



Projet de parc éolien en mer au large
de Courseulles-sur-Mer

Etude de la ressource en vent (2011)

Sommaire

1. CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE	4
1.1. LE GISEMENT EOLIEN EN FRANCE ET EN EUROPE.....	4
1.2. L'ETUDE DE LA RESSOURCE EN VENT	5
2. LE PROJET EOLIEN EN MER DE COURSEULLES-SUR-MER	6
2.1. L'IMPLANTATION DES EOLIENNES	6
3. LE GABARIT MACHINE	6
4. MESURES DE VENT	7
4.1. LE MAT DE MESURE DE VENT.....	8
4.2. LE LIDAR, TELEDETECTION PAR LASER	9
5. CARACTERISATION DU GISEMENT EOLIEN	11
5.1. MODELISATION DU GISEMENT SUR LE SITE DU PROJET.....	11
<i>Methodologie commune.....</i>	<i>11</i>
<i>Modélisation réalisée par Garrad Hassan.....</i>	<i>11</i>
<i>Modélisation réalisée par Natural Power</i>	<i>11</i>
5.2. QUALIFICATION DU GISEMENT EOLIEN	12
6. EVALUATION DE LA PRODUCTION	13
6.1. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE L'AEROGENERATEUR.....	13
6.2. CARACTERISTIQUE DES PERTES TECHNIQUES.....	13
6.3. PRODUCTION ANNUELLE ET FACTEUR DE CHARGE.....	14
7. MESURES COMPLEMENTAIRES ENVISAGEABLES	14

Liste des figures

<i>FIGURE 1 : GISEMENT EOLIEN EN MER A 5 ALTITUDES DIFFERENTES (10M, 25M, 50M, 100M, 200M), EN EUROPE (Risø, 1989).....</i>	<i>4</i>
<i>FIGURE 3 : IMPLANTATION ET ALIGNEMENT DES EOLIENNES DU PROJET DE COURSEULLES-SUR-MER (EDF EN, 2013).....</i>	<i>6</i>
<i>FIGURE 4 : CAMPAGNES DE MESURES DE VENT REALISEES POUR LE PROJET DE COURSEULLES-SUR-MER.....</i>	<i>7</i>
<i>FIGURE 5 : LOCALISATION DES MATS DE MESURE ET DU LIDAR DU PROJET DE COURSEULLES-SUR-MER (WPD OFFSHORE FRANCE, 2011).....</i>	<i>7</i>
<i>FIGURE 6 : INSTRUMENTATION TYPE D'UN MAT DE MESURE DE VENT (EDF EN, 2011)</i>	<i>8</i>
<i>FIGURE 7 : PRINCIPE DE MESURE D'UN LIDAR (EDF EN, 2013).....</i>	<i>9</i>
<i>FIGURE 8 : ROSE DES VENTS DU PROJET DE COURSEULLES-SUR-MER A HAUTEUR DE MOYEU (NATURAL POWER, 2011)</i>	<i>12</i>
<i>FIGURE 9 : RESSOURCE EN VENT A 100 M DE HAUTEUR (EDF EN, 2013)</i>	<i>12</i>
<i>FIGURE 10 : DESCRIPTION DES PERTES TECHNIQUES.....</i>	<i>13</i>
<i>FIGURE 11 : EXEMPLES DE MATS DE MESURES DE VENT (FINO3 A G., SUR LE PARC DE HORNS REV 1 (DONG ENERGY) A D.).....</i>	<i>14</i>

PREAMBULE

En avril 2012, la société Éolien Maritime France (EMF) - consortium regroupant la société EDF EN France et DONG Energy Power - a été autorisée à exploiter un parc éolien localisé sur le domaine public maritime au large de Courseulles-sur-Mer. Cette autorisation fait suite à la désignation de la société EMF comme lauréat de l'appel d'offres lancé par l'État pour l'installation de parcs éoliens au large des côtes françaises. En partenariat avec wpd Offshore, EMF a créé la société de projet « Eoliennes Offshore du Calvados » pour la réalisation du projet.

Dans le cadre du Débat Public, Eoliennes Offshore du Calvados souhaite mettre à disposition de tous, les synthèses des études techniques, économiques ou environnementales, réalisées depuis l'origine du projet.

