



Eoliennes Offshore du Calvados



PROJET de PARC EOLIEN de COURSEULLES-SUR-MER

Expertise des simulations visuelles

Jean-Marc Vézien

Juin 2013

Table des matières

A.	Introduction – Objectif de l’expertise	4
1.	Contexte : le parc éolien de Courseulles-sur-Mer.....	4
2.	L’impact visuel éolien : définition, mesures.....	5
3.	Les objectifs de l’expertise	7
4.	Plan du rapport.....	8
B.	Examen de la méthodologie d’évaluation de l’impact visuel.....	10
1.	L’impact visuel : une mesure subjective par des instruments objectifs	10
2.	Processus de conception du photomontage d’impact.....	14
3.	Capture des supports panoramiques	14
4.	Photocomposition	17
a.	Assemblage panoramique.....	17
b.	Photomontage 3D	18
5.	Rendu visuel final et supports de présentation	22
a)	Rendu visuel	22
b)	Présentation du photomontage.....	26
6.	Conclusion	29
C.	Evaluation des photomontages de Courseulles-sur-Mer.....	29
1.	Zone d’impact et pertinence des points de vue choisis.....	29
a)	Zone critique.....	32
b)	Zone intermédiaire.....	34
c)	Zone lointaine.....	34
2.	Choix des échantillons temporels	35
3.	Evaluation en contexte.....	37
a)	L’effet pleine lune et les repères visuels.....	37
b)	L’effet d’alignement	40
c)	Les effets de contraste relatif.....	42
4.	Conclusion	44
D.	Synthèse	45
E.	Annexes	47
	Bibliographie.....	47
1.	Choix du capteur photographique pour l’étude	48
2.	Visibilité des structures en mer	49

3. L'expert..... 50

A. Introduction – Objectif de l'expertise

1. Contexte : le parc éolien de Courseulles-sur-Mer

Le site de Courseulles-sur-Mer (Calvados) fait partie des trois champs d'éoliennes en mer dont la construction a été confiée en avril 2012 au consortium Eoliennes Offshore du Calvados, à l'issue d'un appel d'offres gouvernemental (voir Figure 1). Les deux autres sites sont situés à Saint-Nazaire (Loire-Atlantique) et Fécamp (Seine-Maritime).

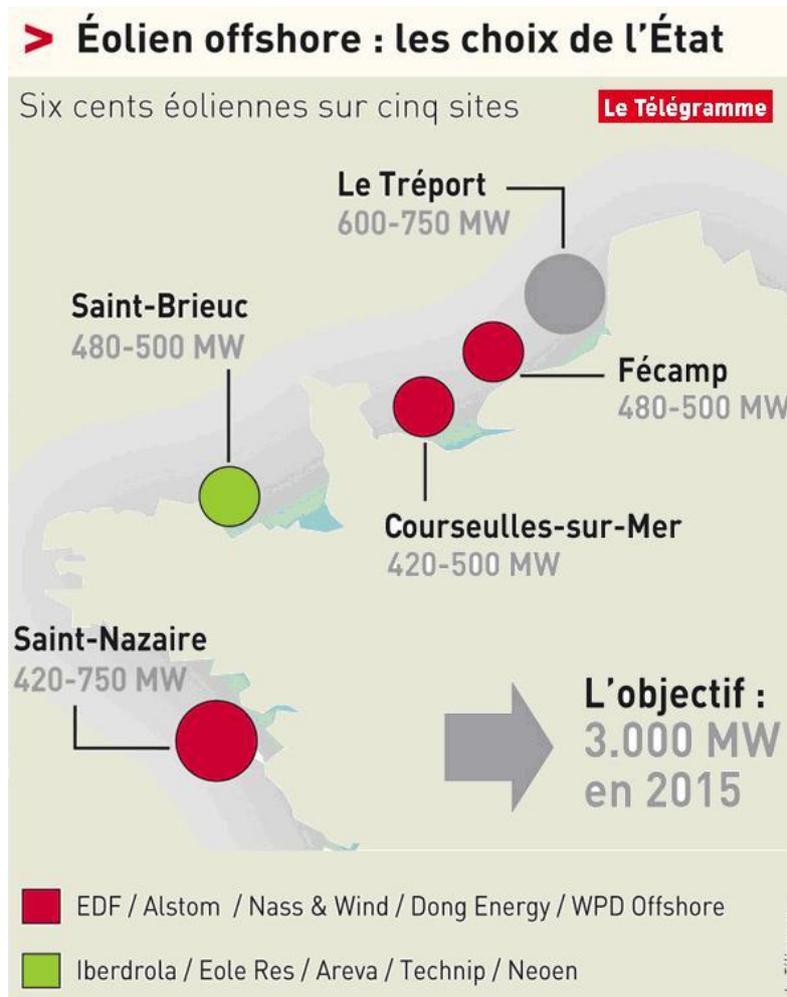


Figure 1: les sites retenus pour l'appel d'offres éolien off-shore de 2012.

Le projet de Courseulles-sur-Mer se compose de 75 éoliennes en mer de type Haliade, d'une capacité unitaire de 6 MW pour une puissance totale de 450 MW. Les éoliennes seront localisées au large des côtes du Bessin, sur une surface globale d'environ 50 km² (voir Figure 2). La production envisagée équivaut à couvrir la consommation électrique moyenne d'environ 630 000 habitants (de l'ordre de grandeur de la population du Calvados). La date de mise en service envisagée est 2018 (voir calendrier prévisionnel Figure 3).

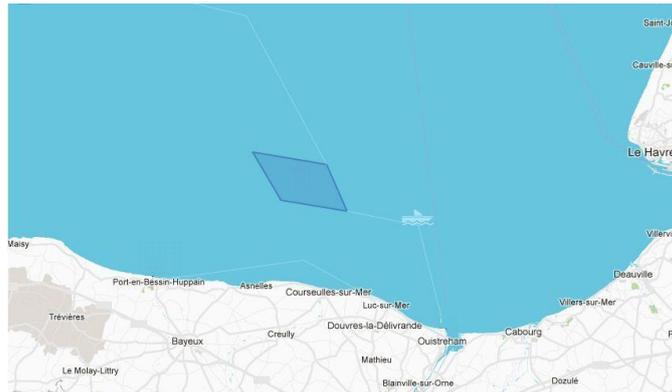


Figure 2: Le site éolien de Courseulles-sur-Mer: vue générale.

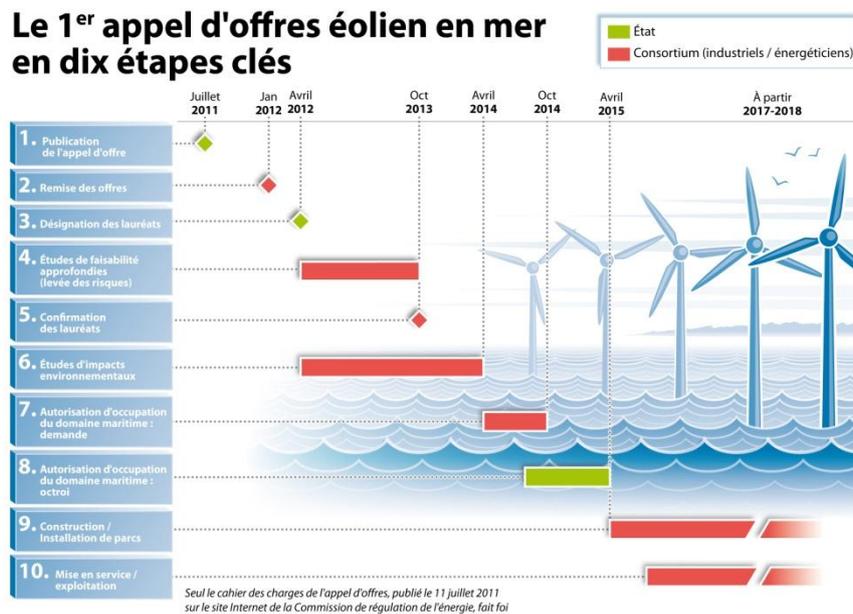


Figure 3: Calendrier prévisionnel de mise en œuvre du projet.

Parallèlement au calendrier technique de l'appel d'offres, et conformément à la loi, le projet de parc éolien de Courseulles-sur-Mer fait l'objet d'un débat public organisé et animé par une Commission particulière du débat public (CPDP), neutre et indépendante. Du 20 mars au 20 juillet 2013, le public concerné pourra examiner l'opportunité, les objectifs et les caractéristiques du projet dans tous ses aspects.

2. L'impact visuel éolien : définition, mesures

De façon générale, une étude d'impact d'un projet de construction consiste en une description du projet, une analyse de l'état initial de la zone concernée, une étude des effets

du projet sur l'environnement (dans toutes ses dimensions) et enfin les mesures envisagées pour éviter, réduire, et compenser les effets négatifs notables.

Tout parc éolien terrestre dont la hauteur de mât est supérieure à 50 mètres fait l'objet d'une étude d'impact avant sa construction. Pour les parcs en mer, la demande de concession d'utilisation du domaine public maritime nécessite la production d'une étude d'impact. La loi (article L.122-1 du code de l'environnement modifié par l'art. 230 de la loi portant engagement national sur l'environnement) confie la responsabilité de l'étude d'impact au maître d'ouvrage du projet, dans notre cas, à Eoliennes Offshore du Calvados.

Engagée en amont du projet, l'étude d'impact dans le domaine éolien fait appel à un ensemble très divers de méthodes d'analyse, et est élaborée par des spécialistes de l'évaluation.

Elle comprend notamment :

- une définition précise de l'aire géographique impactée, fonction de la topographie des lieux;
- l'étude de l'impact sur les milieux naturels: flore, oiseaux, chauve-souris, amphibiens, reptiles, mammifères, invertébrés, etc.
- une étude portant sur la santé et la sécurité publique (notamment en termes d'impact acoustique ou d'éclairage nocturne).
- une étude du point de vue du paysage et du patrimoine.

C'est dans le cadre de ce dernier point que *l'impact visuel* du projet est évalué. C'est un sujet particulièrement sensible car en général, la taille des éoliennes rend illusoire toute tentative de dissimulation : les éoliennes créent de nouveaux paysages, et leur intégration dans la perception quotidienne dépend d'une analyse pertinente des modalités d'accueil dans l'environnement des riverains.

Comme pour les autres composantes de l'impact, l'étude paysagère obéit à une méthodologie bien balisée (voir [Impact2010]) : après la définition précise de l'aire d'étude, l'état initial du patrimoine et du paysage est analysé : relief, végétation, cours d'eau, littoral, sites reconnus (par exemple, dans notre cas, les plages du Débarquement) sont inventoriés pour servir de base à l'analyse des perceptions visuelles caractéristiques du site. Les parcs éoliens en mer comportent ici des propriétés très spécifiques : si les éoliennes sont situées systématiquement loin des observateurs (plusieurs kilomètres en général), elles sont presque toujours perceptibles depuis le bord de mer, en l'absence d'éléments occultants. Par ailleurs, l'étude doit prendre en compte les modifications du littoral dues aux marées, qui altèrent notablement la perception du paysage où s'inséreront les éoliennes.

On tient aussi compte à ce stade de la notion de paysage perçu, directement par les habitants (pour lesquels tel ou tel point de vue sera familier et donc sensible à toute modification), ou par le biais de représentations littéraires, artistiques ou touristiques.

A partir de cette analyse, un ensemble d'outils est exploité pour jauger au mieux de l'impact visuel de l'implantation du parc éolien dans le paysage. Dans le cas d'un parc off-shore, et en l'absence de marqueurs visuels très caractéristiques (comme c'est le cas à Courseulles-sur-Mer) le principal outil exploité 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.

D'autres outils plus dynamiques sont rendus accessibles par les technologies informatiques actuelles, comme les vidéo-montages ou les simulations 3D. Cependant, leur fiabilité peut être mise en doute et par conséquent leur crédibilité dans un processus d'évaluation d'impact reste limitée à cette heure.

3. Les objectifs de l'expertise

Sur la base des directives générales relatives à l'évaluation de l'impact visuel des parcs éoliens offshore (exposées dans la section précédente), le maître d'ouvrage du projet de Courseulles-sur-Mer a commandité une série de photomontages, réalisés par le cabinet d'étude spécialisé Géophom [Geophom12]. Cette série de photomontages illustre par une série de 26 vues significatives prises depuis le littoral concerné (depuis Sainte-Marie-du-Mont à l'ouest jusqu'au Havre à l'est, soit une longueur de côte d'environ 80 km), l'aspect visuel du champ éolien à différentes heures de la journée, et dans les conditions de visibilité optimales (journée très claire d'Août 2012). Trois vues nocturnes complètent la série.

Cet outil de visualisation est accessible sous trois formes distinctes :

- Un cahier imprimé sur un support couleur de haute qualité, au format 2 X A3, présentant les photomontages sur une surface plane.
- Un site internet (<http://www.geophom.fr/PHOM/courseulles>), sur lequel un outil interactif permet d'explorer chaque vue panoramique (ces pages sont optimisées pour une résolution d'écran de 1280x1024 pixels).
- Des impressions grand format de 3 m 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 : Vue panoramique réalisée à partir d'un photomontage. Le sujet doit se placer au centre du cylindre pour retrouver un point de vue fidèle à la réalité.

