

Projet de parc pilote



Expertise des simulations visuelles

Jean-Marc Vézien

Table des matières

A.	Introduction – Objectif de l’expertise	3
1.	Contexte : le projet éolien du golfe du Lion	3
2.	L’impact visuel éolien : définition, mesures	6
3.	Les objectifs de l’expertise	6
4.	Plan du rapport.....	9
B.	Examen de la méthodologie par photomontage	10
1.	L’impact visuel	10
2.	Processus de conception du photomontage d’impact.....	15
3.	Capture des supports panoramiques	15
4.	Choix des points de vue.....	18
a.	Localisation des points de vue.....	18
b.	Horaires de prises de vue	18
c.	Luminosité et conditions météorologiques.....	19
d.	Visibilité des machines : atténuation atmosphérique.....	20
e.	Orientation des pales	21
5.	Photocomposition	21
a.	Assemblage panoramique	21
b.	Photomontage 3D	24
6.	Rendu visuel final et supports de présentation	28
a)	Rendu visuel	28
b)	Présentation des photomontages	32
7.	Conclusion méthodologique.....	35
C.	L’impact visuel du projet EFGL	36
1.	Méthodologie d’évaluation	36
2.	Zones d’impact et amers retenus.....	36
a)	Critères de sélection et paramètre de comparaison.....	37
b)	Liste des amers retenus.....	39
c)	Le phare de Leucate	40
d)	La tour de télécommunication de Leucate.....	42
e)	Le feu de jetée de Port-la-Nouvelle.....	42
f)	Le parc éolien de Opoul-Perillos.....	43
g)	Le parc éolien de Fitou1	45
3.	Covisibilité EolMed-EFGL.....	46

a) G13 : Falaise La Franqui.....	47
b) G27 : Barcarès-Lydia.....	48
4. Conclusion.....	49
D. Synthèse.....	50
E. Bibliographie.....	51
F. Annexes.....	53
Annexe 1 : Arrêté de nomination de l'expert.....	Error! Bookmark not defined.
Annexe 2 : Choix du capteur photographique pour l'étude.....	53
Annexe 3 : Visibilité des structures en mer.....	54
Annexe 4 : Présentation de l'expert.....	56

A. Introduction – Objectif de l'expertise

1. Contexte : le projet éolien du golfe du Lion

Lauréat d'un appel à projets de l'ADEME en novembre 2016, le projet "Les Eoliennes Flottantes du Golfe du Lion" (ou EFGL) est porté par un consortium regroupant ENGIE, EDPR et la Caisse des Dépôts et Consignations. RTE, qui assurera le raccordement au réseau de transport d'électricité terrestre, est co-maître d'ouvrage.

Le parc comportera 4 éoliennes d'une puissance de 6 MW installées dans le Golfe du Lion, au large de Leucate et de Le Barcarès (voir Figure 1). Il vise à tester, en conditions réelles, l'ensemble des technologies déployées, en particulier celle, récente, des éoliennes dites flottantes. Le coût de construction du parc et de son raccordement électrique, incluant les coûts de développement, est estimé à 180 M€.

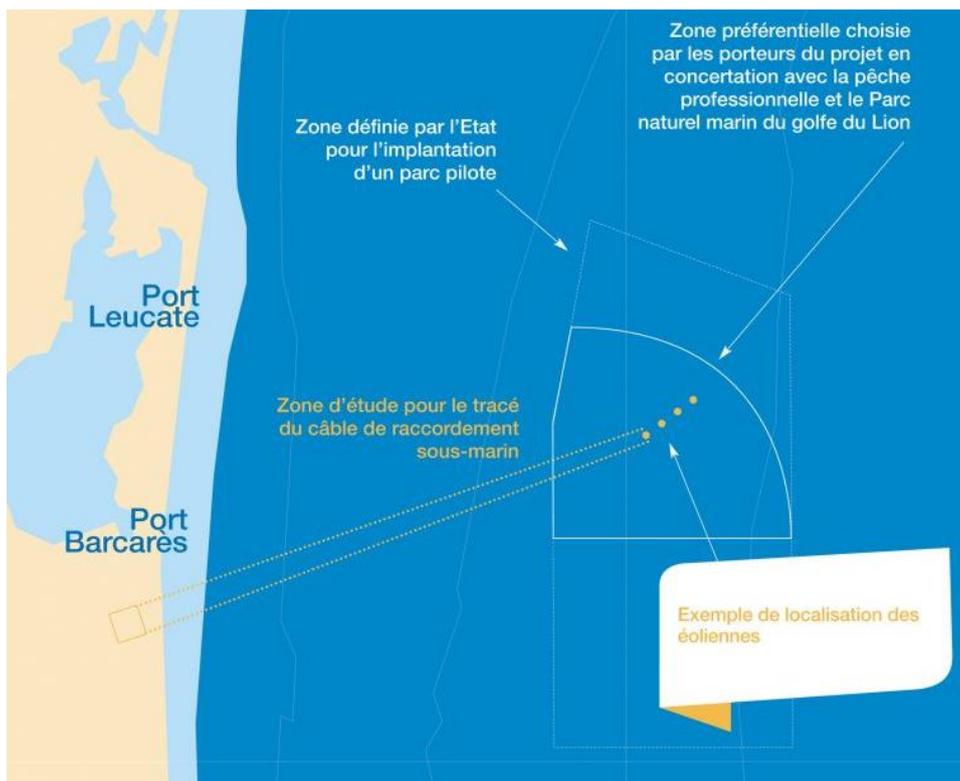


Figure 1 : le site retenu pour le projet des éoliennes du golfe du Lion.

Dans sa configuration actuelle, le projet EFGL se compose de 4 éoliennes en mer, d'une capacité unitaire de 6 MW, de type **Haliade**™ 150-6MW produite par General Electric. Les éoliennes seront localisées au large de Port Barcarès, à une distance d'environ 16 km, sur une zone d'étude d'environ 16 km², à l'intérieur d'une zone de 150 km² fixés dans le cahier des charges de l'appel d'offres (Figure 2). La date de mise en service envisagée est 2021 (voir calendrier prévisionnel Figure 3).

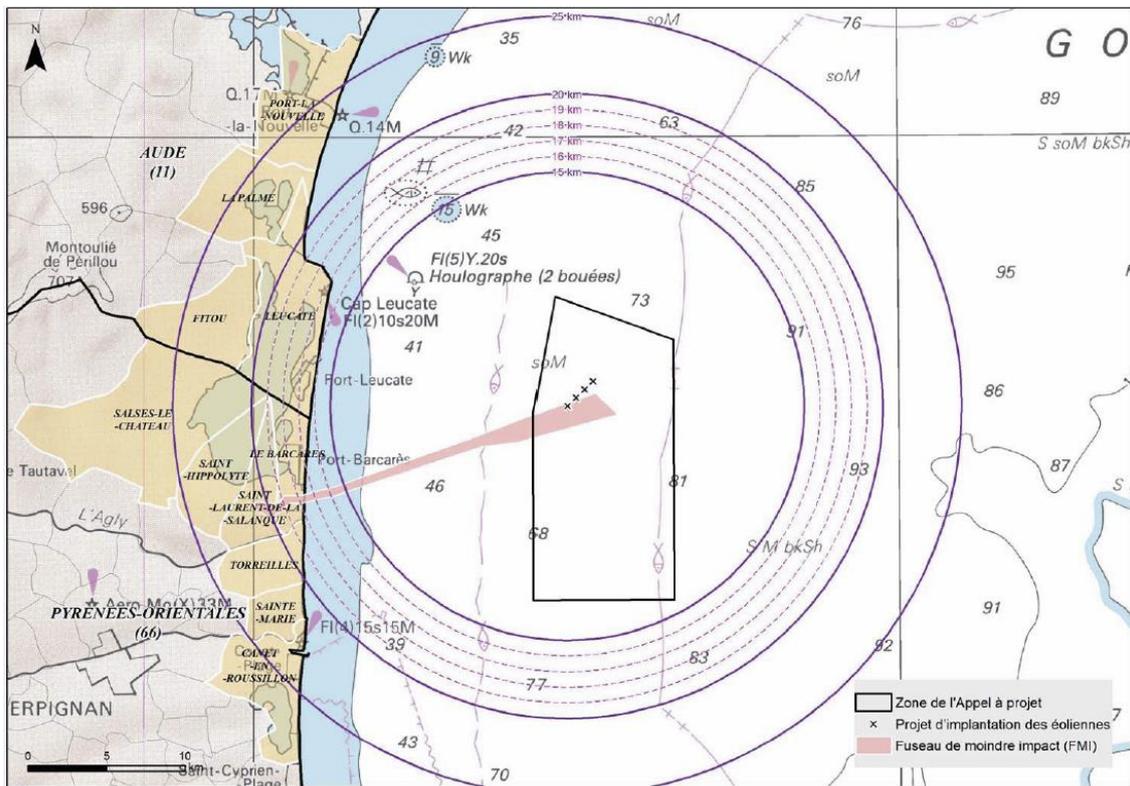


Figure 2 : Le site éolien EFGL : vue générale (source : documents concertation publique)

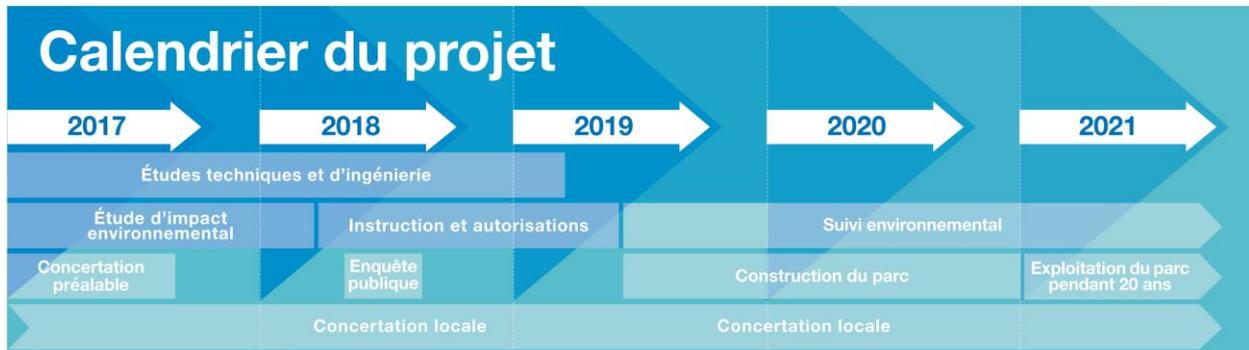


Figure 3 : Calendrier prévisionnel de mise en œuvre du projet (source: dossier du Maître d'Ouvrage).

Parallèlement au calendrier technique du projet, et conformément à la loi, le projet EFGL a d'ores et déjà fait l'objet d'une concertation approfondie avec les acteurs institutionnels, ce depuis 2015.

Le 22 mars 2017, le Groupement LEFGL et RTE ont saisi la Commission Nationale du Débat Public pour avis. Considérant que le projet contribue au développement des énergies renouvelables en France et revêt un intérêt national, qu'il présente d'importants enjeux socio-économiques mais que ses impacts sur l'environnement et l'aménagement du territoire apparaissent limités en l'état actuel, la Commission a décidé d'organiser une concertation sous l'égide d'une garante,

Madame Claude BREVAN, concertation se déroulant du 27 juin au 27 septembre 2017 ¹. La garante de la concertation a désigné l'auteur du présent document en tant qu'expert pour l'assister sur les aspects relatifs à l'impact visuel. On trouvera en annexe le texte complet décrivant la tâche qui m'a été assignée.

Le présent document tente, dans la mesure du possible, d'apporter un éclairage complet, tout en restant accessible, 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 EFGL.

2. L'impact visuel éolien : définition, mesures

L'évaluation de l'impact éolien obéit à une méthodologie bien balisée, et se décline suivant de multiples facteurs : faune, pêche, tourisme, économie, etc. (voir [Impact2010][Impact2016] 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 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 (grâce à des 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 dédié².

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 EFGL a commandité une série de

¹ Voir arrêté de la Commission Nationale du Débat Public, en date du 5 avril 2017. La concertation n'est pas encore achevée à la date de rédaction de la présente étude.

² Pour le projet EFGL : <http://info-efgl.fr/>

photomontages, réalisés par le cabinet d'étude spécialisé Géophom [GeophomLeucate]. Cette série de photomontages illustre, via une collection de 32 vues panoramiques à 180°, prises depuis des points représentatifs du littoral concerné (de Canet-en-Roussillon au sud à Gruissan au nord, avec des vues spécifiques depuis Banyuls et le Pic du Canigou), l'aspect visuel du champ éolien à différentes heures de la journée (dont deux vues nocturnes, prises depuis Leucate et Port-Barcarès). A ces 32 vues, s'ajoutent 2 photomontages illustrant les effets cumulés des deux projets pilotes de la zone, à savoir EFGI d'une part et le projet EolMed situé à une vingtaine de kilomètres au nord, d'autre part¹. Ces photomontages supplémentaires exploitent les prises de vues « Falaise Franqui Semaphore » (panorama n°21) et « Port Barcarès Le Lydia » (panorama n°27). Ils feront l'objet d'une analyse distincte dans la dernière section du rapport.

Pour la phase de concertation, les photomontages sont accessibles sous trois formes distinctes :

- 1 cahier de 32 photomontages, visualisant la portion centrale des photomontages originaux (angle de 90°), imprimés au format dit "double A3" (84 x 29.7 cm, les photomontages eux même faisant environ 66 x 19cm).
- un site internet, sur lequel un outil interactif permet d'explorer chacune des 32 vues panoramiques (ces pages seront idéalement visualisées avec un écran de bonne résolution, typiquement 1920 x 1200 pixels).
- Deux impressions grand format de 3 m x 40 cm de développé présentées sur support semi-cylindrique, installées sur les lieux de concertation, et destinées au grand public afin de mieux apprécier l'impact visuel, dans des conditions plus proches de la réalité terrain (voir Figure 4).