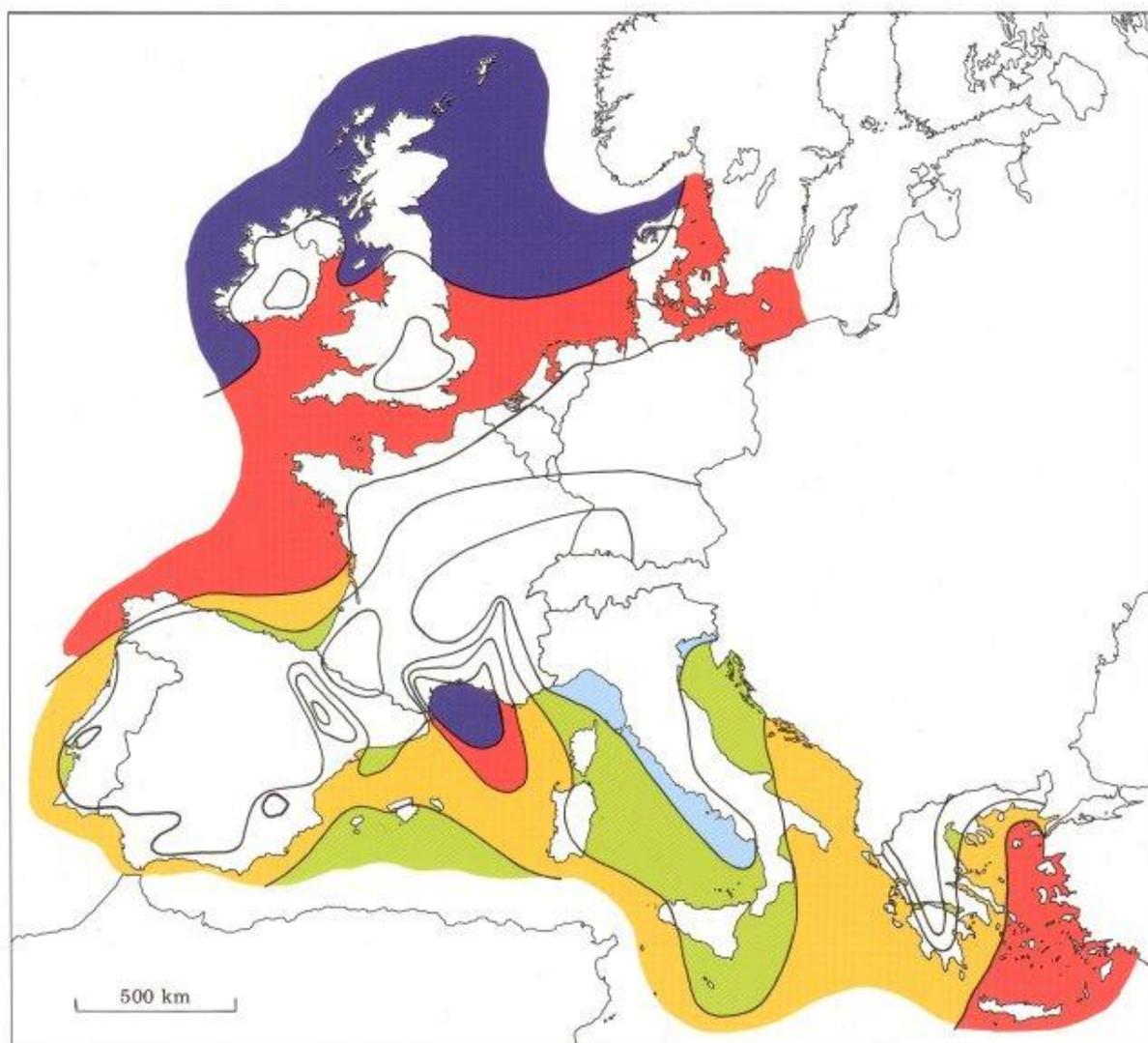
Cette « Étude de la ressource en vent » réalisée par le Maître d'Ouvrage en 2011 dans le cadre de la réponse à l'appel d'offres pour le site a été rédigée à partir du descriptif du projet tel qu'il était au moment de sa rédaction. Ainsi, l'ensemble des données décrites dans cette synthèse correspond aux données disponibles au moment de la rédaction de l'étude. Les conclusions qui y sont indiquées sont donc amenées à évoluer en fonction des modifications apportées au projet.

1. CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE

1.1. LE GISEMENT EOLIEN EN FRANCE ET EN EUROPE

Au préalable du lancement d'études détaillées, différentes cartographies générales peuvent être consultées pour apprécier les secteurs les plus ventés en Europe et en France.

La carte ci-dessous présente le gisement éolien en mer, en Europe. La mer du Nord et la Méditerranée constituent les secteurs ayant le plus fort potentiel, suivis de la façade Manche-Mer du Nord sur la côte française.



Wind resources over open sea (more than 10 km offshore) for five standard heights										
	10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
	$m s^{-1}$	Wm^{-2}								
Dark Blue	> 8.0	> 600	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 10.0	> 1100	> 11.0	> 1500
Red	7.0-8.0	350-600	7.5-8.5	450-700	8.0-9.0	600-800	8.5-10.0	650-1100	9.5-11.0	900-1500
Yellow	6.0-7.0	250-300	6.5-7.5	300-450	7.0-8.0	400-600	7.5- 8.5	450- 650	8.0- 9.5	600- 900
Light Green	4.5-6.0	100-250	5.0-6.5	150-300	5.5-7.0	200-400	6.0- 7.5	250- 450	6.5- 8.0	300- 600
Light Blue	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300

Figure 1 : Gisement éolien en mer à 5 altitudes différentes (10m, 25m, 50m, 100m, 200m), en Europe (Risø, 1989).

1.2. L'ETUDE DE LA RESSOURCE EN VENT

L'étude détaillée ci-dessous présente l'analyse du gisement éolien ayant permis de définir la production annuelle du projet de parc éolien en mer au large de Courseulles-sur-Mer, qui influe fortement sur le modèle économique du projet. La connaissance et la minimisation des incertitudes constituent la clé de l'optimisation du projet.

