



Guide pour l'élaboration d'analyses de visibilité

- Analyses du champ de vision
- Photomontages
- Visualisations 3D

Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Mentions légales

Mandant	Office fédéral de l'environnement (OFEV), Section EIE et organisation du territoire, 3003 Berne
Mandataire	Meteotest AG, Fabrikstrasse 14, CH-3012 Bern
Editeurs	Office fédéral de l'environnement (OFEV) Office fédéral de l'énergie (OFEN)
Accompagnement OFEV Accompagnement OFEN	Marcus Ulber, Elisa Baer, Elisabeth Suter Markus Geissmann, Katharina Meyer
Remarque	Le présent guide a été réalisé sur mandat de l'OFEV. Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.
Date	16.02.2021
Version courante	Rapport final
Versions précédentes	-
Numéro de projet	20_0138
Fichier	Guide_visibilité_fr_v6.1
Créé par	Paul Froidevaux
Contrôlé par	16.02.2021 Dominik Eggli
Approuvé par	16.02.2021 Sara Koller
Garantie	Meteotest garantit à ses clients une exécution soignée et dans les règles de l'art de son mandat. Toute responsabilité, en particulier pour les dommages causés par le défaut, est exclue dans la mesure permise par la loi.

Index

1	Situation générale	6
2	Analyse territoriale du champ de vision	7
2.1	Introduction.....	7
2.2	Contenu d'une expertise sur le champ de vision	7
2.3	Bases de calcul.....	8
2.3.1	Modèle numérique du terrain.....	8
2.3.2	Données sur les éoliennes	9
2.3.3	Hauteur d'observation.....	9
2.4	Aspects spécifiques à l'énergie éolienne.....	9
2.4.1	Rayon / distance maximale de l'effet visuel	9
2.4.2	Intensité de la perception visuelle (d'après Torkler & Zeidler)	10
2.5	Méthode.....	11
2.5.1	Analyse simple du champ de vision.....	11
2.5.2	Analyse du champ de vision pondérée en fonction de la distance	11
2.5.3	Exposition de la population	13
2.5.4	Analyse détaillée du champ de vision en zone d'habitation.....	14
3	Photomontages	16
3.1	Introduction.....	16
3.2	Contenu d'une analyse par photomontage.....	16
3.3	Méthode.....	16
3.3.1	Planification des prises de vue (moments et lieux)	16
3.3.2	La prise de vue.....	19
3.3.3	Traitement d'images	22
3.3.4	Élaboration des photomontages	24
4	Visualisation 3D	29
5	Littérature	33

Liste des Tableaux

Tableau 1:	Vue d'ensemble des outils d'analyse de la visibilité présentés dans ce rapport et leurs applications possibles.	6
Tableau 2:	Exemple de différentes zones d'éloignement définies pour la pondération de l'effet visuel (pour des éoliennes de 170 mètres).12	
Tableau 3:	Exemple d'un tableau récapitulatif de l'exposition de la population...14	

Liste des Figures

Figure 1:	Exemple d'une carte de visibilité simple.....	11
Figure 2:	Représentation graphique de l'intensité de l'effet visuel d'une éolienne en fonction de la distance depuis laquelle elle est observée (Torkler & Zeidler 2013).	12
Figure 3:	Exemple d'une carte de visibilité pondérée en fonction de la distance.....	13
Figure 4:	Exemple d'une analyse détaillée de la visibilité des éoliennes depuis une zone d'habitation. L'analyse se base sur un MNS avec un maillage de 2 m.	15
Figure 5:	Exemple d'une analyse des bâtiments sur la base d'un MNS.	15
Figure 6:	Exemple d'un photomontage (en haut) avec une photographie panoramique jointe (en bas) pour rendre l'emplacement plus reconnaissable.	17
Figure 7:	Exemple d'un photomontage basé sur une photographie inadaptée : trop brumeux, contre-jour, beaucoup d'ombre, la neige a un effet distrayant.....	19
Figure 8:	Exemples de différentes distances focales : 50 mm (en haut) ; 35 mm et 75 mm (en bas).....	20
Figure 9:	Appareil photo professionnel avec géomarqueur installé	22
Figure 10:	Correction des effets d'ombre et de lumière : photographie originale à gauche, photographie modifiée à droite.....	23
Figure 11:	Amélioration des contrastes locaux (clarté) : photographie originale à gauche, photographie retouchée à droite.....	23
Figure 12:	Réduction de l'effet de brume (Dehaze) : photographie originale à gauche, photographie retouchée à droite.....	24
Figure 13:	Photographie avec ligne d'horizon.	25
Figure 14:	Exemple de la prise en compte d'obstacles visuels. Dans ce cas, les obstacles visuels n'ont pas été traités d'une manière suffisamment soignée : sur l'éolienne de gauche, la pale de rotor la plus basse devrait disparaître derrière la forêt ; sur l'éolienne de droite, une trop grande partie du mât a été coupée.	25
Figure 15:	Exemples de la prise en compte de l'heure de la journée, et donc de l'orientation correcte des ombres. En haut : photomontage	

	élaboré pour la mauvaise heure. En bas : photomontage élaboré pour l'heure à laquelle la photo a été prise.	26
Figure 16:	Exemples de prise en compte de la brume. En haut: conditions d'éclairage non adaptées, les éoliennes sont trop lumineuses. En bas : Ajustement des conditions d'éclairage des éoliennes, en tenant compte de la légère nébulosité présente.	27
Figure 17:	Exemple de positionnement des pales des rotors : En haut (irréaliste): les rotors de toutes les éoliennes sont positionnés de la même manière. En bas (réaliste) : les rotors des différentes éoliennes sont positionnés différemment.	28
Figure 18:	Visualisation 3D d'une éolienne (Enercon E-82) sur le Belpberg, générée à l'aide de Google Earth et du "3D Warehouse" de SketchUp. La position d'observation irréaliste (l'observateur est dans les airs) et la coloration non naturelle de la couverture végétale ne sont pas optimales.	30
Figure 19:	Exemple d'une bonne visualisation 3D d'une éolienne (Enercon E-82) sur le Belpberg.	31
Figure 20:	Bon exemple de visualisation 3D pour le projet de parc éolien Linthwind.	32

1 Situation générale

Les analyses de visibilité forment une partie importante de l'évaluation de l'impact d'un projet d'énergie éolienne sur le paysage. Ce rapport est destiné à fournir aux développeurs de projets des conseils et des bonnes pratiques pour l'élaboration de ces analyses de visibilité.

Différents outils peuvent être utilisés, selon les spécificités et l'approfondissement de l'analyse souhaitée. Dans le cadre d'une étude détaillée sur la visibilité des éoliennes et leur impact sur le paysage, les outils peuvent être combinés selon les besoins.

Le Tableau 1 liste les outils présentés dans ce rapport. Ceux-ci sont expliqués plus en détail dans les chapitres suivants. Le tableau indique également dans quelles phases de planification et pour quels aspects de l'analyse ces outils peuvent être utilisés.

Tableau 1: Vue d'ensemble des outils d'analyse de la visibilité présentés dans ce rapport et leurs applications possibles.

Outil d'analyse	Phases de planification		Aspects de l'analyse				
	Planification directrice cantonale / régionale	Planification d'affectation / Autorisation de construire, y compris EIE	Analyse quantitative	Analyse qualitative	Esthétique du paysage	Analyse territoriale (grandes surfaces)	Analyse ponctuelle
Analyse territoriale du champ de vision (chapitre 2)	(x)	x	x			x	
Photomontages (chapitre 3)	(x)	x		x	x		x
Visualisations 3D (chapitre 4)	(x)	x		x	x	x	

Pendant les phases de planification directrice cantonale et régionale, les détails du projet qui sont requis pour les analyses du champ de vision et, en particulier, les photomontages et les visualisations 3D ne sont généralement pas encore disponibles (par exemple, l'emplacement, le nombre et la hauteur des éoliennes). Ces outils ne sont normalement pas nécessaires au stade de la planification directrice. Ils peuvent être utilisés dans le cas où il faut s'attendre à des impacts négatifs importants sur le paysage et que cette situation peut remettre en question la totalité du site éolien ou la faisabilité du parc éolien dans son ensemble (par exemple en raison d'impacts graves sur des objets protégés d'importance nationale).