¹ Concernant le projet de Gruissan, l'implantation définitive n'étant pas encore fixée, il s'agit pour l'instant de photomontages indicatifs sur la base d'un projet représentatif d'implantation.



Figure 4: Exemple de vue panoramique réalisée à partir d'un photomontage, utilisée dans un débat public antérieur. 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. Cette validation portera, notamment, sur le choix des prises de vue de référence, choix qui conditionne pour une large part le processus d'évaluation.
- D'autre part, sur l'évaluation de *l'impact visuel spécifique* du projet EFGL, 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. Elle évaluera en conséquence la sincérité du travail de présentation de l'impact visuel par le maître d'ouvrage. 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 du projet EFGL, **en apportant des éléments quantitatifs et qualitatifs en complément des photomontages proprement dit, de manière circonstanciée**. La méthode retenue fait appel à une analyse s'appuyant sur les données relatives au paysage déjà recueillies, afin de comparer l'aspect visuel du futur parc avec des éléments existant 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 relative à toute implantation d'une construction (habitation, monument, usine) dans une zone géographique. Elle commence en générale par une étude paysagère détaillée qui répertorie tous les éléments utiles à l'étude de l'impact visuel. 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 :

- Une aire d'étude *éloignée*, bornée par la distance de visibilité maximale. Dans le cas présent, cette distance peut être fixée à environ 30 km¹.
- 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 l'EFGL, cette aire est très diversifiée : plages, falaises, étangs, salins, stations balnéaires. Compte tenu de l'éloignement des éoliennes (distance minimum à la côte : 16 km environ) et des paysages côtiers, le rétro-littoral est en général peu profond (moins de cinq kilomètres dans tous les cas, typiquement deux kilomètres), 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 ci-dessous).
- Une aire d'étude *intermédiaire*, couvrant l'espace entre le parc éolien et le littoral. Dans le cas présent, elle est composée uniquement d'eau. La perception du parc depuis les itinéraires maritimes empruntés par des bateaux transportant des passagers (liaison Sète-Maroc) se fait la plupart du temps à des distances importantes, proches ou supérieures à 20 km, donc avec un impact modéré.

Partant de cette division grossière de l'espace, la détermination de l'état initial du patrimoine et du paysage peut être faite. Dans notre cas, elle est détaillée dans l'étude paysagère dédiée à ce projet, dont une version préliminaire a été mise à disposition de l'expert [Paysage2017]. Cette étude permet schématiquement de subdiviser l'espace suivant les composantes suivantes :

- Deux zones **d'impact faible** : la première située à l'arrière du littoral (rivage Ouest de l'étang de Leucate, Fitou, Etang de la Palme), dont la distance et surtout la

¹ Il est possible de voir des éléments de paysage à des distances bien supérieures dans certaines conditions, comme par exemple du haut d'une montagne, telle que le pic du Canigou. Cependant on verra dans la suite de l'étude que c'est très rarement le cas pour le projet EFGL.

présence fréquente d'éléments s'interposant entre l'observateur et le parc éolien rende la visibilité modérée. La seconde, au sud de Canet-en-Rousillon (Saint-Cyprien, Argelès, Banyuls), où, malgré la hauteur d'observation (jusqu'à 600 mètres) les éoliennes seront peu visibles, de par la distance (30 km et plus), la nébulosité atmosphérique et leur petitesse (30' d'angle vertical).

- Une zone **d'impact intermédiaire**, autour de Gruissan, pour laquelle la distance aux éoliennes est déjà significative mais la visibilité est renforcée par la co-visibilité du projet de parc éolien de Gruissan, situé à 20 km au nord. Les 4 éoliennes du projet pilote de Gruissan seront situées à 17 km des côtes et attireront le regard de l'observateur vers le large et indirectement sur les éoliennes EFGL (voir Figure 5).
- Une zone **d'impact maximum**, située entre Canet-en-Rousillon au sud et Port-la-Nouvelle au nord, en passant bien sûr par Le Barcarès et Laucate, où la distance au parc est minimale, entre 16 et 20 km, ce qui lui assure une hauteur comprise entre 30' et 40' sur l'horizon, mais avec une emprise horizontale réduite (entre 3 et 6 degrés environ). Les conditions atmosphériques dans ce secteur permettent de prédire une visibilité des machines les plus proches environ 80% du temps.

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 trois représentations emblématiques de la région :

- une image liée au tourisme et à la plaisance, avec l'exemple-type de la station balnéaire de Canet-en-Roussillon (plages, côté urbanisée, port de plaisance) ;
- une image liée aux activités maritimes professionnelles : la pêche (Port-la-Nouvelle), l'ostréiculture (Leucate) ;
- une image très présente d'espaces naturels préservés (Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée, Etang de Salses-Laucate), associés à des points de vue remarquables (falaise de La Franqui) et des activités sportives (randonnées, VTT, cyclotourisme).

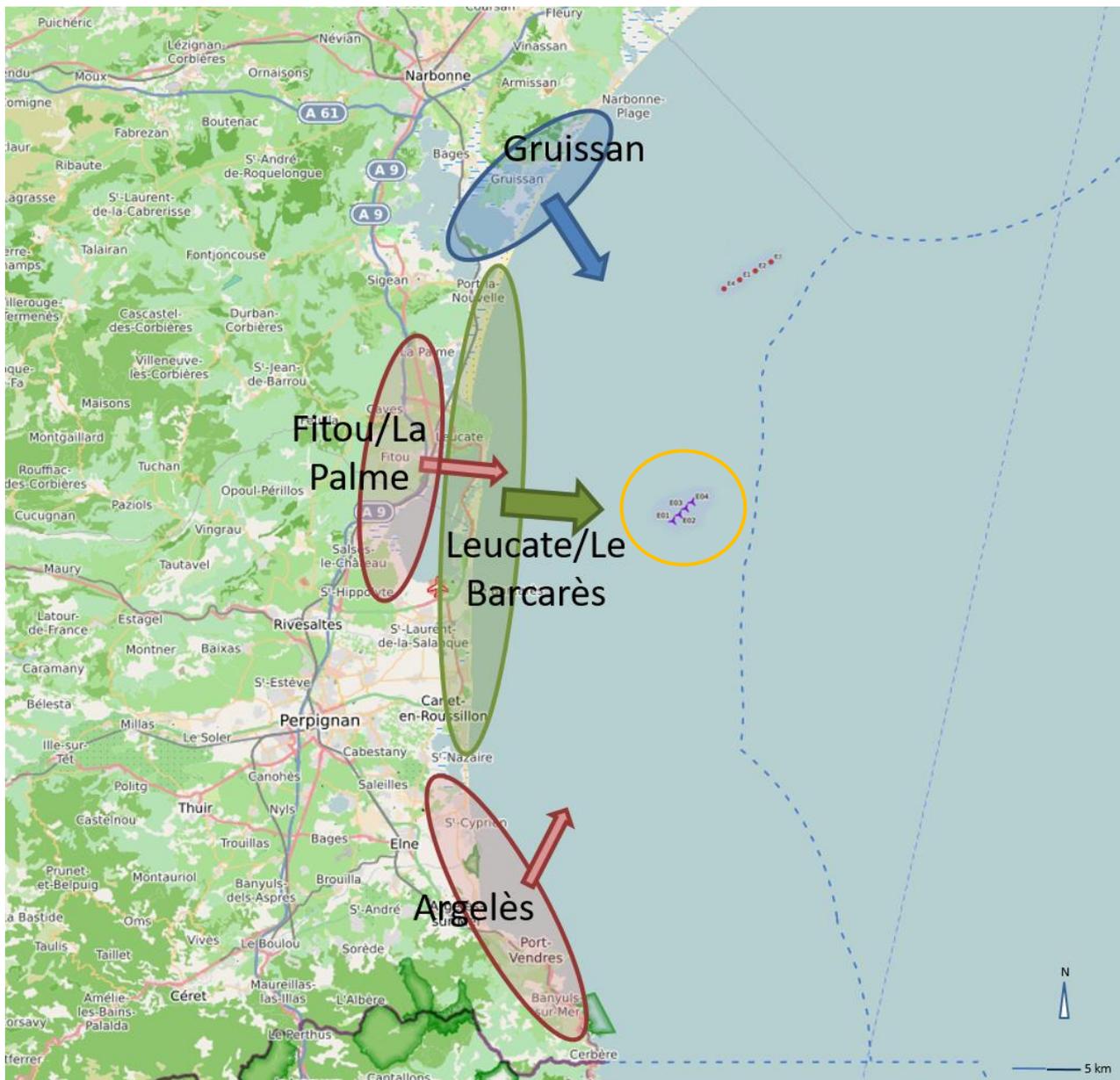


Figure 5 : Carte des principales zones du littoral concernées. L'épaisseur des flèches est proportionnelle à l'impact visuel a priori, compte tenu des éléments paysagers (distance, élévation, etc.). Dans le cercle jaune, le projet EFGL, au nord le projet de Gruissan.



Figure 6 : Quelques paysages prototypiques du littoral impacté par le projet : la plage de Canet-en-Roussillon, un chalutier à Port-La-Nouvelle, les salins de La Palme, la falaise de La Franqui.

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 la lumière ou les saisons. C'est sur l'ensemble de ces considérations que **l'étude paysagère** permet de sélectionner **un panel de points de vue caractéristiques** du littoral. Le choix de ces points de vue reste délicat et fera l'objet d'une discussion critique dans ce document.

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 plus fort que pour le projet EFGL).

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 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 utile 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 sur lesquelles on va, dans un deuxième temps, superposer l'image du champ d'éolienne tel qu'il serait visible, du même endroit : c'est la phase de **photocomposition**. 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 (suivant une projection cylindrique), 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 circulaire (idéalement à 360°), car l'ouverture verticale des APN capture de façon

satisfaisante la partie centrale du 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 (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).

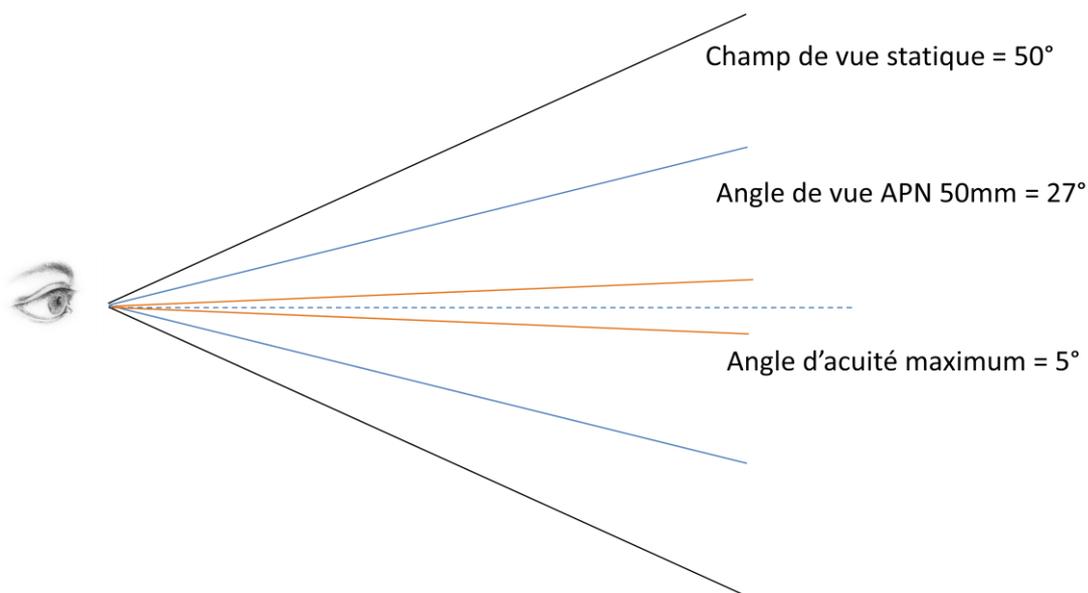


Figure 9 : Ouvertures angulaires d'observation selon l'axe vertical.

Le cabinet d'étude Géophom a été chargé de réaliser les photomontages du projet pilote EFGL. 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 mire 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 appréciable que chaque prise de vue soit 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. On peut cependant regretter que la méthodologie actuelle limite la perception verticale du panorama à l'ouverture d'une prise de vue (27°), alors qu'il serait possible de se rapprocher de la perception humaine en créant un panorama plus ouvert à l'aide de plusieurs panoramiques assemblés (voir la procédure ci-dessous)¹.



(a)



(b)



(c)



(d)

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.

¹ Une focale plus courte permettrait de capturer avec le même nombre de vues un angle vertical plus important. Cependant cette procédure exigerait une correction rigoureuse des distorsions géométriques, et introduirait une résolution angulaire variable dans le panorama final. Il s'agit cependant d'une piste prospective digne d'intérêt.

