



Le réseau  
de transport  
d'électricité

**PROJET de PARC EOLIEN EN MER  
de DUNKERQUE**

**Expertise des simulations visuelles**

**Jeanne Vézien**

**Septembre 2020**

## Table des matières

|    |  |    |
|----|--|----|
| A. | Introduction - Objectif de l'expertise .....                       | 3  |
| 1. | Contexte : le parc éolien au large de Dunkerque.....               | 3  |
| 2. | L'impact visuel éolien : définition, mesures.....                  | 5  |
| 3. | Les objectifs de l'expertise .....                                 | 6  |
| 4. | Plan du rapport .....  | 7  |
| B. | Examen de la méthodologie par photomontage.....                    | 9  |
| 1. | L'impact visuel.....   | 9  |
| 2. | Processus de conception du photomontage d'impact.....              | 13 |
| 3. | Capture des supports panoramiques .....                            | 14 |
| 4. | Photocomposition .....   | 17 |
| a. | Assemblage panoramique .....                                       | 17 |
| b. | Photomontage 3D.....   | 18 |
| 5. | Rendu visuel final et supports de présentation .....               | 22 |
| a) | Rendu visuel.....  | 22 |
| b) | Présentation des photomontages .....                               | 28 |
| 6. | Conclusion.....  | 31 |
| C. | L'impact visuel du projet de parc éolien en mer de Dunkerque ..... | 32 |
| 1. | Méthodologie d'évaluation.....                                     | 32 |
| 2. | Zones d'impact et amers retenus .....                              | 32 |
| 3. | Examen des amers .....   | 35 |
| a) | Le phare du Risban .....   | 35 |
| b) | Le feu de Saint-Pol .....  | 37 |
| c) | Le phare de Gravelines .....                                       | 40 |
| d) | Le feu de la jetée Clipon .....                                    | 41 |
| e) | Covisibilité Dunkerque/Norther .....                               | 42 |
| 4. | Réponses aux observations du public.....                           | 44 |
| 5. | Conclusion.....  | 44 |
| D. | Synthèse .....   | 45 |
| E. | Bibliographie.....   | 46 |
| F. | Annexes .....  | 48 |
|    | Annexe 1 : Arrêté de nomination de l'experte .....                 | 48 |
|    | Annexe 2 : Choix du capteur photographique pour l'étude .....      | 49 |
|    | Annexe 3 : Visibilité des structures en mer .....                  | 50 |
|    | Annexe 4 : Visibilité en mer à Dunkerque.....                      | 51 |
|    | Annexe 5 : Présentation de l'experte .....                         | 52 |

## A. Introduction - Objectif de l'expertise

### 1. Contexte : le parc éolien au large de Dunkerque

A l'issue du troisième appel d'offres lancé par l'État en avril 2016 pour la construction et l'exploitation d'un parc éolien en mer sur une zone identifiée comme favorable, au large de Dunkerque, une procédure dite de « dialogue concurrentiel » a été lancée en décembre 2016. A l'issue de cette procédure, le groupement « Éoliennes en Mer de Dunkerque », a été désigné, le 14 juin 2019, comme lauréat de l'appel d'offres. Ce groupement est composé des sociétés EDF Renouvelables France, innogy SE, et Blauracke GmbH (filiale du groupe Enbridge), suivant la distribution décrite en Figure 1.

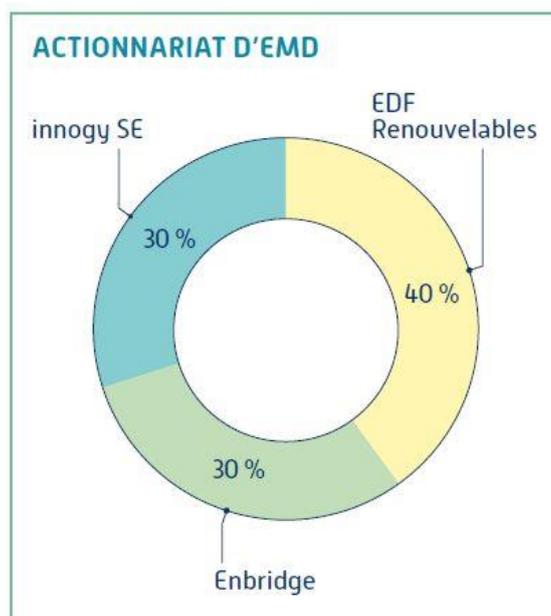


Figure 1 : Répartition des partenaires au sein du groupement EMD.

La zone d'implantation géographique du projet se situe face au littoral dunkerquois (voir Figure 2). Le projet est soumis à une autorisation à « caractéristiques variables », qui s'applique à la filière des énergies marines renouvelables depuis décembre 2018. Cette nouvelle réglementation permet au porteur du projet de faire varier, au cours du projet et si nécessaire, la puissance des éoliennes, leur taille ou leur nombre. Par exemple, il est important de noter qu'à ce stade du projet, il n'existe pas de schéma d'implantation définitif des éoliennes.

A ce stade, il est anticipé que le parc contiendra entre 38 et 46 éoliennes, pour une puissance installée comprise entre 400 et 600 MW. La puissance unitaire des éoliennes devrait être comprise entre 12 et 16 MW. Ce choix permet de limiter l'emprise totale du projet à 50 km<sup>2</sup>, soit environ 68 % de la zone proposée à l'appel d'offres. La zone proposée par l'État dans le cadre du dialogue concurrentiel donnait la possibilité aux candidats d'installer les premières éoliennes à 9 kilomètres. La distance minimum effective à la côte du projet a été fixée à 10 km.

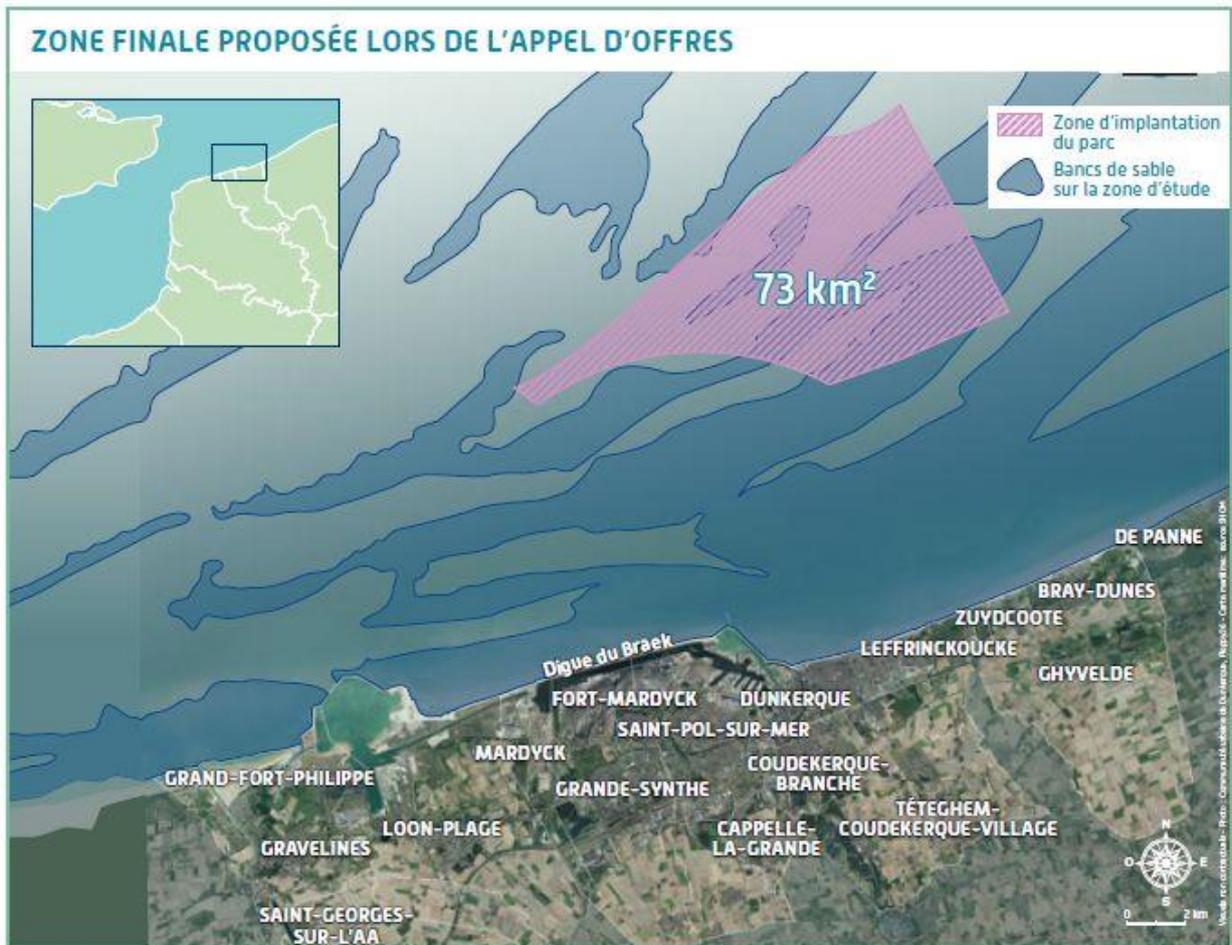


Figure 2: La zone d'implantation du parc de Dunkerque (source : dossier de synthèse du Maître d'Ouvrage)

Pour une puissance installée proche de 600 MW, la production électrique annuelle du parc éolien en mer de Dunkerque serait d'environ 2,3 térawattheures, ce qui correspond à la consommation électrique résidentielle de près d'un million d'habitants, soit l'équivalent de plus d'un tiers de la population du département du Nord. La date de mise en service envisagée est 2027 (voir calendrier prévisionnel, Figure 3).

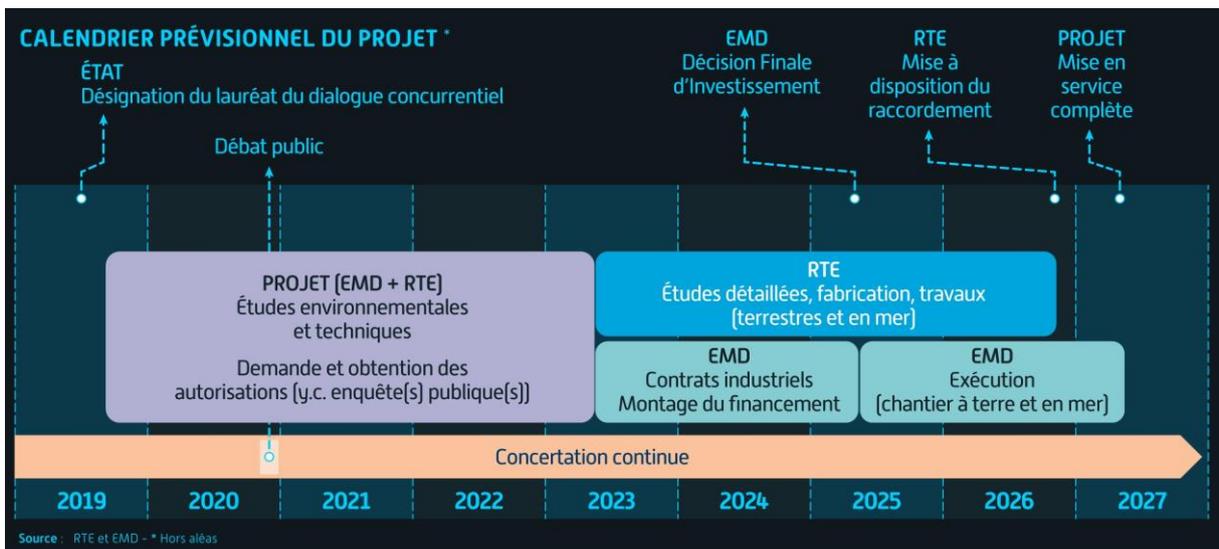


Figure 3 : Calendrier prévisionnel de mise en œuvre du projet (source: RTE, site web du projet).

Parallèlement au calendrier technique de l'appel d'offres, et conformément à la loi, le projet de parc éolien de Dunkerque fait l'objet d'un débat public animé par une Commission particulière du débat public (CPDP), neutre et indépendante. La CPDP a été saisie le 9 août 2019 par la maîtrise d'ouvrage du projet de parc éolien en mer au large de Dunkerque. Le 4 septembre 2019, la CNDP a décidé d'organiser un débat public dont elle a confié l'organisation à une commission particulière composée de 4 membres : Roland PEYLET (Président), Claude BREVAN, Jacques ROUDIER et Dominique SIMON. Ce débat, qui se déroule du 14 septembre au 13 décembre 2020, a pour objectif de donner au public le plus large l'opportunité de connaître les objectifs et les caractéristiques du projet dans tous ses aspects, et de former un avis informé sur le sujet.

Lors de sa séance du 29 juillet 2020, la CNDP a décidé, en application du IV de l'article R. 121-7 du code de l'environnement, et sur proposition de la commission particulière, de confier à l'auteur du présent rapport une expertise, portant sur les problématiques de la perception anticipée du paysage par le biais des photomontages.

Le présent document vise donc à apporter, dans la mesure du possible, un éclairage détaillé sur les questions d'impact visuel soulevées par le projet, d'une part dans la méthodologie adoptée pour sa mesure, et d'autre part, dans l'évaluation particulière qui en résulte pour le projet de Dunkerque.

## 2. L'impact visuel éolien : définition, mesures

L'évaluation de l'impact d'une implantation éolienne obéit à une méthodologie bien balisée, et se décline suivant de multiples facteurs : faune, pêche, tourisme, économie, etc. (voir [Impact2010] pour une description détaillée). *L'impact visuel* d'un projet éolien (en particulier pour les projets terrestres) est un enjeu fort car les éoliennes créent de nouveaux paysages. Leur intégration dans la perception quotidienne dépend d'une analyse pertinente des modalités d'accueil dans l'environnement des riverains.

Les parcs éoliens en mer ont, quant à eux, des propriétés très spécifiques : si les éoliennes sont situées systématiquement loin des observateurs (plusieurs kilomètres, voire plusieurs dizaines de kilomètres en général), elles sont presque toujours perceptibles depuis le rivage, de par l'absence d'éléments occultants. On doit aussi tenir compte de la notion de paysage *perçu*, directement par les habitants (pour lesquels tel ou tel point de vue sera emblématique), ou par le biais de représentations typiques, notamment liées au tourisme.

Pour ce qui concerne les parcs éoliens en mer, le principal outil d'évaluation de l'impact visuel est le *photomontage* : sur la base de photographies panoramiques réalisées sur site, le futur parc éolien est représenté en images de synthèse (sur la base de modèles 3D simulant la forme, la disposition et l'apparence exacte des éoliennes) et incrusté dans le panorama de façon réaliste, afin de rendre compte de la vue qu'en aura un observateur à cet endroit. Le résultat est présenté

aux acteurs de l'évaluation (pouvoirs publics, municipalités, grand public) sous forme d'impression de haute qualité, ou directement en ligne, sous forme de site internet dédié.

### 3. Les objectifs de l'expertise

Afin de fournir à un large public des éléments d'appréciation du futur impact visuel du parc, le maître d'ouvrage du projet de Dunkerque a commandité une série de photomontages, réalisés par le cabinet d'étude spécialisé Géophom [GeophomDunkerque]. Cette série de photomontages illustre, via une collection de 18 vues panoramiques à 180°, prises depuis des points représentatifs du littoral concerné (depuis la digue de l'Aa à l'ouest jusqu'à Neuwpoort à l'est), l'aspect visuel du champ éolien à différentes heures de la journée, tel qu'anticipé. D'autres photomontages viendront à terme compléter cette série.

Suite à une réforme réglementaire survenue en décembre 2018, concernant les autorisations des parcs éoliens en mer (autorisation à *caractéristiques variables*), il est important de noter qu'à ce stade du projet, il n'existe pas de schéma d'implantation des éoliennes figé et définitif, contrairement aux projets de parcs des appels d'offre précédents. Par ailleurs, le modèle final des machines qui constitueront le parc n'est pas encore connu.

C'est pourquoi, pour chaque panorama, il est prévu de produire 2 photomontages, qui présenteront chacun un scénario d'implantation envisagé à ce stade :

- L'un constitué de 46 éoliennes de hauteur au moyeu 125m et de diamètre 200m (hauteur maximum : 225m)
- L'autre de 38 éoliennes de hauteur au moyeu 170m et de diamètre 260m (hauteur : 300m)

Le nombre d'éoliennes effectivement installées sera compris entre ces deux extrêmes, et le modèle retenu aura des caractéristiques comprises entre les deux types de machines correspondant. Le compromis nombre/diamètre reste donc ouvert à ce stade, dans les limites de l'autorisation.

Lors du débat public, les photomontages seront accessibles sous deux formes :

- un site internet, sur lequel un outil interactif permet d'explorer chacune des 18 vues panoramiques, et donc 36 photomontages (ces pages sont optimisées pour une résolution verticale d'écran de 1024 pixels).
- des vues imprimées sur des grands supports semi-circulaire de 3m de développé, similaire à celui visible Figure 4. Ces panneaux seront disponibles lors du débat public, dans un nombre encore à déterminer.



Figure 4 : Exemple de vue panoramique réalisée à partir d'un photomontage, utilisée lors d'un autre projet de parc éolien en mer. Le sujet doit se placer au centre du demi-cylindre pour retrouver un point de vue fidèle à la réalité.

L'expertise de l'évaluation de l'impact visuel portera exclusivement sur ces contenus. Elle sera donc centrée sur l'outil de référence que constitue les photomontages, mais on verra que des éléments supplémentaires le compléteront utilement. Le travail portera :

- D'une part, sur la *validation de la procédure complète* ayant présidé à l'élaboration des photomontages, procédure comprenant notamment la capture du paysage existant par photographies panoramiques, la création des incrustations des éoliennes virtuelles et la restitution des montages dans les formats détaillés ci-dessus.
- D'autre part, sur l'évaluation de *l'impact visuel spécifique* du parc de Dunkerque, tant du point de vue objectif (mesures géométriques, mesures d'apparence) que subjectif (du point de vue psycho-visuel d'observateurs humains du phénomène). En effet, il est possible de fournir des éléments pertinents permettant d'expliquer pourquoi cet impact obéit à des critères mesurables et est donc, dans une large mesure, prédictible. En particulier, on comparera l'impact visuel prédit des futures machines du parc avec des éléments existants et représentatifs du paysage côtier, en se concentrant sur les zones critiques (où l'impact est maximum).

