

## Analyse prospective de la ressource éolienne en mer

Léa THIEBAUD <sup>1</sup>, Anne-Laure TIBERI-WADIER <sup>1</sup>

1. Cerema Eau mer et fleuves, Département Environnement et risques  
155 rue Pierre Bouguer, 29280 Plouzané, France.  
[lea.thiebaud@cerema.fr](mailto:lea.thiebaud@cerema.fr) ; [anne-laure.tiberi-wadier@cerema.fr](mailto:anne-laure.tiberi-wadier@cerema.fr)

### Résumé :

L'éolien en mer connaît actuellement une forte croissance en Europe avec plus de 22 GW (RAMIREZ *et al.*, 2020) de puissance installée et des objectifs ambitieux de développement dans les prochaines années. La production électrique d'origine éolienne en mer dans plusieurs décennies dépendra :

- du nombre d'éoliennes en fonctionnement qui résultera des choix politiques ainsi que des stratégies adoptées pour assurer une bonne cohabitation des usages en mer ;
- de la puissance des éoliennes qui pourrait nettement augmenter. En 1991 la puissance des premières éoliennes en mer était de 0,45 MW. En 2020 les projets attribués prévoient des éoliennes de 10 à 12 MW ;
- de la ressource en vent qui pourrait évoluer notamment en raison du changement climatique (CARVALHO *et al.*, 2017).

Le travail réalisé étudie la ressource en vent à partir de projections du vent issues du projet EURO-CORDEX. Ce projet met à disposition un ensemble de simulations climatiques prospectives basé sur des modèles utilisant des descentes d'échelles statistiques ou dynamiques (modèles régionaux) forcés par les modèles globaux provenant du projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP5) et utilisés dans les rapports du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat). Les données issues de ces chaînes de modèles sont analysées pour prendre en compte la variabilité naturelle du climat, les différents scénarios socio-économiques impactant le changement climatique et l'incertitude liée aux modèles climatiques.

À partir de ces données la ressource éolienne et ses variations spatiales et temporelles sont étudiées sur plusieurs périodes 2006 – 2030, 2076 – 2100 et 2006 – 2100 et sur l'ensemble de l'Europe. Les écart-types entre les moyennes saisonnières des données étudiées sont calculés pour identifier les convergences ou divergences entre les différents modèles sur la zone d'étude. Ces éléments sont appréhendés pour différents scénarios RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5 (*Representative Concentration Pathway*) traduisant une augmentation plus ou moins forte des émissions de gaz à effets de serre au cours du XXI<sup>e</sup> siècle.

**Mots-clés :** Éolien en mer, Vent, Ressource, Prospective, Simulations climatiques, Euro-Cordex, Scénario RCP.

## Thème 5 – Énergies et ressources marines

### 1. Introduction

Le bilan carbone des éoliennes en mer actuelles indique que ces technologies émettent environ 16 g équivalent CO<sub>2</sub> par kWh produit et présentent ainsi un facteur d'émission 60 fois inférieur à celui des centrales à charbon. Cette technologie participe ainsi au développement d'un mix électrique décarboné (KALDELLIS & APOSTOLOU 2017).

La ressource en vent est déterminante dans la performance économique d'une zone pour l'éolien en mer. Elle donne une indication directe du potentiel de production de la zone pour identifier les zones techniquement et économiquement favorables (THIEBAUD *et al.*, 2018). Pour anticiper le potentiel de l'éolien en mer dans les années à venir il faut donc connaître les variations spatiales et temporelles du vent à plus ou moins long terme. Une estimation prospective de la ressource éolienne en mer est réalisée à partir de plusieurs jeux de données issus de travaux sur l'évolution du climat.

### 2. Matériels et méthodes

#### 2.1 Projet EURO-CORDEX et scénarios climatiques

Le projet EURO-CORDEX est une branche du projet international CORDEX (COordinated Regional Downscaling EXperiment). L'objectif de ce projet est d'établir des projections climatiques à l'échelle régionale pour évaluer les impacts du changement climatique et pour identifier des solutions d'adaptation au changement climatique dans le cadre du cinquième rapport du GIEC.

