



Agence Nationale des Fréquences

Commission Consultative de la Compatibilité Electromagnétique

Rapport CCE5 n°2

**PERTURBATIONS DU FONCTIONNEMENT DES RADARS
FIXES DE L'AVIATION CIVILE ET DE LA DEFENSE PAR
LES EOLIENNES**

**Version 1 approuvée le 02/05/2006 par la Commission Consultative de la Compatibilité
Electromagnétique**

Résumé

La multiplication des projets éoliens appelle une attention particulière sur l'impact de ces structures vis-à-vis des radars de l'Aviation civile et de la Défense.

C'est l'objet de ce rapport qui propose successivement :

- une présentation des matériels radar de l'Aviation civile et de la Défense actuellement déployés par la DSNA (Direction des Services de la Navigation Aérienne) et la Défense.
- une évaluation des perturbations générées par les obstacles éoliens sur ces équipements.
- une présentation de la logique des traitements radar pouvant être mis en œuvre pour éliminer ces perturbations, ainsi qu'une caractérisation des configurations ou ces traitements pourraient être surpassés.
- une logique de protection contre ces configurations à risque.

Table des matières

Introduction	4
1 Les radars	4
1.1 Radars primaires	4
1.2 Radars secondaires	5
2 Obstacles éoliens, perturbations attendues	6
2.1 Structure physique d'un obstacle éolien	6
2.2 Perturbations à l'exploitation radar primaire	6
2.2.1 Masque :	6
2.2.2 Fausses alarmes (faux échos) :	7
2.3 Perturbations à l'exploitation radar secondaire	8
2.3.1 Masque	8
2.3.2 Fausses alarmes : trajets multiples	8
3 Situation technique : efficacité des traitements et configurations radar	9
3.1 Masque	9
3.2 Fausse alarme	9
3.2.1 Traitements radar primaire :	9
3.2.2 Traitements radar secondaire :	10
4 Situation réglementaire actuelle	10
5 Recommandations	11
5.1 Recommandations pour les radars de l'Aviation Civile	11
5.1.1 Radar primaire	11
5.1.2 Radar secondaire	11
5.2 Recommandations pour les radars fixes de la Défense	12
5.3 Orientations futures	13
5.4 Situation internationale	13
6 Bibliographie :	13
7 Sigles et acronymes :	13
8 Annexes	14
ANNEXE 1 : SYNTHÈSE CONCERNANT LES RADARS DE L'AVIATION CIVILE ...	15
ANNEXE 2 : CRITÈRES DÉFENSE	17
ANNEXE 3 : COUVERTURE RADAR PRIMAIRES	19
ANNEXE 4 : COUVERTURE RADAR SECONDAIRES	20
ANNEXE 5 : SER ÉOLIENNES	21
ANNEXE 6 : DIFFRACTION EFFET DE MASQUE	23
ANNEXE 7 : DIFFRACTION EFFET SUR MESURE MONOPULSE	24
ANNEXE 8 : TRAJET MULTIPLE	27
ANNEXE 9 : SITUATION INTERNATIONALE	28

Introduction

Dans la suite de ce rapport le terme radar s'applique tant aux radars de l'Aviation civile que de la Défense.

Les radars sont naturellement exploités dans un environnement chargé en obstacles et signaux parasites. Dans ces conditions, des configurations et des traitements spécifiques permettent un fonctionnement et des performances garantissant les besoins opérationnels. Cependant, certaines zones critiques, zones proches et très proches, dans lesquelles des obstacles peuvent saturer les capacités d'adaptation des traitements doivent rester dégagées. Ce sont des zones de **protection** définies pour chaque équipement et opposables à toute installation nouvelle dans l'environnement du radar.

Aujourd'hui, les obstacles éoliens par la particularité de leurs réponses aux émissions radar amènent à examiner à nouveau ces mesures de protection.

Ces mesures sont envisagées ici dans le très court terme sous forme d'un complément de définition des conditions de protection des radar pour ces obstacles particuliers. Pour le moyen et long terme ces mesures pourraient se poursuivre par des études et des développements de traitements radar spécifiques pour la caractérisation et l'élimination de ces échos. Des recommandations aux constructeurs d'éoliennes sur les matériaux utilisés et les structures pourraient également compléter cette approche.

1 Les radars

On distingue deux types d'exploitations fonctionnellement très différentes : les surveillances non coopérative et coopérative.

La surveillance non coopérative est assurée sans intervention de la cible à sa détection : c'est la propriété de la réflexion d'une onde électromagnétique sur la surface physique de la cible qui est utilisée. La détection se fait par reconnaissance de la présence d'un signal réfléchi, la mesure de distance par mesure du temps de propagation radar – cible – radar, la mesure d'azimut par utilisation d'une antenne directive tournante. Les équipements correspondants sont caractérisés comme « **radars primaires** ».

La surveillance coopérative est assurée grâce à la participation active de la cible à sa détection. La cible est équipée d'un répondeur (ou transpondeur). Ce transpondeur reçoit des interrogations du radar et répond. Les mesures de distance et d'azimut utilisent les mêmes principes qu'en radar primaire. L'originalité de l'exploitation coopérative est que le signal reçu est renseigné en identification ou altitude en fonction de l'interrogation du radar. Les équipements correspondants sont caractérisés comme « **radars secondaires** ».

1.1 Radars primaires

Les radars primaires peuvent être de type deux dimensions (2D) donnant des mesures de distance et d'azimut ou trois dimensions (3D), une mesure complémentaire en angle de site (angle d'élévation dans le plan vertical) est alors disponible.

Pour les radars 2D, l'absence de toute mesure d'angle de site ne permet pas de discrimination en altitude. Ainsi, un avion comme un écho au sol ou un obstacle au sol dans le même azimut et à la même distance seront vus sans distinction.

L'architecture d'une liaison pour un radar primaire est en trajet double : radar – cible – radar et le bilan de puissance en $1/R^4$ correspondant est critique.

1.1.1 Les radars civils

Tous les radars primaires utilisés par l'Aviation Civile sont de type 2D.

Deux bandes de fréquences sont utilisées pour les applications Aviation Civile : bande L (1300 MHz – 23 cm) et bande S (3000 MHz – 10 cm). La polarisation est circulaire pour faciliter le traitement des échos météorologiques.

L'exploitation radar primaire (contrôle d'approche et d'aérodrome) est propres aux grands aéroports : Orly, CdG, Nice, Lyon, Marseille, Toulouse, Bordeaux, Bale, Strasbourg. Une carte de leurs couvertures (60 ou 80 NM) est présentée en annexe 3.

1.1.2 Les radars militaires

Pour remplir ses missions de défense aérienne, de conduite des opérations aériennes, et celles liées à la circulation aérienne militaire ; la Défense dispose de nombreux radars primaires fixes 2D et 3D, et de radars tactiques déployables au besoin.

Les bandes de fréquences utilisées sont, comme pour l'aviation civile, la bande L et la bande S. La bande X (9GHz), pour le contrôle d'approche, et la bande C (5 GHz), pour quelques radars tactiques, sont également utilisées.

En complément de besoins identiques à ceux de l'aviation civile pour le contrôle d'approche, une détection « en route » en Haute et Moyenne Altitude, Basse Altitude et très Basse Altitude ainsi que sur des cibles de faible SER est indispensable.

La plupart de ces radars sont implantés sur des sites « aéronautiques » (bases aériennes ou aéronavales) mais de plus en plus de déploiements extérieurs sont nécessaires, en particulier pour la protection de sites sensibles.

1.2 Radars secondaires

En radar secondaire aussi, l'absence de toute discrimination en angle de site a des conséquences négatives. Il ne peut exister d'échos de sol en surveillance coopérative, cependant tous les paramètres et réglages adaptés à une zone de détection difficile dans un site particulier seront appliqués de fait, sans limitation d'altitude, au trafic de survol.

L'architecture de la liaison est en deux trajets simples, distincts. Le bilan de puissance de chacun est en $1/R^2$.

La séparation en deux liaisons a favorisé le choix de deux fréquences différentes : 1030 Mhz pour la liaison montante, 1090 MHz pour la liaison descendante. La polarisation est verticale. La dernière génération de radars secondaires, dits « Mode S », engage des transactions plus performantes avec les transpondeurs.

Pour l'aviation civile, l'exploitation radar secondaire est utilisée (seule) pour la détection 'En Route'. Elle est associée à l'exploitation radar primaire pour le contrôle d'approche et

d'aérodrome. 20 stations radar secondaire sont déployées en métropole. Une carte de leurs implantations est fournie en annexe 4. La portée est 200 NM, la couverture est vite redondante aux altitudes moyennes.

Pour la Défense, les radars secondaires sont aussi utilisés, en complément des radars primaires, pour la reconnaissance entre avions « amis » et avions « ennemis » (IFF : Identification friend or foe). Ce type de radar ne répond pas au besoin opérationnel de la Défense pour la détection de cibles non coopératives (dans le cadre de la mission de défense aérienne); ce qui explique la nécessité d'un nombre important de radars primaires pour assurer la couverture de l'espace aérien national.