#### 4. Plan du rapport

Le présent rapport d'expertise va, par voie de conséquence, être organisé en deux grandes parties : la première (partie B ci-après), de nature essentiellement technique, se penche sur l'examen de la méthodologie de création des photomontages elle-même, en regard des

connaissances scientifiques actuelles sur la création d'images hybrides (mêlant éléments réels et simulations 3D) et des pratiques couramment admises dans le domaine. Elle déterminera donc si les outils, procédures et technologies mis en œuvre pour la réalisation des photomontages sont valides pour la création des supports visuels mis à disposition du public en amont de l'étude d'impact. Une fois cette méthodologie validée, la seconde (partie C) se penchera quant à elle sur la question de l'évaluation de l'impact visuel spécifique sur le site de Dunkerque, en apportant des éléments quantitatifs et qualitatifs en complément des photomontages proprement dit, de manière circonstanciée. La méthode retenue fait appel à une analyse spécifique, s'appuyant sur les données de l'étude paysagère, afin de comparer l'aspect visuel du futur parc avec des éléments existants du paysage. Une partie finale conclura l'étude en synthétisant ses principaux résultats.

## B. Examen de la méthodologie par photomontage

### 1. L'impact visuel

Par définition, l'impact visuel d'un parc éolien est la détermination de la modification de l'aspect d'un paysage suite à son implantation. La méthodologie employée est similaire à celle de toute implantation d'une construction (habitation, monument, usine) dans une zone géographique. Sur des bases objectives, elle commence par la détermination de l'aire d'étude. Dans le cas d'implantations d'éoliennes en mer, on divise cette aire en trois zones [Impact2010]:

- Une aire d'étude *éloignée*, bornée par la distance de visibilité maximale. Dans le cas présent, cette distance peut être fixée à environ 50 km. On se référera à l'étude paysagère commanditée par EMD [Paysage2019] pour la justification de cette distance limite, dictée par des considérations de visibilité liées à la nature du paysage.
- Une aire dite *rétro-littorale*, qui s'étend du littoral (le trait de côte, appelé aussi bord de mer) à l'arrière-côte. Sur le site de Dunkerque, cette aire est très diversifiée : falaises (site des deux-caps), zones industrielles ou portuaires (Dunkerque), façades littorales naturelles (Leffrinckoucke), plages, stations balnéaires plus ou moins construites (Malo-les-Bains, Nieuwpoort). Compte tenu de l'éloignement des éoliennes (distance minimum à la côte : 10 km environ) et des paysages côtiers, le rétro-littoral est en général peu profond (moins d'un kilomètre), et on peut considérer que tout élément occultant proche (arbre, maison) s'interposant entre l'observateur et les éoliennes masquera leur présence. En clair, pour l'impact visuel, on s'intéressera uniquement au « pire cas », celui d'une observation soit depuis le bord de mer lui-même, sans élément d'interposition, soit depuis un point de vue dégagé, dans des zones particulières (voir section C).
- Une aire d'étude *intermédiaire*, couvrant l'espace entre le parc éolien et le littoral. Dans le cas du site Dunkerque, elle est totalement maritime. La perception du parc depuis les itinéraires maritimes empruntés par des bateaux transportant des passagers (ligne Douvres-Dunkerque) se fait à des distances importantes, donc avec un impact modéré (sauf bien sûr à l'arrivée à Dunkerque, où la perception est proche de celle du littoral).

Partant de cette division grossière de l'espace, la détermination de l'état initial du patrimoine et du paysage peut être faite. Elle est détaillée dans la notice paysagère très complète dédiée à ce projet [Paysage2019]. Dans le cas qui nous occupe, on peut déterminer schématiquement suivant les composantes suivantes :

- Une zone **d'impact faible**, comprise entre le cap Gris-Nez et le cap Blanc-Nez, à une distance entre 40 et 50 kilomètres du parc de Dunkerque. En dépit de la

hauteur d'observation (jusqu'à 135 mètres au cap Blanc-Nez), les éoliennes y seront peu visibles, de par la nébulosité atmosphérique (la visibilité n'atteint cette distance que très rarement) et leur petitesse (17' d'angle vertical). Par ailleurs, l'azimut d'observation du parc dans cette zone est proche de 90° (l'azimut de référence, face à l'observateur, vaut 0°) ce qui veut dire qu'il est peu probable que le regard d'un observateur se dirige spontanément dans cette direction.

- Deux zones **d'impact intermédiaire**, pour lesquelles la distance aux éoliennes les plus proches varie entre 35 km (Sangatte, Oostende) et 18 km (Oye-Plage, Nieuwpoort), avec un éloignement typique de 25 km. Pour la plupart des points de ces zones du littoral, la nébulosité atmosphérique réduit considérablement la visibilité du parc, avec une hauteur sur l'horizon d'environ 37' pour les machines les plus proches. Leur azimut, latéral, modère cependant leur visibilité.
- Une zone **d'impact maximum**, située entre Gravelines et Coxyde-Bains, où la distance au parc est minimale, environ 11.5 km et 15km, ce qui lui assure une hauteur d'environ 102' (soit 1,72°) sur l'horizon, et une emprise horizontale non négligeable (55 degrés environ). Les conditions atmosphériques dans ce secteur permettent de prédire une visibilité des machines les plus proches environ 60% du temps (voir plus loin).

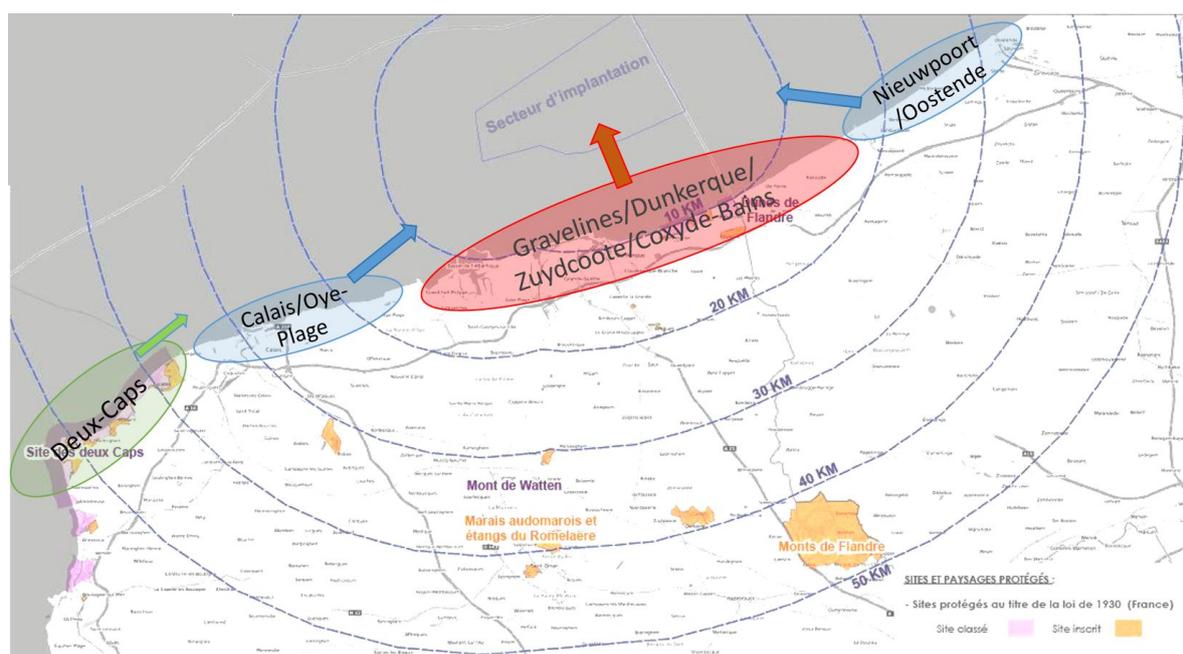


Figure 5 : Carte des principales zones du littoral concernées. L'épaisseur des flèches est proportionnelle à l'impact visuel a priori, compte tenu des éléments paysagers (distance, élévation).

Au-delà de la topographie, on doit aussi tenir compte de la notion de paysage *perçu*, soit directement par les habitants et les nombreux visiteurs du site, mais aussi tel qu'il est représenté et imaginé par le biais de représentations historiques, artistiques ou audiovisuelles. On distingue ainsi 4 représentations emblématiques de la région (voir Figure 6):

- une image liée au tourisme de plage, avec l'exemple-type de la station balnéaire de Malo-Les-Bains (plages, côté urbanisée) côté français, ou La Panne côté belge.

- une image liée aux activités industrialo-portuaires, sur le front de mer de Dunkerque. Le port, très présent dans le paysage urbain dunkerquois, a une vocation énergétique affirmée (centrale électrique, terminaux pétroliers et terminal méthanier, proximité de la plus grande centrale nucléaire d'Europe, usine ArcelorMittal).

- une image d'espaces naturels préservés (site des Deux Caps, dunes de Flandres, réserve naturelle du Platier d'Oye), associés à des points de vue remarquables (falaises), des activités sportives (randonnées) et d'observation ornithologique.

L'étude doit enfin prendre en compte le fait que la perception du paysage peut évoluer en fonction de facteurs dynamiques propres à chaque site, comme les marées. C'est sur l'ensemble de ces considérations que **l'étude paysagère** permet de sélectionner **un panel de points de vue caractéristiques** du littoral.

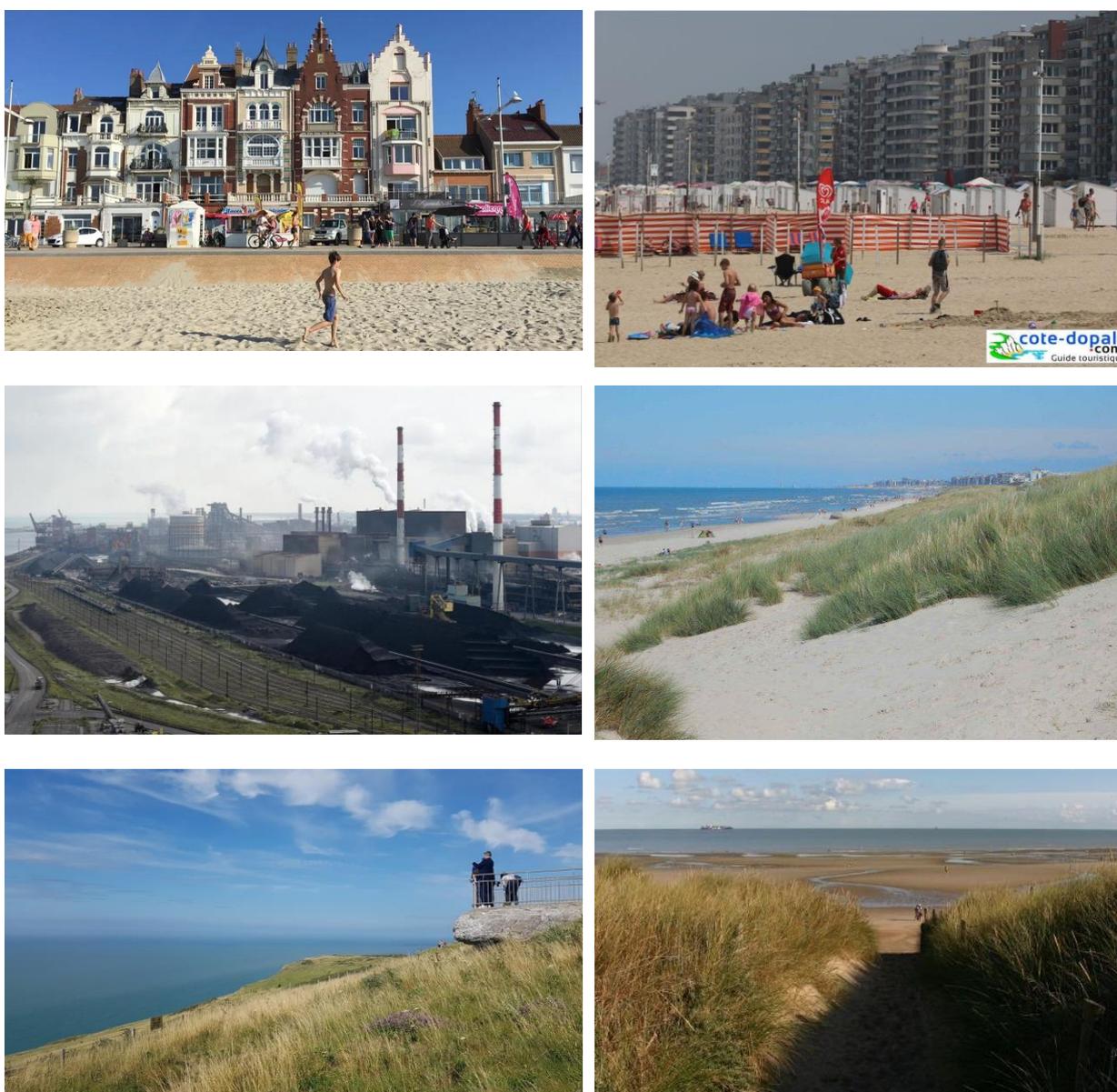


Figure 6 : Quelques paysages typiques du littoral dans la zone critique d'impact maximum : station balnéaire de Malo-Les-Bains, station de La Panne, installations portuaires de Dunkerque, dunes de Flandre à Bray-Dunes, Cap Blanc-Nez, réserve du Platier d'Oye.

La méthodologie couramment admise et pratiquée pour l'évaluation de l'impact visuel éolien (terrestre comme maritime) conduit, à partir de la détermination de ces différentes zones et points d'intérêt, à la réalisation d'une série de photomontages représentatifs de la future apparence du champ, pris depuis des points de vue clé. C'est sur la base de ces photomontages que l'on appréciera, aussi objectivement que possible, l'impact réel des éoliennes sur la vue depuis le littoral. Cette méthodologie a fait ses preuves sur de précédentes installations éoliennes en mer. On en trouvera un exemple représentatif situé en Suède, dans [Lilgrund09]. La Figure 7 montre deux vues sur le champ d'éoliennes de Lillgrund, la première obtenue a priori par photomontage et la seconde, réalisée *in situ* après construction. On voit qu'il est difficile de distinguer le réel du virtuel, compte tenu de la qualité de mise en œuvre et de l'éloignement des objets (dans ce cas, 5 km pour des éoliennes de 115m de haut, donc un impact similaire à celui du futur parc de Dunkerque).

Nous proposons donc, dans la suite de cette section, de détailler le processus mis en œuvre pour la réalisation des photomontages de référence. A chaque étape, on s'attachera à déterminer si les méthodologies mises en jeu pour le projet de parc éolien de Dunkerque suivent ou non les règles de l'art admises dans ce domaine, ce qui permettra de valider l'approche technique et la bonne foi des supports d'évaluation de l'impact accessibles aux acteurs du débat.





Figure 7 : Comparaison réel / virtuel sur un des photomontages réalisés pour l'étude d'impact sur le site éolien de Lillgrund (Suède). L'image réelle est en bas, la simulation au-dessus. Les éoliennes sont situées à 5,3 km du littoral. On notera l'excellente concordance globale, mais une visibilité moindre dans le cas réel, due à des facteurs atmosphériques.

## 2. Processus de conception du photomontage d'impact

Un photomontage réaliste se doit d'abord de suivre une méthodologie précise. Ce processus se décompose classiquement en trois grandes étapes réalisées successivement (voir Figure 8).



Figure 8 : Processus de réalisation d'un photomontage.

La première étape est la phase indispensable de **capture** des supports visuels caractéristiques du site, à partir desquels on va constituer les vues de référence (panorama) sur lesquelles on va, dans un deuxième temps, superposer l'image du champ d'éoliennes tel qu'il serait visible, du même endroit : c'est la phase de **photo-composition**. La résultante, qui est une photographie hybride entre le réel (le panorama existant) et le virtuel (les futures éoliennes), doit enfin être présentée à son public de telle façon qu'il pourra en apprécier l'impact réel. En particulier, on

s'attache à ce stade à montrer le photomontage de telle façon qu'il se superposerait au paysage réel, vu depuis une fenêtre de même taille ouverte dans un bâtiment sur le site : c'est la phase dite de **rendu** final, dont il ne faut pas négliger l'importance dans l'impact visuel.

Intéressons-nous d'abord à l'étape de capture du support visuel qui représente la situation existante.

### 3. Capture des supports panoramiques

La construction d'un panorama de photomontage nécessite, avant tout, de collecter des photographies sur site. A ce jour, ces photographies sont prises à l'aide d'un appareil photo numérique (APN) équipé d'une optique appropriée. On trouvera en Annexe 2 les paramètres guidant la détermination du système de capture. Il faut cependant ici remarquer que la vision humaine ne résulte pas d'un simple processus photographique, aussi, les choix techniques relèvent d'une combinaison de critères physiques (métrologie, optique géométrique) et de considérations empiriques nées de plusieurs décennies de pratique. Actuellement, le consensus se fait, pour ce qui est du capteur optique, autour d'objectifs proches du 50 mm sur un reflex 24x36 classique, ce qui fournit un angle de vue de 40° en horizontale x 27° en verticale, proche du champ visuel monoculaire statique. Pour construire une vue panoramique du site, on prend ainsi une série de clichés qui, assemblés en une mosaïque d'images, vont constituer le panorama de base du photomontage. Pour l'évaluation de l'impact d'un champ éolien distant, proche de l'horizon, le choix logique est de créer un panorama cylindrique (idéalement à 360°, mais dans la pratique on se limite souvent à un demi-horizon, soit 180°). L'ouverture verticale des APN capture de façon assez satisfaisante le champ de vue vertical d'un observateur humain regardant l'horizon (voir Figure 9). Monté sur une tête panoramique spécialement étudiée pour cette tâche, l'APN capturera une série de vues partiellement superposées, décalées de 24° les unes des autres (ce qui autorise un recouvrement des vues indispensable au processus de création du panorama). Typiquement une quinzaine de vue est nécessaire pour un panorama circulaire complet, 7 vues pour un demi-tour (voir [Designer04]). Le panorama cylindrique ainsi reconstitué sera proche de la projection sphérique que crée le paysage sur la rétine, pour peu que l'angle vertical reste modéré (déformation de quelques % pour un angle d'une trentaine de degrés).