Les simulations EURO-CORDEX prennent en compte les simulations du climat mondial des expériences à long terme CMIP5 jusqu'à l'année 2100. Elles sont basées sur des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (figure 1) correspondant à (IPCC, 2013) :

- à un pic du forçage radiatif au cours du XXI<sup>e</sup> siècle à 3,0 W/m<sup>2</sup> et une diminution par la suite (RCP 2.6) ;
- une stabilisation du forçage radiatif après le XXI<sup>e</sup> siècle à 4,5 W/m<sup>2</sup> (RCP 4.5) ;
- une augmentation du forçage radiatif passant à 8,5 W/m<sup>2</sup> à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (RCP 8.5).

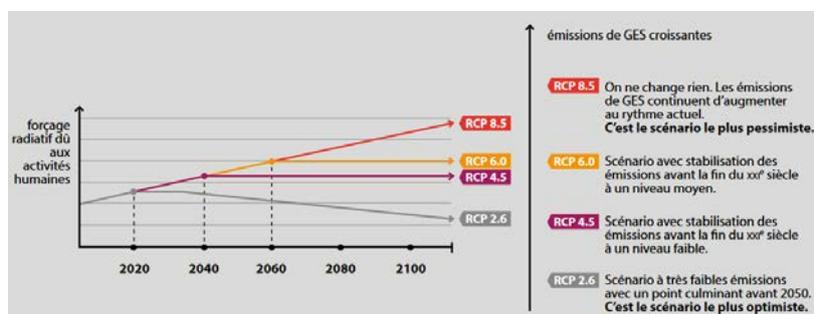


Figure 1. Représentation de l'évolution des différents scénarios d'émissions de GES

(Source : experts du GIEC – ONERC, [https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ONERC\\_Fiche\\_scenarios\\_evolution\\_GES\\_GIEC.pdf](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Fiche_scenarios_evolution_GES_GIEC.pdf)).

## 2.2 Modèles climatiques globaux et régionaux

Les modèles climatiques numériques sont construits sur la base de descriptions mathématiques des processus physiques qui régissent le système climatique. Les modèles de circulation générale (MCG) sont des modèles climatiques numériques globaux qui sont utilisés pour étudier le changement climatique à l'échelle mondiale. Ils décrivent les différentes composantes du système terrestre ainsi que leurs interactions. Afin de simuler le climat passé, des valeurs mesurées sont utilisées comme données de forçage, tandis que pour les projections futures, des valeurs provenant de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre sont utilisées. En raison du grand nombre de points d'analyses et de la grande complexité des MCG, leur intégration nécessite une quantité importante de ressources de calcul. La résolution du maillage horizontal des MCG varie actuellement de 100 à 500 km et ils fournissent des résultats avec une fréquence temporelle de 6 heures. Les MCG sont donc insuffisants pour des estimations des variabilités et des changements climatiques à l'échelle régionale et locale. Une réduction d'échelle est donc nécessaire pour décrire les conséquences locales du changement global, ce qui peut être fait au moyen de modèles climatiques régionaux (MCR). Les MCR sont utilisés pour réduire l'échelle des simulations de MCG en utilisant les données de sortie du MCG comme conditions aux limites latérales. Les intégrations des MCR sont généralement effectuées à une résolution horizontale de 10 à 50 km sur une région d'intérêt spécifique. Dans le cas du projet EURO-CORDEX la région d'intérêt est l'Europe (BENESTAD *et al.*, 2017).

## 2.3 Données utilisées

Quarante-trois jeux de données évaluant la vitesse du vent à proximité de la surface sur la période 2006–2100 sont téléchargeables sur le site <https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/search/cordex-ipsl/>. Ils proviennent des chaînes des modèles de circulation générale et des modèles climatiques régionaux suivants (CORDEX RCM LIST, 2020) :

- *modèles de circulation générale* : CNRM-CERFACS-CNRM-CM5, ICHEC-EC-EARTH, IPSL-IPSL-CM5A-LR, IPSL-IPSL-CM5A-MR, MIROC-MIROC5, MOHC-HadGEM2-ES, MPI-M-MPI-ESM-LR, NCC-NorESM1-M
- *modèles climatiques régionaux* : CCLM4-8-17, HIRHAM5, RACMO22E, RCA4, REMO2009, REMO2015.