2 Analyse territoriale du champ de vision

2.1 Introduction

L'analyse territoriale du champ de vision donne une idée générale des effets visuels d'un parc éolien sur son environnement.

Une analyse simple du champ de vision montre combien d'éoliennes planifiées et/ou existantes sont visibles depuis quels endroits. Lors d'une analyse plus approfondie, la proximité de l'observateur avec chaque éolienne, le fait que certaines éoliennes ne puissent être visibles que partiellement, de même que l'impact général sur le champ de vision de l'observateur, peuvent être pris en compte.

Les analyses du champ de vision s'effectuent avec un logiciel de géo-informatique adapté. Dans ce document, ces analyses sont basées sur ArcGIS et l'extension Spatial Analyst¹.

2.2 Contenu d'une expertise sur le champ de vision

Une expertise sur le champ de vision devrait contenir les informations suivantes :

Partie générale	Brève description de la situation
Bases de calcul	<ul style="list-style-type: none">- Modèle numérique du terrain utilisé et sa résolution horizontale- Obstacles visuels considérés et leur hauteur (par ex. végétation, bâtiments)- Données de base concernant les éoliennes (coordonnées de l'emplacement, hauteur)- Hauteur d'observation considérée- Distance maximale pour laquelle un effet visuel est constaté- Critères utilisés pour la pondération de l'effet visuel
Représentations graphique	<ul style="list-style-type: none">- Simple carte de la visibilité- Carte de la visibilité pondérée en fonction de la distance
En option: <ul style="list-style-type: none">- Tableaux- Cartes- Récepteurs	<ul style="list-style-type: none">- Exposition de la population- Carte pondérée prenant en compte la visibilité partielle de certaines éoliennes et l'impact général sur le champ de vision- Mise en évidence sur les cartes de visibilité de différents endroits particulièrement pertinents pour l'évaluation (par ex. points de vue, zones d'habitations, etc.)

¹ <http://www.esri.com/software/arcgis/extensions/spatialanalyst>

2.3 Bases de calcul

2.3.1 Modèle numérique du terrain

La résolution horizontale du modèle numérique du terrain (MNT) doit être adaptée aux spécificités de l'analyse. Ainsi, une résolution de 25 m est suffisante pour une vue d'ensemble régionale de la visibilité d'un ou plusieurs parcs éoliens. Pour une analyse à petite échelle, par exemple pour un seul lieu, une résolution plus fine devrait être utilisée.

Il est conseillé d'au moins considérer la forêt comme un couvert végétal limitant la vue. Selon les spécificités de l'analyse, les bâtiments et les autres obstacles visuels éventuels devraient également être pris en considération.

Avec un modèle numérique de surface (MNS), la couverture du sol est automatiquement prise en compte. Si aucun MNS n'est disponible, les hauteurs supplémentaires dues à la couverture du sol peuvent être ajoutées à un MNT (voir par ex. Peters & Brahms 2011).

Lors d'un calcul basé sur un MNS ou un MNT modifié, la visibilité depuis les zones forestières est calculée pour un observateur qui serait placé à la hauteur du sommet des arbres. En pratique, on suppose que les éoliennes ne sont pas visibles depuis la forêt, et les zones forestières sont donc éliminées après le calcul. En réalité toutefois, la vue sur les éoliennes n'y est pas nécessairement complètement obstruée. On peut s'attendre à ce que des éoliennes puissent être visibles depuis certaines zones forestières, en particulier dans les forêts de feuillus en hiver et le long des crêtes ou des pentes raides.

Il convient de noter que les résultats pour les zones d'habitations sont théoriques. Les restrictions visuelles causées par les bâtiments et la végétation y varient à très petite échelle et ne peuvent pas être indiquées sur les cartes de visibilité à l'échelle régionale. En outre, la visibilité des éoliennes depuis des bâtiments à plusieurs étages dépend de la hauteur de l'observateur (c'est-à-dire de l'étage où il se trouve).

Pour la Suisse, les bases de données suivantes de Swisstopo² sont des bases de calcul adéquates :

- MNT25 – modèle numérique du terrain, sans végétation ni constructions, avec un maillage de 25 mètres.
- Swiss Alti3D – modèle numérique du terrain, sans végétation ni constructions, avec un maillage de 2 mètres, 5 mètres ou 10 mètres.

² https://shop.swisstopo.admin.ch/fr/products/height_models <https://shop.swisstopo.admin.ch/fr/products/landscape>

- MNS – modèle numérique de surface très précis qui reproduit la forme de la surface terrestre en incluant tous les éléments permanents et visibles du paysage tels que le sol, la végétation, les forêts, les bâtiments et les autres ouvrages d'art avec un maillage de 2 mètres.
- swissTLM3D – modèle topographique du paysage qui contient entre autres des informations sur la couverture du sol et l'utilisation des terres.
- swissBUILDINGS3D 1.0 et 2.0 – bases de données vectorielles représentant les bâtiments.

2.3.2 Données sur les éoliennes

Les données nécessaires concernant les éoliennes sont les coordonnées de l'emplacement, la hauteur de l'éolienne et le diamètre du rotor.

La forme particulière d'une éolienne doit être prise en compte pour déterminer la hauteur de l'éolienne pertinente pour l'analyse. Le moyeu a le plus grand impact visuel. De plus, comme les pales du rotor deviennent de plus en plus fines vers l'extérieur, leurs extrémités sont à peine visibles de loin.

En conséquence, nous recommandons l'approche suivante pour calculer la hauteur effective d'une éolienne dans le cadre d'une analyse de visibilité :

$$H_{eff} = HM + 0.25 * DR$$

H_{eff} = hauteur effective de l'éolienne en m

HM = hauteur de moyeu en m

DR = diamètre du rotor en m

2.3.3 Hauteur d'observation

Une hauteur d'observation de 1.5 mètres est typiquement prise en compte. Les analyses du champ de vision s'effectuent donc pour une hauteur de 1.5 mètres au-dessus du sol.

2.4 Aspects spécifiques à l'énergie éolienne

2.4.1 Rayon / distance maximale de l'effet visuel

Lors de l'analyse du champ de vision, la visibilité d'une éolienne est examinée à l'intérieur d'un rayon prédéfini. Ce rayon représente la distance maximale pour laquelle l'éolienne a un effet visuel. Cette distance maximale dépend de la hauteur du moyeu et du diamètre de rotor.

D'après LUNG (2006), la distance maximale pour laquelle l'éolienne a un effet visuel peut être calculée ainsi :

$$D_m = \frac{1}{(9 * 10^{-5} + (0.011 * 0.952^h))}$$

D_m = distance maximale de l'effet visuel en mètres

h = hauteur totale (hauteur de moyeu + rayon du rotor) de l'éolienne en m

Au-delà de cette distance, l'effet visuel d'une éolienne est considéré comme négligeable. Schöbel (2012) donne une distance maximale de l'effet visuel de 20 km pour une éolienne de 200 mètres en cas de bonnes conditions de visibilité. En cas de brume ou de brouillard, cette distance est réduite à 2 km.

Il est également important de noter que les éoliennes sont mieux visibles la nuit, lorsque leurs feux d'obstacle sont allumés (balisage lumineux), que lors d'une journée moyenne.

