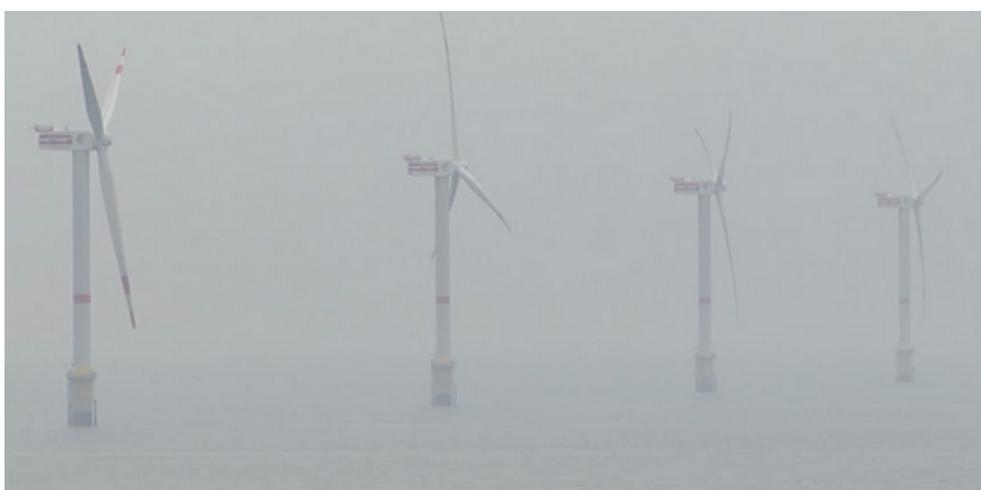


Climatologie de visibilité de parcs éoliens fictifs en Méditerranée



Version 2 du 020/01/2021

Client :
Ministère de la Transition écologique (MTE)
Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC)



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

Analyse réalisée par Météo France



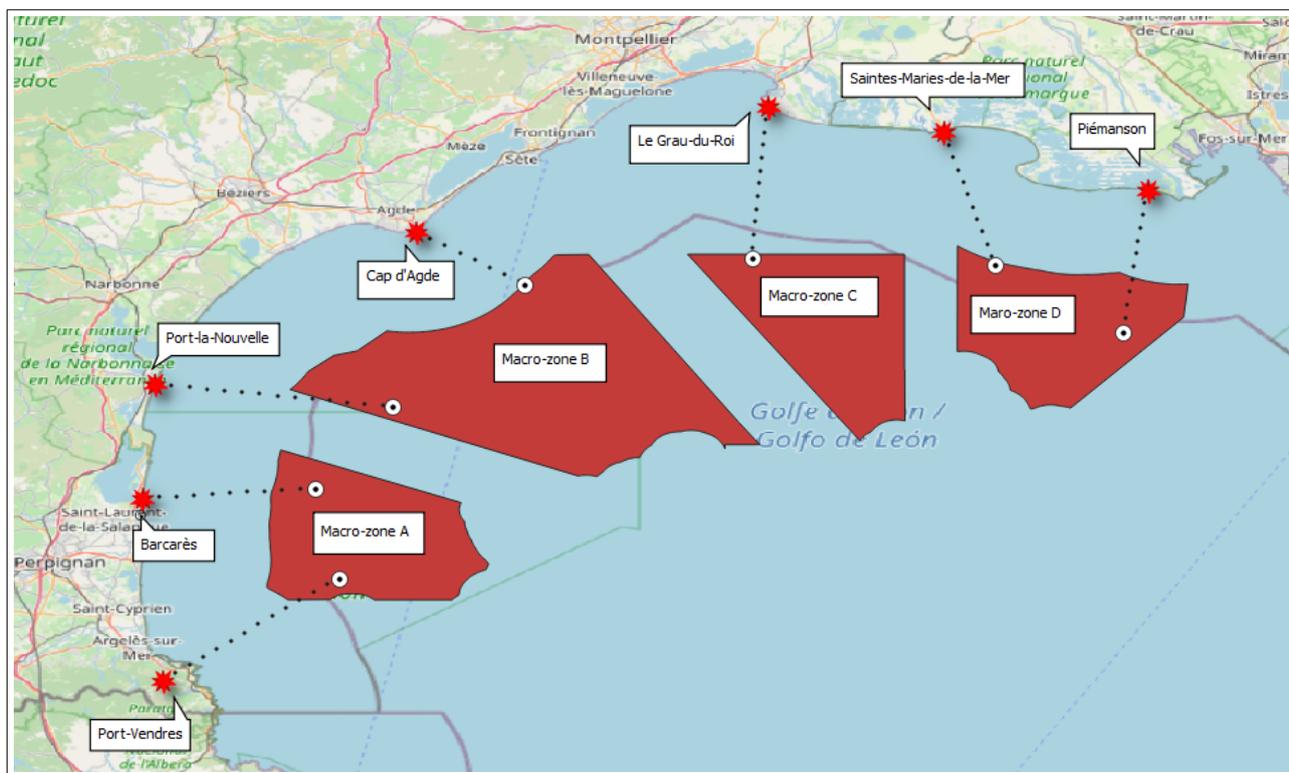
**METEO
FRANCE**

1 Contexte

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

La DGECC a retenu pour cette étude sept points côtiers associés chacun à un parc fictif, constituant ainsi 7 segments d'étude:

- Port-Vendres → Parc A Sud
- Barcarès → Parc A Nord
- Port-La-Nouvelle → Parc B Sud
- Cap d'Agde → Parc B Ouest
- Le Grau-du-Roi (plage de l'Espiquette) → Parc C Ouest
- Saintes-Maries-de-la-Mer → Parc D Ouest
- Piémanson → Parc D Est



Météo-France étudie la visibilité entre les binômes point de vue – parc fictif.

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

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'éclairement 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 :

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

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).

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.

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

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

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.

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

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

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

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

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 :

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

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.

Des données du modèle AROME ont été extraites sur la période 2009-2018 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.

Les données sont extraites de la base de données horaires de 20 ans (2000-2019) AROME, sur la période 2009-2018, période pour laquelle les données atmosphériques de concentration en particules sont disponibles.

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

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 20 m) et au niveau de la partie haute de l'éolienne (niveau 100 m).

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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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 au §1 et les parcs éoliens fictifs situés entre 18 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.

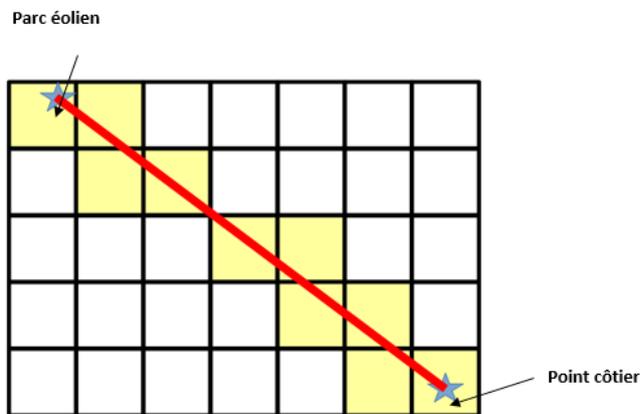
Les distributions climatologiques de ces classes sont alors analysées par mois, année, heure, pour chaque couple « point côtier/parc éolien fictif » .

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.

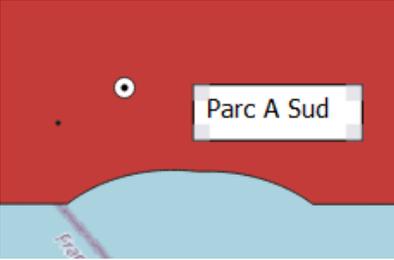
Météo-France fait l'hypothèse d'isotropie de la visibilité au sein de la maille.



