



**PROJET de PARC EOLIEN EN MER
des ILES D'YEU ET DE NOIRMOUTIER**

Expertise des simulations visuelles

Jean-Marc Vézien

Juin 2015

Table des matières

A.	Introduction – Objectif de l’expertise	4
1.	Contexte : le parc éolien de Yeu-Noirmoutier.....	4
2.	L’impact visuel éolien : définition, mesures.....	6
3.	Les objectifs de l’expertise	6
4.	Plan du rapport.....	8
B.	Examen de la méthodologie par photomontage	9
1.	L’impact visuel	9
2.	Processus de conception du photomontage d’impact.....	13
3.	Capture des supports panoramiques	13
4.	Photocomposition	16
a.	Assemblage panoramique.....	16
b.	Photomontage 3D	17
5.	Rendu visuel final et supports de présentation	21
a)	Rendu visuel	21
b)	Présentation du photomontage	25
6.	Conclusion	28
C.	L’impact visuel du projet de parc éolien en mer des îles d’Yeu et de Noirmoutier	29
1.	Méthodologie d’évaluation	29
2.	Zones d’impact et amers retenus.....	29
3.	Examen des amers.....	32
a)	Kulmino.....	33
b)	Le château d'eau de Barbâtre	36
c)	Le château d'eau de Port-Joinville.....	39
d)	Le phare du Pilier.....	41
e)	Les éoliennes de Bouin	41
4.	Conclusion	46
D.	Synthèse	47
E.	Bibliographie.....	49
F.	Annexes	50
	Annexe 1 : Choix du capteur photographique pour l’étude.....	50
	Annexe 2 : Visibilité des structures en mer	51
	Annexe 3 : CV - L’expert	52

A. Introduction – Objectif de l’expertise

1. Contexte : le parc éolien de Yeu-Noirmoutier

Le site de Yeu-Noirmoutier (Vendée) est l'un des deux projets de champs d'éoliennes en mer, attribué au consortium composé d'ENGIE, EDP Renewables et Neoen Marine, à l'issue de l'appel d'offres gouvernemental de mars 2013 (voir Figure 1).

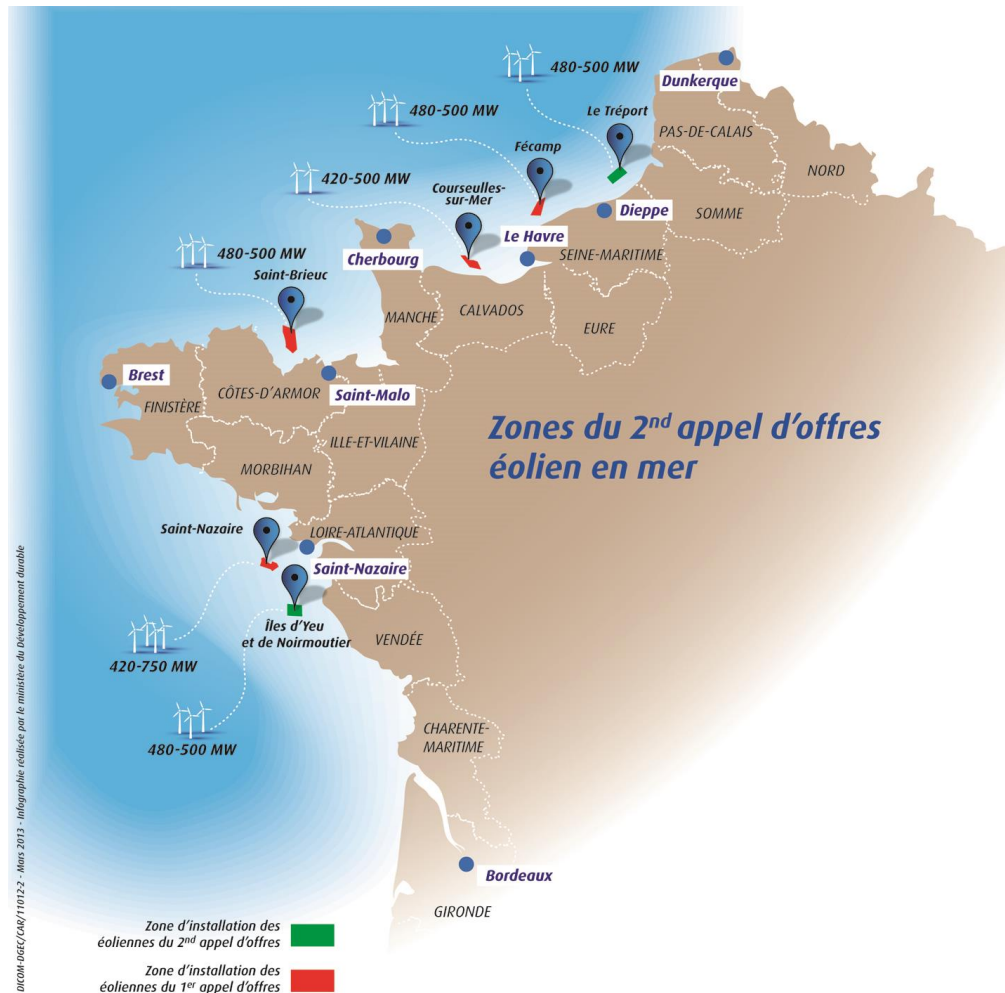


Figure 1 : les sites retenus pour les deux premiers appels d'offres de parcs éoliens en mer.

Le projet des îles d'Yeu et de Noirmoutier se compose de 62 éoliennes en mer, d'une capacité unitaire de 8 MW (fournisseur Adwen), pour une puissance totale de 496 MW. Les éoliennes seront localisées au large de l'île de Noirmoutier, sur une surface de 83 km² (sur les 112 km² fixés dans le cahier des charges de l'appel d'offres) à 11,7 km de l'île d'Yeu et 17,3 km de Noirmoutier (Figure 2). La production envisagée équivaut à environ 1 900 GWh, soit l'équivalent de la consommation électrique annuelle de près de 750 000 personnes (soit plus que la totalité de la population vendéenne). La date de mise en service envisagée est 2021 (voir calendrier prévisionnel Figure 3).



Figure 2 : Le site éolien de Yeu-Noirmoutier: vue générale.

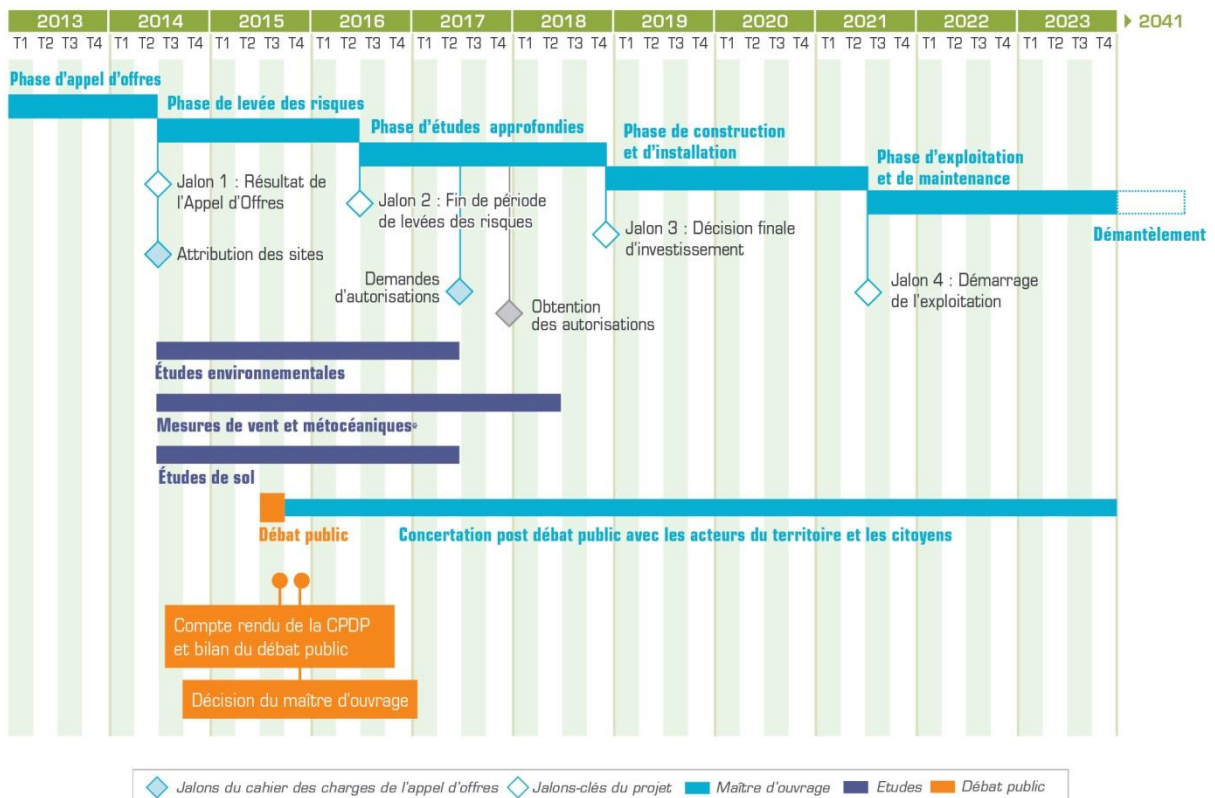


Figure 3 : Calendrier prévisionnel de mise en œuvre du projet (source: dossier du Maître d'Ouvrage).

Parallèlement au calendrier technique de l'appel d'offres, et conformément à la loi, le projet de parc éolien de Yeu-Noirmoutier fait l'objet d'un débat public organisé et animé par une Commission particulière du débat public (CPDP), neutre et indépendante. Du 2 mai 2015 au 7 août 2015, le public concerné pourra examiner l'opportunité, les objectifs et les caractéristiques du projet dans tous ses aspects. L'un de ces aspects concerne **l'impact visuel** du projet.

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] 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 part l'absence d'éléments occultants. On doit aussi tenir compte de la notion de paysage *perçu*, directement par les habitants (pour lesquels tel ou tel point de vue sera emblématique), ou par le biais de représentations typiques, notamment liées au tourisme.

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

3. Les objectifs de l'expertise

Afin de fournir à un large public des éléments d'appréciation du futur impact visuel du parc, le maître d'ouvrage du projet des îles d'Yeu et de Noirmoutier a commandité une série de photomontages, réalisés par le cabinet d'étude spécialisé Géophom [GeophomYeuNoirmoutier]. Cette série de photomontages illustre par une série de 24 vues panoramiques diurnes à 180°, prises depuis le littoral concerné (entre la Pointe de Saint-Gildas au nord et Saint-Jean de Monts au sud, en passant par l'île d'Yeu et la presqu'île de

Noirmoutier), l'aspect visuel du champ éolien à différentes heures de la journée. 7 vues nocturnes complètent le portfolio existant.

Cet outil de visualisation est accessible sous deux formes distinctes :

- Un site internet (<http://geophom.fr/eolienmer-pyn>), sur lequel un outil interactif permet d'explorer chaque vue panoramique (ces pages sont optimisées pour une résolution d'écran de 1600x1080 pixels).
- Des impressions grand format de 3 m x 40 cm de développé présentées sur support semi-cylindrique, installées sur les lieux de débat, et destinées au grand public afin de mieux apprécier l'impact visuel, dans des conditions plus proches de la réalité terrain (voir Figure 4).



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 ces photomontages porte:

- d'une part, sur la *validation de la procédure complète* ayant présidé à leur élaboration, procédure comprenant notamment la capture du paysage existant par photographies panoramiques, la création des incrustations des éoliennes virtuelles et la restitution des montages dans les formats détaillés ci-dessus.
- d'autre part, sur la question centrale de *l'impact visuel* 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.

4. Plan du rapport

Le présent rapport d'expertise va, par voie de conséquence, être organisé en deux grandes parties : la première (partie B ci-après), de nature essentiellement technique, se penche sur l'examen de la méthodologie de création des photomontages elle-même, en regard des connaissances scientifiques actuelles sur la création d'images hybrides (mêlant éléments réels et simulations 3D) et des pratiques couramment admises dans le domaine. Elle déterminera donc si les outils, procédures et technologies mis en œuvre pour la réalisation des photomontages sont valides pour la création des supports visuels mis à disposition du public en amont de l'étude d'impact. Une fois cette méthodologie validée, la seconde (partie C) se penchera quant à elle sur la question de l'évaluation de l'impact visuel sur le site des îles d'Yeu et de Noirmoutier, **en apportant des éléments quantitatifs et qualitatifs en complément des photomontages proprement dit, de manière circonstanciée**. La méthode retenue fait appel, en sus des photomontages, à des prises de vue spécifiques, 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 de toute implantation d'une construction (habitation, monument, usine) dans une zone géographique. Sur des bases objectives, elle commence par la détermination de l'aire d'étude. Dans le cas d'implantations d'éoliennes en mer, on divise cette aire en trois zones :

- Une aire d'étude *éloignée*, bornée par la distance de visibilité maximale. Dans le cas présent, cette distance peut être fixée à environ 30 km (voir calcul en partie C, section 2).
- 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 des îles d'Yeu et de Noirmoutier, cette aire est très diversifiée : côtes rocheuses, falaises, dunes, plages, marais salants, côtes urbanisées. Compte tenu de l'éloignement des éoliennes (distance minimum à la côte : 12 km environ), et de l'altitude modérée du littoral (point culminant : Ile d'Yeu, à 30m d'altitude), le rétro-littoral est en général peu profond (moins de deux kilomètres), et on peut considérer que tout élément occultant proche (arbre, maison) s'interposant entre l'observateur et les éoliennes masquera leur présence. Pour l'impact visuel, on s'intéressera uniquement au « pire cas », celui d'une observation soit depuis le bord de mer lui-même, sans élément d'interposition, soit depuis un point de vue dégagé, dans des zones particulières (voir section C).
- Une aire d'étude *intermédiaire*, couvrant l'espace entre le parc éolien et le littoral. Dans le cas du site des îles d'Yeu et de Noirmoutier, elle est composée pour une large part d'eau, mais contient également les îles importantes: Yeu et Noirmoutier¹.

