

Programme de recherche n°26

Analyse et comparaison des données long terme (réanalyses météorologiques) en vue de réaliser des pré-études de productible et d'améliorer les extrapolations long terme *Complément du RetD12*

Rédaction :

Mathieu BRUNEAU, Ingénieur généraliste – Responsable d'études

Valérian CANTEGRIL, Ingénieur généraliste, Master en énergies renouvelables et modélisation de l'environnement – Responsable du pôle ENR

Supervision/approbation :

Elisabeth GALLET MILONE, Ingénieur eau et environnement – Directrice du pôle Environnement/ICPE/Paysage

Sylvain LE ROUX, Géographe, Docteur en Géographie – Directeur scientifique



Sommaire

RESUME	3
INTRODUCTION.....	4
1. PRESENTATION DES REANALYSES DISPONIBLES.....	5
1.1. REANALYSES GLOBALES	5
1.1.1. <i>Présentation</i>	5
1.1.2. <i>Précision</i>	6
1.2. REANALYSES MESO-ECHELLE.....	7
1.2.1. <i>Présentation</i>	7
1.2.2. <i>Précision</i>	8
2. COMPARAISON DES REANALYSES A DES RELEVES SUR SITE	8
2.1. PRESENTATION DES DONNEES UTILISEES.....	8
2.1.1. <i>Sites étudiés</i>	8
2.1.2. <i>Sélection des réanalyses</i>	10
2.1.3. <i>Données de terrain</i>	10
2.1.4. <i>Extrapolation et profil de vent</i>	10
2.2. TRAITEMENT DES DONNEES	10
2.3. RESULTATS DES COMPARAISONS	11
2.4. SAISONS.....	13
2.5. AUTRES PARAMETRES	13
3. INFLUENCE DU TERRAIN.....	14
3.1. LOCALISATION GEOGRAPHIQUE	14
3.1.1. <i>Méthode</i>	14
3.1.2. <i>Résultat</i>	15
3.2. OROGRAPHIE ET RUGOSITE	15
3.2.1. <i>Méthode</i>	15
3.2.2. <i>Résultat</i>	17
4. APPLICATION SUR DES PARCS EN EXPLOITATION.....	20
4.1. METHODE	20
4.1.1. <i>Présentation des sites</i>	20
4.1.2. <i>Pertes</i>	21
4.2. RESULTATS.....	22
5. DISCUSSION	22
5.1. DISCUSSION.....	22
5.1.1. <i>Impact du terrain</i>	23
5.1.2. <i>Estimation de puissance</i>	24
6. LIMITES DE L'ETUDE ET PERSPECTIVES.....	24
BIBLIOGRAPHIE.....	25



RESUME

Le développement de parc éolien est un processus long et coûteux. Estimer le potentiel d'un site est une partie importante du développement d'un projet éolien. Les réanalyses météorologiques, qui sont des modélisations du vent, peuvent aider à réaliser cette estimation. Au fil des différentes générations de réanalyses, leur précision a augmenté.

Les différentes réanalyses existantes ont tout d'abord été présentées et comparées. Parmi elles, se trouve la réanalyse EMD-WRF qui a commencé à être distribuée par *EMD International* durant l'été 2019 et semble être la plus précise mais est encore peu documentée à ce jour. Des investigations plus poussées ont été réalisées afin d'en évaluer les limites et de définir des règles pour une utilisation optimale.

Ainsi, la réanalyse EMD-WRF a été comparée à 23 sites de données de vent situés en France, à des hauteurs entre 42 m et 122 m. La réanalyse EMD-WRF surestime les mesures de vent réelles de 18,6 % en moyenne, avec un écart-type de 12,52 %. Cette surestimation ne semble pas liée au coefficient de corrélation entre les données de réanalyses et de mesures de vents, ni à la hauteur de l'anémomètre et ni à l'altitude du mât. L'impact de la proximité géographique a aussi été étudié, mais n'a pas donné de résultats concluants. L'impact du terrain, orographie et rugosité, permet de voir un impact de celui-ci sur la précision de la réanalyse EMD-WRF. Catégoriser les sites par types de terrains permet de réduire l'écart-type et ainsi avoir moins d'incertitudes sur la surestimation de la réanalyse. Les sites ayant un terrain décrit comme *simple* ont généralement la surestimation de la vitesse de vent la plus faible. Cela a mené à tester une modification de la vitesse de vent de la réanalyse en fonction du type de terrain et de la valider en modélisant des parcs éoliens existants. Dans tous les cas, l'estimation du potentiel éolien est améliorée mais cela mène à des sous-estimations du productible éolien dans certains cas.



INTRODUCTION

Dès l'identification d'un site susceptible d'accueillir un projet éolien, les porteurs de projets ont besoin d'avoir une première estimation du gisement éolien avant d'engager des études coûteuses telles que la campagne de mesure du vent, l'évaluation environnementale et la demande des autorisations administratives.

Historiquement, les données utilisées comme référence étaient issues de stations Météo-France situées à proximité des sites étudiées ou de modélisation à l'échelle régionale. Les stations Météo-France présentaient cependant les inconvénients de se trouver à une distance souvent importante du site (> 20 km), de présenter des relevés à une altitude réduite (10 m) et de dépendre fortement de l'environnement dans lequel elles sont implantées. À cela, s'ajoute le fait que les stations météo n'ont pas toujours les données de vent sur une période de temps assez longue (10 ans sont recommandés par Measnet pour réaliser une estimation du productible sur le long terme d'un parc). Les modélisations à l'échelle régionale ne tiennent pas compte des spécificités locales et manquent de précision. Depuis une quinzaine d'années, plusieurs organisations ont corrigé et uniformisé les mesures météorologiques historiques sur la planète et mettent à disposition des réanalyses météorologiques avec des résolutions temporelles et spatiales variables. Ces réanalyses peuvent être utilisées pour approximer le gisement éolien d'un site. À l'issue de la campagne de mesure du vent, elles peuvent également être utilisées pour réaliser les extrapolations des données mesurées sur le long terme. Cependant, étant construites à partir de plusieurs sources de données réparties sur le territoire, leur niveau de précision est très variable.

La présente étude s'intéresse particulièrement à une réanalyse méso-échelle sortie durant l'été 2019, qui s'appelle EMD-WRF. Cette réanalyse provient d'EMD International A/S qui utilise le modèle de *Weather Research and Forecasting* (WRF). Après une présentation des principales réanalyses disponibles et de leur précision, la réanalyse EMD-WRF va être comparée à 23 données de vents qui se trouvent dans l'Ouest et dans le Centre de la France. Les questions auxquelles cherche à répondre ce rapport sont :

- Quelles sont les précisions des réanalyses utilisées actuellement ?
- Quelle est la précision de la réanalyse EMD-WRF ?
- Quels facteurs influencent cette précision ?
- Peut-on améliorer cette précision ?



1. Présentation des réanalyses disponibles

Une réanalyse météorologique est une modélisation de données météo faite à partir de différentes données collectées sur plusieurs décennies (stations météorologiques, données aérologique, satellites, radars). Ces données sont ensuite interpolées sur un territoire à l'aide de différents modèles météorologiques en tenant compte du terrain (relief et rugosité). La distance d'interpolation ainsi que la précision des données de terrains permettent de différencier deux grandes catégories de réanalyses présentées dans cette partie :

- Les réanalyses globales, qui ont une précision spatiale de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres.
- Les réanalyses méso-échelles, issues d'une nouvelle modélisation réalisée à partir des réanalyses globales, qui ont une précision plus fine de l'ordre de quelques kilomètres.

La précision des réanalyses est étudiée dans cette partie du fait de leur utilité dans les études de préféabilité et des extrapolations long-termes. Une meilleure précision des données de vent amène une amélioration de la précision du productible calculé dans les études réalisées.

1.1. Réanalyses globales

1.1.1. Présentation

Le logiciel WindPRO, utilisé par ENCIS Environnement dans le cadre de ses études du potentiel éolien, permet d'accéder à plusieurs jeux de données. Actuellement, trois réanalyses globales sont utilisées (Haxsen, 2017) : MERRA-2, CFSv2 et ERA-5. Ces réanalyses sont présentées ci-dessous. À cela s'ajoute ERA-Interim qui n'est plus produite depuis 2019 mais qui a une place dans la littérature importante comme cela est montré dans la partie 1.1.2.

MERRA-2 : *Modern Era Retrospective Analysis for Research and Application* est modélisée et distribuée par *the Global Modelling and Assimilation Office of NASA*. Les données de vent proviennent du modèle GEOS-5 system (*Goddard Earth Observation System Version 5*) (Bosilovich *et al.*, 2015). Il possède une précision horaire et une précision spatiale de 0,5° en latitude et 0,66° en longitude. Les données accessibles remontent à 1992. Deux hauteurs sont disponibles : 10 m et 50 m.

CFSv2 : Le *Climate Forecast System* (CFS) est développé par *l'Environmental Modeling Center au National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). Il est disponible depuis 2011. Un algorithme basé sur GSI (*Gridpoint Statistical Interpolation*) est utilisé pour intégrer de nombreuses données qui ont un pas temporel de 6 heures. Cela permet d'obtenir des données avec une résolution spatiale d'environ 0,2° et une résolution temporelle de 1 heure. La hauteur disponible est de 10 m. Il s'agit d'une extension de la réanalyse CFSR depuis 2011.

