



# Etude de la ressource en vent

2011

## Sommaire

<b>1. CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE</b>	<b>3</b>
1.1. LE GISEMENT EOLIEN EN FRANCE ET EN EUROPE	3
1.2. L'ETUDE DE LA RESSOURCE EN VENT	5
<b>2. LE PROJET EOLIEN EN MER DE SAINT-NAZAIRE</b>	<b>6</b>
2.1. L'IMPLANTATION DES EOLIENNES	6
<b>3. LE GABARIT MACHINE</b>	<b>6</b>
<b>4. MESURES DE VENT</b>	<b>7</b>
4.1. LE MAT DE MESURE DE VENT	8
4.1. LE LIDAR, TELEDETECTION PAR LASER	10
<b>5. CARACTERISATION DU GISEMENT EOLIEN</b>	<b>11</b>
5.1. MODELISATION DU GISEMENT SUR LE SITE DU PROJET	11
<i>Methodologie commune</i>	11
<i>Modélisation réalisée par Garrad Hassan</i>	11
<i>Modélisation réalisée par Natural Power</i>	11
5.2. QUALIFICATION DU GISEMENT EOLIEN	12
<b>6. EVALUATION DE LA PRODUCTION</b>	<b>13</b>
6.1. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE L'AEROGENERATEUR	13
6.2. CARACTERISTIQUE DES PERTES TECHNIQUES	13
6.3. PRODUCTION ANNUELLE ET FACTEUR DE CHARGE	14
<b>7. MESURES COMPLEMENTAIRES ENVISAGEABLES</b>	<b>15</b>

