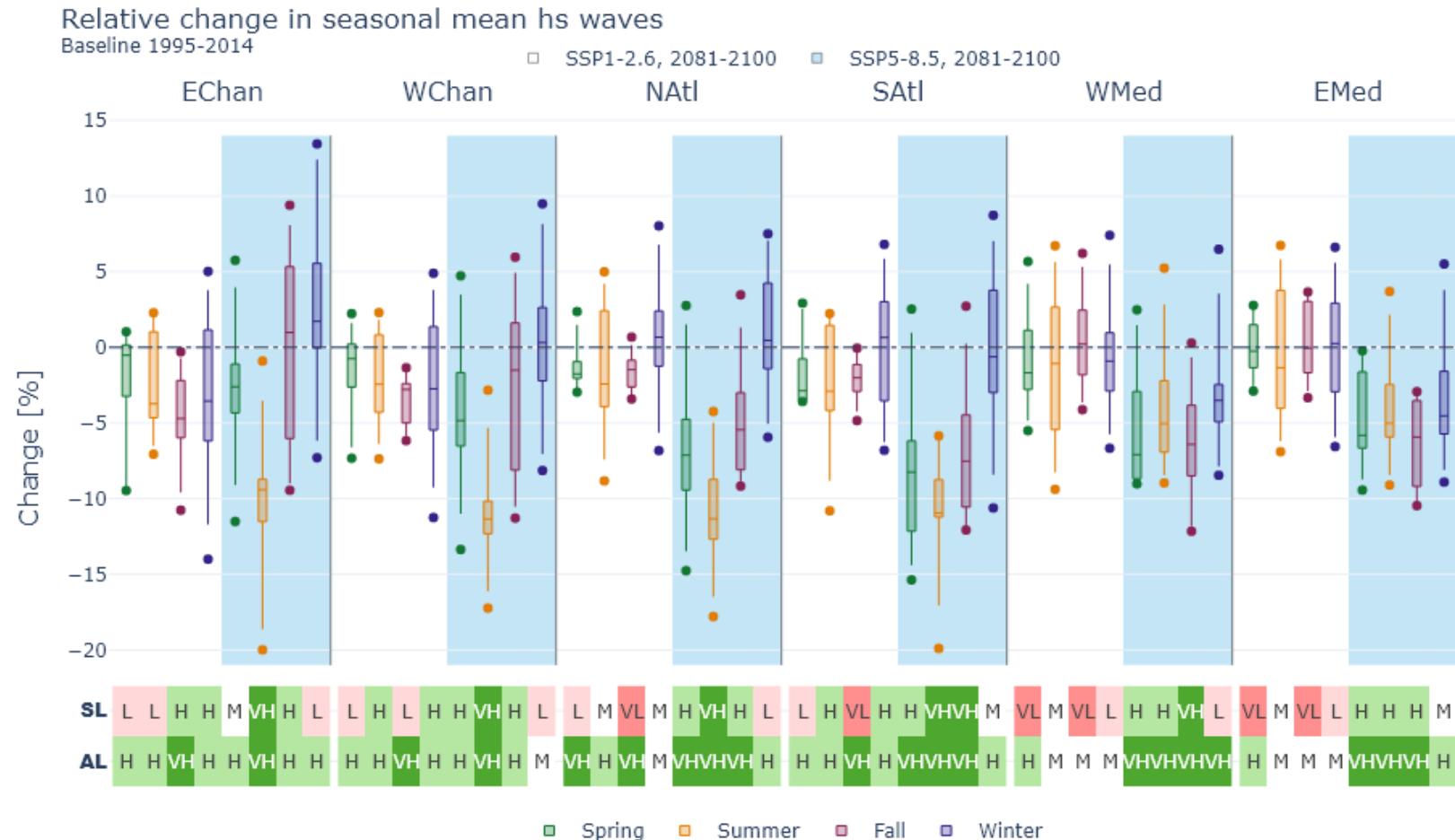


SL = Significance Level				
AL = Agreement Level				
VL	L	M	H	VH
[0;20%[	[20%;40%[	[40%;60%[	[60%;80%[	[80%;100%[

# Impact du CC sur les vagues: conditions moyennes

Résultats pour les 6 points représentatifs, sous 2 SSP.

Différences relatives (en %) saisonnières entre la période future (2071-2100) et la période de référence (1995-2014).



