



Agence Nationale des Fréquences

Commission Consultative de la Compatibilité Electromagnétique

**GUIDE SUR LA PROBLEMATIQUE DE LA PERTURBATION
DU FONCTIONNEMENT DES RADARS PAR LES
EOLIENNES**

Objectifs - Résumé

Ce guide fait suite aux diverses études réalisées au sein de la Commission de Compatibilité Electromagnétique de l'Agence Nationale des Fréquences sur l'impact des éoliennes sur les radars (références [1] et [2]) et a pour objet de servir de support à la circulaire interministérielle (référence).

Il a pour objectifs d'expliciter la problématique, de décrire succinctement les perturbations pouvant être créées au niveau des radars par les éoliennes, de mettre en évidence les facteurs ayant un impact sur les perturbations et certains moyens pour réduire ces dernières et enfin, de proposer certaines pistes pour l'établissement d'un processus de coordination visant à la protection des radars lors de la mise en œuvre de déploiement éolien.

1 Contexte

En 2004, l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR) a été saisie par Météo France, l'Aviation Civile et le Ministère de la Défense de la question des perturbations du fonctionnement des radars par les éoliennes. Pour répondre aux inquiétudes de ces entités sur l'impact que pourrait engendrer la multiplication des projets d'implantation d'éoliennes sur le fonctionnement des radars, l'ANFR a créé, au sein de sa Commission de Compatibilité Electromagnétique (CCE), un groupe dédié sur le sujet. Deux rapports techniques ont été produits, qui décrivent les radars pouvant être impactés, analysent les phénomènes pouvant perturber ces radars et fournissent des recommandations permettant d'atténuer l'impact que pourraient avoir les éoliennes :

- Rapport CCE5 n°1 : Perturbations du fonctionnement des radars météorologiques par les éoliennes (septembre 2005). Ce document montre en particulier la sensibilité des radars météo Doppler à la présence d'éoliennes.
- Rapport CCE5 n°2 : Perturbations du fonctionnement des radars fixes de l'Aviation Civile et de la Défense par les éoliennes (avril 2006). Les radars de la Défense considérés dans ce rapport sont essentiellement les radars fixes de surveillance aérienne.

Les radars maritimes, fluviaux et côtiers font l'objet d'études actuellement en cours et ne sont donc pas traités dans les rapports cités ci-dessus.

Le présent guide a pour objet de servir de support à la circulaire interministérielle (référence) à l'intention des préfets établissant des règles permettant la prise en compte des implantations de radars lors du déploiement de projets éoliens. Ce dispositif pourra ensuite être remplacé ou complété, le cas échéant, par une réglementation spécifique à la problématique radar/éoliennes (modification des dispositions relatives aux servitudes radioélectriques dans le code des postes et des communications électroniques,...).

2 Les radars

2.1 Description :

On distingue deux grands types de radars :

- Radar primaire : la localisation et l'analyse de la nature de la cible se font par reconnaissance de la présence d'un signal réfléchi, la mesure de distance par mesure

du temps de propagation « radar – cible – radar » et la mesure d'azimut par utilisation d'une antenne directive tournante. Les radars tridimensionnels déterminent également l'altitude de la cible. La détermination de la nature de la cible (précipitation, type d'avion...) repose sur une analyse élaborée du signal renvoyé où l'information Doppler est souvent essentielle.

- Radar secondaire : la cible est équipée d'un répondeur (ou transpondeur). Ce transpondeur reçoit des interrogations du radar et répond. Les mesures de distance et d'azimut utilisent les mêmes principes qu'en radar primaire. Il s'agit d'un système de positionnement coopératif où la cible peut transmettre des informations complémentaires de localisation (niveau de vol) et d'identification.

2.2 Situation législative et réglementaire :

Les radars peuvent bénéficier de servitudes radioélectriques, établies par décret du Premier ministre pris après avis de l'ANFR. Ces servitudes d'utilité publique sont relatives à la protection des centres radioélectriques d'émission et de réception contre les obstacles et contre les perturbations électromagnétiques (articles L54 à L64 et R21 à R39 du code des postes et des communications électroniques (CP&CE)).

Les périmètres des zones de servitudes contre les perturbations électromagnétiques sont au maximum de 3000m (cf article R 29 du CP&CE).

