



*Rapport réalisé en 2002
par l'Agence Nationale des Fréquences
à la demande du ministre chargé de l'Industrie*

Perturbation de la réception des ondes radioélectriques par les éoliennes

SOMMAIRE

<u>1. INTRODUCTION</u>	2
<u>2. PERTURBATIONS GENEREES PAR LES EOLIENNES</u>	2
<u>2.1 Nature des perturbations</u>	2
<u>2.2 Services radioélectriques potentiellement affectés</u>	4
<u>2.3 Détermination des distances de brouillage</u>	5
<u>2.4 Solutions palliatives</u>	7
<u>3. SITUATION EN FRANCE</u>	8
<u>3.1 Dispositions réglementaires applicables</u>	8
<u>3.2 Les efforts de prévention</u>	9
<u>3.3 Cas de brouillage constatés</u>	10
<u>4. EXPERIENCES INTERNATIONALES</u>	11
<u>5. RECOMMANDATIONS</u>	12
<u>6. BIBLIOGRAPHIE</u>	13
 <u>ANNEXE 1 : Méthode de détermination des zones de perturbation de la réception TV autour des éoliennes</u>	 14
 <u>ANNEXE 2 : Distance de brouillage pour les systèmes utilisant des modulations à enveloppe constante</u>	 20
 <u>ANNEXE 3 : Liste des sociétés ayant adressé un dossier à l'ANFR</u>	 21

1. INTRODUCTION

L'Agence Nationale des Fréquences, en réponse à une demande du ministre chargé de l'Industrie, dresse dans ce rapport un état des lieux sur la perturbation de la réception hertzienne par les éoliennes.

Ces risques de perturbation par les éoliennes ont été identifiés depuis de nombreuses années et ont donné lieu à de nombreux travaux théoriques en Europe, complétés par des campagnes de mesure. Le premier objectif de ce rapport est de résumer ces travaux antérieurs et de permettre une quantification du risque réel de brouillage.

C'est en 1998 que l'Agence a été pour la première fois saisie d'une demande concernant l'implantation d'éoliennes. Cette première demande et le premier cas de brouillage constaté en Bretagne, ont incité l'Agence à développer une procédure d'information visant à permettre aux affectataires concernés d'identifier les risques en amont des projets. Cette expérience de l'Agence et les leçons que l'on peut en tirer sont exposées dans ce rapport.

Dans sa demande, le secrétariat d'État à l'Industrie soulignait à la fois le développement sans précédent des éoliennes qu'impliquait l'objectif de satisfaire en 2010 une part de 21 % de la consommation électrique à partir de sources d'énergie renouvelable et le fait que de nombreux autres pays européens ont déjà mis en œuvre une telle politique et ont donc certainement été confrontés à la question de la protection de la réception radioélectrique. Nos partenaires européens nous ont fourni des informations, plutôt rassurantes, sur leur expérience en matière de brouillage par les éoliennes.

Les conclusions de ce rapport sont donc que l'effort de développement de l'énergie éolienne se traduira par un accroissement des risques de brouillage des services radioélectriques, et principalement de la télévision. Toutefois, l'action de l'Agence et un effort partagé entre opérateurs ou affectataires d'une part et gestionnaires d'éoliennes d'autre part devraient permettre de prévoir et de limiter l'impact de tels brouillages. À cette fin, l'Agence s'est fixé un plan de travail et formule plusieurs recommandations.

2. PERTURBATIONS GENEREES PAR LES EOLIENNES

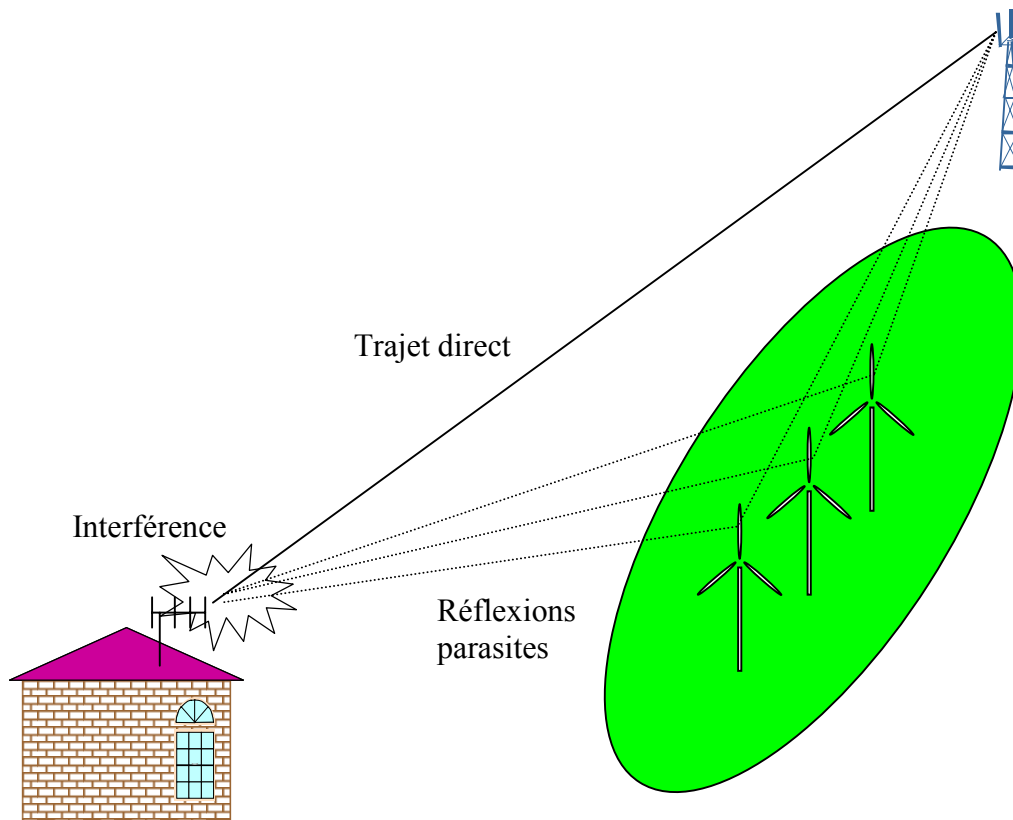
2.1 Nature des perturbations

Contrairement aux cas classiques de brouillage que l'on connaît dans le monde des radiocommunications, les perturbations que peuvent provoquer les éoliennes ne proviennent pas directement de signaux brouilleurs que ces éoliennes auraient la capacité d'émettre. En effet, les émissions qui pourraient être générées par la turbine ne semblent jamais avoir causé d'inquiétudes particulières ([9]) et sont, en tout état de cause, couverts par les normes de Compatibilité Electro-Magnétique (CEM) et la directive CEM.