2 Obstacles éoliens, perturbations attendues

2.1 Structure physique d'un obstacle éolien

La structure d'un obstacle éolien est complexe. La caractéristique d'intérêt ici est la capacité et les propriétés à la réflexion des ondes électromagnétiques. C'est le critère qui guide l'analyse ci dessous. La structure est décomposée en mat, nacelle et pales.

Le mat est une structure verticale élevée, de hauteur proche du diamètre du rotor. Les valeurs couramment rencontrées sont supérieures à 90m. La forme, fine, est généralement conique et le diamètre à la base de l'ordre de 5m pour une hauteur de 90m. Les matériaux utilisés (aciers) réfléchissent les OEM.

La nacelle présente des surfaces verticales importantes et d'orientation variable en fonction de la direction du vent. Elle peut être considérée comme fixe, donc sans effet Doppler pendant les quelques dizaines de millisecondes correspondant à l'éclairement de l'antenne radar au cours de sa rotation.

Les pales sont les surfaces mobiles au sens de la détection radar. Les structures classiques sont composées de rotor à 3 pales, en fibres de verre ou de carbone, matériaux bons réflecteurs des OEM. La vitesse de rotation est de 10 à 30 tours/mn, entraînant des vitesses linéaires en bout de pales pouvant atteindre 100 m/s.

Enfin, la configuration classique pour les projets éoliens est celle de « ferme éolienne » correspondant à des implantations multiples.

2.2 Perturbations à l'exploitation radar primaire

2.2.1 Masque :

C'est l'effet classique de **perte de détection** derrière l'obstacle dû au masque physique à la propagation des OEM.

Cet effet est en réalité plus complexe à cause du phénomène de diffraction qui induit une courbure des trajets de propagation sur les bords et autorise une certaine visibilité (dégradée) derrière l'obstacle même. Un exemple est détaillé en annexe, en termes d'atténuation du signal derrière un obstacle fin et unique.

Les conséquences sont celui d'un affaiblissement des signaux en limite du volume masqué, allant jusqu'à la perte complète au centre de ce volume, derrière l'obstacle même. La configuration de l'obstacle (au sol, d'extension en angle de site limitée) confine les difficultés aux altitudes faibles, sauf configurations particulières dues au relief.

Cette situation peut se rencontrer pour tout type d'obstacle, l'originalité est ici la hauteur et la finesse des structures étudiées qui favorisent l'effet de diffraction. La configuration d'obstacles multiples, si elle est compacte, étend le masque à la dimension maximale du groupement vu du radar (extension azimutale).

2.2.2 *Fausses alarmes (faux échos) :*

Plusieurs situations peuvent être à l'origine de la création de faux échos. Il peut s'agir de la réflexion du signal radar incident sur les surfaces de l'obstacle (fixes ou mobiles). C'est alors un écho parasite, image de l'éolienne, que l'on veut pouvoir éliminer.

Il peut s'agir, beaucoup plus rarement, de la réflexion d'un signal à destination ou en provenance d'une cible utile. C'est un «trajet multiple» sur lequel les mesures de distance et d'azimut seront fausses.

La génération de faux échos par **réflexion sur les parties fixes** de la structure (mat, nacelle) est une situation classique d'échos fixes mais ici à très fortes surfaces équivalentes (SER surfaces équivalentes radar de 100 à 1000 m²). Ces échos sont normalement éliminés par mesure de fréquence Doppler nulle.

La difficulté est ici d'un risque de saturation du récepteur qui s'observerait particulièrement en zone proche et/ou avec des gains d'antenne élevés. La saturation aurait pour conséquences :

- 1) Le surassement des traitements de comparaison des échos en amplitude seule, particulièrement les traitements garantissant un taux de fausse alarme constant par asservissement des seuils de détection (TFAC). Donc, la dégradation de la détection.
- 2) L'étalement du spectre, par produits d'intermodulation, faisant apparaître des fréquences Doppler non nulles, donc une caractérisation partielle en écho utile.
- 3) La non linéarité des traitements de compression d'impulsion avec remontées d'échos parasites. Cet effet est limité à la seule impulsion longue (IL) utilisée au delà de 8 à 10 NM.

Toutes ces conséquences affectent les cellules azimut-distances concernées par le ou les obstacles et les cellules adjacentes, tous angles de sites confondus.

La génération de faux échos par **réflexion sur les parties mobiles** de la structure (pales) est l'effet original aux obstacles éoliens. C'est également l'effet le plus conséquent *quand il apparaît*. On cumule ici des surfaces équivalentes fortes et des valeurs de fréquences Doppler caractéristiques de cibles avion.

Il faut cependant observer simultanément une *orientation particulière des pales* vers le radar pour une forte SER, des *vitesses de pale* conséquentes avec une *orientation particulière* du plan de rotation (puisque'il s'agit de ne considérer que les vitesses radiales), *au moment* du passage du faisceau radar. La conjonction de ces phénomènes est peu probable. Cet effet, violent mais rare et bref, est souvent désigné comme « éclair » ou « flash » de pale

La corrélation de ce phénomène sur une même éolienne d'un tour d'antenne à l'autre est peu probable. Mais, dans le cas de champ d'éoliennes, des éoliennes différentes, voisines, peuvent répéter successivement le même comportement d'un tour d'antenne à l'autre.

La conséquence est la formation de faux échos pouvant initier une fausse piste ou alimenter et corrompre une piste existante, ou encore la saturation du récepteur du

radar. Cet effet concerne la zone géographique d'implantation des éoliennes et sa verticale.

La génération de faux échos par **trajets multiples** est plus précisément détaillée dans la partie « exploitation secondaire » avec les mêmes conséquences. Cet effet est beaucoup plus rare en radar primaire car le bilan de puissance est très limité et deux réflexions supplémentaires dégradent quasi irrémédiablement le signal.

La conséquence serait la formation de faux échos dans la direction des obstacles (réception sur lobe principal) à des distances quelconques fonction de la géométrie de la réflexion.

2.3 Perturbations à l'exploitation radar secondaire

2.3.1 *Masque*

Effet de **perte de détection** derrière l'obstacle dû au masque physique à la propagation des OEM. Les effets de masquage et de diffraction sont de même nature que ceux décrits en radar primaire, mais moins brutaux en limite de détection car le bilan de puissance est beaucoup plus favorable.

Là encore les conséquences sont limitées aux altitudes faibles (seul volume masqué) sauf configurations particulières dues au relief. La configuration d'obstacles multiples introduit l'importance de l'extension azimutale du volume masqué.

Effet de **dégradation de la mesure d'azimut par technique monopulse**. Cet effet est original à l'exploitation radar secondaire qui seule utilise ce type de mesures.

L'éclairage d'un obstacle mince déforme les trajets de propagation par diffraction sur les bords, donc la répartition « attendue » des champs sur l'antenne qui détermine les diagrammes. Cette déformation, s'il y a détection, va dégrader la mesure monopulse qui suppose des diagrammes azimut « Somme » et « Différence » très précis, et référencés en espace libre. Cette situation se rencontre sur tout obstacle fin et dégrade la qualité des mesures dès que l'antenne éclaire significativement l'obstacle. Quelques situations représentatives sont données en annexe. Les dégradations observées sont négligeables ($0,068^\circ$) au delà de 5 km pour obstacle unique. Les conséquences de la dégradation de la mesure d'azimut varient selon le mode du radar en fonction du nombre de mesures élémentaires.

2.3.2 *Fausses alarmes : trajets multiples*

Les trajets multiples par réflexions **sur les parties fixes** de l'obstacle peuvent s'établir malgré les pertes car les bilans de puissance sont très favorables, en particulier en zones proches et très proches. Les conséquences sont la génération de faux échos de caractéristiques fonction de la géométrie de la réflexion, qui dans ce cas se présenteraient stables sur plusieurs tours d'antenne successifs.

Les trajets multiples par réflexion **sur les parties mobiles** peuvent s'établir dans des configurations très particulières fonction des positions relatives du plan de rotation des pales, de la position des pales elles mêmes, de l'éclairage du radar. Les conséquences sont de même l'apparition de faux échos. Cependant, ces configurations sont exceptionnelles et leurs répétitions sur la même éolienne d'un tour d'antenne à l'autre peu probables.

3 Situation technique : efficacité des traitements et configurations radar.

Ce paragraphe détaille les dispositions et les traitements susceptibles d'éliminer les conséquences des effets cités sur l'exploitation radar. Certaines configurations resteront difficiles à résoudre et justifieront les contraintes à imposer pour ce type d'obstacles.

3.1 Masque

Les situations de masque résultent d'une configuration géométrique relative du radar et de l'obstacle. Pour la qualité de détection, la situation est identique en exploitations primaire et secondaire. Pour la qualité de mesure d'azimut en limite du volume masqué, l'exploitation secondaire monopulse est plus vulnérable.

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

3.2 Fausse alarme

Les situations de fausse alarme sont soumises aux traitements radar déclinant les fonctions suivantes, avec les limitations associées.