## Liste des figures

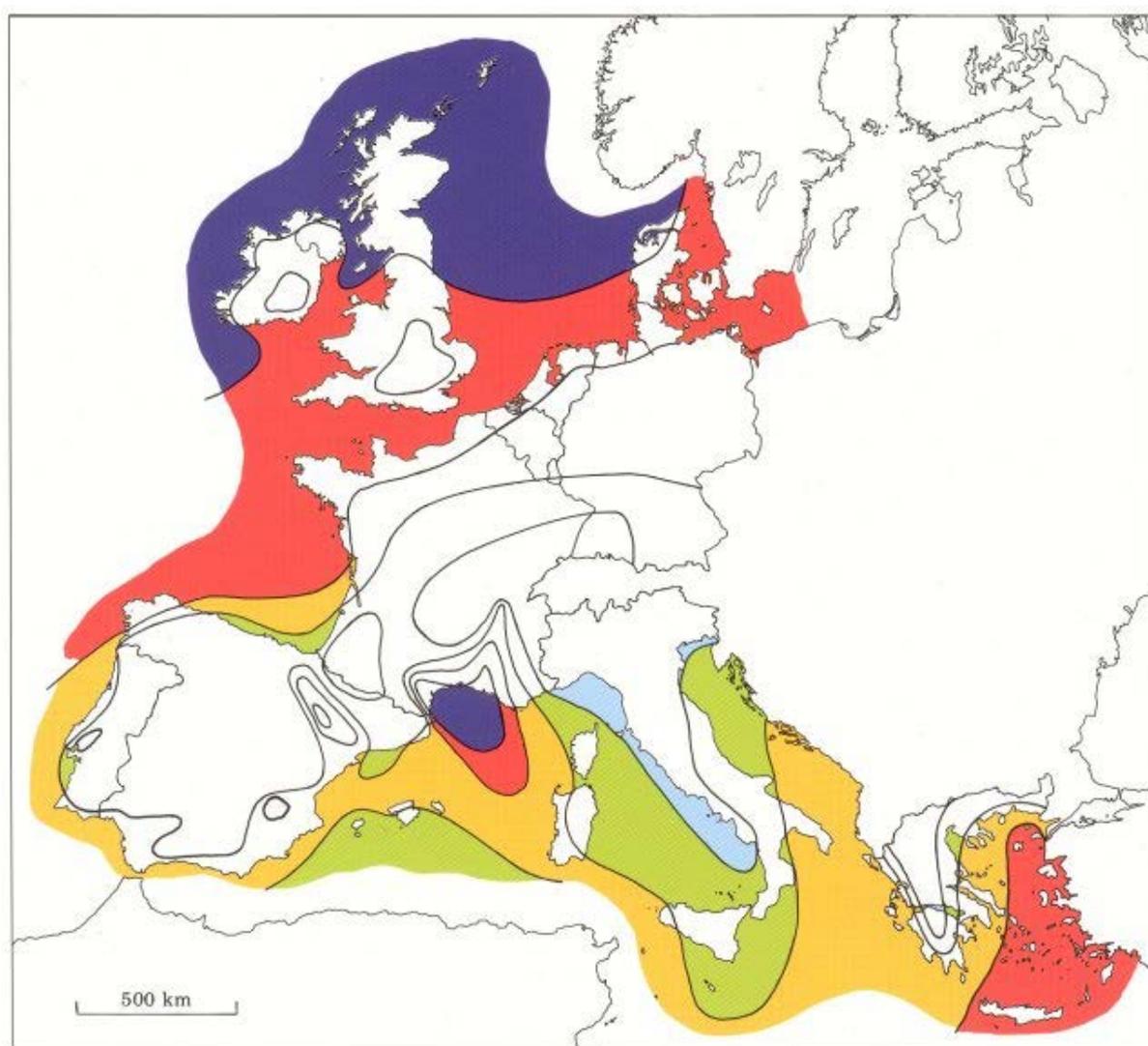
FIGURE 1 : GISEMENT EOLIEN EN MER, EN EUROPE (RISØ, 1989)	3
FIGURE 2 : VITESSE DU VENT A 80 M MODELISEE (SGURR)	4
FIGURE 3 : PLAN D'IMPLANTATION DES EOLIENNES ET DU POSTE ELECTRIQUE (NASS&WIND 2011)	6
FIGURE 4 : CAMPAGNES DE MESURES DE VENT REALISEES POUR LE PROJET DE SAINT-NAZAIRE	7
FIGURE 5 : LOCALISATION DES MATS DE MESURE ET DU LIDAR DU PROJET DE SAINT-NAZAIRE	8
FIGURE 6 : INSTRUMENTATION TYPE D'UN MAT DE MESURE DE VENT (EDF EN, 2011)	9
FIGURE 7 : PRINCIPE DE MESURE D'UN LIDAR (EDF EN, 2013)	10
FIGURE 8 : ROSE DES VENTS DU PROJET DE SAINT-NAZAIRE A 100 M DE HAUTEUR (NATURAL POWER, 2011)	12
FIGURE 9 : RESSOURCE EN VENT A 100 M DE HAUTEUR (EDF EN, 2013)	13
FIGURE 10 : DESCRIPTION DES PERTES TECHNIQUES	14
FIGURE 11 : MATS DE MESURES DE VENT : FINO3 A GAUCHE, SUR LE PARC DE HORNS REV 1 (DONG ENERGY) A DROITE	15

## 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 les plus potentiels, suivis de la façade Manche-Mer du Nord et Atlantique-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
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, en Europe (Risø,1989).

La carte ci-dessous précise le gisement éolien en mer au large des côtes Françaises, à une hauteur de 80mètres au dessus du niveau de la mer.

Le secteur d'étude du projet éolien en mer de Saint-Nazaire figure parmi les secteurs potentiels.

