



Agence Nationale des Fréquences

Commission Consultative de la Compatibilité Electromagnétique

Rapport CCE5 n°3

**PERTURBATIONS DU FONCTIONNEMENT DES RADARS
FIXES MARITIMES, FLUVIAUX ET PORTUAIRES PAR LES
EOLIENNES**

Version 1 approuvée le 26/02/2008 par la CCE5

Table des matières

1	Introduction	3
2	Description des systèmes de radionavigation utilisés par PNM	3
2.1	Radars maritimes, fluviaux et portuaires	3
2.1.1	Missions et objectifs.....	3
2.1.2	Spécificités opérationnelles et techniques des radars utilisés dans l'environnement maritime et fluvial.....	4
2.2	Autres systèmes de radionavigation.....	4
2.2.1	Goniomètres	4
2.2.2	GPS différentiel (DGPS).....	5
3	Description des perturbations dues aux Eoliennes	5
3.1	Saturation des radars	6
3.2	Masquage	6
3.2	Génération de fausses cibles :	6
3.3	Autres perturbations possibles	7
3.4	Synthèse des perturbations possibles	7
4	Analyse technique des perturbations potentielles	8
4.1	Hypothèses	8
4.2	Analyse des effets perturbateurs sur les radars	8
4.2.1	Saturation des radars	8
4.2.2	Masquage :	9
4.2.3	Génération de fausses cibles par réflexion.....	10
4.2.4	Génération de fausses cibles par multi-trajet :	11
4.2.5	Conclusions pour les radars :	12
4.3	Analyse des effets perturbateurs sur les goniomètres	12
4.3.1	Effet de masquage	12
4.3.2	Effet d'erreur de mesure angulaire (multi trajets).....	13
4.4	Analyse des effets perturbateurs sur le GPS différentiel (DGPS).....	14
4.4.1	Perturbation des communications à 300 kHz par masquage.....	14
4.4.2	Perturbation de la réception satellite GPS (sur station de référence ou sur bateau) par multi trajet	14
5	Réduction de l'effet des parcs éoliens sur la fonction radar	14
6	Recommandations pour l'implantation des éoliennes	15
6.1	Face aux radars.....	15
6.1.1	Radars CROSS	15
6.1.2	Radar portuaire.....	15
6.2	Face aux goniomètres doppler	15
6.3	Face aux DGPS	15
7	Bibliographie :	16
8	Sigles et acronymes :	16
9	Annexes	16
	ANNEXE 1 : Couverture des radars portuaires et des CROSS	17
	ANNEXE 2 : Caractéristiques techniques et dégradations tolérables des radars et autres systèmes de radionavigation traités dans ce rapport	18
	ANNEXE 3 : Analyse des effets perturbateurs sur les radars.....	21
	ANNEXE 4 : Analyse des effets perturbateurs sur les goniomètres.....	31

1 Introduction

Au sein de la Commission de la Compatibilité Electromagnétique, l'Agence nationale des fréquences a été saisie depuis 2004 par les divers opérateurs radar de la question des perturbations du fonctionnement des radars par les éoliennes.

Après avoir traité spécifiquement des radars météorologiques dans le rapport CCE5 n°1 [1], puis des radars fixes de l'Aviation civile et de la Défense dans le rapport CCE5 n°2 [2], il a été décidé d'élaborer un rapport correspondant pour les radars maritimes, fluviaux et portuaires opérés par l'affectataire PNM (Port et Navigation Maritime).

Les objectifs de ce rapport sont de :

- décrire les radars maritimes et fluviaux utilisés par PNM,
- présenter et quantifier les effets perturbateurs potentiellement créés par les déploiements d'éoliennes sur les radars traités dans ce rapport,
- préconiser des recommandations susceptibles d'atténuer l'impact que pourraient avoir les éoliennes.

Il est à noter que les sémaphores de la marine nationale implantés le long du littoral assurent, en synergie avec les CROSS, une veille optique et radar de la zone côtière et utilisent des radars aux caractéristiques similaires à ceux des CROSS. Ce rapport peut donc s'appliquer à ces radars spécifiques opérés par la Marine Nationale.

Ce rapport aborde également l'impact potentiel des éoliennes sur d'autres systèmes utilisés par PNM pour la radionavigation comme les goniomètres et le GPS différentiel (DGPS).

2 Description des systèmes de radionavigation utilisés par PNM

2.1 Radars maritimes, fluviaux et portuaires

2.1.1 Missions et objectifs

Les PNM opèrent les radars des Centres Régionaux Opérationnels de Surveillance et de Sauvetage en mer (CROSS), ainsi que des radars de navigation dans les ports et sur les voies navigables.

Les missions de surveillance de la navigation maritime des CROSS sont définies par les recommandations adoptées par l'organisation maritime internationale pour les actions dans les eaux internationales, et sur une réglementation nationale et régionale pour les actions dans les eaux nationales. Dans ce cadre, les objectifs de suivi radar ont été fixés selon la nature des navires, les zones de navigation qu'ils fréquentent, les caractéristiques nécessaires de précision et de séparation.

Les zones de couverture des radars des CROSS sont :

- les zones d'appel dans lesquelles les navires doivent se signaler et les personnels des CROSS les contrôler ;

- les autres zones côtières, certains chenaux ou passes indiqués dans les arrêtés préfectoraux, les accès aux ports où les navires SOLAS vont s'approcher à moins de 7 milles de la côte ;
 - les zones dites de surveillance passive, qui répondent à une fonction de surveillance générale de la navigation.

Les équipements émetteurs/récepteur radars des CROSS sont doublés en mode diversité de fréquences afin d'atteindre une disponibilité aussi proche que possible de 100% par an sur tous les sites.

Quant aux radars portuaires, leur fonction principale est la surveillance des accès nautiques et des manœuvres portuaires.

L'annexe 1 contient une description de la couverture des radars portuaires et de CROSS.

2.1.2 Spécificités opérationnelles et techniques des radars utilisés dans l'environnement maritime et fluvial

Les radars utilisés par le CROSS et les ports présentent les particularités suivantes qui auront des conséquences importantes sur la définition des domaines d'exclusion des parcs éoliens :

- Du fait de l'emplacement des cibles visées par les radars (navires), exclusivement à la surface de la mer, les angles de visée sont très proches de l'horizontale.
- Le domaine angulaire de l'antenne est fin en azimut ($<1^\circ$) et large en site 15° à 30° environ).

Par conséquent, les éoliennes dans le voisinage du radar et les cibles marines observées par le radar se présentent sous des angles de site très proches voire confondus.

- Le traitement de radar ne comporte aucune analyse doppler. Ceci limite l'impact que pourrait avoir la rotation des pales des éoliennes.

Les études présentées dans ce rapport sont fondées sur les caractéristiques techniques de deux radars opérés par PNM. Les caractéristiques techniques ainsi que les dégradations tolérables dans le secteur opérationnel telles qu'elles ont été exprimées par PNM sont fournies en Annexe 2.

2.2 Autres systèmes de radionavigation

2.2.1 Goniomètres

Une antenne tournant autour d'un axe est placée dans le champ d'émission d'un émetteur de porteuse pure. A cause du mouvement de l'antenne, le signal reçu subit un effet Doppler qui se traduit par une modulation FM du signal reçu. En effectuant une démodulation FM, on peut détecter la direction de provenance des ondes, en analysant les instants de passage par zéro du signal BF.

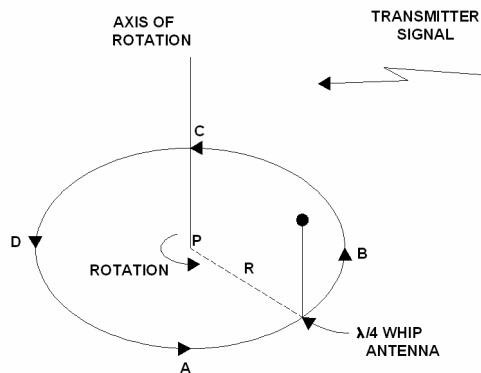


Figure 2.1 – Goniomètre

Dans les radiogoniomètres de PNM, l'antenne tournante est remplacée par un ensemble de dipôles fixes qui sont commutés cycliquement.

2.2.2 GPS différentiel (DGPS)

Les DGPS (Differential Global Positioning System) fonctionnent sur le principe suivant :

- Les stations de référence sur le littoral sont munies d'un récepteur GPS qui élabore une « position GPS » de la station de référence.
- Chaque station de référence possède une connaissance plus précise de sa position géographique par des informations cartographiques extérieures (IGN,...). Cette position géographique précise sera appelée dans ce document « position absolue ».
- La comparaison de la « position absolue » et de la « position GPS » permet à la station de référence d'élaborer un vecteur de correction qui intègre l'effet de différentes erreurs (décalage d'horloge, différence de propagation,...)
- Un émetteur (fréquence : environ 300 kHz) placé à proximité de la station de référence émet en permanence les coordonnées de ce vecteur de correction avec un débit d'environ 100 bauds.
- Un navire approchant de la station de référence, élabore sa propre position GPS avec son récepteur GPS et corrige cette position GPS avec le vecteur de correction émis par la station de référence. Cette correction lui permet d'améliorer la précision de la connaissance de ses coordonnées géographiques.

3 Description des perturbations dues aux Eoliennes

Dans l'ensemble du présent document, on considèrera que la détection des parcs éoliens par les radars n'est pas un effet perturbateur puisque le rôle des radars maritimes est bien de détecter et de localiser les cibles placées en mer, fixes ou mobiles.

Seuls les effets secondaires à cette détection tels que saturation, masquage et création de fausses cibles seront considérés comme des effets perturbateurs.

3.1 Saturation des radars

Les radars peuvent être rendus inopérants à cause d'un niveau de puissance reçue trop important dépassant sa dynamique de fonctionnement. Ce signal peut être généré par la réflexion directe de l'onde radar sur une ou plusieurs éoliennes de forte SER placées à courte distance.

3.2 Masquage

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

Ce phénomène est particulièrement sensible pour les radars.

Les éoliennes, de par leur très forte signature radar, peuvent réduire le champ électromagnétique les traversant.

Cette réduction de champ va générer localement, une zone à l'arrière des éoliennes par rapport au radar où celui-ci verra ses capacités de détection dégradées.

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.

Ce phénomène peut également avoir un impact sur les goniomètres (portée marginalement réduite) et sur le GPS différentiel lorsque un navire est masqué par une éolienne vis-à-vis de l'émetteur 300 kHz d'une station de référence.

3.3 Génération de fausses cibles :

Plusieurs situations peuvent être à l'origine de la génération de fausses cibles.

Il peut s'agir de **la réflexion du signal radar incident** sur les surfaces de l'obstacle éolien. La forte SER relative des éoliennes par rapport aux cibles d'intérêt (bateaux) va générer des échos fixes en pénétrant dans le récepteur radar par les lobes secondaires de l'antenne du radar. Ces échos parasites peuvent réduire le rapport signal utile/(signal perturbant + bruit). Cette perturbation serait particulièrement sensible lorsque l'écho parasite apparaîtra aux mêmes coordonnées géographiques que l'écho d'intérêt. Cet effet s'applique exclusivement aux radars.

Il peut aussi s'agir de la réflexion d'un signal à destination ou en provenance d'une cible utile. C'est un «**multi trajet**» sur lequel les mesures de distance et d'angle seront fausses.

Les multi trajets notamment du type radar/éolienne/bateau/radar (Ordre 1) et radar/bateau/éolienne/bateau/radar (Ordre 2) vont générer des fausses cibles de bateaux lorsque ceux-ci passeront à proximité des éoliennes.

En conséquence de ces phénomènes, on peut assister à une dégradation de la résolution distance des radars. En effet, les éventuels multi trajets avec réflexion sur les éoliennes peuvent générer dans certaines conditions un étalement temporel ou une duplication de la réponse de la cible, entraînant donc une dégradation soit de la résolution distance du radar, soit de la capacité de localisation de la cible utile.

De plus, des multi trajets pourraient venir parasiter l'amplitude du signal reçu par l'antenne en fonction du gisement dans le cas du radar, générant ainsi une dégradation de la mesure angulaire.

Concernant l'impact des multi trajets sur les goniomètres, les trajets parasites bateau/éolienne/goniomètre pourraient dans certaines conditions perturber la mesure angulaire du goniomètre.

3.4 Autres perturbations possibles

Il est à noter que si le masquage et la génération de fausses cibles par masquage ou multi trajets sont les deux phénomènes majeurs pouvant impacter les radars voire les goniomètres, le GPS différentiel est susceptible d'être perturbé par le masquage mais aussi par deux facteurs supplémentaires :

- Perturbation de la réception GPS par la station de référence : La station de référence établit sa « position GPS » par la réception de signaux venant de satellites dont les angles apparents par rapport à l'horizon est supérieur à 10°. Une éolienne placée de telle sorte que l'extrémité d'une pale en position verticale apparaîtrait à plus de 10° au-dessus de l'horizon pourrait générer un multi trajets du type satellite/éolienne/récepteur GPS qui entraînera une erreur sur la « position GPS » de la station de référence.

Cette erreur potentielle va introduire un biais dans le vecteur de correction créé par la station de référence et publié à l'attention des navires.

- Perturbation de la réception GPS par le navire : Cet effet, similaire à celui décrit ci-dessus, entraînera une erreur dans l'établissement de la position GPS du navire. Ce dernier, comme la station de référence, n'utilise que les satellites dont l'angle apparent sur l'horizon dépasse les 10°.

Les éventuelles perturbations décrites ci-dessus génèrent des erreurs de localisation car l'éventuel effet des éoliennes proches, soit de la station de référence, soit du navire, sera différent sur les deux trajets satellite/station de référence et satellite/navire.

3.5 Synthèse des perturbations possibles

Le tableau 1 présente synthétiquement les effets perturbateurs possibles sur les différents équipements électromagnétiques :

Perturbations / Equipement perturbé	Saturation	Masquage	Fausses cibles	Localisation angulaire	Localisation spatiale 2D
Radar	X	X	X	Conséquences du masquage ou fausses cibles	
Goniomètre	s.o.	X	s.o.	X	s.o.
DGPS	s.o.	X	s.o.	s.o.	X

Tableau 1 – Effet perturbateurs possibles sur les radars, Goniomètres, DGPS
(s.o.: sans objet – X : effet perturbateur possible)

4 Analyse technique des perturbations potentielles.

Sur la base des études détaillées fournies en Annexes 3 (pour les radars) et 4 (pour les goniomètres), cette section analyse les perturbations potentielles des éoliennes sur les radars et autres systèmes (goniomètres, DGPS) opérés par PNM.