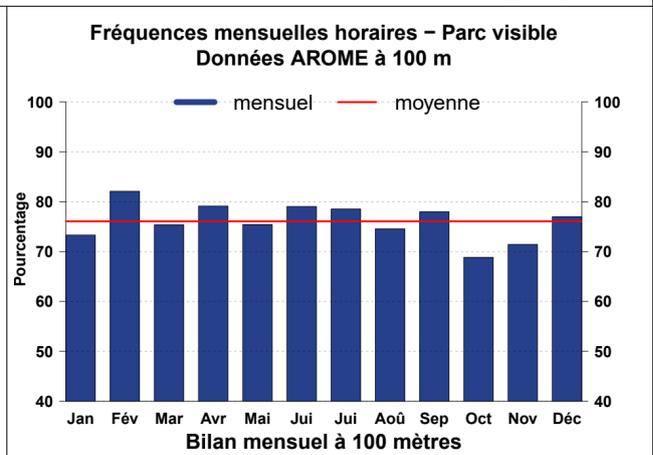
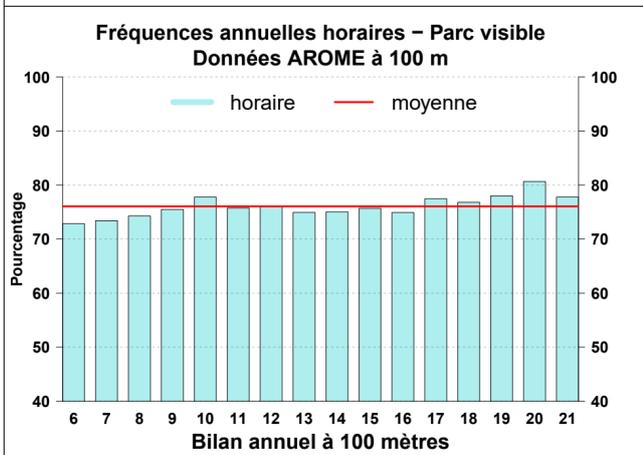
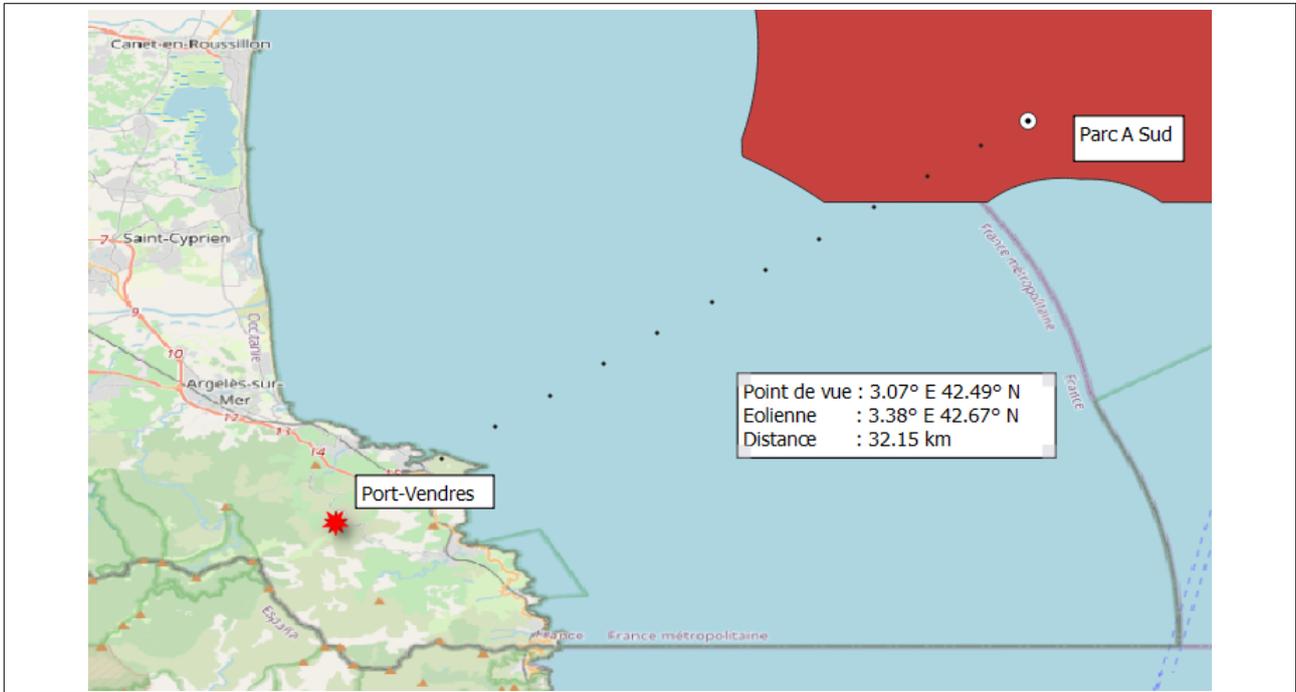
2.6 Statistiques de visibilité

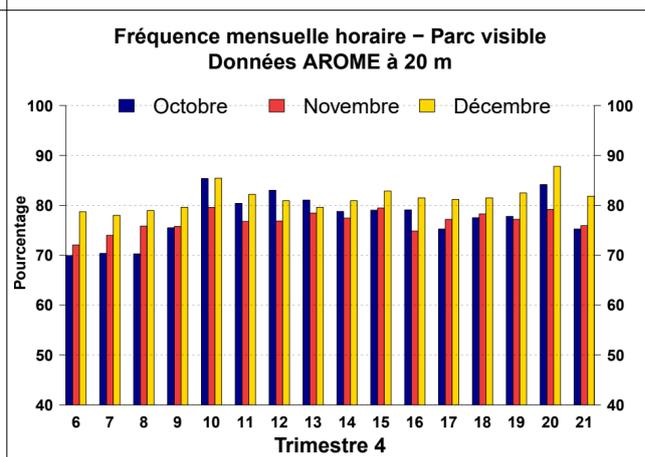
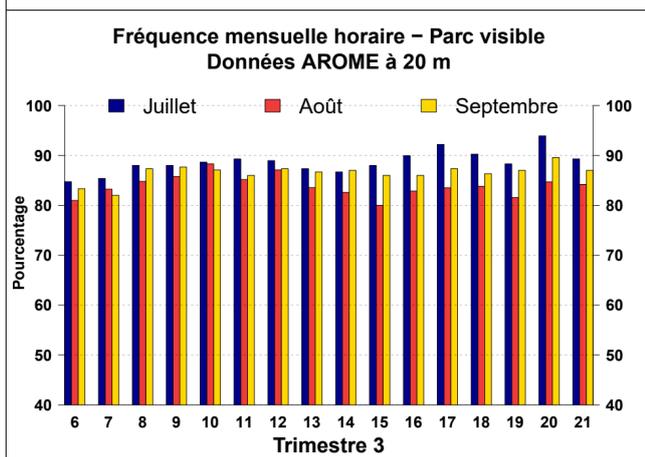
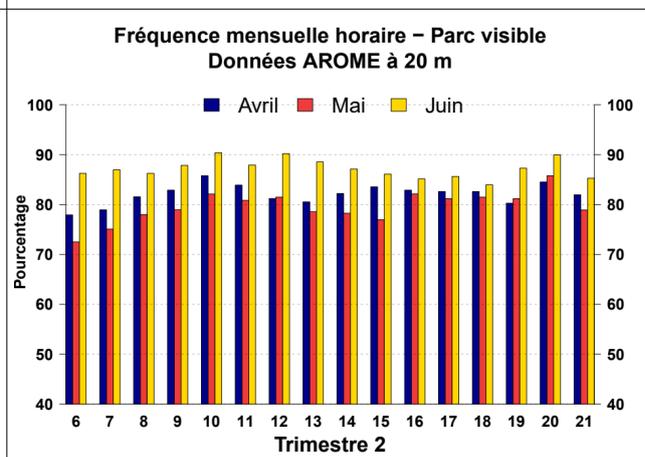
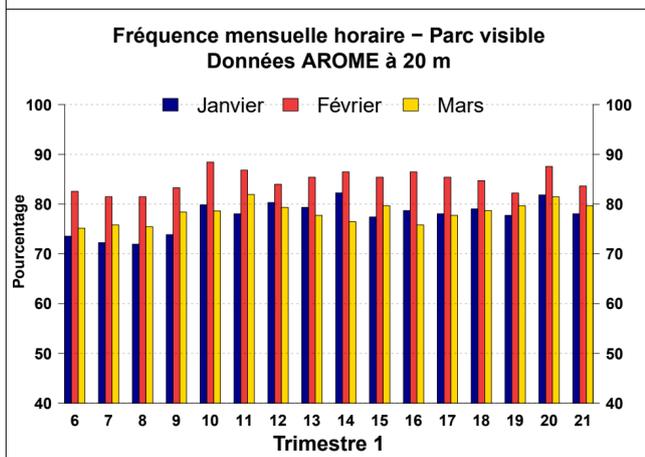
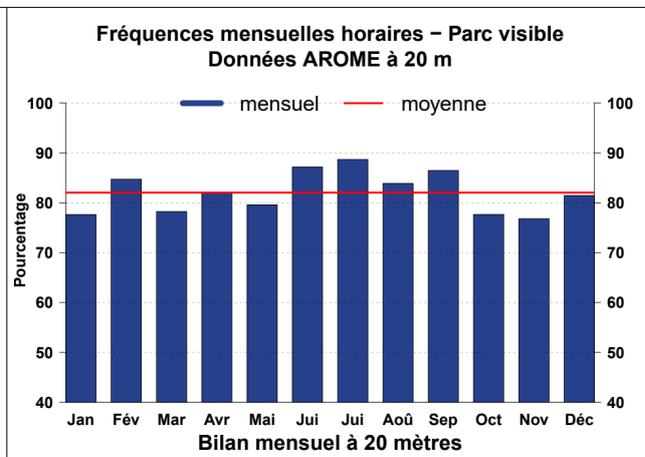
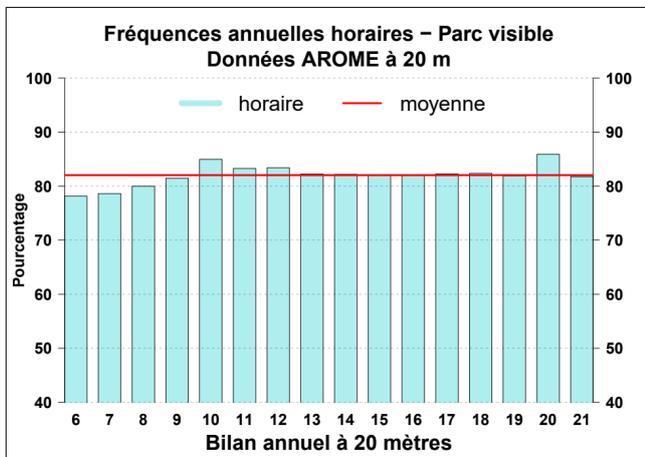
Afin de calculer la visibilité en direction du parc éolien fictif, nous avons utilisé les données du modèle AROME à 20 et 100 mètres de hauteur. La visibilité a été calculée le long d'un axe compris entre la côte et l'éolienne la plus proche du parc fictif considéré en sélectionnant un point tous les 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 6 h – 21 h 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 :

