



Etude de l'impact du parc éolien La Perrière sur le radar météo du Colorado pour Quadran

Jonathan Ellis

QINETIQ/17/02590/1.0

Les demandes doivent être adressées à :

Vince Savage
QinetiQ
Malvern Technology Centre
Malvern, Worcestershire
WR14 3PS

Ce document peut être traduit en toutes autres langues que l'anglais. Il doit être traduit entièrement afin de conserver son contexte et son intégrité. Pour éviter toute confusion, la version anglaise devra également être fournie en tant que source.

Table des matières

1.	Introduction.....	3
1.1.	Contexte	3
1.2.	Périmètre d'étude	3
1.3.	Le renouvellement de La Perrière	3
1.4.	Le radar météo du Colorado	4
1.5.	Impact des éoliennes.....	6
1.6.	Zones de vigilance	7
1.7.	Autres fermes éoliennes.....	8
1.8.	Sites sensibles.....	8
2.	Etude	10
2.1.	Analyse de la ligne de mire.....	10
2.2.	Critère 1 : occultement.....	11
2.3.	Critères 2 et 3 : taille de la zone d'impact et distance entre deux zones d'impact	11
2.2.1.	Réflectivité des composites.....	11
2.3.2.	Zone d'impact.....	12
2.3.3.	Taille maximum de la zone d'impact.....	13
2.4.	Critère 3 : distance entre plusieurs zones d'impact	13
2.5.	Critère 4 : distance par rapport aux sites sensibles	14
3.	Conclusions.....	15
4.	Références.....	16

1. Introduction

1.1. Contexte

Le client Quadran prévoit le renouvellement de sa centrale éolienne existante de La Perrière, située sur la commune de Sainte-Suzanne, dans le nord du département français de la Réunion. Le site se situe approximativement à 17,4 km à l'est de la station météo du Colorado de Météo France. Quadran a demandé une évaluation de l'impact du radar pour quantifier les effets de la ferme éolienne envisagée sur le radar et comparer ceux-ci avec les limites règlementaires [1].

1.2. Périmètre d'étude

L'étude est menée selon la méthode approuvée QinetiQ CLOUDSIS 1.0 pour évaluer les impacts du champ éolien sur les radars météo de Météo-France.

1.3. Le renouvellement de La Perrière

Le nouveau parc proposé sera composé de 9 éoliennes Vestas V110, dont le mât mesure 80 m. Elles remplaceront les 37 turbines existantes, qui seront démantelées. La figure 1-1 illustre l'implantation proposée (carrés blancs) et le numéro des éoliennes. Les éoliennes existantes sont représentées en vert.

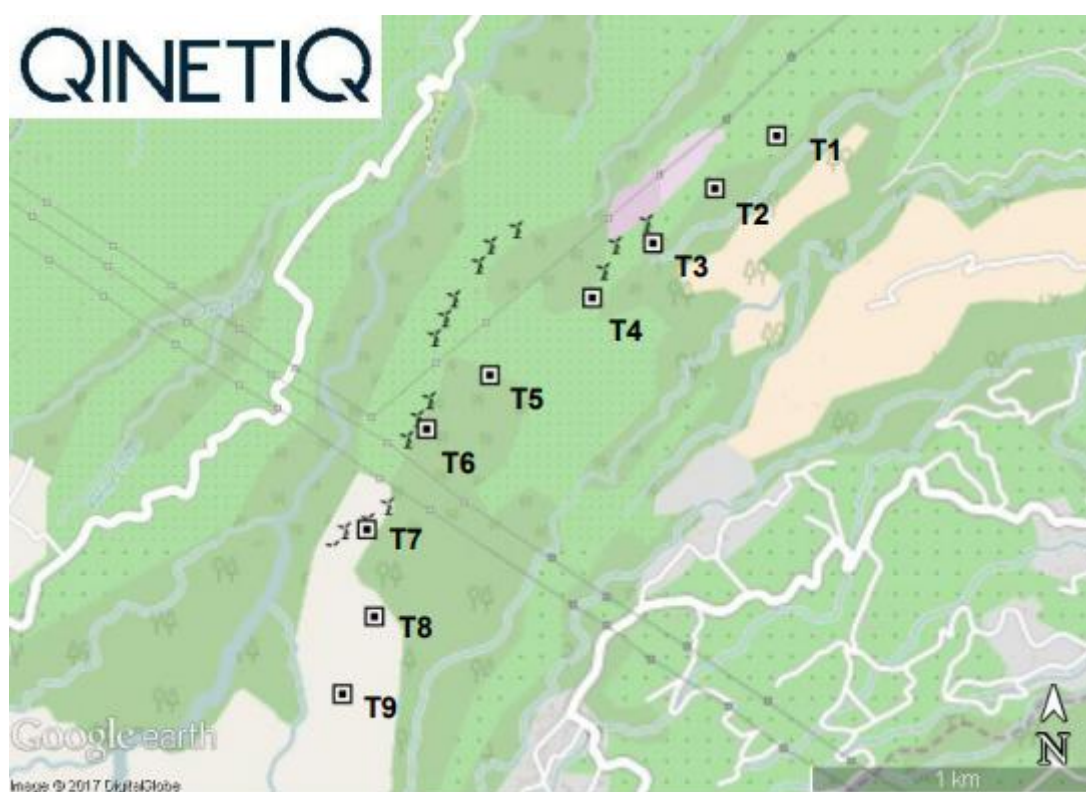


Figure -1-1 - Implantation des futures et des actuelles éoliennes

Les latitudes et longitudes des éoliennes ont été fournies par Quadran en Système Géodésique Mondial 1984 (WGS1984). Les localisations individuelles des machines sont détaillées dans le Tableau 1-1, ainsi que leur altitude par rapport à la mer (NGF, m AMSL) – lesquelles sont également fournies par le client.