Les calculs sont basés sur :

- des mesures de vent à proximité du site (une variation de 10% de l'intensité du vent peut engendrer une variation de 15 à 20% de la production du parc éolien) ;
- une modélisation permettant l'extrapolation temporelle et spatiale du gisement de vent ;
- l'utilisation des caractéristiques techniques de l'aérogénérateur (éolienne) ;
- la connaissance des différentes pertes : pertes dues à l'effet de sillage (déventement des éoliennes les unes par rapport aux autres), pertes électriques (pertes dans les câbles et les autres éléments), pertes dues à l'arrêt des éoliennes ou à un fonctionnement non optimal (maintenance, pannes, arrêts provoqués).

Pour compléter l'expertise des équipes d'ingénierie d'EDF Energies Nouvelles, de DONG Energy et de wpd Offshore, deux bureaux d'études de premier rang ont été missionnés pour l'étude du productible :

- GL Garrad Hassan : leader mondial dans les prestations de services au secteur éolien, GL Garrad Hassan a développé une méthode basée sur des modèles méso-échelles, mise en œuvre sur de nombreux projets offshore financés et construits.
- Natural Power : fondé en 1990, Natural Power a travaillé sur plus de 2100 MW de projets éoliens bénéficiant de permis de construire, dont 800 MW offshore.

2. LE PROJET EOLIEN EN MER DE COURSEULLES-SUR-MER

2.1. L'IMPLANTATION DES EOLIENNES

Le projet de Courseulles-sur-Mer se compose de 75 éoliennes pour une capacité totale installée de 450 Mégawatts (MW), situé à une distance minimale de 10 km à la côte.

La configuration de l'implantation présente deux types d'alignement : l'un suivant l'axe 100° (selon les recommandations des pêcheurs professionnels) et présentant un espacement entre les aérogénérateurs de 948 m, l'autre suivant un axe permettant une meilleure intégration paysagère du parc depuis le site classé d'Arromanches et présentant un espacement entre les aérogénérateurs de 967 m.

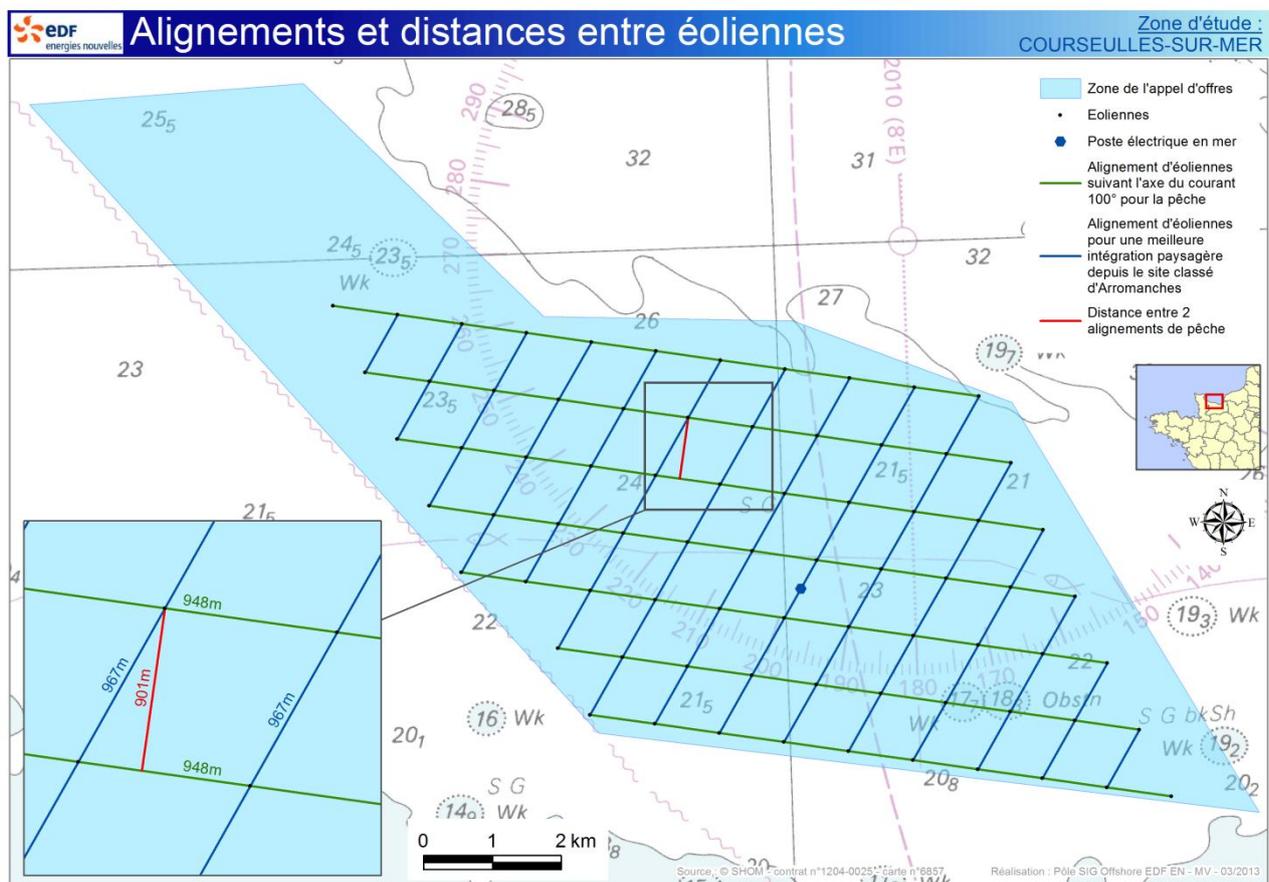


Figure 2 : Implantation et alignement des éoliennes du projet de Courseulles-sur-Mer (EDF EN, 2013)