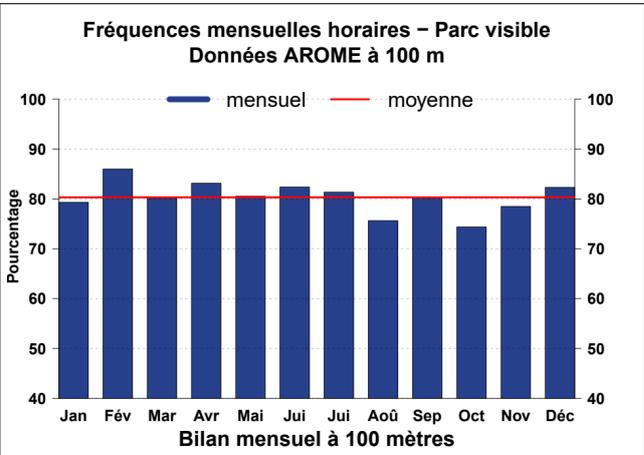
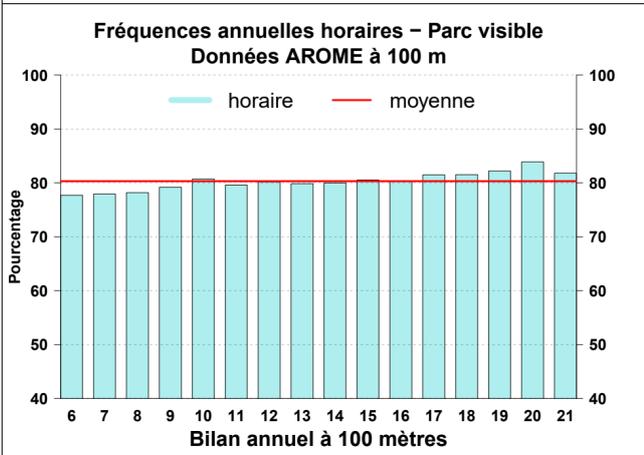
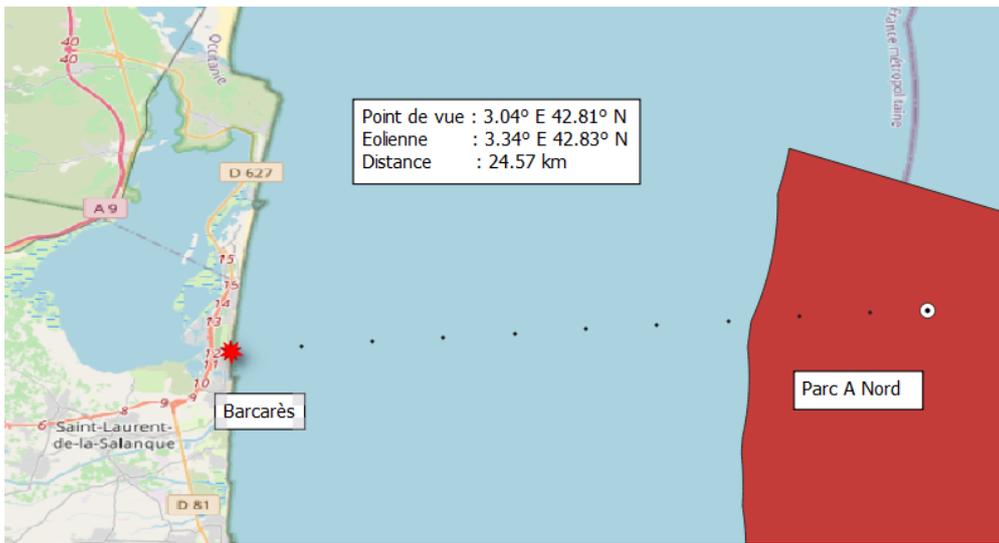
	<p>Nom et localisation du point de vue</p>
	<p>Nom du parc et localisation de l'éolienne fictive</p>
	<p>Points entrant dans le calcul de visibilité le long de l'axe entre le point de vue et l'éolienne du parc fictif, la plus proche de la côte</p>

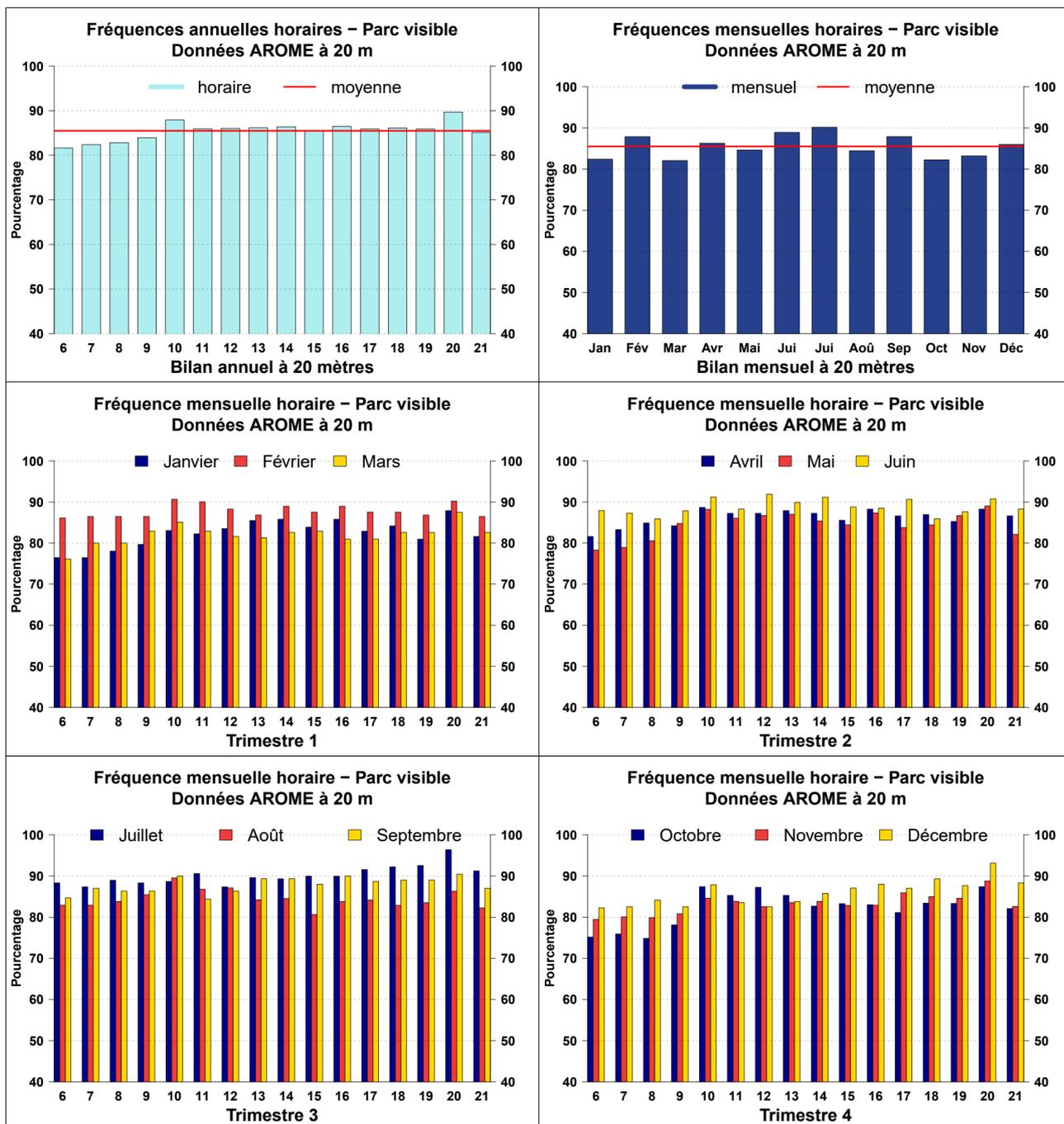
2.6.1 Visibilité entre Port-Vendres et le parc fictif A Sud





2.6.2 Visibilité entre Barcarès et le parc fictif A Nord





2.6.3 Synthèse de la visibilité de la macro-zone A

Récapitulatif des fréquences annuelles (Parc éolien fictif visible) :

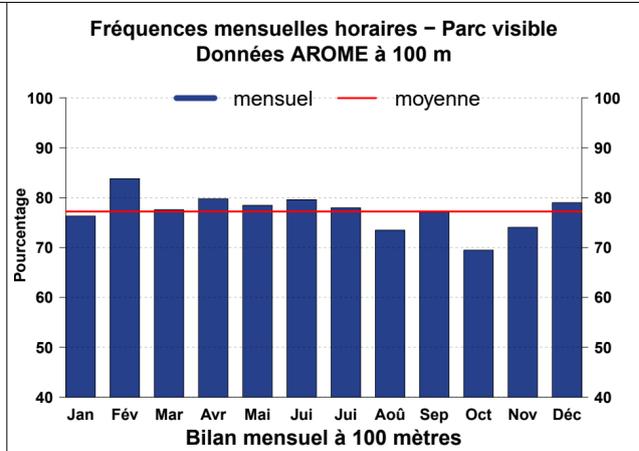
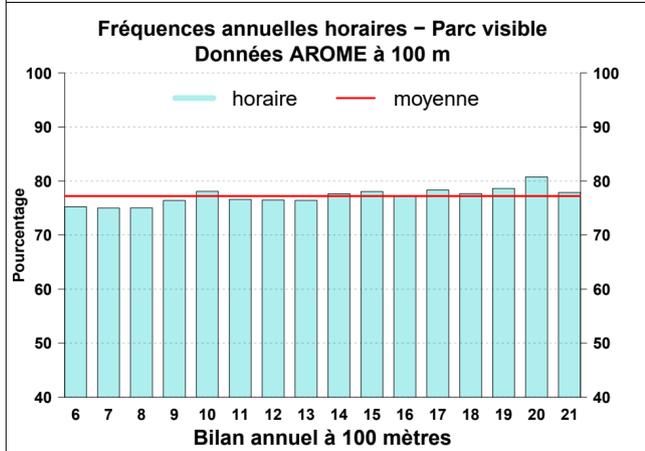
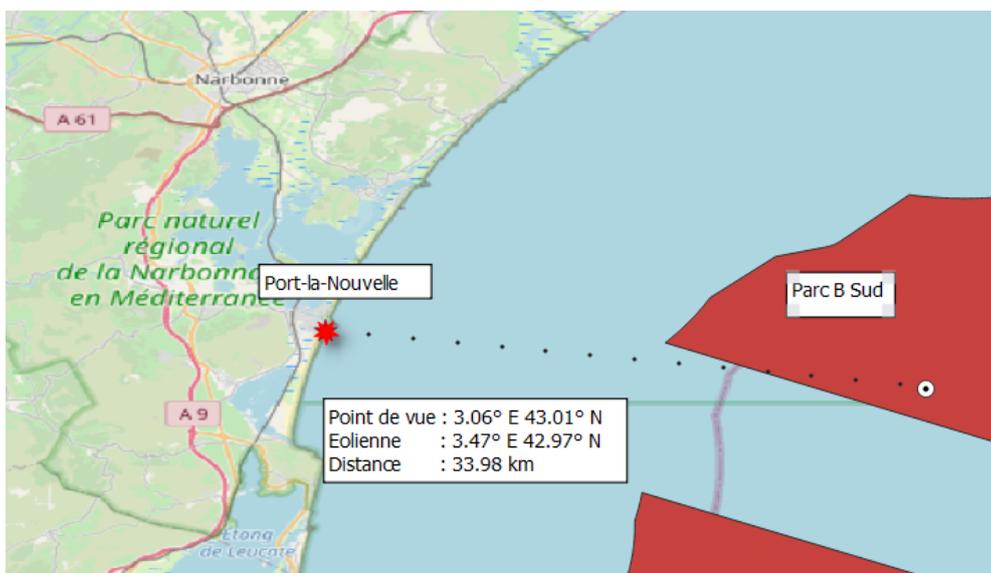
Point de vue	Parc fictif	20 m	100 m
Port-Vendres	Parc A Sud	82.0 %	76.1 %
Barcarès	Parc A Nord	85.5 %	80.3 %