4.1 Hypothèses

Les caractéristiques des radars considérés dans ce rapport sont fournies en Annexe 2.

Concernant les éoliennes, on choisit d'utiliser la taille du mât et du rotor de l'éolienne REpower 5M (<http://www.repower.fr/index.php?id=230>) qui semble aujourd'hui l'éolienne de plus grande taille déjà implantée en mer (Ecosse et projet au large de la Belgique en 2008):

- Hauteur axe rotor : 90 à 100 m en mer (100 à 120 m sur terre) ;
- Diamètre rotor : 126 m ;
- Longueur de pale: 61,5 m ;
- Corde maximale de la pale : 4,6 m ;
- Diamètre du mât : 7m à la surface de la mer – 5,5 m à l'extrémité supérieure ;
- Vitesse de rotation maximale : 7 à 12 tr/mn soit un passage de pale toutes les 1,7 à 2,8 s ;
- SER pouvant atteindre 10 000 m² à 50 000 m².

Les calculs présentés en Annexe 3 pour les radars ne prennent généralement en compte qu'une seule éolienne. En effet, les caractéristiques des radars considérés (faisceau étroit en azimut et résolution en distance comprise entre 8 et 150 m) ainsi que les distances typiques entre plusieurs éoliennes d'un même parc (plusieurs centaines de m) impliquent que, à chaque instant, le radar ne verra qu'une seule éolienne dans chaque case distance/angle et cela jusqu'à une distance de 100 km environ.

4.2 Analyse des effets perturbateurs sur les radars

Cette section quantifie les différents effets perturbateurs potentiels sur les radars. L'annexe 3 étudie plus en détails certains de ces effets (masquage, génération de fausses cibles par réflexion ou multi-trajets).

4.2.1 Saturation des radars

Les radars peuvent être rendus inopérants à cause d'un niveau de puissance reçue trop important dépassant sa dynamique de fonctionnement. Ce signal peut être généré par la réflexion de l'onde radar sur une ou plusieurs éoliennes de forte SER placées à courte distance.

La puissance du signal reçu peut alors atteindre de 10 à 100 mW générant des effets pernicieux pour le radar. Une liste de ces effets possibles ou probables est donnée ci-dessous :

- Saturation : non fonctionnement sur la case distance comprenant l'éolienne
- Dysfonctionnement : la puissance du signal crée un dysfonctionnement du radar durant un temps important.

- Destruction : pour certaines architectures de récepteur radar, la puissance du signal peut atteindre un niveau qui dégrade durablement ou détruit les composants d'entrée du récepteur.

En utilisant les caractéristiques générales des radars utilisés par le CROSS, une éolienne de 50 000 m² face à un radar de 90 dB de dynamique, générera un dépassement de niveau autorisé en réception à des distances radar-éolienne inférieures à 6,9 km environ. Pour une dynamique du radar de 100 dB, la distance radar-éolienne minimale permettant d'éviter la saturation du radar doit être supérieure à 3,8 Km environ.

4.2.2 Masquage :

L'analyse du masquage est réalisée en considérant successivement le masquage créé par un mât d'éolienne, puis par une pale et enfin le masquage global.

La présence d'une éolienne créera deux zones de masquage indiquées sur la figure 4.1 d'atténuation maximale de valeur proche et d'atténuation moyenne très différente :

- Une zone de masquage fixe de forte atténuation (20 dB et plus) créée par le mât qui s'étendra sur plusieurs kilomètres derrière l'éolienne et sur un angle vu du radar de l'ordre de quelques centièmes de degré de large.
- Une zone de masquage à éclipse créée par le diamètre du rotor s'étendant sur plusieurs kilomètres en distance derrière l'éolienne sur un angle vu du radar de l'ordre de quelques degrés de large. Ce deuxième masquage est beaucoup moins intense (de l'ordre de 0,34 dB) mais plus large angulairement (de l'ordre de quelques dixièmes de degré).

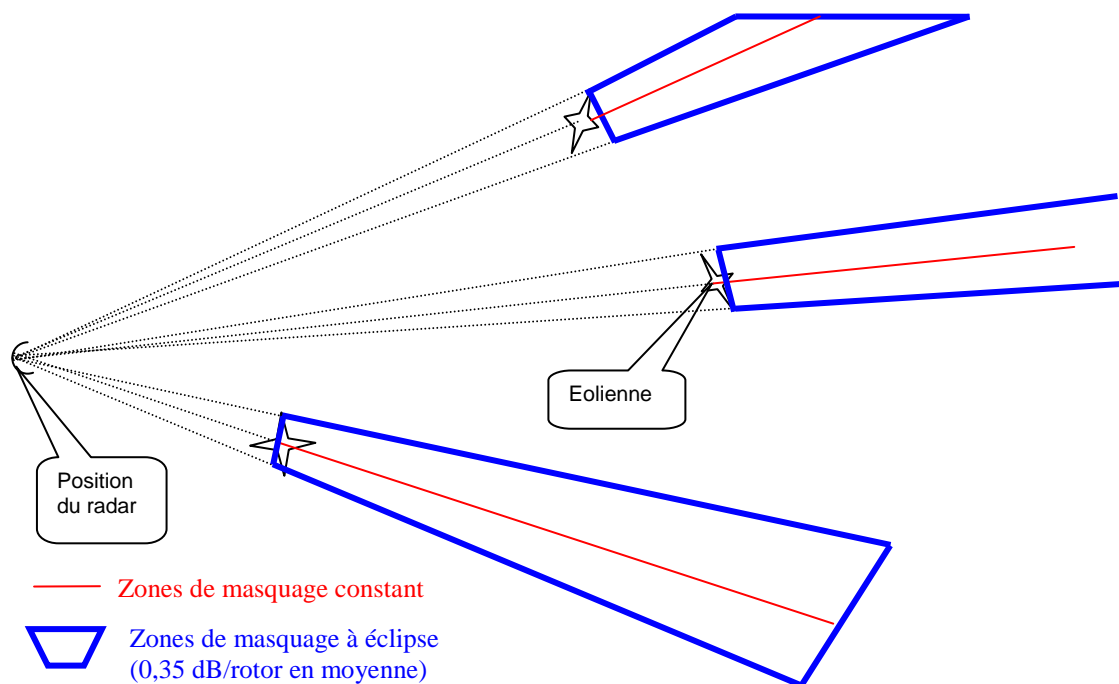


Figure 4.1 - Vue globale des zones de masquage fixe et à éclipse générées par les éoliennes

Hors des zones matérialisées sur la figure 4.1, les éoliennes ne masqueront pas les cibles.

Tous ces effets de masquage auront lieu sur des domaines angulaires en gisement faibles à très faibles (1° à 0,01°)

- Ceci n'entraînera aucune perte de détection des gros navires car généralement leur taille apparente angulaire (30 à 100 m) dépasse le domaine angulaire d'ombre du mât ($< 0,1^\circ$). Le rotor n'entraînera qu'un masquage périodique (réduction en moyenne de 0,35 dB par rotor) qui n'affectera pas les radars marins (sans traitement doppler)
- Le masquage génèrera une perte de détection probable sur une dizaine de km des petits navires placés derrière le mât de chaque éolienne.

Dans ces deux cas, la distance sur laquelle ces pertes de détection auront lieu est fonction de la distance éolienne/radar et de la valeur de la SER du navire à détecter.

4.2.3 Génération de fausses cibles par réflexion

Les éoliennes génèrent des échos fixes dans le lobe principal du radar.

A cause de leur très forte signature radar, les éoliennes génèrent aussi des échos parasites (ou fausses cibles) par les lobes secondaires de l'antenne du radar. Ces échos parasites, apparaissent à quelques degrés à droite et à gauche de l'éolienne et à la même distance que celle-ci, selon la phénomène décrit en Figure 4.2.

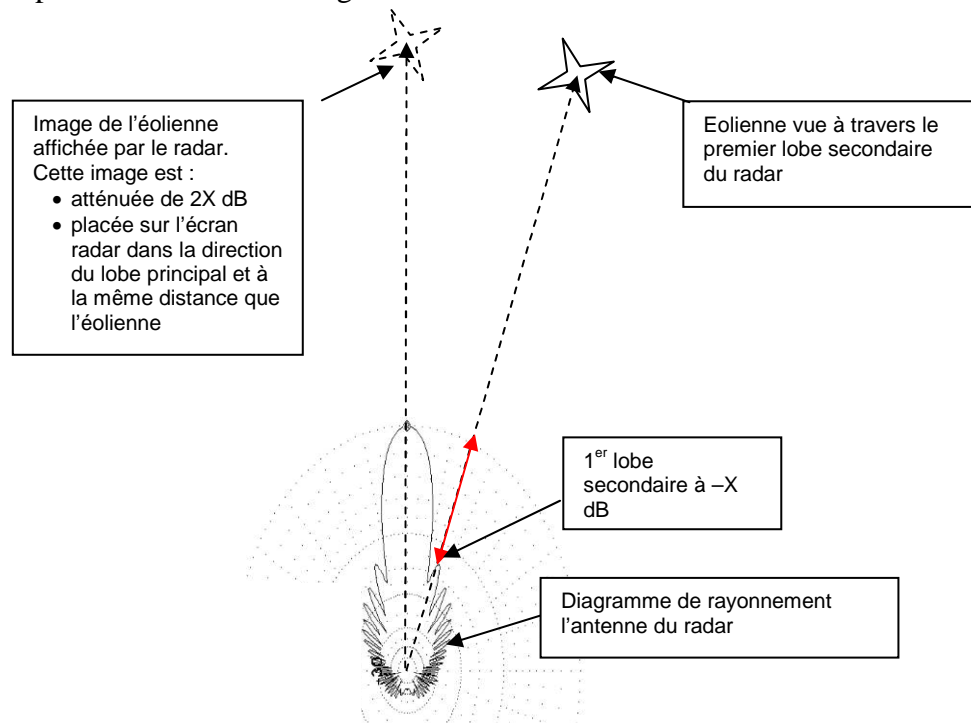


Figure 4.2 – Création d'écho parasite par émission/réception à travers les lobes secondaires de l'antenne du radar

Cette perturbation apparaîtra lorsque l'écho parasite (éolienne) sera placé à la même distance qu'un écho que l'on cherche à détecter. L'écho utile de la cible sera alors confondu spatialement avec l'écho parasite dû à l'éolienne qui sera capté par le radar par l'intermédiaire des lobes secondaires de l'antenne radar.

En l'absence de cible de type bateau, ces fausses cibles générées par les éoliennes seront toujours présentes avec une SER de l'ordre du m^2 .

Il y aura a priori 2 fois plus de fausses cibles que le nombre d'éoliennes (nombre de lobe secondaire à 27 dB et $\pm 5,5^\circ$ ou $\pm 3^\circ$).

Par leur nombre, ces fausses cibles contribueront à brouiller l'analyse de l'opérateur sur la présence/absence de vraies cibles sur les côtés ou au sein du parc éolien.

Ces fausses cibles apparaîtront, à la même distance que l'éolienne et dans un domaine angulaire de + ou - 6° (environ) autour de chaque éolienne.

4.2.4 Génération de fausses cibles par multi-trajet :

Les multi trajets notamment du type radar/éolienne/bateau/radar (Ordre 1) et radar/bateau/éolienne/bateau/radar (Ordre 2) vont générer des fausses cibles de bateaux lorsque ceux-ci passeront à proximité des éoliennes.

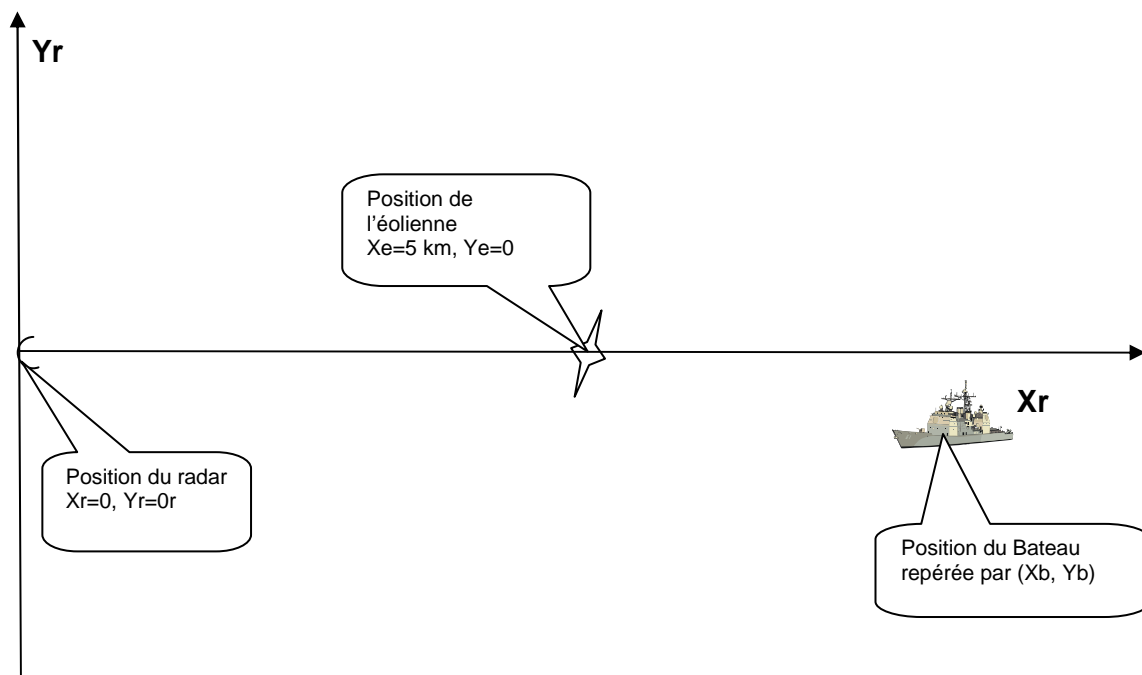


Figure 4.3 – Paramètres géométriques pour le calcul des multi trajets radar/éolienne/bateau/radar –

La valeur relative de la puissance de tous les multi trajets/trajet direct augmente lorsque :

- soit le bateau est proche de l'éolienne
- soit l'éolienne est proche du radar

La directivité importante de l'antenne du radar atténue fortement le niveau des multi trajets d'ordre 1 lorsque la direction de visée radar/bateau s'écarte de l'axe de visée radar/éolienne. Cet effet d'atténuation en angle disparaît lorsque le radar/l'éolienne/le bateau (ou radar/bateau/éolienne) sont alignés à mieux que 0,5° près. Dans ce cas, on peut observer des multiples faux échos (voir la figure A3.3.1 de l'annexe 3).