Les perturbations dues aux éoliennes proviennent de leur capacité à réfléchir et diffracter les ondes électromagnétiques. Le rayon réfléchi ou diffracté va se combiner avec le trajet direct allant de l'émetteur vers le récepteur et potentiellement créer une interférence destructive, c'est-à-dire une altération du signal utile (voir Figure 1). C'est un phénomène assez général qui peut se produire aussi dans le cas de la présence d'un immeuble ou d'un hangar de grande taille, notamment lorsque des métaux sont utilisés dans la construction du bâtiment. Dans le cas des éoliennes, il existe deux facteurs aggravants :

- Les éoliennes sont, par nature, installées dans des zones dégagées et sur des pylônes élevés. Leurs pales représentent une surface importante et contiennent souvent des éléments conducteurs, ce qui accroît leur capacité à réfléchir les ondes radioélectriques.
- Les pales des éoliennes, en tournant, vont générer une variation en amplitude du signal brouilleur. La plupart des récepteurs ont alors plus de difficultés à discriminer le signal brouilleur du signal utile ; l'impact subjectif du brouillage est alors accentué avec des images fantômes sur un poste de télévision par exemple. À noter qu'en plus de cette modulation d'amplitude, la rotation des pales crée aussi, par effet doppler, une modulation de la phase du signal.

Figure 1 : Perturbation de la réception TV par un champ d'éolienne



L'explication du mécanisme de brouillage est amplement détaillée dans la littérature. On le trouve notamment dans [4] et [6].

Le cas des basses fréquences a été analysé en détail dans le rapport [6]. Dans cette gamme de fréquences, ce ne sont pas seulement les pales qui ont un effet diffractant mais l'ensemble de la structure de l'éolienne qui peut être assimilée à un dipôle. En-dessous d'une certaine fréquence de résonance correspondant à une longueur d'onde de quatre fois la hauteur du pylône (3 MHz pour un pylône de 25 m, 0.75 MHz pour un pylône de 100 m), la perturbation provoquée par l'éolienne peut être négligée.

Les fréquences du signal modulant parasite vont s'étaler entre la fréquence fondamentale de rotation des pales (nombre de pales \times vitesse angulaire de rotation) jusqu'à environ une vingtaine de fois cette fréquence fondamentale.

2.2 Services radioélectriques potentiellement affectés

Les services les plus sensibles aux perturbations provoquées par les éoliennes sont donc ceux utilisant des modulations d'amplitude, ce qui est notamment le cas de la radiodiffusion TV analogique, bien que la présence du signal réfléchi et l'effet doppler puissent avoir un impact sur la réception de tout système radioélectrique, indépendamment de sa modulation.

De nombreux services en basse fréquence utilisent aussi des modulations d'amplitude. En revanche, les services mobiles (réseaux privés ou cellulaires) ou la radiodiffusion FM sont, par nature, mieux adaptés à des environnements multi-trajets et utilisent des modulations à enveloppe constante. Les systèmes numériques de radiodiffusion (DVB-T, T-DAB, système DRM développé par Thomson) utilisant la technologie OFDM sont eux aussi conçus pour être robustes aux brouillages liés aux trajets multiples, bien qu'à strictement parler il ne s'agisse pas d'une modulation à enveloppe constante.

Les différents rapports cités dans la bibliographie mettent très clairement l'accent sur les risques liés à la réception de la télévision analogique :

- [2] part de l'hypothèse que c'est la TV analogique pour laquelle les éoliennes présentent un risque de brouillage sérieux.
- [4], en plus de la réception TV, attire l'attention sur le besoin d'étudier l'impact éventuel sur les liaisons hertziennes et sur les systèmes d'atterrissage des avions (ILS).
- [6] conclut que seule la réception TV peut subir des brouillages significatifs.
- [9] conclut qu'un centre de réception radiomaritime à 1.7 km d'un champ d'éoliennes, un téléport satellite à 1.4 km, et les stations de base GSM environnantes ne seront pas brouillés alors que des études supplémentaires sont requises pour vérifier l'absence d'effet sur la réception TV.

On se concentrera donc, pour la partie technique du rapport, sur l'effet des éoliennes sur la réception TV, sachant qu'il existe des mécanismes réglementaires éprouvés (§3.1 et 3.2) pour traiter le cas des grands centres de réception HF qui bénéficient de servitudes de protection contre les brouillages. Le cas des stations de radiogoniométrie de l'Agence sera aussi examiné.

Des études complémentaires seraient aussi utiles concernant le cas de la télévision numérique de terre (TNT) bien que, comme mentionné précédemment, le risque de brouillage soit certainement plus faible que dans le cas de la télévision analogique.

2.3 Détermination des distances de brouillage

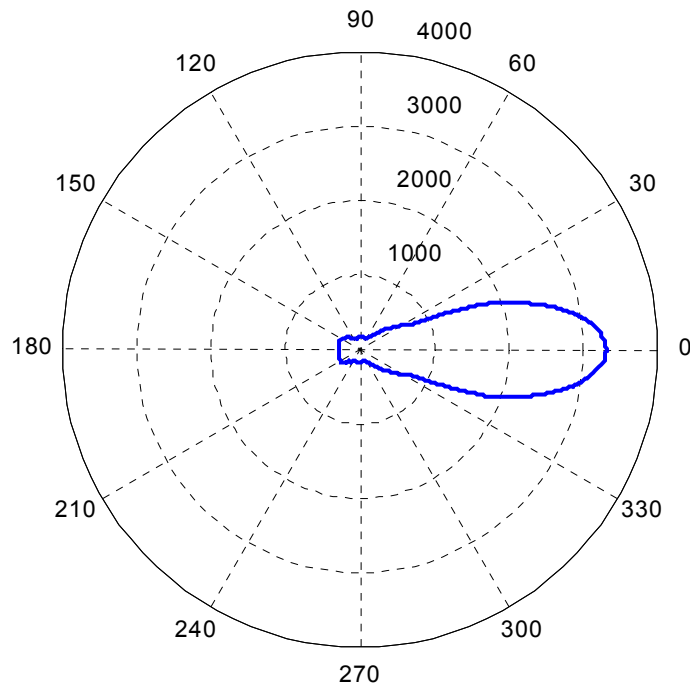
Le risque de brouillage par les éoliennes ayant été identifié depuis le début des années 80, plusieurs travaux ont eu pour objectif de définir les zones autour du champ d'éoliennes dans lesquelles il y avait un risque de brouillage. Dans le cas de la radiodiffusion TV analogique, la méthode pour tracer ces zones a été définie par une recommandation ([1]) de l'Union Internationale des Radiocommunications ; cette dernière reprenait des recherches de l'Union Européenne de Radiodiffusion (UER,[5]).