Les producteurs de ces modèles sont :

- Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) ;
- The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP) ;
- Climate Service Center Germany (GERICS) ;
- CLM Community with contributions by BTU (Brandenburg University of Technology), DWD (German Weather Service), ETHZ (Swiss Federal Institute of Technology Zurich), UCD (University College Dublin), WEGC (Wegener Center for Climate and Global Change, University of Graz, Austria) ;

## Thème 5 – Énergies et ressources marines

- Institut Pierre Simon Laplacet (IPSL) ;
- Met Office Hadley Centre (MOHC) ;
- Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) ;
- KNMI (Royal Netherlands Meteorological Institute) ;
- Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center, Max Planck Institute for Meteorology (MPI- CSC).

La résolution spatiale des données est de 0,11° (~12 km) sur la zone d'étude et la résolution temporelle est saisonnière.

Tableau 1. Synthèse des chaînes modèles disponibles et prises en compte (en vert les données sont disponibles pour les trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre).

Modèles globaux	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	ICHEC-EC-EARTH	IPSL-IPSL-CM5A-LR	IPSL-IPSL-CM5A-MR	MIROC-MIROC5	MOHC-HadGEM2-ES	MPI-M-MPI-ESM-LR	NCC-NorESM1-M
<i>RACMO22E</i>	RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5	RCP4.5 RCP8.5		RCP8.5		RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5	RCP8.5	RCP8.5
<i>REMO2009</i>							RCP4.5 RCP8.5	
<i>REMO2015</i>			RCP2.6		RCP2.6	RCP2.6		RCP2.6 RCP8.5
<i>CCLM4-8-17</i>	RCP4.5 RCP8.5				RCP2.6	RCP4.5 RCP8.5	RCP8.5	
<i>RCA4</i>	RCP4.5 RCP8.5	RCP8.5		RCP4.5 RCP8.5		RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5	RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5	RCP2.6 RCP8.5
<i>HIRHAM5</i>	RCP8.5					RCP4.5 RCP8.5	RCP8.5	RCP4.5 RCP8.5

### 2.4 Analyses réalisées

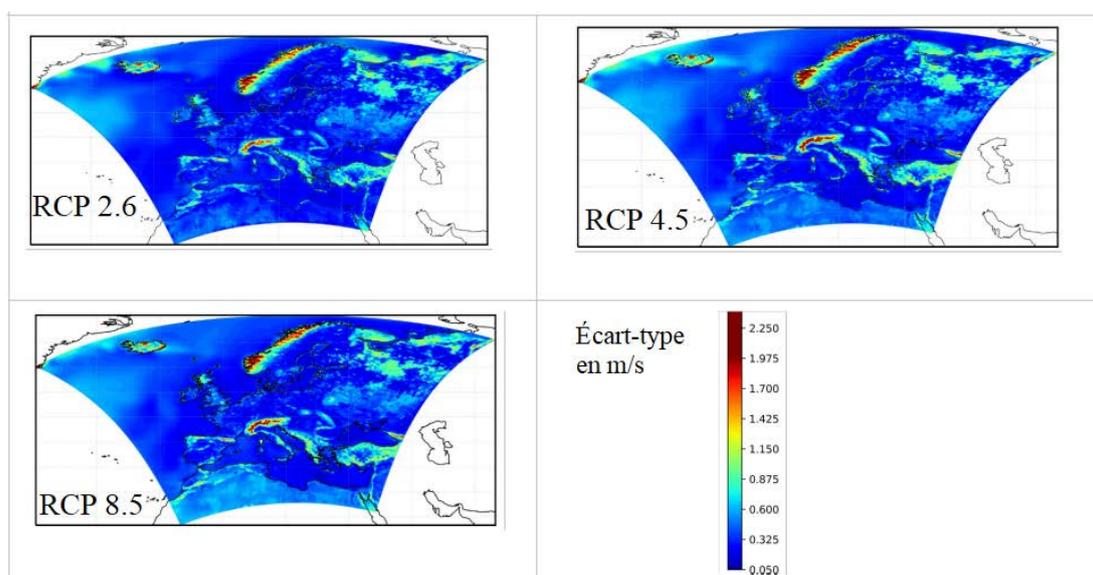
Les écarts-types et les différences de moyennes des vitesses de vent sont représentés pour chaque scénario. L'analyse sur la totalité des chaînes de modèles permet d'identifier les secteurs où les incertitudes sont les plus élevées. L'analyse tenant compte uniquement des chaînes modèles disponibles pour les trois scénarios étudiés (en vert dans le tableau 1) permet ensuite d'étudier les vitesses de vent et leurs variations pour chaque scénario, sur trois périodes temporelles (2006 – 2100, 2006 – 2030 et 2076 – 2100), de manière globale, en hiver et en été.

