



anr[®]



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

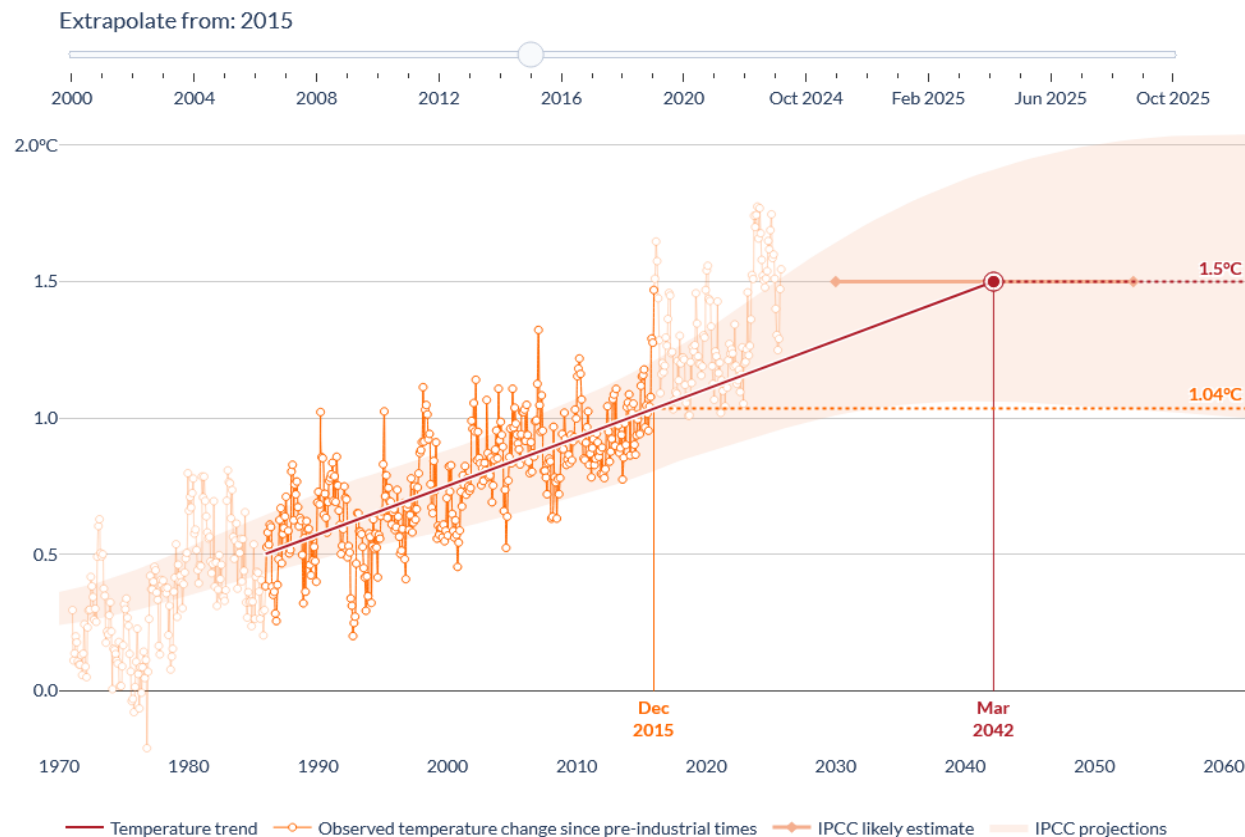
Resultats du projet de R&D 2C NOW

Youen Kervella, France Energies Marines



Global warming reached an estimated **1.04°C** in **December 2015**.

If the 30-year warming trend leading up to then continued, global warming would reach **1.5°C** by **March 2042**.



Sur plusieurs décennies, le climat terrestre change.

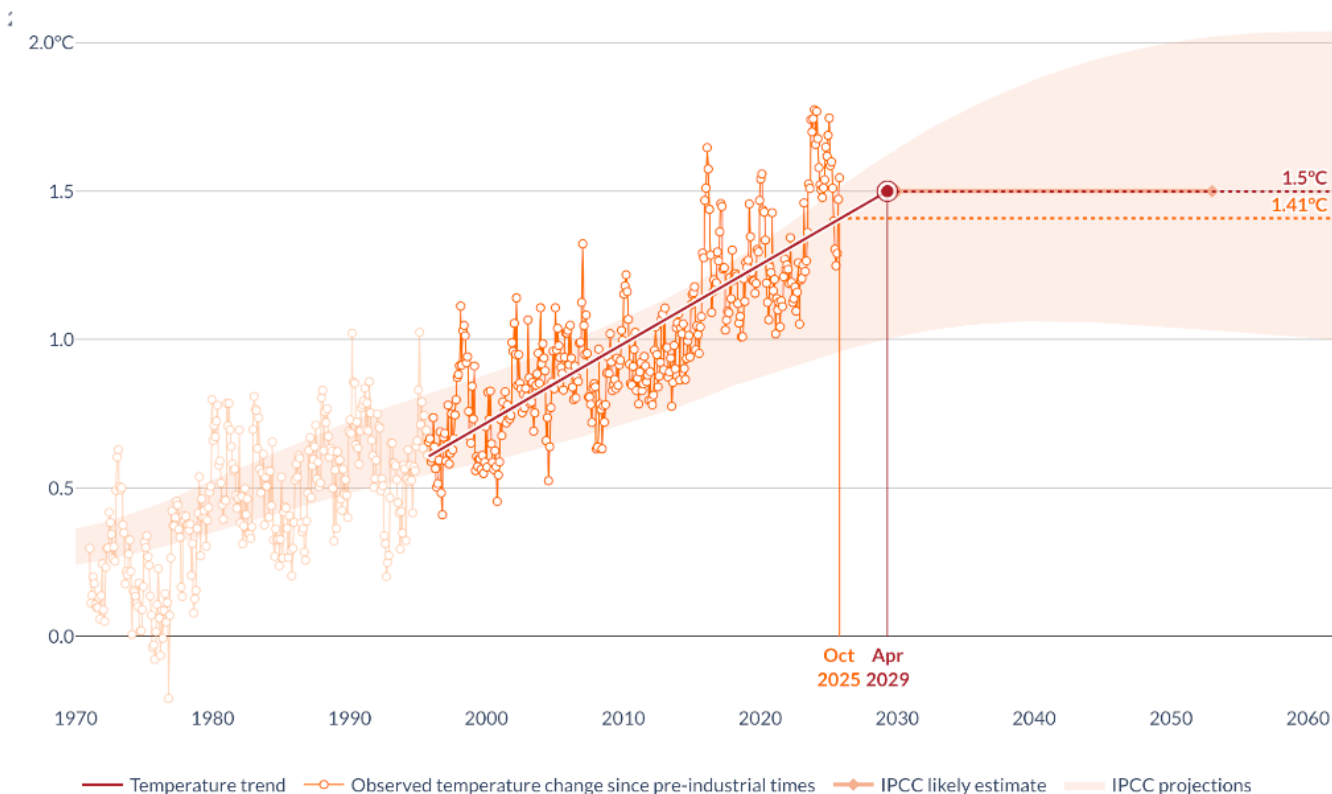
=> Accords de Paris (2015): limiter le réchauffement à +1,5°C

Global mean monthly temperature anomaly with respect to the pre-industrial average (1850-1900)

From the C3S global temperature trend monitor

Global warming reached an estimated **1.41°C** in **October 2025**.

If the 30-year warming trend leading up to then continued, global warming would reach **1.5°C** by **April 2029**.



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



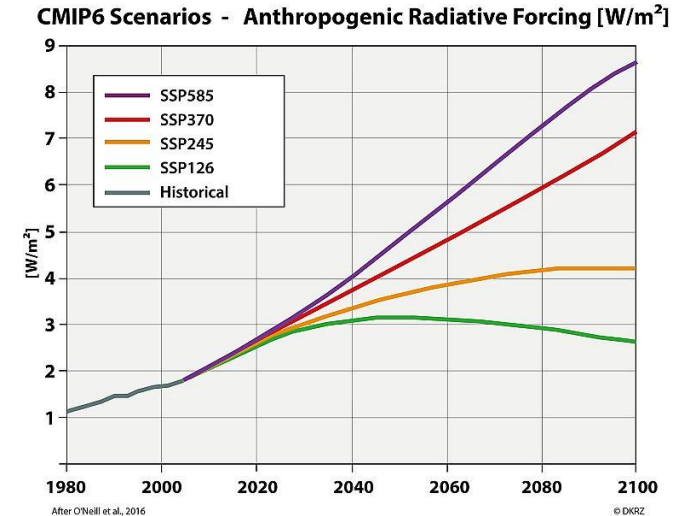
Methodology deployed in 2C NOW



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 van 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

