

Climatologie de visibilité de parcs éoliens fictifs en mer en Bretagne Sud



Version 3.0 du 07/05/2020

Client :

**Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES)
Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC)**



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE**
*Liberté
Égalité
Fraternité*

Étude réalisée par Météo France



Table des matières

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Contexte..... | 3 |
| 2 | Éléments techniques..... | 3 |
| 2.1 | Définition et calcul de la visibilité..... | 4 |
| 2.2 | Méthodologie..... | 6 |
| 2.3 | Présentation des données AROME..... | 6 |
| 2.4 | Construction du paramètre de visibilité..... | 7 |
| 2.4.1 | Modalités de calcul de la visibilité en points de grille..... | 7 |
| 2.4.2 | Méthode d'agrégation des visibilités en point de grille..... | 8 |
| 2.5 | Calcul de l'indicateur catégoriel de visibilité..... | 8 |
| 2.6 | Statistiques de visibilité..... | 9 |
| 2.6.1 | Visibilité du parc fictif Est de Belle-Île-en-Mer..... | 10 |
| 2.6.2 | Visibilité du parc fictif Nord de Belle-Île-en-Mer..... | 12 |
| 2.6.3 | Visibilité du parc fictif Sud-Est de Belle-Île-en-Mer..... | 14 |
| 2.6.4 | Synthèse de la visibilité depuis Belle-Île..... | 16 |
| 2.6.5 | Visibilité du parc fictif Nord depuis Groix..... | 17 |
| 2.6.6 | Synthèse de la visibilité depuis Groix..... | 19 |
| 2.6.7 | Visibilité du parc fictif Est de la presqu'île de Quiberon..... | 19 |
| 2.6.8 | Visibilité du parc fictif Nord de la presqu'île de Quiberon..... | 21 |
| 2.6.9 | Synthèse de la visibilité depuis la presqu'île de Quiberon..... | 23 |
| 3 | Conclusions de l'étude..... | 24 |

1 Contexte

Dans le cadre de la préparation du débat public pour les projets éoliens en mer au large de la Bretagne Sud, la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) du Ministère de la Transition écologique et solidaire fait réaliser des photomontages de parcs éoliens en mer fictifs. En complément de ces photomontages, la DGEC a commandé à Météo-France une étude de climatologie de visibilité des parcs éoliens en mer fictifs (statistiques de vue des parcs fictifs).

La DGEC a retenu trois points côtiers pour cette étude :

- Belle-Ile / Phare de Goulphar,
- Groix / Port de Locmaria,
- Quiberon / Beg er Goalenec

Météo-France étudie la visibilité des éoliennes les plus proches des parcs fictifs de ces points côtiers, à savoir :

- pour Belle-Ile : l'éolienne la plus proche pour les parcs fictifs direction Est, Nord, Sud-Est
- pour Groix : l'éolienne la plus proche pour le parc fictif direction Nord
- pour Quiberon : l'éolienne la plus proche pour les parcs fictifs direction Est et Nord.

Cette étude n'est pas une étude d'observation. Il s'agit d'une étude de climatologie de visibilité.

Attention : l'ensemble des éléments et données fournis à la DGEC dans ce document ne peut être utilisé que dans le cadre du débat public. Toute utilisation hors de ce cadre devra être soumise à l'accord préalable de la DGEC et de Météo-France.

2 Éléments techniques

Dans ce chapitre, nous allons détailler les éléments physiques permettant d'estimer la visibilité atmosphérique. En préambule aux équations physiques qui seront décrites, il convient de retenir les éléments suivants.

La visibilité horizontale est plus ou moins altérée en fonction de la perte d'énergie du rayonnement visible. Elle est très dépendante des conditions atmosphériques (température, humidité, taille et concentration des particules présentes dans l'air d'origines diverses...). Au gré des situations météorologiques la zone considérée connaît des conditions de visibilité très diverses, tantôt excellentes (jusqu'à quelques dizaines de kilomètres) et parfois beaucoup plus médiocres.

Dans l'atmosphère, la visibilité est liée à la concentration de particules qui sont composées, d'une part, de fines gouttelettes d'eau (par exemple la brume ou le brouillard) ou d'aérosols (particules salines au-dessus de l'océan) et, d'autre part, de pollutions liées aux activités humaines ou sables d'origine désertique (très rarement sur la zone considérée dans la présente étude).

La visibilité peut être associée, sur une distance horizontale, au cumul de la transparence de l'atmosphère sur un segment, qui se calcule à partir de la somme des épaisseurs optiques (degré de transparence de l'atmosphère) entre chaque point composant ce segment.

Les données utilisées sont extraites du modèle AROME de Météo France. Il permet d'estimer les paramètres physiques nécessaires au calcul de la visibilité, sur les points du segment horizontal entre le point côtier choisi et le parc éolien en mer fictif. On peut donc en déduire une estimation fiable de la visibilité du parc depuis la côte à partir de statistiques sur établies sur une durée représentative de 10 années. Les aérosols ne sont pas intégrés dans les calculs car indisponibles dans le jeu de données utilisé.

Cette méthode a l'avantage d'être reproductible de manière homogène, sur tous les points maritimes de France métropolitaine, à contrario de l'utilisation de données de visibilités mesurées qui sont trop dépendantes des conditions locales de mesure, en particulier sur les sémaphores.

2.1 Définition et calcul de la visibilité

La définition de la visibilité peut varier en fonction des usages. En aéronautique par exemple, la portée visuelle de piste est privilégiée. **Dans cette étude, nous nous intéresserons à la visibilité météorologique telle que définie par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM – Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques).**

La visibilité météorologique de jour est définie comme la plus grande distance à laquelle un objet noir, de dimensions appropriées¹, situé au sol, peut être vu et identifié sur le fond du ciel à l'horizon.

La visibilité météorologique de nuit est définie comme la plus grande distance à laquelle un objet noir, de dimensions appropriées, situé au sol pourrait être vu et identifié si l'éclairage général augmentait jusqu'à atteindre l'intensité normale en lumière du jour (OMM, 1992a; 2003).

Quand elle n'est pas mesurée directement, la visibilité peut se calculer à partir du type, de la taille et de la concentration des gaz et particules présents dans l'atmosphère. Ceux-ci impactent la transparence des couches traversées.

La visibilité peut être vue comme la transparence de l'air. Plus la transparence de l'air est importante, plus la visibilité sera élevée. À l'inverse, plus l'air est opaque, plus la visibilité sera faible.

La lumière est soit absorbée soit diffusée par les particules au cours de son trajet. Cette perte d'énergie du rayonnement traversant l'atmosphère est caractérisée par le coefficient d'extinction (β) par type de particule (gouttelettes, neige, aérosol...).

La définition de la visibilité est la suivante :

$$V_{\text{totale}} = \frac{-\ln(\varepsilon)}{\beta_{\text{total}}}$$

Cette équation exprime que plus la perte de transparence (β) sera importante, plus la visibilité V sera faible.

avec $\varepsilon = 0,05$ seuil de contraste selon l'OMM, l'OACI (Organisation de l'aviation civile internationale) et la CIE (Commission Internationale de l'Éclairage).

¹ Il s'agit de la taille qui permet de distinguer un objet à l'œil nu en l'absence de phénomènes particuliers affectant la visibilité (brouillard, pluie, neige, etc.). Cette taille doit être suffisamment grande pour permettre de distinguer cet objet s'il est situé au-delà de l'horizon. En effet, en raison de la rotondité de la terre, tout objet de dimensions trop faibles, situé à plus de 4789 mètres (au-delà de l'horizon), sera masqué pour un observateur de 1,80 m.

Il en découle la notion d'épaisseur optique (T) définie comme étant le produit du coefficient d'extinction par la distance (d) qui sépare l'observateur de la source lumineuse ou d'un objet.

$$T = \beta_{total} \times d$$

L'épaisseur optique T est donc proportionnelle à la distance parcourue et à la perte d'énergie lumineuse (β)

d étant la distance totale entre le point de vue et la cible, elle est égale à :

$d = \Delta Z_i \times n$ avec ΔZ_i qui correspond à l'écartement entre 2 points et n le nombre de points de grille sur la trajectoire.

d'où
$$T = \beta_{total} \times \Delta Z_i \times n$$

L'épaisseur optique T peut donc être calculée localement au point Zi ou sur un trajet entre un point et un autre

Par ailleurs l'épaisseur optique totale peut être définie comme la somme des épaisseurs optiques en chaque point de grille i d'où :

$$T = \sum \beta_i \times \Delta Z_i = \Delta Z_i \times \sum \beta_i$$

En rapprochant les deux équations, on peut donc écrire :

$$T = \Delta Z_i \times \sum \beta_i = \beta \times \Delta Z_i \times n$$

Par simplification

$$\beta_{total} = \frac{(\sum \beta_i)}{n}$$

La perte d'énergie lumineuse (β) peut donc être aussi calculée le long d'un trajet en sommant ses valeurs sur chaque point i avec un total de n points (soit un trajet)

Par ailleurs la visibilité V_i en un point de grille est définie de la façon suivante :

$$V_i = \frac{-\ln(\varepsilon)}{\beta_i} \text{ ou } \beta_i = \frac{-\ln(\varepsilon)}{V_i} \text{ donc } \sum \beta_i = \sum \frac{-\ln(\varepsilon)}{V_i}$$

Dans le cas où l'on dispose de plusieurs points de mesure (n) sur un axe, il est possible de calculer une visibilité totale sur cet axe, à partir de la somme horizontale des épaisseurs optiques, ce qui équivaut à définir la visibilité totale par la relation suivante :

$$V_{totale} = \frac{-\ln(\varepsilon)}{\beta_{total}} = \frac{-\ln(\varepsilon)}{\sum \frac{\beta_i}{n}} = \frac{-\ln(\varepsilon) \times n}{\sum \frac{-\ln(\varepsilon)}{V_i}} = \frac{n}{\sum \frac{1}{V_i}}$$

On montre ici que la visibilité totale peut être, après quelques transformations mathématiques, calculée à partir de la somme de la valeur de visibilité en chaque point i d'un segment de n points régulièrement espacés sur l'horizontale.