## 3. Résultats

### 3.1 Écart-types et incertitudes des vitesses pour chaque scénario

Toutes les chaînes de modèles recensées dans le tableau 1 sont prises en compte pour calculer pour chaque scénario et sur l'ensemble de la zone d'étude les écart-types de la

vitesse moyenne de chaque chaîne à la moyenne globale de toutes les chaînes (figure 2). Les écart-types sont globalement inférieurs 2,5 m/s. Les valeurs les plus élevées sont situées à terre dans les zones de hauts reliefs. En mer les écart-types les plus élevés sont identifiés sur la partie nord-ouest de la zone d'étude. En Manche et en Atlantique au large de la côte ouest du Maroc les écarts-types sont un peu plus élevés pour RCP 4.5 et RCP 8.5 uniquement. Les incertitudes sont plus élevées sur l'ensemble de ces secteurs.



*Figure 2. Écart-type des vitesses moyennes de chaque chaîne de modèle à la vitesse moyenne de l'ensemble des chaînes de modèles pour chaque RCP.*

### 3.2 Comparaisons des vitesses de vent provenant des différents scénarios RCP

Les vitesses de vent étudiées pour identifier l'influence des RCP proviennent uniquement des chaînes de modèles disponibles pour les trois RCP (indiquées en vert dans le tableau 1). La figure 3 montre que :

- les écarts les plus élevés sont identifiés entre les vitesses moyennes du scénario RCP 2.6 et du scénario RCP 8.5 ;
- sur la période 2006 – 2030, les vitesses estimées pour les scénarios prévoyant les plus fortes émissions de gaz à effets de serre sont légèrement supérieures à celles des autres scénarios (+0,2 m/s au nord-ouest de la zone d'étude entre les RCP 8.5 et RCP 2.6) ;
- sur la période 2076 – 2100, les vitesses estimées pour les scénarios prévoyant les plus fortes émissions de gaz à effets de serre sont nettement inférieures à celles des autres scénarios (-0,5 m/s au nord-ouest de la zone d'étude entre les RCP 8.5 et RCP 2.6) ;
- en Manche les vitesses du scénario RCP 2.6 restent toujours supérieures à celles des autres scénarios.