Les fausses cibles apparaîtront dans la direction de l'éolienne (respectivement du bateau), reculée par rapport à la distance vraie du bateau. Ces fausses cibles seront susceptibles de créer des pistes supplémentaires accompagnant la 'vraie' piste créée par le bateau.

Les niveaux de multi trajets sont très importants lorsque le bateau est proche de l'éolienne. Il faut que le bateau soit éloigné de l'éolienne de plus de :

- 0,5 Km en latéral ($|Y_b - Y_e| > 0,5$ km), et en même temps
- 1,5 km en axial ($|X_b - X_e| > 1,5$ km),

pour obtenir des multi trajets atténués de plus de 40 dB par rapport au trajet direct.

Néanmoins, la grande dynamique de mesure des radars du CROSS et des ports les rendent généralement aptes à distinguer des échos parasites dus aux multi trajets jusqu'à -60 dB/trajet direct (au moins).

4.2.5 Conclusions pour les radars :

Pour s'affranchir de la saturation, les estimations du §4.2.1 ci-dessus conduisent à préconiser :

- d'une part, une distance minimale radar – éolienne de l'ordre de 5 Km,
- d'autre part, que le CETMEF (Centre d'étude technique maritime et fluvial) vérifie systématiquement que les radars employés par le CROSS présentent tous une dynamique supérieure à 95 dB.

Pour s'affranchir du masquage et de la génération de fausses cibles, la surface comprenant l'union de

- a) l'ensemble de la surface du parc éolien,
- b) une zone de 1 km de profondeur devant le parc éolien,
- c) une zone de 1 à 2 km de profondeur derrière le parc éolien,
- d) une zone de 0° à $+6^\circ$ et de 0° à -6° en azimut entourant chaque éolienne,

constituera une zone où la détection des gros navires sera ponctuellement perturbée par les effets de multi trajets (multiplication de fausses cibles/pistes) et où la détection des petits navires (chalutier, bateaux de sauvetage, bateau de servitude du parc éolien,...) sera en général impossible (sauf exceptions locales par absence locale de fausses cibles).

De plus, dans cette zone, la fonction d'identification et de localisation des cibles sera rendue très difficile voire impossible.

4.3 Analyse des effets perturbateurs sur les goniomètres

L'annexe 4 étudie en détails les différents effets perturbateurs potentiels sur les goniomètres.

4.3.1 Effet de masquage

L'effet de masquage maximal est obtenu lorsque le bateau émetteur, l'éolienne et le goniomètre seront alignés à mieux que quelques centièmes de degrés près.

Dans ce cas, les éoliennes, de par leur très forte signature radar, peuvent réduire le champ électromagnétique placé derrière elle par rapport à un émetteur radar que le goniomètre souhaite capter et localiser.

Cette réduction de champ va générer une zone où le goniomètre verra sa portée également réduite

La longueur d'onde de fonctionnement du goniomètre étant de l'ordre de 2 m (118 à 174 MHz), on retrouvera un effet de masquage par le mât des éoliennes qui ne s'appliquera que sur un trajet aller simple et sera d'amplitude beaucoup plus faible que les masquages observés sur le radar à cause de l'augmentation de la longueur d'onde (2 m environ au lieu de 3cm environ).

L'annexe 4 montre que l'effet de masquage, même dans les pires cas, n'affectera que très marginalement le fonctionnement des goniomètres.

4.3.2 Effet d'erreur de mesure angulaire (multi trajets)

Des erreurs de mesure angulaire sont susceptibles d'être générées par l'interférence, sur le goniomètre, des champs électromagnétiques incidents provenant :

- du trajet direct (bateau émetteur/goniomètre),
- du multi trajets d'ordre 1 (bateau émetteur/éolienne/goniomètre).

L'étude présentée en Annexe 4 permet de mettre en évidence :

- des fortes erreurs angulaires : de 1° à plusieurs dizaines de degrés lorsque le bateau se trouve dans un rayon d'environ 200 m autour de l'éolienne
- une décroissance rapide de ces erreurs en-dessous de $0,1^\circ$ lorsque le bateau est placé à plus de 200 m de l'éolienne.

Du fait des exigences opérationnelles, la perturbation apportée par l'éolienne doit être négligeable devant les $0,3^\circ$ de précision intrinsèque du goniomètre doppler.

La figure 4.4 ci-dessous fournit un exemple d'évolution de l'erreur angulaire (en degrés entre $-0,1^\circ$ et $+0,1^\circ$) constatée par le goniomètre en fonction de la distance bateau - éolienne (en km). Ce cas particulier correspond aux conditions suivantes :

- Eolienne placée à 5 Km du goniomètre
- Trajectoire particulière : Bateau s'éloignant de l'éolienne selon la trajectoire $Y_b(\text{km}) = X_b(\text{km}) - 5 \text{ km}$ avec $5 \text{ km} < X_b < 5,707 \text{ km}$ (dans le repère de la figure A4.1 en Annexe 4).

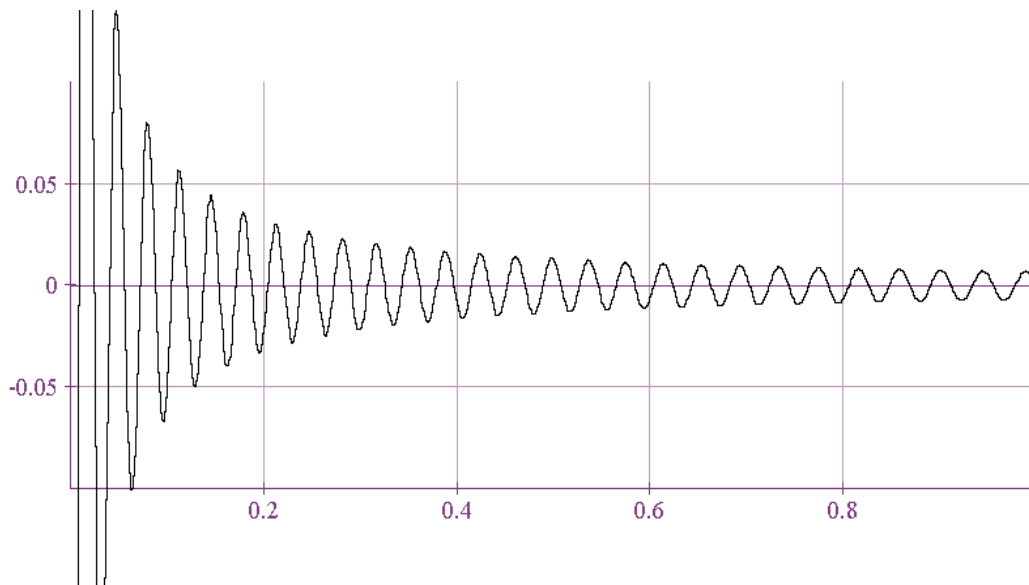


Figure 4.4 – Erreur angulaire (en $^\circ$) d'un goniomètre en fonction de la distance bateau-éolienne (en km)–

On constate, par exemple, que l'erreur générée par la présence de l'éolienne est inférieure à $0,03^\circ$ lorsque le bateau est placé à plus de 500 m de l'éolienne.

Un calcul similaire réalisé en plaçant le bateau fixe à 10 km du goniomètre et en cherchant la limite inférieure de distance entre le goniomètre et l'éolienne fournit également une distance minimale de 500 m pour une erreur $< 0,03^\circ$.

Par conséquent, on peut conclure que l'erreur générée par les multi trajets parasites causé par une éolienne proche du bateau émetteur qui perturbe la mesure angulaire des goniomètres sera négligeable ($<0,03^\circ$) dès que les deux conditions suivantes seront remplies en même temps :

- distance éolienne/goniomètre $> 0,5$ km,
- distance éolienne/bateau émetteur $> 0,5$ km.

4.4 Analyse des effets perturbateurs sur le GPS différentiel (DGPS)

4.4.1 Perturbation des communications à 300 kHz par masquage

Aucun effet sensible de perturbation par masquage n'est prévu, en effet la longueur d'onde de la porteuse du système de communication (1 km) est très grande par rapport à la taille caractéristique de l'éolienne (environ 100 m).

4.4.2 Perturbation de la réception satellite GPS (sur station de référence ou sur bateau) par multi trajet

Chaque GPS (station de référence et bateau) utilise la réception de signaux satellites placés à plus de 10° au dessus de l'horizon.

Les distances minimales,

- d'une part, entre la station de référence et l'éolienne et,
- d'autre part, entre le bateau et l'éolienne

doivent donc être chacune supérieures à 1200 m pour une hauteur d'éolienne de 160 m et un angle de 8° au-dessus de l'horizon (marge de 2° par rapport au récepteur GPS).

Cette marge de distance permettra de s'affranchir de l'effet éventuel des multi trajets satellite/éolienne/bateau et satellite/éolienne/station de référence sur chaque récepteur GPS.

5 Réduction de l'effet des parcs éoliens sur la fonction radar

Ce paragraphe explore quelques pistes permettant d'envisager une réduction de l'effet des éoliennes sur la fonction des radars maritimes.

Les solutions envisageables sont les suivantes :

Pour les éoliennes :

- Aligner le grand axe des parcs éoliens dans la direction du radar pour tenter de ménager des « couloirs » entre les éoliennes. Dans ces « couloirs » l'effet de masquage n'existe pas, seules restent les effets des multi trajets.
- Réduction de la SER des éoliennes, principalement du mât et dans des directions bistatiques dans le but de réduire les multi trajets fixes dans le temps qui limiteront la détection ou l'interprétation des cibles marines. Cette réduction pourrait être réalisée par modification locale de forme ou la pose de matériaux absorbants.
- Pose de bouées à proximité ou dans les parcs éoliens. Ces bouées devraient être munies de réflecteurs radar de SER connue pour aider les opérateurs à régler les paramètres radar adaptés à la recherche de cible prédéterminée à proximité ou au sein des parcs.

Pour les radars :

- Modification de l'algorithme d'extraction des cibles dans le fouillis de mer. La présence des éoliennes modifie fortement les paramètres statistiques du fouillis et le rend non gaussien. Cette modification ne portant que sur le logiciel d'extraction pourrait présenter un rapport coût/efficacité important.

- Définition de procédures d'emploi spécifiques du radar face aux parcs éoliens.
- Formation des opérateurs radar de CROSS à l'interprétation des images radars perturbées par les parcs éoliens.

6 Recommandations pour l'implantation des éoliennes

6.1 Face aux radars

6.1.1 Radars CROSS

Compte tenu des éléments présentés dans ce rapport, l'approche suivante est préconisée pour les obstacles éoliens :

- Dans le secteur opérationnel du radar : aucune éolienne à moins de 5km des radars.

- Coordination nécessaire si la distance prévisible radar/éolienne est comprise entre 5 et 20 km.

Le parc éolien ainsi qu'une surface périphérique au parc de 1 à 2 km de large constituera une zone où le radar verra ses performances de détection/localisation/identification fortement dégradées. Par conséquent, les parcs éoliens devront être placés à plus de 2 km des rails de circulation.

6.1.2 Radar portuaire

Compte tenu du rôle spécifique des radars portuaires pour la sécurité de la navigation dans les chenaux d'accès, il est nécessaire dans ce cas d'étendre les dispositions prévues en 6.1.1 comme suit :

- Aucune éolienne dans le secteur correspondant à l'union de :

- l'ensemble de la zone opérationnelle du radar jusqu'à 10 km du radar,
- une extension de 6° sur les deux limites angulaires de la zone opérationnelle du radar.

- Entre 10 et 20 km, une coordination sera nécessaire.

6.2 Face aux goniomètres doppler

Pour maintenir la précision de mesure angulaire des goniomètres doppler, il est nécessaire d'assurer une distance de 0,5 km entre les éoliennes et les navires.

De même, les éoliennes devront être placées à une distance supérieure à 0,5 km du goniomètre. Cette dernière recommandation s'applique donc également aux éoliennes terrestres proche du goniomètre.

6.3 Face aux DGPS

Pour maintenir la précision du DGPS, il est nécessaire d'assurer une distance de 1,2 km entre les éoliennes et les navires.

De même, les éoliennes devront être placées à une distance supérieure à 1,2 km de toute station de référence d'un système DGPS. Cette dernière recommandation s'applique donc également aux éoliennes terrestres proche de la station de référence d'un système DGPS.

