



Agence Nationale des Fréquences

Commission Consultative de la Compatibilité Electromagnétique

Rapport CCE5 n°1

PERTURBATIONS DU FONCTIONNEMENT DES RADARS

METEOROLOGIQUES PAR LES EOLIENNES

**Version 1.0 approuvée le 19/09/2005 par la Commission Consultative de la Compatibilité
Electromagnétique**

Table des matières

I. Introduction.....	3
II. Les radars météorologiques :	3
III. Perturbations dues aux Eoliennes.....	4
III.1 Blocage du faisceau radar :	4
III.2 Echos fixes	5
III.3 Mode Doppler	7
IV. Situation en France.....	9
IV.1 Dispositions réglementaires applicables	9
IV.1.1. Dispositions préventives	9
IV.1.2. Dispositions curatives	9
IV.2. Les efforts de préventions	9
IV.3. Les cas de perturbation constatés.....	10
V. Situation internationale :	10
VI. Recommandations	11
Bibliographie :.....	13
Annexe 1 : Couverture des radars météorologiques en fin 2006	14
Annexe 2 : Analyse détaillée relative au blocage	16
Annexe 2bis : Résultats des simulations concernant le blocage du faisceau	21
Annexe 3 : Analyse détaillée relative aux échos fixes	22
Annexe 4 : Analyse détaillée relative au mode Doppler	39

I. Introduction

Au sein de la Commission de la Compatibilité Electromagnétique, l'Agence nationale des fréquences a été saisie par Météo France de la question des perturbations du fonctionnement des radars de météorologie par les éoliennes.

Météo France craint en effet que la multiplication des projets d'implantation d'éoliennes ne perturbe significativement le fonctionnement de ses radars et donc ses missions.

Au niveau international, les informations disponibles sur ces perturbations sont très peu nombreuses et, à ce jour et en l'état de nos connaissances, seul le Royaume-Uni et l'Allemagne ont, en Europe, adopté une réglementation spécifique relative à cette question. D'autres pays à fort développement éolien (Danemark, Espagne) n'en ayant pas adopté. Dans certains cas (Danemark), ceci pourrait tenir au faible nombre de radars météorologiques utilisés.

Le présent rapport traite exclusivement des radars météorologiques. Par ailleurs, les radars de l'Aviation Civile et ceux du Ministère de la Défense, qui ont des caractéristiques différentes des radars météorologiques, font l'objet d'une étude et d'un rapport séparés.

Le présent rapport décrit les radars météorologiques pouvant être impactés, analyse les trois phénomènes pouvant perturber ces radars et fournit des recommandations permettant d'atténuer l'impact que pourraient avoir les éoliennes.

II. Les radars météorologiques :

Météo France opère actuellement un réseau de radars météorologiques qui couvre une grande partie du territoire métropolitain et est en cours d'extension afin d'offrir une couverture quasi complète à l'horizon 2006 (24 radars à terme sur le territoire métropolitain et la Corse). L'implantation de ces radars est décrite en **annexe 1**.

Ces radars, qui fonctionnent en bande S (2,7-2,9 GHz) ou en bande C (5,6-5,65 GHz) assurent la quantification d'une part des précipitations (mode « réflectivité ») et d'autre part des vitesses des vents (mode « Doppler ») utilisées en particulier dans la prévision immédiate des systèmes précipitants (en particulier convectifs) et autres événements météorologiques dangereux.

Les données de ce réseau sont indispensables pour assurer la mission de sauvegarde des biens et des personnes qui est confiée à Météo-France. Ces radars jouent ainsi un rôle essentiel dans la gestion des alertes aux populations en cas de risque d'inondations, coulées de boues, éboulements, notamment dans le cadre de la procédure « vigilance météorologique ». En effet, en détectant immédiatement et en continu les précipitations, et dans certains cas, en les anticipant même, ils permettent aux autorités responsables de déclencher, dans de meilleurs délais, les procédures de mise en sécurité des personnes et des biens.

Le choix des sites d'implantation de ces radars résulte de compromis entre les résultats d'études approfondies de simulation de propagation radioélectrique et de contraintes locales d'accès, de raccordement électrique et téléphonique ainsi que d'obstacles existants, tels que le relief, les forêts, les châteaux d'eau, les silos, ... Ces obstacles sont déterminants pour définir la hauteur nécessaire de la tour qui supporte chacun des radars, pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres et une modification de leur environnement peut donc nuire à leur fonctionnement.

L'ensemble de ces radars, qui fonctionnent en bande S (2,7-2,9 GHz) ou en bande C (5,6-5,65 GHz), font l'objet de servitudes contre les perturbations et contre les obstacles dans une zone circulaire dont le rayon n'excède pas 2000 mètres conformément à la réglementation en vigueur (articles L54 à L56-1 et R21 à R26 du code des P et CE).

III. Perturbations dues aux Eoliennes

Compte-tenu des caractéristiques des radars météorologiques, trois phénomènes sont a priori à considérer :

- le blocage du faisceau qui induit une diminution du signal utile reçu ;
- les échos fixes résultant des signaux réfléchis par les éoliennes à des niveaux bien supérieurs au niveau du signal utile dans le cas de mesures de précipitations ;
- la perturbation des mesures Doppler conduisant à des données erronées de vent.

III.1 Blocage du faisceau radar :

L'analyse relative à la problématique de blocage du faisceau radar par les éoliennes, détaillée en **annexe 2**, utilise un critère de 10% de blocage, à l'instar du critère utilisé par l'administration anglaise. Ce seuil de 10 % correspond à un critère de sous-estimation de 20 à 30 % de l'intensité de pluie à une distance de 100 km du radar en présence d'une ou plusieurs éoliennes par rapport au cas où le radar ne serait pas occulté par celui-ci.

L'occultation du faisceau radar par une ou plusieurs éoliennes met en cause les mesures sur les angles d'azimut incriminés, c'est-à-dire lorsque le radar pointe en direction de l'éolienne.

Pour une éolienne et selon le type de radar, ces angles sont compris entre 1 et 2 degrés ce qui peut représenter des zones géographiques importantes pour lesquelles les mesures hydro-météorologiques peuvent être erronées, comme schématisé sur la figure 1 ci-dessous. Dans la zone grisée optiquement occultée par l'éolienne (zone de mesure potentiellement erronée), le signal radar sera atténué et inférieur au niveau nominal.

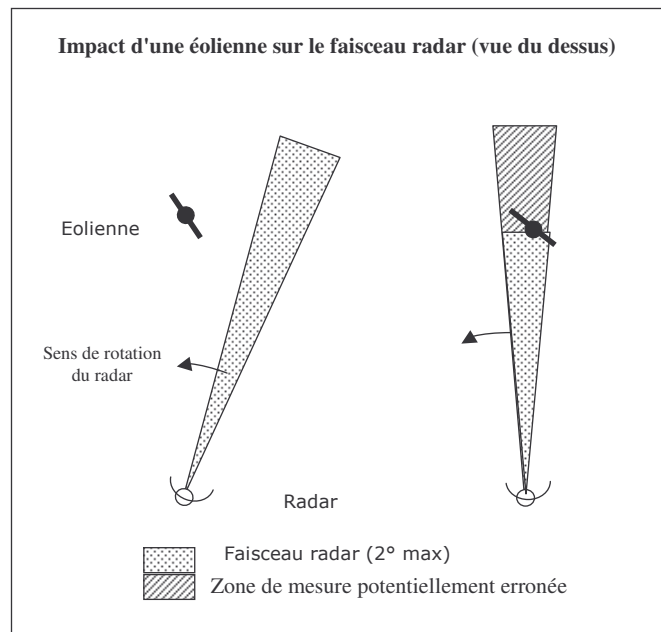


Figure 1

Selon les caractéristiques des éoliennes, l'analyse montre qu'en cas de **visibilité directe** entre le radar et l'éolienne, même au-delà de la distance de servitude (2 000 m), une seule éolienne a le potentiel de bloquer, dans l'azimut considéré, plus de 10% des faisceaux radar et jusqu'à quelques % à 10 km.

Dans le pire des 4 cas analysés, il apparaît qu'une seule éolienne peut bloquer, dans l'azimut considéré, plus de 10% des faisceaux radar jusqu'à une distance de près de 4 km.

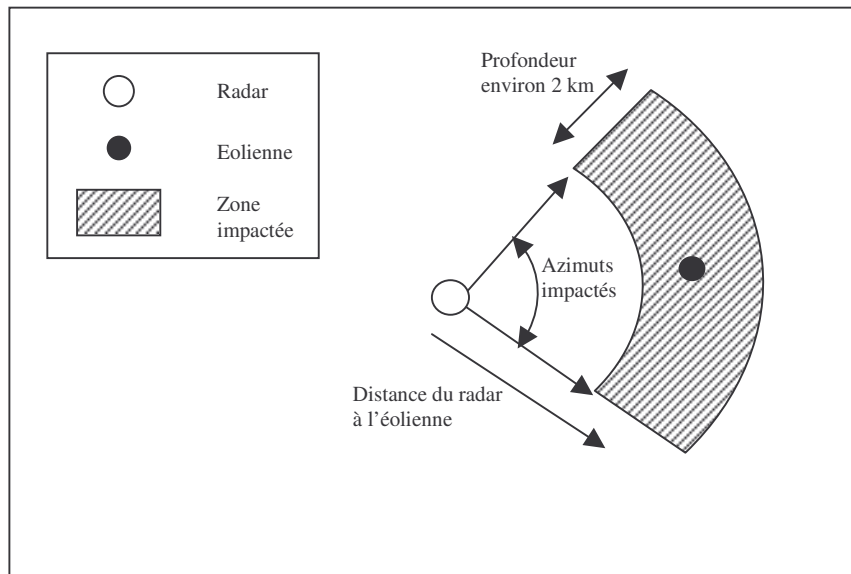
Dans le cas de l'agrégation de l'effet de plusieurs éoliennes installés dans un même parc, il semble raisonnable d'estimer, en fonction de leur agencement, que l'impact de telles installations reste critique jusqu'à une distance de 10 km, en particulier pour les radars présentant une ouverture à 1° (Bande C principalement).

En conséquence, afin de limiter les effets du phénomène de blocage, et dans le cas de visibilité directe entre le radar et l'éolienne, toute nouvelle installation d'éoliennes à une distance inférieure à 10 km d'un radar météorologique devrait faire l'objet d'une coordination entre les responsables du parc éolien et Météo France afin de mettre en œuvre, au cas par cas, l'une des solutions suivantes pour s'assurer que le critère de 10 % de blocage, dans l'azimut considéré, ne soit pas dépassé :

- aligner parfaitement les éoliennes pour qu'une seule soit vue depuis le radar,
- à l'opposé, disperser les éoliennes pour que plusieurs d'entre-elles ne soient pas prises dans le même faisceau radar à un instant donné,
- éloigner le parc d'éoliennes du radar pour que le pourcentage total de surface occultée, dans l'azimut considéré, soit inférieur à 10%.

III.2 Echos fixes

L'analyse relative à la problématique de détection d'échos fixes créés par des éoliennes, détaillée en **annexe 3**, montre que, prenant en compte une large gamme de Surface Equivalente Radar (SER) pour les éoliennes, des échos fixes très importants peuvent être détectés par les radars météorologiques, pouvant impacter des zones géographiques assez larges autour de l'éolienne, comme schématisé sur la figure ci dessous.



A toutes les distances étudiées (jusqu'à 30 km), le niveau de détection de l'éolienne est largement supérieur au niveau minimum de réflectivité (8 dBz) et peut même être supérieur au seuil de saturation des radars (64 dBz) sur des distances très importantes pouvant atteindre 30 km pour une éolienne de SER de 1000 m².

Que ce soit en bande S ou en bande C, un écho fixe sera donc produit dans tous les cas et peut impacter des azimuts et donc un nombre de pixels de mesures importants, avec, au minimum, 2° d'azimut et 4 pixels.

Considérant, par ailleurs, que plusieurs éoliennes sont en général installées dans un même parc, on peut légitimement estimer que l'impact d'un parc éolien sera supérieur à celui d'une seule éolienne, présentant un effet agrégé augmentant soit le nombre de pixels impactés soit les niveaux d'échos fixes.

Bien évidemment, cet impact n'interviendra qu'en cas de visibilité directe entre le radar et le parc éolien, et l'on peut raisonnablement penser que le relief permettra d'atténuer cet impact.

D'un autre côté, il existe des solutions qui peuvent être mises en oeuvre par les radars météorologiques qui permettent d'atténuer les échos fixes produits par les éoliennes, à savoir d'une part à faire varier l'élévation du radar et d'autre part à prendre en compte un mode dégradé.

La variation de l'élévation du radar permet de passer « au dessus » de l'éolienne, mais cette fonctionnalité ne peut toutefois se faire raisonnablement à des élévations supérieures à 3° sans influencer sur l'ensemble des mesures. A cette élévation, l'analyse a montré qu'elle permettait de diminuer de façon assez significative les distances en deçà desquelles les échos fixes pourraient être évités, entre 2 et 12 km, selon la SER de l'éolienne.

De même, la prise en compte du mode dégradé (seuil de 30 dBz), comparé au mode nominal (seuil de 8 dBz), permet d'envisager une cohabitation possible à des distances raisonnables pour lesquelles la hauteur maximale des éoliennes pourra dépasser le niveau NGF du plan du radar. Ceci toutefois ne pourra être mis en oeuvre et efficace uniquement si la part variable de l'écho fixe produit par les pales est suffisamment faible pour ne pas leurrer le traitement radar

permettant d'éliminer les échos fixes, paramètre qui dépend bien évidemment des caractéristiques des éoliennes.

Au final, à l'instar de l'effet de blocage (voir § III.1) et prenant en compte l'impact agrégé d'un parc éolien, l'analyse permet de recommander une distance de « coordination » de 10 km autour des radars météorologiques en deçà de laquelle l'avis de Météo France devrait être demandé avant toute installation de parc éolien.

Cette « coordination » permettra au cas par cas, en fonction des caractéristiques des parcs éoliens considérés et de leur implantation, à Météo France d'évaluer en détail d'une part les niveaux d'échos fixes escomptés, d'estimer leur gêne opérationnelle potentielle et la nécessité d'implémenter une variation d'élévation des radars et, le cas échéant, de déterminer si le mode dégradé peut être mis en oeuvre.

Afin de faciliter cette « coordination » et augmenter les possibilités de conclusions favorables, on peut aussi recommander aux promoteurs éoliens de prendre en compte cette problématique le plus en amont possible de leur projet, de mener des études permettant de déterminer les Surfaces Equivalentes Radar (SER) de leurs éoliennes et, dans la mesure du possible, de prendre toutes les mesures possibles visant à diminuer ces SER, en particulier celles des pales qui déterminantes pour la mise en oeuvre éventuelle du mode dégradé des radars météorologiques.

III.3 Mode Doppler

L'analyse relative à la problématique de détection d'échos Doppler créés par des éoliennes, détaillée en **annexe 4**, montre que, prenant en compte une large gamme de Surface Equivalente Radar (SER) « Doppler » pour les éoliennes (1, 10 et 200 m²), des échos Doppler très importants peuvent être détectés par les radars météorologiques, pouvant impacter de très larges zones géographiques autour de l'éolienne, couvrant en particulier l'ensemble des azimuts sur des zones pouvant atteindre 6 km pour une éolienne et sans doute jusqu'à 10 km si l'on prend en compte l'effet de parcs éoliens.

Au delà de ces distances, les valeurs d'azimuts impactés restent très élevées (plusieurs dizaines de degrés), bloquant la mesure sur des zones géographiques importantes pour lesquelles, par ailleurs, l'ensemble des élévations seront affectées, pour n'atteindre des valeurs relativement faibles qu'au delà de 20 à 30 km.

Le nombre de pixels impactés correspondant est là aussi très grand (plusieurs dizaines), en particulier à courte distance, et reste suffisamment important, y compris au delà de 20 km, pour potentiellement remettre en cause l'ensemble des mesures doppler :

- pour un traitement volumique de la vitesse radiale, un nombre important de pixels erronés aura pour conséquence d'empêcher toutes données de vent fiable dans certaines zones géographiques, situation inacceptable pour certaines zones comportant des installations critiques telles que les aéroports. Lorsque l'impact éolien est « limité » en azimuts, on peut estimer, au cas par cas, le niveau de gêne sur des zones particulières, prenant en compte en particulier le fait que les zones critiques feront aussi l'objet de mesures relatives à l'installation d'éoliennes (principalement pour les aéroports) ou que les modèles numériques de prédiction pourront extrapoler, dans une certaine mesure, les pixels déclarés erronés. Par contre, à l'inverse, pour les situations à courte distance pour lesquelles tous les azimuts (et donc toutes les élévations) sont impactés, ces mesures ne pourront pas

être mises en œuvre, argumentant en faveur d'une exclusion des éoliennes dans les zones concernées.