2.2 Méthodologie

Afin de répondre à la demande, Météo-France a établi une climatologie des conditions de visibilité grâce à la construction d'un paramètre de visibilité sur mer. Ce paramètre a été calculé à partir de données horaires calculées sur les différents points d'une grille fictive du modèle atmosphérique AROME. Il s'agit d'un modèle régional à maille très fine (2,5 km) qui fournit des prévisions atmosphériques détaillées sur la France et permet de prendre en compte des phénomènes de petite échelle. Les archives sont utilisées pour des études climatologiques.

Les données du modèle AROME sur la période 2009-2018 ont été extraites pour la présente étude.

À l'heure actuelle, la présence d'aérosols n'est pas prise en compte dans la modélisation AROME, même si la relation entre la présence d'aérosols dans les basses couches de l'atmosphère et la réduction de visibilité est clairement démontrée. Dans la présente étude, ce sont surtout les aérosols d'origine marine, les particules de sels, qui pourraient être concernés. Les embruns peuvent en effet être à l'origine de baisses de visibilités sur mer mais n'ont pas pu être pris en compte dans les calculs statistiques qui suivent.

Dans la présente étude, la visibilité résultant des calculs peut donc être dans certains cas (présence d'embruns et d'aérosols marins) surestimée par rapport à l'observation.

2.3 Présentation des données AROME

Les calculs de visibilité ont été réalisés à partir des données du modèle atmosphérique à haute résolution AROME.

L'étude s'appuie sur un extrait de la base de données horaires 20 ans (2000-2019) AROME construite à partir d'un rejeu du modèle sur la période (2000-2010) et de la production opérationnelle AROME (2010-2019). Les données atmosphériques de concentration en particules ont été extraites de cette base AROME sur la période 2009-2018.

Les variables d'état du modèle pour la partie atmosphérique sont les composantes horizontales du vent, la vitesse verticale, l'écart à la pression hydrostatique, la température, les humidités spécifiques de la vapeur d'eau et de cinq catégories d'hydrométéores (gouttelettes liquides, cristaux de glace, pluie, neige, grésil) et l'énergie cinétique turbulente sous-maille. Ceci permet une représentation fine des processus microphysiques. Le transport dans la couche limite repose sur un schéma de turbulence (Énergie Cinétique turbulente pronostique TKE [Cuxart et al., 2000] et longueur de mélange [Bougeault and Lacarrere, 1989]) et sur un schéma spécifique représentant les thermiques secs et humides.

Les variables micro-physiques d'intérêt pour l'étude sont :

- CLWC Contenu en eau liquide du nuage en kg kg⁻¹
- CIWC Contenu en glace du nuage en kg kg⁻¹
- RC Contenu en eau de pluie du nuage en kg kg⁻¹

- SC Contenu en eau sous forme de neige du nuage en kg kg-1
- GC Contenu en eau sous forme de graupel (toutes les espèces espèce fortement givrées depuis le grésil jusqu'à la grêle) du nuage en kg kg-1

L'ensemble de ces paramètres physiques sont reconstitués par le modèle AROME en chaque point de grille. Ils permettent de prendre en compte l'ensemble des éléments météorologiques qui peuvent altérer la visibilité horizontale (à l'exception des aérosols : particules solides en suspension comme indiqué).

2.4 Construction du paramètre de visibilité

2.4.1 Modalités de calcul de la visibilité en points de grille

Le paramètre visibilité est calculé en sortie du modèle AROME. Il s'agit d'un paramètre calculé à partir des données horaires brutes du modèle. Le paramètre visibilité a fait l'objet d'une validation par comparaison avec des données observées par visibilimètre (instrument de mesure de la visibilité). La cohérence entre les prévisions et les observations a permis d'intégrer ce paramètre dans les calculs quotidiens du modèle.

Les nuages et les précipitations font l'objet de calculs distincts dans le modèle AROME avec des paramétrisations différentes. Le calcul de visibilité qui en découle est donc lui aussi scindé en 2 parties.

- un calcul lié aux hydrométéores (précipitations) : le calcul donne une VISIHYDRO ;
- un calcul lié aux nuages (brouillard) : le calcul donne une VISICLD.

Les niveaux du modèle ont été sélectionnés afin de couvrir la visibilité au niveau de la base de l'éolienne (niveau 20m) et au niveau de la partie haute de l'éolienne (niveau 100m).

Ci-dessous sont présentées les équations qui servent de base au calcul de VISICLD et de VISIHYDRO. La première visibilité dépend du liquide nuageux et de l'eau glacée, la seconde de la pluie, de la neige et du graupel (toutes les espèces espèce fortement givrées depuis le grésil jusqu'à la grêle).

$$VISICLD = \frac{-\ln 0.05}{\beta_{cld} + \beta_{ice}}$$

$$\beta_{cld} = A \cdot CLWC^B \cdot \exp^{C \cdot \log(CLWC)^2} \cdot \exp^{D \cdot \log(CLWC)^3}$$

A,B,C,D sont des coefficients dépendants de la force du vent, établis par régression statistique.

$$\beta_{ice} = 163,9 \cdot CIWC^{1,0}$$

$$VISIHYD = \frac{-\ln 0.05}{\beta_{rain} + \beta_{snow} + \beta_{graupel}}$$

$$\beta_{rain} = 2,5 \cdot RC^{0,75}$$

$$\beta_{snow} = 10,4 \cdot SC^{0,78}$$

$$\beta_{\text{graupel}} = 2,4 \cdot GC^{0,78}$$

Dans ces équations, on prend donc en compte les altérations de visibilité (β) liées aux gouttelettes d'eau en suspension (de loin les plus fréquentes sur la zone considérée) et aux phénomènes d'eau sous forme solide en suspension (très peu fréquentes cependant sur la zone).

2.4.2 Méthode d'agrégation des visibilités en point de grille

La climatologie a été réalisée sur les trajectoires entre les points côtiers indiqués aux §1 et les parcs éoliens fictifs situés entre 16 et 34 km de la côte. Sur cette trajectoire, tous les points de grille du modèle ont été extraits afin de représenter l'intégralité de la trajectoire. La visibilité totale a ainsi été calculée en direction du parc fictif et chaque fois comparée à la distance entre le point de vue et le parc fictif.

Ceci a ainsi permis à Météo-France de déterminer en chaque point source si le parc fictif sera ou non visible à partir du point vue côtier.

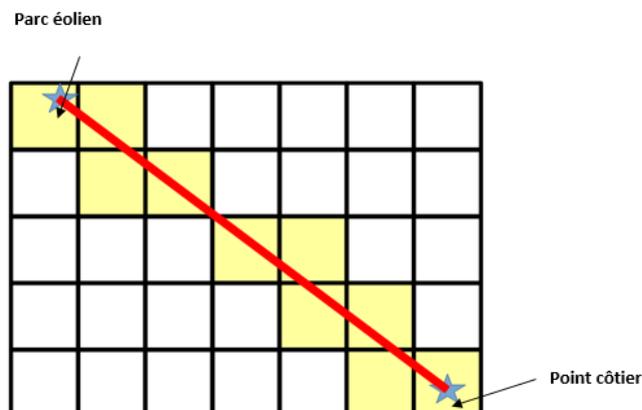
Les distributions climatologiques de ces classes sont alors analysées par mois, année, heure, pour chaque couple « point côtier/parc éolien fictif » .

La plage horaire est limitée à la journée pour les heures comprises entre 06h00 UTC et 21h00 UTC.

2.5 Calcul de l'indicateur catégoriel de visibilité

À partir des informations déterministes de visibilité par points de grille (voir calcul ci-dessus) nous avons calculé un indicateur catégoriel (c'est-à-dire soit « visible », soit « non visible ») de la visibilité du parc éolien fictif. Pour cela, Météo-France a intégré la visibilité des points de grille le long de la trajectoire entre le point côtier et l'éolienne la plus proche du parc éolien fictif comme représenté sur la figure ci-dessous. Le parc éolien fictif est considéré comme visible si la visibilité au point source est supérieure à la distance séparant le point côtier du parc éolien fictif.

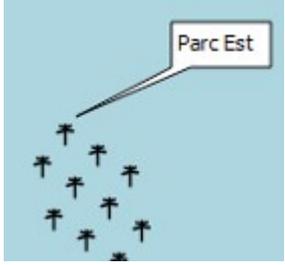
Météo-France fait l'hypothèse d'isotropie de la visibilité au sein de la maille.