Par contre, conformément aux articles R 21 et R 22 du CP&CE, les radars utilisés par l'Aviation Civile et la Défense, en tant que stations de radiopérage, peuvent bénéficier de servitudes contre les obstacles jusqu'à 5000 m (secteur de dégagement).

Malgré ces possibilités, il apparaît que la situation législative et réglementaire actuelle ne suffit pas à assurer la protection des radars contre les effets spécifiques causés par les implantations d'éoliennes.

3 Description des perturbations pouvant être créées par les éoliennes

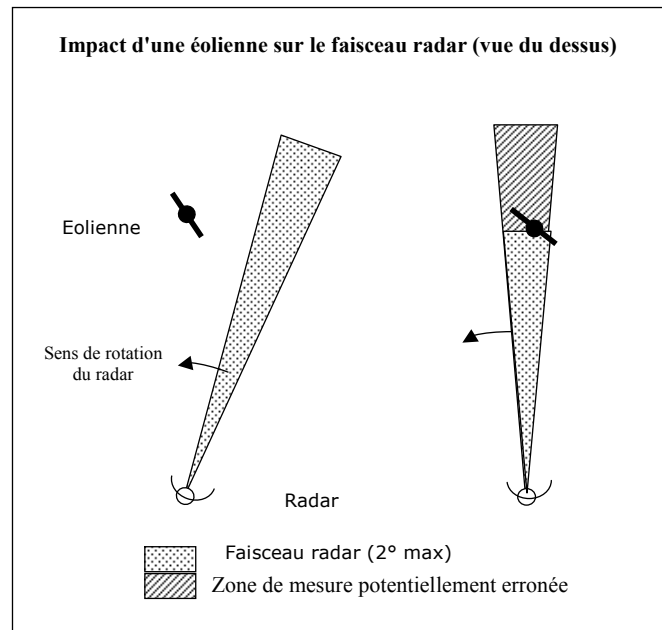
Les éoliennes n'émettent pas d'ondes électromagnétiques dans les gammes des fréquences utilisées par les radars considérés et ne sont donc pas des brouilleurs actifs. Ce sont les pièces fixes ou mobiles massives des éoliennes qui provoquent passivement une dégradation des performances des radars lorsqu'elles sont dans leur rayon de visibilité.

Par ailleurs, le cas des éoliennes est particulier comparé à l'impact que pourraient créer d'autres obstacles (immeubles, pylônes,..) principalement à cause de leur taille, des schémas de déploiement de ces aérogénérateurs, des caractéristiques des matériaux utilisés et surtout du caractère mobile des pales, susceptibles d'engendrer un effet assimilable à un rotor d'hélicoptère ou un champ de vents. Les perturbations engendrées sont aléatoires en fonctions de très nombreux paramètres. Les effets perturbateurs principaux sont :

3.1 Masquage

C'est l'effet classique de **perte de détection** derrière l'obstacle dû au masque physique à la propagation des ondes électromagnétiques. Les conséquences sont celui d'un affaiblissement des signaux en limite du volume masqué, allant jusqu'à la perte complète au centre de ce volume, derrière l'obstacle même. La configuration d'obstacles multiples, si elle est

compacte, étend le masque à la dimension maximale du groupement vu du radar (extension azimutale).



3.2 Création de faux échos

Plusieurs situations peuvent être à l'origine de la création de faux échos (échos parasites). Il peut s'agir de la réflexion du signal radar incident sur les surfaces de l'éolienne (fixes ou mobiles).

- La **réflexion sur les parties fixes** de la structure métallique (mât, nacelle) est une situation classique d'échos mais ici à très fortes Surfaces Equivalentes Radar (SER) de 100 à 1000 m².
- La **réflexion sur les parties mobiles** de la structure (pales). La particularité de ces constructions massives et partiellement mobiles réside dans le fait qu'elles génèrent un effet Doppler de spectre large à des niveaux importants (les SER des pièces en mouvement sont importantes).

En pratique, pour les radars, la génération de faux échos résulte de l'effet cumulé des réflexions sur les parties fixe et mobile.