Pour la méthodologie présentée au chapitre 2.5, la distance maximale de l'effet visuel selon Lung est utilisée.

2.4.2 Intensité de la perception visuelle (d'après Torkler & Zeidler)

D'après une étude de Torkler & Zeidler (2013), l'intensité avec laquelle une éolienne est perçue visuellement dépend des trois facteurs suivants :

- La distance entre l'observateur et l'éolienne : la perception diminue avec cette distance.
- La visibilité partielle de l'éolienne : les différentes parties d'une éolienne ne sont pas toutes perçues avec la même intensité. Ainsi, lors d'une analyse de la visibilité, un supplément de sensibilité est attribué au moyeu à cause de l'agitation optique à proximité. Cette agitation optique est due au mouvement des pâles en rotation ainsi qu'au balisage lumineux.
- Le nombre d'éoliennes visibles : la deuxième éolienne visible a moins d'effet que la première, et ainsi de suite. Les analyses de visibilité tiennent ainsi compte de facteurs de réduction de l'effet visuel en fonction du nombre d'éoliennes visibles.

Pour la méthodologie présentée au chapitre 2.5.2, nous prenons en compte l'intensité de la perception visuelle d'après Torkler & Zeidler en définissant différentes zones d'impact visuel en fonction de la distance à l'éolienne.

2.5 Méthode

Une carte simple de la visibilité montre combien d'éoliennes sont visibles depuis quels endroits (voir section 2.5.1). La distance maximale de l'effet visuel y est calculée d'après LUNG (2006). Pour affiner l'analyse du champ de vision, une pondération de la visibilité en fonction de la distance et d'après l'intensité de la perception visuelle selon Torkler & Zeidler (2013) peut être appliquée (section 2.5.2). L'exposition de la population peut également être calculée (section 2.5.3). En tant qu'option supplémentaire, un calcul détaillé basé sur un MNS est également présenté ici (section 2.5.4).

2.5.1 Analyse simple du champ de vision

Une analyse simple du champ de vision s'effectue selon l'approche dite "viewshed". Le résultat est affiché sur une carte de visibilité. Cette dernière indique le nombre d'éoliennes visibles depuis chaque endroit de la carte. Un exemple d'une telle carte de visibilité est présenté à la Figure 1.

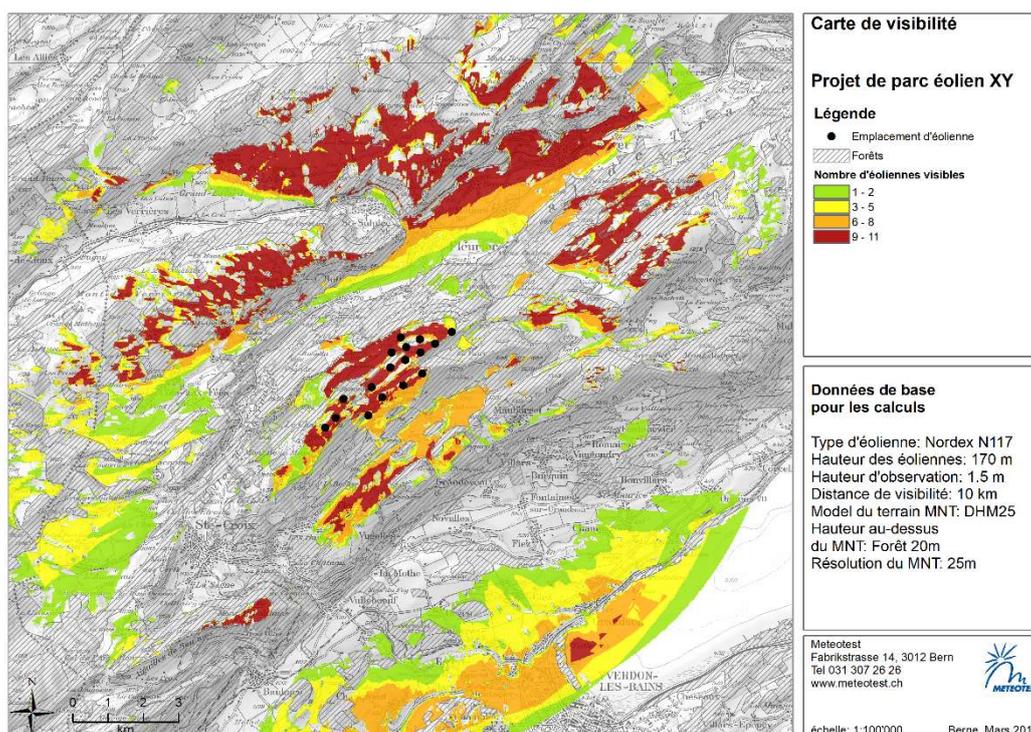


Figure 1: Exemple d'une carte de visibilité simple.

2.5.2 Analyse du champ de vision pondérée en fonction de la distance

Grâce à la définition de zones d'éloignement avec différents coefficients de pondération de la visibilité, il est possible de prendre en compte le fait qu'une éolienne proche a un effet visuel plus important qu'une éolienne distante. La Figure

2 montre que la diminution de l'effet visuel n'est pas forcément linéaire par rapport à la distance.

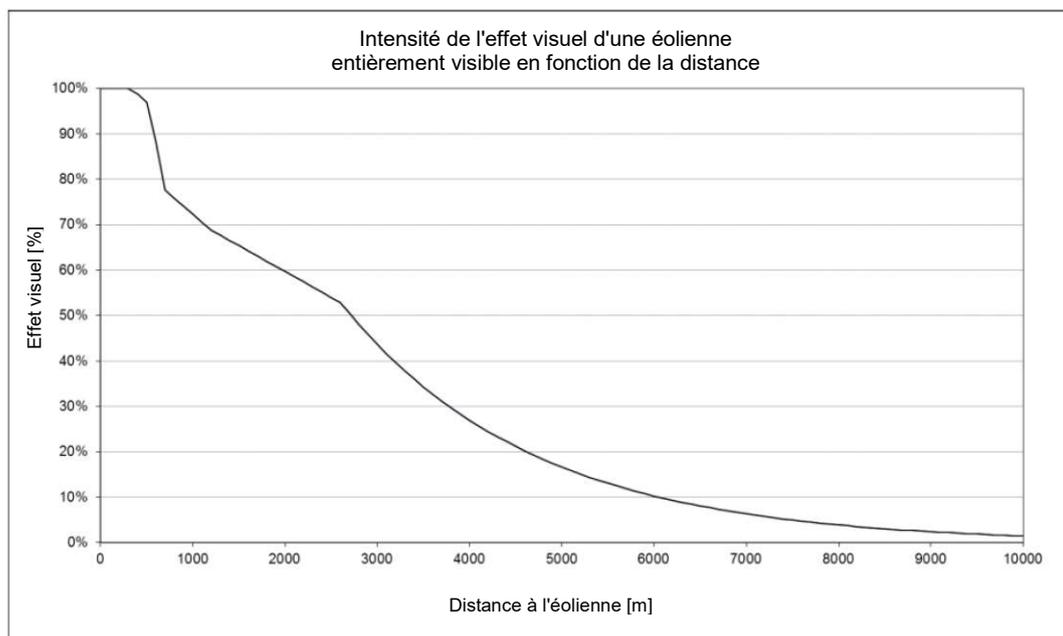


Figure 2: Représentation graphique de l'intensité de l'effet visuel d'une éolienne en fonction de la distance depuis laquelle elle est observée (Torkler & Zeidler 2013).

En fonction de la hauteur du moyeu, différentes zones d'éloignement à l'éolienne peuvent être définies. La pondération du Tableau 2 est montrée en exemple ici. Cette pondération a été utilisée dans le cadre d'une étude sur la visibilité des éoliennes pour le canton de Vaud (Meteotest 2015). Elle correspond à des éoliennes de 110 à 170 m de haut.

