

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Rapport UIT-R SM.2391-0
(06/2016)

Incidences des éoliennes sur les radiogoniomètres fixes

Série SM
Gestion du spectre



Union
Internationale des
télécommunications

Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en œuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Rapports UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REP/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre

Note: Ce Rapport UIT-R a été approuvé en anglais par la Commission d'études aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2017

© UIT 2017

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RAPPORT UIT-R SM.2391-0

Incidences des éoliennes sur les radiogoniomètres fixes

(2016)

Résumé du rapport

Si le Manuel de l'UIT sur le contrôle du spectre prévoit une distance de sécurité d'au moins cinq kilomètres entre un radiogoniomètre et un parc d'éoliennes, aucune étude particulière n'a été effectuée à ce jour sur les effets spécifiques des éoliennes à différentes distances de sécurité d'un radiogoniomètre fixe.

On trouvera dans l'Annexe 1 au présent rapport une étude sur l'incidence des parcs d'éoliennes sur des radiogoniomètres situés à différentes distances et fonctionnant sur différentes fréquences.

Annexe 1**Exemple d'étude effectuée en Allemagne pour déterminer l'incidence des éoliennes sur les radiogoniomètres fixes****Résumé de l'Annexe 1**

Selon un projet de plan régional, il est prévu d'établir une zone prioritaire d'énergie éolienne autour de la station de contrôle des transmissions radioélectriques de la *Bundesnetzagentur* située à Rheurdt, en Allemagne.

La présente étude a montré que les éoliennes situées à proximité des radiogoniomètres fixes provoquaient d'importants brouillages. Même à une distance de 4,6 km, les éoliennes causent des écarts de relèvement et des niveaux de brouillage inacceptables.

Le brouillage spécifique varie considérablement selon la distance et la position du parc d'éoliennes et selon la longueur d'onde. Dans le cas de bandes d'ondes métriques longues (4 m et 2 m), le brouillage se produit généralement dans toutes les directions, quelle que soit l'emplacement du parc. A proximité d'un parc, le niveau de brouillage observé dans des bandes d'ondes décimétriques courtes (notamment 23 cm et 13 cm) dépend de la position de chaque éolienne, tandis que si le parc est plus éloigné, c'est l'ensemble du parc qui agit comme une surface réfléchissante. Les relèvements effectués dans ces bandes de fréquences révèlent alors des niveaux de fluctuation élevés.

Les erreurs de radiogoniométrie peuvent se manifester au travers de résultats très dispersés dans les quatre quadrants, avec quelques erreurs ou relèvements discrets fluctuant autour d'une valeur moyenne fictive.

Un radiogoniomètre fonctionnant en ondes courtes adopte un comportement chaotique s'il se trouve dans un parc d'éoliennes; et quand bien même le parc se trouve à 2,5 km, les relèvements ne sont théoriquement valables que dans un secteur étroit transversal au parc. A une distance de 4,6 km, la situation s'améliore dans la mesure où l'on ne trouve plus d'erreurs importantes de radiogoniométrie que dans la direction du parc et dans la direction opposée. Toutefois, la portée de la présente étude ne s'étend pas aux effets des éoliennes sur la réception par onde ionosphérique des radiogoniomètres en ondes courtes.

Dans toutes les bandes de fréquences, les erreurs de radiogoniométrie relevées sont supérieures à $\pm 20^\circ$ (et, dans certains cas, ce sont mêmes des erreurs tournantes). Une erreur de radiogoniométrie de plus de 2° empêche d'ailleurs d'étudier en temps utile le brouillage des fréquences de sécurité (réservées à la police, les radiocommunications aéronautiques, etc.) et de définir avec précision l'utilisation des fréquences, que ce soit en cas de brouillage ou lorsqu'on examine l'occupation des fréquences.

Etant donné que les fluctuations de niveaux observées peuvent atteindre 40 dB (soit 99,99% de perte du signal), il est impossible d'effectuer une mesure du champ étalonnée, ce qui compromet le décodage potentiellement nécessaire des transmissions radioélectriques analogiques et numériques.

L'étude montre que les éoliennes et les radiogoniomètres fixes sont incompatibles en dessous d'une distance minimale de 4,6 km. Les brouillages observés montrent clairement que dans ces circonstances, il ne serait plus possible à la *Bundesnetzagentur* d'exploiter une station de contrôle des transmissions radioélectriques conformément aux exigences prévues.

Table des matières de l'Annexe 1

	Page
1 Introduction	4
2 Bandes de fréquences	6
3 Mesures.....	7
4 Zones de mesure	7
4.1 Mesures effectuées dans le parc d'éoliennes.....	7
4.2 Mesures de référence	8
5 Dispositifs de mesure.....	11
5.1 Véhicule de radiogoniométrie.....	11
5.2 Véhicule d'émission	11
6 Calcul de l'angle de relèvement	14
7 Emplacements des radiogoniomètres	15
7.1 Radiogoniomètre 0: au centre du parc d'éoliennes	15
7.2 Radiogoniomètre 1: en bordure du parc d'éoliennes.....	17
7.3 Radiogoniomètre 2: à 2,5 km du parc d'éoliennes	18
7.4 Radiogoniomètre 3: à 4,6 km du parc d'éoliennes	19
8 Parcours de mesure	20
9 Résultats des mesures radiogoniométriques	22
9.1 Mesures de référence	22
9.2 Séries de mesures.....	33
10 Mesures du niveau de réception	64
10.1 Sensibilité du système.....	66
10.2 Enregistrement dans le temps	66
10.3 Analyse des niveaux	70

1 Introduction

La *Bundesnetzagentur* (Agence fédérale des réseaux pour l'électricité, le gaz, les télécommunications, la poste et les chemins de fer) est une haute autorité fédérale à part entière relevant du Ministère fédéral allemand de l'économie et de la technologie; son siège se trouve à Bonn. Aux termes de la Loi sur les télécommunications (TKG), elle a notamment pour mission de réglementer l'usage des fréquences au sein de la République fédérale d'Allemagne, de veiller à ce que les conditions liées aux assignations de fréquences soient respectées, d'étudier les brouillages perturbant l'usage des fréquences et de remédier à toute atteinte à la réglementation dans ce domaine.

A cette fin, la *Bundesnetzagentur* exploite sept stations de contrôle des transmissions radioélectriques réparties dans toute l'Allemagne. Ces stations de contrôle sont équipées de radiogoniomètres enregistrés auprès de l'Union internationale des télécommunications (UIT), qui les a agréés. Elles peuvent indiquer la direction dans laquelle une émission radioélectrique est effectuée par rapport à leur propre emplacement. En partant de cette information, il est alors possible de déterminer l'emplacement probable de l'émetteur. Sur ces sept stations de contrôle, quatre seulement sont équipées de radiogoniomètres supplémentaires fonctionnant en ondes courtes; en effet, ce type d'équipements est très coûteux et le choix de son emplacement est soumis à des contraintes topographiques.

Station de contrôle des émissions radioélectriques de Krefeld/Rheurdt



Radiogoniomètre à ondes courtes



La station de contrôle des émissions radioélectriques de Rheurdt, près de Krefeld, se trouve sur un emplacement répondant à ces contraintes. Compte tenu de l'homogénéité de l'environnement, et pour éviter des rayonnements non essentiels et des erreurs de radiogoniométrie dues aux bâtiments voisins, le radiogoniomètre à ondes courtes a été déployé loin des bâtiments; il est commandé à distance et se situe dans une plaine plate destinée exclusivement à l'exploitation agricole.

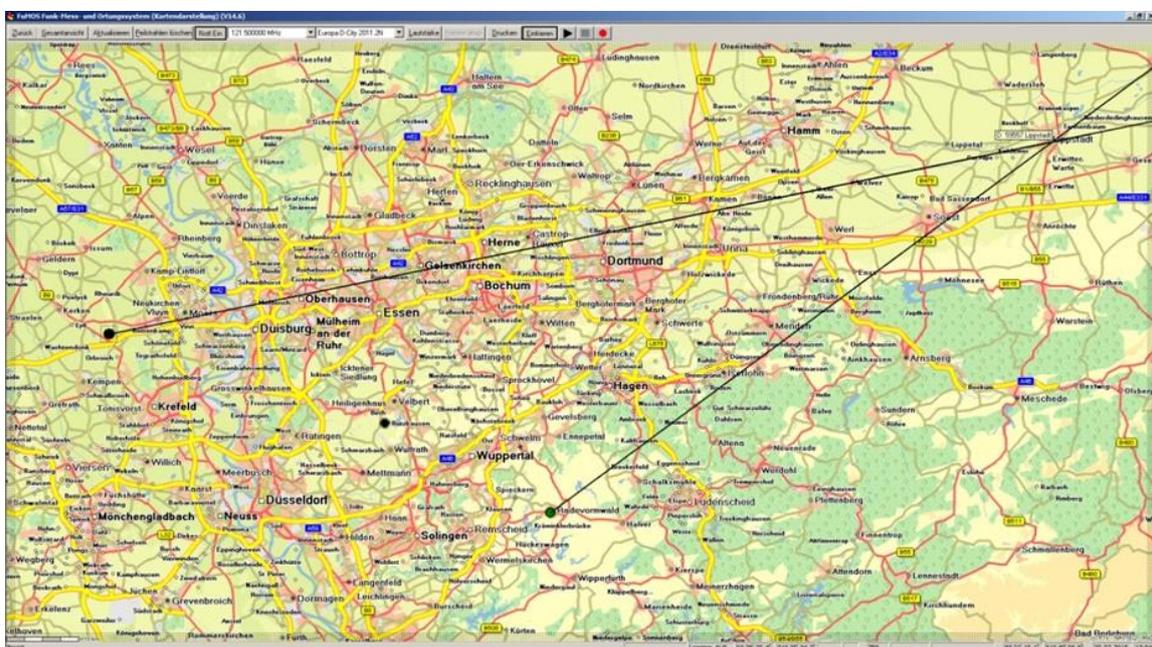
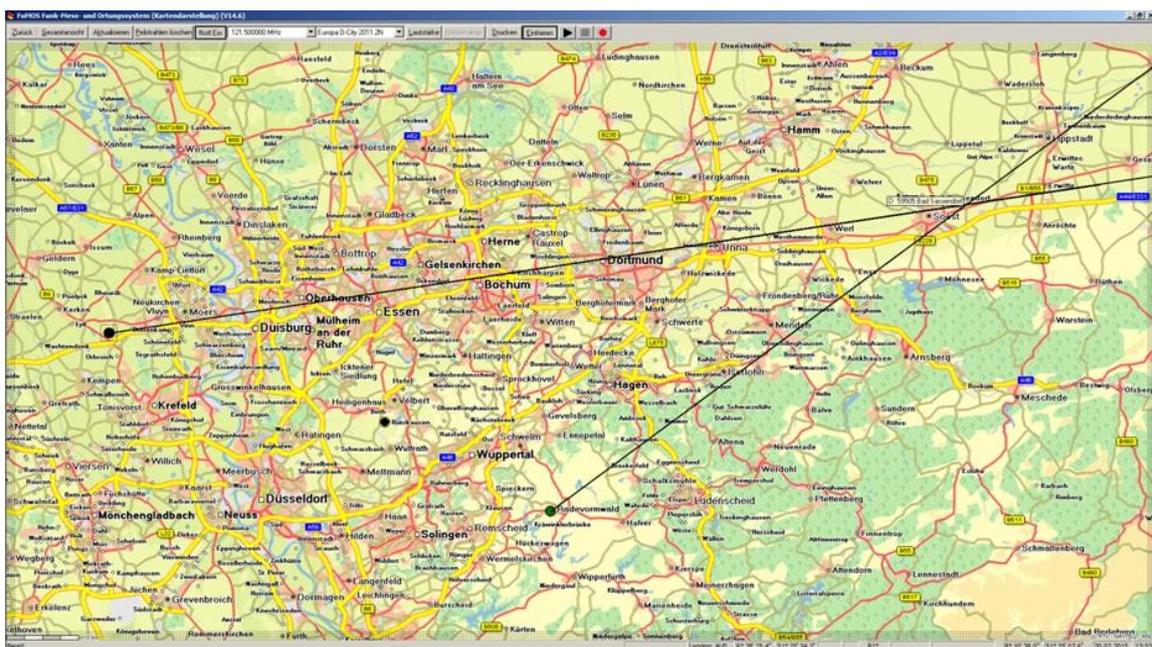
L'utilité d'un radiogoniomètre, qui repose sur la capacité de celui-ci à déterminer des directions de manière précise, dépend de son emplacement. Le champ de réception du radiogoniomètre doit disposer d'une «vue dégagée» et l'instrument ne doit pas subir de brouillage de la part des infrastructures proches (par exemple du bruit artificiel provenant de zones industrielles ou commerciales). C'est pourquoi, dans la mesure du possible, les radiogoniomètres sont installés à l'écart des zones développées.

Les constructeurs de systèmes de radiogoniométrie indiquent dans quelle mesure le terrain doit être dégagé pour que les systèmes fonctionnent correctement et conformément au cahier des charges. L'opérateur du système est lui aussi soumis à des contraintes, qui sont définies dans l'ordre d'importance des bandes de fréquences concernées. Les communications radioélectriques destinées aux services de sécurité tels que l'aéronautique, la police et les équipes de secours sont prioritaires, et leurs fréquences doivent être étudiées avant celles qui sont destinées à d'autres usagers, comme par exemple les radioamateurs, qui utilisent des fréquences réservées à un usage de loisir.

Dans le cas du radiogoniomètre à ondes courtes déployé à Krefeld/Rheurdt, le constructeur (l'entreprise Plath, située à Hambourg) indique que le terrain doit être dégagé dans un rayon de 2 000 m sur une zone en forme de cône dont l'angle d'élévation est de 3° par rapport au centre du radiogoniomètre. Cela signifie que sur une distance de 2 000 m, la présence d'immeubles est tolérée si ceux-ci ne dépassent pas une hauteur de 105 m ($2\,000\text{ m} \times \tan 3^\circ \approx 105\text{ m}$). Dans le cas de parcs éoliennes, la hauteur maximale à l'extrémité de la pale doit aussi être prise en compte, car la vitesse et la direction de la rotation déterminent dans quelle mesure la zone balayée constitue un obstacle à la réception radioélectrique. Dans le cas d'un radiogoniomètre à ondes courtes, un terrain dégagé sur environ 3,8 km représente la «distance tolérable» à partir de laquelle des éoliennes de 190 m de haut peuvent être installées.

A une distance de 200 km, une erreur de radiogoniométrie d'à peine 3° provoque un écart de relèvement de 10,5 km, et il devient alors impossible de déterminer l'emplacement de l'émetteur.

Variation de la valeur de radiogoniométrie de 81° à 78° à partir de Rheurdt



Si l'on reprend l'exemple d'une erreur de radiogoniométrie d'exactlyment 3°, la zone cible n'est plus la ville de Soest mais la ville de Lippstadt, qui se trouve 10 km plus loin.

Il est donc recommandé dans le Manuel de l'UIT sur le contrôle du spectre (qui contient des directives applicables à l'échelle mondiale en matière de construction de stations de contrôle des émissions radioélectriques) de conserver une distance de 2 000 m entre la station de contrôle et chaque éolienne, et de prévoir une zone de sécurité de 5 000 m autour des stations de contrôle en cas de présence d'un parc d'éoliennes.

La présente étude a été effectuée du fait que l'administration régionale de Düsseldorf avait proposé, dans son plan régional, d'établir une zone prioritaire d'énergie éolienne autour de la station de contrôle et du système de réception fixes du service de contrôle et d'inspection des émissions radioélectriques de Rheurdt. Elle visait à déterminer à l'avance les effets possibles de ce projet sur les radiogoniomètres fonctionnant dans les bandes de fréquences décimétriques et métriques/décimétriques, et à définir la distance critique aux éoliennes à partir de laquelle ces effets pouvaient être tolérés.

2 Bandes de fréquences

Cette étude portait sur toutes les bandes de fréquences décimétriques et métriques/décimétriques pertinentes. Le tableau ci-après présente un aperçu de chacune de ces bandes et de ses principaux usages:

Bande de fréquences	Longueur d'onde	Type d'usage radioélectrique
65-87,5 MHz	4 m	Autorités et organisations chargées de la sécurité publique (police, pompiers, services de secours), armée, radiocommunication ferroviaires, radiocommunications mobiles privées (PMR), radiorecherche sur site, services auxiliaires de radiodiffusion.
108-174 MHz	2 m	Radiocommunications aéronautiques, autorités et organisations chargées de la sécurité publique, armée, radiocommunications destinées aux taxis, radiocommunications à l'intérieur des bâtiments, service mobile maritime et radiocommunications sur les voies d'eau intérieures, service d'amateur.
400-470 MHz	70 cm	Autorités et organisations chargées de la sécurité publique, radiocommunications mobiles multicanaux analogiques et numériques, radiocommunications à l'intérieur des bâtiments, service d'amateur, services de données mobiles, radioastronomie.
800-1 100 MHz	30 cm	Communications mobiles, armée, navigation aéronautique, services de radiorepérage, radioastronomie.
1 200-1 400 MHz	23 cm	Services de radiorepérage (radar, GPS, Galileo), communications par satellite, service d'amateur.
2 000-3 000 MHz	13 cm	Communications mobiles, réseaux radioélectriques locaux d'entreprise (WLAN), autorités et organisations chargées de la sécurité publique, faisceaux hertziens, communications par satellite, armée, navigation aéronautique, services de radiorepérage, radioastronomie, service d'amateur.

Les longueurs d'ondes de chaque bande de fréquences sont fournies à titre indicatif.

3 Mesures

Les mesures ont été confiées aux parties suivantes, associées selon plusieurs combinaisons différentes:

- Service de contrôle et d'inspection des émissions radioélectriques de Darmstadt.
- Service de contrôle et d'inspection des émissions radioélectriques de Rheurdt.
- Equipe chargée de développer le logiciel «GPS_Azimuth» (voir la section 6).

Elles ont été effectuées entre le 26 et le 30 janvier 2015 et entre le 5 et le 8 février 2015 à l'intérieur et aux alentours du parc d'éoliennes de Haren (Ems). Les mesures de référence ont été effectuées entre le 18 et le 20 février 2015 sur terrain ouvert près de Kerken-Aldekerk.

4 Zones de mesure

4.1 Mesures effectuées dans le parc d'éoliennes

Pour pouvoir effectuer leurs mesures, les responsables se sont efforcés de trouver un parc d'éoliennes situé sur le territoire fédéral qui répondait aux critères suivants:

- le parc devait être équipé d'un nombre suffisamment élevé d'éoliennes de dernière génération;
- le terrain devait être plat;
- la zone devait être peu développée dans un rayon de 5 km autour du parc;
- elle devait être libre de tout brouillage provenant des arbres feuillus.

Le choix s'est finalement porté sur le parc d'éoliennes de Haren (Emsland), qui semblait répondre le mieux aux critères précités. Ce parc, qui compte 29 éoliennes, relève de la région de Haren/Ems et se trouve dans le district de Rütenmoor, tout près de la frontière avec les Pays-Bas. La zone dégagée, qui couvre environ 295 ha, était autrefois une lande mais elle est désormais consacrée à l'agriculture intensive.

Parc d'éoliennes de Haren (Ems)



Les 29 éoliennes exploitées dans le parc sont de deux types: le type ENERCON E-70-4, dont la puissance nominale est de 2 MW, et le type ENERCON E-66-1, dont la puissance nominale est de 1,8 MW. Toutes les éoliennes ont la même hauteur de moyeu (98 m). Elles sont équipées des pales les plus récentes (extrémités fuselées) pour mieux capter l'énergie du vent.

Parc d'éoliennes de Haren
(les points bleus représentent les emplacements des éoliennes)



4.2 Mesures de référence

Le constructeur de l'antenne du radiogoniomètre fonctionnant en ondes décimétriques et de l'antenne fonctionnant en ondes métriques/décimétriques indique dans ses spécifications que ces antennes tolèrent une erreur maximale de radiogoniométrie $\leq 2^\circ$ RMS.

Spécifications

Gamme de fréquences (en 2 sous-gammes)	VHF / UHF I UHF II	20 MHz à 1300 MHz 1300 MHz à 3000 MHz
Type d'antenne	VHF / UHF I UHF II	1 antenne-réseau circulaire à neuf éléments et 1 antenne-réseau circulaire à huit éléments
Polarisation		verticale
Impédance nominale		50 Ω
Erreur de radiogoniométrie ¹		$\leq 2^\circ$ RMS
Sensibilité du radiogoniomètre ² (voir fig. 4-1)	20 MHz à 200 MHz 200 MHz à 1300 MHz 1300 MHz à 3000 MHz	12 $\mu\text{V/m}$ à 110 $\mu\text{V/m}$ typ. < 2 $\mu\text{V/m}$ typ. 2.5 $\mu\text{V/m}$ à 10 $\mu\text{V/m}$ typ.
Facteur d'antenne (voir fig. 4-2)		Voir aussi la description de l'interface 4071.4004.01 SB
Linéarité		IP2: 65 dBm typ. IP3: 30 dBm typ.
Connecteurs	DF1 DF2 DF3 CAL Commande et alimentation électrique Connecteur de boussole	Type N femelle Type N femelle Type N femelle Type N femelle SJT-07GS-12-35P-014 SJT-07GS-10-35S-RF45
Alimentation électrique (par le processeur du radiogoniomètre)	Tension Intensité	15 V DC à 18 V DC < 1,8 A
Dimensions	Diamètre Hauteur Longueur du paratonnerre	Approx. 1,1 m Approx. 0,45 m Approx. 1,4 m avec le paratonnerre Approx. 1 m

¹ Sur le mât, dans un environnement libre de toute réflexion. La valeur quadratique moyenne (RMS) est calculée à partir des valeurs radiogoniométriques ramenées à une moyenne des azimuts et des fréquences. Sur des mâts plus minces (4 m à 8 m), une erreur supplémentaire de radiogoniométrie de 2° maximum peut se produire à des fréquences entre 20 MHz et 40 MHz en raison d'une éventuelle résonance propre.

² Largeur de bande du radiogoniomètre 0,6 KHz, temps moyen 1 s, erreur de radiogoniométrie $\leq 2^\circ$.

Pour vérifier ces informations, des mesures ont été effectuées avec les antennes décamétrique et métrique/décimétrique à proximité de la station de contrôle habitée qui se trouvait sur un terrain plat exploité à des fins agricoles, près du village de Kerken.

Mesures de référence en ondes décamétriques et métriques/décimétriques



Ces mesures montrent que dans un environnement homogène libre de tout brouillage émanant de structures telles que des éoliennes, il est parfaitement possible de rester en dessous du plafond d'erreur radiogoniométrique indiqué par le constructeur, qui est de $\pm \leq 2^\circ$ RMS. On trouvera de plus amples détails à cet égard dans la section 9.1.

5 Dispositifs de mesure

5.1 Véhicule de radiogoniométrie

Un radiogoniomètre quasi-fixe était embarqué dans un véhicule de type Mercedes Sprinter équipé d'antennes radiogoniométriques (fonctionnant dans les bandes 30 à 3 000 MHz et 1 à 30 MHz). Ces antennes étaient montées sur un mât télescopique de 8 m au-dessus du sol.

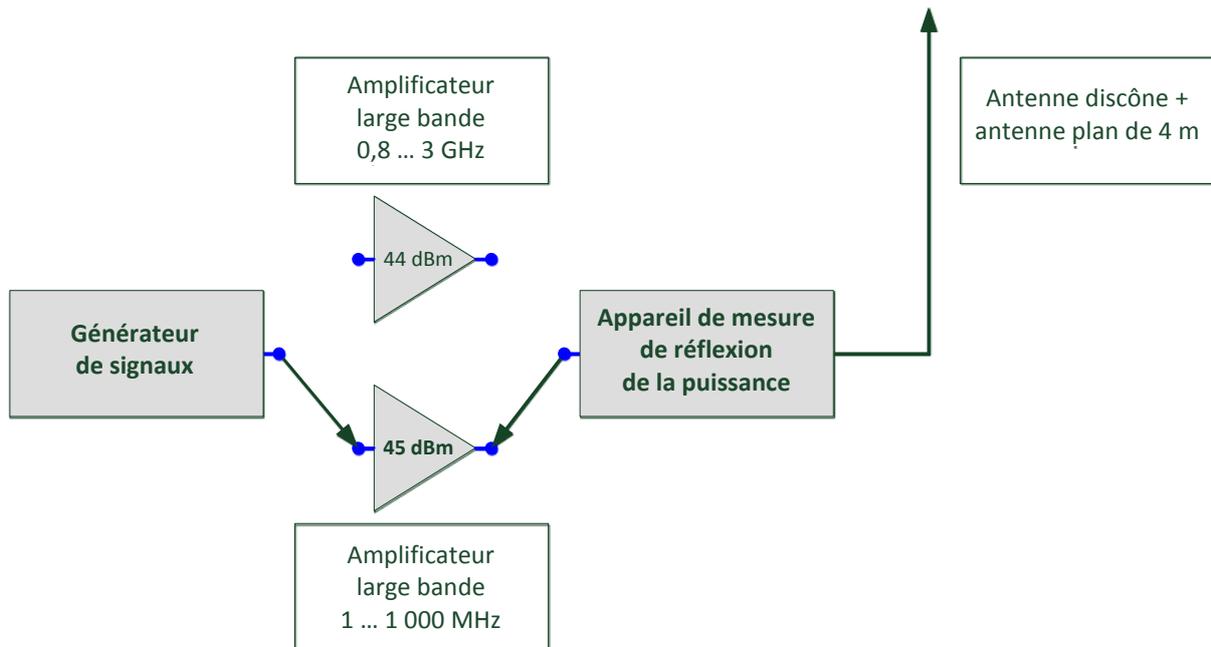


Des radios portatives et un terminal relai fabriqués par le même constructeur ont été employés pour les communications internes.