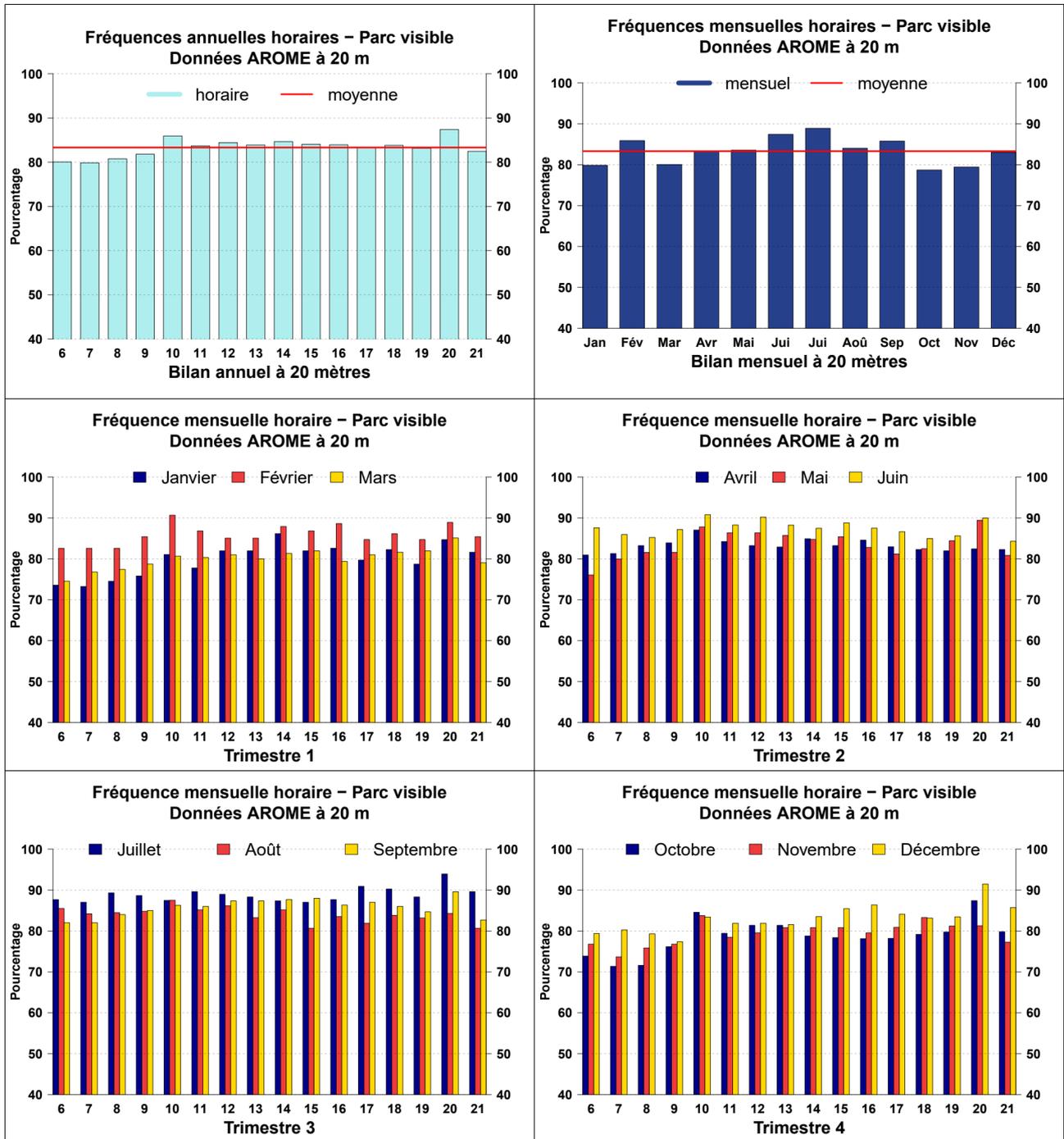
On peut observer des minima de fréquence de visibilité en début de matinée. Ceci est essentiellement dû à la présence de brumes ou brouillards sur mer.

Même si les résultats diffèrent d'un parc fictif à l'autre, une variabilité saisonnière se dessine. Les mois d'automne affichent les plus mauvaises valeurs de visibilité. Les 2 parcs fictifs seront visibles durant plus des trois quarts de l'année.

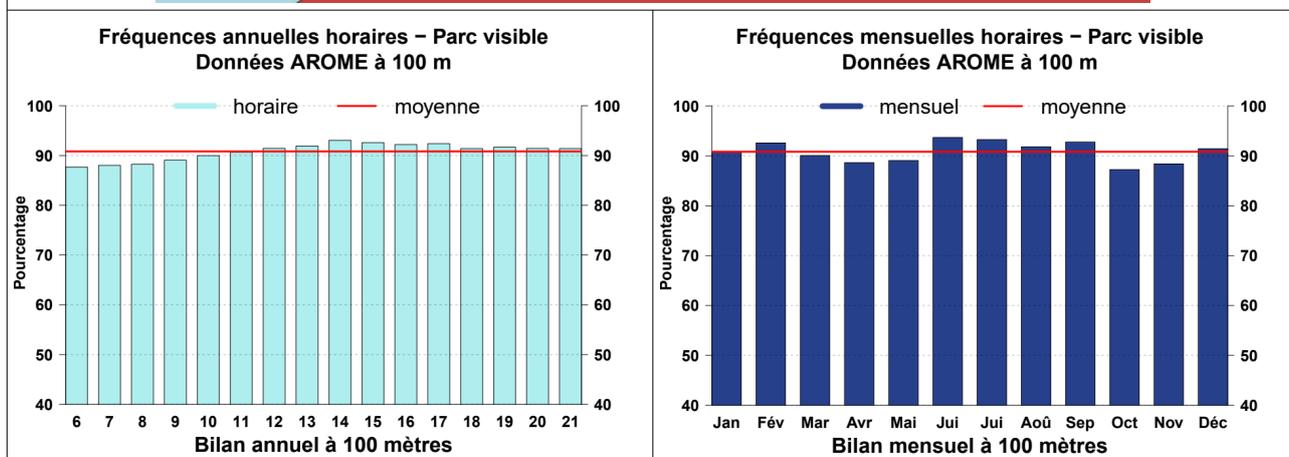
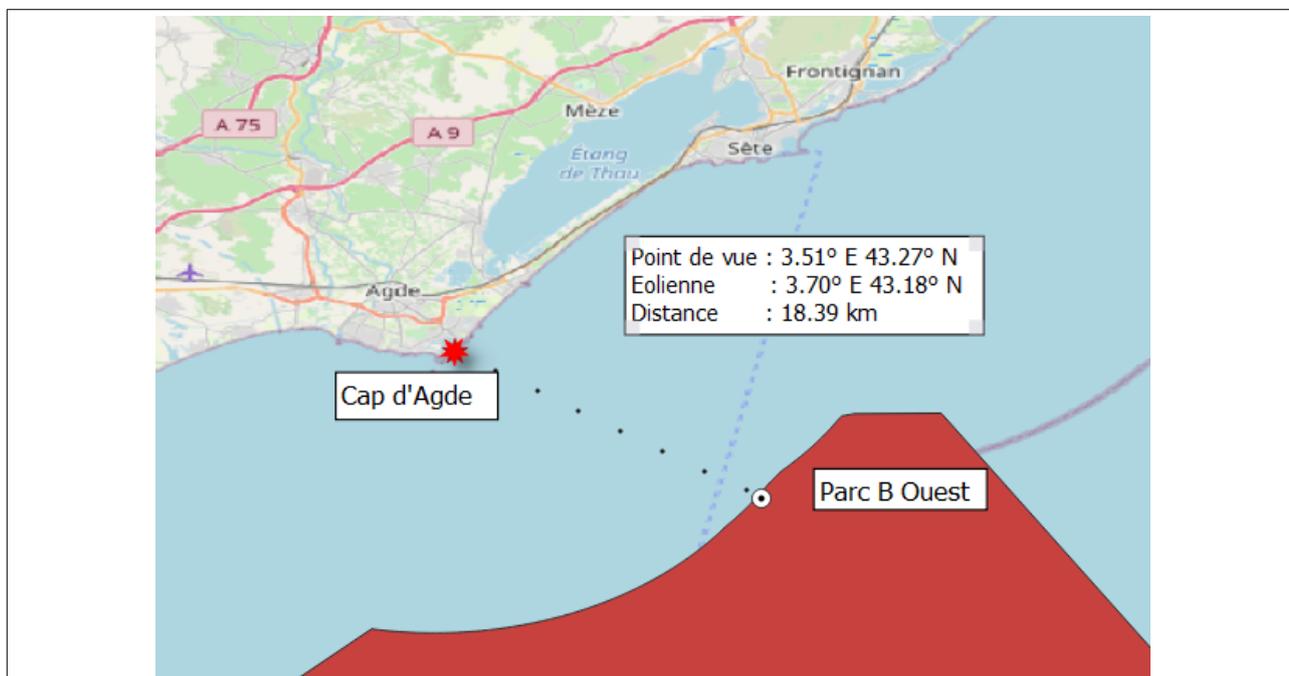
Les meilleures visibilités à 20 mètres sont observées en février, juin et juillet.