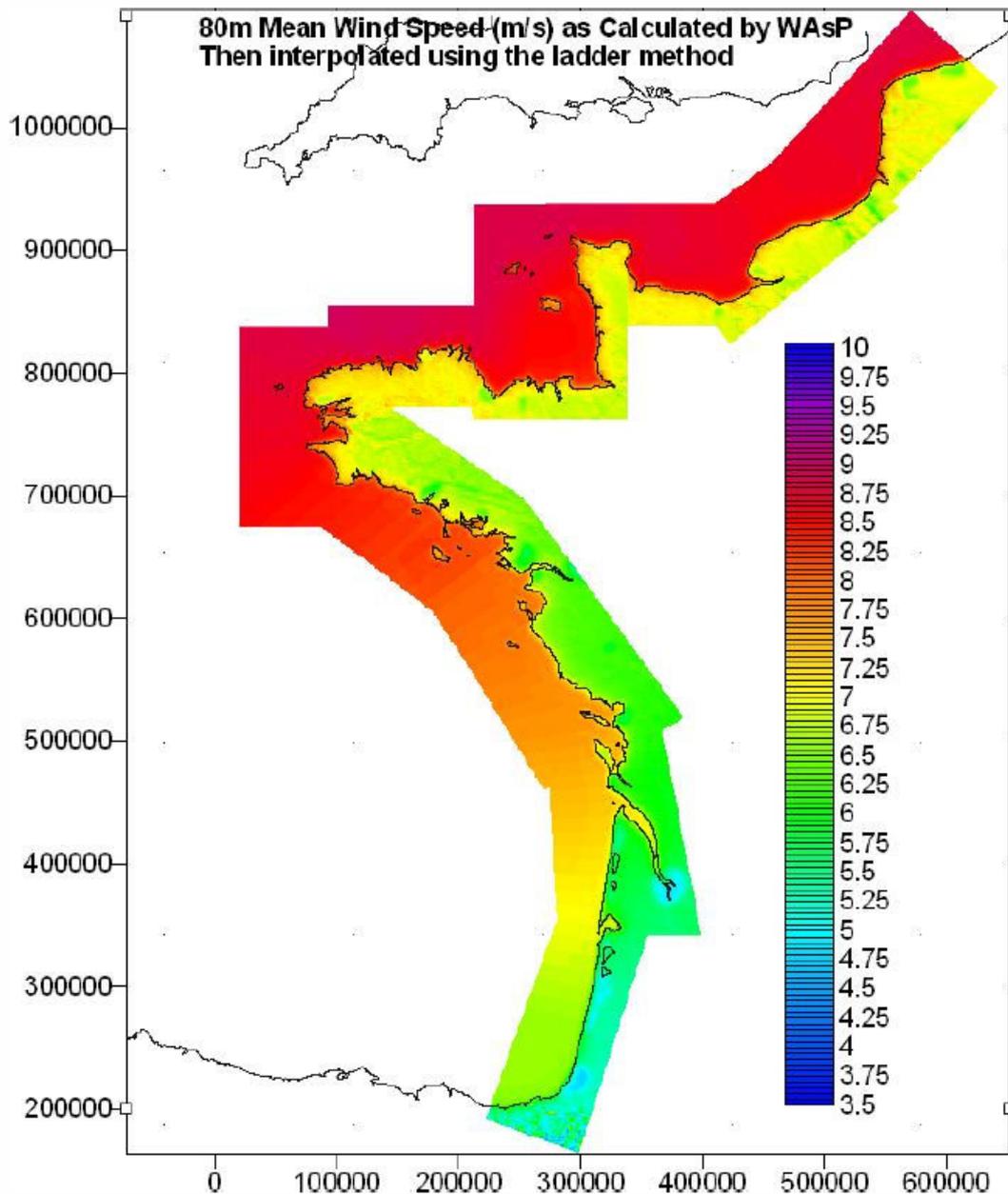


Figure 2 : Vitesse du vent à 80 m modélisée (SGURR)

## 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 de Saint-Nazaire, 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 in situ (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 ;
- 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 Nass&Wind 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 SAINT-NAZAIRE

### 2.1. L'IMPLANTATION DES EOLIENNES

Le projet de Saint-Nazaire se compose de 80 éoliennes pour une capacité totale installée de 480 MW, situé à plus de 12 km de la côte.

L'implantation du parc se décompose en 7 rangées de 7 à 13 éoliennes, avec un espacement de 960 mètres entre les rangées et de 950 mètres entre les éoliennes au sein d'une rangée.