L'expertise de ces photomontages va porter :

- d'une part, sur la *validation de la procédure complète* ayant présidé à l'élaboration de ces photomontages, procédure comprenant notamment la capture du paysage existant par photographies panoramiques, la création des incrustations des éoliennes virtuelles et la restitution des montages dans les formats détaillés ci-dessus. On jugera dans cette phase de la *sincérité* de l'étude d'impact, en ce qu'elle cherche à reproduire ou non, *de bonne foi*, l'aspect réel du champ éolien tel qu'il devrait apparaître une fois installé sur le site.
- d'autre part, sur l'aspect global du résultat obtenu, en tentant de répondre, à l'aide de critères issus de l'état des connaissances dans le domaine, à 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 - bien qu'étant, in fine, subjectif - 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 penchera sur l'examen de la méthodologie d'évaluation 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 répondent bien aux critères d'une évaluation d'impact selon les règles de l'art. La seconde (partie C) se penchera quant à elle sur la question de l'évaluation de l'impact visuel sur le site de Courseulles-sur-Mer, en apportant des éléments quantitatifs et qualitatifs en complément des photomontages, de manière circonstanciée. Ces éléments font appel à la fois à des mesures intrinsèques au site (et donc spécifiques à cette implantation éolienne), mais aussi à des considérations générales sur la perception d'éléments visuels nouveaux dans un panorama. Une partie finale conclura l'étude en synthétisant ses principaux résultats.

B. Examen de la méthodologie d'évaluation de l'impact visuel

1. L'impact visuel : une mesure subjective par des instruments objectifs

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 off-shore, on divise cette aire en trois zones :

- Une aire d'étude *éloignée*, bornée par la distance de visibilité maximale. Dans le cas de Courseulles-sur-Mer, cette distance peut être fixée à environ 40 km (voir calcul en partie C, section 1).
- Une aire dite *rétro-littorale*, qui s'étend du littoral (le trait de côte, appelé vulgairement bord de mer) à l'arrière-côte. Dans le cas qui nous occupe, ce rétro-littoral est assez homogène sur l'étendue du périmètre, et consiste en une série de plages rectilignes, entrecoupées de quelques pointes. Compte tenu de l'éloignement des éoliennes (distance minimum à la côte : 10 km environ), et de l'altitude faible du littoral (moins de 50 m dans la grande majorité des cas), le rétro-littoral est 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. Aussi, on s'intéressera uniquement au « pire cas », celui d'une observation depuis le bord de mer lui-même, sans élément d'interposition.
- Une aire d'étude *intermédiaire*, couvrant l'espace entre le parc éolien et le littoral. Dans le cas de Courseulles-sur-Mer, elle est composée uniquement d'eau, puisqu'il n'y a aucune île dans un rayon de 40 km autour du parc éolien.

Une quatrième zone, dite immédiate, couvre la surface des éoliennes elle-même. On considérera ici qu'elle ne génère aucun impact du fait de l'éloignement des côtes. Partant de cette division de l'espace, la détermination de l'état initial du patrimoine et du paysage peut être faite. Dans le cas de Courseulles-sur-Mer, cet état doit se focaliser sur l'élément patrimonial fondamental, qui est celui des plages du débarquement et des lieux de mémoire qui leur sont indéfectiblement associés : plages d'Omaha, Utah, Gold, Sword, Fish, etc. (voir Figure 5).



Figure 5: Carte des principaux éléments patrimoniaux du littoral du Débarquement.

On doit ici tenir compte de la notion de paysage *perçu*, 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 (photos de guerre, par exemple, voir Figure 6), artistiques ou audiovisuelles. Le parc de Courseulles-sur-Mer ne se trouve pas au large de plages, mais au large des plages du Débarquement.



Figure 6: Le Débarquement du 6 juin 1944.

D'autres sites sont à considérer, comme la ville d'Honfleur (villégiature touristique), le port d'Ouistreham, et la ville du Havre (distante d'environ 40 km), principal élément de référence sur l'horizon pour les habitants de la zone de littoral concernée.

L'étude doit enfin prendre en compte les modifications du littoral dues aux marées, qui peuvent altérer notablement la perception du paysage où s'inséreront les éoliennes. Cependant, dans le cas qui nous occupe ici, la modification d'aspect reste assez modérée (voir photos du site sur [Geophom12]).

La méthodologie couramment admise et pratiquée pour 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 off-shore. 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 à Courseulles-sur-Mer 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.

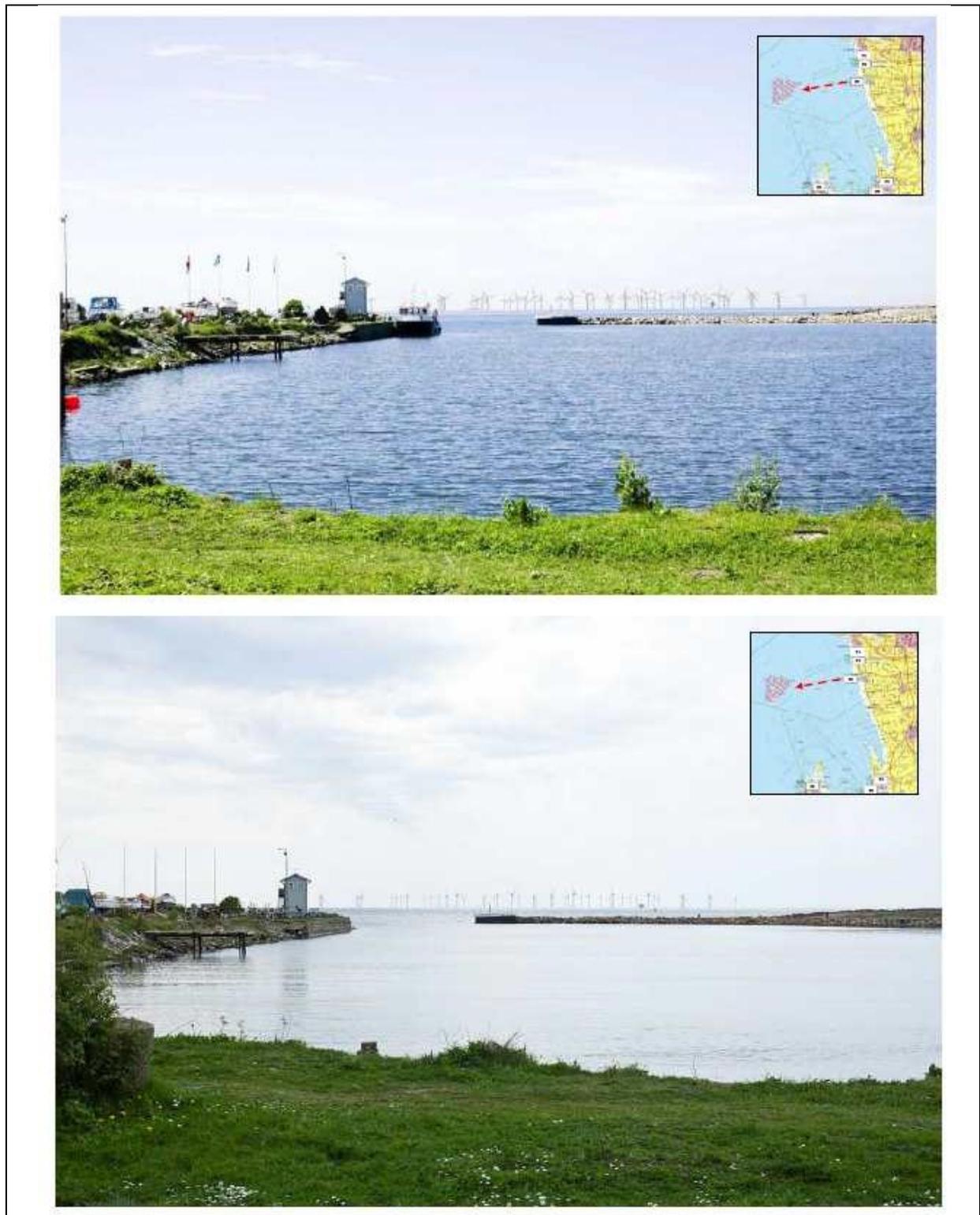


Figure 7: Comparaison réel <--> virtuel sur un des photomontages réalisés pour l'étude d'impact sur le site éolien de Lillgrund (Suède). L'image réelle est en bas, la simulation au dessus. Les éoliennes sont situées à 5.3 km du littoral. On notera l'excellente concordance globale, mais une visibilité 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 1 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 typiquement de 25° les unes des autres (ce qui autorise un recouvrement des vues indispensable au processus de création du panorama). Typiquement une quinzaine de vues sont nécessaires 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).

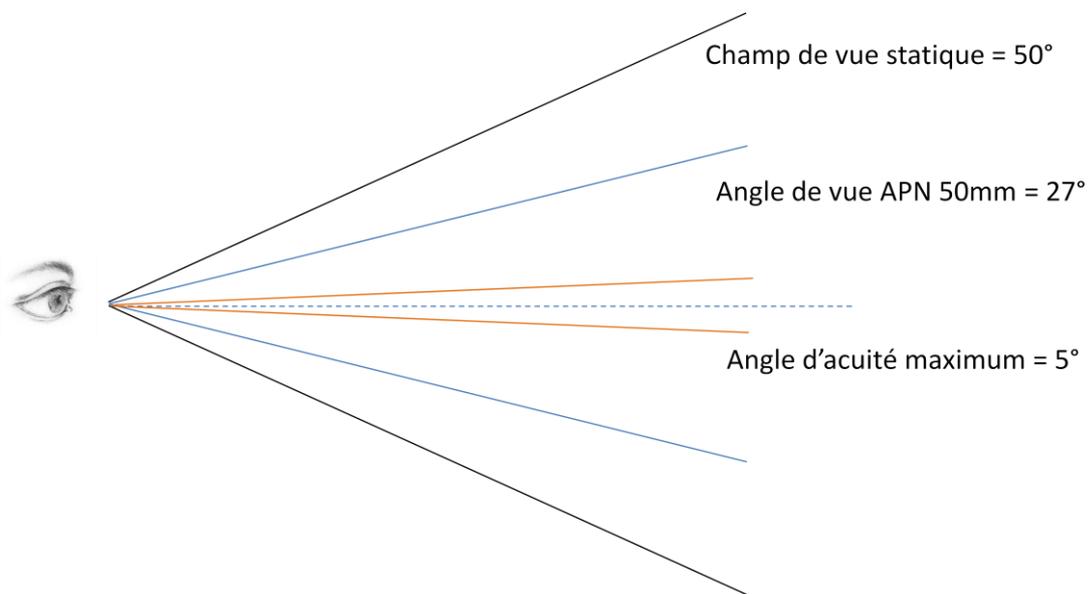


Figure 9: Ouvertures angulaires d'observation selon l'axe vertical.

Le cabinet d'étude Géophom a été chargé de réaliser les photomontages de Courseulles-sur-Mer. 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. Les prises de vue sont réalisées par beau temps afin de réaliser les photomontages avec l'impact visuel maximum (pire cas). 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 analyser avec précision la pertinence et la qualité.



(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 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.

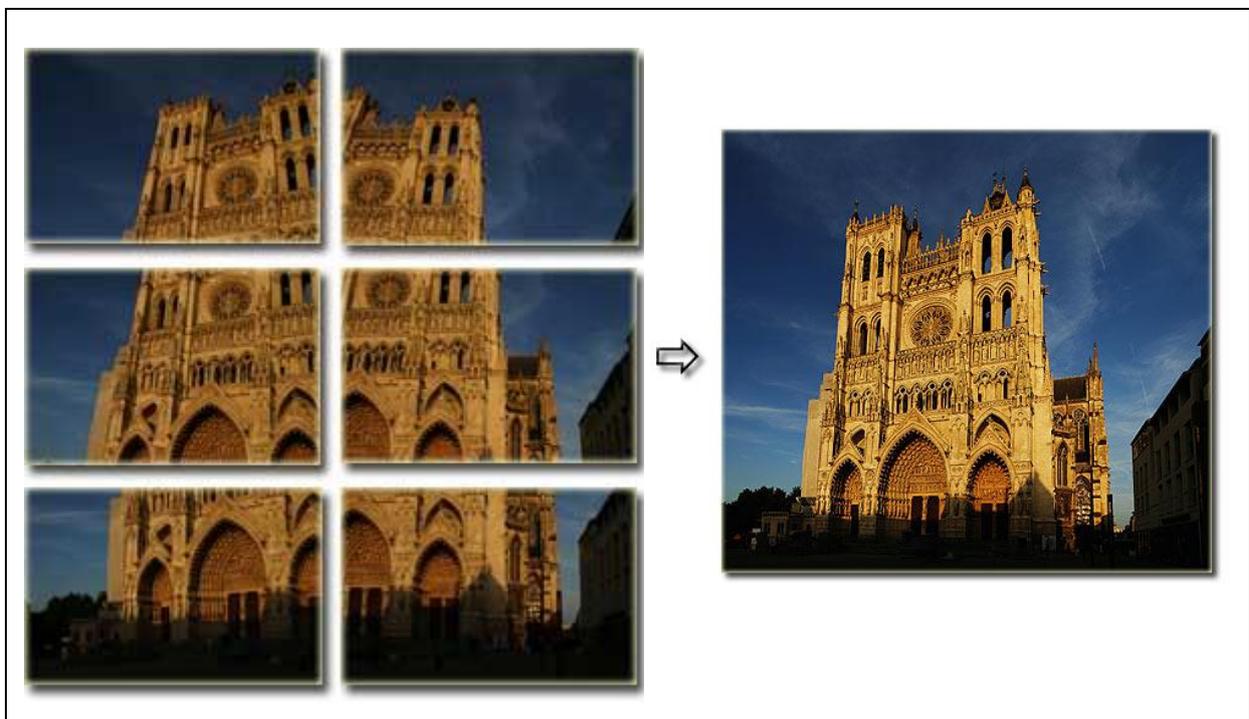


Figure 11: Exemple de stitching (tiré de www.ptgui.com).