ERA-Interim : *ECMWF Re-Analysis Interim* est distribué par le ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) et par le *Copernicus Climate Change* (C3S) (ECMWF, 2019). Il possède une résolution temporelle de 6 heures et possède une résolution spatiale de 0,75°. Il a arrêté d'être produit le 31 août 2019 pour être remplacé par la réanalyse ERA-5.



ERA-5 : ECMWF Re-Analysis 5 est une réanalyse de climat développée par le C3S. Il remplace la précédente réanalyse ERA-Interim. Il a une résolution spatiale de 0,25° et une résolution temporelle de 1 heure. La période disponible s'étend de 1989 à 2019.

Les réanalyses présentées sont résumées dans le tableau suivant :

	Producteur	Résolution	Pas	Altitude (m)	Disponibilité
CFSv2	DOC, NOAA, NWS, NCEP, EMC	0,2°	Horaire	10, 1500, 5500	Depuis 2011
ERA5	ECMWF	0,25°	Horaire	10, 100	Depuis 1950
MERRA-2	NASA	0,5° x 0,66°	Horaire	50	Depuis 1992
ERA-Interim	ECMWF	0,75°	6 heures	10	1979-2019

Tableau 1 : Comparaison réanalyses météorologiques globales

1.1.2. Précision

Cette sous-section, présente l'état de l'art concernant la précision des différentes réanalyses météorologiques globales. Certains articles présentent le biais des réanalyses par rapport aux données de vent réelles, alors que d'autres s'intéressent plus au coefficient de corrélation entre les réanalyses et les données de vent réelles.

ERA-5 et MERRA-2 ont été comparées, dans EMD International A/S (2019), à 108 mâts de mesures répartis autour du globe dont les hauteurs varient entre 60 m et 140 m au-dessus du sol. Pour MERRA-2 et ERA-5, il a été noté que le coefficient de corrélation moyen est de 0,71 et 0,78 respectivement et que l'écart-type est de 0,12 et de 0,10.

Coburn (2019) a étudié la précision de différentes réanalyses : notamment ERA-Interim et MERRA-2. Pour cela, elles ont été comparées à des données de vent situées à 10 m, annuellement et par saison. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2. ERA-Interim a le meilleur biais et MERRA-2 a la meilleure corrélation. Les analyses des saisons montrent un biais important en hiver.

Année entière	Biais (m/s)	Coefficient de corrélation
ERA-Interim	0,127	0,85
MERRA-2	0,415	0,89
Printemps		
ERA-Interim	- 0,154	0,86
MERRA-2	0,344	0,9
Été		
ERA-Interim	0,135	0,83
MERRA-2	0,297	0,87
Automne		
ERA-Interim	0,16	0,88
MERRA-2	0,459	0,91
Hiver		
ERA-Interim	0,374	0,84
MERRA-2	0,563	0,89

Tableau 2 : Résumé des résultats obtenus par Coburn (2019)



Benedict Jourdier (2015) compare aussi MERRA-2 et ERA-Interim à des stations météo françaises. Le biais est le plus souvent positif pour MERRA-2 et ERA-Interim sur tout le pays. Dans le centre et l'ouest de la France, le biais moyen annuel est entre -0,2 m/s et 0,4 m/s. Concernant la variabilité saisonnière des réanalyses Benedict Jourdier (2015) montre qu'en France, MERRA-2 surestime la vitesse du vent toute l'année mais surtout pendant l'hiver. ERA-Interim présente un biais positif et plus constant sur l'année. Aucune des deux réanalyses ne se démarque comme étant plus performante que l'autre.

Une autre étude (Sharp *et al.*, 2015), analyse la précision des réanalyses CFSR, ancienne version de CFSv2. Le biais avec les données météo MIDAS (*Met Office Integrated Data Archive System*, situées au Royaume-Uni) a une moyenne à 0,35 m/s pour l'onshore et 0,56 m/s pour l'offshore. Ils remarquent donc que les sites *offshores* ont des biais plus faibles que les sites *onshores*. Cela pourrait être dû à l'homogénéité des ressources de vent ou que les sites *onshores* avaient des vents maximum plus élevés que les sites *offshores* étudiés. Cet article montre que le CFSR a plus d'erreurs avec les augmentations d'altitude, du fait que le CFSR aurait des problèmes à représenter précisément des vitesses de vents au-dessus d'une certaine valeur.

Les réanalyses globales semblent toutes présenter le plus souvent un biais positif, ce qui signifie qu'elles surévaluent la vitesse réelle du vent. De plus, l'étude de Coburn (2019) semble indiquer que la précision des réanalyses varie selon les périodes de l'année.

1.2. Réanalyses méso-échelle

Les précédentes réanalyses ont le défaut d'avoir une répartition spatiale trop grande ($> 0,2^\circ$). De plus, ERA-Interim possède une résolution temporelle plus faible que les autres (6 heures). Ces défauts peuvent réduire la précision des études des préfaisabilités et d'extrapolation long-termes. Measnet recommande, pour une bonne estimation, que le mât de mesures soit à moins de 10 km des futures éoliennes pour un terrain « simple » et 2 km pour un terrain « complexe » (MEASNET, 2016). Il semble alors raisonnable de rechercher des distances similaires voire inférieures pour les réanalyses. Cette partie se concentre sur les deux jeux de réanalyses méso-échelle disponible via l'interface WindPRO : EMD-ConWx et EMD-WRF, qui présentent ces caractéristiques de distance.

1.2.1. Présentation

EMD-ConWx est développé en collaboration entre EMD et ConWx, spécialisé dans la modélisation méso-échelle. Cette réanalyse a comme données d'entrées la réanalyse ERA-Interim. Elle interpole celle-ci pour obtenir une résolution spatiale de 3 km et une résolution temporelle de 1 heure. Les hauteurs de vent accessibles varient entre 10 m et 200 m.

EMD-WRF Europe+, ou EMD-WRF, est la nouvelle réanalyse développée par EMD, qui a commencé à être disponible pendant l'été 2019 via l'interface de WindPRO. Les données d'entrée sont la réanalyse EMD-ERA5. Le wiki d'EMD (EMD, 2019) indique qu'il a pour but de remplacer EMD-ConWx. La résolution spatiale est de 3 km et la résolution temporelle est de 1 heure. Les hauteurs de vent accessibles varient entre 10 m et 4000 m.



	Producteur	Résolution	Pas	Altitude (m)	Disponibilité	Autre information
EMD-ConWx	EMD, ConWx	0,03°	Horaire	10, 25, 50, 75, 100, 150, 200	Depuis 1993 –jusqu'à 2019	Construit à partir de ERA-Interim
EMD-WRF Europe+	EMD	0,03°	Horaire	10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 750, 1000, 4000	Depuis 1999	Construit à partir de ERA 5

Tableau 3 : Comparaison réanalyses météorologiques globales

1.2.2. Précision

EMD-ConWx a été étudiée dans Haxsen (2017). La réanalyse a été comparée à des mesures SODAR (*Sonic Detection And Ranging*) en Allemagne. Plusieurs hauteurs entre 50 m et 200 m ont été comparées. En moyenne les données d'EMD-ConWx surestiment la vitesse du vent en moyenne de 0,63 m/s à 200 m et 1,54 m/s à 50 m avec une moyenne générale de 1,02 m/s. Le RMSE moyen est de 1,91 m/s. Pour réduire la surestimation, l'auteur proposait de décaler verticalement les réanalyses de 50 m vers le bas, ie. au lieu de comparer les valeurs du SODAR à 150 m avec la réanalyse à 150 m, la valeur à 100 m est utilisée. Ainsi le biais a diminué à 0,18 m/s. Il est notable que le lieu avec le biais le plus faible est décrit comme plat et le pire lieu est décrit comme complexe avec des forêts, ce dernier possédant un biais de 1,56 m/s avant le décalage vertical. Il note que les vents faibles ont une faible déviation tandis que les vents forts beaucoup plus. Le coefficient de corrélation est quant à lui d'environ 0,811 pour une moyenne horaire et est considéré meilleur que les coefficients des réanalyses globales.