Cette méthode s'est révélée pertinente, comme l'attestent les résultats de mesures menées au Danemark ([8]) et les compléments théoriques apportés au Portugal ([2]). Les résultats danois attestent que la recommandation UIT-R tend à surestimer les distances de brouillage d'environ 10 dB (soit un facteur 3).

La difficulté d'application de cette méthodologie réside dans la connaissance des paramètres pertinents de l'éolienne. Ainsi, la méthode nécessite de connaître la largeur et la surface de chaque pale, alors que les informations mises à disposition par les constructeurs se limitent généralement à la surface de balayage des pales et à leur longueur qui déterminent les caractéristiques mécaniques et électriques de l'éolienne.

Toutefois, cette méthodologie pourrait être simplement reprise dans un cadre français pour évaluer les risques de brouillage des éoliennes sur la TV analogique. L'annexe 1 de ce rapport a été développée dans ce but à partir de la recommandation UIT-R, en y ajoutant des résultats quantitatifs afin de fixer les ordres de grandeur. Par exemple, la zone de brouillage pour un émetteur lointain et une occultation du trajet direct de 10 dB vers le récepteur TV (comparé au trajet vers l'éolienne) est tracée sur la Figure 2. Sur cette figure, l'émetteur utile se trouve dans la direction 180 °.

Figure 2 : exemple de zone de brouillage (distance en m)



Ces résultats démontrent qu'il y a une direction privilégiée du brouillage correspondant à l'alignement du récepteur, de l'éolienne et de l'émetteur utile (facteur de réflexion maximal en direction du récepteur et gain de l'antenne de réception maximal en direction de l'éolienne). La largeur de ce « lobe » principal, fonction de la largeur de la pale, est d'environ +/- 35° dans notre exemple, et la distance de brouillage peut atteindre plusieurs kilomètres (plus de 10 km dans le cas d'une occultation de 20 dB). En dehors de ce lobe, la zone de brouillage « diffus » reste limitée à moins d'un kilomètre en l'absence d'occultation et peut atteindre quelques kilomètres en cas d'occultation importante.

Dans le cas du brouillage de récepteurs de systèmes utilisant des modulations à enveloppe constante, [9] utilise une règle empirique en considérant que les distances maximales de brouillage peuvent atteindre, au pire, trois fois la largeur de la première zone de Fresnel. Une illustration de cette règle est donnée en annexe 2 mais il convient de rester prudent quant à son application en raison du manque de données théoriques et de résultats de mesures la justifiant.

Par ailleurs, l'impact des différentes caractéristiques de l'éolienne sur le niveau de perturbation se déduit des explications données plus haut sur le mécanisme de brouillage et les méthodes de détermination des zones de brouillage potentiel ([1],[4]) :

- La surface de la pale accroît l'amplitude du signal réfléchi.
- Le matériau utilisé peut aussi avoir un effet important sur le coefficient de réflexion (les matériaux métalliques sont plus réfléchissants que certains matériaux composites comme la fibre de verre)

- La longueur de la pale, ou plutôt le rapport de sa longueur à la longueur d'onde du signal, détermine la largeur de la zone de diffusion avant pour laquelle le risque de brouillage est le plus important.
- La vitesse de rotation détermine directement la fréquence du signal modulant en amplitude et de l'effet doppler.
- L'accroissement du nombre de pales permet de réduire le taux de modulation en amplitude mais augmente la fréquence maximale du signal modulant.
- La hauteur du pylône détermine la fréquence minimale de résonance de la structure.
- Toute modification minime de la forme des pales et de leur inclinaison a un effet immédiat (pour les fréquences suffisamment élevées) sur le niveau du signal réfléchi dans une direction donnée, dans une enveloppe déterminée comme celles de l'annexe 1.

Les effets d'une unique éolienne ont été relativement bien étudiés ; *a contrario*, l'interférence agrégée résultante d'un champ d'éoliennes n'a pas véritablement fait l'objet d'étude. Le rapport [7] propose une loi empirique évaluant la puissance du signal réfléchi à la moitié de la somme en puissance du signal maximal réfléchi par N éoliennes (soit un facteur de $5\log_{10}(N)$), soit 10 dB pour 100 éoliennes, ce qui correspond à un accroissement d'un facteur 3 des distances de brouillage.

2.4 Solutions palliatives

De nombreuses solutions techniques permettent de prévenir les perturbations éventuelles, notamment dans le cas de la réception TV :

- Les champs d'éoliennes doivent être déployés dans des zones peu habitées.
- Le site éolien doit être choisi pour éviter l'alignement avec une zone de mauvaise réception, en prenant en compte l'évaluation des zones de brouillage décrite dans la section précédente.
- On doit utiliser des matériaux composites moins réfléchissants, tels la fibre de verre.

Après déploiement, il devient beaucoup plus difficile de réduire les brouillages. On peut améliorer les conditions de réception de la manière suivante :

- Réorienter l'antenne pour fournir une meilleure discrimination entre champ utile et champ réfléchi par l'éolienne s'il n'y a pas alignement complet avec l'émetteur et l'éolienne.
- Utiliser une antenne plus performante, afin d'améliorer le pouvoir discriminant de l'antenne s'il n'y a pas alignement complet avec l'émetteur et l'éolienne.
- Accroître la hauteur de l'antenne pour assurer une meilleure visibilité de l'émetteur.

Dans le cas où le brouillage persisterait, les seules solutions envisageables sont d'installer un réémetteur TV ou, plus radicalement, d'utiliser un autre mode de réception de la TV (satellite par exemple). Ces deux solutions ont un coût non négligeable. Dans le cas du réémetteur, il faut ajouter au coût de l'émetteur et de son installation, l'intervention nécessaire chez les usagers pour réorienter l'antenne de réception. On a aussi noté, en France et en Allemagne,

qu'une proposition d'installation gratuite d'une parabole de réception satellite aux usagers brouillés augmentait fortement le nombre de plaintes, les usagers souhaitant profiter de l'opportunité offerte !

La question se pose alors de la responsabilité du brouillage et de la répartition du coût des mesures nécessaires pour le faire cesser.