- Pour un traitement VAD (Vertical Azimut Display), pour lesquelles l'ensemble des données (pour toutes les altitudes) dans un rayon de quelques km ou quelques dizaines de km sont intégrées afin de calculer un profil de vent à la verticale du radar, le profil sera fortement impacté, en particulier si les mesures sur l'ensemble des azimuts et élévations à certaines distances sont erronées. Le traitement VAD nécessite de disposer d'un grand nombre de mesures à différentes altitudes afin de réaliser le consensus nécessaire à la production d'un profil cohérent. Si les données à courte distance ne sont pas disponibles, il est théoriquement possible d'effectuer les mesures à des distances plus importantes mais en pratique, ces mesures seront beaucoup moins précises tant du fait de la discrimination inférieure en altitude que des niveaux utiles reçus plus faibles. Là encore, l'analyse milite en faveur d'une exclusion des éoliennes dans les zones proches du radar afin d'éviter les impacts sur l'ensemble des azimuts et élévations.

Bien évidemment, à l'instar des échos fixes, cet impact n'interviendra qu'en cas de visibilité directe entre le radar et le parc éolien, mais dans la majorité des cas, on peut difficilement penser que le relief permettra d'atténuer de façon importante cet impact. En effet, les échos doppler sont produit par les pales des éoliennes qui en sont les points les plus hauts et seront donc, en limite de visibilité, toujours détectés par le radar.

Par ailleurs, contrairement à la problématique « échos fixes », aucune mesure spécifique telle qu'une élévation supérieure des radars ne semble pouvoir améliorer sensiblement la situation et pouvoir s'affranchir, dans une certaine mesure, des échos Doppler produits par les éoliennes.

Au final, prenant en compte l'impact agrégé d'un parc éolien, l'analyse permet de recommander d'une part une distance « de protection » de 5 km ou 10 km respectivement pour les radars en bande C et bande S en deçà de laquelle aucune éolienne ne pourrait être installée et une distance de « coordination » de respectivement 20 et 30 km autour des radars météorologiques en deçà de laquelle l'avis de Météo France devrait être demandé avant toute installation de parc éolien.

Cette « coordination » permettra au cas par cas, en fonction des caractéristiques des parcs éoliens considérés et de leur implantation, à Météo France d'évaluer en détail d'une part les niveaux d'échos Doppler escomptés, d'estimer leur gêne opérationnelle potentielle et, le cas échéant, de trouver des solutions raisonnables assurant, dans des zones non critiques, un impact minimal sur les radars.

Afin de faciliter cette « coordination » et augmenter les possibilités de conclusions favorables, on peut, à l'instar de la problématique « échos fixes », aussi recommander aux promoteurs éoliens de prendre en compte cette problématique le plus en amont possible de leur projet, de mener des études permettant de déterminer les Surfaces Equivalentes Radar (SER) « Doppler » de leurs éoliennes et, dans la mesure du possible, de prendre toutes les mesures possibles visant à diminuer ces SER.

IV. Situation en France

IV.1 Dispositions réglementaires applicables

IV.1.1. Dispositions préventives

Les radars de Météo France, bénéficient 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 (articles L54 à L56 et R21 à R26 du code des P & CE).

Dans le cas d'un radar de Météo France, la servitude contre les obstacles s'étend sur une zone de 2000 m centrée sur ledit radar. Les servitudes contre les perturbations radioélectriques ne s'appliquent que pour le moteur et la turbine des éoliennes et n'a guère d'intérêt ici.

IV.1.2. Dispositions curatives

A ce jour, aucune disposition curative n'est en vigueur.

IV.2. Les efforts de préventions

Les acteurs de projets éoliens sont depuis longtemps attentifs, en France, aux risques d'interférence avec les transmissions hertziennes. Dès octobre 1998, l'ANFR a été conviée à participer à un colloque national sous le patronage de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, intitulé « Enjeux et perspective de la filière éolienne en France ».

L'ANFR avait rappelé à cette occasion l'intérêt des études d'impacts et la nécessaire consultation préalable de ses services de manière à identifier la présence éventuelle de servitudes radioélectriques.

A la suite de ces contacts, les cabinets d'études de projets éoliens ont pris l'habitude d'adresser au service Sites et Servitudes une description géographique des zones qu'ils ont à analyser. L'ANFR communique en retour, avec copie au(x) titulaire(s) de la (des) stations protégée(s), la liste des servitudes des communes concernées et les coordonnées des gestionnaires de servitudes. Il appartient alors au cabinet d'entrer en contact avec les gestionnaires pour approfondir l'étude.

Cette procédure a été validée lors d'une séance plénière de la Commission consultative des Sites et Servitudes (COMSIS) de l'ANFR.

Depuis septembre 2005, le site de l'ANFR (www.anfr.fr) ouvre la possibilité aux collectivités locales et aux sociétés réalisant des études d'impact et « ayant besoin d'en connaître » (c'est le cas de celles installant des éoliennes) d'avoir accès au répertoire national des servitudes radioélectriques.

Pour information, le tableau ci-dessous indique le nombre de consultations relatives aux projets éoliens :

Année	2000	2001	2002	2003	2004
Nombre de consultations	63	258	909	1112	918

Tableau 2

On note une très forte croissance des consultations à partir de 2002 mais il est toutefois probable que la loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique (Loi 2005-781 du 13/072005) proposant la création de Zones de Développement Eolien (ZDE) puisse réduire le nombre de consultations. Par ailleurs, on peut noter que le principe de ZDE pourrait faciliter l'application des recommandations du présent rapport.

Par ailleurs, à l'exception des stations du Ministère de la Défense, de l'Intérieur, et l'Aviation Civile, toutes les stations radioélectriques sont répertoriées et accessibles via internet (www.cartoradio.fr), ce qui permet aux promoteurs de projets éoliens un contrôle élémentaire a priori de l'environnement radioélectrique.

IV.3. Les cas de perturbation constatés

Sur l'ensemble des projets éoliens actuellement en cours, assez peu sont aujourd'hui installés. Toutefois, des perturbations ont déjà été mis en évidence sur le radar météorologique d'Abbeville pour lequel des échos fixes conformes à l'étude théorique sont actuellement mesurés (voir Annexe 3 section 2).

V. Situation internationale :

Bien que le Danemark et l'Espagne présentant un fort développement des fermes d'éoliennes aient été directement contactées afin de connaître leur situation respective en matière d'impact sur les radars météorologiques, aucune n'a fait état de perturbation.

Dans certains cas, il est pertinent de noter que le nombre de radars météorologiques étant particulièrement réduit (4 au Danemark), le risque de perturbation de ces derniers est très faible. Par ailleurs, il convient également de noter que la perturbation par effet Doppler peut parfaitement être effective sans qu'elle ait été détectée.

Concernant l'Allemagne qui opère 16 radars en bande C et présente aussi un fort développement éolien, le service météorologique (DWD) est impliqué dans le processus de décision concernant l'implantation de parcs éoliens. En dessous d'une distance de 5 km d'un radar météorologique, le DWD ne donne pas d'autorisation. Par contre, il étudie au cas par cas les projets prévus entre 5 et 10 km. On peut aussi noter un cas de projet éoliens rejeté après une action en justice intenté par le DWD et un autre projet éolien qui a nécessité, après installation du parc, le déplacement d'un radar météorologique au frais du promoteur éolien.

Le Royaume-Uni a pour sa part publié en 2003 une étude [1] relativement complète sur cette question, en considérant toutefois les radars de l'Aviation civile comme « victimes » potentielles des perturbations dues aux éoliennes.

Une distance de « coordination » de 30 km autour des radars (Aviation civile, Militaire et météorologiques) est aujourd'hui imposée au promoteurs éoliens au Royaume-Uni.

VI. Recommandations

Afin d'éviter ou limiter les perturbations du fonctionnement des radars météorologiques par les éoliennes, l'analyse menée dans le présent rapport recommande la mise en place de distances de coordination et de protection autour de ces radars :

- distance de coordination en deçà de laquelle l'avis de Météo France devrait être demandé avant toute installation de parc éolien.
- distance de protection en deçà de laquelle aucune éolienne ne devrait être installée.

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).

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

La distance de protection s'applique pour le mode Doppler et s'explique d'une part par les seuils de sensibilité très faible des radars dans ce mode et d'autre part par le fait que, contrairement aux autres phénomènes, aucune mesure spécifique ne semble pouvoir améliorer sensiblement la situation et pouvoir s'affranchir, dans une certaine mesure, des échos Doppler produits par les éoliennes.

On peut d'ailleurs noter que ces distances sont assez cohérentes des situations actuelles prévalant dans d'autres pays d'Europe.

La procédure de « coordination » permettra au cas par cas et en fonction des caractéristiques des parcs éoliens considérés et de leur implantation d'une part de déterminer le niveau de visibilité entre le radar et le parc éolien considéré et à Météo France d'évaluer en détail d'une part les contraintes de blocage induites et les niveaux d'échos fixes et Doppler escomptés, d'estimer leur gêne opérationnelle potentielle et, le cas échéant, de trouver des solutions raisonnables assurant un impact minimal sur les radars sans que ceci ne nuise à ses missions de sauvegarde des biens et des personnes.

Afin de faciliter cette « coordination » et augmenter les possibilités de conclusions favorables, on peut aussi proposer les recommandations suivantes :

- à Météo France, dans tous les cas possibles, d'opérer les radars météorologiques en mettant en œuvre l'une ou les deux techniques suivantes permettant de limiter l'impact des échos fixes :
 - augmenter l'élévation du radar dans la direction de l'éolienne,
 - fonctionner en mode dégradé (seuil de détection de 30 dBz),
- aux promoteurs éoliens :
 - de prendre en compte les contraintes relatives aux radars météorologiques le plus en amont possible de leur projet,

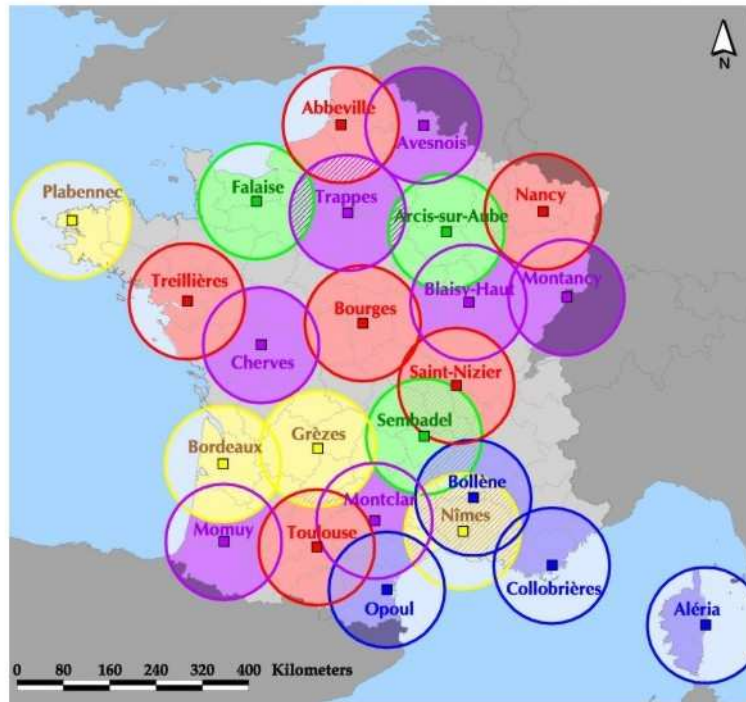
- de concevoir les parcs éoliens de façon à limiter le blocage et à condition que cela n'augmente pas l'impact sur les modes « Echos fixes » et « Doppler » en :
 - alignant parfaitement les éoliennes pour qu'une seule soit vue depuis le radar,
 - à l'opposé, dispersant les éoliennes pour que plusieurs d'entre-elles ne soient pas prises dans le même faisceau radar à un instant donné,
 - éloignant le parc d'éoliennes du radar pour que le pourcentage total de surface occultée, dans l'azimut considéré, soit inférieur à 10%.
- de mener des études permettant de déterminer et fournir les Surfaces Equivalentes Radar (SER) de leurs éoliennes,
- dans la mesure du possible, de prendre toutes les mesures visant à diminuer ces SER, en particulier celles des pales qui sont déterminantes pour l'impact sur le mode « Doppler » et sur la mise en œuvre éventuelle du mode « échos fixes » dégradé des radars météorologiques.

Bibliographie :

[1] Wind farms impact on radar aviation interests - Final report ; FES
W/14/00614/00/REP - DTI PUB URN 03/1294 ; 2003

Annexe 1 : Couverture des radars météorologiques en fin 2006

Les radars du réseau ARAMIS



Type de radar

- Gematronik / Meteor 300 AC
- Gematronik / Meteor 510 C (futurs radars du projet PANTHERE)
- Omera / Melodi DLM10
- Thomson / MTO 2000S
- Thomson / Rodin TRS2730

METEO-FRANCE
DSO/CMR/PMO
avril 2004

Coordonnées géographiques et bande de fréquence des radars météorologiques

Lieu	Bande de fréquence	Statut (à juin 2005)	Longitude	Latitude
Abbeville	C	Opérationnel	0015008E	500812N
Aleria	S	Opérationnel	0092948E	420747N
Arcis sur Aube	C	Opérationnel	0041840E	482744N
Blaisy haut	C	Projet (Novembre 05)	0044634E	472119N
Bollène	S	Opérationnel	0044548E	441927N
Bordeaux	S	Opérationnel	0004128W	444953N
Bourges	C	Opérationnel	0022140E	470333N
Cherves	C	Projet (Octobre 05)	0000400E	464204N
Collobrières	S	Opérationnel	0062225E	431304N
Falaise	C	Opérationnel	0000841W	485538N
Grèzes	S	Opérationnel	0012215E	450621N
Nimes	S	Opérationnel	0043013E	494826N
Montancy	C	Projet (Juillet 06)	0070109E	472207N
Momuy	C	Projet (Février 06)	0003629W	433732N
Montclar	C	Opérationnel	0023640E	435923N
Nancy Réchicourt	C	Opérationnel	0063456E	484300N
Opoul	S	Opérationnel	0025158E	425507N
Plabennec	S	Opérationnel	0042601W	482700N
Saint Nizier	C	Opérationnel	0042807E	460407N
Sembadel	C	Opérationnel	0034243E	451735N
Taisnières-en-Thierache	C	Opérationnel	0034930E	500740N
Toulouse	C	Opérationnel	0012240E	433433N
Trappes	C	Opérationnel	0020038E	484625N
Treillières	C	Opérationnel	0013904W	472003N

Annexe 2 : Analyse détaillée relative au blocage

1 Blocage maximum admissible

Les premières études présentées par Météo France concernant l'impact des éoliennes faisant état de la problématique de blocage du faisceau radar, utilisent un critère de 10% de blocage, à l'instar du critère utilisé par l'administration anglaise.

Afin de valider et justifier ce critère, des simulations ont été réalisées selon les hypothèses suivantes :

- l'éolienne masque un certain secteur angulaire 0.02° , 0.05° , 0.1° et 0.2° (soit, compte-tenu de l'ouverture de 1° du faisceau radar, respectivement 2, 5, 10 et 20 % de blocage du faisceau),
- on prend un faisceau radar gaussien de 0.5 degrés de demie ouverture a moins 3 dB,
- on se place dans le cas le plus défavorable ou le secteur masque est exactement au centre du faisceau, ie dans la partie la plus énergétique,
- on se donne une cellule convective caractérisée par deux éléments: la valeur max. au centre en dBz (on prend 40, 50 et 60 dBz) et le rayon de la cellule ou l'on a la réflectivité nulle 0 dBz (pour ce dernier paramètre, des valeurs de 1 à 4 km ont été pris en compte),
- On déplace la cellule convective du radar jusqu'a la portée maximale de 200 km. Pour chaque distance, on calcule le rapport de ce que donne le radar avec masquage par l'éolienne par rapport a ce qu'il donnerait sans éolienne. Pour ce calcul, on prend en compte la forme gaussienne du faisceau et la modélisation de cellule décrite dans l'alinéa précédent (discrétisation du faisceau + intégration).

On peut noter que l'analyse décrite ci-dessus suppose une obstruction totale du faisceau, estimant qu'aucun signal ne revient des zones situées derrière l'obstacle. Cette approximation permet de simplifier significativement les calculs même si l'analyse de l'effet de blocage du faisceau radar devrait prendre en compte la méthode de Fresnel qui montre que les signaux électromagnétiques peuvent se recomposer, au moins partiellement, après le franchissement d'un obstacle.

L'atténuation du signal après le franchissement de l'obstacle dépend de la distance entre l'obstacle et la cible et également de la distance entre la source (radar) et l'obstacle. Pour les distances proches de l'obstacle à l'ombre de la source électromagnétique, cette atténuation est très importante. A l'inverse, à une distance plus lointaine, cette atténuation est plus limitée.

Par contre, de ce fait, l'analyse de l'effet de blocage du faisceau radar en prenant en compte la méthode de Fresnel n'est pas aisée car elle impose une modélisation fine de la position des pales de l'éolienne et exige de considérer différentes valeurs d'atténuation selon les différentes distances entre l'obstacle et la cible.

Des analyses détaillées ont montré que le principe retenu dans ce rapport (obstruction totale) n'induit, pour les radars météorologiques, dont les cibles ont des dimensions très grandes par rapport au diamètre de l'éolienne, qu'une surestimation de la quantification de l'effet de blocage de quelques % et donc que l'erreur maximale induite par une telle approximation soit négligeable.

