

EolMed – Gruissan

Ferme Pilote d'Eoliennes Flottantes



Expertise des simulations visuelles

Partie 1 : analyse méthodologique

Jean-Marc Vézien

Janvier 2018

Table des matières

A.	Introduction – Objectif de l’expertise	3
1.	Contexte : le projet éolien EolMed-Gruissan	3
2.	L’impact visuel éolien : définition, mesures	4
3.	Les objectifs de l’expertise	5
4.	Plan du rapport.....	7
B.	Examen de la méthodologie par photomontage	8
1.	L’impact visuel	8
2.	Processus de conception du photomontage d’impact.....	12
3.	Capture des supports panoramiques	13
4.	Choix des points de vue.....	16
a.	Localisation des points de vue.....	16
b.	Horaires de prises de vue	16
c.	Luminosité et conditions météorologiques.....	18
d.	Visibilité des machines : atténuation atmosphérique.....	18
e.	Orientation des rotors	19
5.	Photocomposition	20
a.	Assemblage panoramique	20
b.	Photomontage 3D	22
6.	Rendu visuel final et supports de présentation	26
a)	Rendu visuel	26
b)	Présentation des photomontages	31
7.	Conclusion méthodologique.....	33
C.	Synthèse	34
E.	Bibliographie.....	35
F.	Annexes	37
	Annexe 1 : Choix du capteur photographique pour l’étude.....	37
	Annexe 2 : Visibilité des structures en mer	38
	Annexe 3 : Présentation de l’expert	40

A. Introduction – Objectif de l’expertise

1. Contexte : le projet éolien EolMed-Gruissan

Lauréat d'un appel à projets de l'ADEME en novembre 2016, le projet "EolMed-Gruissan" est porté par un consortium regroupant Quadran Energies Marines (maître d'ouvrage), Servion (concepteur de la turbine), Ideol (concepteur du flotteur) et Bouygues Travaux Public. Le parc 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 215 M€.

Dans sa configuration actuelle, le projet pilote EolMed-Gruissan se compose de 4 éoliennes en mer, d'une capacité unitaire de 6.2 MW (modèle 6.2M152 fourni par Servion). Les éoliennes seront localisées au large de Gruissan, à une distance d'environ 18 km, sur une zone d'étude d'environ 25 km², à l'intérieur d'une zone de 67 km² fixée dans le cahier des charges de l'appel d'offres (Figure 1). La date de mise en service envisagée est 2021 (voir calendrier prévisionnel Figure 2).

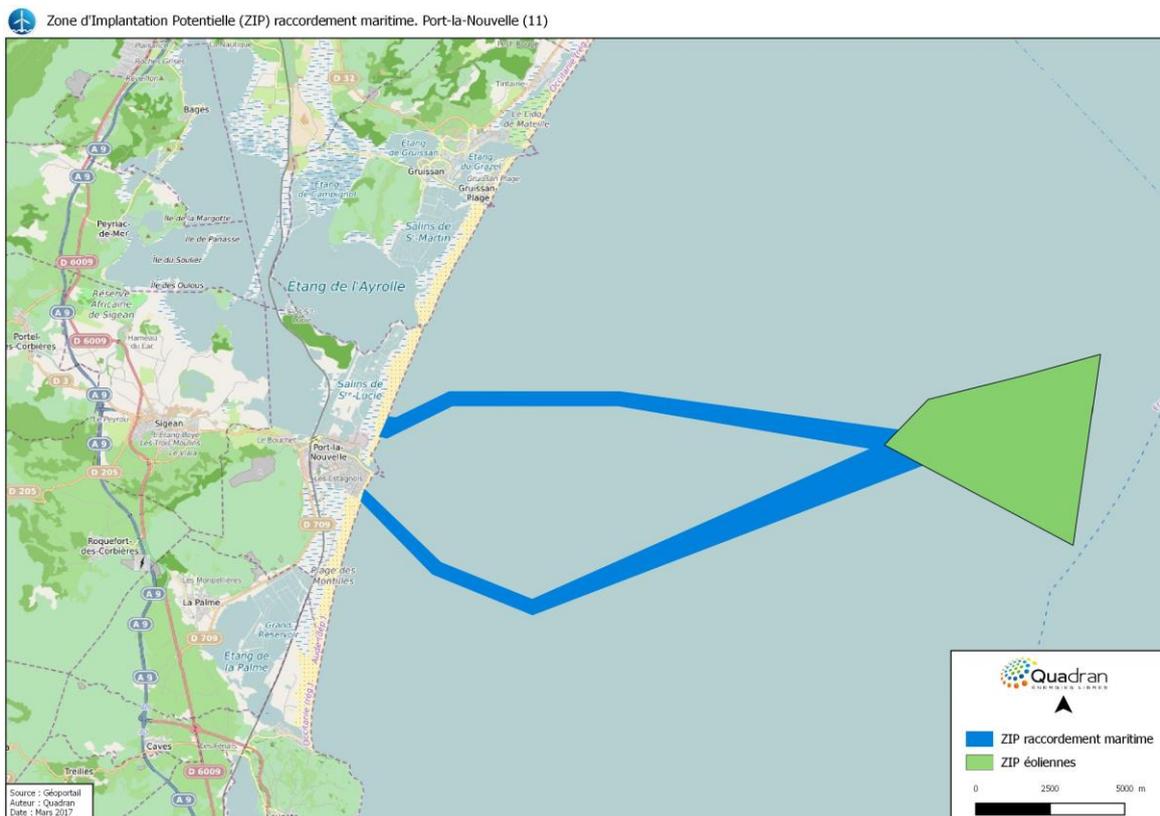


Figure 1 : Le site éolien Eolmed-Gruissan : vue générale (source : Quadran Energies Marines). En vert, la zone d’implantation potentielle des éoliennes du projet, définie par Quadran Energies Marines suite à la réalisation d’un pré-diagnostic sur la zone de l’appel à projet de l’ADEME.

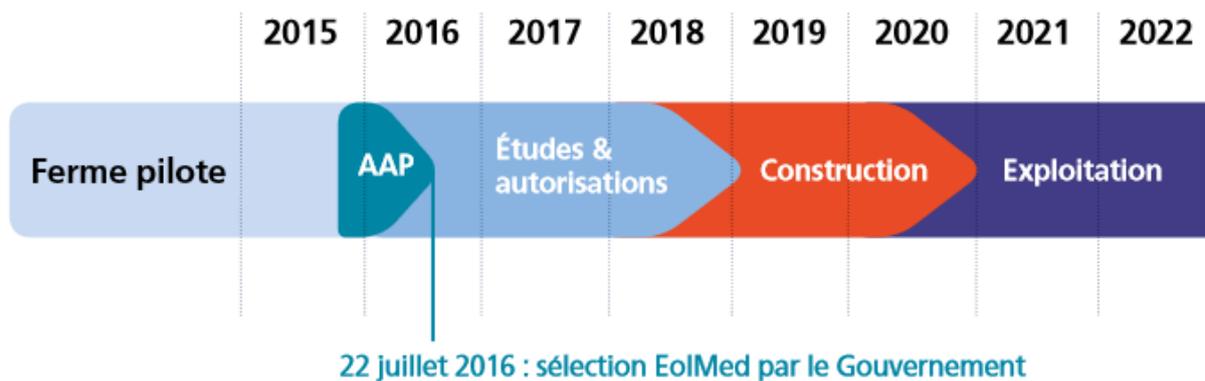


Figure 2 : Calendrier prévisionnel de mise en œuvre du projet (source: dossier du Maître d’Ouvrage).