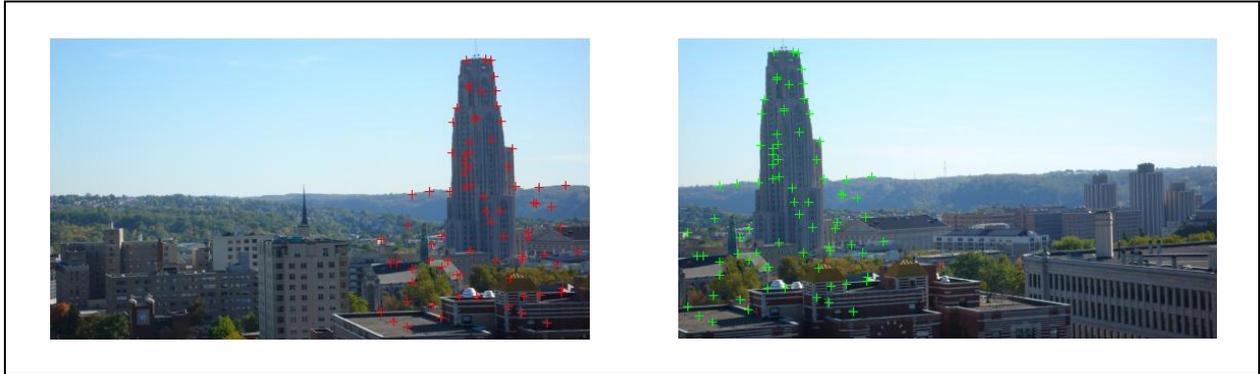


Figure 12: Mise en correspondance d'amers dans un couple d'images. Chaque croix rouge correspond à une croix verte et réciproquement.

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'off-shore 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 centaine de points bien répartis sur chaque image sont nécessaires. Une fois le calcul d'assemblage réalisé, des ajustements de contraste, de couleur et de luminosité sont nécessaires pour obtenir un panoramique parfaitement homogène.

L'examen des panoramiques résultant (sous leur forme numérique haute résolution de 33144 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 Grayes-sur-Mer).

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 issu d'une base de données. 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.

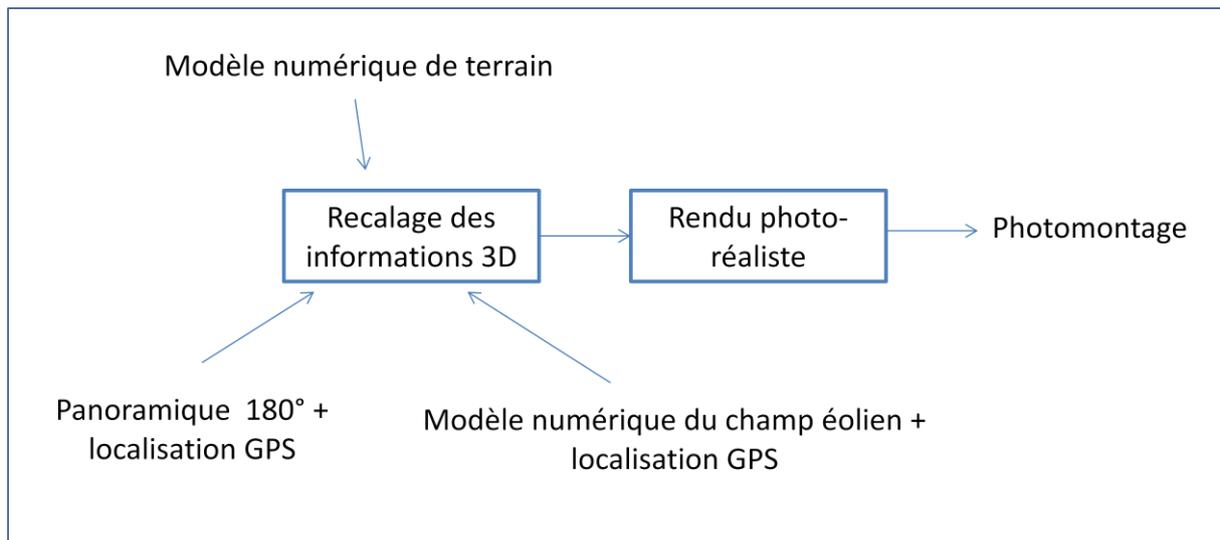


Figure 14: Schéma du processus de photomontage.

Le modèle numérique de terrain est typiquement importé d'une base de données topographique de la zone littorale. On utilise en général la BDAlti-50 de l'IGN (résolution 50 m sur l'ensemble de la France) ou la base SRTM de la NASA (résolution de 90 m), disponible sur le monde entier. Pour l'étude de Courseulles-sur-Mer, une combinaison des deux bases a été utilisée (SRTM complétant les données manquantes dans la BDAlti-50).

La localisation du panorama est quant à elle obtenue à partir de coordonnées GPS attachées aux images (tagage EXIF). 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.

L'ensemble de ces informations est 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 (*3dsMax* 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 d'impact :

- 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 3dsMax 9.

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. Très complet, il s'agit aussi d'un produit très cher (plus de 15000€ par poste pour la version complète).
- *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 et le logiciel a des fonctionnalités similaires, pour des prix équivalents.
- *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, mais le prix est beaucoup plus abordable (4500€ pour le package complet). Le logiciel est plus récent mais résulte d'une expertise de son concepteur principal, Alan Harris, vieille de 25 ans.

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 de Courseulles-sur-Mer, le logiciel *WindFarm 4.2*.

En ce qui concerne la méthodologie, la procédure est la suivante: le panoramique est chargé dans le logiciel (dans la limite des 180° supportés par celui-ci), ainsi que le modèle numérique du terrain et la représentation numérique des éoliennes dont la localisation GPS est connue (on ajuste, comme on l'a vu précédemment, ces données en fonction du niveau de la mer). Grâce au géo -repérage de repères identifiés dans le panorama (antennes, château d'eau, clochers, terrain...), on fait coïncider l'azimut de la vue avec les données 3D. Une fois l'azimut réglé, l'horizon photographique est ajusté sur l'horizon numérique. Ce réglage est inférieur à 3 dixièmes de degrés.

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 photo-montage, 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 vidéo 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.

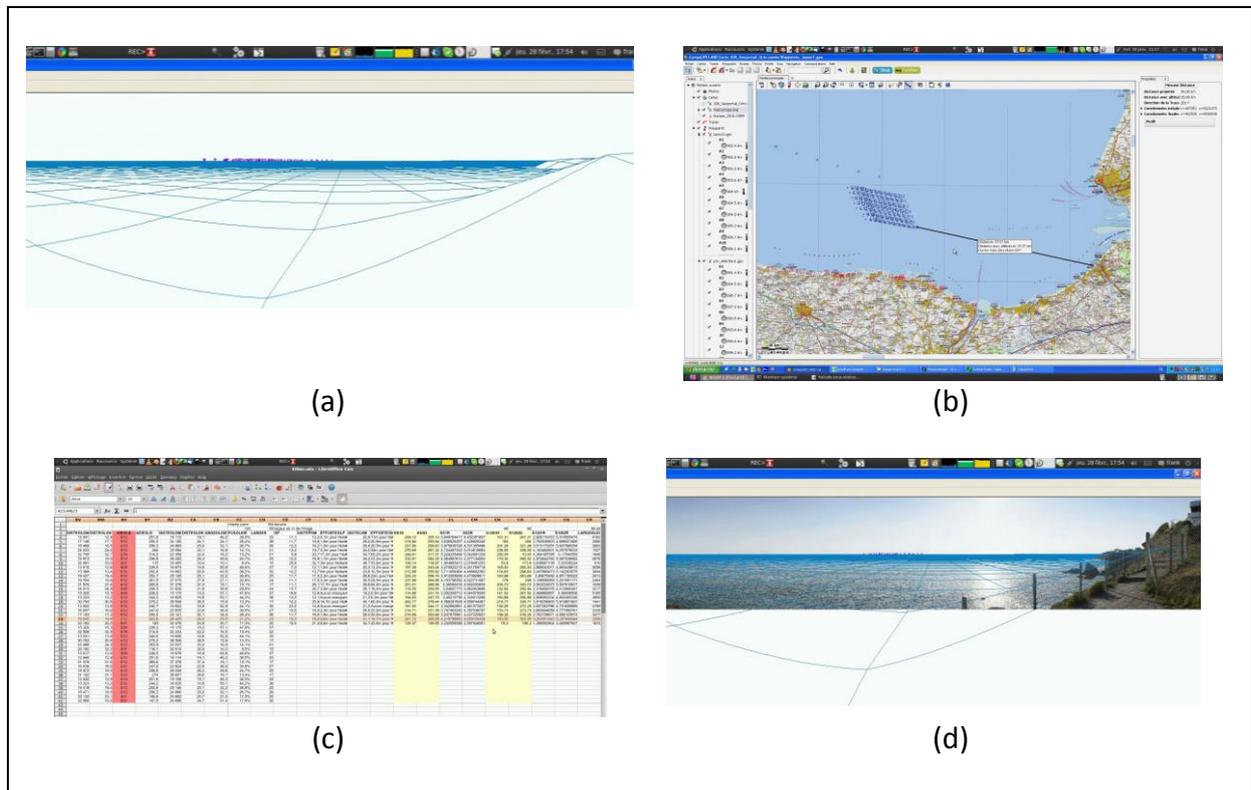


Figure 16: Photo-composition du champ éolien : (a) Les éoliennes et le modèle numérique de terrain sont importés dans *Windfarm*. (b) et (c) Les indications de géolocalisation permettent le recalage précis du panorama photographique en superposition. (d) Toutes les informations sont maintenant correctement 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

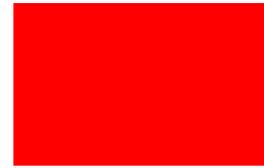
Une fois la modélisation 3D du parc éolien recalée par rapport au panorama photographique, il devient possible d'en produire une image réaliste qui viendra s'ajouter aux éléments existants. Cette phase, appelée phase de **rendu visuel**, est rendue possible par le calcul des interactions entre d'une 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 turbines éoliennes. Ces dernières sont très bien spécifiées, tant du point de vue de leur forme (du fait de l'éloignement, un modèle simplifié est suffisant) que du point de vue du matériau : les éoliennes Alstom de type Haliade sont recouvertes des peintures suivantes :



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



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



Rouge (extrémité pales) :
RAL 3026 (255/0/0)

Figure 17: Les couleurs utilisées dans l'éolien off-shore en France (les valeurs sont les composantes RVB).

Le matériau retenu est extrêmement diffusant (voir photographie réelle ci-dessus), il en résulte un aspect mat (pas de spécularité) 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 de tenir compte des paramètres réels : ceux-ci sont très nombreux et surtout sont impossibles à mesurer sur le terrain sans un appareillage complexe, hors de portée des moyens d'une étude d'impact à l'heure actuelle. 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).