3.2.1 Traitements radar primaire :

Ces traitements sont présentés en distinguant :

- Les traitements du signal qui s'appliquent sur les signaux reçus au cours d'un passage du faisceau radar (dans la récurrence puis sur plusieurs récurrences successives). Ces traitements jouent sur les caractéristiques des signaux : amplitude, fréquence Doppler. Ils délivrent en sortie une information « **plot** ».
- Les traitements de données qui corrélerent les plots correspondants à plusieurs tours d'antenne successifs. Ces traitements jouent sur les caractéristiques de comportement de la cible entre 2 tours d'antenne (4 à 8 secondes). Ce sont des traitements de poursuite qui délivrent en sortie une information « **piste** ».

Traitement du signal

Linéarité : contrôle de la dynamique des récepteurs par paramétrage des gains. Mise en œuvre de lois d'atténuation dites GVT (gain variable dans le temps) qui évite la saturation en zone proche. Cette mesure est efficace sur les échos de sol mais, étant appliquée sans distinction d'angle de site (il n'existe pas de discrimination dans le plan vertical), elle est défavorable aux cibles utiles proches.

Efficacité limitée en cas d'échos fixes forts, qui se trouveraient hors de la dynamique maximale autorisée par les plus fortes valeurs d'atténuation.

Filtrage Doppler : Traitements MTD (Moving Target Detector) codant une batterie de bancs de filtres Doppler, qui tirent le meilleur parti de la résolution en fréquence Doppler disponible. Ces traitements permettent la discrimination échos fixes - échos mobiles et supposent un traitement linéaire.

Clutter map : Carte dynamique d'échos fixes actualisée à chaque tour. Comparaison au niveau de signal reçu. Efficacité limitée en cas d'échos fixes forts.

Traitements TFAC (taux de fausse alarme constants) : calcul de seuils de détection sur plusieurs cellules azimut-distance adjacentes. Protège de remontées d'écho fixe étendu. Efficacité limitée en cas d'échos fixes forts.

Traitements de données

Poursuite : Paramétrage possible de zones à statut particulier : blanking (annulation de tout traitement), non initialisation de pistes, paramétrages spécifiques

Les traitements du signal démontrent une capacité d'adaptation aux perturbations générées par les échos éoliens seulement limitée par des retours de signaux saturants. Eviter ces situations de saturation est finalement la priorité qui garantit la meilleure efficacité.

En cas de fortes surfaces équivalentes telles qu'on les reconnaît pour les obstacles éoliens, cette limitation de bilan de puissance s'obtient en jouant sur les facteurs gain d'antenne (intervenant au carré) et distance.

Des valeurs limites sur ces deux paramètres pour une surface équivalente représentative (1000m²) et garantissant la limite de saturation des récepteurs sont évaluées en annexe 5.

Les traitements de poursuite complètent la protection contre les échos éoliens de caractéristiques trop proches de celles des échos avion (éclaircs de pale). Les cas de corrélation des détections d'un tour d'antenne au suivant, particulièrement caractéristiques des configurations d'implantation multiple, peuvent être résolus par contraintes sur les plots détectés dans la zone géographique d'intérêt (non initialisation piste, inhibition,) permettront de s'affranchir de toute fausse détection.

C'est le sens des recommandations proposées en section 5.

3.2.2 *Traitements radar secondaire* :

Traitements contre les trajets multiples

Une première précaution est de dimensionner les bilans de puissance au plus juste des caractéristiques des trajets simples (gains d'antenne, sensibilité récepteurs, ...).

Ensuite, des traitements basés sur la reconstitution d'une géométrie de réflexion présentent une certaine efficacité. Il s'agit, sur des réponses de même identité susceptibles de correspondre à un même transpondeur, de reconnaître une géométrie de trajets multiples. Il s'ensuit la caractérisation du plan réflecteur origine, puis l'élimination des pistes multiples détectées ultérieurement.

La situation est simplifiée et le paramétrage possible a priori en cas de connaissance d'un plan réflecteur d'influence avérée.

Ces traitements doivent permettre la résolution des réflexions sur les parties fixes des obstacles éoliens.

Les réflexions sur les parties mobiles de probabilité d'occurrence faible, peu susceptibles de perdurer d'un tour d'antenne au suivant, seront en grande partie éliminées par les traitements de poursuite et les exigences d'initialisation piste.

4 Situation réglementaire actuelle

Les traitements radar, on l'a vu, démontrent une certaine efficacité. Cependant, les zones proches et très proches où leurs effets sont limités doivent rester dégagées. C'est le sens des dispositions de protection des radars contre les obstacles, encore désignées par « servitudes ».

Les radars civils actuels en France, sont protégés par exclusion d'obstacles au dessus d'un angle de site de 0,5° de 2 à 5 km du radar. L'origine de cette valeur d'angle de site se trouvant à 2 km, sur le plan horizontal de la source. De 0 à 2 km, la limite de l'exclusion est le plan horizontal de la source voire en dessous en radar secondaire.

Les recommandations OACI dans ce domaine référencées en Annexe 9 sont une exclusion au dessus d'un angle de 1/100 (0,57°) en radar primaire et 1/200 (0,28°) en radar secondaire.

Les radars militaires sont protégés par exclusion d'obstacles dans une zone de 400 m autour du radar et au-dessus d'un angle de site de 1° au-delà de 400 m et jusqu'à 5 km.

Les particularités des obstacles éoliens d'une part, et les contraintes opérationnelles distinctes entre l'Aviation Civile et la Défense d'autre part, amènent à compléter ces dispositions par des recommandations spécifiques.

5 Recommandations

5.1 Recommandations pour les radars de l'Aviation Civile

Deux tableaux de synthèse présentés en annexe 1 reprennent les développements précédents pour les exploitations radar primaire et radar secondaire.

5.1.1 Radar primaire

Logique :

Les éoliennes sont caractérisées par des effets de masques et de SER plus importants que les obstacles rencontrés jusqu'ici.

Il y a nécessité de maîtriser ces effets en complétant les dispositions actuelles de protection par des mesures dites de **coordination** qui engageraient une instruction particulière des projets, hors zone de protection, mais potentiellement perturbateurs par leur taille ou leur localisation.

Les critères appelant coordination :

Risque de masque important (angle de site élevé, dispersion de l'implantation)

Risque de saturation (position en angle de site donc sous gain antenne conséquent, distance)

Risque de dégradation de la détection par nécessité d'appliquer des paramètres durcis pour l'efficacité des traitements de poursuite. Ce risque prend toute son importance s'il concerne des espaces critiques au sens de la Navigation Aérienne (CTR, axes d'approche, procédures).

Concrètement et pour les seuls obstacles éoliens :

- **Pas d'éoliennes à moins de 5 km de tout radar primaire**
- **Coordination au dessus d'un angle de site de 0,5° par rapport au radar de 5 à 20 km (si visibilité).**
- **Coordination pour des regroupements importants¹, en visibilité, à une distance inférieure à 30 km.**

5.1.2 Radar secondaire

Logique :

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

Les éoliennes sont caractérisées par des effets de masques : pertes de détection et dégradation de la mesure d'azimut par technique monopulse (diffraction). Ces effets ont cependant été caractérisés comme significatifs en cas d'implantations multiples. Le risque de fausse alarme par trajets multiples est également identifié. La situation peut être résolue par les algorithmes de reconstitution des réflexions et l'élimination des fausses détections, mais ces traitements peuvent eux mêmes être source de dégradation des performances s'ils s'appliquent sur des volumes de taille importante. Des précautions sont de plus nécessaires en zones critiques. Il y a donc de même nécessité de maîtriser ces effets en complétant les dispositions actuelles de protection par des mesures dites de **coordination** qui engageraient une instruction particulière des projets hors zone de protection mais potentiellement perturbateurs par leur taille ou localisation.

Les critères appelant coordination :

Implantations multiples avec

Risque de masque important (site élevé, dispersion de l'implantation)

Risque de dégradation de la détection par nécessité d'appliquer des paramètres particuliers pour l'efficacité des traitements de poursuite. Ce risque prend toute son importance s'il concerne des espaces critiques au sens de la Navigation Aérienne (CTR, axes d'approche, procédures)

Concrètement et pour les seuls obstacles éoliens :

- **Pas d'éoliennes à moins de 5 km de tout radar secondaire**
- **Coordination pour des regroupements importants², en visibilité, à une distance inférieure à 30 km.**

5.2 Recommandations pour les radars fixes de la Défense

Les radars primaire et secondaire de la Défense étant co-implantés un seul type de recommandations est défini.

Sur un plan technique, la logique et les critères appelant coordination sont similaires à ceux du paragraphe 5.1.

Par contre sur un plan opérationnel, les spécificités des matériels utilisés et les performances requises pour accomplir la mission de Défense nécessitent une approche spécifique.