7 Bibliographie :

- [1] Rapport de la CCE5 n° 1 : *perturbations du fonctionnement des radars météorologiques par les éoliennes*
- [2] Rapport de la CCE5 n° 2 : *perturbations du fonctionnement des radars fixes de l'aviation civile et de la défense les éoliennes*
- [3] A. Theil, L. J. van Ewijk : *Radar performance degradation due to the presence of wind turbines* - IEEE RADAR 2007 -17-20 Avril 2007
- [4] M. Howard, C. Brown : *Results of the electromagnetic investigations and assessments of marine radar, Communications and positioning system undertaken at the North Hoyle wind farm by QinetiQ and the Maritime and Coastguard Agency* - QinetiQ/03/00297/1.1 - MCA MNA 53/10/366 du 15 Novembre 2004
- [5] Hammerle, R. : *Factors limiting the accuracy of Doppler and Adcock direction finding systems* - Passive Direction Finding, IEE Colloquium on - Publication Date: 31 Jan 1989
- [6] *SCANTER 2001 Transceiver - Product Specification* - TERMA document n°262001 DP

8 Sigles et acronymes :

ASC : Auto-Adaptative Sensivity Control [6]

CETMEF : Centre d'Etude Techniques Maritimes et Fluviales

DGPS : Differential Global Positioning System

CROSS : Centres Régionaux Opérationnels de Surveillance et de Sauvetage en mer

LI : Longueur d'impulsion (radar)

PRF : Pulse Repetition Frequency - Fréquence de répétition des impulsions (radar)

SER : Section Efficace Radar

9 Annexes

- 1 Couverture des radars portuaires et des CROSS
- 2 Caractéristiques techniques et dégradations tolérables des radars et autres systèmes de radionavigation traités dans ce rapport
- 3 Analyse des effets perturbateurs sur les radars
- 4 Analyse des effets perturbateurs sur les goniomètres

ANNEXE 1 : Couverture des radars portuaires et des CROSS

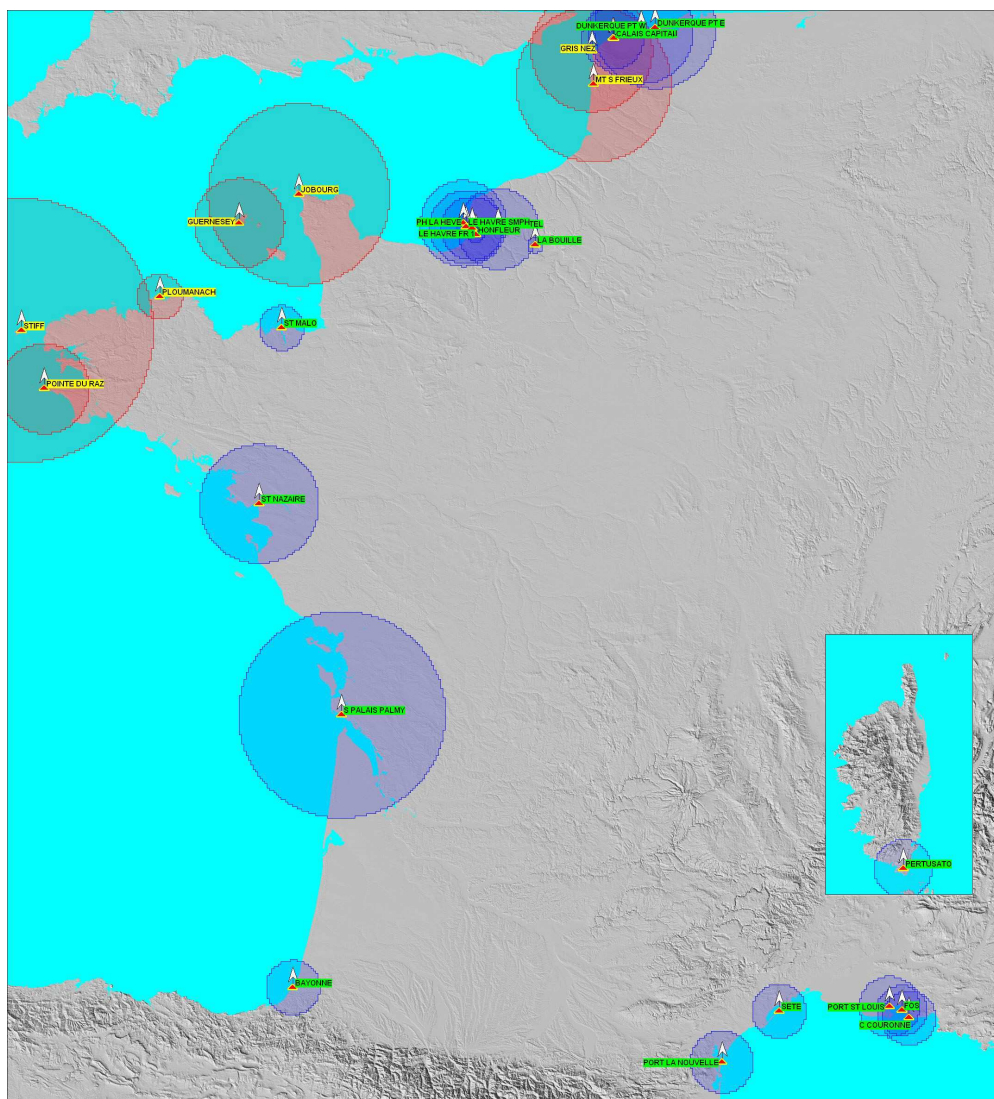


Figure A1.1 - Couverture des radars portuaires et des CROSS

ANNEXE 2 : Caractéristiques techniques et dégradations tolérables des radars et autres systèmes de radionavigation traités dans ce rapport

Les études présentées dans ce rapport sont fondées sur les caractéristiques techniques de deux radars opérés par PNM. Les caractéristiques techniques ainsi que les dégradations tolérables dans le secteur opérationnel telles qu'elles ont été exprimées par le CETMEF sont fournies dans cette annexe.

On considère dans ce rapport que les radars de PNM présentent jusqu'à trois types de secteur angulaire d'observation (repéré par rapport au Nord géographique : 0°) :

- Secteur(s) opérationnel(s) : secteur dans lequel le radar doit conserver une capacité opérationnelle quasi-inchangée (détection, pistage, trajectographie, ...), seules les perturbations décrites dans le tableau A2.1 sont tolérables.
- Secteur(s) de servitude : secteur dans lequel le radar acquiert des informations lui permettant de se régler ou de s'étalonner. Aucune performance opérationnelle n'est spécifiée dans ce secteur.
- Secteur(s) inutilisé(s) : dans ce secteur aucune information n'est utile pour le radar.

Dans le secteur inutilisé des radars la notion de dégradation n'a aucun sens. En particulier les éventuels effets de duplication de cible par multi trajets faisant apparaître des cibles « fantômes » dans ce secteur sont réputés non gênant.

Les tableaux A2.1 et A2.2 ci-dessous indiquent les dégradations tolérables dans le secteur opérationnel telles qu'elles ont été exprimées par le CETMEF.

A2.1 Radar du Stiff à Ouessant

Caractéristiques techniques

- Type d'émetteur /récepteur / TERMA SCANTER 2001
 - Emetteur : Mono-fréquence
 - Fréquence 9170 MHz ou 9438 MHz
 - Puissance : 4 ou 25 kW
 - PRF : 400 à 1200 Hz
 - LI : 50 à 1000 ns
 - Facteur de bruit en réception : 4 dB environ
 - Temps de re-sensibilisation de l'ASC : 75 ns, correspondant à une distance de 12 m environ
- Antenne EASAT 2526 X
 - Gain de l'antenne : 45 dB
 - Diagramme en gisement :
 - Lobe principal : 0,33° à -3dB
 - 1^{er} Lobe secondaire : - 27 dB à + et - 1° du lobe principal
 - 2^{ème} lobes secondaires : -32dB à+ ou - 5,5° du lobe principal
 - Diagramme en site
 - Lobe principal: 1,8° à -3dB
- Portée sur cible de 300m² : 70 km environ
- Altitude antenne /haute mer : 132 m
- Secteur opérationnel : 0°, 360° avec une réduction de portée tolérable de 10% sur les azimuts 70° à 150°

Dégradations tolérables des appareils de localisation dans le secteur opérationnel de la station du Stiff à Ouessant

Station du Stiff à Ouessant	Portée maximale sur $\square = 300 \text{ m}^2$	Résolution à 3dB sur la localisation distance	Zone masquée tolérable	Localisation angulaire	Localisation Spatiale (GPS seulement)
Type d'appareil					
Radar Scanter 2001 de TERMA antenne EASAT EA 2526 DF	36 milles Réduction de portée tolérable de 10% sur azimuth 70° à 150°	Pas de dégradation acceptable sauf pour les échos du secteur 70° à 150°	en distance : de 10 à 30 nautiques sur le secteur 70° à 150°	Résolution angulaire : 0,33° sans dégradation	
Goniomètre PA 100 Rohde et Schwarz (antenne AP116)	Sans objet	Sans objet	De 10 milles à 30 milles en distance Et de 70° à 150°	Résolution angulaire : 0,3°	
GPS Différentiel (DGPS)	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet	Erreur maximale en longitude : 0 m. latitude : 0 m. altitude : 0 m.

Tableau A2.1 – Dégradations tolérables des appareils de localisation dans le secteur opérationnel de la station du Stiff à Ouessant

A2.2 Radar de Honfleur port du Havre

Caractéristiques techniques

- Emetteur : PHILIPS type GR 290
 - Fréquence 9 GHz environ
 - Puissance : 25 kW
 - PRF : 3000 Hz à 4000 Hz
 - LI : 50 ns \pm 10 ns, 100 ns, 200 ns
 - Portée : 25 km
 - Facteur de bruit en réception : <12 dB environ
 - Temps de re-sensibilisation du récepteur : inconnue (estimation : 100 ns, soit environ 15 m)
- Antenne CHL S38 (<http://www.chl.nl/PDF/AntennaSummary.pdf>)
 - Gain de l'antenne : 36dB
 - Ouverture en gisement à -3 dB: 0,24°
 - 1^{er} Lobes secondaires : - 27 dB à + et - 1° du lobe principal
 - 2^{ème} lobes secondaires : -32dB à+ ou - 5,5° du lobe principal
 - Ouverture en site : de -10° à +7° à -3 dB
- Secteur opérationnel : portée 50 Km
 - de 190° à 320° / portée 50 Km et
 - de 60° à 90° / portée 15 Km
- Altitude antenne /haute mer : 45 m

Dégradations tolérables du radar de Honfleur port du Havre

Station de Rouen-Honfleur	Portée maximale sur $\square = 300 \text{ m}^2$	Résolution à 3dB sur la localisation distance	Zone masquée tolérable	Localisation angulaire
Type d'appareil				
Radar PHILIPS type GR 290	Aucune dégradation dans le secteur opérationnel	Aucune dégradation dans le secteur opérationnel	Dans les secteurs inutilisés exclusivement	Résolution angulaire : $0,3^\circ$ sans dégradation

Tableau A2.2 – Dégradations tolérables sur le radar de la station de Rouen-Honfleur

ANNEXE 3 : Analyse des effets perturbateurs sur les radars

Cette annexe analyse et quantifie les effets de masquage et de génération de fausses cibles qui seraient susceptibles de générer une éolienne sur les radars maritimes.

Les effets perturbateurs sur les radars sont calculés ci-dessous en réalisant les calculs sur une seule éolienne test définie ci-dessus.

En effet, sachant, d'une part, que les radars CROSS et de port présentent :

- un faisceau étroit en azimut (0,3° environ)
- une résolution distance comprise entre 8 m et 150 m

et que, d'autre part, dans les parcs éoliens, les éoliennes sont distantes de plusieurs centaines de mètres l'une de l'autre, à chaque instant, le radar ne verra qu'une seule éolienne dans chaque case distance/angle et cela jusqu'à une distance de 100 km environ.

Les calculs de quantification des effets perturbateurs des radars sont donc effectués sur une seule éolienne. Les effets perturbateurs obtenus sur une éolienne seront répétés autant de fois que le faisceau radar interceptera d'éolienne lors de sa rotation et de son exploration en distance.

On remarque que l'altitude du radar de la station du Stiff (132 m) est tout à fait comparable avec l'altitude de l'axe rotor des éoliennes envisagée (100 m pour la 5M, 80 m pour la MM82).

A titre informatif, on constate que :

- la distance d'inter visibilité radar entre le radar du Stiff (altitude : $H_1 = 132$ m) et le haut de la pale de l'éolienne REpower 5M (altitude $H_2 = 160$ m environ) est de 100 km environ (54 nautiques).
- la distance d'inter visibilité maximale entre la surface de la mer et le radar du Stiff atteint 47 km (25 nautiques)

La formule utilisée est :

$$D_{inter} = \left(2 R_T H_1\right)^{0.5} + \left(2 R_T H_2\right)^{0.5} \quad (1)$$

avec un rayon terrestre R_T de 8500 Km prenant en compte les effets moyens de réfraction pour les ondes électromagnétiques.

Les plus grosses éoliennes, qui présentent une altitude de la nacelle de l'ordre de 100 m, seront donc visibles dans tout le domaine de portée nominale (36 nautiques) du radar du Stiff.

A3.1 Quantification des effets de masquage

Les éoliennes, par leur très forte signature radar, peuvent réduire fortement, le champ électromagnétique présent à l'arrière. Cette réduction de champ va générer une zone où le radar verra ses capacités de détection dégradées.

A3.1.1 Masquage par un mât d'éolienne

On utilise le formalisme exposé dans [3] qui utilise une comparaison entre la taille de l'obstacle (mât de l'éolienne) et la zone de Fresnel.

Les hypothèses sous-jacentes à ce calcul sont :

- Modèle d'optique physique (réflexion + diffraction).
- Modèle bidimensionnel : la hauteur du mât est considérée comme très grande devant la longueur d'onde du radar
- Limitation des possibilités de calcul dans la zone de champ lointain derrière l'éolienne (soit environ 3 Km au-delà de l'éolienne)

On calcule l'atténuation (en dB) du signal radar en aller et retour obtenu derrière un mât cylindrique de 7 m de diamètre à 9,2 GHz en fonction de :

- La distance radar/éolienne (abscisse en km.)

- La distance radar/bateau (ordonnées en km)

L'atténuation calculée représente un pire cas, correspondant à l'atténuation des capacités de détection radar appliquée à un bateau ponctuel placé sur l'axe radar-éolienne.