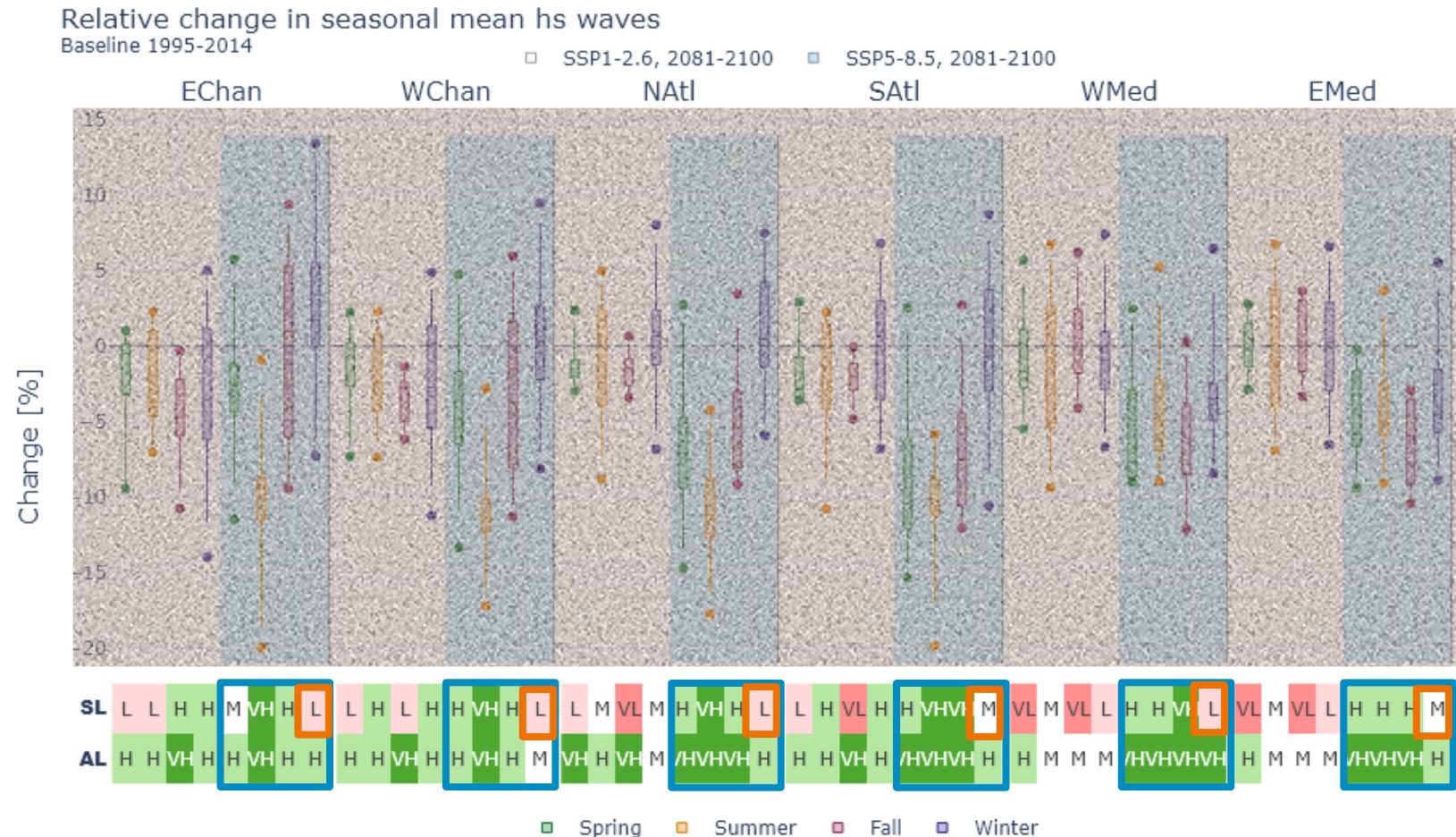
SL = Significance Level				
AL = Agreement Level				
VL [0;20%]	L [20%;40%]	M [40%;60%]	H [60%;80%]	VH [80%;100%]

# Impact du CC sur les vagues: conditions moyennes

Résultats pour les 6 points représentatifs, sous 2 SSP.

Différences relatives (en %) saisonnières entre la période future (2071-2100) et la période de référence (1995-2014).

Indices de confiance: plus élevés sous le SSP5-8.5, mais moyens à bas en hiver.



SL = Significance Level				
AL = Agreement Level				
VL	L	M	H	VH
[0;20%]	[20%;40%]	[40%;60%]	[60%;80%]	[80%;100%]

## **Impact du CC sur les vagues: conditions moyennes**

## Résultats pour les 6 points représentatifs, sous 2 SSP.

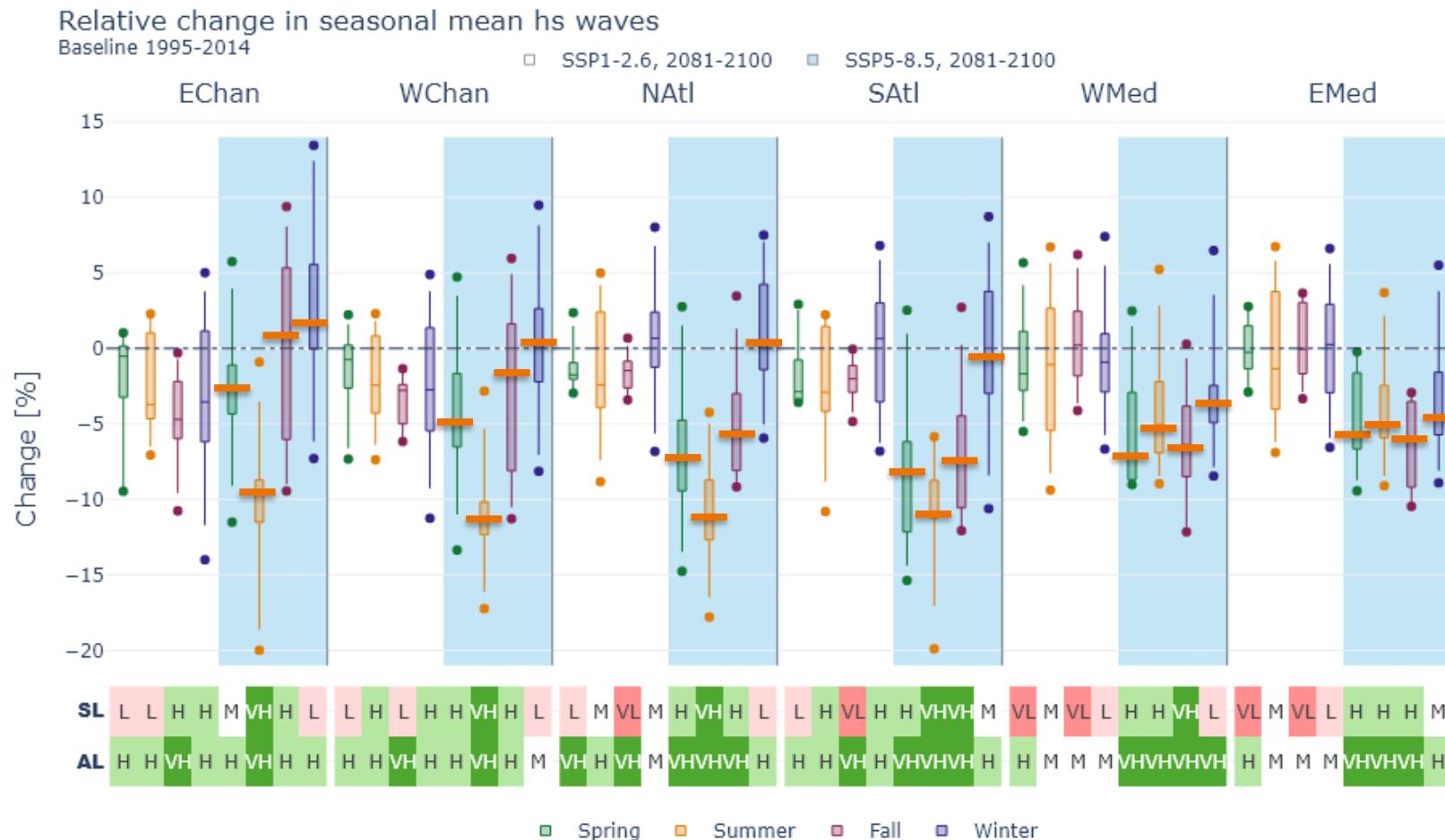
Différences relatives (en %) saisonnières entre la période future (2071-2100) et la période de référence (1995-2014).