Tableau 2: Exemple de différentes zones d'éloignement définies pour la pondération de l'effet visuel (pour des éoliennes de 170 mètres).

Zone	Distance à l'éolienne [km]	Pondération
Zone centrale	0–0.5	1
Zone proche	0.5–2.5	0.7
Zone moyenne	2.5–5.0	0.3
Zone éloignée	5.0–10.0	0.05

Le résultat de la simple analyse du champ de vision est ensuite pondéré en conséquence et affiché sur une nouvelle carte (voir Figure 3).

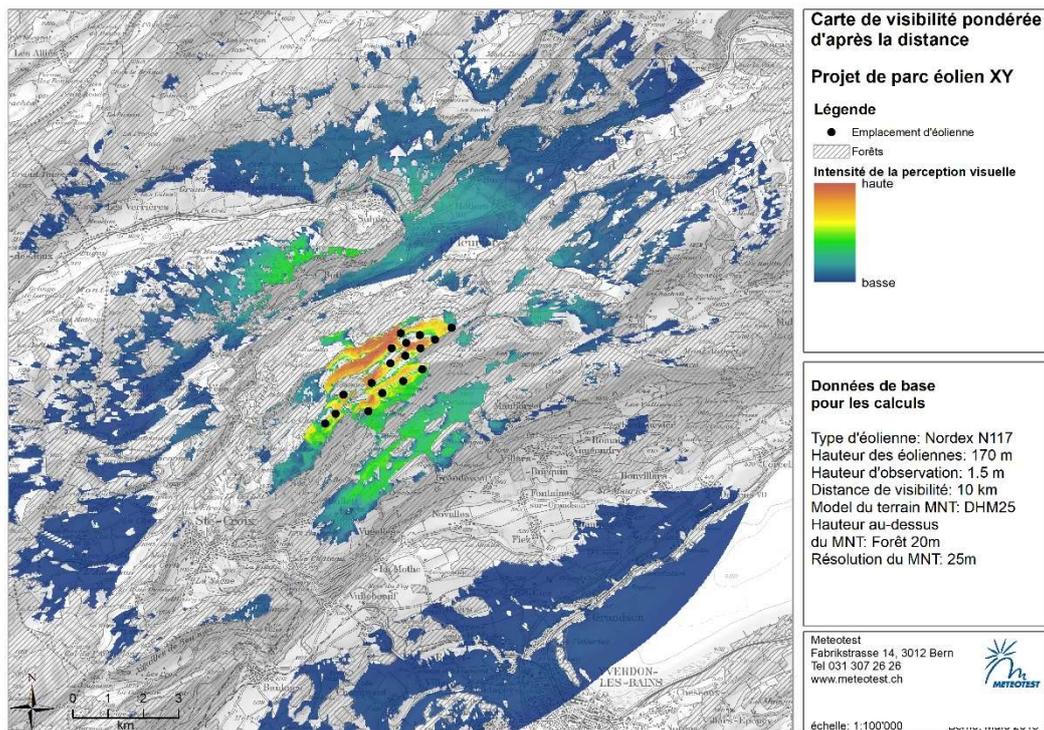


Figure 3: Exemple d'une carte de visibilité pondérée en fonction de la distance.

2.5.3 Exposition de la population

Le calcul de l'exposition de la population montre combien d'habitantes et d'habitants sont concernés par la visibilité d'un parc éolien.

Pour ce faire, le résultat de l'analyse simple du champ de vision (sous forme de quadrillage, c'est-à-dire de grille de géo-données) est multiplié par le quadrillage de la densité de la population. Un nouveau quadrillage représentant l'exposition de la population est ainsi obtenu (voir un résumé au Tableau 3). Les valeurs numériques de ce nouveau quadrillage représentent une mesure de la visibilité qui augmente avec la densité de la population et le nombre d'éoliennes visibles (unité : nombre d'habitants x nombre de turbines visibles).

Tableau 3: Exemple d'un tableau récapitulatif l'exposition de la population.

Zone centrale 0 - 0.5 km			Zone proche 0.5 - 2.5 km			Zone moyenne 2.5 - 5 km			Zone éloignée 5 - 10 km		
Nb. d'éoliennes	Habitants	%									
0	716'447	100.0%	0	667'546	93.2%	0	664'536	92.7%	0	579'818	80.9%
1 - 2	127	0.0%	1 - 2	24'528	3.4%	1 - 2	2'556	0.4%	1 - 2	26'498	3.7%
3 - 5	3	0.0%	3 - 5	16'835	2.3%	3 - 5	8'061	1.1%	3 - 5	26'764	3.7%
6 - 10	-	0.0%	6 - 10	6'030	0.8%	6 - 10	25'253	3.5%	6 - 10	11'973	1.7%
11 - 25	-	0.0%	11 - 25	1'637	0.2%	11 - 25	15'764	2.2%	11 - 25	49'007	6.8%
26 - 50	-	0.0%	26 - 50	-	0.0%	26 - 50	406	0.1%	26 - 50	22'153	3.1%
> 50	-	0.0%	> 50	-	0.0%	> 50	-	0.0%	> 50	363	0.1%
population totale	716'576	100.0%									
personnes affectées totales	130	0.02%	personnes affectées totales	49'030	6.8%	personnes affectées totales	52'040	7.3%	personnes affectées totales	136'758	19.1%

2.5.4 Analyse détaillée du champ de vision en zone d'habitation

Une analyse détaillée du terrain ou des bâtiments permet d'évaluer la visibilité des éoliennes depuis une zone d'habitation.

L'analyse détaillée du terrain se base sur un modèle numérique de surface à haute résolution (MNS). Ceci permet de représenter la visibilité depuis les rues, ainsi que depuis les différentes façades des bâtiments (voir Figure 4).

Dans le cadre d'une analyse détaillée des bâtiments, il s'agit de calculer combien d'éoliennes sont visibles depuis chaque façade du bâtiment (voir Figure 5). La hauteur d'observation prise en compte correspond au dernier étage du bâtiment concerné.

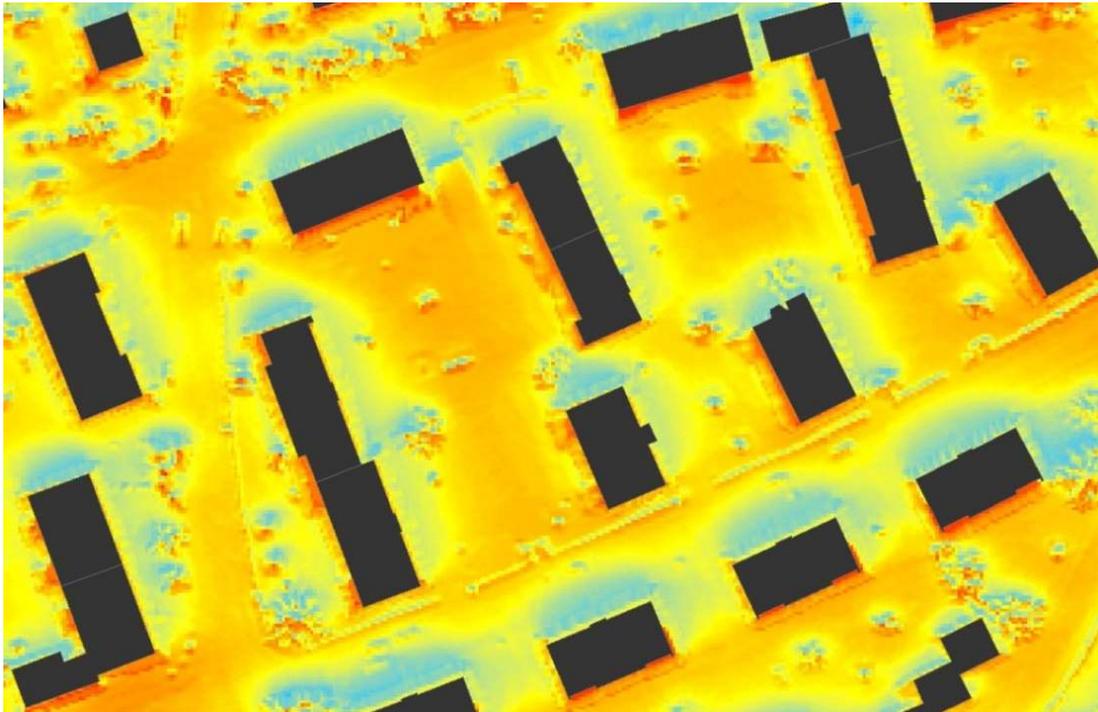


Figure 4: Exemple d'une analyse détaillée de la visibilité des éoliennes depuis une zone d'habitation. L'analyse se base sur un MNS avec un maillage de 2 m.