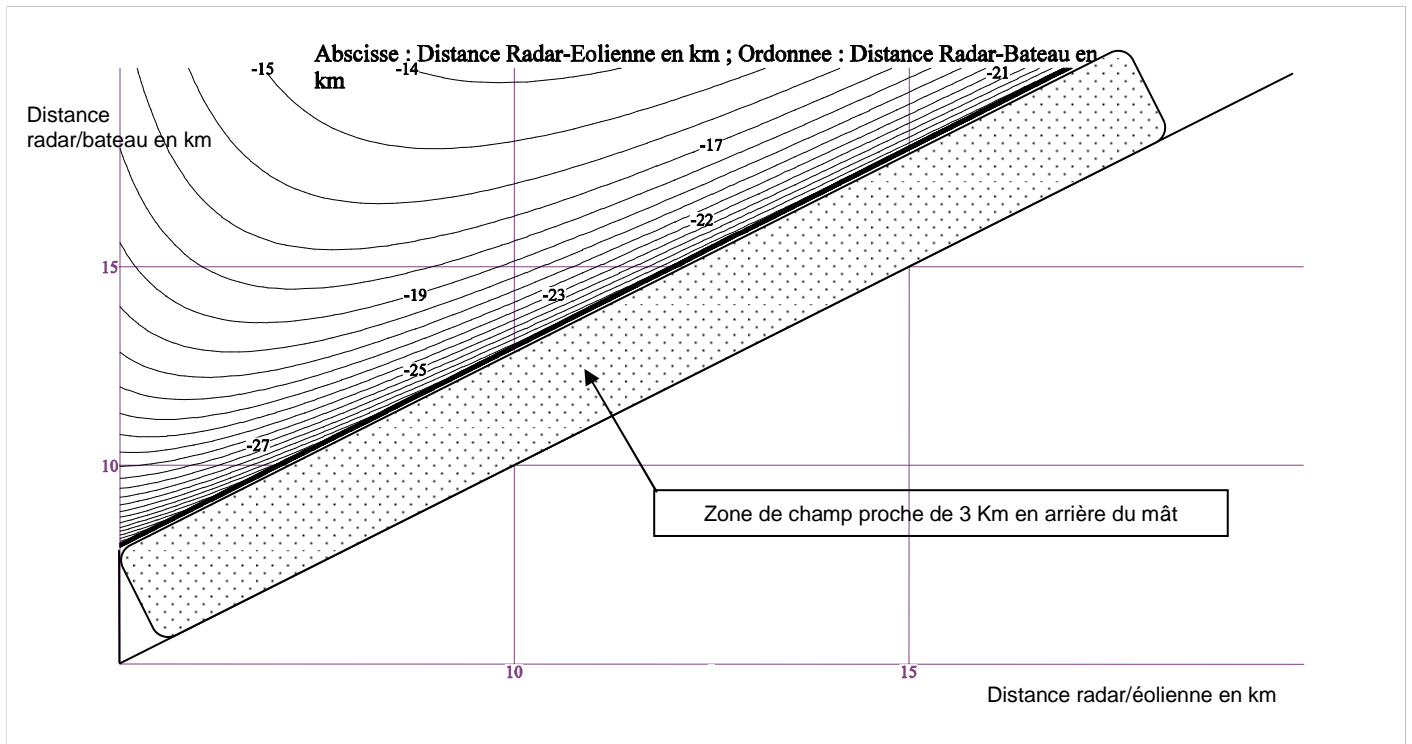


Figure A3.1 – Atténuation maximale en dB du signal radar en aller retour derrière un mât de 7 de diamètre – (Fréquence radar =9,2 GHz - Iso atténuation : pas de 1 dB)

La figure A3.1 permet de constater plusieurs effets :

- fortes atténuations (20 dB et plus) pour des positions de l'éolienne à moins de 20 km du radar. Le radar présentera les mêmes capacités de détection qu'en l'absence d'éolienne mais sur une cible de SER 20 dB (et plus) supérieure.
- La valeur absolue de ces atténuations augmente très rapidement lorsque la distance radar-éolienne (D_{re}) ou bien lorsque la distance radar-bateau (D_{rb}) décroît. La proximité de l'éolienne du radar ou de la cible est donc catastrophique pour les capacités de détection du radar.
- Cette atténuation n'existe que dans l'ombre géométrique du mât, soit un angle de pénombre α_{pm} très faible tel que :

$$\alpha_{pm} = \frac{7}{D_{re}}$$

- pour $D_{re} = 5$ km, $\alpha_{pm} = 1,4$ mrd, soit $0,08^\circ$
- pour $D_{re} = 10$ km, $\alpha_{pm} = 0,04^\circ$

La droite inférieure en trait gras formalise la limite inférieure de validité du calcul correspondant aux conditions de champ lointain ($D_{brKM} = D_{reKM} + [(2 \text{ PHI}^2)/(1000 \cdot \lambda)]$). En dessous de cette limite, l'atténuation fluctue spatialement très rapidement en fonction des interférences constructives et destructives des différentes contributions.

A3.1.2 Masquage par une pale

La pale de l'éolienne test choisie étant de corde maximale 4,6 m (REpower 5M), on observe sur la figure A3.2 des niveaux de masquage maximaux assez voisins de ceux présentés en figure A3.1 pour les effets de masquage des pales.

Néanmoins ce masquage par les pales :

- n'est effectif que durant moins de 4% du temps (taux de remplissage du rotor)
- présente une fréquence de répétition inférieure à 0,5 Hz.

Le système radar, intégrant dans le temps les signaux provenant des cibles, ne sera donc pas perturbé et le masquage par les pales est négligeable en moyenne (perte moyenne de 0,3 dB en aller-retour)

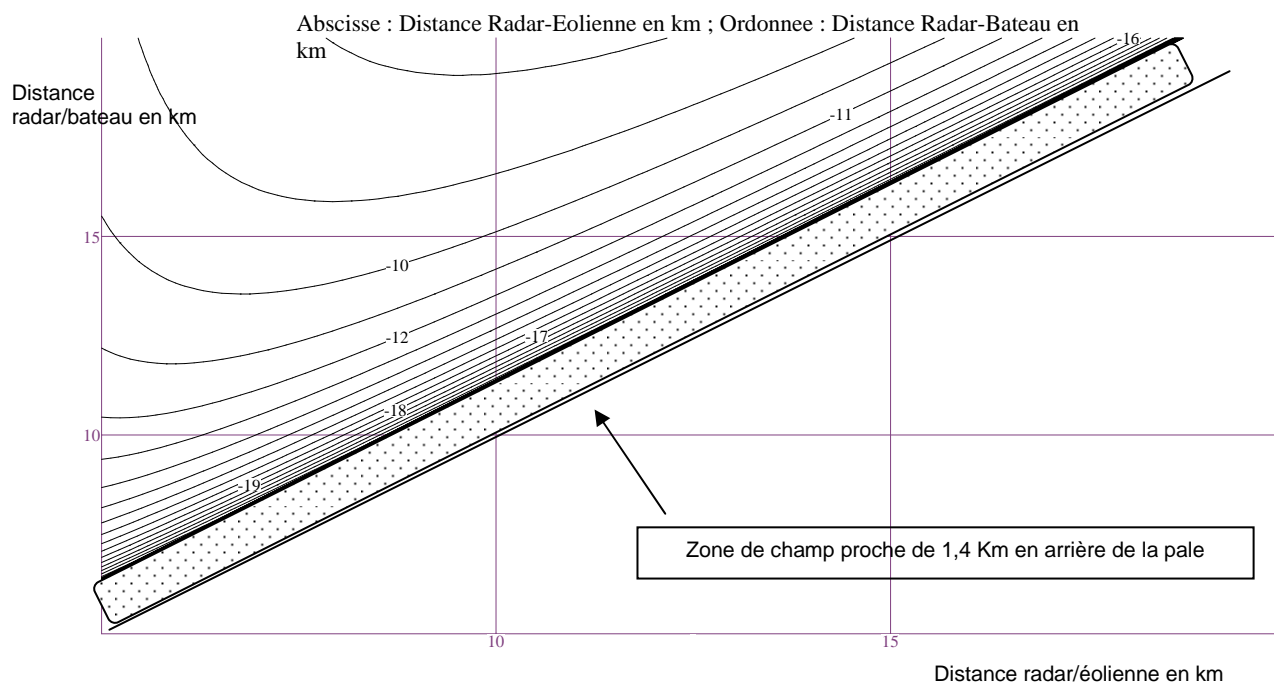


Figure A3.2 - Atténuation maximale en dB du signal radar en aller retour derrière une pale de 4,6 m de corde – (Fréquence radar = 9,2 GHz - Iso atténuation : pas de 1 dB)

A3.1.3 Masquage global :

La présence d'une éolienne créera donc deux zones de masquage d'atténuation maximale de valeur proche et d'atténuation moyenne très différente :

- Une zone de masquage fixe de forte atténuation (20 dB et plus) créée par le mât qui s'étendra sur plusieurs kilomètres derrière l'éolienne et sur un angle vu du radar de l'ordre de quelques centièmes de degré de large.
- Une zone de masquage à éclipse créée par le diamètre du rotor s'étendant sur plusieurs kilomètres en distance derrière l'éolienne sur un angle vu du radar de l'ordre de quelques degrés de large. Ce deuxième masquage est beaucoup moins intense mais plus étalé car l'amplitude moyenne de l'atténuation est de l'ordre du carré du taux de remplissage du rotor soit une atténuation en aller/retour de $(1,04)^2$, soit, de l'ordre de 0,34 dB en moyenne temporelle. Un parc éolien de 10 éoliennes alignées sur l'axe d'observation du radar conduira à une atténuation de l'ordre de 3,5 dB.

La figure A3.1.3 indique les valeurs angulaires en degrés de ces deux zones de masquage

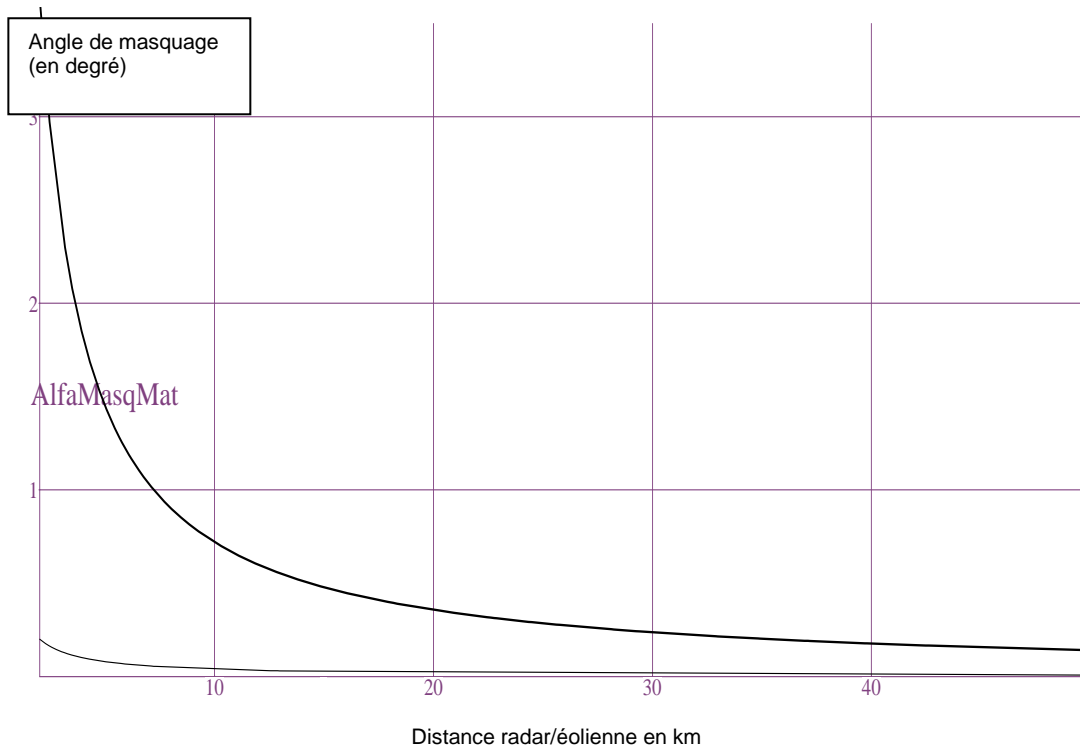


Figure A3.1.3 – Angles en degrés des deux zones de masquage (masquage mâât : trait fin, masquage rotor : trait gras)

La figure A3.1.4 ci-dessous indique la répartition dans un espace 2D (la surface de la mer) des différentes zones de masquage créées par les éoliennes.

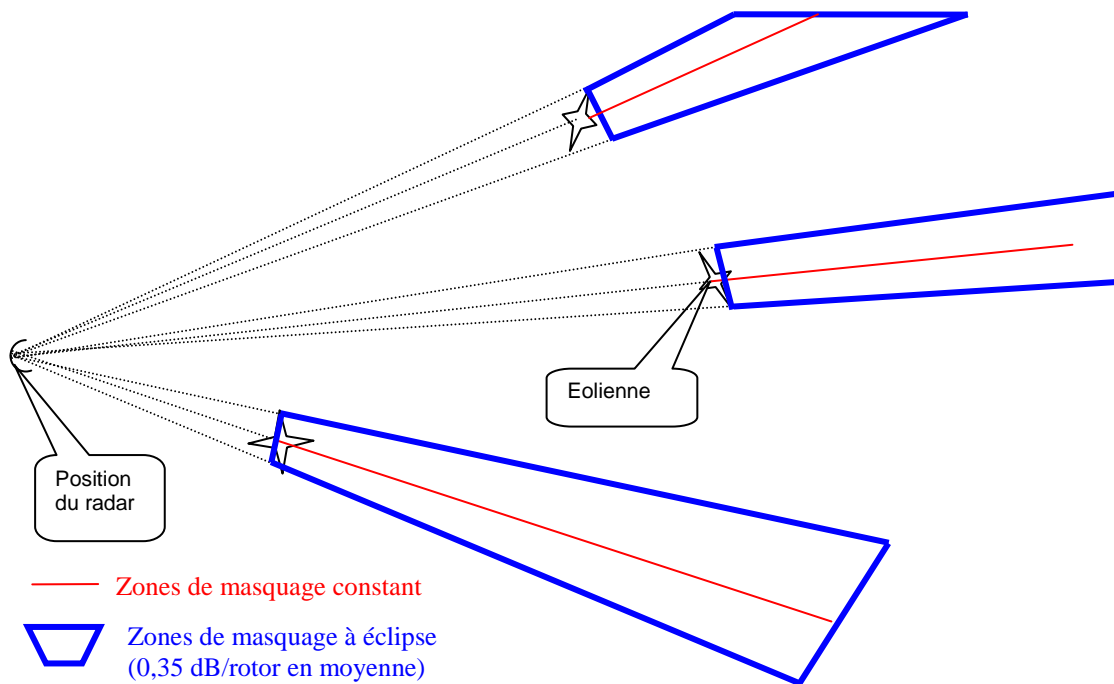


Figure A3.1.4 - Vue globale des zones de masquage fixe et à éclipse générées par les éoliennes (le dessin n'est pas à l'échelle)

Hors des zones matérialisées sur la figure A3.1.4, les éoliennes ne masqueront pas les cibles.

A3.2 Quantification de l'effet d'aveuglement par fausses cibles

Les éoliennes génèrent des échos fixes dans le lobe principal du radar mais génèrent aussi des échos parasites (ou fausses cibles) par les lobes secondaires de l'antenne du radar. Ces échos parasites, apparaissent dans la direction d'observation du radar et à la même distance que l'éolienne.

Cette perturbation apparaîtra lorsque l'écho parasite (éolienne) sera placé à la même distance qu'un écho que l'on cherche à détecter. L'écho utile de la cible sera alors confondu spatialement avec l'écho parasite dû à l'éolienne qui sera capté par le radar par l'intermédiaire des lobes secondaires de l'antenne radar.