Indices de confiance: plus élevés sous le SSP5-8,5, mais moyens à bas en hiver.

## Changements médians (SSP5-8.5):

Baisse jusqu'à 12%, plus marquée en été en Manche et dans l'Atlantique.

Stagnation ou augmentation en hiver en Manche et dans l'Atlantique.



VL	L	M	H	VH
[0;20%[	[20%;40%[	[40%;60%[	[60%;80%[	[80%;100%[

# Impact du CC sur les vagues: conditions moyennes

Résultats pour les 6 points représentatifs, sous 2 SSP.

Différences relatives (en %) saisonnières entre la période future (2071-2100) et la période de référence (1995-2014).

Indices de confiance: plus élevés sous le SSP5-8.5, mais moyens à bas en hiver.

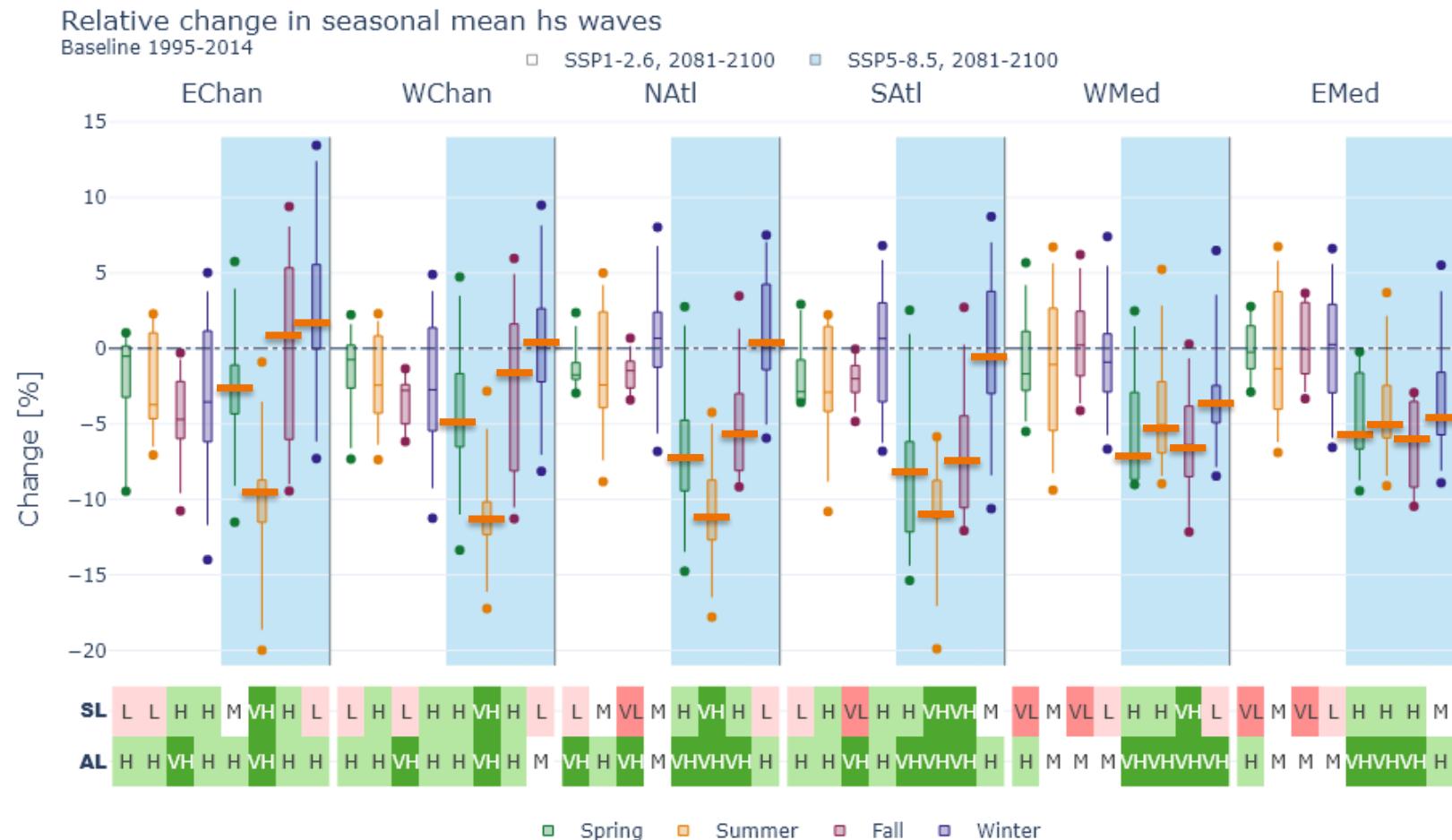
## Changements médians (SSP5-8.5):

Baisse jusqu'à 12%, plus marquée en été en Manche et dans l'Atlantique.