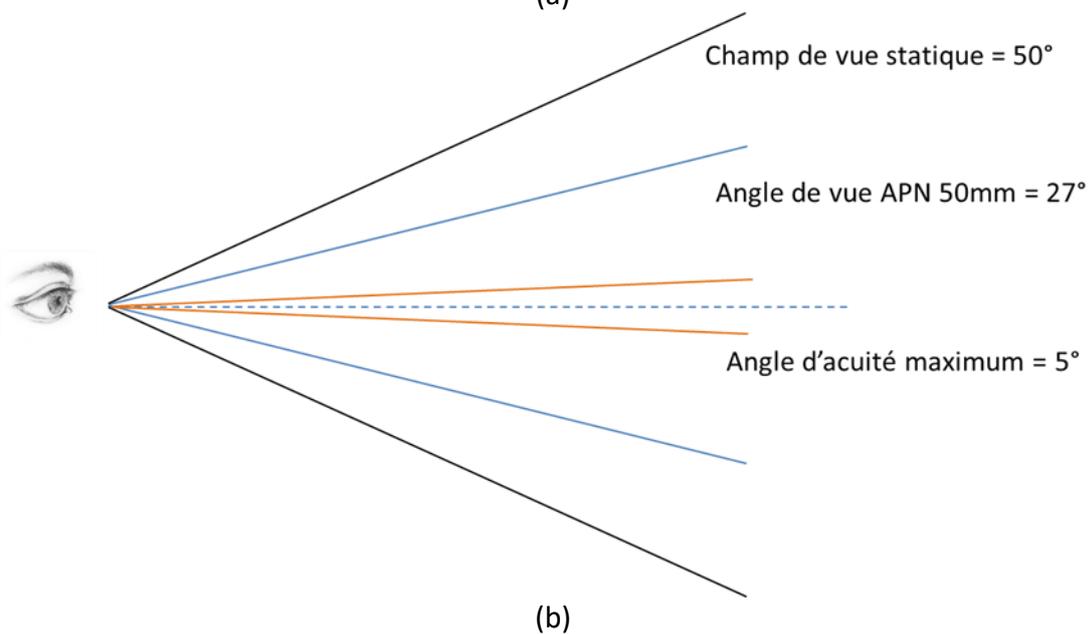
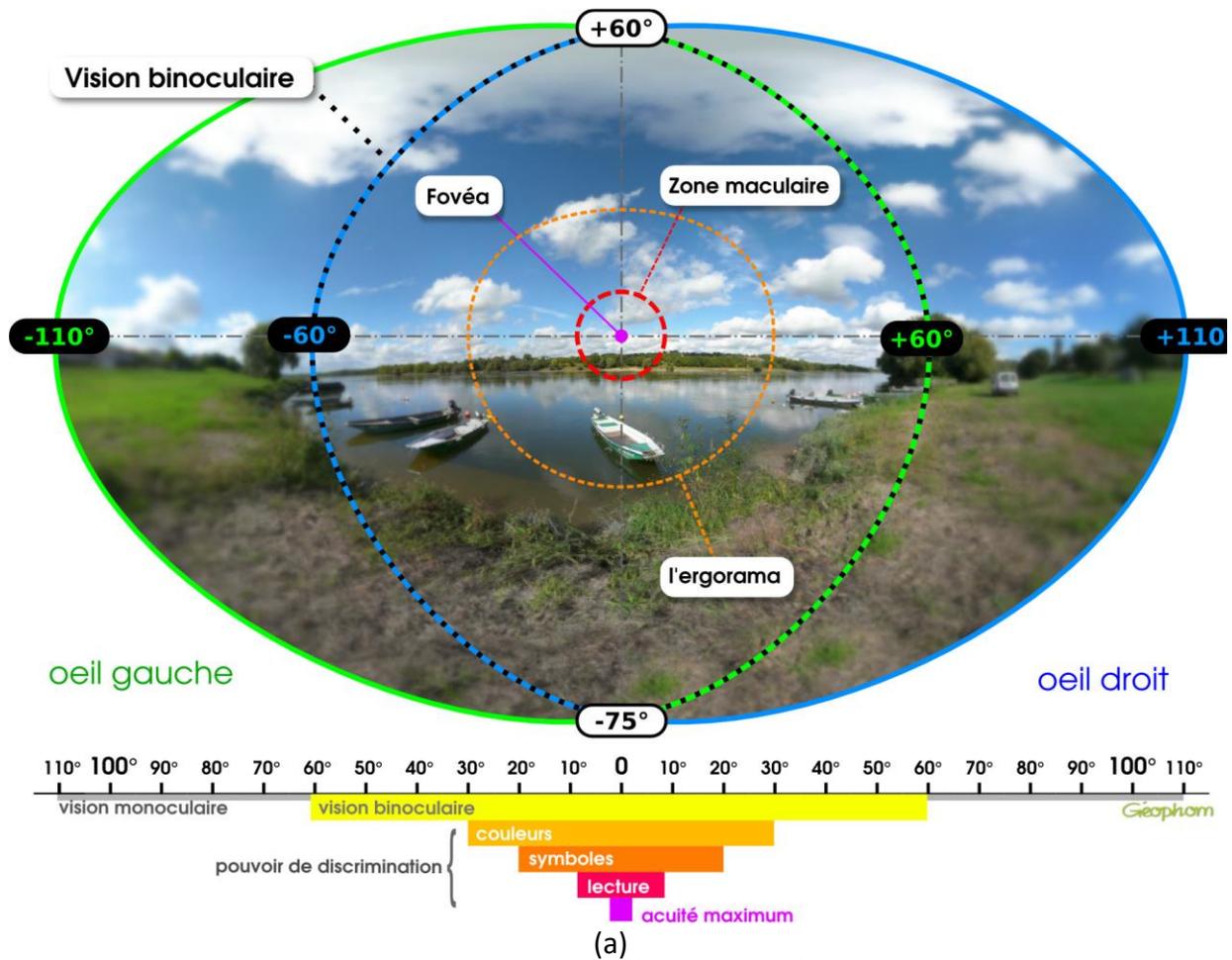


Figure 9 : Vision humaine (a) Ouvertures angulaires d'observation en vue frontale (source Géophom) (b) ouvertures angulaires verticales

Le cabinet d'étude Géophom a été chargé de réaliser les photomontages du projet de parc éolien de Dunkerque. Les photographies ont été réalisées à l'aide d'un APN reflex plein format à la résolution de 36 mégapixels (modèle Nikon D800E), doté d'une focale fixe de 50 mm et monté

sur un trépied muni d'une tête panoramique crantée à 24°. La position de prise de vue est précisément déterminée par GPS (lieu et date), raffinée par détermination d'amers repérés visuellement par compas. Une série de 15 photographies ainsi capturées permet de constituer un panorama complet à 360°, duquel sera extrait un demi-tour centré sur le champ éolien, dont la position est par ailleurs connue par co-repérage GPS préalable. Afin de minimiser les opérations de post-production lors de l'assemblage numérique du panorama (voir section suivante), il est indispensable de s'assurer que l'APN effectue la rotation panoramique autour du point nodal, c'est-à-dire au niveau du point d'entrée des rayons lumineux dans l'optique de l'appareil. Cette opération nécessite un calibrage préalable, effectué à l'aide de mires graduées. La tête panoramique permet ensuite de préserver la position obtenue sur site, et donc d'assurer une rotation pure garantissant un panorama optimum.

Du point de vue de la capture des prises de vue, la procédure de Géophom est rigoureuse, adaptée, et ne suscite aucun commentaire particulier. Il est particulièrement judicieux que chaque prise de vue ait été abondamment commentée et annotée (conditions météo, amers remarquables, paramètres de l'APN), ce qui permet d'en extraire des informations utiles pour les usagers des photomontages finaux.



**Figure 10 : prise de vue panoramique. (a) l'APN utilisé. (b) La tête panoramique. (c) L'ensemble est calibré afin que la rotation s'effectue autour du point nodal de l'appareil. (d) Les prises de vue sont complétées par des mesures GPS et des annotations vocales.**

## 4. Photocomposition

### a. Assemblage panoramique

Les images ainsi capturées sont ensuite assemblées pour former un panorama continu à 360°, selon une projection cylindrique au centre de laquelle se trouverait l'APN. Les techniques de traitement d'image utilisées pour ce type d'opération sont regroupées sous le vocable générique de « stitching » (assemblage ou couture en français). Elles consistent en une déformation des images de départ pour les conformer à une projection unifiée (cylindrique la plupart du temps), puis à une fusion des pixels superposables entre les images (voir Figure 11). Les opérations mathématiques impliquées sont bien connues et maîtrisées depuis une vingtaine d'années. Des solutions logicielles performantes et accessibles aux non-spécialistes sont développées depuis une décennie. Le choix est vaste et seuls les détails de réglage ou la souplesse d'utilisation distinguent les solutions existantes. L'expertise de l'utilisateur reste cependant requise pour la sélection finale des points d'ancrage, c'est-à-dire des appariements de pixels correspondant à des objets présents dans des photos deux à deux, et qui permettent de les recoller sans erreur (voir Figure 12). Ces appariements seront d'autant plus faciles que les prises de vue auront été bien choisies au préalable. Une expertise née d'une expérience du terrain reste donc ici indispensable.

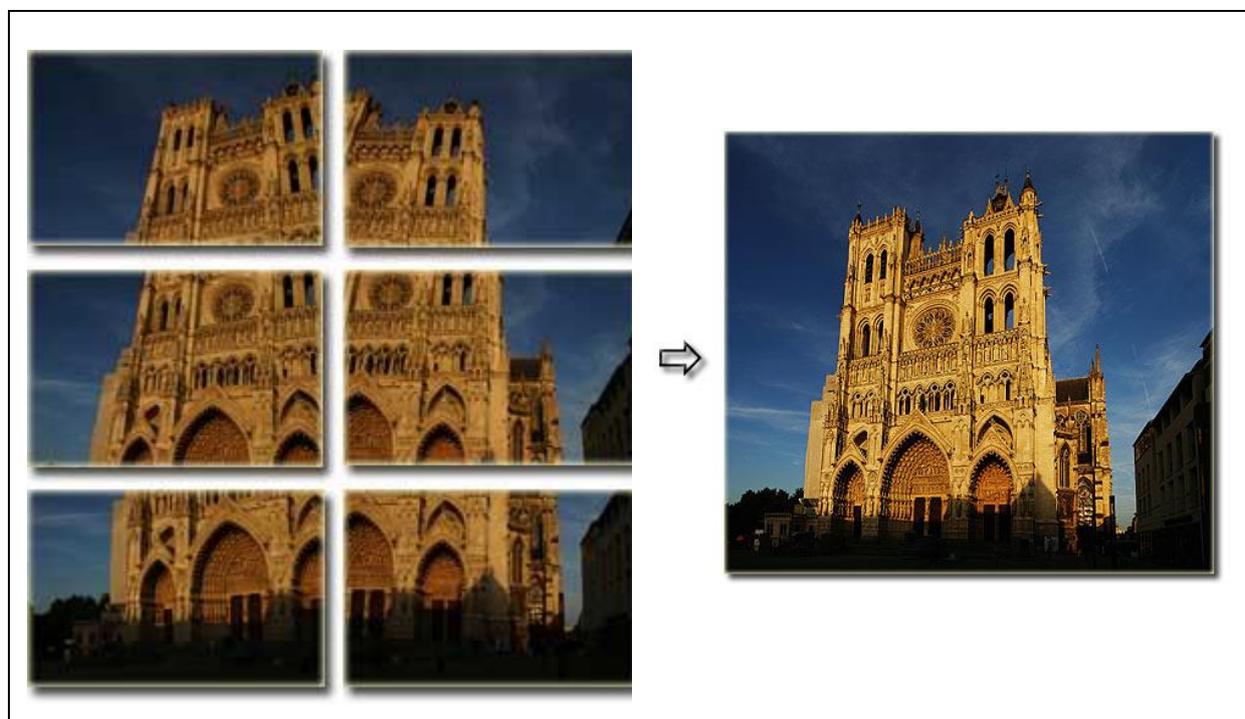


Figure 11 : Exemple de stitching (tiré de [www.ptgui.com](http://www.ptgui.com)).

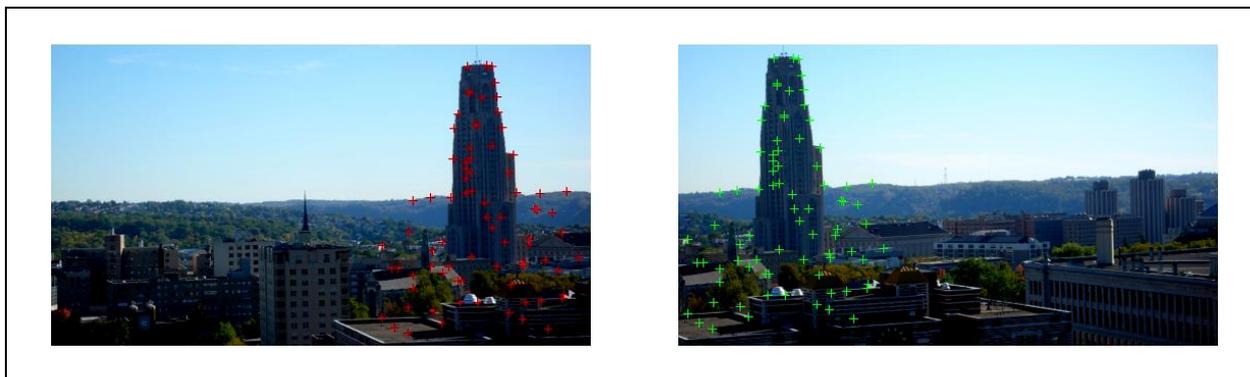


Figure 12 : Mise en correspondance d'amers dans un couple d'images. Chaque croix rouge correspond à une croix verte et réciproquement.

Pour ce qui est des photomontages réalisés par Géophom, le programme d'assemblage utilisé est *Hugin (version 2018.0.0.5)*, logiciel libre particulièrement performant [HUGIN]. Ce logiciel permet de compenser les déformations optiques de l'appareil (par calibrage préalable), et de sélectionner manuellement les points d'appariement pour le calcul de l'assemblage panoramique final. La difficulté dans le cas de l'éolien en mer est qu'il est impossible de trouver des points d'accroche fiables sur la mer elle-même. On doit donc se limiter aux éléments d'avant-plan (plage...). Typiquement une vingtaine de points bien répartis sur chaque image sont nécessaires. Une fois le calcul d'assemblage réalisé, des ajustements de contraste, de couleur et de luminosité sont nécessaires pour obtenir un panoramique parfaitement homogène.

L'examen des panoramiques résultant (sous leur forme numérique haute résolution de 33175 x 4840 pixels, voir un exemple Figure 13) permet d'attester que le processus de création mis en place par Géophom respecte les règles de l'art et génère des supports numériques exploitables pour le photomontage.



Figure 13 : Exemple de panorama obtenu (prise de vue depuis la batterie de Zuydcoote).

## b. Photomontage 3D

Une fois le panoramique créé, il faut y intégrer le modèle numérique du champ éolien. Pour ce faire, le panoramique est importé au sein d'un logiciel de composition 3D spécialisé, en conjonction avec un modèle topographique numérique de la zone. Les deux informations sont recalées avant d'y intégrer un modèle 3D des éoliennes spécifiquement créé pour ce projet. Enfin, une étape de rendu produit une image photo-réaliste du panorama augmenté des machines éoliennes, en fonction de multiples paramètres (matériaux, éclairage, conditions atmosphérique) – voir synopsis Figure 14.

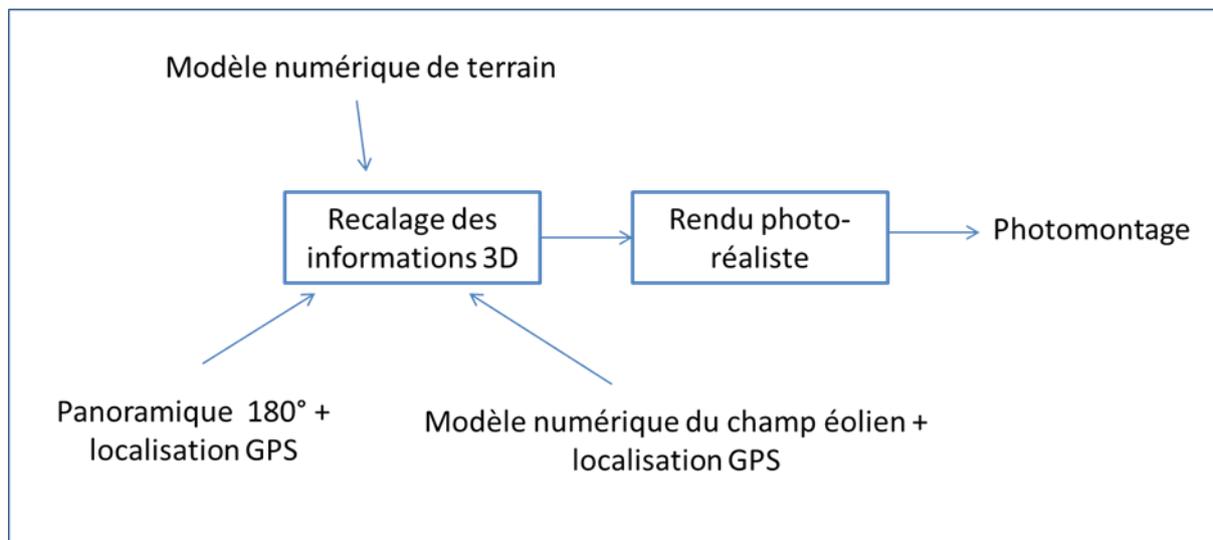


Figure 14 : Schéma du processus de photomontage.

Le modèle numérique de terrain est typiquement importé d'une base de données topographique de la zone littorale. On utilise ici la BDAlti-75 de l'IGN (résolution 75 m sur l'ensemble de la France, disponible sur <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/bd-alti-r-75-m-250-m-1-000-m/>).

La localisation du panorama est quant à elle obtenue à partir de coordonnées GPS attachées aux images (éventuellement affinée par vue aérienne). Par ailleurs, la détermination de l'azimut de référence du panorama (direction du nord dans l'image cylindrique) est déterminée par localisation d'amers dans l'image : antennes-relais, bâtiments, phares, etc.

Une difficulté supplémentaire provient du fait que l'espace maritime lui-même n'est pas géoréférencé (le niveau de la mer varie en fonction du temps) : Géophom contourne ingénieusement cette difficulté en plaçant arbitrairement le niveau de la mer à zéro et en décalant l'altitude du modèle topographique de la côte et du panorama en fonction de la hauteur de la marée à l'instant de prise de vue (les informations de hauteurs d'eau sont tirées des « Références Altimétriques Maritimes » du SHOM, édition 2014, mais n'ont pas varié depuis).

L'ensemble de ces informations est ensuite importé dans un logiciel de photomontage 3D dans lequel on va reproduire l'espace réel, augmenté par les éoliennes. Il existe deux grands types de solutions :

- Les logiciels généralistes
- Les logiciels spécialisés dans l'éolien.

### Logiciels généralistes

Il s'agit de logiciels libres (*Blender* [BLENDER]) ou commerciaux (par ex. *Unity3D* de Unity Technologies ou *Maya* d'Autodesk), permettant de modéliser des objets en 3D avant d'en faire des prises de vues, par exemple pour des films ou des publicités. Ces logiciels, développés depuis

plus de trente ans, possèdent maintenant des capacités de recréation d'images réalistes très abouties (voir Figure 15), presque impossibles à distinguer de la réalité. Cependant, ces logiciels ne sont pas adaptés au photomontage destiné à l'étude de l'impact visuel :

- Il est difficile d'y importer des modèles numériques de terrain ou des données géoréférencées ;
- Ils ne gèrent pas par défaut les panoramas cylindriques qui vont servir de « décor » au photomontage final (en particulier à la résolution très importante nécessaire à ce type d'application) ;
- Les bases de données relatives aux parcs éoliens à simuler n'existent pas dans les formats natifs de ces logiciels, ce qui implique un travail important de traduction de données 3D pour pouvoir les utiliser ;
- Les paramètres contrôlant la production de l'image finale (sources de lumières, propriétés des surfaces, atmosphère) sont excessivement complexes à maîtriser, et ne correspondent pas nécessairement à des phénomènes physiques réels : autrement dit, la production d'images peut obéir à des lois empiriques sans lien direct avec la réalité du terrain.