3. LE GABARIT MACHINE

CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'EOLIENNE ALSTOM HALIADE 150

Puissance nominale	6 MW
Hauteur du moyeu du rotor	100.2 mètres (au dessus du niveau moyen de la mer - MSL)
Diamètre du rotor	150 mètres
Plage de vitesse de rotation du rotor	Entre 4 et 12 tours par minute

4. MESURES DE VENT

Afin d'estimer au plus près le productible et de limiter les incertitudes, six campagnes de mesures de vent à proximité du site ont été réalisées, au moyen de plusieurs mâts de mesures et d'un Lidar¹.

SITE DE MESURE	PERIODE	HAUTEUR MAXIMUM DE MESURE AU-DESSUS DU SOL
Mât Ste-Honorine-des-Pertes	Mai 2002 – Avril 2004	47m
Mât Fécamp 1	Février 2003 – Mai 2004	40m
Mât Fécamp 2	Mai 2003 – Juin 2004	50m
Mât Antifer 1	Novembre 2000 – Août 2004	37,5m
Mât Antifer 2	Depuis mai 2011	23m
Lidar Antifer	Depuis mai 2011	212,3m

Figure 3 : Campagnes de mesures de vent réalisées pour le projet de Courseulles-sur-Mer

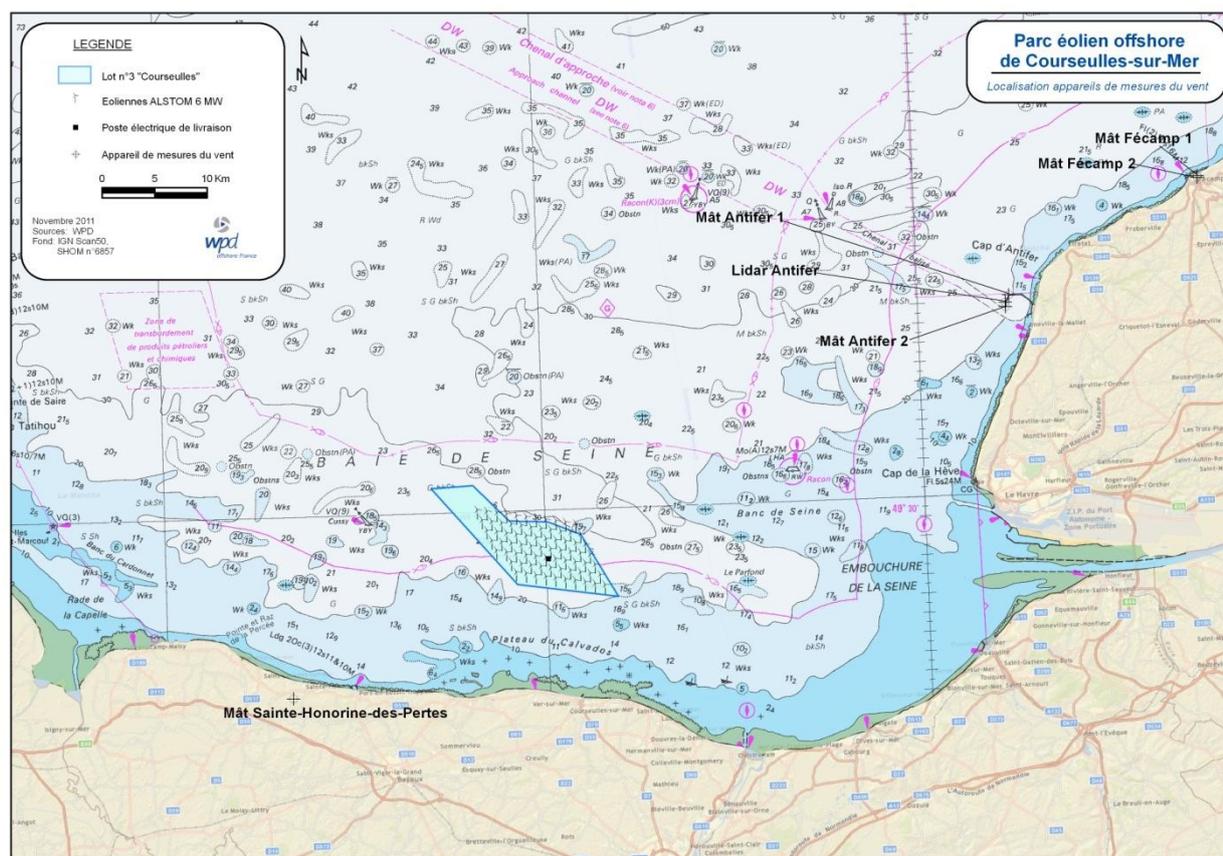


Figure 4 : Localisation des mâts de mesure et du Lidar du projet de Courseulles-sur-Mer (wpd offshore France, 2011)

¹ Light Detection and Ranging ou télédétection par laser, instrument de mesure optique basée sur la réflexion d'impulsions optiques, permettant de déterminer la vitesse et la direction du vent à différentes hauteurs

4.1. LE MAT DE MESURE DE VENT

Un mât de mesure de vent est équipé d'anémomètres et de girouettes à différentes hauteurs. Utilisé notamment pour le développement éolien terrestre, les mâts de mesure ont des hauteurs pouvant évoluer entre quelques dizaines de mètres, jusqu'à une centaine de mètres.