## Thème 5 – Énergies et ressources marines

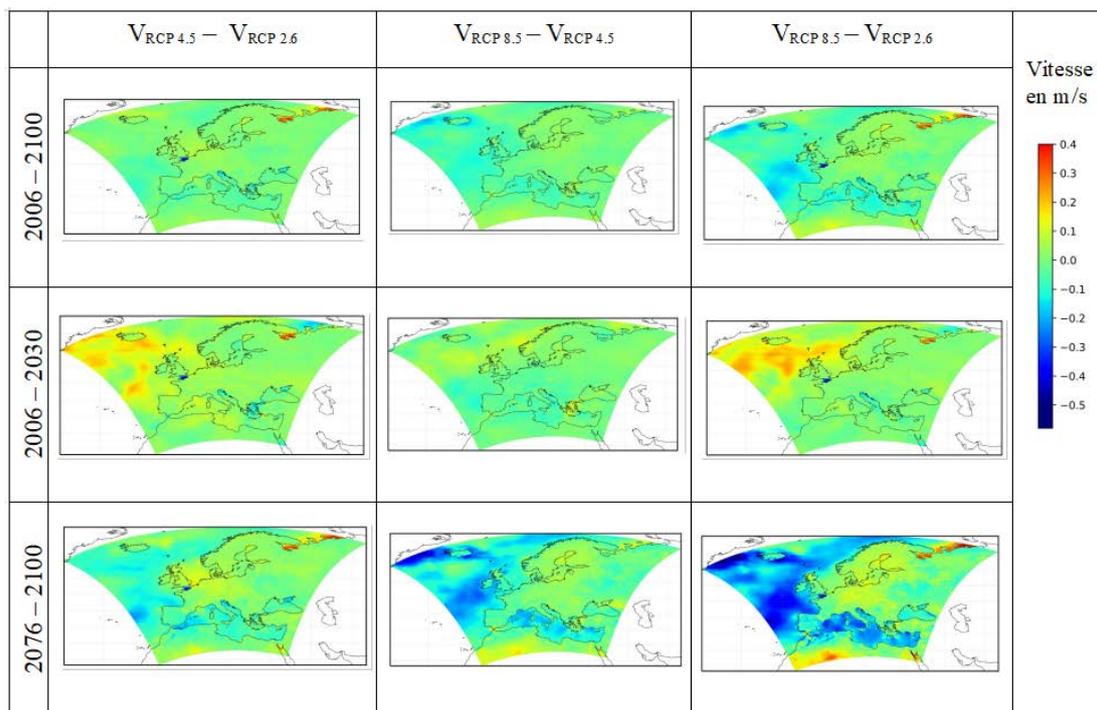


Figure 3. Différence entre la moyenne des vitesses tous modèles confondus de chaque scénario RCP pour les périodes temporelles étudiées.