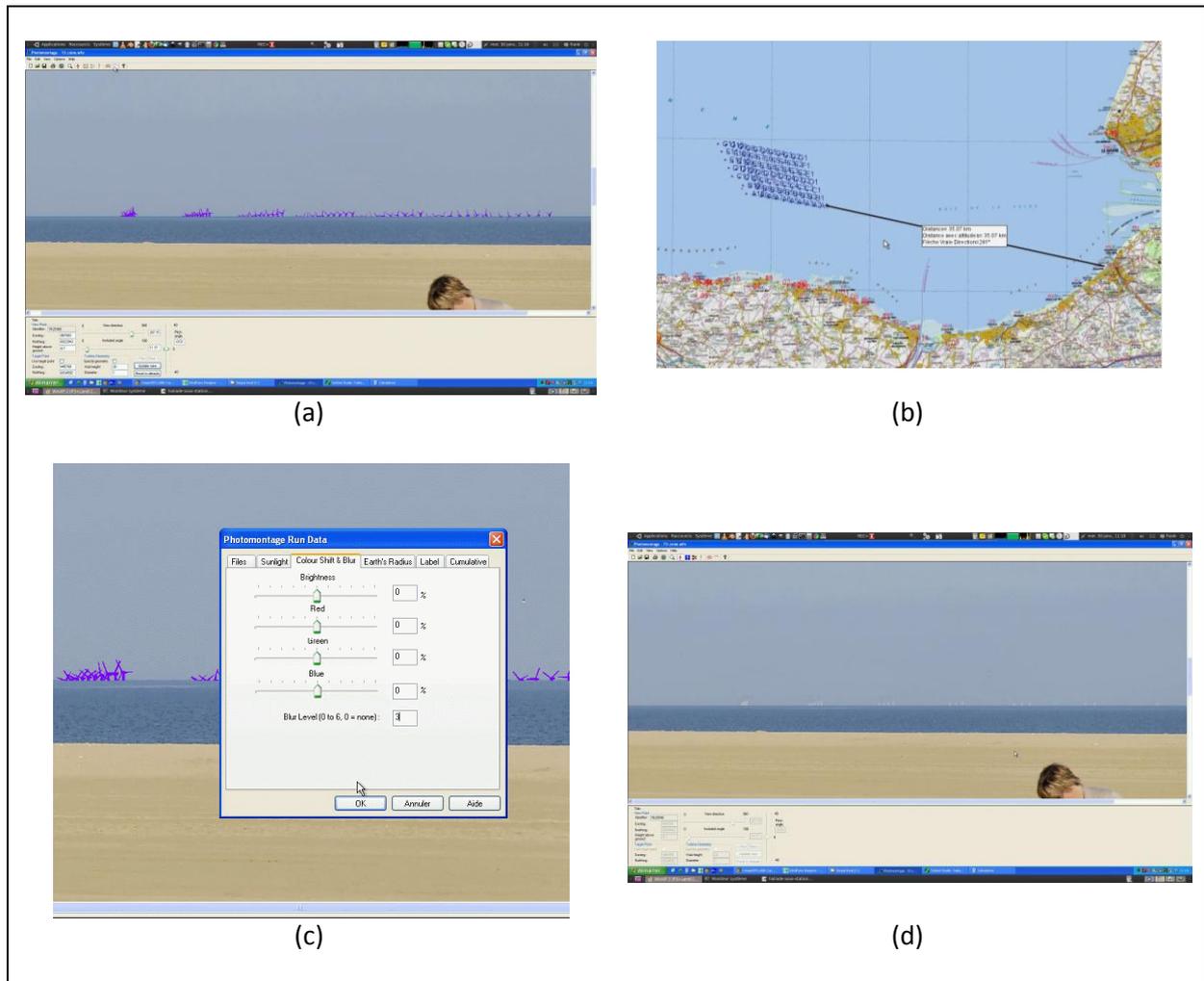


Figure 18: Phase de rendu visuel dans une session WindFarm : (a) rendu « fil de fer », permettant de valider l'allure globale. (b) Les données de localisation relative au point de vue permettent le découpage en 3 zones de profondeur croissante. (c) Un facteur d'atténuation est réglé pour simuler la variation de visibilité en fonction de la distance. (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 a décidé ici de diviser le parc en trois « tranches », d'éloignement croissant, et de déterminer trois paramètres d'atténuation croissante à affecter au rendu visuel dans chacune des tranches concernées. On calcule donc 3 images, une pour les éoliennes les plus éloignées, une contenant les éoliennes les plus proches, et enfin une tranche intermédiaire. La détermination de ces trois atténuations atmosphériques 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).

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* (voir Figure 19). D'autres post-traitements doivent aussi être appliqués :

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

En conclusion, la chaîne de rendu utilisée pour la conception des vues hybrides réel/virtuel 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.

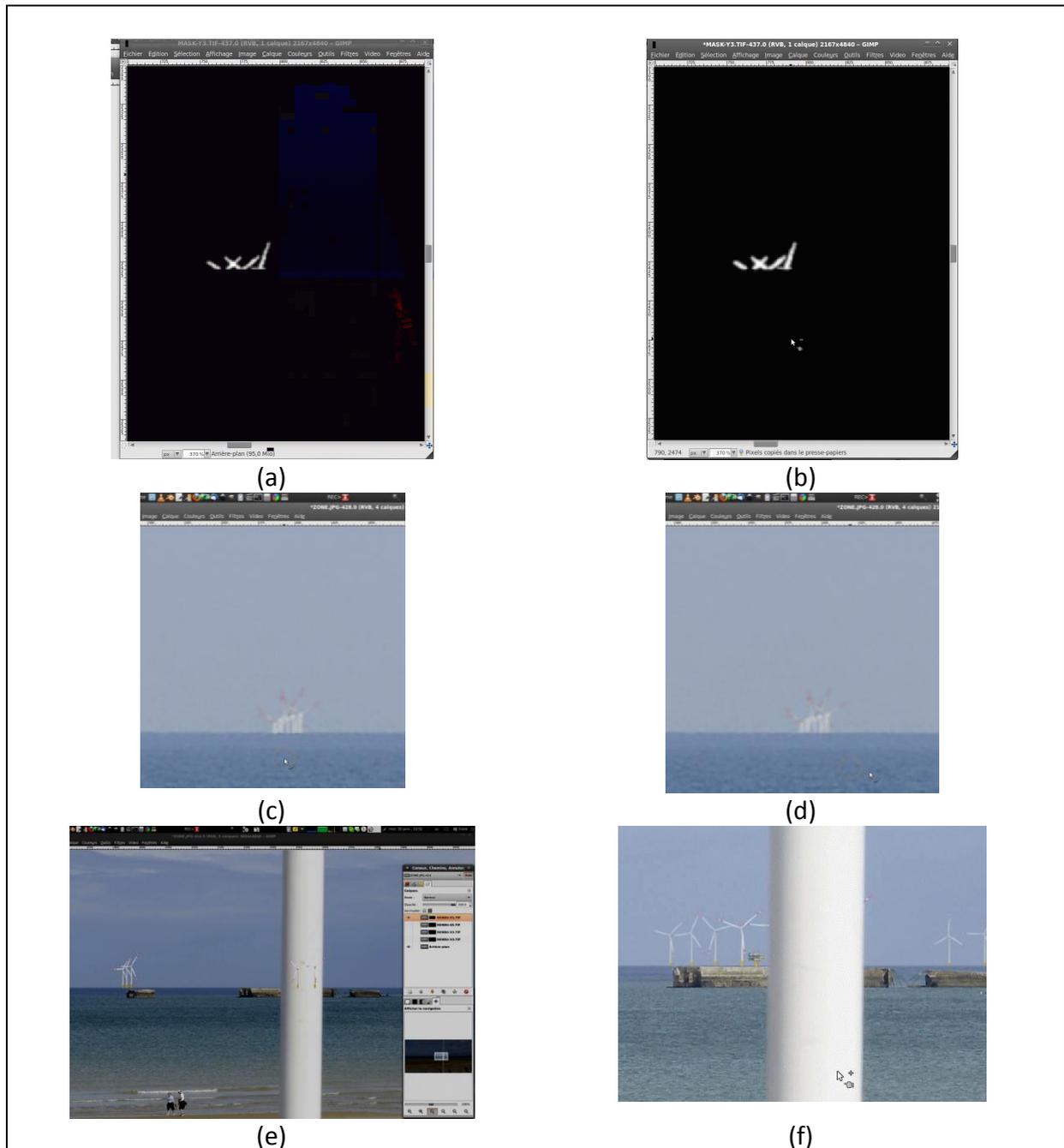


Figure 19: Retouches finales du photomontage. (a) On exporte depuis le logiciel Windfarm un masque de présence des éoliennes. (b) Ce masque est rendu légèrement flou sur ces bords pour permettre, lors de la phase de fusion, une parfaite intégration des éoliennes par rapport au fond. (c) L'interface des éoliennes avec la mer est trop nette, car les vagues ne sont pas prises en compte dans Windfarm. (d) On introduit donc un léger gommage pour estomper cette interface peu réaliste. (e) 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, ici juste à gauche du poteau.

b) Présentation du photomontage

L'objectif ultime du photomontage est de pouvoir présenter une vue aussi fidèle que possible du futur parc éolien aux acteurs de la filière autant qu'au public riverain de l'installation. Pour juger de façon objective de l'impact visuel du parc de Courseulles-sur-

Mer, 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, 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 (on ne choisira jamais un support de format inférieur pour une étude d'impact sérieuse). 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 offshore 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° pour Courseulles-sur-Mer), 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.

Trois supports existent pour l'étude de Courseulles-sur-Mer :

Support plan

Les photomontages du projet sont accessibles sur Internet à l'adresse <http://www.geophom.fr/PHOM/courseulles/carte.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 couvert par le panorama. Elle vaut :

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

Pour éviter les distorsions de visualisation, l'angle 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 développé ci-dessus et fournit un outil utile pour l'étude d'impact.

Support courbe

La représentation naturelle d'un panorama correspondant à une projection image cylindrique est bien sûr d'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 :

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

Pour cette étude, A vaut 180 degrés, de sorte que $D = L / \pi$.

Le premier support représente un compromis entre une taille de support transportable et une précision d'observation acceptable. Il s'agit donc de vues reproduites sur papier sur une taille 2 x A3 soit environ 84 cm de large, qui doivent donc être repliées en demi-cercle et observées à 27 cm de distance environ. On voit donc que la distance d'observation reste faible et qu'il est difficile à un observateur de scruter une vue aussi proche pendant très longtemps sans engendrer de fatigue visuelle. On considérera donc ces vues comme un moyen commode de rassembler l'ensemble des photomontages dans un seul cahier transportable facilement, et contenant par ailleurs toutes informations annexes (lieu, date, distances de points caractéristiques, marée, etc.).

Le second support est de plus grande taille puisqu'il s'agit d'une vue cylindrique de 3m de développé, observée à une distance d'environ 1m (voir Figure 4, page 8). Cette vue est

imprimée grâce à une imprimante dédiée de bonne résolution (400 points par pouce) à partir de supports numériques originaux (33144 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, qui est d'environ 0.3 mm à 1m – ici le pixel du panorama mesure 0.1mm. Autrement dit, le rendu obtenu est équivalent en résolution à ce que peuvent voir les meilleurs yeux humains, et la distance d'observation est confortable. Ce type de support est donc tout à fait approprié pour juger de l'apparence du parc éolien en termes de proportions vis-à-vis du panorama global. Il doit donc être l'instrument privilégié de présentation au public concerné par les études d'impact, pour peu que ses conditions d'utilisation soient strictement respectées.

6. Conclusion

Cette section a présenté, dans le détail, la méthodologie et les procédures utilisées lors de la création des photomontages utilisés comme instrument principal de l'étude d'impact visuelle des parcs éoliens off-shore dont la construction a été décidée en 2012, en particulier pour le parc de Courseulles-sur-Mer, étude réalisée par le cabinet Géophom et commanditée par la société Éoliennes Offshore du Calvados ¹. 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.

C. Evaluation des photomontages de Courseulles-sur-Mer

Au-delà de la pertinence méthodologique, il convient d'étudier aussi l'impact visuel en situation, c'est-à-dire compte tenu des spécificités du futur site d'implantation des générateurs éoliens. Nous avons donc choisi d'évaluer dans une section séparée ce qui relève du site de Courseulles-sur-Mer proprement dit, et en quoi cela influence l'impact visuel éolien.

1. Zone d'impact et pertinence des points de vue choisis

Le photomontage traduit la perception visuelle depuis un point d'observation donné, figé dans le temps et dans l'espace (lieu donné, moment de la journée, date, conditions

¹ La méthodologie suivie ne dépend pas, pour l'essentiel, de l'implantation géographique du parc. Seuls les lieux et le nombre de photomontages représentatifs varient. La section suivante s'intéresse aux aspects spécifiques du parc éolien de Courseulles-sur-Mer.

météorologiques fixés par les images support). A ce titre, il se doit d'être significatif, représentatif d'un point de vue « typique » par rapport à l'impact visuel du projet. Cette notion de représentativité est par nature subjective. Les ressources forcément limitées affectées à l'étude d'impact conduisent à devoir sélectionner avec soin les points de vue de référence. Une étude typique sur une implantation éolienne terrestre contiendra entre quelques dizaines et une centaine de montage. Un parc off-shore en nécessite souvent moins de par la nature d'éloignement et la visibilité souvent limitée au rivage immédiat. L'étude menée sur le projet de Courseulles-sur-Mer se situe de ce point de vue dans la norme.

On a étudié dans la section B le processus de fabrication des photomontages, nous n'y reviendrons donc pas ici. Si on s'intéresse à la zone elle-même, l'étude paysagère [SETUP11] la divise en quatre (Figure 20). Pour notre part, nous délimiterons des zones légèrement différentes selon des critères de visibilité subjectifs:

- On peut laisser de côté la zone d'influence directe des éoliennes car elle ne contient aucune terre. Il aurait été cependant souhaitable d'inclure quelques panoramas pris depuis un bateau, par exemple sur le rail Rouen/Le Havre qui passe à environ 20 km au nord du champ de Courseulles-sur-Mer, ou sur le couloir transmanche partant de Ouistreham, qui tangente le champ à une douzaine de kilomètres à l'est, pour compléter l'étude².
- Les terres les plus proches sont éloignées d'environ 10km des éoliennes. On peut considérer qu'entre 10 et 20 km, la visibilité sera la plus critique, d'autant que l'effacement dû à la rotondité de la terre y est négligeable (voir Annexe 2).
- Entre 20 et 40 km, les éoliennes deviennent de moins en moins visibles, autant du fait de l'éloignement (diminution de taille, écran atmosphérique) que de la rotondité de la Terre.
- Au-delà de 40 km, la taille d'une éolienne au-dessus de l'horizon est inférieure à 7 minutes d'arc, soit moins d'un dixième de degré (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 10 km seulement). Voir par exemple un zoom sur le photomontage de la Figure 21.