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

Le 28 novembre 2016, la société Quadran Energies Marines (en la personne de son directeur) a 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'un garant, Monsieur Jacques Roudier, concertation se déroulant du 15 juin au 15 septembre 2017 ¹. Le garant 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 EolMed-Gruissan.

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

¹ Voir arrêté de la Commission Nationale du Débat Public, en date du 7 décembre 2016.

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 dédié¹.

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 EolMed-Gruissan a commandité plusieurs séries de photomontages, réalisées par le cabinet d'étude spécialisé Géophom [GeophomGruissan]. Ces photomontages illustrent, via une collection de vues panoramiques à 180°, l'aspect visuel du champ éolien à différentes heures de la journée, depuis des points représentatifs du littoral concerné. A ces vues, s'ajoutent plusieurs photomontages illustrant les effets cumulés des deux projets pilotes de la zone, à savoir EolMed-Gruissan d'une part et le projet EFGL situé à une vingtaine de kilomètres au sud, d'autre part². Ces photomontages cumulatifs feront l'objet d'une analyse distincte dans un rapport complémentaire.

Durant la phase de concertation, les photomontages étaient accessibles sous deux formes :

- un cahier de 60 photomontages (30 prises de vue panoramiques réalisées en février 2017, servant chacune de base à l'élaboration de deux photomontages alternatifs correspondant aux 2 configurations provisoires du projet³). Ce support visualise uniquement la portion centrale des photomontages originaux (suivant un angle de 90°), imprimés à un format proche du 2 x A3 (84 x 42 cm, les photomontages eux même faisant environ 80 x 23cm). La totalité du cahier était disponible lors d'ateliers thématiques et de réunions techniques avec

¹ Pour le projet EolMed-Gruissan, ce site est en cours d'élaboration et sera accessible en janvier 2018.

² La ferme pilote EFGL (Eoliennes Flottantes du Golfe du Lion), similaire dans ses grandes lignes au projet EolMed-Gruissan, est décrite à l'adresse <http://info-efgl.fr/>.

³ Ces deux configurations correspondent respectivement à un arrangement des 4 machines en ligne ou en grappe.

l'administration, et une sélection de vues représentatives étaient visibles lors des événements de concertation.

- 9 vues ont été imprimées sur des grands supports semi-circulaire de 3m de développé (montrant à chaque fois les 2 layouts), similaire à celui visible Figure 3. Ces panneaux ont été mis à disposition dans certaines mairies de la zone concernée.



Figure 3: Exemple de vue panoramique réalisée à partir d'un photomontage du projet. Le sujet doit se placer au centre du demi-cylindre pour retrouver un point de vue fidèle à la réalité. Ici, deux implantations alternatives sont visibles en superposition.

Pour la suite du projet, le bureau d'étude chargé de l'étude paysagère a sélectionné 15 nouveaux sites servant à l'élaboration d'autant de photomontages créés à partir de vues supplémentaires capturées en juillet 2017. Le cahier résultant de 45 vues, rassemblant tous les panoramas (sur la base d'un nouveau layout en ligne avec une direction sud-ouest/nord-est) est complété de trois vues prises en mer (réalisées en décembre 2017) et de 9 vues cumulatives (5 réalisées sur la base de panoramas de la série déjà décrite, et 4 autres sur la base de panoramas réalisés pour l'analyse d'impact du projet EFGL, obligamment prêtées par le maître d'ouvrage). Ce contenu fera l'objet d'impressions en grand format, et sera également disponible sous forme numérique au début de l'année 2018.

L'expertise de l'évaluation de l'impact visuel portera donc sur l'ensemble des vues déjà réalisées. Elle sera 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 différents formats. Cette validation méthodologique porte, notamment, sur le choix des prises de vue de référence, choix qui conditionne pour une large part le processus d'évaluation. Elle fait l'objet du présent rapport.
- D'autre part, sur l'évaluation de *l'impact visuel spécifique* du projet EolMed-Gruissan, 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). Cette analyse fera l'objet d'un rapport complémentaire au présent document.

4. Plan du rapport

Le présent rapport d'expertise, 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. Il 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. Il évaluera en conséquence la sincérité du travail de présentation de l'impact visuel par le maître d'ouvrage. Il va examiner ainsi successivement les différentes phases de l'élaboration des photomontages, depuis la capture des panoramas support jusqu'à la création des images hybrides superposant les éoliennes à ces paysages, en passant par la délicate phase de géoréférencement visuel et de recalage des éléments virtuels par rapport au modèle numérique de paysage, dont toutes les étapes seront examinées dans le détail.

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 d'EolMed-Gruissan, cette aire est très diversifiée : plages, falaises, étangs, salins, stations balnéaires. Compte tenu de l'éloignement des éoliennes (distance minimum à la côte : 18 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 a été mise à disposition de l'expert [Paysage2017]. Cette étude permet schématiquement de subdiviser l'espace suivant les composantes suivantes :

- Une zone **d'impact maximum**, couvrant le littoral face au projet, depuis la falaise La Franqui au sud jusqu'à Valras-Plage au nord, en passant par Port-La-Nouvelle et

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 les éoliennes sont des éléments architecturaux très graciles, dont la visibilité devient très problématique au-delà de 30 km. Néanmoins deux vues lointaines ont été réalisées depuis le pic du Canigou et le Mont Saint-Clair.

Gruissan. Cette zone comporte de nombreux points où la visibilité du projet est dégagée, et se situe entre 18 et 23 km (donc au plus près), face au projet. L'orientation des rotors sera le plus souvent face au nord-ouest (vents dominants), ce qui conduira à une visibilité maximum pour cette zone du littoral. Cette zone s'étend un peu plus profondément au niveau du massif de la Clape, dont les premiers contreforts offrent une vue maritime très dégagée.