Table 1-1 Coordonnées des turbines et altitude des éoliennes de la ferme envisagée

N° éolienne	WGS84 coordonnées (degrés décimaux)		Altitude, NGF (m par rapport au niveau de la mer)
	Latitude (Nord)	Longitude (Est)	
T1	-20.948792	55.594714	333
T2	-20.950414	55.592672	358
T3	-20.952092	55.590631	389
T4	-20.953772	55.588625	413
T5	-20.956150	55.585253	458
T6	-20.957811	55.583164	487
T7	-20.960897	55.581192	526
T8	-20.963572	55.581439	558
T9	-20.965953	55.580386	580

Les caractéristiques des Vestas V110 ont été fournies par le client [4] [5]. Les dimensions utilisées pour cette étude sont résumées dans le Tableau 1-2. Pour la modélisation, la forme des éoliennes a été considérée comme une tour linéaire (diamètre constant).

Table 1-2 Paramètres des turbines utilisés pour l'étude [4][5]

Paramètre	Valeur
Type de machine	Vestas V110
Hauteur du moyeu (mètres)	80
Diamètre du mât à sa base (m)	3.7
Diamètre en haut de mât (m)	2.5
Diamètre du rotor (m)	110
Hauteur en bout de pale (m)	135

1.4. Le radar météo du Colorado

Météo-France est propriétaire et exploitant du radar météorologique du Colorado. Les paramètres de celui-ci ont été fournis par Météo-France [7]. Les principaux paramètres utilisés dans l'étude sont répertoriés dans le Tableau 1-3.

Table 1-3 Principaux paramètres du radar utilisés dans l'étude

Paramètre	Valeur
Latitude (WGS84, degrés nord)	-20.911784

Longitude (WGS84, degrés eat)	55.421948
Altitude de l'antenne par rapport au niveau de la mer (m) en format Institut géographique national (IGN) 1989 (IGN89)	749.8
Fréquence (GHz)	2.81
Puissance crête (kW)	740
Durée des impulsions (seconds)	2×10^{-6}
Bande passante 3dB (degrés)	1.2
Gain maximum de l'antenne (dB)	42.5
Bruit de fond du récepteur (dBm)	-114
Seuil de détection après le bruit de fond (dB)	2
Facteur de bruit (dB)	4.3
Facteur d'annulation du désordre (dB)	30
Gamme maximum d'opération (km)	250
Fréquence de rotation de l'antenne (degrees / second)	6
Pertes totales (dB)	5.4
Trois plus faibles angles de balayages (degrés) ¹	0.3 / 0.8 / 1.4
Radar constant (dB)	-72

La courbe du faisceau de l'antenne utilisée pour la modélisation est représentée Figure 1-2.

¹ L'angle de balayage (scan angle) correspond à l'angle d'élévation du faisceau du radar météo. La détection de l'élévation est réalisée en utilisant une antenne, comme une parabole, qui produit un rayon très concentré qui se propage à travers l'atmosphère. Pour permettre de surveiller plusieurs hauteurs, l'antenne est mécaniquement balayée horizontalement et verticalement, permettant une couverture en volume. Cela crée une série de couches s'élevant verticalement, chaque couche contenant les données de distance et d'azimut.

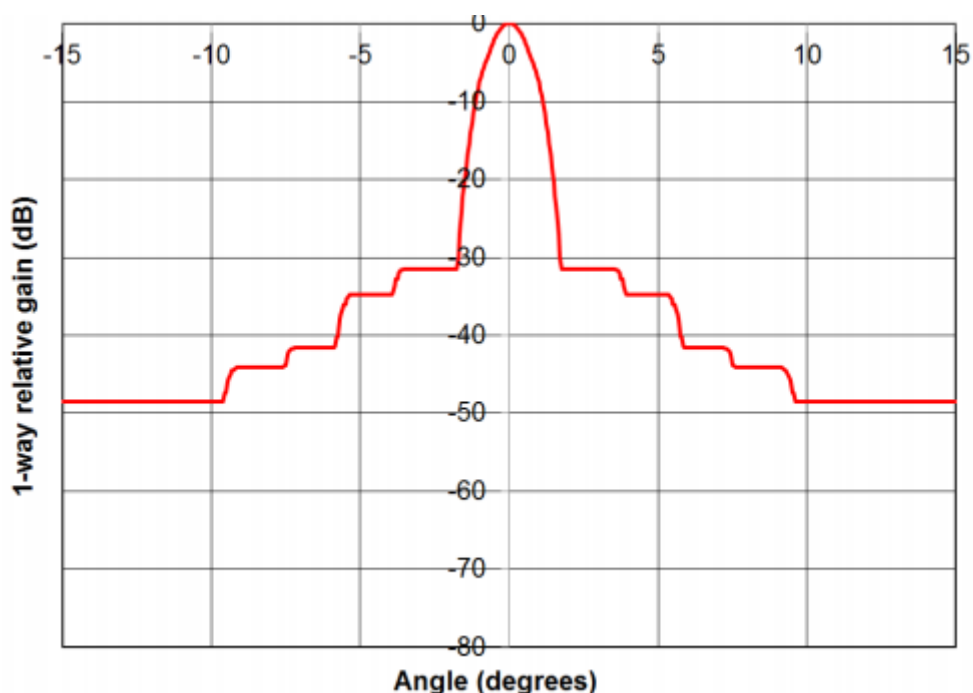


Figure 1-2 Courbe du faisceau de l'antenne utilisée dans le modèle

Il a été considéré une résolution de maillage² de 1 km.