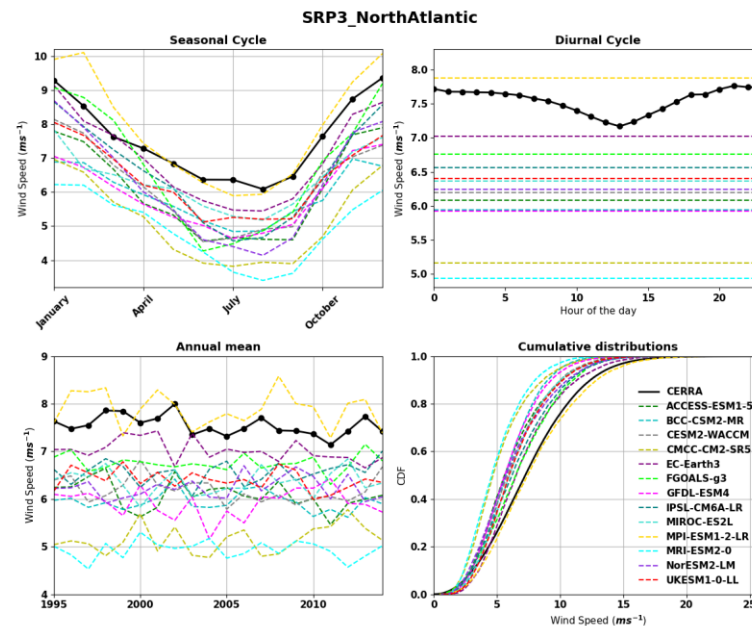
CMIP6 (IPCC)
Datasets

Statistical
Downscaling

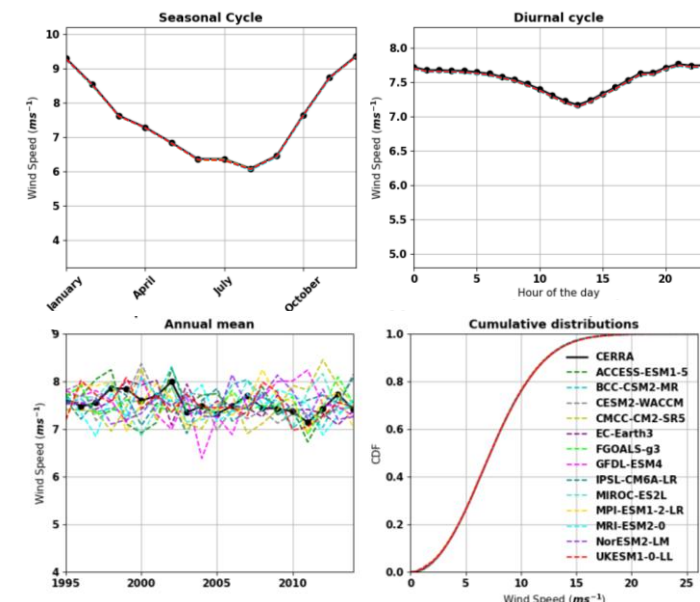
Statistics on
metocean changes

Application to
Offshore Wind

- Etape 1: contrôle qualité des mesures in-situ
- Etape 2: selection des meilleures réanalyses, en utilisant des scores “climatiques”, pour chaque façade maritime¹.
- Etape 3: descente d’échelle locale des GCMs via CDF-t² en utilisant les meilleures réanalyses.



Before CDF-t



After CDF-t

Methodology deployed in 2C NOW

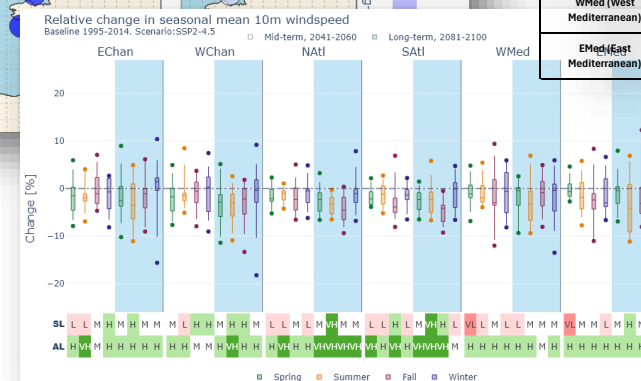
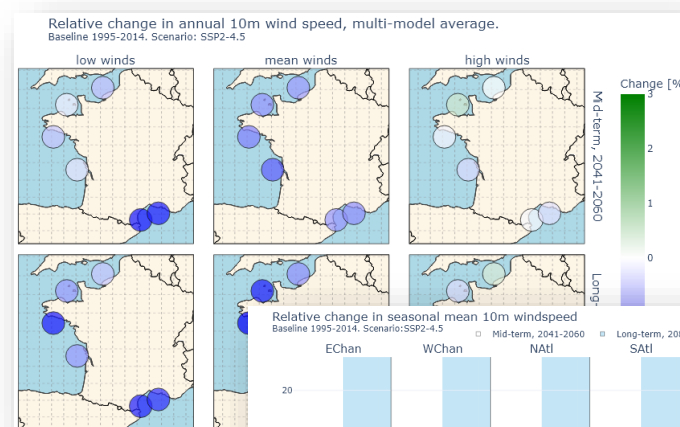
CMIP6 (IPCC)
Datasets

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 reference (1995-2014) vs périodes futures (autour de 2050 et 2100).
- Pour chaque SSP
- Prise en compte des incertitudes (variabilité des modèles).



Baseline period: 1995-2014		Past (1955-1974)				Near-mid-term (2031-2050)			
		Median [cm]	[p5;p95]	AL [%]	SL [%]	Median [cm]	[p5;p95]	AL [%]	SL [%]
location & components									
EChan (East Channel)	MSL	-4.2				15.5			
	Negative Surge	-0.1 [-0.4; 0.2]	60	40	-0.2 [-0.3; -0.0]	100	80		
	Positive Surge	-0.4 [-0.6; 0.6]	60	80	-0.3 [-0.7; 0.2]	60	60		
WChan (West Channel)	MSL	-5.1				16.6			
	Negative Surge	0.1 [-0.3; 0.4]	60	60	-0.2 [-0.5; 0.0]	80	60		
	Positive Surge	-0.2 [-0.5; 0.3]	60	60	-0.2 [-0.5; 0.2]	80	40		
NAtl (North Atlantic)	MSL	-5.4				17			
	Negative Surge	-0.1 [-0.2; 0.4]	60	40	0 [-0.2; 0.1]	60	40		
	Positive Surge	-0.1 [-0.3; 0.1]	60	20	-0.4 [-0.5; 0.1]	80	80		
SAtl (South Atlantic)	MSL	-5.3				17			
	Negative Surge	-0.1 [-0.3; 0.3]	80	60	0 [-0.2; 0.1]	80	0		
	Positive Surge	0 [-0.2; 0.1]	60	0	-0.2 [-0.4; 0.3]	80	20		
WMed (West Mediterranean)	MSL	-4.9				16.2			
	Negative Surge	-0.2 [-0.4; 0.3]	60	80	0 [-0.4; 0.1]	60	20		
	Positive Surge	0.2 [-0.0; 0.2]	80	20	-0.4 [-0.4; 0.1]	80	60		
EMed (East Mediterranean)	MSL	-5.3				16.4			
	Negative Surge	-0.1 [-0.3; 0.2]	80	80	-0.1 [-0.5; 0.0]	80	20		
	Positive Surge	0.1 [-0.1; 0.2]	80	0	-0.3 [-0.5; 0.2]	80	80		

Methodology deployed in 2C NOW

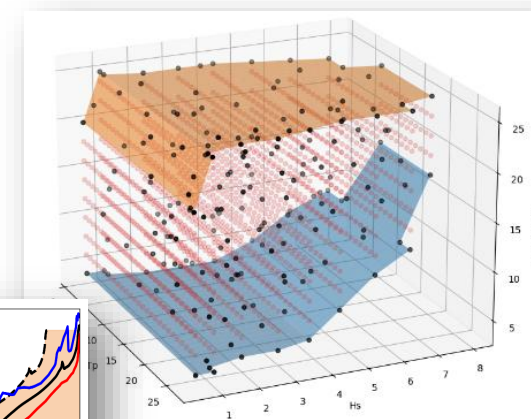
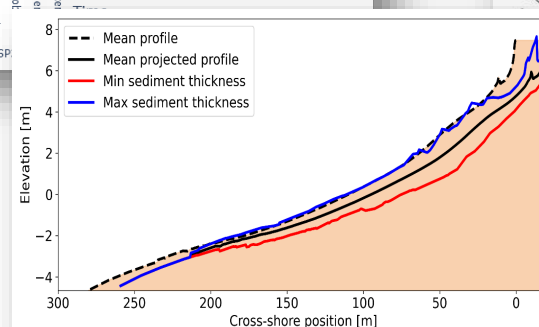
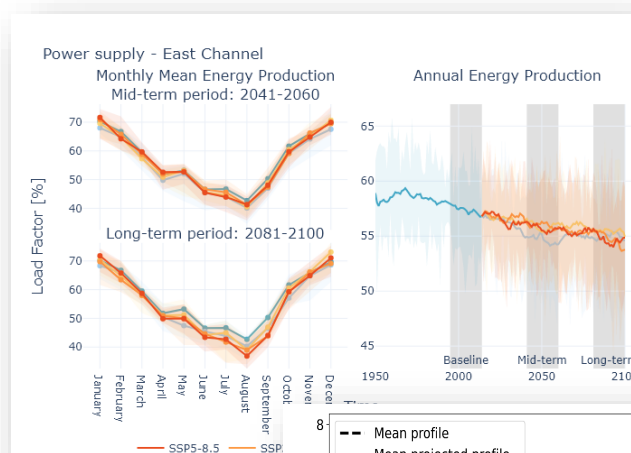
CMIP6 (IPCC)
Datasets