4. Choix des points de vue

La sélection de points de vue pertinents pour illustrer l'impact visuel d'une construction est subordonné d'une part à l'évaluation a priori de cet impact (via des mesures objectives de visibilité modulées par des facteurs subjectifs comme la représentativité de tel ou tel paysage [Paysage2017]), qui conduit à choisir tel ou tel lieu de prise de vue ; d'autre part à la détermination des conditions statistiquement représentatives d'observation du paysage en ces lieux. Ce deuxième point est le plus délicat, car les paramètres présidant à cette détermination sont nombreux et difficiles à quantifier. Nous passerons en revue les principaux d'entre eux, et évaluerons dans quelle mesure les photomontages réalisés atteignent le degré de représentativité souhaité.

a. Localisation des points de vue

L'étude paysagère, conduite sur des critères objectifs (comme la carte de visibilité calculée par logiciel) et subjectifs (sensibilité du paysage, qui s'appuie néanmoins sur des données quantifiables comme l'affluence touristique et la présence de points de vue ou de bâtiments classés) a abouti à la sélection de 32 points de vue pour la création de photomontages. Sur ces 32 sites, 20 d'entre eux (soit près des 2/3) sont situés sur la zone critique du littoral, assurant une très bonne représentativité géographique vis-à-vis de l'impact. Par ailleurs 9 d'entre eux sont situés dans les zones d'impact faible (étang de Leucate, La Palme, Banyuls) et deux dans la zone de co-visibilité de Gruissan, zone d'impact modéré spécifique. On peut donc conclure à une **très bonne représentativité** des points de vue quant à leur emplacement. On notera qu'à titre de référence, une vue a été générée depuis le Pic du Canigou, de par la visibilité exceptionnelle dont on peut parfois bénéficier.

b. Horaires de prises de vue

Deux considérations entrent en ligne de compte pour l'heure de capture des panoramas : d'une part, privilégier les horaires où l'affluence est la plus forte (donc en milieu/fin de journée), d'autre part présenter plusieurs cas typiques d'éclairage : contre-jour, éclairage latéral, éclairage arrière direct. Sur les 32 photomontages réalisés, 5 (soit 15%) l'ont été le matin, à contre-jour, 7 (22%) ont été capturés en milieu de journée (éclairage latéral modéré, quasi-zénithal compte tenu de la saison), et enfin 16 (50%) en milieu/fin de journée, avec un éclairage arrière marqué. Dans la pratique, c'est l'éclairage à contre-jour (donc le matin) qui accentue la visibilité des éoliennes sur l'horizon.



Figure 11: deux éclairage différents du projet en fonction de l'heure d'observation. A gauche, en éclairage direct en milieu d'après-midi ; à droite, à contre-jour, vers midi.

Pour une meilleure représentativité, deux vues nocturnes (depuis Leucate et Port-Barcarès) et deux vues à l'aube (falaise La Franqui et Port-Barcarès) complètent la série. Le soleil se couchant dans la direction globalement opposée à l'azimut du projet, il n'a pas été jugé utile de créer de photomontage au crépuscule (le ciel étant alors très sombre en direction du large).

En conclusion, la représentativité des prises de vue en terme d'horaires est donc très satisfaisante.

c. Luminosité et conditions météorologiques

Il est important de générer des photomontages dans des conditions météo qui maximisent, autant que possible, la visibilité de la ferme pilote, ce qui permet de mesurer l'impact visuel dans le « pire cas », même si celui-ci n'est pas forcément le plus fréquent statistiquement. On préférera donc des prises de vue diurnes avec un soleil franc, mais sans qu'une température excessive génère trop de turbulences atmosphériques sur le littoral. L'optimum, de ce point de vue, est de capturer les vues lors d'une journée calme et ensoleillée au printemps. Cependant, les photomontages de l'étude d'impact, dont les panoramas diurnes ont été capturés durant l'été (période du 20 au 26 juillet), pendant une période stable d'ensoleillement, à différents moments de la journée et avec un pic de température diurne à 30° environ présentent des conditions globalement satisfaisantes.

Enfin il n'a pas été jugé utile de prendre de mesures particulières dans des prises de vue à contre-jour, l'APN utilisé possédant un mode « Delighting » qui permet de « déboucher » les zones d'ombres et de limiter les zones saturées¹.

¹ Les appareils photos n'ont pas la dynamique de notre système visuel qui nous permet de distinguer à la fois des détails dans les zones très sombres et très lumineuses. Les modes dit de « débouchage » permettent d'ajuster la dynamique des images lors de la prise de vue pour contrer efficacement cette perte d'information visuelle.

En conclusion, on peut donc dire que le projet est simulé dans un environnement photographique dont les conditions de luminosité favorisent sa visibilité.

d. Visibilité des machines : atténuation atmosphérique

La visibilité des éoliennes sur l'horizon maritime est fortement dépendante des paramètres de visibilité choisis pour leur rendu simulé dans le photomontage (ce point sera détaillé dans la section 6). En retour ces paramètres doivent être choisis en tenant compte de la visibilité typiquement constatée sur les sites de prise de vue. Là encore, on tendra vers un choix « de précaution » en choisissant une visibilité maximale. Dans le cas du projet EFGL, la visibilité retenue est celle observée depuis le sémaphore du Cap Leucate, situé à une cinquantaine de mètre d'altitude. Les données de visibilité recueillies par MétéoFrance ont été obtenues via le bureau d'étude Abiès : elles consistent en une série d'observations diurnes (4 observations par jour, toutes les 3 heures), la visibilité étant noté de 0 à 7, collectées tous les jours entre 2010 et 2016, soit plus de 10000 enregistrements. D'après le guide de météo France marine, la visibilité en mer est exprimée en Milles marin selon la légende suivante :

Visibilité "bonne"	sup à 5
visibilité "médiocre"	comprise entre 2 et 5
visibilité "mauvaise"	comprise entre 0,5 et 2
brume	inf à 0,5

On notera donc qu'une visibilité « bonne » (supérieure à 5 milles) n'assure pas une visibilité à coup sûr des éoliennes situés à 16 km des côtes. Néanmoins on retiendra ce seuil comme étant celui au-delà duquel la visibilité est propice à l'étude d'impact. Selon ce critère, une analyse statistique démontre que **le seuil de visibilité est atteint dans 87% des observations**¹. Ceci nous permet de conclure que :

- Le projet EFGL sera visible, au moins depuis la zone d'impact maximale, la plupart du temps en journée.
- Pour le rendu simulé des machines, il conviendra d'utiliser un coefficient d'atténuation minimal (ce qui est bien le cas, voir section 6).

¹ A noter que si on fixe le seuil de visibilité à 7, on atteint encore 81% de temps de visibilité de l'horizon. Il est connu que la visibilité est excellente dans la région, avec des observations de phénomènes parfois distants de 200km – avec l'aide de la réfraction atmosphérique qui permet de voir au-delà de l'horizon géométrique (voir Annexe).

e. Orientation des pales

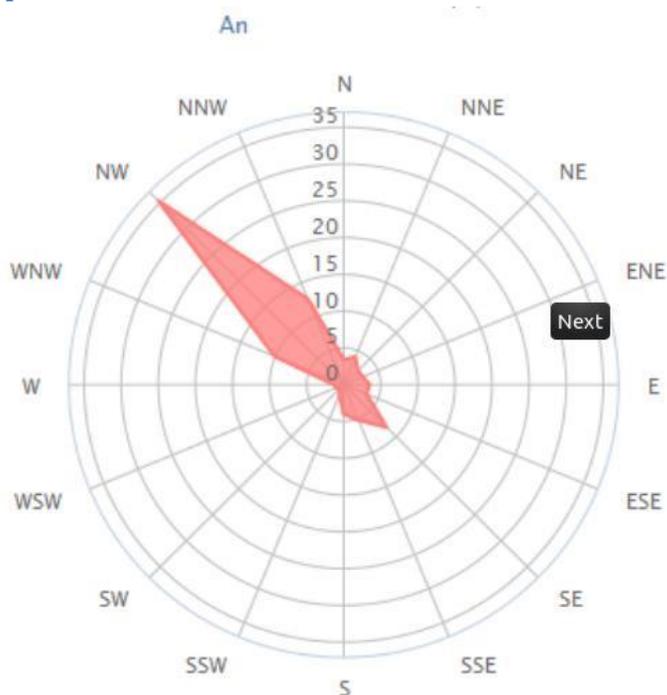


Figure 12: La rose des vents à Leucate (statistique sur 1 an).

La rose des vents de cette région du littoral est très particulière (voir Figure 12), puisqu'elle montre une très forte majorité de vent venant du nord-ouest (Tramontane). Il est donc parfaitement légitime de **représenter systématiquement les machines du projet EFGL avec une orientation de pales faisant face à l'azimut 315°**. C'est le choix qui a été retenu pour les photomontages d'impact. Dans cette configuration, les machines présentent un angle d'environ 45° avec le littoral le plus proche, ce qui minimise quelque peu leur impact visuel. Cet angle est moins favorable pour la zone de Gruissan (60° environ), mais pour une distance supérieure (30 km) et un azimut moins axial, ce qui modère l'impact résultant.

En conclusion de cette section, on peut affirmer que, au regard des critères communément retenus pour la représentation de l'impact des parcs éoliens en mer, les panoramas réalisés sont bien représentatifs des vues typiquement observées dans la zone concernée, que cela concerne la luminosité, la visibilité ou l'orientation au vent. Tout au plus peut-on regretter l'absence de vues prises depuis la mer, qui complèteraient utilement la palette des vues représentatives du paysage, par exemple à l'usage des plaisanciers de la région.

5. 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 13). 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 14). 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 13 : Exemple de stitching (tiré de www.arcsoft.com).



Figure 14 : 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 2014.0.0.5)*, logiciel libre particulièrement performant [HUGIN]. Ce logiciel permet de compenser les déformations optiques de l'appareil, 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. Cette procédure de recalage est délicate et le savoir-faire y tient une place importante. Cependant on peut en mesurer la précision en comparant la position prédite du modèle numérique de terrain utilisé avec son image panoramique (voir Figure 15). Une fois le calcul d'assemblage réalisé, des ajustements de contraste, de couleur et de luminosité sont nécessaires pour obtenir un panoramique parfaitement homogène.

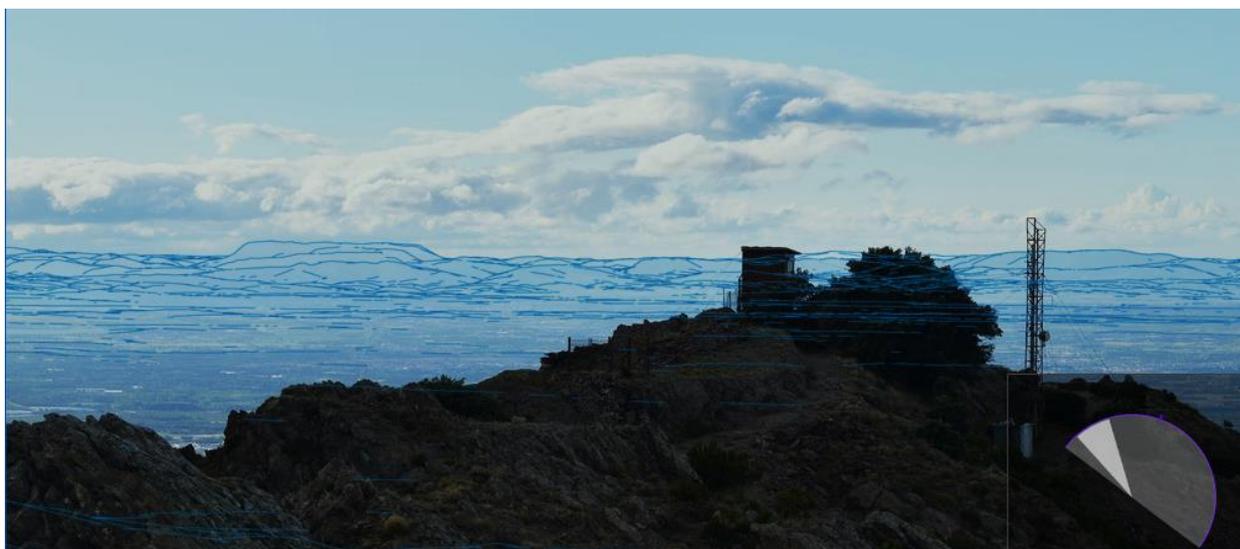


Figure 15: superposition du modèle numérique de terrain avec la vue panoramique reconstituée (ici un détail de la vue n°28, depuis la Tour Madeloc). On notera l'excellente superposition des deux rendus.

L'examen des panoramiques résultant (sous leur forme numérique haute résolution de 50400 x 3764 pixels, voir exemple Figure 16) 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 16 : Exemple de panorama obtenu (ici la vue depuis les ruines de la chapelle de Leucate).

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 17.

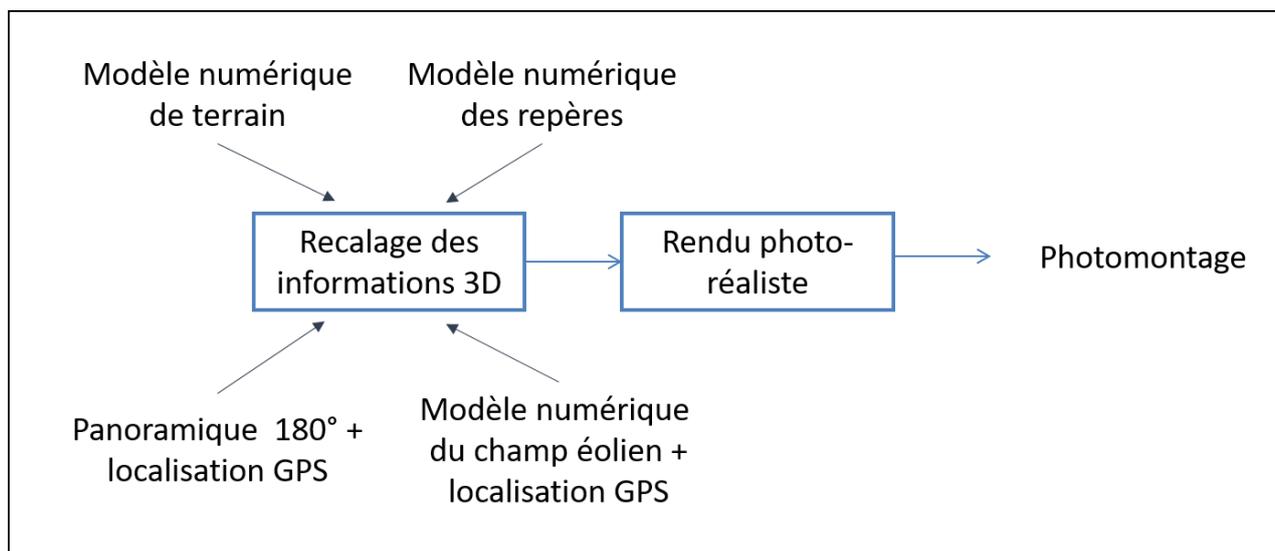


Figure 17 : Schéma du processus de photomontage.