² Le parc éolien constituera d'ailleurs une curiosité touristique et il est certain qu'il attirera un surcroît de visiteurs, même en dehors de la haute saison, qui voudront l'approcher par bateau. Des vues rapprochées peuvent à ce titre constituer un ajout intéressant.

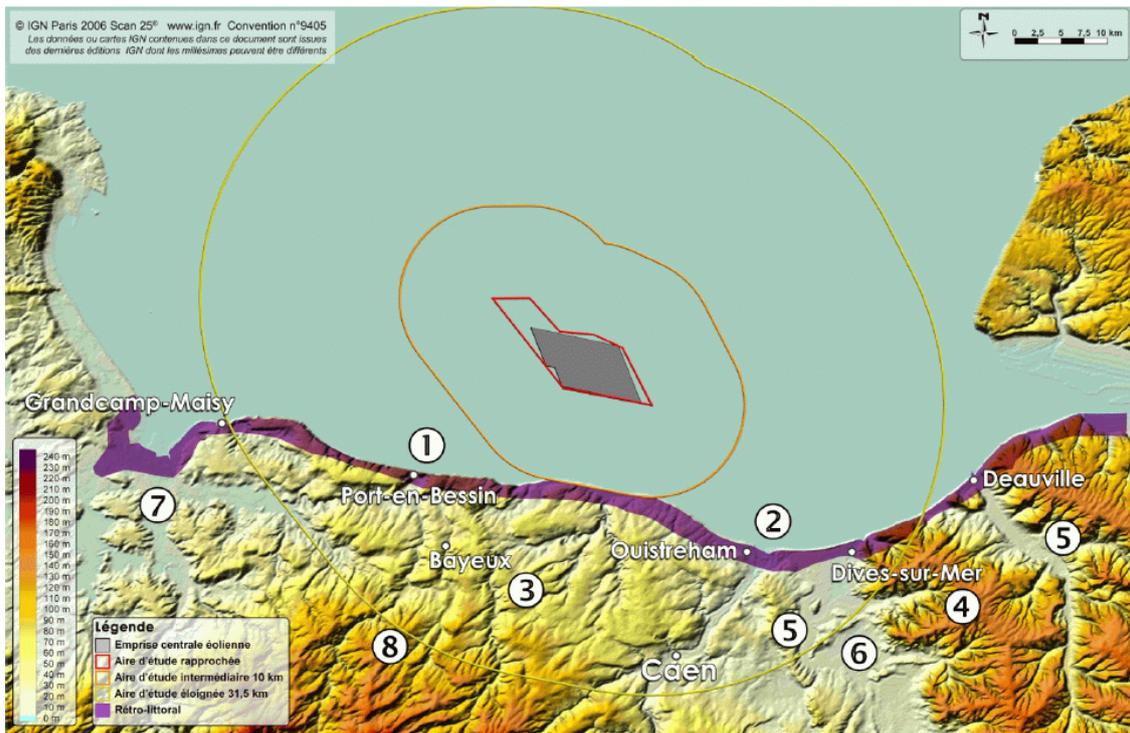


Figure 20: Les aires d'impact définies par l'étude paysagère
 (Note : les numéros correspondent à l'étude géologique et peuvent être ignorés ici).



Figure 21: Vue depuis la plage de Deauville. Les éoliennes deviennent difficiles à distinguer à cette distance.

On peut donc a priori délimiter deux zones réelles d'impact, l'une située entre 10 et 20km, et l'autre entre 20 et 40 km, l'impact devenant négligeable au-delà. Par ailleurs, on ne considérera que les zones littorales contenues dans ces cercles concentriques, puisque, du fait de la taille très réduite et de la position sur l'horizon, les éoliennes sont occultées par tout obstacle terrestre proche (maison, arbre, monument, etc.). La Figure 24 résume cette subdivision.

Elle permet de dégager au final trois zones distinctes d'impact visuel:

- Une zone dite **critique**, située à une dizaine de kilomètre de l'éolienne la plus proche, et pour laquelle le champ se trouve en face du littoral. Cette zone s'étend entre Arromanches à l'ouest et Saint-aubin à l'est ;
- Une zone **intermédiaire**, où l'impact va s'affaiblissant jusqu'à Port-en-Bessin d'une part, et Ouistreham d'autre part ;
- Une zone **lointaine** divisée en deux secteurs : de Port-En-Bessin à la Pointe du Hoc, et de Ouistreham à Deauville. On y ajoute le cas particulier du port du Havre avec ces points de vue élevés (voir plus loin).

L'étude paysagère a permis quant à elle de déterminer avec précision la topographie de la zone et de définir, à partir de cartes de visibilité théorique, un ensemble de points de vue représentatifs³. Ils se situent pour l'essentiel dans les trois zones ci-dessus et dressent un panorama représentatif de l'impact paysager (Figure 22).

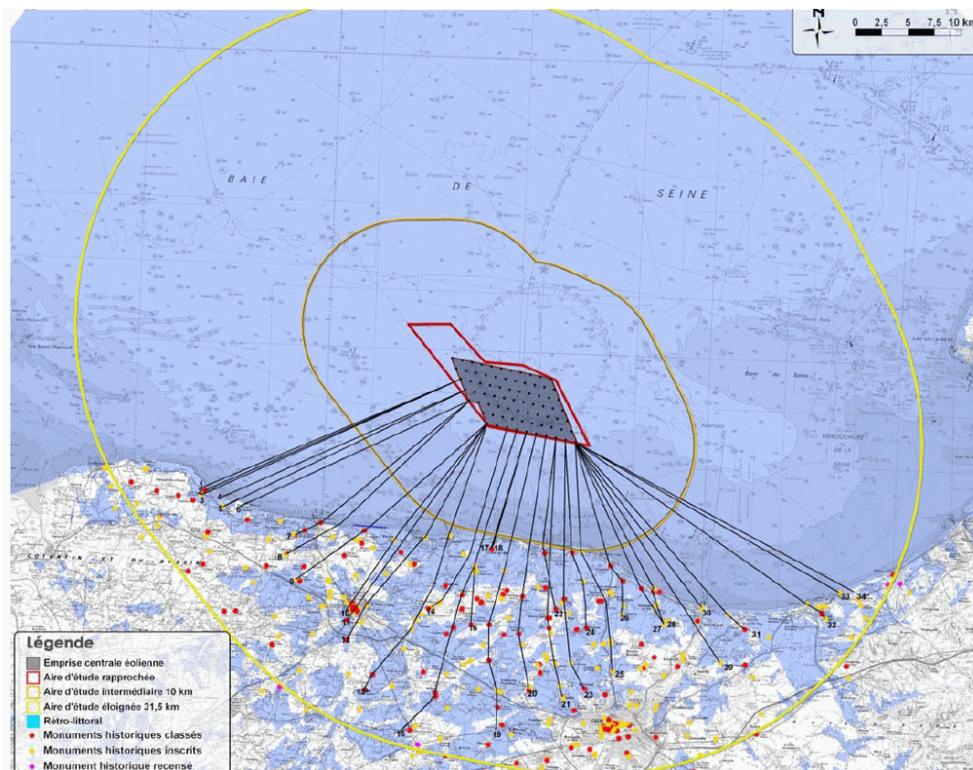


Figure 22: Carte de visibilité du projet, calculée lors de l'étude paysagère.

a) Zone critique

La zone critique est celle où le champ éolien, à une dizaine de kilomètre au large, s'étend face aux plages (en particulier Gold et Juno beach). A cette distance, l'effacement du à la courbure terrestre est faible (moins de 10 mètres), et l'éolienne la plus proche est vue selon 60 minutes d'arc environ (à comparer, par exemple, à la pleine lune, qui couvre un disque de

³ C'est sur la base de cette étude que les points de vue utilisés pour les photomontages d'impact ont été sélectionnés.

30 minutes d'arc). Pour se faire une idée de la taille relative dans le champ visuel, il suffit de disposer un bâtonnet de 1.7cm à 1m de distance de l'observateur, ou de regarder l'angle de l'index à bout de bras. A cette distance, les facteurs atmosphériques sont cependant déjà présents : une analyse météorologique montre que les éoliennes les plus proches du rivage ne seront visibles que les $\frac{3}{4}$ du temps dans cette zone.

Points côtiers	Non visible	Partiellement visible	Visible
Courseulles-sur-Mer	25%	32%	43%
Arromanches-les-Bains	40%	17%	43%

Figure 23: Visibilité à 10 km sur un an (source : étude paysagère).

Cependant, il est raisonnable de penser que les éoliennes feront « partie du paysage » dans cette zone, et attireront le regard (par leur taille, nombre et mouvement) de la plupart des visiteurs, en couvrant un champ horizontal de 55°, face à la plage. L'étude paysagère complète corrobore ces conclusions en parlant d'un **impact fort** dans cette zone.

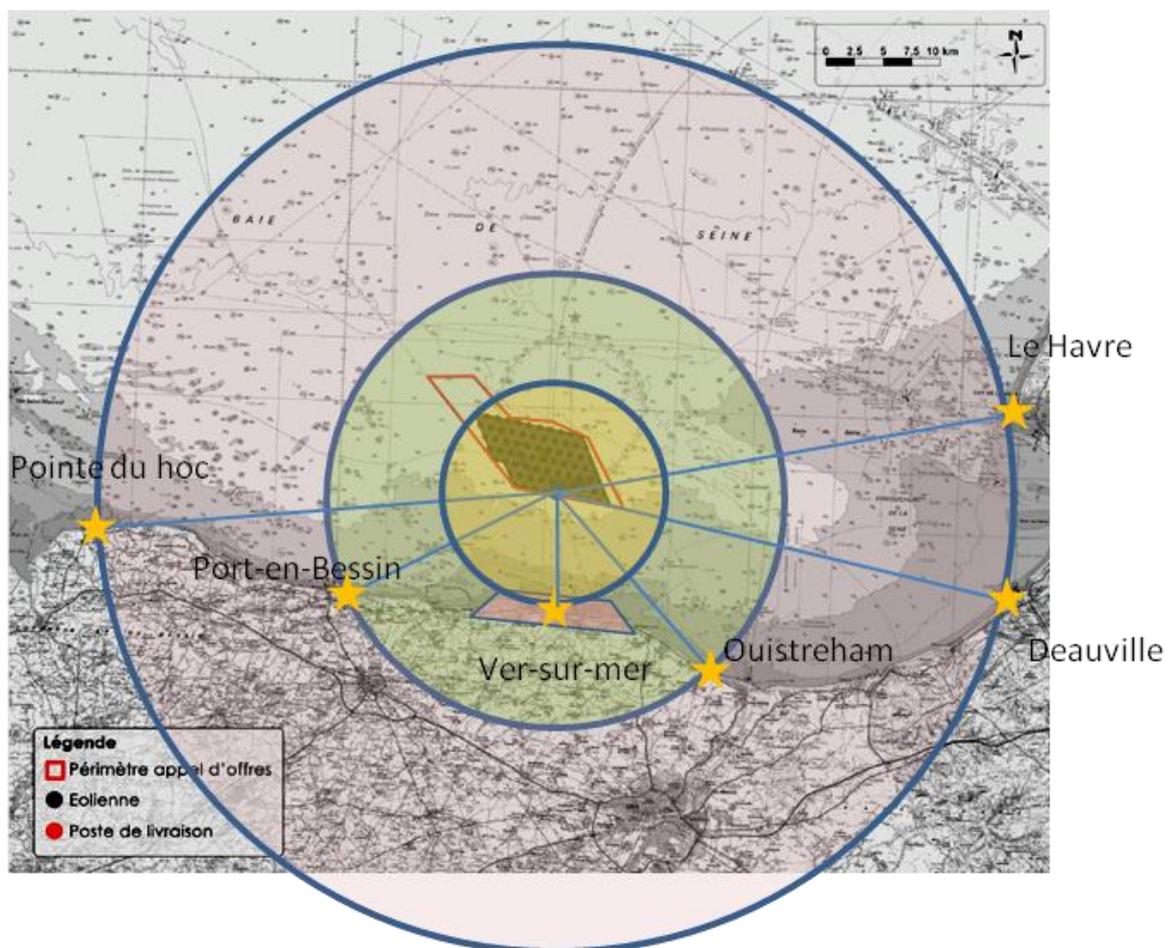


Figure 24: Les zones d'impact visuelles selon la distance au parc de Courseulles-sur-Mer. Le cercle intérieur se situe à 10 km de l'éolienne la plus proche du rivage, le second à 20 km, et le dernier à 40 km. Le trapèze centré sur Ver-sur-mer est la zone la plus critique, entre Arromanches à l'ouest et Saint-aubin à l'est.

b) Zone intermédiaire

La zone intermédiaire s'étend le long du littoral, entre 10 et 20 km des éoliennes les plus proches. A cette distance, l'effacement devient non négligeable et peut atteindre 20 mètres. Chaque éolienne est perçue avec des dimensions proches de la pleine lune (environ 30 minutes d'arc ou $\frac{1}{2}$ degré). Autrement dit, la hauteur sur la mer de chaque générateur est inférieure à celle d'un bâtonnet de 1 cm à 1m de distance. Par ailleurs, la visibilité s'affaiblit fortement : les éoliennes seront visibles environ la moitié du temps à Arromanches, et encore moins souvent au-delà. Enfin, dans cette zone, l'azimut central du parc n'est plus la haute mer, mais est inclinée de plus de 45° par rapport au nord, qui est la direction naturelle de regard vers la mer depuis le littoral. Le parc éolien dans son ensemble couvre alors un angle apparent d'environ 40° .