Sur cette base, les figures en **Annexe 2bis** donnent les résultats obtenus dans tous les cas de figure évoqués ci-dessus et montrent que la sous-estimation minimale de l'intensité de pluie est égale à la valeur de l'occultation et s'accroît avec la distance de la cellule de pluie considérée pouvant atteindre des valeurs considérables de l'ordre de 80 à 90%, ce qui n'est pas acceptable.

En utilisant un critère de sous-estimation raisonnable de l'ordre 20 à 30% à 100 km, la figure 2-1 ci-dessous montre que la valeur de 10% de blocage du faisceau est une valeur maximale admissible, même s'il pourrait ne pas être suffisant pour assurer la protection des radars météorologiques dans le cas de cellules convectives de taille inférieures à 2 km, reconnaissant toutefois que ces cellules ne sont pas typiques.

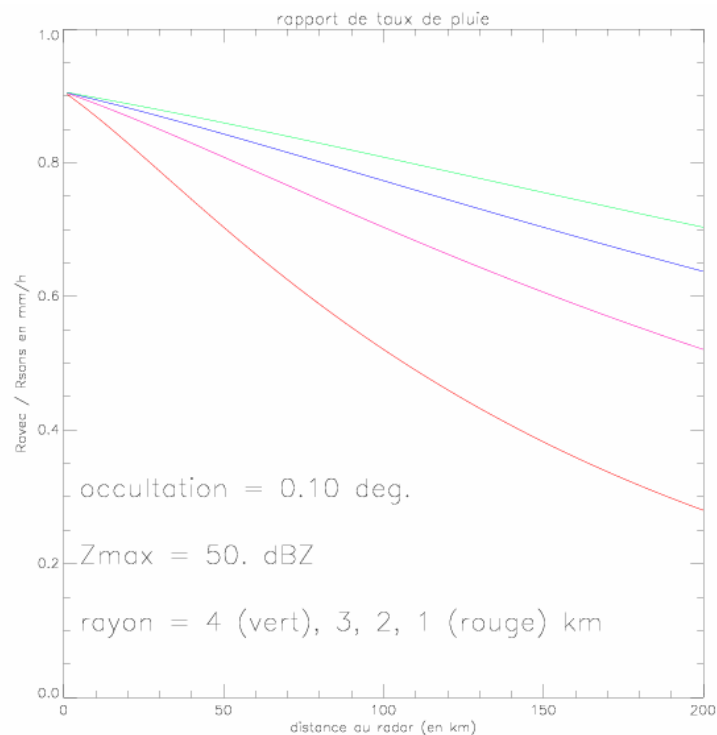
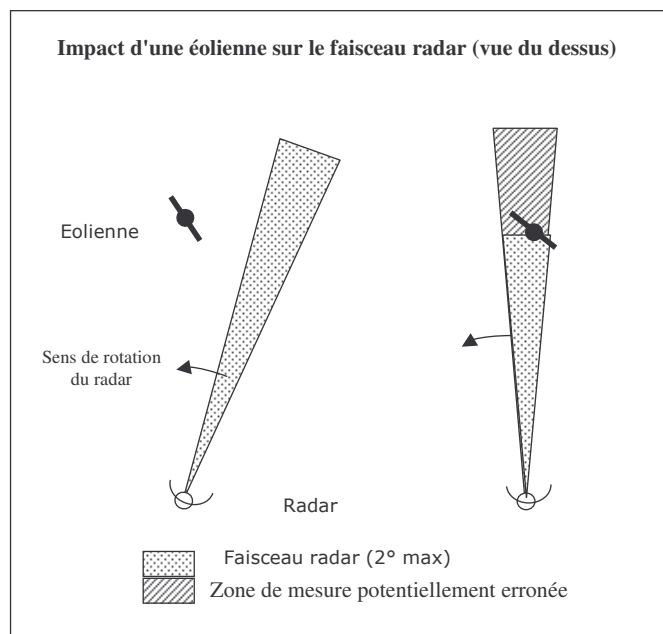


Figure 2-1

2 Analyse du blocage maximum admissible

L'occultation du faisceau radar par une ou plusieurs éoliennes met en cause les mesures sur les angles d'azimut incriminés, c'est-à-dire lorsque le radar pointe en direction de l'éolienne.

Pour une éolienne et selon le type de radar, ces angles sont compris entre 1 et 2 degrés ce qui peut représenter des zones géographiques importantes pour lesquelles les mesures hydro-météorologiques peuvent être erronées, comme schématisé sur la figure 2-2 ci-dessous. Dans la zone grisée optiquement occultée par l'éolienne (zone de mesure potentiellement erronée), le signal radar sera atténué et inférieur au niveau nominal.



L'analyse qui suit a été menée avec des radars installés à une hauteur de 20 mètres et présentant des ouvertures de faisceaux (à 3 dB) de 1 et 2°, typiques des radars de Météo France et pour deux types d'éoliennes présentant les caractéristiques suivantes :

Type 1 :

- fût de 70 mètres de haut
- section de 4 à 2 mètres
- 3 pâles de 40 mètres de long et 2 mètres de large

Type 2 :

- fût de 120 mètres de haut
- section de 6 à 4 mètres
- 3 pâles de 70 mètres de long et 3 mètres de large

Sur cette base, les figures 2-3 et 2-4 suivantes donnent les valeurs de pourcentage du faisceau radar en fonction de la distance à l'éolienne et montrent que, en cas de **visibilité directe** entre le radar et l'éolienne, même au-delà de la distance de servitude (2 000 m), une seule éolienne a le potentiel de bloquer, dans l'azimut considéré, plus de 10% des faisceaux radar et jusqu'à quelques % à 10 km.

Considérant, par ailleurs, que plusieurs éoliennes sont en général installées dans un même parc, on peut légitimement estimer, en fonction de leur agencement, que l'impact de telles installations reste critique jusqu'à une distance de 10 km, en particulier pour les radars présentant une ouverture à 1° (Bande C principalement).

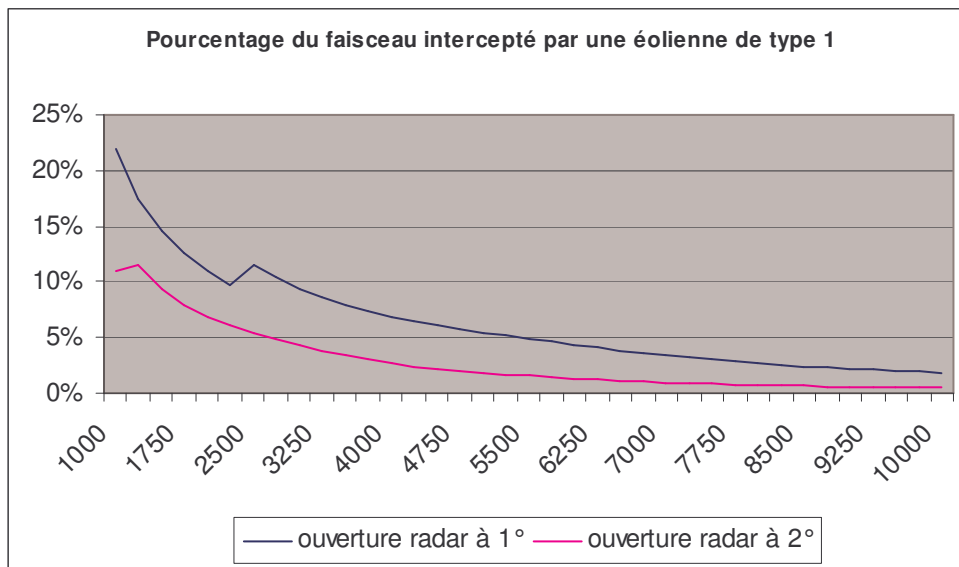


Figure 2-3

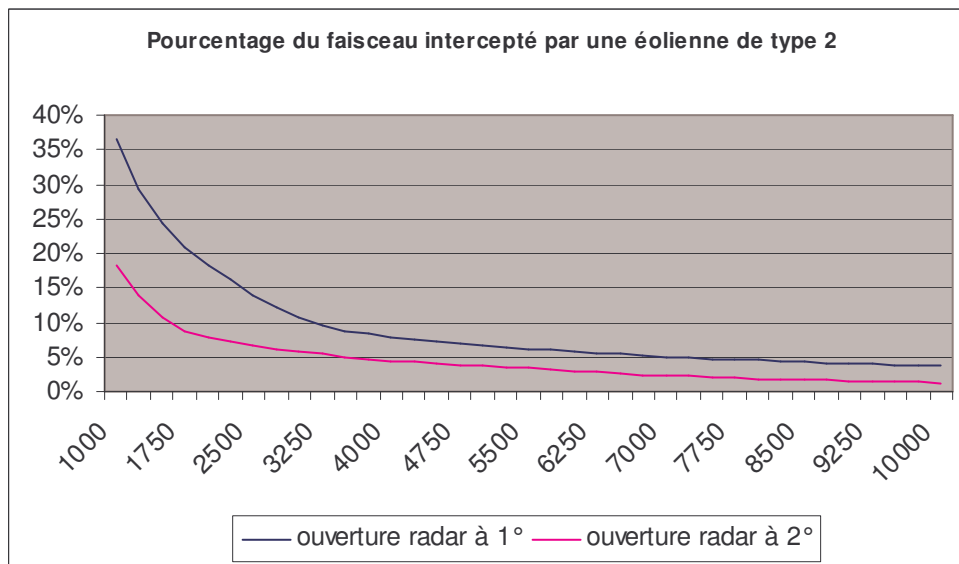


Figure 2-4

3 Conclusion concernant le scénario « blocage »

Afin de régler les éventuels problèmes de blocage du faisceau qui, en tout état de cause, n'interviendront qu'en cas de visibilité directe entre le radar et les éoliennes, une distance de « coordination » de 10 km est nécessaire, permettant de mettre en œuvre plusieurs solutions quant à la conception des parcs d'éoliennes :

- aligner parfaitement les éoliennes pour qu'une seule soit vue depuis le radar,
- à l'opposé, disperser les éoliennes pour que plusieurs d'entre-elles ne soient pas prises dans le même faisceau radar à un instant donné,
- éloigner le parc d'éoliennes du radar pour que le pourcentage total de surface occultée, dans l'azimut considéré, soit inférieur à 10%.

Ces solutions seront étudiées au cas par cas en fonction des caractéristiques de chaque éolienne et des parcs correspondants :

- coordonnées géographiques du parc et de ses éoliennes,
- cote au sol en m NGF de chaque éolienne,
- dimensions des éoliennes (hauteur, largeur, nombre de pales, longueur et largeur des pales,...).

Annexe 3 : Analyse détaillée relative aux échos fixes

1 Principe de la mesure

Les radars hydro-météorologiques réalisent des mesures de niveau de précipitation, exprimés en réflectivité (dBz).

Ces radars sont calibrés afin de faire coïncider le niveau de bruit du récepteur avec le niveau de réflectivité de 0 dBz à 100 km. Par ailleurs, le niveau de détection minimale d'une cellule de pluie est fixé à 8 dBz.

La figure 3-1 suivante donne les niveaux relatifs (en dBz) de la détection minimale (8 dBz), d'une cellule convective importante (60 dBz) et du niveau équivalent au bruit du récepteur (correspondant à environ -113 dBm).

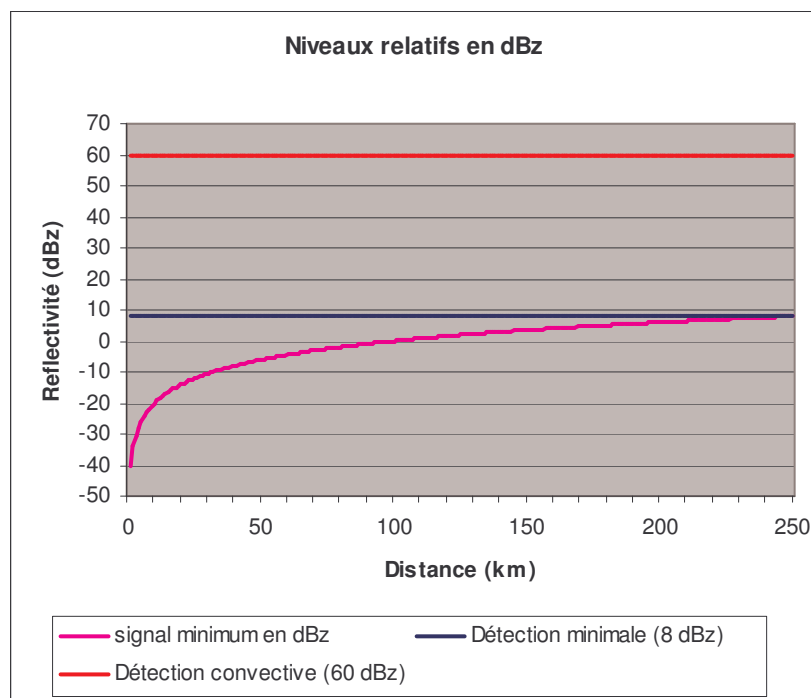


Figure 3-1

La relation puissance/réflectivité est donnée par la formule suivante :

$$P = \frac{Cz}{r^2}$$

Avec P = puissance en mW

C = constante (environ 10^{-7} ou -70 dB)

z = réflectivité

r = distance (m)

Ce qui donne, en dB, la relation suivante :

$$dBm = dBz + C - 20\log(r)$$

Sur cette base, la figure 3-2 donne, en dBm, les niveaux relatifs correspondant aux niveaux de réflectivité de la figure 3-1 précédente.

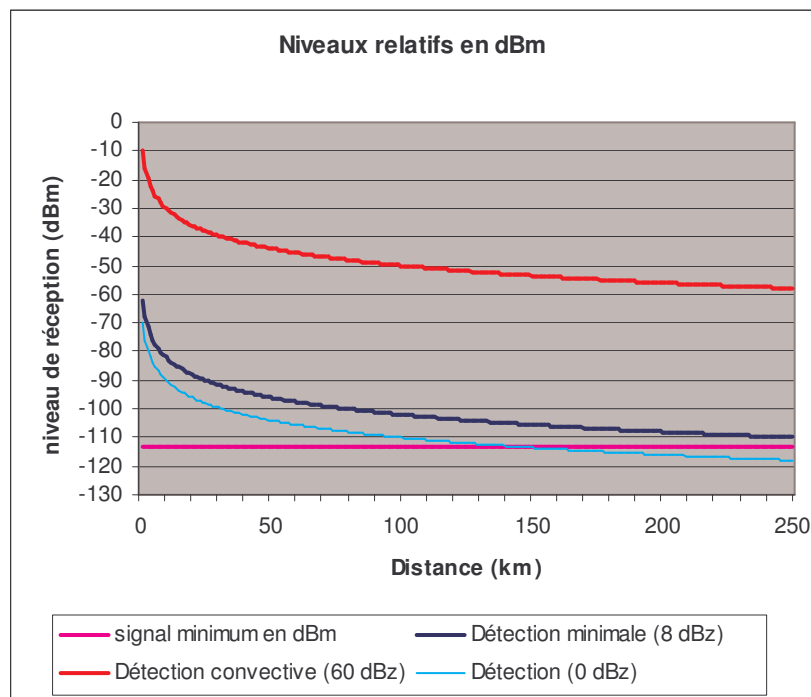


Figure 3-2

2 Surface équivalente des Eoliennes

Le signal reçu de la détection de l'éolienne par un radar météorologique est donné par :

$$P_r = P_e + 2G + 20\log(0.0003/(FD^2)) + 10\log(SER / (4\pi)^3) - 2FL$$

Avec :

- P_r : puissance reçue (dBm)
- P_e : puissance émise (dBm)
- G : gain d'antenne (dBi)
- F : Fréquence (MHz)
- D : Distance (km)
- FL : pertes de feeder (dB)
- SER : Surface Equivalente Radar (m²)

Déterminer l'impact des échos produits par les éoliennes nécessite donc la connaissance de la surface équivalente (SER) des éoliennes, ce qui n'est pas une tâche triviale et dépend fortement des caractéristiques spécifiques des éoliennes.

Il existe toutefois dans la littérature un certain nombre d'éléments génériques, et en particulier l'étude anglaise relative au radars aéronautiques réalisée par Qinetics (« Wind farm impact on radar ») qui donne, pour la bande S, une gamme de SER de 10 à 1000 m² (i.e. 10 à 30 dBsm) voire 2000m² (33 dBsm) pour les éoliennes, prenant en compte à la fois le fut et les pales.

Des mesures effectuées par Météo France sur son radar d'Abbeville (Somme) ont permis de mettre en évidence les échos fixes produits par deux champs d'éoliennes existants et installés à environ 19 km au sud-ouest du radar, à savoir « Nibas » et « Chépy » composés respectivement de 6 et 2 éoliennes dont la taille est assez modeste (65m de haut et 35 m de longueur de pales). Ces échos fixes sont visibles sur la figure 3-3 ci-dessous comme deux points brillants.