Partant de cette division de l'espace, la détermination de l'état initial du patrimoine et du paysage peut être faite. Dans le cas qui nous occupe, on peut citer principalement :

- La Pointe de Saint-Gildas (estuaire sud de la Loire), au nord de la zone, offre une vue sud-ouest parfaitement dégagée vers la zone du parc, dont les machines les plus proches sont distantes d'une trentaine de kilomètres;
- Le littoral de l'île de Noirmoutier côté océan, et dans son prolongement le littoral continental entre la plage de la Grande Côte et Notre-Dame-de-Monts, d'où le parc est visible vers l'ouest, à une vingtaine de kilomètres

¹ Une quatrième zone, dite immédiate, recouvre le périmètre du parc éolien lui-même. On considérera ici qu'elle ne génère aucun impact du fait de l'éloignement des terres.

- Le littoral nord de l'île d'Yeu, entre la Pointe du But et Ker-Chalon, où la distance au parc est minimale, entre 12 et 15 km.
- Enfin le littoral entre Saint-Jean-de-Monts et Saint-Gilles-Croix-de-Vie, duquel le parc est visible au Nord-Ouest entre 25 et 30 km de distance.

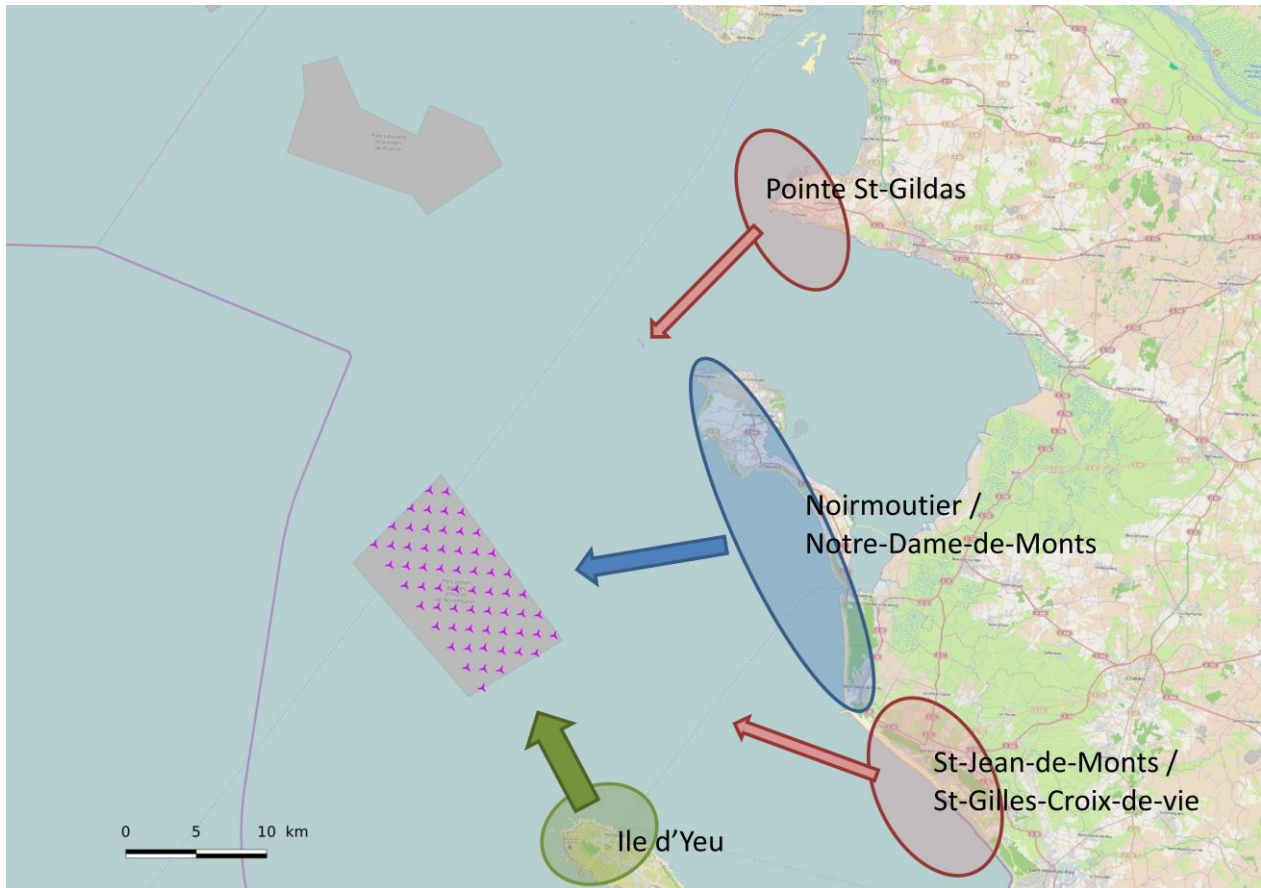


Figure 5 : Carte des principaux éléments patrimoniaux du littoral concerné. L'épaisseur des flèches est proportionnelle à l'impact visuel a priori, compte tenu des éléments paysagers (distance, élévation).

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

- une image liée au tourisme et à la plaisance, avec l'exemple-type de la station balnéaire de Saint-Gilles-Croix-de-Vie (plages, côté urbanisée, port de plaisance)
- une image liée aux activités maritimes professionnelles : la pêche (Port-Joinville sur l'île d'Yeu) et mais aussi le transport de marchandises (porte-conteneurs sortant et entrant à Saint-Nazaire).
- une image très présente d'espaces naturels préservés (île d'Yeu, Noirmoutier), avec ses activités traditionnelles: marais salants, pêche à pied.



Figure 6 : Quelques paysages prototypes du littoral de la zone du parc éolien.

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

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.

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 en mer des îles d'Yeu et de Noirmoutier 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.

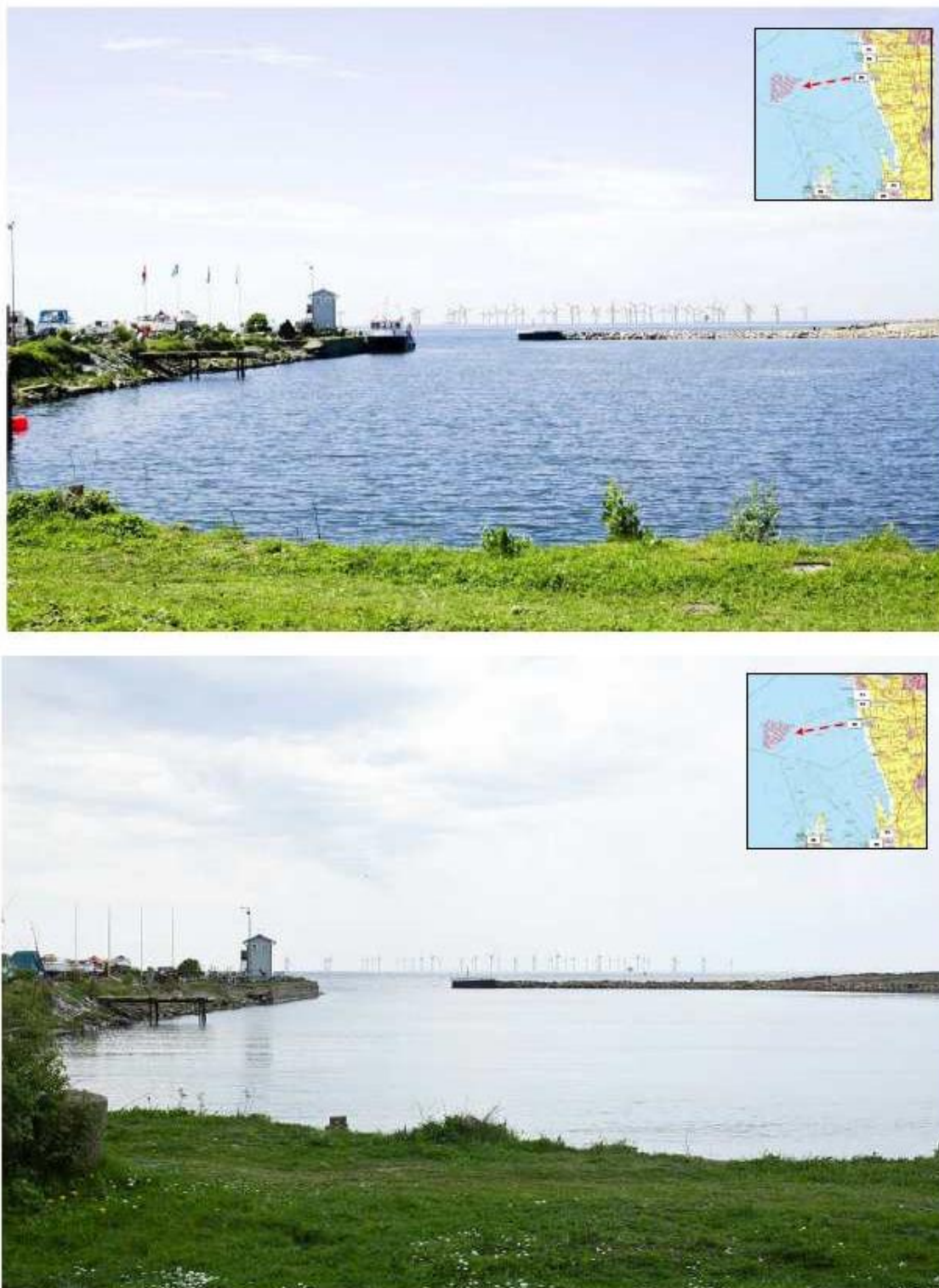


Figure 7 : Comparaison réel / virtuel sur un des photomontages réalisés pour l'étude d'impact sur le site éolien de Lillgrund (Suède). L'image réelle est en bas, la simulation au dessus. Les éoliennes sont situées à 5,3 km du littoral. On notera l'excellente concordance globale, mais une visibilité moindre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

2. Processus de conception du photomontage d'impact

Un bon photomontage 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 représenter le photomontage de telle façon qu'il soit impossible à distinguer d'une fenêtre qui donnerait à voir ce paysage dans un bâtiment sur 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 F les paramètres guidant la détermination du système de capture. Il faut cependant ici remarquer que la vision humaine ne résulte pas d'un simple processus photographique, aussi, les choix techniques relèvent d'une combinaison de critères physiques (métrologie, optique géométrique) et de considérations empiriques nées de plusieurs décennies de pratique. Actuellement, le consensus se fait, pour ce qui est du capteur optique, autour d'objectifs proches du 50 mm sur un reflex 24x36 classique, ce qui fournit un angle de vue de 40° en horizontale x 27° en verticale, proche du champ visuel monoculaire statique. Pour construire une vue panoramique du site, on prend ainsi une série de clichés qui, assemblés en une mosaïque d'images, vont constituer le panorama de base du photomontage. Pour l'évaluation de l'impact d'un champ

éolien distant, proche de l'horizon, le choix logique est de créer un panorama circulaire (idéalement à 360°, mais dans la pratique on se limite souvent à un demi-horizon, soit 180°), car l'ouverture verticale des APN capture de façon satisfaisante le champ de vue vertical d'un observateur humain regardant l'horizon (voir Figure 9). Monté sur une tête panoramique spécialement étudiée pour cette tâche, l'APN capturera une série de vues partiellement superposées, décalées de 25° les unes des autres (ce qui autorise un recouvrement des vues indispensable au processus de création du panorama). Typiquement une quinzaine de vue est nécessaire pour un panorama circulaire complet, 7 vues pour un demi-tour (voir [Designer04]). Le panorama cylindrique ainsi reconstitué sera proche de la projection sphérique que crée le paysage sur la rétine, pour peu que l'angle vertical reste modéré (déformation de quelques % pour un angle d'une trentaine de degrés).

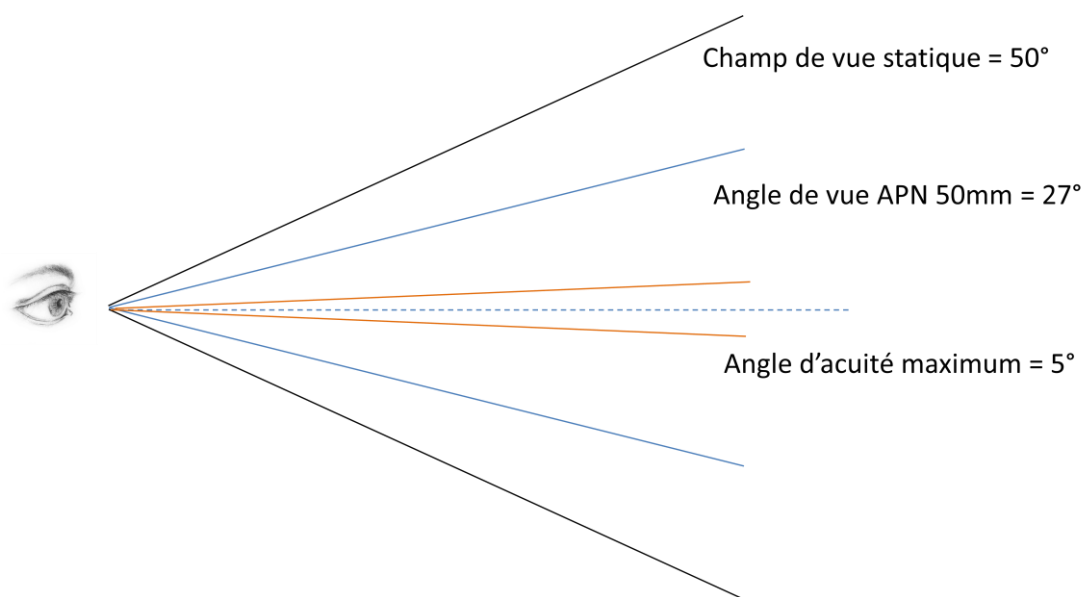


Figure 9 : Ouvertures angulaires d'observation selon l'axe vertical.