Figure 5: Exemple d'une analyse des bâtiments sur la base d'un MNS.

3 Photomontages

3.1 Introduction

Les photomontages aident à mieux se représenter les effets visuels des éoliennes sur le paysage. Contrairement à l'analyse du champ de vision qui est quantitative, le photomontage est un outil d'évaluation qualitative des effets d'un parc éolien sur le paysage.

Afin de créer des photomontages réalistes avec des proportions correctes, il est important de prendre les photos originales de haute qualité et de considérer un certain nombre de bonnes pratiques ("best practices"). Ces dernières sont présentées dans les sections suivantes.

3.2 Contenu d'une analyse par photomontage

Les informations suivantes devraient être fournies dans une analyse par photomontage :

Informations générales	<ul style="list-style-type: none">▪ Eoliennes (coordonnées de l'emplacement, type de turbine)▪ Moment (date et heure) et lieu de la prise de vue (emplacement depuis lequel la photographie a été prise)▪ Distance entre le lieu de la prise de vue et les éoliennes▪ Nombre d'éoliennes visibles
Représentations graphiques	<ul style="list-style-type: none">▪ Lieux des prises de vue (emplacements depuis lesquels la photographie a été prise)▪ Photomontages▪ Ligne de profil (facultatif)

3.3 Méthode

3.3.1 Planification des prises de vue (moments et lieux)

Distance entre le lieu de la prise de vue et les éoliennes

Les photos devraient être prises depuis les trois zones d'éloignement des éoliennes suivantes (zones définies dans le Tableau 2) : zone proche (0.5-2.5 km), zone moyenne (2.5-5 km) et zone éloignée (5-10 km).

En cas de photographie depuis la zone centrale (cf. Tableau 2), il peut être difficile de capturer la hauteur d'une éolienne. Depuis la zone proche, la distance par rapport aux éoliennes doit être choisie de sorte que ces dernières soient visibles sur toute leur hauteur.

A une distance de 3 km, les éoliennes apparaissent déjà très petites. À une distance de plus de 10 km, une éolienne ne peut être vue que dans des conditions de visibilité optimales. Il reste néanmoins judicieux d'également créer des photomontages depuis la zone moyenne et la zone éloignée, de manière à évaluer l'impact visuel d'un parc éolien sur tout un paysage.

Reconnaissance du paysage

Lors du choix de l'emplacement de la prise de vue, il faut veiller à ce que les endroits photographiés soient facilement reconnaissables par la population. Il peut s'agir, par exemple, d'habitations connues en arrière-plan, d'un carrefour routier clairement reconnaissable ou d'une ligne d'horizon facilement identifiable, éventuellement avec une tour ou une antenne. Afin de rendre le paysage reconnaissable, il peut aussi être utile de joindre une photographie panoramique au photomontage (Figure 6).

En outre, il peut être important d'effectuer des photomontages également depuis certains lieux particuliers comme des points de vue emblématiques, des lieux publics très fréquentés (terrain de sport ou parc par exemple), ou des lieux particulièrement dignes de protection que l'on voudrait protéger d'une dégradation du paysage.



Figure 6: Exemple d'un photomontage (en haut) avec une photographie panoramique jointe (en bas) pour rendre l'emplacement plus reconnaissable.

Nombre de photomontages

Dans la mesure où la topographie le permet, des photomontages montrant toutes les éoliennes devraient être créés. De plus, les photomontages devraient être effectués depuis des points de vue différents. Dans le cas d'un grand parc éolien ou si les éoliennes sont très éloignées les unes des autres, il est important d'effectuer des photomontages supplémentaires ne couvrant qu'une partie du parc et sur lesquelles se trouvent une ou plusieurs éoliennes.

Dans la pratique, en cas de petits parcs ou d'éoliennes esseulées, il s'est avéré judicieux de créer au moins six photomontages de manière à couvrir correctement les critères ci-dessus. En cas de grands parcs éoliens pour lesquels il est conseillé de créer des photomontages de différentes parties du parc, le nombre de photomontages augmente en conséquence.

Conditions d'éclairage : Moment de la journée, saison et conditions météo

L'impression rendue par un photomontage dépend fortement des conditions d'éclairage. Le meilleur moment pour prendre des photos est le matin et en fin d'après-midi. Néanmoins, si les photos sont prises trop tôt le matin ou trop tard dans l'après-midi, les rayons du soleil seront trop parallèles au terrain, ce qui crée de très longues ombres. Cela peut générer un effet de projecteur qui est désagréable pour l'œil. Vers midi, il y a généralement plus de brume et la visibilité est réduite.

Il est donc important de planifier soigneusement les opérations sur le terrain. Il existe des outils en ligne tels que les applications Sonnenverlauf³ ou Sun Seeker⁴ pour déterminer la position du soleil et des ombres projetées à un endroit particulier. Ces outils peuvent être utilisés pour déterminer le meilleur moment de la journée pour les prises de vues.

Au cours de la planification, il est important de déterminer depuis quel côté les emplacements des éoliennes sont éclairés afin que, lors du photomontage final, les mâts et les rotors ne soient pas dans l'ombre ou à contre-jour. En principe, les photos doivent être prises avec le soleil dans le dos. Lors d'un photomontage basé sur une photographie prise à contre-jour, le paysage est fortement ombragé et seules les silhouettes des éoliennes sont visibles (Figure 7).

En plus de l'heure de la journée, la saison influence également l'effet d'un photomontage. Par exemple, il n'est pas très logique de faire tous les photomontages lorsqu'il y a de la neige au sol si la région n'est que rarement enneigée.

En général, les journées ensoleillées ou partiellement ensoleillées sont préférables, car il est plus facile de créer des photomontages réalistes pour de telles

³ <https://www.sonnenverlauf.de>

⁴ http://www.ozpda.com/sunseeker_iphone.php

conditions. Si le planning le permet, il est préférable de prendre des photos pendant des conditions de foehn. Les conditions de foehn sont en général liées à une très bonne visibilité.



Figure 7: Exemple d'un photomontage basé sur une photographie inadaptée : trop brumeux, contre-jour, beaucoup d'ombre, la neige a un effet distrayant.

3.3.2 La prise de vue

Réglages de l'appareil photo

Les réglages de l'appareil photo doivent être vérifiés avant l'intervention sur le terrain. En particulier, la date et l'heure doivent être correctement paramétrées. Les photos doivent être prises dans la plus haute résolution et la meilleure qualité permises par l'appareil. Si possible, les photos doivent être enregistrées au format RAW (voir section 3.3.3). Cela nécessite toutefois un post-traitement des photos. Un photographe qui ne serait pas particulièrement familier avec le format RAW peut enregistrer les photos également, voire exclusivement, au format JPG et sélectionne – si disponible – le mode de scène "paysage".