Figure 15 : Une image synthétique de paysage réalisée par la société Landscape3d.

Pour toutes ces raisons, en règle générale, on préfère, dans les domaines du design paysager, faire appel à des logiciels dédiés.

## Logiciels spécialisés

Il existe plusieurs logiciels permettant de simuler numériquement sur ordinateur l'implantation, le fonctionnement et l'impact d'un futur parc éolien. Concernant l'impact visuel à proprement parler, on peut citer deux grands produits :

- *WindPro* (de la société EMD International) est le produit phare qui assure, par une vaste gamme de modules, tous les aspects du design et de la planification d'un parc éolien, comme le bruit, la production énergétique, les zones d'influence visuelle, les effets stroboscopiques des pales, l'impact environnemental, le photomontage, le raccordement à la grille électrique, etc.
- *WindFarm* (société ReSoft), permet la modélisation du bruit, du rendement énergétique, de l'impact visuel (ombres portées, photomontages) du parc éolien. L'approche est également modulaire. Le logiciel est plus récent mais résulte d'une expertise de plus de 25 ans de son concepteur principal, Alan Harris.

Globalement, en ce qui concerne les capacités de simulation visuelle, les deux logiciels ont des capacités similaires, le choix de l'un ou l'autre n'est donc pas critique. La société Géophom a utilisé pour le parc de Dunkerque le logiciel *WindFarm* 5.0.1.2.

En ce qui concerne la méthodologie, la procédure est la suivante : le panoramique est chargé dans le logiciel (dans la limite des 180° supportés par celui-ci), ainsi que le modèle numérique du terrain et la représentation numérique des éoliennes dont la localisation GPS est connue (on ajuste, comme on l'a vu précédemment, ces données en fonction du niveau de la mer). Grâce au géo-repérage de repères identifiés dans le panorama (antennes, château d'eau, clochers, terrain...), on fait coïncider l'azimut de la vue avec les données 3D. Une fois l'azimut réglé, l'horizon photographique est ajusté sur l'horizon numérique. La précision de ce réglage est inférieure à 1/20<sup>ème</sup> de degrés, soit environ 3' d'angle, de l'ordre de l'acuité visuelle maximum de l'être humain.

Si le champ visuel du panorama d'origine est supérieur à 180°, seul le demi-cylindre qui nous intéresse sera extrait et traité dans *WindFarm*, avant d'être éventuellement réintroduit, après photomontage, dans le panorama complet.

La procédure suivie est très bien documentée dans les sources techniques et méthodologiques de Géophom [MethodoGeophom2017], ainsi que par le biais de vidéos capturées lors de sessions de travail réelles, mises à disposition de l'expert (voir Figure 16). L'analyse de ces matériaux, complétée par des interviews directes avec les intervenants de Géophom, permettent de conclure à la validité de la procédure de recalage des panoramas avec les informations numériques géoréférencées relatives au parc éolien.

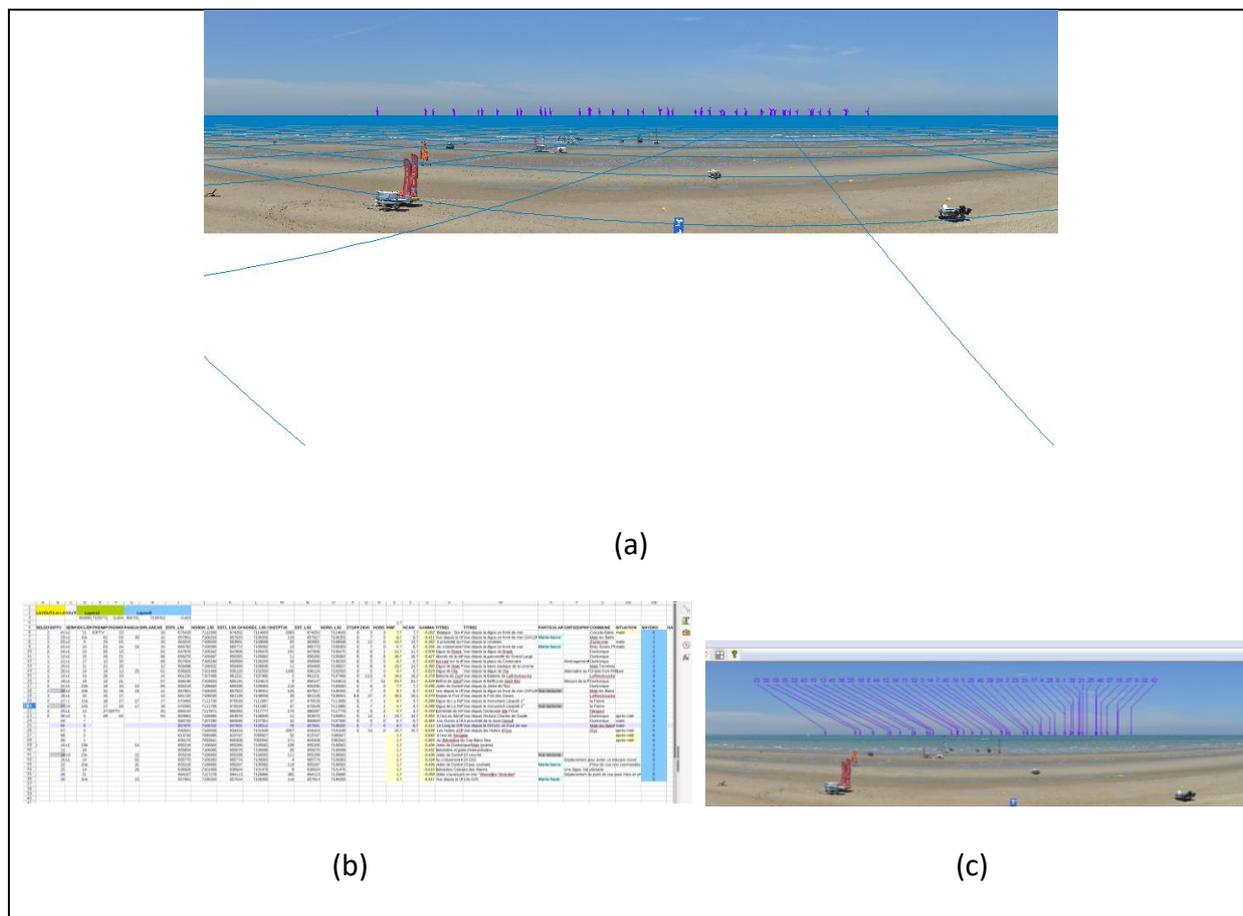


Figure 16 : Photo-composition du champ éolien : (a) Les éoliennes et le modèle numérique de terrain sont importés dans *Windfarm*. (b) Les indications de géolocalisation permettent le recalage précis du panorama photographique en superposition. (c) Toutes les informations sont maintenant correctement superposées dans le même modèle 3D, on peut passer à la phase de rendu.

## 5. Rendu visuel final et supports de présentation

### a) Rendu visuel

Une fois la modélisation 3D du parc éolien recalée par rapport au panorama photographique, il devient possible d'en produire une image réaliste qui viendra s'ajouter aux éléments existants. Cette phase, appelée phase de **rendu visuel**, est rendue possible par le calcul des interactions entre d'une part, une estimation des sources lumineuses présentes au moment de la photographie (pour l'essentiel, en journée, le soleil – le balisage de nuit est représenté sur les vues nocturnes), et d'autre part, les objets à visualiser, à savoir, ici, les éoliennes. Bien qu'encore à l'étude, ces dernières sont déjà suffisamment spécifiées, tant du point de vue de leur forme (du fait de l'éloignement, un modèle simplifié est suffisant) que du point de vue de l'aspect extérieur (couleur), qui suivra les normes en vigueur pour l'éolien en mer en France (Figure 17). Le matériau retenu est extrêmement diffusant, il en résulte un aspect mat (pas ou peu de reflets) facile à simuler informatiquement.

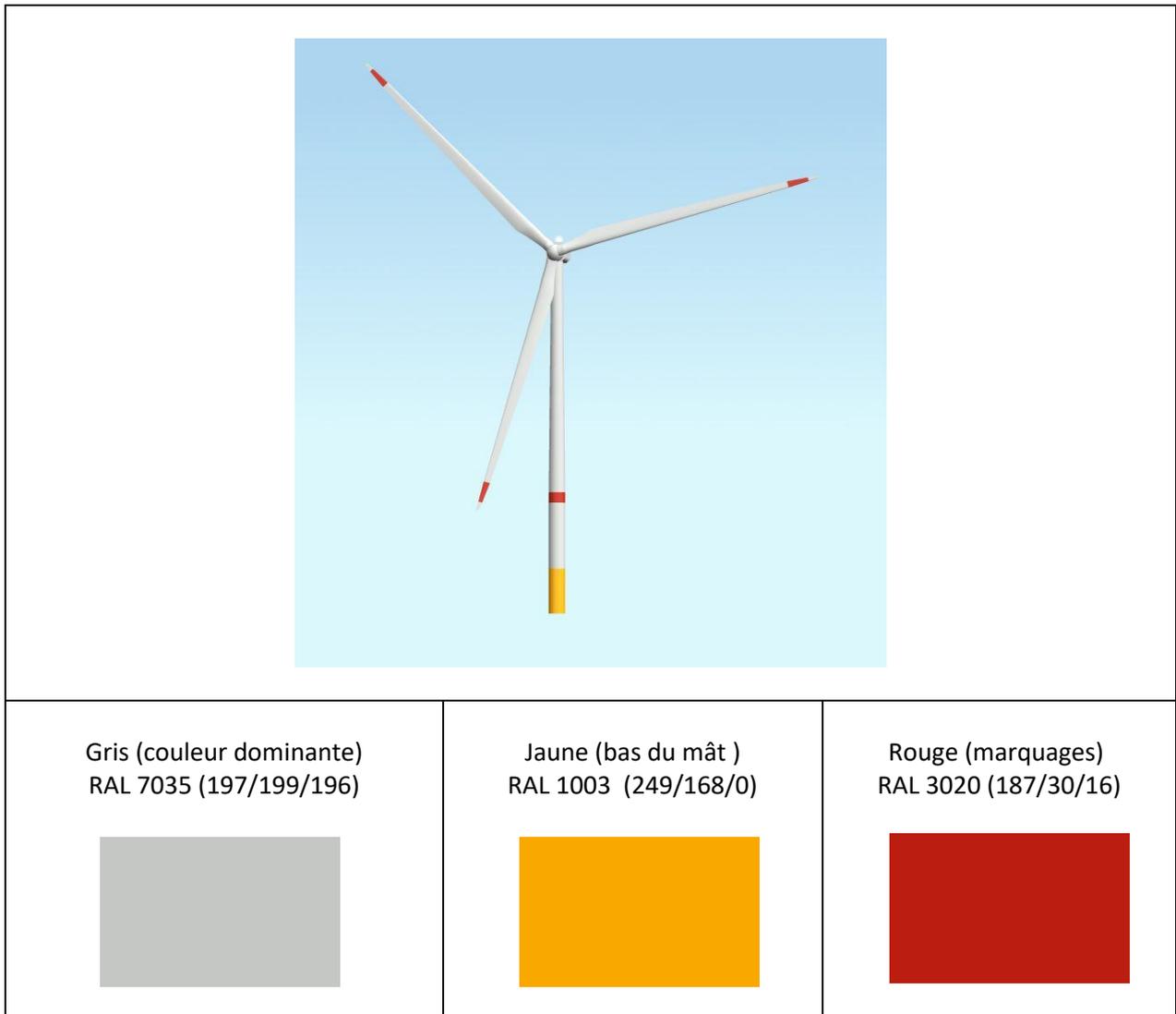


Figure 17 : Les couleurs utilisées pour la simulation du parc de Dunkerque (les valeurs indiquées entre parenthèses sont les composantes Rouge, Vert et Bleu dans le système RVB).

L'orientation des éoliennes par rapport à un observateur situé sur la côte étant un facteur déterminant dans leur visibilité, on choisira logiquement une orientation correspondant aux vents dominants. La rose des vents représentant les statistiques de direction des vents sur une année est visualisée Figure 18. On y constate une dominance très marquée des vents d'orientation Ouest/Ouest-Sud-Ouest. Ramenée à l'orientation du trait de côte dans la zone de Dunkerque, les éoliennes du parc en mer seront donc vues, la plupart du temps, selon une orientation d'environ 240° (ou -120°). Cette orientation est celle adoptée dans les photomontages présentés au public.

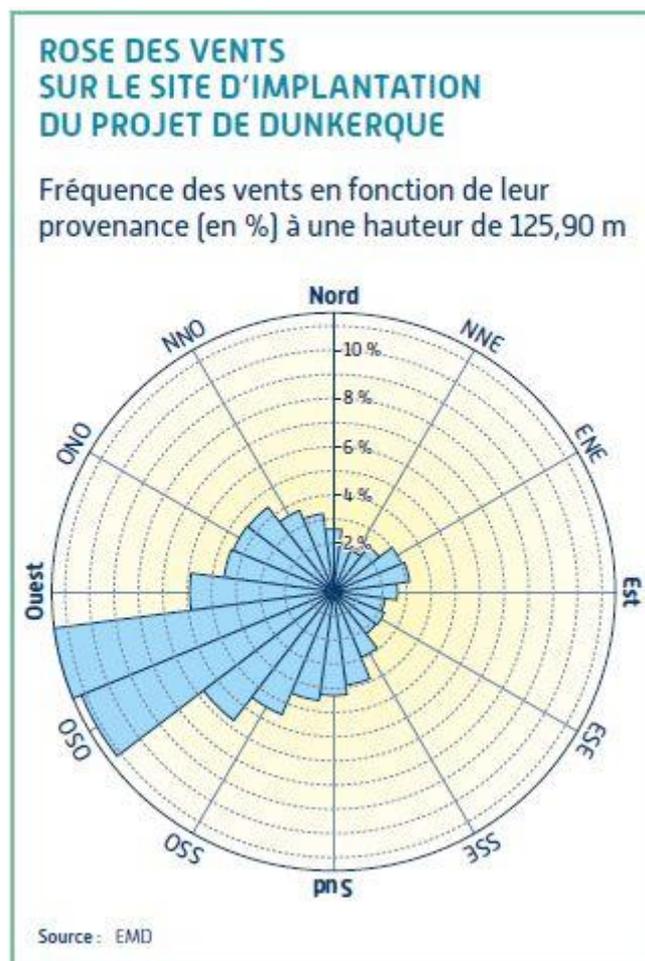


Figure 18: Rose des vents

La position du soleil (azimut, élévation) est calculée compte tenu du lieu, du jour et de l'heure de prise de vue. Il est important de réaliser des panoramas à différentes heures de la journée pour que les photomontages obtenus soient significatifs des différents aspects possibles des éoliennes (éclairage latéral ou zénithal, mais jamais à contre-jour du fait de la configuration spatiale, voir Figure 19). Dans le cas des photomontages examinés dans cette étude, 5 d'entre eux ont été réalisés le matin, 5 dans la période 12h-15h, 4 l'après-midi, deux le soir entre 18 et 20h et enfin 2 de nuit, ce qui assure une bonne représentativité.

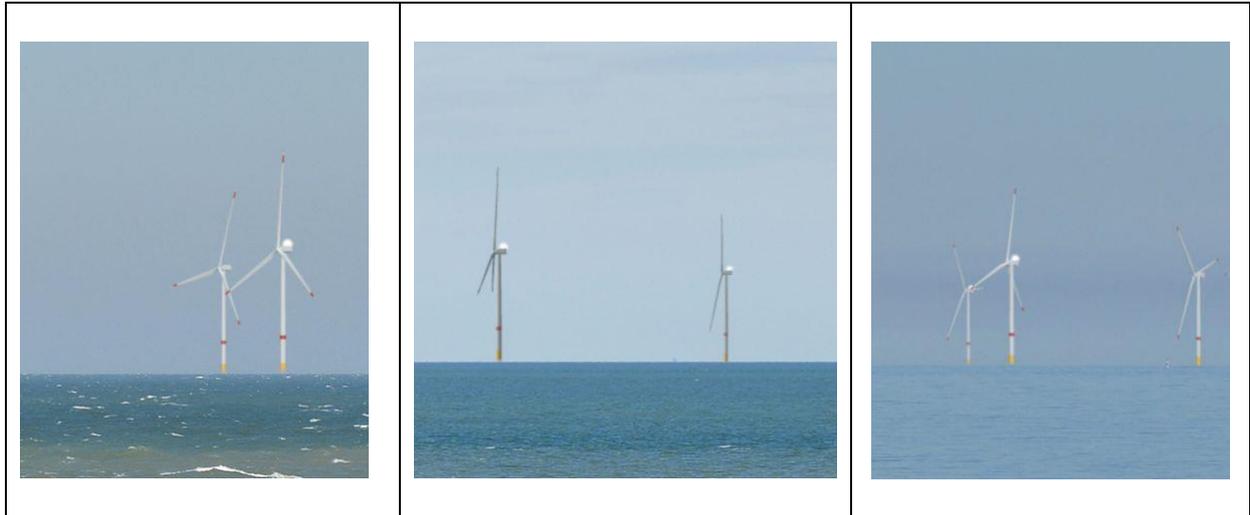
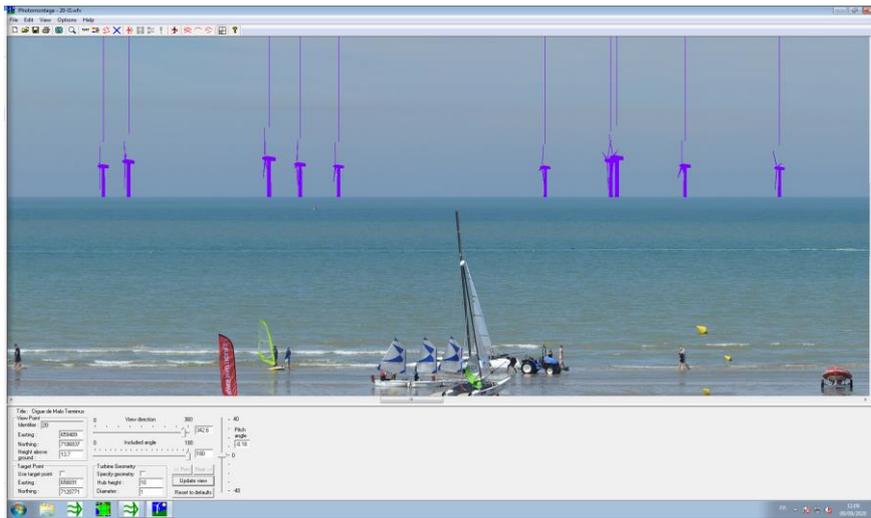
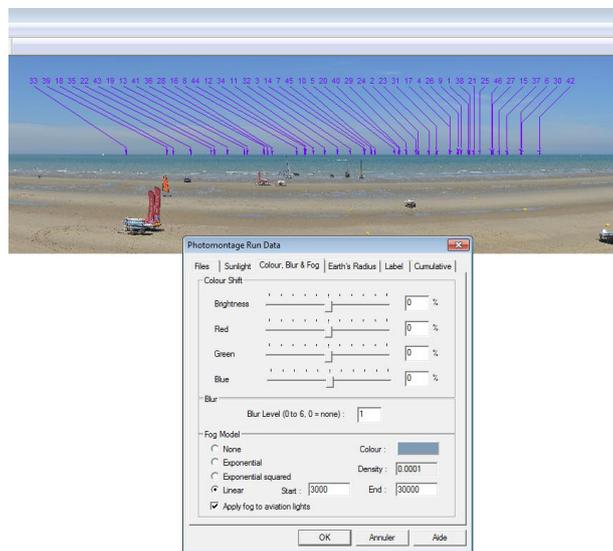


Figure 19 : Différents éclairages du parc éolien de Dunkerque en fonction des heures de la journée : à gauche le matin, au centre, vers midi, et à droite, en fin d'après-midi (les éoliennes sont vues à très fort grossissement). On remarque que la visibilité est maximale avec un éclairage zénithal.