En particulier, les mesures post-11 septembre se traduisent dans le domaine de la posture permanente de sûreté aérienne (PPS) par des actions de renforcement garantissant la préservation de l'intégrité de l'espace aérien national. Cette mission est assurée grâce à la couverture radar à partir d'équipements fixes de grands centres de détection et de contrôle, et d'équipements mobiles assurant la protection ponctuelle de sites réputés sensibles en raison de leur nature ou du cadre des activités qui y sont menées (ZIT : Zones d'interdiction temporaire, dispositifs particuliers de sûreté...). Une détection optimale est donc impérative, notamment en très basse altitude et pour des cibles de faible SER.

Des études théoriques et expérimentales, il ressort qu'il est extrêmement difficile de donner une règle générale car les phénomènes observés dépendent d'un grand nombre de paramètres

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

(type de radars, type d'éoliennes, relief, vitesse et direction du vent...). Il faut noter en particulier les deux paramètres majeurs que sont la distance d'implantation et la position des éoliennes dans le tilt radar.

Compte tenu des éléments ci-dessus, l'approche suivante est préconisée pour les obstacles éoliens :

- **pas d'éolienne à moins de 5 km de tout radar ou à l'intérieur de toute ZIT**
- **coordination pour toute implantation d'éoliennes de 5 à 30 km sur la base de critères spécifiques (types de radars, ZIT,...)**

L'annexe 2 contient le détail de ces recommandations et de ces critères.

5.3 Orientations futures

Des actions sont à envisager pour favoriser les coordinations mentionnées ci-dessus telles que :

- prise en compte d'études ou expérimentations complémentaires;
- traitements radar spécifiques des échos éoliens (par reconnaissance d'une signature particulière) ;
- recommandations aux constructeurs éoliens (formes des mats et des nacelles, matériaux).

5.4 Situation internationale

Une synthèse des dispositions proposées par les pays Européens particulièrement concernés par ces problèmes se trouve en annexe 9 sous forme de tableau.

La référence aux pentes 1/100 et 1/200 respectivement pour les équipements primaires et secondaires est la plus fréquente.

6 Bibliographie :

BWEA (British Wind Energy Association): Wind Energy and Aviation Interests. Interim guidelines. Site Internet www.bwea.com

QinetiQ : Wind Farms Impact on Radar Aviation Interests (W/14/00614/00/REP)

Thalès : Impact des champs d'éoliennes sur les radars primaires et secondaires (pour DSNA-12/2005)

CCE5 : Rapport n°1 Perturbations du fonctionnement des radars météorologiques par les éoliennes. (2005)

7 Sigles et acronymes :

AIP : Aeronautical Information Publications

BA : Basses Altitudes

CTR : Control Traffic Region (Zone de control)

DSNA : Direction des Services de la Navigation Aérienne

GVT : Gain Variable dans le Temps

HMA : Hautes et Moyennes Altitudes
IFF : Identification friend or foe
IL : Impulsion Longue
MTD : Moving Target Detector
OACI : Organisation Internationale de l'Aviation Civile
OEM : Onde Electro-Magnétique
PPS : Posture Permanente de Sûreté
SER : Surface Equivalente Radar
TFAC : Taux de Fausse Alarme Constant
ZIT : Zones d'Interdiction Temporaire

8 Annexes

- 1 Synthèse concernant les radars de l'Aviation Civile
- 2 Critères pour la coordination avec les radars Défense
- 3 Couverture radar primaire civile en France
- 4 Implantations radar secondaires civils en France
- 5 SER (surface équivalente radar) éoliennes
- 6 Diffraction : effet de masque
- 7 Diffraction : effet sur la mesure monopulse
- 8 Géométrie d'un trajet multiple
- 9 Situation internationale

ANNEXE 1 : SYNTHÈSE CONCERNANT LES RADARS DE L'AVIATION CIVILE

Radar primaire

Effet	Détails de l'effet	Conséquences	Solutions	Mise en œuvre Recommandations
Masque	-Obstacle à la propagation -Effet de diffraction	Défauts de détection dans le volume masqué	Limitation du volume masqué	- Contrainte en extension site (site max), contrainte en extension azimutale (largeur – distance). - Maîtrise des larges regroupements - Recommandation d'alignement des obstacles si implantation multiple
Fausse alarme	Réflexion sur les parties fixes (mat, nacelle) : SER fortes Doppler nul	-Plot caractérisé fixe mais , sensibilité des traitements à la saturation. -A risque, tout le volume à la verticale de la zone géographique d'intérêt	Garantir les conditions d'un traitement linéaire pour une élimination efficace par filtrage Doppler	-Non saturation (dynamique récepteur, paramétrage de la détection). -Contrainte en distance pour limiter les puissances.
	Réflexion sur les parties mobiles (pales) : SER fortes Doppler avion Effet éclair de pale, mais d'occurrences rares	-Plot caractérisé mobile. -A risque, tout le volume à la verticale de la zone géographique d'intérêt	-Action sur le traitement de données : phénomène non corrélé d'un tour antenne à l'autre pour une éolienne particulière. -Mais phénomène apparaissant d'une éolienne à l'autre si implantation multiple.	-Pas de réglage des traitements du signal radar possible (signal trop proche des signaux utiles) -Paramétrage du traitement de données (filtrage plots, non initialisation piste, inhibition, ...). Maîtrise des larges regroupements. Attention aux zones critiques d'évolution ATC
	Trajets multiples. Rares cause bilan de puissance	Faux plots dans la direction de l'obstacle	-Ajustement du bilan de puissance aux trajets directs.	- GVT

Radar secondaire

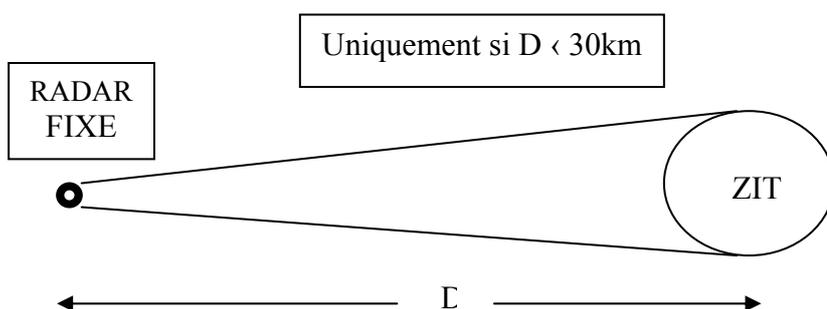
Effet	Détails de l'effet	Conséquences	Solutions	Mise en œuvre Recommandations
Masque	-Obstacle à la propagation -Effet de diffraction	Défaut de détection dans le volume masqué	Limitation du volume masqué	<ul style="list-style-type: none"> - Contrainte en extension site (site max), contrainte en extension azimutale (largeur – distance). -Maîtrise des larges regroupements - Contrainte d'alignement des obstacles si implantation multiple
	Déformation des trajets de propagation (diffraction) : dégrade la mesure d'azimut par monopulse Mode S plus sensible à la mesure monopulse	Dégradation de la mesure d'azimut de XPDR en limite du volume masqué. Effet négligeable au delà de 5 km pour obstacle unique (servitudes actuelles)		
Fausse alarme	Trajets multiples par réflexions	Faux plots dans la direction de l'obstacle	Algorithmes existants pour l'élimination des trajets multiples	Paramétrage des traitements trajet multiples. Maîtrise des larges regroupements. Attention aux zones critiques d'évolutions ATC

ANNEXE 2 : CRITERES DEFENSE

1. Zones d'interdiction temporaires (ZIT)

pas d'éoliennes dans la zone définie par :

- la surface de la ZIT définie dans l'AIP France (Aeronautical Information Publications)
- le cône joignant le radar fixe à la ZIT si ce radar est à moins de 30 km de la ZIT (de façon à éviter un trou de détection à proximité de la ZIT)



2. Par type de radar

a. Radar HMA (Haute et Moyenne Altitude)

Exclusion entre 5 et 20 km au-dessus d'un angle de site de $0,5^\circ$ ayant pour origine le foyer de l'antenne, coordination au-dessous; puis entre 20 et 30 km accord au-dessous de cet angle et coordination au- dessus.

La notion de coordination est fonction du nombre d'éoliennes et de leur SER, ainsi que de paramètres opérationnels tel que l'existence d'une procédure particulière nécessitant une détection optimale pour son contrôle, un axe d'arrivée ou d'attente, point d'intégration, etc...

b. Radar BA (Basse Altitude)

Exclusion entre 5 et 20 km au-dessus d'un angle de site de 0° ayant pour origine le foyer de l'antenne, coordination au-dessous; puis entre 20 et 30 km accord au-dessous de cet angle et coordination au- dessus.