Le cabinet d'étude Géophom a été chargé de réaliser les photomontages du projet de parc éolien mer des îles d'Yeu et de Noirmoutier. 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. Plusieurs séries de 15 photographies sont ainsi capturées pour former un panorama complet à 360°, duquel sera extrait un demi-tour centré sur le champ éolien, dont la position est par ailleurs connue par co-repérage GPS préalable. Afin de minimiser les opérations de post-production lors de l'assemblage numérique du panorama (voir section suivante), il est indispensable de s'assurer que l'APN effectue la rotation panoramique autour du point nodal, c'est-à-dire au niveau du point d'entrée des rayons lumineux dans l'optique de l'appareil. Cette opération nécessite un calibrage préalable, effectué à l'aide de mires graduées. La tête panoramique permet ensuite de préserver la position obtenue sur site, et donc d'assurer une rotation pure garantissant un panorama optimum.

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



(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 enregistrées.

4. Photocomposition

a. Assemblage panoramique

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

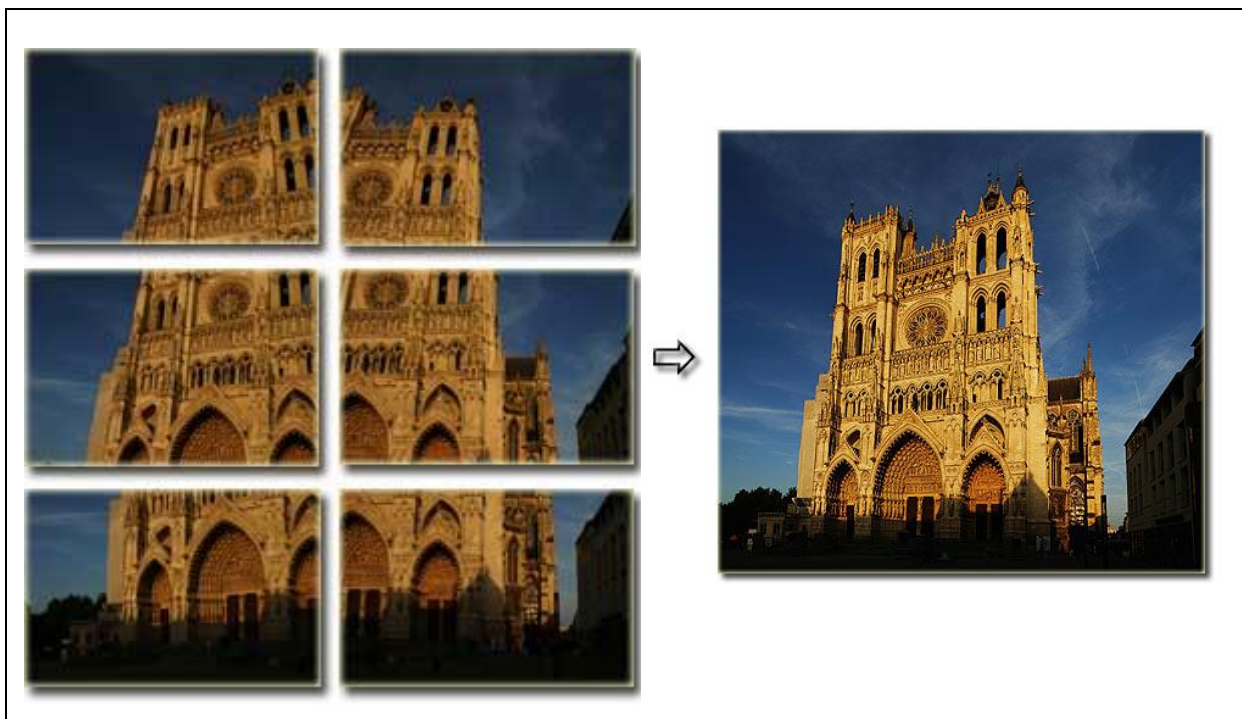


Figure 11 : Exemple de stitching (tiré de www.ptgui.com).

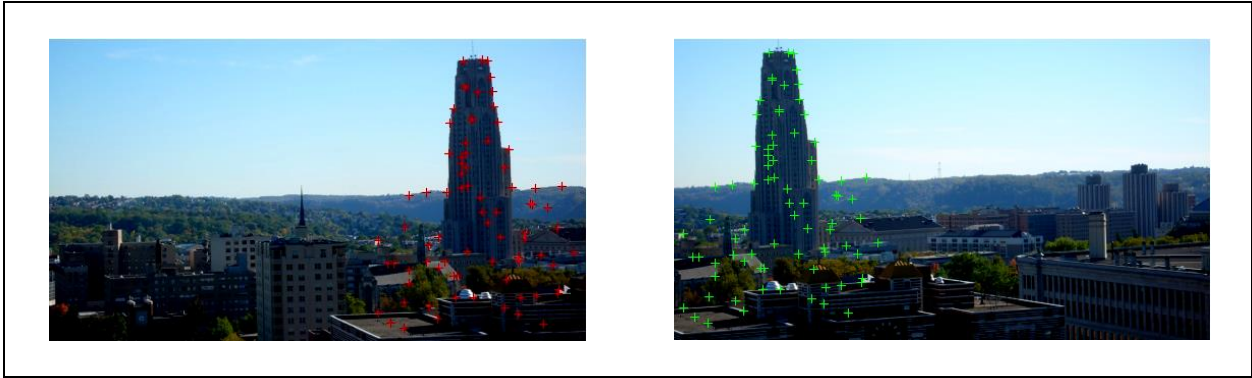


Figure 12 : Mise en correspondance d'amers dans un couple d'images. Chaque croix rouge correspond à une croix verte et réciproquement.

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

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



Figure 13 : Exemple de panorama obtenu (ici la vue depuis la plage de la Grande Côte).

b. Photomontage 3D

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

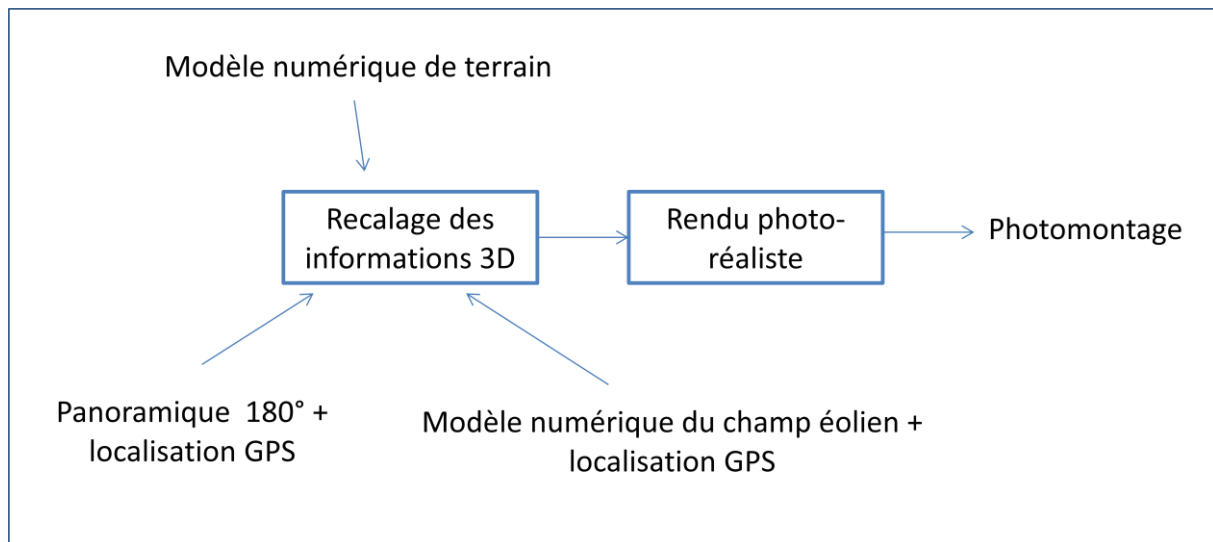


Figure 14 : Schéma du processus de photomontage.

Le modèle numérique de terrain est typiquement importé d'une base de données topographique de la zone littorale. On utilise ici la BDAlti-25 de l'IGN (résolution 25 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 provient du fait que l'espace maritime lui-même n'est pas géoréférencé (le niveau de la mer varie en fonction du temps) : Géophom contourne ingénieusement cette difficulté en plaçant arbitrairement le niveau de la mer à zéro et en décalant l'altitude du modèle topographique de la côte et du panorama en fonction de la hauteur de la marée à l'instant de prise de vue (les informations de hauteurs d'eau sont tirées des « Références Altimétriques Maritimes » du SHOM, édition 2011.).

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 généraliste

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

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

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

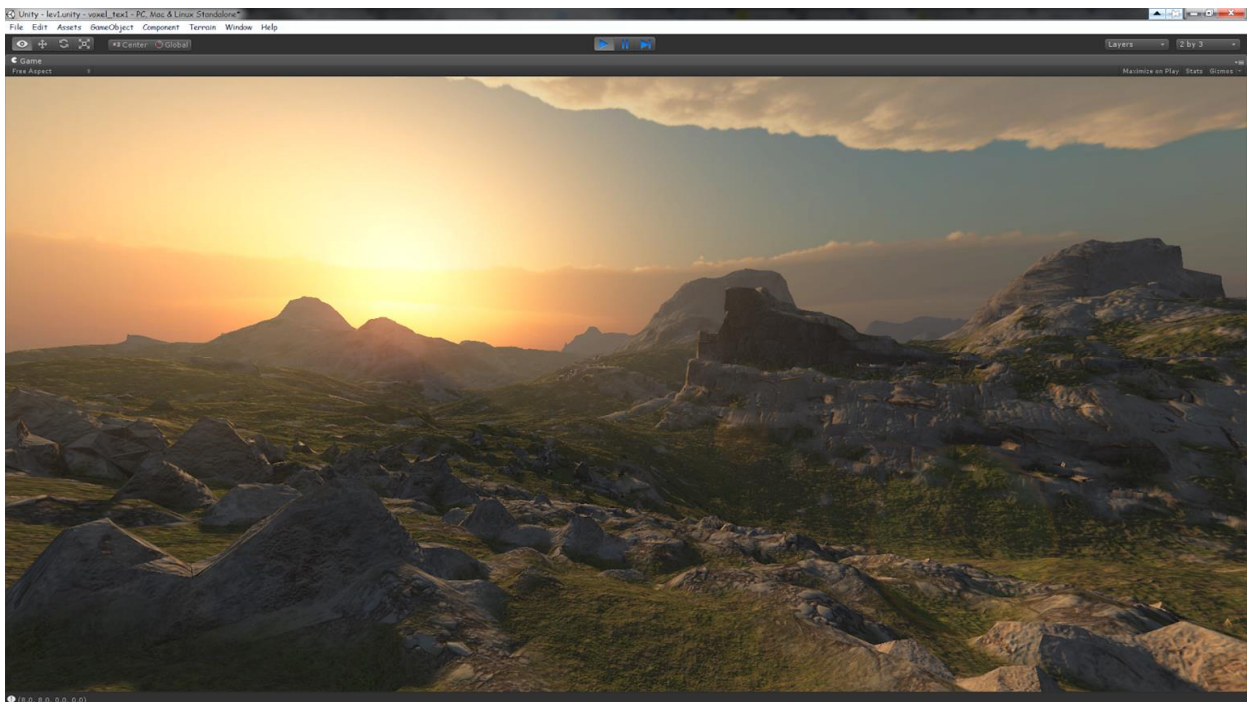


Figure 15 : Une image synthétique de paysage réalisée avec le moteur de jeu vidéo Unity.

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

Logiciels spécialisés

Il existe une grande variété de 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 parc des îles d'Yeu et de Noirmoutier le logiciel *WindFarm 5.0*.

En ce qui concerne la méthodologie, la procédure est la suivante: le panoramique est chargé dans le logiciel (dans la limite des 180° supportés par celui-ci), ainsi que le modèle numérique du terrain et la représentation numérique des éoliennes dont la localisation GPS est connue (on ajuste, comme on l'a vu précédemment, ces données en fonction du niveau de la mer). Grâce au géo-repérage de repères identifiés dans le panorama (antennes, château d'eau, clochers, terrain...), on fait coïncider l'azimut de la vue avec les données 3D. Une fois l'azimut réglé, l'horizon photographique est ajusté sur l'horizon numérique. La précision de ce réglage est inférieure à 1/20^{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 16). L'analyse de ces matériaux, complétée par des interviews directes avec les intervenants de Géophom, permettent de conclure à la validité de la procédure de recalage des panoramas avec les informations numériques géoréférencées relatives au parc éolien.