La figure ci-dessous illustre le principe d'instrumentation d'un mât de mesure, permettant la collecte des vitesses et des orientations du vent, nécessaires à la qualification de la ressource en vent.

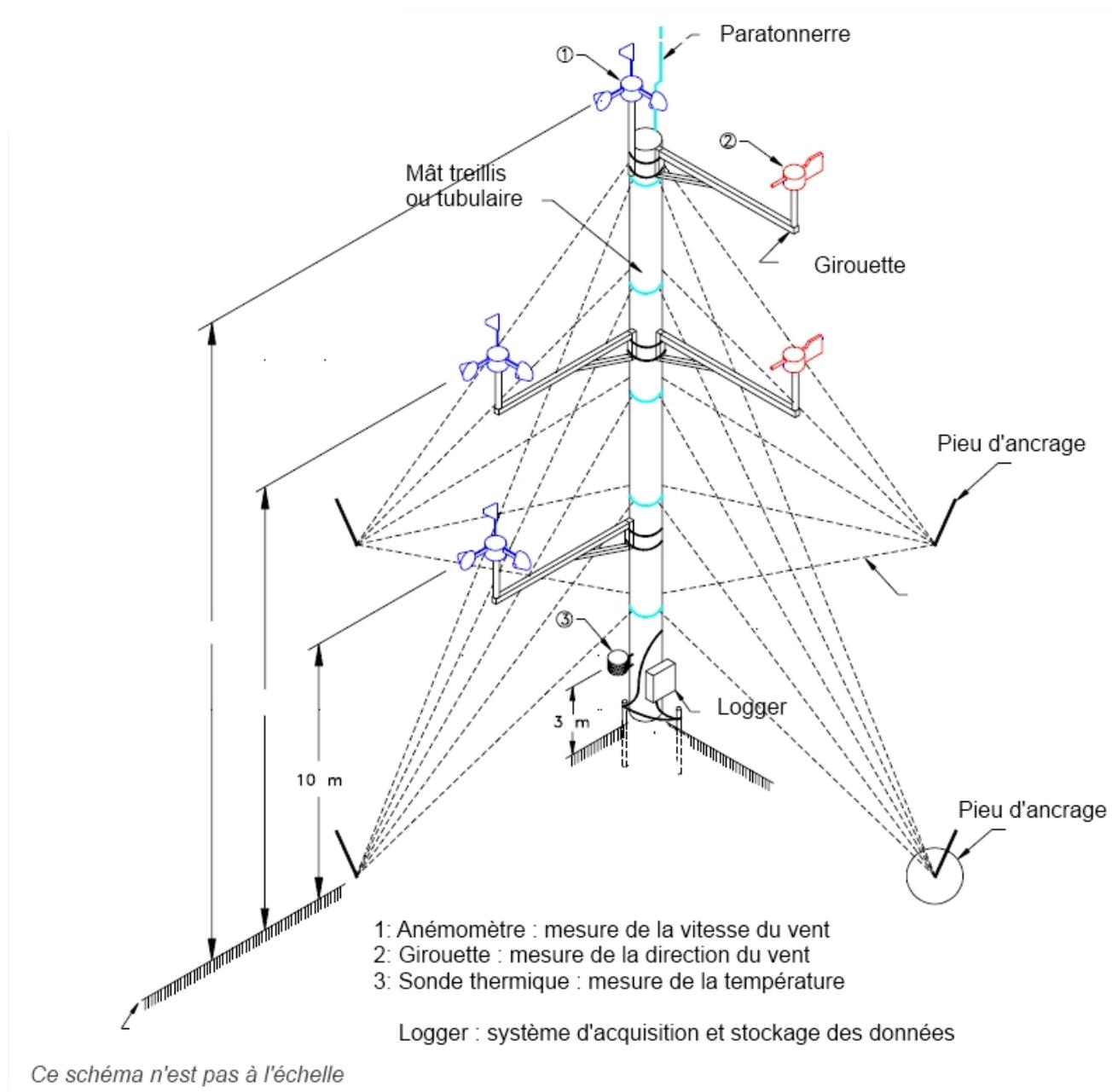


Figure 5 : Instrumentation type d'un mât de mesure de vent (EDF EN, 2011)

4.2. LE LIDAR, TELEDETECTION PAR LASER

Le Lidar (Light Detection and Ranging) est un instrument de mesure optique basée sur la réflexion d'impulsions optiques. Moins fréquent que des mâts de mesure dans le cadre de l'éolien terrestre, cet outil permet néanmoins, avec un encombrement limité, de mesurer les vitesses et orientations des vents jusqu'à 200 mètres de hauteur.