1.5. Impact des éoliennes

Les machines peuvent affecter les radars météo de trois manières différentes, selon les rapports de 2006 et 2010 du groupe OPERA (Programme Opérationnel pour les Echanges d'Information des Radars Météo) du EUMETNET (Réseau Européen des services Météorologiques). [8][9]. Ces effets principaux sont :

- Occultement du faisceau par des obstacles tel que les éoliennes, ce qui peut entraîner une réduction de la visibilité d'objets tels que la pluie ou la grêle.
- Réflexion des éoliennes, ce qui peut entraîner une augmentation du niveau de bruit. Cela mène à une diminution de la capacité du radar à détecter des objets moins réfléchissants tels que la pluie ou la grêle.
- Une interférence des mesures Doppler (décalage de fréquence d'une onde entre son émission et sa réception), qui peut entraîner des valeurs erronées des mesures de vitesse des précipitations. Ceci est difficile à limiter au vue de la variabilité des réflexions.

Cependant, les effets réels produits par les éoliennes sur un écran d'opérateur radar va dépendre des techniques de filtration utilisées par le radar (filtration des bruits,...) et les conditions météorologiques du jour.

Selon le rapport OPERA de 2010 [9], ces impacts techniques peuvent affecter les services météorologiques suivants : i) prévisions météo, ii) prévisions hydrologiques et alertes, iii) pollution et gestion des risques nucléaires et industriels, et iv) résultats à moyen et long termes.

² Les données brutes du radar sont généralement classées dans des cellules d'une distance et d'un azimut définis. La largeur angulaire de chaque cellule fixée, l'étendue des cellules augmente avec l'éloignement du radar. La majorité des résultats météo publiés pour le grand public sont convertis de ces cellules distance-azimut en coordonnées XY, avec une taille de cellule constante et indépendante de la distance. Cela permet la cohérence des résultats fournis dans toutes les régions.

1.6. Zones de vigilance

La législation française pour le développement de fermes éoliennes à proximité de radars est exposée en [1]. Les zones de sauvegarde pour les bandes C, S et X des radars Météo-France³, comme stipulé dans la législation, est montrée dans le Tableau 1-4.

Table 1-4 Zones de vigilance pour le développement de centrales éoliennes à proximité des radars Météo-France

Bande radar	Distance entre une éolienne et un radar		
	Zone de protection	Zone de coordination	Zone autorisée
S	< 10 km	10 km to 30 km	> 30 km
C	< 5 km	5 km to 20 km	> 20 km
X	< 4 km	4 km to 10 km	> 10 km

Selon la réglementation, le développement de centrales éoliennes est interdit dans les zones de protection d'un radar Météo-France, sauf cas exceptionnels ou Météo-France a été consulté et a jugé que l'impact sur la provision de son service n'est pas opérationnellement significatif [10]. Si un projet éolien se situe dans la zone de coordination d'un radar Météo-France, une étude d'impact est requise. Pour que le parc éolien soit en adéquation avec la réglementation, les critères suivants doivent être remplis :

- **Critère 1.** Le pourcentage d'occultement de la ferme éolienne (y compris la ferme existante) ne doit pas excéder 10 %.
- **Critère 2.** La taille de la zone d'impact d'une ferme éolienne ne doit pas excéder 10 km, mesurée selon la plus grande dimension. Seules les parties de la zone d'impact comprises dans la zone de coordination sont prises en compte dans le calcul [10].
- **Critère 3.** La distance entre les zones d'impact de deux fermes différentes doit être d'au moins 10 km.
- **Critère 4.** La distance entre la zone d'impact d'une ferme éolienne et un site sensible⁴ doit être d'au moins 10 km.

Si un projet éolien est dans la zone autorisée, une objection à l'implantation de ce parc dans la zone d'impact d'un radar est improbable.

Toutes les machines proposées pour le renouvellement de La Perrière sont situées dans la zone de coordination du radar du Colorado (10 à 30 km dans la bande de fréquence S du radar). Une étude est requise pour comparer les impacts selon les 4 critères.

³ Les bandes micro-ondes S, C et X correspondent aux bandes de fréquence radar tels que définis par les standards de l'IEEE (Institut des Ingénieurs en Electricité et Electronique). Les gammes vont de 2 à 4 GHz pour la bande S, de 4 à 8 GHz pour la bande C et de 8 à 12 GHz pour la bande X.

⁴ Les sites sensibles sont les sites SEVESO et les établissements nucléaires mentionnés à l'article L.515-36 du Code de l'Environnement.



Figure 1-3 : Localisation des futures éoliennes en regard avec les zones de protection et de coordination

1.7. Autres fermes éoliennes

Il n'y a pas d'autres fermes éoliennes dans la zone de coordination du radar du Colorado [4][11].

1.8. Sites sensibles

Le détail des sites sensibles a été fourni par Quadran [12]. Des informations supplémentaires ont été obtenues de la part de [13][14]. Selon ces informations, il y a 4 sites sensibles dans la zone de coordination, à savoir la SRPP, COROI SAS, EDF-SEI SAS, et SCPR. Les localisations de ces sites ont été obtenues par Quadran, et sont listées dans le tableau 1-5.

Table 1-5 Localisation des sites sensibles utilisées dans l'étude

Site	Latitude (WGS84, degrees north)	Longitude (WGS84, degrees east)
SRPP:	-20.925789	55.289728
COROI	-20.928428	55.285006
EDF-PEI	-20.929578	55.326619
SCPR	-21.025778	55.248156

La Figure 1-4 montre une carte des sites sensibles (diamants verts) et des turbines (carrés blancs).