2.6 Statistiques de visibilité

Afin de calculer la visibilité en direction du parc éolien fictif, nous avons utilisé les données du modèle AROME à 20 et 100 mètres de hauteur. La visibilité a été calculée le long d'un axe compris entre la côte et l'éolienne la plus proche du parc fictif considéré en sélectionnant un point tous les 2,5 km. La méthodologie décrite précédemment a ensuite été appliquée pour chaque binôme « point côtier/parc éolien fictif » pour chaque heure dans le créneau 6h - 21h UTC et chaque jour de l'année pour la période 2009-2018. L'ensemble de ces données de fréquence a ensuite permis de calculer des moyennes de visibilités mensuelles et annuelles. Ces résultats sont présentés ci-après sous forme d'histogrammes et par trimestre. Ils représentent la fréquence à laquelle le parc fictif **est visible** depuis le continent. Dans ces calculs la courbure de la terre n'est pas prise en compte, seule la visibilité météorologique est renseignée.

Dans les paragraphes qui suivent, les symboles utilisés pour la cartographie sont les suivants :

| | |
|---|--|
|  | Nom et localisation du point de vue |
|  | Matérialisation du parc fictif |
|  | Points entrant dans le calcul de visibilité le long de l'axe entre le point de vue et l'éolienne la plus proche du parc éolien fictif. |

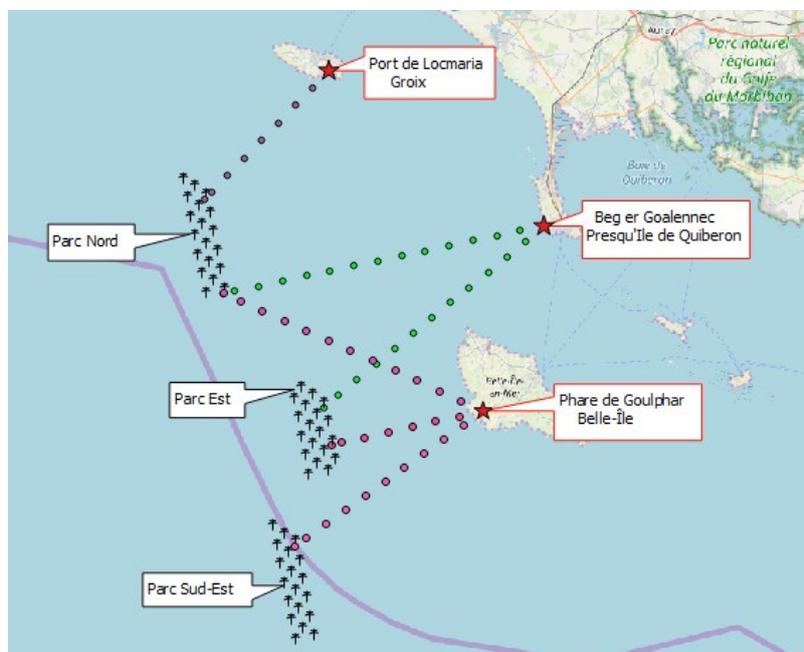
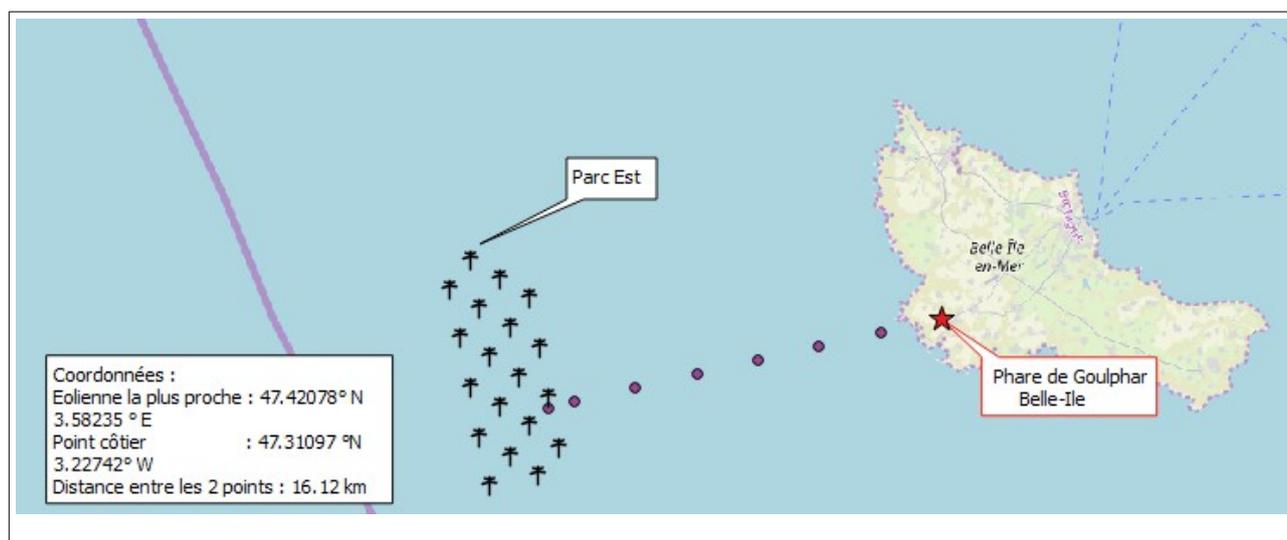
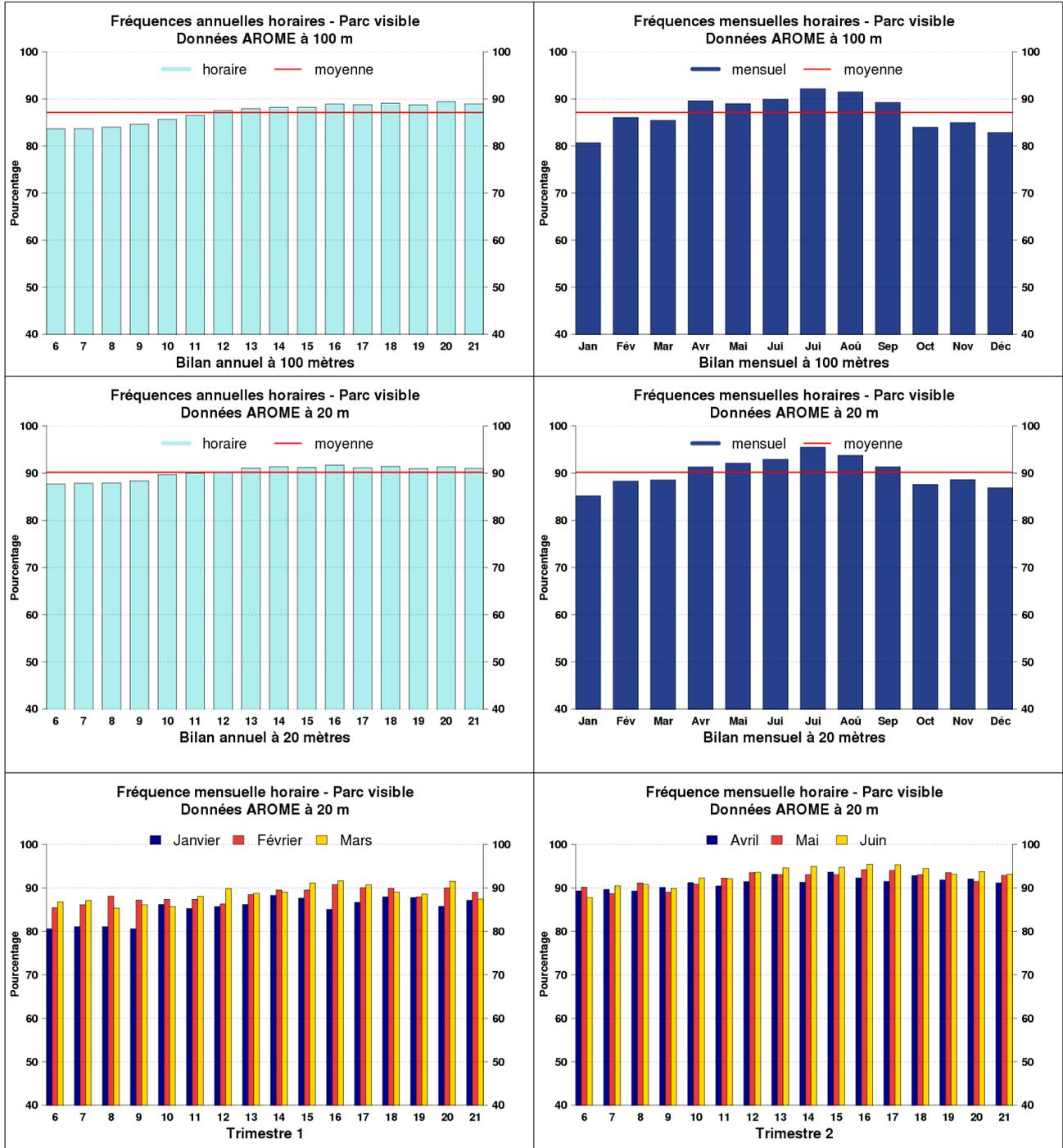
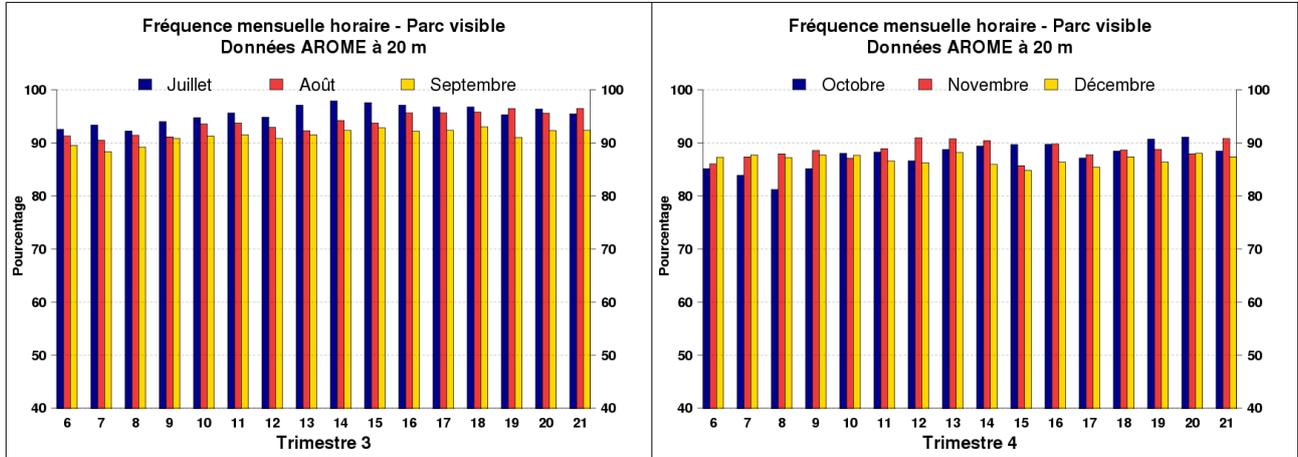