Statistical
Downscaling

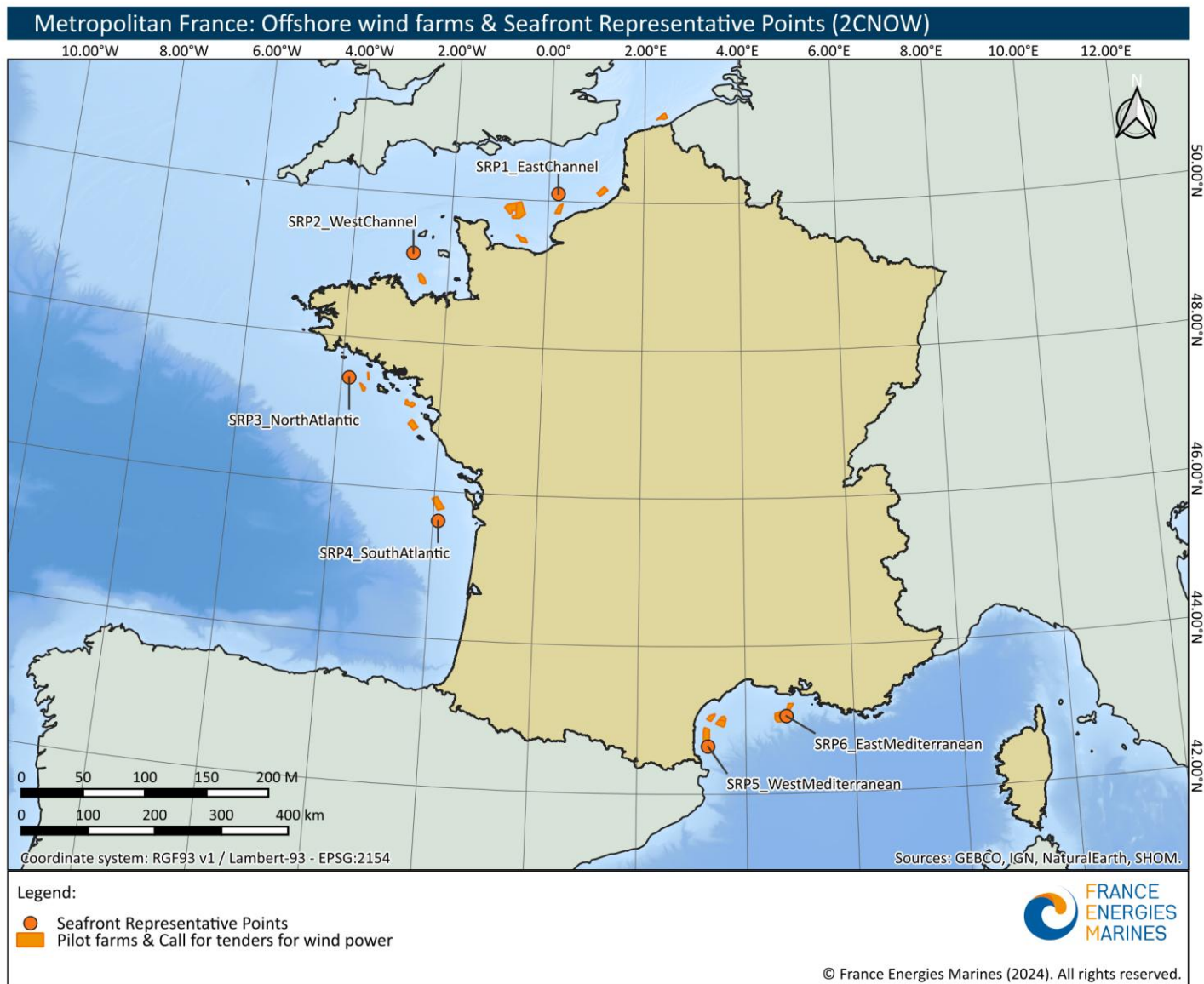
Statistics on
metocean changes

Application to
Offshore Wind

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



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



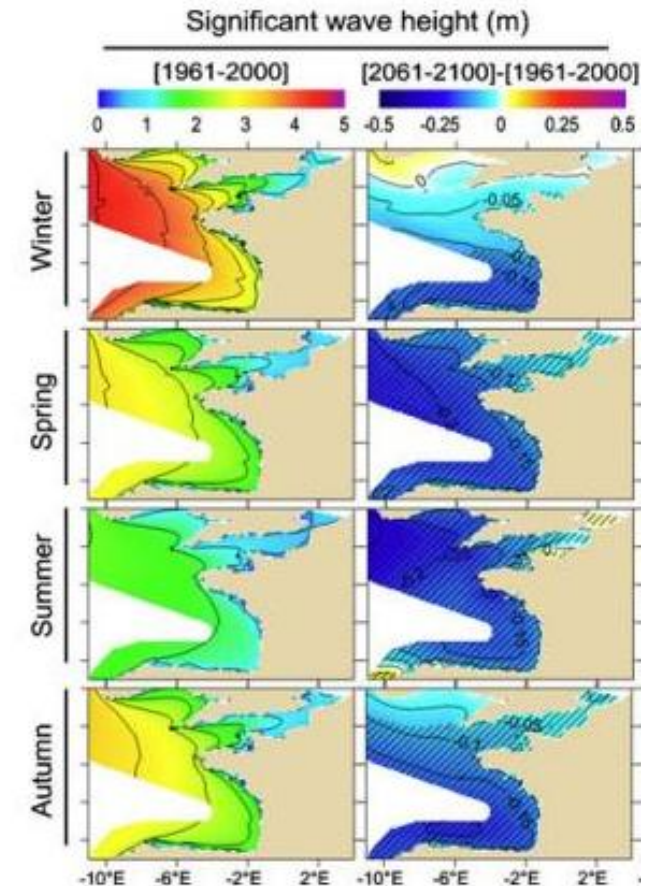
2C NOW

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



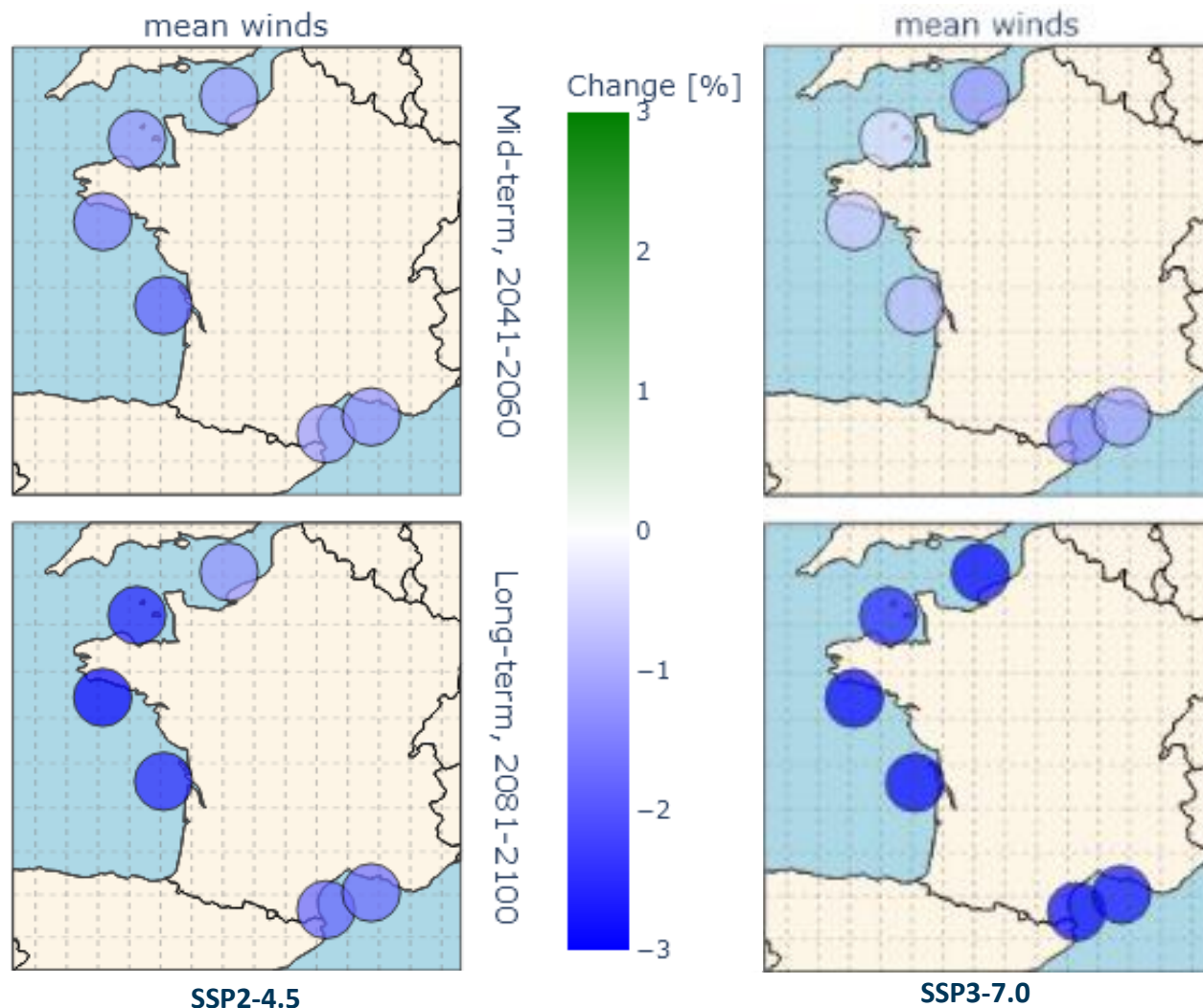
Biblio:

- 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 et 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)

Quid du vent ?



Relative change in annual 10m wind speed, multi-model average. Baseline: 1995-2014

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^{ème} rapport du GIEC¹, 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 scénario 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^{ème} rapport du GIEC¹ et la littérature pour les vents européens (*Carvalho et al., 2017; Carvalho et al., 2021*)

1

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_TechnicalSummary.pdf

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

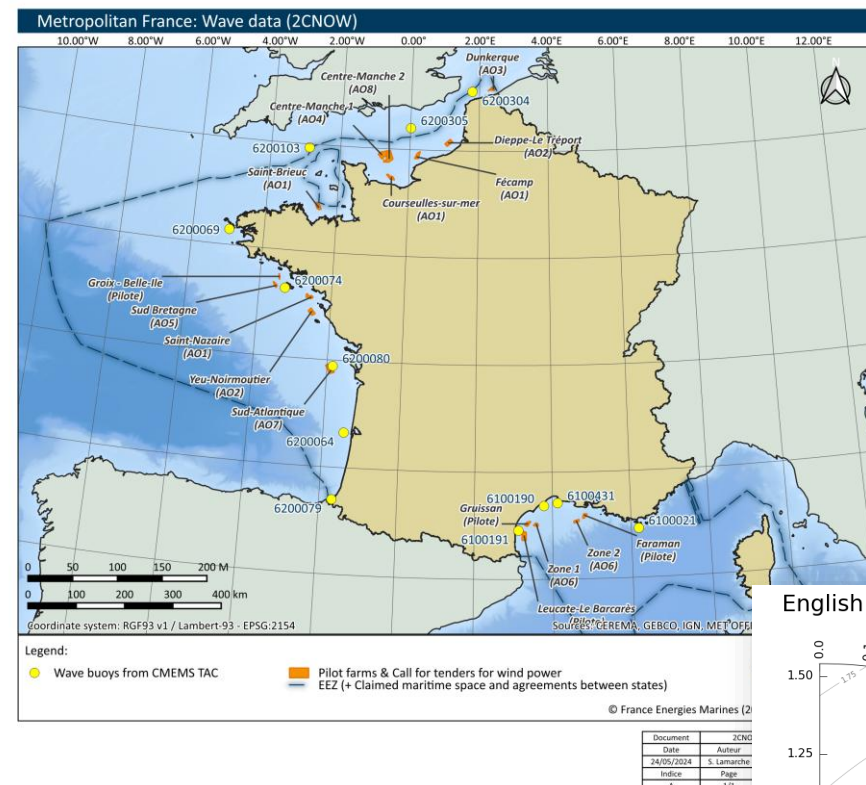
2 périodes:

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

Downscaling statistique via CDF-t¹, en utilisant les meilleures réanalyses (sélection via bouées CANDHIS notamment: 3 en Manche, 4 en Atlantique et 4 en Méditerranée²).