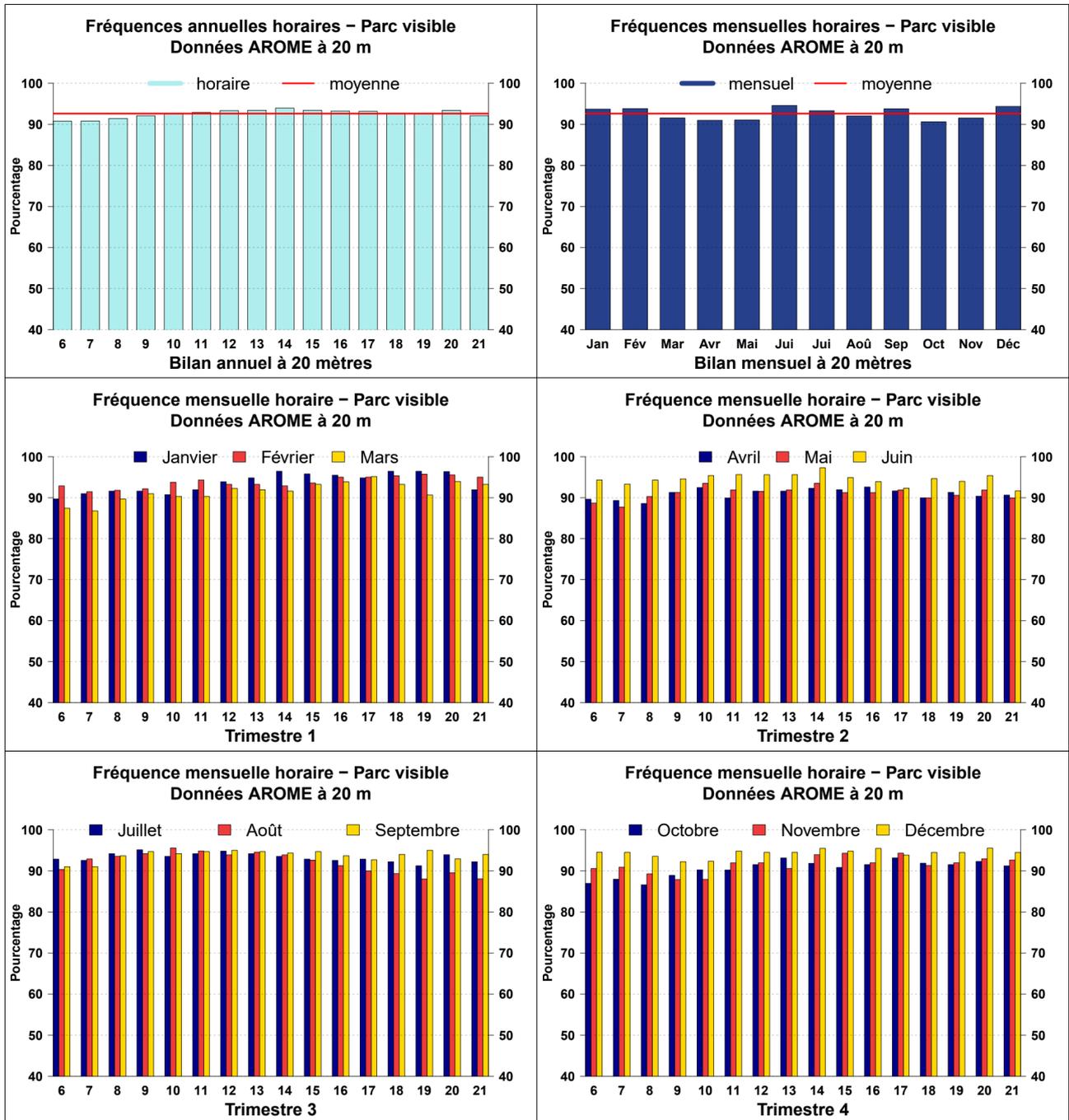
2.6.4 Visibilité entre Port-la-Nouvelle et le parc fictif B Sud





2.6.5 Visibilité entre Cap d'Agde et le parc fictif B Ouest





2.6.6 Synthèse de la visibilité de la macro-zone B

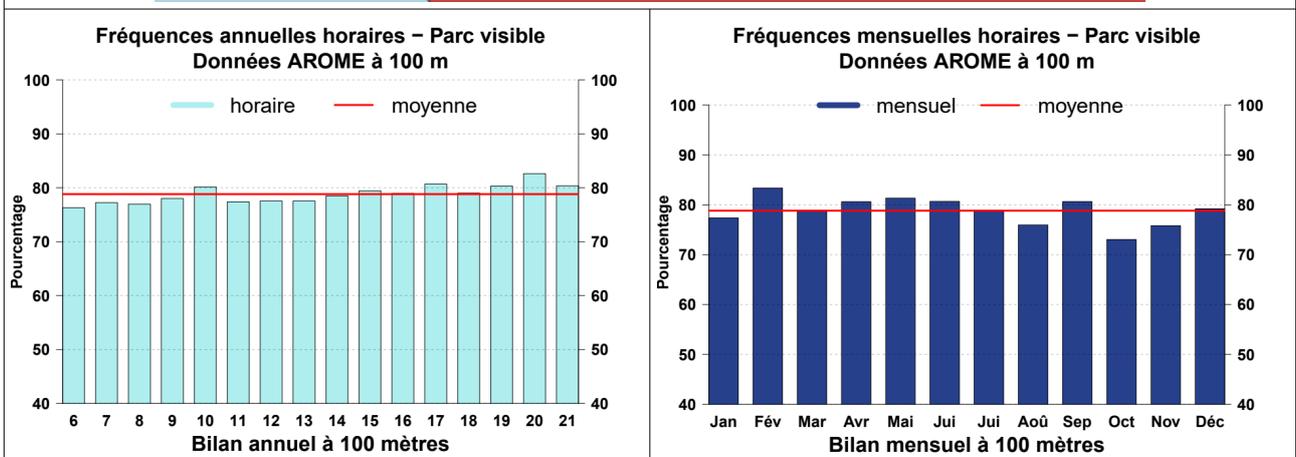
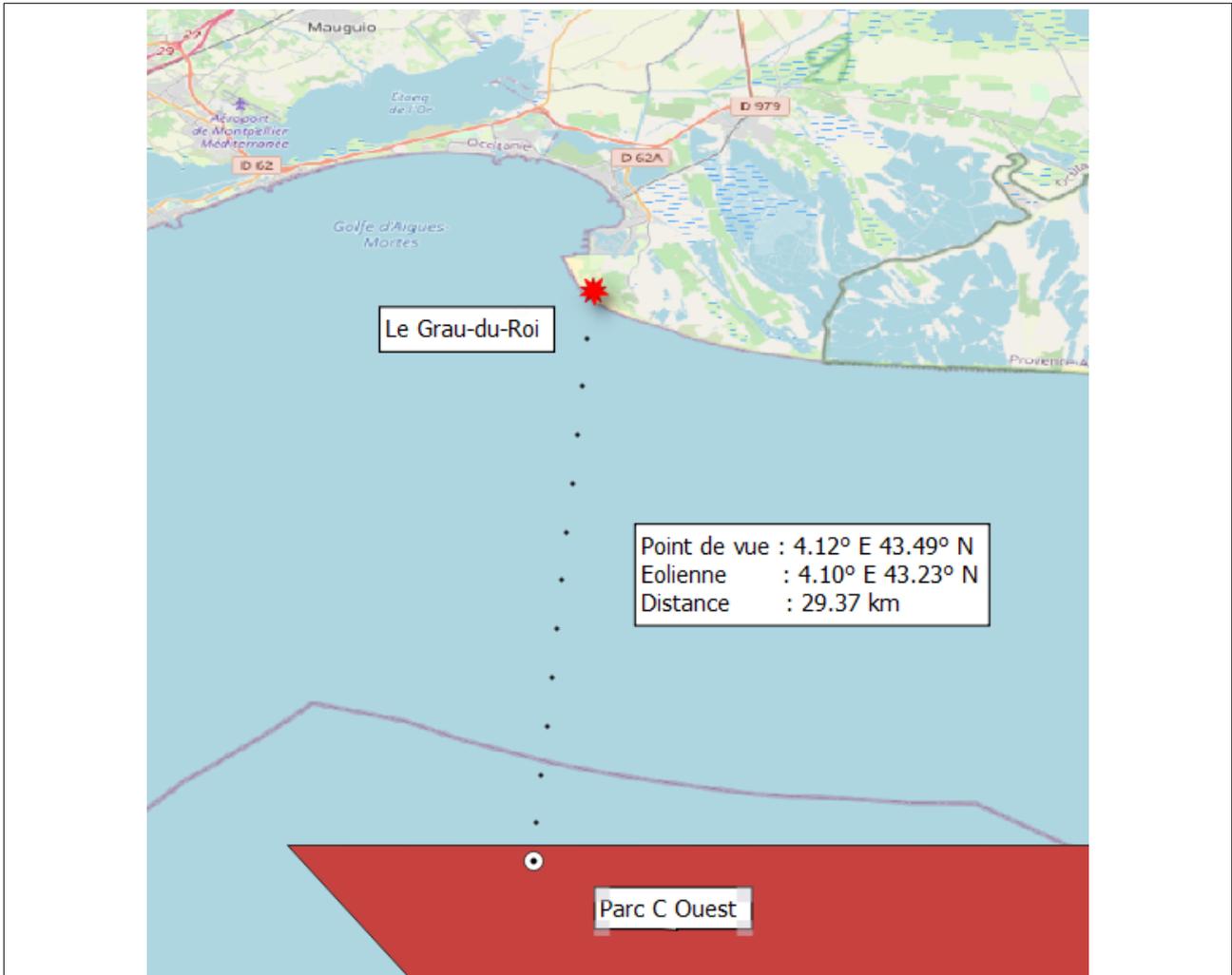
Récapitulatif des fréquences annuelles (Parc éolien fictif visible) :