- La génération de faux échos par **trajets multiples**, qui faussent les mesures de distance et d'azimut, est potentiellement plus importante avec les radars secondaires car le signal de retour est émis par la cible. Il est plus puissant que l'écho d'un radar primaire. L'atténuation associée à une réflexion indésirable n'atténue pas suffisamment le signal émis par la cible. Les trajets multiples sont dus essentiellement aux réflexions sur les parties fixes des éoliennes.

3.3 Impact sur les traitements Doppler

Les réflexions sur les parties mobiles génèrent de faux échos affectés d'un décalage en fréquence dû à l'effet Doppler. Ce décalage en fréquence est fonction de l'orientation du plan de rotation des pales de l'éolienne par rapport au radar et est d'autant plus faible que ce plan de rotation est proche de la perpendiculaire à l'axe radar-éolienne.

Ces échos Doppler parasites ne sont pas éliminés par les traitements des radars, ce qui crée à la distance de l'éolienne une perturbation importante. De ce fait, la présence d'un champ d'éoliennes présente un certain nombre d'échos parasites pour les données radar, fonction de leur positionnement géographique et de leur orientation par rapport au radar, et susceptibles de dégrader les données Doppler voire de les rendre totalement inexploitable.

4 Facteurs ayant un impact sur les perturbations

La présente section décrit les différents facteurs et paramètres qui ont une influence sur les perturbations pouvant être engendrées par les éoliennes sur les radars.

4.1 Facteurs géographiques

- **Visibilité** : une éolienne qui n'est pas en visibilité radioélectrique du radar ne crée pas de perturbation. Pour les radars opérant au-dessus de 1 GHz, la visibilité optique suffit.
- **Distance** : l'énergie renvoyée par l'éolienne est d'autant plus faible que la distance entre le radar et l'éolienne augmente. Cependant, l'impact global sur un radar n'est pas toujours proportionnel à la distance.
- **Taille et configuration des champs d'éoliennes** : le nombre et la répartition des éoliennes sont deux paramètres nécessaires pour déterminer l'impact sur un radar.
- **Positionnement des éoliennes par rapport au radar** : le positionnement du plan du rotor par rapport à l'axe du radar a une influence sur l'effet doppler et l'amplitude de la SER.

4.2 Caractéristiques physiques des éoliennes

- **Forme, structure et matériaux de l'éolienne** : même s'il existe des variantes, d'un point de vue général, les éoliennes se composent d'un fût, d'une nacelle et de 3 pales. Cependant, elles présentent des caractéristiques différentes pouvant avoir un effet sur leur impact sur les radars.

Les fûts sont en général métalliques, de forme conique, et il est établi que, plus que sa dimension, l'angle d'incidence du cône est un des principaux paramètres contrôlant la SER du fût.

La nacelle peut être métallique ou en matériau composite et sa forme, là encore, contrôle sa SER.

Les pales ont des structures métalliques mais leur enveloppe peut être métallique, en fibre de verre et maintenant en fibre de carbone. Ce dernier matériau est un bon conducteur et présente un pouvoir réfléchissant notable. Dans le cas de pales en matériaux composites, il est là aussi établi que la structure interne de la pale joue un rôle important sur sa SER pour laquelle aucune modélisation n'existe à ce stade.

- **Vitesse de rotation des pales** : Certaines éoliennes opèrent à vitesse de rotation constante, d'autres à vitesse variable. La quasi totalité des éoliennes de grande puissance sont à vitesse variable, d'ampleur plus ou moins importante. Ces vitesses en fonctionnement sont comprises entre 10 et

33 tours/minutes. La gamme de vitesses de vent exploitable va de 4 m/s à 25 m/s (la puissance nominale de l'éolienne étant atteinte vers 12-15 m/s).

On peut noter que les vitesses de bout de pale peuvent montrer des valeurs courantes entre 50 et 100 m/s. Cette caractéristique est celle qui distingue les éoliennes des autres obstacles et engendre l'inefficacité du traitement habituel des échos fixes. Les vitesses relevées, comparables aux vitesses des cibles peuvent être à l'origine de la création de fausses pistes sur les écrans radar.