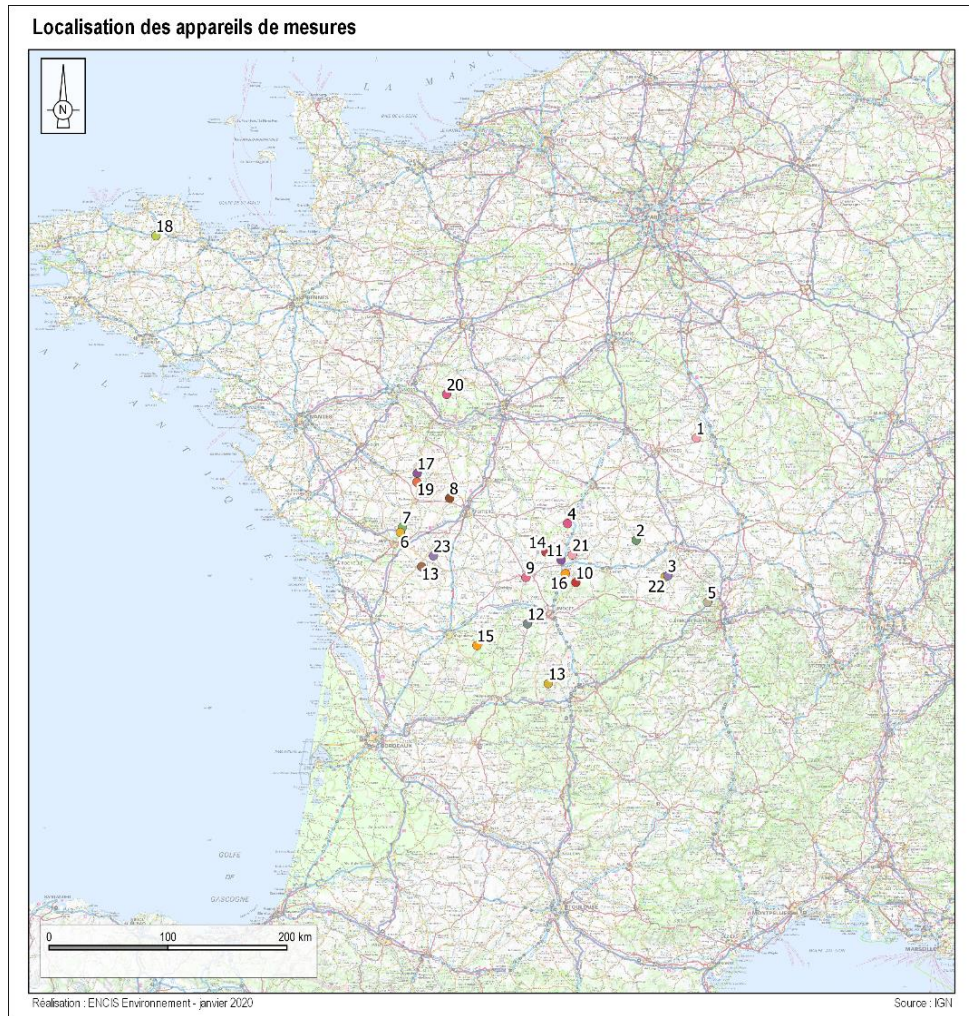
Concernant la réanalyse EMD-WRF, aucun article n'a encore été publié à ce jour, du fait de la sortie récente de cette réanalyse.

2. Comparaison des réanalyses à des relevés sur site

2.1. Présentation des données utilisées

2.1.1. Sites étudiés

Les données de 23 sites sont mises à disposition par ENCIS Environnement pour tester la précision de la réanalyse EMD-WRF. Ces données sont anonymisées pour des raisons de confidentialités. Vingt-et-un relevés proviennent de mâts de mesures installés dans le cadre d'une étude du potentiel éolien ou de l'activité chiroptérologique corrélée aux conditions de vent. Deux, numérotés 17 et 19, proviennent d'anémomètres placés en haut d'éoliennes. Géographiquement, les sites sont situés à l'ouest et au centre de la France. Les mesures des données de vent ont été faites entre les années 2006 et 2018 selon le site. Leur altitude est entre 75 m et 500 m au-dessus du niveau de la mer et les anémomètres sont à des hauteurs entre 42 m et 122 m au-dessus du sol.



Carte 1 : Emplacement des appareils de mesures de vent

ID projet	Hauteur (m)	Période de mesure (mois)	ID projet	Hauteur (m)	Période de mesure (mois)
1	72	12	13	50	13
2	66	12	14	42	7
3	84	24	15	122	7
4	72,5	6	16	85	7
5	49	36	17	91,5	13
6	50	13	18	47	8
7	50	22	19	91,5	13
8	65	125	20	80	10,5
9	80	27	21	80,5	26
10	62	12	22	45	11
11	61	12	23	42	13
12	61	12			

Tableau 4 : Hauteur et périodes de mesure des appareils de mesure

La plupart des sites ont au moins un an de données, sept sites (numéros 4, 14, 15, 16, 18, 20 et 22) ont entre 6 mois et 11 mois de données.



2.1.2. Sélection des réanalyses

La réanalyse EMD-WRF est disponible sur une maille régulière de 3 km par 3 km directement via l'interface WindPRO. Les données sont disponibles entre 1999 et 2019. Il a été choisi d'étudier les quatre réanalyses les plus proches du mât de mesures. Elles seront nommées d1-d2-d3-d4 qui sont respectivement, la réanalyse la plus proche jusqu'à la plus lointaine.

2.1.3. Données de terrain

Les données de rugosité sont chargées directement depuis l'interface WindPRO. Il s'agit des données Corine Land Cover 2012. Celles-ci possèdent une précision de 100 m et sont disponibles sur tout le pays.

Pour les données d'orographie, il a été choisi de prendre les données de la BD Alti. Celle-ci présente un pas de 75 m. Les données sont interpolées à un pas de 1 m avec le logiciel QGIS, la précision de la couche finale est validée par les cartes IGN (Institut National de l'Information géographique et forestière).

2.1.4. Extrapolation et profil de vent

Dans la plupart des cas, l'altitude des données de réanalyses ne correspondait pas à l'altitude du mât de mesures. Par exemple, l'altitude de la réanalyse est de 75 m et le mât de mesures est à 80 m. Les données de vent de la réanalyse sont alors interpolées verticalement avec une matrice de cisaillement qui utilise la loi puissance. Pour chacune des réanalyses se trouvant à des coordonnées différentes que celle du mât de mesures, une extrapolation verticale des données est faite via le logiciel WindPRO.

2.2. Traitement des données

Les données de vent sont exportées depuis WindPRO et sont traitées pour obtenir les paramètres suivants :

$$\text{Ecart entre les données} = \frac{V_{\text{mesures}} - V_{\text{réanalyse}}}{V_{\text{réanalyse}}}$$

$$\text{Biais} = V_{\text{réanalyse}} - V_{\text{mesures}}$$

$$\text{Ecart type} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{\text{mesures}}[i] - V_{\text{réanalyse}}[i])^2}$$

$$\text{Coefficient de corrélation } R = \frac{\text{Cov}(\text{mesures}, \text{réanalyses})}{\text{Ecart type}_{\text{mesures}} \cdot \text{Ecart type}_{\text{réanalyse}}}$$

L'état de l'art (cf. 1.1.2) a montré que les réanalyses peuvent avoir un biais qui dépend de la saison (Benedict Jourdir, 2015). Pour y pallier les deux premiers paramètres ont été calculés pour chaque mois.

D'autres paramètres sont aussi comparés. Le premier est le coefficient de corrélation R en fonction des sites étudiés. En effet, un coefficient R élevé signifie que les données de mesures et les données réanalyse varient de manière similaire. Il est intéressant de vérifier si cela signifie, sur les 23 sites, que l'écart entre les



données diminue si le coefficient de corrélation augmente. Les autres paramètres sont l'altitude du site et la hauteur des anémomètres. Dans Sharp et al. (2015) il a été remarqué que les estimations du vent empirent avec l'altitude, cela semble intéressant de vérifier si cela se confirme sur nos données. Pour cela, un coefficient de corrélation R_2 est calculé entre chacun des trois paramètres et l'écart entre les données, selon la formule suivante :

$$\text{Coefficient de corrélation } R_2 = \frac{\text{Cov}(\text{Ecart entre les données}, \text{Paramètre})}{\text{Ecart type}_{\text{Ecart entre les données}} \cdot \text{Ecart type}_{\text{Paramètre}}}$$

Le paramètre étant soit le coefficient de corrélation R, l'altitude ou la hauteur de mesure. Par exemple, si le paramètre est l'altitude des anémomètres, deux jeux de données sont utilisés pour calculer le coefficient de corrélation R_2 :

- Le premier est l'écart entre les données pour chaque site (23 données)
- Le deuxième est l'altitude de l'anémomètre pour chaque site (23 données)

Ainsi, une valeur R_2 forte, ie. proche de 1, indiquerait une corrélation entre l'imprécision des réanalyses et le paramètre en question. Pour une valeur R_2 négative, cela signifierait qu'il y a une corrélation entre la précision et le paramètre étudié. Une valeur nulle signifierait que la précision et le paramètre ne sont pas corrélés.

2.3. Résultats des comparaisons

La réanalyse EMD-WRF surestime distinctement la vitesse du vent. La Figure 1 et la Figure 2 représentent l'écart entre les données et le biais pour les 23 sites. Le Tableau 5 représente les résultats généraux. Les écarts entre les vitesses moyennes mesurées et les réanalyses sont entre 0,73 % et 42 % en fonction du site, avec une moyenne à 18,6 %. Le biais a une moyenne à 1,02 m/s, avec une déviation annuelle comprise entre 0,04 m/s et 2,3 m/s en fonction du site. Il est notable qu'aucune réanalyse n'a de biais négatif. Cependant, l'écart type est important : 12,52 % pour l'écart entre les données et 0,57 m/s pour le biais.