Stagnation ou augmentation en hiver en Manche et dans l'Atlantique.

## Incertitudes modèles:

Importantes; de 10% en Méditerranée à 20% en Manche sous le SSP5-8.5.



SL = Significance Level				
AL = Agreement Level				
VL	L	M	H	VH
[0;20%]	[20%;40%]	[40%;60%]	[60%;80%]	[80%;100%]

## 2C NOW

Quelques résultats: impacts du  
changement climatique sur les vagues  
(conditions extrêmes)



## Méthodologie

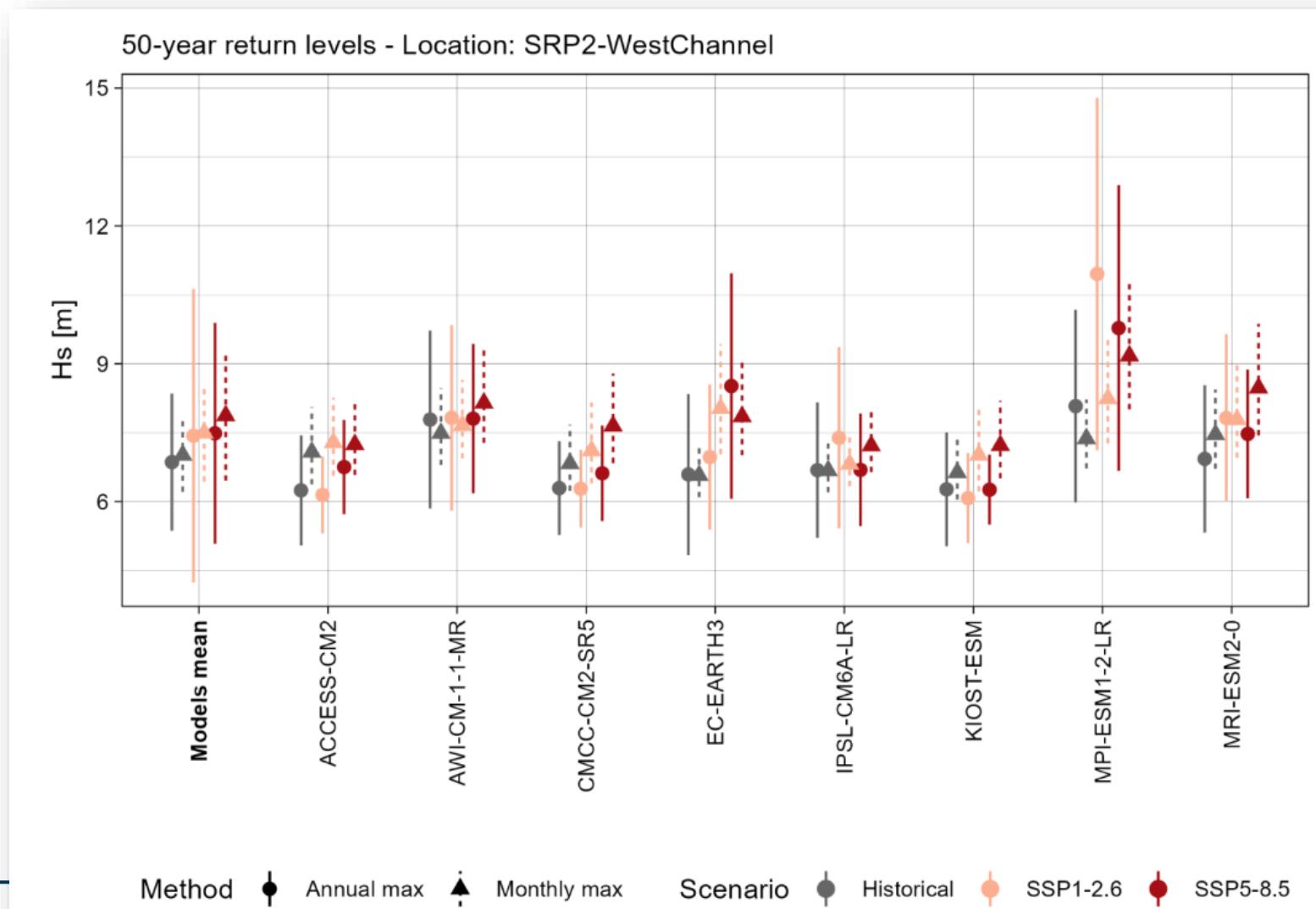
- Approche classique:
  - Generalized Extreme Value (GEV) appliqués aux maximas annuels:  $M_n \sim \text{GEV}(\mu, \sigma, \xi)$
  - Estimation par maximum de vraisemblance
  - Calcul des niveaux de retour pour des périodes de 50/100 ans.
- Approche proposée:
  - Utilisations des maximas mensuels pour réduire l'incertitude (+ de données)
  - GEV avec paramètres dépendants du mois:  $M_{n,m} \sim \text{GEV}(\mu = f_1(m), \sigma = f_2(m), \xi)$
  - Prise en compte de la saisonnalité via fonctions splines
  - Retour aux maximas annuels: CDF annuelle => produit des CDF mensuelles (indépendance vérifiée par ACF/PACF)
- Extension non-stationnaire:
  - Paramètres  $\mu$  et  $\sigma$  dépendants du mois et de l'année:  $M_{n,m} \sim \text{GEV}(\mu = f_1(m, y), \sigma = f_2(m, y), \xi)$
  - Niveaux de conception équivalents (combinaison des probabilités sur toute la durée de vie)