Il est possible d'écrire la relation suivante (2) qui exprime le rapport entre la puissance du signal capté par le radar provenant du bateau et celle provenant de l'éolienne (rappel : l'éolienne et le bateau sont à la même distance et séparé angulairement de 1° (respectivement $5,5^\circ$)) correspondant à la position des 1^{er} et 2^{ème} lobes secondaires de l'antenne radar)

$$\frac{S_b}{S_e} = \frac{\sigma_b \cdot (N_{ls})^2}{\sigma_e} \quad (2)$$

Dans laquelle :

σ_i : représente la SER de l'objet i en m^2

S_i : représente la puissance du signal provenant de l'objet i

L'indice i :

- = b : désigne le bateau
- = e : désigne l'éolienne

N_{ls} : Niveau de Lobe Secondaire : désigne la réduction apportée par la captation par les lobes secondaires par rapport au lobe principal (sans dimension)

Pour assurer une détection correcte du bateau en présence d'une éolienne à la même distance et à un gisement décalé de 1° (respectivement $5,5^\circ$), il est nécessaire que le rapport $\frac{S_b}{S_e}$ soit

constamment supérieur à un seuil de détection S_{detec} de 10 ou 13 dB (facteur 10 à 20).

La formule (2) peut donc se mettre sous la forme (3) pour déterminer quelle est la SER minimale d'un bateau détectable dans ces conditions

$$\sigma_b \geq \frac{\sigma_e S_{\text{detec}}}{(N_{ls})^2} \quad (3)$$

Application numérique : pour une éolienne de $SER = 50\,000\,m^2$, un Niveau de 1^{er} Lobe Secondaire (N_{ls}) de 27dB (coefficient de 500), et un seuil de détection de 20 (13 dB), la SER minimale du bateau apte à être détectée est $20\,m^2$

Cet effet sera donc marginalement gênant car il interdira ponctuellement (en distance et en angle la détection de bateaux dont la signature est inférieure à $20\,m^2$ à proximité de chaque éolienne.

En l'absence de cible de type bateau, ces fausses cibles générées par les éoliennes seront toujours présentes avec une SER de l'ordre du m^2 .

Il y aura a priori autant de fausses cibles que de nombre d'éoliennes X 2 (nombre de lobe secondaire à 27 dB et $\pm 5,5^\circ$ ou $\pm 3^\circ$).

Par leur nombre, ces fausses cibles contribueront à brouiller l'analyse de l'opérateur sur la présence/absence de vraies cibles sur les côtés ou au sein du parc éolien.

Ces effets, dus aux 1^{er} et 2^{ème} lobes secondaires de l'antenne, seront observés d'une façon similaire avec l'antenne S38 du radar de port Rouen-Honfleur car le diagramme de l'antenne présente

également des lobes secondaires de -27 dB dans les $\pm 1^\circ$ qui entourent le lobe principal et de -30 dB vers $\pm 5,5^\circ$ autour du lobe principal.

Cet effet s'applique exclusivement aux radars.

A3.3 Dégradation de la localisation distance des radars

Cet effet sera créé par les éventuels multi trajets avec réflexion sur les éoliennes pouvant générer dans certaines conditions :

- un étalement temporel de la réponse de la cible entraînant donc une dégradation de la résolution distance des radars sur la cible utile.
- des duplications des cibles existantes qui peut introduire des confusions entre cibles réelles et multi trajets.

Un exemple de l'effet de duplication d'écho est donné par l'illustration suivante figure A3.3.1 (§ figure 6-36 de [4]).

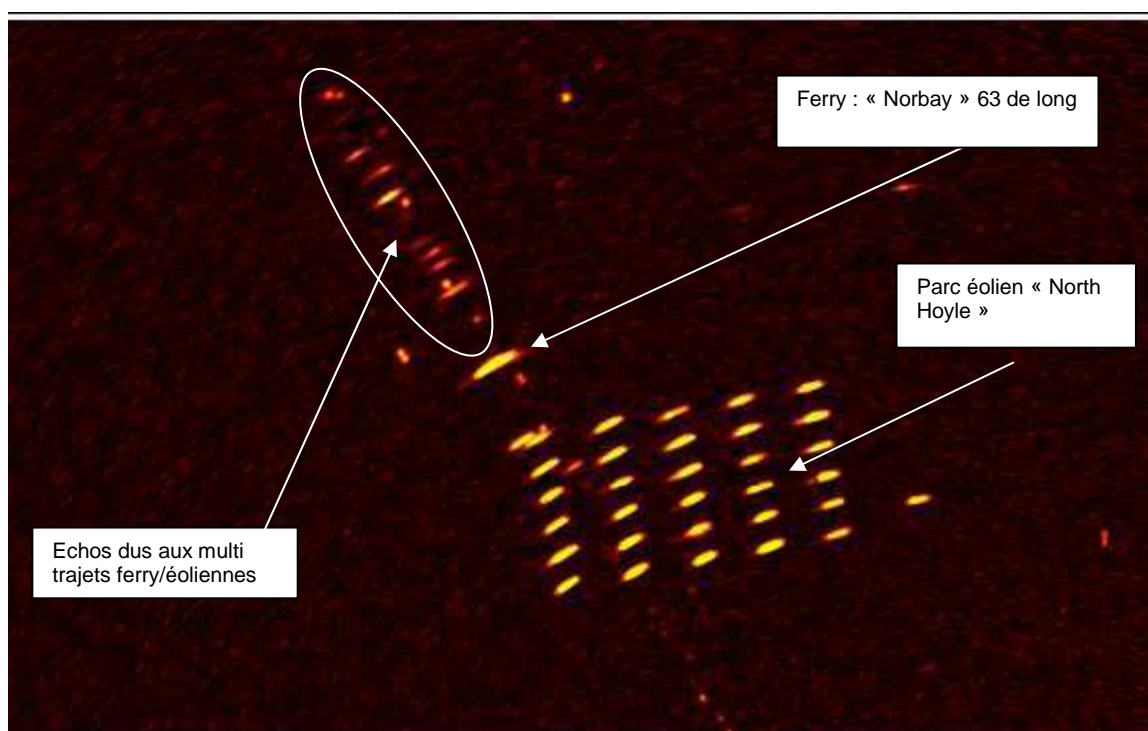


Figure A3.3.1 – Illustration de l'effet de duplication de cible par multi trajets –Image radar brute d'un parc éolien de taille 3,1 km (L) par 1,8 km (l) en présence d'un ferry placé à 0,9 km en arrière du parc.

A3.3.1 Classification des multi trajets

Dans le paragraphe suivant, les lettres majuscules B, R, E représenteront respectivement le Bateau (cible à détecter), le Radar, et l'Eolienne (considérée comme génératrice de réflexions parasites). On distinguera les différents ordres des multi trajets par leur nombre de réflexion sur les cibles.

- Trajet d'ordre 0 : appelé souvent « Trajet direct » : RBR
- Trajets d'ordre 1 : une réflexion parasite sur l'éolienne
 - RBER
 - REBR

Ces deux trajets d'ordre 1 présentent le même niveau d'atténuation par rapport au trajet direct et le même retard selon le principe du retour inverse de la lumière. Les calculs ne prendront en compte que le trajet RBER qui sera

multiplié par un facteur 4 (6dB) pour tenir compte de la combinaison en phase avec le trajet REBR.

- Trajets d'ordre 2 : deux réflexions parasites
 - RBEBR
 - REBER

Ces trajets d'ordre 2 sont généralement d'amplitude beaucoup plus faible que les trajets d'ordre 0 ou 1, néanmoins la figure 6 illustre bien un multi trajets d'ordre 2 du type RBEBR de très forte amplitude car :

1. le flanc du ferry ($L=63\text{m}$ X $h=10\text{m}$ environ) agit comme un véritable miroir électromagnétique réfléchissant la signature des éoliennes. Ce qui explique que les plots issus de ces multi trajets présentent une extension angulaire proches de celle des éoliennes. Ce sont les images des éoliennes réfléchies par le flanc du ferry
2. Le lobe principal du radar éclaire à la fois la ligne des 6 éoliennes et le ferry.

Les hypothèses communes aux 3 calculs ci-dessous sont (§ figure A3.3.2):

- SER monostatique et bistatique du bateau = 10 000 m²
- SER bistatique éolienne : 50 000 m²,
- $X_e = 5\text{km}$, $Y_e = 0\text{ m}$
- Le bateau est placé dans le domaine : $4,5\text{ km} < X_b < 7\text{ km}$ et $-0,1\text{ km} < Y_b < 0,3\text{ km}$
- L'antenne radar vise en permanence le bateau quelle que soit sa position dans le plan $\langle X_r, 0, Y_r \rangle$. Ceci correspond à la mission du radar du CETMEF qui est de localiser en permanence les bateaux et non pas les éoliennes.

Le diagramme de l'antenne radar inclut une modélisation des lobes secondaires au 1^{er} ordre

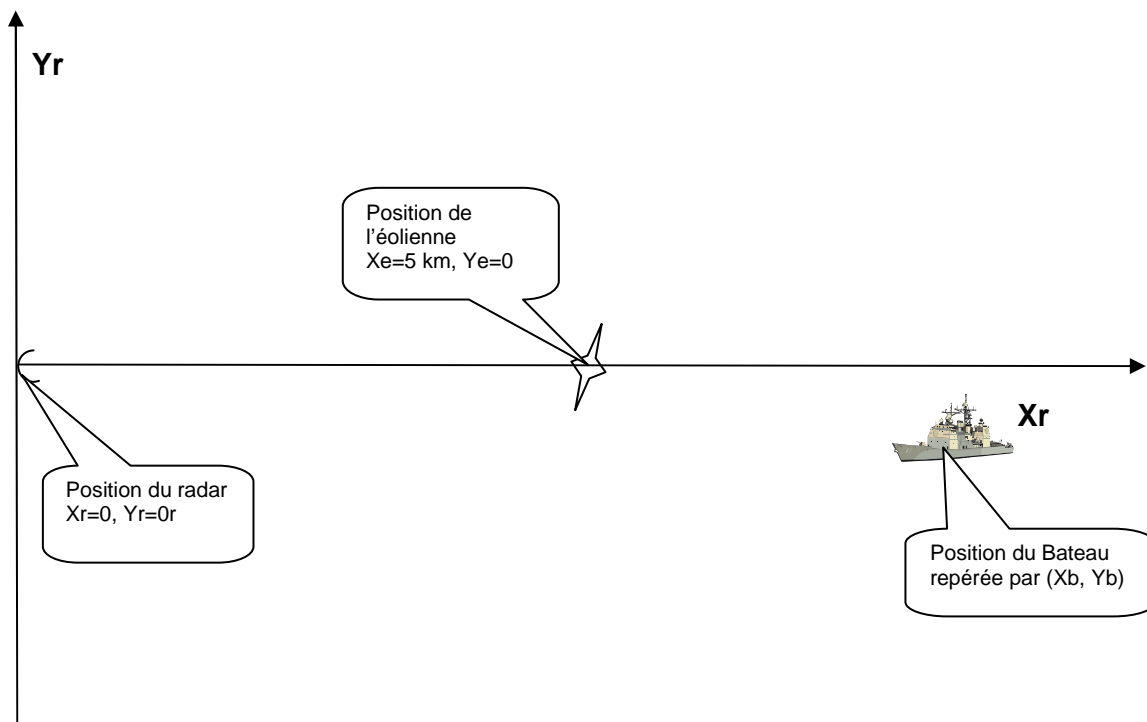


Figure A3.3.2 – Paramètres géométriques pour le calcul des multi trajets radar/éolienne/bateau/radar –

Ces hypothèses, et en particulier le fait de placer l'éolienne à 5km du radar ainsi que les forts niveaux de SER du bateau et de l'éolienne qui ont été choisis, conduisent à considérer les cas

exposés ci-dessous comme un pire cas pour l'effet des multi trajets Dans la réalité on constatera des effets moins importants en moyenne.

Les figures A3.3.3, A3.3.4 et A3.3.5 fournissent le rapport en dB entre la puissance du multi trajet considéré et la puissance du trajet direct, ce qui fournit une estimation de la puissance de nuisance de ce multi trajets sur l'écran radar.

A3.3.2 Calcul des multi trajets d'ordre 1 (RBER+REBR)

La figure A3.3.3 permet d'observer :

- Une zone ($-0,05\text{km} < Y < 0,05 \text{ km}$ environ) où les niveaux de trajets multiples sont très forts ($> -20 \text{ dB}$) lorsque le bateau et l'éolienne sont tous les deux dans le lobe principal du radar et à moins de 2km l'un de l'autre.
- Plusieurs zones ($Y > 0,05 \text{ km}$ et $Y < -0,05 \text{ km}$) où l'effet bénéfique de la finesse du lobe principal du radar atténue fortement ($> 40 \text{ dB}$) les multi trajets dès que l'éolienne est éclairée par les lobes secondaires de l'antenne.