De plus, on remarque que la distance entre la réanalyse et le mât de mesures ne semble pas influencer le résultat. L'utilisation de la réanalyse la plus proche, ie. d1 (X), permet d'obtenir le biais le plus faible sur seulement 3 sites (3 ;9 ;21), la réanalyse d2 (□) étant meilleure pour 6 sites (1 ;4 ;10 ;11 ;12 ;20), tout comme d3 (◇) (2 ;5 ;15 ;16 ;22 ;23). La réanalyse d4 (+) donne de meilleurs résultats sur 8 sites (6 ; 7 ; 8 ; 13 ; 14 ; 17 ; 18 ; 19).

Enfin, le coefficient de corrélation R est calculé. La valeur moyenne obtenue est de 0,79 avec un écart type de 0,05.

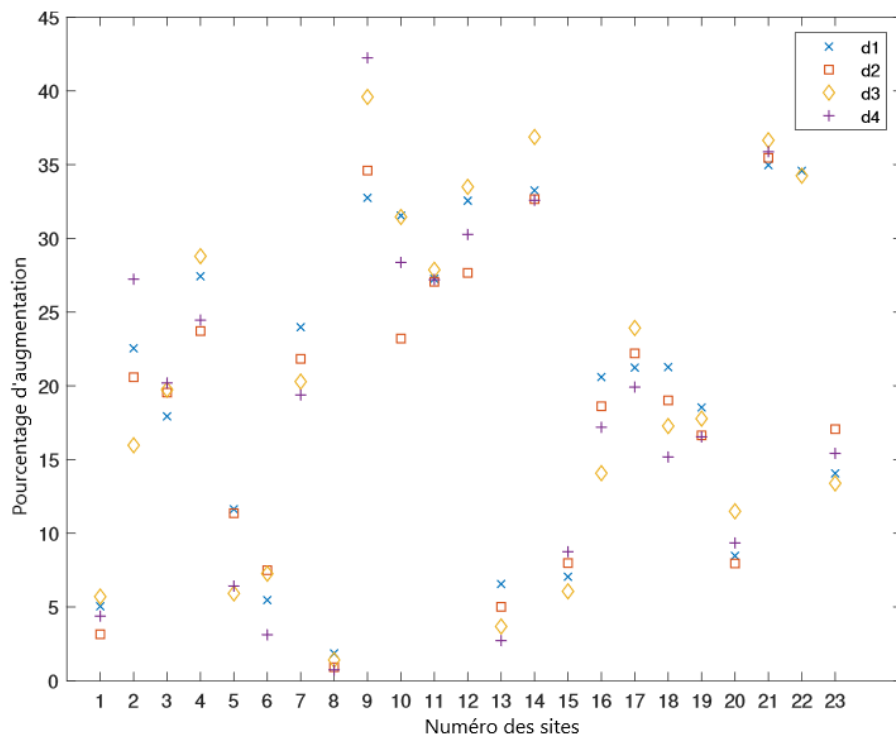


Figure 1 : Écart entre les données en fonction des sites et de la réanalyse sélectionnée

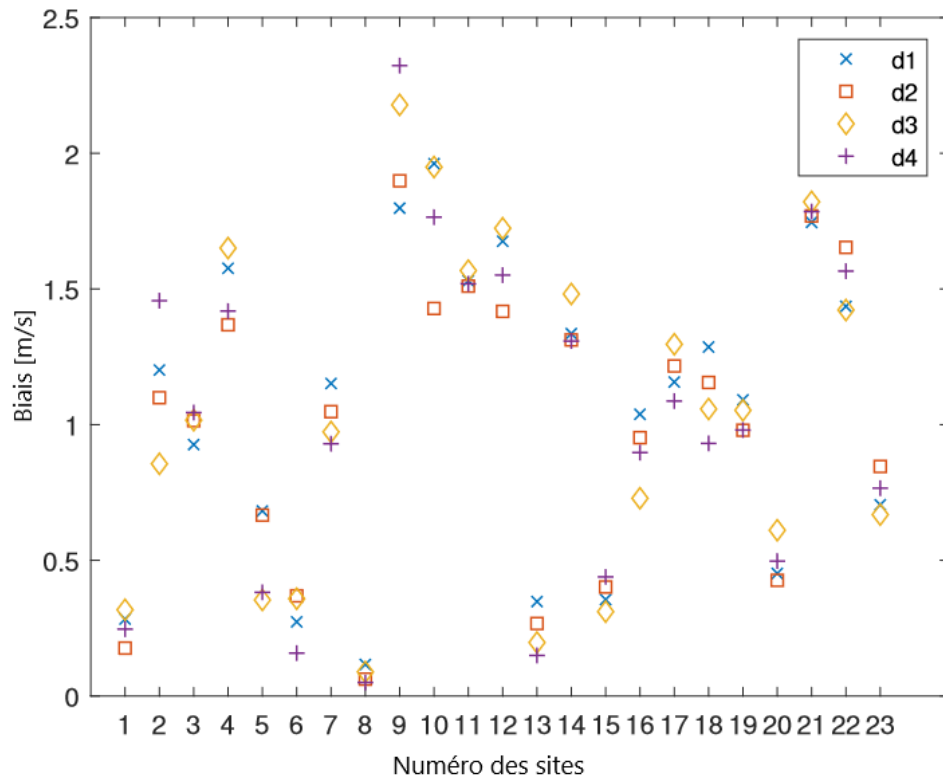


Figure 2 : Biais en fonction des sites et de la réanalyse sélectionnée



	Écart entre les données	Biais
Moyenne	18,6 %	1,02 m/s
Écart-type	12,52 %	0,57 m/s

Tableau 5 : Résultats globaux

2.4. Saisons

La Figure 3 présente l'écart entre les données pour chaque mois. Il y a une variation visible entre les mois. Les mois de janvier, février, octobre, novembre et décembre se présentent comme des mois possédant un écart supérieur à 20 %, tandis que les autres mois sont entre 15 % et 20 %. Le mois de mai se démarque en ayant un « pic » de 19,48 % et juillet est le mois avec le moins de surestimation, avec 15,53 %. Cependant l'écart type est toujours important pour chaque mois, aucun mois ne semble ressortir comme étant plus précis que les autres.

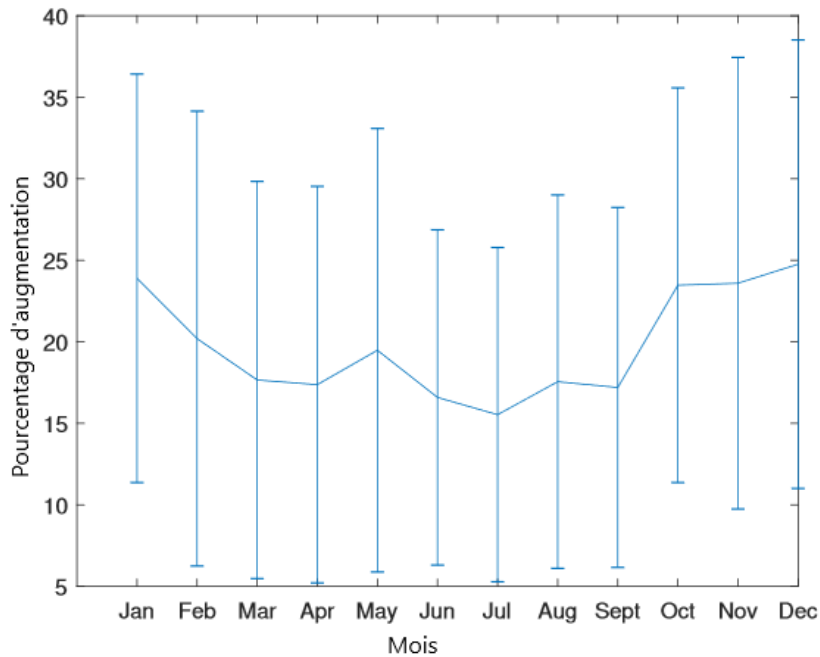


Figure 3 : Variation mensuelle. Les barres bleues représentent l'écart-type pour chaque mois

2.5. Autres paramètres

Le Tableau 6 présente le coefficient de corrélation R_2 calculé entre l'écart entre les données et les autres paramètres décrits dans la méthode. Le coefficient de corrélation R et la hauteur ne montrent pas de preuve de lien, ainsi une réanalyse ayant une bonne corrélation avec les données de vent réels ne signifie pas que sa vitesse de vent sera plus proche de la vitesse de vent du site.

De même la hauteur du mât ne semble pas être corrélée à la précision de la réanalyse. L'altitude semble montrer un faible lien.