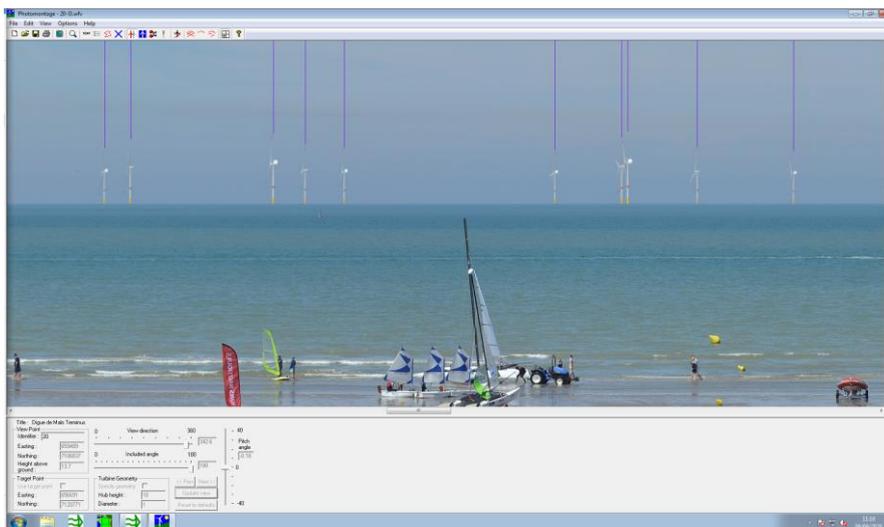
Par ailleurs, les paramètres contrôlant le rendu de l'image du parc doivent aussi tenir compte des conditions atmosphériques (transparence de l'atmosphère, diffusion de la lumière). Il est impossible d'utiliser des paramètres réels : ceux-ci sont très nombreux et surtout sont impossibles à mesurer sur le terrain sans un appareillage complexe très coûteux. In fine, le contrôle du rendu se fait par des lois empiriques approchées, faisant intervenir des décalages de teinte et des atténuations de contraste (voir Figure 20).



(a)



(b)



(c)

Figure 20 : Phase de rendu visuel dans une session WindFarm : (a) rendu « fil de fer », permettant de valider l'allure globale. (b) Un facteur d'atténuation est réglé pour simuler la variation de visibilité en fonction de la zone. (c) Rendu final dans Windfarm avant retouches.

Le cabinet Géophom utilise les fonctionnalités du logiciel de rendu *WindFarm* qui permet d'atténuer le rendu visuel des éléments synthétiques en fonction de leur distance. Une interpolation linéaire est ainsi effectuée entre la couleur du fond (horizon sans éolienne) et chaque pixel synthétique correspondant, entre deux distances : 0% d'atténuation à  $D_{min}$  et 100% à  $D_{max}$ . La détermination de ces paramètres d'atténuation dépend bien sûr de la distance à l'éolienne la plus proche du point d'observation ainsi qu'à l'éolienne la plus éloignée (obtenue par lecture des données de localisation GPS). Les réglages empiriques de  $D_{min}$  et  $D_{max}$  sont effectués sur la base de l'observation d'éléments du paysage existant (côte, phares en mer, tourelles) situés à des distances similaires. Cependant, des ajustements sont possibles, l'objectif étant de ne jamais totalement masquer les éoliennes les plus lointaines, tout en donnant à voir une certaine "profondeur" de champ. En pratique, on part de  $D_{min}=20\text{km}$  et  $D_{max}=40\text{km}$ .

Cette méthode approchée donne d'excellents résultats visuels et apparaît appropriée du fait de l'éloignement des objets, qui couvrent moins de 1 degré d'arc en termes d'angle vertical, et de leur homogénéité d'aspect (voir Figure 20).

Finalement, l'image des éoliennes est superposée au panorama d'origine. Pour corriger les artefacts de rendu qui subsistent du fait des approximations géométriques (par exemple, la mer est une surface parfaitement plane dans le module visuel de *WindFarm*), les images des éoliennes sont exportées dans un logiciel de retouche (ici *Gimp 2.10* [GIMP] est utilisé). La fusion des images des générateurs éoliens avec le fond panoramique se fait par la technique classique de *lissage des masques de fusion* dans ce logiciel.

D'autres post-traitements doivent aussi être appliqués :

- Éléments occultants : certains éléments du champ proche (personnages, poteaux, bateaux, etc.) peuvent masquer certaines éoliennes, à l'insu du logiciel de rendu. Il faut donc procéder manuellement à leur occultation (Figure 21).
- Prise en compte de l'interface avec la mer : *Windfarm* ignorant le concept de vagues (la mer est considérée comme une surface plate), la base des jackets est légèrement estompée pour rendre l'image plus réaliste.
- Le poste de livraison en mer n'est pas modélisé dans *Windfarm* et doit donc être ajoutée manuellement en 2D dans le photomontage, à partir d'images existantes (Figure 20). La position de cette station est connue avec précision dans le projet, son azimut dans le panorama l'est donc également.

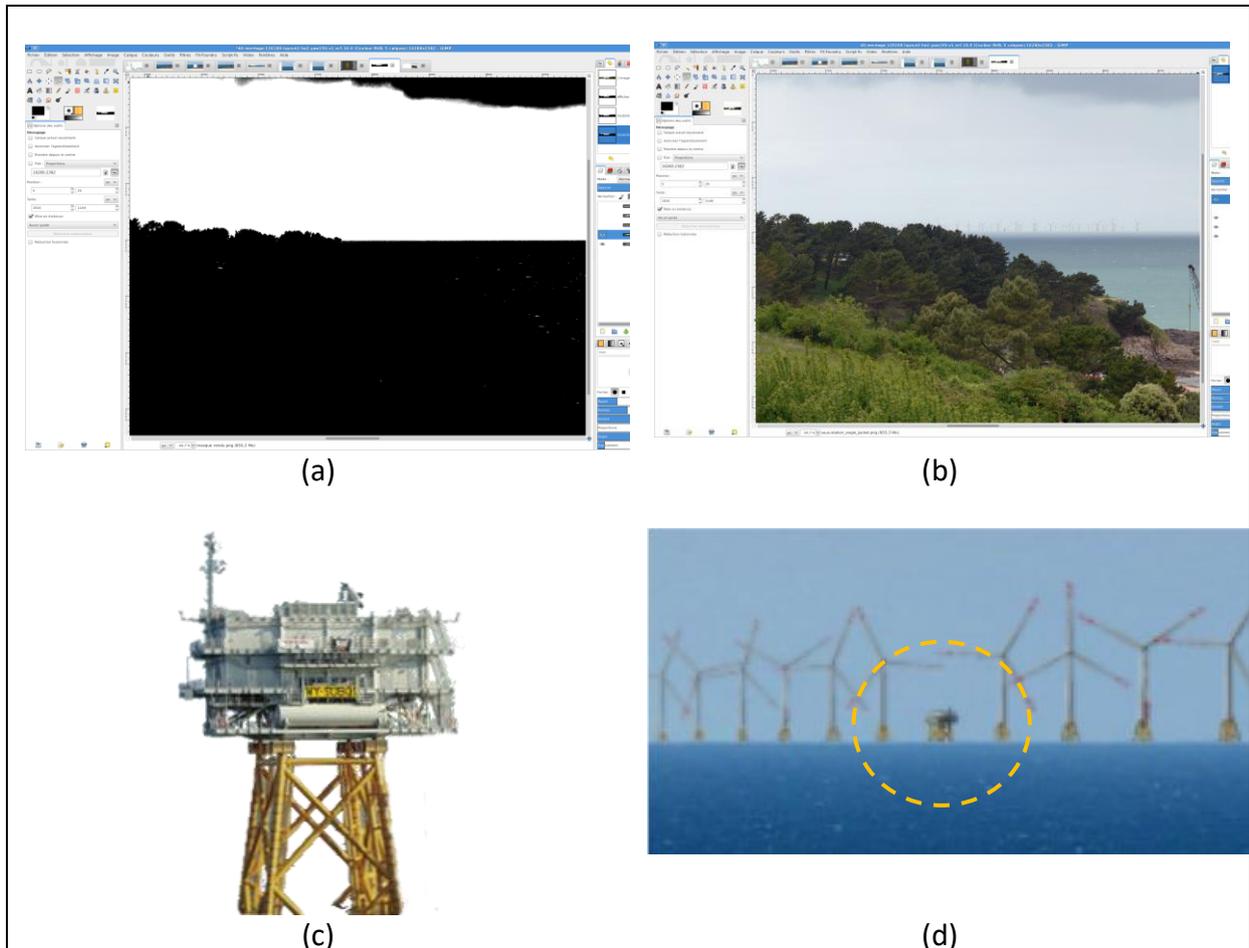


Figure 21 : Retouches finales du photomontage. Windfarm ne modélisant pas finement le paysage, on crée manuellement des masques d'occultation – comme en (a) - pour bloquer la visibilité de certaines éoliennes dans le rendu final (b). Le poste de livraison électrique (c) doit être ajouté a posteriori dans l'image, sous forme de calque 2D, pour le rendu final (d).

En conclusion, la chaîne de rendu utilisée pour la conception des vues hybrides réelles/virtuelles constitutives des photomontages est conforme aux usages de la profession. Elle s'accommode des limitations actuelles des logiciels de simulation éolienne par une utilisation raisonnée de techniques empiriques classiques dans le domaine de l'imagerie numérique.

### b) Présentation des photomontages

L'objectif des photomontages objets de l'étude est de pouvoir présenter au public une vue aussi fidèle que possible du futur parc éolien. Pour juger de façon objective de l'impact visuel du parc, il faut donc aussi impérativement présenter le photomontage dans des conditions telles qu'il se superposerait de façon exacte au vrai paysage (à l'exception bien sûr des éoliennes). **On n'insistera donc jamais assez sur le contrôle strict des conditions de restitution au public du photomontage.** Si ces conditions ne sont pas respectées, on en arrivera alors à croire les éoliennes plus - ou moins - visibles qu'elles ne le seront une fois installées. Tout le travail de création d'un photomontage fidèle serait alors rendu inopérant par cette inadéquation du support de présentation.

Géométriquement parlant, le principe général est simple : pour un moyen de présentation donné, il faut placer l'observateur à la place permettant de faire coïncider les directions de vue réelles (que l'on aurait depuis le point de capture des images, sur le littoral) avec les directions de vue équivalentes dans le photomontage, sur le lieu de présentation. Les deux paramètres fondamentaux à mettre en rapport sont :

- Le champ visuel du photomontage (horizontal et vertical)
- La dimension du support de présentation

Ces deux paramètres sont liés par la distance d'observation du support, qui est calculée de façon à ce que le photomontage occupe dans le regard de l'observateur le même espace angulaire que la vue réelle.

Pour les photomontages de projets terrestres, les recommandations méthodologiques émanant de l'état préconisent un champ visuel de 90°, adapté aux impressions sur un format double A3 paysage, soit environ 84 cm x 30 cm. Ce choix permet d'observer le photomontage à plat, à une distance appropriée, en étant proche des conditions réelles (coïncidence des angles entre réalité et document imprimé). Cependant, ce mode de présentation est peu recommandé pour un usage public, car il est difficile de faire respecter des conditions d'observation adéquates à un observateur non averti.

Dans le cas de projets d'éoliennes en mer, éloignés de la côte, la distance importante du point de vue aux machines pousse à augmenter la dimension des supports pour que les éoliennes soient rendues sur plus de quelques pixels.

L'expert a eu à sa disposition l'ensemble des photomontages réalisés dans le cadre du débat public, sous forme numérique (site internet), mis à disposition par le maître d'ouvrage à l'adresse <http://parc-eolien-en-mer-dunkerque.geophom.info/>. Les montages sont alors visibles sur un support de type écran d'ordinateur, via une fenêtre d'observation plane de dimension fixe. Le cabinet d'étude Géophom préconise une observation suivant un angle horizontal proche de 50°, qui correspond à la zone de la vision humaine centrale statique appelée ergorama (voir Figure 9), où l'œil distingue les formes et les couleurs. Le site web mis à disposition permet d'observer les panoramas dans des conditions contrôlées, facilitant une perception géométriquement exacte.

Ce support numérique interactif a l'avantage d'une grande accessibilité. Cependant, beaucoup d'écrans actuels ont une résolution limitée (typiquement inférieure à 100 points par pouce), ce qui ne permet pas toujours de bien restituer de fins détails comme des mâts d'éoliennes à l'horizon. La restitution sur un angle aussi limité ne donne pas non plus une image très conforme à une observation sur place, où on peut embrasser tout l'horizon d'un seul regard. Enfin, si l'écran est trop petit, la distance de vue le sera également, ce qui oblige l'utilisateur à « loucher » sur le support, et donc à observer la scène dans des conditions bien différentes d'une observation à distance (absence de convergence visuelle).

En conclusion, bien qu'utile au débat public pour augmenter la diffusion des informations relatives à l'impact visuel, ce type de support doit être considéré avec circonspection, puisque rien ne garantit qu'il sera observé avec un écran de taille et de résolution suffisante.

Cependant, malgré ces réserves, le site Internet développé par Géophom pour ce type de visualisation respecte pleinement le cahier des charges explicité ci-dessus. **L'experte recommande de rendre possible le téléchargement des photomontages (180°, haute résolution) depuis le site dédié au projet.**

On ne saurait trop insister sur l'impérieuse nécessité à respecter strictement les règles d'observation des photomontages, telles qu'édictées par les conditions de leur élaboration. A cet effet, il est prévu que la présentation des photomontages lors du début public soit complétée par des supports physiques. La représentation naturelle d'un panorama - correspondant à une projection d'image sphérique - consiste bien sûr à utiliser un support 3D de même nature. Dans ce cas, l'observateur doit être placé au centre du cercle de même rayon que le support. Si le support est de largeur L et couvre un angle A (exprimé en degré), alors la distance d'observation est :

$$D = (180 \times L) / (\pi \times A)$$

Le support retenu pour une présentation publique doit être de grande taille, par exemple une vue cylindrique de 3 m de développé, support déjà utilisé dans des conditions similaires (voir Figure 4). Pour ce type de support, A vaut 180 degrés, de sorte que la distance d'observation vaut  $D = L / \pi$  soit environ 1 m. Cette vue est imprimée grâce à une imprimante dédiée de bonne résolution (300 points par pouce) à partir de supports numériques originaux (33140 pixels pour le panorama entier). On obtient donc une résolution angulaire d'environ 180 pixels par degré. Ce chiffre est à rapprocher de la résolution angulaire de l'œil humain (détails perceptibles : environ 1' d'arc), qui est d'environ 0,3 mm à 1 m – alors qu'ici le pixel du panorama mesure 0,1 mm. Autrement dit, le rendu obtenu est supérieur en résolution à ce que peuvent voir les meilleurs yeux humains, et la distance d'observation est confortable. **Ce type de support est donc approprié pour juger de l'apparence du parc éolien en termes de proportions vis-à-vis du panorama global, pour peu qu'il soit éclairé uniformément avec suffisamment d'intensité (800 lux au minimum).** Il doit donc obligatoirement compléter les outils numériques de présentation au public concerné par les études d'impact visuel, pour peu que ses conditions d'utilisation soient strictement respectées. Sa limitation principale, outre son caractère statique, reste la distance de convergence et d'accommodation des yeux de l'observateur, qui, à 1 mètre, reste très éloignée de celle de l'observation véritable, proche de l'infini.

**L'experte recommande donc de réaliser un maximum de supports de ce type représentant le parc éolien en mer de Dunkerque, à partir de photomontages représentatifs réalisés depuis la zone critique de visibilité.**

A cet effet, on pourrait choisir des vues particulièrement représentatives de la visibilité du parc, par exemple, d'ouest en est :

- Depuis la digue de l'Aa ;
- Depuis la plage du front de mer à Dunkerque ;
- Depuis la Batterie de Leffrinckouke ;
- Depuis le monument Leopold 1<sup>er</sup> à De Panne ;
- Depuis la jetée "Westelijke Stredam" à Oostende (possibilité de co-visibilité avec le parc éolien belge de Norther, au large de Zeebruges).

## 6. Conclusion

Cette section a présenté, dans le détail, la méthodologie et les procédures utilisées lors de la création des photomontages, dans le cadre du débat public relatif à la construction du parc éolien de Dunkerque, photomontages réalisés par le cabinet Géophom et commandités par le maître d'ouvrage<sup>1</sup>. L'expertise poussée de cette réalisation permet de conclure que les moyens et méthodes engagés sont conformes aux préconisations de l'Etat en la matière [Impact2010]. Les solutions mises en œuvre pour leur réalisation sont par ailleurs en phase avec l'avancement actuel des connaissances et des techniques de réalisation des photomontages. L'expertise conclut également à la sincérité de la démarche employée, en ce qu'elle respecte un cahier des charges clair et transparent, et engage les moyens nécessaires et suffisants pour la réalisation des objectifs fixés.

Deux remarques principales peuvent être faites :

- **Compléter** les photomontages existant par **une vue maritime**, depuis le Ferry en sortie du port de Dunkerque ;
- Mettre à disposition du débat public un nombre suffisant de photomontages caractéristiques sous la forme de **panoramas semi-circulaires** de 3m, comme cela a déjà été le cas pour l'anticipation visuelle d'autres parcs en mer.

---

<sup>1</sup> La méthodologie suivie ne dépend pas, pour l'essentiel, de la zone géographique effective du parc. La section suivante s'intéressera aux aspects spécifiques du parc éolien de Dunkerque.