5.2 Véhicule d'émission

Les signaux étaient émis à partir d'un générateur de signaux et, au besoin, étaient amplifiés par des amplificateurs large bande pour atteindre une puissance de 25 watts à la sortie de l'émetteur. Une antenne discône large bande avait été configurée pour émettre dans les fréquences de 146 MHz, 440 MHz, 971 MHz, 1 300 MHz et 2 400 MHz, et une antenne plan était employée pour émettre dans les 87,45 MHz. Les deux antennes étaient installées et exploitées sur un mât télescopique de 10 m monté sur un véhicule de contrôle de type Mercedes Sprinter.

Diagramme de l'émetteur métrique/décimétrique



Véhicule de contrôle équipé d'un mât de 10 m et d'une antenne d'émission

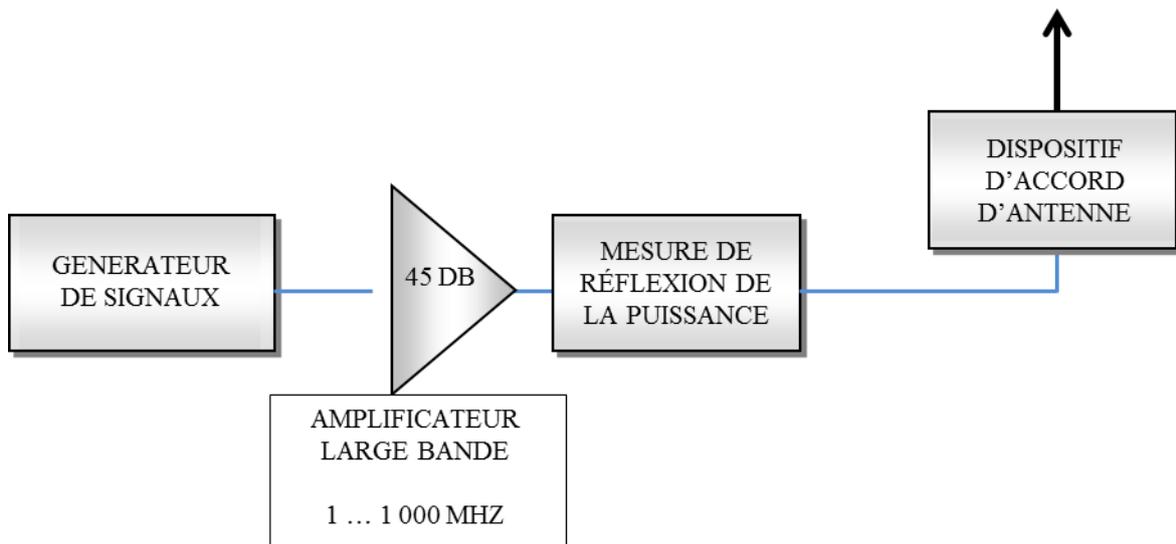


Amplificateurs



Après amplification (au besoin), des signaux ont été émis dans la bande d'ondes décimétriques (5,46 MHz, 14 MHz et 28 MHz) par le biais d'un dispositif d'accord d'antenne et d'une antenne verticale d'environ 3 m de haut.

Diagramme de l'émetteur en ondes décimétriques



Véhicule de contrôle équipé d'une antenne verticale à ondes décamétriques



6 Calcul de l'angle de relèvement

Le *Bundesnetzagentur* a développé à l'interne un programme appelé «GPS_Azimut» qui permet de calculer l'azimut entre le radiogoniomètre et l'émetteur (relèvement de la cible) à chaque emplacement du véhicule d'émission. Ce logiciel calcule automatiquement l'angle de relèvement en fonction des coordonnées du radiogoniomètre et des coordonnées du véhicule fournies par un récepteur GPS.

Interface du logiciel «GPS_Azimuth» (l'angle de relèvement est surligné en jaune)

GPS-Azimuth-Berechnung V1.2, Programmierung: ESCH 8.9, Jürgen Jung

Programm GPS Messfahrt / Karte Info

GPS-Azimuthberechnung V1.2 - Stand: 22.01.2015

Eingabe:

Peiler-Koordinaten: O 7°08'48.4" N 52°52'11.3"

Peilerhöhe (GPS) [m]: 1.0 Peilerhöhe (Aufbau) [m]: 1.0

Senderhöhe (PKW) [m]: 1.0

Auslese-Intervall GPS [s]: 0.9

Ausgabe:

GPS-Daten

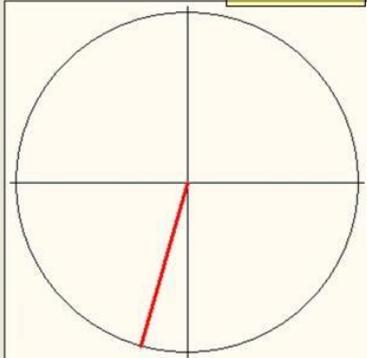
Sender PKW: O 06°28'24.7" N 51°25'37.2"

Datum: PC 23.02.2015 Sat: 10
 Uhrzeit (UTC): PC 13:31:27 EPE [m]: 1.28

Senderhöhe ü. NN (GPS) [m]: 120.3

Azimuth / Distanz

Distanz: 167071.13 Azimut: 195.98



Protokoll

Anzahl der Datensätze: 946/947 Datum

Datum:	Uhrzeit(UTC):	O-Koordinaten:	N-Koordinaten:	Azimuth[*]	Distanz[m]:	Peilerhöhe ges.[m]:	Senderhöhe ges
23.02.2015	13:31:02	06°28'25.3"	51°25'36.9"	195.97	167076.92	2.00	128.60
23.02.2015	13:31:03	06°28'25.3"	51°25'37.0"	195.97	167076.92	2.00	128.20
23.02.2015	13:31:04	06°28'25.2"	51°25'37.0"	195.97	167073.95	2.00	127.80
23.02.2015	13:31:05	06°28'25.2"	51°25'37.0"	195.97	167074.47	2.00	127.50
23.02.2015	13:31:06	06°28'25.2"	51°25'37.0"	195.97	167074.47	2.00	127.30
23.02.2015	13:31:07	06°28'25.2"	51°25'37.0"	195.97	167074.47	2.00	127.10
23.02.2015	13:31:08	06°28'25.2"	51°25'37.0"	195.97	167074.47	2.00	126.90
23.02.2015	13:31:09	06°28'25.1"	51°25'37.0"	195.97	167074.47	2.00	126.70
23.02.2015	13:31:10	06°28'25.1"	51°25'37.0"	195.97	167074.99	2.00	126.60
23.02.2015	13:31:11	06°28'25.1"	51°25'37.0"	195.97	167074.99	2.00	126.40
23.02.2015	13:31:12	06°28'25.1"	51°25'37.0"	195.97	167074.99	2.00	126.20
23.02.2015	13:31:13	06°28'25.1"	51°25'37.0"	195.97	167074.99	2.00	126.00
23.02.2015	13:31:14	06°28'25.1"	51°25'37.0"	195.97	167074.99	2.00	125.70
23.02.2015	13:31:15	06°28'25.0"	51°25'37.0"	195.97	167074.99	2.00	125.40
23.02.2015	13:31:16	06°28'25.0"	51°25'37.1"	195.97	167075.51	2.00	125.10
23.02.2015	13:31:17	06°28'25.0"	51°25'37.1"	195.97	167072.54	2.00	124.90
23.02.2015	13:31:18	06°28'24.9"	51°25'37.1"	195.97	167072.54	2.00	124.60
23.02.2015	13:31:19	06°28'24.9"	51°25'37.1"	195.97	167073.06	2.00	124.30
23.02.2015	13:31:20	06°28'24.9"	51°25'37.1"	195.97	167073.06	2.00	124.00
23.02.2015	13:31:21	06°28'24.9"	51°25'37.1"	195.97	167073.06	2.00	123.60
23.02.2015	13:31:22	06°28'24.8"	51°25'37.1"	195.97	167073.06	2.00	123.20
23.02.2015	13:31:23	06°28'24.8"	51°25'37.1"	195.97	167073.58	2.00	122.70
23.02.2015	13:31:24	06°28'24.8"	51°25'37.2"	195.97	167073.58	2.00	122.40
23.02.2015	13:31:25	06°28'24.8"	51°25'37.2"	195.97	167070.60	2.00	122.10
23.02.2015	13:31:26	06°28'24.7"	51°25'37.2"	195.97	167070.60	2.00	121.80
23.02.2015	13:31:27	06°28'24.7"	51°25'37.2"	195.98	167071.13	2.00	121.50

Messfahrt / Karte

7 Emplacements des radiogoniomètres

7.1 Radiogoniomètre 0: au centre du parc d'éoliennes

Le radiogoniomètre a été placé au centre du parc d'éoliennes pour illustrer la situation découlant du plan régional proposé par l'administration régionale (désignation de la zone prioritaire d'énergie éolienne «Ker_Wind_007») si ce plan était mis en œuvre comme prévu. Il se trouve donc entouré d'éoliennes de tous côtés. Les mesures effectuées sont présentées dans la section 9.2.1.

Emplacement du radiogoniomètre (point rouge), entouré d'éoliennes (points bleus)



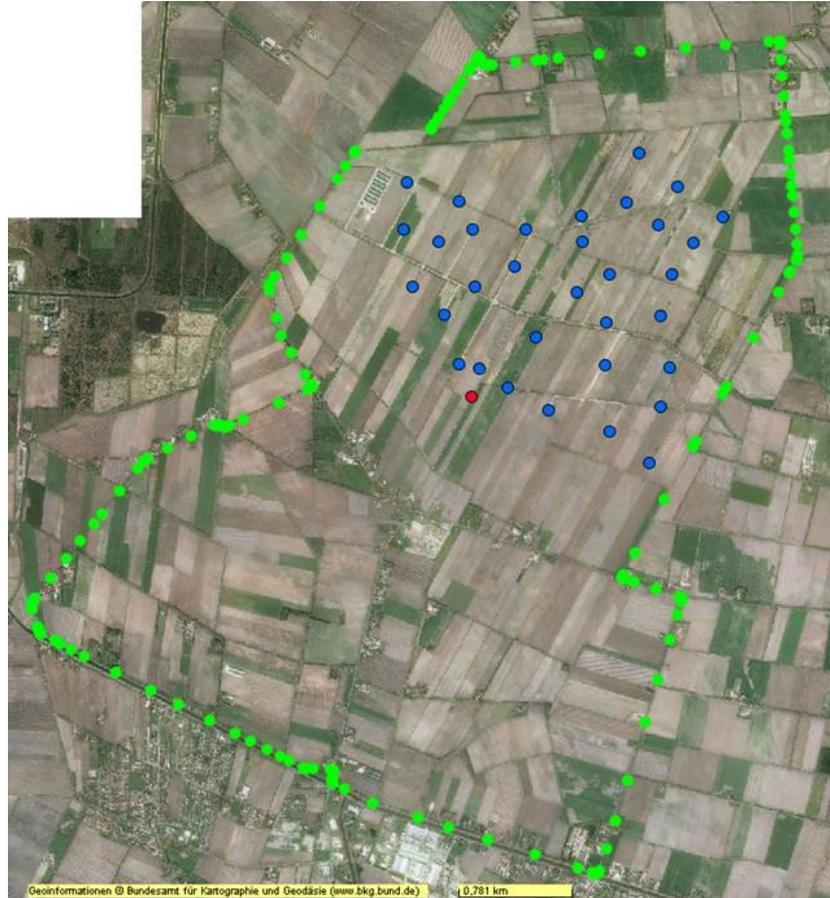
Emplacement du radiogoniomètre au milieu du parc d'éoliennes



7.2 Radiogoniomètre 1: en bordure du parc d'éoliennes

Ce radiogoniomètre est situé en bordure du parc d'éoliennes, les éoliennes se trouvant au nord tandis qu'une zone dégagée se trouve au sud. Les résultats des mesures sont présentés dans la section 9.2.2.

Emplacement du radiogoniomètre (point rouge) en bordure du parc d'éoliennes (points bleus)



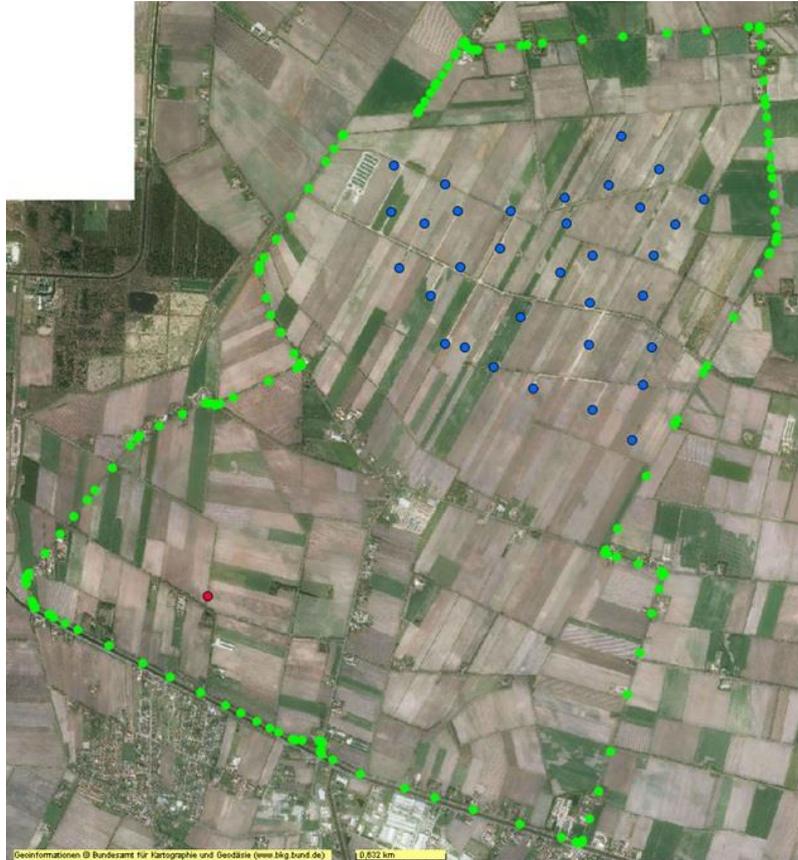
Emplacement du radiogoniomètre en bordure du parc d'éoliennes



7.3 Radiogoniomètre 2: à 2,5 km du parc d'éoliennes

Ce radiogoniomètre est situé à environ 2,5 km du parc d'éoliennes, avec une vue dégagée sur le parc au nord-est. Les résultats des mesures sont présentés dans la section 9.2.3.

Emplacement du radiogoniomètre (point rouge) au sud-ouest du parc d'éoliennes (points bleus)



Le radiogoniomètre se trouve à 2,5 km du parc d'éoliennes (visible au fond)



7.4 Radiogoniomètre 3: à 4,6 km du parc d'éoliennes

Ce radiogoniomètre est le plus éloigné (4,6 km) des éoliennes. Les résultats des mesures sont présentés dans la section 9.2.4.

Le radiogoniomètre (point rouge) se trouve à 4,6 km de la limite du parc d'éoliennes (points bleus) à vol d'oiseau



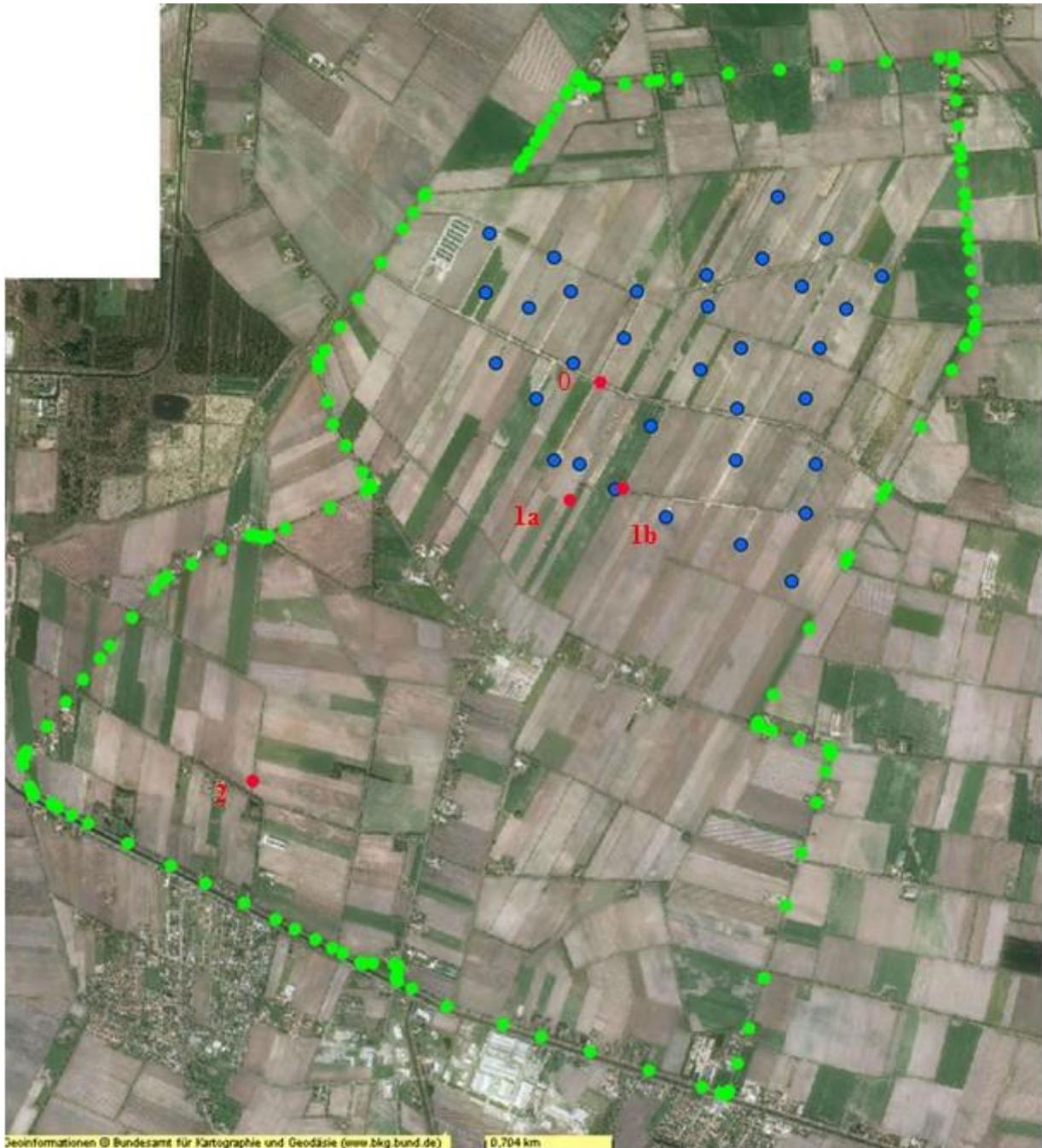
Le radiogoniomètre se trouve à 4,6 km du parc d'éoliennes



8 Parcours de mesure

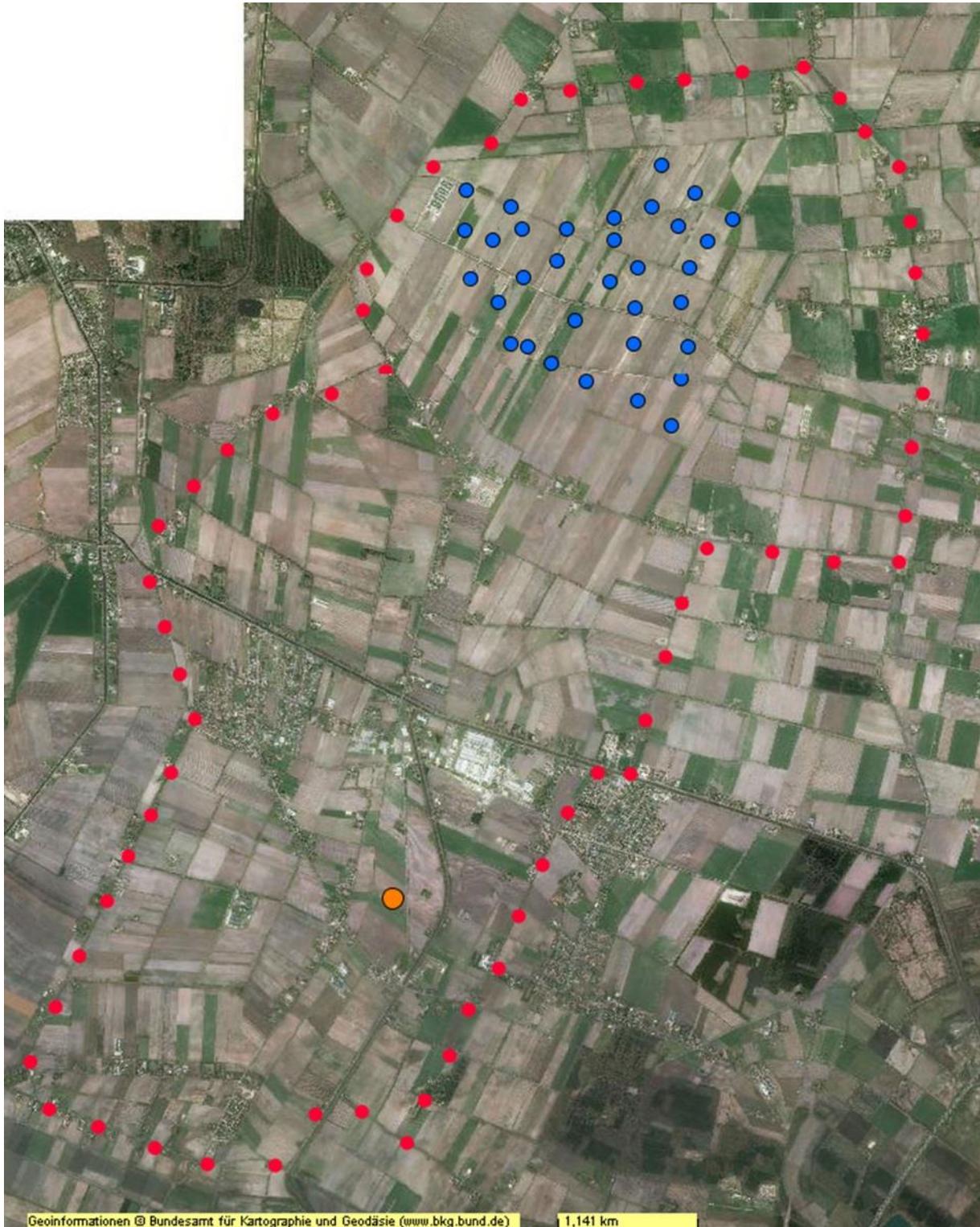
Le véhicule émetteur, un Mercedes Sprinter, s'est déplacé par intervalles de 10° autour du radiogoniomètre et du parc d'éoliennes le long du parcours indiqué par les points verts. Les infrastructures présentes ont dû être prises en compte pour planifier l'itinéraire. Certains tronçons n'étaient pas goudronnés et il a été nécessaire d'utiliser le Sprinter en mode 4x4.

Parcours de mesure (points verts) autour du parc d'éoliennes et des emplacements 0 à 2 du radiogoniomètre



Pour le radiogoniomètre 3, le parcours de mesure (ligne de points rouges) a dû être considérablement élargi pour que le radiogoniomètre et le parc d'éoliennes se trouvent tous deux dans le champ de mesure.

Parcours de mesure (points rouges) autour du parc d'éoliennes et de l'emplacement 3 du radiogoniomètre



9 Résultats des mesures radiogoniométriques

9.1 Mesures de référence

Dans les diagrammes présentés dans les pages suivantes, l'intervalle de tolérance pour les radiogoniomètres fixes du service d'inspection et de contrôle des émissions radioélectriques est indiqué en couleur. Il convient de noter que les calculs ont été effectués en tenant compte des spécifications du système radiogoniométrique présentées dans la section 4.2, et des effets des erreurs de radiogoniométrie évoqués dans la section 1.