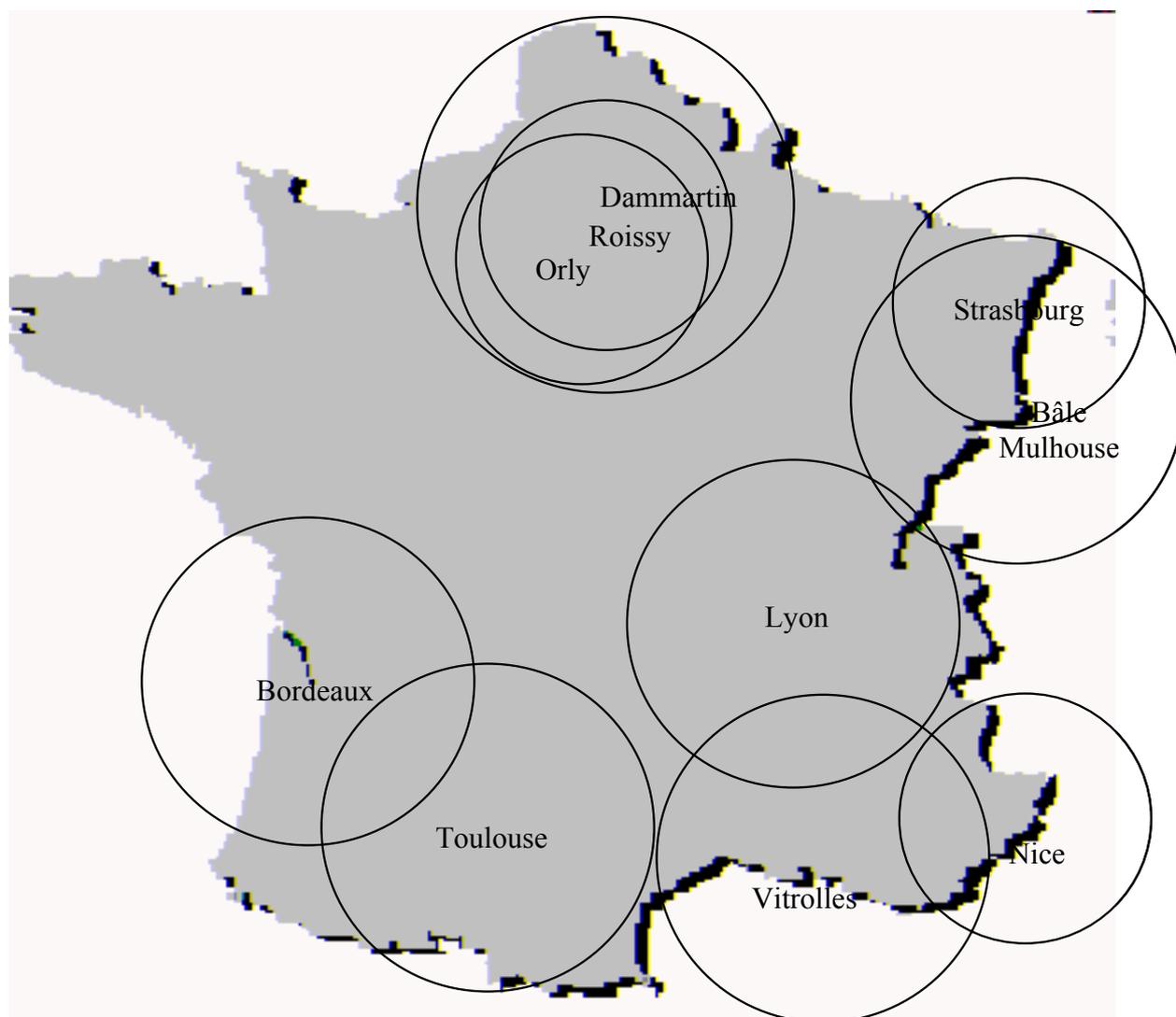
c. Radar d'atterrissage de précision

Exclusion jusqu'à 20 km dans un angle de 20° de part et d'autre de l'axe de piste, pour les deux sens de la piste.

d. GRAVES

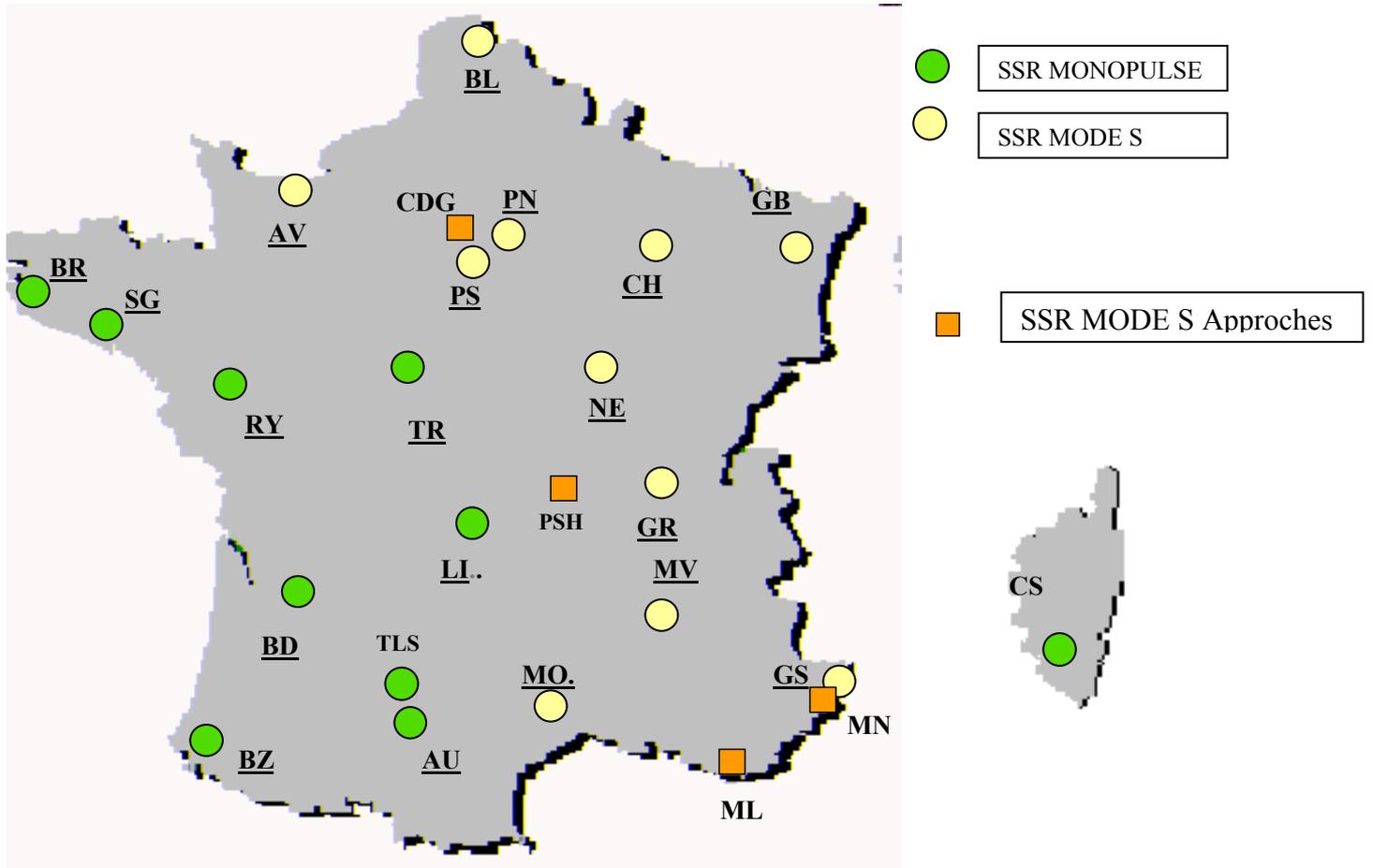
Il n'existe que deux sites d'implantation pour ce radar très particulier pour lequel, compte tenu du domaine d'emploi très spécifique, la mesure de précaution des 30 km est maintenue.

ANNEXE 3 : COUVERTURE RADAR PRIMAIRES



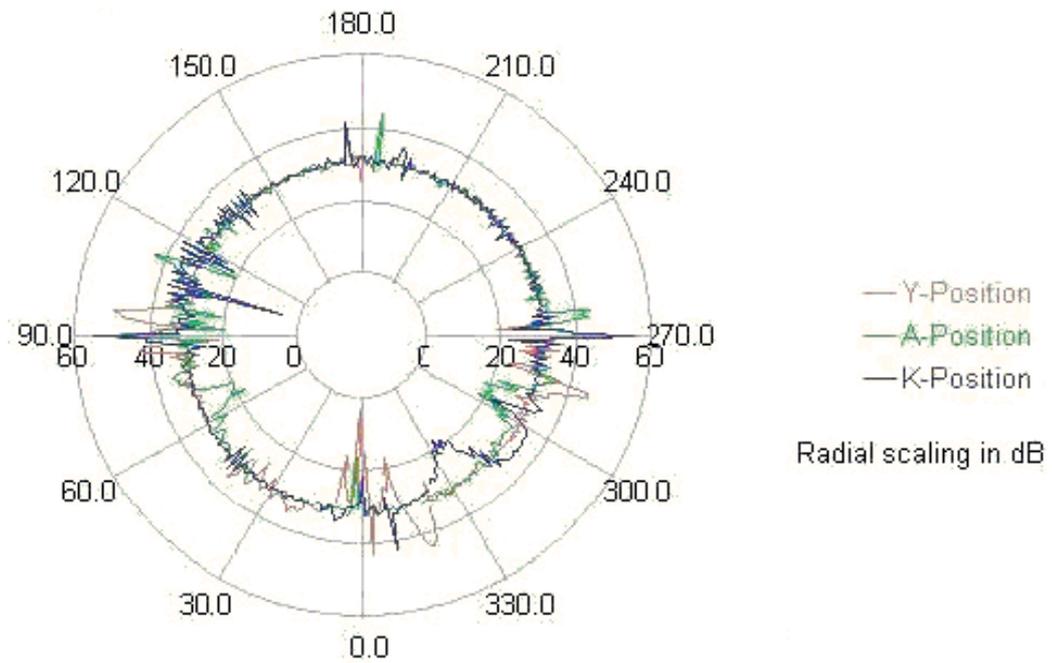
Couverture radars primaires civiles française