3. SITUATION EN FRANCE

3.1 Dispositions réglementaires applicables

a) dispositions préventives

Certaines stations radioélectriques particulières bénéficient de servitudes, établies par décret pris après avis de l'ANFR. Ce sont essentiellement des stations de la Défense et de l'Aviation civile ainsi que des stations de France Télécom avant son changement de statut :

* servitudes de protection des centres radioélectriques d'émission et de réception contre les obstacles (articles L 54 à L 56 et R 21 à R 26 du code des P et T)

Ces servitudes consistent en une limitation de la hauteur des obstacles dans des zones définies autour des centres d'émission ou de réception et sur le parcours des faisceaux hertziens.

Il est notamment interdit, dans une zone pouvant aller jusqu'à 5 000 mètres autour de la station, de créer des obstacles fixes ou mobiles dont la partie la plus haute excède une cote fixée par le décret approuvant le plan de servitude et publié au *Journal officiel*.

Par ailleurs, si ces servitudes, lors de leur établissement, entraînent la suppression ou la modification de bâtiments constituant des immeubles par nature, une expropriation pour cause d'utilité publique a lieu, si un accord amiable n'est pas trouvé.

Dans les autres cas, une indemnité peut être versée si un dommage est causé par la modification de l'état antérieur des lieux.

Cependant la question se pose de la qualification en tant qu' « immeubles par nature » des éoliennes et donc de leur soumission à cette procédure d'expropriation et d'indemnisation.

* servitudes de protection des centres de réceptions radioélectriques contre les perturbations électromagnétiques (articles L 57 à L 62 et R 27 à R 32 du code des P et T)

Ces servitudes sont destinées à protéger la réception radioélectrique des centres.

Les servitudes électromagnétiques dans une zone concernée, imposées aux propriétaires ou usagers d'installations électriques sont fixées par décret ; celui-ci détermine des zones dites « de garde » ou « de protection radioélectriques ».

Si un dommage est causé par l'établissement de la servitude aux propriétés ou aux ouvrages, une indemnité est versée par le ministère bénéficiaire de la servitude.

Cependant les éoliennes (les pales) ne sont pas des installations électriques visées par ces articles. Seuls peuvent être concernés le moteur ou les turbines.

Par ailleurs, si l'on se réfère au décret n° 92-587 du 26 juin 1992 modifié, seuls sont soumis à la CEM les appareils électriques ou électroniques, ainsi que les équipements ou composants contenant de tels systèmes.

b) dispositions curatives

Pénales : L'article L 39-1 du code des Postes et Télécommunications punit pénalement le fait de perturber les émissions hertziennes d'un service autorisé en utilisant une fréquence, un équipement ou une installation radioélectrique dans des conditions non conformes, non réglementaires ou sans autorisation.

Les cas des éoliennes n'est pas couvert par cette disposition.

Code de la construction et de l'habitation : l'article L 112-12 de ce code précise les mesures à apporter en cas de gêne à la réception de la radiodiffusion ou de la télévision causée par une construction.

Si l'installation existe, un dispositif de réception ou de réémission est installé d'office sous le contrôle du CSA (avec indemnisation éventuelle de la part du propriétaire).

Si l'installation est en cours d'édification, le constructeur est tenu de faire réaliser à ses frais (sous le contrôle de TDF) une installation de réception ou de réémission. Cette réalisation peut, en cas de carence du propriétaire, être réalisée après saisine du président du tribunal de grande instance.

3.2 Les efforts de prévention

Les acteurs de projets éoliens sont depuis longtemps attentifs, en France, aux risques d'interférences avec les transmissions hertziennes. Dès octobre 1998, l'Agence a été convié 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.

À 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'Agence communique en retour, avec copie au(x) titulaire(s) de la (des) station(s) protégée(s) et systématiquement à TDF, la liste des servitudes des communes concernées et les coordonnées des gestionnaires de servitudes. Il appartient alors au cabinet de rentrer en contact avec les gestionnaires pour approfondir l'étude.

Cette façon de procéder a été validée lors d'une séance plénière de la COMSIS (Commission Consultative des Sites et Servitudes) à l'ANFR.

Pour information, le nombre de consultations relatives à de tels projets est donné ci-dessous :

	2000	2001	2002 (au 1 ^{er} avril)
Nombre de consultations relatives à des projets éoliens	63	258	130

La liste des sociétés ayant adressé un dossier à la COMSIS est fourni en annexe 3.

3.3 Cas de brouillage constatés

Au début de l'année 2002, l'ANFR a entrepris des opérations de mesure en vue d'évaluer l'impact de sites éoliens sur les services de radiocommunication et de radiodiffusion ainsi que sur ses propres stations de radiogoniométrie.

Les parc éoliens étudiés étaient constitués respectivement de trois éoliennes sur la commune de Lastours (11) et de cinq sur la commune de Plouarzel (29). La configuration de chaque éolienne était analogue : elles étaient constituées de trois pales de vingt mètres et elles étaient toutes situées sur des points hauts.

Les mesures effectuées consistaient à mesurer d'abord le bruit radioélectrique de la bande V/UHF (30 MHz - 3 GHz) et à analyser ensuite les conséquences d'une installation d'éoliennes sur la réception de la télévision et le résultat de mesure de nos installations de radiogoniométrie.

Les mesures de bruit n'ont pas détecté d'anomalies, toutes les émissions détectées ont été identifiées et il n'a pas été observé de raies « parasites » dont les génératrices des éoliennes seraient à l'origine. Ce point semble valider la nature des perturbations énoncées au paragraphe 2 : ces dernières sont dues à la capacité des éoliennes à réfléchir et à diffracter une onde électromagnétique et non à une problématique de compatibilité électromagnétique.

Les images télévisuelles perturbées présentaient les défauts suivants : pertes de la chrominance (« image en noir et blanc ») et de la luminance (défaut dominant). À noter que les problèmes apparaissaient uniquement en zone de diffusion « avant » des éoliennes (Cf. Figure 2). Ces phénomènes n'étaient par ailleurs pas permanents mais présentaient un synchronisme avec le passage de la pale devant le fût de l'éolienne. Par ailleurs, les constats effectués par l'ANFR ne reflètent pas une dégradation prononcée de la qualité de l'image. Alors que nos équipements professionnels détectaient un léger défaut de qualité, celui-ci n'était pas réellement perçu par les particuliers. Cependant, ces derniers ont indiqué que leur contestation était motivée par un niveau de dégradation beaucoup plus important qui était atteint lorsque les éoliennes étaient orientées différemment.