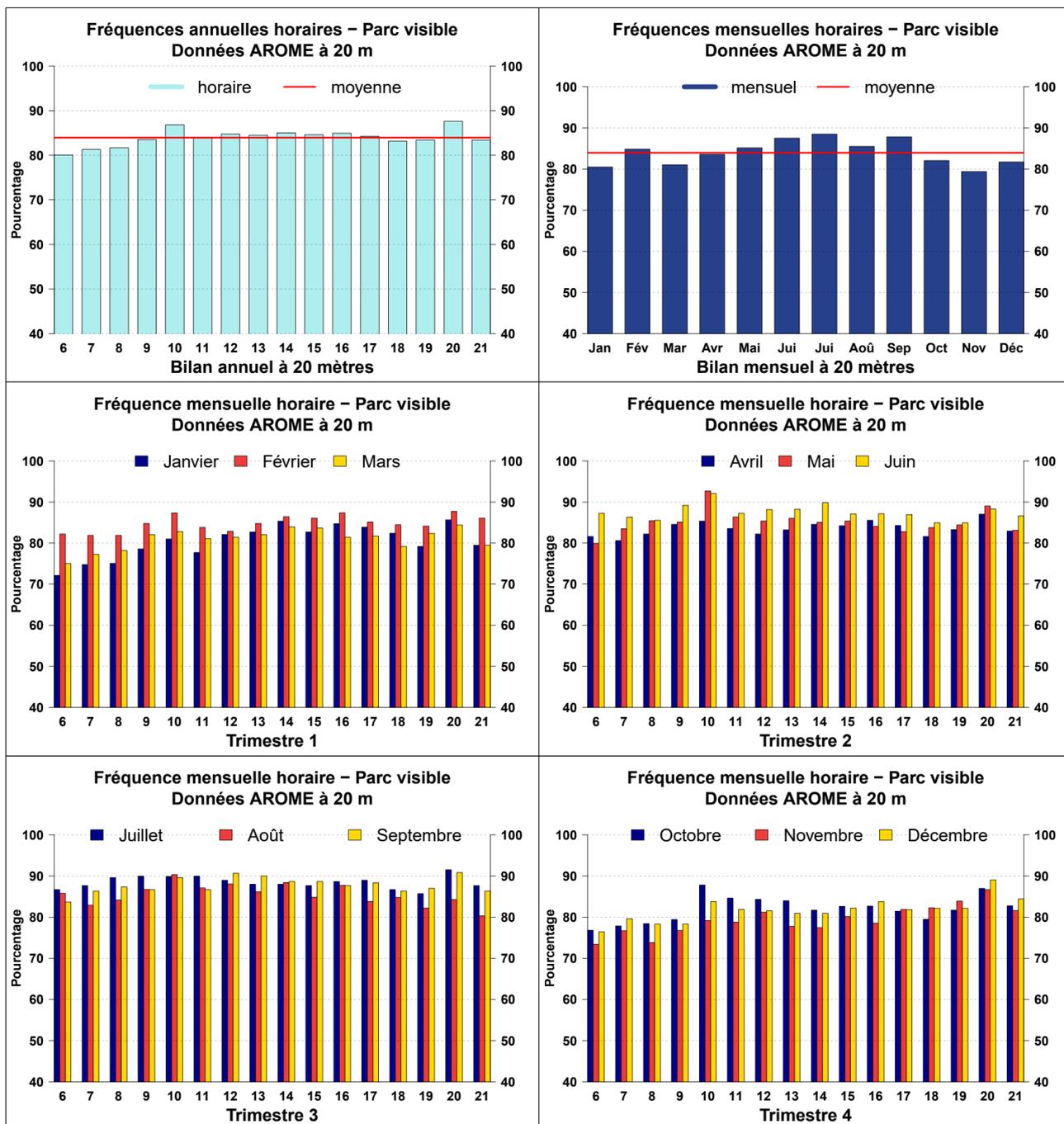
Point de vue	Parc fictif	20 m	100 m
Port-la-Nouvelle	Parc B Sud	83.3 %	77.2 %
Cap d'Agde	Parc B Ouest	92.6 %	90.8 %

La variabilité diurne est peu marquée avec, cependant, des pourcentages de visibilité un peu plus faibles aux premières heures de la matinée.

Les meilleures visibilités sont observées au cours des mois de février et durant l'été ; les plus basses durant le mois d'octobre.

2.6.7 Visibilité entre le Grau-du-Roi et le parc fictif C Ouest





2.6.8 Synthèse de la visibilité de la macro-zone C

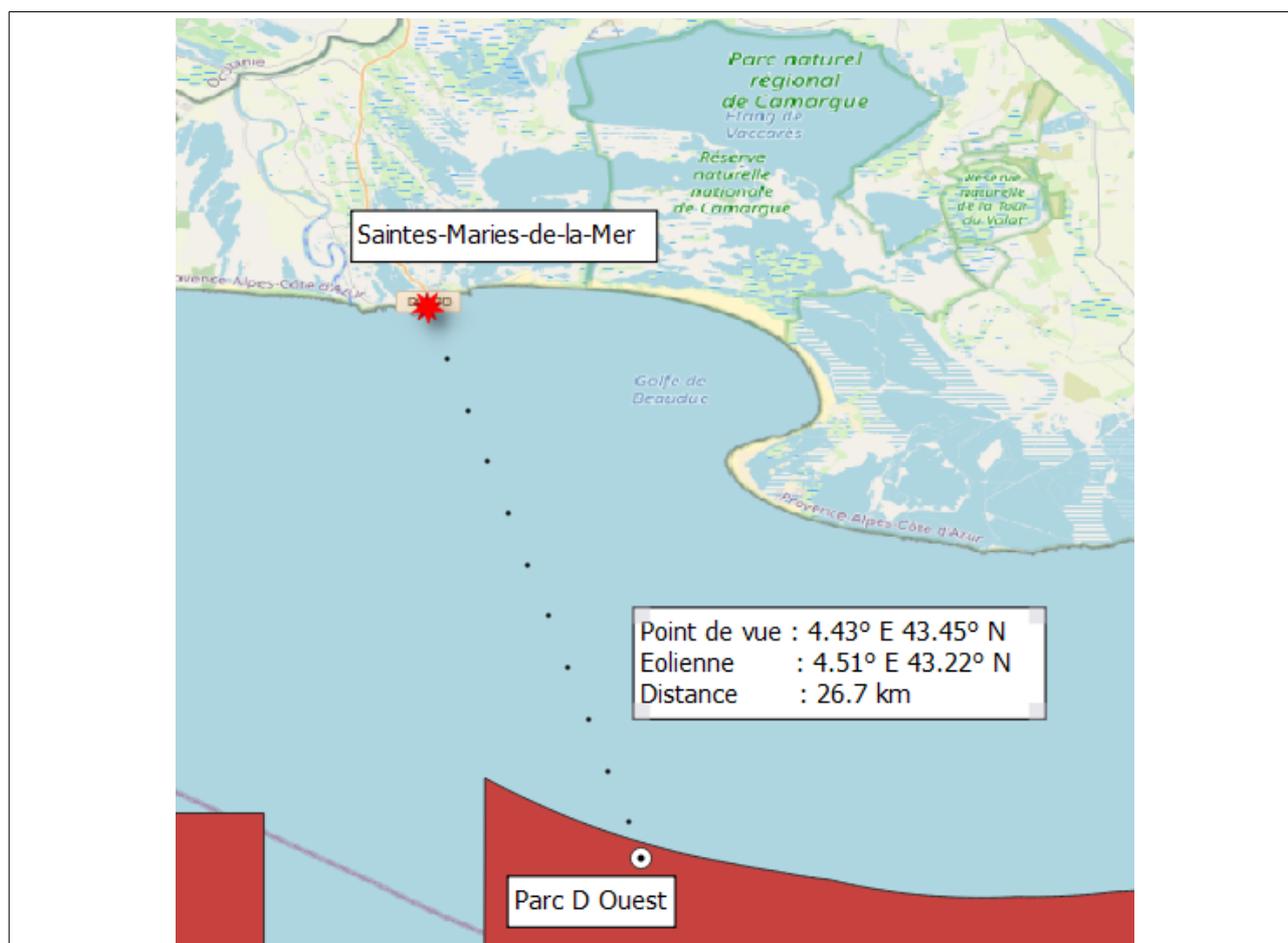
Récapitulatif des fréquences annuelles (Parc fictif visible) :