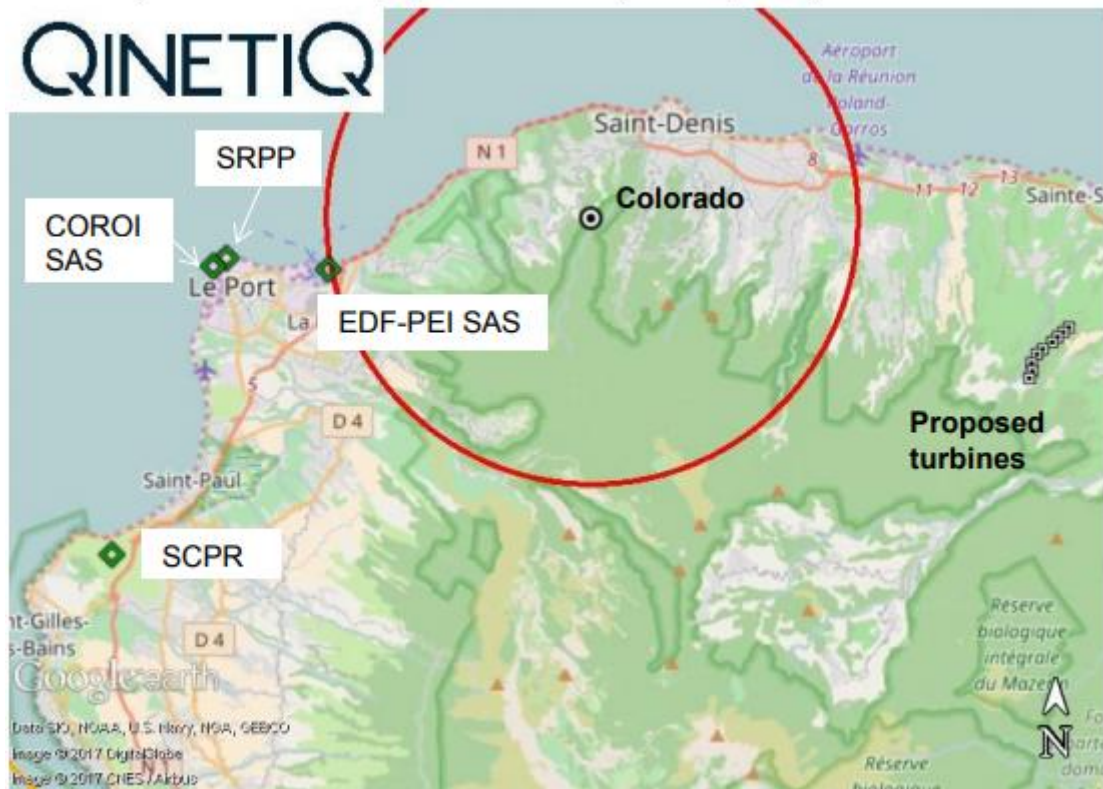


Figure 1-4 Localisation des sites sensibles en regard des éoliennes proposées

2. Etude

Dans cette partie, les impacts de la ferme éolienne proposée vont être quantifiés en utilisant l'implantation des machines exposée dans le Tableau 1-1 et les caractéristiques des turbines citées dans le Tableau 1-2. Les résultats seront comparés avec les critères d'acceptation de la réglementation afin de conclure si les impacts sont conformes.

2.1. Analyse de la ligne de mire

La ligne de mire du radar peut être utilisée en première approche pour déterminer si un radar va être capable de détecter un objet. Les ondes radar se courbent vers le bas dans l'atmosphère, donc la ligne de mire d'un radar va couvrir une plus large zone qu'une ligne de mire classique ou « géométrique » (ligne droite). Quand un objet est dans la ligne de mire d'un radar, il est probable qu'il soit détectable et ait un impact sur le fonctionnement du radar. Quand un objet est en dehors de la ligne de mire d'un radar, il est probable que l'impact soit moins important ou qu'il n'y ait pas d'impact du tout.

La Figure 2-1 montre le pourcentage de visibilité aux alentours des éoliennes proposées (carrés blancs), comme détectés par le radar du Colorado. Les couleurs représentent combien la structure est dans la ligne de mire du radar. Par exemple, le vert clair (indiquant une valeur de 50 %) signifie que la moitié haute de l'obstacle sera dans la ligne de mire du radar et aura une forte probabilité d'être détectée.