Concernant le cas de brouillages en Bretagne, la solution palliative choisie a été de modifier le mode de réception, et d'utiliser ainsi une réception « satellite ». En effet, l'intensité des vents dans la région ne semblait pas permettre l'utilisation d'antennes plus performantes ou un accroissement de leur hauteur

Concernant les tests de susceptibilité de nos équipements de radiogoniométrie sur le site de Lastours, l'instabilité constatée du résultat de mesure a pu être atténuée en augmentant le temps d'intégration des équipements, solution immédiate et sans aucune conséquence financière. Cependant, on peut s'inquiéter de l'efficacité à long terme de cette solution, la modification de ce paramètre étant à effectuer en fonction de la configuration du site éolien (orientation des pales). Une telle solution est incompatible avec l'évolution en cours consistant à automatiser le fonctionnement des stations de radiogoniométrie.

4. EXPERIENCES INTERNATIONALES

L'utilisation massive des éoliennes dans plusieurs pays européens depuis plus de quinze ans a conduit l'Agence à rassembler des informations sur leur expérience en ce qui concerne le brouillage des services radioélectriques. Des contributions ont été présentées dans le courant de l'année 2000, alors que les premières demandes d'intervention de l'Agence nous étaient parvenues, au sein du groupe de travail *Spectrum Engineering* de l'ECC. Des investigations supplémentaires en direction des équipes s'occupant de contrôle du spectre sont en cours, via l'équipe projet FM 22 de l'ECC.

Les réponses obtenues de la part des administrations britannique, allemande, danoise et portugaise ont permis d'une part de rassembler une bibliographie conséquente, d'autre part de mieux appréhender les difficultés qu'elles ont rencontrées et les mesures prises pour faire face à ces difficultés.

Royaume-Uni

La *Radiocommunication Agency* (RA) a mené de nombreuses études au début des années 90 afin de répondre aux inquiétudes soulevées par le développement des éoliennes. Aucune procédure formelle ne s'applique actuellement aux éoliennes si ce n'est de vérifier que celles-ci ne font pas directement obstacle aux liaisons hertziennes. Toutefois, les projets de création de champs d'éoliennes sont généralement envoyés pour information à la RA. D'après ses indications, il pourrait y avoir une action en justice envers un opérateur d'éoliennes de la part de quiconque pourrait démontrer une perte de couverture liée au déploiement d'éoliennes, mais une telle action ne pourrait pas se faire au titre des lois sur les télécommunications.

Allemagne

Fin 1998, 28 cas de plaintes au total avaient été recensées par le Reg TP concernant la radiodiffusion TV, dont 15 concernant le même site (Kassel). Un seul cas ne concernait pas la radiodiffusion, mais aucun détail n'a été donné sur le service affecté.

Danemark

Le *Department of Trade and Industry* danois a lancé en 1991 une étude [8] sur l'effet des éoliennes sur la réception TV. Une méthode d'estimation des risques potentiels de brouillage a été mise au point ; elle requiert la participation active des gestionnaires d'éoliennes et des opérateurs de radiodiffusion. D'après un représentant de l'administration danoise, ces

questions sont maintenant directement traitées entre les opérateurs et aucun problème n'est remonté récemment vers l'administration.

Il y a quelques années, un cas de brouillage de faisceaux hertziens numérique (8 Mbit/s) à 7 GHz a été enregistré au Danemark.

Portugal

L'Agence portugaise (ICP) fait état d'inquiétudes similaires à celles exprimées en France. Sur le plan technique, des études ont été menées en collaboration avec une université afin de mettre en œuvre la recommandation UIT-R BO.605. Sur le plan juridique, l'ICP n'est pas sûr d'avoir un fondement juridique pour pouvoir intervenir sur une installation non-radioélectrique.

5. RECOMMANDATIONS

L'évaluation théorique des risques de brouillage permet de conclure qu'il y a effectivement des risques de perturbation *a priori* non négligeables de la réception radioélectrique, principalement TV, par les éoliennes. Toutefois, compte tenu d'un déploiement qui se fait essentiellement en zone rurale, le nombre de cas de brouillage effectif devrait rester limité. Cela est confirmé par le nombre réduit de cas constatés jusqu'à aujourd'hui en France et par l'expérience de nos partenaires européens.

Dans le cadre d'une politique de prévention des brouillages, il conviendrait donc d'assurer l'identification des cas problématiques en renforçant la procédure actuelle mise en place par la COMSIS. À ce titre, plusieurs recommandations peuvent être formulées afin d'améliorer la prévention et le traitement des risques de perturbations de la réception radioélectrique par les éoliennes :

- Obligation pour les gestionnaires d'éoliennes de faire parvenir à l'Agence leurs projets de déploiement,
- Clarification du fondement juridique permettant à la COMSIS d'intervenir sur ces déploiements,
- Utilisation par les opérateurs de radiodiffusion, tel TDF, de méthodes de prévision des brouillages comme celle décrite en annexe 1,
- Clarification des responsabilités, notamment financières, en cas de brouillage prévu ou constaté.

Par ailleurs, l'Agence Nationale des Fréquences a prévu de poursuivre ses efforts visant à évaluer l'impact des nouvelles configurations des parcs éoliens et également à mieux appréhender les risques de brouillage.

À cette fin, une étude constituée de deux volets est en cours de définition. Le premier volet évaluera les impacts des récentes évolutions technologiques (apparition d'éoliennes en fibres de carbone de grandes dimensions) et des projets de constitution de grands ensembles éoliens. Le deuxième s'appliquera à valider les études sur des sites sélectionnés (par la réalisation de mesures comparatives). Cela permettra notamment à l'ANFR d'améliorer ses méthodes de

mesure, et à plus long terme, d'établir des mesures de référence avant implantation de grosses fermes d'éoliennes.