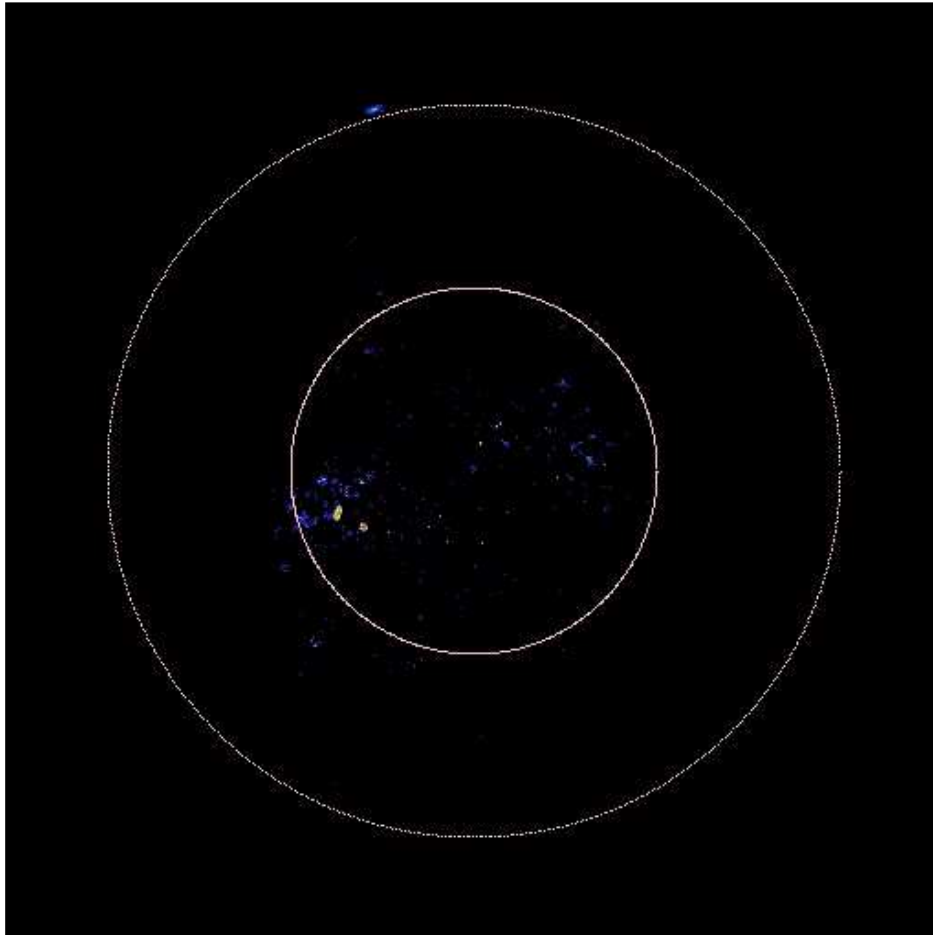


Figure 3-3

Les deux points considérés correspondent à **des valeurs de réflectivité entre 61 et 62 dBz** proches de la saturation du radar, confirmant d'ailleurs l'analyse théorique ci-dessus, et permettent d'en déduire, en utilisant la formule ci-dessus, des niveaux de SER de l'ordre de 24 à 25 dBsm, soit entre environ 250 et 320 m².

Par ailleurs, la figure 3-4 ci-dessous présente les mesures relatives aux pixels correspondant à la localisation du champ d'éoliennes de Nibas, extraites sur une période de 13 heures, représentant 157 images, après filtrage par l'Eliminateur d'Echos Fixes (EEF) du radar.

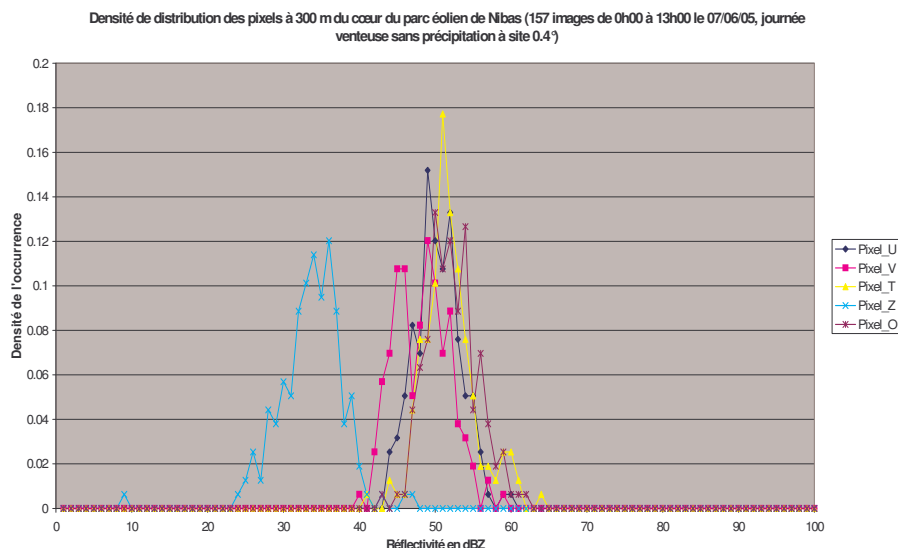


Figure 3-4

On peut voir qu'en dehors d'un pixel décalé de l'axe des éoliennes, les valeurs de réflectivité sont là encore très importantes (jusqu'à 64 dBZ) et très variables. Il faut d'ailleurs noter que chaque point correspond déjà à une moyenne des mesures instantanées sur chaque impulsion radar, elles-même présentant une forte variabilité car non filtrée par l'EEF.

A titre de comparaison, à 19 km, une réflectivité de 60 dBZ correspond à une SER de 23 dBsm, ce qui tend donc à confirmer les hypothèses initiales.

Sur cette base, l'analyse d'impact des échos fixes produits par les éoliennes sur les radars météorologiques a été menée en prenant en compte une gamme de SER que l'on peut raisonnablement estimer représenter une large gamme d'éoliennes :

- 10 m² (soit 10 dBsm)
- 200 m² (soit 23 dBsm)
- 1000 m² (soit 30 dBsm)

Il convient aussi de noter que la SER d'une éolienne varie considérablement suivant la forme donnée à ses différentes parties. En particulier, ainsi qu'il est mentionné dans l'étude de QinetiQ [1], l'augmentation de l'angle au sommet du cylindre conique que forme le fût permet de réduire significativement la SER de celui-ci et donc de l'ensemble de l'éolienne.

L'étude en question donne en effet (section 2.1) l'exemple d'une éolienne (Enercon) dont la SER est réduite de 100 m² à 10 m² en augmentant de 2° l'angle au sommet du cône cylindrique. De la même façon, il est mentionné qu'une tour de section elliptique présentant au radar son plus faible côté a une SER plus faible qu'une tour de section circulaire.

3 Caractéristiques des radars hydrométéorologiques

Les caractéristiques des radars météorologiques nécessaires à la détermination de l'impact des éoliennes sont :

	Bande S	Bande C
Puissance crête d'émission	700 kW (88,5 dBm)	250 kW (84 dBm)
Pertes de feeder	3 dB	3 dB
Gain d'antenne	43 dBi	45 dBi

Les antennes sont de type “paraboliques” présentant le gabarit suivant :

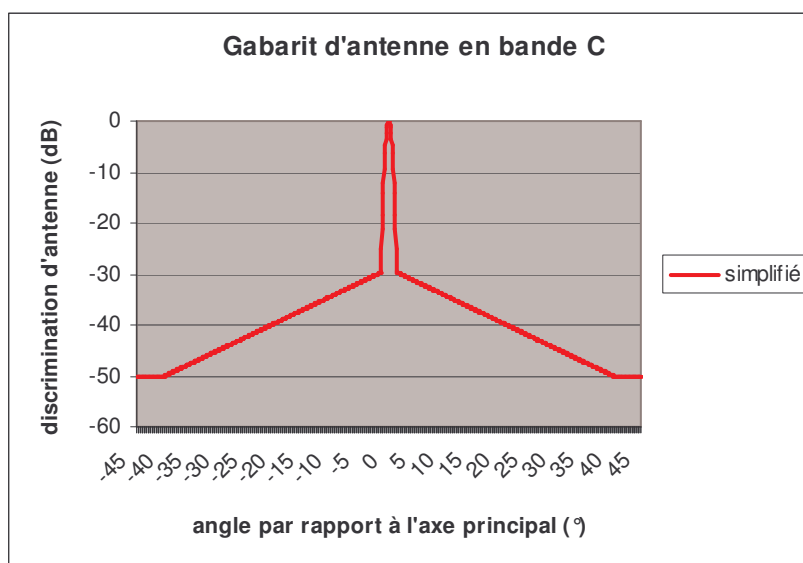


Figure 3-5

4 Niveaux de détection des éoliennes (Bande C)

Le niveau minimum de détection d'une zone de précipitation est de 8 dBz.

Lorsque le signal de détection de l'éolienne reçu au niveau du radar est supérieur à ces 8 dBz, un écho fixe sera créé qui ne permettra pas la détection de pluie sur la zone concernée. En fonction du niveau du signal et de la discrimination d'antenne du radar, cet écho fixe peut être circonscrit à la localisation de l'éolienne mais aussi, dans les cas extrêmes, s'étendre sur une zone répartie de part et d'autre de l'éolienne, à équidistance du radar, formant une portion de cercle dont l'angle d'ouverture est le double de la discrimination d'antenne nécessaire pour assurer un niveau de réception inférieur aux 8 dBz.

La figure 3-6 ci-dessous donne, en dBm et pour la bande C, les niveaux de réception comparés en réflectivité et échos fixes, dans l'axe du radar et pour peu que l'éolienne soit en visibilité.

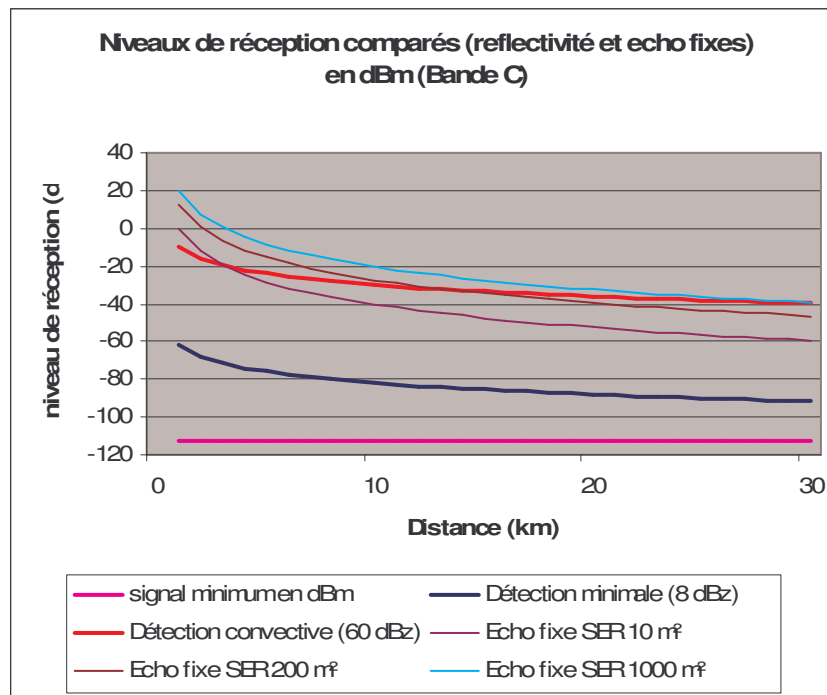


Figure 3-6

A toutes les distances jusqu'à 30 km, on peut voir que le niveau de détection de l'éolienne est largement supérieur au niveau minimum de réflectivité (8 dBz) et supérieur, dans quasiment tous les cas, au seuil de saturation (64 dBz). Un écho fixe sera donc produit dans tous les cas.

Dans le plan horizontal, prenant en compte la rotation du radar, cet écho fixe perdurera tant que la discrimination d'antenne entre le lobe principal de l'antenne et la direction de l'éolienne ne ramènera pas le niveau de détection de l'éolienne en dessous du niveau de réflectivité minimum (8 dBz).

Pour éliminer l'écho fixe, sachant que le gain d'antenne intervient à la fois à l'émission et la réception, il faut alors que la discrimination d'antenne minimale soit supérieure à la moitié de la différence entre le niveau de détection calculé et le niveau de réflectivité minimum (8 dBz), comme donné sur la figure 3-7 ci-dessous.

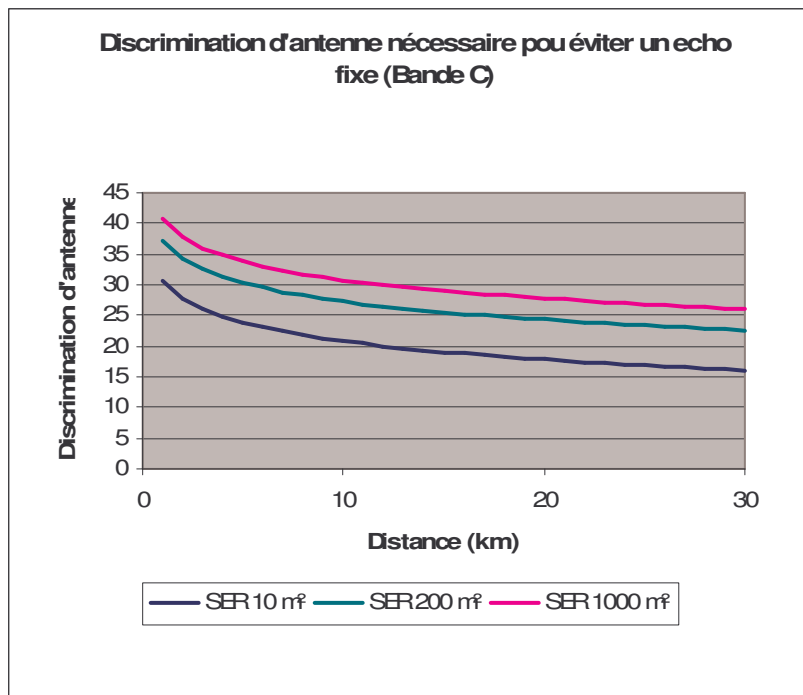


Figure 3-7

En comparant ensuite ces valeurs avec le gabarit d'antenne donné sur la figure 3-5 ci-dessus, on obtient les azimuts de la figure 3-9 dans lesquels l'écho fixe produit par une éolienne sera maintenu, selon le principe exposé sur la figure 3-8, représentant le plan horizontal.

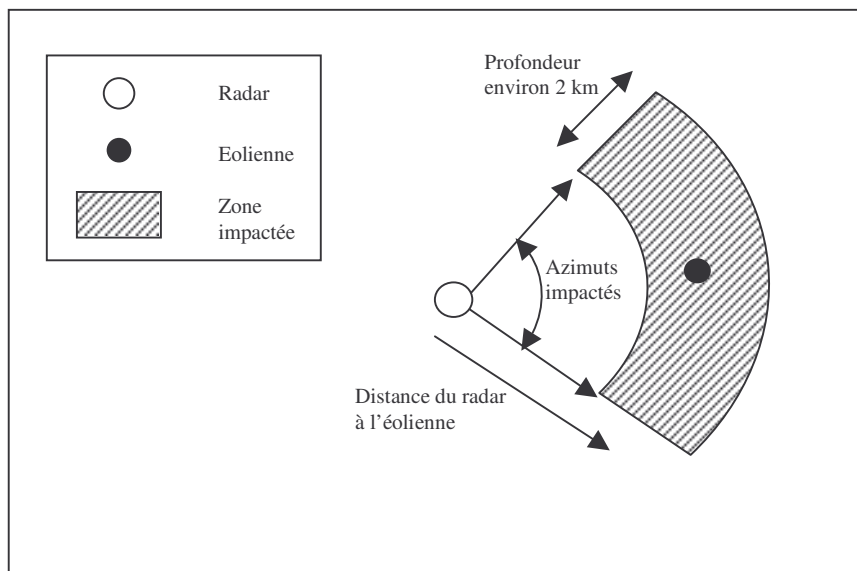


Figure 3-8

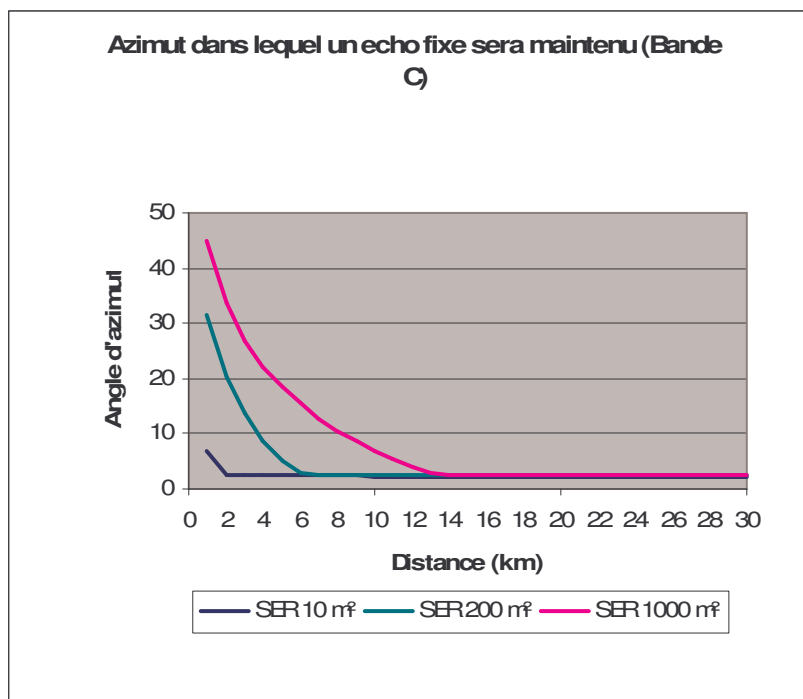


Figure 3-9

Il apparaît donc que, dans le cas d'éoliennes présentant des SER de 200 à 1000 m², l'écho fixe produit par l'éolienne sera présent dans des azimuts très importants (plusieurs dizaines de degrés) par rapport à la direction de l'éolienne, y compris à des distances largement supérieures au seuil des servitudes radioélectriques. Au minimum, au delà respectivement de 6 et 13 km, l'azimut impacté est de l'ordre de 2°. Pour des éoliennes présentant une SER de 10 m², les azimuts impactés représentent quelques degrés en deçà de 2 km mais reste de 2° au-dessus de 2km.