Illustration 1: les différents parcs et points de vues

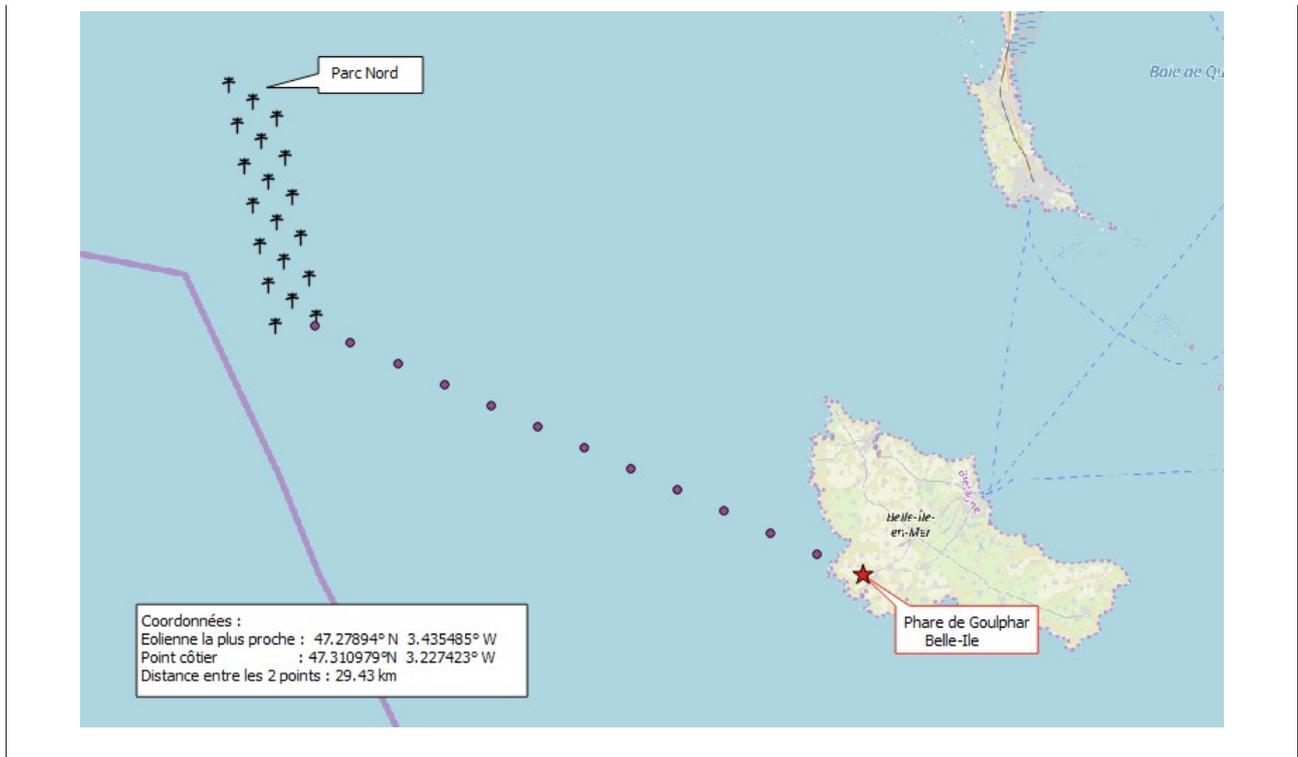
2.6.1 Visibilité du parc fictif Est de Belle-Île-en-Mer