- Deux zones **d'impact intermédiaire**, l'une au nord, sur le littoral entre Valras et Agde, l'autre au sud entre Leucate et Le Barcarès. Les éoliennes seront relativement peu visibles depuis ces zones plus éloignées du projet (entre 23 et 31 km), du fait de la nébulosité atmosphérique et leur petitesse (20' d'angle vertical). L'alignement du projet, tout comme l'orientation majoritaire des rotors réduisent encore la visibilité des éoliennes depuis ces zones.
- Une zone **d'impact minimum**, située en retrait de la première zone, dessine un vaste croissant entre Caves au sud et Fleury au nord, en suivant grossièrement le tracé de l'autoroute A9. Situé à une trentaine de kilomètres du projet, la vue y est le plus souvent occultée par des éléments du paysage (relief, végétation) ou du bâti. Là où la vue est suffisamment dégagée pour apercevoir le large (rives de l'Étang de Bages, premiers contreforts des Corbières), la distance réduit considérablement la visibilité du projet (taille verticale apparente : 20' d'arc, nébulosité). Par ailleurs, la vue est en générale attirée vers des éléments plus proches du paysage (relief, littoral).

La localisation de ces zones est illustrée en Figure 4. Au-delà de ces quatre zones, la distance, associée à la présence d'éléments occultant rendent la visibilité du projet problématique, et l'impact négligeable.

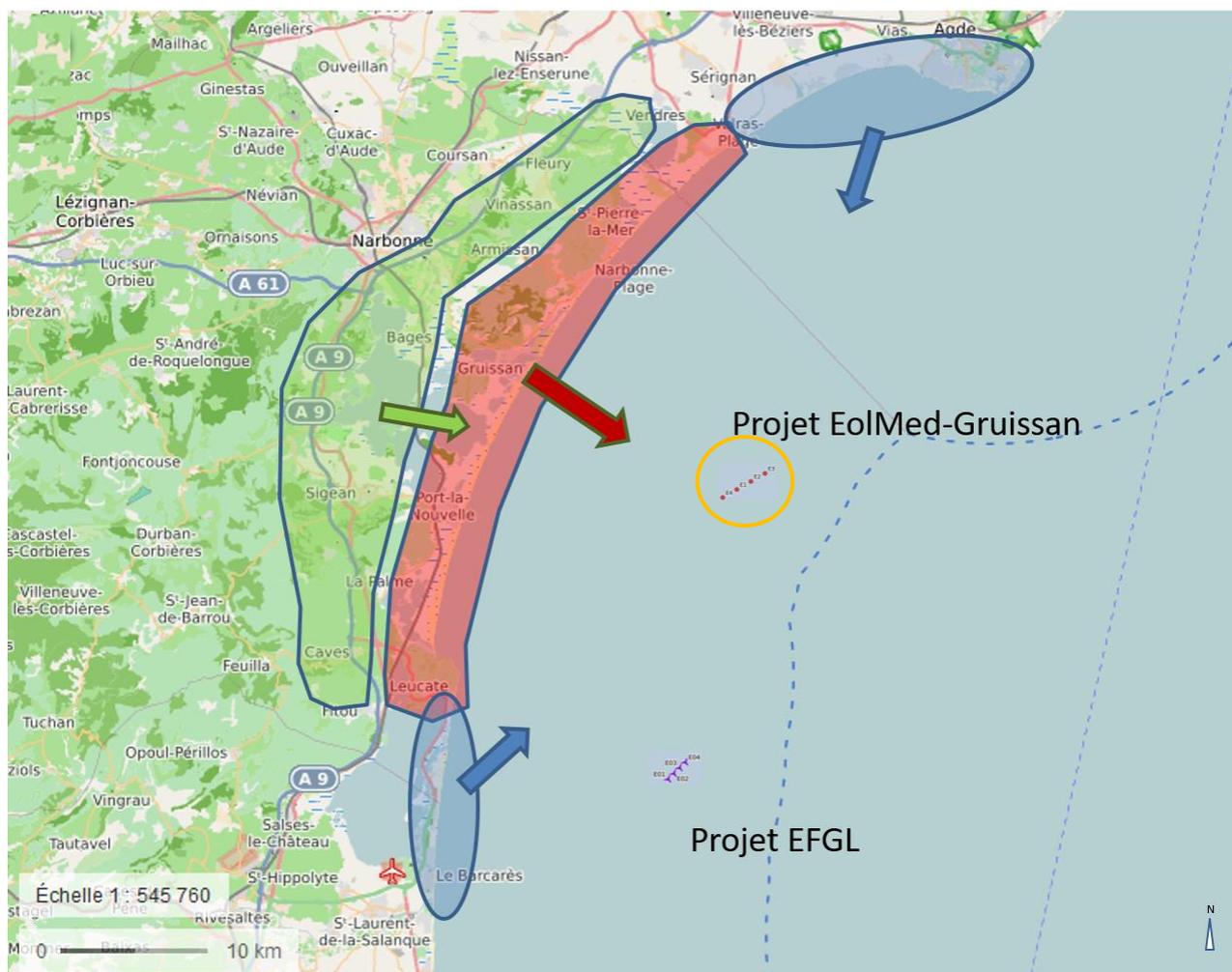


Figure 4 : Carte des principales zones du littoral concernées. L'épaisseur des flèches est proportionnelle à l'impact visuel a priori, compte tenu des éléments paysagers (distance, élévation, etc.).

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 Valras Plage, ou le port de plaisance d'Agde (plages, côté urbanisée) ;
- une image liée aux activités maritimes professionnelles, comme la pêche à Valras ou les salins à Gruissan ;
- une image très présente d'espaces naturels préservés (Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée, Etang de Salses-Leucate, Réserve de Sainte-Lucie), associés à des lieux remarquables (falaise de La Franqui, massif de La Clape) et des activités sportives (randonnées, VTT, cyclotourisme).



Figure 5 : Quelques paysages prototypiques du littoral impacté par le projet : le port de plaisance d'Adge, la plage de Valras, le port de pêche de Valras, le Salin de l'île Saint Martin à Gruissan.

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 une deuxième partie (rapport intitulé « analyse comparative d'impact »).

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 parc éolien, 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 6 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 visuel plus fort que pour le projet EolMed-Gruissan).

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 6 : 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 7).



Figure 7 : 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 parc éolien 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 8). 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).