## C. L'impact visuel du projet de parc éolien en mer de Dunkerque

### 1. Méthodologie d'évaluation

Au-delà d'une évaluation méthodologique des photomontages en tant qu'outil de référence, il est possible d'apprécier l'impact visuel *in situ*, c'est-à-dire compte tenu des spécificités du futur site d'implantation des éoliennes. L'impact doit tenir compte à la fois de facteurs objectifs (position des éoliennes dans le champ visuel, éloignement, facteurs atmosphériques et météorologiques) mais aussi de facteurs subjectifs de nature psycho-cognitive (ainsi, certains éléments du paysage attirent l'attention ou sont perçus plus gros que leur taille réelle du fait de leur signification pour l'observateur, par exemple la lune dans certaines conditions [Lunellusion]). Une approche empirique pour combiner les deux facteurs consiste à comparer visuellement le futur parc éolien, tel que prédit par les photomontages, à des éléments saillants du paysage existant. Ces éléments, appelés *amers*<sup>2</sup>, sont en effet des repères familiers du paysage pour les habitants. La comparaison aux amers, sur des bases objectives, permet donc de relier concrètement une impression visuelle de l'existant au futur paysage éolien. Elle permet également aux observateurs de se déplacer sur des sites de prises de vue présélectionnés afin d'apprécier par eux-mêmes, sur la base des données comparatives, l'impact que pourront avoir les futures infrastructures dans le paysage.

La méthodologie retenue sera la suivante : après avoir identifié ces éléments remarquables, nous les passerons successivement en revue et, à l'aide de prises de vue spécifiques, nous établirons une correspondance entre leur impact visuel dans le paysage actuel et celui des futures éoliennes en mer.

### 2. Zones d'impact et amers retenus

La détermination des zones d'impact se fonde d'une part sur l'étude paysagère déjà citée [Paysage2019], d'autre part sur les données de visibilité en mer fournies par Météo France (voir Annexe 4).

En utilisant des considérations on peut délimiter trois zones d'impact concentriques :

- La *zone d'influence directe* des éoliennes ne contient aucune terre, l'impact visuel y reste par conséquent limité. Cependant, il est généralement souhaitable, pour l'information publique, d'illustrer l'impact via quelques vues prises depuis un bateau. Dans le cas du parc de Dunkerque, le choix logique serait d'acquérir des prises de vue depuis un ferry reliant Dunkerque à Douvres, dans la zone proximale du parc, à la sortie du Bassin de l'Atlantique (13km de l'éolienne la plus proche).

---

<sup>2</sup> Les amers servaient (et servent encore à l'occasion) de repère pour la navigation à l'approche des côtes, afin d'éviter les écueils et accéder ou sortir des zones portuaires. Dans la procédure de photomontage, ils sont très utiles pour le recalage fin du modèle numérique sur le panorama photographique.

- La zone comprise entre Gravelines et Coxyde-Bains constitue la terre *la plus proche du parc*, entre 11 et 15 km des éoliennes. On peut considérer que la visibilité y sera la plus critique, d'autant que l'effacement dû à la rotondité de la terre y est négligeable, du fait de la proximité des côtes. Il est donc important d'y choisir des amers caractéristiques. **Le phare du Risban**, principal phare de Dunkerque, constitue le choix le plus évident. Il est bien visible depuis la partie est de la zone critique. Son allure le rend difficile à confondre avec tout autre élément du paysage, et il est logiquement connu de tous les riverains. Autrement dit, sa silhouette "fait partie du paysage" du littoral. Le **feu de Saint-Pol**, bien que de dimensions plus modeste, est situé à l'extrémité de la jetée du même nom, et est visible depuis tout le littoral environnant, à l'est comme à l'ouest (en particulier depuis la digue de Braek). Il consiste également un amer de choix pour l'étude comparative.
- Le littoral plus lointain, de part et d'autre de la zone critique (zone s'étendant de Oye-Plage à Calais à l'ouest, et de Nieuport à Oostende à l'est), se situe à des distances comprises entre 18 et 35 km. Sur la zone ouest, **le feu de la jetée Clipon**, bien que de dimensions modestes, est très identifiable de par sa position avancée en mer, et sera retenu. Le **phare de Gravelines**, à l'allure si caractéristique, constitue également un repère visuel très présent dans cette zone. Sur la zone est, le littoral, très rectiligne, est constitué d'une conurbation très urbanisée, où aucun amer de référence significatif n'a pu être identifié.
- Au-delà de 35 km (Calais à l'ouest, Oostende à l'est), la taille d'une éolienne au-dessus de l'horizon est inférieure à 24 minutes d'arc (un très bon œil humain résout quelques minutes d'arc). Plus important encore, l'épaisseur atmosphérique rend problématique la détection même des éoliennes à cette distance (on considère que la visibilité est excellente à 30 km, ce qui n'est intervenu qu'une fois en 2019 à Dunkerque, selon Météo France !). A titre d'exemple, on peut observer la Figure 22, extrait d'un photomontage réalisé à partir d'un panorama capturé depuis la digue de l'Aa, à Grand-Fort-Philippe. On y voit des éoliennes distantes entre 19 km pour les plus proches et 32 km pour les plus lointaines. A cette dernière distance, il devient difficile de comparer une éolienne à des amers existants (plus petits), car ceux-ci seront placés plus près de l'observateur, et donc ne souffriront pas de la même atténuation. Par ailleurs, notons qu'aucun amer significatif n'a été repéré dans cette zone sur la côte. Par contre, il existe un parc éolien off-shore belge, dénommé Norther<sup>3</sup>, situé à 23 km au large d'Oostende. Ce parc, mis en service en 2019, est constitué de 44 machines de type Vestas V164-8.4 MW. Chaque éolienne est constituée d'un mât de 105 m de hauteur portant des pales de 82 m, pour atteindre une hauteur totale de 187 m. Son observation permet une comparaison utile avec le futur parc de Dunkerque (voir section C, partie 3, sous-section e)).

---

<sup>3</sup> Voir <https://www.belgianoffshoreplatform.be/en/projects/norther/>



Figure 22 : Zoom sur un photomontage réalisé depuis la digue de l'Aa à Grand-Fort-Philippe. Si les éoliennes les plus proches, à 19km sont bien visibles, les plus éloignées situées à 32km le sont beaucoup moins, du fait des facteurs atmosphériques.

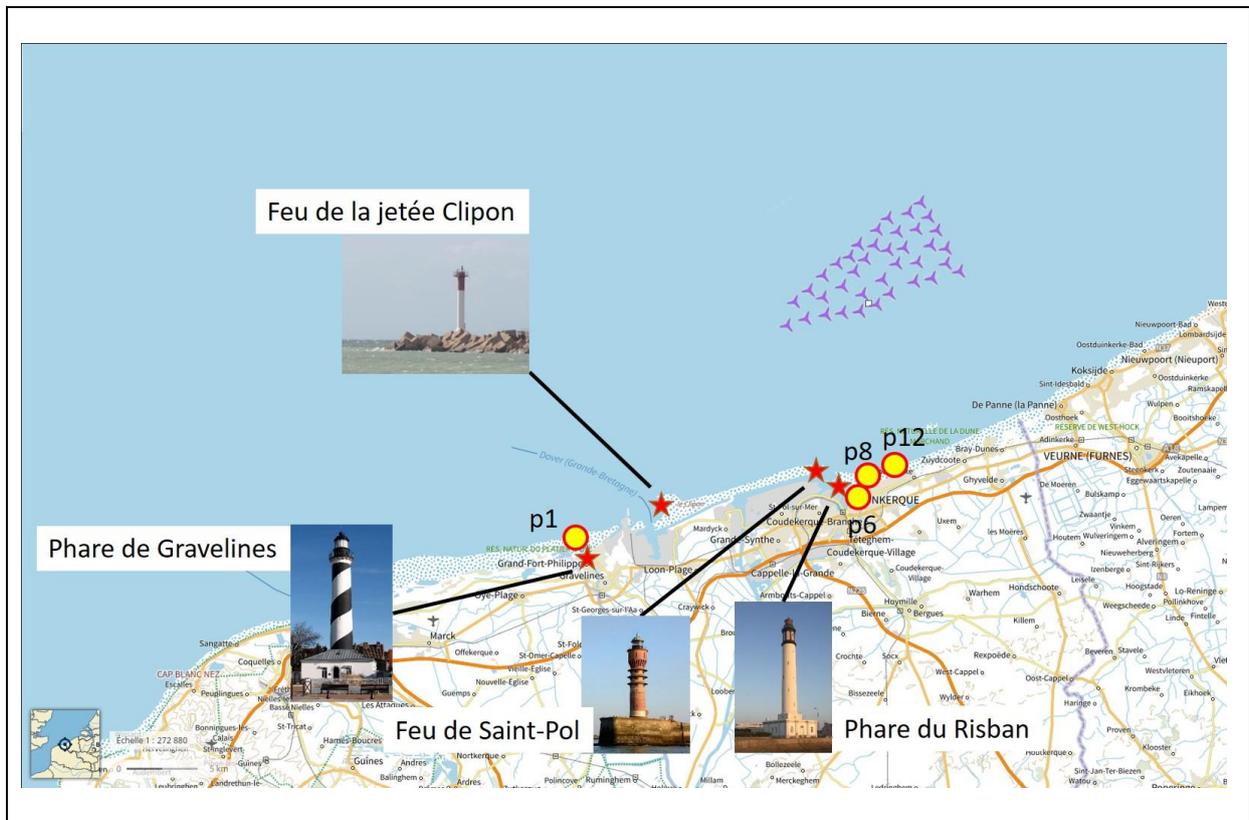


Figure 23 : Les amers retenus pour l'analyse comparative d'impact, avec les points de vue exploités.

La carte de la Figure 23 visualisent les amers de référence retenus pour l'étude. A partir de cette sélection, il devient possible, pour un point de vue donné, de prédire le rapport de taille visuel

entre l'éolienne la plus proche du futur parc et un amer particulier. En effet, soit d'une part A la hauteur éolienne, et B sa distance à l'observateur et d'autre part C la hauteur d'un amer, et D sa distance à l'observateur, alors ce rapport de taille vaut :

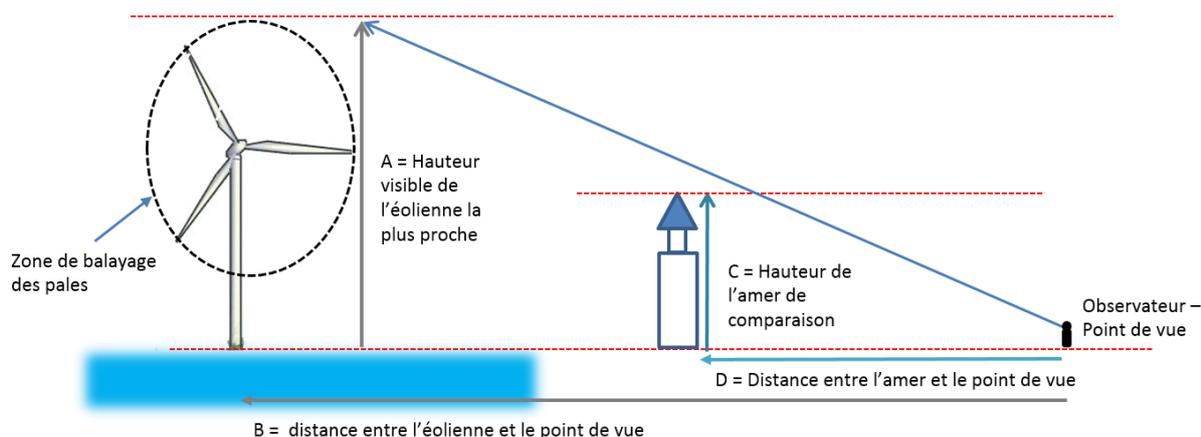


Figure 24 : Rapport d'échelle amer/éolienne.

$$R = \frac{(C \times B)}{(A \times D)}$$

L'observation directe dans les photomontages doit bien évidemment vérifier ce rapport de proportion (on verra que cette mesure est parfois délicate suivant les conditions d'observation). Bien sûr, cette mesure de taille relative doit être modulée par la nature de l'amer (notamment sa largeur perçue, qui suit les mêmes lois de proportionnalité) et sa situation dans le paysage d'observation, ce que nous nous attacherons à faire autant que faire se peut, dans la section suivante<sup>4</sup>.

### 3. Examen des amers

#### a) Le phare du Risban

Situé dans le port de Dunkerque, emblème du paysage dunkerquois, le phare du Risban, le plus septentrional de France, a une hauteur de 63m (6ème phare de France). Il est parfaitement visible, de jour, depuis la côte est, sur toute l'étendue du littoral depuis Dunkerque jusqu'à la frontière belge.

<sup>4</sup> Le schéma ci-dessus ne tient pas compte de l'effacement dû à la courbure terrestre, pour des raisons de simplicité. Le calcul effectif, plus complexe, tient compte, lui, de tous les facteurs optiques, tels que la nébulosité, la réfraction, la rotondité, etc.



Du fait de sa taille, on observera une hauteur sur l'horizon comparable à celle des machines du futur parc en se plaçant à environ 2 ou 3 km du phare. Les points de vue panoramiques qui nous intéresseront seront donc ceux situés :

- Depuis la digue de front de mer à Malo-les-Bains (point de vue n°10)
- Depuis la base nautique de la Licorne (point de vue n°12)

Malheureusement, le photomontage réalisé depuis Malo-les-Bains, limité à 180°, ne permet pas de voir le phare du Risban. Par contre, depuis la base nautique de la Licorne, le phare est bien visible, à une distance de 4.2km. L'éolienne la plus proche, à l'azimut 339°, est distante de 11.5km, ce qui prédit un ratio de :

$$R = (63 \times 11.5) / (300 \times 4.2) = 0.57$$

L'évaluation empirique par examen du photomontage donne une valeur de 0.56, en bon accord. On peut donc dire que, depuis la base nautique de la Licorne, le phare du Risban sera environ deux fois moins haut sur l'horizon que l'éolienne la plus proche (configuration la plus défavorable).

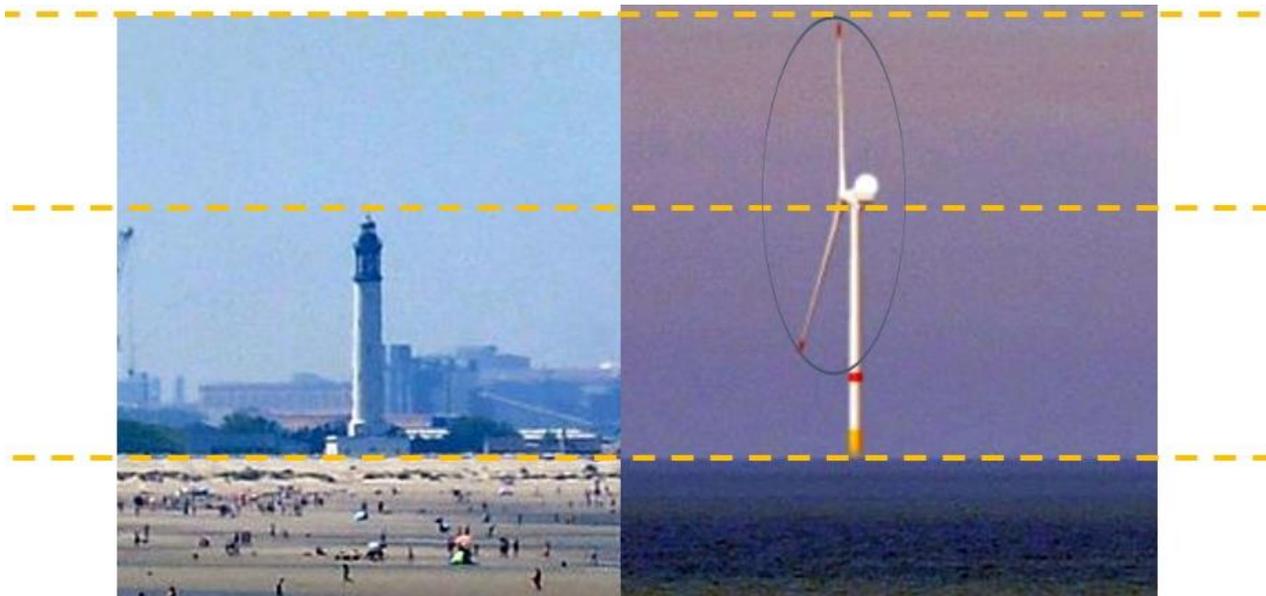


Figure 25 : Comparaison visuelle entre le phare du Risban et l'éolienne la plus proche du parc de Dunkerque, depuis le point de vue n°12 (base de la licorne), en configuration de hauteur maximale. On mesure un ratio de hauteur 0.56, très proche de la valeur théorique attendue. Note : les couleurs ont été ajustées pour faciliter les mesures.

#### b) Le feu de Saint-Pol



Ce feu<sup>5</sup>, est situé au bout de la jetée ouest du port de Dunkerque. Son architecture très inhabituelle, ainsi que sa position avancée, à l'extrémité de la digue du Braek, le rendent très visible malgré sa hauteur modeste (36m). Une comparaison visuelle pourra facilement être établie depuis une distance situé à 2km du feu, donnant un rapport de taille prédit de  $R= 0.6$ .

<sup>5</sup> La différence entre phare et feu est purement administrative, voir <https://fr.wikipedia.org/wiki/Phare>.

Les points de vue correspondant à ces conditions sont le photomontage n°6, pris depuis la passerelle du Grand Large, et le photomontage n°8, capturé sur la place du centenaire.

i) Passerelle du Grand Large (n°6)

La Figure 26 représente, côte à côte, deux gros plans (au même facteur d'échelle, point essentiel pour la comparaison) issus du photomontage n°6, visualisant l'éolienne (configuration 300m) la plus proche (azimut 350°) et le feu de Saint-Pol. Ce dernier est situé à 2.4km du point de prise de vue, et l'éolienne à 11.6km, ce qui permet de calculer

$$R = (36 \times 11.6) / (300 \times 2.4) = 0.58$$

Visuellement, on obtient<sup>6</sup> un rapport de taille d'environ  $55/97 = 0.56$ .

L'observation des simulations confirme là encore le calcul théorique, et permet d'affirmer que les éoliennes les plus proches auront une **hauteur proche du double de celle du feu de Saint-Pol**, lorsqu'observées depuis la passerelle du Grand Large.