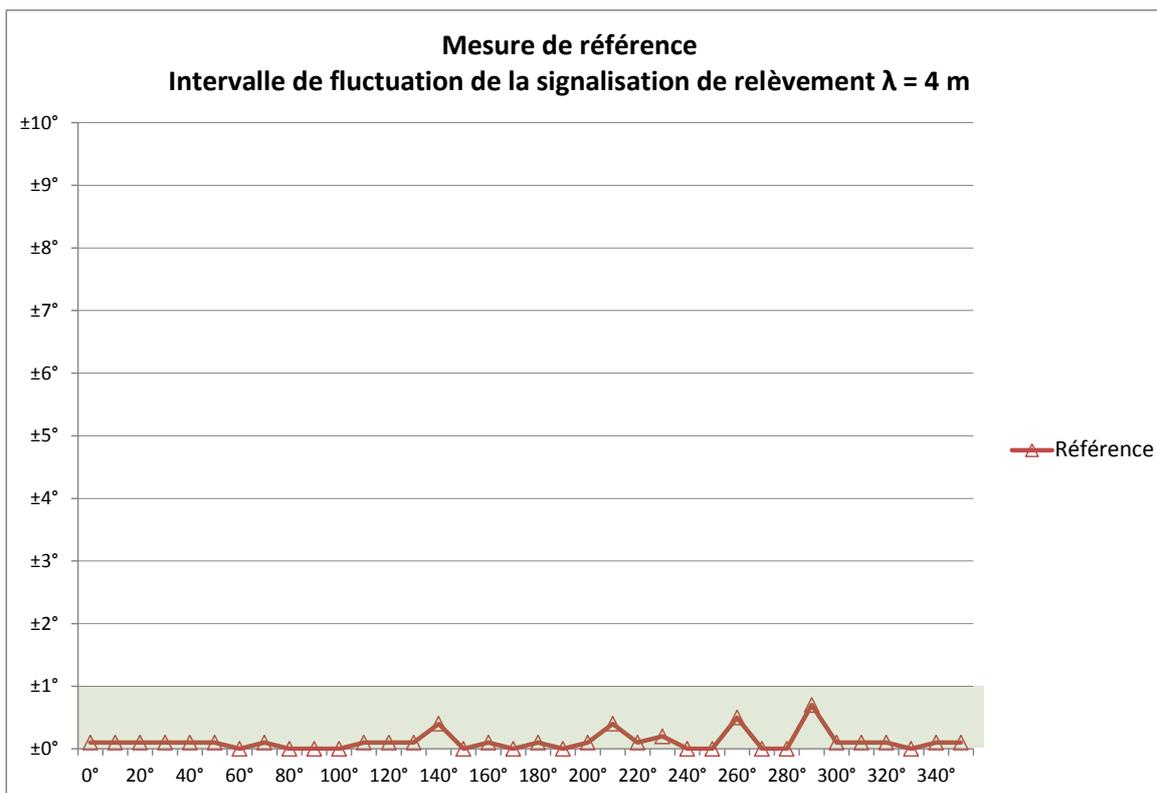
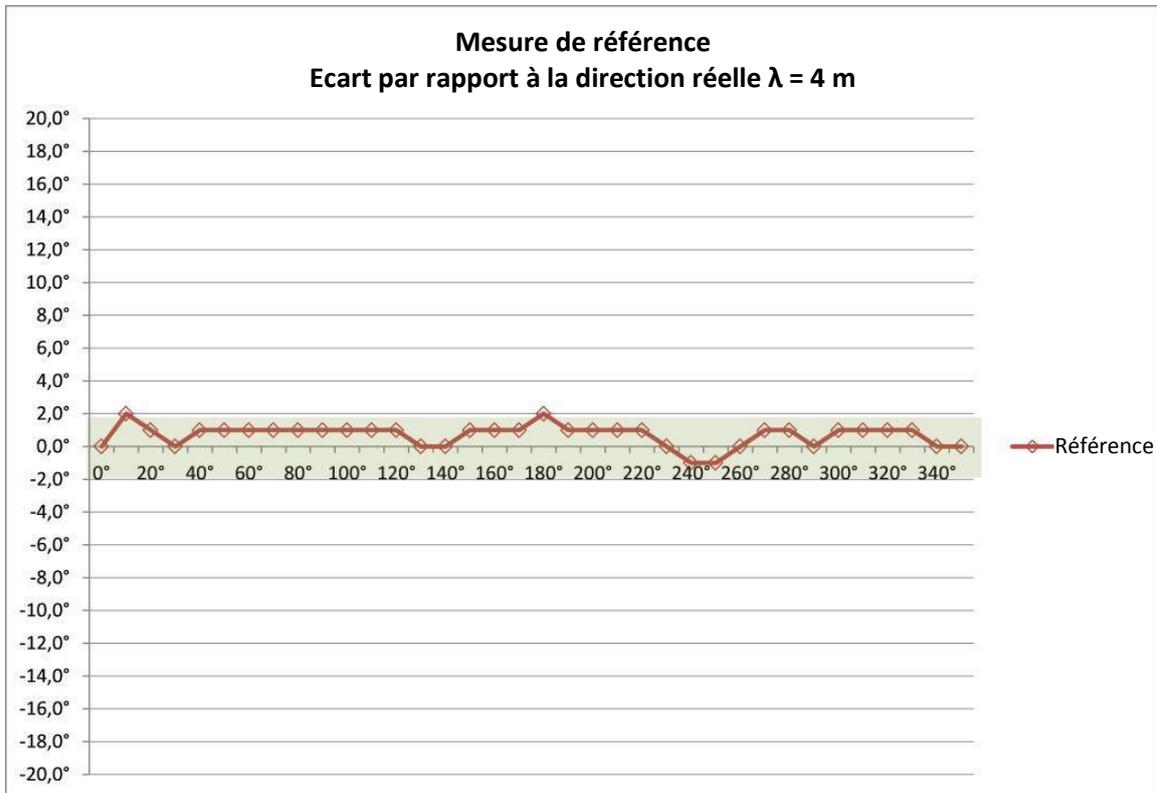
Comme nous l'avons indiqué plus haut, les radiogoniomètres fixes doivent être montés sur des mâts de hauteur suffisante et être situés dans un environnement dégagé pour pouvoir fonctionner correctement. La difficulté consistait donc à reproduire ces conditions en utilisant un dispositif de mesure portatif de manière à pouvoir mener, au prix d'un effort limité, une étude dont les conclusions pouvaient aussi s'appliquer à des radiogoniomètres fixes.

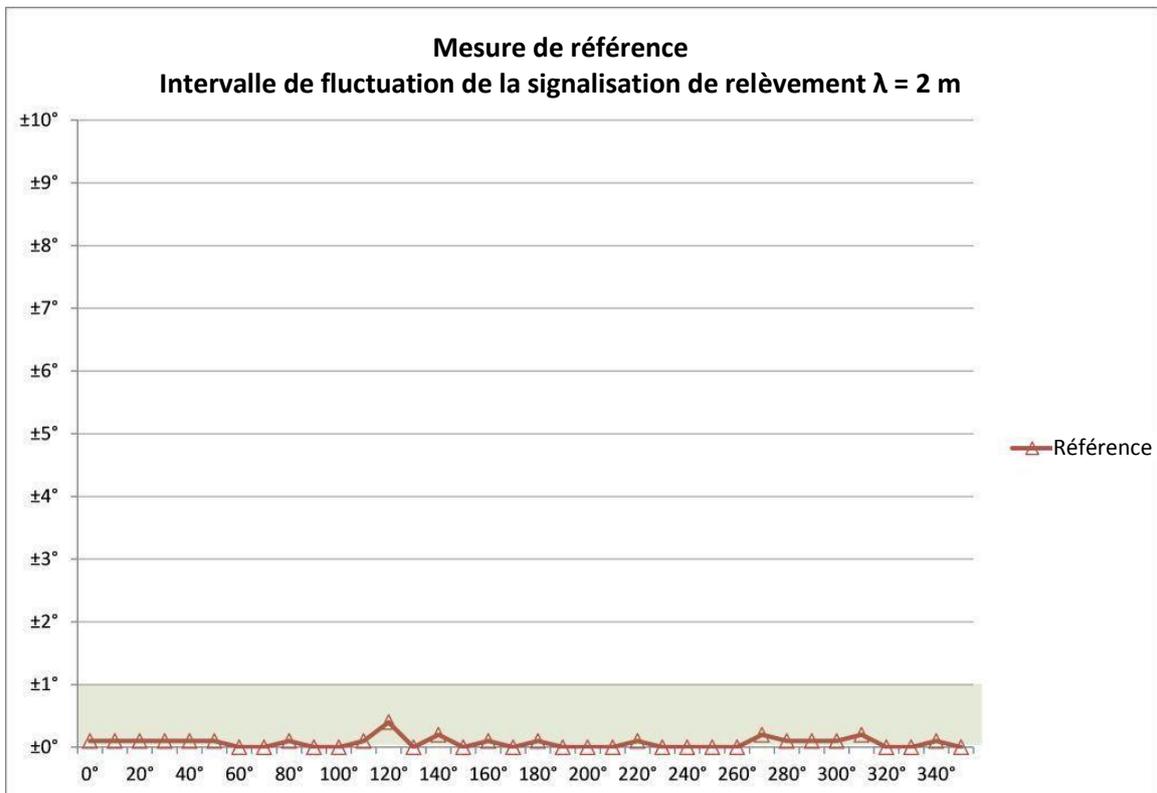
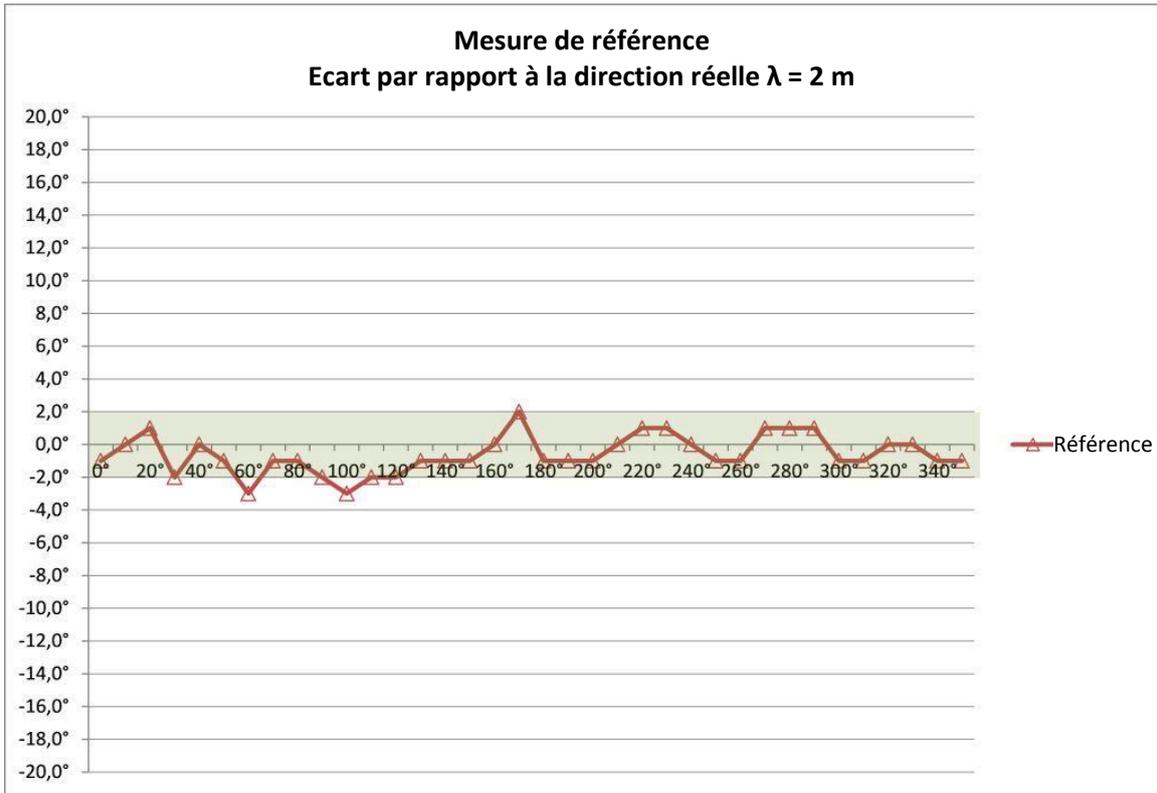
Mesures de référence effectuées sur terrain dégagé près de Kerken

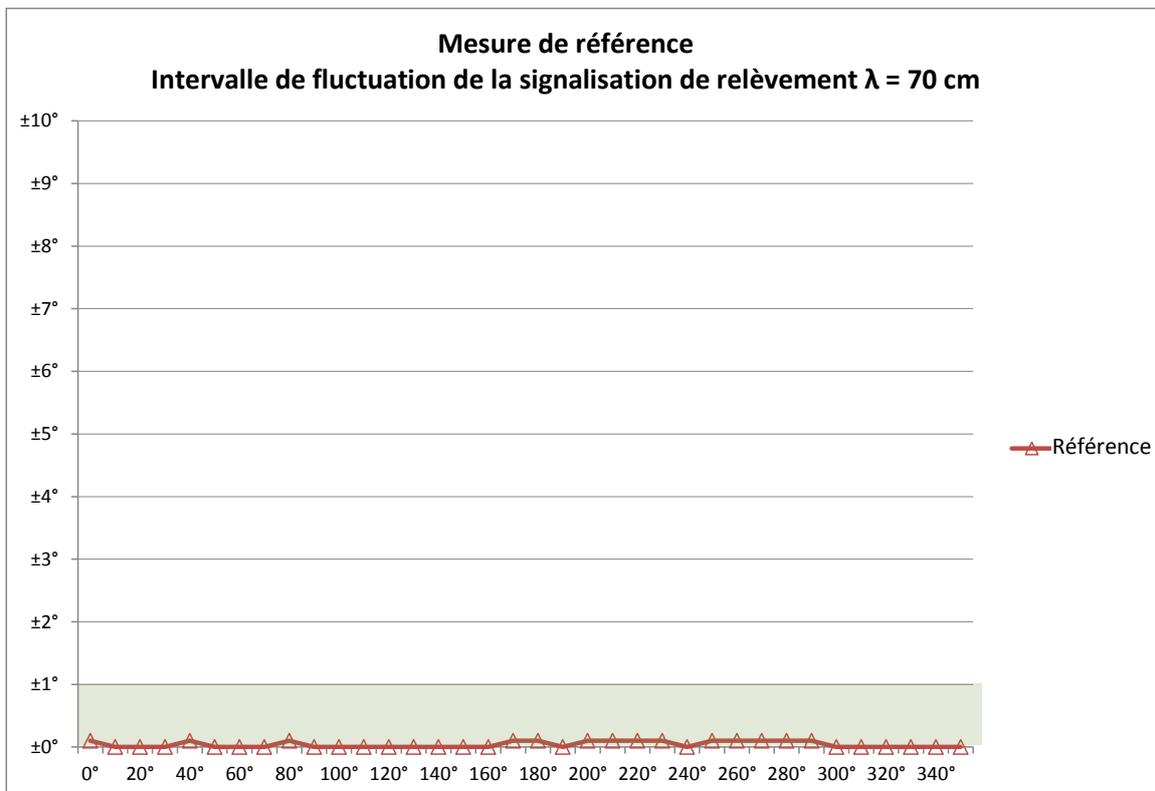
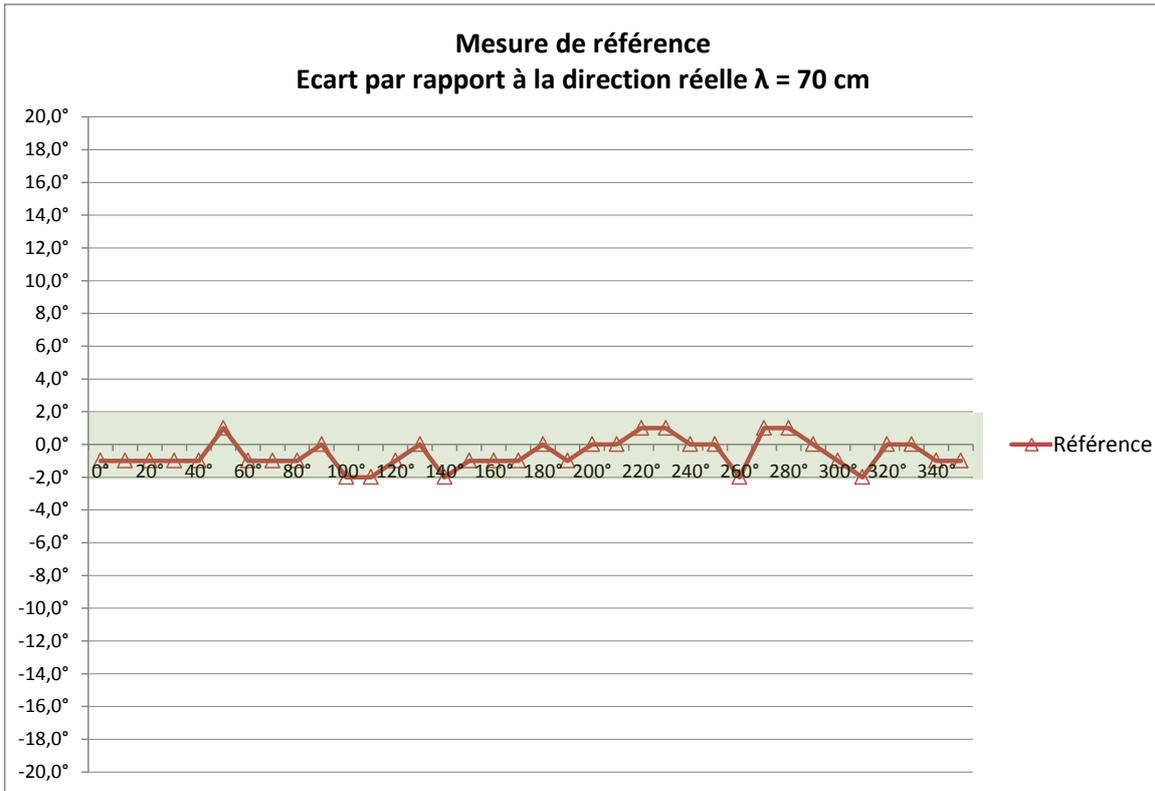


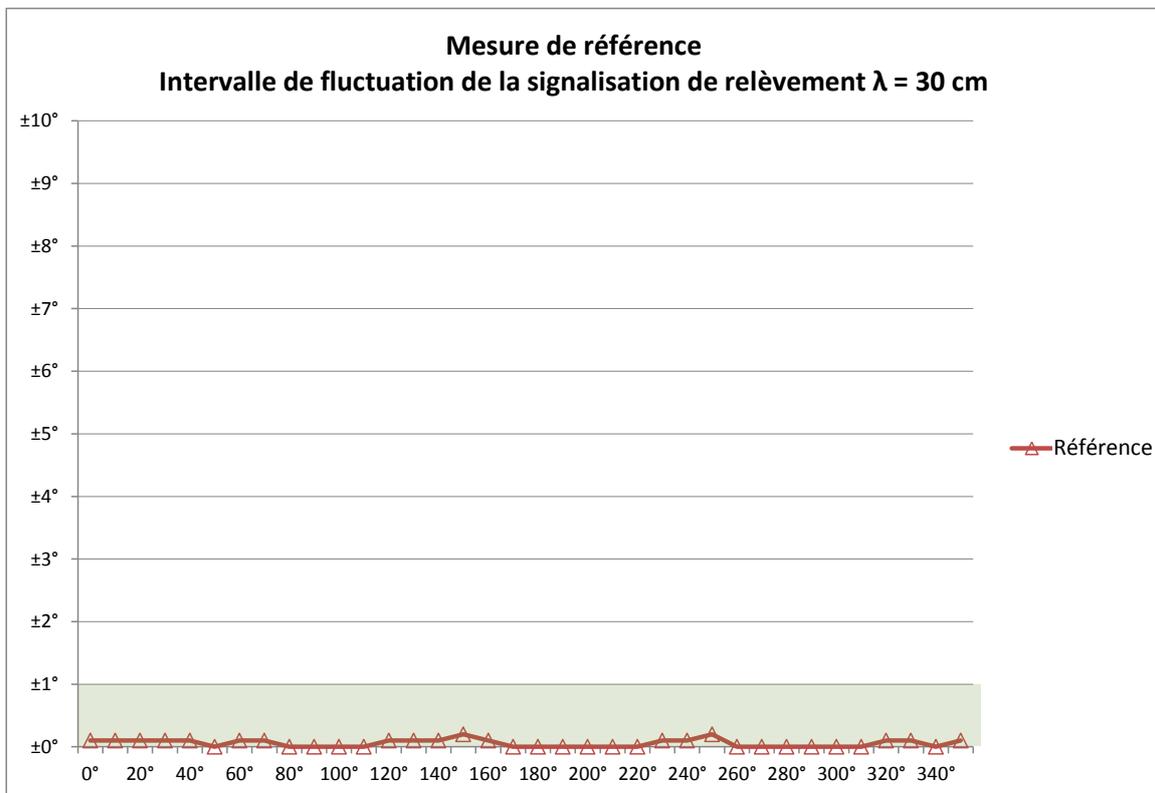
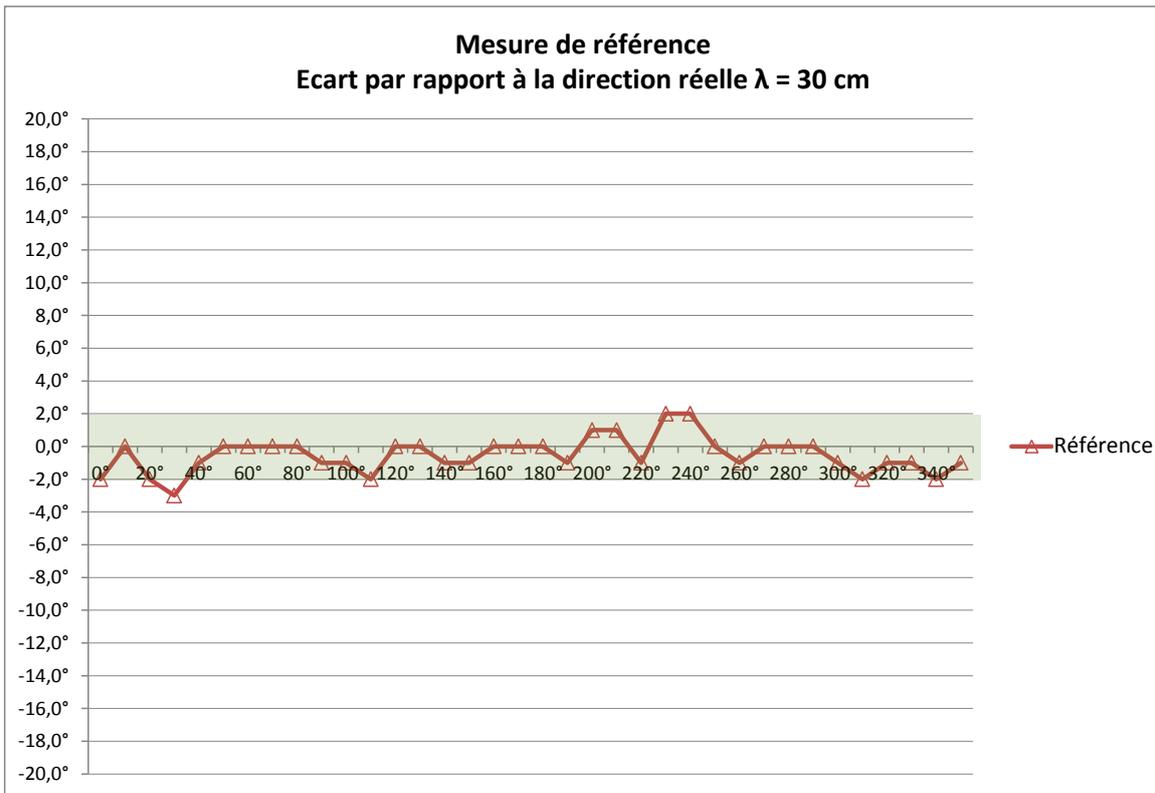
9.1.1 Bandes d'ondes métriques et décimétriques

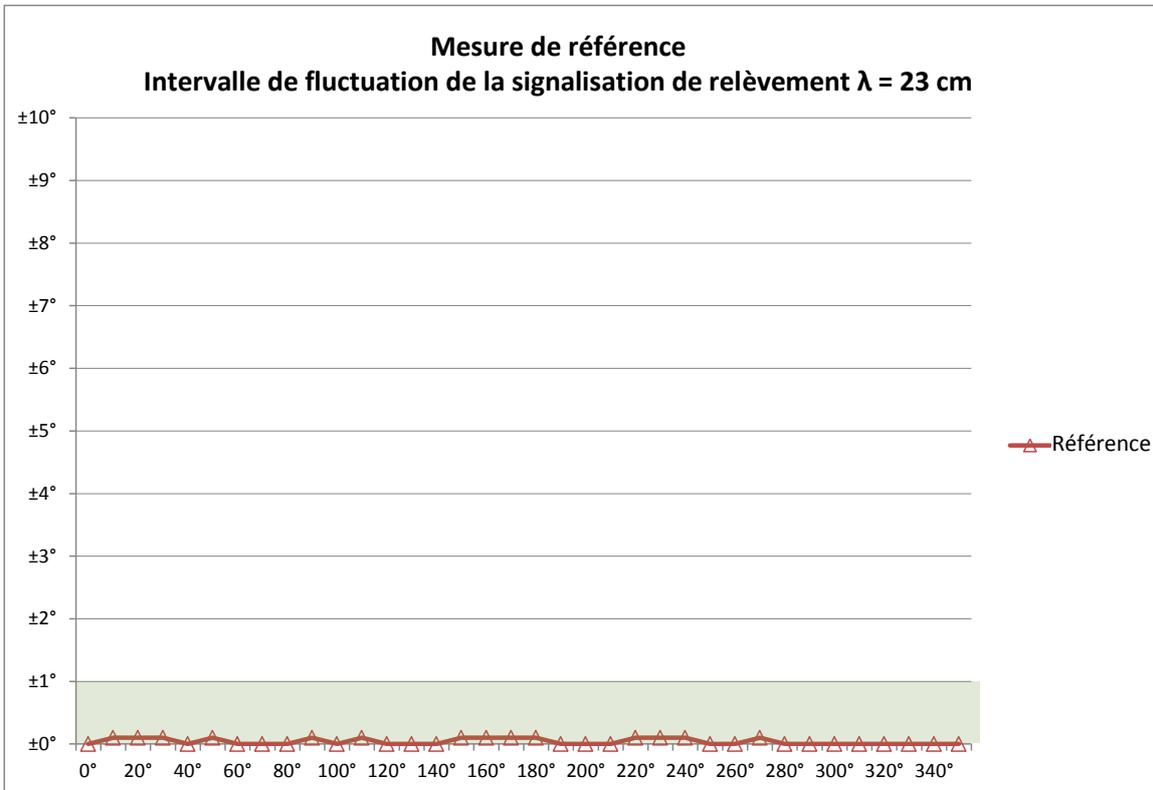
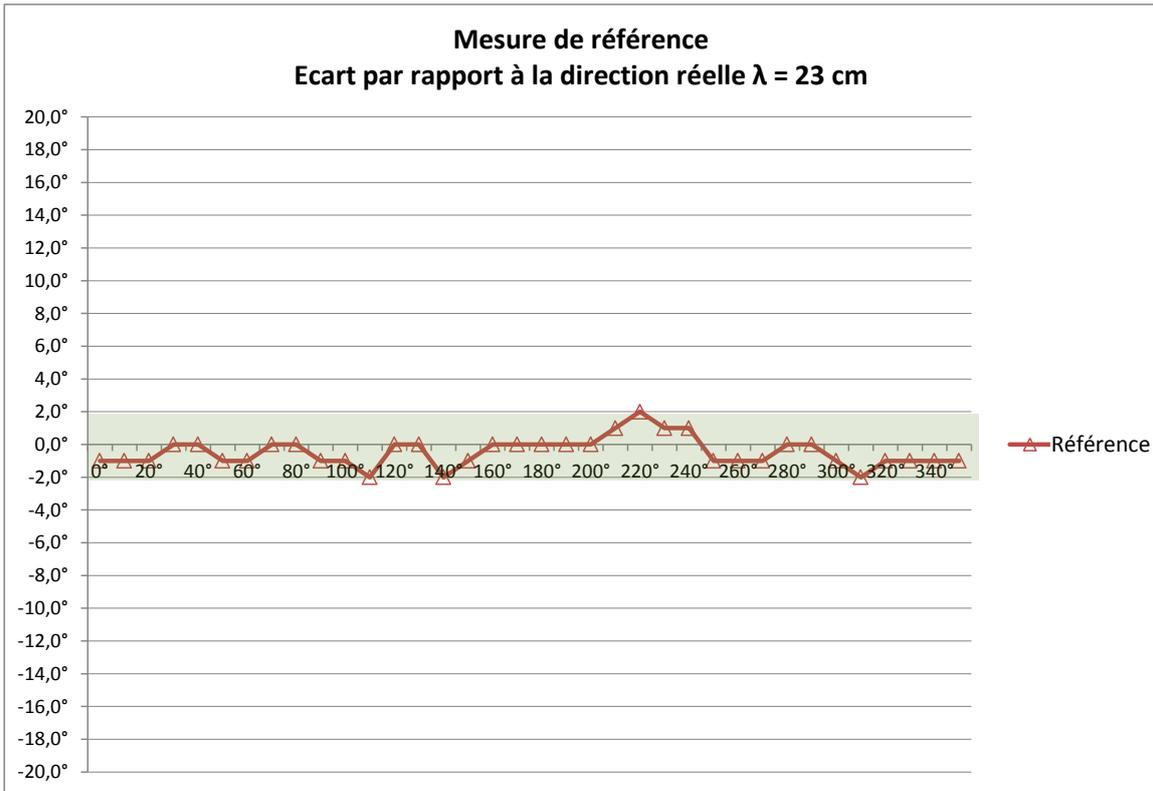
Une mesure de référence a été effectuée conformément à la section 4.2 pour vérifier le dispositif de mesure. Les résultats sont présentés ci-dessous.