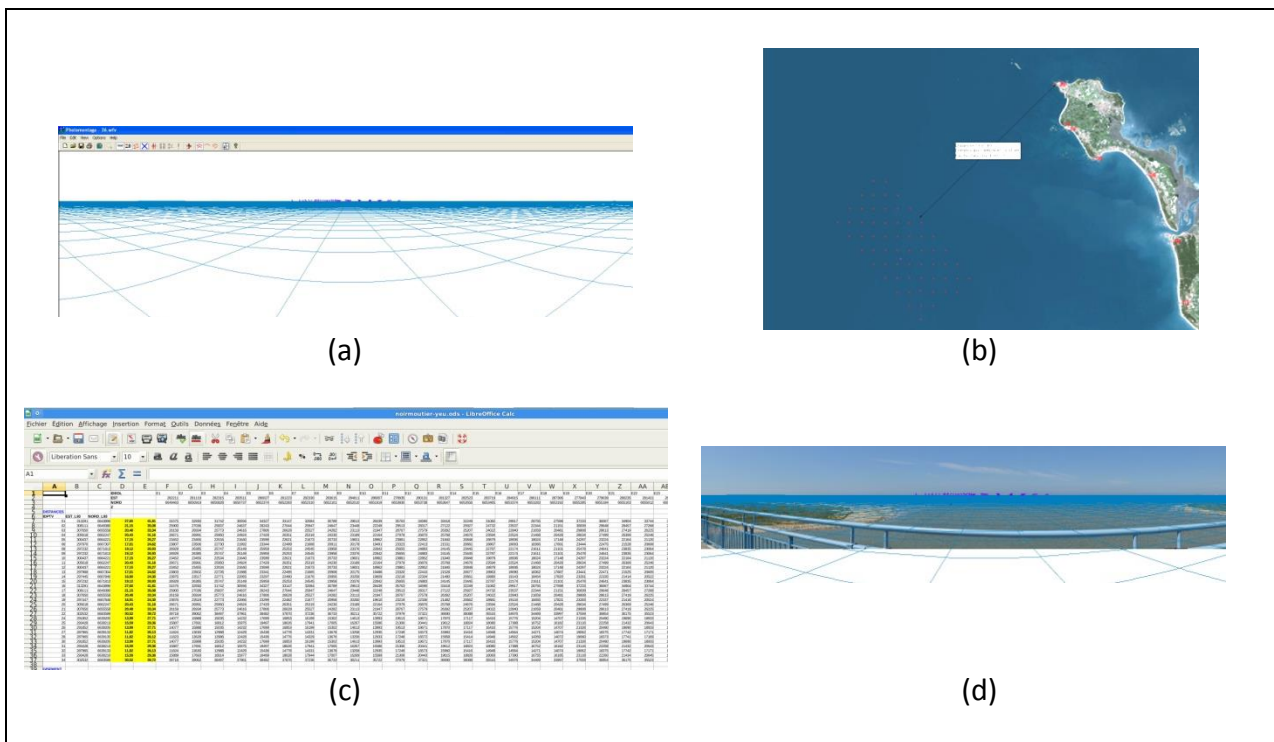
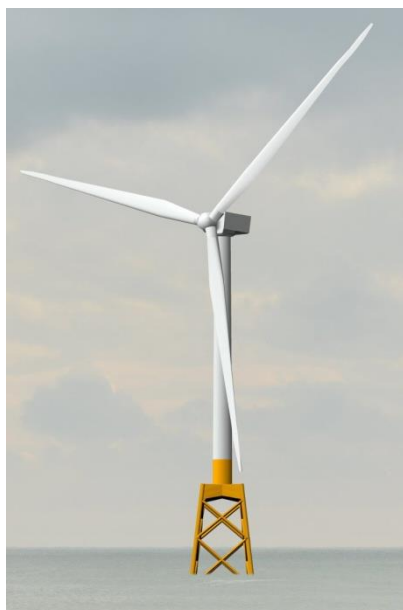


Figure 16 : Photo-composition du champ éolien : (a) Les éoliennes et le modèle numérique de terrain sont importés dans *Windfarm*. (b) et (c) Les indications de géolocalisation permettent le recalage précis du panorama photographique en superposition. (d) Toutes les informations sont maintenant correctement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

5. Rendu visuel final et supports de présentation

a) Rendu visuel

Une fois la modélisation 3D du parc éolien recalée par rapport au panorama photographique, il devient possible d'en produire une image réaliste qui viendra s'ajouter aux éléments existants. Cette phase, appelée phase de **rendu visuel**, est rendue possible par le calcul des interactions entre d'une part, une estimation des sources lumineuses présentes au moment de la photographie (pour l'essentiel, 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.



Gris (couleur dominante):
RAL7035
(199/203/201)



Jaune (bas du mât / Jacket) :
RAL 1003
(252/184/33)



Rouge (marquages) :
RAL 3026 (255/0/0)

Figure 17 : Les couleurs utilisées dans l'éolien en mer en France (les valeurs sont les composantes Rouge, Vert et Bleu). A noter : les marquages ne sont pas encore intégrés au projet définitif.

Le matériau retenu est extrêmement diffusant (voir photographie 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 (voir Figure 18).

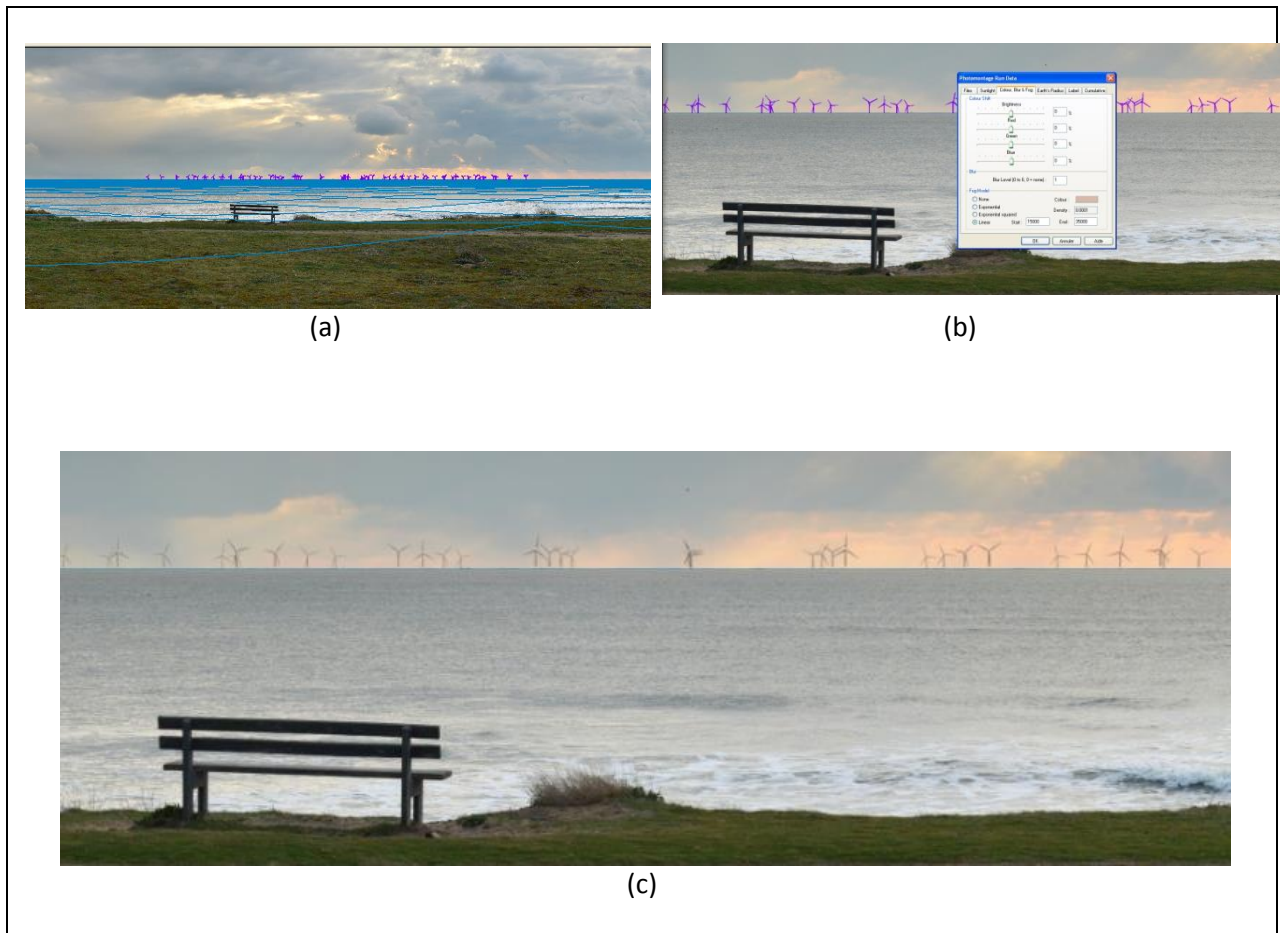


Figure 18 : Phase de rendu visuel dans une session WindFarm : (a) rendu « fil de fer », permettant de valider l'allure globale. (b) Un facteur d'atténuation est réglé pour simuler la variation de visibilité en fonction de la zone. (d) Rendu final dans Windfarm avant retouches.

Compte tenu de l'éloignement du parc, il est indispensable de faire intervenir 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 Dmin et 100% à DMax. 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 DMin et Dmax sont effectués sur la base de l'observation d'éléments du paysage existant (ex : Yeu pour les points de vue de Noirmoutier) situés à des distances similaires. Cependant, des ajustements sont possibles, l'objectif étant de ne jamais totalement masquer les éoliennes les plus lointaines, tout en donnant à voir une certaine "profondeur" de champ.

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 18).

- 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* [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.

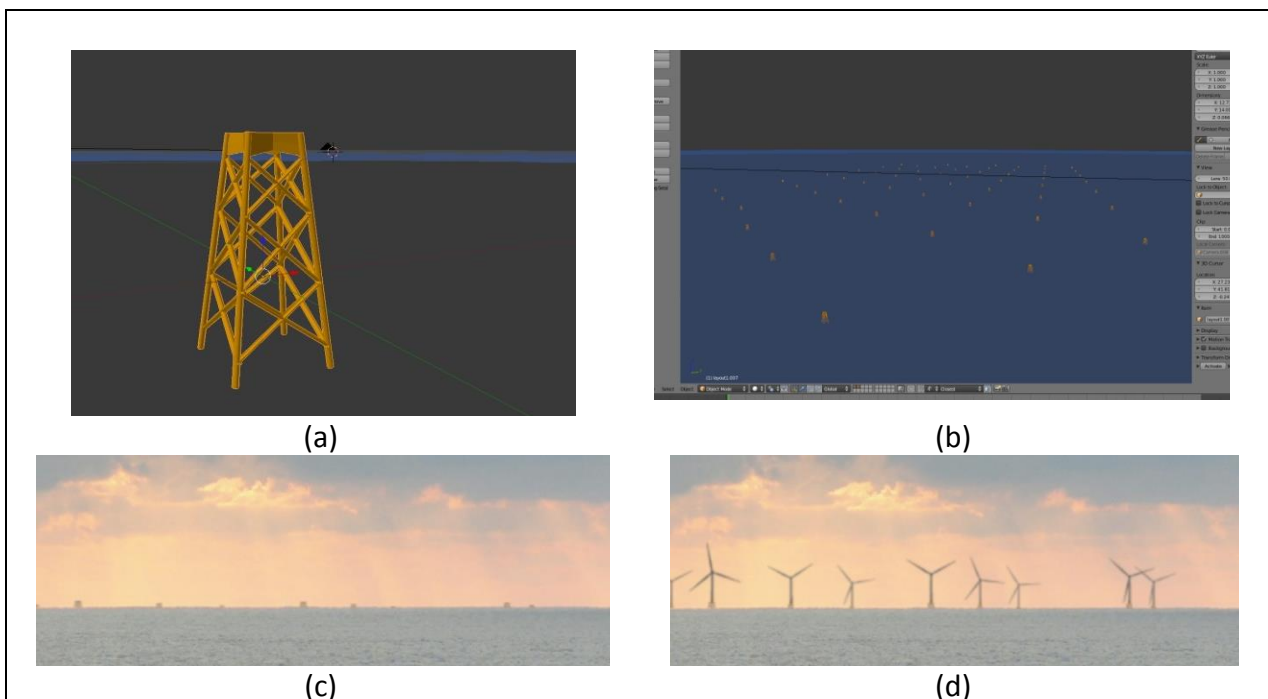


Figure 19 : Rendu des fondations « jacket » : (a) la modélisation 3D est importée dans le logiciel Blender. (b) Les jackets sont positionnées à l'emplacement des éoliennes. (c) Un calque contenant uniquement les jackets est généré. (d) fusion avec le calque contenant les éoliennes.

D'autres post-traitements doivent aussi être appliqués :

- Éléments occultants : certains éléments du champ proche (personnages, poteaux, bateaux, etc.) peuvent masquer certaines éoliennes, à l'insu du logiciel de rendu. Il faut donc procéder manuellement à leur occultation (Figure 20).
- Les fondations « jackets » (éléments métalliques assurant l'ancrage des éoliennes au fond marin) ne sont pas modélisées dans *WindFarm*. Ils sont donc ajoutés en post-production : un modèle 3D des jackets est importé dans le logiciel de modélisation *Blender*, 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 (voir Figure 19).

- Prise en compte de l'interface avec la mer : *Windfarm* ignorant le concept de vagues (la mer est considérée comme une surface plate), la base des jackets est légèrement estompée pour rendre l'image plus réaliste.
- Le poste de livraison en mer n'est pas modélisé dans *Windfarm* et doit donc être ajoutée manuellement en 2D dans le photomontage, à partir d'images existantes (Figure 20). La position de cette station est connue avec précision dans le projet, son azimut dans le panorama l'est donc également.

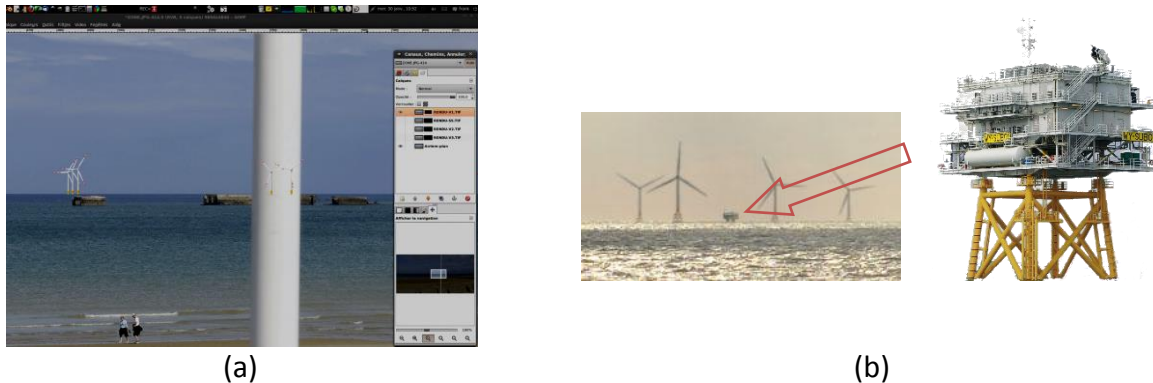


Figure 20 : Retouches finales du photomontage. (a) Windfarm ne modélisant pas finement le paysage, certains éléments occultants empêchent la visibilité de certaines éoliennes qui doivent être effacées manuellement. (f) Le poste de livraison électrique doit aussi ajoutée a posteriori dans l'image, sous forme de calque 2D.

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 du photomontage

L'objectif des photomontages objets de l'étude est de pouvoir présenter au public, lors du débat public organisée par la commission particulière du débat public, une vue aussi fidèle que possible du futur parc éolien. Pour juger de façon objective de l'impact visuel du parc des îles d'Yeu et de Noirmoutier, 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 construites. 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 60°, adapté aux impressions sur un format A3 paysage, soit environ 80 cm x 40 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 impose d'augmenter la dimension des supports pour que les éoliennes soient rendues sur plus de quelques pixels. De plus, la nature dégagée du paysage impose que l'on voit des éléments côtiers facilitant l'appréciation de l'impact des éoliennes, ce qui conduit à augmenter le champ visuel représenté (180° dans le cas présent), et donc, à élargir le support. Il s'agit alors de trouver le bon compromis entre dimensions du support, étendue du champ visuel et détail des éoliennes.