ANNEXE 4 : COUVERTURE RADAR SECONDAIRES

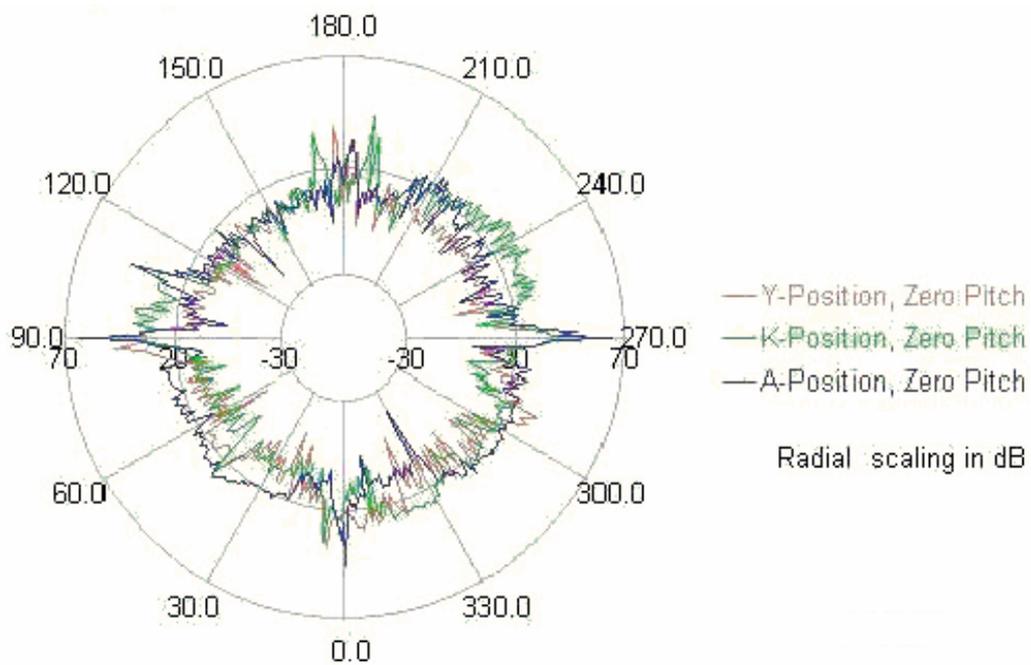


ANNEXE 5 : SER EOLIENNES

Surfaces Equivalentes Radar



SER d'une éolienne en bande L



SER d'une éolienne en bande S

Surface Equivalente Radar (SER) d'une éolienne mesurée sous tous les angles de 0 à 360°.

Tour : hauteur 90 m; diamètre à la base 5 m; diamètre au sommet 3,5 m
Rotor tripale de diamètre 84 m

La valeur de SER est exprimée en db. Les tracés sont présentés en bandes L et S pour différentes positions des pales.

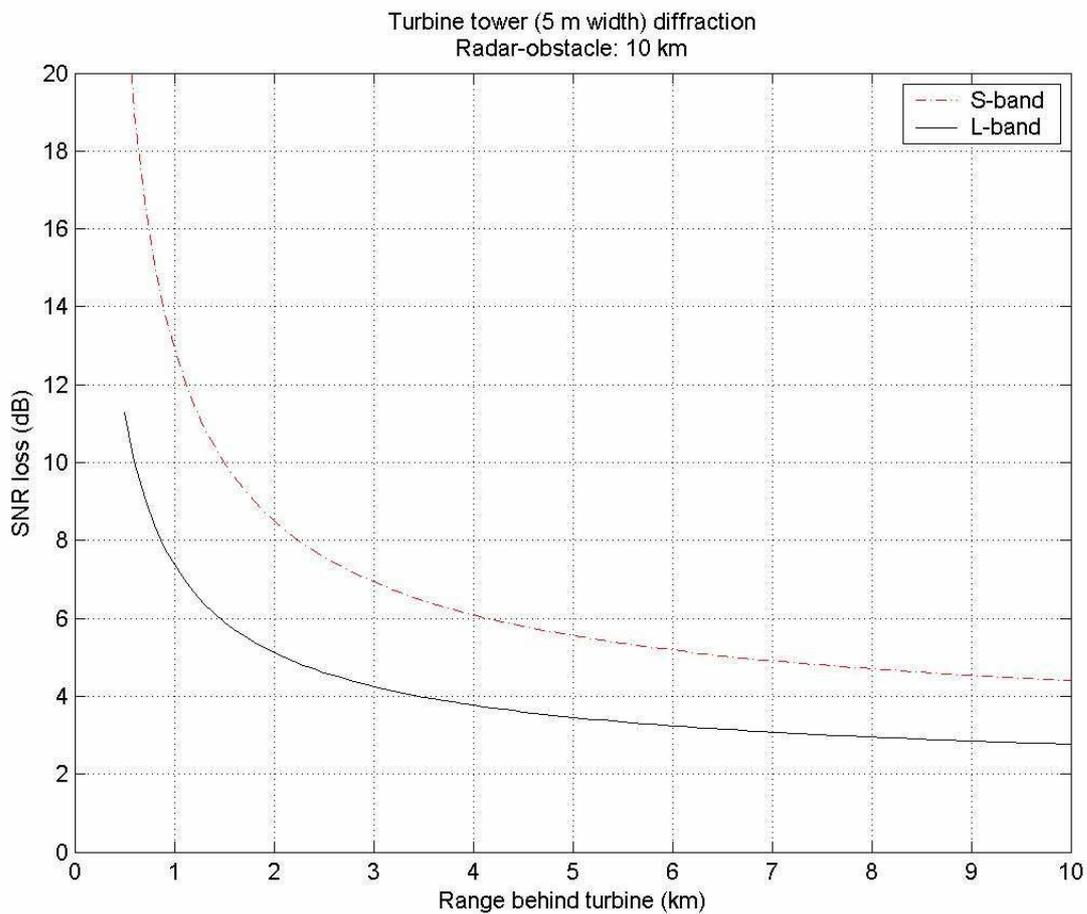
On observe :

Une SER bande L plus forte (de 10 db environ)

Une influence prédominante de la tour

Des valeurs de SER ponctuellement très fortes (flash de pale)

ANNEXE 6 : DIFFRACTION EFFET DE MASQUE



Calcul d'atténuation d'un signal radar primaire en retour d'une cible située derrière un mat de diamètre 5 m.