	Coefficient de corrélation R	Altitude	Hauteur de mât
R_2	-0,05	0,28	-0,08

Tableau 6 : Coefficient de corrélation R_2 entre paramètres et l'écart entre les données

3. Influence du terrain

Pour déterminer des relations ou des tendances entre les données, les sites ont été classés suivant deux critères :

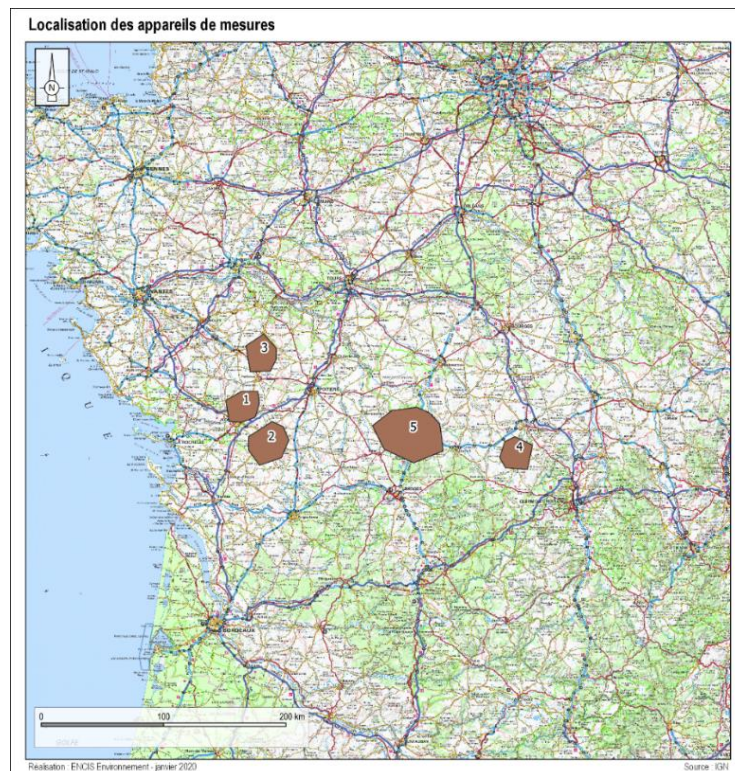
- **Géographique** : où l'on étudie si la proximité géographique a un lien avec la précision des réanalyses. Ici, la proximité est entendue comme une distance d'une quinzaine de kilomètres.
- **Orographie et rugosité** : où les sites sont regroupés selon la complexité des terrains ; cela comprend aussi bien le relief que la rugosité.

3.1. Localisation géographique

3.1.1. Méthode

Sachant que les données de réanalyses surestiment les données réelles de vent de manière plus ou moins importante (cf. 2.3), il est intéressant de se demander si cette variabilité dans la surestimation est dépendante du secteur géographique. Pour cela, nous allons comparer différents sites proches géographiquement (quelques kilomètres de distances) pour voir si les réanalyses de vent surestiment les données de vents identiquement ou non.

Certains sites étudiés sont en effet proches : 5 zones ont au moins deux appareils de mesures situés à une distance de moins de 13 km les uns des autres, ceux-ci sont indiqués sur la Carte 2. La surestimation des réanalyses dans ces zones est alors calculée.



Carte 2 : Emplacement des groupes de sites proches



3.1.2. Résultat

Le Tableau 7 représente les 4 groupes de deux sites et la distance entre eux, ainsi qu'un groupe de quatre sites proches. Les résultats n'indiquent pas que la distance entre les sites implique une même surestimation. Seulement la paire 3 a une surestimation similaire. Pour les autres sites, les différences sont trop importantes pour voir une tendance se présenter.

	Distance	Écart entre les données
Groupe 1 (6-7)	5 km	5,9 % - 19,37 %
Groupe 2 (13-23)	13 km	2,7 % - 13,38 %
Groupe 3 (17-19)	8 km	19,9 % - 16,53 %
Groupe 4 (3-22)	3 km	17,9 % - 34,25 %
Groupe 5 (11-14-16-21)	11 km	27 % - 32 % - 14 % - 35 %

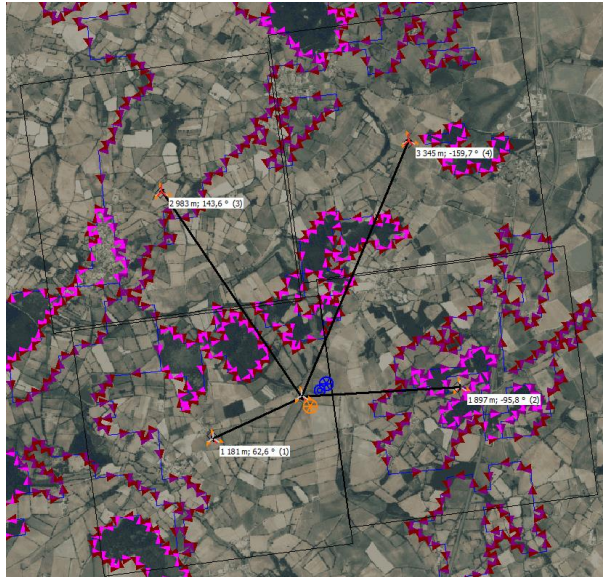
Tableau 7 : Impact de la proximité géographique des sites

3.2. Orographie et rugosité

3.2.1. Méthode

Le second critère susceptible d'influencer la précision des réanalyses est la configuration du terrain des sites d'études (orographie et rugosité) qui peuvent fortement influencer le comportement du vent. Il a été décidé de distinguer deux catégories pour l'orographie, « simple » ou « complexe ». Pour déterminer l'orographie du terrain, le *Ruggedness Index* (RIX ou indice d'inégalités du terrain) est calculé via l'interface WindPRO. Une description du RIX est faite dans le sujet de recherche RetD numéro 12, il s'agit du ratio entre les surfaces du terrain qui ont une pente supérieure à un angle donné et la surface totale étudiée. Le calcul du RIX est réalisé sur un cercle de 3 km de diamètre autour des 4 réanalyses les plus proches du mât avec un angle critique de 10 %. Il a été choisi de définir un terrain comme complexe si un des quatre cercles présente un RIX supérieur à 10 %.

La rugosité a été catégorisée par trois méthodes différentes. Aucune méthode n'ayant été trouvée dans la littérature, il a été choisi de calculer le pourcentage de forêt présent autour du site. Pour cela, le logiciel *ImageJ* a été utilisé, il permet de calculer des surfaces à partir de vue satellitaire. Pour chaque carré (de côté 3 km) autour d'une réanalyse, on fait le rapport entre l'aire de forêt présente et l'aire totale du carré, comme présenté sur la Carte 3. Par exemple, le ratio de forêt sur la surface de la première réanalyse, en bas à droite, est de 15,6 %.



Carte 3 : Image satellitaire traitées par ImageJ. Les quatre lignes noires partent d'une réanalyse et rejoignent le mât de mesures au centre. Les quatre aires autour de chaque réanalyses sont représentées

Premièrement, il a été décidé de définir la rugosité d'un terrain comme complexe si en moyenne il y a plus de 20 % de forêts sur l'ensemble des quatre aires définies autour de l'appareil de mesures. Dans le cas contraire le terrain a une rugosité simple. Cette séparation est appelée **Séparation 1 – Moyenne**.

Ensuite une deuxième méthode de séparation a été faite, appelée **Séparation 2 – Maximum**. Si au moins une aire parmi les quatre possède au moins 20 % de forêt alors le terrain a une rugosité complexe. Dans le cas contraire celle-ci est simple.

Une dernière séparation est faite, elle dépend de la présence de haies d'arbres sur le terrain. La séparation a été faite par vue satellitaire des sites. Ce choix vient du fait que les haies d'arbres bloquent le vent mais qu'ils occupent une surface au sol faible, ainsi ils devraient être mal pris en compte par les données de terrain des réanalyses qui ont une précision kilométrique. Cette séparation est appelée **Séparation 3 – Haies**.

Ainsi pour chaque séparation (1 – Moyenne, 2 – Maximum et 3 – Haies), chaque site peut être réparti dans quatre cas :

- Cas 1 : Orographie complexe et rugosité complexe
- Cas 2 : Orographie complexe et rugosité simple
- Cas 3 : Orographie simple et rugosité complexe
- Cas 4 : Orographie simple et rugosité simple

Les écarts entre les données de chaque séparation sont calculés et comparés en fonction du cas. Le coefficient de corrélation R_2 est également calculé entre les paramètres (coefficient de corrélation R, altitude et hauteur) et l'écart entre les données comme décrit dans la section 2.2.