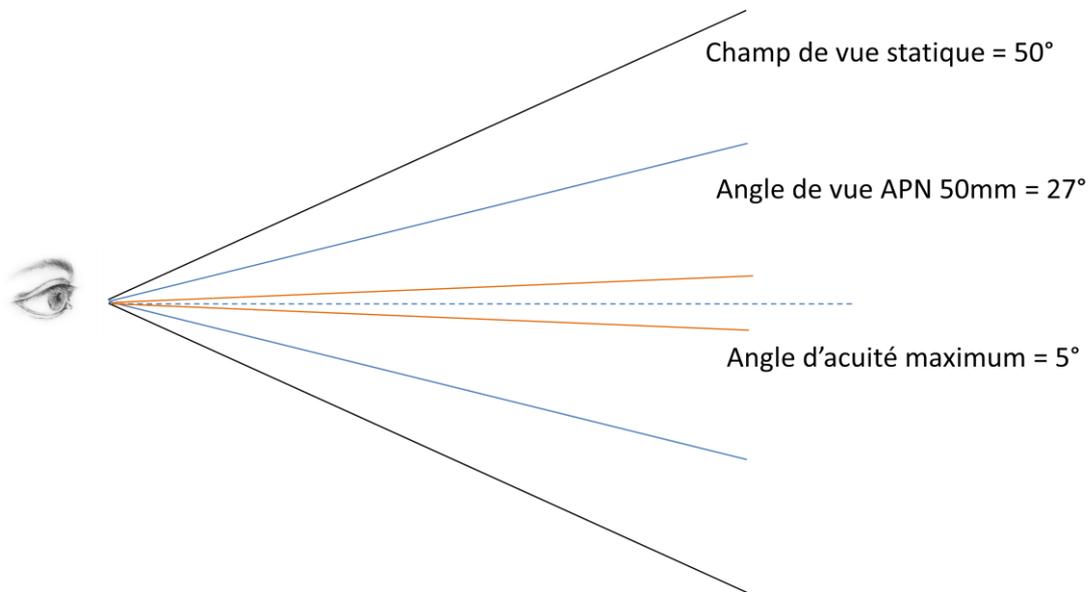


Figure 8 : Ouvertures angulaires d'observation selon l'axe vertical.

Le cabinet d'étude Géophom a été chargé de réaliser les photomontages du projet pilote EolMed-Gruissan. 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 9 : 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 subordonnée 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 48 points de vue pour la création de photomontages. Sur ces 48 panoramas, 23 d'entre eux (soit près de la moitié d'entre eux) sont situés sur la zone critique du littoral, assurant une très bonne représentativité géographique vis-à-vis de l'impact. Par ailleurs 5 d'entre eux (10% du total) sont situés dans les zones d'impact intermédiaire (au nord et au sud de la zone d'impact maximale), et 14 dans la zone d'impact faible (29% du total). Il peut sembler paradoxal que la zone de faible impact soit plus représentée que la zone d'impact intermédiaire, mais cela s'explique aisément de par son étendue (comparable à celle du littoral d'impact maximal, situé entre elle et la mer), et la diversité des paysages qui y sont présents (étangs, massifs, périphérie urbaine). On peut donc conclure à une **très bonne représentativité** des points de vue quant à leur emplacement. On notera qu'à titre de référence, deux vues ont été générées depuis le Pic du Canigou et le Mont Saint-Clair, de par la visibilité exceptionnelle dont on peut parfois bénéficier depuis ces deux sites. Enfin 3 vues maritimes complètent utilement les panoramas terrestres.¹

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 43 photomontages réalisés en journée depuis le littoral², 4 (soit 9%) l'ont

¹ Ces vues ont été réalisées par le maître d'ouvrage en décembre 2017 et n'ont pas pu faire l'objet d'une analyse à la date de ce rapport.

² On ne considère ici ni les vues depuis la mer (3 photomontages), ni les montages nocturnes (2 occurrences), destinés à illustrer le balisage.

été à contre-jour, le matin, depuis la zone face aux éoliennes, 7 (16%) ont été capturés en début de matinée ou en fin de journée en février, donnant un éclairage latéral marqué, 20 (soit 47 %) en fin de matinée ou milieu de journée, donnant un éclairage latéral modéré, et enfin 12 (28%) 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 : on aurait donc espéré davantage de vues à ce moment de la journée, même si elle ne correspond pas à la plus forte affluence de population.



Figure 10: quatre éclairages différents du projet en fonction de l'heure d'observation. Les situations de contre-jour (en haut à gauche) fournissent la visibilité maximum, en début de journée.

Pour une meilleure représentativité, deux vues nocturnes (depuis la pointe de la Franqui à Leucate et le front de mer à Port-La-Nouvelle) 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).

Par contre, il manque clairement plusieurs vues à l'aube, face au projet, pour illustrer un lever de soleil dans l'axe du projet éolien. Il s'agit d'ailleurs d'une demande régulièrement exprimée lors des réunions de débat public sur ces questions.

En conclusion, la représentativité des prises de vue en terme d'horaires est satisfaisante, mais peut encore faire l'objet de quelques ajouts pertinents : quelques vues en éclairage latéral supplémentaires, et quelques vues à l'aube, par exemple depuis la plage de Gruissan ou la falaise de la Franqui.

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. Une première série de 30 panoramas a été ainsi saisie dans la dernière décade de février 2017, par temps très clair. La seconde série a été capturée 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, même si les brumes maritimes diminuent parfois la visibilité.

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.

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 EolMed-Gruissan, la visibilité retenue est celle observée depuis le sémaphore du Cap Leucate, situé à une cinquantaine de mètres d'altitude. Les données de visibilité recueillies par MétéoFrance² 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

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.

² Ces données ont été obligeamment transmises par le maître d'ouvrage du projet voisin EFGl.

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 18 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 EolMed-Gruissan 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).

e. Orientation des rotors

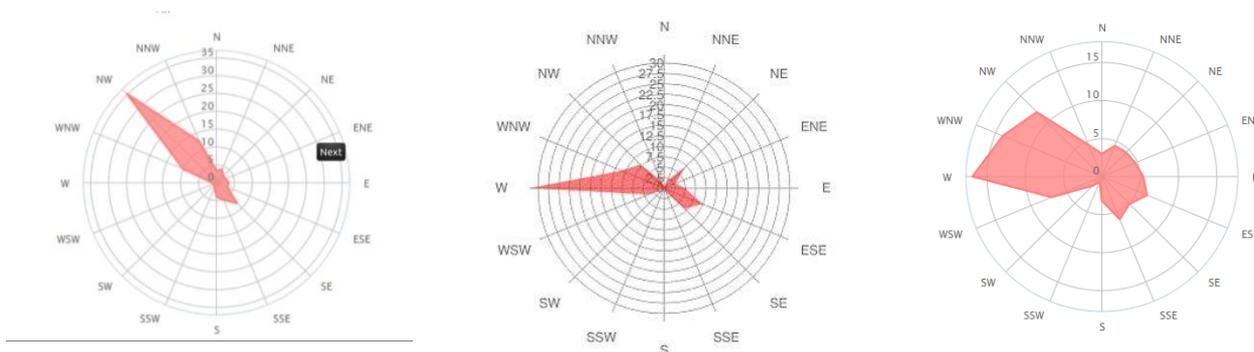


Figure 11: De gauche à droite : les rose des vents à Leucate, Gruissan, Agde (statistique sur 1 an).