Compte-tenu d'une part de la grille de détection des radars météorologiques présentant des pixels de 1km x 1km, et d'autre part des effets de raccord (l'impulsion de détection de l'éolienne couvrira 2 pixels contigus), on peut alors calculer le nombre de pixels qui seront rendus inutilisables du fait des échos fixes produits par l'éolienne (voir figure 3-10).

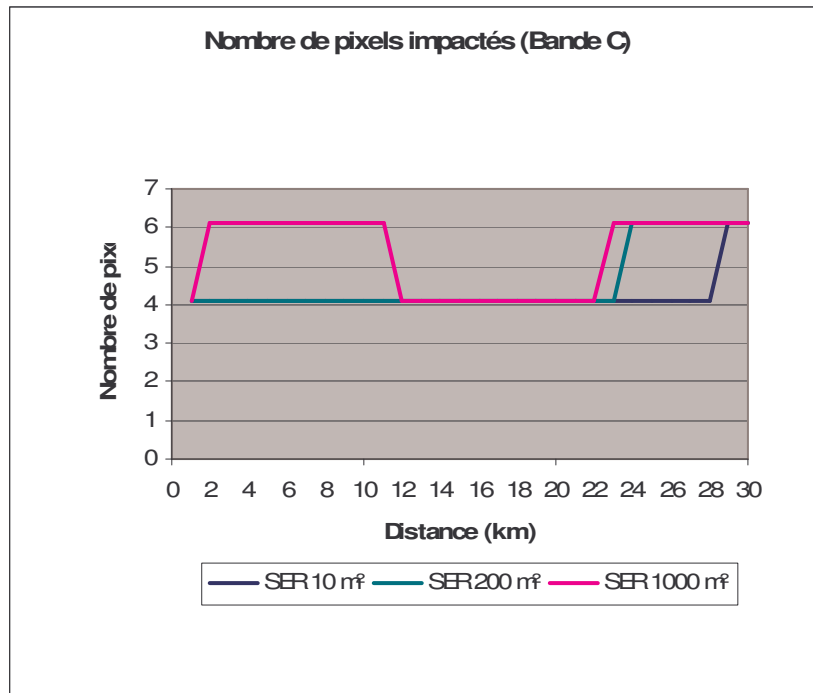


Figure 3-10

Le choix des sites d'implantation des radars résulte de compromis entre les résultats d'études approfondies de simulation de propagation radioélectrique et de contraintes locales d'accès, de raccordement électrique et téléphonique ainsi que d'obstacles existants, tels que le relief, les forêts, les châteaux d'eau, les silos, ...

Dans certaines zones géographiques représentant des bassins versants sensibles, la présence d'échos fixes importants n'est pas admise et conditionne la localisation des radars météo. Une modification de leur environnement peut donc grandement nuire à leur fonctionnement, voire les rendre inopérants quant au déclenchement d'alertes hydrologiques.

Il est toutefois à noter que, dans la plupart des cas, les seuils hydrologiques critiques se situent au-dessus de 30 dBz, correspondants à des cellules convectives importantes. Les traitements radar permettent d'une part d'éliminer les échos fixes jusqu'à 30 dBz et d'autre part de ressortir les niveaux de réflectivité supérieurs à ce niveau. Par contre, dans ce cas, le traitement visant à éliminer l'écho supprime aussi les niveaux de réflectivité inférieurs à l'écho fixe sur les pixels concernées.

Les figures 3-11 et 3-12 ci-dessous, de façon similaire à l'analyse relative au seuil nominal de 8 dBz, présentent les azimuts et nombre de pixels impactés en supposant un seuil de détection en mode dégradé à 30 dBz.

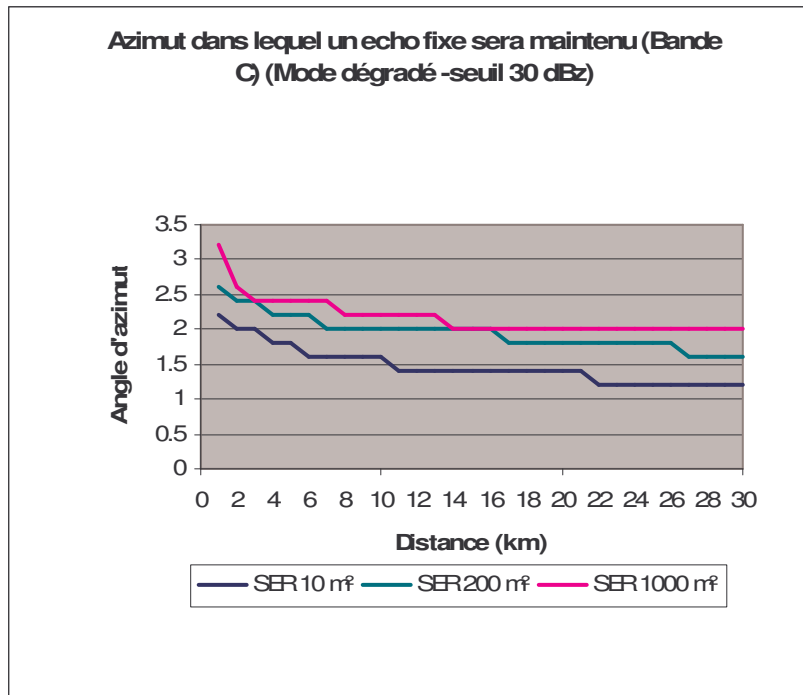


Figure 3-11

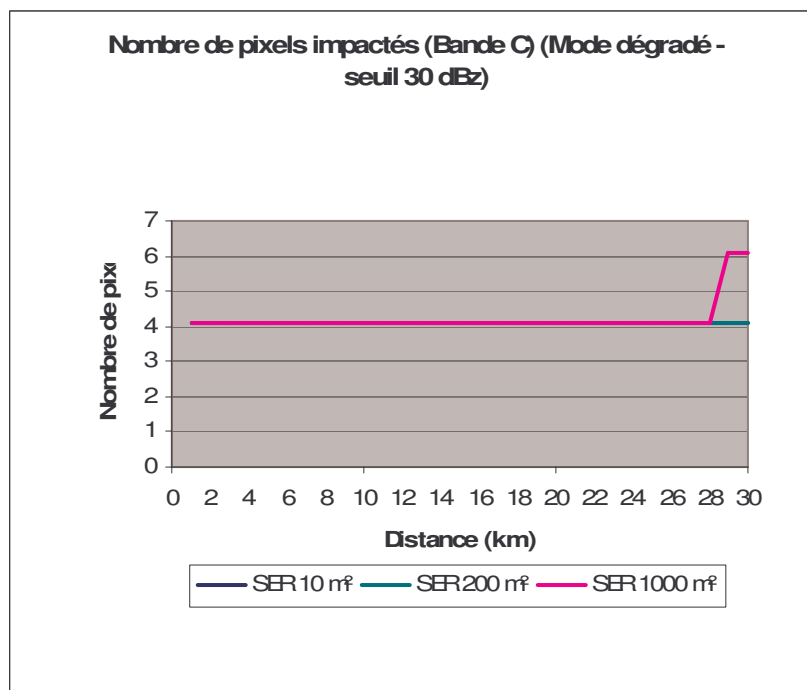


Figure 3-12

En mode dégradé, on peut voir que si les azimuts impactés sont réduits de façon importantes pour les deux types d'éoliennes, l'effet d'une éolienne présentant une SER de 1000 m² est atténué en terme de pixels impactés mais que la situation est globalement la même, pour des éoliennes présentant une SER de 10 et 200 m².

Cette possibilité de filtrage de certain échos fixes doit toutefois être prise avec précaution. En effet, ce filtrage est basé sur l'écart-type des mesures effectués sur chaque impulsion radar, sachant qu'écho fixe présente, théoriquement, un écart-type nul, alors que les mesures en réflectivité présente un écart-type tel qu'il permet de discriminer un écho de cellule de pluie d'un écho fixe. Or, les premières mesures effectuées sur le radar d'Abbeville font ressortir que l'écart-type des échos éoliens est similaire à celui d'une zone de pluie, du sans doute à l'effet du mouvement des pales qui induisent une forte variabilité, et n'est donc pas filtré, contrairement aux autres échos fixes. Les figures 3-3 et 3-4 au paragraphe 4.2 ci-dessus représente l'image radar après filtrage « écho fixe » et confirme donc que les échos produits par les champs d'éoliennes de « Nibas » et « Chépy » ne sont pas filtrés.

En conclusion, il semble que la possibilité de mettre en œuvre le mode dégradé des radars météorologiques ne soit possible que si la part d'écho fixe ramenée par les pales des éoliennes, et donc leur SER relative (ce qui ramène d'ailleurs à la problématique Doppler), est suffisamment petite pour n'induire qu'une faible variabilité des échos fixes qui permettra leur filtrage par le traitement des radars.

Par ailleurs, une autre solution permettant de s'affranchir de certain échos fixes consiste à faire varier l'élévation du radar et donc passer « au dessus » de l'éolienne, mais cette fonctionnalité ne peut toutefois se faire raisonnablement à des élévations supérieures à 3° sans influencer sur l'ensemble des mesures.

Bien évidemment, l'effet de cette fonctionnalité est limité et ne permet de se soustraire qu'à des cas d'échos fixes pour lesquels la discrimination d'antenne nécessaire (en élévation, correspondant à la moitié des angles présentés sur la figure 3-11 ci-dessus) est inférieure 2.5° (3° d'élévation – angle d'ouverture du faisceau à 3 dB).

La figure 3-13 donne donc, en fonction de la distance et prenant en compte la rotondité de la Terre, la hauteur maximale de l'éolienne au dessus du plan NGF du faisceau radar permettant de s'affranchir des échos fixes.

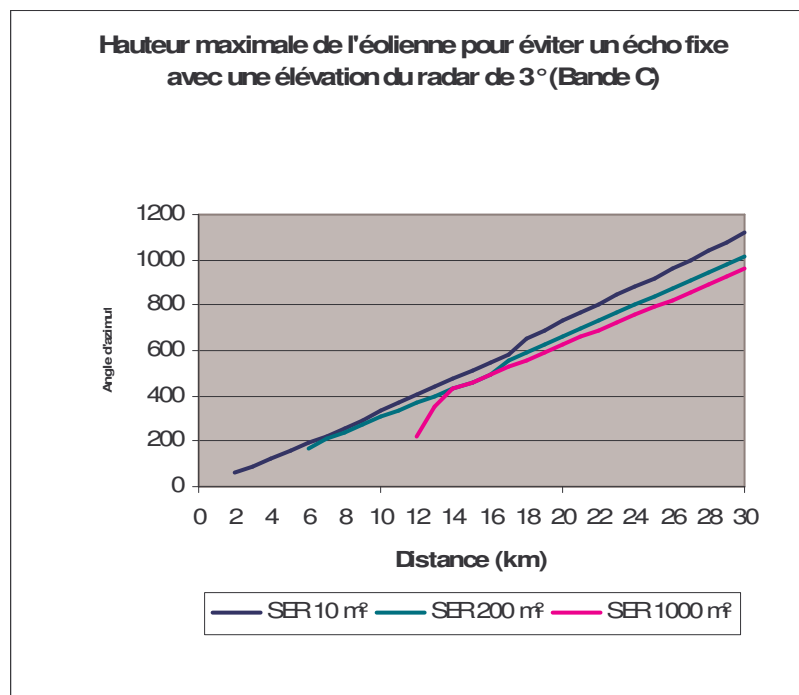


Figure 3-13

On peut donc voir que pour des SER de 10, 200 et 1000 m², l'augmentation de l'élévation du radar jusqu'à 3° permet de s'affranchir des échos fixes au delà respectivement de 2, 6 et 12 km de distance mais qu'en dessous, les échos fixes seront maintenus, pour peu bien sûr que l'éolienne soit en visibilité du radar.

En mode dégradé (seuil à 30 dBz), l'intérêt de cette solution est beaucoup plus évident et permet d'envisager une possible cohabitation à des distances raisonnables, comme le montre la figure 3-14 ci-dessous, pour peu bien évidemment que cette solution puisse être mise en œuvre.

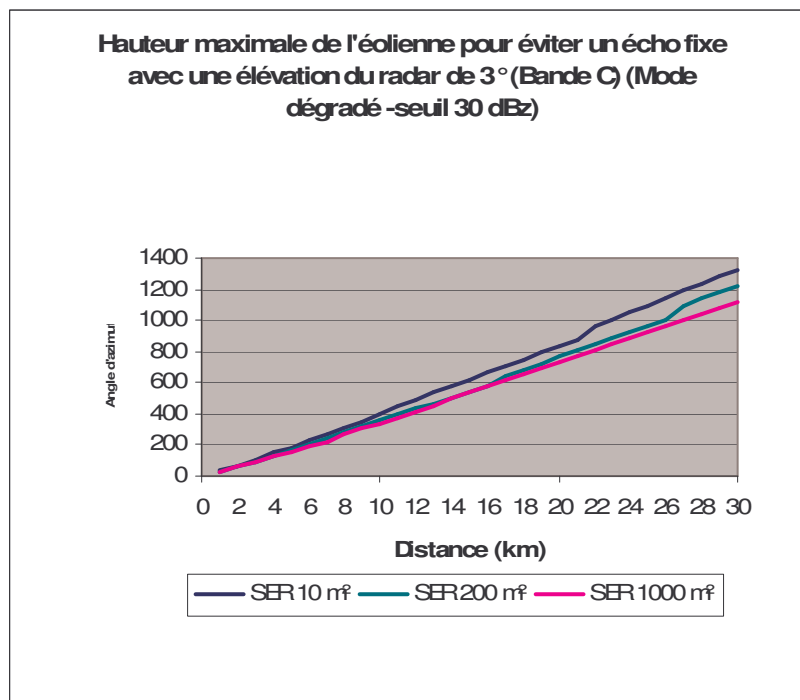


Figure 3-14

5 Cas des radars Bande S

De façon similaire, les figures 3-15 à 3-20 ci-dessous donnent les résultats de simulation pour les radars en Bande S.