3.2.2. Résultat

3.2.2.1 Séparation 1 – Moyenne

La Figure 4 représente l'écart entre les données pour les quatre catégories de terrain :

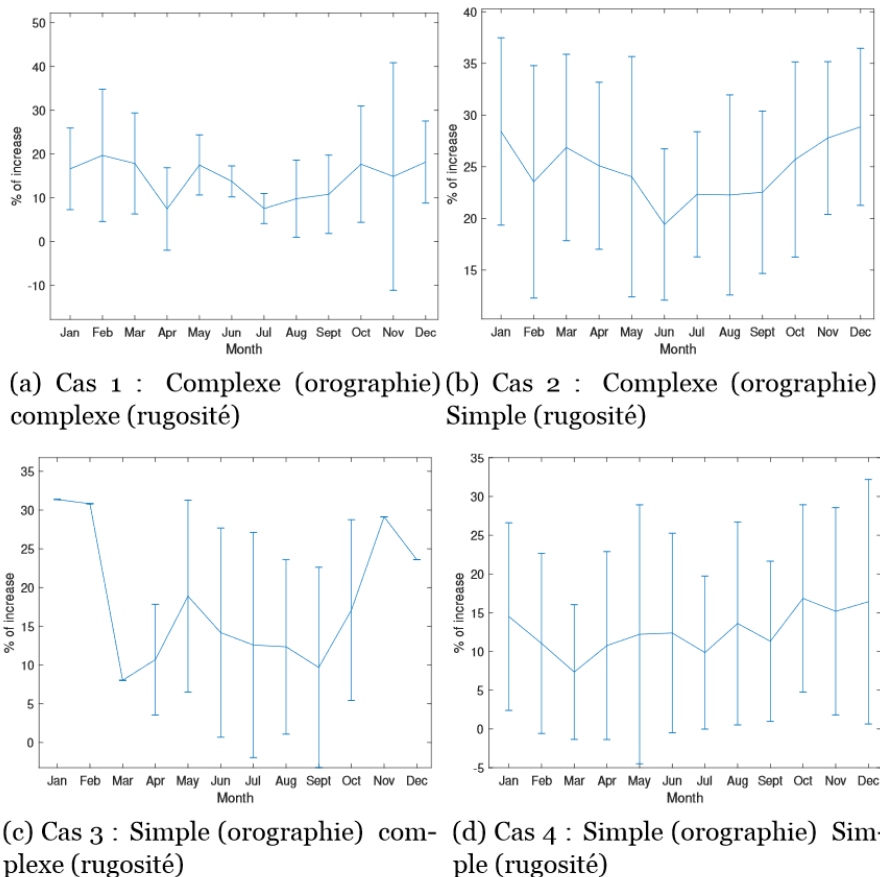


Figure 4 : Écart entre les données mensuelles pour les quatre catégories

Le Tableau 8 présente la moyenne de surestimation pour chaque cas et l'écart-type pour chaque mois. Les trois dernières colonnes représentent le coefficient de corrélation R_2 entre l'écart entre les données et les trois paramètres définis dans la méthode.

	Numéro des sites	Moyenne des surestimations (%)	Écart-type (%)	Corrélation	Altitude	Hauteur
Cas 1	5/10/16/18	14,32	10,47	0,09	-0,47	0,26
Cas 2	2/3/4/11/17/21/22	24,73	8,7	-0,31	0,06	-0,44
Cas 3	12/15/20	18,2	6,95	0,51	0,96	-0,78
Cas 4	1/6/7/8/9/12/14/19/23	12,62	12,39	-0,31	0,70	0,05

Tableau 8 : Alternative 1

L'écart-type est égal ou inférieur au cas sans séparation (12,52 %) obtenu dans la partie 2.3 . Les Cas 1 et Cas 4 ont les moyennes de surestimations les plus faibles, 14,32 % et 12,62 % respectivement, mais le Cas 1 comprend seulement quatre sites tandis que le cas 4 regroupe neuf sites. Le Cas 2 possède le plus grand écart



entre les données moyen, 24,73 %. Cas 1 présente un faible écart type, sauf pour novembre. Le Cas 3 possède des mois sans écart types car les sites utilisés n'ont pas de données pour ces mois.

Concernant la corrélation R_2 entre les trois paramètres et l'écart entre les données, les paramètres *Hauteur* et *Corrélation* ont un faible coefficient de corrélation avec l'écart entre les données. L'altitude a un coefficient de corrélation de 0,70 pour le Cas 4. Pour les autres cas, celui-ci est plus faible ou il concerne un cas possédant peu de sites, par exemple le Cas 3 ici qui ne possède que trois sites.

3.2.2.2 Séparation 2 – Maximum

Pour ce scénario, les mêmes valeurs sont calculées et présentées Figure 5. Similairement à l'alternative précédente, l'écart-type de chaque cas est plus bas que le cas comprenant tous les sites. Cas 2 possède la plus grande surestimation, 26,22 % et le Cas 4 possède la plus basse 10,58 %.

De même pour les trois paramètres étudiés, présentés dans le Tableau 9.

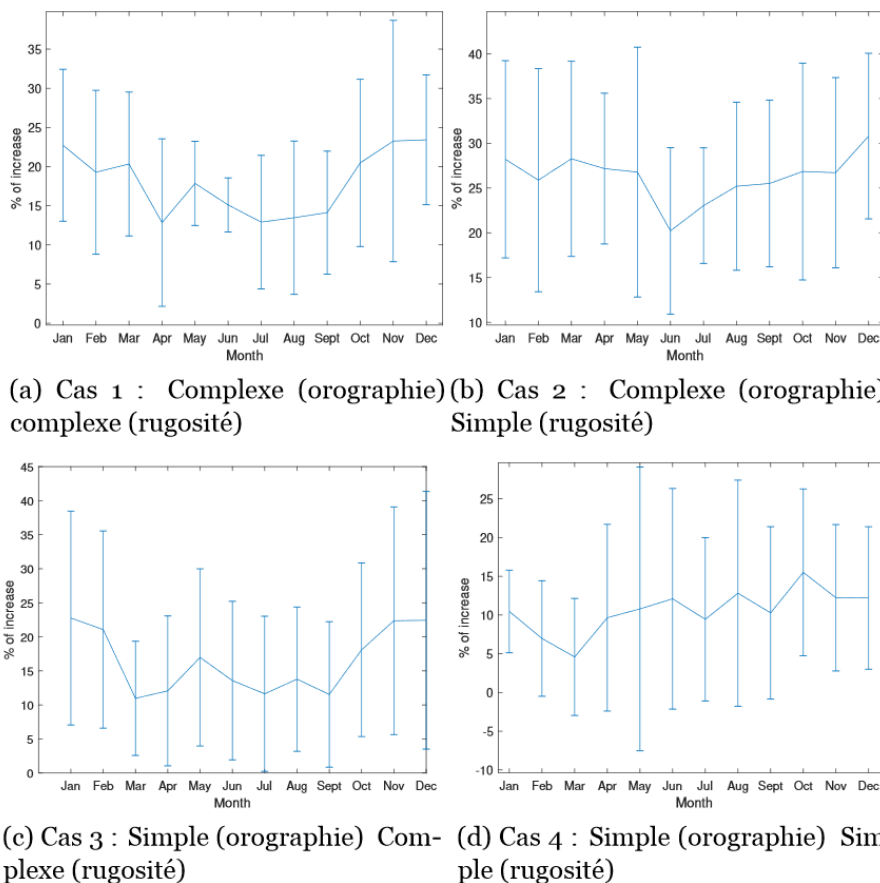


Figure 5 : Écart entre les données mensuelles pour les quatre catégories

	Numéro des sites	Moyenne (%)	Écart-type (%)	Corrélation	Altitude	Hauteur
Cas 1	3/4/5/10/11/16/18	17,98	9,12	0,27	-0,62	0,23
Cas 2	2/17/21/22	26,22	10,27	-0,47	0,25	-0,34
Cas 3	1/9/12/15/20/23	16,44	12,94	0,22	0,76	-0,28
Cas 4	6/7/8/13/14/19	10,58	10,89	-0,52	0,74	-0,14

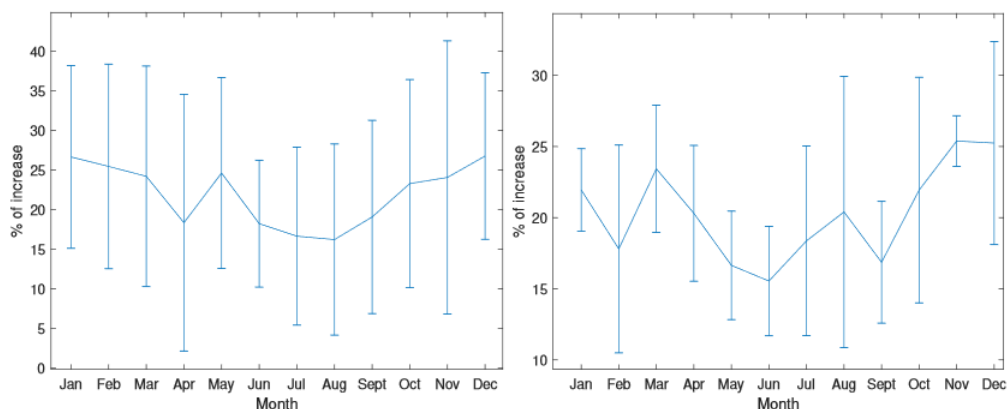
Tableau 9 : Alternative 2



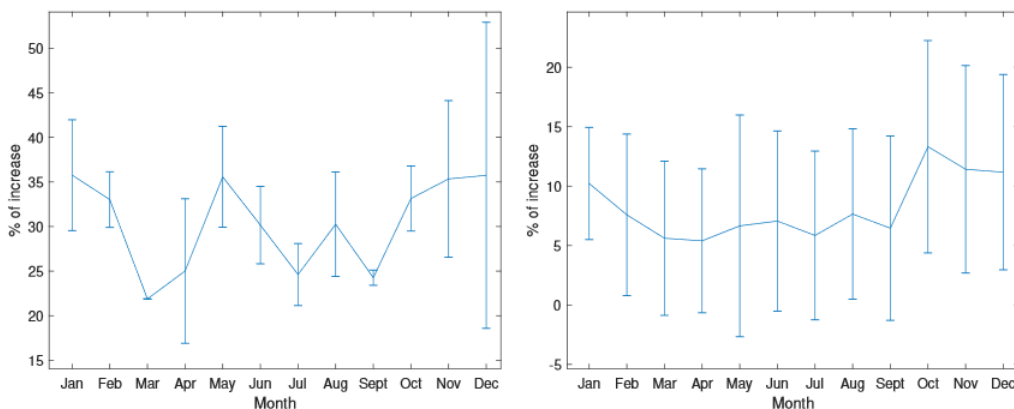
3.2.2.3 Séparation 3 – Haies

Pour la dernière alternative, une diminution de l'écart type est notable. Celui-ci est aussi plus faible que le cas où tous les sites étaient ensemble. Pour les Cas 2, 3 et 4 ont des écart-types entre 5,37 % et 7,4 %. Le cas ayant la surestimation la plus faible est le Cas 4 avec un minimum de 8,20 % et le plus fort est pour des sites avec des haies et peu de relief, Cas 3, avec 30,40 % de surestimation.