La rose des vents de cette région du littoral est très particulière (voir Figure 11), puisqu'elle montre une très forte majorité de vent venant de l'ouest et du nord-ouest (Tramontane). Si on ajoute à cela le fait que la visibilité des machines sera maximale si leurs rotors font face au rivage le plus impacté (donc globalement dans la direction nord-ouest), il est parfaitement légitime de représenter systématiquement les machines du projet EolMed-Gruissan avec une orientation de rotor faisant face à l'azimut NW. C'est le choix qui a été retenu pour les photomontages d'impact. Pour les zones d'impact intermédiaire, au nord et au sud de la zone la plus impactée, cette orientation privilégiée tend à diminuer l'impact en présentant les éoliennes « par la tranche ». Cela est cependant justifié d'un point de vue statistique.

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

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).

bien représentatifs des vues typiquement observées dans la zone concernée, que cela concerne la luminosité, la visibilité ou l'orientation au vent.

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 12). 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 13). 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 12 : Exemple de stitching (tiré de www.arcsoft.com).



Figure 13 : 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 14). Une fois le calcul d'assemblage réalisé, des ajustements de contraste, de couleur et de luminosité sont nécessaires pour obtenir un panoramique parfaitement homogène.

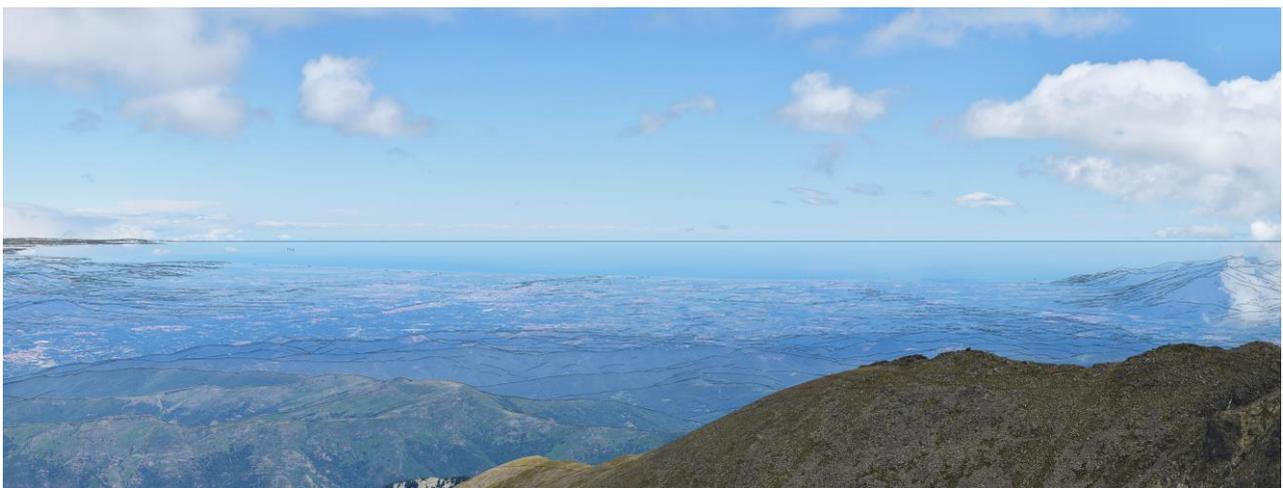


Figure 14: superposition du modèle numérique de terrain avec la vue panoramique reconstituée (ici un détail de la vue n°45, depuis le pic du Canigou). On notera l'excellente superposition des deux rendus.

L'examen des panoramiques résultant (sous leur forme numérique haute résolution de 50400 x 3764 pixels, voir exemple Figure 15) 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 15 : Exemple de panorama obtenu (ici la vue n°1, depuis Notre-Dame-des-Auzils, commune de Gruissan).

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 16.

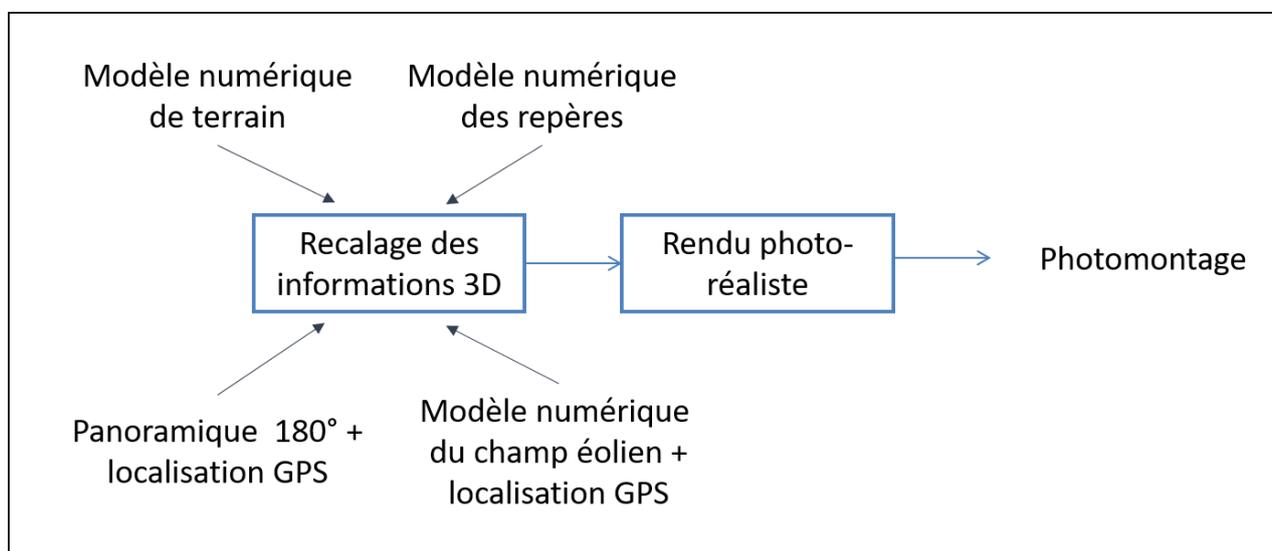


Figure 16 : Schéma du processus de photomontage.

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 obtenues par un GPS de randonnée très fiable (Garmin Etrex) fixé au trépied de capture. 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 17), 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 17 : 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 au réseau électrique, etc.
- *WindFarmer* (société GL Garrad Hassan). Cette société se spécialise dans la consultation 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 Eolmed-Gruissan 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 18). 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 Eolmed-Gruissan.