L'appareil projette un rayon laser qui se réfléchit sur les particules aérosols. Cela permet de mesurer les vitesses horizontales et verticales des particules d'air à différentes altitudes. La plage de mesure s'étend généralement de 40 mètres à 200 mètres. Le Lidar envoie à intervalles réguliers les données mesurées par télétransmission.

La figure ci-dessous illustre le principe général de fonctionnement d'un Lidar, avec notamment son champ de mesure.

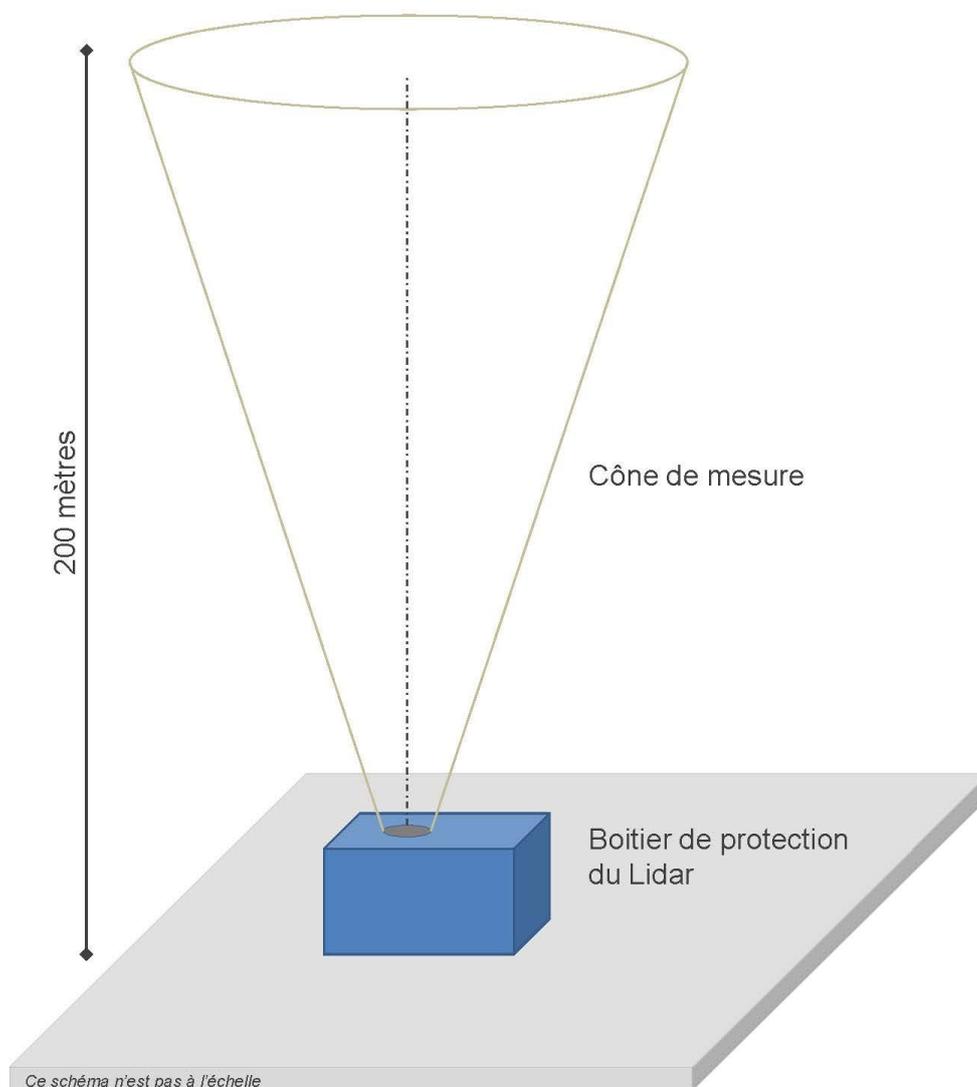


Figure 6 : Principe de mesure d'un Lidar (EDF EN, 2013)

Ci-dessous les illustrations du Lidar installé sur la digue d'Antifer pour les mesures de vent nécessaires au projet de parc éolien en mer de Courseulles-sur-Mer.



5. CARACTERISATION DU GISEMENT EOLIEN

Afin d'estimer au plus près le productible et de limiter les incertitudes, en complément de l'expertise interne, deux modélisations du gisement sur site avec estimation du productible ont été réalisées par des bureaux d'étude de référence, GL Garrad Hassan et Natural Power.

5.1. MODELISATION DU GISEMENT SUR LE SITE DU PROJET

Méthodologie commune

L'évaluation du gisement éolien sur le site de Courseulles-sur-Mer par GL Garrad Hassan et Natural Power, mandatés en exclusivité, suit globalement la méthodologie suivante :

- extrapolation du vent mesuré sur le long terme
- évaluation du profil vertical du vent
- extrapolation spatiale du vent

Les méthodologies des deux bureaux d'études diffèrent principalement dans l'extrapolation spatiale du vent. Les résultats obtenus nous permettent de réduire l'incertitude liée aux modèles et processus, et ainsi, d'affiner la connaissance du gisement éolien.