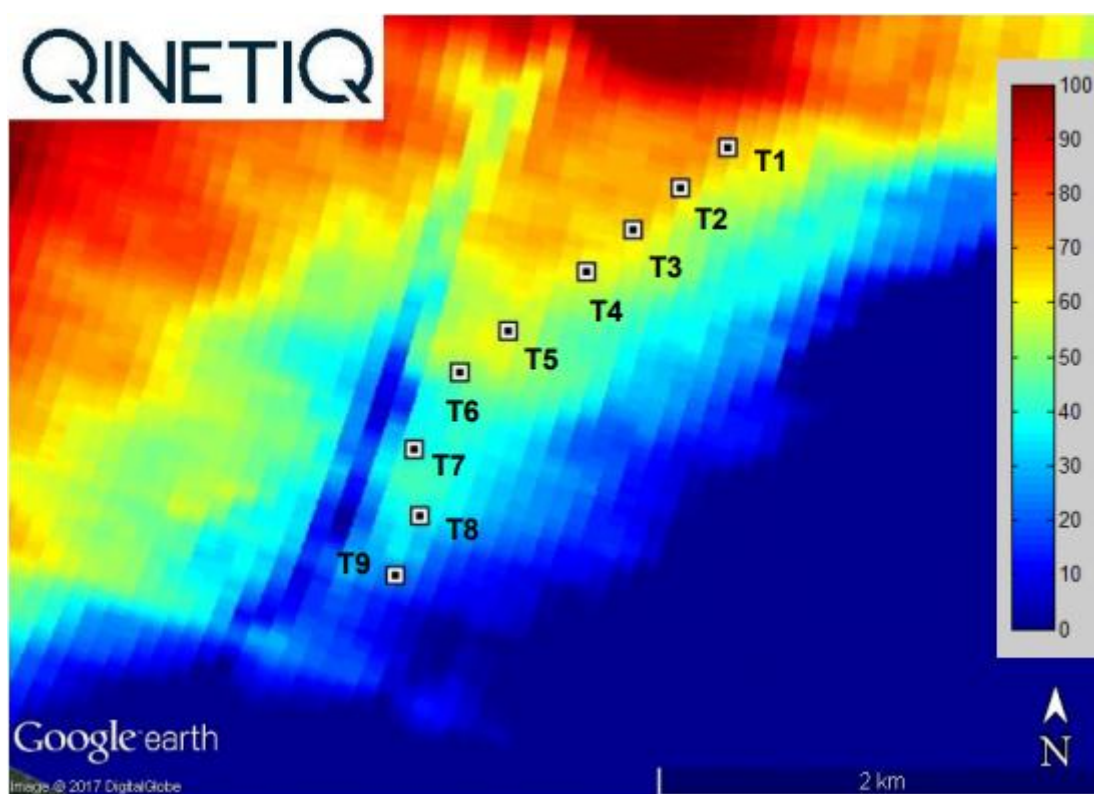


Figure 2-1 Pourcentage de visibilité d'une structure de 135 m depuis le radar du Colorado

On peut voir que les machines sont partiellement dans la ligne de mire du radar. Les pourcentages vont de 25,9 % à 70,9 %. Les pales de chaque machine se situent dans la ligne de mire et ont des chances d'être détectées par le radar. Pour la plupart des éoliennes, les mâts sont aussi dans la ligne de mire et peuvent probablement être détectés. Cependant, ce n'est pas le cas des mâts des éoliennes 7, 8 et 9, et par conséquent, les impacts des mâts seront réduits.

2.2. Critère 1 : occultement

N'importe quel objet dans la ligne de mire du radar peut bloquer le radar, ou réduire la force du signal derrière l'objet. Les grands obstacles comme les éoliennes peuvent avoir une forte influence sur la force du signal, ce qui – dans le cas d'un radar météo – peut entraîner une sous-estimation des taux de précipitation. Pour être en adéquation avec la réglementation, le pourcentage d'occultement d'un parc éolien ne doit pas excéder 10 %.

L'occultement du parc proposé est calculé à partir des données du Tableau 1-2.

La Figure 2-2 montre le pourcentage d'occultement obtenu pour le plus faible angle de balayage, soit 0,3°. L'occultement sera moindre à des plus grands angles de balayage. Les résultats montrent que l'occultement maximal issu de la ferme éolienne proposée est approximativement de 0,1 %, ce qui est significativement en dessous de la limite des 10 %. Cela rend donc le projet de renouvellement du parc éolien de La Perrière en adéquation avec la réglementation en termes d'occultement.

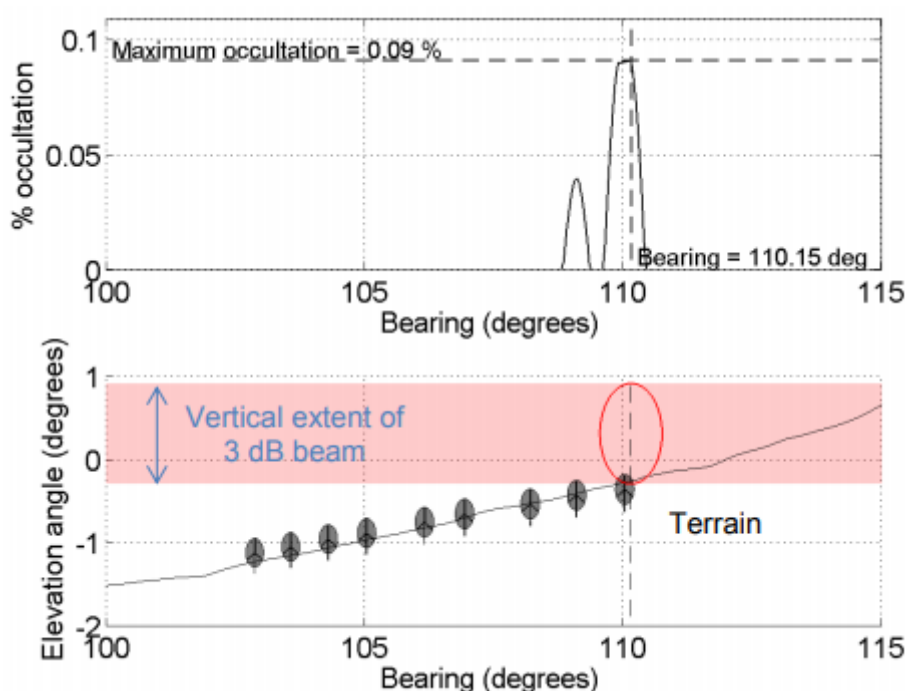


Figure 2-2 Pourcentage d'occultement issu du parc proposé - Vestas V110 - angle de balayage = 0,3°