# Impact du CC sur les vagues: conditions extrêmes

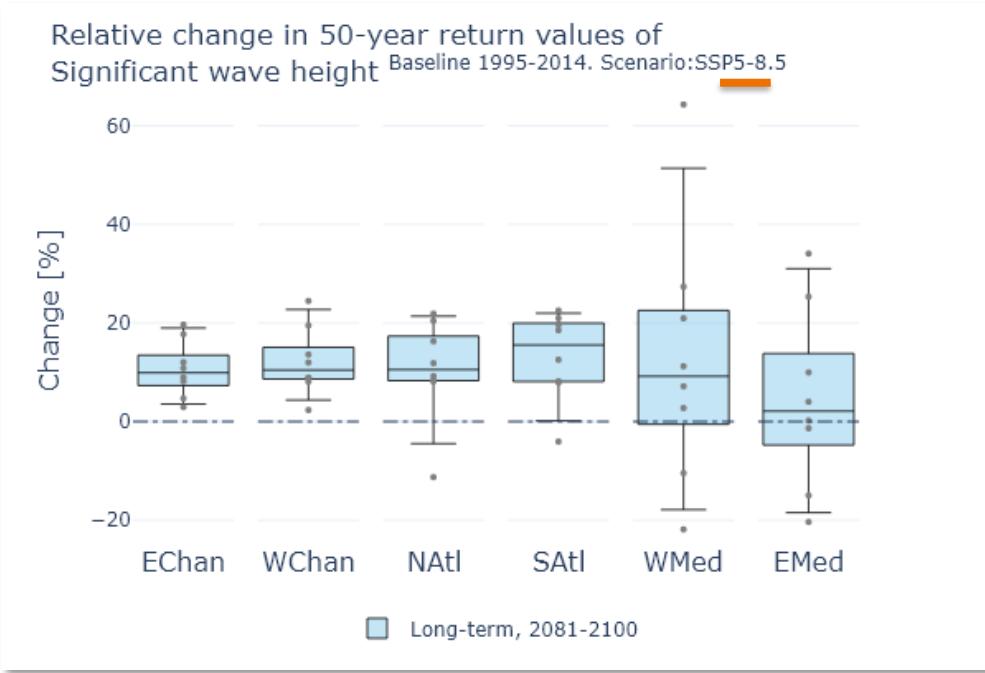
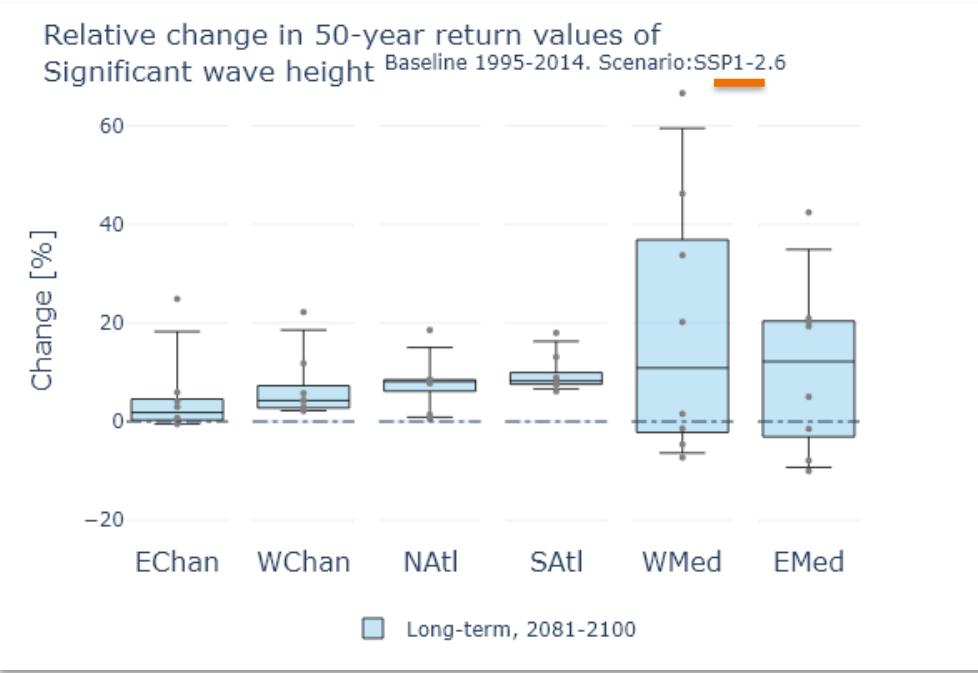
Différences entre les méthodes employées et réduction des IC avec la méthode mensuelle.

Tendance robuste à la hausse des extrêmes, plus marquée sous le SSP5-8.5.

Attention à l'interprétation: IC plus larges que l'évolution elle-même.



# Impact du CC sur les vagues: conditions extrêmes



Scénario SSP1-2.6: tendance à la hausse partout, plus marquée dans l'Atlantique et la Méditerranée, incertitudes fortes en Méditerranée.

Scénario SSP5-8.5: tendance à la hausse partout, plus marquée dans l'Atlantique et la Manche, et moins marquée à l'Est de la Méditerranée, incertitudes fortes en Méditerranée.

# Impact du CC sur les vagues: conditions extrêmes

Modèle non-stationnaire: comparaison du p99 de 2010 et 2100, pour les 8 modèles climatiques.

Principales tendances:

- Hs plus forts en hiver et plus faibles en été (surtout sous le SSP5-8.5).
- Décalage des saisons et « pentes » (saisons plus marquées).

Raillard et al. (2025). Non-stationary GEV models for estimating design sea-states in a changing climate. Applications to offshore wind farms along the French coasts. => submitted.

=> À approfondir.