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).

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 peut provenir du fait que l'espace maritime lui-même n'est pas géoréférencé, et que le niveau de la mer varie en fonction de la marée. Cependant, dans le cas de la Méditerranée, ce marnage est assez faible (40 cm) pour que son effet visuel soit négligé.

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 18), 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.

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



Figure 18 : Une image synthétique de paysage réalisée avec le moteur de jeu vidéo Unreal.

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 trois 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.
- *WindFarmer* (société GL Garrad Hassan). Cette société se spécialise dans la consultance sur les domaines de l'énergie, et notamment de l'éolien. Elle commercialise néanmoins aussi son propre logiciel de modélisation modulaire. Aussi ancienne qu'EMD (plus de 25 ans), son expertise est reconnue mais le logiciel ne permet pas de traiter des assemblages panoramiques.
- *WindFarm* (société ReSoft), permet la modélisation du bruit, du rendement énergétique, de l'impact visuel (ombres portées, photomontages) du parc éolien. L'approche est aussi 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 trois 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 projet EFGL le logiciel *WindFarm* 4.2.5.3.

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, le modèle numérique des repères et la représentation numérique des éoliennes dont la localisation GPS est connue. Grâce au géo-repérage des 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^{ème} 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 [MethodoGeophom], ainsi que par le biais de vidéos capturées lors de sessions de travail réelles, mises à disposition de l'expert (voir Figure 19). 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 à la ferme pilote EFGL.

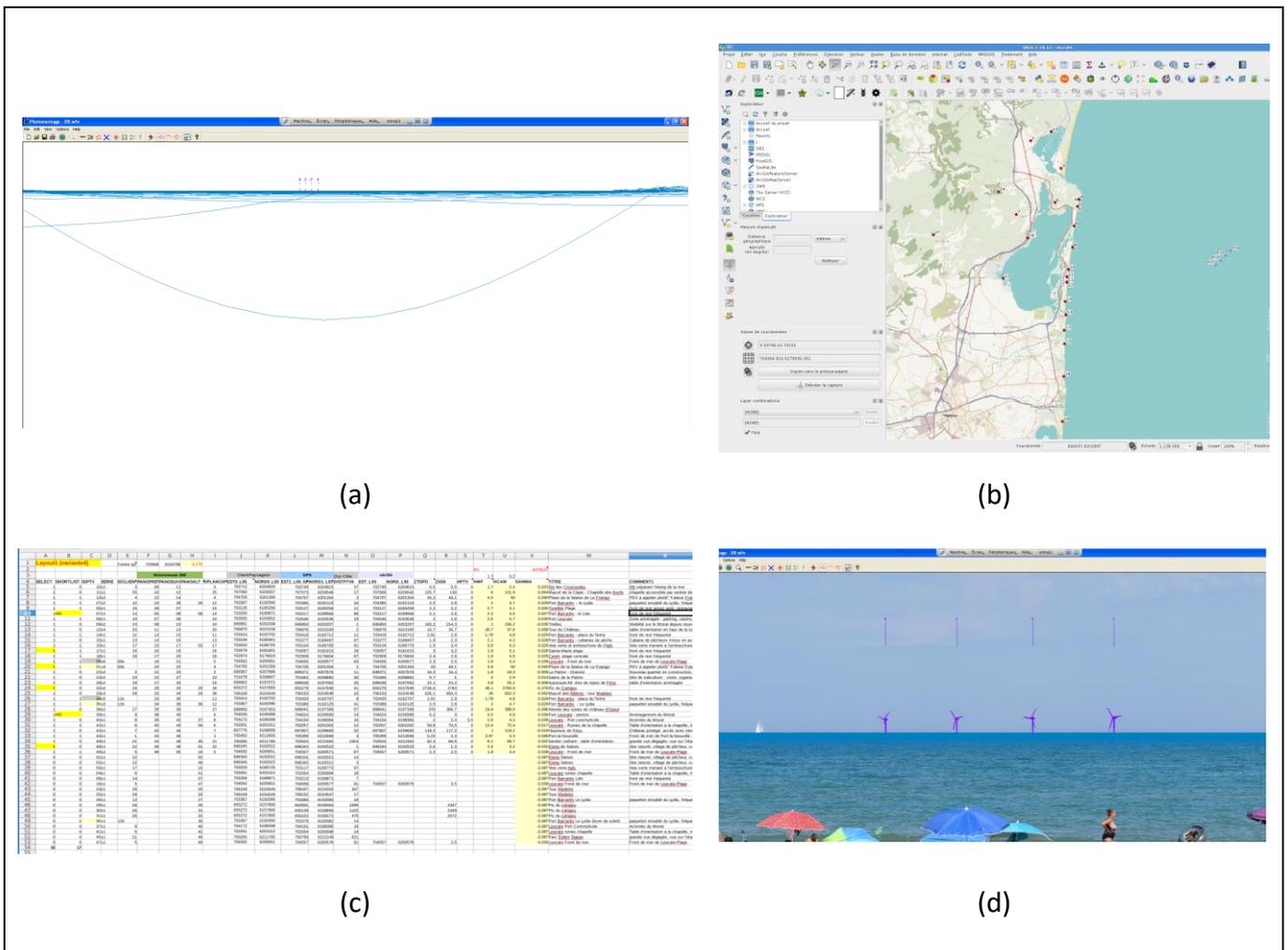


Figure 19 : Photo-composition du champ éolien : (a) Les éoliennes et le modèle numérique de terrain sont importés dans Windfarm. (b) et (c) Les indications de géolocalisation permettent le recalage précis du panorama photographique en superposition. (d) Toutes les informations sont maintenant correctement superposées dans le même modèle 3D, on peut passer à la phase de rendu.

6. 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, le soleil), et d'autre part, les objets à visualiser, à savoir ici, les éoliennes. Bien qu'encore à l'étude, ces derniers sont déjà suffisamment spécifiés, 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 20 : Les couleurs utilisées sur le projet EFGL (les valeurs sont les composantes Rouge, Vert et Bleu de chaque teinte). Pour l'instant, le balisage diurne n'est pas fixé, et peut encore faire l'objet de modifications.

Le matériau retenu est extrêmement diffusant (voir schéma ci-dessus), il en résulte un aspect mat (pas ou peu de reflets) facile à simuler informatiquement. La position du soleil (azimut,

élévation) est calculée compte tenu du lieu, du jour et de l'heure de prise de vue. Cependant, 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.

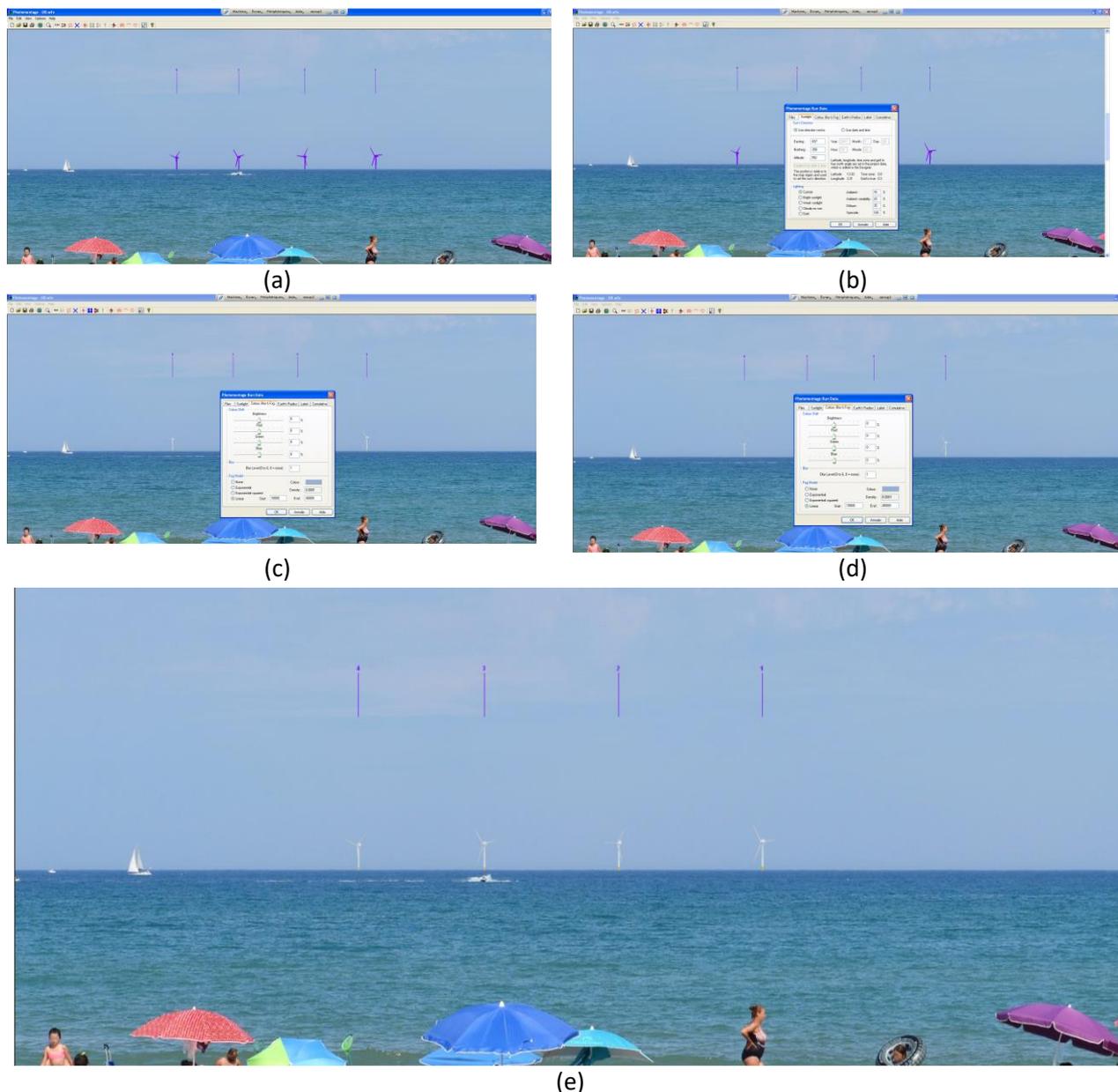


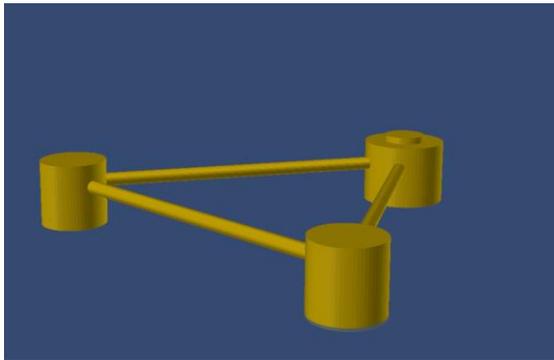
Figure 21 : Phase de rendu visuel dans une session WindFarm : (a) rendu « fil de fer », permettant de valider l'allure globale. (b) On règle la position et l'intensité de l'éclairage solaire. (c) Un facteur d'atténuation est réglé pour simuler la variation de visibilité en fonction de la zone. (d) ajustement de la courbure terrestre et de l'indice de réfraction atmosphérique (e) Rendu final dans Windfarm avant retouches.

Compte tenu de l'éloignement du parc, il est indispensable de faire intervenir, outre la rotondité de la terre, des facteurs atmosphériques. En l'absence de mesures fiables, l'opérateur doit se fier à son expérience sur le terrain et à sa connaissance du module de rendu visuel.

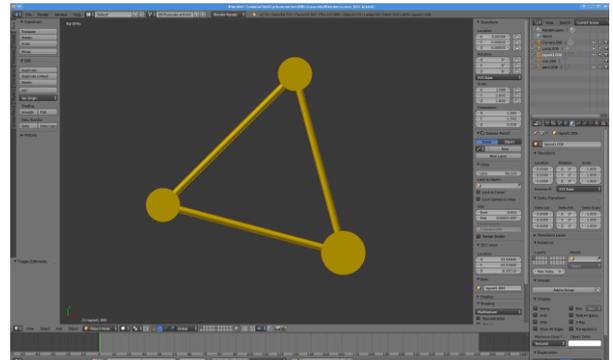
Le cabinet Géophom utilise les nouvelles fonctionnalités du logiciel de rendu *WindFarm* qui permet d'atténuer le rendu visuel des éléments synthétiques en fonction de leur distance. Une interpolation linéaire est ainsi effectuée entre la couleur du fond (horizon sans éolienne) et chaque pixel synthétique 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. Typiquement, le choix s'est porté sur $D_{min}=20\text{km}$ et $D_{max}=40\text{km}$, ce qui crée un minimum d'atténuation pour la zone d'impact critique, tout en restant réaliste.

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 21).

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 2.8* [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.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 22 : Rendu des flotteurs : (a) la modélisation 3D est importée dans le logiciel Blender. (b) Les flotteurs sont positionnés à l'emplacement des éoliennes. (c) Un calque contenant uniquement les flotteurs est généré. (d) fusion avec le calque contenant les éoliennes.

D'autres post-traitements doivent aussi être appliqués :

- **Les flotteurs métalliques** sur lesquels reposent les éoliennes ne sont pas modélisés dans *WindFarm*. Ils sont donc ajoutés en post-production : un modèle 3D est créé dans le logiciel de modélisation *Blender (version 2.76)*, et positionné à l'emplacement des turbines. Un rendu est effectué depuis le point de vue réel, pour créer un calque contenant uniquement les fondations. Ce masque est fusionné avec le rendu *WindFarm* précédent (Figure 22).
- 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 flotteurs est légèrement estompée pour rendre l'image plus réaliste (on utilise un masque de fusion).
- **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 23).