¹ Michelangeli et al., 2009.

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



English Channel (1994-2019) - Mean Conditions

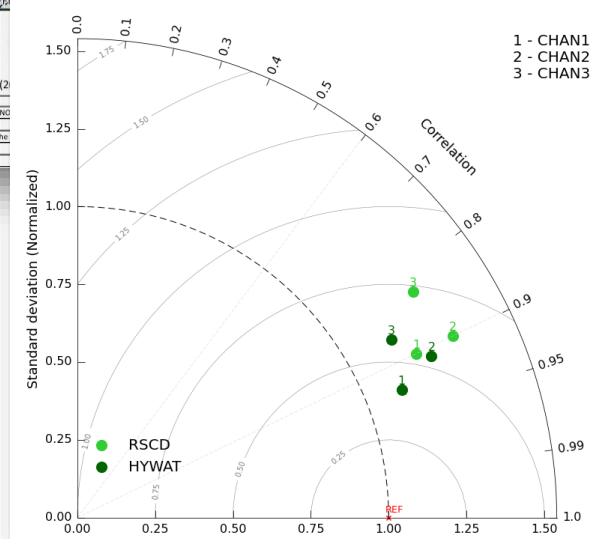
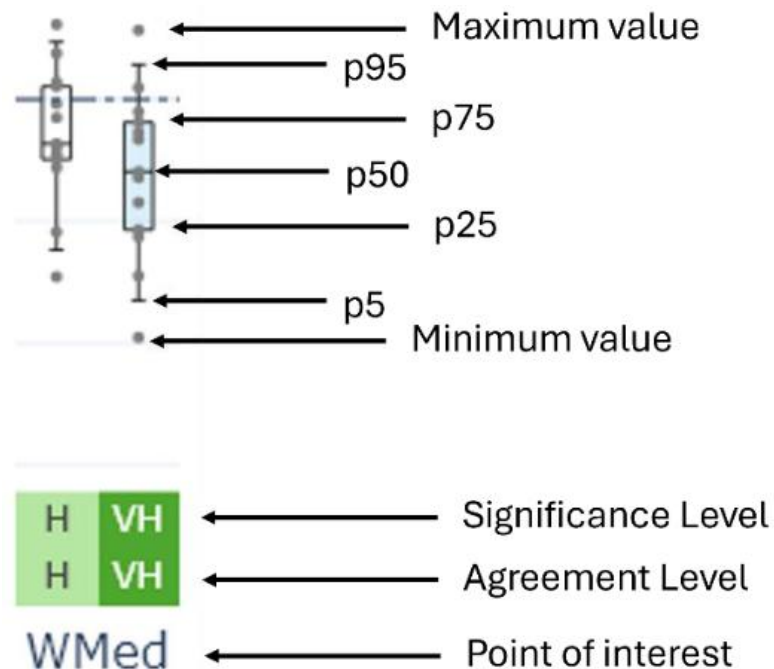


Table 10: best reanalyses for each French maritime seafront in terms of waves.

Maritime seafront	Best reanalysis
English Channel	HYWAT
Atlantic Ocean	HYWAT
Mediterranean Sea	MED-WAV

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

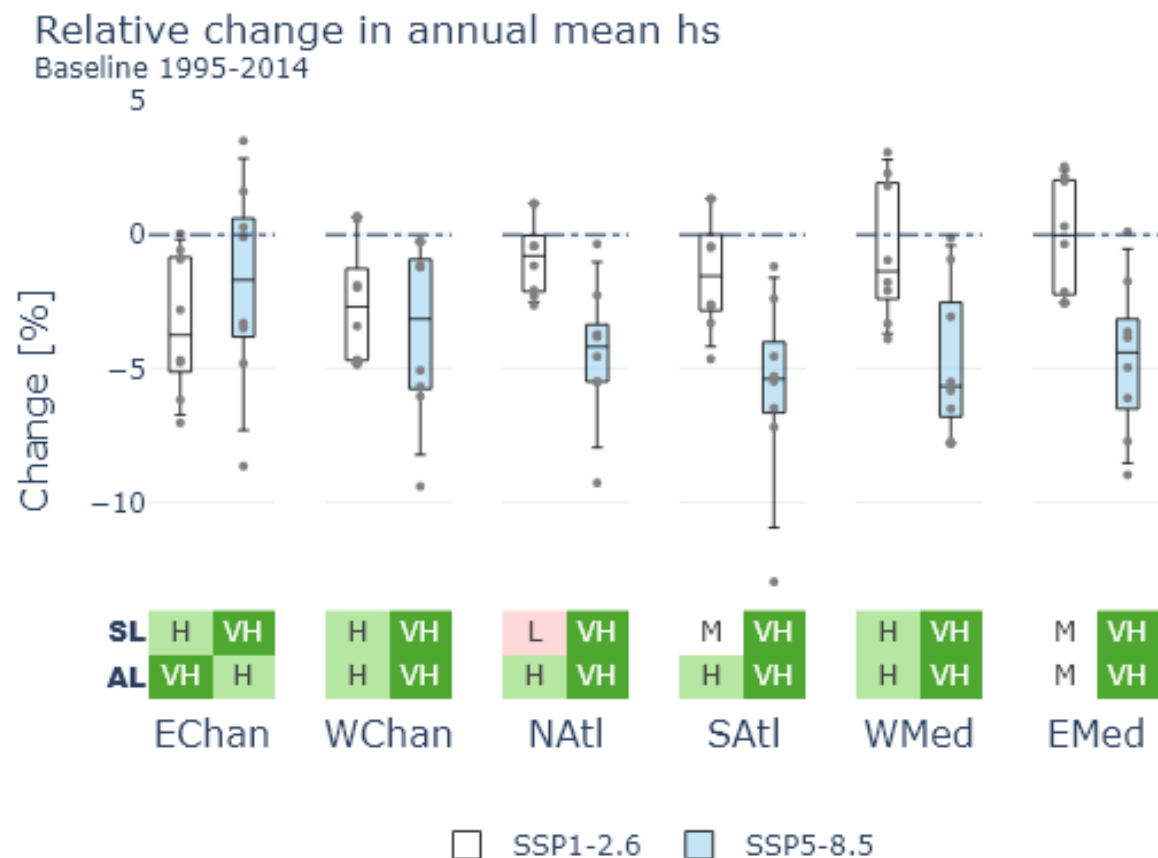


SL = Significance Level				
AL = Agreement Level				
VL	L	M	H	VH
[0;20%[	[20%;40%[	[40%;60%[	[60%;80%[	[80%;100%[

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).

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).

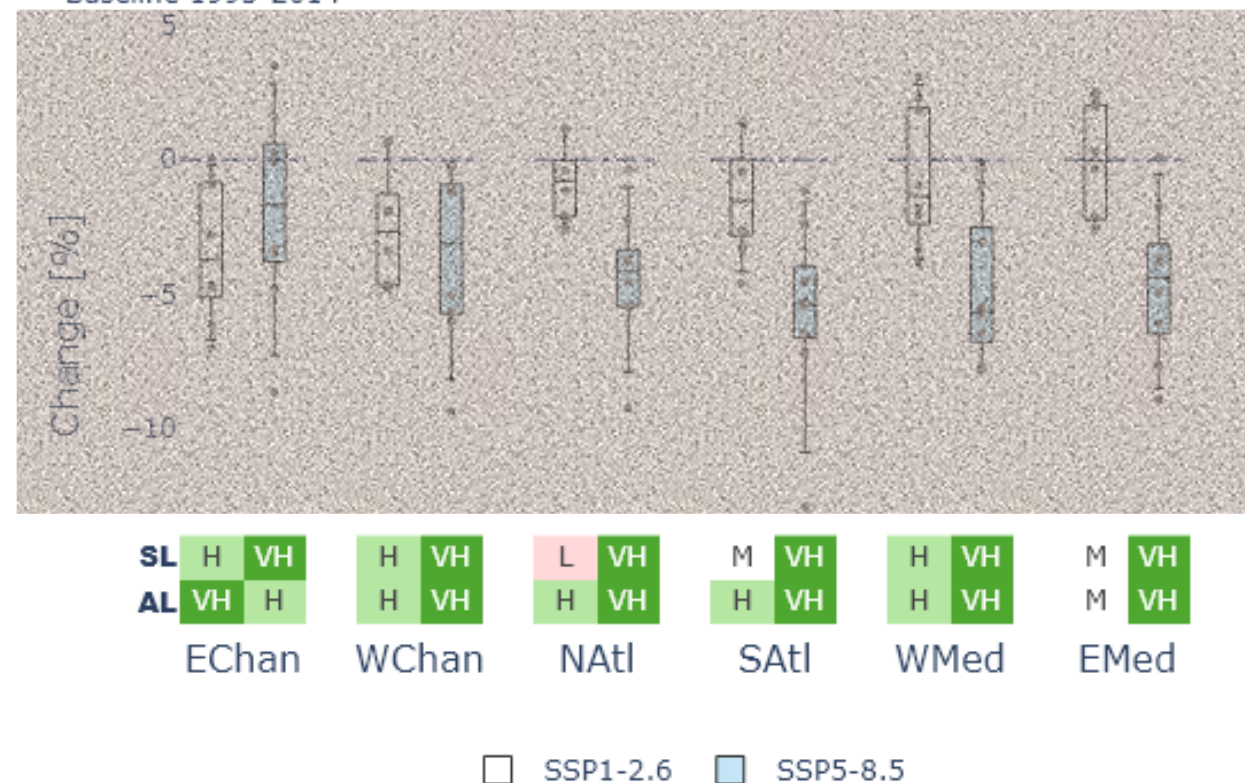


SL = Significance Level				
AL = Agreement Level				
VL	L	M	H	VH
[0;20%[	[20%;40%[	[40%;60%[	[60%;80%[	[80%;100%[

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.