Dans cette partie, les éoliennes seront visibles si on les cherche, ou si on scrute l'horizon assez longuement, dans des conditions météorologiques favorables. L'étude paysagère parle d'impact **moyen/faible**.

c) Zone lointaine

Cette zone est située au-delà de 20 km des éoliennes les plus proches. On doit distinguer la zone ouest, qui s'étend de Port-en-Bessin à la pointe du Hoc, de la zone est, de Ouistreham à Deauville. L'effacement dû à la courbure terrestre devient un facteur important, diminuant parfois de moitié la hauteur visible des éoliennes, sauf sur la pointe du Hoc, dont l'élévation annule l'effacement. Au final, l'angle soutenu au dessus de l'horizon varie de $30'$ d'arc à $7'$ seulement. Mais c'est la visibilité qui devient problématique, et les éoliennes ne seront probablement pas visibles plus du quart du temps. La pointe du hoc se situe à 40 km du champ éolien, et on y verra chaque éolienne avec une hauteur de la moitié d'une pleine lune, soit le quart de l'ongle de l'index à bout de bras, les jours de beau temps clair.

A ce stade, on parle d'impact **faible à inexistant**, qui est corroboré par l'étude paysagère. Il faudra connaître l'azimut du parc sur l'horizon pour le localiser avec des jumelles, car les éoliennes se confondront avec d'autres éléments sur la mer plus proche (bateaux), voire seront occultées par eux. Le champ couvert à l'horizon est d'environ 15° dans cette zone.

Au-delà des 40 km, les éoliennes seront virtuellement indétectables depuis la côte à l'ouest (par exemple Utah Beach), comme à l'est (Deauville). Depuis les hauteurs du Havre, il restera possible de localiser le champ de Courseulles-sur-Mer par beau temps puisque la vue porte à peu près à cette distance, sans que l'impact visuel soit pour autant notable (angle horizontal soutenu : 8°).

L'étude réalisée par Géophom contient, suite aux recommandations de l'étude paysagère, 27 points de vue de référence. 12 d'entre eux sont situés en zone critique, 8 en zone intermédiaire, 7 en zone lointaine. A ce titre les points de vue ont été correctement répartis pour tenir compte des différentes zones, tout en concentrant la moitié des vues sur la zone la plus sensible pour y jauger de l'impact visuel.

2. Choix des échantillons temporels

La particularité du futur parc éolien de Courseulles-sur-Mer est de n'être réellement perceptible que vers le nord. Ceci implique l'absence de phénomènes de contre-jour sur le site, ainsi qu'un faible nombre de coucher ou de lever de soleil dans l'axe d'observation depuis la côte.

A la latitude considérée (environ 49°), le soleil se lève en été à l'azimut 53° et donc se couche à l'azimut 307° (nord=0°). En hiver, ces valeurs valent respectivement 127° et 233°. Si on reporte ces valeurs sur la carte de la zone, pour quelques vues clés, on observe (Figure 25) que :

- Le soleil ne se lève ni ne se couche jamais dans l'axe du parc éolien dans la zone critique ;
- Dans la zone intermédiaire, le soleil se lève au solstice d'été dans l'axe du parc, uniquement aux alentours de Port-en-Bessin ;
- Le soleil se lève souvent dans l'axe d'observation du parc en zone lointaine, côté ouest (pointe du Hoc), et symétriquement le parc s'observe au couchant côté est, sur Deauville (plutôt en été) ou Le Havre (plutôt en hiver).

L'étude de Géophom porte sur des photomontages réalisés entre 7h15 et 17h30 TU (ajouter deux heures pour l'heure d'été), dans la journée (on reviendra plus loin sur les vues simulées de nuit). Les vues où la luminosité et la visibilité sont maximales ont été privilégiées, de façon à maximiser l'impact visuel des éoliennes (pire cas) : on a donc une majorité de vues prises en fin de matinée et en début d'après-midi, ce qui est justifié. Il est cependant probable que ce choix majoritaire de vues en conditions défavorables a tendance à surestimer l'impact visuel.

Par contre, il manque clairement des vues plus matinales ou plus vespérales (une seule vue est prise juste après le coucher du soleil, à Arromanches). Il aurait été profitable d'ajouter quelques vues spécifiques compte tenu des levers et couchers de soleil sur zone, à savoir :

1. Une vue au lever du soleil, au milieu de l'été, à la pointe du Hoc ;
2. Une vue au lever du soleil, au solstice d'été, depuis Port-en-Bessin ;
3. Une vue au coucher du soleil à Deauville, en été ;
4. Une vue au coucher du soleil depuis les hauteurs du Havre, au environ de l'Equinoxe.

Les vues de nuit (en fait des vues de soirée, réalisées juste après le coucher du soleil) appellent à un traitement et des commentaires particuliers. Le photomontage sous-jacent est réalisé suivant les mêmes méthodes et techniques que pour les photomontages diurnes. La spécificité des vues nocturnes se situe au niveau du rendu visuel que WindFarm ne permet pas de calculer directement. La technique consiste donc à effectuer un rendu avec des conditions d'éclairage réduites, et à réaliser l'incrustation par masque de fusion comme précédemment. La spécificité tient à l'ajout des signaux lumineux dont les caractéristiques (couleur, clignotement) sont totalement réglementées, et qui sont une nécessité absolue pour la navigation maritime et aérienne. Cet ajout s'effectue sous la forme d'un calque spécifique dans le logiciel de post-traitement *GIMP*. Pour l'étude de Courseulles-sur-Mer, trois vues ont été réalisées, deux en zone critique (Arromanches et Luc-sur-Mer), et une en zone lointaine (Le Havre) (voir un exemple Figure 26).

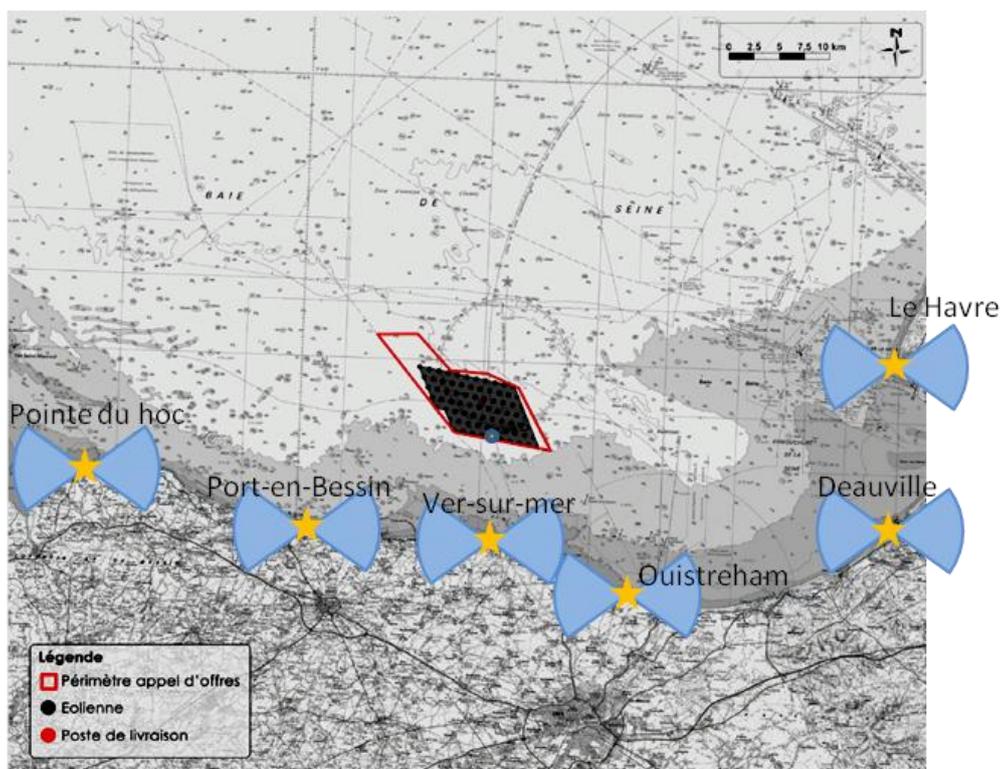


Figure 25 : Axes des levers et couchers de soleil sur la zone. Le soleil se lève dans le quadrant droit, et se couche dans la position symétrique dans le quadrant gauche.



Figure 26: photomontage nocturne: à gauche, masque de fusion calculé par Windfarm (en blanc: l'emplacement des balises lumineuses). A droite, le résultat du rendu sous Gimp.

Si le rendu visuel final est, empiriquement, proche du réel, il n'en reste pas moins que la caractéristique principale des feux de signalisation du champ éolien est leur clignotement, qui ne peut être illustré sur un photomontage statique. Dans la restitution sur écran, un système d'animation dynamique, géré informatiquement, serait envisageable mais ne constitue pas une pratique à l'heure actuelle. Cependant, au final, on peut facilement comparer le clignotement des feux comme analogue à une série de phares peu puissants (synchronisés) sur l'horizon⁴.

3. Evaluation en contexte

Les photomontages permettent de rendre tangibles une future réalité visuelle, sur la base des lois de l'optique et de la géométrie. Ils ont cependant leur limite, car ils ne rendent pas compte (a) de l'intégralité du flot de sensations d'un usager sur site (b) de considérations subjectives liées à l'observation par une personne humaine. Ce sont ces aspects qui sont abordés dans cette section.

a) L'effet pleine lune et les repères visuels

Lors de l'observation d'un élément nouveau dans un paysage familier, cet élément n'est pas vu hors contexte : ainsi des éoliennes off-shore, construites à plus de 10 kilomètres du rivage, seront observées comme des éléments lointains, à l'horizon, à l'aune d'éléments familiers observés eux aussi dans les mêmes conditions. Il peut alors arriver que ces éléments influencent fortement notre perception subjective du nouvel élément observé, au point d'altérer notre jugement sur sa taille ou sa forme, et donc d'en modifier fortement l'impact. L'exemple le plus frappant de ce phénomène est celui dit de la pleine lune (voir [Lunellusion]) : l'astre sélène paraît beaucoup plus gros à l'horizon qu'au zénith, alors qu'optiquement parlant sa taille ne varie pas sur une échelle de quelques jours⁵. Les explications de ce phénomène sont sujettes à débat, mais la plus plausible est la présence dans le champ visuel d'éléments à l'horizon dont nous connaissons la taille. La lune étant reconnue comme un astre, elle est nécessairement *plus grosse* que des arbres ou des bâtiments, et est donc *perçue comme telle*, et artificiellement grossie par notre cerveau.

⁴ Cependant, la puissance typique d'un feu éolien est de 20 000 candelas, à rapprocher d'un phare classique qui dépasse les 100 000 candelas. Il s'agit donc plutôt d'une balise (bien visible à 5 km, portée maximum 25 km) que d'un phare (portée 50 km, visible parfois à 100 km).

⁵ La taille du disque lunaire varie bien en fonction de la distance terre-lune, mais sur une échelle de temps de plusieurs semaines, et d'un facteur réel n'excédant pas 10%. L'effet « pleine lune » rend compte de variation rapportée subjectivement allant du simple au double, voire au triple ! Enfin, et contrairement à une opinion couramment répandue, la traversée des couches atmosphériques altère très peu la *taille* des objets, mais peut changer leur *position* de façon significative.



Figure 27 : La pleine lune à l'horizon peut apparaître plus grosse et augmenter l'impact visuel en attirant l'attention de l'observateur.

En ce qui concerne directement l'impact éolien, il faut s'assurer qu'autant que possible, la lune ne se lève ni ne se couche dans la direction du parc, car elle sera alors très visible (*grossie*), et mobilisera l'attention de l'observateur. Le parc éolien impactera alors défavorablement son observation⁶. Cependant, une carte d'observation lunaire similaire à la carte solaire de la page 36 (voir Figure 28) montre que, pour les sites en zone critique, les axes de lever et de coucher de lune ne coïncident pas avec la direction d'observation du parc. Autrement dit, un noctambule ne pourra pas voir les deux objets en même temps dans sa zone d'attention.

En dehors de la lune, l'orientation septentrionale du parc vis-à-vis des côtes proches en zone critique limite fortement la présence d'autres éléments de comparaison visuelle. Le seul exemple réellement significatif (en dehors des bateaux, dont la présence est trop dynamique pour permettre des comparaisons de taille durables, affectant l'impact) et unanimement reconnu est celui des cheminées de la centrale EDF située au Havre. Ces deux cheminées en béton armé, d'une hauteur de 240m (et culminant à 255mètres au-dessus du niveau moyen de la mer) sont d'un diamètre de 25 mètres à la base et de 12 mètres au sommet. Leur hauteur implique donc une visibilité (théorique) à plus de 60 kilomètres ! Dans la pratique, cependant, l'atténuation due à l'atmosphère rend les cheminées difficilement perceptibles à cette distance.