2.3. Critères 2 et 3 : taille de la zone d'impact et distance entre deux zones d'impact

2.2.1. Réflectivité des composites

Dans cette partie, la réflectivité issue du parc solaire est calculée afin de montrer à quel point les réflexions des machines seront fortes. Deux types de grandeurs sont utilisés en météorologie, souvent mentionnés comme des résultats, qui peuvent être dérivés des radars météo modernes : la réflectivité et la vitesse radiale. La réflectivité est représentative de l'intensité de l'écho, elle est mesurée en dBZ (décibels de réflectivité Z), et correspond à la quantité de puissance transmise et renvoyée vers le récepteur du radar. Deux formes de données de réflectivité sont usuellement présentées : de *base* et *composée*. Les images de réflectivité de base sont typiquement les informations issues des angles d'élevation les plus faibles, et sont utilisées pour détecter les précipitations qui sont les plus proches du sol. La réflectivité composée est l'intensité d'écho maximale parmi toutes les couches et gammes du radar, et est utilisée pour déterminer la plus

grande réflectivité parmi toutes les réflexions. La réflectivité composée est souvent importante pour détecter les traits des structures orageuses ou les intensités représentatives des orages. Les données sont usuellement présentées en dBZ. Le décibel a une échelle logarithmique, échelle souvent utilisée par les ingénieurs pour décrire le niveau de signal des systèmes de radars à cause des grandes variations de réflectivité rencontrées. C'est une unité de mesure qui exprime l'ampleur d'une quantité relativement à un niveau de référence spécifié ou implicite.

Seules les trois premières couches (en partant du bas) sont utilisées dans le calcul.

La Figure 2-3 montre la réflectivité composée des réflexions de la ferme éolienne proposée. Les couleurs sur le graphique représentent les valeurs de réflectivité composée en dBZ. Par exemple, la couleur orange indique que la réflectivité composée est comprise entre 40 et 45 dBZ. Les zones blanches correspondent à une réflectivité inférieure à zéro, et le rouge foncé indique une réflectivité maximum d'au moins 60 dBZ. On peut voir que la plus grande réflectivité dans le cas de La Perrière est supérieure à 60 dBZ, et les plus grandes valeurs sont situées aux alentours directs des éoliennes et sont issues des réflexions directes de celles-ci. La réflectivité en direction des machines depuis la station météo est plus faible, elle est causée par les réflexions qui prennent différentes trajectoires et se dispersent entre les machines et entre les machines et le sol.

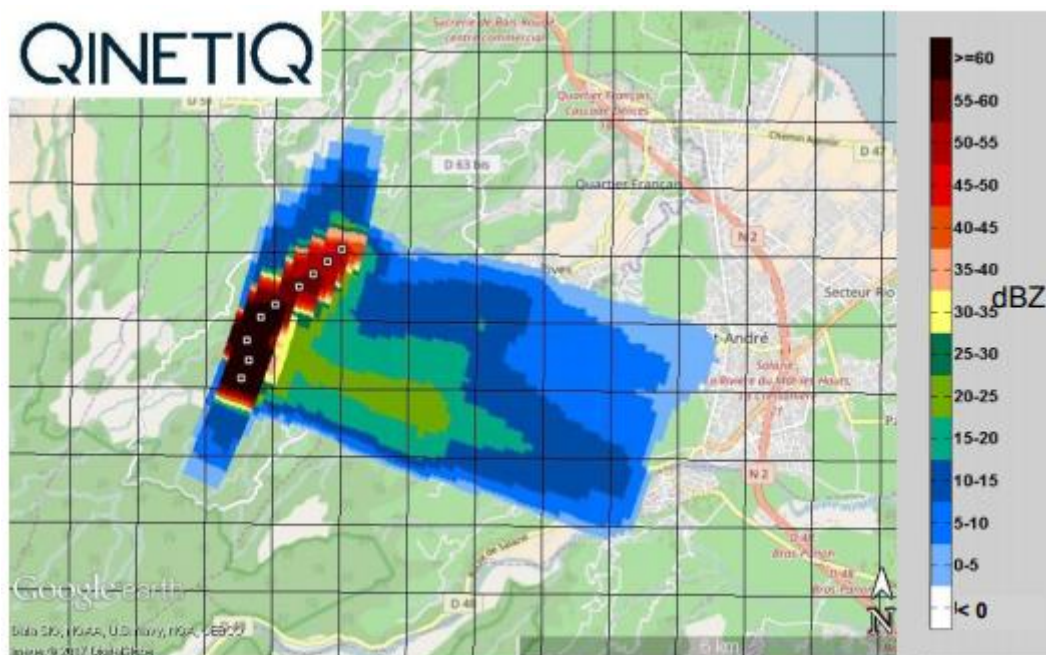


Figure 2-3 : Réflectivité composée (dBZ) du parc éolien proposé - échelle : grille de 1 km x 1 km

2.3.2. Zone d'impact

Les réflexions issues des éoliennes peuvent entraîner l'augmentation du niveau de bruit. Il existe deux principaux effets au bruit d'un champ éolien : i) une capacité réduite du radar à détecter des objets moins réfléchissants dans la région, comme de la pluie ou de la grêle ii) des interférences de mesures Doppler qui peuvent causer une erreur d'évaluation de la vitesse des précipitations de la région.

La zone d'impact est définie comme le quadrillage dans lequel, pour les 3 plus faibles angles de balayage, une ferme éolienne peut causer un impact opérationnel significatif sur les données brutes

du radar.⁵ La taille apparente de l'objet⁶ (telle que vue par le radar) est utilisée dans le calcul pour montrer l'impact moyen dans le temps. Il y a un impact, si dans un canal, la réflectivité de l'éolienne est : i) supérieure à 0 dBZ et ii) plus élevée que la réflectivité du terrain. La taille de la zone d'impact est mesurée selon la plus grande dimension. Seules les parties de la zone d'impact à l'intérieur de la zone de coordination sont prises en compte dans le calcul [10].

2.3.3. Taille maximum de la zone d'impact

La Figure 2-4 montre la zone d'impact (en rouge) relative au parc proposé. La zone où les données brutes du radar sont impactées (en violet) fait partie de la zone d'impact. La taille de la zone d'impact est de 9,8 km. C'est moins que la limite de 10 km imposée par la réglementation, par conséquent, ce projet de ferme éolienne est acceptable en termes de taille de zone d'impact.