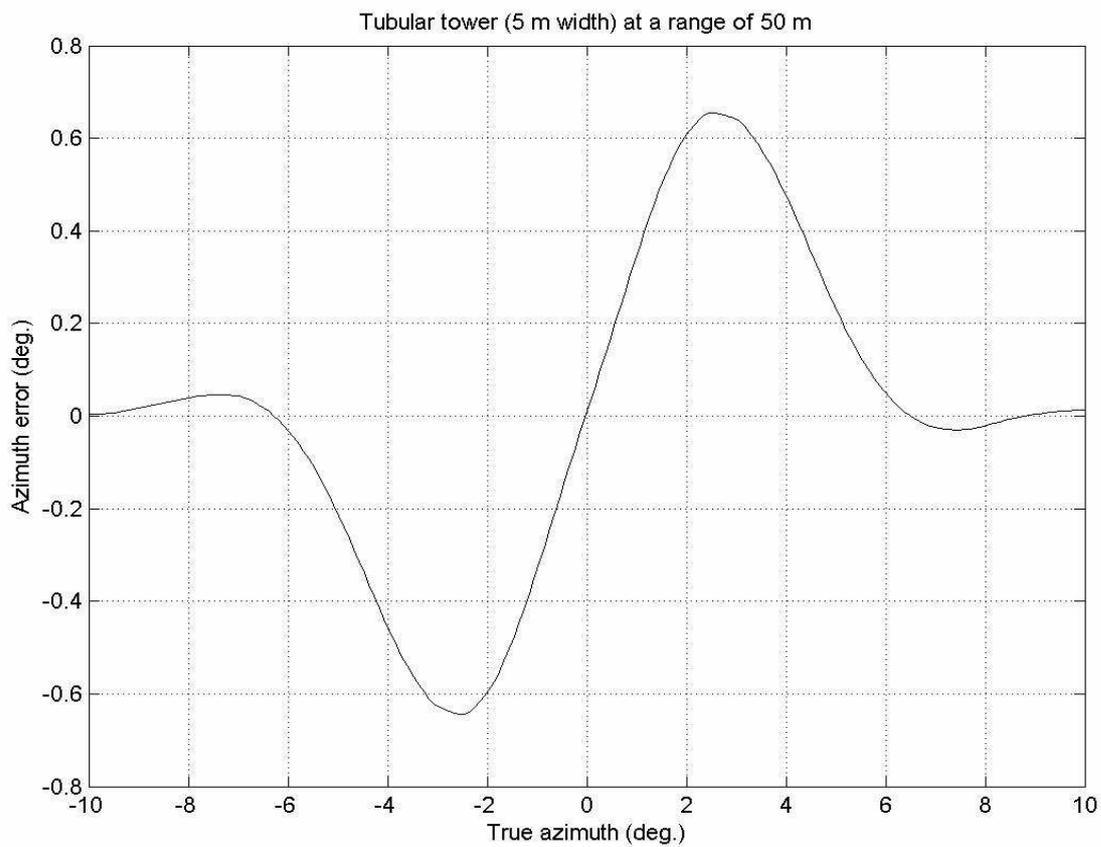
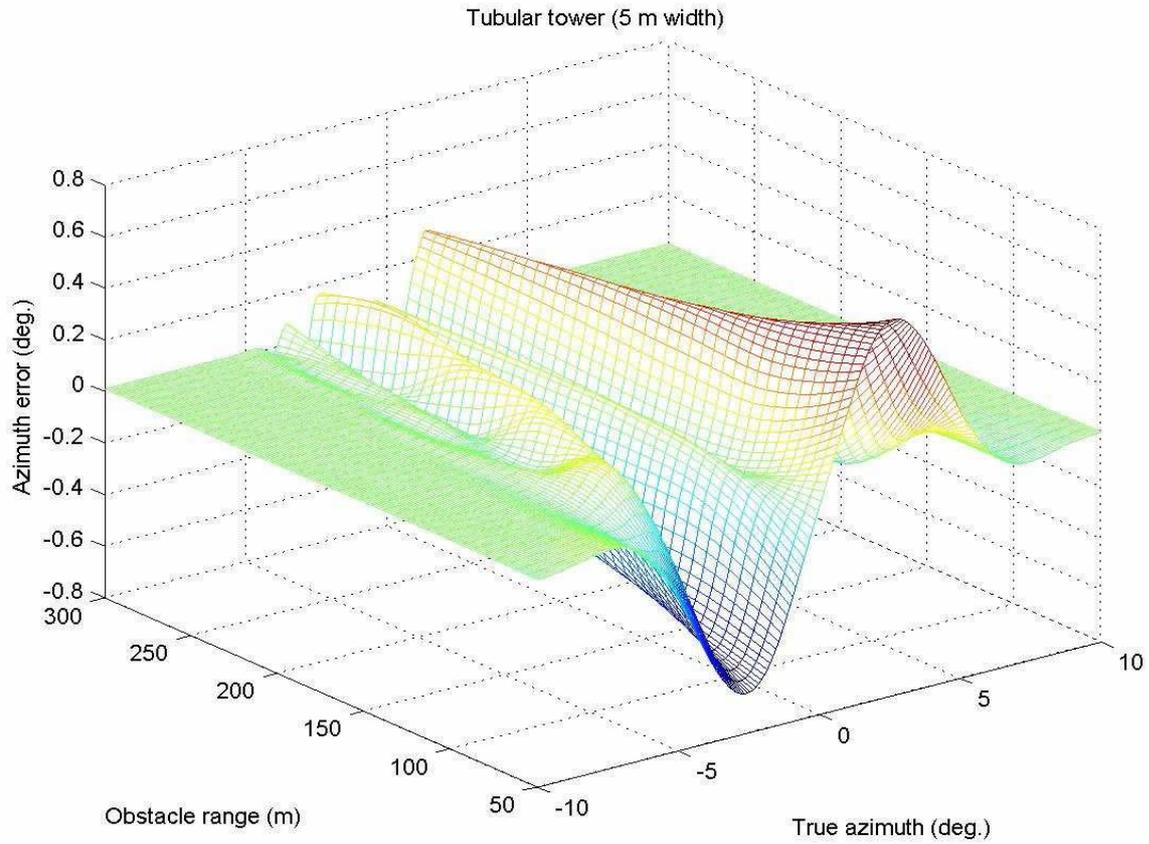
Distance radar - mat : 10 km

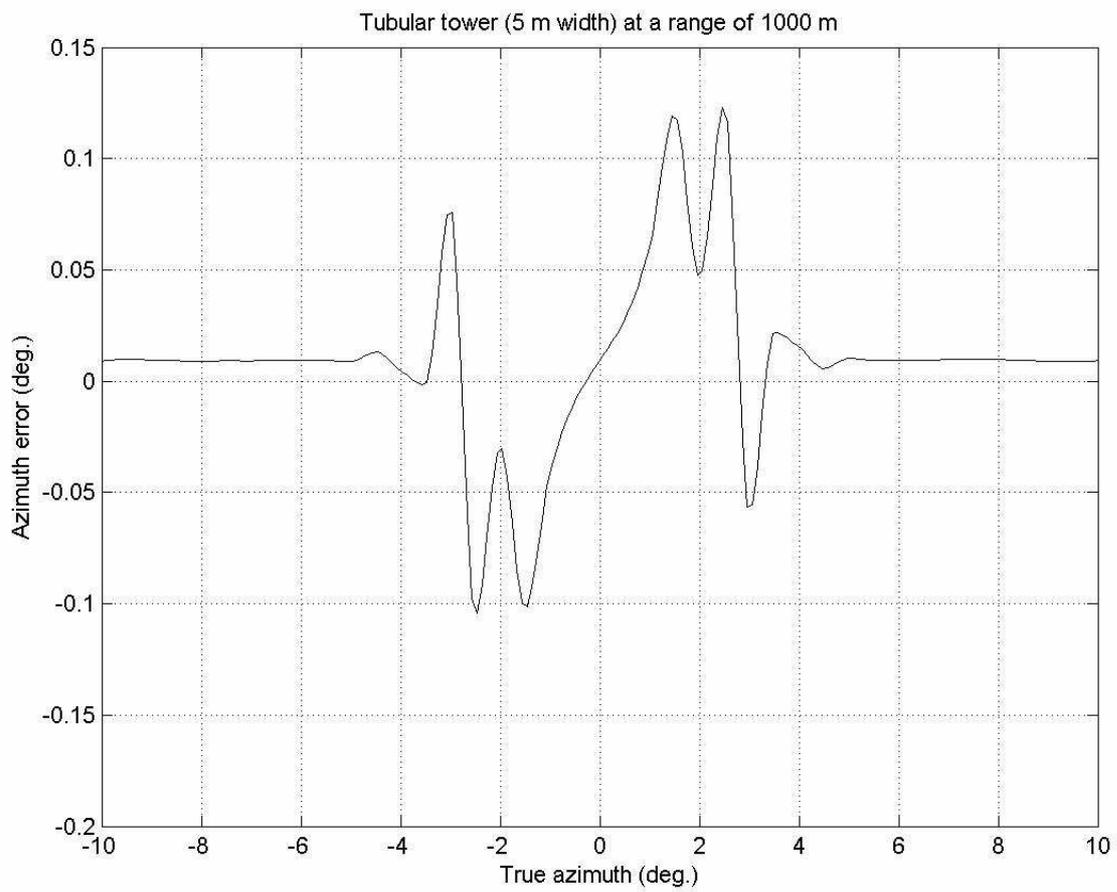
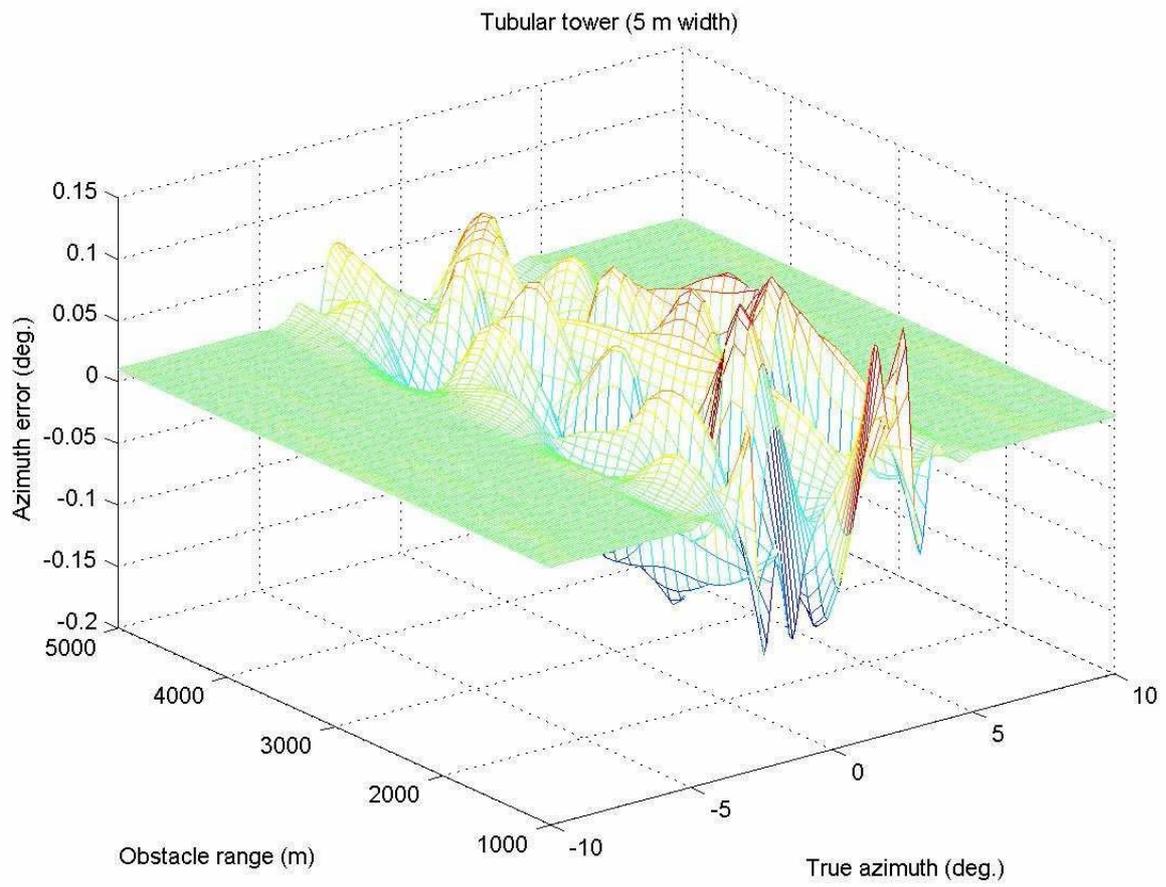
Distance mat - cible portée en abscisses