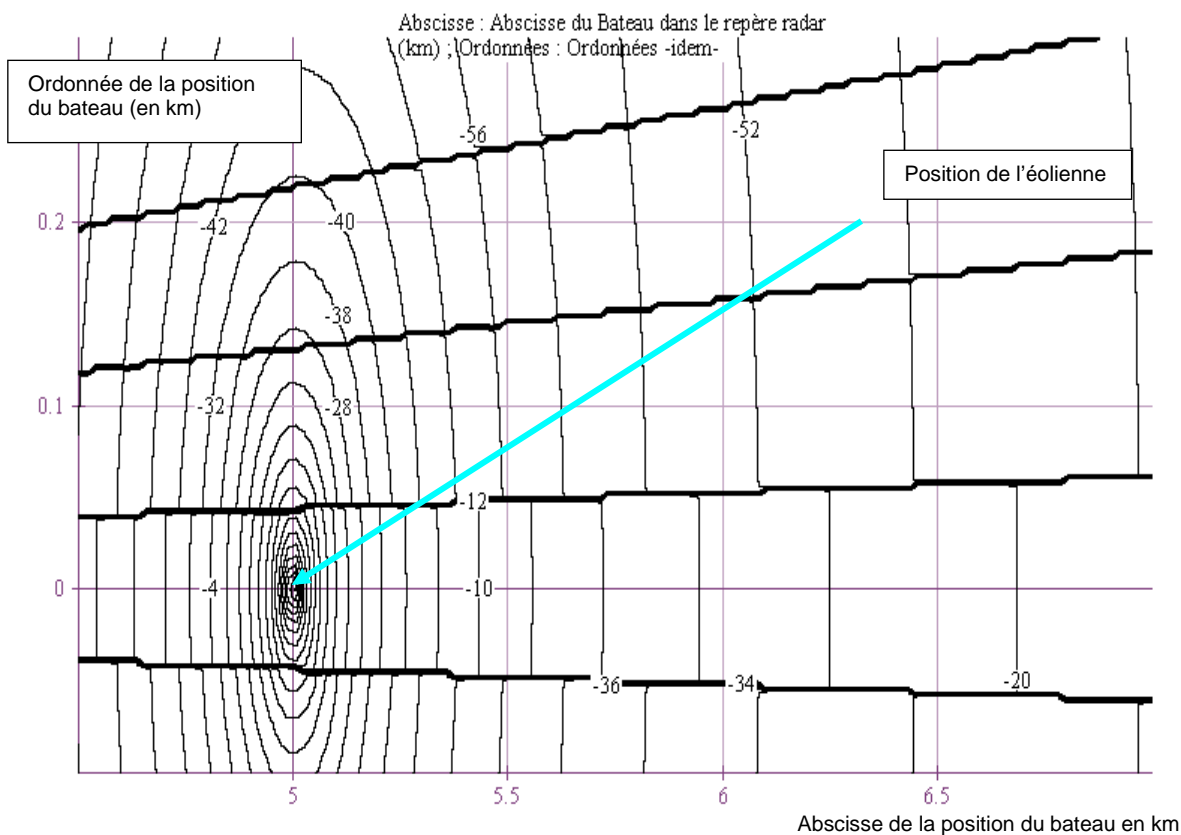


Figure A3.3.3 - Rapport en dB de la somme des 2 multi trajets d'ordre 1 (RBER+REBR) par rapport au niveau du trajet direct en fonction de la position du bateau /éolienne (l'éolienne est placée en $X=5\text{km}$, $Y=0$)

A3.3.3 Calcul du muti trajets d'ordre 2 (REBER)

Dans la Figure A3.3.4 ci-dessous, on constate :

- le même effet de découpe de l'espace par le lobe principal du radar (qui par hypothèse, suit toujours le bateau) que dans la figure 8 et pour les mêmes raisons.
- des niveaux relatifs du multi trajets REBER d'ordre 2 nettement plus faible (-23 dB environ à $X=5,5 \text{ km}$, $Y=0$) que la somme des multi trajets RBER+REBR. Cette atténuation est due principalement au nombre de réflexion propagation qui augmente d'une unité (ordre 2/ordre1) et atténue fortement le niveau du multi trajet.

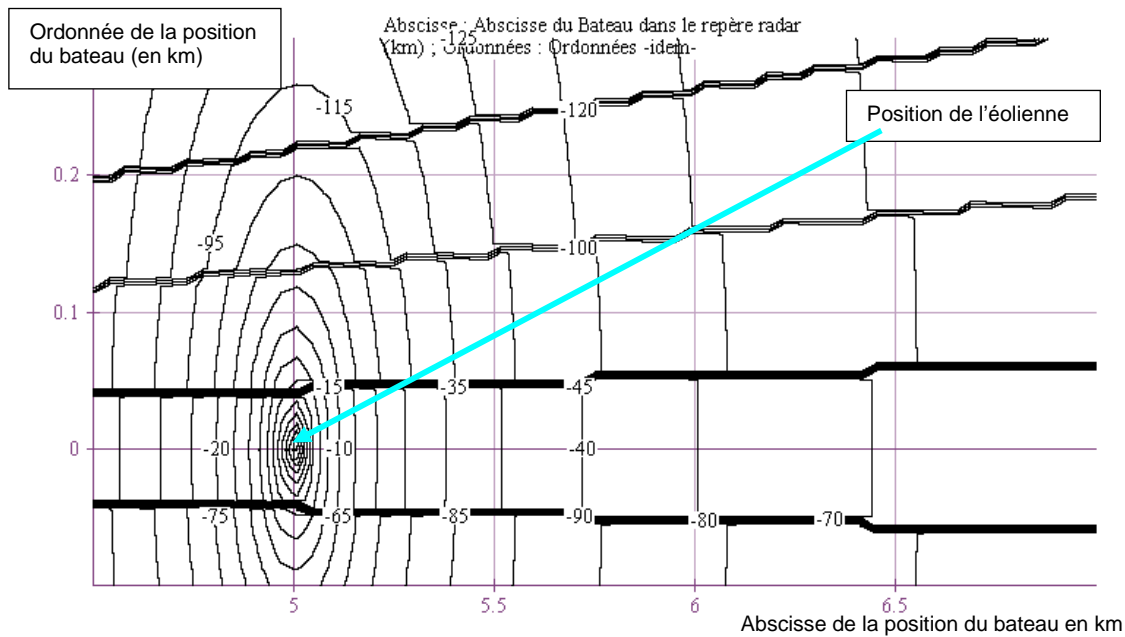


Figure A3.3.4 Niveau relatif/trajet direct en dB du multi trajets d'ordre 2 REBER en fonction de la position du bateau /éolienne ($X_e=5\text{km}$, $Y_e=0$)

A3.3.4 Calcul du muti trajet d'ordre 2 (RBEER)

La figure A3.3.5 permet d'observer que :

- L'effet de découpe spatiale attaché à la finesse du lobe principal n'intervient plus. En effet ce multi trajets commence (RB...) et finit (...BR) par un trajet entre le radar et le bateau. Le radar ayant pour mission de suivre en permanence le bateau celui-ci est toujours au centre du lobe principal du radar et il n'y a donc aucune rejection du multi trajets par l'antenne.
- Dans la zone proche de l'éolienne, les niveaux du multi trajets RBEER sont proches de celui du multi trajets REBER.
- Hors de cette zone proche ($Y > 0,05\text{km}$ et $Y < -0,05\text{ km}$) les niveaux s'atténuent lentement avec la distance.

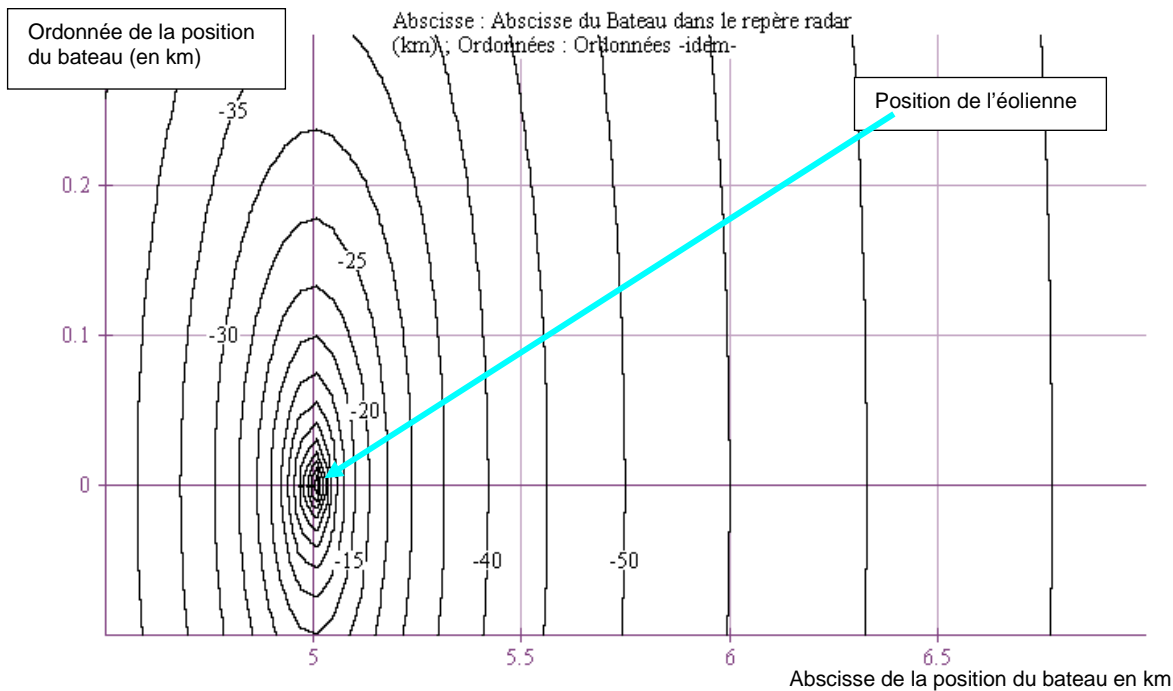


Figure A3.3.5 : Niveau relatif/trajet direct en dB du multi trajets d'ordre 2 (RBEBR) en fonction de la position du bateau /éolienne (l'éolienne est placée en $X=5\text{km}$, $Y=0$)

A3.3.5 Conclusion quantitative sur les multi-trajets

La valeur relative de la puissance de tous les multi trajets/trajet direct augmente lorsque :

- soit le bateau est proche de l'éolienne
- soit l'éolienne est proche du radar

La directivité importante de l'antenne du radar atténue fortement le niveau des multi trajets lorsque la direction de visée radar/bateau s'écarte de l'axe de visée radar/éolienne (sauf multi trajets RBEBR).

Cet effet d'atténuation en angle disparaît lorsque le radar/l'éolienne/le bateau (ou radar/bateau/éolienne) sont alignés à mieux que $0,5^\circ$ près. Dans ce cas, on peut observer des multiples faux échos comme sur la figure 6 où la coque du ferry vue de côté semble se comporter comme un miroir réfléchissant les éoliennes (effet dû probablement à un RBEBR).

Les niveaux de multi trajets sont très importants lorsque le bateau est proche de l'éolienne. Il faut que le bateau soit éloigné de l'éolienne de plus de :

- 0,5 Km en latéral ($|Y_b - Y_e| > 0,5 \text{ km}$), et en même temps
- 1,5 km en axial ($|X_b - X_e| > 1,5 \text{ km}$),

pour obtenir des multi trajets atténués de plus de 40 dB par rapport au trajet direct.

Néanmoins, la grande dynamique de mesure des radars du CROSS et des ports les rendent aptes à distinguer des échos parasites dus aux multi trajets jusqu'à -60 dB/trajet direct (au moins) sauf réglage manuel volontaire de l'opérateur.

ANNEXE 4 : Analyse des effets perturbateurs sur les goniomètres

La géométrie utilisée pour le calcul de la perturbation des goniomètres est décrite dans la figure A4.1 ci-dessous :

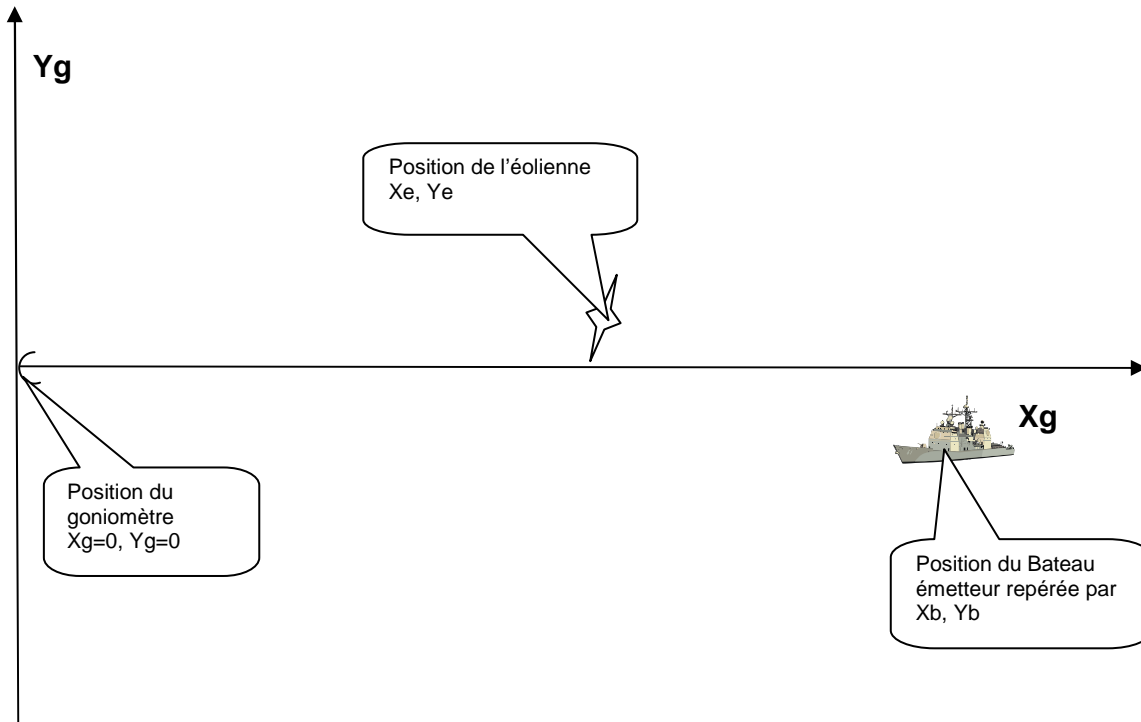


Figure A4.1 – Paramètres géométriques pour le calcul des perturbations apportées par les éoliennes au goniomètre.

A4.1 Effet de masquage

L'effet de masquage maximal est obtenu lorsque le bateau émetteur, l'éolienne et le goniomètre seront alignés à mieux que quelques centièmes de degrés près.

Dans ce cas, les éoliennes, de par leur très forte signature radar, peuvent réduire le champ électromagnétique placé derrière elle par rapport à un émetteur radar que le goniomètre souhaite capter et localiser.

Cette réduction de champ va générer une zone où le goniomètre verra sa portée également réduite. La longueur d'onde de fonctionnement du goniomètre étant de l'ordre de 2 m (118 à 174 MHz), on retrouvera un effet de masquage par le mât des éoliennes qui :

- ne s'appliquera que sur un trajet aller simple
- sera d'amplitude beaucoup plus faible que les masquages observés sur le radar à cause de l'augmentation de la longueur d'onde (2 m environ au lieu de 3cm environ).