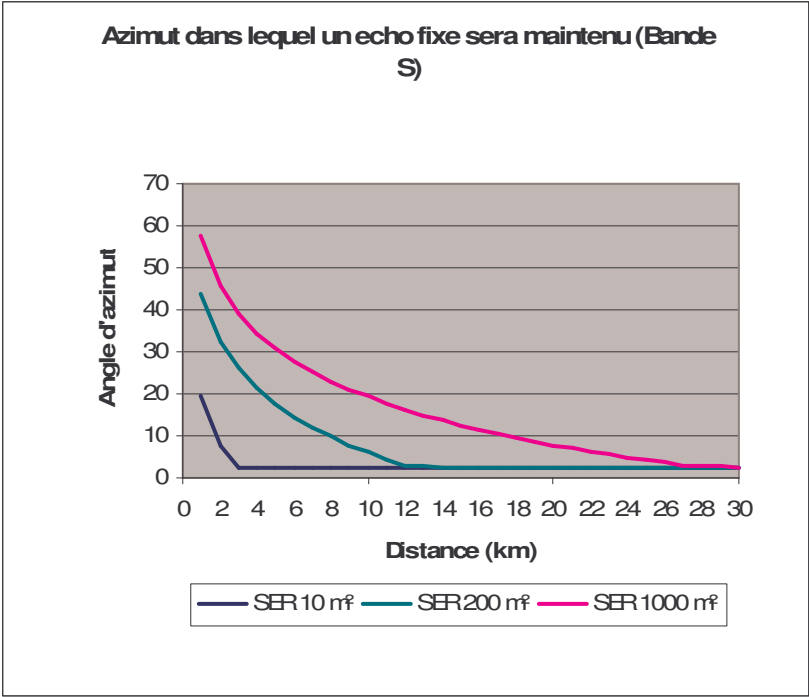


Figure 3-15

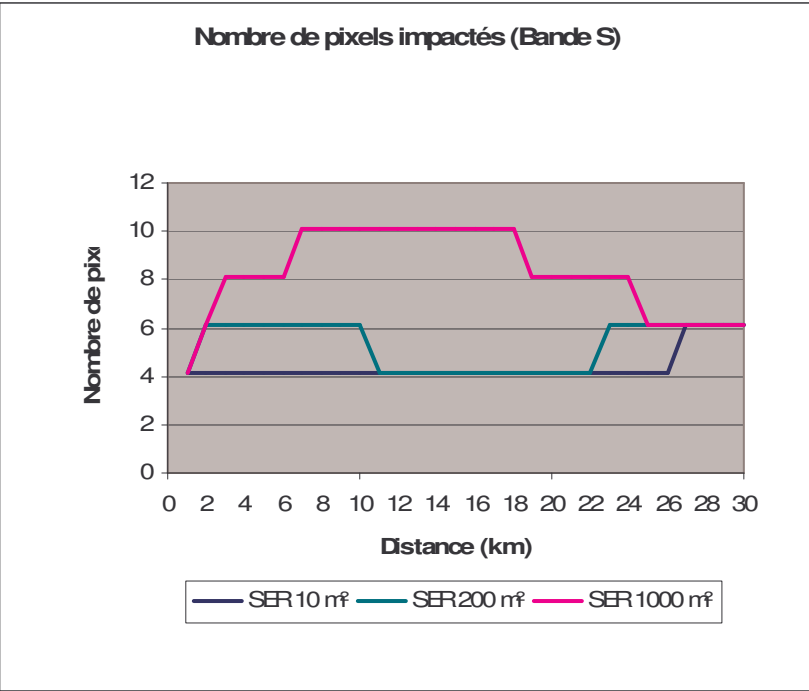


Figure 3-16

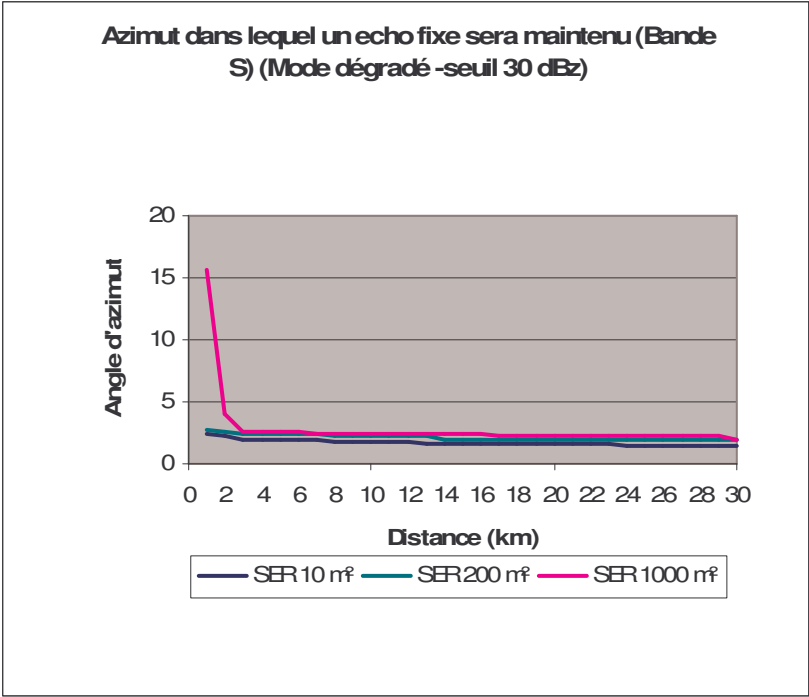


Figure 3-17

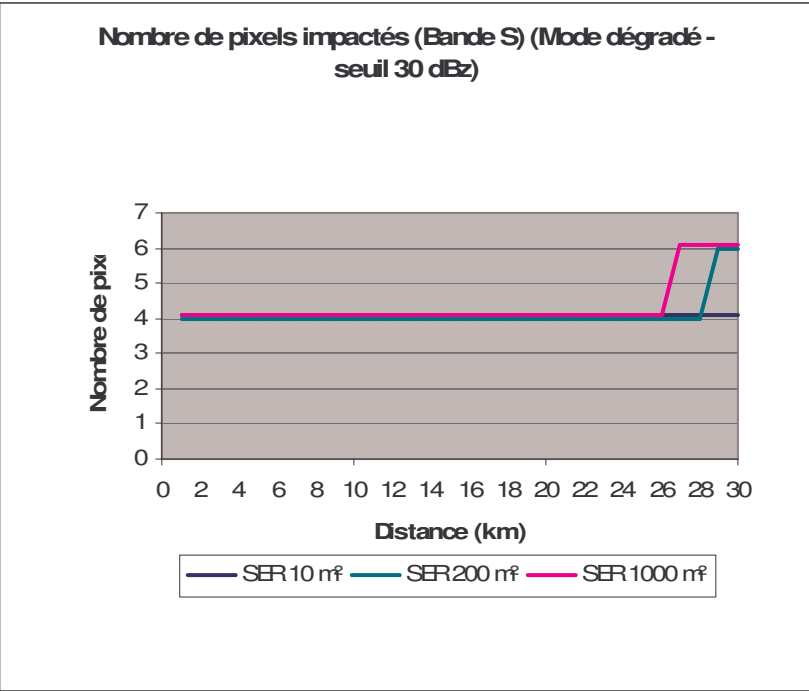


Figure 3-18

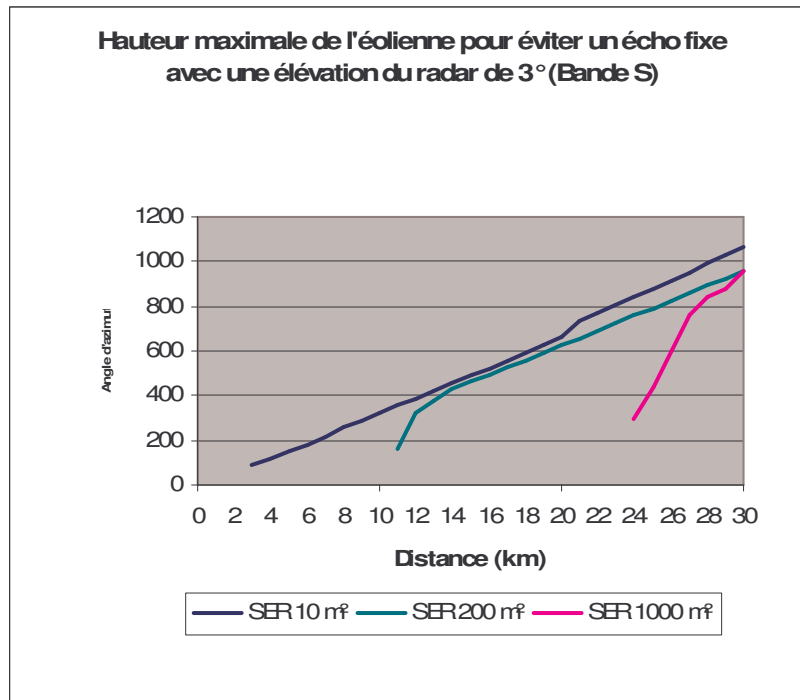


Figure 3-19

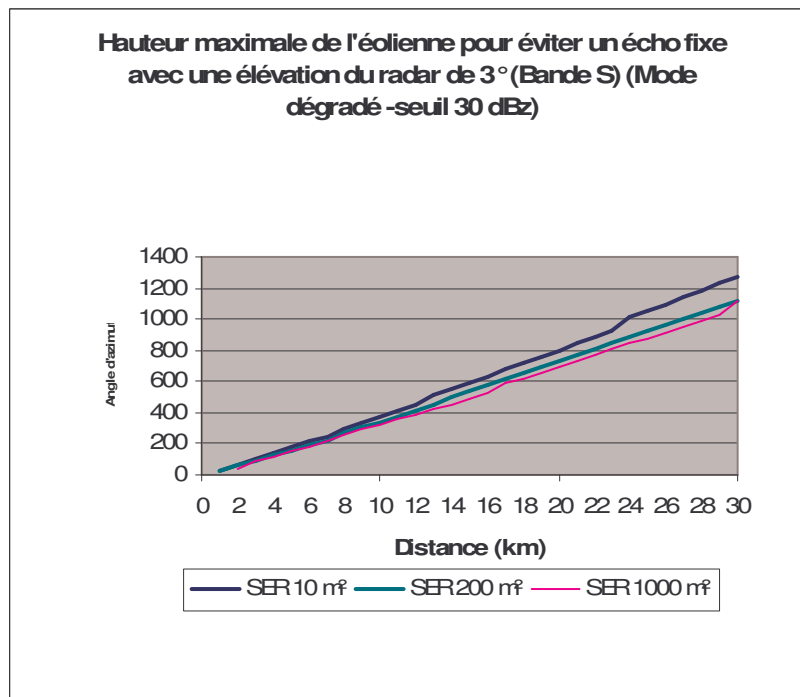


Figure 3-20

Compte-tenu à la fois des puissances supérieures des radars et de l'atténuation « espace libre » inférieure en bande S, il apparaît que les résultats sont plus pessimistes qu'en bande C, puisque dans le cas d'éoliennes présentant une SER de 200 m², l'écho fixe produit par l'éolienne sera présent dans des azimuts supérieurs à 10° au delà de 8 km, et atteignent un minimum de 2° à 12 km alors que dans le cas d'éoliennes présentant une SER de 1000 m²,

l'écho fixe produit par l'éolienne sera présent dans des azimuts supérieurs à 10° au delà de 18 km, présentant un nombre de pixels impactés jusqu'à 10.

Par contre, dans les deux cas de SER, l'analyse en mode dégradé (seuil 30 dBz) montre une nette amélioration de la situation avec des azimuts et pixels impactés limités à respectivement 3° et 4.

De même, pour le seuil nominal de 8 dBz, on peut donc voir que l'augmentation de l'élévation du radar jusqu'à 3° permet de s'affranchir des échos fixes au delà de 12 km pour une SER de 200 m² et de 24 km pour une SER de 1000 m², alors qu'en mode dégradé, on peut envisager une possible cohabitation à des distances raisonnables, pour peu là encore, que cette solution puisse être mise en œuvre.

6 Situation agrégée

Les résultats de simulations ci-dessus montrent l'impact d'une éolienne sur les radars météorologiques.

Considérant, par ailleurs, que plusieurs éoliennes sont en général installées dans un même parc, on peut légitimement estimer que l'impact d'un parc éolien sera supérieur, présentant un résultat agrégé soit géographique ou en niveaux de détection.

En effet, si les éoliennes ne sont pas suffisamment espacées (cas N°1), les signaux de détection de chacune des éoliennes vont s'agréger en puissance au niveau du récepteur du radar, augmentant par là même le niveau d'écho fixe et donc, par voie de conséquence similairement à l'analyse ci-dessus, la discrimination d'antenne nécessaire pour éviter l'écho fixe, les azimuts dans lesquels l'écho fixe sera maintenu et donc, in fine, le nombre de pixels impactés.

En supposant un parc éolien composé de 5 éoliennes présentant une SER de 200 m², le résultat agrégé pour ce cas N°1 serait similaire au résultat donné pour une éolienne de 1000 m² de SER, même si l'agrégation de la part variable des échos fixes dues aux pales pourrait ne pas être linéaire. Les figures données aux § 4 et 5 ci-dessus permettent toutefois d'appréhender l'impact d'une telle agrégation dans le cas d'éoliennes présentant une SER de 200 m², sachant que pour des éoliennes de 1000 m² de SER, l'effet agrégé d'un parc éolien serait beaucoup plus important.

A l'inverse, si les éoliennes sont espacées (cas N°2), les signaux de détection de chacune des éoliennes ne s'agrégeront sans doute pratiquement pas mais le parc éolien présentera alors une suite d'échos fixes dont les impacts respectifs s'agrégeront de façon géographique augmentant là encore les azimuts dans lesquels l'écho fixe sera maintenu et le nombre de pixels impactés.

Bien évidemment, cette agrégation dépend totalement de la configuration du parc éolien, mais on peut estimer, en première approche, pour le cas N°2, que le nombre de pixels impactés sera augmenté de la surface du parc éolien (en km²).

7 Conclusion concernant le scénario « écho fixe »

En fonction des niveaux de SER des éoliennes, l'analyse ci-dessus montre clairement que l'impact des éoliennes sur le fonctionnement en réflectivité des radars ne peut être négligé jusqu'à des distances de l'ordre de 15 km pour les radars en bande C et au delà de 30 km pour les radars en bande S, en particulier considérant l'effet agrégé d'un parc éolien.

Bien évidemment, cet impact n'interviendra qu'en cas de visibilité directe entre le radar et le parc éolien, et l'on peut raisonnablement penser que le relief permettra d'atténuer cet impact.

De même, la prise en compte du mode dégradé (seuil de 30 dBz), comparé au mode nominal (seuil de 8 dBz), permet d'envisager une cohabitation possible à des distances raisonnables pour lesquelles la hauteur maximale des éoliennes pourra dépasser le niveau NGF du plan du radar. Ceci toutefois ne pourra être mis en œuvre et efficace uniquement si la part variable de l'écho fixe produit par les pales est suffisamment faible pour ne pas leurrer le traitement radar, paramètre qui dépend bien évidemment des caractéristiques des éoliennes.

Au final, à l'instar de l'effet de blocage (voir § 3.3) et prenant en compte l'impact agrégé d'un parc éolien, l'analyse ci-dessus permet d'estimer une distance de « coordination » nécessaire de 10 km en deçà de laquelle l'avis de Météo France devrait être demandé. Cette « coordination » permettra au cas par cas, en fonction des caractéristiques des parcs éoliens considérés, à Météo France d'évaluer en détail d'une part les niveaux d'échos fixes escomptés, d'estimer leur gêne opérationnelle potentielle et, le cas échéant, de déterminer si le mode dégradé peut être mis en œuvre.

Annexe 4 : Analyse détaillée relative au mode Doppler

1 Niveaux de détection doppler des éoliennes (Bande C)

Contrairement à la réflexivité (en dBz) qui est une mesure d'intensité du signal, la détection Doppler s'effectue sur la phase du signal et s'opère donc dès que le signal reçu est supérieur au niveau de bruit (i.e. -113 dBm).

L'analyse d'impact des échos fixes produits par les éoliennes sur les radars météorologiques a été menée en prenant en compte une gamme de SER que l'on peut raisonnablement estimer représenter une large gamme d'éoliennes :

- 10 m^2 (soit 10 dBsm)
- 200 m^2 (soit 23 dBsm)
- 1000 m^2 (soit 30 dBsm)

Pour la détermination de l'impact sur le Doppler, seules les pales, en mouvement, sont à prendre en compte.

Considérant les deux types d'éoliennes prises en compte dans l'analyse relative au blocage (voir Annexe 2), la surface des pales représente plus de 50% de la surface présentée au radar. Toutefois, les pales ne sont en général pas entièrement métallique ce qui peut raisonnablement permettre de penser que la proportion de SER relative aux pales sera moindre. Par ailleurs, l'orientation des pales est variable ce qui là aussi permet de diminuer, en moyenne, leur part relative dans la SER totale.

Sur cette base, on peut donc raisonnablement estimer que, selon les éoliennes, la part de SER relative aux pales peut varier dans une gamme de l'ordre de 5 à 20% de la SER totale et l'analyse d'impact des échos Doppler produits par les éoliennes sur les radars météorologiques a été menée en prenant en compte une gamme de SER que l'on peut raisonnablement estimer représenter une large gamme d'éoliennes :

- 1 m^2 (soit 0 dBsm)
- 10 m^2 (soit 10 dBsm)
- 200 m^2 (soit 23 dBsm)

Par ailleurs, on peut aussi estimer que la forte variabilité des échos fixes telle que mesurée sur le radar d'Abbeville (voir Annexe 3) est due au mouvement des pales qui présentent donc une SER dynamique importante, supérieure à 10 dB.

On peut aussi noter que les éléments présentés dans l'étude QinetiC (Ref [1]) concernant les SER montrent bien des variations importantes dues aux pales. En particulier la figure 4-6 de cette étude montre, pour une éolienne dont la SER moyenne totale serait de 18 dBsm , une variation pouvant aller jusqu'à $+10 \text{ dB}$ ce qui tend à confirmer les hypothèses ci-dessus, tant concernant la proportion de SER due aux pales que sur les valeurs de SER Doppler prises en compte. On peut aussi noter que les figures 5-9 et 5-10 de cette même étude montrent aussi la récurrence de « points chauds » Doppler dont la SER peut dépasser 20 dB , ce qui là aussi tend à confirmer la pertinence de la valeur de 23 dBsm citée ci-dessus, même si l'on peut considérer que cette valeur représente sans doute un maximum.

Par ailleurs, la vitesse angulaire des pales implique que la vitesse radiale des pales proche du rotor de l'éolienne est beaucoup plus faible que celle en bout de pale, ce qui induira un spectre

Doppler très large et donc une corrélation spectrale évidente entre la mesure de vent et l'écho de l'éolienne.

Comparé au scénario « échos fixes », on peut donc estimer que le mode doppler sera plus sensible à l'effet des éoliennes, en particulier à des distances faibles, comme montré sur la figure 4-1 ci-dessous.