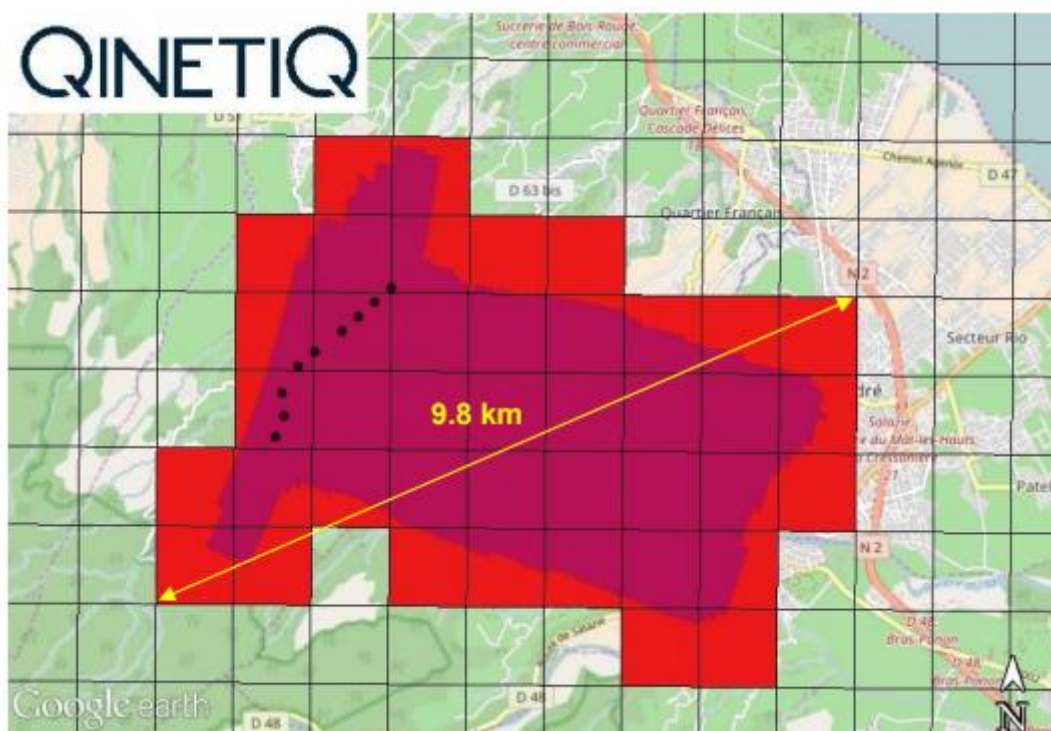


Figure 2-4 Zone d'impact (polygone rouge) - points noirs = implantation des éoliennes ; échelle = quadrillage de 1 km x 1 km

2.4. Critère 3 : distance entre plusieurs zones d'impact

Il n'y a pas d'autre ferme éolienne dans la zone de coordination. Par conséquent, le projet proposé est en adéquation avec le critère 3.

⁵ Le radar utilise un procédé Doppler pour filtrer les résultats non souhaités issus de cibles stationnaires tels que le sol. Tout objet statique, comme un mât d'éolienne, peut être filtré en utilisant une technique appelée indication/détection de cibles mobiles (ICM/DCM). La technique ICM utilise l'effet Doppler issu d'un objet se rapprochant ou s'éloignant du radar pour séparer les objets mobiles du bruit ambiant. La technique DCM est similaire bien que plus avancée. Cette filtration aide à différencier les retours issus de sources fixes ou mobiles.

⁶ Il est pris pour hypothèse que les pales de l'éolienne sont en mouvement, par conséquent, la taille apparente de la machine change selon le temps. La moyenne est estimée selon une analyse des jeux de données des différentes tailles apparentes, et cette moyenne est considérée comme la taille apparente globale de la machine.

2.5. Critère 4 : distance par rapport aux sites sensibles

La zone d'impact est située à l'extérieur de la zone d'exclusion des sites sensibles (Figure 2-). Par conséquent, le projet est en adéquation avec le critère 4. La distance minimum entre la zone d'impact et un site sensible est de 25,2 km (EDF SEI).