6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Recommandation UIT-R BO.805, « Evaluation des dégradations de la réception de la télévision dues aux éoliennes, 1992
- [2] TV interference from Wind Turbines, actes de la conférence des télécommunications organisée par l'université de Coïmbra, 2001
- [3] Interference to television reception from large wind turbines, BBC engineering research report, 1983
- [4] Recommended practices for wind turbine testing and evaluation – Part 5 “electromagnetic interference”, Executive committee of the international energy agency programme for R&D on wind energy conversion systems, 1986
- [5] Report of ad-hoc group EBU R2/WRO, 1990
- [6] Environmental aspects of wind turbine generators – Part 2 electromagnetic interference, National Wind Turbine Centre, 1984
- [7] Effects of Wind Turbine on UHF Television Reception, Field tests in Denmark, Television Service Planning Note, BBC, 1991.
- [8] Final report on the effect of wind turbines on UHF television reception : field test in Denmark, B.Sorenson, Perma Energy Ltd, 1991.
- [9] EMC aspects associated with the proposed Klipheuvel wind farm, TSI (Afrique du Sud), 2001

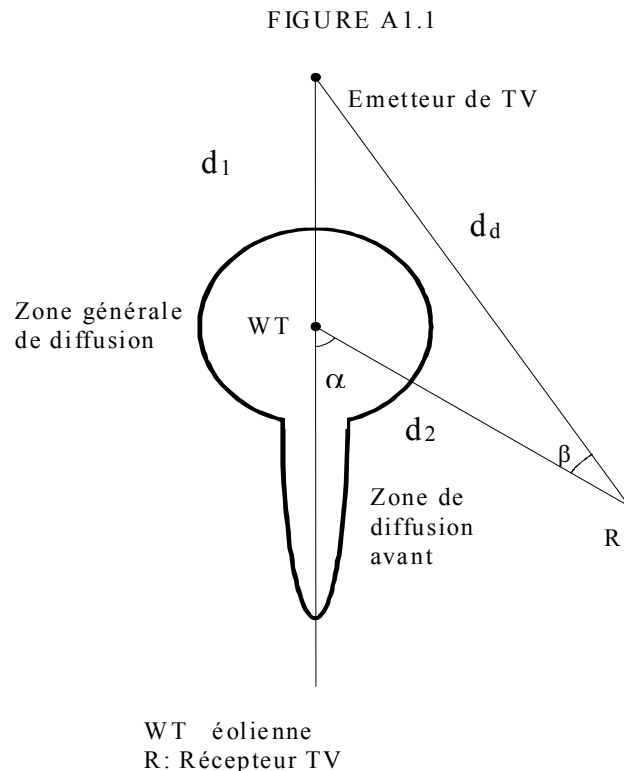
ANNEXE 1 : Méthode de détermination des zones de perturbation de la réception TV autour des éoliennes

Cette annexe est basée sur le contenu de la Recommandation B0.805 de l'Union Internationale des Radiocommunications et d'autres recommandations pertinentes.

Le contour de la zone de perturbation peut être défini comme celui pour lequel le rapport entre le niveau de puissance du signal direct et du signal diffracté au niveau du récepteur TV est égal au rapport de protection (voir figure A1.1), soit :

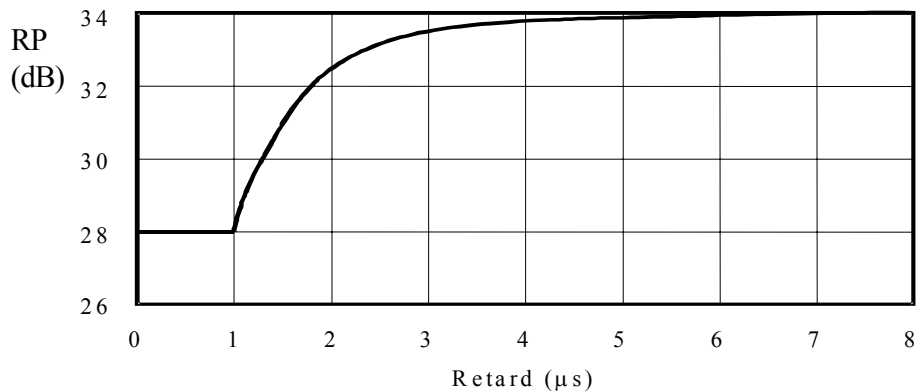
$$RP = \frac{E_{direct}}{E_{diffracté}} \cdot G_{rel}(\beta)$$

E_{direct} étant le niveau de champ du trajet direct entre l'émetteur et le récepteur, $E_{diffracté}$ étant la valeur du champ diffracté par l'éolienne au niveau du récepteur TV et G_{rel} étant la fonction donnant la discrimination de l'antenne de TV dans la direction de l'éolienne (β : angle entre la direction de l'éolienne et celle de l'émetteur TV, au niveau du récepteur TV).



Le rapport de protection est fonction du décalage temporel entre le signal direct et le signal diffracté. Les valeurs pour ce rapport de protection sont données dans recommandation UIT-R BT.805 (voir figure A1.2).

FIGURE A1.2



Ce retard τ peut-être directement calculé de la façon suivante :

$$\tau(\mu s) = \frac{1}{300} * (d_1 + d_2 - d) = \frac{1}{300} * (d_1 \cdot (1 + \frac{\sin(|\alpha - \beta|)}{\sin(|\beta|)}) - d)$$

d : distance émetteur TV – Récepteur TV (m)

d_1 : distance émetteur TV – Eolienne (m)

d_2 : distance Eolienne – Récepteur TV (m)

α : angle entre l'axe de diffusion avant et le récepteur TV, au niveau de l'éolienne

β : angle entre la direction de l'éolienne et celle de l'émetteur TV, au niveau du récepteur TV

Par ailleurs, le niveau de champ E_{direct} doit être de préférence évalué en utilisant un modèle numérique de terrain. En pratique, on doit s'attendre à ce que les perturbations liées aux éoliennes se produisent lorsque l'émetteur n'est pas en visibilité directe du récepteur TV.

Le champ $E_{diffracté}$ peut être évalué à partir du champ reçu au niveau de l'éolienne $E_{éolienne}$. Dans la direction de réflexion maximale, c'est à dire la zone de diffusion avant, et en supposant l'éolienne et le récepteur TV en visibilité, on a :

$$E_{diff\ max} = E_{éolienne} \cdot \frac{A}{\lambda d_2}$$

A (m²) : surface d'une pale

λ (m) : longueur d'onde

À noter que, dans un calcul pire cas, la surface totale des pales (surface d'une pale x nombre de pales) devrait être prise en compte. Toutefois, pour une éolienne « typique » à trois pales, il n'y aura qu'une seule pale présentant un lobe principal de diffraction dans la direction de brouillage (pale verticale). En revanche, avec deux pales, la prise en compte de la surface cumulée des deux pales serait recommandée puisque celles-ci se retrouvent simultanément en position verticale.