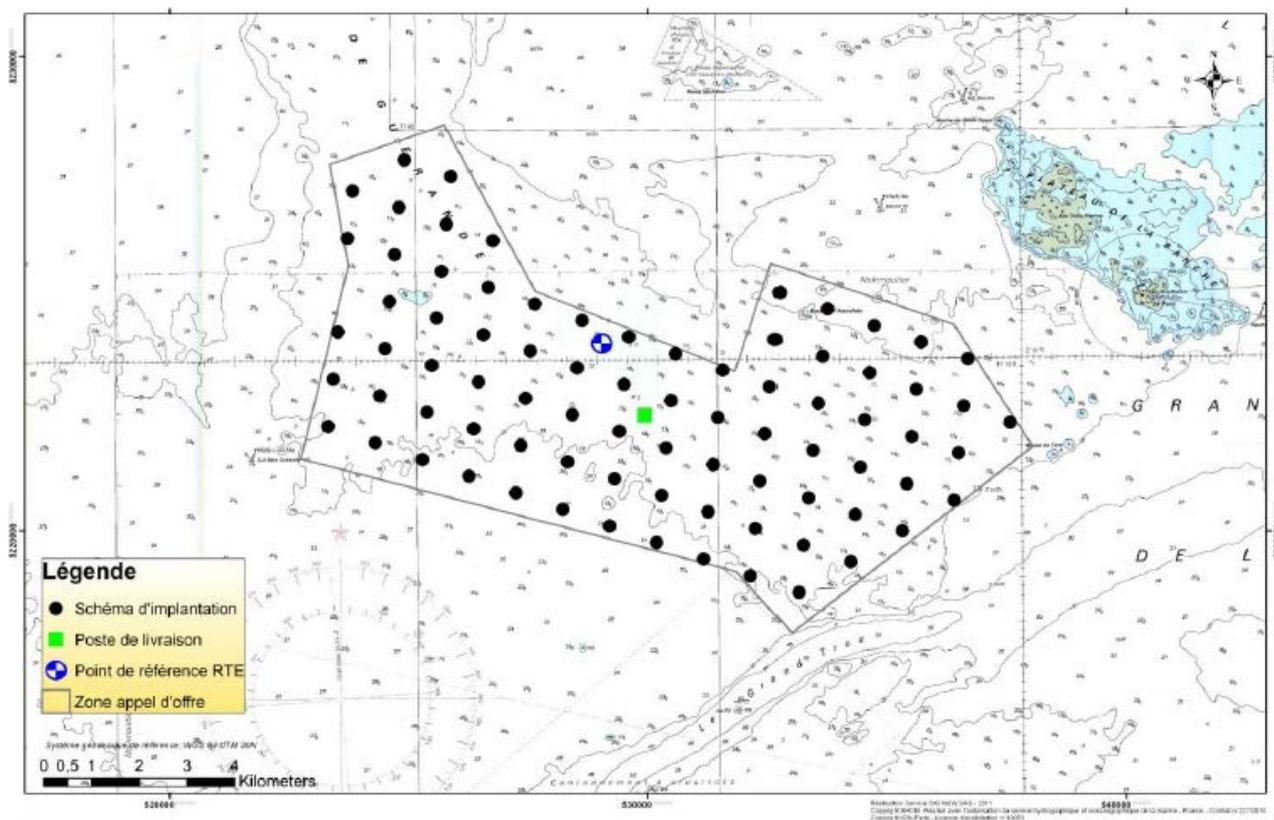


Figure 3 : Plan d'implantation des éoliennes et du poste électrique (Nass&Wind 2011)

## 3. LE GABARIT MACHINE

### CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'EOLIENNE ALSTOM HALIADE

Puissance nominale	6 MW
Hauteur du moyeu du rotor	100 mètres
Diamètre du rotor	150 mètres
Plage de vitesse de rotation du rotor	Entre 4 et 11,5 tours par minute