La figure A4.2 ci-dessous présente les résultats obtenus par les mêmes méthodes que celles du §A3.1 et avec les hypothèses suivantes : $Y_e = Y_b = 0$ (alignement bateau /éolienne/goniomètre)

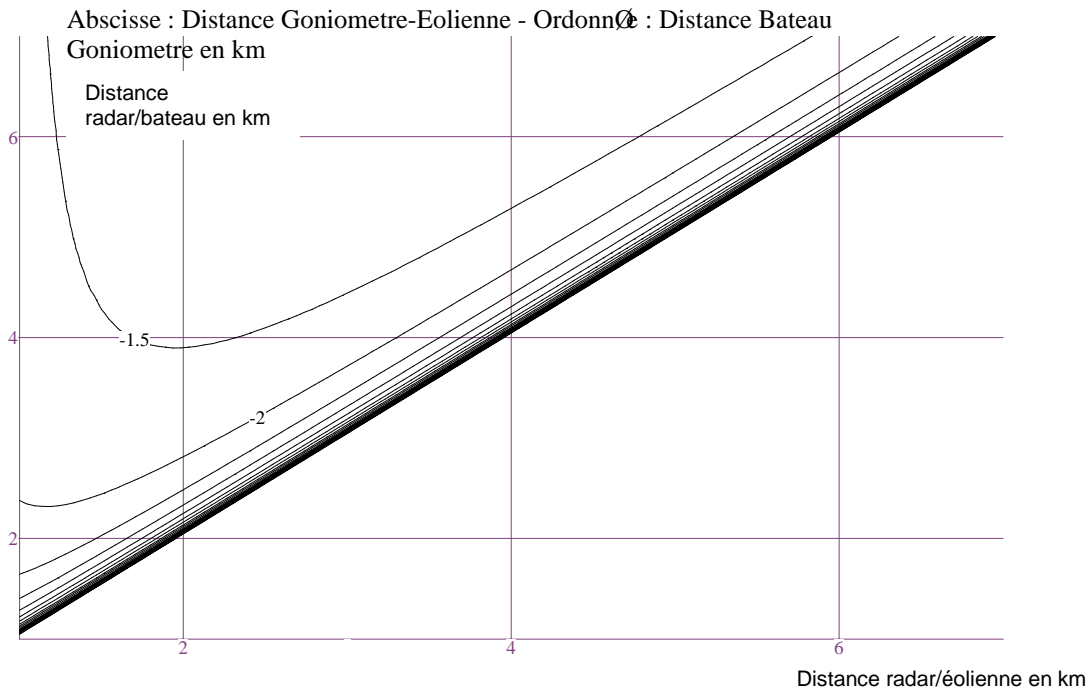


Figure A4.2 - Atténuation en dB du signal VHF/goniomètre en aller simple derrière un mât de 7m de diamètre – (fréquence VHF de calcul 150 MHz - Iso atténuation : séparées de 0,5 dB)

La figure A4.2 montre que les affaiblissements sur le trajet Bateau/éolienne sont inférieurs à 2 dB pour :

- une distance goniomètre éolienne de 5 Km ou plus
- une distance bateau éolienne de 500 m ou plus.

De plus, nous rappelons que les atténuations affichées dans la figure A4.2 constituent des maxima d'atténuations qui correspondent à une situation où le bateau émetteur, l'éolienne et le goniomètre sont alignés à mieux que quelques centièmes de degrés près. Dès que cette condition d'alignement sera rompue, aucune atténuation mesurable ne sera générée par l'éolienne sur l'onde électromagnétique VHF.

L'effet de masquage, même dans les pires cas, n'affectera donc que très marginalement le fonctionnement des goniomètres.

A4.2 Effet d'erreur de mesure angulaire

Nous nous intéressons dans ce paragraphe aux erreurs angulaires générées par la présence d'une éolienne à proximité du trajet direct de l'onde VHF. Ce type d'erreur sera principalement dû à l'interférence, sur le goniomètre, des champs électromagnétiques incidents provenant :

1. du trajet direct (bateau émetteur/goniomètre),
2. du multi trajets d'ordre 1 (bateau émetteur/éolienne/goniomètre)

On utilise la modélisation ainsi que la formule (7) de la référence [5] qui sont adaptées au cas des goniomètres de type doppler (type Rohde et Schwarz PA 100) confrontés à un multi trajet.

La formule utilisée se met sous la forme :

$$E_{AoA} = \frac{2 \cdot R_{MD} \cdot \cos(D_{phase}) \cdot \cos\left(\frac{D_{\theta}}{2}\right)}{\frac{\pi \cdot D}{\lambda}} \cdot J_1\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot D}{\lambda} \cdot \sin\left(\frac{D_{\theta}}{2}\right)\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4)$$

où :

- E_{AoA} : erreur de mesure de l'angle d'arrivée (Angle of Arrival) par le goniomètre (en degré)
- R_{MD} : rapport entre l'amplitude du multi trajet et celui du trajet direct
- D_{phase} : différence de phase entre le trajet direct et le multi trajet
- D_{θ} : angle formé par les vecteurs propagation du trajet direct et du multi trajet
- D : diamètre du cercle d'antenne du goniomètre doppler
- J_1 : Fonction de Bessel d'ordre 1
- λ : Longueur d'onde VHF (2m)

On trouvera ci-dessous le résultat de calcul de l'erreur de la mesure angulaire (4) apportée par une éolienne sous les hypothèses suivantes) :

- SER bistatique éolienne à 150 MHz : 10 000 m² (SER estimée du mât seul en champ proche à 1 km),
- Fréquence de l'émetteur VHF : 150 MHz
- Position de l'éolienne : $X_e = 5\text{km}$, $Y_e = 0\text{ m}$
- Le bateau est placé dans le domaine :
 $5\text{ km} < X_b < 7\text{ km}$ et $-0\text{ km} < Y_b < 2\text{ km}$

Pour améliorer la lisibilité des valeurs prise par la grandeur E_{AoA} (très forte dynamique et forte variabilité), l'affichage de la figure A4.3 représente la grandeur A telle que :

$$A = \log_{10}(|E_{AoA}|) \text{ avec un plancher imposé à } -3 \text{ (Correspondant à } |E_{AoA}| = 0,001^\circ).$$

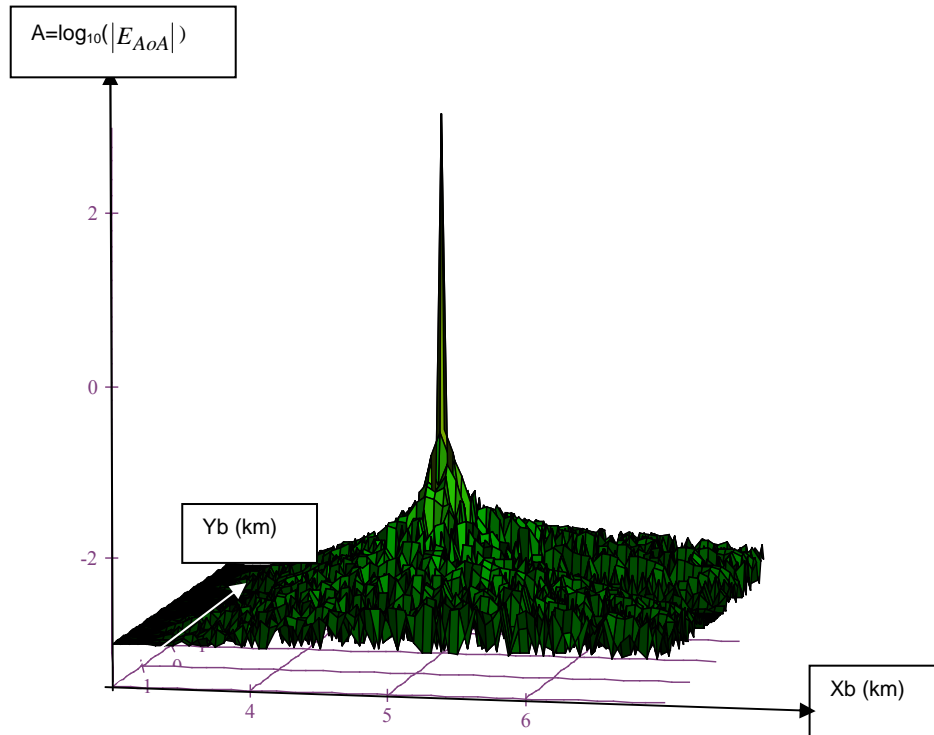


Figure A4.3 –Logarithme de l'erreur de mesure angulaire d'un goniomètre doppler(en degré) fonction de la position d'un bateau émetteur à proximité d'une éolienne- L'éolienne est placée en $X=5 \text{ km}$, $Y=0 \text{ km}$.- L'échelle Yb s'étend de -2 km à $+2 \text{ km}$

La figure A4.3 permet de constater :

- des fortes erreurs angulaires : de plusieurs dizaines de degrés ($A > 1$) à 1° ($A = 0$) lorsque le bateau se trouve dans un rayon d'environ 200 m autour de l'éolienne
- une décroissance rapide de ces erreurs en-dessous de $0,1^\circ$ lorsque le bateau est placé à plus de 200 m de l'éolienne.

En accord avec la demande du CETMEF (cf Annexe 2), la perturbation apportée par l'éolienne doit être négligeable devant les $0,3^\circ$ de précision intrinsèque du goniomètre doppler.

La figure A4.4 ci-dessous fournit un exemple d'évolution de l'erreur angulaire (en degrés entre $-0,1^\circ$ et $+0,1^\circ$) constatée par le goniomètre en fonction de la distance bateau - éolienne (en km). Ce cas particulier correspond aux conditions suivantes :

- Eolienne placée à 5 Km du goniomètre
- Trajectoire particulière : Bateau s'éloignant de l'éolienne selon la trajectoire $Yb(\text{km}) = Xb(\text{km}) - 5 \text{ km}$ avec $5 \text{ km} < Xb < 5,707 \text{ km}$ (dans le repère de la figure A4.1 en Annexe 4).

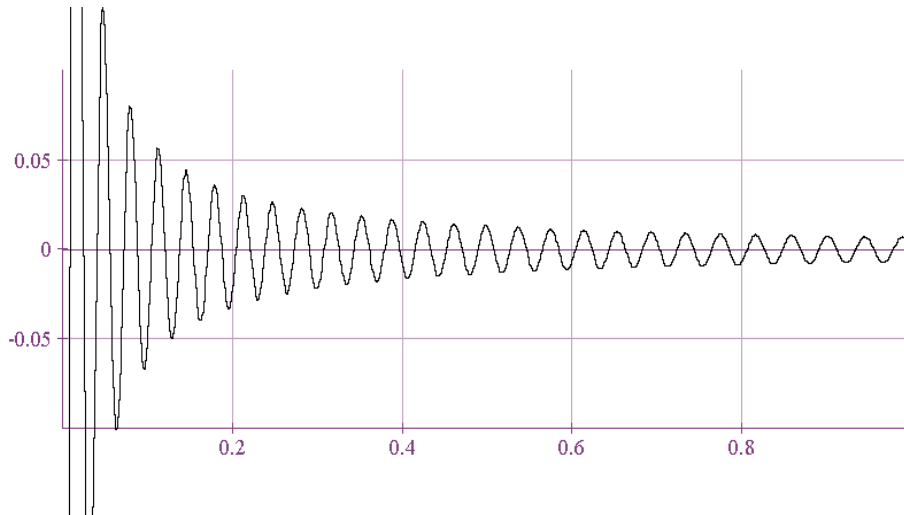


Figure A4.4 – Erreur angulaire (en °) d'un goniomètre en fonction de la distance bateau-éolienne (en km)–

On constate, par exemple, que l'erreur générée par la présence de l'éolienne est inférieure à $0,03^\circ$ ($A < -1,5$) lorsque le bateau est placé à plus de 500 m de l'éolienne. Cette donnée apparaît sur la figure A4.5 sur laquelle nous avons artificiellement supprimé les données à l'intérieur d'un cercle de 500 m de rayon centrée sur l'éolienne de manière à faire apparaître les niveaux d'erreur existant à l'extérieur de ce cercle jusqu'à une distance bateau/éolienne d'environ 2 km.

Un calcul similaire réalisé en plaçant le bateau fixe à 10 km du goniomètre et en cherchant la limite inférieure de distance entre le goniomètre et l'éolienne fournit également une distance minimale de 500 m pour une erreur $< 0,03^\circ$.

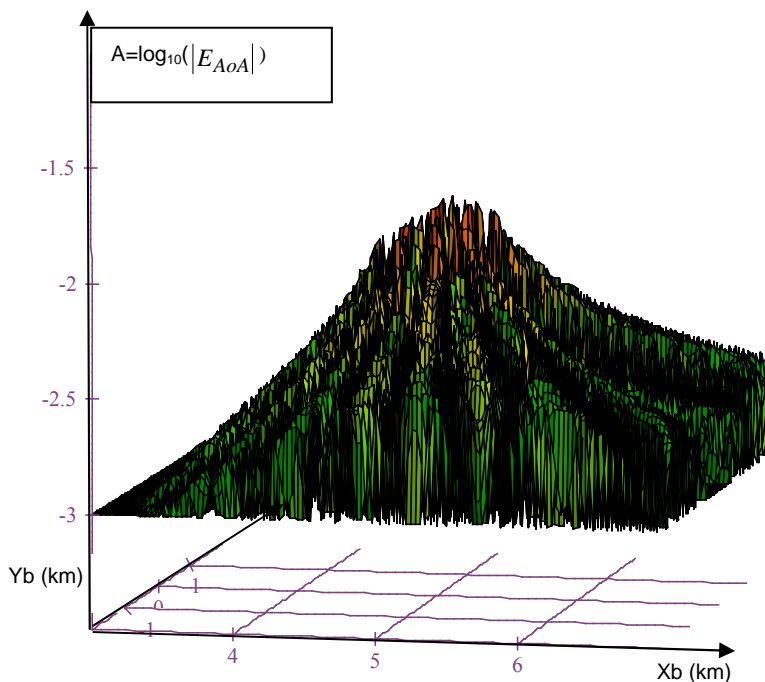


Figure A4.5 – Logarithme de l'erreur de mesure angulaire d'un goniomètre doppler (en degré) en fonction de la position d'un bateau émetteur à proximité d'une éolienne-

(L'éolienne est placée en $X=5$ km, $Y=0$ km.- L'échelle des distances latérales Yb s'étend de -2 km à +2 km. Les données sont fournies exclusivement à l'extérieur d'un cercle de 500 m de rayon centré sur l'éolienne)

Par conséquent, on peut conclure que l'erreur générée par les multi trajets parasites causé par une éolienne proche du bateau émetteur qui perturbe la mesure angulaire des goniomètres sera négligeable ($<0,03^\circ$) dès que les deux conditions suivantes seront remplies en même temps :

- distance éolienne/goniomètre $> 0,5$ km,
- distance éolienne/bateau émetteur $> 0,5$ km.