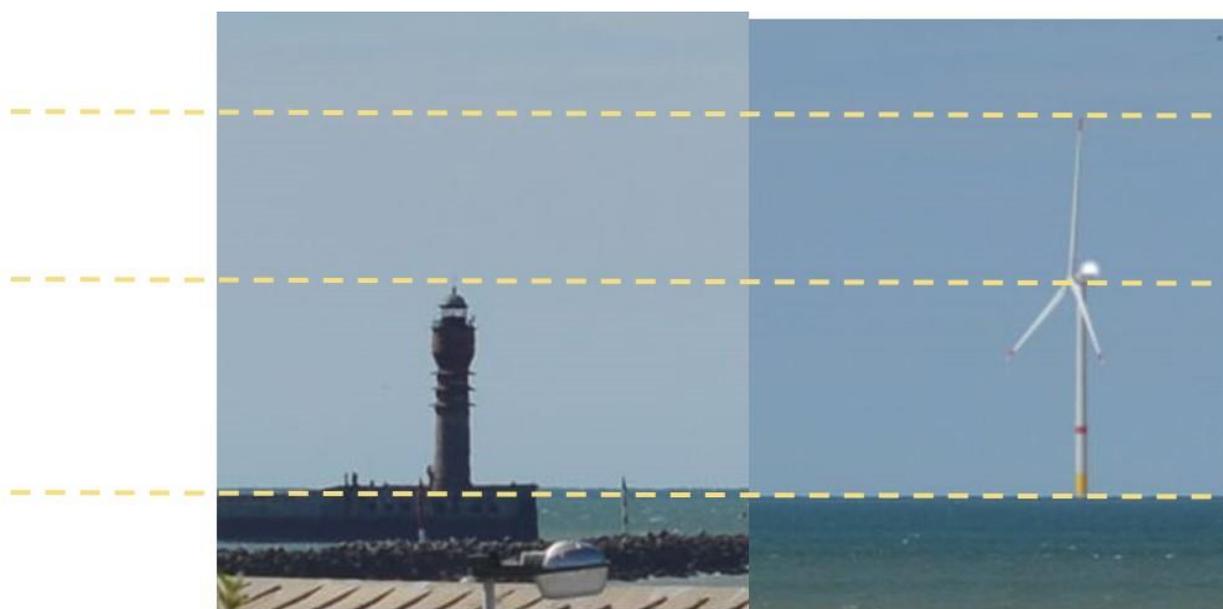


Figure 26 : Comparaison visuelle entre le feu de Saint-Pol et la simulation visuelle du parc de Dunkerque, depuis le point de vue n°6 (passerelle du Grand Large), en configuration de hauteur maximale. On mesure un ratio de hauteur 0.56, proche de la valeur théorique attendue.

<sup>6</sup> Il existe une marge d'erreur de 2 ou 3% sur ce type de mesure, car il est très difficile d'estimer le sommet des objets concernés.

ii) Place du Centenaire

Le feu de Saint-Pol est situé à 3 km du point de prise de vue, à un azimut favorable (293°), proche de celui du parc, qui débute à 330°. L'éolienne la plus proche étant distante de 11.5km, on établit un ratio théorique de :

$$R = (36 \times 11.5) / (300 \times 3) = 0.46$$

L'observation directe du photomontage est reprise Figure 27, avec un fort facteur de zoom pour estimer numériquement le ratio de hauteur avec précision. Ce ratio s'établit à 0.45, proche de la valeur prédite. On peut donc dire que les éoliennes les plus proches s'élèveront au-dessus de l'horizon au double de la hauteur du feu de Saint-Pol, observées depuis la page du centenaire. Si on retient l'hypothèse de visibilité minimale (machines de 225m), le ratio s'établit à 1,5 environ.

Par ailleurs, il est à noter que le Risban est aussi visible sur cette vue, mais sa distance réduite (1.2 km) ne permet pas une comparaison raisonnable avec les éoliennes, car son diamètre est visuellement 5 fois supérieur à celui des machines les plus proches, sans atténuation atmosphérique notable.

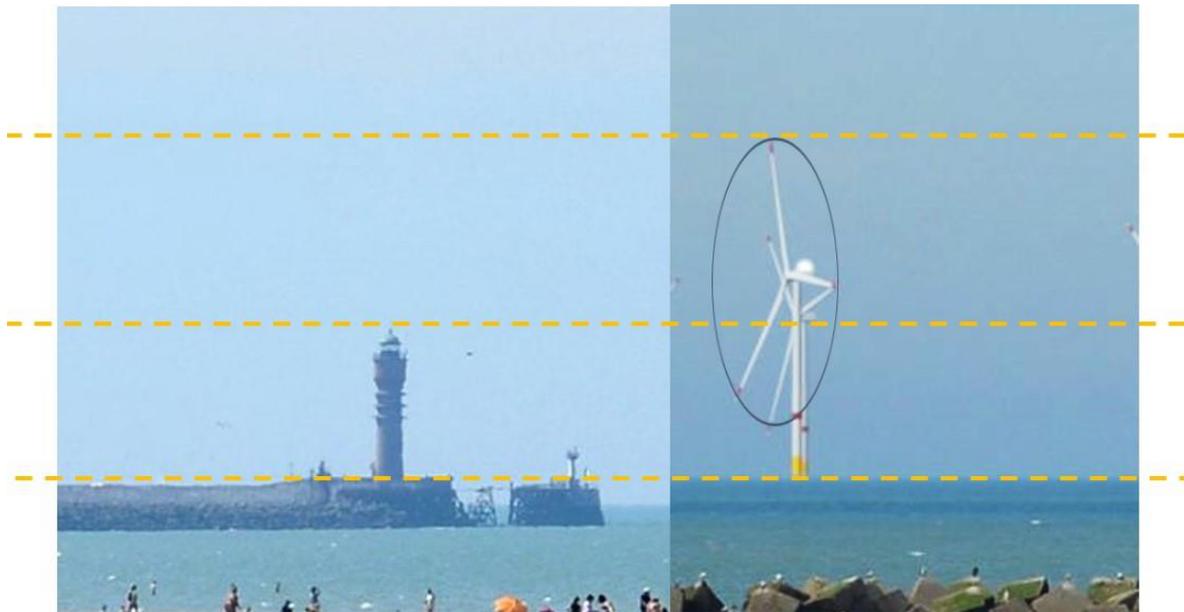


Figure 27 : Comparaison visuelle entre le feu de Saint-Pol et l'éolienne la plus proche du parc, depuis le point de vue n°8 (place du centenaire), en configuration de hauteur maximale. On mesure un ratio de 0.45. On notera que la perception des hauteurs est parasitée par la superposition de plusieurs éoliennes.

### c) Le phare de Gravelines



Construit en 1843, il mesure 25.5 mètres de haut. Il acquiert sa couleur actuelle dans les années 30, qui le rend reconnaissable entre tous grâce à sa spirale noire et blanche qui lui vaut le surnom de « Black and White ». Situé à Petit-Fort-Philippe, il est très visible entre le littoral du platier d'Oye et la jetée ouest du bassin de l'atlantique. La vue réalisée au point de vue n°1, depuis la digue de l'Aa à Grand-Fort-Philippe, permet une très bonne co-visibilité entre le parc et cet amer, à des azimuts cependant très éloignés (130° pour le phare, 45° pour le parc, soit presque 90° d'écart). A cet emplacement, l'éolienne la plus proche sera située à 19.8km, le phare est distant de 1.75km. Le rapport de taille vaut donc :

$$R = (25.5 \times 19.8) / (290 \times 1.75) = 0.99$$

Empiriquement, l'examen de vues comparées issues du photomontage n°1 permet de confirmer ce calcul, voir Figure 28. On peut donc affirmer qu'en terme de hauteur sur l'horizon, depuis la digue de l'Aa, **le phare de Gravelines sera comparable à l'éolienne la plus proche du parc.**

La comparaison doit cependant être tempérée par le fait qu'à cette distance, **le diamètre apparent** du phare est beaucoup plus important que celui d'une éolienne. On peut estimer ce rapport de diamètre visuel à environ 7.



Figure 28 : Comparaison visuelle entre le phare de Gravelines et l'éolienne la plus proche du parc, depuis le point de vue n°1 (digue de l'Aa), en configuration de hauteur maximale. On mesure un ratio très proche de l'unité. On notera qu'il est difficile d'évaluer le niveau de la base du phare, occulté sur la prise de vue.

#### d) Le feu de la jetée Clipon



Ce feu, qui signale le musoir de la jetée bâbord du port de Dunkerque Ouest (départ des Ferries vers Douvres), a une hauteur de 23m. La jetée, autrefois lieu de pêche, est maintenant fermée au public, mais le feu est très visible depuis l'ouest de Dunkerque, puisqu'il est situé visuellement assez loin du trait de côte. Sa hauteur modeste nécessitera de choisir un point de vue relativement proche pour préserver un rapport R assez grand. Le seul point de vue répondant à ce critère sur la côte ouest de Dunkerque est le point de vue n°1, capturé depuis la digue de l'Aa à Grand-Fort-Philippe. A cet endroit, la covisibilité avec le parc est très bonne, du fait de la proximité des azimuts ( $45^\circ$  pour le parc,  $58^\circ$  pour le feu).

La Figure 29 montre deux vues extraites du photomontage n°1, juxtaposées, à la même échelle : l'une du feu Clipon (distance : 5.9 km), l'autre de l'éolienne la plus proche, distante de 19.8km. A cet endroit précis, le rapport de taille prédit vaut :

$$R = (23 \times 19.8) / (300 \times 5.9) = 0.26$$

Empiriquement, on mesure sur le photomontage  $R = 1.6/5.7 = 0.28$ , en bon accord avec la théorie. On peut donc affirmer que, depuis la digue de l'Aa, **l'éolienne la plus proche sera environ 4 fois plus haute que le feu du Clipon** en configuration la plus défavorable. Avec les machines les plus petites, on monte à  $R = (23 \times 19.8) / (225 \times 5.9) = 0.34$ , soit un rapport 1:3 environ.

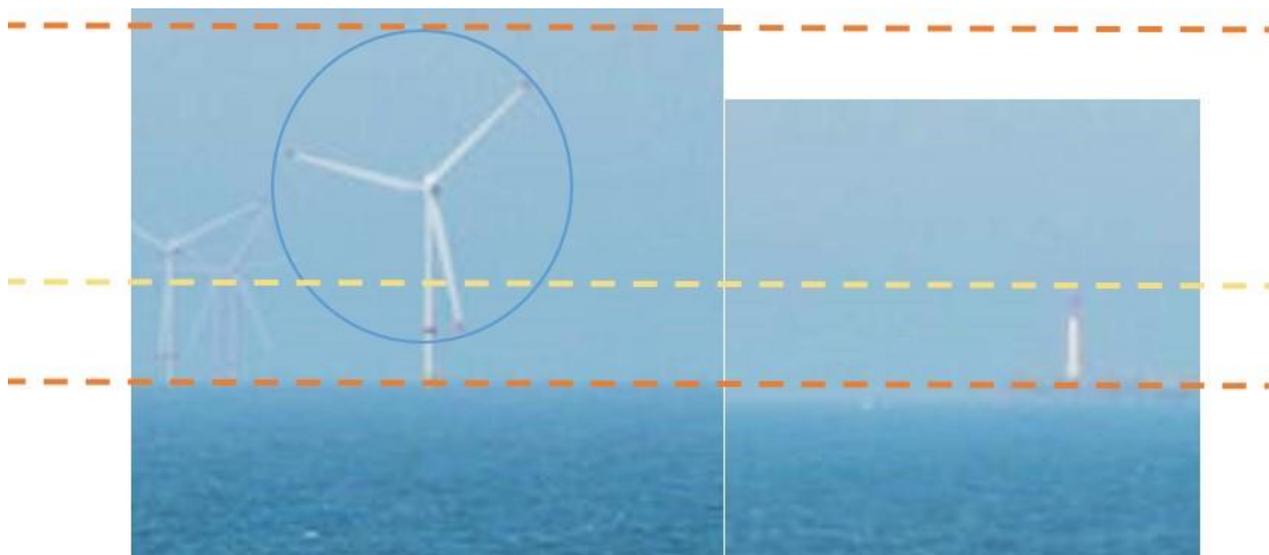


Figure 29 : Comparaison visuelle entre le feu de la jetée Clipon et l'éolienne la plus proche du parc, depuis le point de vue n°1 (digue de l'Aa), en configuration de hauteur maximale. On mesure un ratio de hauteur 0.28, proche de la valeur attendue. Attention, les vues ont été fortement zoomées pour permettre une observation comparée.

#### e) Covisibilité Dunkerque/Norther



Figure 30: Le parc éolien off-shore Norther (photo AFP).

Rappelons que le parc Norther est un parc éolien off-shore belge, situé à 23 km au large d’Oostende. Ce parc, mis en service en 2019, est constitué de 44 machines de type Vestas V164-8.4 MW. Chaque éolienne est constituée d’un mât de 105 m de hauteur portant des pales de 82 m, pour atteindre une hauteur totale de 187 m.



Figure 31 : Covisibilité du futur parc avec le parc Norther (Belgique).

Le front de mer à Oostende est équidistant des parcs Norther et du futur parc de Dunkerque, nous sommes donc dans une situation dite de co-visibilité, qui permet de jauger de façon très adéquate la visibilité du futur parc, dans les zones d’impact intermédiaire. A cet endroit, on obtient un rapport  $R = (187 \times 32) / (300 \times 32) = 187/300 = 62\%$ . **Autrement dit, depuis Oostende, la hauteur du parc Norther sera égale à environ 60% de celles des machines de Dunkerque**, si le choix se porte sur les plus grandes éoliennes. Dans la seconde hypothèse, on obtient un rapport  $R = 187/225 = 0.83$ . Malheureusement, à l’écriture de ce rapport, aucun photomontage depuis Oostende n’a encore été réalisé, on ne peut donc pas vérifier empiriquement cette prédiction de visibilité relative.

Notons que, depuis le port de Zeebruges, la distance du parc Norther n’est que de 23km. On peut anticiper que le parc de Dunkerque aura une hauteur sur l’horizon similaire à celle observée depuis cet endroit, à une distance au rivage de  $23 \times (187/300) = 14,5\text{km}$ , soit un point d’observation situé au niveau de Coxyde-Bains (vue n°19) ou sur la digue du Braek (vue n°2). Dans l’hypothèse de machines plus modeste, la « vue équivalente » se situera à  $23 \times (187/225)$

= 19km, soit au niveau du point de vue n°20 à Nieuwpoort, ou au point de vue n°1 (digue de l'Aa, déjà citée).

Attention, depuis ces points on ne parle plus de co-visibilité, mais de hauteur équivalente : autrement dit, pour anticiper la vue du futur parc de Dunkerque depuis les points de vue cités, on peut se placer sur le port de Zeebrugge et observer le parc Norther, dans la direction de la pleine mer<sup>7</sup>. A l'écriture de ce rapport, nous ne disposons pas de données photographiques permettant de valider empiriquement les données théoriques de visibilité équivalente. **Nous recommandons donc la réalisation d'un panorama depuis le port de Zeebrugge, visualisant le parc Norther.**

#### 4. Réponses aux observations du public

A l'heure de la rédaction de ce rapport, le débat public n'a pas encore pu faire émerger d'observations émanant du public. Si des interrogations ou des critiques relatives à l'évaluation de l'impact visuel venaient à être émises, l'experte se tient à la disposition de la Commission de débat public pour y répondre (voir coordonnées en Annexe 5).

#### 5. Conclusion

L'étude comparative, à partir de l'observation d'éléments caractéristiques du paysage existant, se révèle particulièrement utile pour collecter des données objectives autant que subjectives sur l'impact du futur parc éolien en mer de Dunkerque. Le phare du Risban, les feux de Saint-Pol et de la jetée Clipon constituent des amers bien visibles depuis les points-clés du littoral en zone critique, à partir desquels une analyse comparative objective peut être menée. Cette analyse comparative a l'avantage de pouvoir se transférer sur le terrain, par une observation directe des amers et une évaluation *in situ* de l'impact. Par ailleurs, la covisibilité anticipée des parcs de Dunkerque et de Norther (Belgique) permet aux usagers désireux d'appréhender l'aspect visuel du futur ensemble en se rendant à Oostende. Le parc Norther, constitué d'un nombre équivalent de machines, y est visible à une distance de 32km. Cependant, leur taille plus modeste (187m contre 300m en bout de pale pour les plus grandes machines envisagées) obligera l'observateur avisé à se rendre à Zeebrugge, où leur distance (23km) rendra leur empreinte visuelle plus comparable à celle de Dunkerque.

Pour autant, l'étude comparative n'est pas exempte de limitations : lorsque l'amer est un phare, il est proportionnellement beaucoup plus épais qu'un mât d'éolienne. A l'inverse, les éoliennes formeront des "paquets" dont la proximité visuelle peut favoriser la perception. Cet effet est cependant atténué par les facteurs atmosphériques.

---

<sup>7</sup> Attention, nous ne discutons pas ici des éoliennes construites sur les jetées du port de Zeebruges, qui sont bien trop près de l'observateur pour servir de point de comparaison valable.

## D. Synthèse

La présente étude avait pour objectif d'examiner la procédure utilisée pour la création des photomontages servant à évaluer l'impact visuel du parc éolien en mer de Dunkerque. Suivant la demande de la Commission particulière du débat public chargée du dossier, le travail a été divisé en deux grandes sections : d'une part, une validation méthodologique de la procédure de création des photomontages, depuis la prise de vue des panoramas du littoral présent jusqu'à l'édition des supports matériels et numériques permettant l'observation des éoliennes telles qu'elles apparaîtraient *in situ*. Cette partie de l'étude conclut de manière claire **à la bonne foi du cabinet d'étude et du maître d'ouvrage**, à la sincérité des représentations générées, et valide la méthodologie mise en œuvre, qui suit d'ailleurs de près les recommandations édictées par l'Etat en la matière dans ses guides relatifs à l'étude d'impact. La création des photomontages du parc de Dunkerque est par ailleurs **conforme à l'état de l'art** sur la génération d'images photo-réalistes mêlant des contenus réels et virtuels : des études menées selon des processus similaires ont abouti à la création de visuels très proches des images réalisées a posteriori, une fois le parc éolien effectivement installé. On peut seulement regretter que la visualisation des photomontages soit limitée aux seuls cahiers, qui bien que techniquement valides, ne permettent pas à eux seuls une pleine appréciation de l'impact (voir ci-dessous).

Au-delà des techniques mises en jeu, la deuxième section de l'étude s'est attachée à analyser l'impact spécifique à la lumière des spécificités du site, afin de répondre au mieux aux observations et objections soulevées par le public. La méthode retenue consiste à comparer le futur parc éolien à des éléments architecturaux familiers du paysage (phares), par rapport auxquels des comparaisons aussi bien objectives (on connaît bien la localisation et les dimensions de ces amers), que subjectives peuvent être facilement faites, en se plaçant dans des positions privilégiées, facilement reproductibles par les usagers. Des comparatifs visuels objectifs viennent corroborer les prédictions numériques, et renforcent en cela la validité de la méthode.

En guise de dernier mot, on ne saurait trop insister sur l'impérieuse nécessité à respecter strictement les règles d'observation des photomontages, telles qu'édictées par les conditions de leur élaboration. L'experte recommande donc la présentation physique de quelques photomontages représentatifs lors du débat public, qui compléteront très utilement le site internet. La représentation naturelle d'un panorama - correspondant à une projection d'image sphérique - consiste bien sûr à utiliser un support de même nature. Le support retenu pour une présentation publique doit être de grande taille, par exemple une vue cylindrique de 3 m de développé (comme déjà utilisé lors de débats précédents). La distance d'observation, située au centre du cylindre, (1 m du support dans le cas présent) doit alors être scrupuleusement respectée. La vue est imprimée grâce à une imprimante dédiée de bonne résolution (300 points par pouce), de sorte à obtenir une résolution angulaire suffisante. Ce type de support est approprié pour juger de l'apparence du parc éolien en termes de proportions vis-à-vis du panorama global, pour peu qu'il soit éclairé avec suffisamment d'intensité (800 lux au minimum).