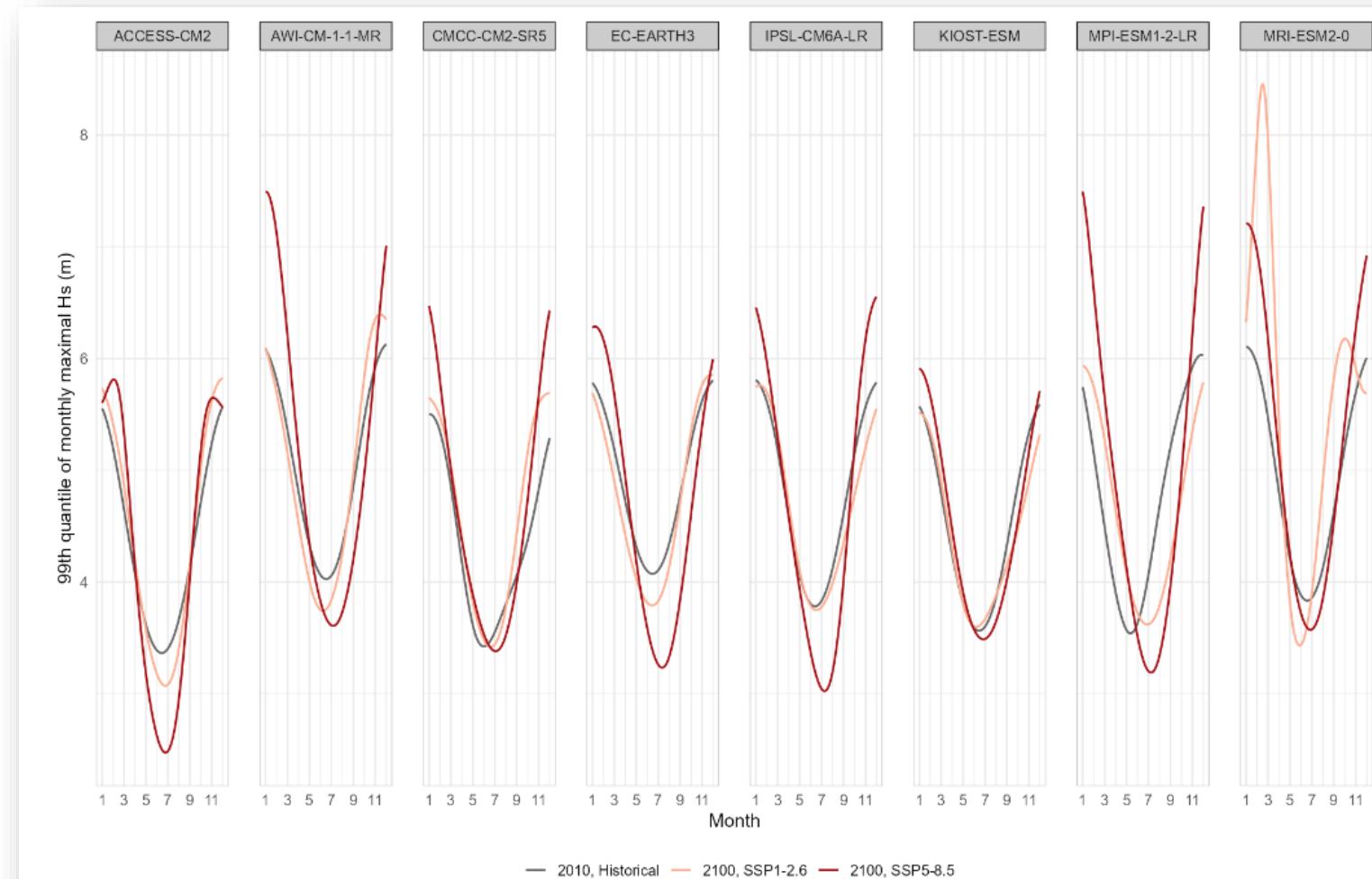


Figure 5: Comparison of monthly 99th quantiles, at the East English Channel Representative point, obtained from the completely non-stationary model of eq. 3 at different years.

## 2C NOW

Application à l'éolien en mer

# Application à l'éolien en mer: zone d'atterrage

Hydrodynamique => modifications morphologiques => érosion (exposition des câbles électriques) ou accrétion (surchauffe).

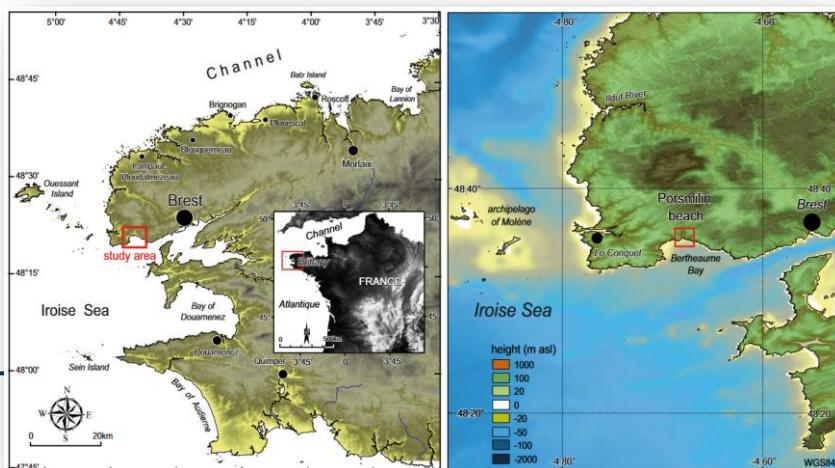
## 2C NOW:

- Etat de l'art de l'évolution côtière due au changement climatique
- Méthodologie d'évaluation des impacts du CC sur les sites d'atterrage des cables sous-marins (2 modèles).