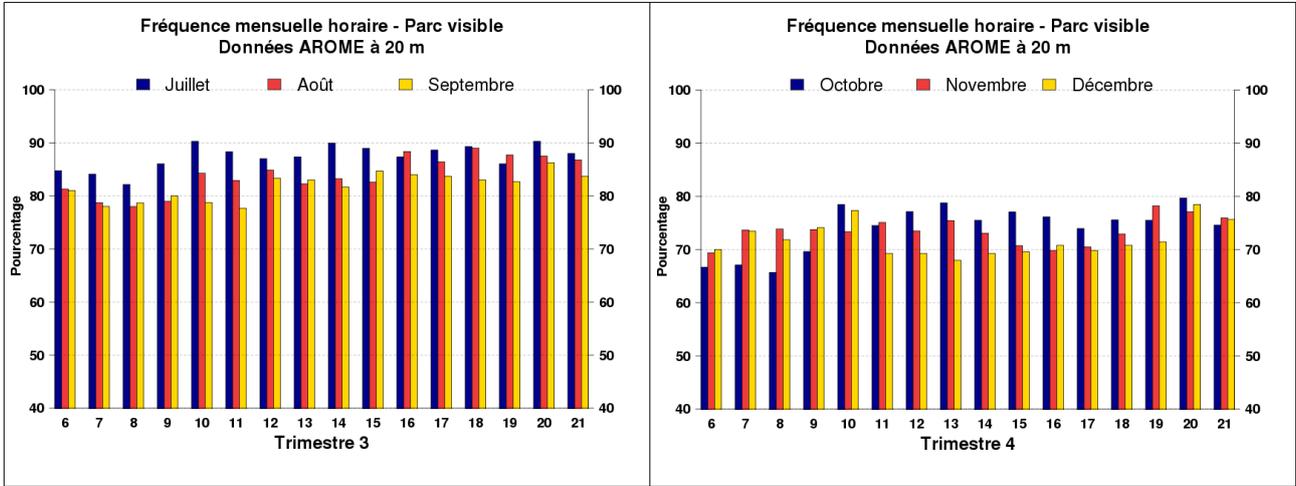




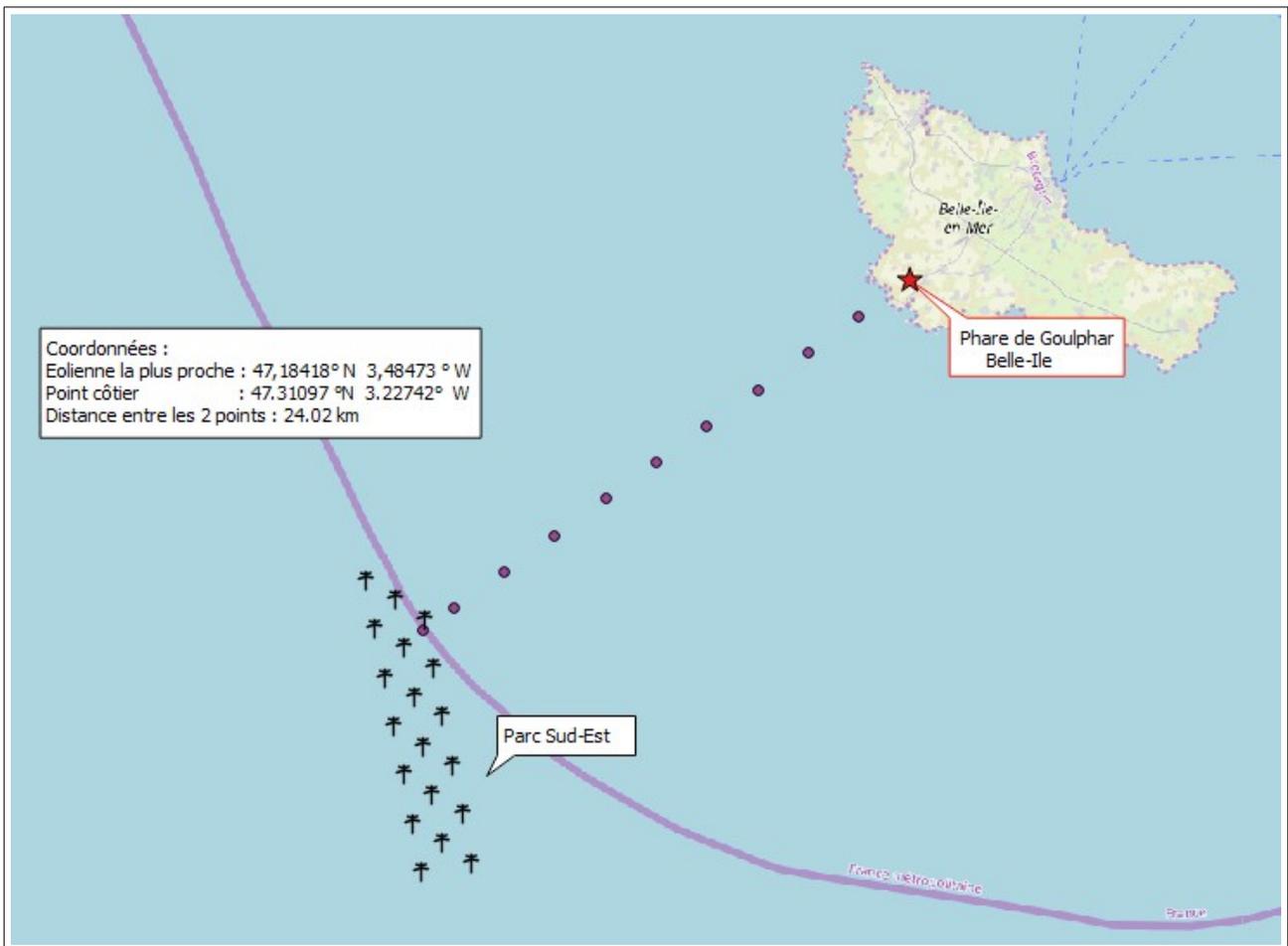
2.6.2 Visibilité du parc fictif Nord de Belle-Île-en-Mer



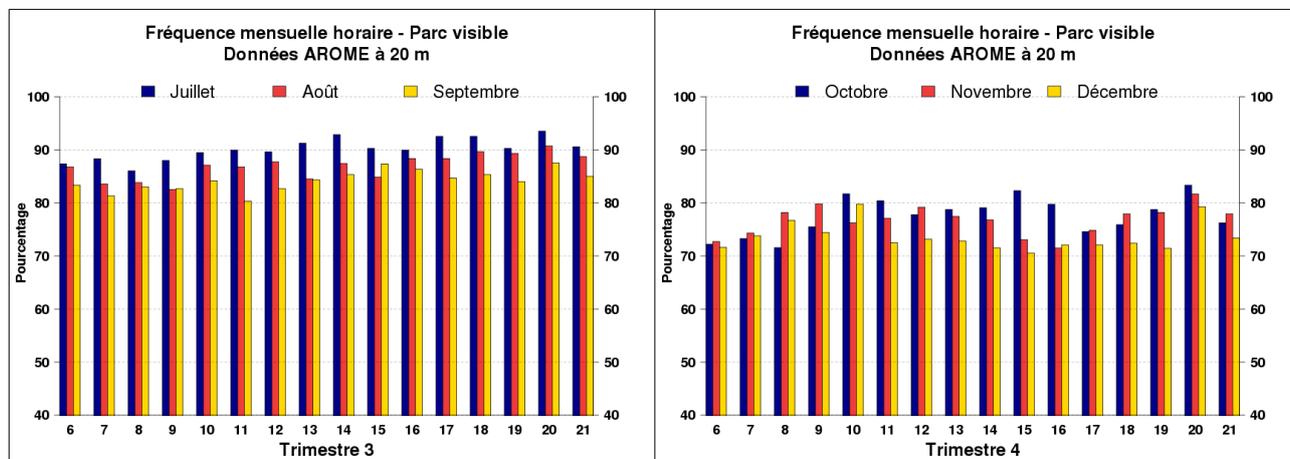




2.6.3 Visibilité du parc fictif Sud-Est de Belle-Île-en-Mer







2.6.4 Synthèse de la visibilité depuis Belle-Île

Récapitulatif des fréquences annuelles (Parc éolien fictif visible) :

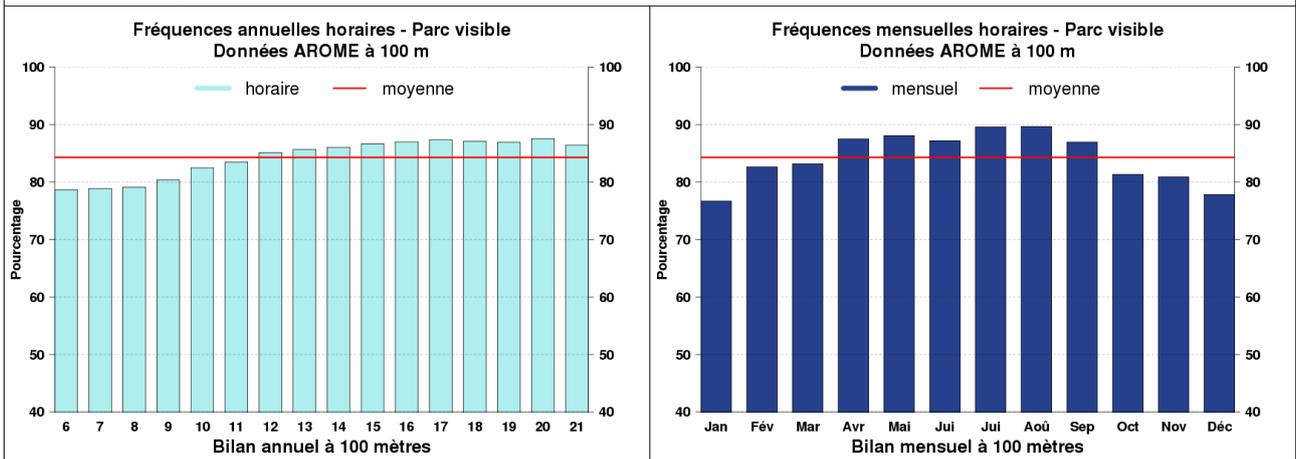
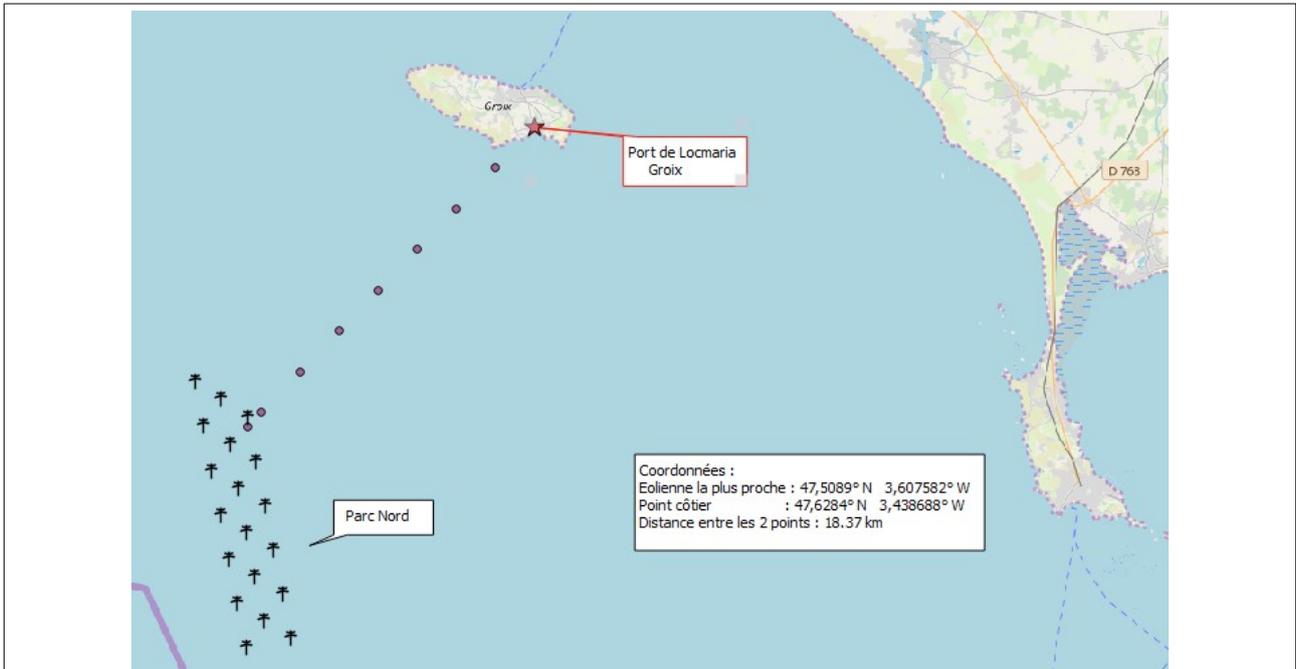
| Parc \ Hauteur | 20m | 100 m |
|----------------|--------|--------|
| Parc Est | 90.2 % | 87.1 % |
| Parc Nord | 78.5 % | 71.6 % |
| Parc Sud-Est | 81.2 % | 75.0 % |