Deux types de supports existent pour l'étude du projet de parc éolien en mer des îles d'Yeu et de Noirmoutier :

Support plan

Les photomontages du projet sont accessibles sur Internet à l'adresse <http://geophom.fr/eolienmer-pyn/index.html>. Ils sont alors représentés sur un support de type écran, via une fenêtre de visualisation plane de dimension fixe. La distance d'observation D dépend de la largeur physique L de la fenêtre 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 aux environs de 60°. Dans ce cas, on indique donc à l'utilisateur la distance à laquelle il doit se placer pour percevoir une vue proche du réel.

Ce support numérique interactif a l'avantage d'une grande accessibilité. Cependant, beaucoup d'écrans actuels ont une résolution limitée (typiquement inférieure à 100 points par pouce), ce

qui ne permet pas toujours de bien restituer de fins détails comme des mâts d'éoliennes à l'horizon. La restitution sur un angle aussi limité ne donne pas non plus une image très conforme à une observation sur place, où on peut embrasser tout l'horizon d'un seul regard. Enfin, si l'écran est trop petit, la distance de vue le sera également, ce qui oblige l'utilisateur à « loucher » sur le support, et donc à observer la scène dans des conditions bien différentes d'une observation à distance (absence de convergence visuelle).

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

Cependant, malgré ces réserves, le site Internet développé par Géophom pour ce type de visualisation respecte pleinement le cahier des charges explicité ci-dessus. Les photomontages statiques ont par ailleurs été enrichis par une animation de la rotation des éoliennes (ainsi que du clignotement des balises dans les vues diurnes comme nocturnes), ce qui accroît notablement le réalisme de la simulation.

Support courbe

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 est de grande taille puisqu'il s'agit d'une vue cylindrique de 3 m de développé. Pour ce support, A vaut 180 degrés, de sorte que $D = L / \pi$ soit environ 1 m (voir Figure 4, page 7). Cette vue est imprimée grâce à une imprimante dédiée de bonne résolution (300 points par pouce) à partir de supports numériques originaux (33140 pixels pour le panorama entier). On obtient donc une résolution angulaire d'environ 180 pixels par degré. Ce chiffre est à rapprocher de la résolution angulaire de l'œil humain (détails perceptibles : environ 1' d'arc), qui est d'environ 0,3 mm à 1 m – alors qu'ici le pixel du panorama mesure 0,1 mm. Autrement dit, le rendu obtenu est supérieur en résolution à ce que peuvent voir les meilleurs yeux humains, et la distance d'observation est confortable. Ce type de support est donc approprié pour juger de l'apparence du parc éolien en termes de proportions vis-à-vis du panorama global, pour peu qu'il soit éclairé uniformément avec suffisamment d'intensité. 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.

6. Conclusion

Cette section a présenté, dans le détail, la méthodologie et les procédures utilisées lors de la création des photomontages utilisés dans le cadre du Débat Public des parcs éoliens en mer, en particulier pour le parc des îles d'Yeu et de Noirmoutier, étude réalisée par le cabinet Géophom et commanditée par la société Eoliennes en Mer Iles d'Yeu et de Noirmoutier². L'expertise poussée de cette réalisation permet de conclure que les moyens et méthodes engagés sont conformes aux préconisations de l'Etat en la matière [Impact2010]. Les solutions mises en œuvre pour leur réalisation sont par ailleurs en phase avec l'avancement actuel des connaissances et des techniques de réalisation des photomontages. L'expertise conclut également à la sincérité de la démarche employée, en ce qu'elle respecte un cahier des charges clair et transparent, et engage les moyens nécessaires et suffisants pour la réalisation des objectifs fixés.

² La méthodologie suivie ne dépend pas, pour l'essentiel, de la zone géographique effective du parc. La section suivante s'intéressera aux aspects spécifiques du parc éolien des îles d'Yeu et de Noirmoutier.

C. L'impact visuel du projet de parc éolien en mer des îles d'Yeu et de Noirmoutier

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 psycho-cognitive (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*³, sont en effet des repères familiers du paysage pour les habitants. La comparaison aux amers, sur des bases objectives, permet donc de relier concrètement une impression visuelle de l'existant au futur paysage éolien. Elle permet également aux observateurs de se déplacer sur des sites de prises de vue présélectionnés afin d'apprécier par eux-mêmes, sur la base des données comparatives, l'impact que pourront avoir les futures infrastructures dans le paysage.

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

2. Zones d'impact et amers retenus

En utilisant des considérations paysagères [Impact2010], on peut délimiter quatre zones d'impact concentriques:

- La *zone d'influence directe* des éoliennes ne contient aucune terre, l'impact visuel y reste par conséquent limité. Cependant, il est généralement souhaitable, pour l'information publique, d'illustrer l'impact via quelques vues prises depuis un bateau⁴, par exemple depuis la navette entre Fromentine et Yeux.
- L'île d'Yeu constitue la terre *la plus proche du parc*, à environ 12 km des éoliennes. On peut considérer que la visibilité y sera la plus critique, d'autant que l'effacement dû à la rotondité de la terre y est négligeable (voir Annexe 0). Il est donc important de choisir

³ 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.

⁴ Des vues rapprochées peuvent à ce titre constituer un ajout intéressant.

un amer caractéristique sur l'île, qui servira de comparaison. Le château d'eau, culminant à 67 m, est visible depuis de nombreux points de l'île et en particulier depuis les rivages nord, desquels on peut l'observer en même temps que le parc éolien. Il constitue donc un amer de référence pour cette zone.

- Le littoral ouest de Noirmoutier, prolongé par la côte jusqu'à Notre-Dame-de-Monts, constitue une zone de *criticité intermédiaire*, entre 17 et 20 km des premières éoliennes du parc. Sur la presqu'île, le **château d'eau de Barbâtre** est un repère aisément identifiable, visible aussi bien de la majeure partie de Noirmoutier que du littoral continental avoisinant. Un peu plus au sud, le **château d'eau « Kulmino »**, haut de 70 m, constitue un repère incontournable du paysage de la région. Connu de tous, c'est un lieu touristique visible depuis tous les environs. Enfin, à l'extrémité nord-ouest de Noirmoutier, en co-visibilité avec le futur parc, le **phare du Pilier** constitue un amer maritime facile à repérer. Culminant à 42 m, il se situe à 5 km des côtes.
- Au-delà de 30 km, la taille d'une éolienne au-dessus de l'horizon est d'environ 18 minutes d'arc (un très bon œil humain résout 1 minute d'arc). Plus important encore, l'épaisseur atmosphérique rend problématique la détection même des éoliennes dans le champ visuel à cette distance (une « bonne » visibilité en mer est atteinte si on voit des détails à 5 milles de distance, soit seulement 10 km). A titre d'exemple, on peut observer un zoom sur le photomontage de la Figure 21. A cette distance, il est donc difficile de comparer le futur champ éolien à des amers existants plus petits, car ceux-ci seront placés plus près de l'observateur, et donc ne souffriront pas de la même atténuation. Pour cette raison, il a été jugé préférable de ne pas retenir d'éléments de comparaison dans cette zone de *faible impact*.
- Dans la zone rétro-littorale, le **parc éolien situé sur la commune de Bouin** présente des caractéristiques intéressantes pour l'évaluation d'impact:
 - visibilité importante de par sa position littorale, depuis la presqu'île de Noirmoutier et tout le marais breton.
 - nature de l'amer, très similaire aux futures éoliennes, dont elles sont en quelque sorte un modèle réduit: 8 machines de type Nordex N80 (2.5 MW), moyeu à 62 mètres, hauteur totale 102 mètres, soit un facteur d'échelle global de ½ par rapport aux futures éoliennes⁵.
 - caractère emblématique: ce parc, qui a vu le jour en 2003, a fait l'objet d'intenses discussions. Aujourd'hui il fait partie du paysage, et remporte la quasi-unanimité auprès des personnes directement impactées⁶.

Pour ces différentes raisons, ce parc a été ajouté aux amers de comparaison précédents.

⁵ Il s'agit évidemment d'une schématisation, les éoliennes sont de types différents : la longueur des pales des éoliennes du parc de Bouin est de 40 m, soit 64 % de la hauteur au moyeu, contre 74 % pour les éoliennes du futur parc en mer. Cependant le facteur critique pour la visibilité est la hauteur totale atteinte, qui sera le critère retenu dans la suite. Les éoliennes de Bouin font 48,5% de la hauteur des futures machines.

⁶ Un sondage Sofres de janvier 2003 fait état de 94 % des administrés de Bouin favorables au projet.



Figure 21 : Vue depuis Saint-Jean-De-Monts (Note: on a appliqué ici volontairement un fort facteur de zoom). Les éoliennes deviennent difficiles à distinguer à cette distance (30 km) du fait de l'atténuation atmosphérique.



Figure 22 : Les éléments caractéristiques retenus pour l'analyse comparative d'impact.

Une fois les amers sélectionnés (voir Figure 22), et compte tenu de leurs caractéristiques relatives d'aspect visuel, il est possible de dresser un tableau prédictif qui donne, pour un éloignement donné d'une éolienne du futur parc, la distance correspondante de l'amer lui donnant la même taille apparente. En effet, soit H_e la hauteur des futures éoliennes ($H_e=209$ m), et H_a la hauteur d'un amer (ex: $H_a=70$ m pour le Kulmino), alors, pour voir les deux objets

sous le même angle apparent, le théorème de Thalès indique qu'ils devront être placés à des distances respectives D_e et D_a telles que (voir Figure 23):

$$\frac{H_e}{D_e} = \frac{H_a}{D_a}$$

Autrement dit:

$$D_a = \frac{H_a}{H_e} D_e$$

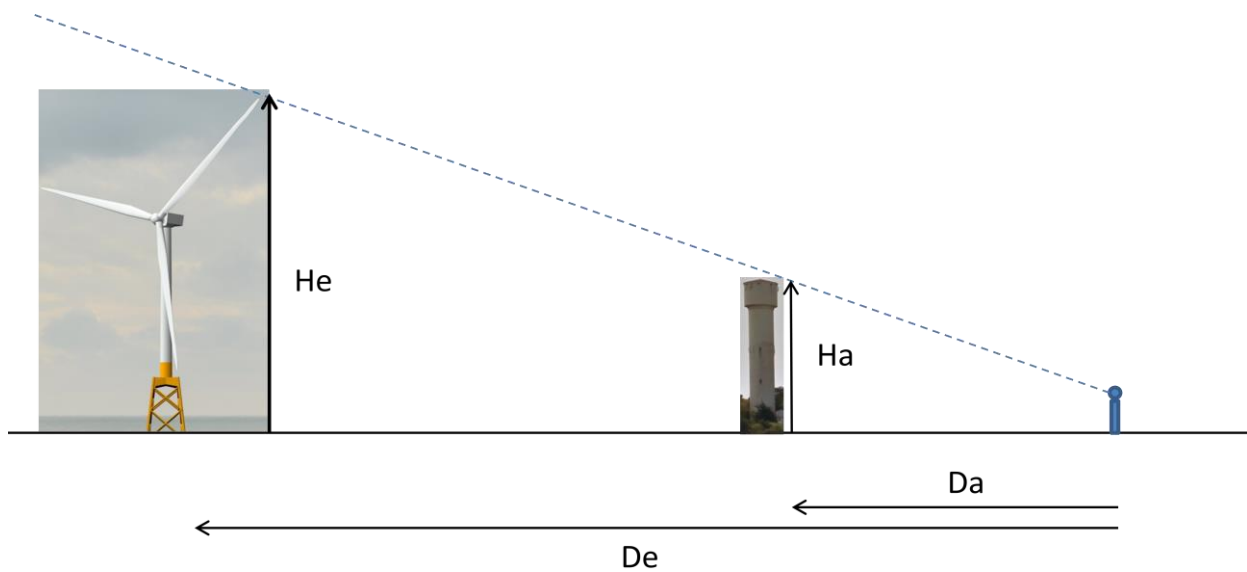


Figure 23 : Rapport d'échelle amer/éolienne.

Dans l'exemple du Kulmino, $D_a \approx D_e / 3$, c'est-à-dire qu'il suffit d'observer le Kulmino à une certaine distance pour se faire une idée de la taille verticale d'une éolienne 3 fois plus éloignée. Bien sûr, cette mesure grossière 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 suivante⁷.

3. Examen des amers

On peut maintenant établir un tableau croisé donnant la distance à un des amers précédemment sélectionnés en fonction de la distance à une éolienne du futur parc, telle que les deux édifices seront vus avec le même angle de vue (et donc la même taille apparente) : voir Tableau 1 ci-dessous. Bien sûr, on tient ici compte de l'effacement dû à la courbure

⁷ Le schéma ci-dessus ne tient pas compte de l'effacement dû à la courbure terrestre, pour des raisons de simplicité. Le calcul effectif d'équivalence lui, en tient compte.

terrestre, qui devient significatif au-delà de 15 km. On a arbitrairement choisi un point d'observation légèrement en altitude pour minimiser cet effet (Altitude = 8 m).

Tableau 1 : tableau croisé de taille équivalente (tous les nombres en km).

Distance éolienne en mer (km)	10	15	20	25
Amers	distance équivalente			
Kulmino	3,5	5,3	7,4	10,5
Barbâtre	3,1	4,8	6,7	9,5
Château d'eau Port-Joinville	3,2	4,9	6,9	9,8
Phare du Pilier	2,5	3,1	4,2	5,6
Eolienne de Bouin	4,9	7,5	10,5	14,9

C'est sur la base de ce tableau d'équivalence des tailles apparentes que l'on va s'efforcer de sélectionner des lieux qui donneront une idée de l'impact visuel d'une future éolienne en mer, par comparaison aux amers.

a) Kulmino

Ce lieu emblématique est visible depuis de nombreux points du territoire, du fait de la végétation peu dense (en dehors de la forêt domaniale) et d'un relief peu prononcé (Marais Breton, altitude entre 2 et 4 m). C'est donc dans cette zone qu'un point d'observation caractéristique devait être choisi. Une observation à 5 km environ permet d'obtenir une vue équivalente à la zone intermédiaire. A 5,7 km au nord du Kulmino, *l'héliport de Fromentine* constitue un observatoire convenable, duquel on a d'ailleurs une co-visibilité avec le Château d'eau de Barbâtre (voir Figure 24). La formule d'équivalence donne environ 16 km, correspondant à la **distance des éoliennes les plus proches, à la pointe nord de Noirmoutier**.