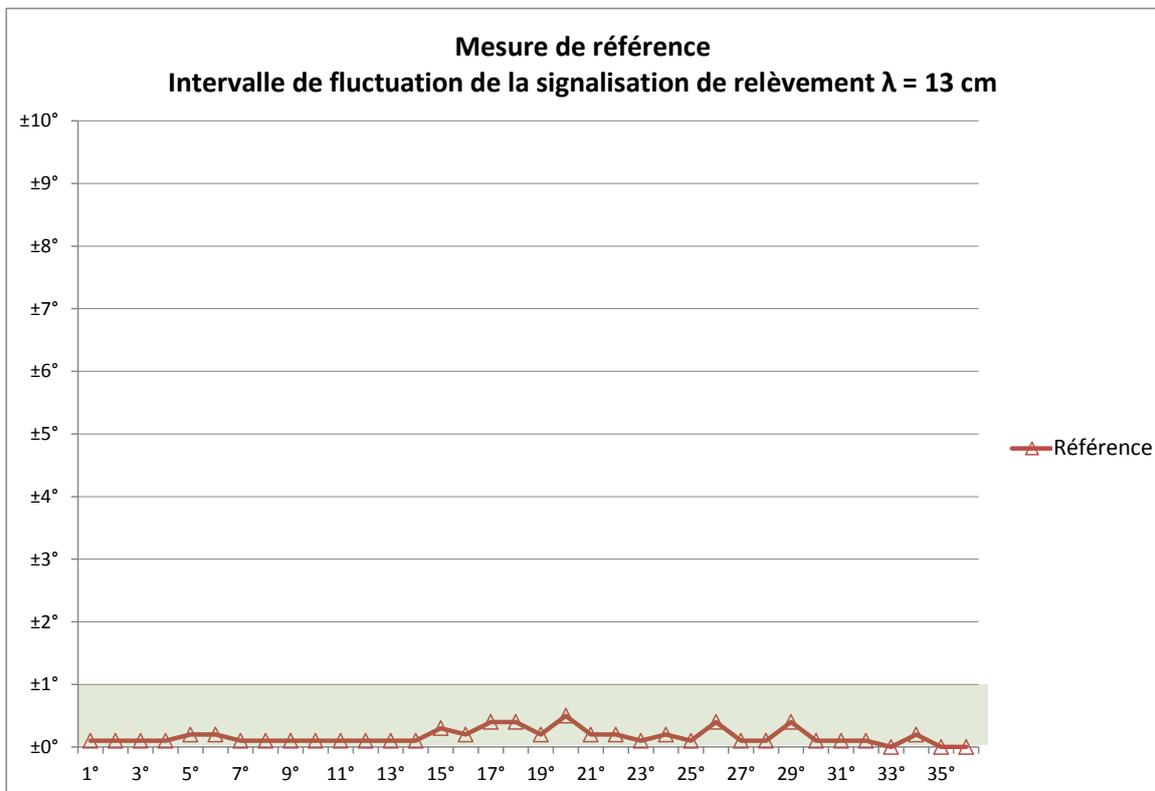
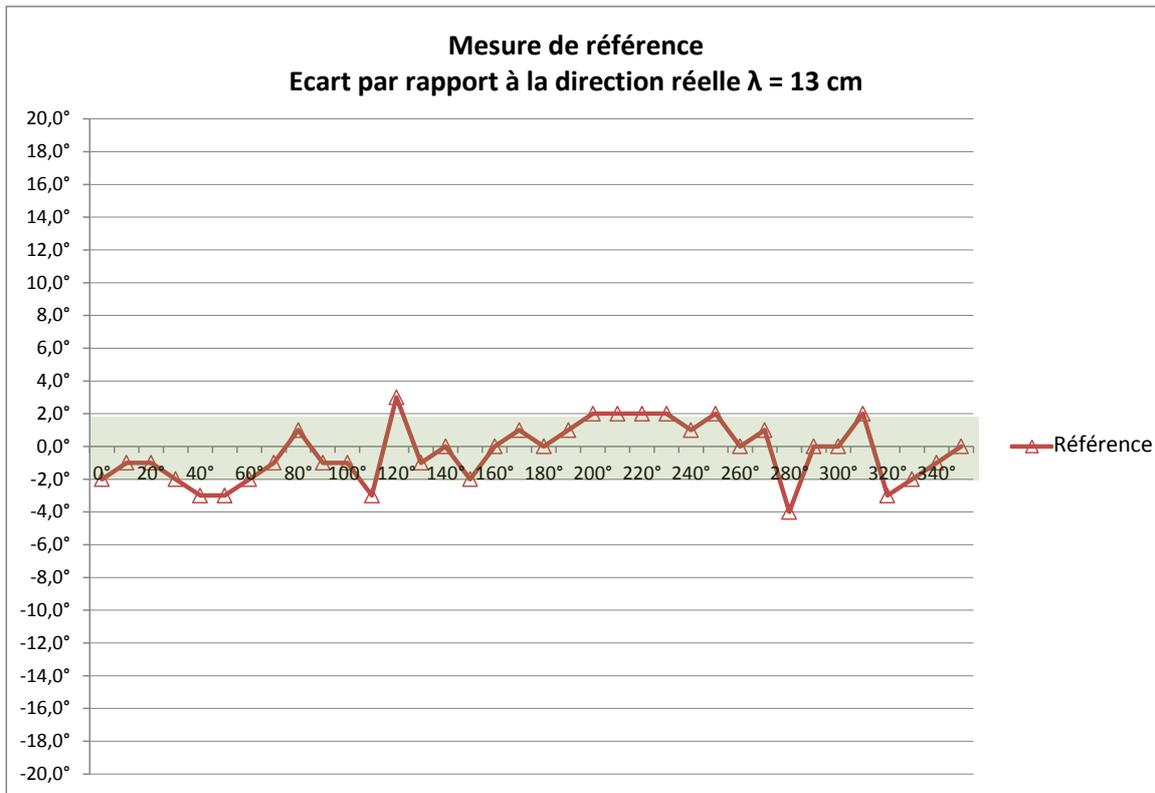












Dans les bandes de fréquences de 4 m, 2 m, 70 cm, 30 cm et 23 cm, les mesures obtenues se situaient pour la plupart à l'intérieur de l'intervalle de tolérance des radiogoniomètres fixes. Seules les fréquences de 2 m et 30 cm ont affiché des mesures dans lesquelles l'intervalle de tolérance était dépassé, et le dépassement n'était guère que de 1° dans une direction donnée. Même dans la bande de fréquences des 13 cm, qui est particulièrement délicate en raison de sa courte longueur d'onde, l'intervalle de tolérance n'a été dépassé de 2° qu'une seule fois, et de 1° dans deux autres directions.

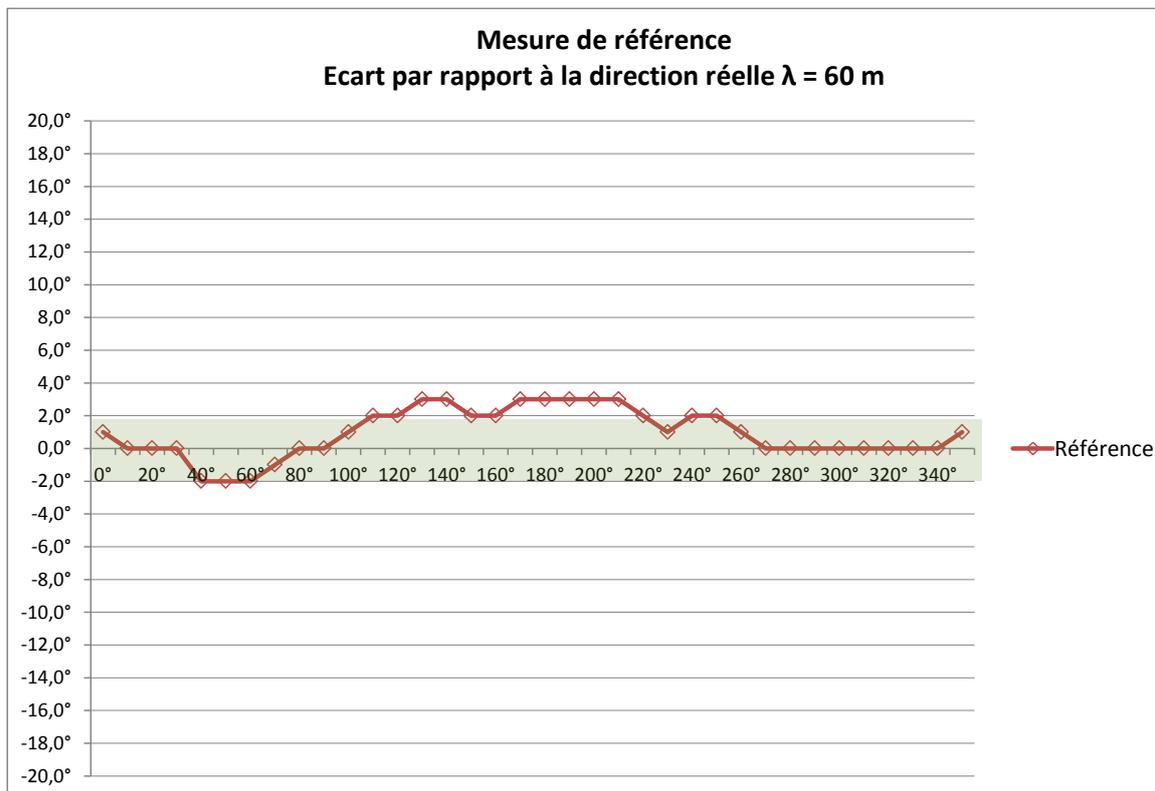
La marge de fluctuation de la signalisation de relèvement, qui est importante pour pouvoir évaluer les résultats du radiogoniomètre, s'est systématiquement située à l'intérieur de l'intervalle toléré.

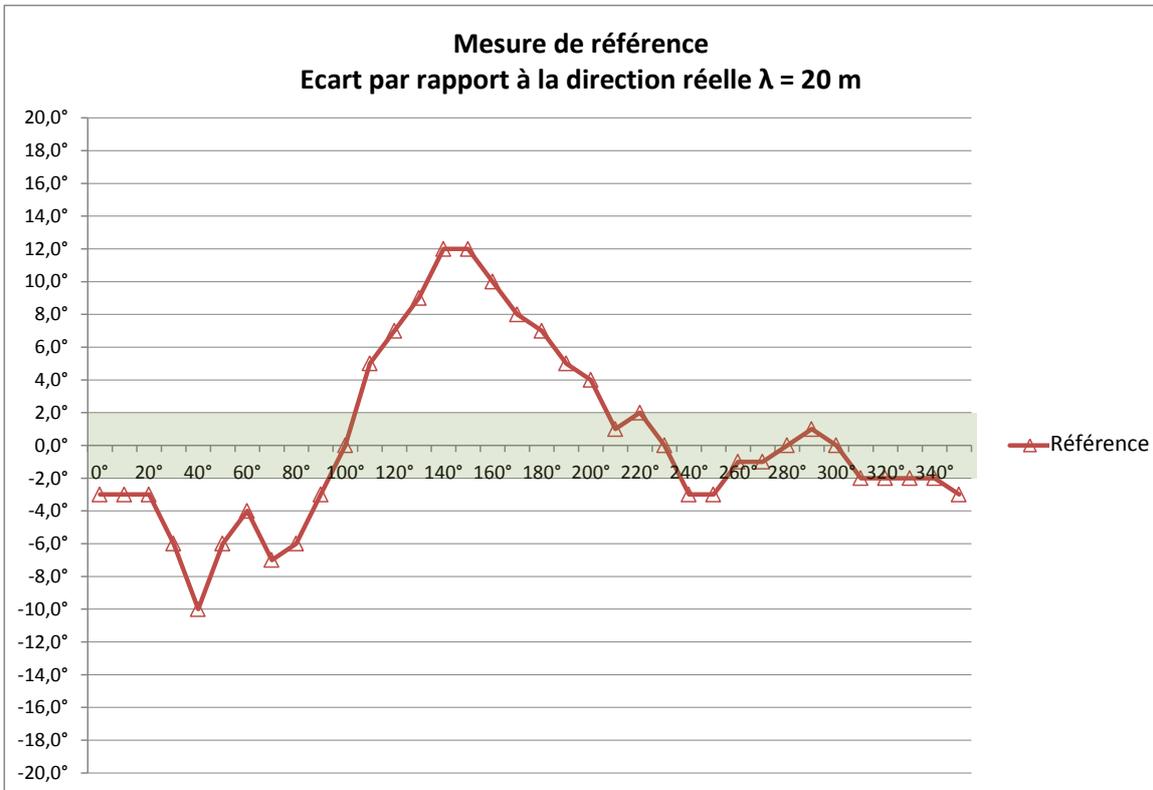
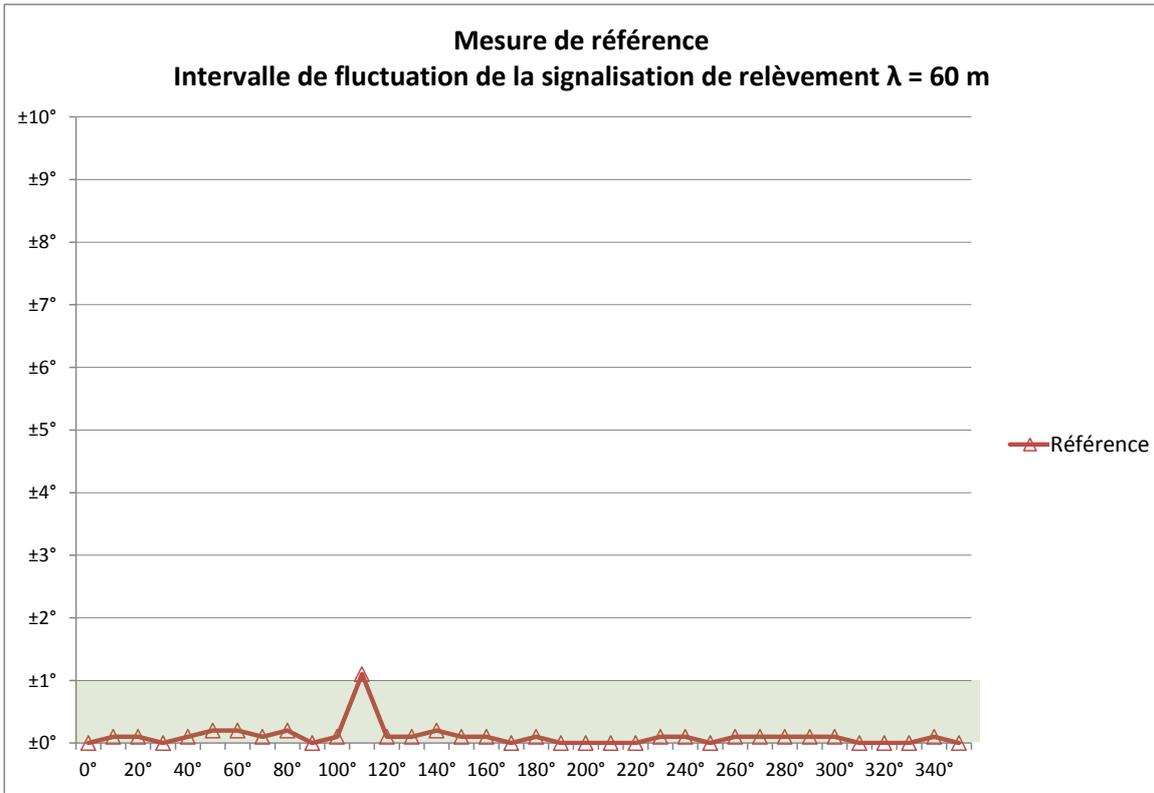
Le dispositif de mesure pouvait donc être utilisé pour effectuer l'étude prévue.

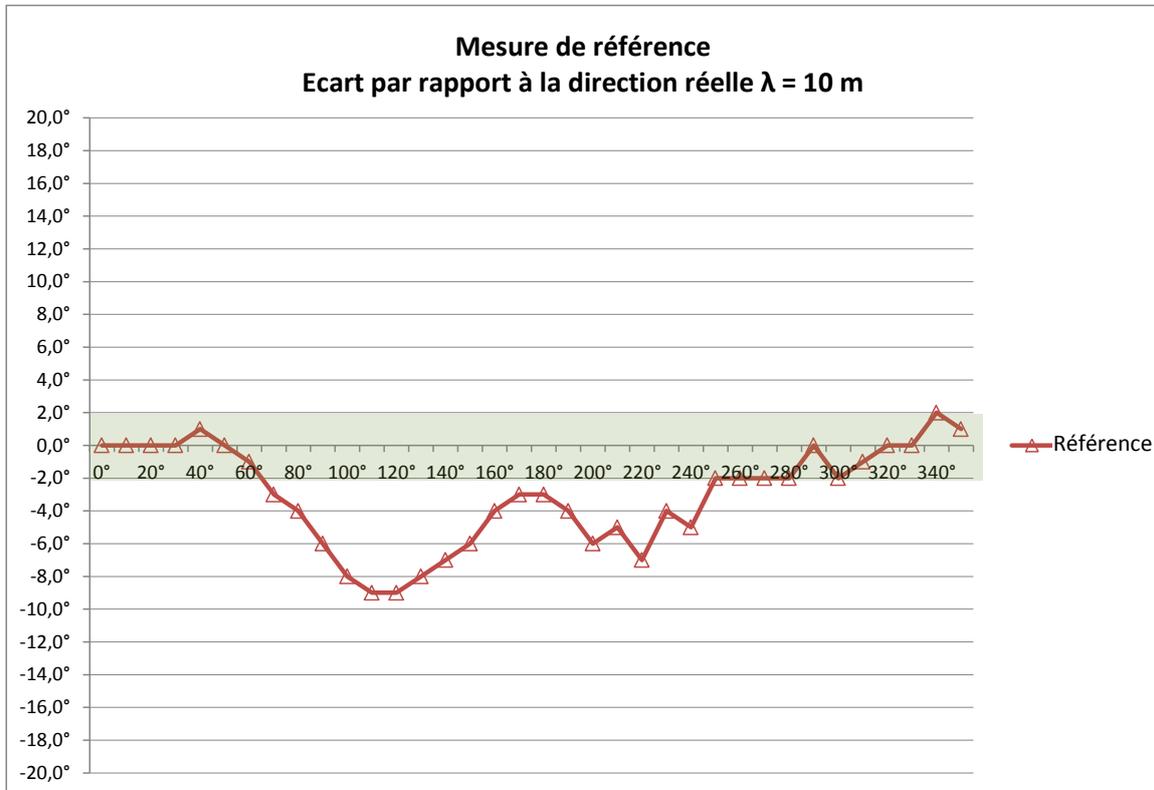
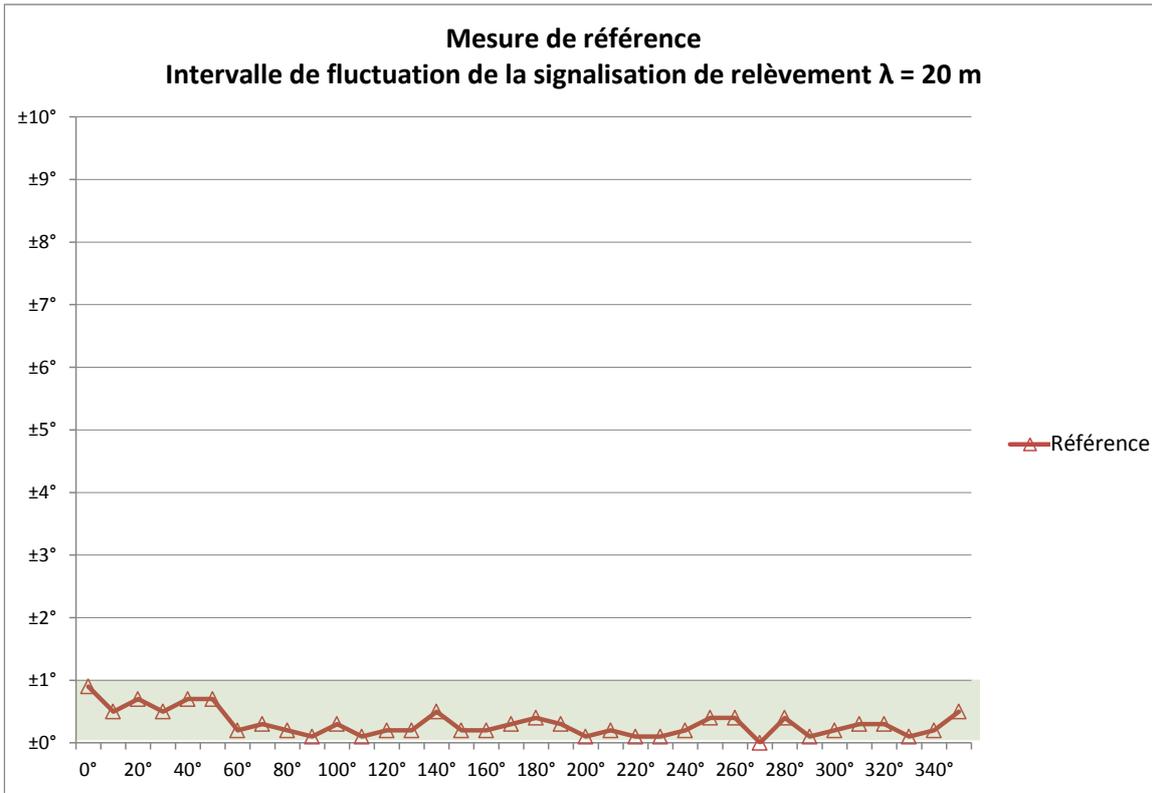
9.1.2 Bandes d'ondes décimétriques

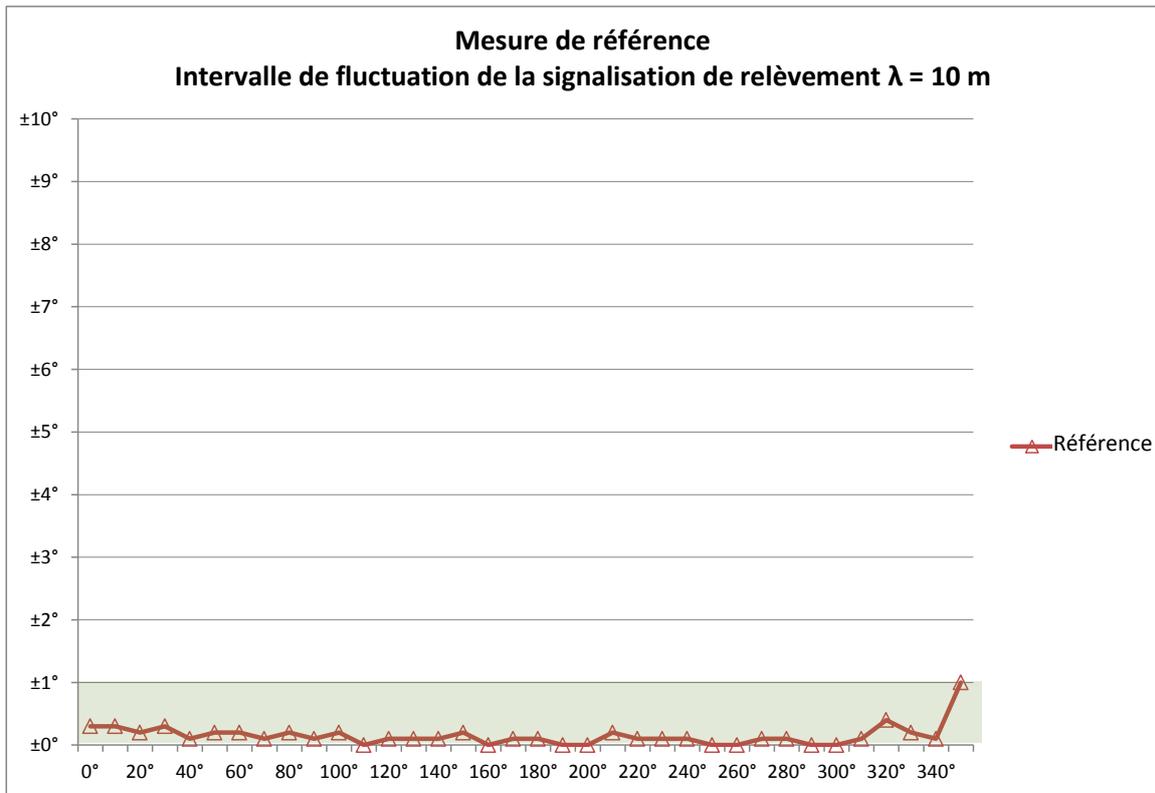
Le commanditaire de l'étude avait également demandé que des mesures soient effectuées dans la bande d'ondes décimétriques, qui couvre les fréquences entre 3 et 30 MHz, et donc dans les longueurs d'onde situées entre 80 m et 10 m. La taille des antennes dépend surtout des longueurs d'ondes dans lesquelles il est prévu de travailler, et les mesures en ondes décimétriques nécessitent, pour des raisons physiques, de grandes antennes qui ne sont pas compatibles avec un travail de mesure fondé sur des dispositifs portatifs. Des solutions techniques de fortune peuvent être employées pour réduire la taille de l'antenne, mais elles diminuent l'efficacité du rendement de rayonnement et risquent de déformer le diagramme de rayonnement. Certains éléments du dispositif de mesure (câbles, etc.) peuvent également avoir une incidence sur les mesures car ils émettent un rayonnement horizontal susceptible de perturber le fonctionnement du radiogoniomètre.