⁶ On ne peut évidemment évaluer objectivement le mérite esthétique d'un coucher de lune sur un parc éolien, qui est une affaire de goût... On part ici du principe que l'impact, à tout le moins, ne sera pas négligeable.

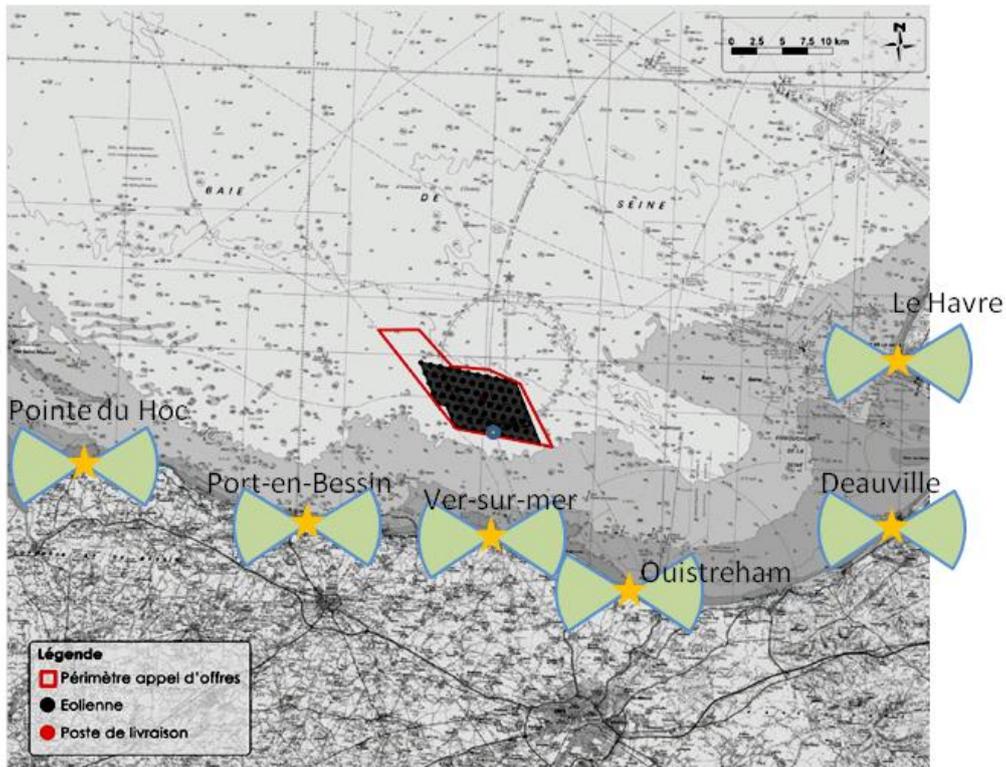


Figure 28: Axes des levers et coucher de lune sur la zone.

Prenons concrètement deux exemples : l'un situé à l'ouest de la zone critique, à Tracy-sur-mer, à 60 km des cheminées mais seulement 13 km des éoliennes les plus proches, et l'autre côté Est, à Saint-Aubin, à 45 km des cheminées et 11 km des éoliennes.

A Tracy, depuis l'altitude de la prise de vue (50m), la ligne d'horizon se situe à 25 km. A 60km, l'effacement des cheminées dû à la rotondité de la terre vaut 96m, et on voit donc 160m de cheminées. On compare donc une éolienne de 173 m à 13 km (pour la plus proche) avec deux cheminées de 160 m à 60 km, soit un rapport de taille d'environ 5. Visuellement (voir photos Figure 29), on mesure un rapport d'environ 4, ce qui peut s'expliquer par le très faible contraste des cheminées à cette distance, qui sont difficiles à localiser du fait de la diffusion atmosphérique. On peut donc dire que sur le flanc ouest de la zone critique, les cheminées du Havre, bien que situées dans un azimut proche, ne peuvent servir de repère visuel pour établir un impact de référence.

Par contre, à Saint-Aubin, l'altitude de la prise de vue (7m) porte la ligne d'horizon à seulement 9.5 km. Les cheminées sont donc beaucoup plus proches, mais ont un effacement proche de celui de Tracy, 99 m environ. On compare donc une éolienne (au plus proche) de 173 m à 11 km avec des cheminées de 156 m à 45 km, soit un rapport de 4.5. Une mesure directe sur les images donne un facteur de 4.1 environ. L'impact visuel est cependant différent car le contraste apparent des cheminées est plus net. A contrario, l'azimut des deux objets est très différent, de sorte qu'un observateur ne peut comparer leur taille relative d'un seul regard. Sur le flanc Est de la zone critique, les cheminées peuvent

cependant servir de référence, et l'on peut affirmer que les éoliennes seront perçues environ 4 fois plus hautes qu'elles.

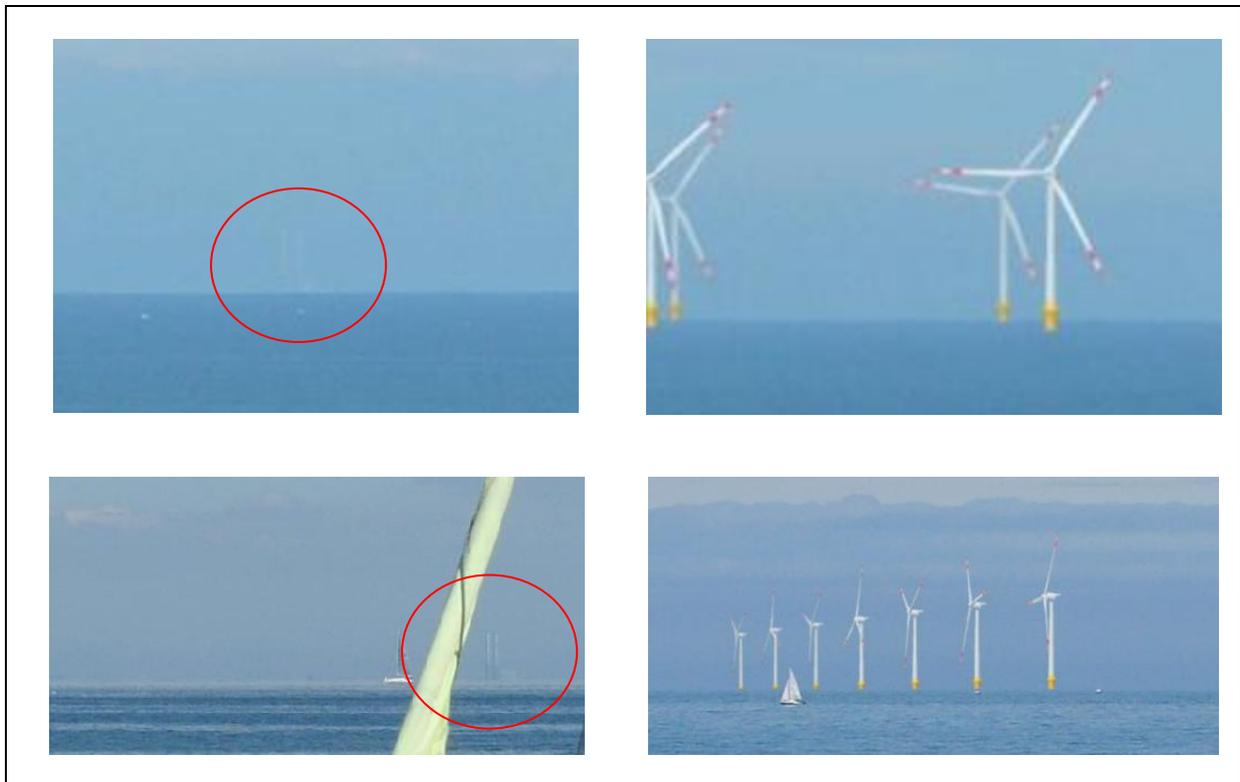


Figure 29 : Comparaison de la taille relative des cheminées du Havre et du parc éolien. Ligne du haut : vue depuis Tracy-sur-Mer. Ligne du bas : vue depuis Saint-aubin (attention : les vues côte à côte correspondent à un même grossissement mais ne reflètent pas l'impact visuel réel).

b) L'effet d'alignement

L'impact visuel d'un parc éolien off-shore ne se limite pas à celui de chaque génératrice prise individuellement : le parc de Courseulles-sur-Mer contient ainsi 75 machines disposées en 11 rangées d'orientation globale Nord-Nord-Ouest / Sud-Sud-Est. L'effet visuel peut donc varier significativement suivant que l'on perçoit ou non ces alignements. De ce point de vue, il existe deux directions spécifiques de visée du parc sur deux directions : vers le sud-ouest et vers le sud-est (voir Figure 30).

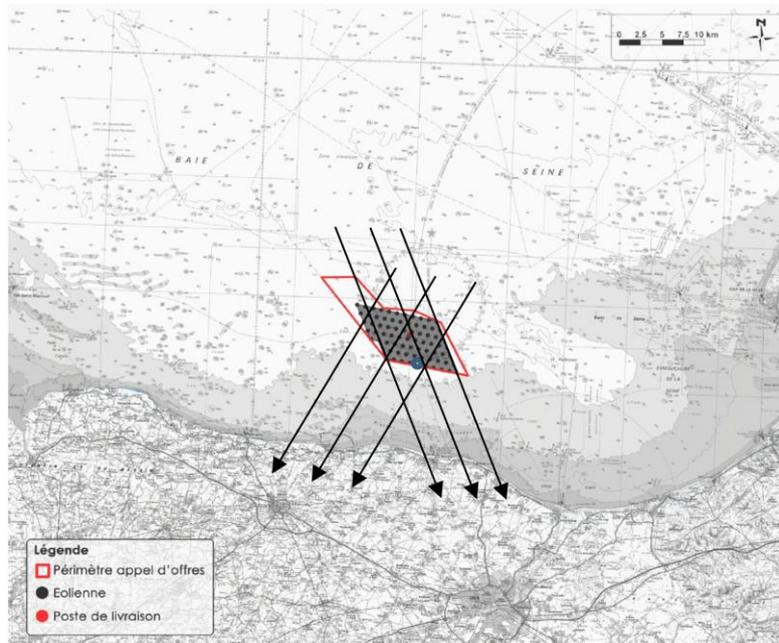


Figure 30 : Alignements des éoliennes de Courseulles-sur-Mer et directions de vue préférentielles.

On le voit, ces alignements seront potentiellement visibles depuis la zone critique, en créant des « paquets » d'éoliennes sur l'horizon. Mais du fait de la perspective et de la profondeur du parc (plus de 5 km d'écart de distance entre les éoliennes les plus proches et les plus lointaines), la perception visuelle de ces alignements est très limitée. Sur aucun photomontage, on n'observe plus de deux alignements visuels réels. Dans la pratique, la perception globale est plutôt celle de plusieurs séries de 3 à 5 éoliennes côte-à-côte (Figure 31).



Figure 31 : Alignement des éoliennes perçu depuis la plage de Deauville (détail du photomontage numéro 29 de l'étude de Géophom).

Un autre facteur à prendre en compte est celui de l'orientation du rotor : un rotor face à l'observateur est beaucoup plus perceptible qu'un rotor « de profil », puisqu'il occupe un angle de vue horizontal 5 fois plus grand. Par ailleurs, la rotation des pales est alors beaucoup plus perceptible.



Figure 32 : Impact visuel en fonction de l'orientation des pales : il peut varier dans un facteur de 1 à 5.

La carte des vents de la région renseigne utilement sur les orientations qui seront perceptibles le plus fréquemment (Figure 33). Sans surprise, les vents d'orientation Est-Ouest sont prédominants sur cette zone et totalisent presque la moitié du cumul d'orientation. Les vents Nord-Sud soufflent quant à eux moins du quart du temps. En conclusion, on peut dire que le régime des vents dans le secteur du parc éolien aura tendance à minimiser son impact en termes de visibilité des éléments en mouvement.