Atténuation calculée portée en ordonnées

On observe une limitation de l'atténuation pour une cible au delà de 5 km du mat.

ANNEXE 7 : DIFFRACTION EFFET SUR MESURE MONOPULSE





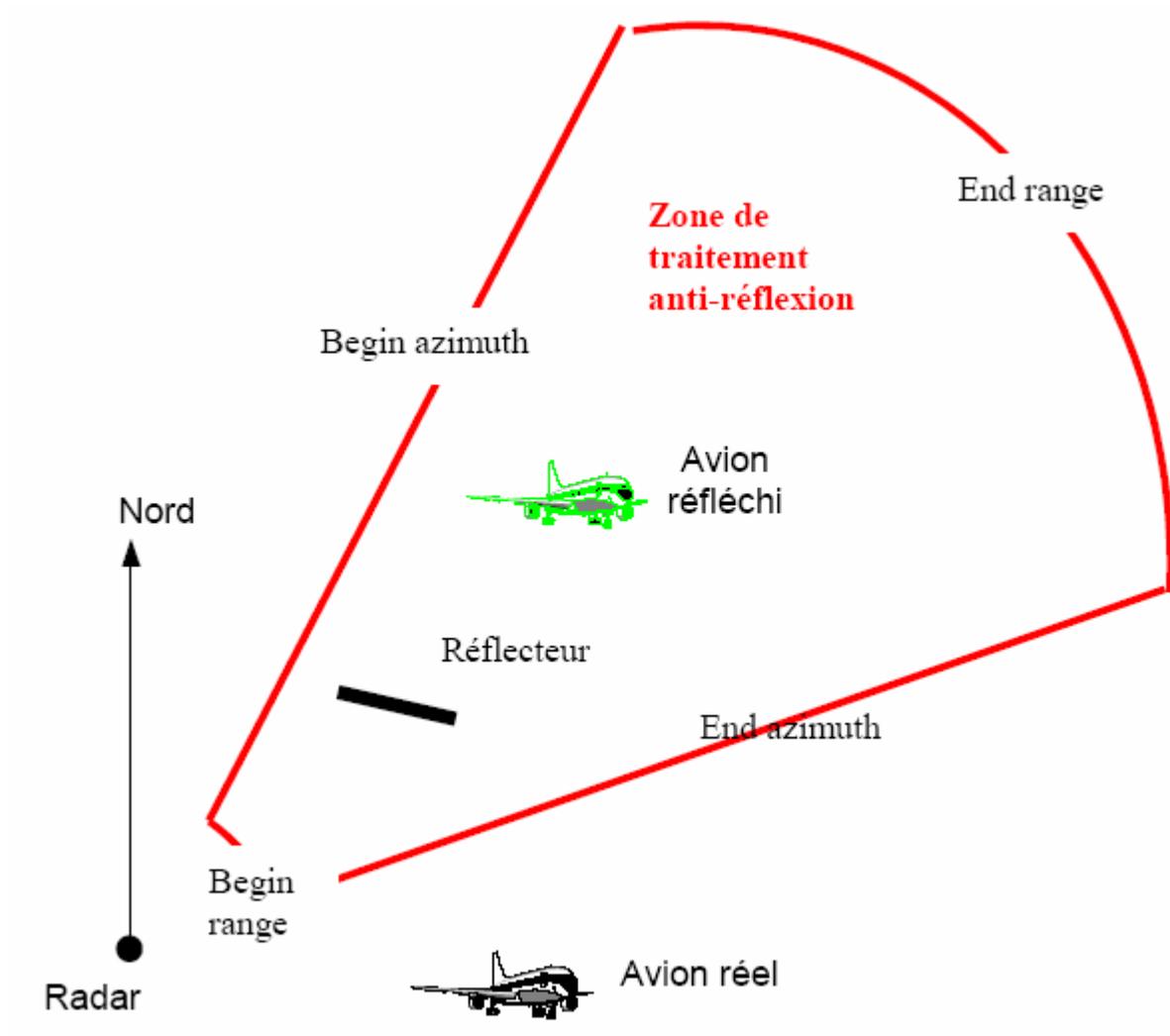
Erreur calculée sur la mesure monopulse (à 1090 MHz) en fonction de la valeur exacte, en présence d'une tour de diamètre 5m éloignée du radar de :

de 50 à 300m ; avec tracé isolé à 50 m

de 1 à 5 km ; avec tracé isolé à 1 km.

Au delà de 5 km, l'erreur est inférieure à $0,068^\circ$: précision spécifiée pour la mesure radar.

ANNEXE 8 : TRAJET MULTIPLE



ANNEXE 9 : SITUATION INTERNATIONALE

Source : Wind turbines and Aviation interests. European experience and practice P. Jago, N. Taylor ETSU W/14/00626/REP

TABLE 1 – SUMMARY OF MAIN FINDINGS

	Aero-drome safe-guarding	Technical site safeguarding			Planning, assessment and approval process	Low flying policy	Charting policy	SAR Ops policy	Marking and illuminating
		Civil ²		Military					
		Airfield radar	Other						
UK	Assessed if within 17km (civil)	Assessed if within 30km	Assessed if within 34km (ILS); 30km (other systems)	Assessed if within 74km of AD radar; developer to prove no negative effects	Voluntary; widely used. Statutory via Local Planning Authority	Generally not below 250 feet	Charted if <input type="checkbox"/> 300 feet	Nil stated	Policy being developed
Denmark	ICAO standards	ICAO standards	ICAO standards; VOR stations: not within 1km	Nil stated	Wind energy incorporated into regional plans; planning authorities inform aviation authorities	No objections to structures <100m	Charted if <input type="checkbox"/> 100m or 'if deemed necessary'	Nil stated	National guidelines
Germany	ICAO standards	ICAO standards	ICAO standards	5km protected area; 20km 'area of interest'; Military to prove negative effects	Construction Committees inform aviation authorities; plans assessed within 2 months	Generally not below 1000 feet	Charted if <input type="checkbox"/> 100m or 'if deemed necessary'	Statement of concern from SAR operators	National guidelines
Netherlands	ICAO standards	ICAO standards; not >150 metres within 30km	ICAO standards	Nil stated	No regulated process away from safeguarded aerodromes	Generally not below 1200 feet	Archive of all structures >300 feet	Nil stated	Follow ICAO regulations for tall structures
Sweden	ICAO standards	ICAO standards	ICAO standards	None aviation-specific	Voluntary	Not below 50 metres	'FIA' database (>50m in towns, > 20m, rural)	As Germany	As Netherlands
Norway	ICAO standards	ICAO standards, plus assessed if within 10nm and in LOS; (ILS: not within 20nm)		Not known	Energy authorities inform aviation authorities	Not known	Obstacles >15 metres registered	Nil stated	National guidelines

² For primary radar, ICAO standard is a protected surface slope of gradient 1:100; for Secondary Surveillance Radar a slope of 1:200; for nav aids, 1:50.