On peut aisément vérifier ce résultat visuellement, en comparant un panorama pris depuis l'héliport vers le sud, et un photomontage à la distance équivalente, par exemple celui pris depuis la digue du port Morin (Panorama 08 sur le site de présentation des photomontages [GeophomYeuNoirmoutier]), dont une vue de détail est présentée Figure 25. On note l'excellente similitude des tailles apparentes. Le Kulmino est bien sûr beaucoup plus visible de par son diamètre de 11,6 m, et son chapeau de diamètre 37,8 m, à comparer au mât des éoliennes du parc (diamètre 6,3 m). On veillera donc à se contenter de comparer les *hauteurs* relatives des deux objets, en sachant qu'une éolienne plus fine (en apparence un mât d'éolienne est 6 fois plus fin que le chapeau du Kulmino) est beaucoup moins visible individuellement.

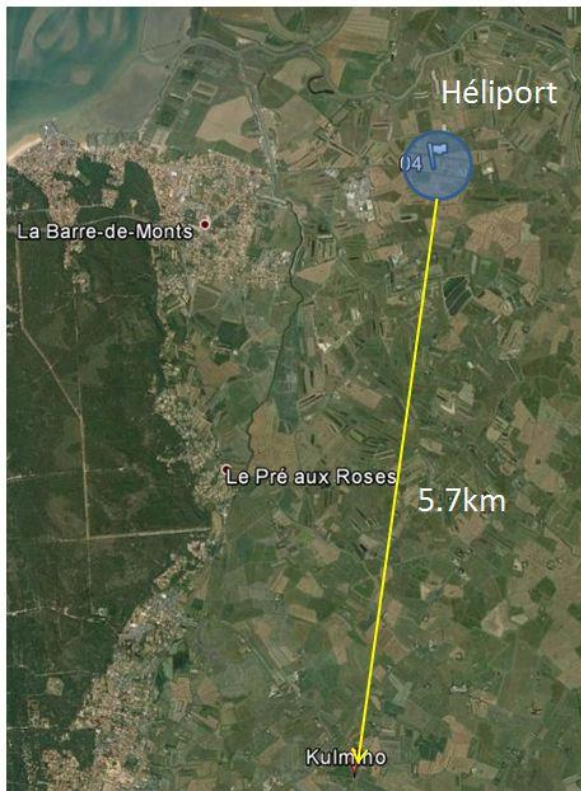
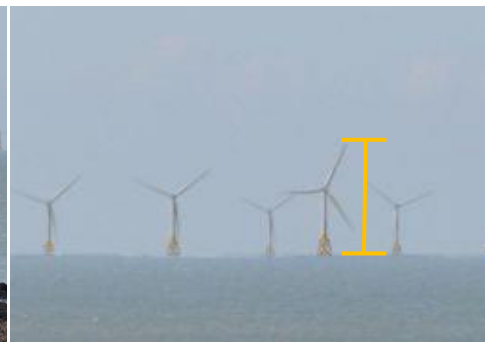


Figure 24 : L'héliport de Fromentine, au bord de la D22. Ce point de vue est étiqueté 04 dans notre nomenclature.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 25 : (a) Détail du photomontage réalisé sur le port Morin. (b) Détail à l'échelle 1 (1 pixel affiché = 1 pixel du panorama). (c) Détail du panorama réalisé depuis l'héliport de Fromentine. (d) Zoom au même facteur.

Pour obtenir une équivalence de distance plus lointaine, correspondant à une vue depuis Notre-Dame-de-Monts (21 km), il faut s'éloigner de l'amer d'environ 8 km. Notre choix s'est porté sur une vue dégagée à l'entrée de la localité de Beauvoir-sur-Mer, au niveau du (voir Figure 26). La distance au Kulmino étant de 8,2 km fournit une équivalence éolienne de 22 km, proche de celle désirée.

Sur le panorama capturé, le Kulmino devient plus difficilement visible (occultation partielle), et l'impact visuel du champ éolien sera modéré (ce d'autant plus qu'il est vu depuis son côté le plus étroit). Une comparaison entre taille calculée et taille mesurée reste très probante (voir Figure 27).



Figure 26 : Localisation du point de vue à la sortie sud de Beauvoir-sur-Mer, numéroté 05 dans notre nomenclature.

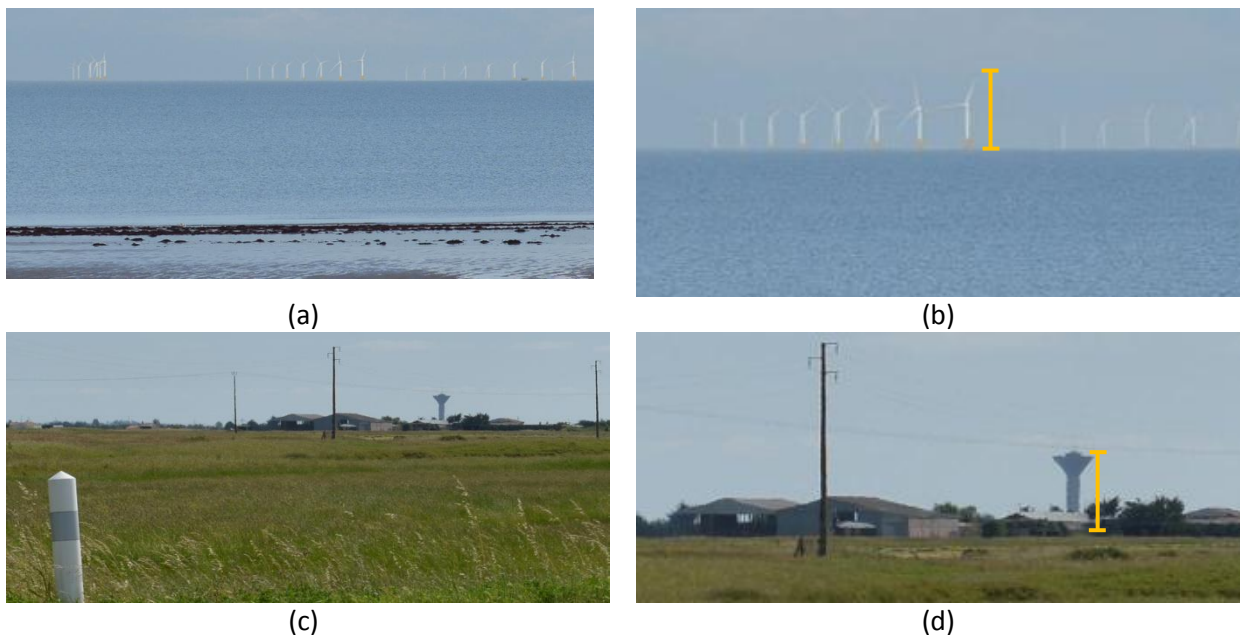


Figure 27 : (a) Détail du photomontage réalisé depuis la plage de Notre-Dame-de-Monts. (b) Détail à l'échelle 1 (1pixel affiché = 1 pixel du panorama). (c) Détail du panorama réalisé depuis l'entrée sud de Beauvoir-sur-Mer. (d) Zoom au même facteur.

Bien sûr, la comparaison a ses limites, notamment en termes de largeur perçue : le cylindre de la base du Kulmino, « agrandi » à la même taille les éoliennes, aurait une largeur de 36 m (théorème de Thalès), soit 6 fois plus que les aérogénérateurs prévus. La couleur grise du château d'eau le rend aussi très visible sur l'horizon.

b) Le château d'eau de Barbâtre

Situé à l'extrémité sud de l'île, ce château d'eau est un amer bien visible aussi bien de la majeure partie de Noirmoutier que de certains points du littoral continental avoisinant. Deux localisations ont retenu notre attention pour l'étude de l'impact visuel: l'héliport, déjà mentionné, qui a l'avantage d'une co-visibilité Kulmino/Barbâtre, et l'entrée du Gois côté Noirmoutier (voir Figure 28), lieu très bien connu de tous les riverains, dont la vue est bien dégagée vers Noirmoutier comme vers le continent (on y voit clairement les éoliennes de Bouin, sur lesquelles nous reviendrons plus loin).

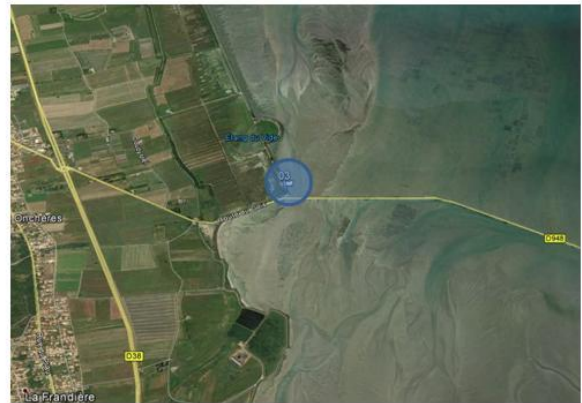


Figure 28 : A gauche : le château d'eau de Barbâtre, avec deux points de vue caractéristiques. A droite : le point de vue numéroté 03 dans notre nomenclature, distant de 3 km, se situe à l'entrée du Gois, côté presqu'île.

Les tables d'équivalence donnent des distances aux éoliennes égales à 10 km pour le point de vue 03 (entrée du Gois) et 18 km pour le point de vue 04 (hélicoptère) respectivement. Cela correspond dans le premier cas à une observation au plus près (en fait le point d'observation le plus proche est à 11,8 km), donc à un impact maximum (pire cas), encore exagéré par le diamètre du château d'eau (évalué à 9,80 m), bien supérieur, en proportion, à celui des éoliennes, environ 6 fois plus fine visuellement !). Il faudra donc considérer ces conditions d'observation comme exagérant l'impact.

La comparaison visuelle corrobore les calculs: le château d'eau de Barbâtre paraît visuellement très impactant par rapport à la simulation éolienne visuellement équivalente, non du fait des hauteurs, très similaires, mais de son diamètre.

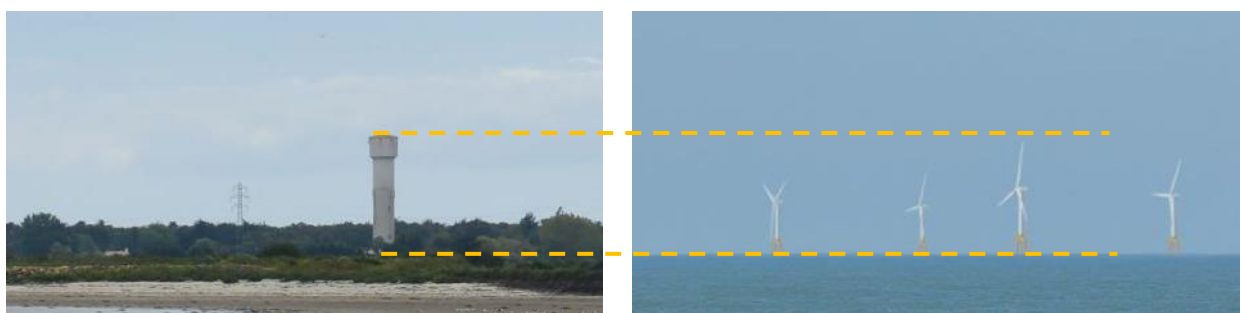


Figure 29 : Vue depuis le passage du Gois (site 03). En bas, comparaison à l'échelle visuelle 1 entre le château d'eau de Barbâtre et les éoliennes vues de la Pointe du But, sur l'île d'Yeu.

Dans le cas du point de vue 04 (hélicoptère), l'emplacement choisi équivaut à voir les éoliennes depuis Port-Morin : on retrouve donc une situation très semblable à celle du Kulmino, lorsqu'il est observé depuis le même emplacement. Autrement dit, *les angles visuels perçus du Kulmino et de Barbâtre sont similaires depuis l'hélicoptère de Fromentine, et correspond, on l'a vu, à un impact intermédiaire, tel que perçu depuis la côte ouest de Noirmoutier. Cette prédiction géométrique est confirmée par comparaison visuelle directe (Figure 30).*

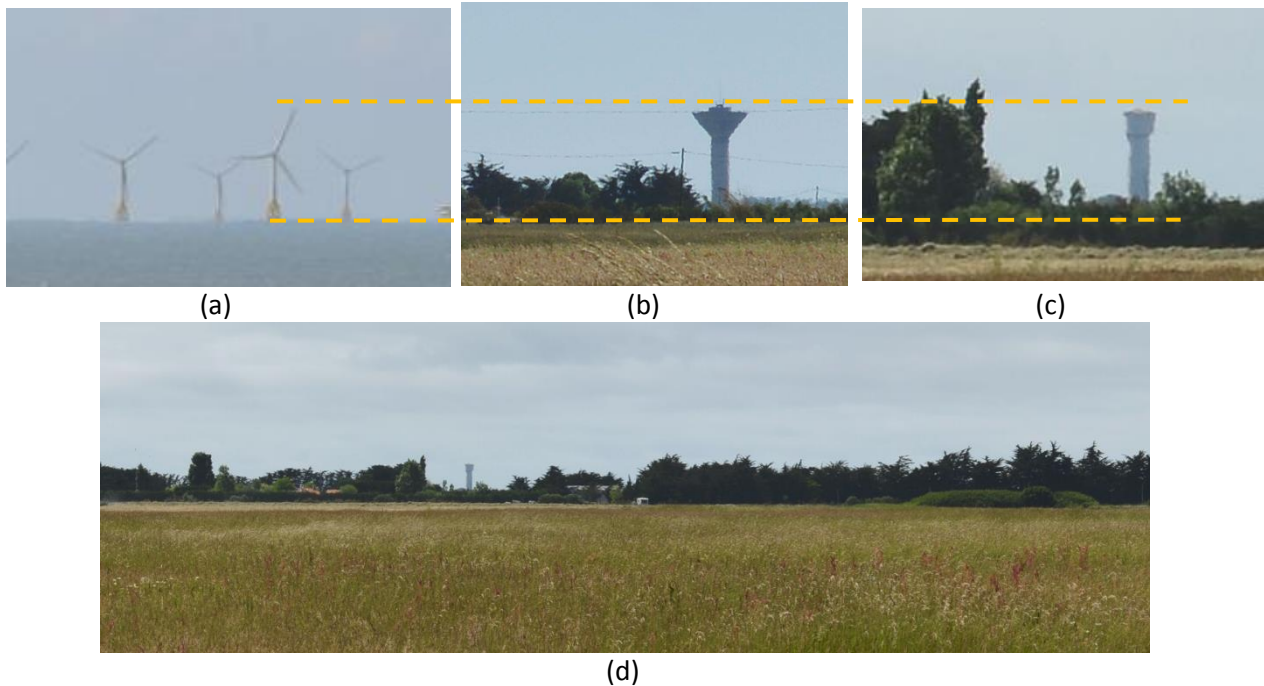


Figure 30 : (a) Zoom échelle 1 du photomontage depuis le port Morin (repris de Figure 27). (b) Le Kulmino vu depuis l'héliport de Fromentine (repris de Figure 27). (c) Le château d'eau de Barbâtre depuis le même endroit (d) vue plus générale du point de vue dans la direction de Barbâtre.

c) Le château d'eau de Port-Joinville

Ce château d'eau s'élève à 67 m d'altitude au dessus du niveau moyen de la mer (50 m de hauteur). Il est en théorie bien visible sur l'île mais cette visibilité tend à être compromise par les nombreux éléments occultants (voir un exemple à seulement 2 km de distance, Figure 31).