- Espacement entre les pales :

Lorsque plusieurs éoliennes sont installées en groupe, elles occupent une surface significative appelée parc, champ ou ferme. Les éoliennes sont séparées par des distances dictées par les caractéristiques du terrain et par le désir de minimiser les perturbations aérodynamiques induites par les voisines. Les règles de l'art indiquent qu'elles doivent être séparées de 2 à 3 diamètres de rotor perpendiculairement au vent dominant et de 5 à 10 diamètres dans la direction du vent.

4.3 Caractéristiques « radioélectriques » des éoliennes

Les éoliennes n'émettent pas d'ondes électromagnétiques mais, de par leurs caractéristiques physiques, présentent la capacité de renvoyer et diffuser les ondes électromagnétiques émises par les radars.

La Surface Equivalente Radar (SER) (*Radar Cross Section (RCS) en anglais*) caractérise d'une manière intrinsèque cette capacité à renvoyer et diffuser les ondes électromagnétiques mais dépend néanmoins de la fréquence du radar et de sa polarisation, de la direction d'incidence, donc de la position relative du radar et de l'éolienne, et des caractéristiques physiques de l'éolienne (dimensions, matériaux, mais aussi forme, angle d'incidence du cône,...).

De plus, concernant les éoliennes, la rotation des pales induit une très forte et rapide variabilité de la SER se traduisant en particulier par l'apparition répétée, au rythme de la rotation, de « flashes », c'est à dire d'échos brefs et très élevés.

Un certain nombre d'études (dont [3]) ont montré que les SER des éoliennes sont très élevées, souvent entre 100 et 1000m² (entre 20 et 30 dBsm), avec des niveaux maximums correspondants aux « flashes » qui peuvent atteindre, dans les cas extrêmes, des valeurs de 40 dBsm.

5 Solutions techniques potentielles pour réduire les perturbations

Cette section liste les différentes solutions envisageables dans le cadre des coordinations. Certaines sont de nature générique, d'autres ne peuvent être évaluées que spécifiquement au cas par cas. Les solutions proposées dans cette section ne préjugent en rien de la possibilité de mise en œuvre.

5.1 Traitements au niveau des radars

Limitation de l'effet de masquage

Aucune action par réglage des traitements radar n'est pertinente. L'enjeu est la réduction du volume masqué. Il peut être traité par confinement en angle de site (non dépassement d'un angle de site fixé) et par la maîtrise de l'extension azimutale en particulier en cas d'obstacles multiples.

Limitation des faux échos

Les solutions suivantes permettraient de traiter les effets des échos fixes, mais cela se fait au détriment des performances du radar :

- augmentation de l'élévation du radar dans la direction de l'éolienne. Cette solution peut se heurter à la limitation de l'angle de site de gain maximum de l'antenne (dit pointage), fixe pour les radar AC.
- Fonctionnement en mode dégradé : (seuil de détection à 30 dBz pour les radars météo, dans le cas des mesures de précipitations).
- Traitement du signal : adaptation de la dynamique du récepteur pour éviter les situations de saturation, traitements Doppler par bancs de filtres permettant certaines séparations (résolutions) cible-éolienne.
- Traitements de données pour favoriser la poursuite de cibles : définition de zones de non initialisation de piste, durcissement des critères d'association de plots aux pistes.

A ce jour, il n'y a pas de solutions viables permettant de supprimer ou réduire les effets sur les modes Doppler. Par exemple, pour Météo France, la seule solution consiste aujourd'hui à éliminer les données Doppler sur de très grandes zones géographiques centrées sur les parcs éoliens, au détriment de l'efficacité du radar, pouvant aller, à l'extrême, si les zones supprimées sont trop importantes et nombreuses, vers l'inutilité opérationnelle totale des données Doppler du radar.

Limitation des trajets multiples

- Pour les trajets multiples s'établissant sur les parties fixes (mat), une reconnaissance de la géométrie de la réflexion est possible et permet des traitements a priori.
- Pour les trajets s'établissant sur des parties mobiles, la géométrie de la réflexion fluctue. Une observation sur plusieurs tours d'antenne, donc des traitements de poursuite, permet une limitation des effets.

5.2 Traitement au niveau des éoliennes

Limitation de l'effet de masque

Dans le cas des champs d'éoliennes, l'alignement des éoliennes dans l'axe du radar ou, a contrario, un étalement des éoliennes réduit l'effet de masque.