## 4. MESURES DE VENT

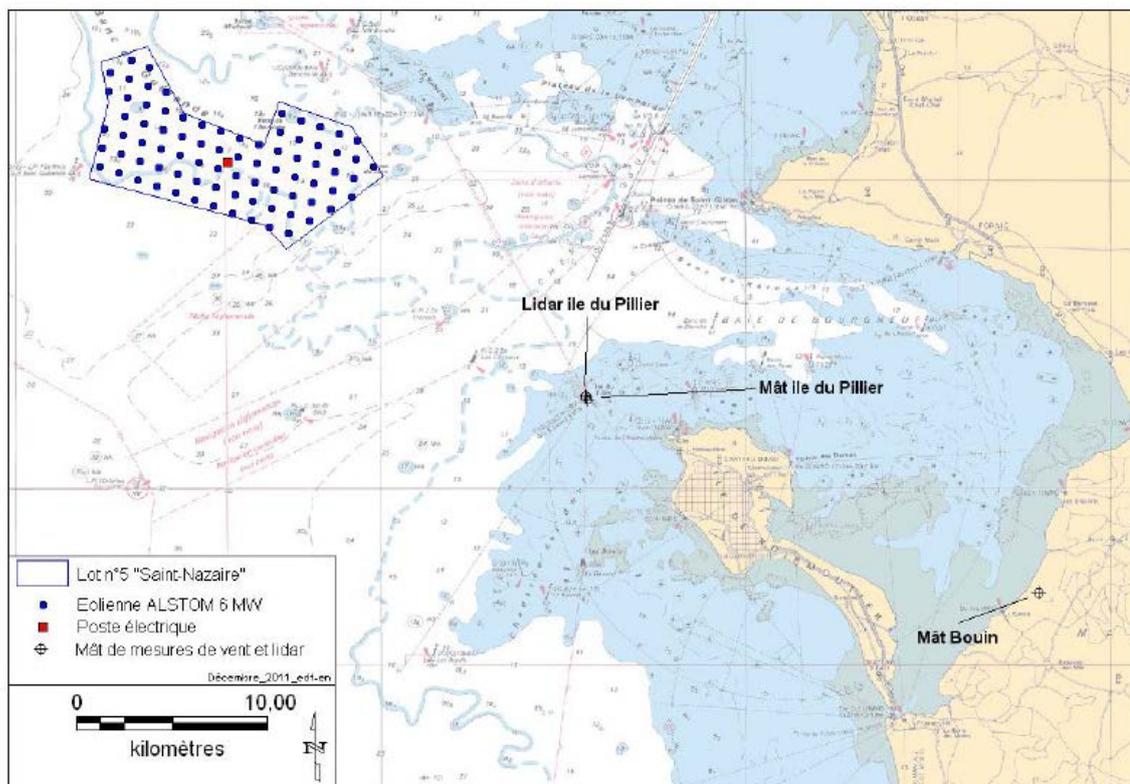
Afin d'estimer au plus près le productible et de limiter les incertitudes, trois campagnes de mesures de vent à proximité du site ont été réalisées, avec l'installation de plusieurs mâts de mesures et d'un Lidar<sup>1</sup>.

Mesures a proximité du site	Période de mesure	Hauteur maximum de mesure au-dessus du sol	Illustration du dispositif mis en œuvre
Mât ile du Pillier	Avril 2004 – Juin 2005	25.1m	
Mât Bouin	Avril 2001 – Octobre 2004	50m	
Lidar ile du Pillier	Depuis septembre 2010	183.8m	

Figure 4 : Campagnes de mesures de vent réalisées pour le projet de Saint-Nazaire

Ces points de mesures ont été positionnés dans des conditions de vent les plus représentatives possible du site. En particulier, **la localisation du lidar sur l'île du Pillier** a été choisie suite à une étude en juin 2010 du bureau d'étude allemand DEWI, qui évalua la variabilité spatiale du vent sur la zone d'implantation des éoliennes. Ce lidar, dernière mesure installée sur le site, a été validé par le bureau d'étude Risø.

<sup>1</sup> *Light Detection and Rangin* 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