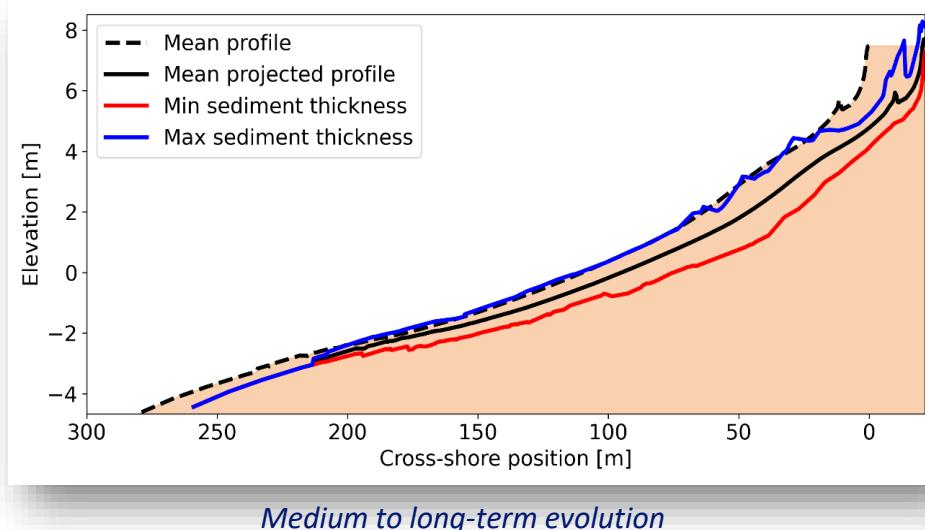
COASTAL EVOLUTION  
DUE TO CLIMATE CHANGE AND  
THE IMPACT ON CABLES IN THE LANDFALL ZONE



### Demonstration at Porsmilin Beach:



33



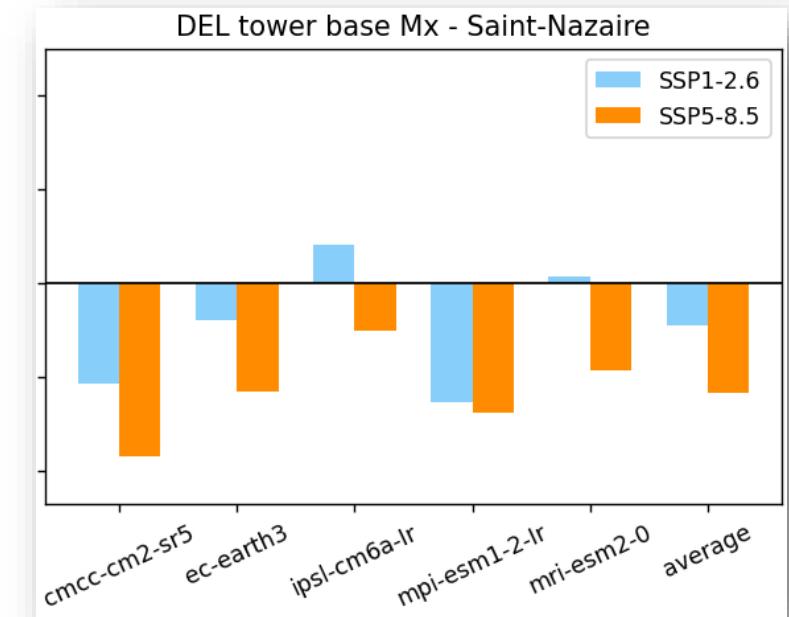
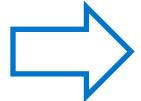
Impact de l'évolution des conditions météo-océaniques sur la conception en fatigue des turbines  
=> évalué par variations de DEL dans de multiples scénarios climatiques.

## Methodology:

**Environmental data processing:** CMIP6 + CDF-t, historical and future (SSP1 and SSP5),  
Saint-Nazaire, Saint-Brieuc, Fécamp, Courseulles sur Mer.

**Aeroelastic simulations:** IEA 10MW WTG, monopile, OpenFAST.

- Tendance générale à la baisse des DEL dans les différents scénarios climatiques;
- Potentiel allongement de la durée de vie opérationnelle;
- Forte variabilité entre les modèles et les sites (non illustrée ici);
- Nombreuses hypothèses (absence de turbulence, désalignement vent-vagues, un seul type d'éolienne, etc.).



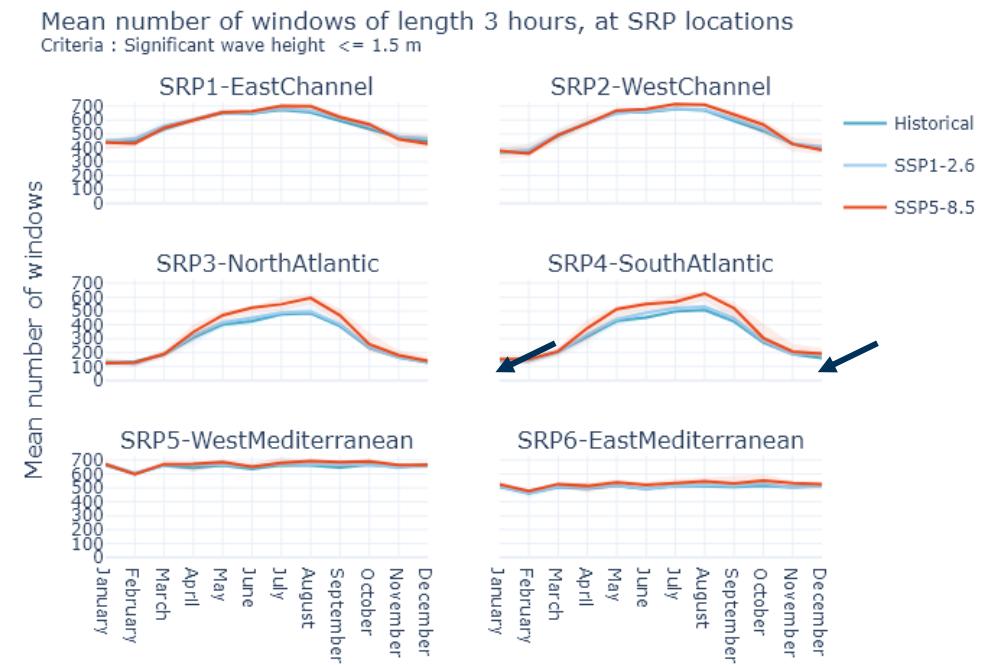
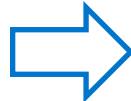
## Impacts du changement climatique (évolutions vent et vagues) sur les opérations en mer