À partir de la théorie de la diffraction, la Recommandation B0.805 définit l'amplitude relative dans la zone de diffusion avant de la façon suivante :

$$E_{\text{diffracté}} = E_{\text{diff max}} \cdot \max\left(\frac{1}{3}, \frac{\sin\left(\pi \cdot \frac{W}{\lambda} \sin(\alpha)\right)}{\pi \cdot \frac{W}{\lambda} \sin(\alpha)}\right) \quad \text{pour } \alpha < 90^\circ$$

W (m) : largeur de la pale

La signification du facteur 1/3 est qu'en dessous d'une certaine diminution du coefficient de réflexion (10 dB), les phénomènes de diffraction vont considérablement dépendre de la forme exacte de la pale et l'on ne peut donc évaluer que l'enveloppe approximative d'une « zone générale de diffusion ».

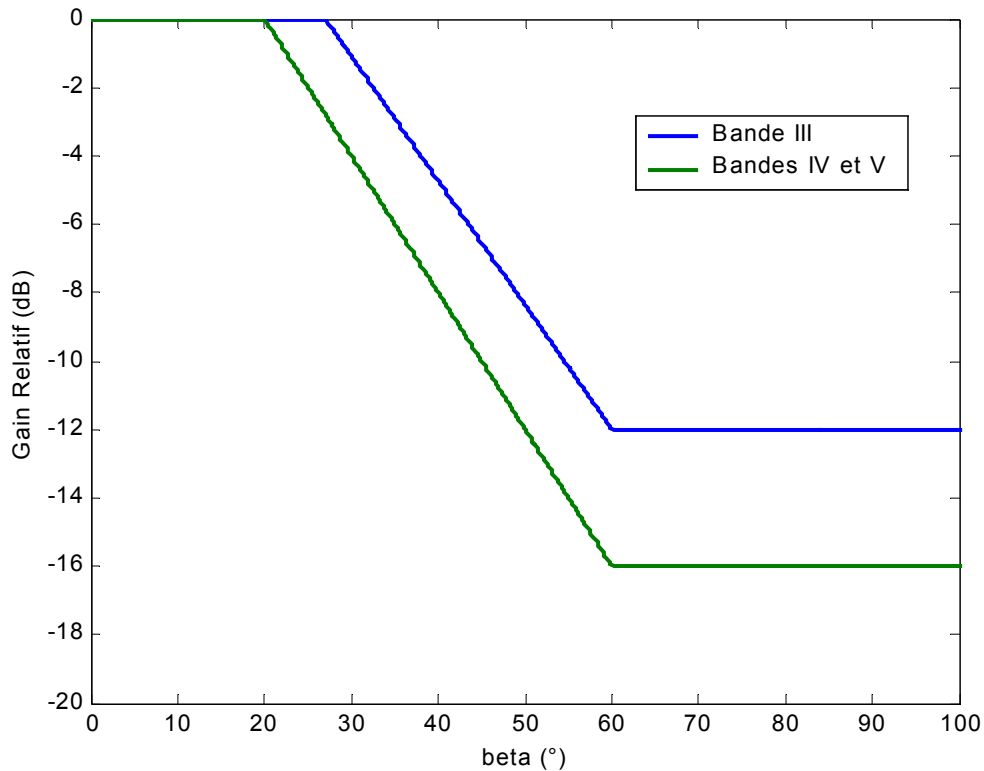
Dans la zone de diffusion arrière, on prendra aussi $E_{\text{diffracté}} = E_{\text{diffmax}} / 3$.

À noter aussi que le terme utilisé dans cette recommandation pour définir W est la « largeur » de la pale, ce qui prête à confusion, la diffraction se faisant alternativement avec la pale dans le sens de la largeur et de la longueur. Cependant, la largeur du lobe principal de la figure de diffraction étant inversement proportionnelle à la largeur de l'élément diffractant, on peut utiliser comme « pire cas » la largeur de la pale.

Le dernier paramètre nécessaire pour évaluer le rapport de protection est donc la discrimination apportée par l'antenne, $G(\beta)$. La Recommandation UIT-R BT.419 fournit les diagrammes correspondants en figure A1.3.

Figure A1.3

Discrimination de l'antenne de réception TV



Afin de préciser les ordres de grandeur, des calculs ont été réalisés avec, comme hypothèse simplificatrice, un émetteur de TV très éloigné de l'éolienne.

Comme indiqué au paragraphe § 2.3 Détermination des distances de brouillage), il est difficile de trouver des valeurs caractéristiques de la largeur des pales et de leur surface. A partir de données disponibles sur Internet, on peut toutefois considéré comme typique pour de grandes éoliennes à 3 pales, une largeur de 1 m et une surface de 25 m². La figure A1.4 donne la zone de brouillage (distance en mètres) dans ce cas typique à la fréquence de 500 MHz et sans occultation du trajet direct comparé au trajet émetteur - éolienne. Les figures A1.5 et A1.6 donnent ces résultats en cas d'occultation supplémentaire du trajet direct d'un facteur respectivement de 10 dB et 20 dB.

Figure A1.4
Zone de brouillage – pas d'affaiblissement supplémentaire du trajet direct