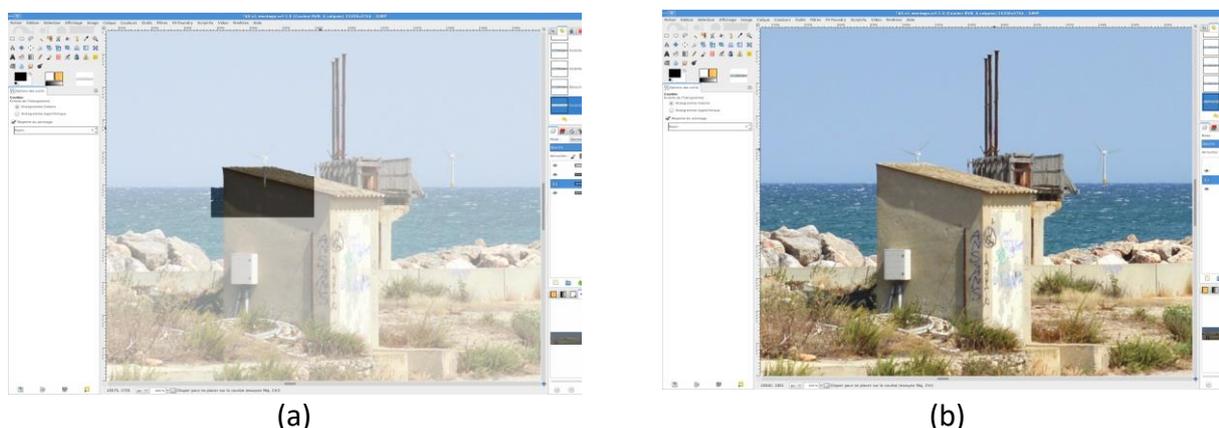


Figure 23 : Retouches finales du photomontage. Windfarm ne modélisant pas finement le paysage, on crée manuellement des masques d'occultation – comme en (a) - pour bloquer la visibilité de certaines éoliennes dans le rendu final (b).

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).

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 un ensemble des supports qui seront mis à disposition des acteurs de la concertation en septembre 2017. Ils sont de trois types :

Support plan

Le support traditionnel de présentation des photomontages consiste en un cahier rassemblant toutes les vues, imprimé sur un format large, typiquement au format double-A3 "paysage" (84 x 29.7cm). Ce support physique obéit à un compromis entre la souplesse d'utilisation d'une part (facilité de transport, de consultation, de réimpression) et d'autre part l'accès à un maximum d'information. Pour être utilisé lors de l'évaluation de l'impact visuel, il est cependant impératif d'observer le support à une distance fixée. Cette distance d'observation D dépend de la largeur physique L de l'impression et de l'angle A visualisé dans le panorama. Elle vaut :

$$D = L / (2 * \tan (A / 2))$$

Pour éviter les distorsions de visualisation, l'angle de présentation doit rester limité, ce qui a été fait dans le cas présent (A=90° dans les cahiers). La technique d'impression doit pouvoir rendre compte de petits détails dans l'image, ce qui suppose une résolution élevée. Dans le cas présent,

le support est imprimé à environ 400 dpi (points par pouce), ce qui permet de résoudre individuellement chaque pixel de l'image.

Enfin le support physique doit être **impérativement** correctement éclairé avec une intensité minimum de 800 à 1000 lux, pour que l'observateur puisse en percevoir tous les détails.

Support Internet

Les photomontages du projet, mis à disposition par le maître d'ouvrage à l'occasion de la phase de concertation publique, sont par ailleurs accessibles sous forme d'un site Internet à l'adresse <http://info-efgl.fr/portfolio/simulations-visuelles/>. Ils sont alors visibles sur un support de type écran, via une fenêtre d'observation plane de dimension fixe, suivant un angle horizontal de 47° pour un écran HD de 1920 pixels de large (résolution = 40.17 pixels par degrés).

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 à la concertation publique 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.

Support Cylindrique

La représentation naturelle d'un panorama - correspondant à une projection d'image sphérique - consiste bien sûr à utiliser un support 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 (voir Figure 4, page 6). 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 (64800 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. Ce **type de support est approprié pour juger de l’apparence de la ferme éolienne 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 être l’instrument privilégié 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. Idéalement, pour réduire les effets de convergence oculaire, les supports devraient être plus grands et plus éloignés, mais on se heurte alors à des obstacles logistiques difficiles à lever.

7. Conclusion méthodologique

Cette section a présenté, dans le détail, la méthodologie et les procédures utilisées lors de la création des photomontages, dans le cadre de la concertation relative au projet EFGL, étude réalisée par le cabinet Géophom et commanditée par le maître d’ouvrage¹. **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][Impact2016]. 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.**

¹ La méthodologie suivie ne dépend pas, pour l’essentiel, de la zone géographique effective du parc. La section suivante s’intéressera spécifiquement aux spécificités du parc EFGL.

C. L'impact visuel du projet EFGL

1. Méthodologie d'évaluation

Au-delà d'une évaluation méthodologique, il convient d'étudier l'impact visuel *in situ*, c'est-à-dire compte tenu des spécificités du futur site d'implantation des éoliennes. L'impact doit donc tenir compte à la fois de facteurs objectifs (position des éoliennes dans le champ visuel, éloignement, facteurs atmosphériques et météorologiques) et de facteurs subjectifs de nature psychocognitive (par exemple, certains éléments du paysage attirent l'attention ou sont perçus plus gros que leur taille réelle du fait de leur signification pour l'observateur [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*¹, 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 du projet EFGL.

2. Zones d'impact et amers retenus

Par le biais des considérations paysagères [Impact2010][Impact2016], on peut délimiter quatre zones d'impact:

- 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 bateau².
- La zone comprise entre 16 et 20 km constitue la terre *la plus proche du projet*. 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. Il est donc important d'y choisir un ou plusieurs amers caractéristiques.

¹ 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.

² Des vues rapprochées peuvent à ce titre constituer un ajout intéressant. Typiquement on utilisera des vues prises depuis une route maritime, une zone de plaisance, de pêche, etc. en spécifiant bien entendu la localisation GPS précise.

- Le littoral plus lointain ou plus occulté (situé dans la zone d'impact dite faible) constitue un cas moins critique, mais où la présence d'amers constitue une référence pour fixer précisément la visibilité des machines.
- Au-delà de 25 km, la taille d'une éolienne au-dessus de l'horizon est inférieure à 20 minutes d'arc (un très bon œil humain ne peut percevoir des objets que s'ils ont une résolution angulaire supérieure à quelques minutes d'arc). Plus important encore, l'atténuation visuelle due à l'épaisseur de l'atmosphère rend problématique la visibilité même des éoliennes à cette distance (on considère que la visibilité est excellente si on perçoit une embarcation à 30 km). A titre d'exemple, on peut observer la Figure 24 extrait d'un photomontage réalisé à partir d'un panorama capturé depuis la tour de Gruissan. A cette distance, il devient difficile de comparer le futur champ éolien à des amers existants, car ceux-ci seront nécessairement plus petits et placés plus près de l'observateur, et donc ne souffriront pas de la même atténuation. Pour cette raison, on évite autant que possible, de retenir des éléments de comparaison dans cette zone de *faible impact*.



Figure 24 : Photomontage réalisé depuis la tour de Gruissan, à environ 30km du projet. Les éoliennes deviennent difficiles à distinguer à cette distance. La visibilité est ici égale à 25km (données du sémaphore de Leucate).

a) Critères de sélection et paramètre de comparaison

Les amers retenus doivent obéir à deux critères principaux : être emblématiques du littoral considéré, et pouvoir être comparables au projet dont on mesure l'impact. Le premier critère peut sembler subjectif, mais dans la pratique, les points de repère visibles depuis de nombreux points du littoral et présentant une élévation suffisante sont des candidats évidents. Il s'agit en général de phares, sur terre ou en mer, de balises, de tours, de châteaux d'eau, voire d'éoliennes existantes. Le deuxième critère tend à exclure les structures massives, ou dont la distance à l'observateur est difficile à évaluer de par leur emprise importante. Sans les écarter systématiquement, il est ainsi difficile de comparer l'impact de gracieuses éoliennes avec des montagnes¹, des caps², des falaises ou des ponts, sur la seule base de leur hauteur visuelle relative.

¹ Par exemple, le pic du Canigou, situé à environ 75 km du projet.

² Par exemple, le Cap Béar, à plus de 50 km du projet.

Une fois les amers potentiels identifiés, il faut ensuite s'assurer qu'ils sont visibles dans un ou plusieurs des photomontages réalisés, afin de pouvoir valider les rapports de taille prédits à l'aide des données visuelles effectives. Cet examen permet notamment de confirmer que les amers retenus ne sont pas occultés par des éléments paysagers ou architecturaux qui rendraient la comparaison impossible. Par ailleurs, les photomontages ne couvrant qu'un angle de 180° orienté vers le large, sont exclus les amers qui conduirait l'observateur à tourner le dos à la mer pour les observer. Cette condition restrictive n'est pas pénalisante dans la mesure où, dans ces conditions, le parc éolien et l'amer de référence ne peuvent de toute façon pas être présents simultanément dans le champ visuel de l'observateur.

Une fois les amers sélectionnés, il est 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. 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 :

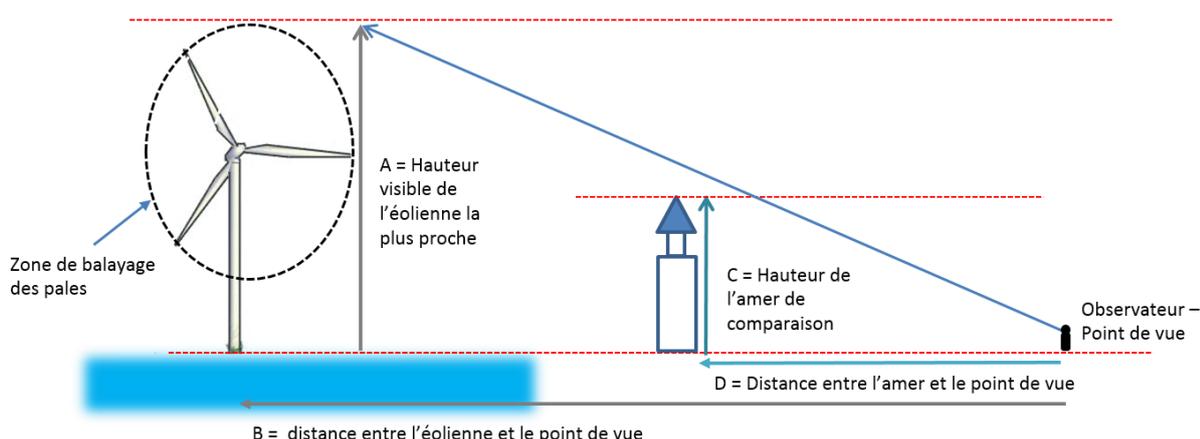


Figure 25 : Rapport d'échelle amer/éolienne.

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

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 suivante¹. Enfin, il va sans dire que pour être valide, la comparaison relative des tailles ne doit

¹ Notons que ce rapport de taille ne dépend pas de l'altitude de l'observateur, ni de celle de l'amer de comparaison. Par ailleurs, le schéma ci-dessus ne tient pas compte de l'effacement dû à la courbure terrestre, pour des raisons de simplicité. Les calculs effectifs tiennent compte, eux, de tous les facteurs optiques, tels que la réfraction, la rotondité, etc.

pas fournir un ratio R trop faible ou trop important, ce qui exclut, en particulier, de se trouver trop proche d'un amer (dans ce cas, d'ailleurs, le ratio R varierait rapidement en fonction de la position de l'observateur, rendant la comparaison peu représentative).

b) Liste des amers retenus

Sur la base des critères définis ci-dessus, la liste des amers retenue figure dans le tableau suivant. Cette sélection ne prétend pas à l'exhaustivité mais vise plutôt à représenter une base simple d'évaluation.

Amers retenu	Numéro du photomontage / lieu d'observation	Distance observateur/ amer	Distance observateur /projet EFGL
Phare de leucate H = 19,4 m	06- Chapelle de Leucate	2,53km	19,6km
	07- Château de Fitou	6,95km	23,3 km
Tour télécom. de Leucate H=27m	06- Chapelle de Leucate	2,60km	19,6km
	07- Château de Fitou	7,03km	23,3 km
Feu de jetée de Port-La-Nouvelle H=18m	21 – Parc Eolien de Sigean	3,1km	25,3km
Parc Eolien d' Opoul-Perillos	27- Château d'Opoul	4,28 km ¹	32,14km
Parc éolien de Fitou 1	23-Salin de La Palme	8.87 km ²	23,7km

La carte ci-dessous représente les amers retenus et les points de vues d'observation associés.

¹ La distance est mesurée ici à la génératrice la plus proche du point de vue. Visuellement ce sera la machine la plus visible, et la moins susceptible d'être occultée.

² Idem.