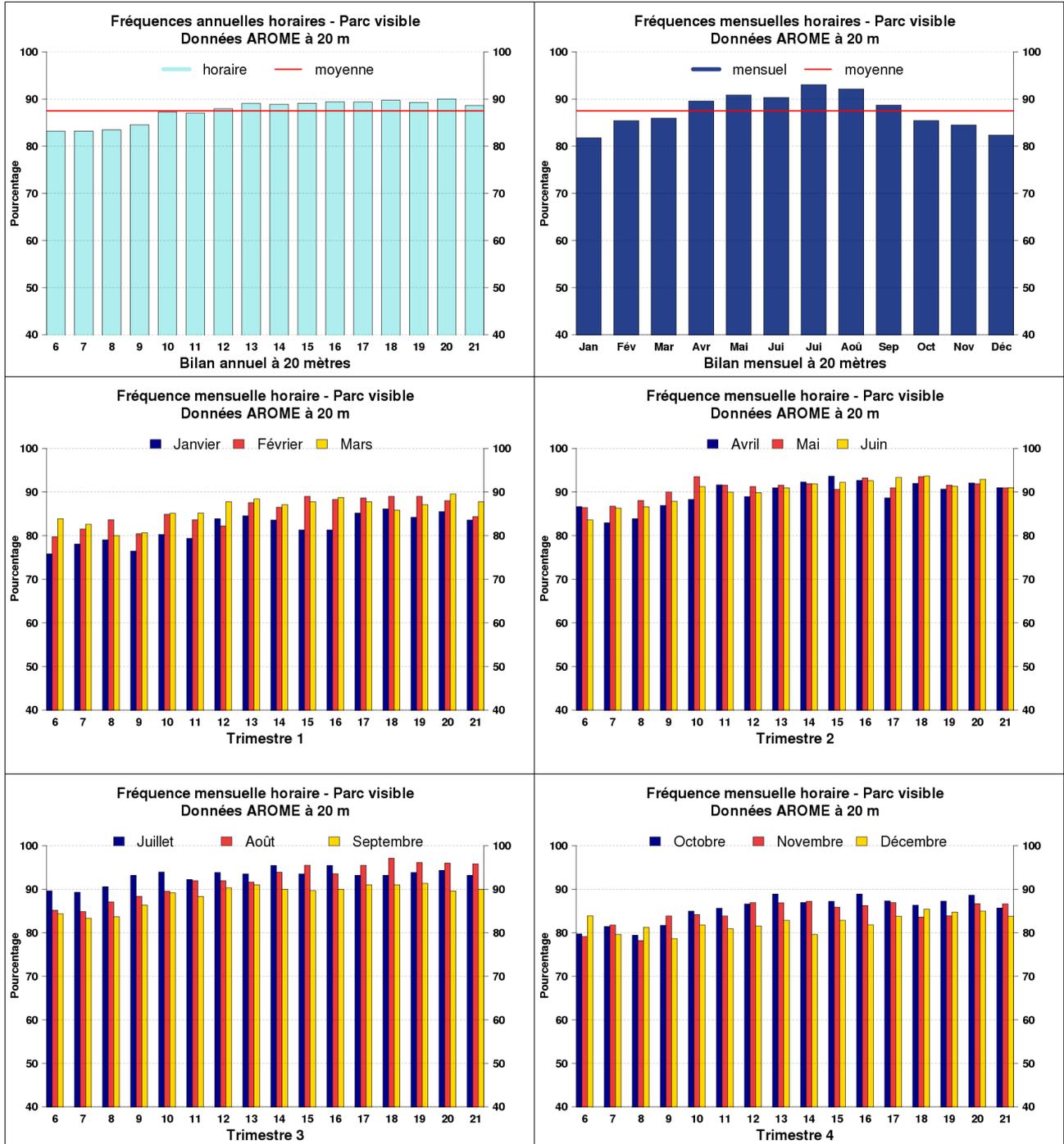
La variabilité diurne est moins nette que sur terre même si on peut observer des minima de fréquence aux premières heures du jour. Ceci est essentiellement dû au fait que les processus engendrant la formation des brouillards sur mer sont différents.

Même si les résultats diffèrent d'un parc fictif à l'autre, une variabilité saisonnière se dessine nettement. Les mois d'automne et d'hiver affichent les plus mauvaises valeurs de visibilité. Pour une hauteur de 20m, les 3 parcs fictifs seront visibles durant plus des trois quarts de l'année ; pour une hauteur de 100 m, seul le parc fictif situé au Nord ne le sera pas. En considérant les 2 hauteurs, le parc fictif Est situé à environ 16 km à l'ouest du point côtier, sera visible 89 % du temps en moyenne sur l'ensemble de l'année.

Les meilleures visibilités à 20 m sont observées au cours des mois d'été quel que soit le parc fictif.

2.6.5 Visibilité du parc fictif Nord depuis Groix





2.6.6 Synthèse de la visibilité depuis Groix

Récapitulatif des fréquences annuelles (Parc éolien fictif visible) :

| Parc \ Hauteur | 20m | 100 m |
|----------------|--------|--------|
| Parc Nord | 87.5 % | 84.3 % |

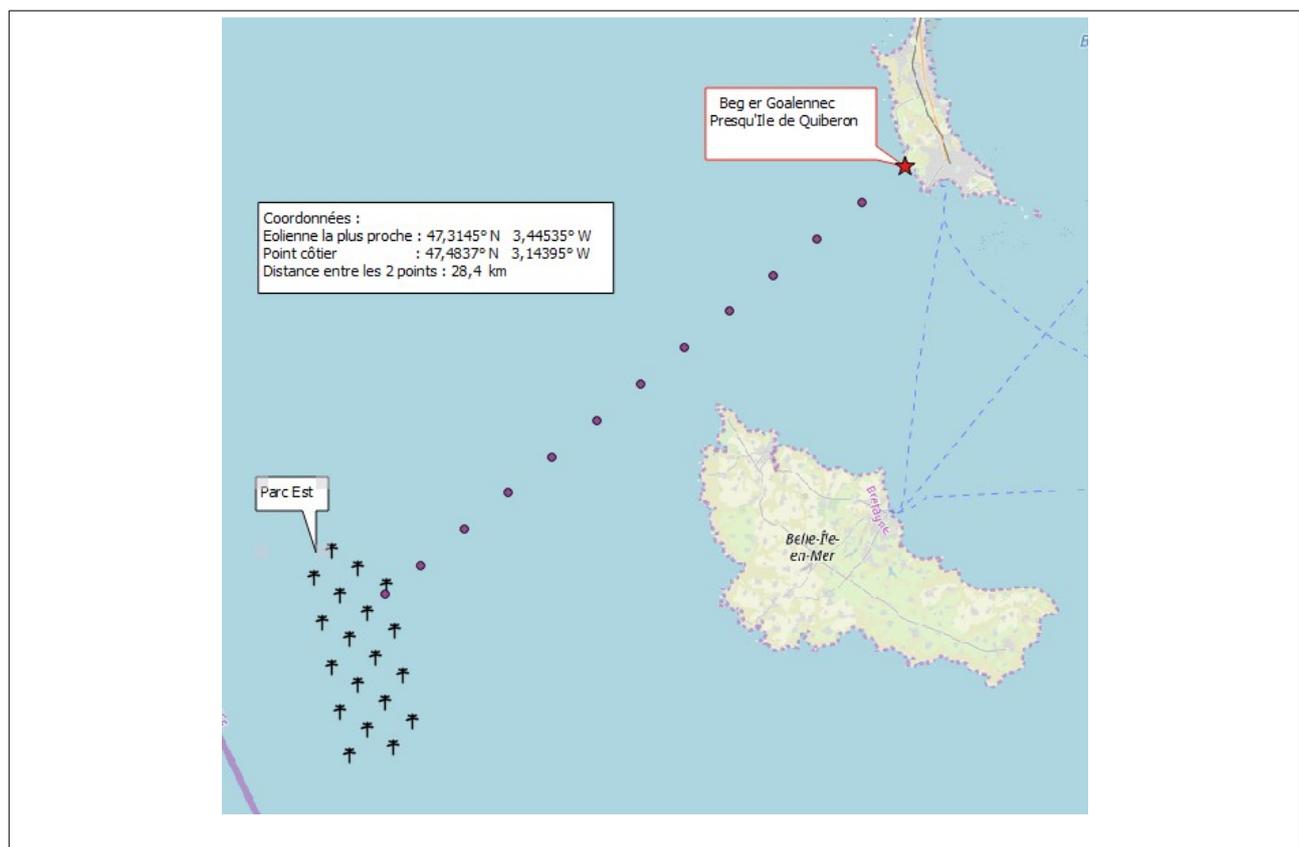
La variabilité diurne est peu marquée.