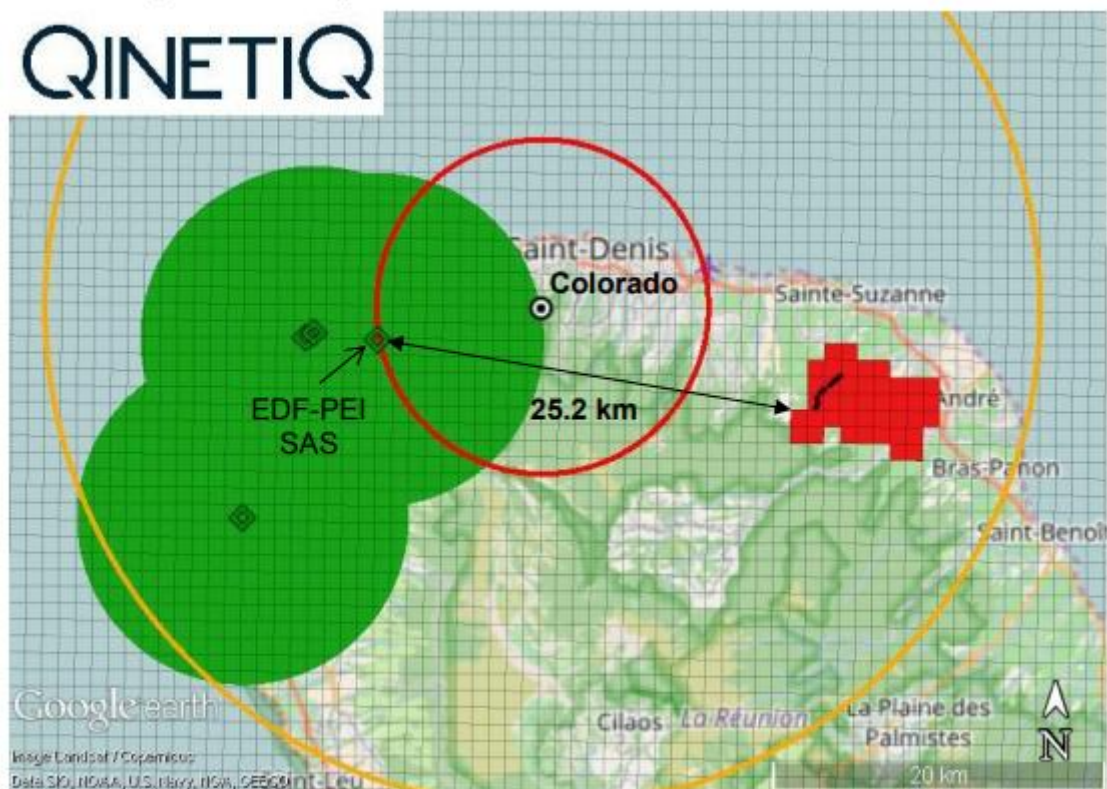


Figure Erreur ! Utilisez l'onglet Accueil pour appliquer O au texte que vous souhaitez faire apparaître ici.-5 Zone d'impact (rouge) en regard avec les zones d'exclusion des sites sensibles (cercles verts)

3. Conclusions

Une analyse de la ligne de mire du radar a montré que toutes les machines prévues sont partiellement dans cette ligne de mire, avec un pourcentage de visibilité allant de 25,9 à 70,9 %.

Une étude CLOUDSIS 1.0 a été menée pour l'implantation éolienne proposée. Les résultats sont résumés comme suit :

- Le pourcentage d'occultement maximal est de 0,1 %, ce qui est nettement en dessous de la limite règlementaire de 10 %.
- La taille de la zone d'impact est d'approximativement 9,8 km ce qui ne dépasse pas la limite règlementaire de 10 km.
- Il n'y a pas d'autres ferme éolienne dans la zone de coordination, par conséquent, le projet est compatible avec le critère 3.
- La distance minimale entre la zone d'impact et les sites sensible est de 25,2 km, ce qui rend le projet de La Perrière compatible avec le critère 4.

Les résultats clés sont compilés dans le Tableau 3-1.

Table 3-1 Résumé des résultats pour le projet de La Perrière

Critère	Impact	Résultat
Critère 1	Pourcentage maximum d'occultement	0.1% (PASSE)
Critère 2	Taille de la zone d'impact	9.8 km (PASSE)
Critère 3	Distance minimum aux zones d'impacts d'autres champs éoliens	No other wind farms in coordination area (PASSE)
Critère 4	Distance minimum à des sites sensibles	25.2 km (PASSE)

4. Références

- [1] « Arrêté du 6 novembre 2014 modifiant l'arrêté du 26 août 2011 », URL: <http://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2014/11/6/DEVP1416471A/jo/texte>
 - [2] *Décision du 20 novembre 2015, du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, relative à la reconnaissance de la méthode de modélisation des perturbations générées par les aérogénérateurs sur les radars météorologiques CLOUDSiS 1.0 et de la société Qinetiq Ltd chargée de sa mise en oeuvre*, reference NOR: DEVP1527649S, URL: <http://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/fiches/BO201522/bo201522.pdf>
 - [3] Rectificatif publié au Bulletin Officiel numéro 24 page 35: <http://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/fiches/BO201524/bo201524.pdf>
 - [4] Coyard, V. (Quadran), *RE: UC Wind farm impact assessment*, email to Savage, V. (QinetiQ), sent 7th April 2017
 - [5] Coyard, V. (Quadran), *RE: UC Wind farm impact assessment*, email to Ellis, J. (QinetiQ), sent 31st May 2017
 - [6] Savage, V. (QinetiQ), *RE: UC Wind farm impact assessment*, email to Coyard, V. (Quadran), sent 31st May 2017
 - [7] Météo-France, *PARAMÈTRES DES RADARS POUR LA MODELISATION DES IMPACTS EOLIENS*, version 6, 16th May 2017
 - [8] OPERA II, WORK PACKAGE 1.8, *Impact of Wind Turbines on Weather Radars*, OPERA deliverable OPERA_2006_18
 - [9] OPERA III, WORK PACKAGE 1.5b, *Site protection (wind turbines)*, OPERA deliverable: OPERA_2010_05
 - [10] Savage, V. *Weather Radar Impact Assessment Criteria*, May 2017, QINETIQ/15/04526/14.0, QinetiQ Proprietary
 - [11] Savage, V. (QinetiQ), *RE: UC Wind farm impact assessment*, email to Coyard, V. (Quadran), sent 2nd November 2016
 - [12] Coyard, V. (Quadran), *RE: UC Wind farm impact assessment*, email to ellis, J. (QinetiQ), sent 30th June 2017
 - [13] ASN, *ANNEXE A - Liste des installations nucléaires de base au 31 décembre 2015*, URL: <http://www.asn.fr/Informer/Publications/Rapports-de-l-ASN/La-surete-nucleaire-et-la-radioprotection-en-France-en-2015>
 - [14] MEDDE webpage, *Base des installations classées*, URL: <http://www.installationsclassées.developpement-durable.gouv.fr/rechercheICForm.php>
-