Concernant les trois autres paramètres étudiés, aucun cas ayant un nombre important de sites ne montre un lien entre ces trois paramètres et la surestimation de la vitesse de vent des réanalyses.



(a) Cas 1 : Complexe (orographie) complexe (rugosité) (b) Cas 2 : Complexe (orographie) Simple (rugosité)



(c) Cas 3 : Simple (orographie) complexe (rugosité) (d) Cas 4 : Simple (orographie) Simple (rugosité)

Figure 6 : Écart entre les données mensuelles pour les quatre catégories

	Numéro des sites	Moyenne (%)	Écart-type (%)	Corrélation	Altitude	Hauteur
Cas 1	2/4/5/10/16/21/22	21,96	12,58	0,40	-0,54	0,06
Cas 2	3/11/17/18	20,32	5,37	-0,49	-0,008	0,04
Cas 3	9/12/14	30,4	5,6	-0,11	-0,96	0,01
Cas 4	1/6/7/8/13/15/19/20/23	8,2	7,4	0,44	0,04	-0,04

Tableau 10 : Alternative 3

Les trois catégorisations du terrain ont permis de remarquer une réduction de l'écart-type à moins de 10 % contre 12,52 % pour le cas général. Le cas le plus simple, avec un terrain plat, peu d'arbres ou peu de haies d'arbres, présente un écart entre les données plus faible que les autres cas. En conséquence, des sites avec au moins un des paramètres de terrains qui est dans la catégorie complexe semble être plus enclin à surestimer les données de vent.

L'altitude du site semblait montrer un lien avec la surestimation, pour le cas des terrains simples : pour eux, le coefficient de corrélation R2 avait comme valeur 0,7 et 0,74 pour les deux premières alternatives, respectivement. Mais la troisième alternative ne présente qu'une valeur de 0,04 pour le cas du terrain simple. En conséquence, il n'est pas possible de conclure d'un lien systématique entre surestimation du vent et l'altitude du mât de mesures. De plus, la hauteur du mât et le coefficient de corrélation ne semblent pas non plus être liés directement à l'augmentation de la surestimation du vent. Le coefficient R2 n'a pas donné de résultats probants pour permettre de tirer une conclusion.

Concernant la troisième alternative, la surestimation semble être plus importante lors de la présence d'haies d'arbres. Aucune explication n'a été trouvée dans la littérature. Les haies ralentissent le vent mais comme leur surface est faible, ils ne sont pas modélisés assez précisément à une méso-échelle.

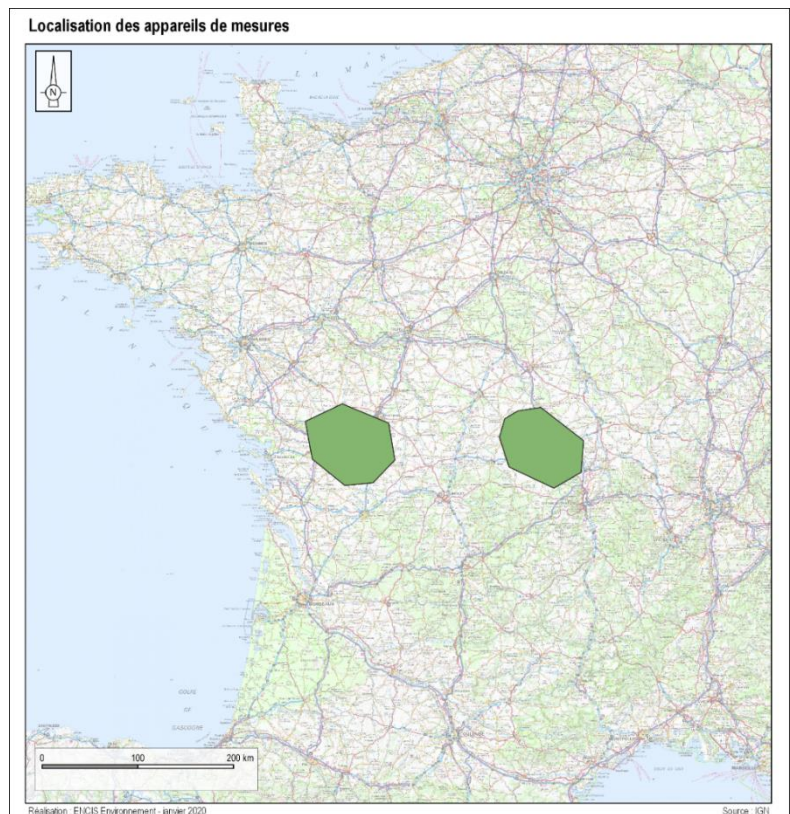
4. Application sur des parcs en exploitation

4.1. Méthode

4.1.1. Présentation des sites

Cinq sites éoliens déjà construits ont fournis leur production annuelle. Les sites ont entre 3 et 9 turbines installées. Les modèles et les emplacements sont anonymisés, mais les sites sont dans les même zones de France que les mâts de mesures étudiés précédemment. La Carte 4 représente deux zones où se trouvent les parcs éoliens étudiés.

Carte 4 : zones d'emplacement des parcs éoliens étudiés





Les Tableau 11, Tableau 12, Tableau 13 et Tableau 14 représentent les moyennes de surestimations pour les quatre Cas de division de terrain. La séparation 2 (Maximum) a été choisie parmi les trois disponibles car elle possède au moins quatre sites par cas.

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Surestimation	22 %	19 %	20 %	13 %	18 %	15 %
Mois	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Surestimation	12 %	13 %	14 %	20 %	23 %	23 %

Tableau 11 : Surestimation pour le Cas 1

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Surestimation	28 %	25 %	28 %	27 %	26 %	20 %
Mois	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Surestimation	23 %	25 %	25 %	27 %	27 %	31 %

Tableau 12 : Surestimation pour le Cas 2

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Surestimation	23 %	21 %	11 %	12 %	17 %	13 %
Mois	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Surestimation	12 %	14 %	11 %	18 %	22 %	22 %

Tableau 13 : Surestimation pour le Cas 3

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Surestimation	10 %	7 %	4 %	9 %	11 %	12 %
Mois	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Surestimation	9 %	13 %	10 %	15 %	12 %	12 %

Tableau 14 : Surestimation pour le Cas 4

Pour chacun des cinq sites étudiés, une réanalyse est choisie. Le productible est une première fois calculé par WindPRO. Dans un deuxième temps, pour chaque terrain, le RIX et le ratio de forêt sont calculés ce qui permet de séparer chaque site selon les cas 1, 2, 3 ou 4. La vitesse du vent est diminuée selon la catégorie des sites choisie à l'aide des tableaux ci-dessus. La catégorie de chaque site est présentée sur le Tableau 15. Ensuite, WindPRO calcule la production du site avec les vitesses de vent modifiées.

Sites	A	B	C	D	E
Cas	Cas 3	Cas 3	Cas 2	Cas 1	Cas 4

Tableau 15 : Catégorie des sites éoliens étudiés

4.1.2. Pertes

Des pertes sont déjà présentes dans les productions des sites étudiés, elles ont été déduites du productible calculé. Cette partie présente les pertes déduites :

- Effets de sillages : calculés directement par le module PARK dans WindPRO.
- Disponibilité : 3 % ;



- Réseau disponibilité : 0,75 % ;
- Pertes électriques : 0,5 % ;
- Consommation du parc : 1,5 %

4.2. Résultats

Le Tableau 16 présente dans la première colonne la différence entre le productible réel et le productible calculé avec la réanalyse non modifiée. La deuxième colonne présente la différence avec la réanalyse modifiée. La réanalyse sans offset surestime pour chaque cas la production de vent. Les valeurs vont de 21,1 % à 50,2 %. Avec la modification faite sur la réanalyse, les résultats sont plus proches de la réalité. Les sites A, D et E ont une estimation très proche de la réalité, à moins de 4 %. Le site B passe de 21,1 % à -21,1 % et le site C passe de 48,8 % à -19,9 %.