Relative change in annual mean hs
Baseline 1995-2014



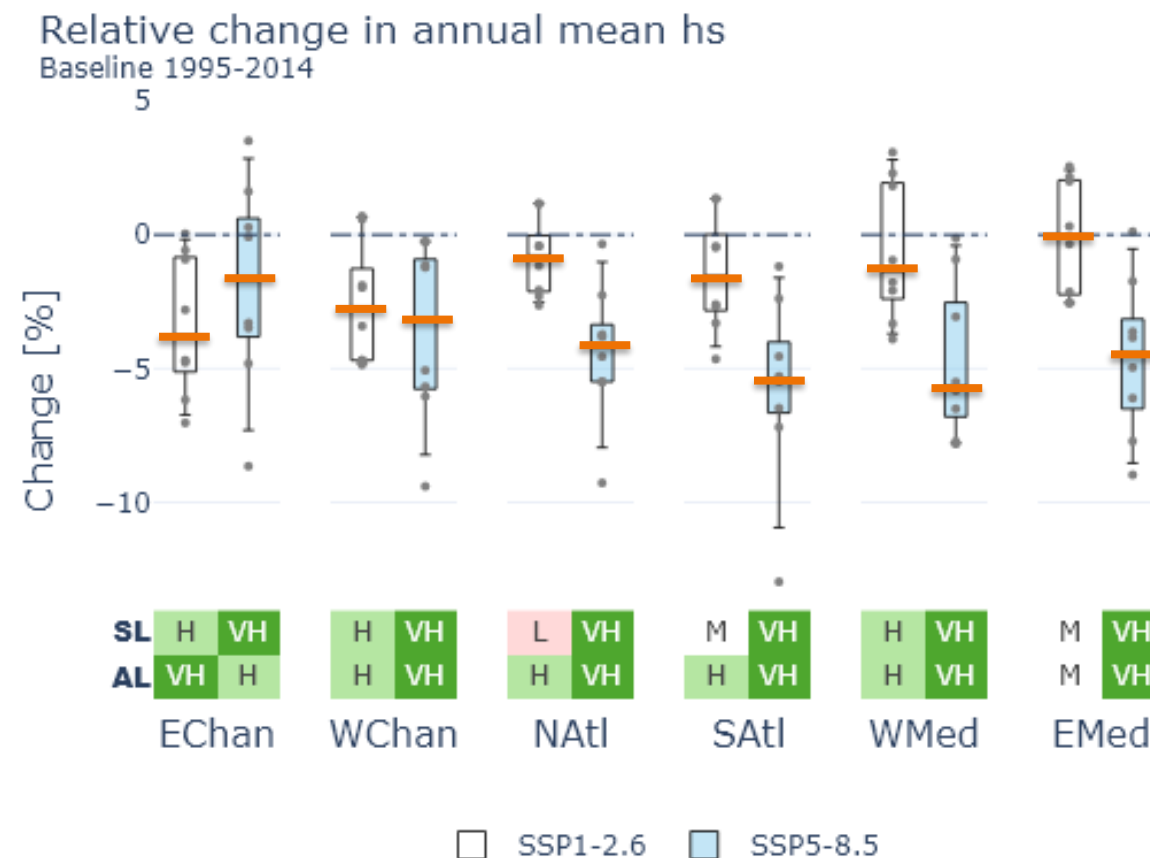
SL = Significance Level				
AL = Agreement Level				
VL	L	M	H	VH
[0;20%[	[20%;40%[	[40%;60%[	[60%;80%[	[80%;100%[

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%[

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.

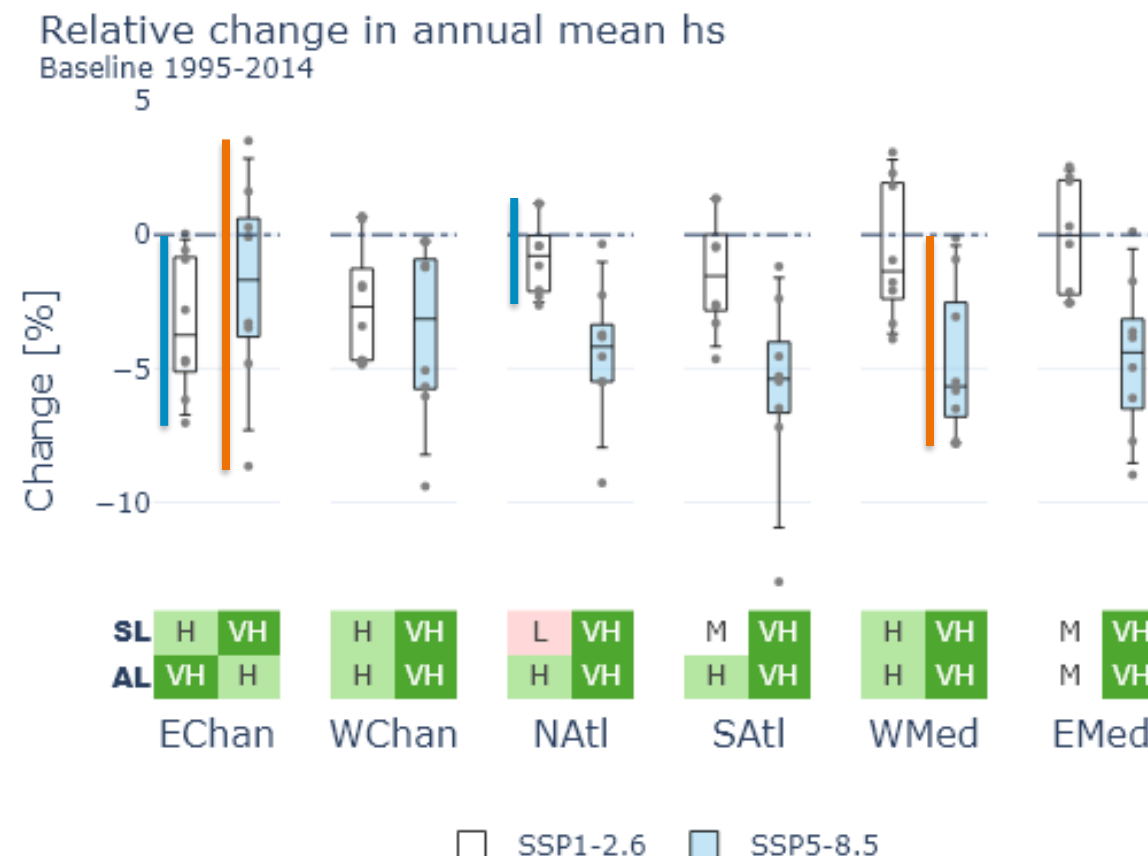
Changements médians: baisse sous les 2 SSP (sauf Emed pour
SSP1-2.6).

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.

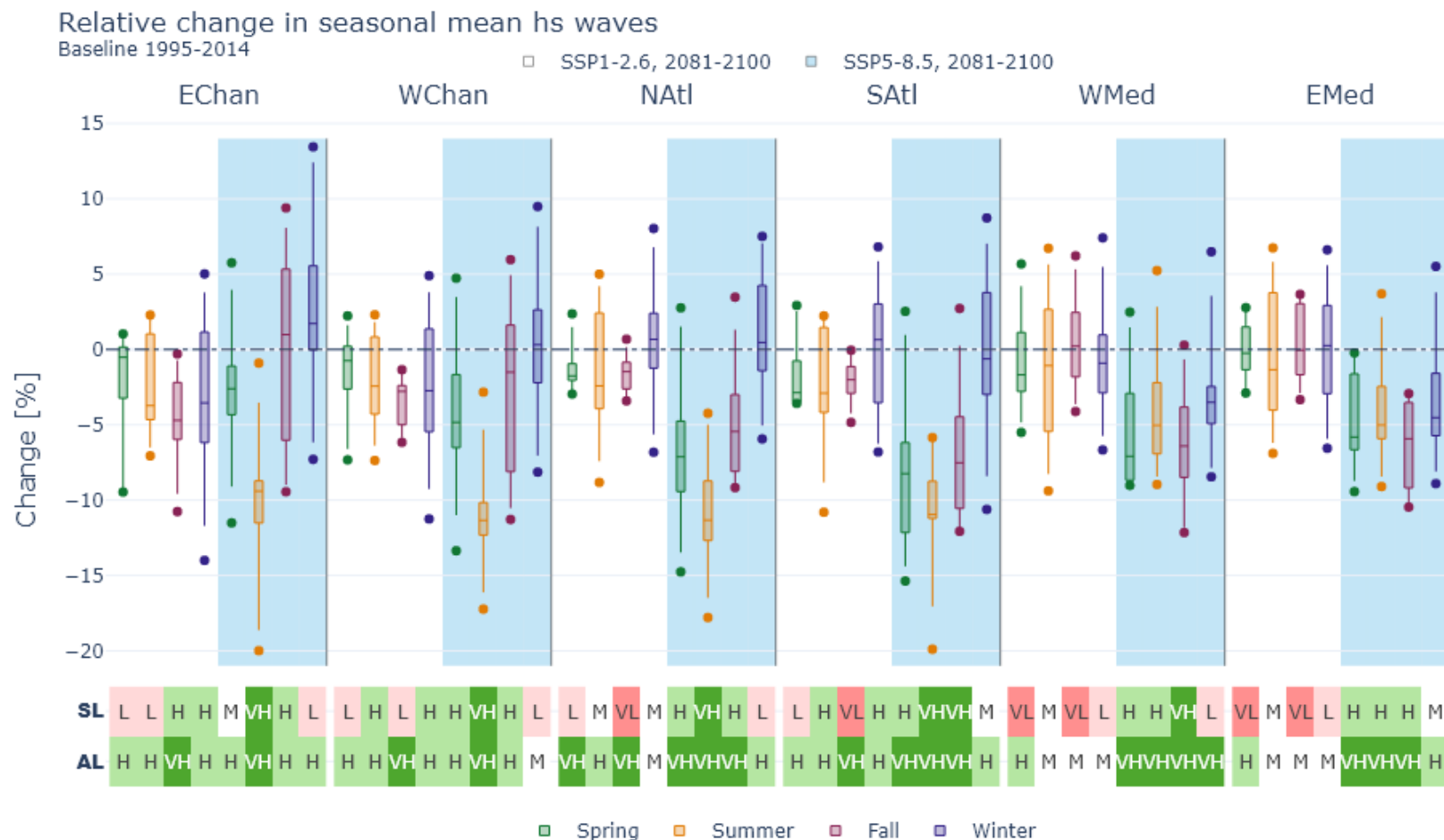
De 7,5% à 15% sous le SSP5-8.5.



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

Résultats pour les 6 points représentatifs, sous 2 SSP.