Distance focale

Pour obtenir une image réaliste et la moins déformée possible, il convient d'utiliser une distance focale de 40 à 55 mm. Cela permet de reproduire la même impression de perspective et de profondeur que celle de l'œil humain placé au même endroit que l'appareil photographique.⁵

La Figure 8 montre différentes distances focales en exemple. La photo du haut a été prise avec une distance focale de 50 mm et correspond ainsi à peu près à l'œil humain et à la perception humaine. Les deux graphiques du bas ont été pris avec des distances focales de 35 mm et 75 mm respectivement et se situent donc en dehors de la plage optimale



Figure 8: Exemples de différentes distances focales : 50 mm (en haut) ; 35 mm et 75 mm (en bas).

Cadrage

Lorsque nous regardons droit devant nous et que nous ne changeons pas la position de nos yeux ou de notre tête, notre champ de vision couvre un angle avec une ouverture de 180 degrés. C'est pourquoi il peut être utile de travailler avec des images panoramiques. Une image panoramique contient plus de points de référence dans le paysage, de sorte que le spectateur/la spectatrice perçoit plus rapidement depuis quel endroit une photographie a été prise. Les panoramas

⁵ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Focale>

sont très adaptés pour prendre des photos relativement proches (jusqu'à trois kilomètres d'éloignement aux éoliennes).

Pour les photomontages d'éoliennes, il est important qu'il y ait suffisamment d'espace visible au-dessus de l'horizon, de manière à pouvoir y ajouter les mâts et les rotors dans différentes positions et tailles.

Points de référence

Afin d'ajuster une photographie aussi précisément que possible, plusieurs points de référence dont la position exacte peut être facilement identifiée à partir d'une carte topographique ou d'une photographie aérienne⁶ doivent être visibles. Il devrait y avoir au moins un point de référence sur le côté droit et un autre sur le côté gauche de la photographie. De plus, ces points ne doivent pas être trop proches de l'emplacement de la photographie.

Nombre de photos

Afin de créer de bons photomontages, il est indispensable de prendre plusieurs photos depuis chaque endroit prévu en variant légèrement l'orientation et l'emplacement des prises de vue, ainsi que les réglages d'exposition en cas de conditions d'éclairage difficiles. Lors du photomontage, les photos les plus appropriées seront sélectionnées et utilisées.

Protocole des prises de vue

Un protocole contient les informations nécessaires sur les photographies prises sur le terrain. Les informations suivantes doivent être notées :

- l'emplacement exact de la prise de vue (coordonnées X/Y)
- direction dans laquelle la photographie a été prise (°)
- Informations sur les points de référence présents sur la photographie (maisons, carrefours, tours et mâts, etc. qui figurent sur la carte topographique ou sur une photographie aérienne géoréférencée).

La distance focale, la date et l'heure de la photographie sont généralement incluses dans les informations EXIF⁷ des fichiers photos. Les appareils photo de haute qualité avec objectifs interchangeables sont rarement équipés d'un GPS intégré. Toutefois, il existe sur le marché des géomarketeurs qui peuvent être montés sur la griffe de l'appareil photo par exemple (Figure 9). Les nouveaux appareils photo peuvent aussi se connecter à un smartphone via bluetooth et ainsi

⁶ par ex. sur <http://map.geo.admin.ch/>

⁷ Exchangeable Image File Format

obtenir les coordonnées GPS. Comme alternative, les coordonnées peuvent également être enregistrées à l'aide d'un dispositif GPS externe et documentées dans le protocole puis - si souhaité - intégrées dans les données EXIF (par exemple à l'aide du logiciel de retouche photo Adobe Lightroom).



Figure 9: Appareil photo professionnel avec géomarqueur installé

3.3.3 Traitement d'images

Il existe d'innombrables instructions et outils pour le traitement de photos. Nous abordons ici les points essentiels des photomontages d'éoliennes.

Format d'enregistrement de la photographie

L'œil humain est (pour l'instant encore) supérieur aux capteurs des appareils photo numériques en termes de sensibilité à la lumière. L'œil peut distinguer la lumière et les ombres bien mieux qu'un capteur d'appareil photo. C'est pourquoi l'image brute capturée par un appareil photo doit être post-traitée. Les appareils photo effectuent automatiquement ces corrections lorsque des photos sont enregistrées sous forme de fichiers JPG.

Pour les photomontages de haute qualité, ces corrections doivent être effectuées manuellement pour un résultat optimal. À cette fin, les photographies sont prises et enregistrées au format RAW, ce qui permet une flexibilité et une qualité maximales dans le post-traitement des images. Les données JPG peuvent également être post-traitées, mais cela se fait au détriment de la qualité de l'image, surtout en cas de corrections importantes.

Le post-traitement de fichiers de photos RAW dans un logiciel de retouche photo tel qu'Adobe Lightroom nécessite beaucoup d'expérience pour obtenir des résultats optimaux. Il est préférable de confier ce travail à un professionnel.

Correction de l'exposition

La compensation de l'exposition rend une photographie moins grise et plus proche de ce que l'œil humain perçoit (Figure 10). L'objectif est d'éclaircir les zones sombres et d'assombrir les zones claires en ajustant les valeurs tonales de l'image. Le traitement de l'image doit toutefois rester modéré afin que le résultat ne paraisse pas exagéré et ne détourne pas l'attention du but du photomontage.



Figure 10: Correction des effets d'ombre et de lumière : photographie originale à gauche, photographie modifiée à droite.

Traitement des contrastes

Un autre avantage du traitement de l'image est l'amélioration du contraste local. De nombreux programmes proposent un curseur "Clarté". Ce curseur augmente le contraste dans les tons moyens. L'augmentation du contraste a en général un effet positif sur l'observateur car l'image semble plus nette (Figure 11). Ici aussi, il s'agit de ne pas exagérer de manière à éviter de donner l'impression que l'image a été traitée artificiellement.



Figure 11: Amélioration des contrastes locaux (clarté) : photographie originale à gauche, photographie retouchée à droite.

Suppression de la brume

Les images fortement brumeuses peuvent être partiellement ou complètement "dévoilées" grâce à la fonction de correction du voile "Dehaze" (Figure 12). Cela est particulièrement utile lorsque les objets à mettre en évidence se trouvent à une grande distance et qu'aucune photographie de meilleure qualité n'est disponible.



Figure 12: Réduction de l'effet de brume (Dehaze) : photographie originale à gauche, photographie retouchée à droite.

3.3.4 Élaboration des photomontages

Un logiciel spécialisé est indispensable pour l'élaboration de photomontages précis. Les photomontages présentés ici à titre d'exemple ont été créés avec le logiciel WindPRO et le module "Photomontage"⁸.

Référencer les photographies

La photographie doit être correctement référencée dans le paysage. Pour ce faire, les métadonnées suivantes de la photographie sont nécessaires : la distance focale, les coordonnées du lieu où la photographie a été prise, une carte topographique numérique et un modèle d'élévation. Le logiciel crée une image virtuelle prenant en compte le terrain, l'horizon et les points de référence marqués sur la photographie.

Le modèle d'élévation permet une représentation correcte des éoliennes et de la ligne d'horizon. Ceci est important pour valider et ajuster précisément l'emplacement de la prise de vue. La région couverte par le modèle d'élévation doit être suffisamment grande pour que les lignes d'horizon plus éloignées puissent également être visualisées (voir Figure 13). Pour la Suisse, les modèles d'élévation de

⁸ <https://www.emd.dk/>

swisstopo sont adaptés. Le DHM25, avec une résolution horizontale de 25 m, est généralement assez détaillé pour pouvoir référencer un photomontage de manière suffisamment précise.