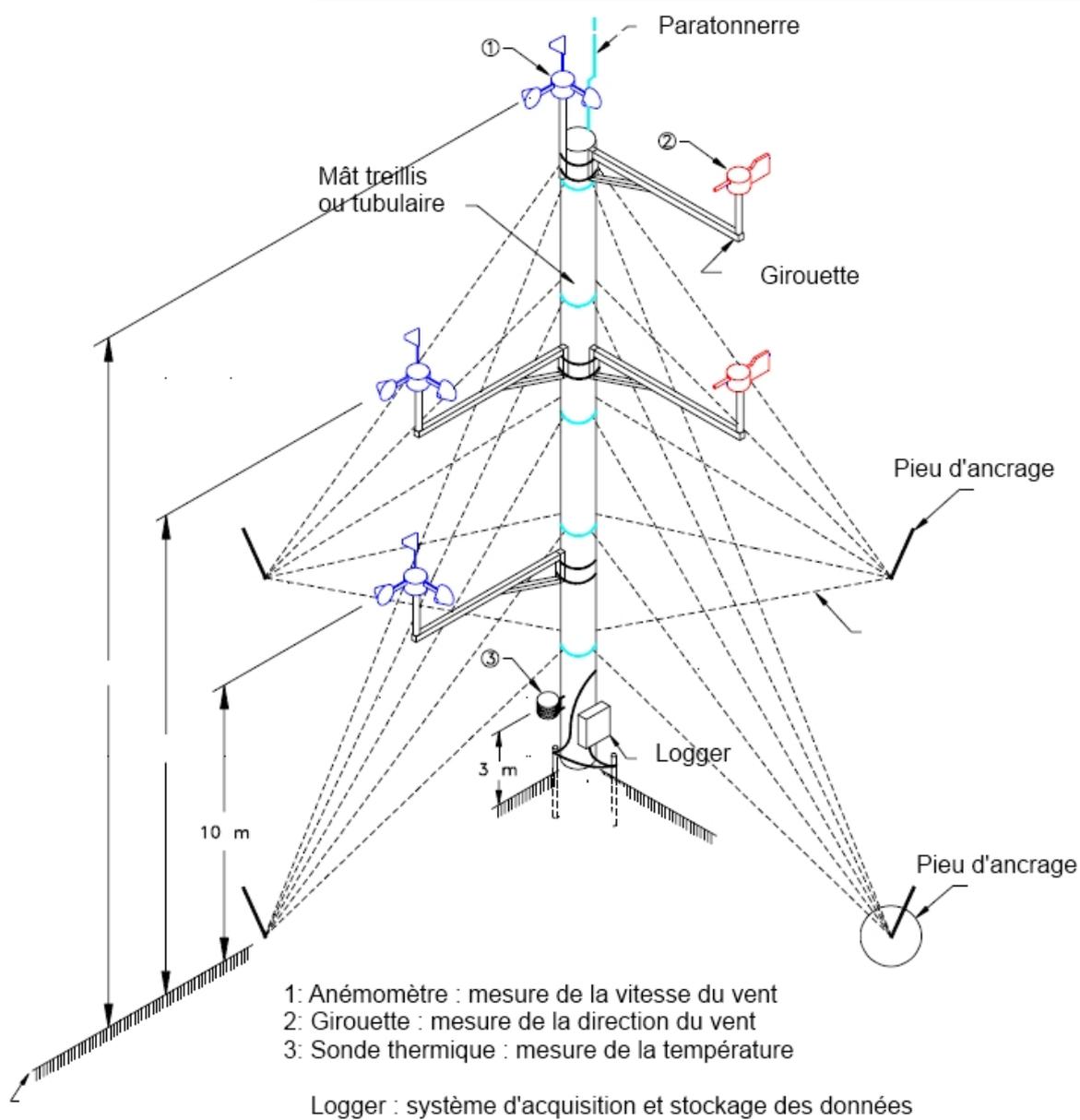


**Figure 5 : Localisation des mâts de mesure et du Lidar du projet de Saint-Nazaire**

#### 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-après 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.



Ce schéma n'est pas à l'échelle

Figure 6 : Instrumentation type d'un mât de mesure de vent (EDF EN, 2011)

#### 4.1. LE LIDAR, TELEDETECTION PAR LASER

Le Lidar (Light Detection and Rangin) 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, l'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 régulièrement les données mesurées par télétransmission.