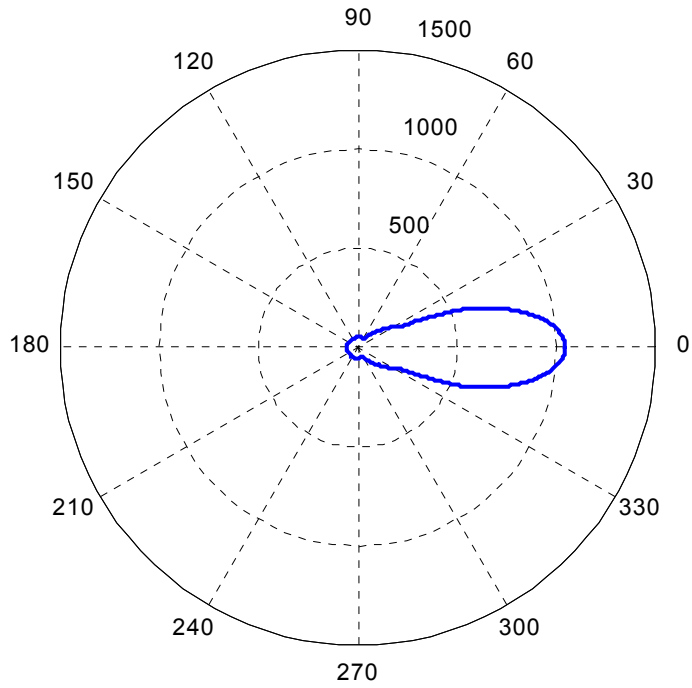


Figure A1.5
Zone de brouillage – Trajet direct affaibli de 10 dB

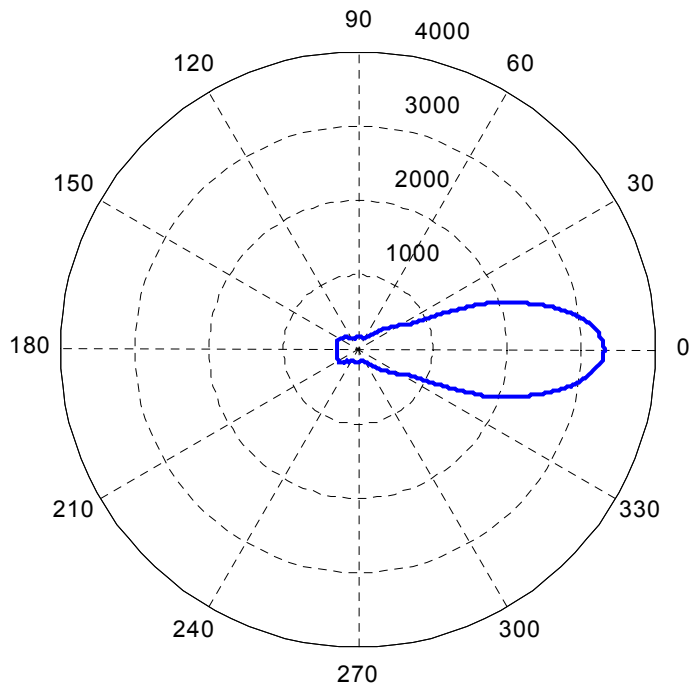
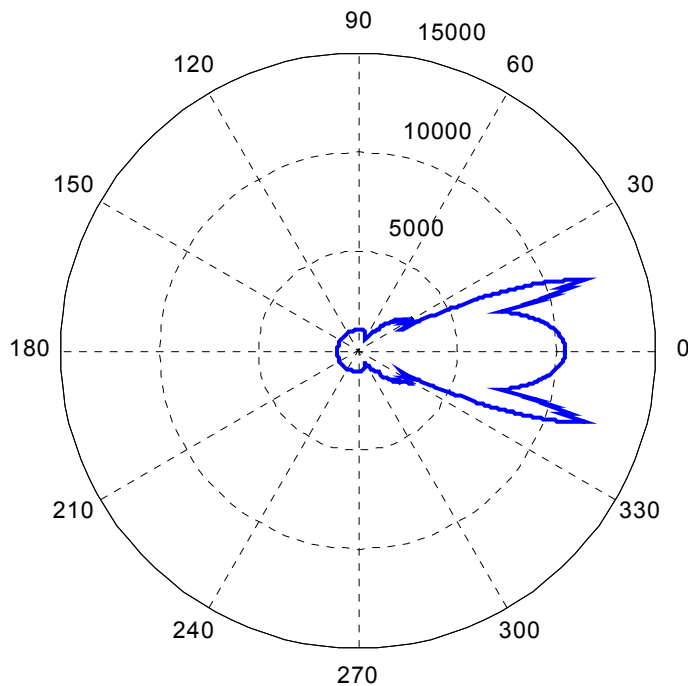


Figure A1.6
Zone de brouillage – Trajet direct affaibli de 20 dB



Les variations rapide des distances de brouillage pour certaines direction (voir notamment le cas de l'atténuation de 20 dB) sont liés à l'effet de l'augmentation rapide du rapport de protection entre 1 et 3 μ s de retard.

On peut constater sur ces résultats l'importance de la zone de diffusion avant, qui peut s'étendre de 1 à 12 km suivant l'occultation du trajet principal et la démonstration que, s'il n'y a pas occultation du trajet direct, la zone de diffusion avant ne dépassera pas 1 km (la recommandation ITU-R B0.805 donne une valeur pratique de 500 m). Quant à la zone générale de diffusion (en dehors des $\pm 36^\circ$ de l'axe avant), elle ne devient significative que dans le cas d'une forte atténuation du signal direct.

Enfin, on peut rappeler que les résultats de mesure danois montrent que les distances maximales de brouillage sont surestimées d'un facteur 3 environ lorsqu'on utilise la méthode ci-dessus.

ANNEXE 2 : Distance de brouillage pour les systèmes utilisant des modulations à enveloppe constante

Le rapport [9] suggère qu'il ne peut pas y avoir de brouillage si l'éolienne se trouve éloigné du chemin entre l'émetteur et le récepteur d'une distance supérieure à 3 fois la largeur de la première zone de Fresnel.

$$d_{pert} = 3 \cdot \sqrt{\lambda \cdot d_{em} \left(1 - \frac{d_{em}}{d_{liaison}}\right)}$$

d_{pert} : distance de perturbation

d_{em} : distance de l'éolienne à l'émetteur

$d_{liaison}$: distance totale de la liaison

La largeur de la première zone de Fresnel est maximale au milieu de la distance de la liaison. On a donc alors une distance maximale de perturbation :

$$d_{max} = 3 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{4} \cdot d_{liaison}}$$

Quelques valeurs sont données dans le tableau suivant à titre d'exemple (distances en km) :

	1 km	3 km	10 km	30 km
100 MHz	2.60	4.50	8.22	14.23
1 GHz	0.82	1.42	2.60	4.50
10 GHz	0.26	0.45	0.82	1.42

Ces résultats indiquent une possibilité de brouillage pour certains faisceaux hertziens (liaison longue, fréquence faible entre 1 et 3 GHz), lorsque l'éolienne est dans l'axe du faisceau et pour certains réseaux PMR à basse fréquence et grande couverture.

ANNEXE 3 : Liste des sociétés ayant adressé un dossier à l'ANFR

ABIES
AL TECH
ALBATROS ENERGIE
AXILYA
Bastien CHENIVESSE
BRL Ingénierie
Bureau Etudes JACQUEL
C.A.U.E.
CERESA
Claire TINCELIN-SALOMON
ENERGIE DU MIDI
ENERGIE DU VENT
ENERGIE EOLIENNE France
Entreprise de pose de canalisation
EOLERES
Erik SEVESTRE
Fermes Eoliennes de France
FORCLUM
GAMESA ENERGIE France
HORIZONS
Jean Robert COSTES
KVH PROJEKT GMBH
M. VIDAL
Maurice GILARD
OSTWIND
OUEST AMENAGEMENT
P&T TECHNOLOGIE
P. MAT
QUENEA
RECHERCHE ET DEVELOPPEMENTS EOLIENS
S3E
SARL JEAN SOLVAIN
SOLLDEV
T. BLOTTEAU
UMWELT
UMWELTKONTOR
VALOREM
VENTURA SA
VSB ENERGIES