Limitation des faux échos fixes

Le traitement par des matériaux absorbants à bas coût du mat est tout à fait envisageable, pour une réduction de 10 à 20 dB. Ce traitement aurait pour effet de réduire également les couplages « pale-mât ». Cette réduction peut également être envisagée par des modifications locales de la section du mât.

Limitation des effets Doppler néfastes

L'effet Doppler est provoqué essentiellement par les pales. L'optimisation des formes externes des pales est sans doute illusoire dans la mesure où c'est surtout le critère de performance aérodynamique qui permet de définir cette forme. Quelques ajustements de détails pourraient sans doute être faits.

Le traitement interne par des matériaux absorbants (par exemple de type mousse) est tout à fait envisageable et pourrait ne pas être très coûteux. Des améliorations plus sensibles pourraient être obtenues en traitant les peaux externes (verre-résine), mais à des coûts bien supérieurs.

6 Recommandations des rapports CCE

Afin d'éviter ou limiter les perturbations du fonctionnement des radars par les éoliennes, les rapports ANFR CCE5 N°1 et 2 recommandent la mise en place de distances de coordination et de protection autour de ces radars :

- distance de coordination (d_c) en deçà de laquelle l'avis de l'administration compétente en charge du radar devrait être demandé avant toute installation de parc éolien.
- distance de protection (d_p) en deçà de laquelle aucune éolienne ne devrait être installée.

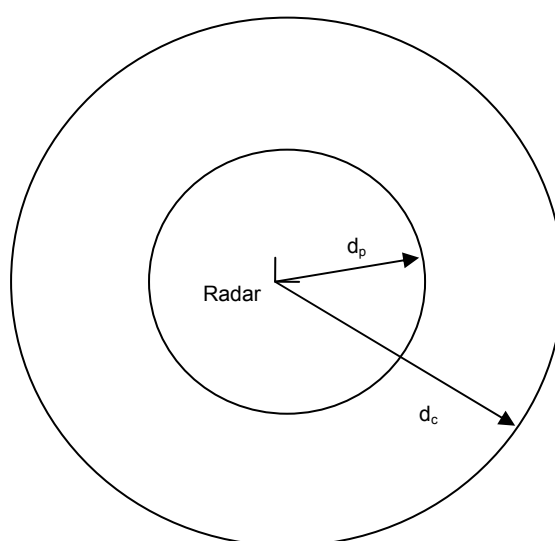


Figure 1 : distances de protection et de coordination autour d'un radar

- **Radar météo** : Le tableau suivant résume les Recommandations en terme de distances de coordination et de protection relatives aux trois problématiques analysées dans le présent rapport (Blocage, Echos Fixes et Doppler).

	<i>Distance de coordination</i>		<i>Distance de protection</i>	
	<i>Radars Bande S</i>	<i>Radars Bande C</i>	<i>Radars Bande S</i>	<i>Radars Bande C</i>
<i>Blocage</i>	<i>10 km</i>	<i>10 km</i>		
<i>Echos fixes</i>	<i>10 km</i>	<i>10 km</i>		
<i>Doppler</i>	<i>30 km</i>	<i>20 km</i>	<i>10 km</i>	<i>5 km</i>

- **radar primaire aviation civile** :

Distance de protection : Pas d'éolienne à moins de 5 km de tout radar primaire

Distances de coordination : Coordination au dessus d'un angle de site de $0,5^\circ$ par rapport au radar de 5 à 20 km (si visibilité).
Coordination pour des regroupements importants¹, en visibilité, à une distance inférieure à 30 km.

- radar secondaire aviation civile :

Distance de protection : Pas d'éolienne à moins de 5 km de tout radar secondaire
Distance de coordination : Coordination pour des regroupements importants², en visibilité, à une distance inférieure à 30 km.

- radar militaire :

Les missions sont assurées grâce à la couverture radar à partir d'équipements fixes de grands centres de détection et de contrôle, et d'équipements mobiles assurant la protection ponctuelle de sites réputés sensibles en raison de leur nature ou du cadre des activités qui y sont menées (ZIT : Zones d'interdiction temporaire, dispositifs particuliers de sûreté...).