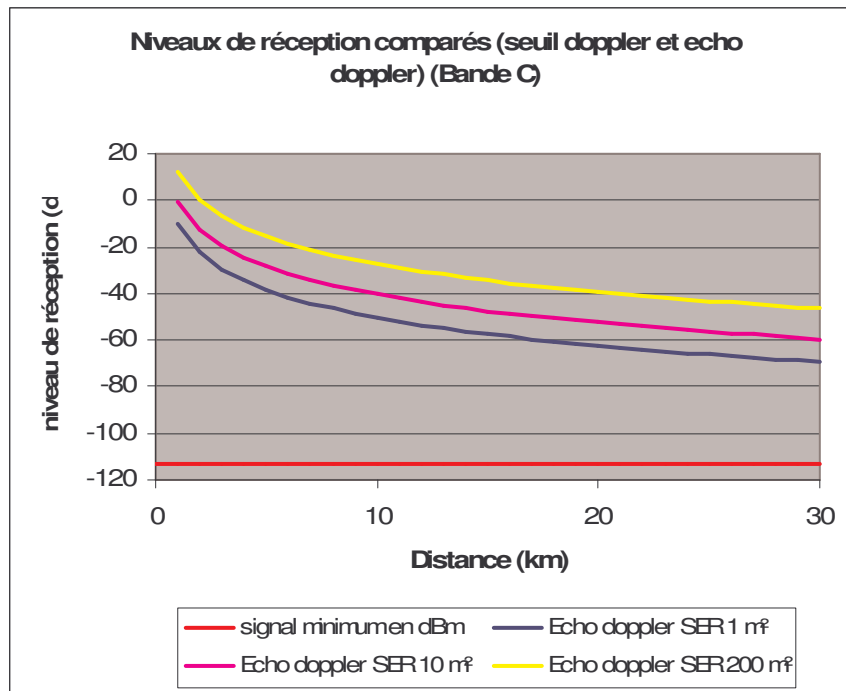


Figure 4-1

A toutes les distances jusqu'à 30 km, on peut voir que le niveau de détection de l'éolienne est largement supérieur au niveau de détection doppler (-113 dBm), entre 50 et 120 dB et que donc, dans tous les cas, le traitement doppler sera perturbé.

Dans le plan horizontal, prenant en compte la rotation du radar, cet écho doppler perdurera tant que la discrimination d'antenne entre le lobe principal de l'antenne et la direction de l'éolienne ne ramènera pas le niveau de détection de l'éolienne en dessous du niveau de détection minimale (-113 dBm).

Là aussi, pour éliminer l'écho doppler, sachant que le gain d'antenne intervient à la fois à l'émission et la réception, il faut alors que la discrimination d'antenne minimale soit supérieure à la moitié de la différence entre le niveau de détection calculé et le niveau de détection minimale, comme donné sur la figure 4-2.

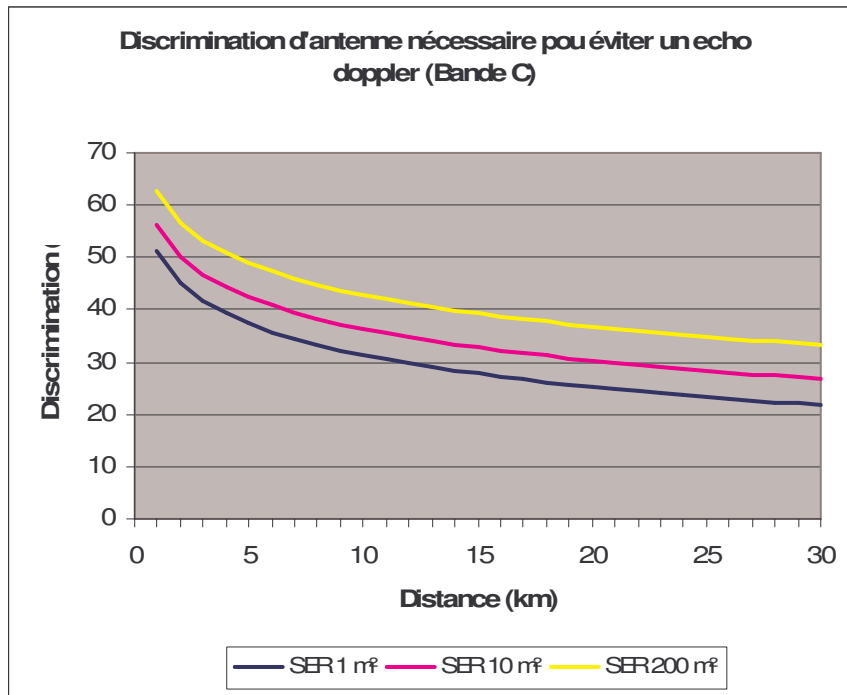


Figure 4-2

En comparant ensuite ces valeurs avec le gabarit d'antenne donné sur la figure 3-5 de l'Annexe 3, on obtient, selon le schéma de principe de la figure 4-3, dans le plan horizontal les azimuts et dans le plan vertical les élévations, formant une portion de sphère à équidistance du radar dans lesquels l'écho doppler produit par une éolienne sera maintenu.

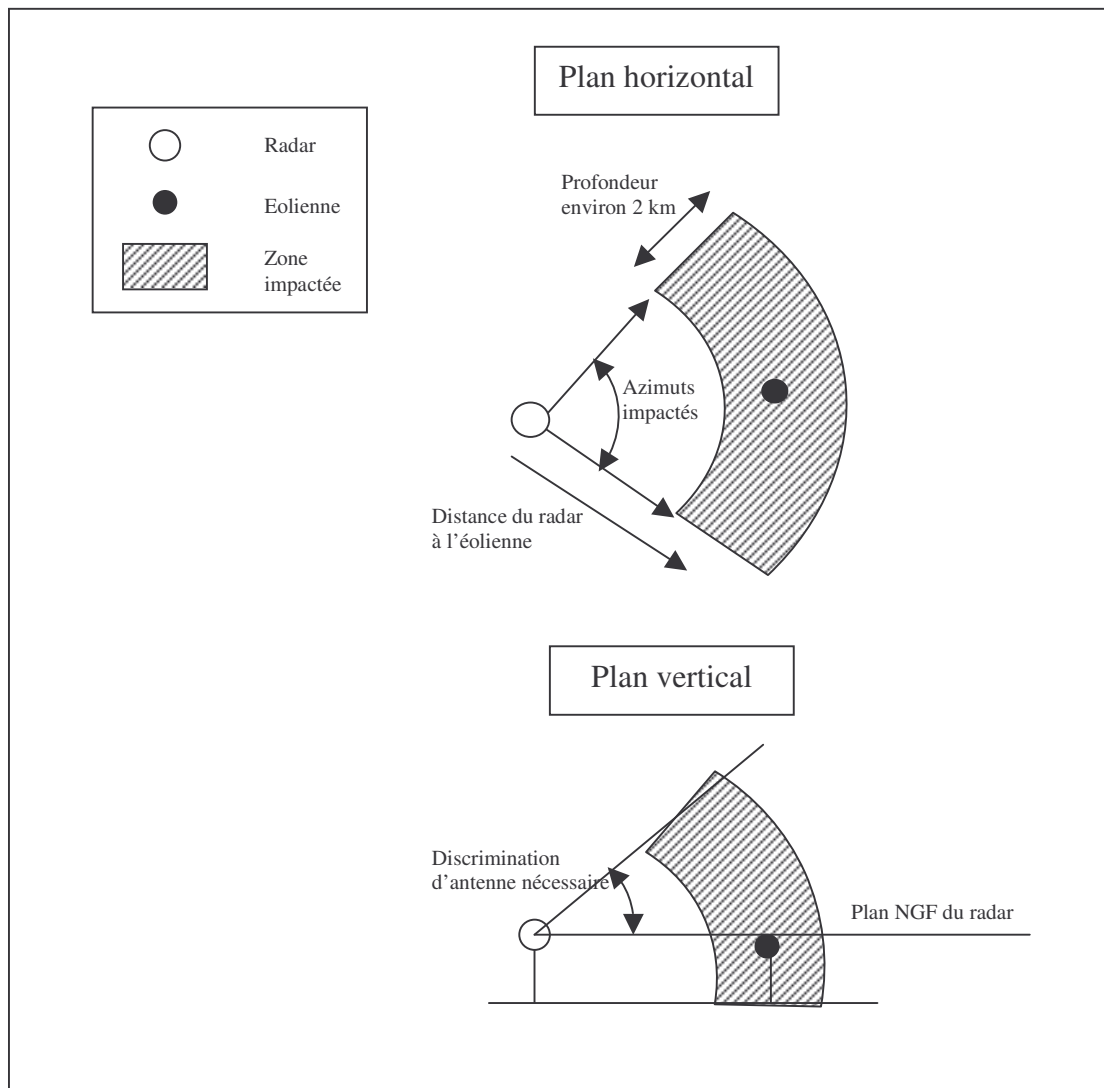


Figure 4-3

Les azimuts correspondants sont donnés sur la figure 4-4, notant que la discrimination d'élévation est égale à la moitié de l'azimut impacté.

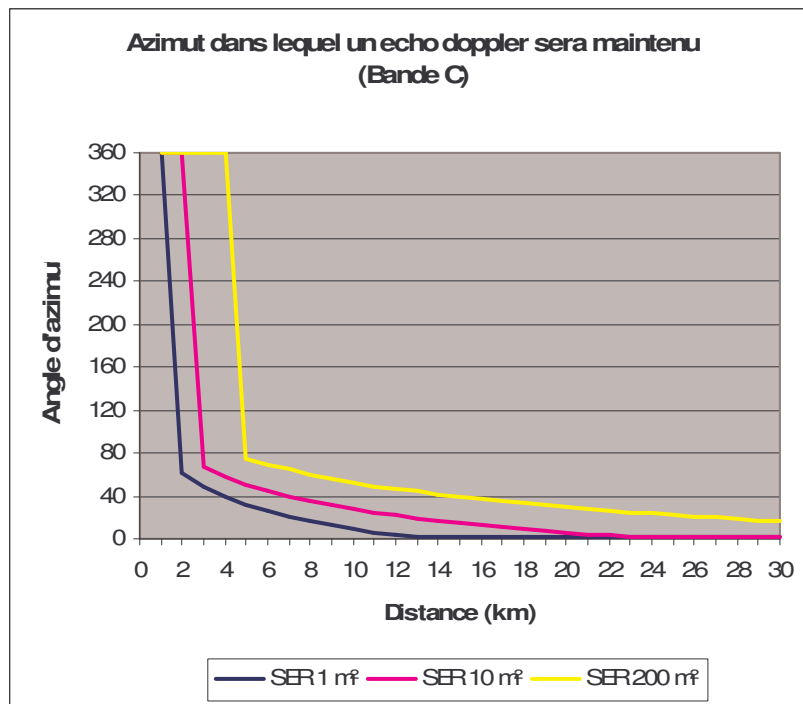


Figure 4-4

Il apparaît donc que, dans le cas d'éoliennes présentant des SER doppler de 1, 10 et 200 m², l'impact sur le traitement doppler sera présent sur l'ensemble des azimuts et des élévations pour une éolienne située jusqu'à, respectivement, 1, 2 et 4 km. Cette situation extrême s'explique par le fait que dans ce cas, la discrimination d'antenne maximale n'est pas suffisante pour atténuer le signal doppler reçu de l'éolienne.

Pour les autres distances, les valeurs d'azimuts impactés restent très élevées (plusieurs dizaines de degrés), bloquant la mesure sur des zones géographiques importantes pour lesquelles, par ailleurs, l'ensemble des élévations seront impactées, pour n'atteindre des valeurs inférieures à 3° qu'au delà de 22 km.

Là encore, compte-tenu d'une part de la grille de détection des radars présentant des pixels de 1km x 1km, et d'autre part des effets de raccord (l'impulsion de détection de l'éolienne couvre 2 pixels contigus), on peut alors calculer le nombre de pixels qui seront rendus inutilisables du fait des échos doppler produits par l'éolienne (voir figure 4-5).

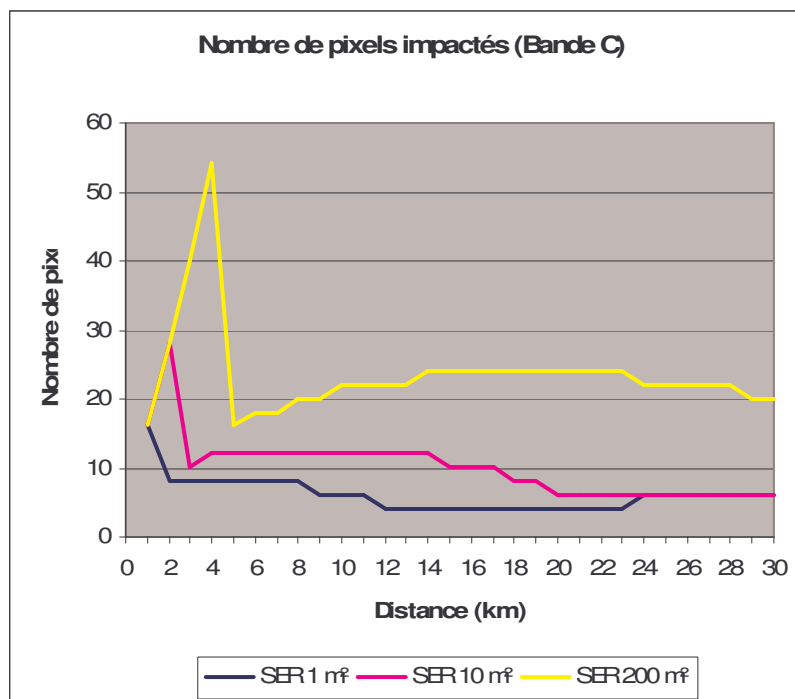


Figure 4-5

Le nombre de pixels impactés est donc très grand, en particulier à courte distance, et reste suffisamment important, y compris au delà de 20 km, pour potentiellement remettre en cause l'ensemble des mesures doppler :

- pour un traitement volumique de la vitesse radiale, un nombre important de pixels erronés aura pour conséquence d'empêcher toutes données de vent fiable dans certaines zones géographiques, situation inacceptable pour certaines zones comportant des installations critiques telles que les aéroports. Lorsque l'impact éolien est « limité » en azimuts, on peut estimer, au cas par cas, le niveau de gêne sur des zones particulières, prenant en compte en particulier le fait que les zones critiques feront aussi l'objet de mesures relatives à l'installation d'éoliennes (principalement pour les aéroports) ou que les modèles numériques de prédiction pourront extrapoler, dans une certaine mesure, les pixels déclarés erronés. Par contre, à l'inverse, pour les situations à courte distance pour lesquelles tous les azimuts (et donc toutes les élévations) sont impactés, ces mesures ne pourront pas être mises en œuvre, argumentant en faveur d'une exclusion des éoliennes dans les zones concernées.
- Pour un traitement VAD (Vertical Azimut Display), pour lesquelles l'ensemble des données (pour toutes les altitudes) dans un rayon de quelques km ou quelques dizaines de km sont intégrées afin de calculer un profil de vent à la verticale du radar, le profil sera fortement impacté, en particulier si, comme montré ci-dessus, les mesures sur l'ensemble des azimuts et élévations à certaines distances sont erronées. Le traitement VAD nécessite de disposer d'un grand nombre de mesures à différentes altitudes afin de réaliser le consensus nécessaire à la production d'un profil cohérent. Si les données à courte distance ne sont pas disponibles, il est théoriquement possible d'effectuer les mesures à des distances plus importantes mais en pratique, ces mesures seront beaucoup moins précises tant du fait de la discrimination inférieure en altitude que des niveaux utiles reçus plus faibles. Là

encore, l'analyse milite en faveur d'une exclusion des éoliennes dans les zones proches du radar afin d'éviter les impacts sur l'ensemble des azimuts et élévations.

De même, à de tels niveaux de discrimination d'antenne nécessaires pour éliminer l'écho doppler, la solution consistant à faire varier l'élévation du radar et donc passer « au dessus » de l'éolienne sera inopérante dans la plupart des cas, comme le montre la figure 4-6 ci-dessous pour une élévation de 3°.

De même, considérant une élévation du radar de 10° (voir figure 4-7), qui réduirait de facto la détectabilité du radar dans les basses couches atmosphériques, la situation est bien évidemment meilleure mais ne permet pas de se dégager des échos doppler en deçà de 8, 14 et 28 km, respectivement pour les SER de 1, 10 et 200 m².

En conséquence, dans la plupart des cas, l'écho doppler sera maintenu dans une large portion de sphère autour du radar.