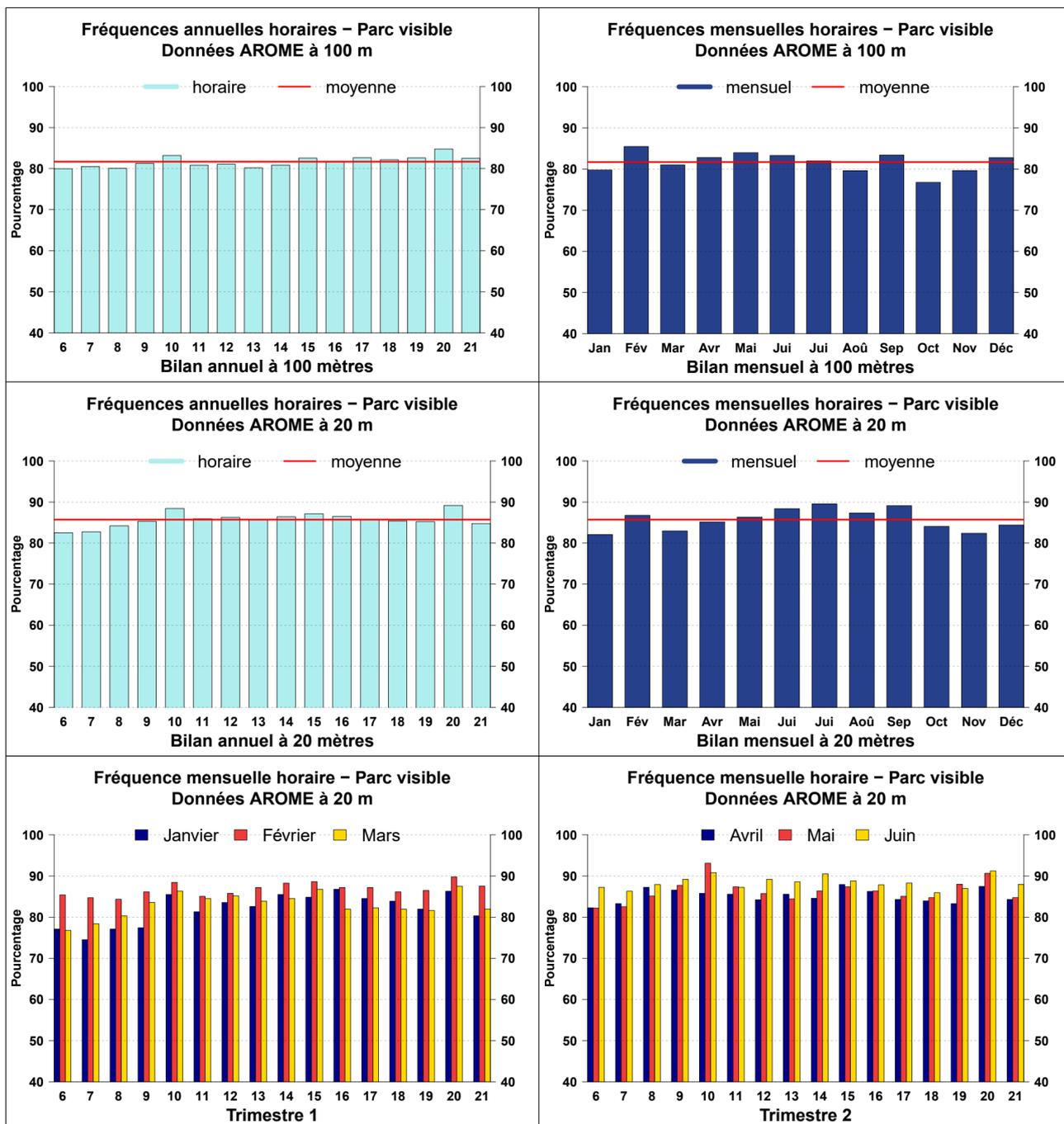
Point de vue	Parc fictif	20 m	100 m
Le Grau-du-Roi	Parc C Ouest	83.9 %	78.8 %

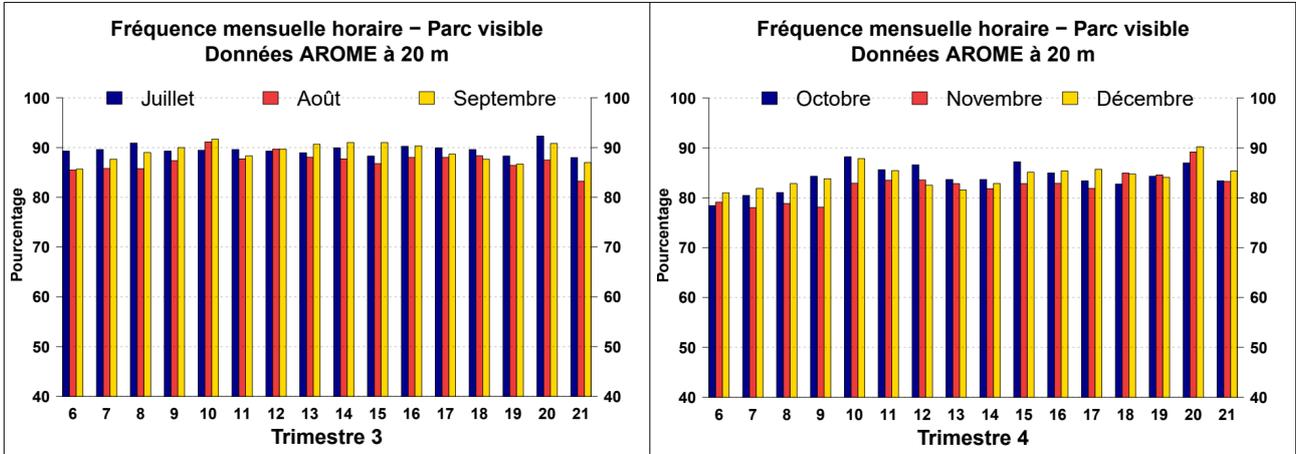
Les observations horaires montrent toujours des visibilitées plus réduites aux premières heures de la journée.

Les observations concernant la variabilité saisonnière se retrouvent ici aussi avec des maxima de fréquence de visibilité réduite en octobre et novembre et des minima en été à 20 mètres et en février et au printemps à 100 mètres.

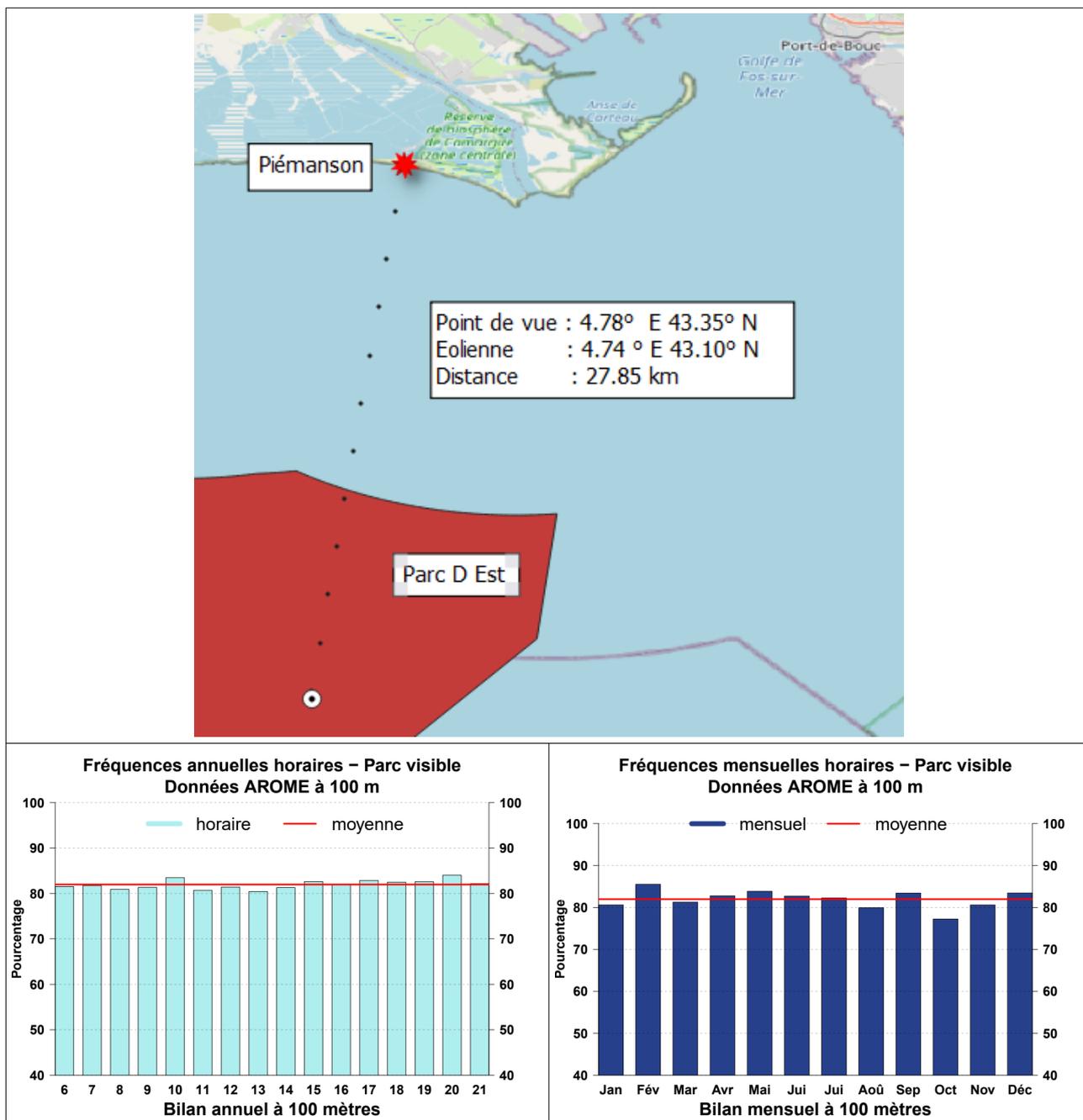
2.6.9 Visibilité entre Saintes-Maries-de-la-Mer et le parc fictif D Ouest