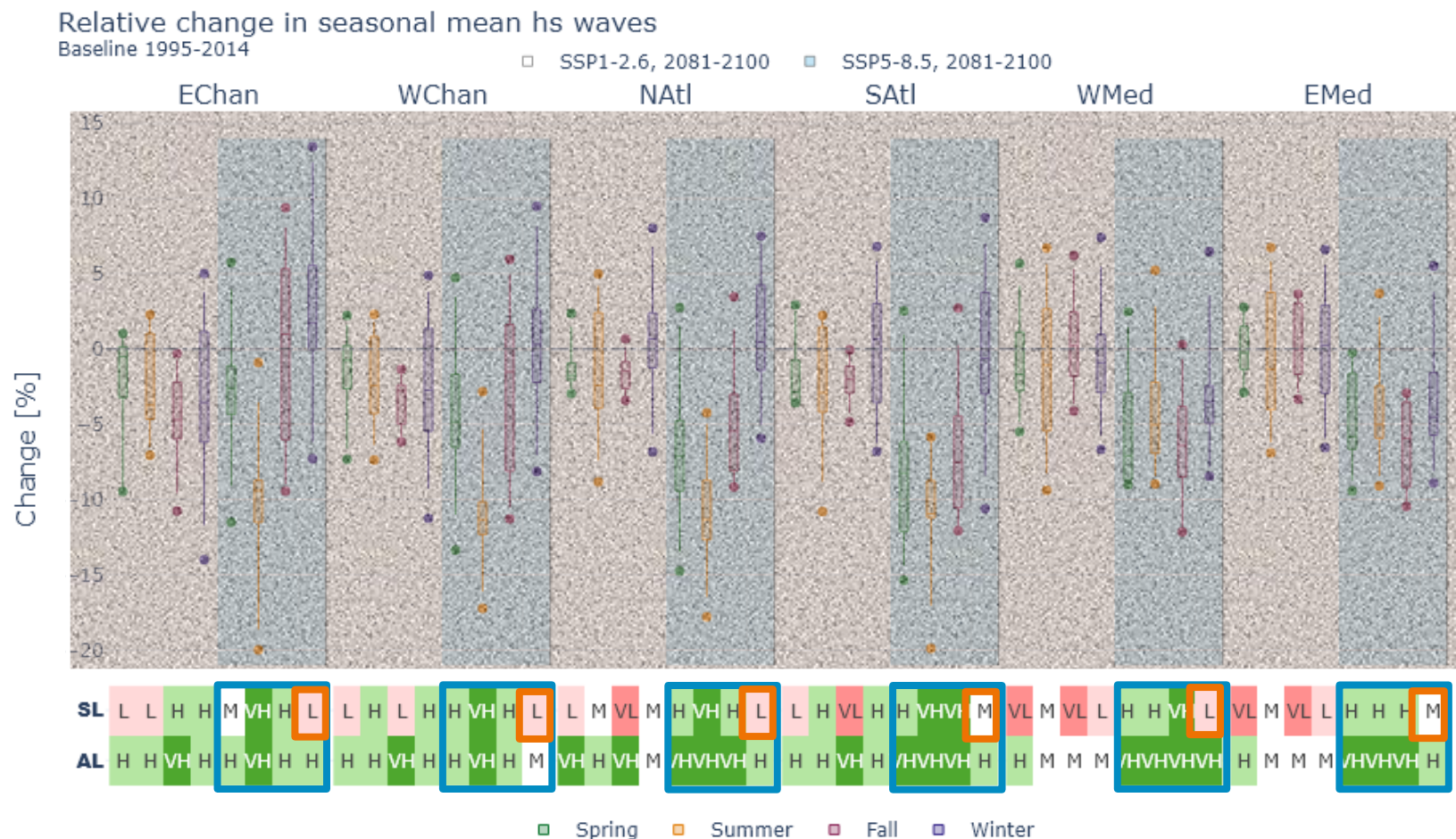
Différences relatives (en %) **saisonnnières** entre la période future (2071-2100) et la période de référence (1995-2014).



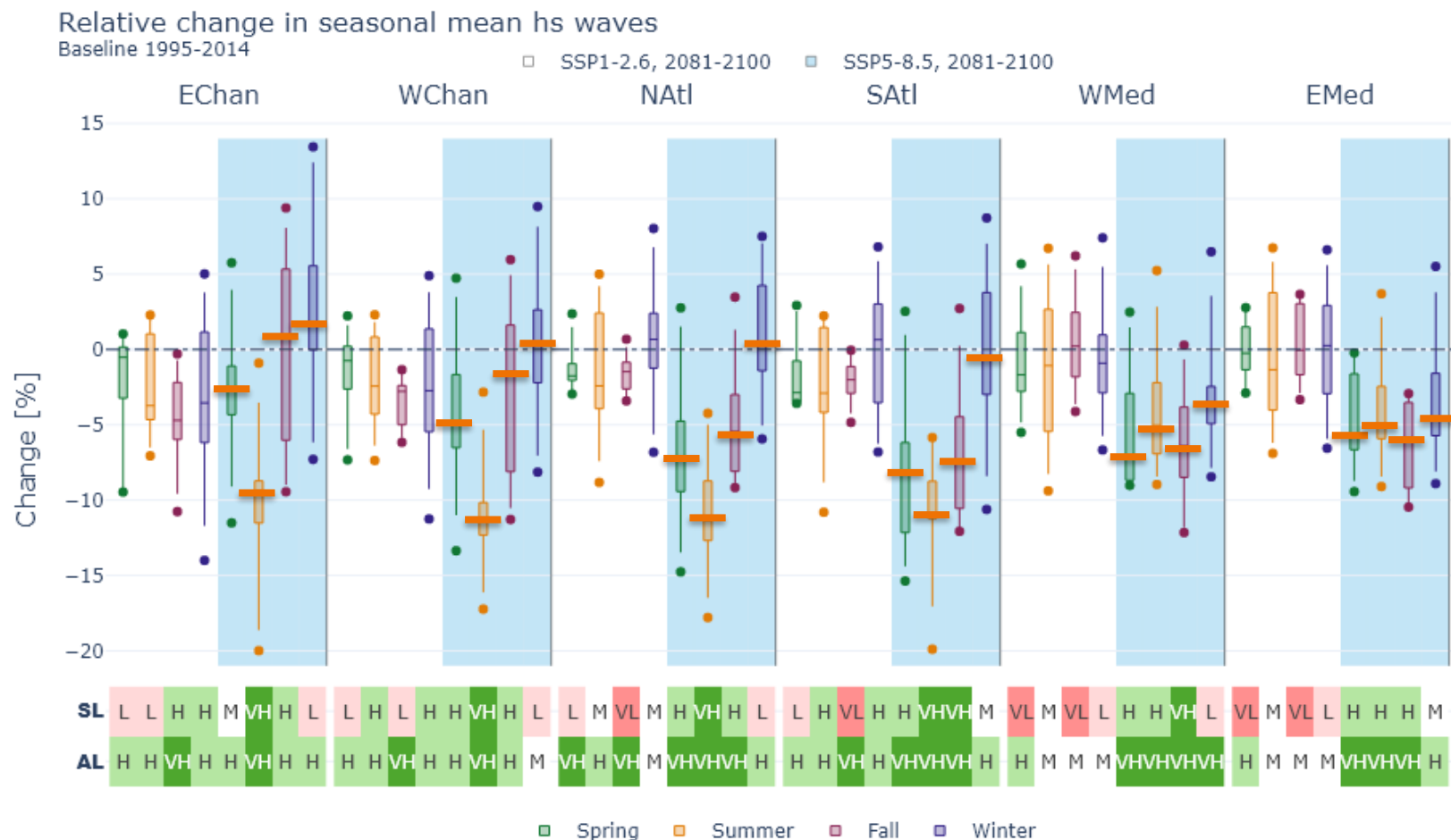
Résultats pour les 6 points représentatifs, sous 2 SSP.

Différences relatives (en %) **saisonnnières** 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.

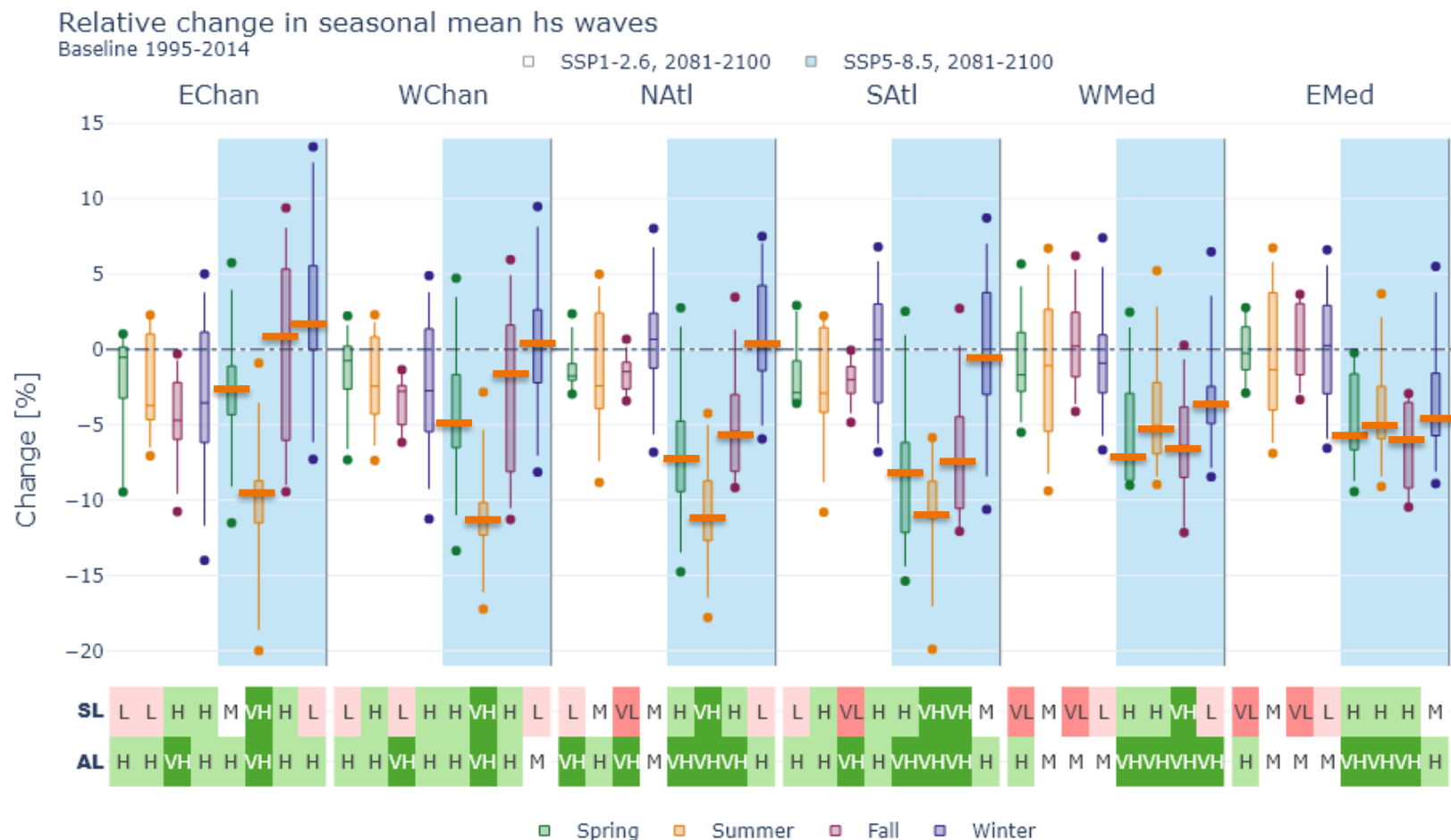


Baisse jusqu'à 12%, plus marquée en été en Manche et dans l'Atlantique.
Stagnation ou augmentation en hiver en Manche et dans l'Atlantique.