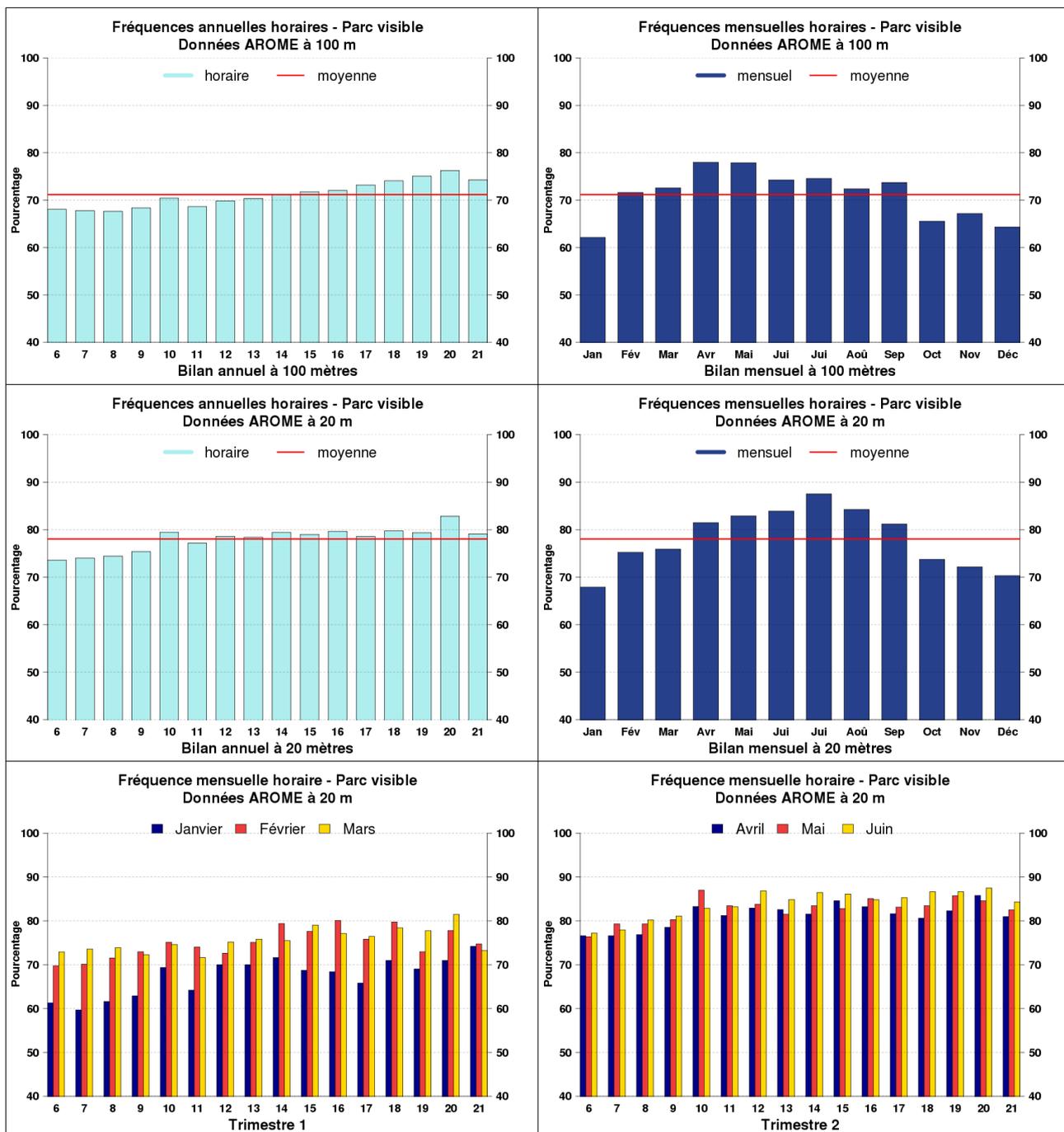
Les mois d'automne et d'hiver affichent les plus mauvaises valeurs de visibilité.

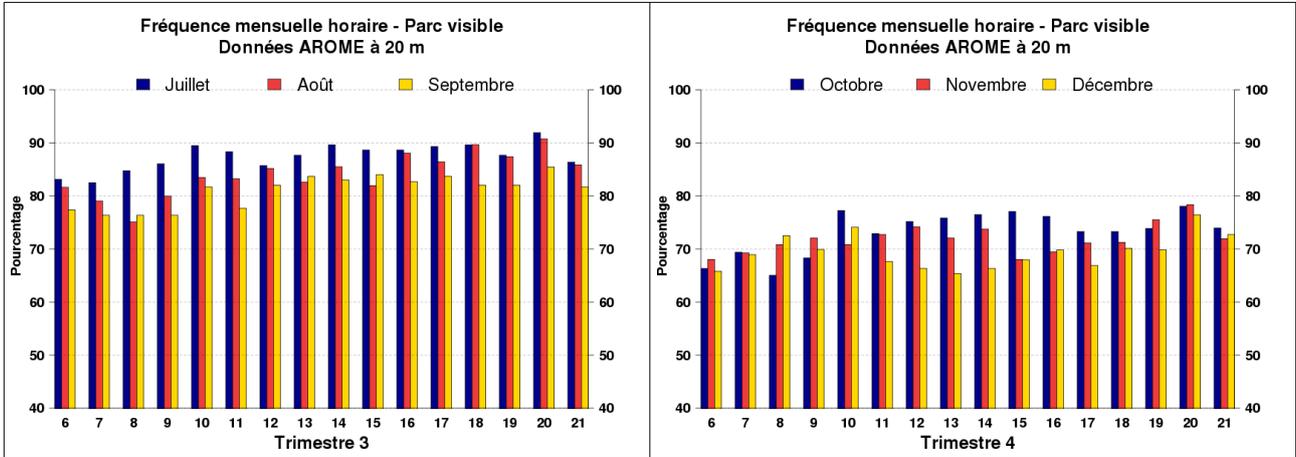
Le parc Nord à environ 18 km de Groix sera visible pendant plus de 10 mois sur l'année.

Les meilleures visibilitées sont observées au cours des mois d'été.

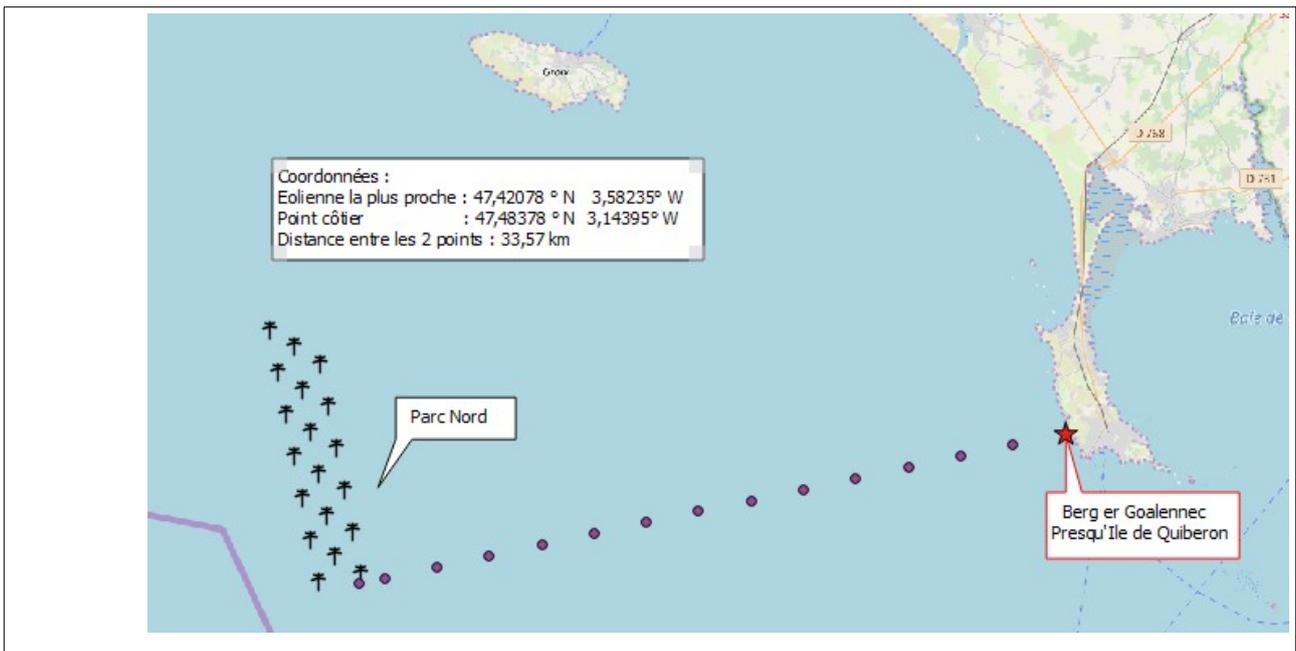
2.6.7 Visibilité du parc fictif Est de la presqu'île de Quiberon