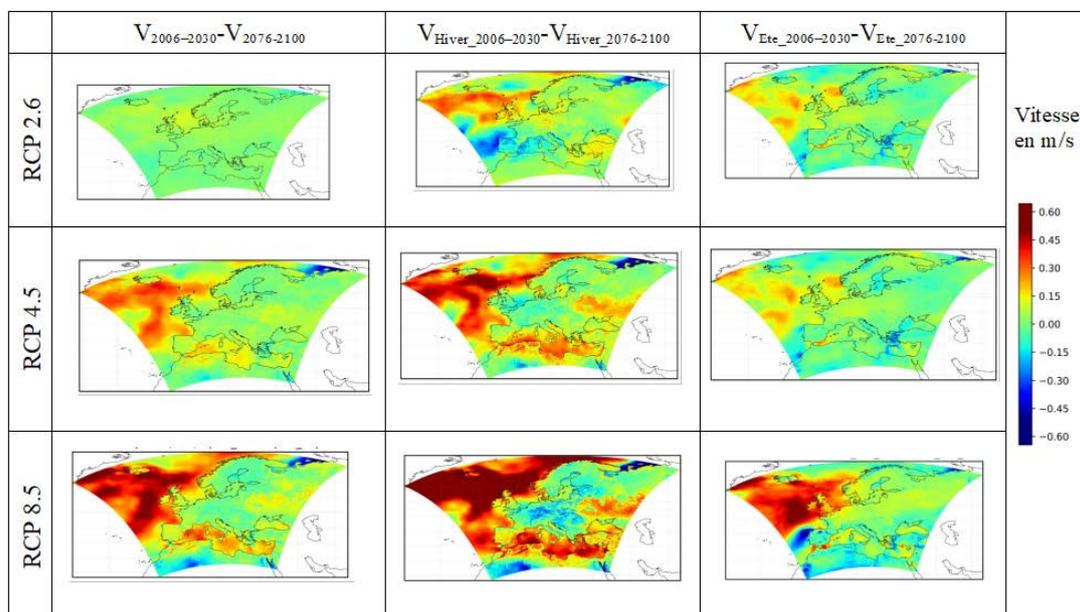
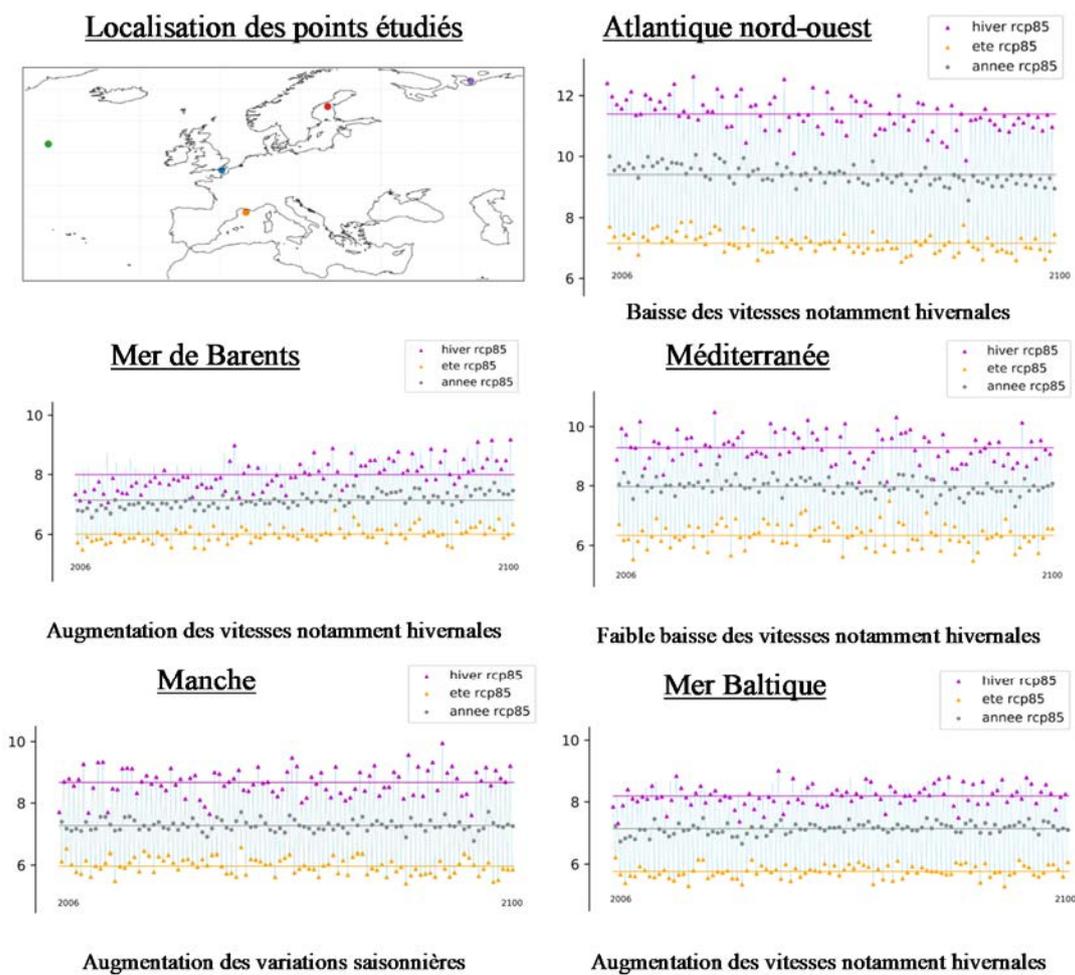


Figure 4. Différence entre les moyennes des vitesses tous modèles confondus pour chaque période temporelle étudiée et pour chaque scénario RCP.