Les mesures de références dans la bande d'ondes décimétriques ont donc aussi été effectuées avec le dispositif décrit dans la section 5. Les résultats sont présentés ci-après.









Dans la bande des 60 m, les écarts des valeurs radiogoniométriques sont restés pour l'essentiel dans l'intervalle de tolérance, les dépassements atteignant tout juste 1°. En revanche, le dépassement de l'intervalle de tolérance a atteint 10° dans la bande des 20 m et 7° dans la bande des 10 m.

Compte tenu de ces écarts marqués, le dispositif de mesure a fait l'objet d'essais supplémentaires. Ces essais ont montré que le diagramme de rayonnement différait de manière substantielle du diagramme omnidirectionnel souhaité, en particulier dans la bande des 10 m, la direction la plus favorable se trouvant manifestement au-dessus de l'avant du véhicule et la moins favorable à l'arrière du véhicule.

Le dispositif de mesure doit être employé conjointement avec une antenne symétrique, verticale et non résonnante de station terrienne (antenne au sol). Le rendement de rayonnement de cette antenne est médiocre et il dépend dans une large mesure du contreponds (la terre ou le corps conducteur d'un véhicule). Comme nous l'avons indiqué dans la section 5.2, lorsqu'on monte l'antenne à l'arrière du véhicule, il faut disposer d'un contreponds hautement conducteur (la terre) à l'avant du véhicule (donc de l'antenne) et n'avoir aucun contreponds à l'arrière de l'antenne (dans la direction opposée à celle du déplacement) ni sur les côtés. Dans la bande des 10 m, la taille du contreponds à l'avant du véhicule correspond à la moitié de la longueur d'onde, et dans la bande des 20 m elle correspond à un quart de la longueur d'onde. Le contreponds augmente le rendement de rayonnement et par conséquent le gain d'antenne à l'avant du véhicule.

Dans la partie supérieure de la gamme d'ondes décimétriques, le diagramme de rayonnement omnidirectionnel a donc disparu, et le radiogoniomètre ne peut plus fonctionner correctement dans un champ de rayonnement déformé. Les réflexions provenant d'objets plus éloignés ont probablement un effet particulièrement marqué en raison de l'onde directe amortie rayonnant de manière transversale par rapport au véhicule.

Dans la bande des 60 m, le contreponds du toit du véhicule ne s'étend que sur environ 8% de la longueur d'onde; son efficacité est donc marginale. Le rendement de rayonnement qui en résulte est donc plus ou moins également médiocre dans toutes les directions, et le diagramme de rayonnement omnidirectionnel ne subit que l'influence de la terre environnante. Aux fins de l'étude, ce rayonnement

médiocre a pu être compensé en augmentant la puissance d'émission sans que cela ne cause d'effet néfaste. On peut présumer que les caractéristiques de la terre sont essentiellement identiques sur le lieu de mesure et dans la zone de Rütenbrooker Moor.

Les auteurs souhaitent aussi rappeler que les radiogoniomètres fixes à ondes courtes fonctionnent par ondes ionosphériques (d'où le cône de sécurité mentionné dans la section 1), tandis qu'un dispositif de mesure mobile fonctionne par ondes de sol. Les résultats des mesures ne sont donc pas directement transposables à un radiogoniomètre fixe en ondes courtes. Néanmoins, les mesures effectuées dans la bande des 60 m fournissent un certain nombre d'informations quant à l'éventuelle nécessité d'une distance de sécurité; c'est pourquoi seuls les résultats obtenus dans cette bande sont présentés ci-dessous.

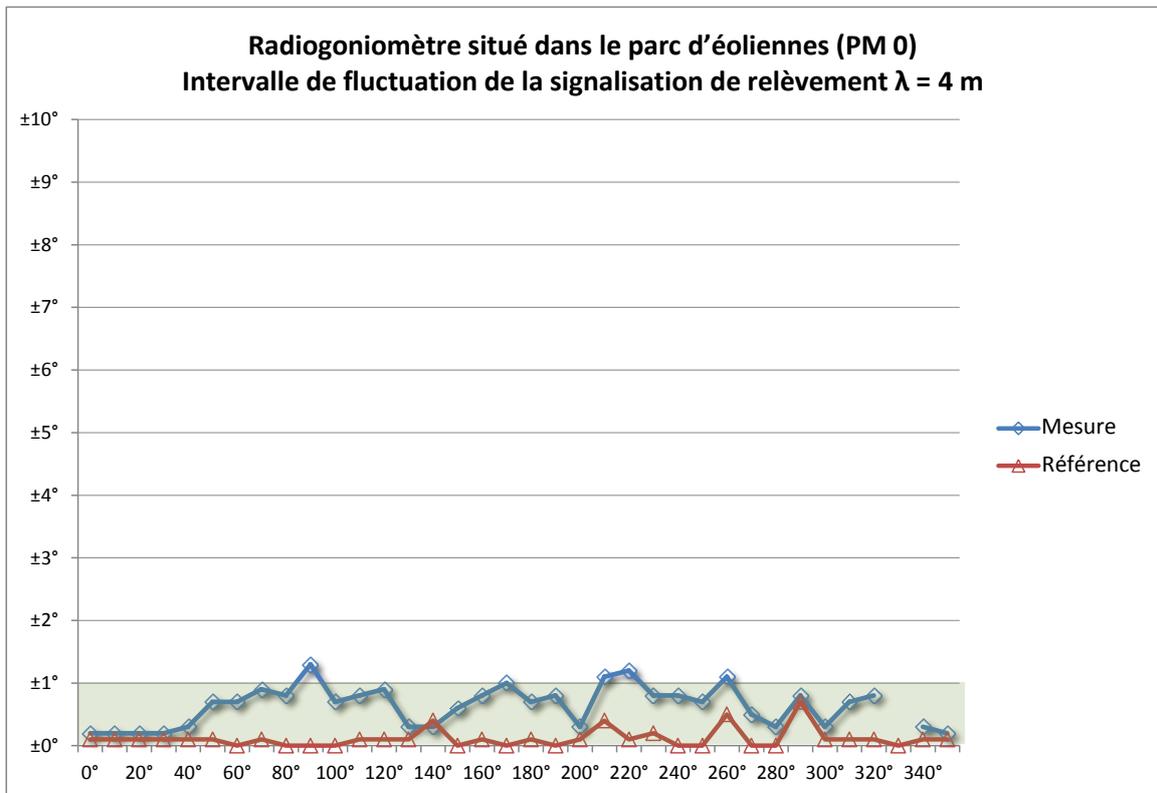
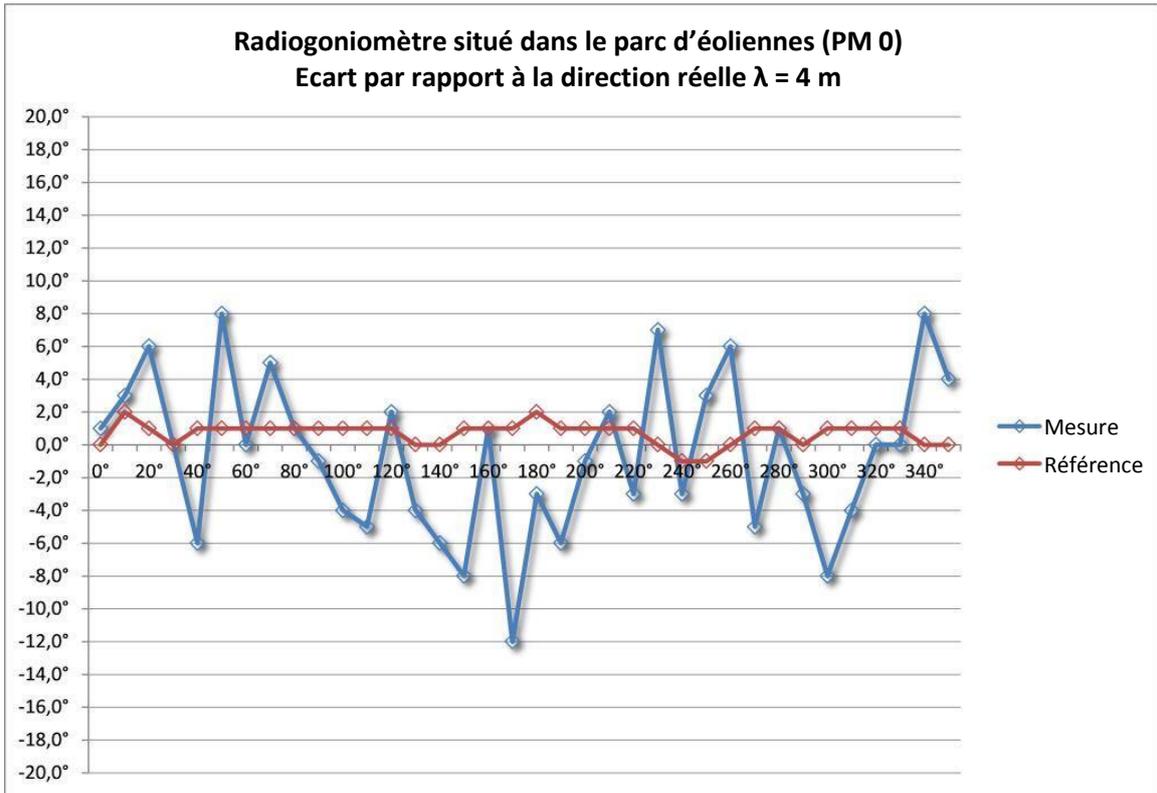
9.2 Séries de mesures

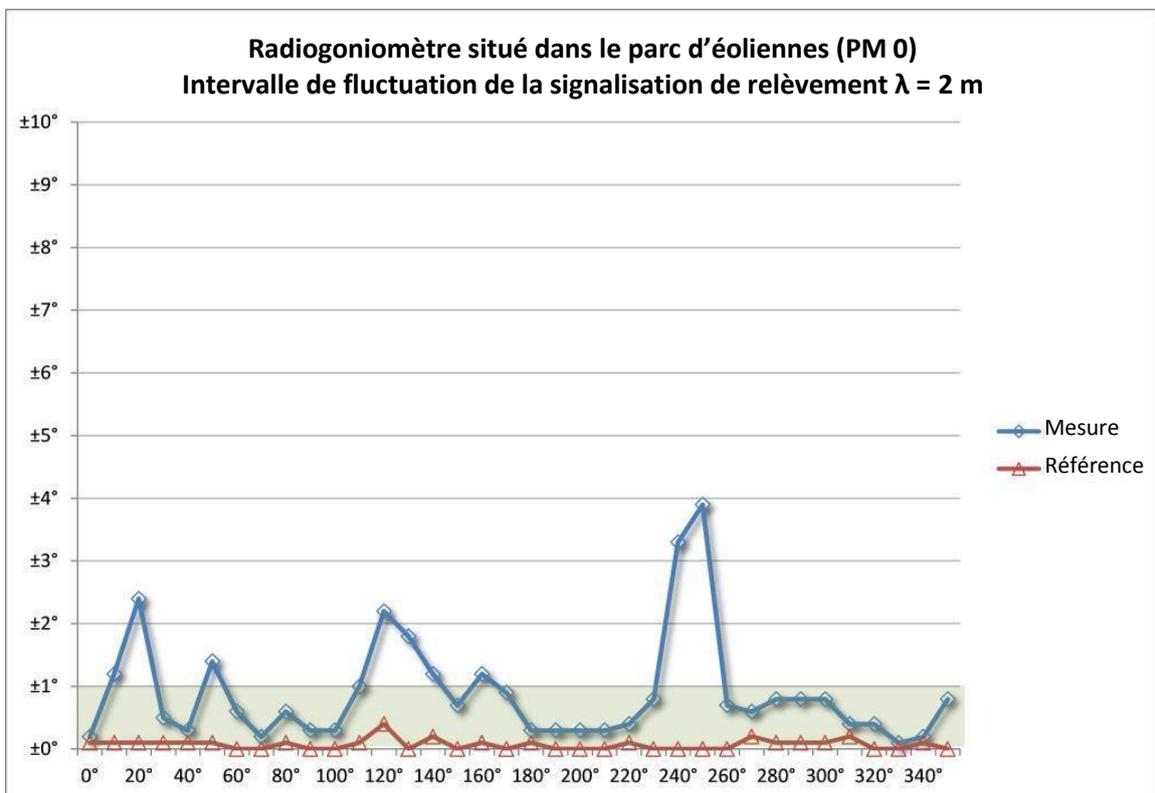
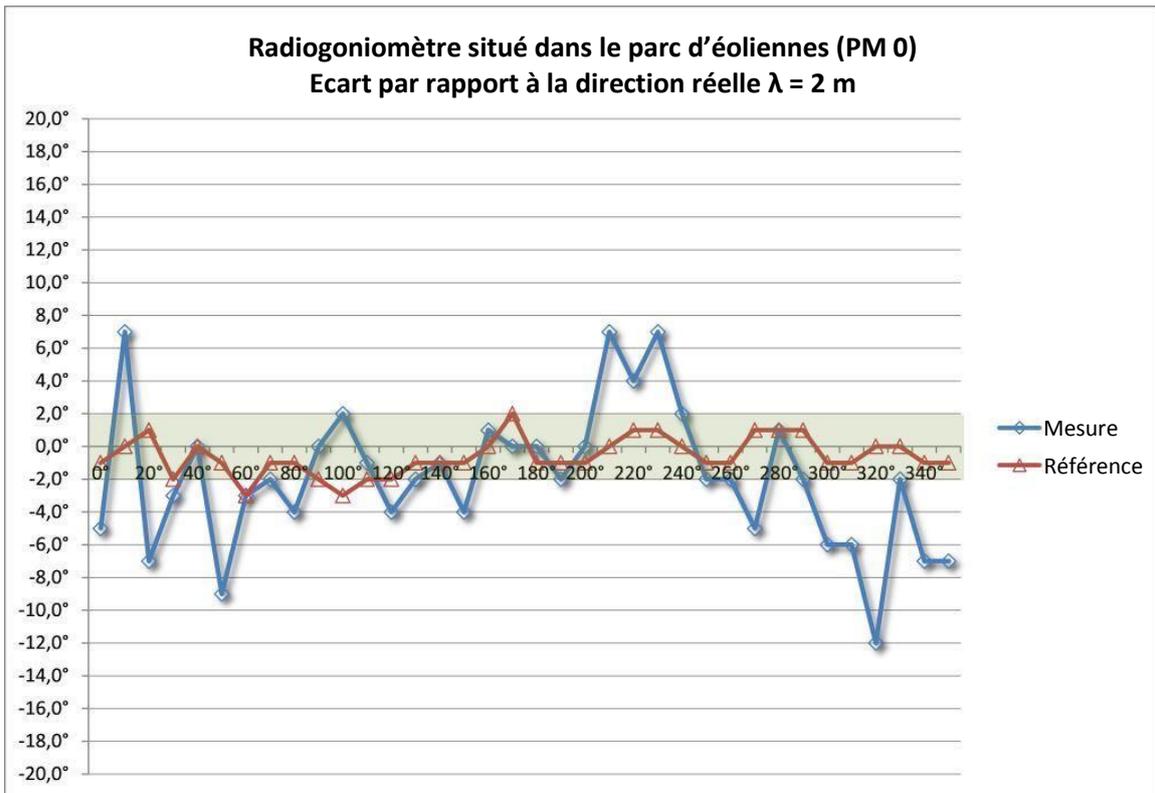
La première série de mesures visait à déterminer les effets auxquels un radiogoniomètre était soumis lorsqu'il se trouvait au centre d'un parc d'éoliennes et à proximité d'éoliennes dans les quatre quadrants radiogoniométriques. A cette fin, le radiogoniomètre a été installé à l'emplacement indiqué dans la section 7.1. D'autres séries de mesures visaient à déterminer les effets sur le radiogoniomètre lorsque celui-ci se trouvait en bordure du parc d'éoliennes (à proximité d'éoliennes dans deux quadrants, voir la section 7.2), et lorsqu'il se trouvait à 2,5 km (voir section 7.3, un quadrant) et à 4,6 km du parc d'éoliennes (voir la section 7.4).

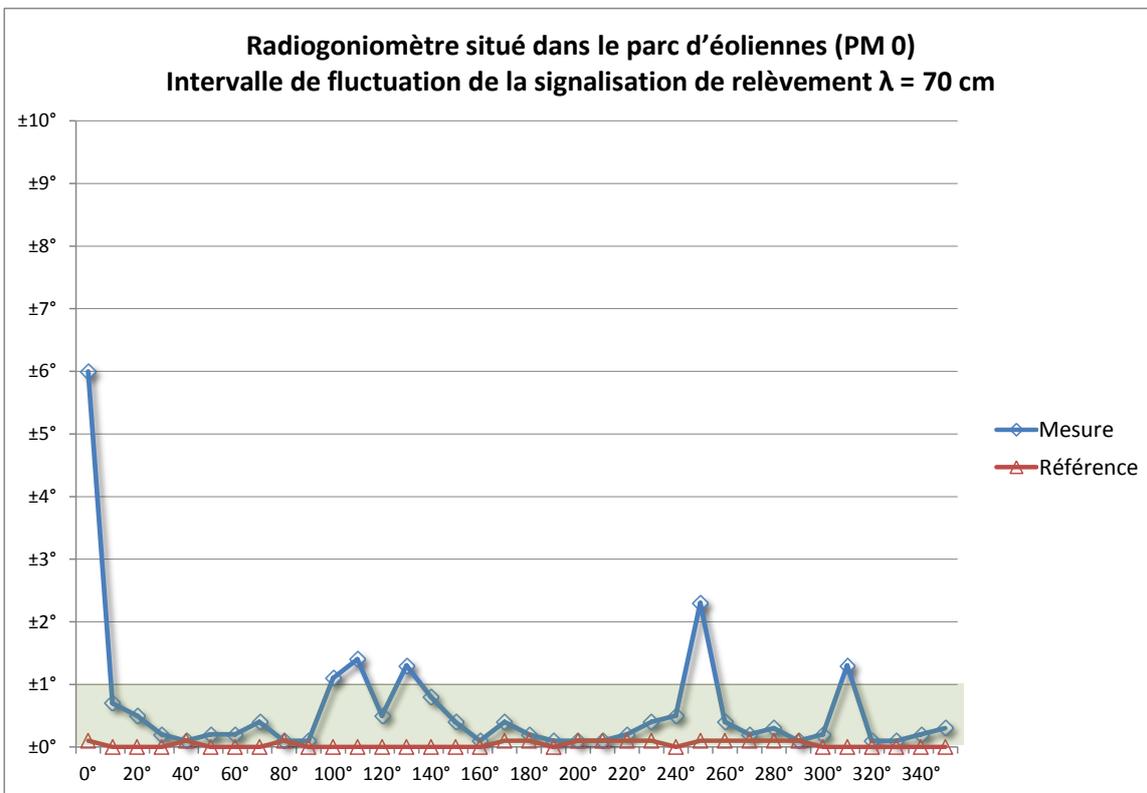
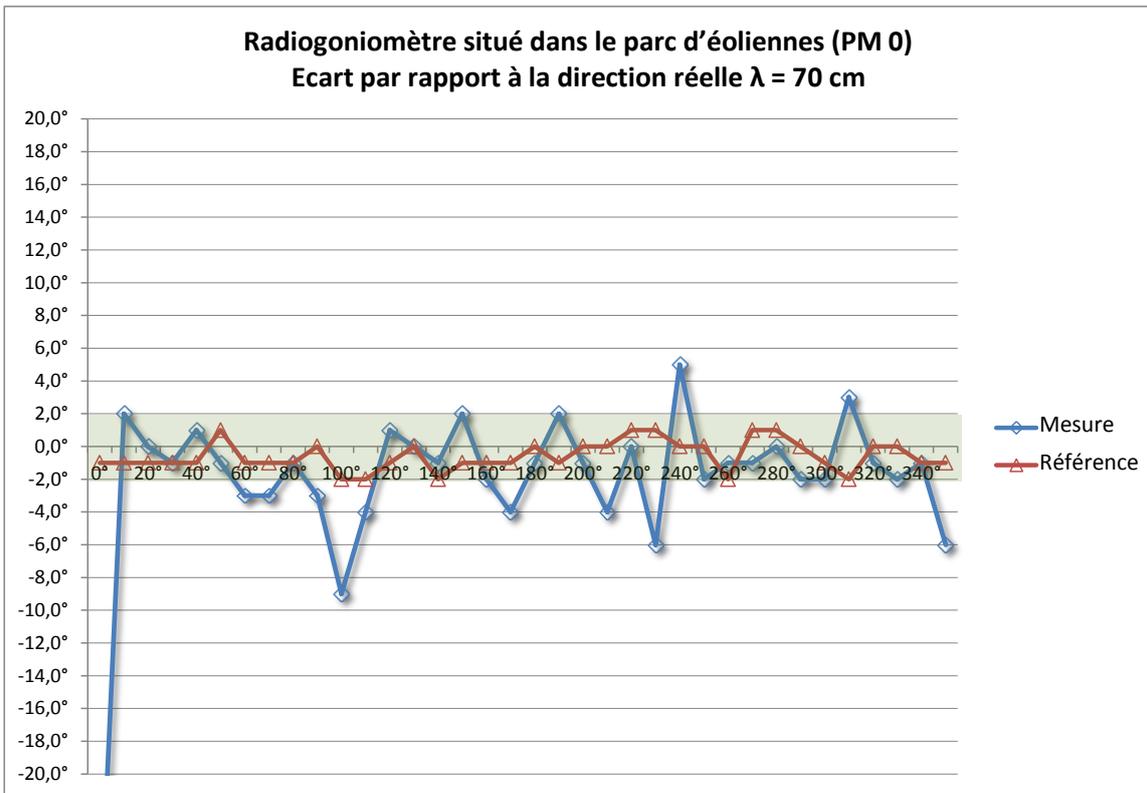
Pour faciliter la comparaison, les diagrammes ci-après indiquent les résultats des séries de mesures ainsi que ceux des mesures de référence et l'intervalle de tolérance.