Modélisation réalisée par Garrad Hassan

L'extrapolation spatiale du vent se base sur le modèle MC2 (*Mesoscale Compressible Community*) utilisant le mode EOLE. Ce modèle permet de simuler individuellement un nombre fini d'états climatiques. Chaque simulation se base sur des données de terrain (topographie, occupation du sol, obstacles...) sur un domaine de 500 km x 500 km et avec une résolution de 2,5 km. Pour chaque état climatique, les résultats de ces simulations sont pondérés suivant la fréquence d'occurrence relative à la base de données globale des statistiques météorologiques géostrophiques¹.

Les résultats de la modélisation méso-échelle sont introduits dans un modèle plus fin (micro-échelle MS-Micro) sur un domaine 50 km x 35 km avec une résolution de 500 mètres. La vitesse du vent mesurée et extrapolée sur le long terme est corrélée à celle prédite par le modèle micro-échelle (ajustement linéaire). Cet ajustement est alors appliqué sur l'ensemble du domaine modélisé afin d'évaluer la variation spatiale du vent.

Modélisation réalisée par Natural Power

Natural Power utilise le modèle méso-échelle WRF (*Weather Research & Forecasting model*) qui est un modèle numérique de prévision météorologique de nouvelle génération. La résolution est de 500 mètres, et les données d'entrée sont : topographie, l'occupation du sol, les données de vent². Les données de vent mesurées sur site sont calibrées à l'aide d'un modèle micro-échelle afin de tenir compte des éventuels effets locaux. Ces mesures filtrées sont comparées aux résultats du modèle méso-échelle afin de les calibrer.

¹ Base de données utilisées : NCEP/NCAR ReAnalysis 2

² CFSR, 31 ans de données

5.2. QUALIFICATION DU GISEMENT EOLIEN

En mer, sur la zone du projet éolien, la vitesse moyenne du vent estimée à 100 mètres de hauteur à 8.3 mètres par seconde (environ 30 km/h).

Les vents dominants proviennent des secteurs Ouest et Sud-Ouest, dont la répartition énergétique est précisée ci-dessous au travers d'une rose des vents.

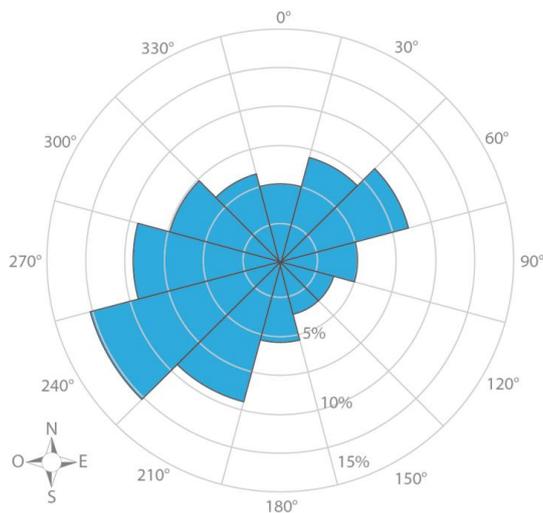


Figure 7 : rose des vents du projet de Courseulles-sur-Mer à hauteur de moyeu (Natural Power, 2011)