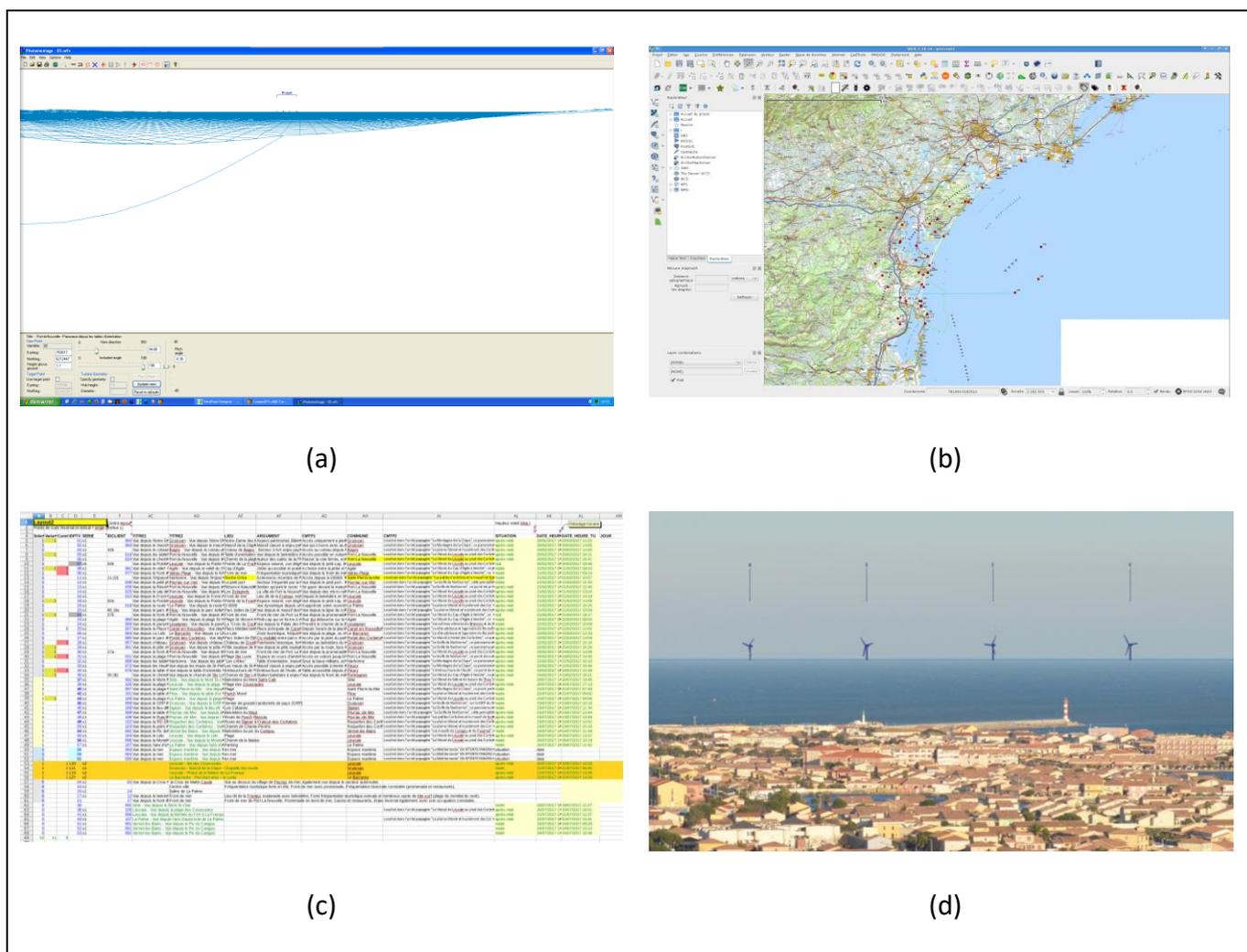


Figure 18 : Photo-composition du projet EolMed-Gruissan : (a) Les éoliennes et le modèle numérique de terrain sont importés dans Windfarm. (b) et (c) Les indications de géolocalisation permettent le recalage précis du

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.

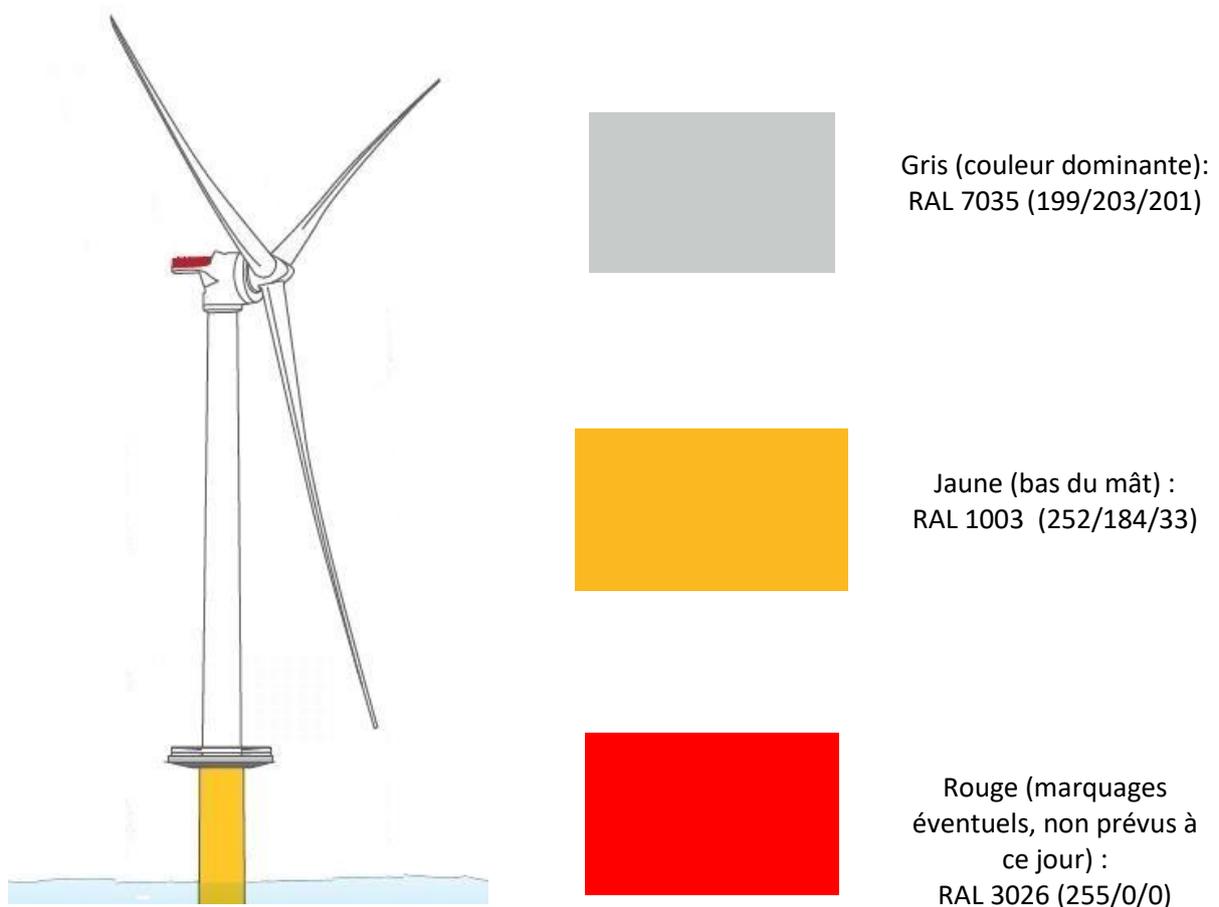


Figure 19 : Les couleurs utilisées sur le projet Eolmed-Gruissan (les valeurs sont les composantes Rouge, Vert et Bleu de chaque teinte).