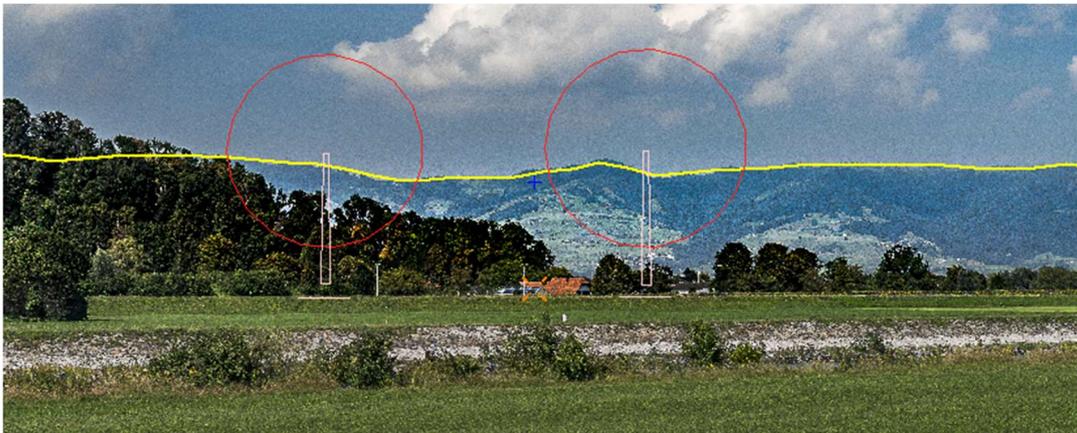


Figure 13: Photographie avec ligne d'horizon.

Prendre en compte les obstacles visuels

La prise en compte d'obstacles visuels cachant une partie d'une éolienne peut s'avérer être une tâche délicate. Si une éolienne est située derrière une forêt ou un arbre, la zone concernée doit être soigneusement retouchée pixel par pixel (voir par ex. Figure 14).



Figure 14: Exemple de la prise en compte d'obstacles visuels. Dans ce cas, les obstacles visuels n'ont pas été traités d'une manière suffisamment soignée : sur l'éolienne de gauche, la pale de rotor la plus basse devrait disparaître derrière la forêt ; sur l'éolienne de droite, une trop grande partie du mât a été coupée.

Déterminer les conditions d'éclairage

Il s'agit de veiller à ce que les ombres sur les éoliennes correspondent à celles de la photographie. Il est donc important de faire correspondre le photomontage à la date et à l'heure de la prise de vue. Cela permet également de contrôler l'intensité et la couleur de la lumière. La Figure 15 montre des ombrages corrects et incorrects pour comparaison.



Figure 15: Exemples de la prise en compte de l'heure de la journée, et donc de l'orientation correcte des ombres. En haut : photomontage élaboré pour la mauvaise heure. En bas : photomontage élaboré pour l'heure à laquelle la photo a été prise.

La photographie de la Figure 15 a été prise en février à 15h16. Dans l'illustration du haut, le photomontage a été effectué pour la mauvaise heure (8h30). Ainsi, les mauvais côtés des mâts sont ombragés. Dans l'illustration du bas en revanche, l'heure correcte (15h16) a été utilisée, ce qui signifie également que les ombres sont correctes.

Le photomontage doit également être adapté aux conditions de visibilité. La Figure 16 montre à quel point l'impression d'un photomontage peut être différente selon que le photomontage est, ou non, soigneusement adapté aux conditions d'éclairage.



Figure 16: Exemples de prise en compte de la brume. En haut: conditions d'éclairage non adaptées, les éoliennes sont trop lumineuses. En bas : Ajustement des conditions d'éclairage des éoliennes, en tenant compte de la légère nébulosité présente.

Positionnement des pales des rotors

Dans la réalité, les moyeux de toutes les éoliennes d'un parc en service pointent dans la même direction. Contrairement à l'orientation des moyeux, l'orientation des pales de rotor est cependant aléatoire. On voit souvent des photomontages dans lesquels les pales des rotors de toutes les éoliennes sont positionnées de manière identique. Ceci est très irréaliste. Pour un montage réaliste, il est important de définir un angle de rotor différent pour chaque éolienne.



Figure 17: Exemple de positionnement des pales des rotors : En haut (irréaliste): les rotors de toutes les éoliennes sont positionnés de la même manière. En bas (réaliste) : les rotors des différentes éoliennes sont positionnés différemment.

4 Visualisation 3D

Sur le terrain, les éoliennes ont en réalité un effet encore différent de celui des photomontages. Les visualisations 3D peuvent fournir une aide supplémentaire pour la planification et l'évaluation des nouvelles éoliennes. Les visualisations 3D présentent certains avantages, mais aussi des inconvénients et des risques :

Avantages :

- Pour autant qu'elles soient bien faites, elles permettent à beaucoup de personnes de se représenter les éoliennes de manière réaliste.
- Elles permettent aux utilisatrices et utilisateurs d'évaluer l'effet visuel des éoliennes depuis différents endroits.
- Elles sont potentiellement plus proches de la vision habituelle que les visualisations 2D, pour autant que des images de qualité soient utilisées.
- Elles permettent d'effectuer des animations réalistes.

Désavantages / Risques :

- Leur élaboration demande un plus gros effort technique.
- Elles nécessitent des logiciels coûteux pour un résultat optimal.
- Elles peuvent conduire à des visualisations avec des angles de vue ou des emplacements de spectateurs irréalistes.

On peut s'attendre à ce que les visualisations 3D soient utilisées plus fréquemment à l'avenir. En tant que technologie d'avenir, les visualisations en réalité augmentée peuvent également être utilisées⁹.

Divers logiciels commerciaux sont disponibles pour les visualisations 3D. Trois possibilités sont mentionnées ici à titre d'exemple :

- Esri CityEngine : Ce logiciel est un module du célèbre logiciel SIG ArcGIS.
- AutoDesk/AutoCAD : les logiciels CAO (Conception assistée par ordinateur) les plus utilisés proposent également des visualisations 3D.
- Maya : Ce logiciel est principalement utilisé dans l'industrie du cinéma et de la télévision, ainsi que pour les jeux vidéo.

Il convient également de mentionner ici VisAsim, un projet cofinancé par le Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS) pour la simulation visuo-acoustique des éoliennes¹⁰.

⁹ <https://echtzeit.swiss/#projects>

¹⁰ <http://www.visasim.ethz.ch/>

En plus des solutions professionnelles payantes, de bonnes animations peuvent également être créées avec des applications librement disponibles, telles que par exemple Google Earth et SketchUp.

Un avantage de cette solution est qu'elle peut être facilement partagée avec d'autres personnes qui peuvent se faire leur propre image de la situation dans Google Earth. Un inconvénient est que la qualité des données d'images de Google Earth est loin de la qualité des images originales prises avec un appareil photo.