En terme de prospective, il est à noter que d'autres moyens de visualisation pourraient être envisagés. On pense notamment aux simulateurs utilisés en Réalité Virtuelle (visiocasques), qui permettent d'immerger des utilisateurs dans une simulation 3D photo-réaliste leur permettant d'évoluer librement dans un environnement reproduisant fidèlement les conditions d'une observation *in situ*. En particulier, ces simulateurs permettent d'observer une simulation dynamique, où les conditions d'observation peuvent varier : ainsi l'observateur peut se déplacer le long du rivage, changer l'heure ou la date, et voir les éoliennes en mouvement, dans les conditions du réel. Il est regrettable que, pour l'heure, de tels moyens restent hors de portée des études d'impact classiques, du fait du coût encore prohibitif de leur mise en œuvre<sup>8</sup>. Par ailleurs, ces simulateurs restent d'une résolution angulaire encore trop modeste pour pouvoir appréhender pleinement des objets aussi distants que des éoliennes en mer<sup>9</sup>.

Les technologies de Réalité Augmentée sont également porteuses d'un fort potentiel pour l'étude de l'impact visuel, puisqu'elles consistent en la superposition des éléments virtuels (ici les éoliennes) directement sur la vue des utilisateurs présents sur le site, par exemple par le biais d'écrans « semi-transparentes », soit implantés sur les principaux lieux d'observation, soit équipant des dispositifs mobiles de type casque. Ces technologies arriveront à maturité dans la prochaine décennie et devraient apporter un réel bénéfice pour les futures études de l'impact visuel sur les parcs éoliens et plus généralement sur toute construction nécessitant ce type d'évaluation.

## E. Bibliographie

[BLENDER] Logiciel libre Blender, disponible sur <http://www.blender.org>

[CourbureWikipedia] Courbure terrestre. Article wikipedia. Disponible sur [fr.wikipedia.org/wiki/Courbure\\_terrestre](http://fr.wikipedia.org/wiki/Courbure_terrestre)

[Designer04] Photos panoramiques par assemblage – Cahier du Designer n°17. Editions Eyrolles, 2004.

[GeophomDunkerque] Projet de parc éolien en mer au large de Dunkerque et son raccordement électrique - photomontages réalisés par le cabinet Géophom. Disponible sur <http://parc-eolien-en-mer-dunkerque.geophom.info/>

[GIMP] Logiciel libre Gimp, disponible sur [www.gimp.org](http://www.gimp.org).

[Goldstein2009] Sensation and perception. E.B. Goldstein, 8<sup>ème</sup> édition, Wadsworth Publishing Company, 496p, ISBN 978-1305580299.

[HUGIN] Logiciel libre Hugin, disponible sur <http://hugin.sourceforge.net>

---

<sup>8</sup> Ce coût comprend le coût matériel du simulateur, à présent raisonnable, mais aussi et surtout le coût de réalisation d'une simulation utile en termes d'impact visuel, c'est-à-dire avec le degré de réalisme requis. On sait que la réalisation de jeux vidéo qui permettent ce type d'immersion hyper-réaliste se chiffre parfois en millions d'euros...

<sup>9</sup> Les meilleurs visiocasques actuels offrent une résolution de 5000 pixels horizontaux pour 180° d'ouverture, soit une résolution angulaire de 27 pixels / degré, soit environ 3 fois moins que l'œil humain.

[Impact2010] Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens (actualisation 2010). Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer. [www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr)

[Lilgrund09] Lilgrund Wind Farm – Visual effects. Vattenfall pilot report, mars 2009. Disponible sur demande.

[Lunellusion] Illusion lunaire ou « Moon Illusion » : site anglais wikipedia, voir [en.wikipedia.org/wiki/Moon\\_illusion](http://en.wikipedia.org/wiki/Moon_illusion)

[MethodoGeophom2017] "Méthodologie des simulations de parcs éoliens en mer". Document méthodologique interne - société Géophom.

[Panoramas2007] " Petite Histoire des Panoramas". Claude Lamboley. Communication à l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier - [https://www.ac-sciences-lettres-montpellier.fr/academie\\_edition/fichiers\\_conf/Lamboley2007.pdf](https://www.ac-sciences-lettres-montpellier.fr/academie_edition/fichiers_conf/Lamboley2007.pdf)

[Paysage2019] " Parc Eolien en mer de Dunkerque : Etude paysagère". Agence Bocage Paysage <http://www.bocagepaysage.fr/>

## F. Annexes

### Annexe 1 : Arrêté de nomination de l'experte



SÉANCE DU 29 JUILLET 2020

---

DÉCISION N° 2020 / 97 / EOLIEN DUNKERQUE / 5

---

#### PROJET DE PARC EOLIEN EN MER AU LARGE DE DUNKERQUE ET SON RACCORDEMENT ELECTRIQUE

La Commission nationale du débat public,

- vu le Code de l'environnement en ses articles L. 121-1 et suivants, notamment le I de l'article L. 121-8 et l'article L. 121-9,
- vu le courrier de saisine et le dossier annexé reçu le 19 août 2019, de MMes Claire GRANDET et Béatrice BUFFON, respectivement Directrice du département Concertation et Environnement de RTE et Directrice générale adjointe de EDF Renouvelables,
- vu sa décision n°2019 / 137 / EOLIEN DUNKERQUE / 1 du 4 septembre 2019, décidant de l'organisation d'un débat public sur le projet de parc éolien en mer au large de Dunkerque et son raccordement électrique, et désignant M. Roland PEYLET, Président de la commission particulière en charge de l'animation du débat public,
- vu sa décision n°2019/ 162 / EOLIEN DUNKERQUE / 2 du 6 novembre 2019, désignant Mmes Claude BREVAN, Dominique SIMON et M. Jacques ROUDIER, membres de la commission particulière,
- vu sa décision n°2020/ 28 / EOLIEN DUNKERQUE / 3 du 4 mars 2020, validant le dossier des maîtres d'ouvrage sur le projet de parc éolien en mer au large de Dunkerque et son raccordement électrique, sous trois réserves,
- vu sa décision n°2020/ 81 / EOLIEN DUNKERQUE / 4 du 1<sup>er</sup> juillet 2020, fixant la durée du débat et arrêtant ses modalités et son calendrier,

après en avoir délibéré,

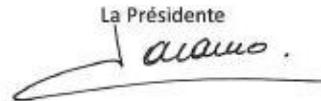
**DÉCIDE :**

**Article 1 :**

La commission décide, sur proposition de la commission particulière du débat public, d'engager une expertise sur la perception anticipée du paysage par le biais des photomontages.

**Article 2 :**

La présente décision sera publiée au Journal officiel de la République française.

La Présidente  
  
Chantal JOUANNO

## Annexe 2 : Choix du capteur photographique pour l'étude

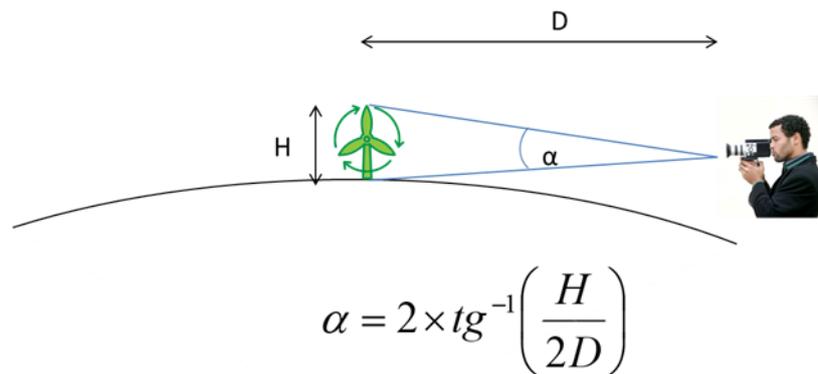
Le choix de l'appareil photographique numérique (APN) et de l'optique de capture des photographies servant de base aux photomontages doit être guidé par un seul critère essentiel : reproduire la vision humaine. Or ce choix est délicat par nature, car la vision humaine est tout sauf une vision statique et instantanée ! Il s'agit d'une vision binoculaire, en mouvement, et guidée par des processus attentionnels (nous *regardons* les choses). Néanmoins, des critères objectifs permettent de choisir le meilleur capteur :

- *Angle de vue reproduisant la vue humaine* : le champ visuel de l'être humain n'est pas statique. La vision précise s'effectue sur un angle très réduit, inférieur à 5°, et est entouré d'un champ périphérique beaucoup moins précis. C'est le cerveau qui reconstitue une vue « grand angle » de la scène observée, en tenant compte des connaissances du sujet et de l'historique d'observation (balayage du champ visuel par saccades oculaires). Au niveau psycho-cognitif, on peut estimer le champ visuel perceptible consciemment à environ 50°, mais cette valeur est purement indicative et fluctue entre les individus, et en fonction des conditions et de l'état du sujet. Pour la création de photomontages, l'angle horizontal de l'APN est sans importance, car on procédera à un collage de vues couvrant chacune un champ limité. L'angle vertical devra atteindre au moins 25° : une optique de 50mm sur un APN Reflex 24x36 est suffisante pour cela. On évitera toujours les objectifs « grand angle » (à courte focale), qui peuvent certes capturer directement un angle panoramique, mais introduisent de très fortes aberrations optiques impropres à la restitution fidèle du paysage.
- *Résolution de l'œil* : Notre vue permet de percevoir de très petits détails, de l'ordre de 1 mm à 3 m. A 10 km, nous voyons donc (en théorie) des structures d'environ 3 m. Mais là encore, cette donnée brute doit être modulée car nous ne *voyons* pas tous les détails, et heureusement ! La plupart des détails fins sont ignorés par le cerveau qui s'intéresse à reconnaître les objets de son environnement, et donc groupera (souvent à l'insu même de l'observateur) les structures fines en « paquets » pertinents, en fonction de critères liés à l'attention : des objets en mouvement, ou dont la couleur tranche par rapport au fond seront alors détectés instantanément, alors que parfois certains gros objets seront ignorés car l'attention du sujet sera fixée ailleurs. Les APN professionnels atteignent couramment 36 Méga pixels (Soit 7360 x 4912 pixels). Associé à une optique d'ouverture 40° (objectif de 50 mm classique), on obtient un angle de 0,34' d'angle par pixel, à comparer à la résolution humaine qui vaut environ 1 minute d'angle. Autrement dit, dans des conditions adéquates de restitution, la résolution des APN actuels suffit amplement à fournir tous les détails visibles pour l'œil humain le plus affûté.

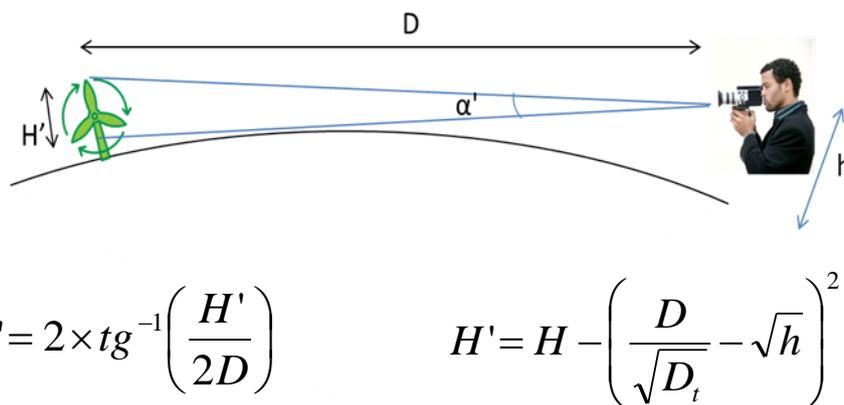
L'appareil choisi pour l'étude du futur parc éolien de Dunkerque est le Nikon D800E pourvu d'une optique de 50 mm. Cet APN est dépourvu de filtre passe-bas qui permet de restituer un « piqué » d'image très adapté à la tâche de photomontage. Les photographies sont téléchargées au format RAW, et correspondent à l'image directement issue du capteur, sans post-traitement, avec une fidélité maximale.

### Annexe 3 : Visibilité des structures en mer

La visibilité d'un parc éolien en mer peut être déterminée selon des critères géométriques :



La distance de l'horizon D est inférieure à 5 km pour un observateur d'une taille de 1,80 m. Au-delà, la rotondité de la terre diminue encore l'angle selon lequel une éolienne est visible. Il constitue donc une valeur maximale. Au-delà de 5 km, La hauteur H est donc diminuée de l'effacement dû à cette rotondité et on a :



H = 300 m au maximum pour une éolienne du parc éolien de Dunkerque, et  $D_t = 12740$  km (diamètre terrestre), ce qui conduit au tableau suivant (les lignes en rouge correspondent à des distances inférieures à la limite du rivage le plus proche) :

| D     | $\alpha$ (degrés) | $\alpha$ (minutes d'arc) | Effacement (m) | Effacement (%) | Hauteur visible (m) |
|-------|-------------------|--------------------------|----------------|----------------|---------------------|
| 1 km  | 17.06             | 1024                     | 0              | 0              | 300                 |
| 2 km  | 8.58              | 515                      | 0              | 0              | 300                 |
| 5 km  | 3.44              | 206                      | 0              | 0              | 300                 |
| 10 km | 1.72              | 103                      | 2              | 1              | 298                 |
| 15 km | 1.15              | 69                       | 8              | 3              | 292                 |
| 20 km | 0.86              | 52                       | 18             | 6              | 282                 |
| 25 km | 0.69              | 41                       | 32             | 11             | 268                 |
| 30 km | 0.57              | 34                       | 50             | 17             | 250                 |
| 35 km | 0.49              | 29                       | 72             | 24             | 228                 |
| 40 km | 0.43              | 26                       | 97             | 32             | 203                 |

On voit que l'effacement ne devient significatif qu'au-delà de 25km de distance, il est donc pratiquement négligeable aux endroits où les éoliennes sont les plus visibles. Ces distances correspondent à une transmission de la lumière parfaitement rectiligne. Cependant les rayons lumineux subissent des réfractions dues aux variations de densité dans l'atmosphère. Outre des déformations optiques, ces phénomènes provoquent, en général, un éloignement de l'horizon perçu. Dans la pratique, ce phénomène peut « reculer » l'horizon d'observation dans une proportion variant entre 20% et 35% par rapport à l'horizon réel, à supposer bien entendu que la nébulosité n'opacifie pas le trajet optique supplémentaire. Exceptionnellement des objets tels que des falaises ou des phares situés à plus de 30km peuvent être rendus partiellement visibles par ce phénomène apparenté aux mirages.

## Annexe 4 : Visibilité en mer à Dunkerque

Les sources permettant d'estimer la visibilité sur un site donné en France sont nombreuses et anciennes. Dans le cas présent, le cabinet d'étude paysager a collecté les données suivantes :

- Un ancien atlas climatique de France (édition 89), qui relève un peu moins de 40 jours de brouillard annuels, et surtout 170 jours / an de précipitations (inclus le crachin typique du nord à faible pluviométrie mais limitant très fortement la visibilité), soit presque la moitié du temps ;
- Les relevés de la station météorologique de Dunkerque, qui fait état d'un maximum de 114 jours de brouillard en 1979, et un minimum de 15 jours en 2015.

On dispose également des données de visibilité horizontale sur la zone du projet depuis 1973 (station Météo-France de Dunkerque), avec des données journalières comprenant jusqu'à 8 relevés par jour. Ainsi, pour le 1<sup>er</sup> janvier 2020, les données sont consultables sur :

<https://www.infoclimat.fr/observations-meteo/archives/1er/janvier/2020/dunkerque/07010.html>

L'accès à des statistiques annuelles complètes n'a pas été possible dans le temps de l'expertise. **Une analyse jour par jour sur 2019 de la visibilité diurne depuis Dunkerque** a cependant conduit aux statistiques suivantes :

| Visibilité | Nombre de jours | Soit en % | Commentaires   |
|------------|-----------------|-----------|--|
| < 11km     | 131             | 36        | Parc invisible en totalité depuis toute la côte  |
| < 20 km    | 220             | 60        | Parc visible uniquement depuis la zone critique d'impact (Gravelines / Coxyde). Visibilité partielle uniquement. |
| > 20 km    | 14              | 4         | Parc visible en zone de visibilité intermédiaire. Visibilité totale depuis la zone critique                      |
| > 30 km    | 1               | 0.3       | Parc visible depuis les zones de faible impact   |

On constate donc que le parc est totalement invisible 1/3 des journées, et visible partiellement presque les 2/3 du temps, depuis le rivage proche. Par contre, dès que l'on s'éloigne de la zone

critique, la visibilité chute drastiquement et le parc ne sera pratiquement jamais visible au-delà de Gravelines à l'ouest et Nieupoort à l'est.

## **Annexe 5 : Présentation de l'experte**

Titulaire du diplôme d'ingénieur CentraleSupélec, Jeanne Vézien a obtenu un Doctorat en Informatique au sein de l'équipe SYNTIM à l'Institut National de Recherche en Informatique et Automatique (INRIA) en 1995, et a dirigé le groupe d'analyse d'images de l'équipe MIRAGES, toujours à l'INRIA, de 1997 à 2001, avec pour domaine de recherche principal la vision par machine, notamment dans le domaine de l'analyse stéréoscopique et de la réalité augmentée. Elle a également travaillé au laboratoire GRASP de l'université de Pennsylvanie pendant trois ans sur la génération et le recalage d'images 3D pour des applications médicales. Elle est, depuis 2002, ingénieure de recherche au sein de l'Equipe VENISE du laboratoire LIMSI-CNRS, et travaille sur des domaines allant de la Réalité Virtuelle à la Réalité Augmentée, et sur les liens entre analyse et synthèse d'images. Conceptrice et développeuse des dispositifs de Réalité Virtuelle du LIMSI-CNRS, elle a activement contribué au design et à la spécification du grand équipement immersif EVE. Jeanne Vézien a participé au sein de l'équipe VENISE à plusieurs projets nationaux et européens sur le thème de la Réalité Virtuelle notamment le projet ANR « Masse de données » CoRSAIRe (2005-2008) sur l'utilisation des technologies de Réalité Virtuelle des applications de Mécanique des fluides et de bio-informatique ; le projet Perf-RV2, plate-forme RNTL visant à étudier la place de l'humain virtuel dans l'usine numérique ou le projet ANR EVEILS portant sur l'élaboration de démonstrateurs de Réalité Virtuelle pour la pédagogie des sciences. Elle est l'auteure de plusieurs dizaines d'articles scientifiques dans les domaines de l'analyse d'images et de la Réalité Virtuelle ainsi que de plusieurs chapitres de livres du domaine. Elle enseigne également ces spécialités dans plusieurs formations doctorales et écoles d'ingénieurs de la région parisienne.

L'experte peut être contactée par courrier électronique à l'adresse : [vezien@limsi.fr](mailto:vezien@limsi.fr)