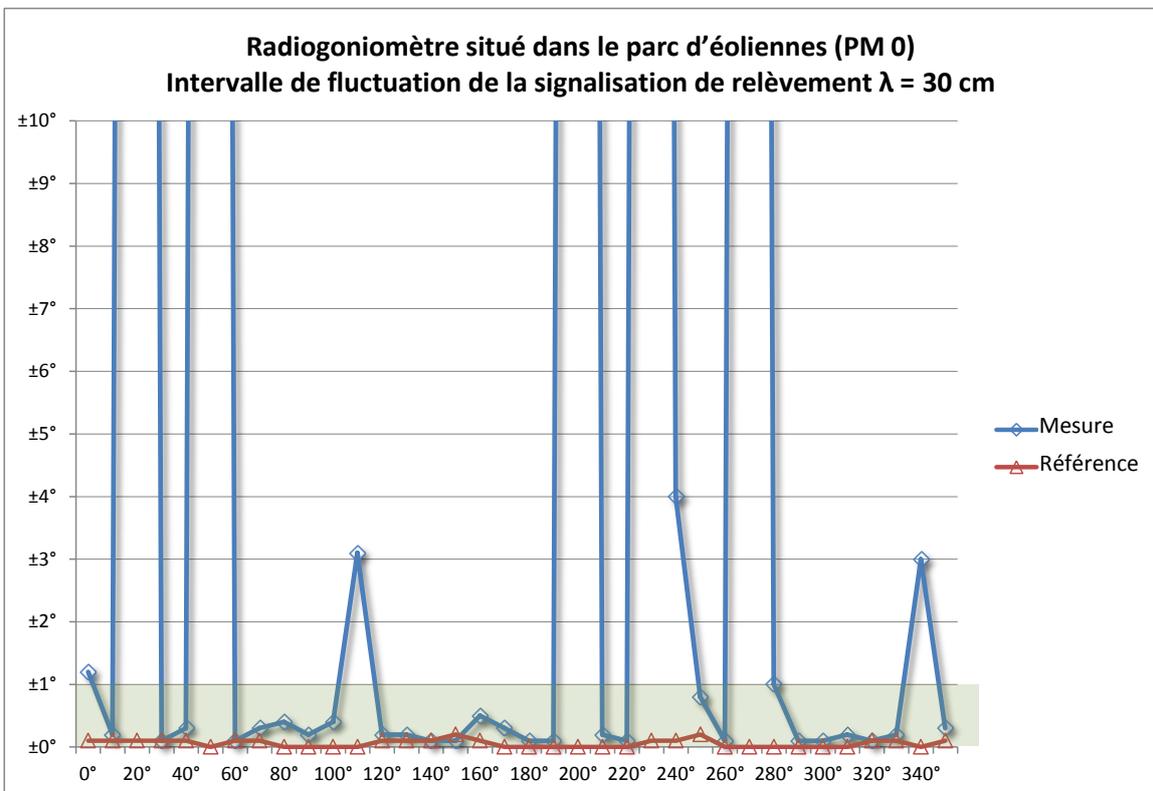
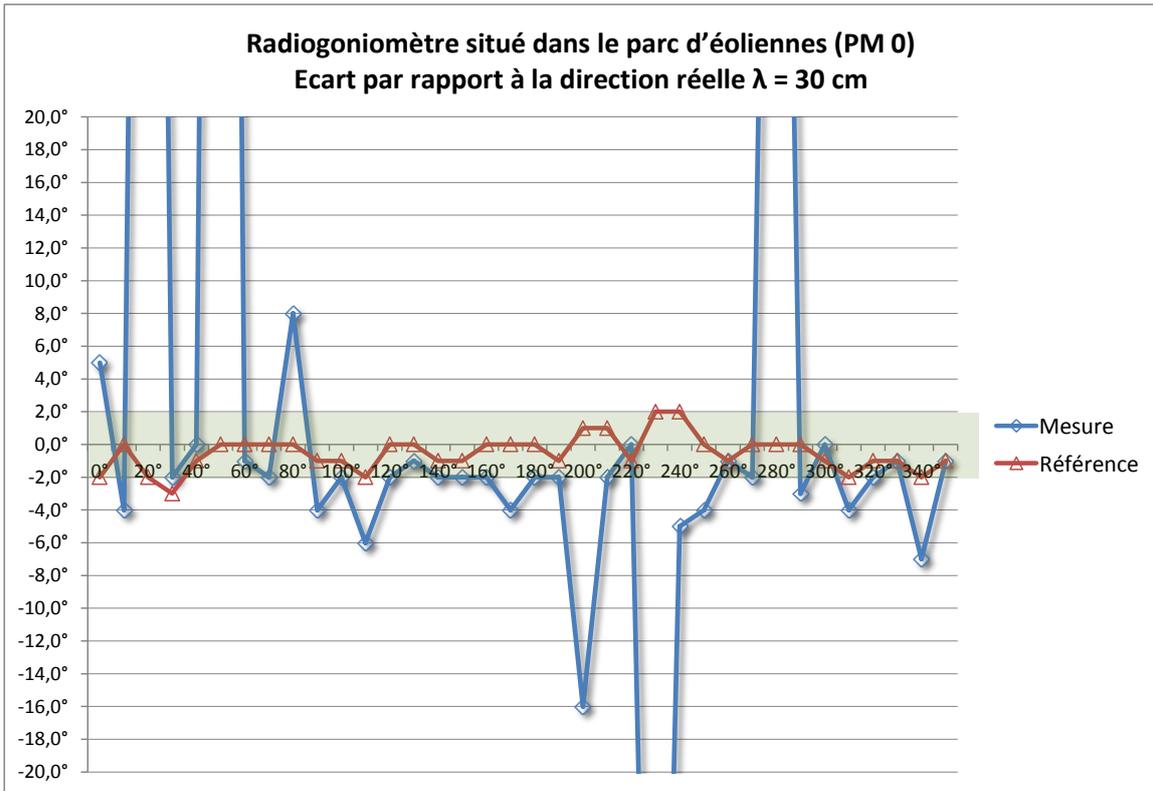
La même échelle est employée dans l'ensemble du rapport pour que tous les diagrammes des variables mesurées puissent être comparés entre eux. En conséquence, lorsque l'effet exercé sur le radiogoniomètre est particulièrement fort, la taille absolue de l'écart de relèvement peut ne plus être visible. Nous avons estimé que cet inconvénient restait acceptable puisqu'il permettait de comparer les diagrammes et qu'il favorisait la résolution de ceux-ci dans la plage de valeurs considérée. Au demeurant, tout résultat du radiogoniomètre qui se trouverait en dehors de la plage de valeurs indiquée dans le diagramme serait certainement inutile à toute application, ce qui signifie que la taille exacte de l'écart est en fait non pertinente. Les écarts dans les indications de relèvement qui sont supérieurs à 20° par rapport au relèvement vrai correspondent donc à des relèvements dits tournants, surtout lorsqu'ils s'accompagnent de fluctuations marquées des indications du relèvement.

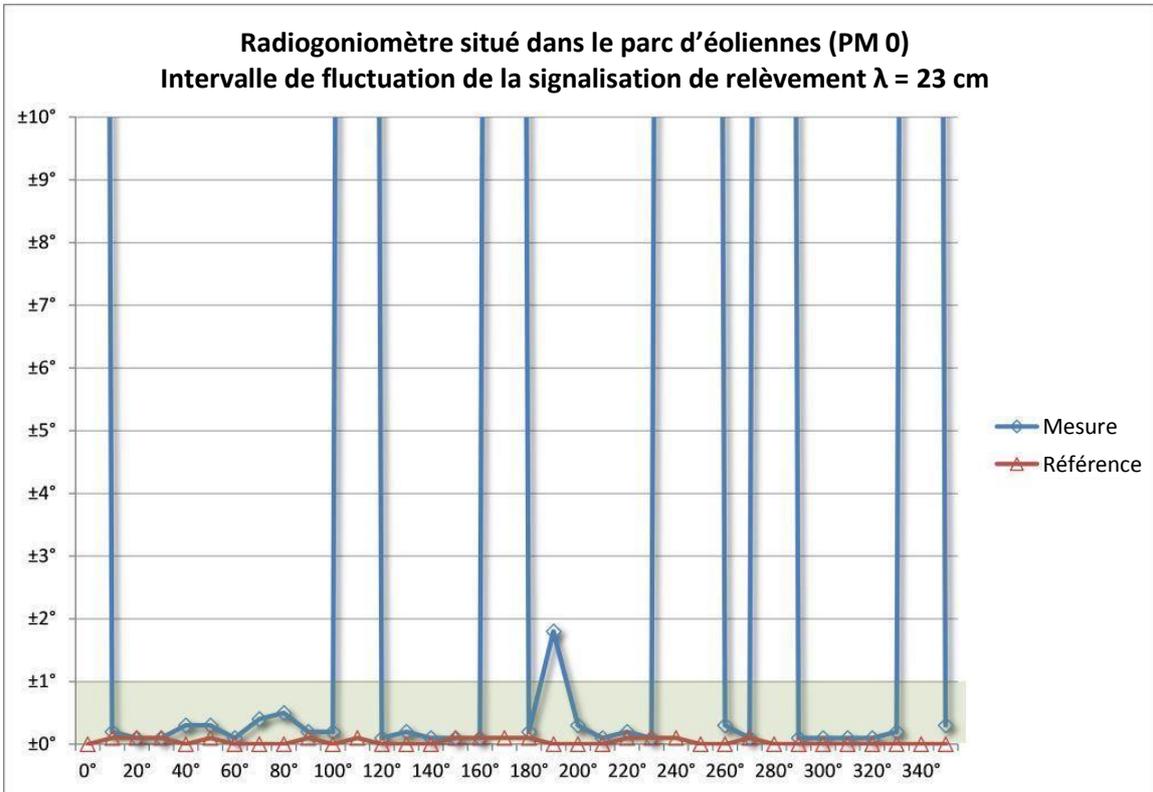
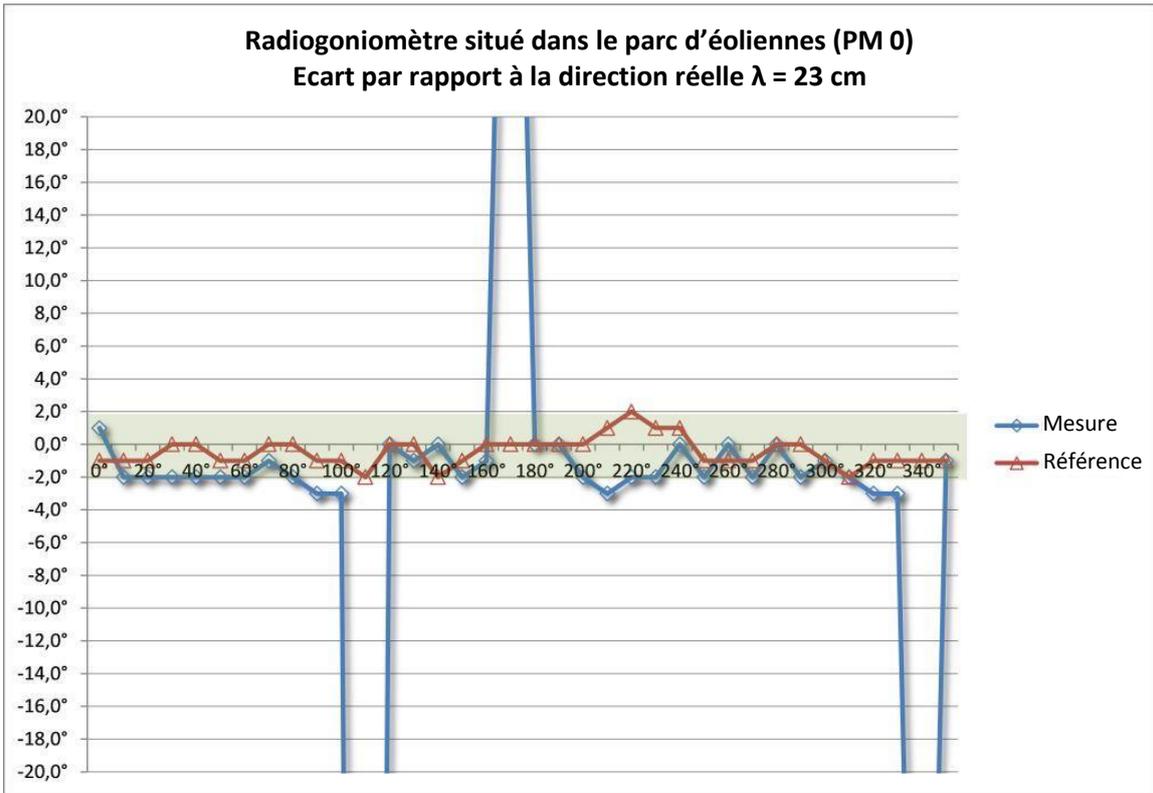
9.2.1 Radiogoniomètre situé dans le parc d'éoliennes

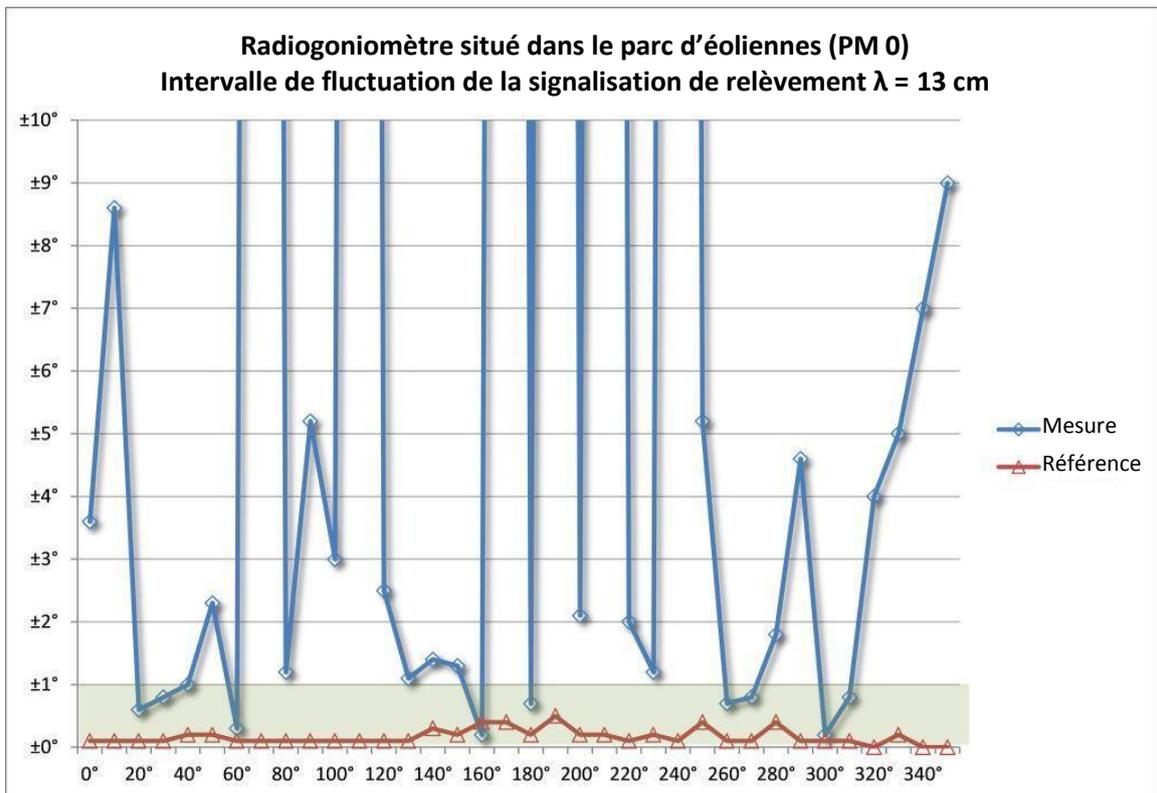
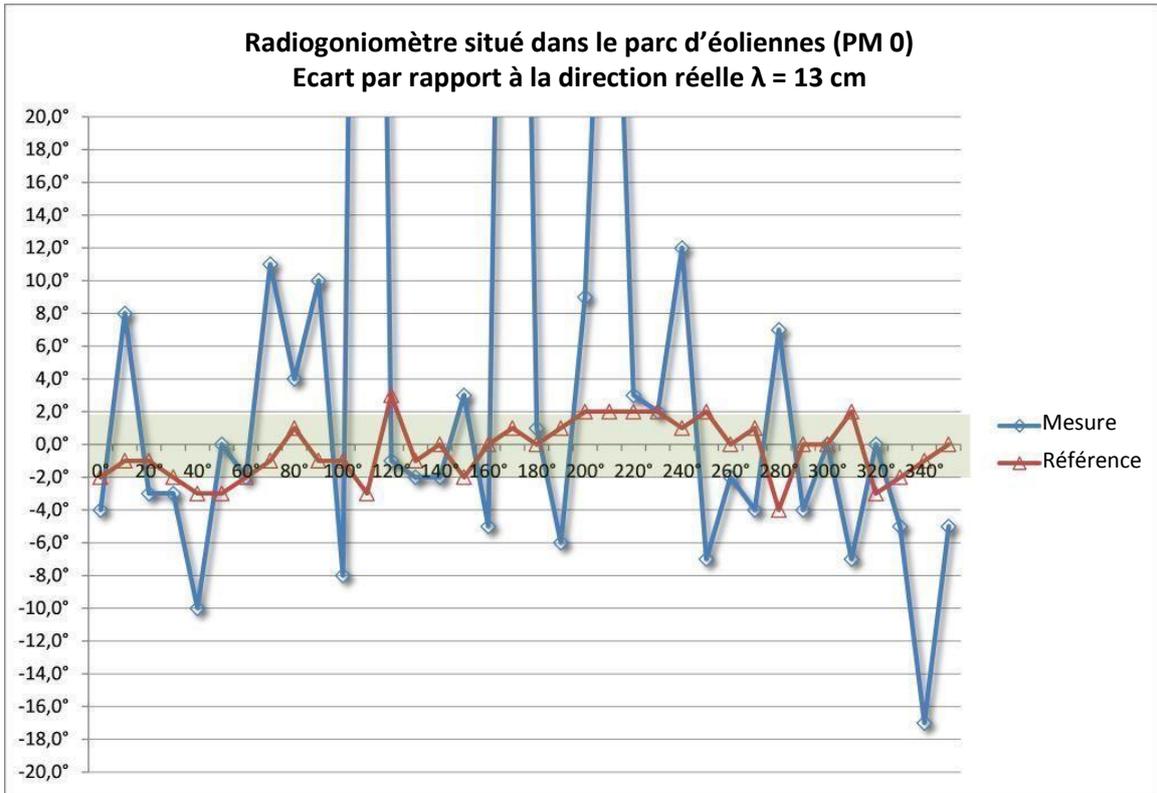


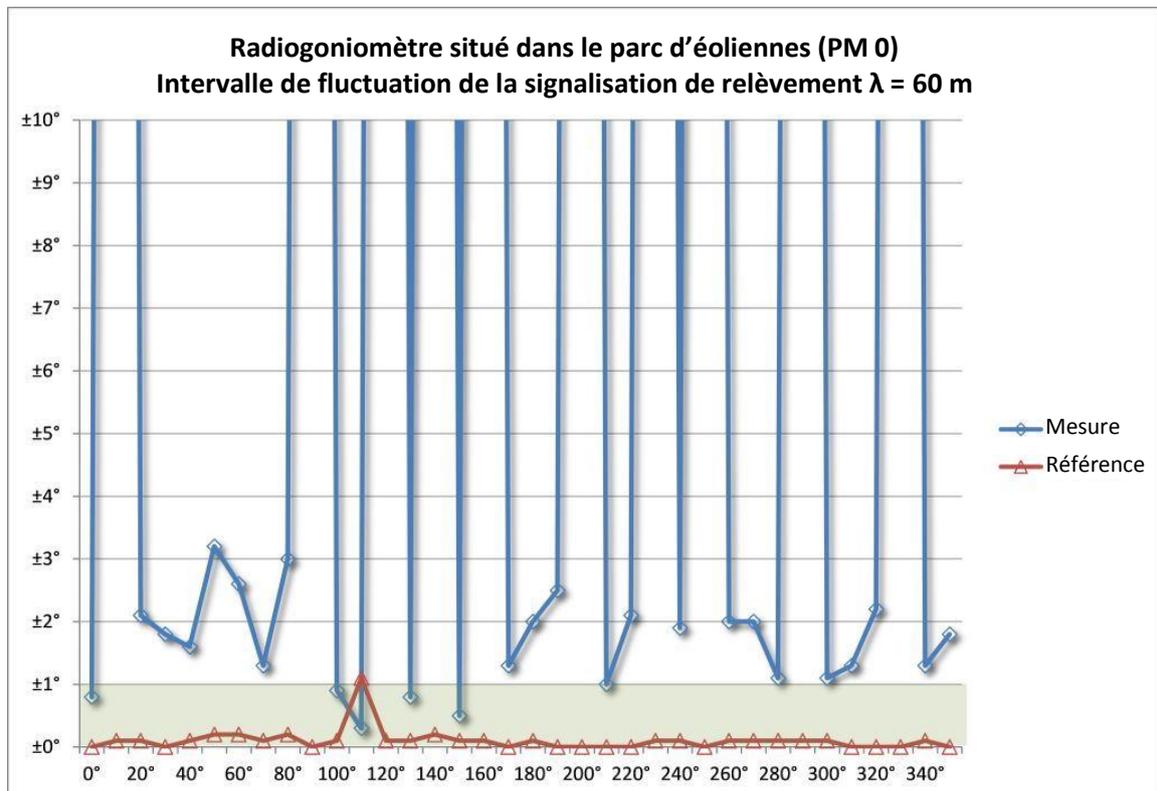
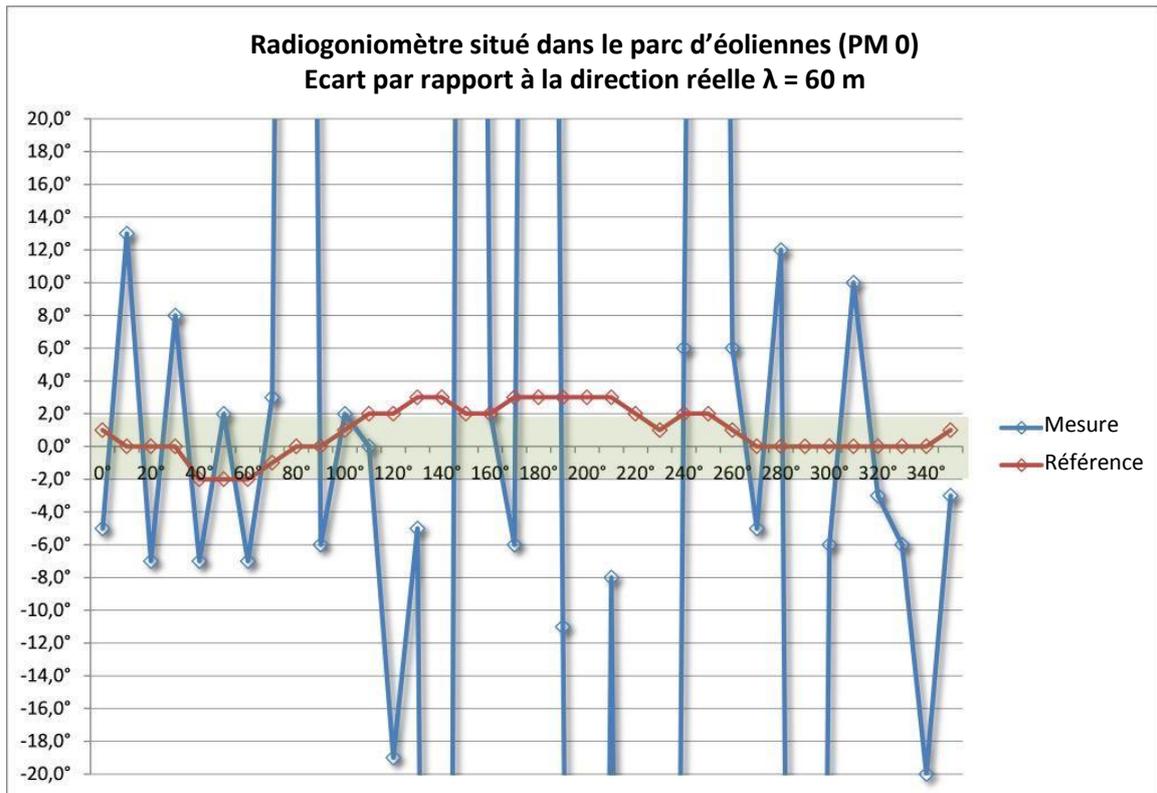












Au cours des mesures radiogoniométriques effectuées à l'intérieur du parc d'éoliennes, d'importantes erreurs ont été enregistrées dans toutes les bandes de fréquences métriques et décimétriques examinées. Une forte augmentation de l'intervalle de fluctuation a aussi été observée dans les relèvements effectués dans des longueurs d'onde inférieures à 70 cm, soit à peu près dans la bande de fréquences de 800 MHz à 3 GHz.

En raison des caractéristiques physiques des différentes bandes de fréquences, il est possible, dans des longueurs d'onde plus longues, d'observer des erreurs dans toutes les radiales, quelle que soit la direction réelle du mât. Inversement, dans des longueurs d'onde plus courtes, des brouillages ont été enregistrés dans des intervalles d'angles de plus en plus aigus avec des effets de plus en plus prononcés. Dans des longueurs d'ondes très courtes (bande des 13 cm), les intervalles dans lesquels le signal est hautement déformé sont si nombreux que le radiogoniomètre devient inutilisable dans toutes les directions.

A cet égard, il convient d'accorder une attention particulière aux diagrammes correspondant à la bande des 23 cm. L'étude de l'écart par rapport au relèvement vrai montre que le relèvement n'apparaît très déformé que dans trois intervalles d'angles relativement étroits. Cependant, un examen plus approfondi des intervalles de fluctuation met en évidence des fluctuations extrêmement marquées (relèvements tournants) dans six directions sur un rayon de 360°. Quant aux directions dans lesquelles des relèvements apparemment corrects (faible écart) coïncident avec un intervalle de fluctuations prononcées, elles fournissent en réalité des résultats radiogoniométriques corrects de manière aléatoire, ces résultats ne pouvant être reproduits plusieurs fois de la même manière.