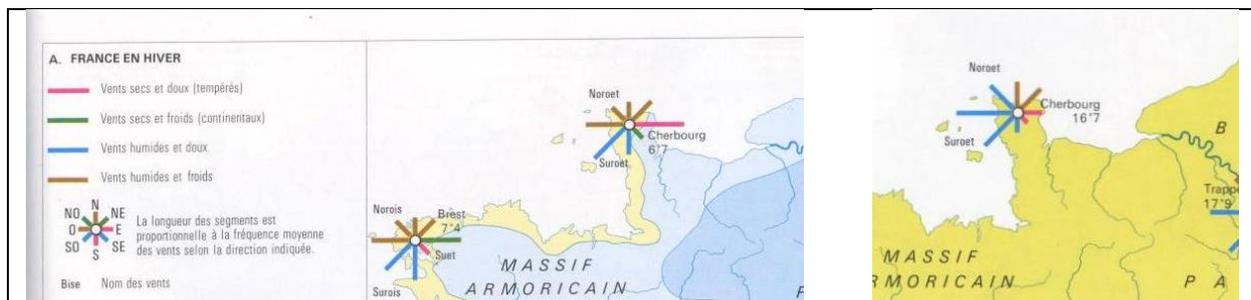


Figure 33 : Carte des vents dominants sur la région, en hiver (gauche) et en été (droite).

c) Les effets de contraste relatif

En plus des considérations purement géométriques liées à la taille et à la distance, on doit examiner des facteurs liés à l'incidence de la lumière solaire sur les générateurs éoliens. Le premier de ces facteurs est lié au mouvement des pales, qui crée un effet stroboscopique (alternance de lumière et d'ombre) à la fréquence de rotation des pales. Si cet effet doit être étudié pour des implantations terrestres, la distance d'un parc off-shore rend cet effet négligeable pour une observation depuis le littoral⁷. Le deuxième facteur à considérer est le contraste relatif des générateurs par rapport au paysage, dans le cas présent réduit au ciel. On peut voir Figure 34 quelques exemples de découpe des éoliennes sur le ciel, dans des conditions dégagées, mais une nébulosité variable. On notera que les vues synthétisées ici

⁷ Pour le parc de Courseulles-sur-Mer, on a vu au demeurant que le soleil ne se trouve pratiquement jamais dans l'axe de coucher ou de lever du soleil.

correspondent aux pires cas : visibilité parfaite, ciel très clair⁸. Le gris moyen choisi pour peindre les éoliennes off-shore (RAL 7035, voir Figure 17 page 23) est en revanche peu contrasté par rapport au ciel dès que le temps est nuageux.

En l'absence de données de visibilité précises (mesure par visibilimètre), il est difficile de présager du taux exact de visibilité des éoliennes autrement que par les données météorologiques, qui prédisent que les éoliennes ne seront pleinement visibles que la moitié du temps en zone critique (voir Figure 23).

En pratique, si on se base sur des données empiriques, les objets lointains sont difficiles à discerner du fait de la présence d'humidité dans les couches basses de l'atmosphère, d'où un effet de brouillard même par temps clair (Figure 35). On retrouve ici le fait que pour les observations lointaines, supérieures à 20 km, il est difficile de parler d'impact visuel.

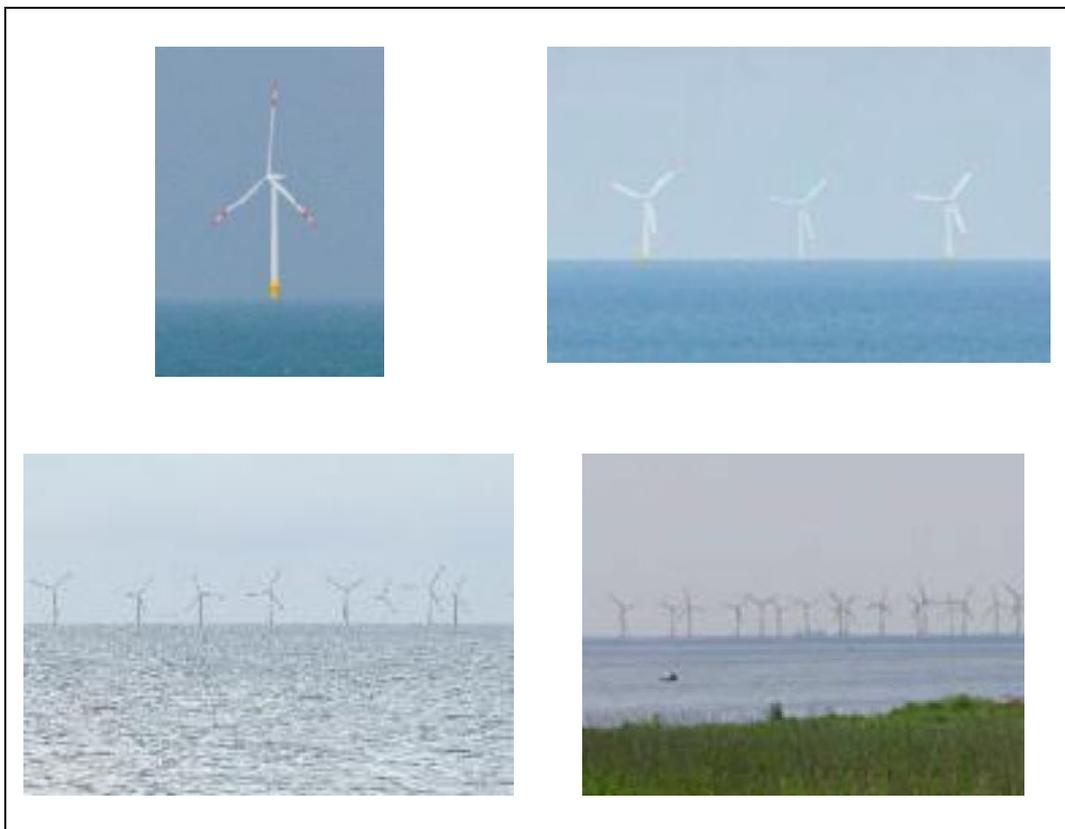


Figure 34 : Quelques exemples de contraste des éoliennes sur le ciel à l'horizon. Par forte luminosité (en haut), le rendu des mâts gris est très lumineux en éclairage direct. Par temps plus nébuleux (en bas), le contraste est beaucoup plus modéré. Cette condition sera majoritaire sur le site.

⁸ Il faut savoir que l'ensoleillement équivalent de la région est de 75 jours en moyenne par an, soit environ 1 jour sur 5 seulement.



Figure 35 : vue d'un cargo sortant du port du Havre. Distance : 37 km. Visibilité officielle (sémaphore du Havre) : 18.5 km. A gauche focale=70 mm, à droite focale=300 mm (source : Géophom).

4. Conclusion

L'étude d'impact visuelle découlant de l'expertise recoupe, par des considérations complémentaires, l'étude paysagère qui a présidé aux choix relatifs à l'implantation du futur parc éolien de Courseulles-sur-Mer. Elle démontre clairement que l'impact visuel, négligeable au-delà de 40 km de la zone, restera modéré au dessus de 20 km. Dans ces zones, les éoliennes seront bien détectables, mais par la conjonction de facteurs cumulatifs (distance, effacement, atmosphère, angle de vue), elles n'attireront pas plus l'attention que d'autres éléments maritimes sur l'horizon, comme des embarcations, et ne constitueront pas en tout état de cause un élément paysager caractéristique.

La situation sera différente sur les zones plus proximales, là où le champ éolien fait face au littoral (aux alentours d'Arromanches, Ver-sur-mer et Courseulles-sur-Mer). Dans cette zone, les photomontages réalisés donnent une idée fidèle de ce que l'on verra une fois le champ éolien réalisé, **pour peu qu'ils soient observés dans les conditions prescrites**. Pour parfaire la restitution de l'impact visuel, il serait souhaitable de réaliser quelques vues au lever et coucher du soleil (voir liste page 35). Les conditions météorologiques enregistrées sur la zone prédisent que les éoliennes seront visibles environ la moitié du temps, et feront donc « partie du paysage », mais avec une visibilité variable (à 10 km des côtes, les objets à l'horizon sont généralement peu saillants). Par ailleurs, les facteurs subjectifs présidant à la perception des éoliennes auront tendance à en diminuer la visibilité en termes psycho-visuels : peu d'« effet pleine lune » (la lune ne se couchera ni ne se lèvera dans l'axe du parc pour les zones critiques), peu d'éléments de comparaison avec des éléments de paysage caractéristiques (à l'exception des cheminées du Havre, qui ne sont dans l'axe visuel du parc que dans des zones lointaines). On notera enfin qu'on observera ni alignements répétés, ni d'effets stroboscopiques (pas de soleil dans l'axe).

En conclusion, cette étude corrobore la carte d'impact élaborée lors de l'étude paysagère, et son tableau récapitulatif que l'on trouvera pp. 15, 16 et 17 du document [SETUP11].

D. Synthèse

La présente étude avait pour objectif de valider la méthodologie utilisée par le maître d'ouvrage pour évaluer aussi précisément que possible l'impact visuel du projet de parc éolien de Courseulles-sur-Mer. 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 à l'étude d'impact, 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 de Courseulles-sur-Mer 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'étude à la lumière des spécificités du site. Ces spécificités ont été prises en compte de façon approfondie pour la sélection des points de vue, de la date et des heures des clichés de référence. De ce point de vue, l'étude paysagère a permis de guider de façon décisive l'étude d'impact visuel. Cependant, l'impact reste un aspect subjectif, même s'il se fonde sur des réalités physiques (la géométrie, la lumière, et leurs interactions). Plusieurs facteurs psycho-cognitifs relatifs à la vision humaine, de nature à altérer la perception subjective de l'impact ont été étudiés. Le bilan global penche plutôt pour un affaiblissement de l'impact objectif du fait de conditions favorables sur le site, la principale étant l'exposition nord pour les zones d'impact le plus marqué.

Au final, on ne saurait trop insister sur l'impérieuse nécessité à respecter strictement les conditions 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 œuvre⁹. Par ailleurs, ces simulateurs ne sont pas actuellement transportables et donc ne permettraient pas au public concerné d'en faire un usage profitable.

Les technologies de Réalité Augmentée sont également porteuses d'un fort potentiel pour l'étude d'impact, 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 d'impact sur les parcs éoliens et plus généralement sur toute construction nécessitant ce type d'évaluation.

⁹ 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. Annexes

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.

[Geophom12] Projet de parc éolien au large de Courseulles-sur-Mer. Livret de photomontages réalisé par le cabinet Géophom.

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

[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, documentation Géophom, Juillet 2012. Disponible sur <http://www.debatpublic-eolienmer-saint-nazaire.org/docs/documents-maitre-ouvrage/st-nazaire-methodologie-photomontage.pdf> .

[SETUP11] Projet de parc éolien en mer de Courseulles-sur-Mer : synthèse de l'étude paysagère de décembre 2011. Disponible sur <http://www.debatpublic-eolien-en-mer-courseulles.org/docs/etudes/etude-paysagere.pdf>

1. Choix du capteur photographique pour l'étude

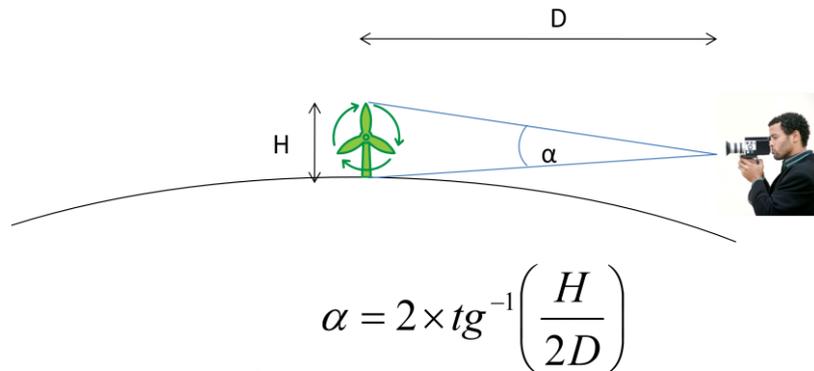
Le choix de l'appareil numérique (APN) et de l'optique de capture des photographies servant de base aux photomontages d'impact doit être guidé par un seul critère essentiel : reproduire la vision humaine. Or ce choix est délicat par nature, car la vision humaine est tout sauf une vision statique et instantanée ! 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 1mm à 3m. A 10 km, nous voyons donc des structures d'environ 3m. 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 2 minutes 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.

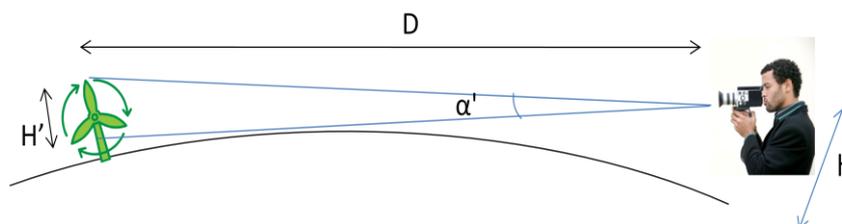
L'appareil choisi pour l'étude de Courseulles-sur-Mer est le Nikon D800E pourvu d'une optique de 50mm. Cet APN est dépourvu de filtre passe-bas qui permet de restituer un « piqué » d'image très adapté à la tâche de photomontage. Les photographies sont téléchargées au format RAW, et correspondent à l'image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

2. Visibilité des structures en mer

La visibilité d'un parc éolien off-shore peut être déterminée selon des critères géométriques :



La distance de l'horizon D est inférieure à 5 km pour un observateur de 1m80 environ. 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 = 175 m pour une éolienne du parc de Courseulles-sur-Mer, et $D_t = 12740$ km (diamètre terrestre)

D	α (degrés)	α (minutes d'arc)	Effacement (m)	α' (avec l'horizon)
500 m	20	1200	0	1200
1 km	10	600	0	600
2 km	5	300	0	300
5 km	2	120	0	120
10 km	1	60	2	60
20 km	0.5	30	18	27
30 km	0.33	20	50	15
40 km	0.25	15	97	7

3. 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'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