### 3.3 Variations temporelles des vitesses de vent provenant des différents scénarios RCP

Les vitesses de vent étudiées pour identifier les variations temporelles proviennent uniquement des chaînes de modèles disponibles pour les trois RCP (indiquées en vert

dans le tableau 1). La figure 4 montre que les écarts entre la moyenne des vitesses sur la période 2006 – 2030 et la moyenne des vitesses sur la période 2076 – 2100 les plus élevés sont situés en mer. Ils sont maximums entre les moyennes hivernales du scénario RCP 8.5. Pour ce scénario on identifie une baisse jusqu'à 1 m/s au nord-ouest de la zone d'étude entre la moyenne hivernale 2006 – 2030 et la moyenne hivernale 2076 – 2100.



*Figure 5. Variations des moyennes annuelles, hivernales et estivales des vitesses tous modèles confondus pour le scénario RCP 8.5 et en cinq points de la zone d'étude.*

En mer Baltique et en mer de Barents à l'est de la Russie on observe une augmentation des vitesses. Les variations des moyennes annuelles, hivernales et estivales estimées avec l'hypothèse du scénario RCP 8.5 sont représentées sur la figure 5 pour cinq points de la zone d'étude de 2006 à 2100 afin de visualiser les écarts inter et intra annuelles en chacun de ces points.

## Thème 5 – Énergies et ressources marines

### 4. Conclusion

L'analyse prospective de la ressource éolienne en mer est réalisée en utilisant des données provenant de différentes chaînes de modèles du projet EURO-CORDEX. Les vitesses prospectives du vent des chaînes de modèles étudiées sont relativement stables en mer et constituent une source pertinente pour identifier les zones techniquement et économiquement favorables pour l'éolien en mer à long terme. Les estimations des vitesses dépendent fortement du scénario d'émissions de gaz à effet de serre retenu. Les scénarios qui prévoient les émissions les plus fortes de gaz à effets de serre sont ceux qui modifient le plus fortement les vitesses du vent. Ces variations sont d'autant plus importantes en mer et sont plus ou moins fortes en fonction des saisons. Pour effectuer une analyse plus fine de l'évolution prospective des vitesses de vent ces travaux pourraient être complétés par l'analyse de données avec une résolution journalière ou horaire afin d'identifier des événements particuliers et leur fréquence. D'autres zones d'études pourraient également être étudiées grâce aux données du projet CORDEX.

### 5. Références bibliographiques

- IPCC (2013). *Climate change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M.) eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1535 p.
- BENESTAD R., HAENSLER A., HENNEMUTH B., ILLY T., JACOB D., KEUP-THIEL E., KOTLARSKI S., NIKULIN G., OTTO J., RECHID D., SIECK K., SOBOLOWSKI S., SZABO P., SZEPSZO G., TEICHMANN C., VAUTARD R., WEBER T., ZSEBEHAZI G. (2017). *Guidance for EURO-CORDEX climate projections data use*. Published by the EURO-CORDEX community, 27 p.
- CARVALHO D., ROCHA A., GOMEZ-GESTEIRA M., SILVA SANTOS C. (2017), *Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections*. *Renewable Energy*, Vol. 101, pp 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.036>
- CORDEX RCM LIST (2020). [https://is-enes-data.github.io/CORDEX\\_RCMs\\_info.html](https://is-enes-data.github.io/CORDEX_RCMs_info.html)
- KALDELLIS J. K., APOSTOLOU D. (2017). *Life cycle energy and carbon footprint of offshore wind energy. Comparison with onshore counterpart*. *Renewable Energy*, Vol. 108, pp 72-84. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.039>
- RAMIREZ L., FRAILE D., BRINDLEY G. (2020). *Offshore wind in Europe – Key trends and statistics 2019*. Rapport WindEurope, 40 p. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Offshore-Statistics-2019.pdf>
- THIEBAUD L., TIBERI-WADIER A. L., BEAUDOUIN Y. (2018). *Analyse de données de vent en Europe pour caractériser le potentiel éolien en mer*. Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, La Rochelle, pp 577-586. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2018.067>