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 éolien 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.



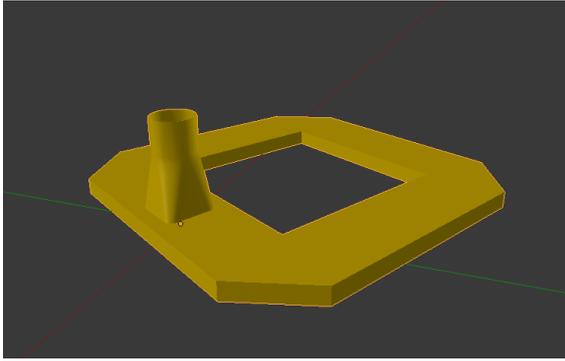
Figure 20 : Phase de rendu visuel dans WindFarm pour le projet EolMed-Gruissan : (a) rendu « fil de fer », permettant de valider l'allure globale. (b) On règle la position et l'intensité de l'éclairage solaire. (c) Un facteur d'atténuation est réglé pour simuler la variation de visibilité en fonction 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.

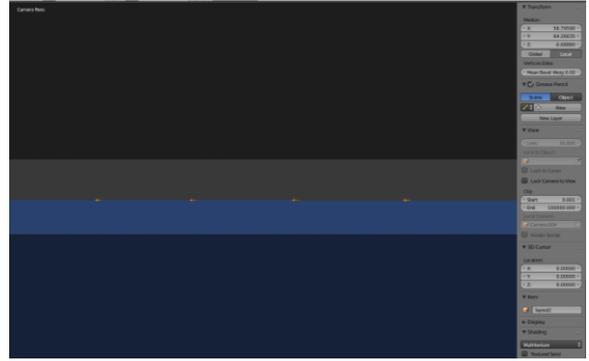
Le cabinet Géophom utilise les nouvelles fonctionnalités du logiciel de rendu *WindFarm* qui permet d'atténuer le rendu visuel des éléments synthétiques en fonction de leur distance. Une interpolation linéaire est ainsi effectuée entre la couleur du fond (horizon sans éolienne) et chaque pixel synthétique 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 20).

Finalement, l'image des éoliennes est superposée au panorama d'origine. Pour corriger les artefacts de rendu qui subsistent du fait des approximations géométriques (par exemple, la mer est une surface parfaitement plane dans le module visuel de *WindFarm*), les images des éoliennes sont exportées dans un logiciel de retouche (ici *Gimp 2.8* [GIMP] est utilisé). La fusion des images des éoliennes avec le fond panoramique se fait par la technique classique de *lissage des masques de fusion* dans ce logiciel.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 21 - Rendu des flotteurs du projet EolMed-Gruissan: (a) la modélisation 3D est importée dans le logiciel Blender. (b) Les flotteurs sont positionnées 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 en béton** 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 21).
- Prise en compte de l'interface avec la mer : *Windfarm* ignorant le concept de vagues (la mer est considérée comme une surface plate), la base des 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 22).

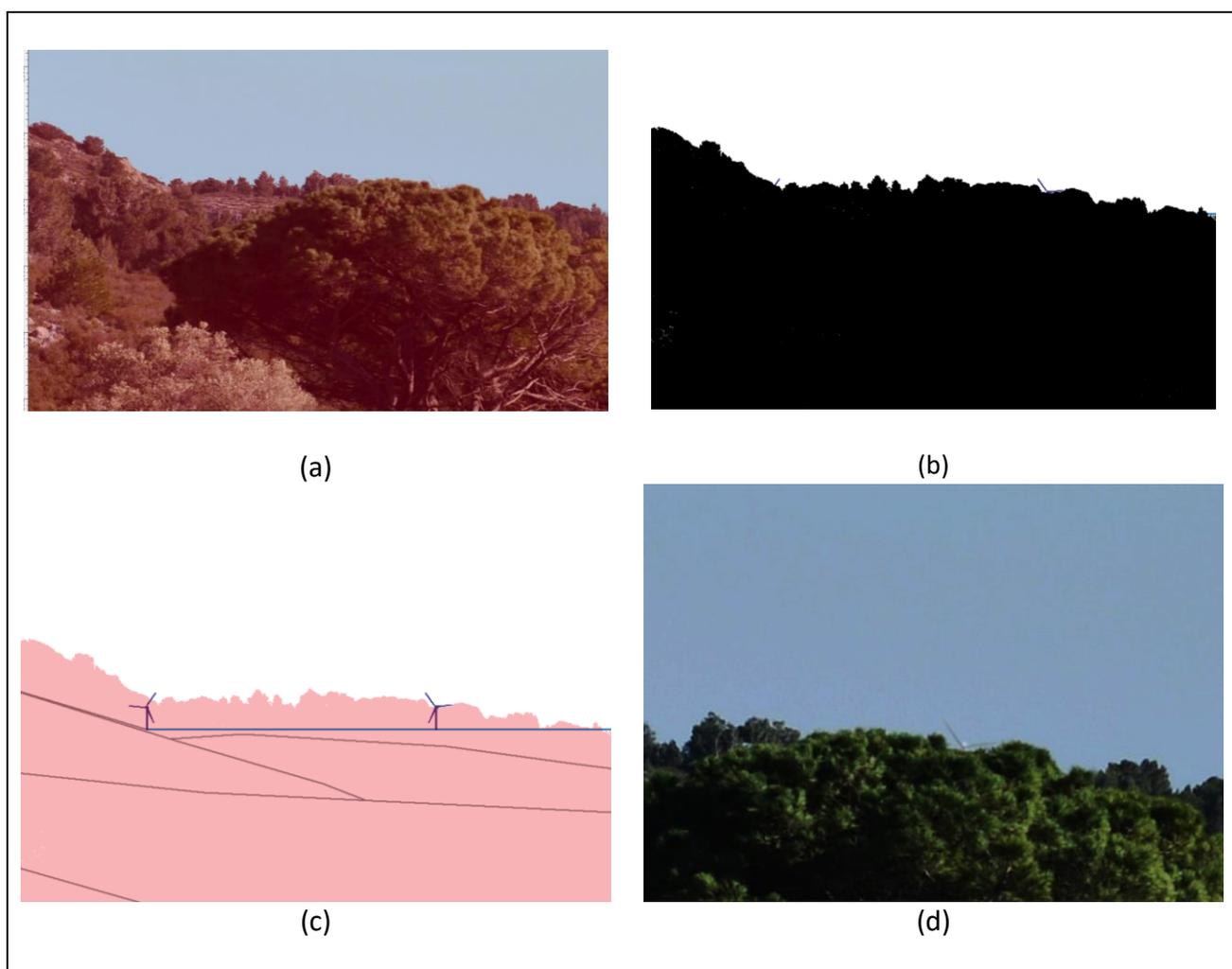


Figure 22 : Retouches finales d'un photomontage du projet EolMed-Gruissan. *Windfarm* ne modélisant pas des détails comme la couverture végétale (a), on crée manuellement des masques d'occultation – comme en (b) – pour bloquer la visibilité de certaines éoliennes. En (c), le rendu en fil de fer permet d'évaluer le degré d'occultation dans le rendu final. En (d), un zoom sur l'éolienne de droite partiellement visible derrière le couvert végétal.