Distance de protection : pas d'éolienne à moins de 5 km de tout radar de surveillance aérienne ou à l'intérieur de toute ZIT

Distance de coordination : coordination pour toute implantation d'éoliennes de 5 à 30 km de tout radar de surveillance aérienne et sur la base de critères spécifiques (types de radars, ZIT,...).

Des détails sont donnés en annexe 2 du rapport [2].

7 Processus de coordination pour la protection des radars lors de la mise en œuvre de déploiement éolien.

Les processus de coordination entre les promoteurs éoliens et les administrations opérant des radars pourront conduire à préciser les paramètres suivants en vue d'optimiser les possibilités de partage de l'espace disponible:

- Lieu d'implantation des éoliennes ;
- Géographie du parc éolien vu du radar (alignement des fûts);
- Dimensions (fûts, pales, nacelles) des éoliennes ;
- Modification partielle de la forme (réduction SER) de l'éolienne vue du radar ;
- Traitement surfacique partiel (réduction SER) de l'éolienne vue du radar ;

D'un point de vue pratique, les processus de coordination doivent également prendre en compte les spécificités d'exploitation des radars. Par conséquent, les détails dans les processus de concertation et les critères de décision diffèrent suivant les administrations opérant les radars.

Aviation Civile

¹ La taille des regroupements est un des paramètres de la coordination.

² La taille des regroupements est un des paramètres de la coordination.

La logique est d'intégrer l'exploitation opérationnelle :

- a. Radar primaire : que ce soit pour les exploitations en contrôle d'approche et d'aérodrome, le critère principal est d'éviter les implantations à la verticale d'espaces critiques en termes de contrôle aérien (procédures, axes d'approche,...).
- b. Radar secondaire : pour les exploitations « en route », les basses couches ne sont pas essentielles et les traitements multiradar peuvent apporter des solutions. Pour les exploitations d'approche, la visibilité en basse couche est le critère structurant. En cas d'implantation commune entre des radars secondaires et primaires, ces configurations sont protégées par les contraintes plus sévères relatives à la protection des radars primaires.

Météo France

Les caractéristiques détaillées des champs éoliens sont utilisées afin de déterminer l'impact potentiel sur les radars. Pour l'impact sur le mode Doppler, le plus critique, ces caractéristiques sont prises en compte en association avec les données du Rapport CCE5 N°1 afin de calculer l'étendue de la zone d'impact Doppler. Pour chaque projet, un avis défavorable est émis si la plus grande dimension de sa zone d'impact Doppler dépasse 10 km. De plus, Météo France traite chaque projet en fonction des autres projets éoliens afin de faire en sorte que les zones d'impacts respectives de 2 différents projets autour d'un même radar soit espacées de plus de 10 km.

Ministère de la Défense

La préservation de la capacité de détection basse altitude dans le cadre de la posture permanente de sûreté d'une part et de la sécurité des vols d'autre part sont les deux impératifs de la défense.

Les avis proposés reposent sur les critères retenus dans le rapport CCE5 N°2 et le traitement des zones de coordination prend en compte l'importance du nombre d'éoliennes dans le projet comme facteur à priori aggravant mais non déterminant. Il est corrélé avec les autres paramètres (emplacement, configuration, contraintes opérationnelles...) avant d'aboutir à un avis définitif.

Ainsi, la connaissance des caractéristiques détaillées du parc éolien (positionnement et hauteur des éoliennes notamment) est indispensable à un examen plus précis de l'impact opérationnel qui est fonction de la mission à remplir (contrôle aérien, défense aérienne, protection de sites sensibles..).

Enfin l'affinage des impacts techniques au travers une modélisation des effets semble incontournable pour préciser les critères à retenir.

8 Bibliographie :

- [1] ANFR : Rapport CCE5 n°1 Perturbations du fonctionnement des radars météorologiques par les éoliennes (septembre 2005).
- [2] ANFR : Rapport CCE5 n°2 : Perturbations du fonctionnement des radars fixes de l'Aviation Civile et de la Défense par les éoliennes (avril 2006).
- [3] QinetiQ : Wind Farms Impact on Radar Aviation Interests (W/14/00614/00/REP)

9 Sigles et acronymes :

ANFR : Agence Nationale des Fréquences

OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale

SER : Surface Equivalente Radar

ZIT : Zones d'Interdiction Temporaires