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

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)



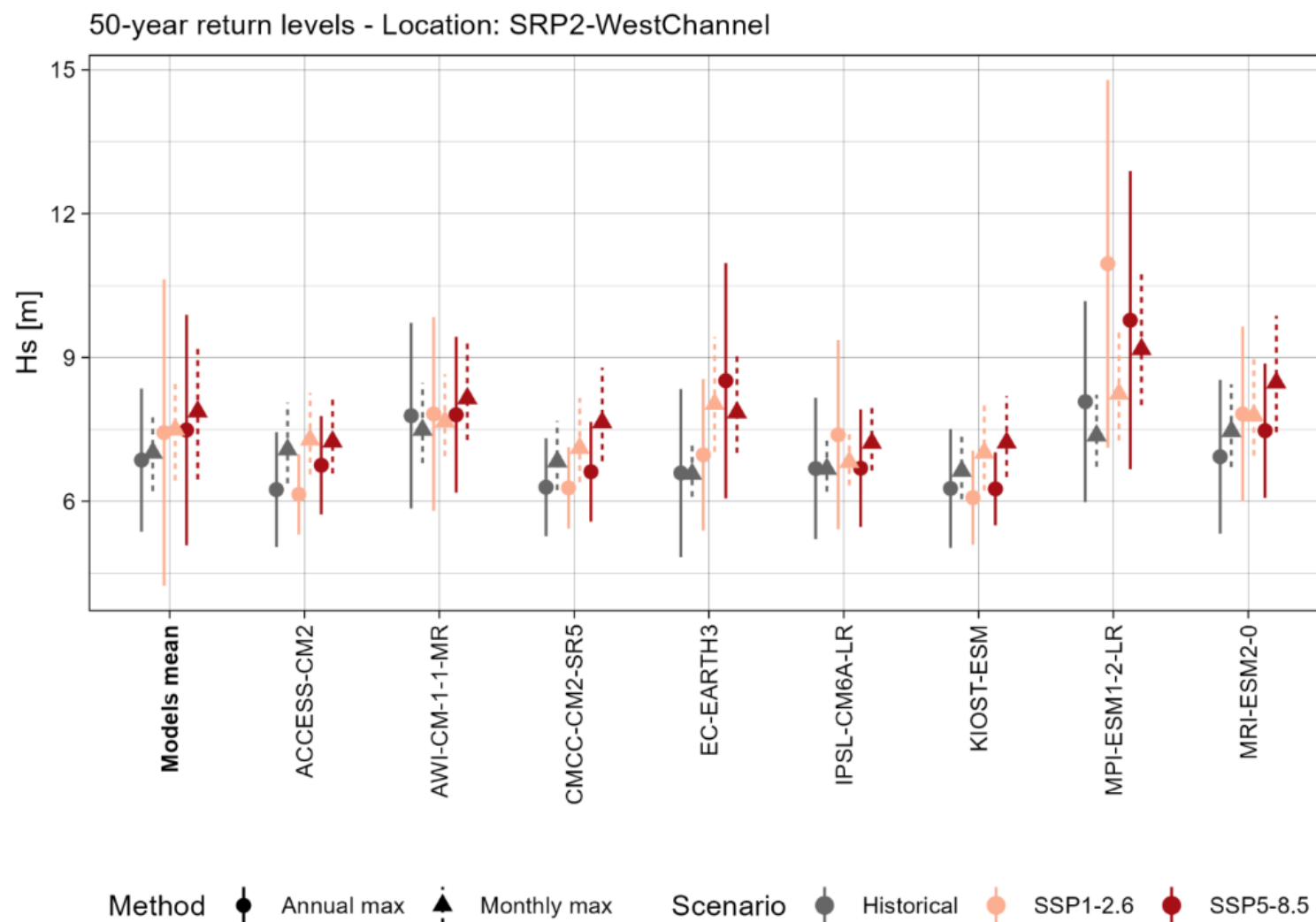
Méthodologie

- 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 μ et σ 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)

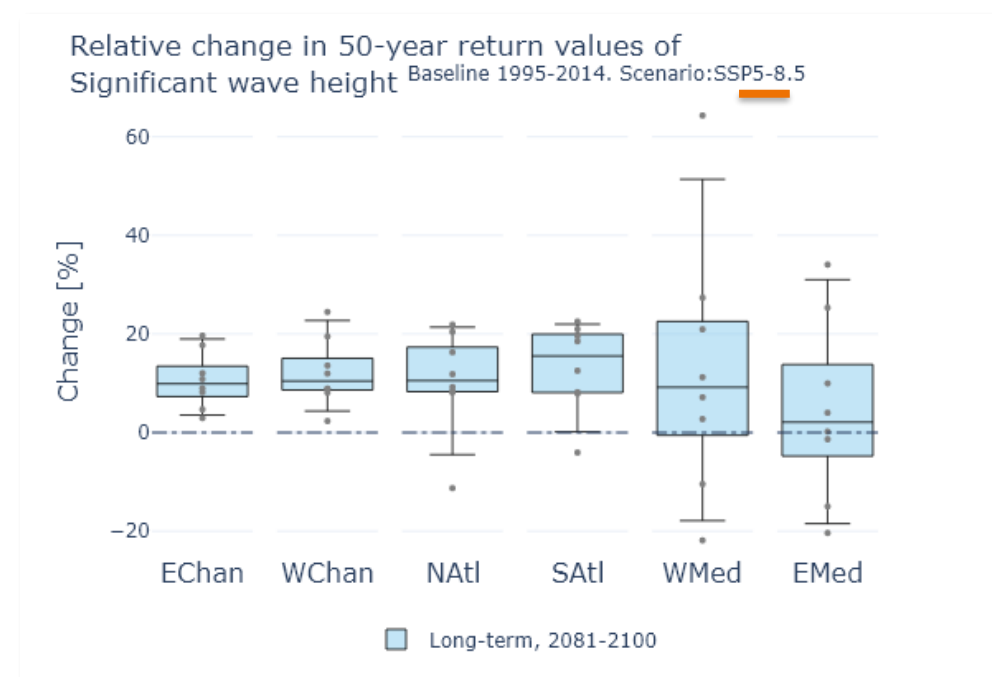
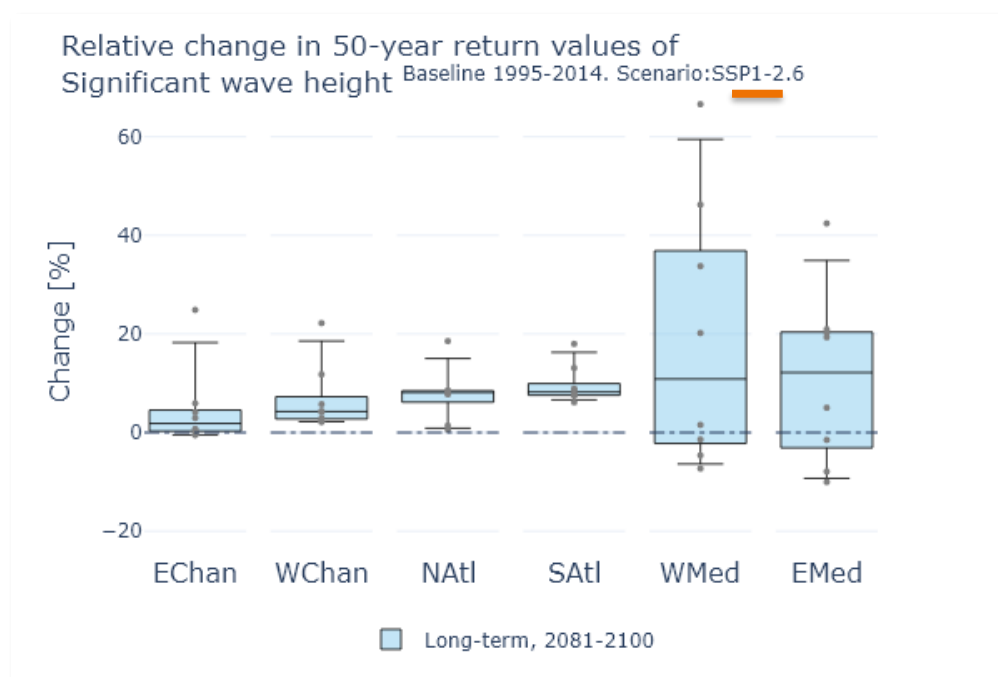
Différences entre les méthodes employées et réduction des IC avec la méthode mensuelle.

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.

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.