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

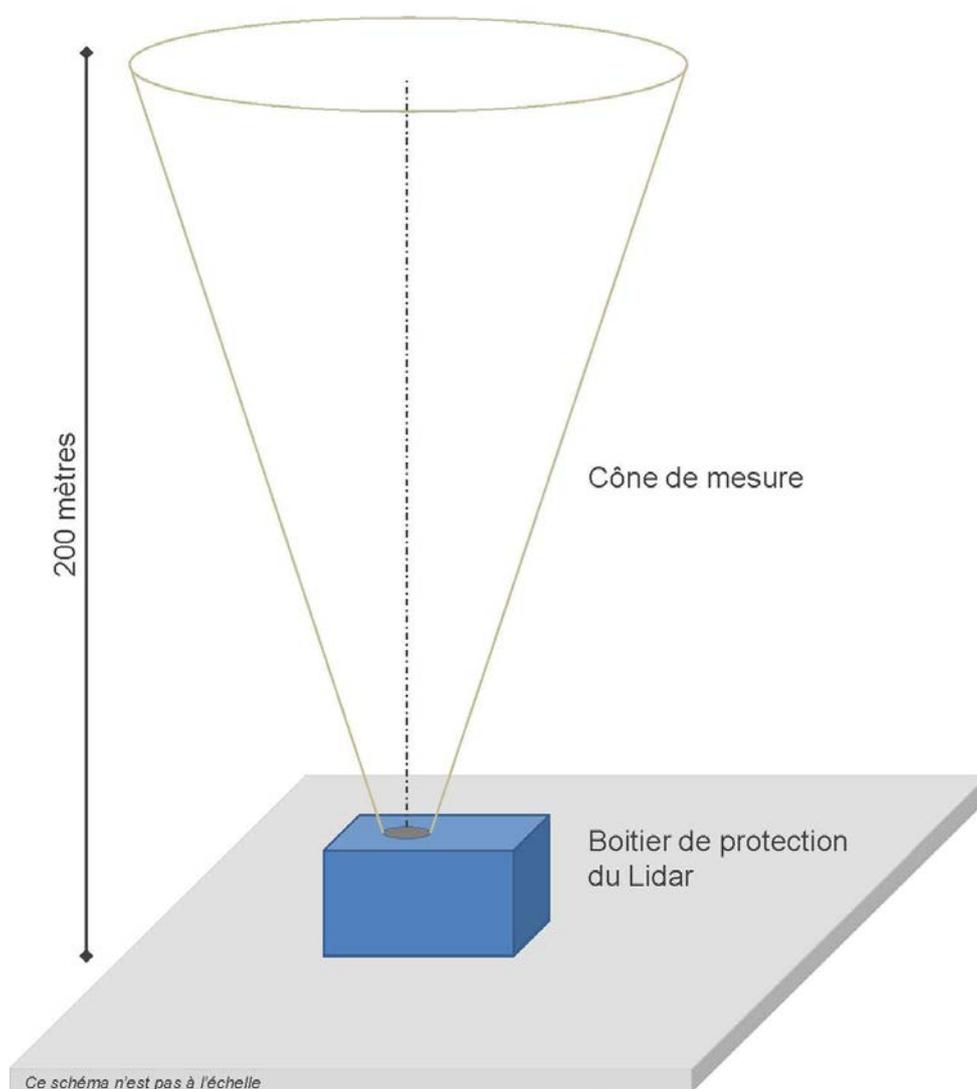


Figure 7 : Principe de mesure d'un Lidar (EDF EN, 2013)

## 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 Saint-Nazaire 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 géostrophiques<sup>1</sup>. 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 500m. 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 vent<sup>2</sup>. Les données de vent mesurées sur site sont calibrées à l'aide d'un modèle micro-échelle afin de tenir

---

<sup>1</sup> base de données utilisées : NCEP/NCAR ReAnalysis 2

<sup>2</sup> CFSR, 31 ans de données

compte des éventuels effets locaux. Ces mesures filtrées sont comparées aux résultats du modèle méso-échelle afin de les calibrer.

## 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 est de 8,5 mètres par seconde (30,6 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.

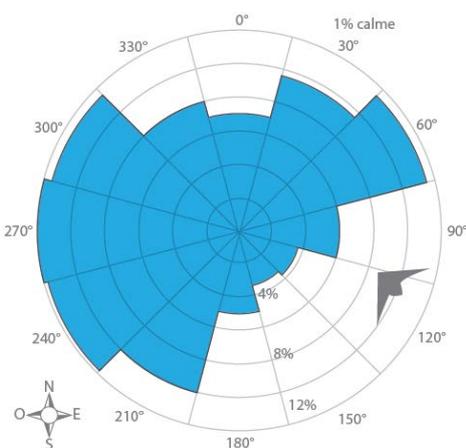


Figure 8 : rose des vents du projet de Saint-Nazaire à 100 m de hauteur (Natural Power, 2011)