Il est donc important de toujours prendre en compte les deux diagrammes. Un relèvement ne peut être considéré comme valable que si l'écart par rapport à l'angle de relèvement vrai et l'intervalle de fluctuation sont tous deux compris dans l'intervalle de tolérance.

Les captures d'écran ci-dessous, qui représentent des relèvements effectués à ce point de mesure, illustrent les effets réellement enregistrés par le radiogoniomètre:

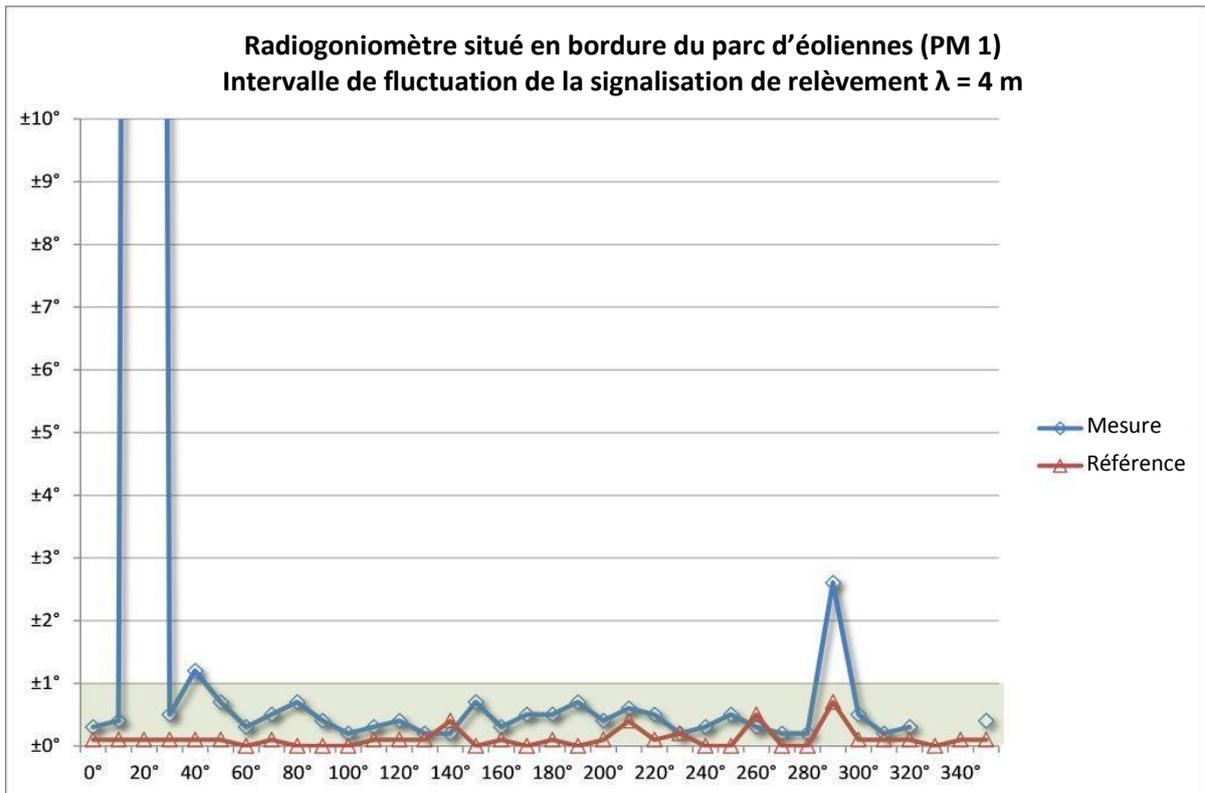
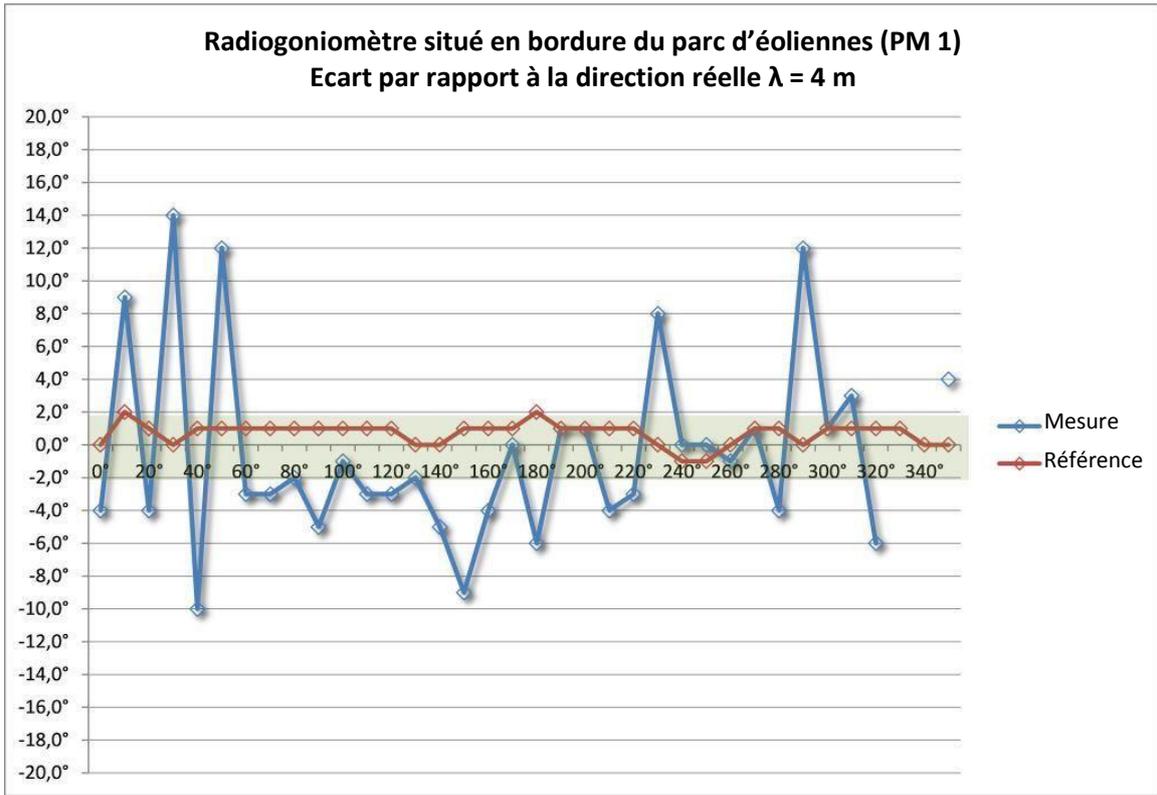


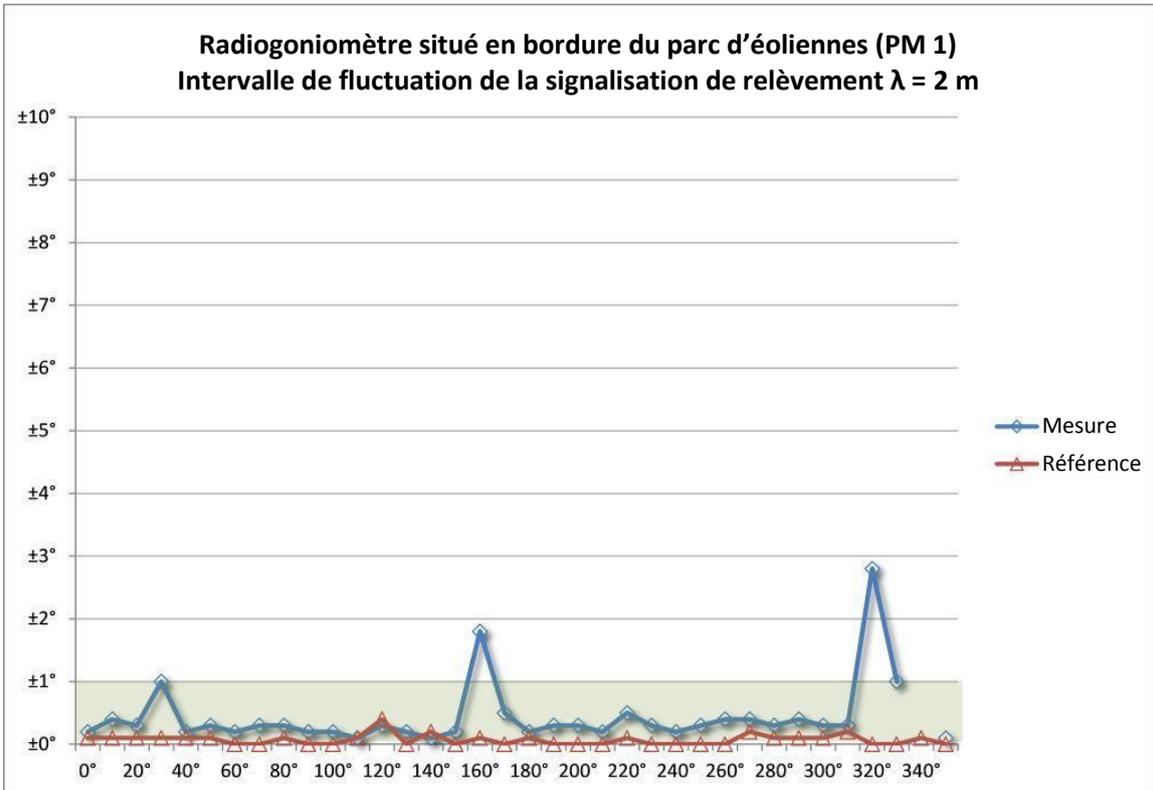
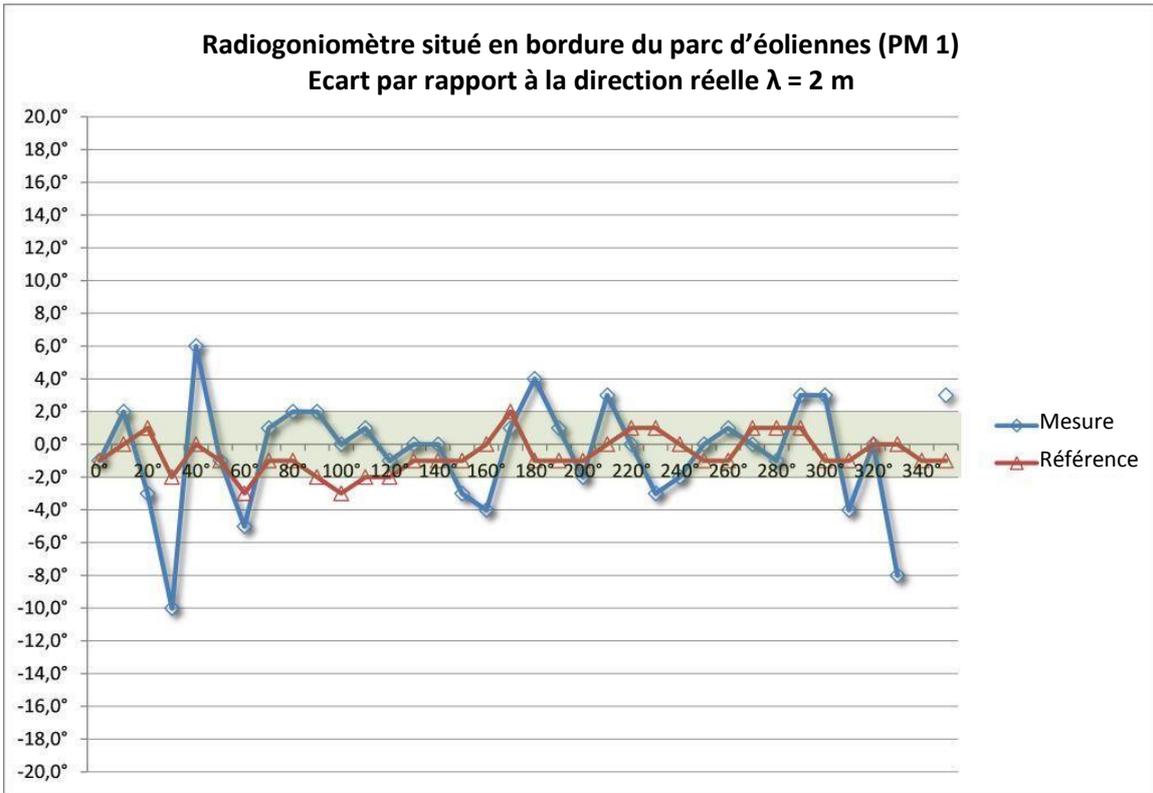
Les lignes blanches représentent l'historique des relèvements pendant les 30 dernières secondes, tandis que la ligne jaune indique le relèvement au moment de la capture d'écran. Dans le premier exemple (bande des 23 cm), les relèvements fluctuent de manière chaotique dans presque toutes les directions. Dans le deuxième exemple (bande des 13 cm), le résultat du radiogoniomètre semble fluctuer autour d'une valeur moyenne. Dans le troisième exemple (bande des 30 cm), on observe deux résultats extrêmes, mais aucun d'eux n'est correct!

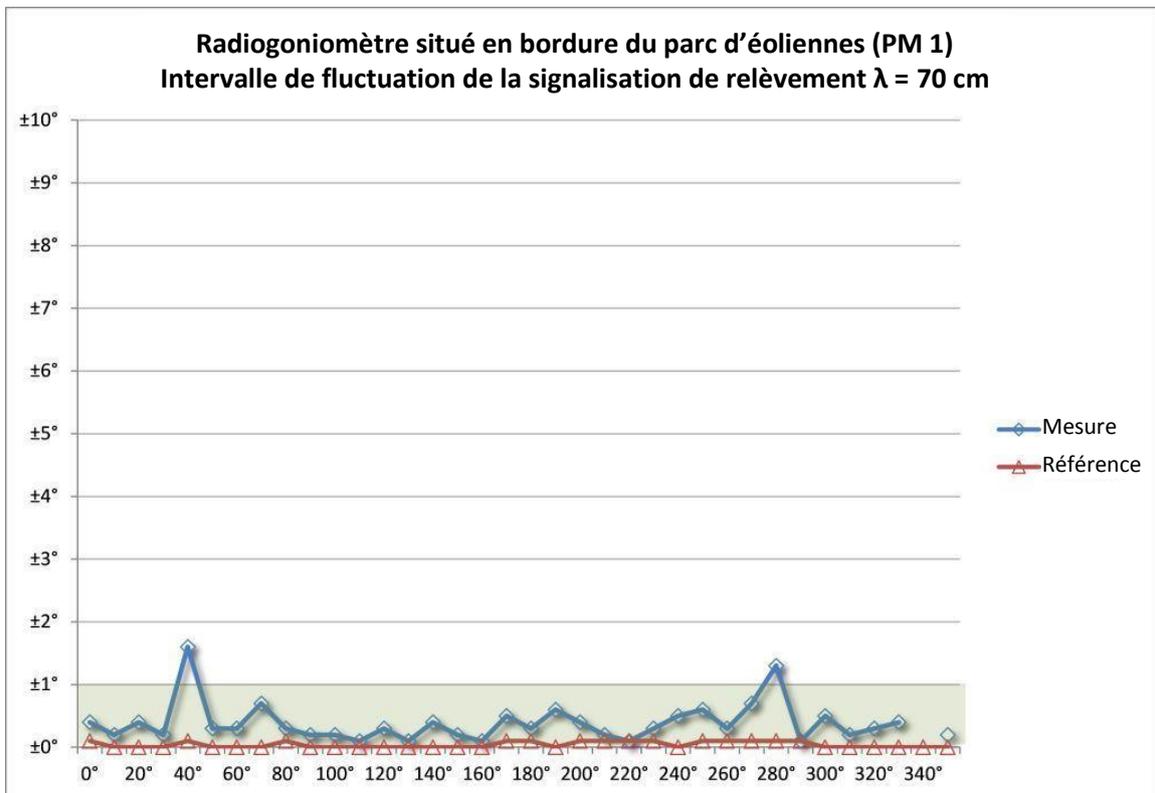
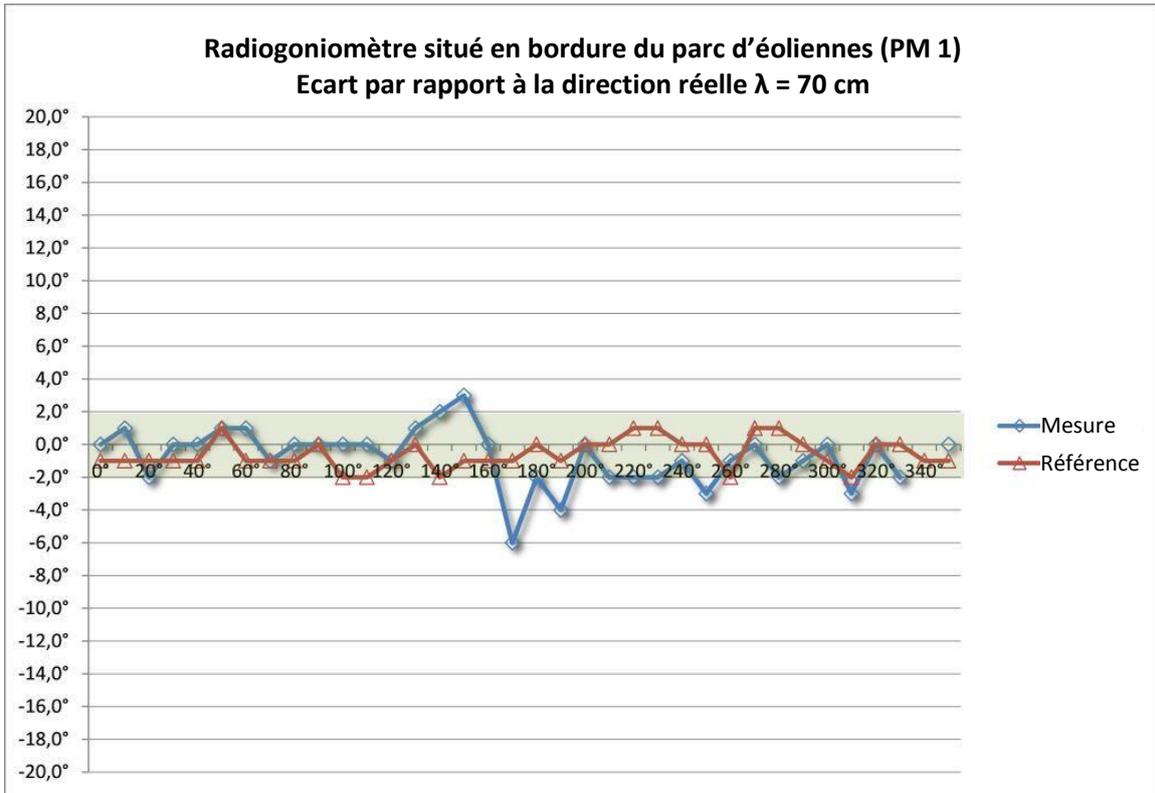
Dans l'intervalle des ondes décimétriques, le radiogoniomètre se comporte de manière chaotique et il est par conséquent inutilisable.

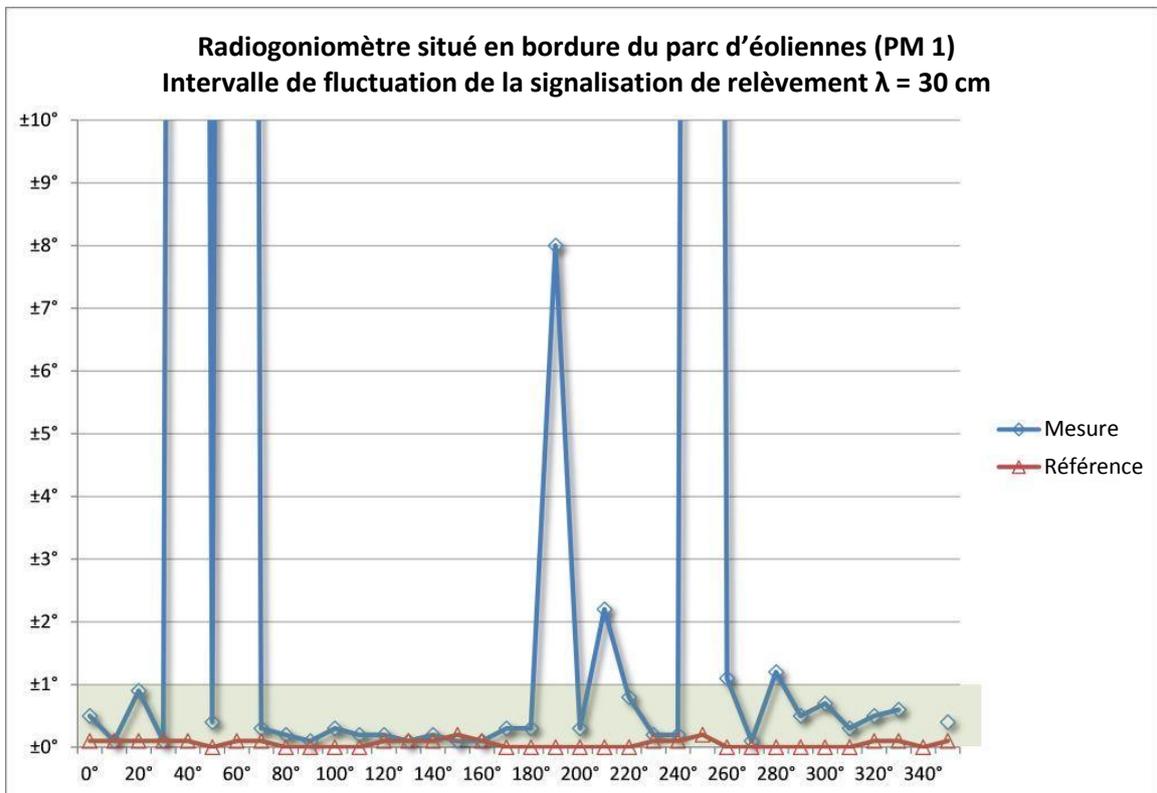
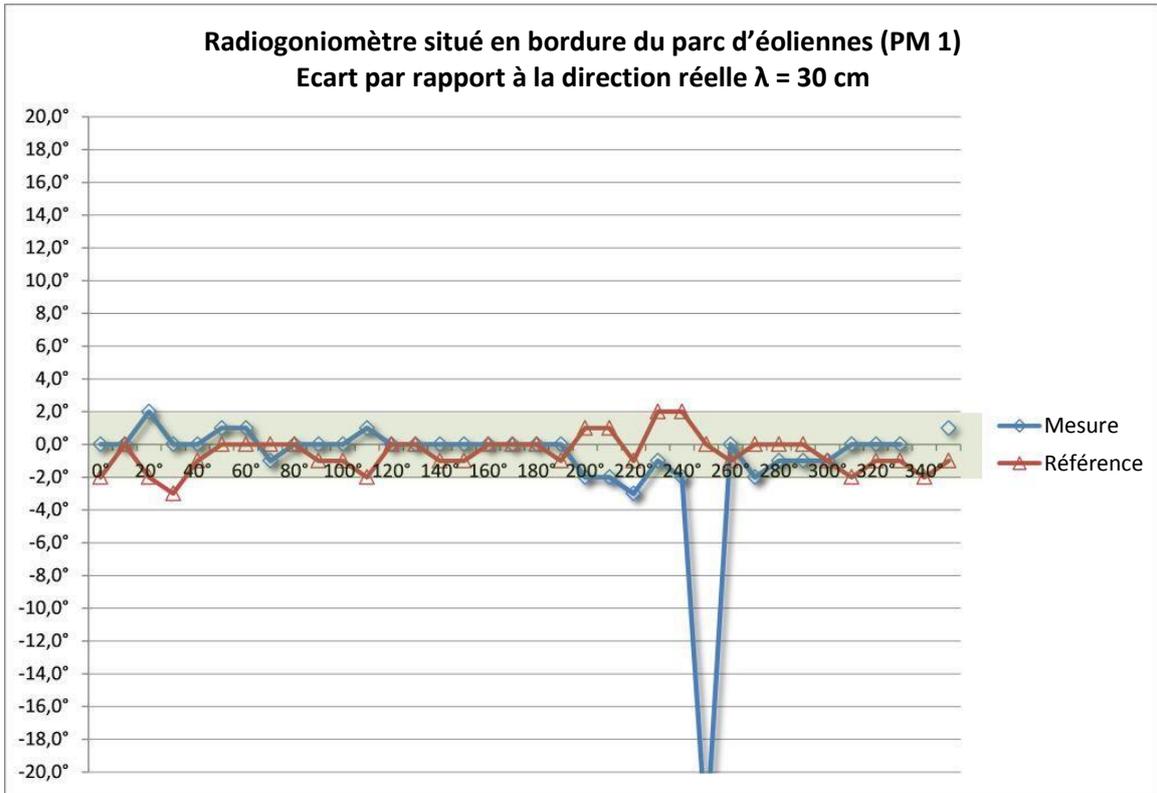
Conclusion: Un radiogoniomètre ne peut être utilisé à l'intérieur d'un parc d'éoliennes.