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 [Impact2016] préconisent un champ visuel de 100°, 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). Le champ retenu ici (90°) est satisfaisant.

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.

A la date de ce rapport, l'expert a uniquement eu à sa disposition le support plan utilisé par les acteurs de la concertation en septembre 2017. Il s'agit d'un support traditionnel de présentation des photomontages qui consiste en un cahier rassemblant toutes les vues, imprimé sur un format

large, proche du format double-A3 "paysage" (ici 84cm x 42cm). Les vues en elle-même occupent une surface de 80cm x 23.4cm. 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 une résolution de 12500px x 3650px, ce qui correspond 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.

Bien que n'ayant pas pu les observer tous directement, l'expert peut néanmoins commenter l'utilisation des panoramas semi-cylindriques, ayant pu examiner deux d'entre eux (similaire à celui de la Figure 3). 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, comme c'était le cas pour ce projet. 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 alors 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 ¹. Par contre, l'expert déconseille l'utilisation d'une double rangée de photomontages sur le même support, car on place alors l'utilisateur devant une situation perceptivement peu pertinente par rapport à la réalité du terrain².

Par ailleurs, la présentation des photomontages sous forme numérique a l'avantage d'une grande accessibilité. Certes, 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. 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, selon les conditions prescrites. Néanmoins, l'expert recommande la mise en ligne des photomontages au sein d'un site internet dédié (le maître d'œuvre s'est engagé à ce que cela soit le cas en janvier 2018), en les accompagnant d'instructions claires et détaillées décrivant leurs conditions d'utilisation.

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 EolMed-Gruissan, étude réalisée par le cabinet Géophom et commanditée par le maître d'ouvrage³. 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 limitation principale des panoramas, outre leur 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 in situ, 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 évidents.

² L'intention visant à pouvoir comparer deux configurations de la ferme éolienne en juxtaposition est louable, mais le but premier du support est son réalisme par rapport à la situation réelle.

³ 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 EOLMED-GRUISSAN.

C. 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 EolMed-Gruissan. 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 EolMed-Gruissan est par ailleurs **conforme à l'état de l'art** sur la génération d'images photo-réalistes mêlant des contenus réels et virtuels : des études menées selon des processus similaires ont abouti à la création de visuels très proches des images réalisées a posteriori, une fois le parc éolien effectivement installé.

On 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 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 seconde partie de l'étude consistera à analyser l'impact spécifique à la lumière des spécificités du site, notamment du fait de la présence d'un autre projet pilote similaire au large de Leucate/Le Barcarès. Cette seconde partie fait l'objet d'un document complémentaire, intitulé « analyse comparative d'impact ».

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. L'utilisation de dispositifs portables de type casque de Réalité Virtuelle constituera également dans le futur un outil d'évaluation très utile. Néanmoins leurs

¹ Ce coût comprend le coût matériel de déploiement 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.

limitations techniques actuelles (notamment en terme de champ de vue et de définition) rendent encore ces moyens inappropriés pour une évaluation d'impact.

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.

[GeophomGruissan] Projet de parc éolien EolMed-Gruissan. Livret de photomontages réalisé par le cabinet Géophom.

[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 terrestres (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] "EolMed-Gruissan : Etude Paysagère et Patrimoniale", Bureau d'étude L'Artifex. Septembre 2017

F. Annexes

Annexe 1 : Choix du capteur photographique pour l'étude

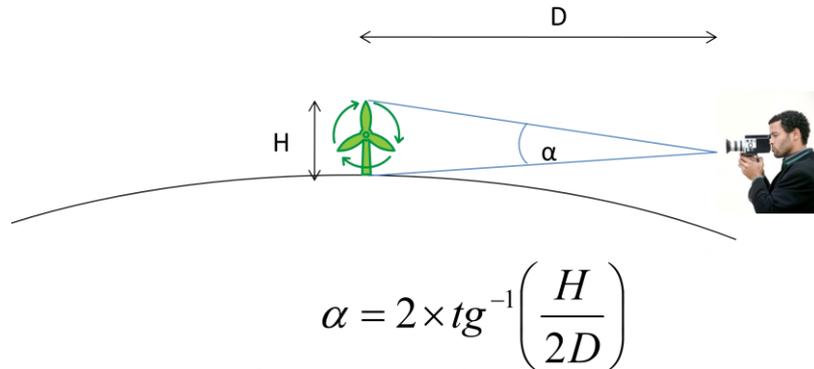
Le choix de l'appareil photographique numérique (APN) et de l'optique de capture des photographies servant de base aux photomontages doit être guidé par un seul critère essentiel : reproduire la vision humaine. Or ce choix est délicat par nature, car la vision humaine est tout sauf une vision statique 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.

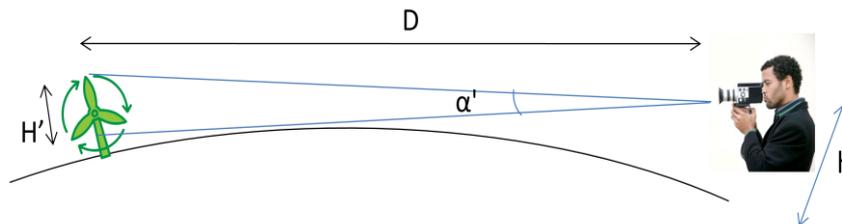
L'appareil choisi pour l'étude du projet EOLMED-GRUISSAN est le Nikon D800E pourvu d'une optique de 50 mm. Cet APN est dépourvu de filtre passe-bas qui permet de restituer un « piqué » d'image très adapté à la tâche de photomontage. Les photographies sont téléchargées au format RAW, et correspondent 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 = 176 m pour une éolienne du parc éolien EOLMED-GRUISSAN, et $D_t = 12740$ km (diamètre terrestre)

D	α (degrés)	α (minutes d'arc)	Effacement (m)	Effacement (%)	Hauteur visible (m)
1 km	10,06	603	0	0	176
2 km	5,04	302	0	0	176
5 km	2,02	121	0	0	176
10 km	1,01	61	2	1	174
15 km	0,67	40	8	5	168
20 km	0,50	30	18	11	158
25 km	0,40	24	32	18	144
30 km	0,34	20	50	29	126
35 km	0,29	17	72	41	104
40 km	0,25	15	98	56	78

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 85 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