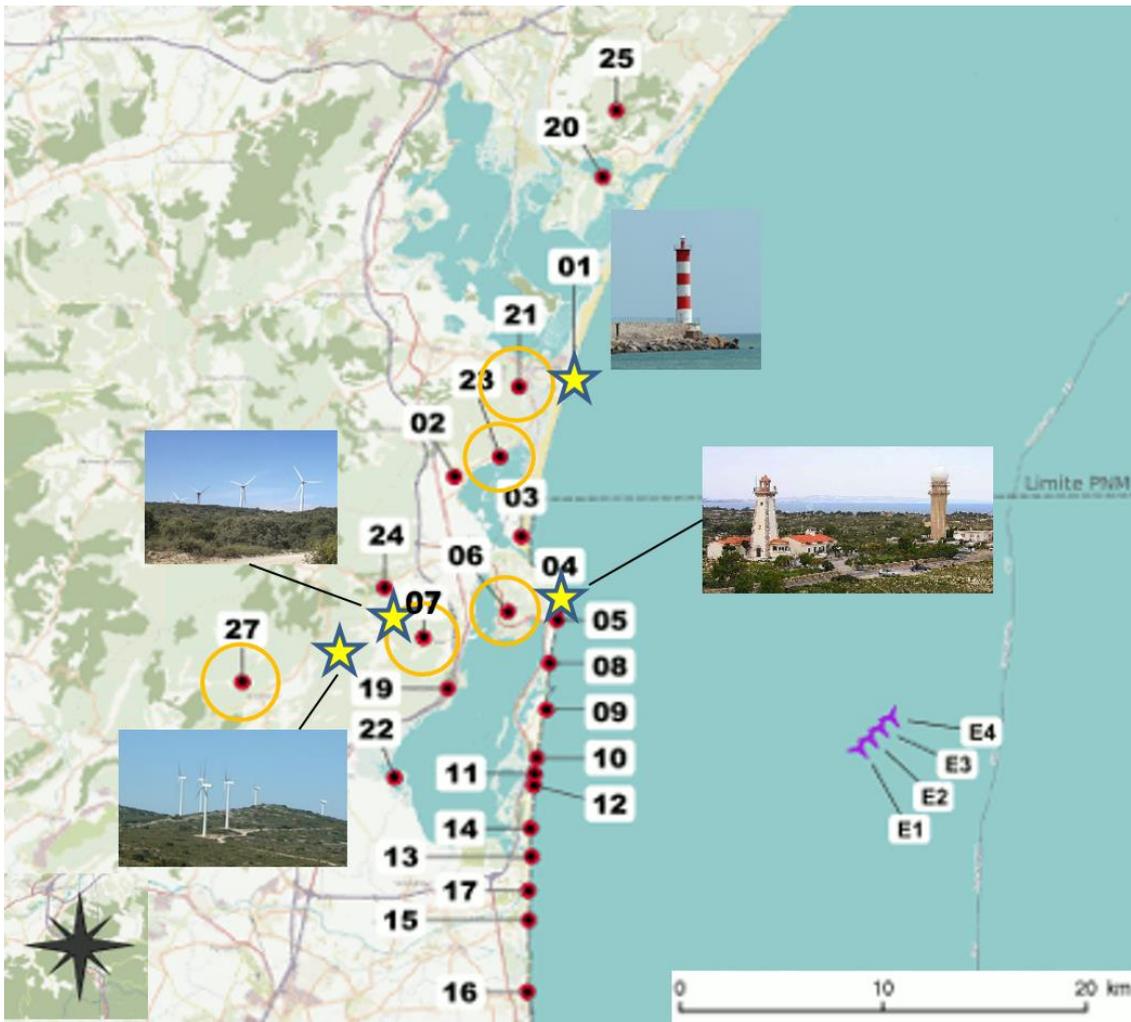


Figure 26: carte des amers retenus pour le projet EGL. Les points de vue de référence sont cerclés de jaune.

Reprenons à présent chaque amer en analysant l'impact visuel du projet EGL relativement à lui.

c) Le phare de Leucate

Datant de 1951, ce phare situé sur la falaise de La Franqui mesure 19 mètres de hauteur et s'élève à 68 mètres au-dessus du niveau de la mer. Sa situation sur un promontoire très touristique attire naturellement le regard.



Figure 27: Le phare de Leucate.

Il est bien visible depuis deux des points de vue retenus :

- Le premier, numéroté 06, se situe sur les ruines de la chapelle de Leucate. A cet endroit, le ratio de visibilité vaut :

$$R = (19 \times 19600) / (175 \times 2530) = 0,84.$$

Autrement dit, le phare a une hauteur apparente égale à 84% de celle des futures machines EFGL, soit une hauteur comparable.

- Le second, numéroté 07, se situe au château de Fitou, sur les hauteurs bordant l'étang. La vue depuis l'accès au château est très dégagée, le phare se situant à un azimut proche de celui du projet. Depuis cet endroit :

$$R = (19 \times 23300) / (175 \times 6950) = 0,36.$$

Cette fois, la hauteur apparente du phare vaut environ 1/3 de celle des futures génératrices.

Ces deux ratios peuvent être vérifiés visuellement sur les photomontages produits par la société Géophom (voir Figure 28).

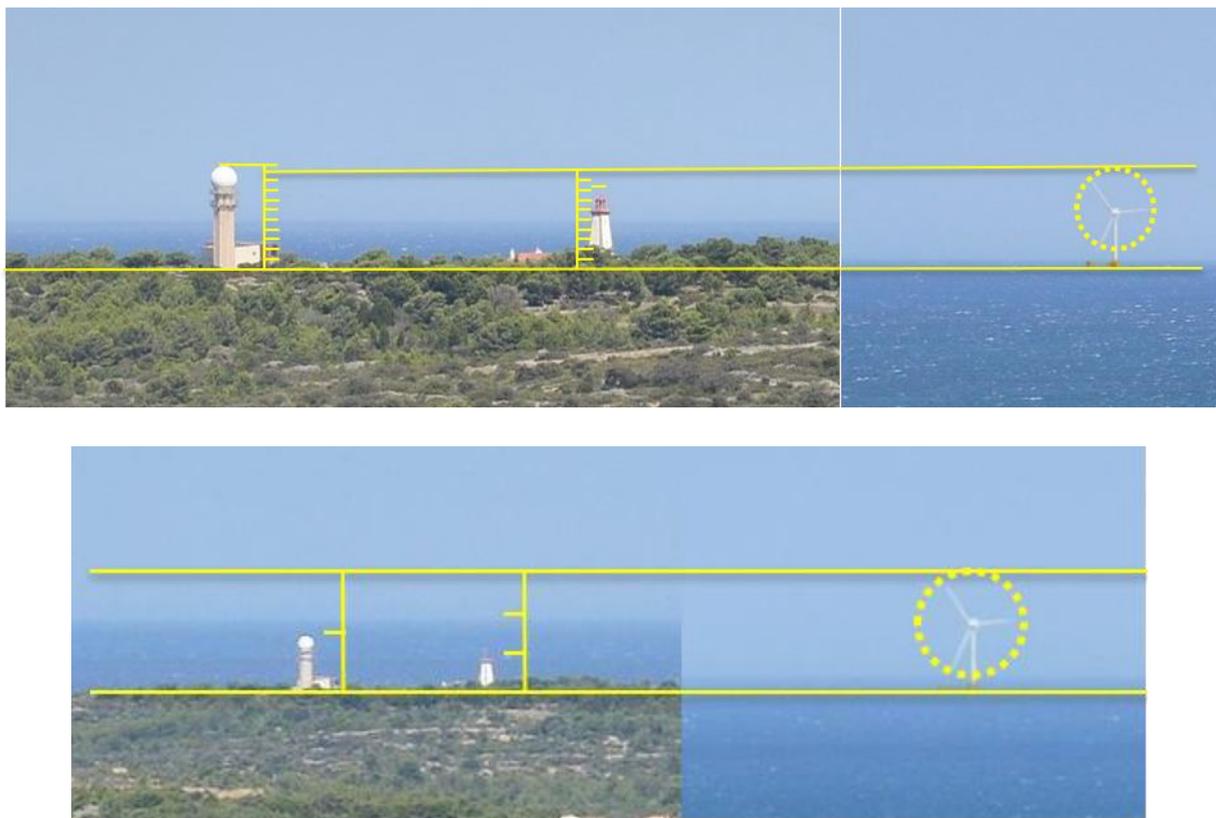


Figure 28 : comparatif visuel de la ferme pilote EFGL avec le phare et le radar météo de Leucate. En haut, depuis le point de vue 06 (chapelle de Leucate). En bas, depuis le château de Fitou (point de vue 07). Les vues sont fortement zoomées pour permettre l'appréciation précise des ratios visuels. Cependant les niveaux de zoom sont évidemment identiques pour tous les extraits d'un photomontage donné.

d) La tour de télécommunication de Leucate

Cet édifice à la ligne caractéristique est situé à proximité du phare et culmine à 27m de hauteur. Sa couleur blanche, ainsi que la sphère qui le couronne le rendent visibles depuis de nombreux points de vue alentour. Pour faciliter les comparaisons nous avons adopté les mêmes points de vue de référence que pour le phare, à savoir 06 et 07, distant respectivement de 2,6 et 7,03 km. On calcule donc des ratios de visibilité de valeur respective $R = (27 \times 19600) / (175 \times 2600) = 1,16$ et $R = (27 \times 23300) / (175 \times 7030) = 0,51$. La hauteur visuelle depuis la chapelle de Leucate de la tour de télécommunication est donc de 16% supérieure à celle des éoliennes du projet, ce que l'on vérifie Figure 28. De même, on vérifie que depuis le point de vue situé à l'entrée du château de Fitou (07), la ferme pilote aura une hauteur apparente double de celle de la tour¹.

e) Le feu de jetée de Port-la-Nouvelle

¹ Attention : on parle bien ici de la hauteur apparente du bâtiment, mesurée depuis sa base, et non pas de la hauteur sur l'horizon, qui peut varier en fonction de l'altitude de prise de vue.



Situé à l'extrémité de la jetée de Port-la-Nouvelle, ce feu est emblématique de la ville et est visible, du haut de ses 18 mètres depuis tous les points du littoral sur une dizaine de kilomètres. C'est donc un amer tout indiqué, mais il doit être observé depuis une distance raisonnable (de l'ordre d'un dixième de la distance entre l'observateur et le projet, soit typiquement entre 2 et 3 kilomètres) pour être comparable au projet EFGL. Suivant ce critère le point de vue retenu est le 21, situé au niveau de la table d'orientation du site éolien de Sigean, à 3,1km du feu de jetée et à 25,3 km du site. Le ratio s'établit alors à $R = (18 \times 25300) / (175 \times 3100) = 0,84$. Si on inclut le pied en béton du jeu de jetée, la hauteur s'établit à 20m et le ratio passe à $R = 0.93$. On doit donc, visuellement, obtenir des hauteurs très comparables, ce qui est vérifié dans le photomontage résultant, visible Figure 29.

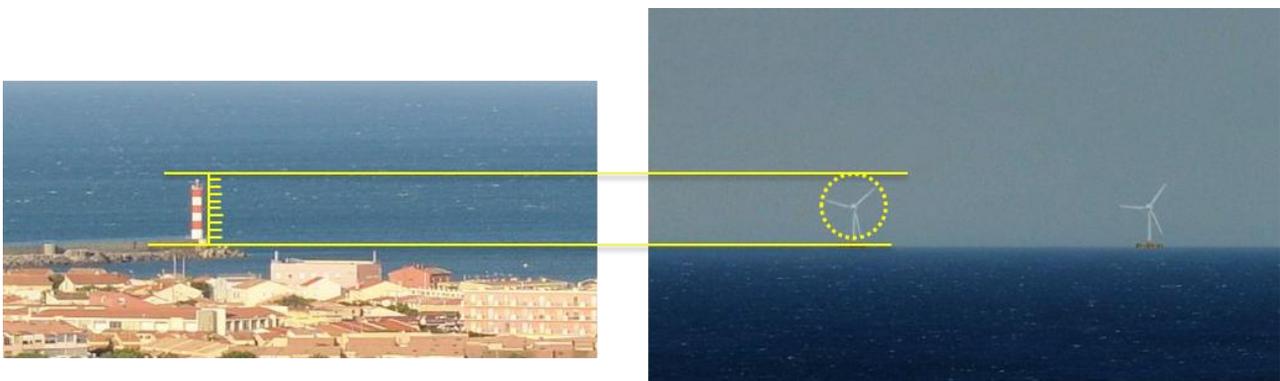


Figure 29: comparaison visuelle du phare de jetée avec l'éolienne la plus proche du projet EFGL, depuis le point de vue de référence 21 (parc éolien de Sigean). Les deux détails sont bien entendu à la même échelle.

f) Le parc éolien de Opoul-Perillos

Situé sur la commune de Salses, ce parc constitué de 6 turbines Vestas V66/1750 (puissance de 1 750 kW, diamètre de 66 m) a été mis en service en mars 2003. La hauteur nacelle de ses machines est de 60 m, ce qui porte la hauteur maximum en bout de pale à 93m. Le parc est orienté globalement nord-sud, et sa localisation le place en covisibilité avec le projet EFGL depuis le point de vue 27 situé au pied des ruines du château d'Opoul, à 400m d'altitude. Le photomontage 27 (Figure 31) corrobore les données de localisation [OccitanieDonneesPubliques]



Figure 30: les 6 machines du parc éolien terrestre d'Opoul-Perillos.

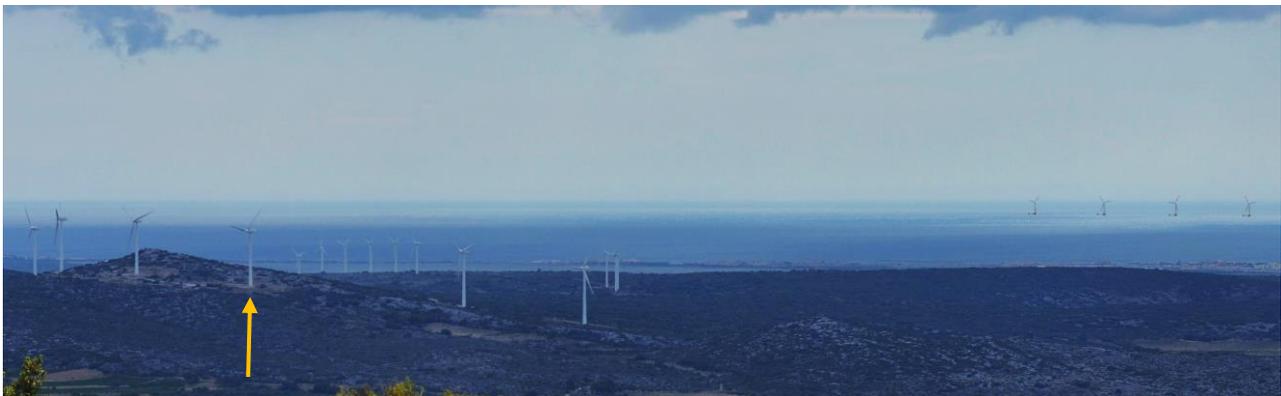


Figure 31: photomontage réalisé à partir du panorama 27 (chateau d'Opoul). A gauche, au premier plan, le parc d'Opoul (la machine la plus proche est indiquée). A droite, à l'horizon, le projet EFG.