Impacts on:

**Weather windows:** number of 3h-WW under a (wave or wind) threshold.

**Weather downtime:** number of days to wait for operation (wave or wind threshold).

- Augmentation du nombre de fenêtres d'opérations sur la côte atlantique sous le scénario SSP5-8.5;
- Plus de temps d'attente (WD) au point Est Manche en décembre et janvier;
- Forte variabilité des modèles..



## 2C NOW

### Limitations et perspectives

**Résolutions spatiale et temporelle** : Les modèles globaux, même « downscalés », peuvent-ils prendre en compte les phénomènes locaux ?

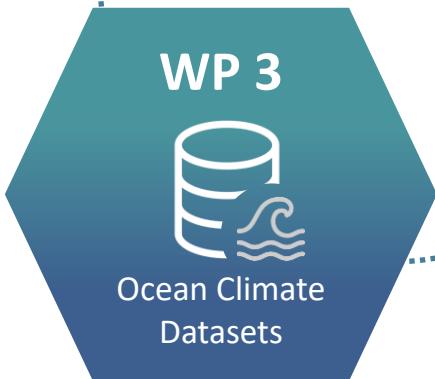
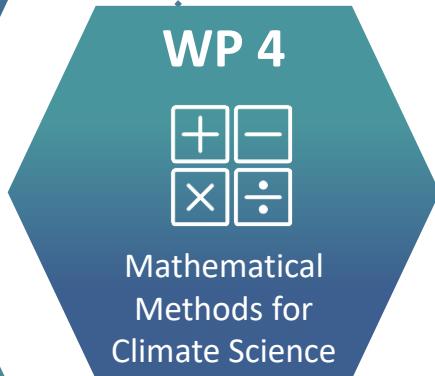
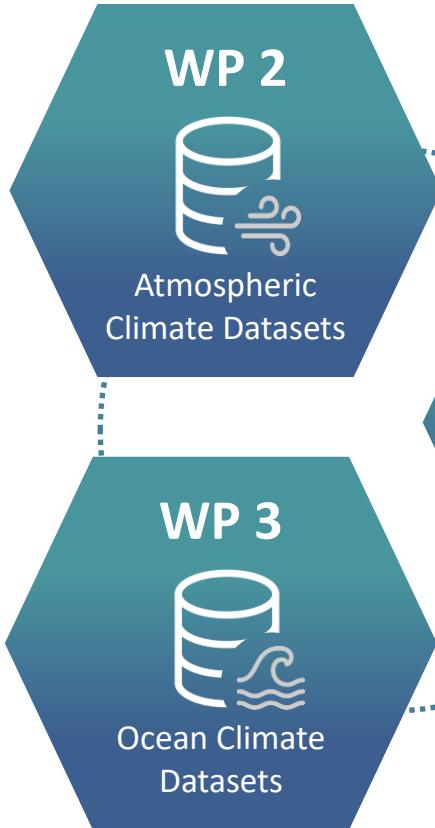
**Disponibilité des modèles et des scénarios** : jeux de données de vagues non-continu et 2 SSP

**Méthodes mathématiques** : Downscaling statistique et analyses extrêmes univariées

**Incertitudes** : point clé, seule la variabilité des jeux de données a été étudiée

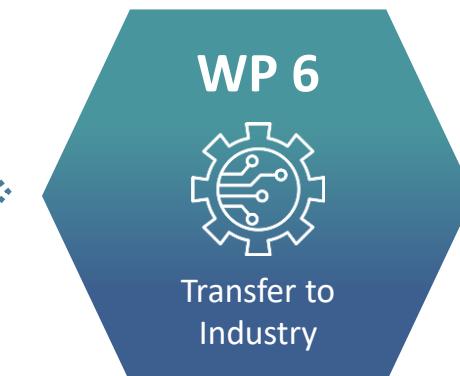
**Domaine d'application** : forçages limités, incertitudes limitées, hypothèses (un seul type de turbine, turbulence, etc)

**Nouvelles méthodes basées sur l'IA**



## 2 MORE

Sept. 2025 – Sept. 2028  
2,5 M€



Nouveau jeu de données global de vagues (climatique), HR avec IA, puis applications design structures

13 partenaires:



# Merci!

Plus d'infos sur la page projet:

<https://www.france-energies-marines.org/en/projects/2c-now/>

**ASSOCIATED RESOURCES**

- [2C NOW fact sheet \(PDF\)](#)
- [Pitch of 2C NOW project presentation](#)
- [Pitch of 2C NOW project results](#)
- [2C NOW final webinar](#)
- [Coastal evolution due to climate change and the impact on cables in the landfall zone \(PDF\)](#)
- [Comparisons and corrections of climate models for waves and water levels along the French coasts \(PDF\)](#)
- [Evaluating the quality of recent reanalyses for wind speed along the French coastline \(PDF\)](#)
- [State of the art of climate change impact on offshore wind \(PDF\)](#)

Contact: [youen.kervella@france-energies-marines.org](mailto:youen.kervella@france-energies-marines.org)