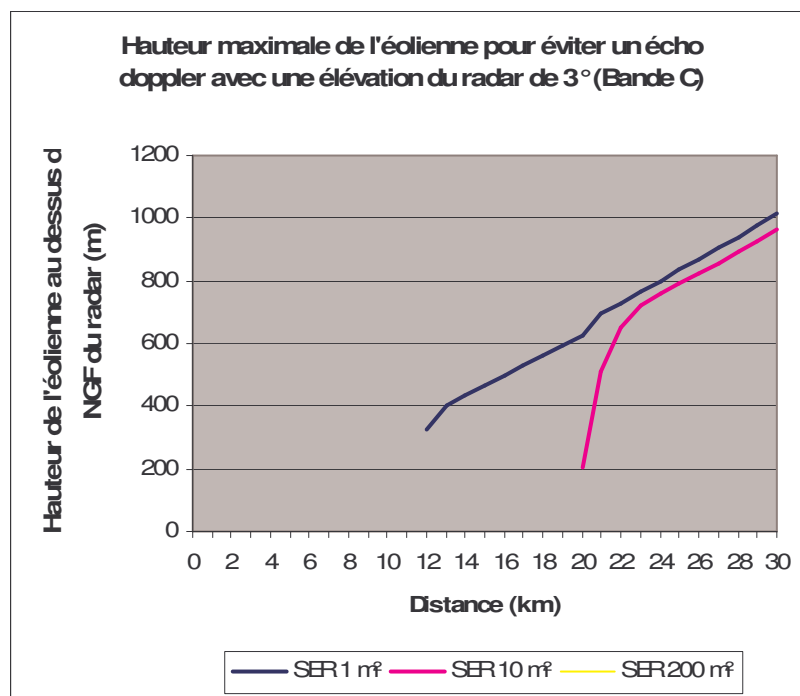


Figure 4-6

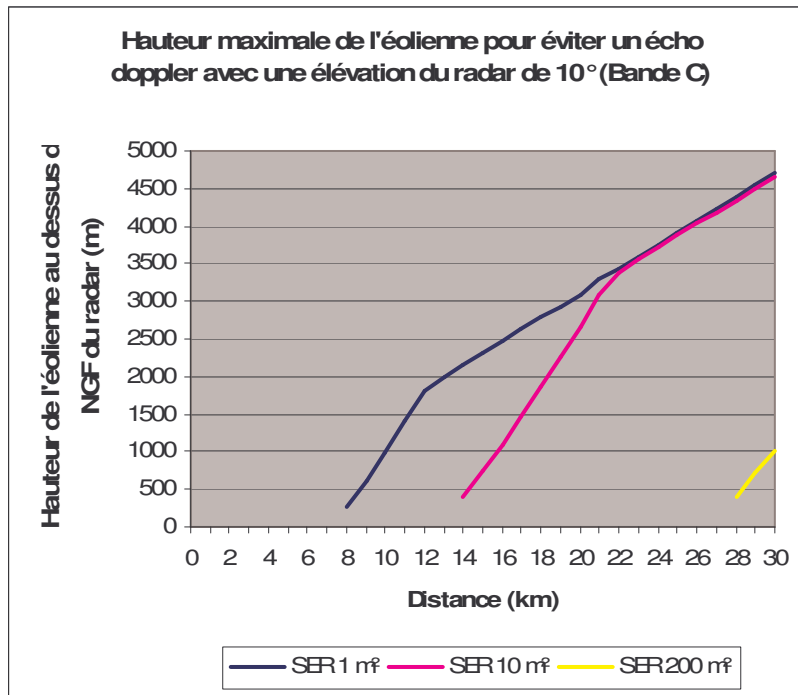


Figure 4-7

2 Cas des radars Bande S

De façon similaire, les figures 4-8 et 4-9 ci-dessous donnent les résultats de simulations pour les radars en Bande S.

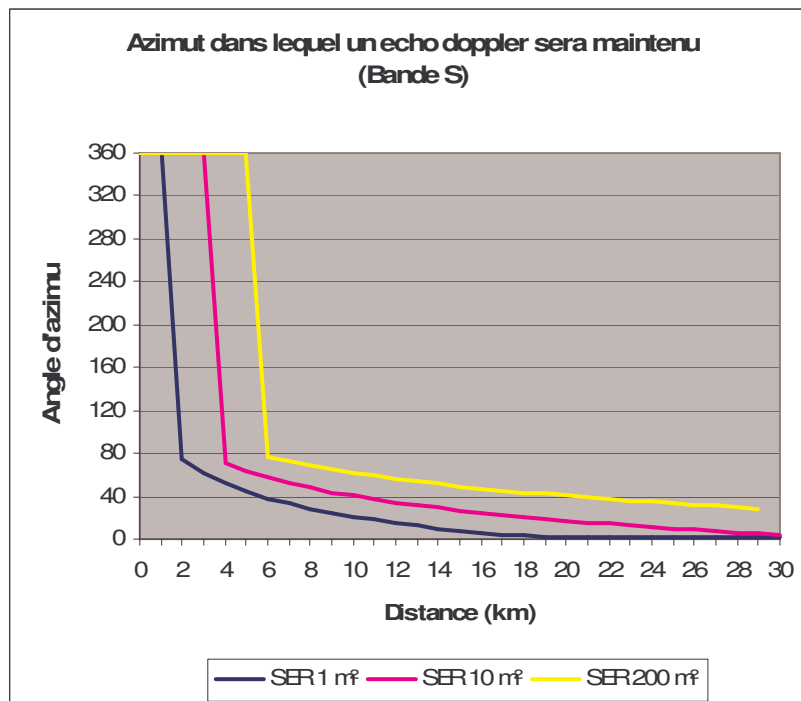


Figure 4-8

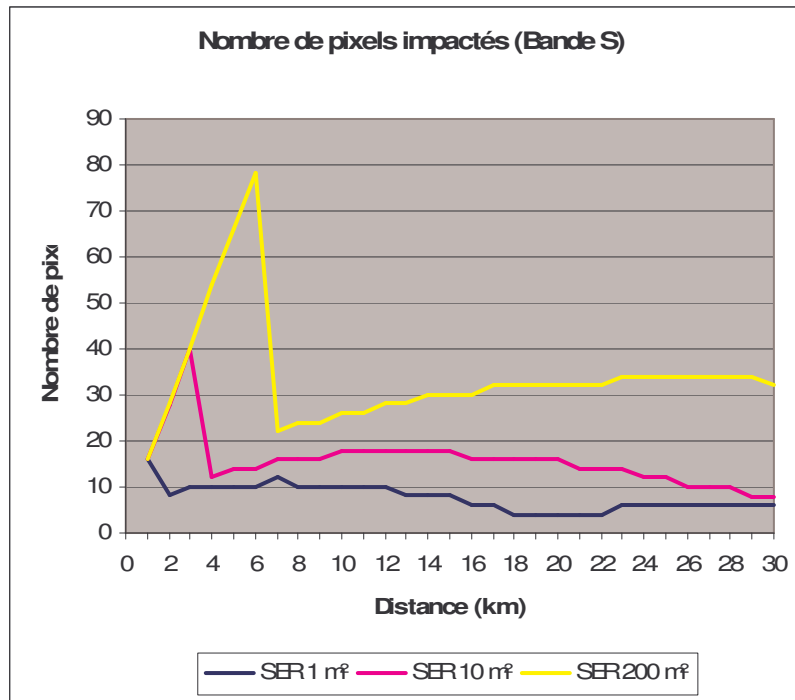


Figure 4-9

Compte-tenu à la fois des puissances supérieures des radars et de l'atténuation « espace libre » inférieure en bande S, il apparaît que les résultats sont encore plus pessimistes qu'en bande C, puisque dans le cas d'éoliennes présentant des SER doppler de 1, 10 et 200 m², l'impact sur le traitement doppler sera présent sur l'ensemble des azimuts pour une éolienne située jusqu'à, respectivement, 1, 3 et 6 km, la situation restant critique au delà avec des azimuts impactés bien au dessus de 10° jusqu'à 30 km.

Enfin, l'augmentation de l'élévation du radar jusqu'à 3° ou 10° est totalement ou quasiment inopérante jusqu'à 30 km, pour des valeurs de SER doppler de 10 et 200 m², mais permet un dégagement au delà de 12 km pour une SER Doppler de 1 m², comme le montre la figure 4-10 pour une élévation de 10°.

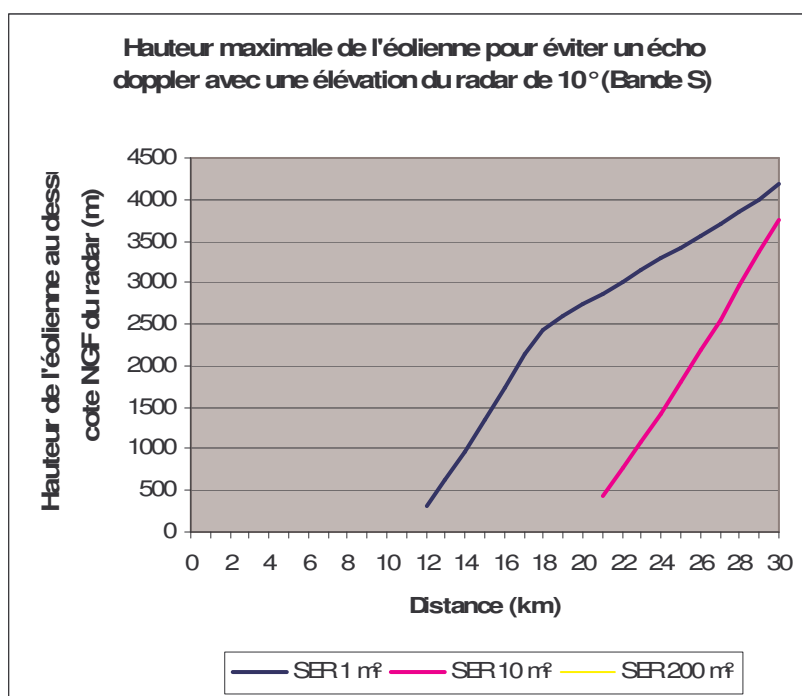


Figure 4-10

3 Situation agrégée

Les résultats de simulations ci-dessus montrent l'impact d'une éolienne sur les radars météorologiques.

Les hypothèses d'agrégation émises pour le cas des échos fixes en annexe 3 restent valides et entraîneront que la surface impactée par un champ d'éolienne sera très supérieure à celle produite par une éolienne.

En particulier, si les éoliennes ne sont pas suffisamment espacées (cas N°1), les signaux de détection de chacune des éoliennes vont s'agréger en puissance au niveau du récepteur du radar, et l'on peut estimer que les distances pour lesquelles tous les azimuts sont impactés augmenteront, dans des proportions similaires à la différence entre les différents cas de SER doppler de 1, 10 et 200 m² sur les figures des § 1 et 2 ci-dessus.

A l'inverse, si les éoliennes sont espacées (cas N°2), les signaux de détection de chacune des éoliennes ne s'agrégeront pratiquement pas mais le parc éolien présentera alors une suite d'échos doppler dont les impacts respectifs s'agrégeront de façon géographique augmentant les azimuts dans lesquels l'écho Doppler sera maintenu et le nombre de pixels impactés.

Là encore, cette agrégation dépend totalement de la configuration du parc éolien, mais on peut estimer, en première approche et pour le cas N°2, que le nombre de pixels impactés sera augmenté de la surface du parc éolien (en km²).

Contrairement à l'impact « échos fixes » pour lequel certaines mesures en mode dégradé permettent de s'affranchir, dans une certaine mesure, de l'effet des éoliennes, il ne semble pas se dégager de solution correspondante pour l'impact doppler.

Par contre, on peut estimer que le cas N°1 ci-dessus pour lequel les éoliennes sont resserrées est préférable afin de limiter autant que faire se peut la zone géographique impactées par un parc éolien. De plus, dans ce cas, il serait préférable d'aligner les éoliennes dans l'axe du radar afin de limiter les radiales impactées.

Pour information, la figure 4-11 ci-dessous présente la situation possible autour du radar météorologique d'Abbeville, prenant en compte les parcs éoliens déjà existants ou en projet, et représentant l'ensemble des zones dans lesquelles les mesures Doppler seraient erronées.

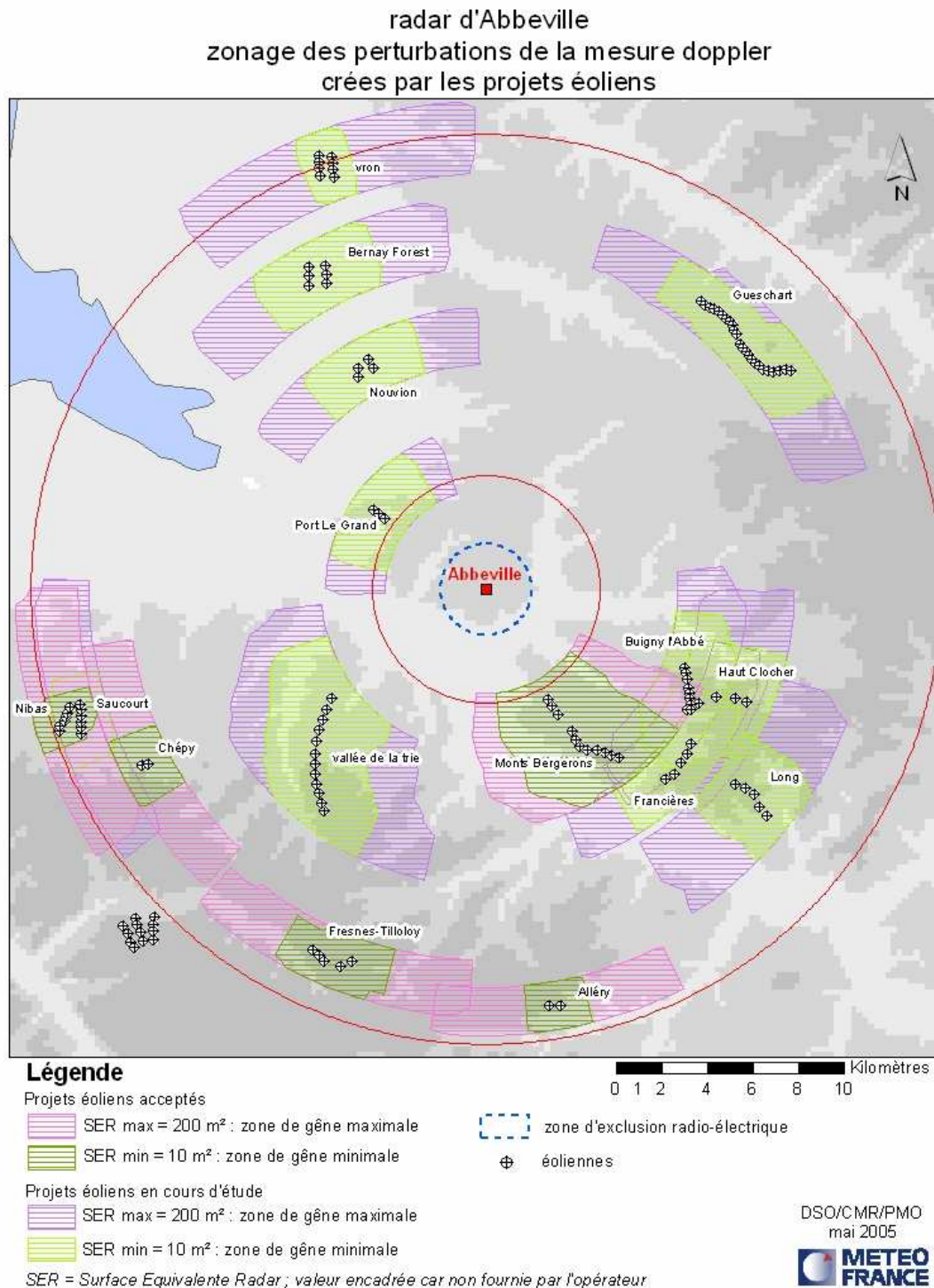


Figure 4-11

En fonction des niveaux de SER doppler des éoliennes, l'analyse ci-dessus montre clairement que l'impact des éoliennes sur le fonctionnement « Doppler » des radars est très important, en particulier à des distances inférieures à 10 km en deçà desquelles l'ensemble des données seront erronées.

Bien évidemment, à l'instar des échos fixes, cet impact n'interviendra qu'en cas de visibilité directe entre le radar et le parc éolien, mais dans ce cas, on peut difficilement penser que le relief permettra d'atténuer de façon importante cet impact. En effet, les échos doppler sont produits par les pales des éoliennes qui en sont les points les plus hauts et seront donc, en limite de visibilité, toujours détectés par le radar.

Par contre, contrairement à la problématique « échos fixes », aucune mesure spécifique telle qu'une élévation supérieure des radars, ne semble pouvoir améliorer la situation et pouvoir s'affranchir, dans une certaine mesure, des échos Doppler produits par les éoliennes.

Afin de régler le problème sur le mode « doppler » tant pour le mode de traitement volumique de la vitesse radiale que pour le mode VAD, il semble que, dans un premier temps et en prenant en compte l'effet agrégé, aucune installation de parc éolien ne devrait avoir lieu dans un rayon d'environ 5 km pour les radars en bande C et 10 km pour les radars en bande S.

Au delà, pour les radars en bande C, une distance de « coordination » de 20 km semble nécessaire alors que pour les radars en bande S, une distance de 30 km serait nécessaire, sachant que 30 km est environ la distance maximale de détection Doppler des radars en état de ciel clair (hors précipitations).

Cette « coordination » permettra au cas par cas, en fonction des caractéristiques des parcs éoliens considérés, à Météo France d'évaluer en détail d'une part les niveaux d'échos Doppler escomptés, d'estimer leur gêne opérationnelle potentielle et, le cas échéant, de trouver des solutions raisonnables assurant, dans des zones non critiques, un impact minimal sur les radars.