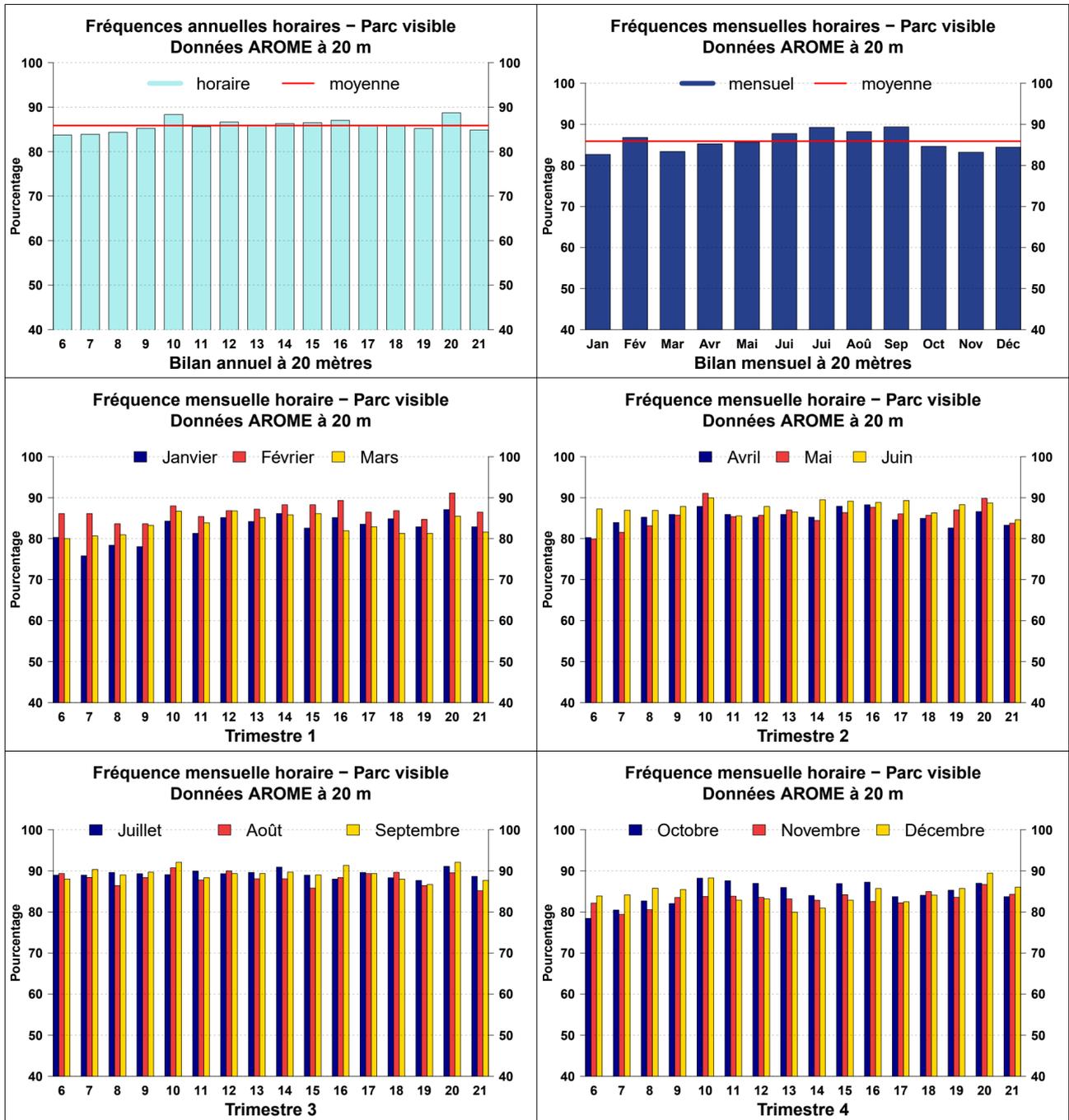






2.6.10 Visibilité entre Piémanson et le parc fictif D Est





2.6.11 Synthèse de la visibilité de la macro-zone D

Récapitulatif des fréquences annuelles (Parc fictif visible) :

Point de vue	Parc fictif	20 m	100 m
Stes-Maries-de-la-Mer	Parc D Ouest	85.7 %	81.7 %
Piémanson	Parc D Est	85.9 %	82.0 %

Les observations horaires montrent 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 visibilité réduite en octobre et des minima en février et en été mais ces variations sont très peu marquées pour le point de vue de Piémanson avec un parc visible presque toute l'année.

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.

Macro-zone	Point de vue	Parc fictif	20 M	100 M	Distance Point côtier / Parc
A	Port-Vendres	A Sud	82.0 %	76.1 %	32.2 km
	Barcarès	A Nord	85.5 %	80.3 %	24.6 km
B	Port-la-Nouvelle	B Ouest	83.3 %	77.2 %	34.0 km
	Cap d'Agde	B Est	92.6 %	90.8 %	18.4 km
C	Le Grau-du-Roi	C Ouest	83.9 %	78.8 %	29.4 km
D	Stes-Maries-de-la-Mer	D Ouest	85.7 %	81.7 %	26.7 km
	Piémanson	D Est	85.9 %	82.0 %	27.8 km

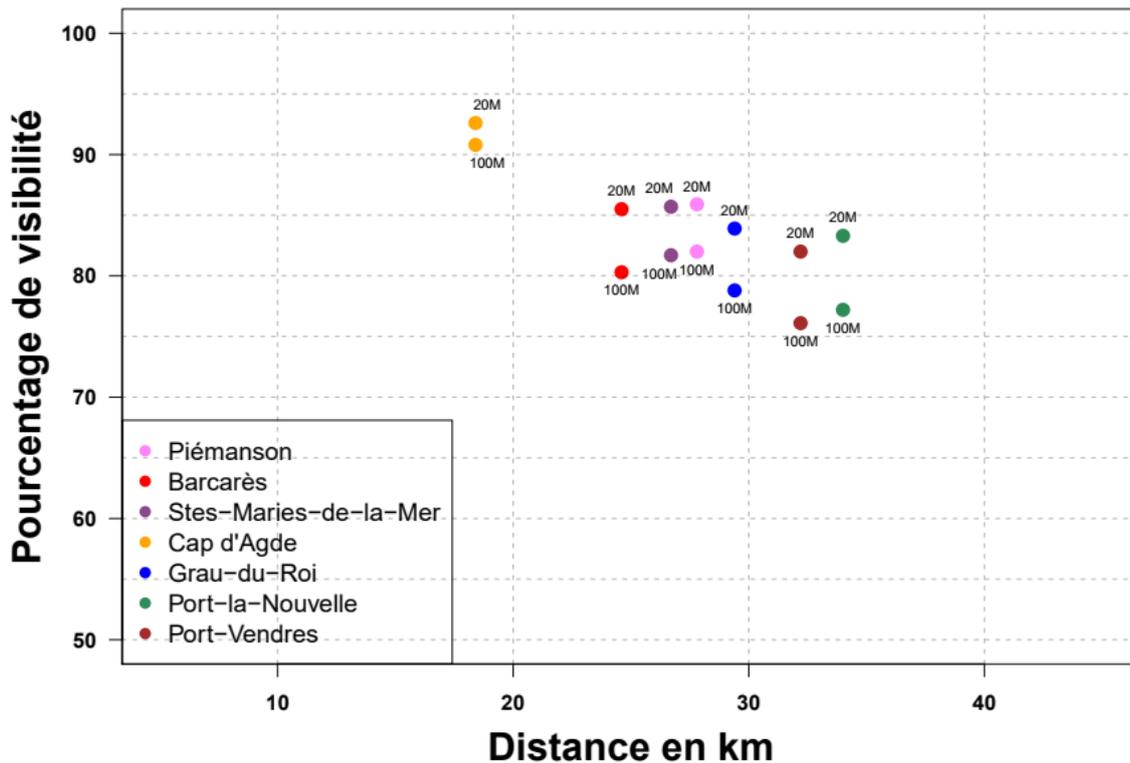
Quels que soient le parc fictif et le point de vue, les visibilités évoluent en fonction de l'heure de la journée et de la saison.

En effet les premières heures de la journée sont un moment propice aux phénomènes générant de faibles visibilités notamment près des côtes.

A contrario, au cours des mois d'été, les précipitations sont moins fréquentes, ce qui a une incidence sur la visibilité des parcs fictifs. Les pourcentages de visibilité élevés obtenus pour le mois de février ont leur explication dans les régimes de vent qui sévissent durant l'hiver sur la zone étudiée, avec notamment, d'une part la tramontane dans la partie « Occitanie » et, d'autre part le mistral. Ces deux types de vent d'un large secteur Nord sont le plus souvent accompagnés d'une grande limpidité de l'air.

Le pourcentage de visibilité entre le point côtier et l'éolienne du parc qui lui est associée a tendance à décroître avec la distance et la hauteur, comme le montre le graphique qui suit :

Visibilité – Distance Point de vue / Parc fictif



Le parc B Ouest associé au point de vue du Cap d'Agde sera visible quasiment toute l'année.

Pour l'ensemble des segments étudiés dans cette étude, l'absence de visibilité des parcs fictifs varie en moyenne sur une année entre 7 et 24 %, selon la localisation et la hauteur.

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