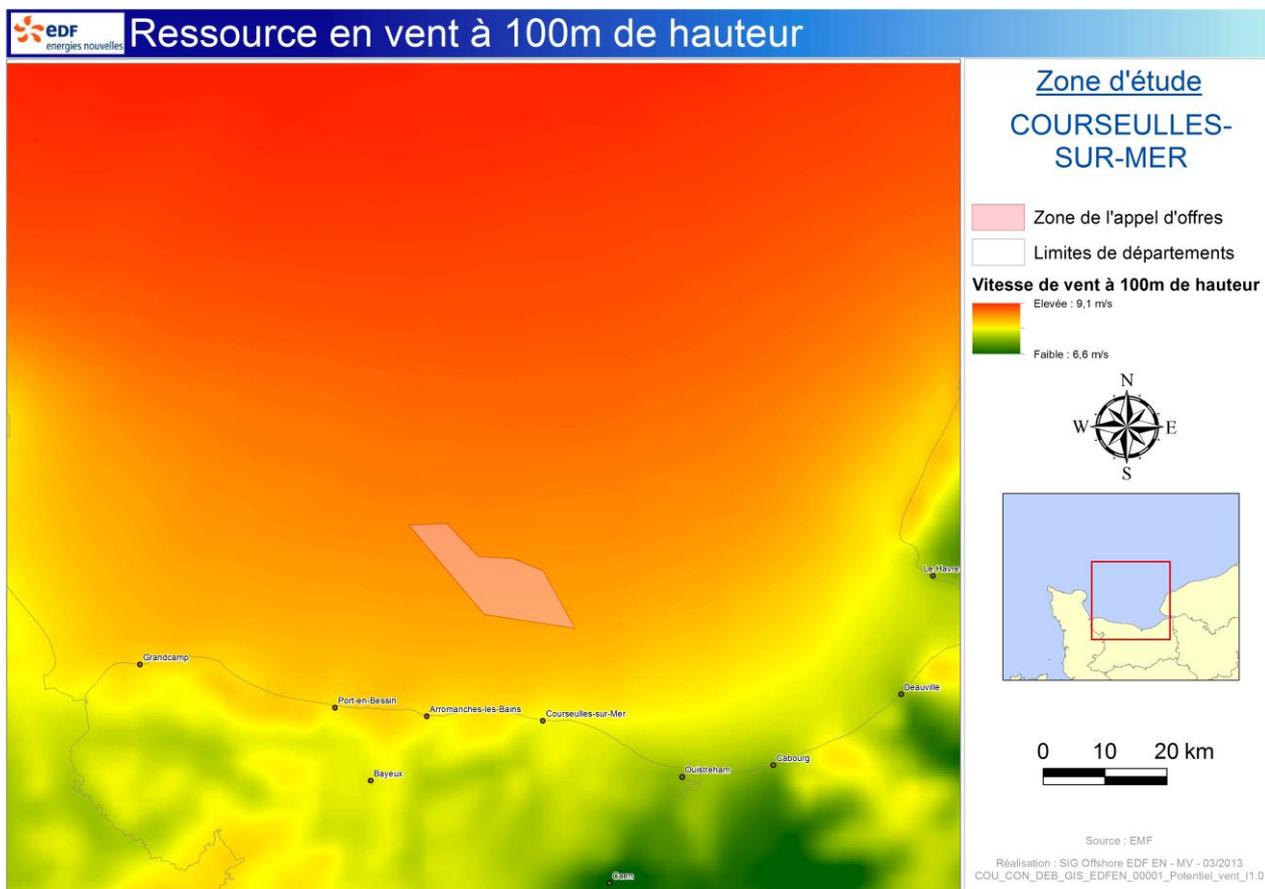


Figure 8 : ressource en vent à 100 m de hauteur (EDF EN, 2013)

6. EVALUATION DE LA PRODUCTION

6.1. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE L'AEROGENERATEUR

La courbe de puissance de l'éolienne ALSTOM Haliade 150 - 6MW est utilisée pour transformer les données de vent en données de production.

6.2. CARACTERISTIQUE DES PERTES TECHNIQUES

Les pertes techniques sont considérées en sortie de génératrice. Après l'application de ces pertes techniques, la production est celle vendue sur le réseau électrique.

Pertes techniques	Description
Effet de sillage (interne)	A l'arrière d'une éolienne, un sillage se développe. Dans ce sillage, la vitesse moyenne du vent est diminuée car l'éolienne a capté une partie de l'énergie cinétique du vent naturel et l'intensité de turbulence est augmentée. Les pertes par effet de sillage sont donc directement liées à la distance séparant les éoliennes.
Indisponibilité des éoliennes	Pertes occasionnées par les périodes d'indisponibilité dues aux opérations de maintenance préconisées par ALSTOM et par la réparation des pannes
Indisponibilité intra-parc	Pertes résultantes des périodes d'indisponibilité des éléments en aval de l'éolienne : poste électrique, réseau électrique interne
Indisponibilité réseau de transport	Pertes résultantes de l'indisponibilité du réseau électrique auquel sera raccordé le parc
Efficacité électrique	Pertes électriques entre la génératrice et le compteur de la sous-station électrique : transformateur, autoconsommation, longueur de câbles
Autoconsommation	Pertes liées à la consommation de l'éolienne pour ses auxiliaires de fonctionnement
Hystérésis vent fort	Pertes résultantes des périodes d'arrêt dues à l'hystérésis des phases de découplage/recouplage aux hautes vitesses du vent.
Dégradation de performance	Pertes dues au vieillissement, à la salissure, et à des températures ambiantes hors de la plage de fonctionnement des éoliennes

Figure 9 : Description des pertes techniques

6.3. PRODUCTION ANNUELLE ET FACTEUR DE CHARGE

Au regard des études réalisées par GL Garrad Hassan et Natural Power et des expertises internes, l'électricité produite annuellement sera supérieure à 1 500 GWh/an.

Le facteur de charge est de 38%.

L'ensemble des valeurs indiquées ci-dessus sont susceptibles d'évoluer avec l'acquisition de nouvelles mesures.

7. MESURES COMPLEMENTAIRES ENVISAGEABLES

Afin de qualifier plus précisément le gisement éolien sur le site, l'installation d'une plateforme de mesure in-situ est envisageable.

L'état de l'art actuel consiste à installer un mât de mesure anémométrique. L'utilisation d'un Lidar (*Light Detection and Ranging*)¹ flottant est une possibilité intéressante, mais qui n'est pas encore reconnue par la communauté économique.

Ces nouvelles mesures permettront d'affiner davantage la connaissance du gisement de vent et de préciser les paramètres de dimensionnement des fondations. Le mât de mesure sera conservé pendant toute l'exploitation de la centrale éolienne de manière à assurer le contrôle du bon fonctionnement des éoliennes.

Cette structure s'élèverait à 100 m au-dessus du niveau moyen de la mer, permettant ainsi une mesure du vent à la hauteur du moyeu des éoliennes.



Figure 10 : Exemples de mâts de mesures de vent (FINO3 à g., sur le parc de Horns Rev 1 (DONG Energy) à d.)

¹ *Light Detection and Ranging* ou télédétection par laser, instrument de mesure optique basée sur la réflexion d'impulsions optiques, permettant de déterminer la vitesse et la direction du vent à différentes hauteurs