	Différence avec la production réelle (sans offset)	Différence avec la production réelle (avec offset)
A	48,8 %	-0,9 %
B	21,1 %	-21,1 %
C	48,8 %	-19,9 %
D	50,2 %	3,9 %
E	28,3 %	3,9 %

Tableau 16 : Différence de production Réelle - Réanalyse

5. Discussion

5.1. Discussion

La comparaison des réanalyses et des mâts de mesures montre que la réanalyse EMD-WRF possède une précision moyenne concernant la vitesse du vent. En effet, sur les 23 sites, la différence moyenne est de 18,6 %, l'écart-type est de 12,52 % et le biais est de 1,02 m/s. Les résultats sont proches des valeurs obtenues par l'étude faite sur la précédente réanalyse EMD-ConWx (Haxsen, 2017). De plus, un biais positif est en accord avec ce qui a déjà observé en France (Benedict Jourdir, 2015). Cependant, l'amplitude des résultats est trop importante pour proposer un *offset* général sur les réanalyses. En effet, le risque de sous-estimation est jugé trop important.

Les résultats sont moins bons que ceux obtenus dans Coburn (2019), qui avait trouvé un biais entre 0,127 m/s et 0,415 m/s. Cela pourrait être expliqué par la faible hauteur des mats de mesures qui étaient à 10 m. Le vent est probablement plus faible à cette hauteur que les mesures présentées dans cette étude. En conséquence, les biais devraient y être plus faibles. De plus, cette étude a été faite sur un autre continent, comme montré dans Benedict Jourdir (2015), le biais de réanalyses est différent selon les zones géographiques étudiées et l'étude de Coburn (2019) se situe dans le Centre des États-Unis.

Une partie des imprécisions peut provenir de l'interpolation verticale, la loi puissance est utilisée et Elkinton, Rogers and McGowan (2006) ont montré que celle-ci pouvait présenter des imprécisions. Cependant, il faut remarquer que les interpolations effectuées sont faites sur des faibles distances. En effet les réanalyses EMD-WRF ont des pas de hauteurs de 50 m entre 10 m et 300 m, donc l'interpolation se fait sur une hauteur de



maximum 25 m. L'incertitude aurait été supérieure pour d'autres réanalyses, comme MERRA-2, qui ne possèdent une hauteur max de 50 m.

De plus, une autre source d'erreur peut être l'extrapolation horizontale. La méthode utilisée est celle appelée downscaling. Une autre méthode ou un autre profil de vent aurait probablement changé les résultats. Mais avec les outils disponibles et par contrainte de temps, il n'a pas semblé raisonnable d'estimer cette source d'erreur. Il convient de rappeler que ces méthodes sont encore utilisées dans des études de vents et possèdent des résultats satisfaisants si des données de vent réelles sont utilisées.

La division mensuelle des données montre une variation de la surestimation selon les différents mois de l'année. L'hiver comporte plus de déviation par rapport à la vitesse de vent réelle tandis que l'été, cette déviation diminue. Ceci est à mettre en relation avec l'article de Coburn (2019), où les variations saisonnières étaient similaires : l'hiver surestimait les données de vent plus que l'été et le printemps. Les réanalyses ont seulement des pas temporels horaires tandis que les mesures ont des pas dix-minutaires. Le vent fort qui apparaît sur des périodes de temps courts est possiblement plus difficilement modélisable.

Le coefficient de corrélation entre les données est de 0,79 avec un écart-type de 0,05. On est proche des valeurs d'ERA-5, qui est une donnée d'entrée d'EMD-WRF, et d'EMD-ConWx. L'écart-type est légèrement plus faible, mais cela pourrait être dû au plus faible nombre de sites analysés. C'est un signe d'amélioration de modélisation d'une génération à l'autre.

5.1.1. Impact du terrain

L'étude portant sur la proximité géographique des sites n'a pas démontré un lien avec la surestimation des réanalyses EMD-WRF. En effet, les sites proches n'ont pas une surestimation nécessairement similaire.

Les trois catégorisations du terrain ont permis de remarquer une réduction de l'écart-type à moins de 10 % contre 12,52 % pour le cas général. Le cas le plus simple, avec un terrain plat, peu d'arbres ou peu de haies d'arbres, présente un écart entre les données plus faible que les autres cas. En conséquence, des sites avec au moins un des paramètres de terrains qui est dans la catégorie complexe semble être plus enclin à surestimer les données de vent.

L'altitude du site semblait montrer un lien avec la surestimation, pour le cas des terrains simples : pour eux, le coefficient de corrélation R_2 avait comme valeur 0,7 et 0,74 pour les deux premières alternatives, respectivement. Mais la troisième alternative ne présente qu'une valeur de 0,04 pour le cas du terrain simple. En conséquence, il n'est pas possible de conclure d'un lien systématique entre surestimation du vent et l'altitude du mât de mesures. De plus, la hauteur du mât et le coefficient de corrélation ne semblent pas non plus être liés directement à l'augmentation de la surestimation du vent. Le coefficient R_2 n'a pas donné de résultats probants pour permettre de tirer une conclusion.

Concernant la troisième alternative, la surestimation semble être plus importante lors de la présence d'haies d'arbres. Aucune explication n'a été trouvée dans la littérature. Les haies ralentissent le vent mais comme leur surface est faible, ils ne sont pas modélisés assez précisément à une méso-échelle.



Note : le choix de catégoriser le terrain à l'aide du RIX et de la surface d'arbres présents autour du site est arbitraire comme peu d'exemples ont été trouvés dans la littérature sur la manière de définir la complexité d'un terrain.

5.1.2. Estimation de puissance

Les réanalyses de vent sans modifications ne sont pas précises pour estimer la production d'un parc éolien de manière précise. Dans cette étude, cela mène à une surestimation qui est entre 21,1 % et 50,2 % pour les sites étudiés. Avec les modifications proposées, le résultat est plus près de la production réelle. Les sites A, D et E sont à moins de 4 % de la valeur de production réelle. Le site C est passé de 48,8 % de surestimation à 19,9 % de sous-estimation. La précision du productible calculé est donc plus grande. Cependant, l'offset sur les données de réanalyse est trop important ce qui conduit à une sous-estimation de la production réelle. C'est aussi le cas pour le site B qui est passé à une surestimation de 21,1 % à 21 % sous-estimation. Pour conclure sur une modification satisfaisante pour les réanalyses qui permettrait de réduire suffisamment l'erreur sans sous-estimer le productible, plus de tests sur plus de sites devront être fait. Pour l'instant seuls les cas 1 et 4 ont évité de sous-estimer la production de vent.

Une position plus conservatrice consisterait à uniquement appliquer l'offset du Cas 4 qui est le plus faible (ie. le cas où le terrain est plat et avec peu d'éléments de rugosité comme des arbres) ce qui limiterait le risque de sous-estimation.

6. Limites de l'étude et perspectives

Plusieurs facteurs empêchent d'avoir une idée exacte de la précision de la réanalyse EMD-WRF. La première est qu'ici, le logiciel WindPRO a été utilisé et que les équations pour l'extrapolation verticale et horizontale ne sont pas données explicitement, une partie des erreurs peut venir de là et mériterait une étude pour pouvoir les estimer. En effet, les modèles d'extrapolations comportent des approximations qui apportent des incertitudes sur leurs résultats. Le second facteur est que la méthode de calcul de cette réanalyse n'a pas été trouvée, cela permettrait de pouvoir se rendre compte si les incertitudes viennent des données de vents d'entrée (ERA-5), des données de terrains ou d'autres facteurs.

Enfin il serait intéressant, en tant que suite de cette étude, de pouvoir définir une incertitude à attribuer à l'utilisation de réanalyses lors d'études de préfaisabilités.



BIBLIOGRAPHIE

- Benedict Jourdiér (2015) *Ressource éolienne en France métropolitaine : méthodes d'évaluation du potentiel, variabilité et tendances.*
- Bosilovich, M. *et al.* (2015) 'MERRA-2 : Initial Evaluation of the Climate', *NASA Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation*, 43(September), p. 139. doi: NASA/TM–2015-104606/Vol. 43.
- Coburn, J. J. (2019) 'Assessing wind data from reanalyses for the upper Midwest', *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(3), pp. 429–446. doi: 10.1175/JAMC-D-18-0164.1.
- ECMWF (2019) *What is ERA Interim ?* Available at: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/What+is+ERA-Interim> (Accessed: 27 October 2019).
- Elkinton, M. R., Rogers, A. L. and McGowan, J. G. (2006) 'An investigation of wind-shear models and experimental data trends for different terrains', *Wind Engineering*, 30(4), pp. 341–350. doi: 10.1260/030952406779295417.
- EMD International A/S (2019) *WindPRO user manual.*
- Haxsen, S. (2017) *Suitability of the EMD-ConWx europe mesoscale data for wind resource assessments.* Uppsala University.
- MEASNET (2016) *MEASNET PROCEDURE: Evaluation of Site-Specific Wind Conditions. Version 2.*
- Sharp, E. *et al.* (2015) 'Evaluating the accuracy of CFSR reanalysis hourly wind speed forecasts for the UK, using in situ measurements and geographical information', *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 77, pp. 527–538. doi: 10.1016/j.renene.2014.12.025.