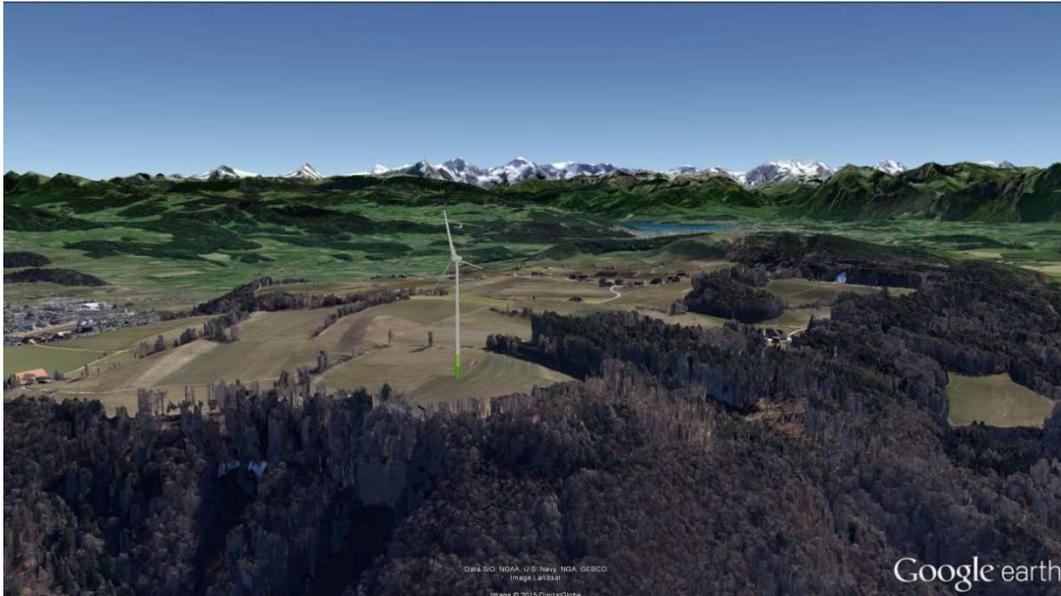


Figure 18: Visualisation 3D d'une éolienne (Enercon E-82) sur le Belpberg, générée à l'aide de Google Earth et du "3D Warehouse" de SketchUp. La position d'observation irréaliste (l'observateur est dans les airs) et la coloration non naturelle de la couverture végétale ne sont pas optimales.

Afin d'obtenir des résultats convaincants et objectifs, il convient de tenir compte des mêmes principes et exigences pour les visualisations 3D que ceux décrits pour les visualisations 2D au chapitre 3.3.

L'image source doit être de haute qualité. Les conditions d'éclairage (heure du jour, saison, météo) doivent être choisies de manière réaliste. Tout effet défavorable (exposition, contraste, brume) doit être réduit par le traitement de l'image. Si des captures d'écran de visualisations 3D sont prises, il faut s'assurer que les angles de vue soient réalistes et que le paysage soit reconnaissable.

Le placement et l'éclairage de l'éolienne dans le terrain virtuel doivent être effectués de manière correcte et professionnelle, comme pour les photomontages. Il faut également faire attention à ce que les positions des rotors soient naturelles.

La Figure 19 montre un bon exemple de visualisation en 3D d'une éolienne sur le Belpberg, créée avec Google Earth et le "3D Warehouse" de SketchUp. La position du téléspectateur à la périphérie du village de Belp permet d'obtenir une impression réaliste de l'effet de l'éolienne.



Figure 19: Exemple d'une bonne visualisation 3D d'une éolienne (Enercon E-82) sur le Belpberg.

Un autre bon exemple de visualisation 3D est la représentation du projet de parc éolien Linthwind dans la Figure 20. Cette visualisation a été créée avec un outil professionnel par la société Echtzeit GmbH¹¹ en collaboration avec la ZHAW et l'OFEN.

¹¹ Echtzeit GmbH; www.echtzeit.swiss



Figure 20: Bon exemple de visualisation 3D pour le projet de parc éolien Linthwind.

5 Littérature

Offices fédéraux

OFEN mars 2010: Recommandations pour la planification d'installations éoliennes. Utilisation des instruments de l'aménagement du territoire et critères de sélection des sites.

OFEN/OFEFP/ARE, Berne, août 2004: Concept d'énergie éolienne pour la Suisse. Bases pour la localisation de parcs éoliens.

OFEN juin 2008: Eoliennes en Suisse. Bases de planification pour l'aménagement du territoire et effets

OFEN juin 2008: Windenergieanlagen in der Schweiz - Leitfaden für die Analyse der Umweltauswirkungen.

OFEN juin 2008: Eoliennes en Suisse. Liste de contrôle pour investisseurs de grandes installations.

Général

Manuel de l'énergie éolienne- Monika Agatz (www.windenergie-handbuch.de)

Hübner, Gundula und Löffler, Elisabeth: Wirkungen von Windkraftanlagen auf Anwohner in der Schweiz: Einflussfaktoren und Empfehlungen. Rapport final en coopération avec l'Université St. Gallen et la Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, octobre 2013.

Müller, Georg Philipp juin 2014: Vorranggebiete Windenergie - Fallstudien zu den planerischen Prozessen in den Kantonen.

Académie suisse des sciences naturelles (2012): Solutions possibles pour la Suisse dans les conflits entre les énergies renouvelables et l'utilisation du territoire. Résumé.

Analyses de visibilité pour l'énergie éolienne

Meteotest (2015): Etude de co-visibilité de parcs éoliens pour le territoire du canton de Vaud. Département du territoire et de l'environnement (DTE).

Peters, J. & Brahm, E (2011): Landschaftsbildgutachten zur geplanten 380-kV-Leitung im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin (Uckermarkleitung)

Torkler, F. & Zeidler, M. (2013): Sichtbarkeitsanalyse von bestehenden Windenergieanlagen sowie geplanten Windeignungsfeldern für die Fläche des Nationalparks Unteres Odertal (Phase 1). Rapport. (www.nationalpark-unteres-odertal.eu/ -> Aktuelles -> Veröffentlichungen). Dernier accès: 14. juillet 2020.

Rodewald R (2012) Lösungswege aus Sicht des Landschaftsschutzes. Dans: Forum Raumentwicklung (3), pp. 19-22.

Schöbel S (2012) Windenergie und Landschaftsästhetik. Zur Landschaftsgerechten Anordnung von Windfarmen (Berlin: Jovis Verlag), pp. 158.

Torkler F (26.6.2014) Visualisierung von geplanten Windenergieanlagen durch animierte Fotomontagen ausgewählter Sichtachsen sowie Ausweisung von potenziellen Gebieten für Sichtverschattungen (Hecken, Alleen, Baumgruppen) zur Verringerung der Sichtbarkeit von Windenergieanlagen (Phase 2). Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (LUGV), Nationalparkverwaltung Unteres Odertal

Ratzbor Günter (28.3.2011) Windenergieanlagen und Landschaftsbild - Zur Auswirkung von Windrädern auf das Landschaftsbild

Bock S und Seuss R 2012: Sichtbarkeitsanalyse für Windenergieanlagen. Dans: Erneuerbare Energien unterstützt durch GIS und Landmanagement (Klarle Martina (Hrsg.)), Wichmann Verlag

Klettke, S (2012): Ermittlung der visuellen Wahrnehmung von Windenergieanlagen auf Basis einer Sichtbarkeitsanalyse – travail de Bachelor, haute école Neubrandenburg

Deglmann Windpark Management GmbH (2014): Sichtbarkeitsanalyse und Fotomontage im Rahmen des Planungsvorhabens "Windkraftanlage Pamensdorf"

Nohl, W. (2010): Ist das Landschaftsbild messbar und bewertbar? - Bestandsaufnahme und Ausblick. Referat auf der Fachtagung "Was ist schiach - Das Landschaftsbild im Prüfverfahren", Institut für Landschaftsentwicklung, Erholungs- und Naturschutzplanung (ILEN), Universität für Bodenkultur, Vienne, 25 février 2010.

Nohl, W. (1993): Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes durch mastenartige Eingriffe. Materialien für die naturschutzfachliche Bewertung und Kompensationsermittlung.

Seuss, I. & Bock, S. (2012): Pilotprojekt 3D-Daten in der Landes- und Regionalplanung. Mandaté par: Hessische Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung.

Landesamt für Umwelt Naturschutz und Geologie (LUNG), 2006: Hinweise zur Eingriffsbewertung und Kompensationsplanung für Windkraftanlagen, Antennenträger und vergleichbare Vertikalstrukturen.

Zink, R. (2012): 3D-Visualisierung am Beispiel der Windenergie. gis.BUSINESS 4/2012