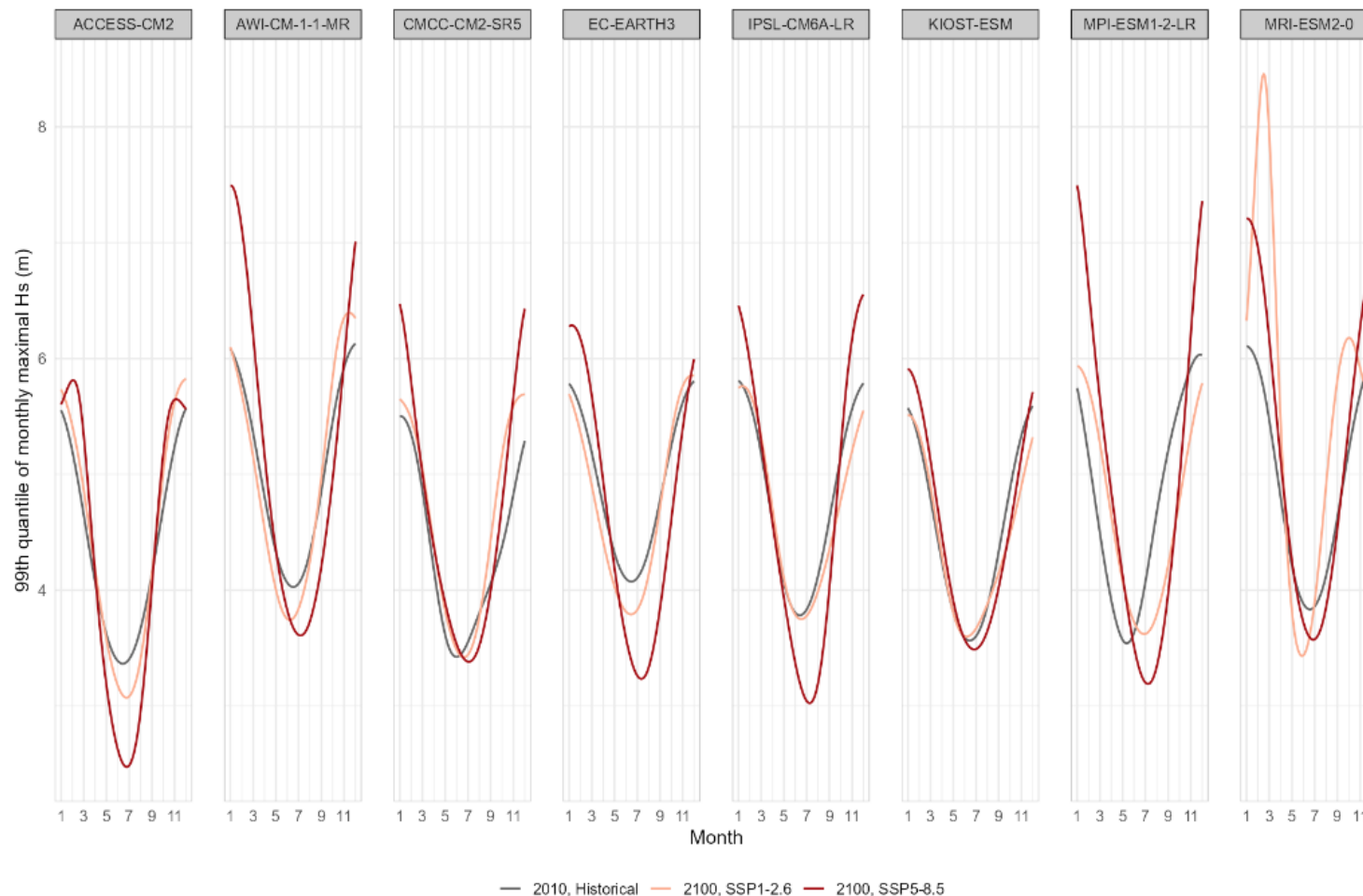


Figure 5: Comparison of monthly 99th quantiles, at the East English Channel Representative point, obtained from the completely non-stationary model of eq. 3 at different years.

2C NOW

Application à l'éolien en mer



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

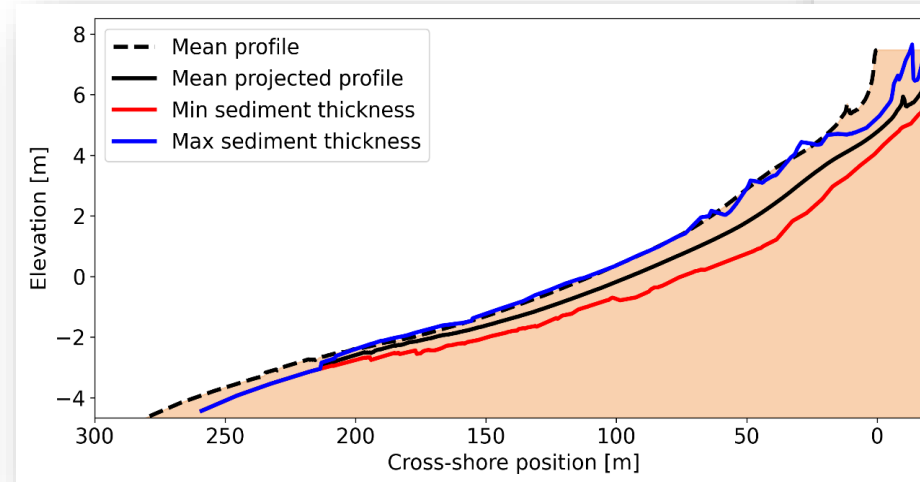
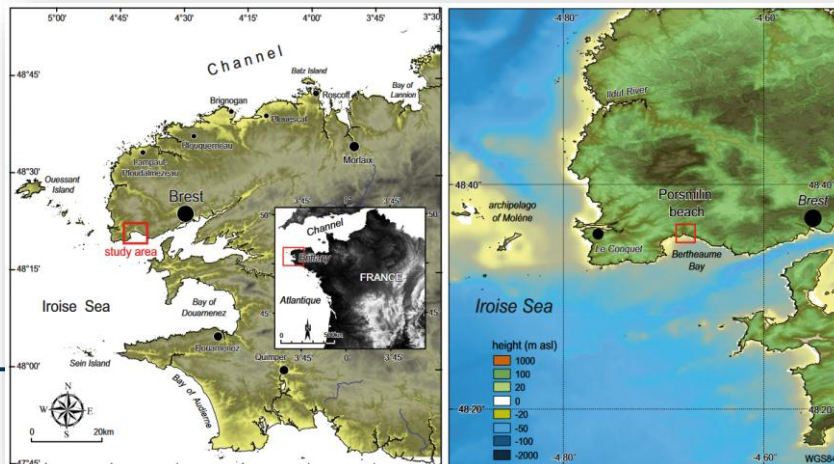
2C NOW:

- 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 câbles sous-marins (2 modèles).

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



Demonstration at Porsmilin Beach:



Medium to long-term evolution

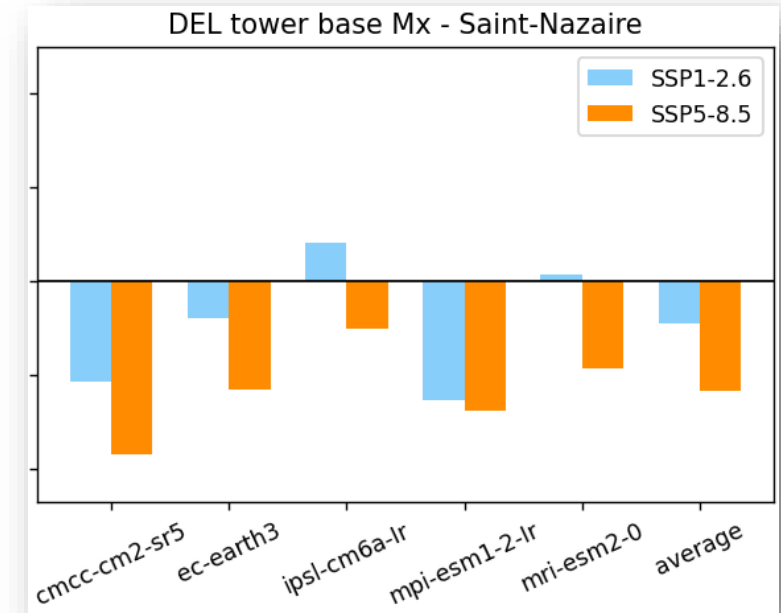
Impact de l'évolution des conditions météo-océaniques sur la conception en fatigue des turbines
=> évalué par variations de DEL dans de multiples scénarios climatiques.

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

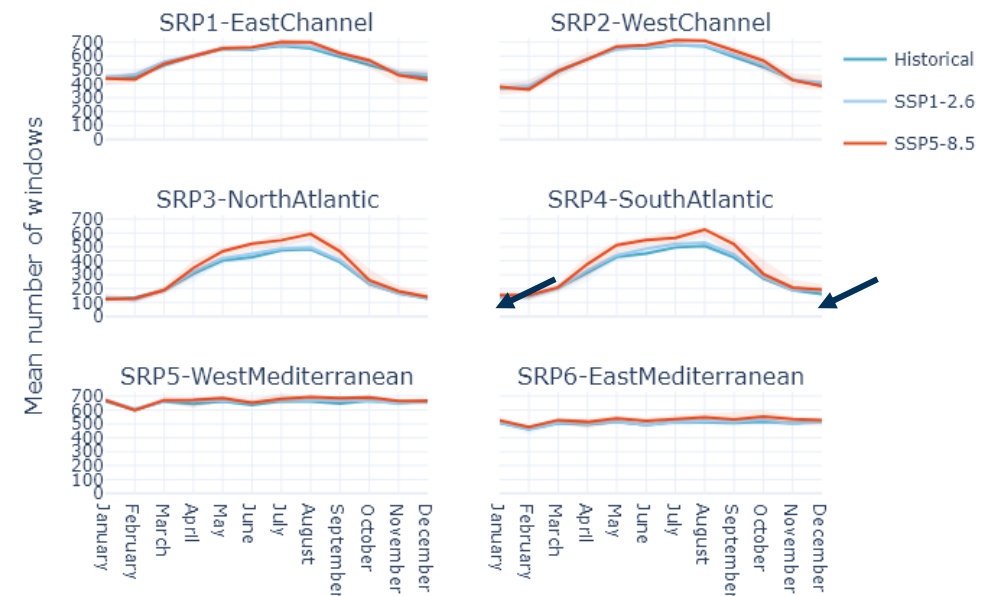
Impacts on:

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..

Mean number of windows of length 3 hours, at SRP locations
Criteria : Significant wave height ≤ 1.5 m



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

2C MORE

Sept. 2025 – Sept. 2028
2,5 M€



13 partenaires:



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

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