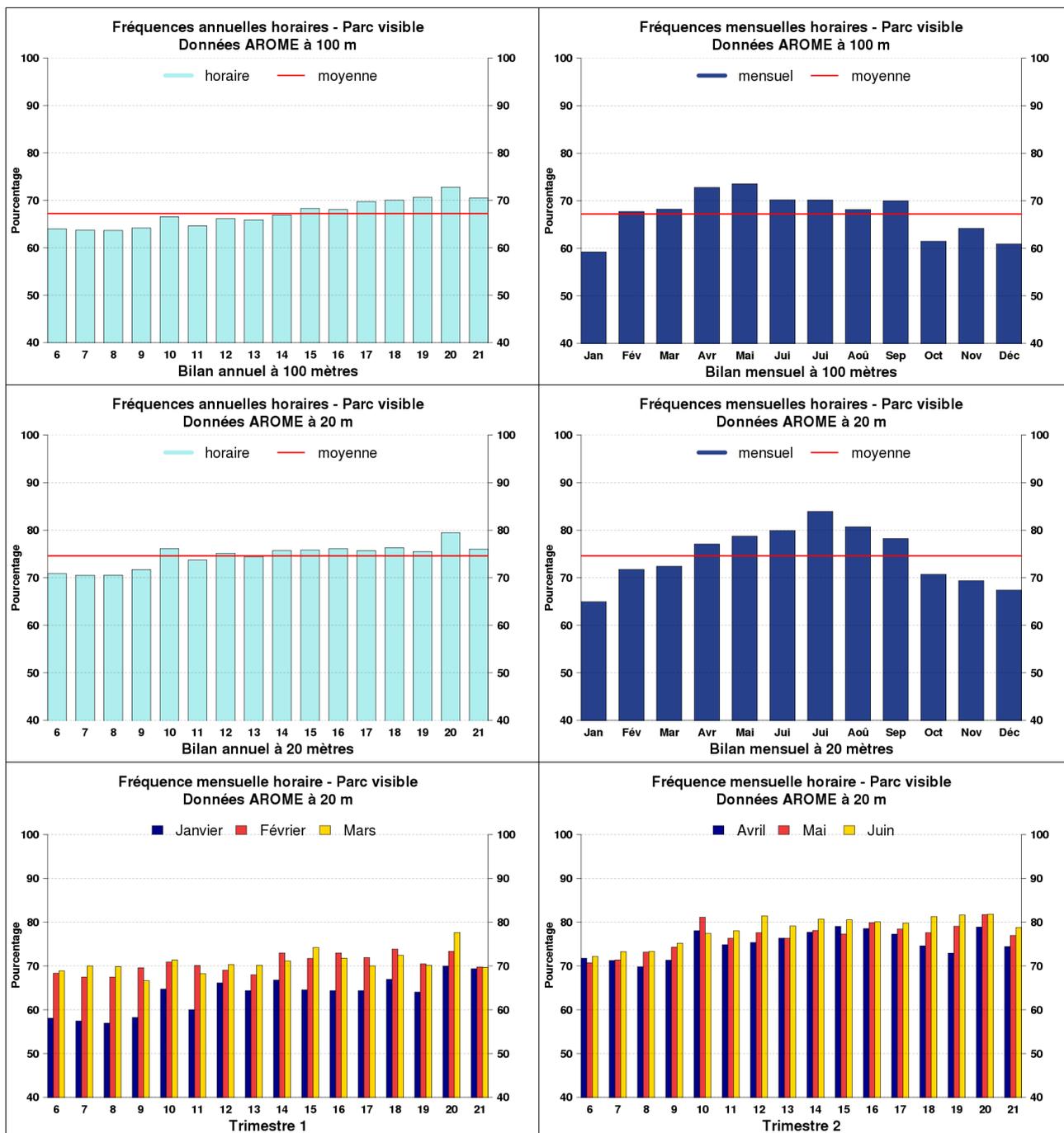


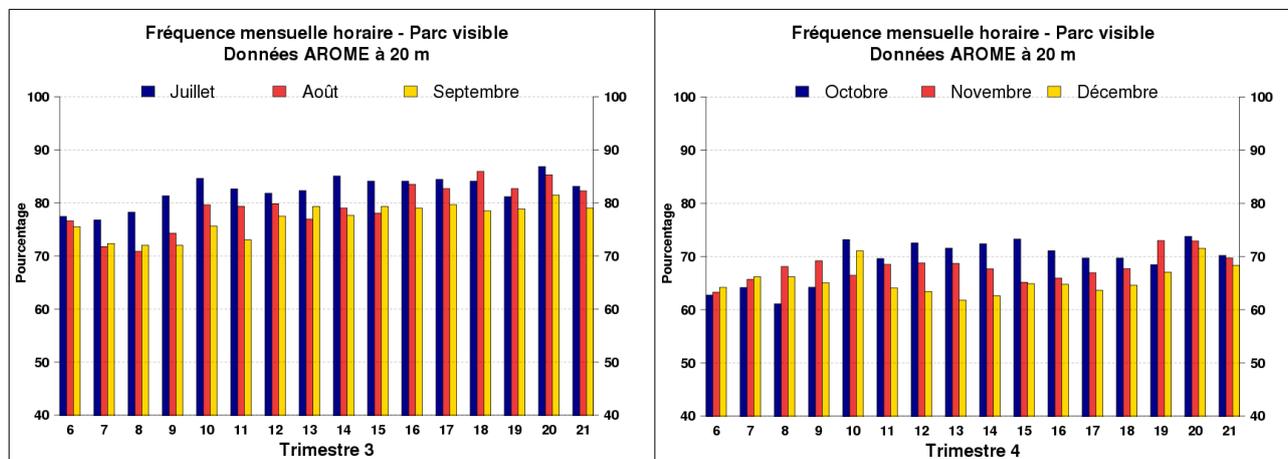




2.6.8 Visibilité du parc fictif Nord de la presqu'île de Quiberon







2.6.9 Synthèse de la visibilité depuis la presqu'île de Quiberon

Récapitulatif des fréquences annuelles (Parc fictif visible) :

| Parc \ Hauteur | 20 m | 100 m |
|----------------|--------|--------|
| Parc Est | 77.7% | 70.7 % |
| Parc Nord | 73.0 % | 65.3 % |

Les observations horaires montrent toujours des visibilités plus réduites aux premières heures de la journée.

Les observations concernant la variabilité saisonnière se retrouvent ici aussi avec des maxima de fréquence de mauvaise visibilité en automne et en hiver (notamment en janvier) et des minima en été à 20 m (en juillet) et au printemps à 100 m.

Le parc Est situé à environ 28 km du point côtier sera visible pendant 74 % de l'année en considérant les hauteurs de 20 et de 100 m.

3 Conclusions de l'étude

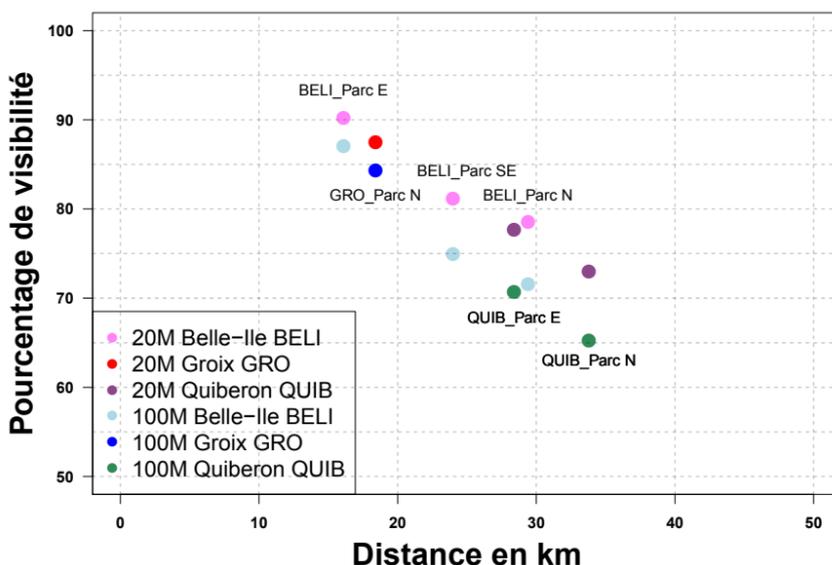
Le tableau ci-dessous récapitule les fréquences de parcs fictifs visibles en fonction de leur position relative par rapport aux points de vue côtiers.

| Point de vue | Parc | 20 M | 100 M | Distance Point côtier / Parc |
|--------------|---------|--------|--------|------------------------------|
| Belle-Ile | Est | 90.2 % | 87.1 % | 16.1 km |
| | Nord | 78.5 % | 71.6 % | 29.4 km |
| | Sud-Est | 81.2 % | 75.0 % | 24.0 km |
| Groix | Nord | 87.5 % | 84.3 % | 18.4 km |
| Quiberon | Est | 77.7 % | 70.7 % | 28.4 km |
| | Nord | 73.0 % | 65.3 % | 33.8 km |

Quels que soient la zone fictive et le point de vue, les visibilitées évoluent en fonction de l'heure de la journée et de la saison. En effet les premières heures de la journée sont un moment propice aux phénomènes générant de faibles visibilitées notamment près des côtes. A contrario, au cours des mois de printemps ou d'été les durées de précipitations sont généralement plus faibles, ce qui a une incidence sur la fréquence de visibilité des parcs fictifs. Ils seront donc plus visibles à ces périodes.

Le pourcentage de visibilité entre le point côtier et l'éolienne la plus proche du parc considéré décroît avec la distance.

Visibilité – Distance Point de vue / Parc fictif



Dans tous les cas concernés par la présente étude, on constate que la visibilité d'un parc éolien fictif en mer est diminuée d'un pourcentage variant entre 10 % et 35 %.

Pour rappel, **cette statistique surestime un peu les fréquences de visibilité dans la mesure où elle ne prend pas en compte les cas d'embruns observés.** Par ailleurs, la rotondité de la terre peut avoir un effet de masquage de toute ou partie d'une éolienne en fonction de sa hauteur et de sa distance du point de vue. Cet aspect n'est pas pris en compte.

FIN DE DOCUMENT