La machine la plus proche du parc d'Opoul (machine au centre sur la vue) se situe à 4,28km du point de prise de vue. Le projet se situe quant à lui à environ 32km : une situation certes éloignée, mais les machines restent bien visibles par la combinaison d'un point de vue élevé et très dégagé. Le calcul fournit donc un ratio de visibilité $R = (93 \times 32140) / (175 \times 4280) = 3,99$. Un zoom sur la Figure 31 permet une mesure directe en conformité avec cette prédiction : les machines d'Opoul sont bien 4 fois plus hautes, visuellement, que les machines de la ferme pilote.

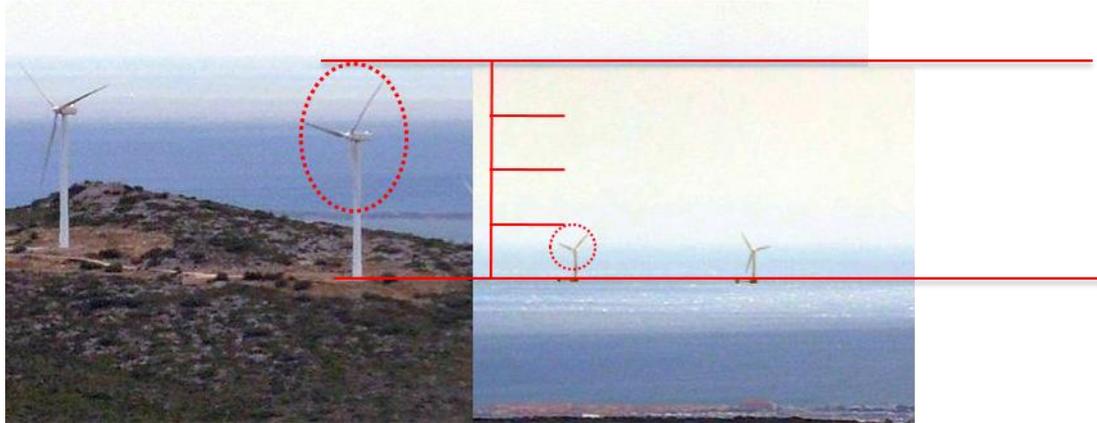


Figure 32: comparaison visuelle des deux parcs Opoul et EFGL, en zoomant d'un même facteur les deux machines les plus proches des deux projets. On vérifie bien que R=4.

g) Le parc éolien de Fitou1

Situé sur la commune de Fitou, ce parc est constitué de 8 turbines Nordex N60/1300 (puissance de 1 300 kW, diamètre de 60 m). Il a été mis en service en mai 2002. La hauteur de nacelle est de 80 m, ce qui fournit une hauteur en bout de pale égale à 110 m.



Figure 33: le parc éolien de Fitou 1.

Ce parc est évidemment très visible depuis le point de vue 24, situé à Treilles. Cependant, sa hauteur apparente est alors très forte et surtout très variable de par sa proximité, ce qui rend un peu hasardeux une comparaison avec le projet situé à plus de 20 km ! On lui préférera donc un point de vue plus lointain, situé à environ 10km, qui devrait fournir un ratio entre 1 et 2. Le point de vue 23, situé aux salins de La Palme, répond à ce critère, étant situé à 23,7km du projet et à 8,87km de l'éolienne la plus proche et la plus au nord du parc de Fitou 1. Ces données permettent de prédire un ratio visuel de $R = (110 \times 23700) / (175 \times 8870) = 1,68$, autrement dit que le projet EFGL devrait avoir une hauteur apparente égale à environ $1/1,68 = 60\%$ de celle de Fitou 1.

Examinons le photomontage correspondant. La comparaison visuelle est moins aisée que dans les cas précédents pour deux raisons : tout d'abord, l'azimut des deux projets est très différent (d'environ 90°), ce qui veut dire qu'un observateur ne pourra observer les deux objets simultanément. Ensuite, du fait de l'altitude très réduite des salins, il est difficile d'observer les éoliennes en mer entièrement, à moins de trouver un point de vue un peu plus élevé. A ces réserves près, la comparaison visuelle donne de bons résultats (Figure 34).

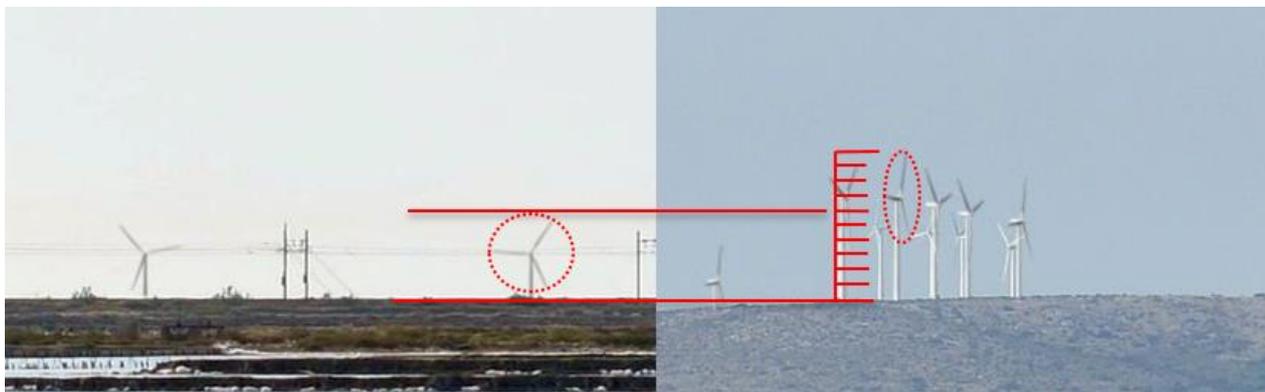


Figure 34: Comparaison des tailles apparentes des éoliennes EFGL et de Fitou 1, vues depuis le point de vue 23 (salins de La Palme). On mesure $R=10/6$, proche de la valeur théorique.

3. Covisibilité EolMed-EFGL

La méthodologie de comparaison avec des amers existants peut être généralisée à l'analyse de la covisibilité entre le projet EFGL et un autre projet similaire dont la construction aura lieu à une vingtaine de kilomètres au nord, au large de Gruissan : la ferme pilote d'Eolmed comprendra elle aussi 4 éoliennes flottantes, de type SENVION 6.2M152, dont la géométrie est très proche du modèle Haliade choisi pour EFGL. (Voir le site de référence du projet EolMed sur <http://www.eolmed.fr/>).

Considérons que les deux projets sont en covisibilité maximum dès lors qu'ils sont situés, tous les deux, à moins de 30km du point de vue considéré (en effet, la visibilité devient plus incertaine au-delà, et l'impact décroît considérablement). Si on croise cette zone avec la zone d'impact maximum pour EFGL (notre objet d'intérêt ici) on peut sélectionner deux points de vue significatifs dans la liste déjà existante : le 04 (Falaise La Franqui), et le 12 (Port Barcarès Le Lydia) – voir Figure 35. Nous examinerons dans la suite ces deux cas représentatifs.

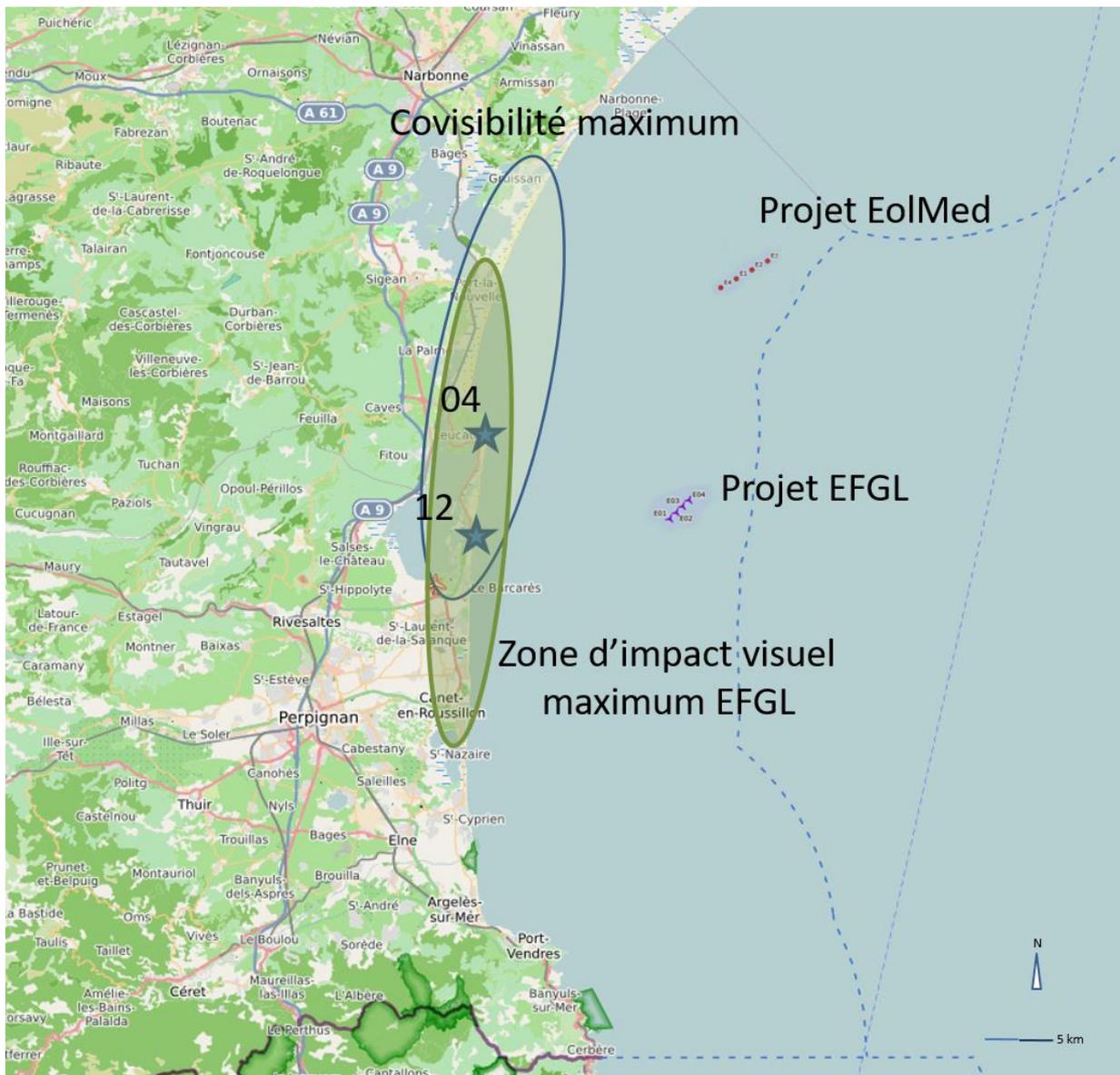


Figure 35: Zone de covisibilité maximum et sélection des points de vue de référence.

a) Point de vue 04 : Falaise La Franqui

Depuis ce point de vue très dégagé, les deux parcs sont clairement visibles à des distances respectives de 16.9km pour l'éolienne la plus proche de EFGL et 22.9km pour la plus proche d'EolMed. La covisibilité est renforcée par des azimuts proches sur l'horizon (50° d'écart environ). Suivant le même calcul que pour les amers existants, et sachant que les génératrices ont la même taille verticale sur les deux projets, on peut définir le ratio R par

$$R = \text{distance}(\text{EFGL}) / \text{distance}(\text{Eolmed})$$

Le calcul donne ici $R = 0.74$. Autrement dit, l'éolienne la plus proche d'EolMed doit avoir une taille verticale perçue égale à environ $\frac{3}{4}$ de son homologue du parc EFGL. Notons néanmoins que,

du fait de la disposition choisie pour le projet EolMed¹, les machines sont pratiquement toutes alignées selon la direction d'observation, ce qui réduit quelque peu la covisibilité dans cette zone particulière. Sur le photomontage correspondant (Figure 36), on observe bien le ratio 3/4 prédit. Notons que plus au nord, on observera une situation symétrique, le projet EolMed devenant plus visible car plus proche, à l'inverse du projet EFGL qui s'éloigne progressivement. Par exemple, à Port-la-Nouvelle, le ratio R s'établit à environ $23500/18500 = 1.27$ ($1/0.78$) : le projet EFGL aura alors une hauteur apparente égale au 3/4 de celle de EolMed.