Or, pour obtenir une taille apparente équivalente à celle d'une éolienne depuis un point de vue proximal (12 km environ), le point de vue doit être placé à environ $(67/209)*12 = 3,8$ km. La Figure 32 montre le lieu de ces points de vue: ils sont situés très au sud de l'île, d'où la visibilité totale du château d'eau, après prospection, s'est avérée très problématique. C'est la raison pour laquelle il a été décidé de ne pas retenir, au final, de comparaison visuelle sur cet amer.



Figure 31 : vue sur le château d'eau de Joinville depuis la plage de Ker-Chalon (distance 2 km environ). Malgré la vue dégagée, la topographie, le couvert végétal et le bâti dégradent déjà la vue à cette distance.



Figure 32 : Lieu des points d'observation depuis lesquels on verrait le château d'eau de Port-Joinville avec une taille apparente équivalente à une éolienne à 12 km. On voit que ces points de vue potentiels sont situés au sud de l'île. Pour une vue équivalente située à 20 km, seule l'extrême pointe est de l'île pourrait convenir. Après examen du site, aucun point de vue convenable n'a pu être retenu.

d) Le phare du Pilier

Situé à 5 km au large de la pointe nord-ouest de la presqu'île de Noirmoutier (pointe de l'Herbaudière), il culmine à 42 m. De la pointe, il sera visible en même temps que le parc, distant d'une vingtaine de kilomètres, bien que dans une direction distincte d'environ 45°. Depuis ce point d'observation, le facteur de taille relatif peut être calculé à $(42 \times 19,1)/(5 \times 198) = 0,81$ (on remarque que, en suivant la table d'effacement fournie dans l'Annexe 2, la rotondité de la terre diminue ici la visibilité des éoliennes les plus proches d'environ 5 %). Autrement dit, les éoliennes seront environ 25 % plus hautes au-dessus de l'horizon que le phare. Cela se vérifie aisément sur les photomontages créés depuis cette zone, par exemple le photomontage 04 (voir Figure 33).

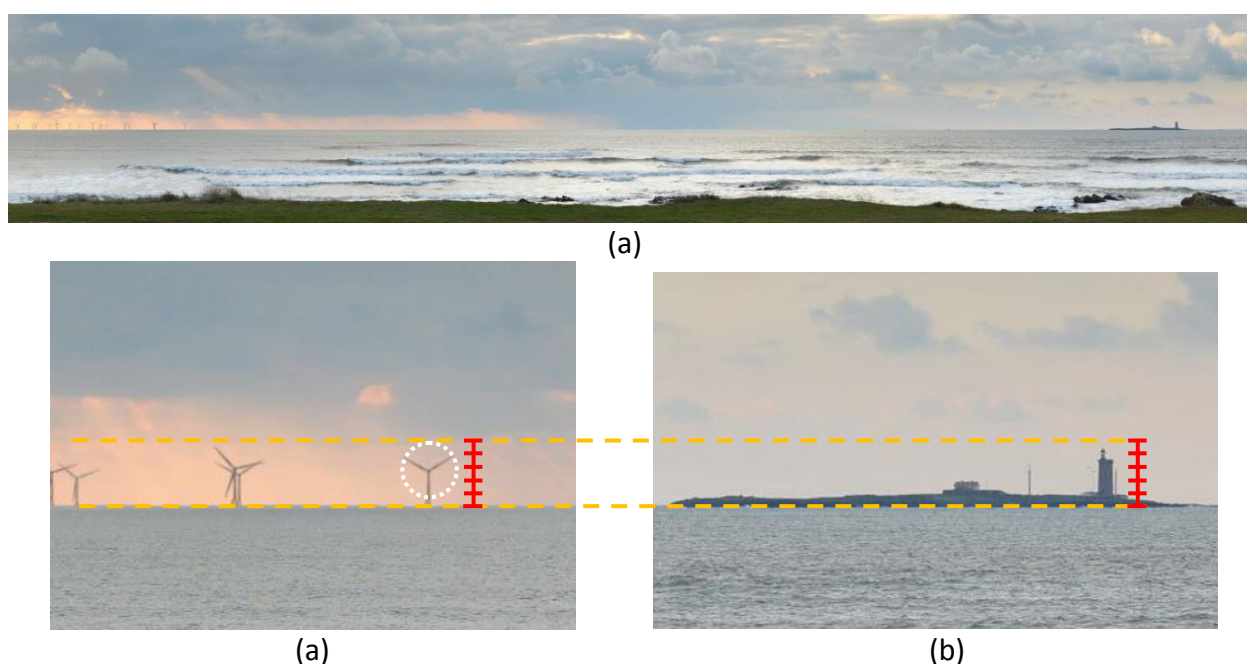


Figure 33 : Comparaison visuelle entre une éolienne du futur parc et le phare du Pilier, depuis la Pointe de l'Herbaudière. (a) Vue générale, numérotée 04 dans la nomenclature des photomontages. (b) et (c) sont extraites de (a), et présentées ici avec le même facteur d'échelle - très agrandi par rapport à la vue réelle.

Bien entendu, l'impression visuelle est très différente : d'un côté, un ensemble de structures fines dispersées sur l'horizon, de l'autre, un objet massif, sombre, quatre fois plus proche, posé sur un îlot rocheux qui attire le regard. La comparaison d'impact trouve ici ses limites subjectives, bien qu'il soit permis de penser que le phare restera l'élément dominant perceptuellement, dans la direction du large.

e) Les éoliennes de Bouin

Cet ensemble de huit éoliennes d'une puissance unitaire de 2,5 MW constitue une base de comparaison très intéressante, du fait d'une part de sa position, qui le rend visible depuis de très nombreux points du littoral, d'autre part du fait de sa nature même, similaire au futur parc (les machines ont une hauteur totale approximativement deux fois moindre que les futurs

éoliennes du parc éolien des îles d'Yeu et de Noirmoutier). Le parc de Bouin a été mis en service en 2003, et les riverains en ont donc maintenant une image mentale stable : il "fait partie du paysage" de la zone. Le rapport global 1/2 de taille rend les formules d'équivalences très commodes, il suffit de se positionner :

- à 6 km des éoliennes de Bouin pour simuler la taille perçue "au plus près" (depuis l'île d'Yeu) du futur parc,
- à 9 ou 10 km pour simuler la vue depuis le littoral de Noirmoutier (situation intermédiaire, impact significatif),
- à 13 ou 14 km pour simuler une vue lointaine (Saint Jean-de-Monts, pointe de Saint-Gildas).

Sur cette base, trois points de vue ont été sélectionnés :

- Le carrefour de la D59 et de la D21, à 2,5 km à l'est de Bouin, point numéroté 01 (Figure 34), qui correspond à la situation proximale ;
- Le littoral de la pointe sud de l'île de Noirmoutier, côté est, à la sortie du pont, point numéroté 02 (voir Figure 35), correspondant à la situation intermédiaire, dans sa partie continentale (Notre-Dame-de-Monts)
- L'entrée du passage du Gois, numéroté 03, déjà décrit Figure 28, qui fournit une équivalence de vue à la côte de Noirmoutier (voir distances au parc de Bouin sur la Figure 36).



Figure 34 : En haut: distance du point de vue 01 au parc éolien de Bouin (officiellement Parc Eolien de la Côte de Jade). En bas: situation géographique, à l'intersection de la D21 et de la D59.

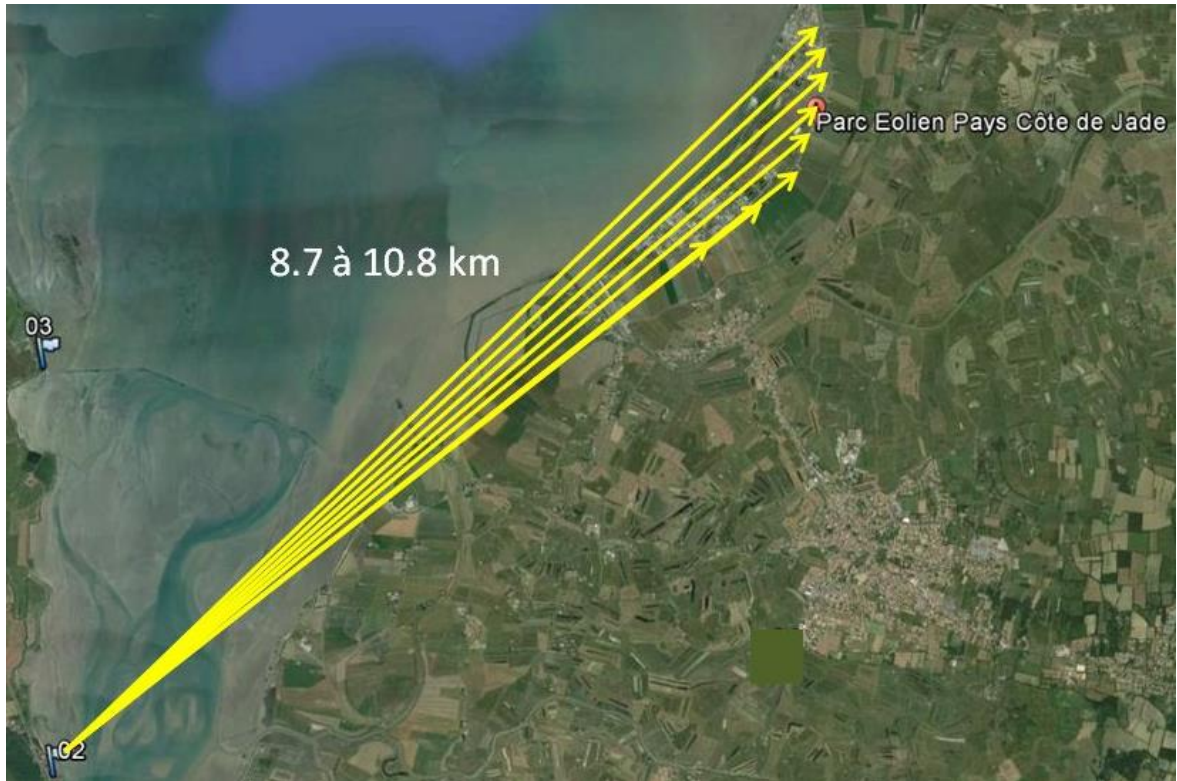


Figure 35 : Haut: distance du point de vue 2 au parc éolien de Bouin. En bas: situation géographique, à l'extrémité sud de Noirmoutier, sur le littoral près de la rue de la pointe.

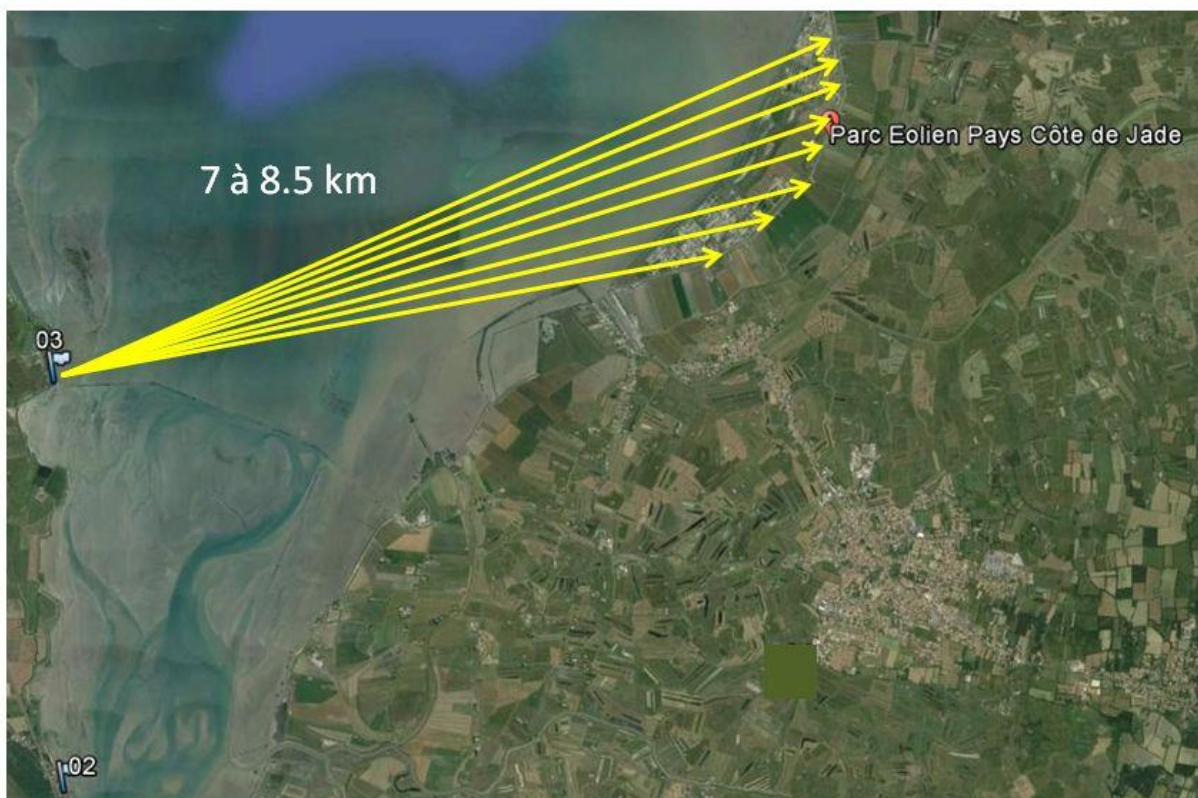


Figure 36 : Distances du point de vue étiqueté 03 (entrée du Gois) au parc éolien de Bouin.