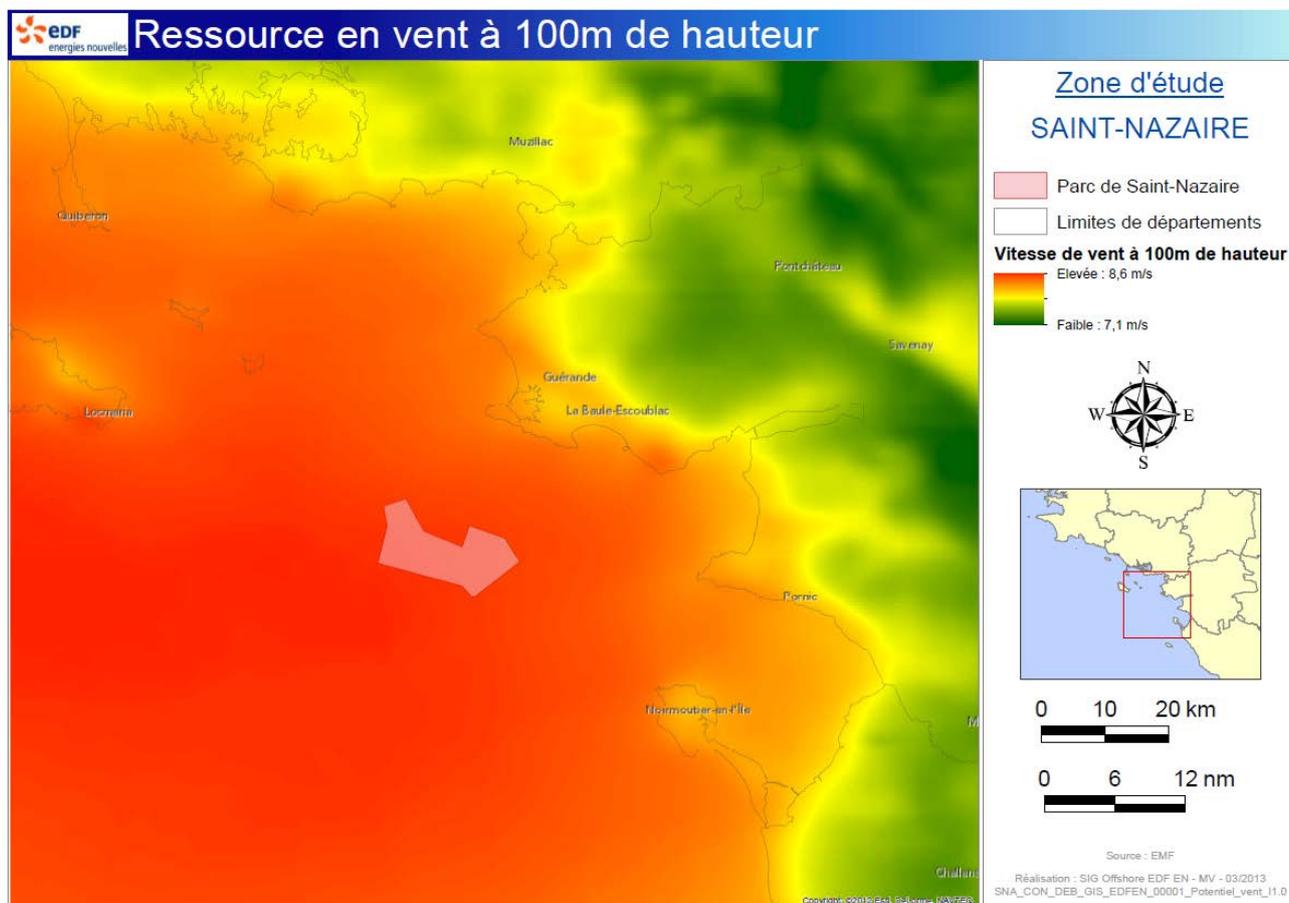


Figure 9 : ressource en vent à 100 m de hauteur (EDF EN, 2013)

## 6. EVALUATION DE LA PRODUCTION

### 6.1. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE L'AEROGENERATEUR

La courbe de puissance de l'éolienne ALSTOM Haliade-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 tourbillonnaire 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.
Effet de sillage (externe)	Effet de sillage dû aux autres centrales éoliennes à proximité
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 ....
Auto-consommation	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 ou à des dépôts de givre sur les pales

Figure 10 : 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 **1 700 GWh/an**.

La durée annuelle de fonctionnement en équivalent pleine puissance est de l'ordre de 3600 heures. Cela représente **un facteur de charge de plus de 40%**, contre 23% en moyenne pour une éolienne terrestre.

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 serait envisageable.

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

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

La structure de 10 tonnes, fichée sur un monopieu de 2 m de diamètre, 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 11 : Mâts de mesures de vent : FINO3 à gauche, sur le parc de Horns rev 1 (DONG Energy) à droite

---

<sup>1</sup> *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