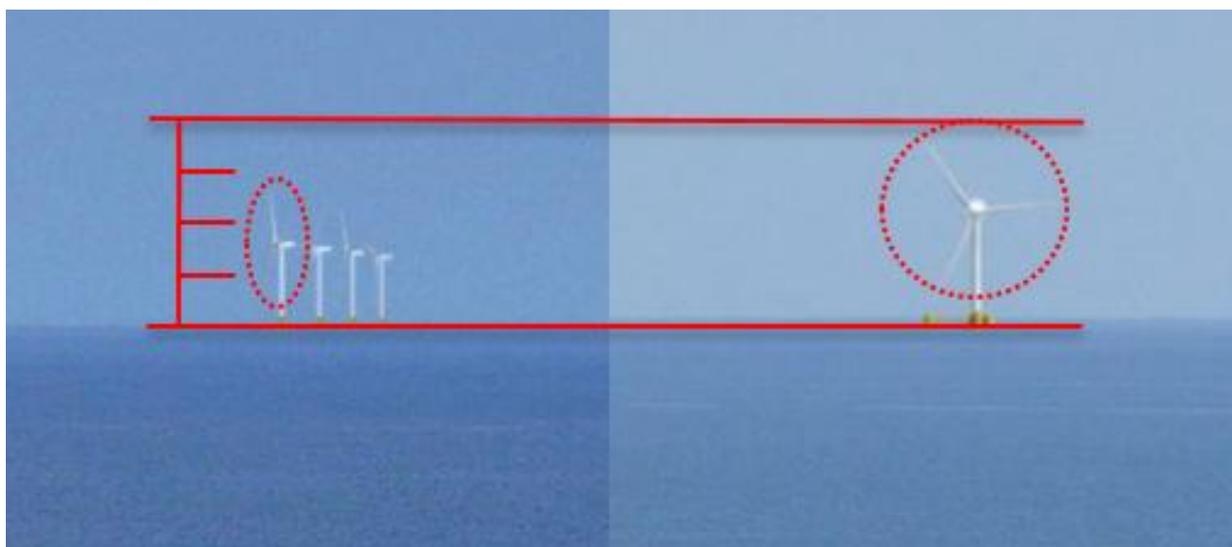


Figure 36: Comparaison de la visibilité des futures fermes pilote EolMed (gauche) et EFGL (droite), depuis le point de vue 04. Le ratio R mesuré est proche de 0.75.

b) Point de vue 12 : Barcarès-Lydia

Ce point de vue est situé sur la plage de Port-Barcarès, à hauteur du célèbre paquebot échoué « Le Lydia ». L'esplanade présente une vue bien dégagée, et depuis cet endroit les azimuts des deux projets sont encore plus proches, avec environ 35° d'écart. La covisibilité est cependant moins marquée, car la distance au projet EolMed atteint 29.7 km, celle d'EFGL étant toujours de 16.9km. Le ratio R théorique s'établit donc à $R = 0.57$, ce qui veut dire que le projet EolMed apparait cette fois presque deux fois plus petit que le projet EFGL sur l'horizon. De plus, si on tient compte de la rotondité de la terre, les éoliennes présentent un effacement non négligeable, qui diminue leur hauteur visible. Le ratio R devient alors :

$$R = ((175-38) \times 16900) / ((175-6.2) \times 29700) = 0.46$$

La Figure 37, qui représente côte à côte les deux projets (au même grossissement), corrobore ce calcul. On en déduit que la covisibilité sera relativement réduite au sud de la zone d'impact maximal.

¹ Il s'agit d'une disposition provisoire indicative, le choix définitif du schéma d'implantation n'est pas encore fixé.

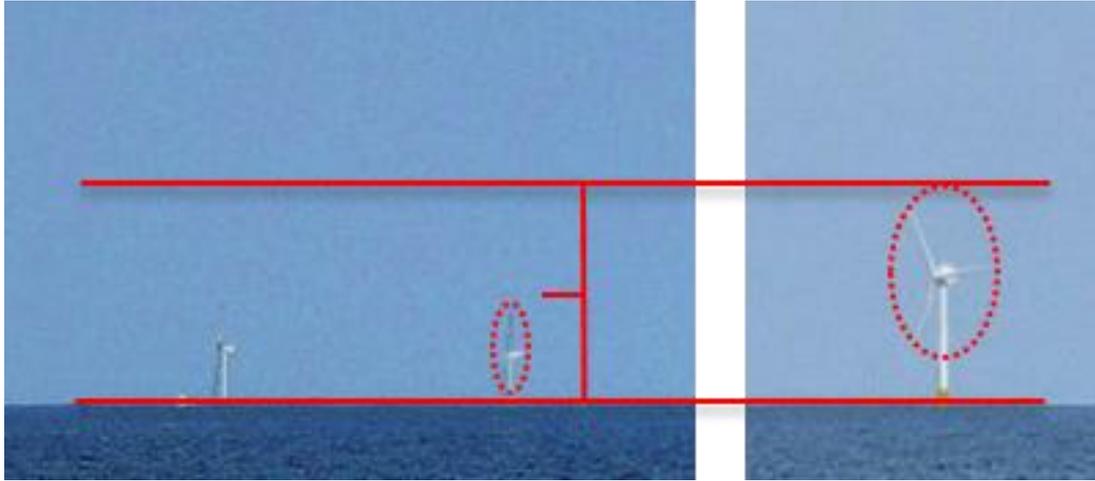


Figure 37: Comparaison de la visibilité des futures fermes pilote EolMed (gauche) et EFGL (droite), depuis le point de vue 12. Le ratio R mesuré est légèrement inférieur à 1/2.

4. 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 EFGL. En particulier, les parcs éoliens terrestres constituent des amers bien visibles depuis les points-clés du littoral, 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.

Pour autant, elle n'est pas exempte de limitations : par exemple, lorsque l'amer est un phare, il est proportionnellement beaucoup plus épais qu'un mât d'éolienne.

La technique permet aussi utilement de comparer l'impact relatif de plusieurs projets simultanés, en déterminant les zones où leur impact conjoint est le plus fort. Dans le cas présent, on peut délimiter cette zone comme le littoral s'étendant de la falaise La Franqui à Port-La-Nouvelle.

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 projet de parc éolien flottant EFGL. Suivant la demande de la Commission Nationale du Débat Public, 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 EFGL 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.

Par ailleurs, au regard des critères communément retenus pour la représentation de l'impact des parcs éoliens en mer, les panoramas réalisés sont bien représentatifs des vues typiquement observées dans la zone concernée, que cela concerne les conditions météorologiques, la visibilité ou l'orientation au vent. La seule réserve que l'on peut émettre concerne la période des prises de vue, concentrée sur une courte durée (juillet). S'il est souhaitable de compléter la série existante par des prises de vue à d'autres périodes (la saison hivernale peut parfois offrir des conditions de visibilité favorables), celles-ci n'apporteront pas de changement significatif dans la perception du futur projet : en effet, les photomontages existants ont délibérément utilisé des paramètres de visibilité favorisant la perception des éoliennes et exploitant des valeurs typiquement rencontrées sur ce littoral.

Enfin, 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. De ce point de vue, l'utilisation des supports plan (papier et internet) présente des limitations certaines (notamment en termes de résolution des détails) qu'il convient de toujours rappeler clairement pour éviter tout soupçon de minimisation délibérée de l'impact.

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 d'assister les acteurs du débat dans leur réflexion sur ce sujet. La méthode retenue consiste à comparer le futur ensemble éolien à des éléments architecturaux familiers du paysage, à l'aide de mesures aussi bien objectives (on connaît bien la localisation et les dimensions de ces amers), que subjectives, en se plaçant dans

des lieux privilégiés, facilement accessibles aux usagers. Les amers retenus ont été dans le cas présent des phares (Leucate, Port-La-Nouvelle), des tours (tour de télécommunications de Leucate) et des éoliennes existantes (parcs terrestre de Fitou 1 et d'Opoul). Comme il est difficile de comparer l'impact du projet avec des structures massives, de forte emprise visuelle horizontale, ou dont la distance à l'observateur est difficile à évaluer, les amers de type montagne, cap ou falaise ont été écartés.

Des comparatifs visuels objectifs viennent corroborer les prédictions numériques, et renforcent en cela la validité de la méthode.

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, 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 œuvre¹. Par ailleurs, ces simulateurs ne sont pas actuellement transportables et donc ne permettraient pas au large public concerné d'en faire un usage profitable.

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 de dispositifs de type casque. Ces technologies seront utilisables dans un avenir proche 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

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

[OccitanieDonneesPubliques] Visualiseur de données publiques, région Occitanie, disponible sur http://carto.picto-occitanie.fr/1/visualiseur_de_donnees_publiques.map

¹ Ce coût comprend le coût matériel du simulateur, 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 en millions d'euros...

[GeophomLeucate] Projet de parc éolien EFGL. Livret de photomontages réalisé par le cabinet Géophom. Version numérique disponible sur <http://info-efgl.fr/portfolio/simulations-visuelles/>.

[GIMP] Logiciel libre Gimp, disponible sur www.gimp.org

[Goldstein2009] Sensation and perception. E.B. Goldstein, 8^{ème} édition, Wadsworth Publishing Company, 2009.

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

[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

[Impact2016] Guide relatif à l'élaboration des études d'impact des projets de parcs éoliens terrestre (actualisation 2016). Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer. www.developpement-durable.gouv.fr

[Lilgrund09] Lilgrund Wind Farm – Visual effects. Vattenfall pilot report, mars 2009. Disponible sur www.vattenfall.se/lilgrund.

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

[MethodoGeophom] "Choix méthodologiques-photomontages en mer". Document méthodologique interne - société Géophom.

[Panoramas2007] " Petite Histoire des Panoramas". Claude Lamboley. Communication à l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier (disponible sur <http://www.blu-montpellier.fr/academie>)

[Paysage2017] " Les éoliennes flottantes du golfe du Lion : volet paysage et patrimonial de l'étude d'impact sur l'environnement" (version 1) juin 2017, Abiès.

F. Annexes

Annexe 1 : Choix du capteur photographique pour l'étude

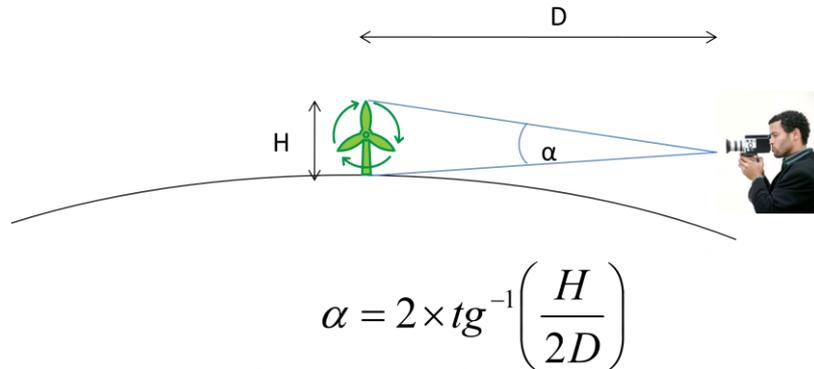
Le choix de l'appareil photographique numérique (APN) et de l'optique de capture des photographies servant de base aux photomontages doit être guidé par un seul critère essentiel : reproduire la vision humaine. Or ce choix est délicat par nature, car la vision humaine est tout sauf une vision statique 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. Cependant, une ouverture verticale plus importante permet de fournir une immersion plus satisfaisante, et un angle de vue de 50° serait souhaitable. Un objectif « grand angle » (à courte focale) peut capturer directement une telle ouverture, à condition de corriger avec précision les distorsions géométriques qu'il entraîne.
- *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 détournée vers d'autres. 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 affuté.

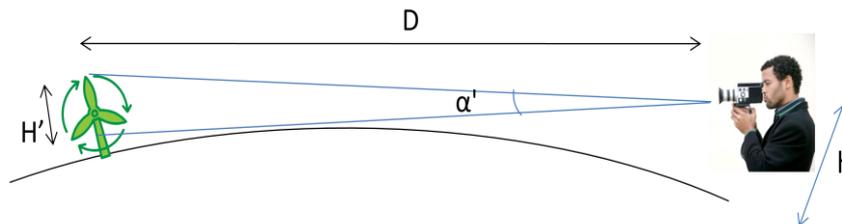
L'appareil choisi pour l'étude du projet EFGl est le Nikon D800E pourvu d'une optique de 50 mm. Cet APN est dépourvu de filtre passe-bas qui permet de restituer un « piqué » d'image très adapté à la tâche de photomontage. Les photographies sont téléchargées au format RAW, et correspondent à l'image directement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

Annexe 2 : 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 :



$$\alpha' = 2 \times \text{tg}^{-1} \left(\frac{H'}{2D} \right) \quad H' = H - \left(\frac{D}{\sqrt{D_t}} - \sqrt{h} \right)^2$$

H = 175 m pour une éolienne du parc éolien EFGL, et $D_t = 12740$ km (diamètre terrestre)

D	α (degrés)	α (minutes d'arc)	Effacement (m)	Effacement (%)	Hauteur visible (m)
1 km	10,00	600	0	0	175
2 km	5,01	301	0	0	175
5 km	2,01	120	0	0	175
10 km	1,00	60	2	1	173
15 km	0,67	40	8	5	167
20 km	0,50	30	18	11	157
25 km	0,40	24	32	19	143
30 km	0,33	20	50	29	125
35 km	0,29	17	72	41	103
40 km	0,25	15	98	56	77

Ces distances correspondent à une transmission de la lumière parfaitement rectiligne. Or les rayons lumineux subissent des réfractons dues aux variations de densité dans l'atmosphère, ce qui peut courber leur trajectoire. 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 montagnes, des falaises ou des phares situés à plus de 30km peuvent être rendus partiellement visibles par ce phénomène apparenté aux mirages. Le rendu des photomontages tient compte de l'effet de réfraction, ce qui permet un meilleur recalage entre les données topographiques numériques et le paysage réel, notamment sur ces objets lointains et élevés.

Dans le cas du présent projet, un cas particulier est l'observation depuis un point culminant comme le pic du Canigou, à 75 km du site. Depuis cette altitude (2800m), l'horizon géométrique est situé à près de 200 km, ce qui permet en théorie d'apercevoir les machines. Dans la pratique, la nébulosité empêche toute observation à l'œil nu de détails à cette distance, qui seraient, même dans une atmosphère cristalline, à la limite de la perception humaine.

Annexe 3 : Présentation de l'expert

Titulaire du diplôme d'ingénieur Supélec, Jean-Marc 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. Il 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. Il est, depuis 2002, ingénieur 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. Concepteur et développeur des dispositifs de Réalité Virtuelle du LIMSI-CNRS, il a activement contribué au design et à la spécification de grands équipements de visualisation comme la salle immersive EVE ou l'équipement de visualisation de haute performance DIGISCOPE. Jean-Marc 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. Il est l'auteur 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. Il enseigne également ces spécialités dans plusieurs formations doctorales et écoles d'ingénieurs de la région parisienne.

L'expert peut être joint par courrier électronique à l'adresse : vezien@limsi.fr