Les photos prises depuis ces points de vue sont en accord avec les prédictions métriques: ainsi, depuis le point de vue 01, la taille perçue des éoliennes de Bouin est très semblable à celle des éoliennes les plus proches, vues depuis la Pointe du But, au nord de l'île d'Yeu (photomontages numérotés 29 et 30 sur le site web de présentation). Depuis le point de vue 03, on visualise un impact équivalent à celui qu'aurait une éolienne du futur parc, depuis Port-Morin (photomontage numéroté 9) ou le parking du lieu-dit "La Loire" (photomontage 10). Enfin, plus éloigné, le point de vue 02 permet de simuler l'impact depuis Notre-Dame-de-Monts (photomontage numéro 19).

On peut se faire une idée de la justesse de comparaison à l'aide de la Figure 37, qui représente côte-à-côte les vues à la même échelle des différents points de vue et des photomontages correspondants. Il faut évidemment rappeler que ces images sont de forts grossissements des vues réelles (si ce document est imprimé sur une feuille A4, il faut se positionner à plus de 3 m pour obtenir l'échelle visuelle réelle !). On voit, là encore, que la correspondance de taille est excellente.

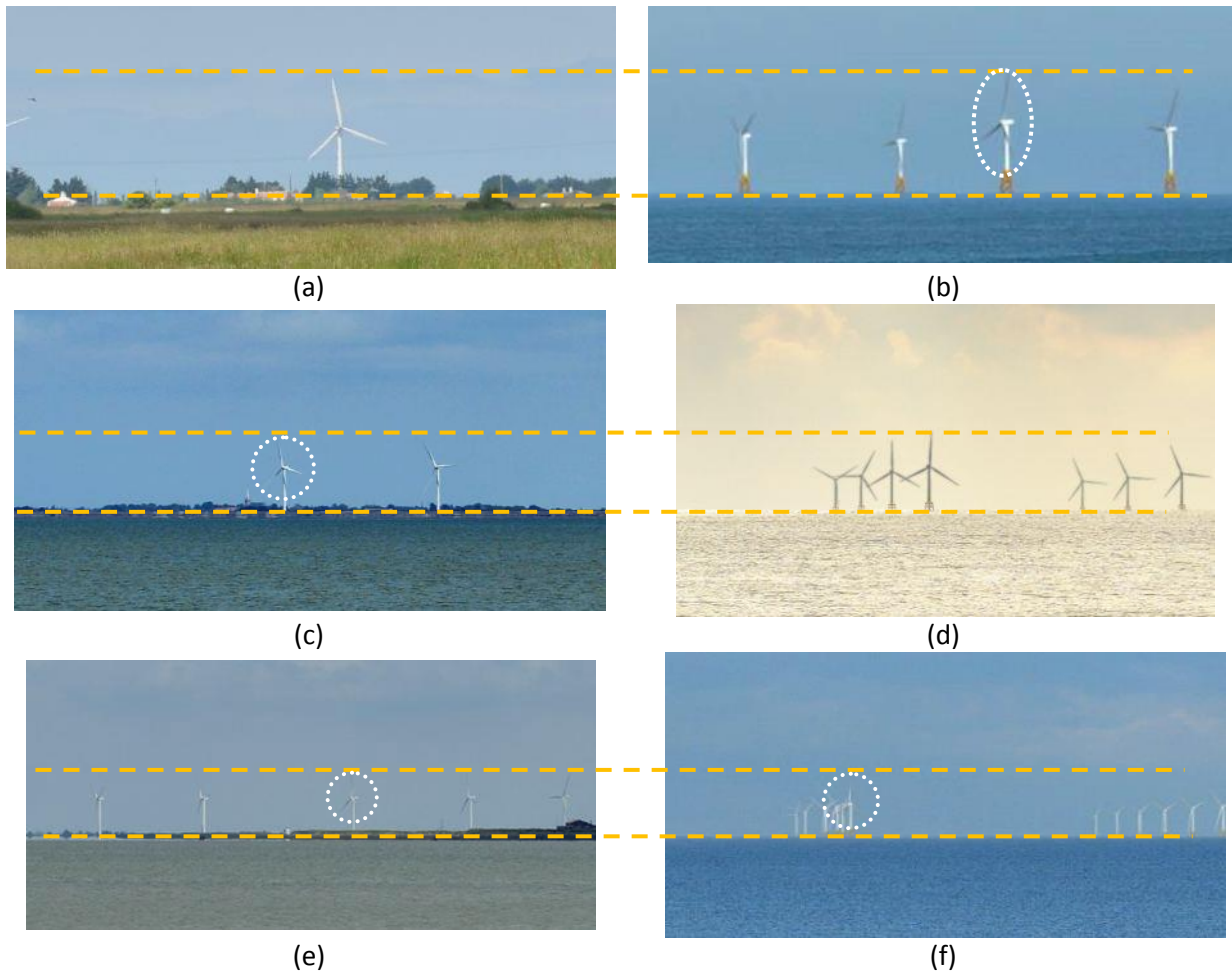


Figure 37 : Comparatif visuel entre le futur parc éolien et le parc de Bouin. (a) vue de l'éolienne centrale de Bouin depuis le point de vue 01 (distance 5,5 km). (b) vue de l'éolienne la plus proche depuis la Pointe du But (distance 11,8 km). (c) Vue de l'éolienne la plus lointaine de Bouin, depuis le point de vue 03 (Gois) - le disque en pointillé est le parcours des pales. (d) Photomontage des éoliennes les plus proches depuis la digue de Port-Morin (distance 17 km). (e) Vue de Bouin depuis le point de vue 02, à 10,5 km environ. (f) Photomontage depuis Notre-Dame-de-Monts (21,2 km).

4. Conclusion

L'étude comparative de l'impact visuel, à partir de l'observation d'éléments caractéristiques du paysage existant (les amers), se révèle particulièrement utile pour collecter des données objectives autant que subjectives sur l'impact du futur parc éolien des îles d'Yeu et de Noirmoutier. Sur la base de campagnes de terrain spécifiquement menées à cet effet, cinq points de vue particuliers ont été identifiés et répertoriés (voir Tableau 2 ci-dessous, dans lequel on a ajouté le photomontage fait à la pointe de l'Herbaudière d'où le phare du Pilier est visible). Depuis ces points de vue, on peut observer (lorsque les conditions météorologiques s'y prêtent) au moins un des cinq amers mentionnés. L'observation de cet amer donne alors une idée assez exacte de la hauteur des futures éoliennes, depuis l'un des points de vue répertoriés dans la campagne de réalisation des photomontages (on a sélectionné des points de vue emblématiques des situations les plus critiques, à des distances inférieures à 20 km).

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

Le site éolien de Bouin forme une base de comparaison très intéressante, car constitué de machines structurellement assez similaires (à une échelle proche de ½) aux futurs aérogénérateurs. Par ailleurs, leur nombre (8) correspond exactement au nombre maximum de machines formant le premier rang du futur parc éolien (par exemple vu depuis Noirmoutier). On ne peut donc que recommander au lecteur soucieux de mesurer l'impact du futur parc d'aller sur l'un des sites répertoriés (par exemple, à l'extrémité du Gois, côté île): il pourra y juger, par lui-même, de l'impact visuel des futures éoliennes, qui seront des machines deux fois plus grandes et deux fois plus lointaines que les générateurs de Bouin.

Tableau 2: table récapitulative de l'observation comparative des amers de référence.

Numéro du point de vue	Localisation	Amer(s) observé(s)	Distance équivalente au parc	Photomontage de comparaison
01	intersection de la D21 et de la D59	Eoliennes de Bouin	12km	Pointe du But (Yeu)
02	Rue de la Pointe (Noirmoutier)	Eoliennes de Bouin	21 km	Notre-Dame-de-Monts
03	Extrémité du Gois (Noirmoutier)	Eoliennes de Bouin	17 km	Digue de Port-Morin
04	Héliport de Fromentine	Barbâtre / Kulmino	18 km	Digue de Port-Morin
05	Sortie sud de Beauvoir-sur-Mer	Kulmino	22 km	Notre-Dame-de-Monts
Photomontage 04 du site web	Pointe de l'Herbaudière	Phare du Pilier	19,1 km (vraie distance)	Pointe de l'Herbaudière

D. Synthèse

La présente étude avait pour objectif de valider la méthodologie utilisée par la société Géophom, mandatée par le maître d'ouvrage pour évaluer aussi précisément que possible l'impact visuel du projet de parc éolien des îles d'Yeu et de Noirmoutier. Le travail a été divisé en deux grandes sections : d'une part, une validation méthodologique de la procédure de création des photomontages servant de support au Débat Public, 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 des îles d'Yeu et de Noirmoutier 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.

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

En guise de conclusion, 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. Le support le plus adapté à une restitution fidèle reste à ce jour les panoramas sur grand écran cylindrique, tels que ceux réalisés pour l'information du public riverain du site.

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 œuvre⁸. 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 d'écrans « transparents » implantés sur les principaux lieux d'observation. Ces technologies seront accessibles en termes de coût 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.

⁸ 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...

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.

[GeophomYeuNoirmoutier] Projet de parc éolien au large de Yeu-Noirmoutier. Livret de photomontages réalisé par le cabinet Géophom. Disponible sur <http://geophom.fr/eolienmer-pyn/presentation.html>

[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

[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.

F. Annexes

Annexe 1 : Choix du capteur photographique pour l'étude

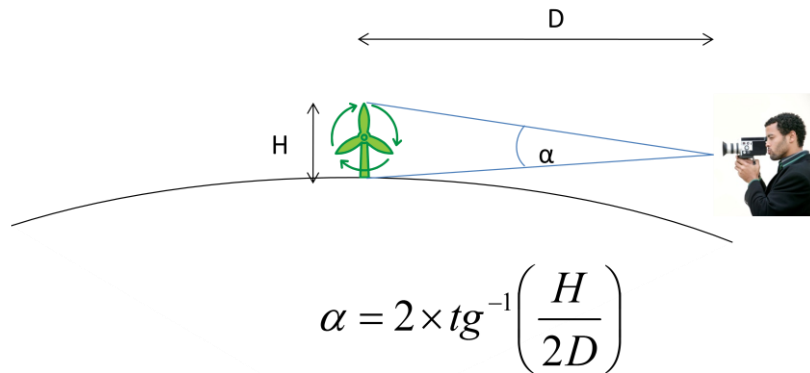
Le choix de l'appareil photographique numérique (APN) et de l'optique de capture des photographies servant de base aux photomontages doit être guidé par un seul critère essentiel : reproduire la vision humaine. Or ce choix est délicat par nature, car la vision humaine est tout sauf une vision statique 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. On évitera toujours les objectifs « grand angle » (à courte focale), qui peuvent certes capturer directement un angle panoramique, mais introduisent de très fortes aberrations optiques impropres à la restitution fidèle du paysage.
- *Résolution de l'œil* : Notre vue permet de percevoir de très petits détails, de l'ordre de 1 mm à 3 m. A 10 km, nous voyons donc (en théorie) des structures d'environ 3 m. Mais là encore, cette donnée brute doit être modulée car nous ne *voyons* pas tous les détails, et heureusement ! La plupart des détails fins sont ignorés par le cerveau qui s'intéresse à reconnaître les objets de son environnement, et donc groupera (souvent à l'insu même de l'observateur) les structures fines en « paquets » pertinents, en fonction de critères liés à l'attention : des objets en mouvement, ou dont la couleur tranche par rapport au fond seront alors détectés instantanément, alors que parfois certains gros objets seront ignorés car l'attention du sujet sera 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.

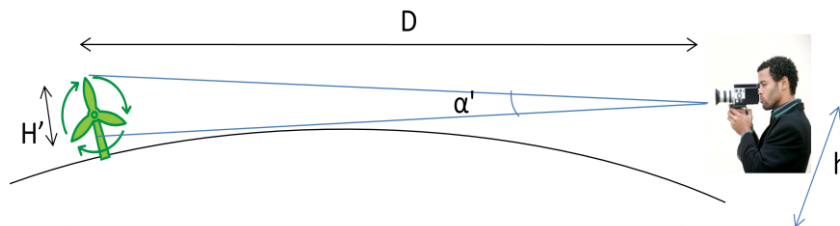
L'appareil choisi pour l'étude du futur parc éolien des îles d'Yeu et de Noirmoutier est le Nikon D800E pourvu d'une optique de 50 mm. Cet APN est dépourvu de filtre passe-bas qui permet de restituer un « piqué » d'image très adapté à la tâche de photomontage. Les photographies sont téléchargées au format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

Annexe 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 diminué 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 = 209 m pour une éolienne du parc éolien des îles d'Yeu et de Noirmoutier, et $D_t = 12740$ km (diamètre terrestre)

D	α (degrés)	α (minutes d'arc)	Effacement (m)	Effacement (%)	Hauteur visible (m)
1 km	11,93	716	0	0	209
2 km	5,98	359	0	0	209
5 km	2,39	144	0	0	209
10 km	1,20	72	2	1	207
15 km	0,80	48	8	4	201
20 km	0,60	36	18	9	191
25 km	0,48	29	32	16	177
30 km	0,40	24	50	24	159
35 km	0,34	21	72	35	137
40 km	0,30	18	98	47	111

Annexe 3 : CV - 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 du grand équipement immersif EVE. 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