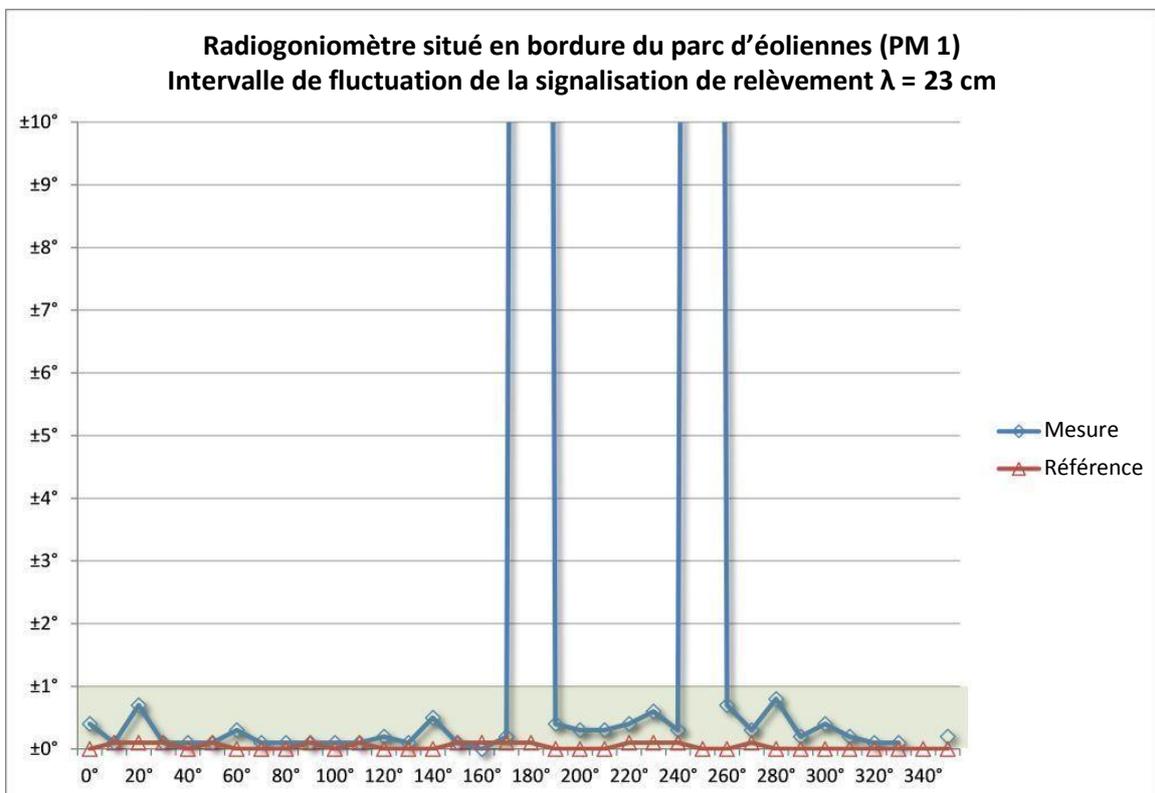
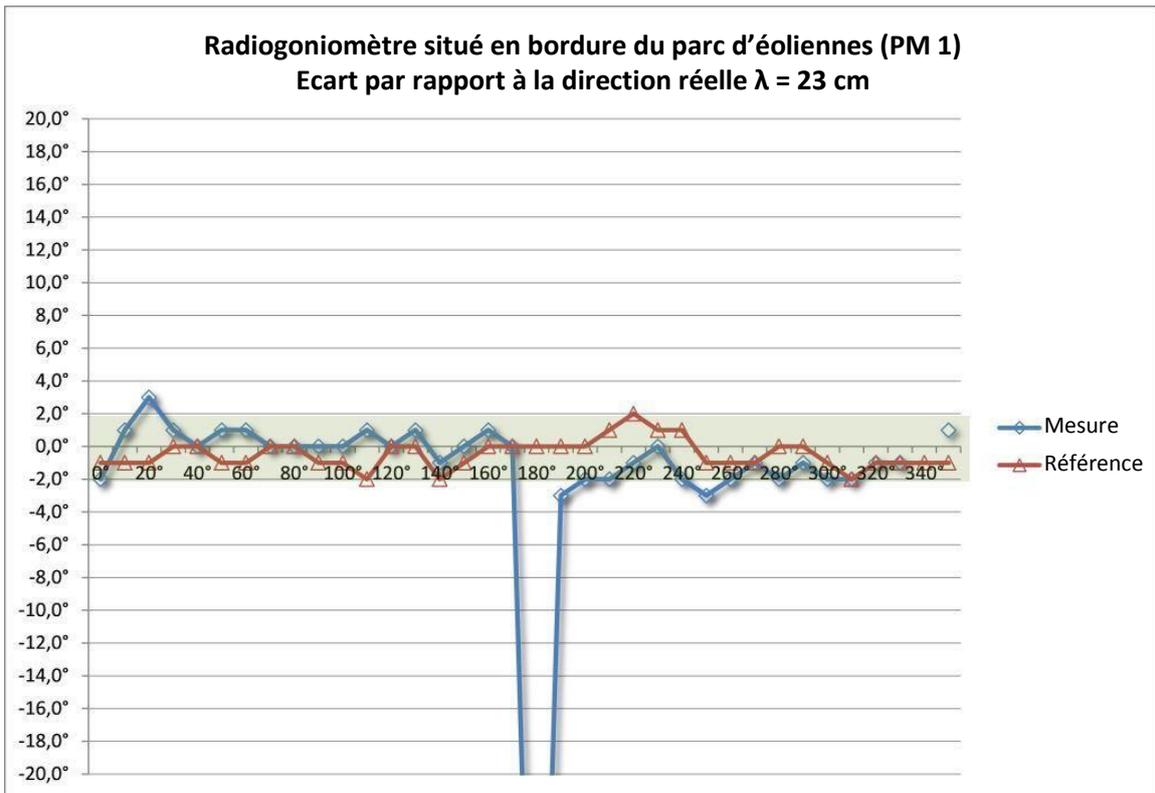
9.2.2 Radiogoniomètre situé en bordure du parc d'éoliennes

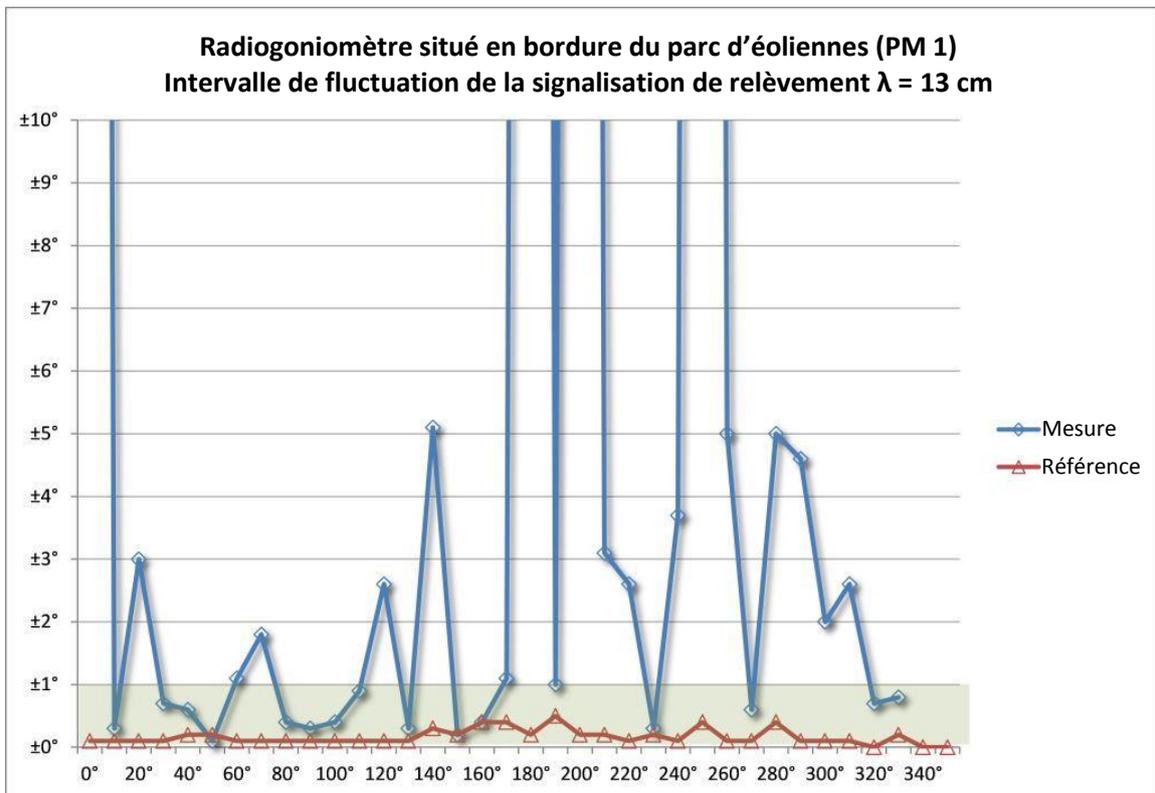
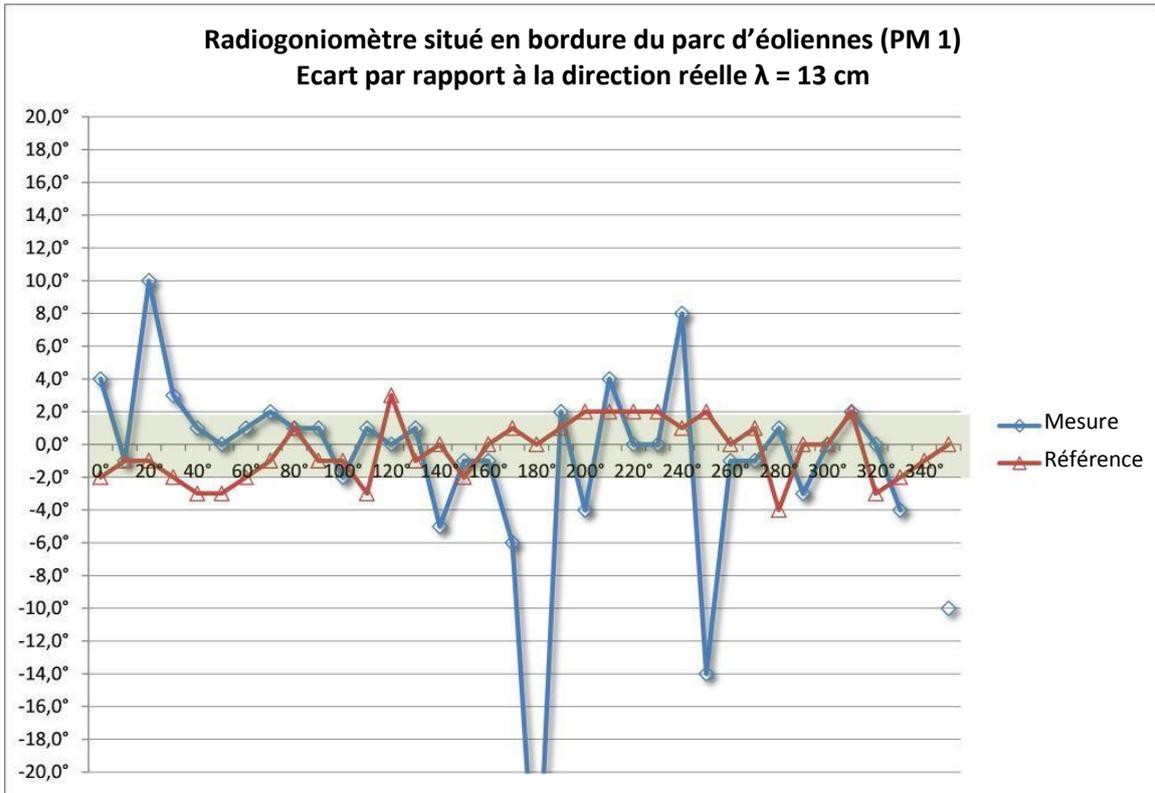












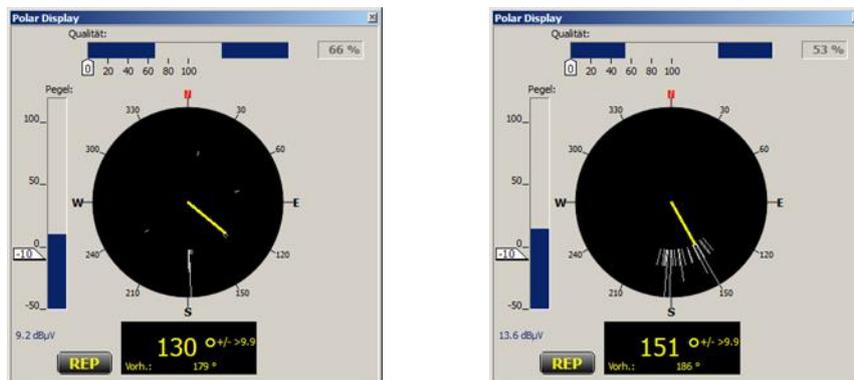
Des brouillages, parfois considérables, ont été enregistrés dans toutes les bandes de fréquences testées. Ils étaient particulièrement prononcés dans la bande des 4 m, où de fortes erreurs radiogoniométriques ont été observées dans toutes les directions. Néanmoins, les erreurs les plus importantes ont été observées dans les relèvements provenant de la direction du parc d'éoliennes et, ce qui est intéressant, de la direction opposée.

Dans la bande des 2 m, les erreurs les plus marquées ont également été observées dans les relèvements provenant de la direction du parc d'éoliennes et de la direction opposée. Dans ces cas, des fluctuations importantes ont à nouveau été notées dans les relèvements, et un relèvement «correct» aléatoire a été observé à 320°.

La bande des 70 cm se comporte relativement bien dans cette constellation, mais les erreurs du radiogoniomètre provenaient de directions opposées au parc d'éoliennes (au sud!).

Les trois bandes de fréquences les plus élevées (800 MHz à 3 GHz) sont une fois encore remarquables car dans certains cas on a observé des fluctuations marquées des relèvements dans des intervalles d'angles restreints. Dans les bandes des 30 cm et des 23 cm, il est possible d'obtenir des relèvements fiables dans des intervalles d'angles plus larges. Cependant, en raison des fortes fluctuations observées dans certaines directions, les relèvements fiables ne peuvent parfois être obtenus qu'après une longue période d'observation, ce qui est infaisable avec la plupart des systèmes radioélectriques numériques.

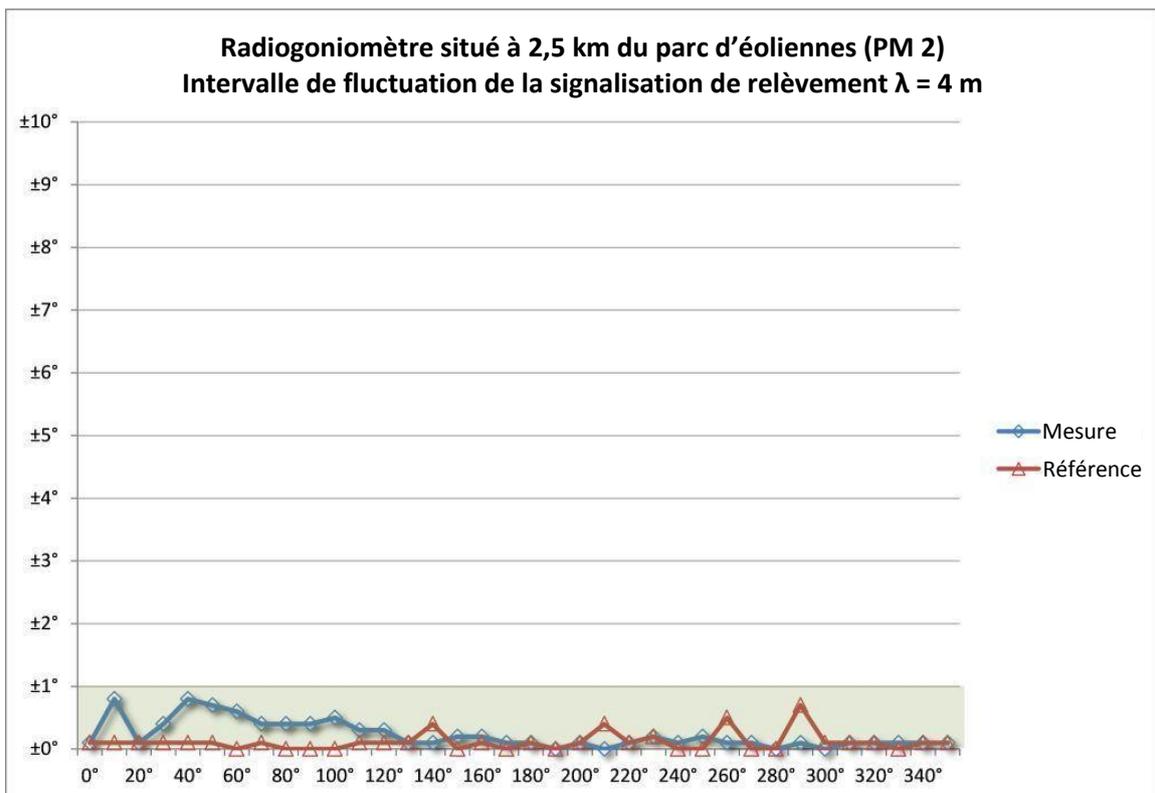
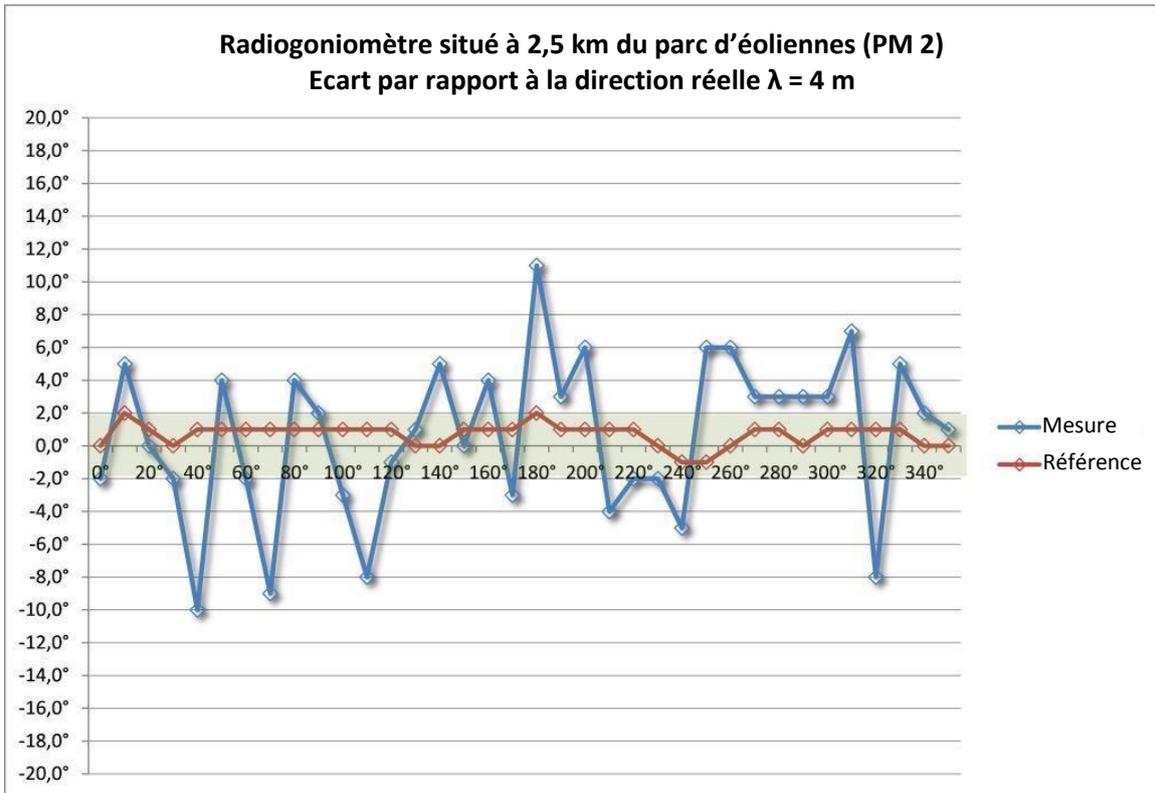
Dans la bande des 13 cm, les relèvements sont chaotiques et sujets à des fluctuations marquées, surtout dans la direction du parc d'éoliennes et dans la direction opposée.

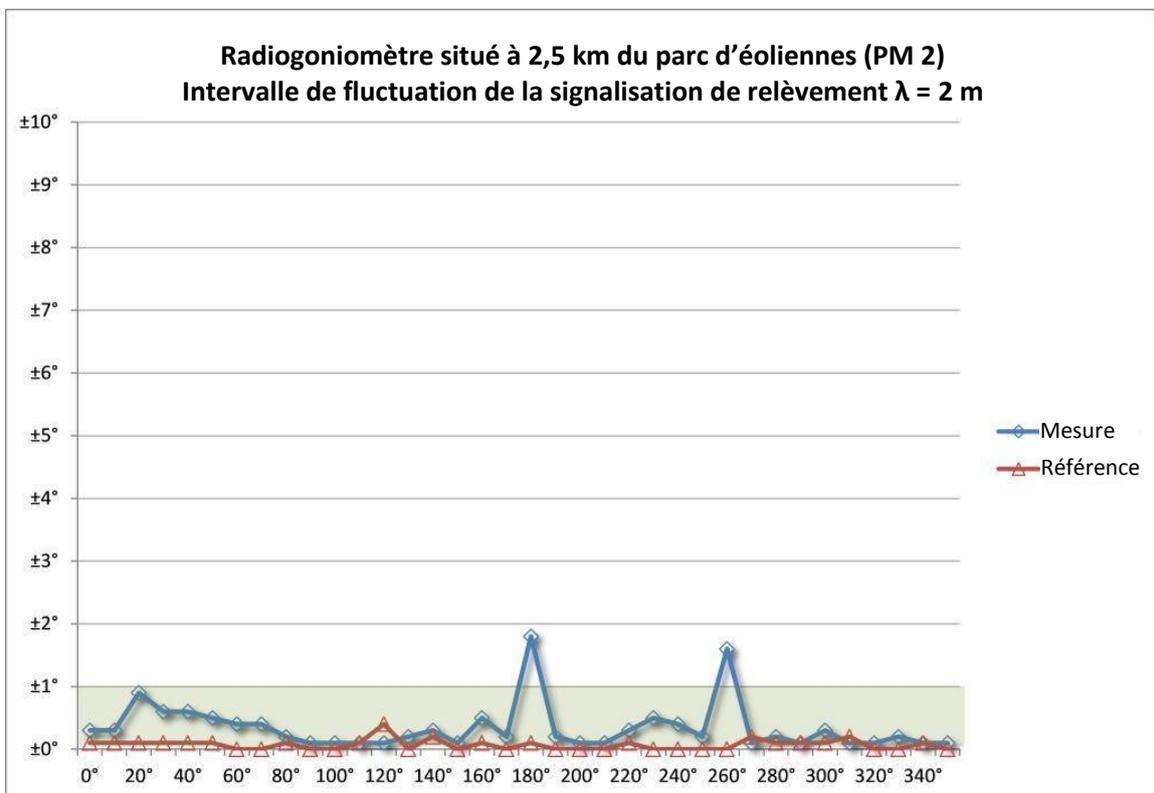
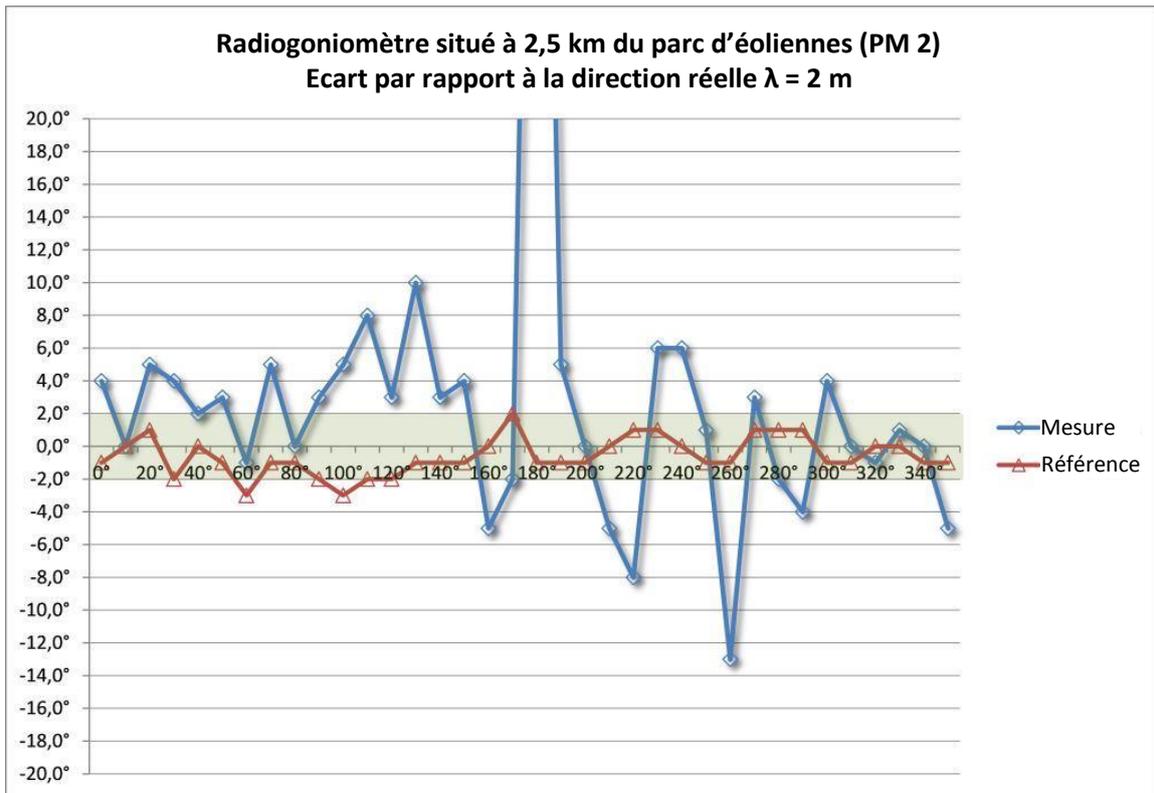


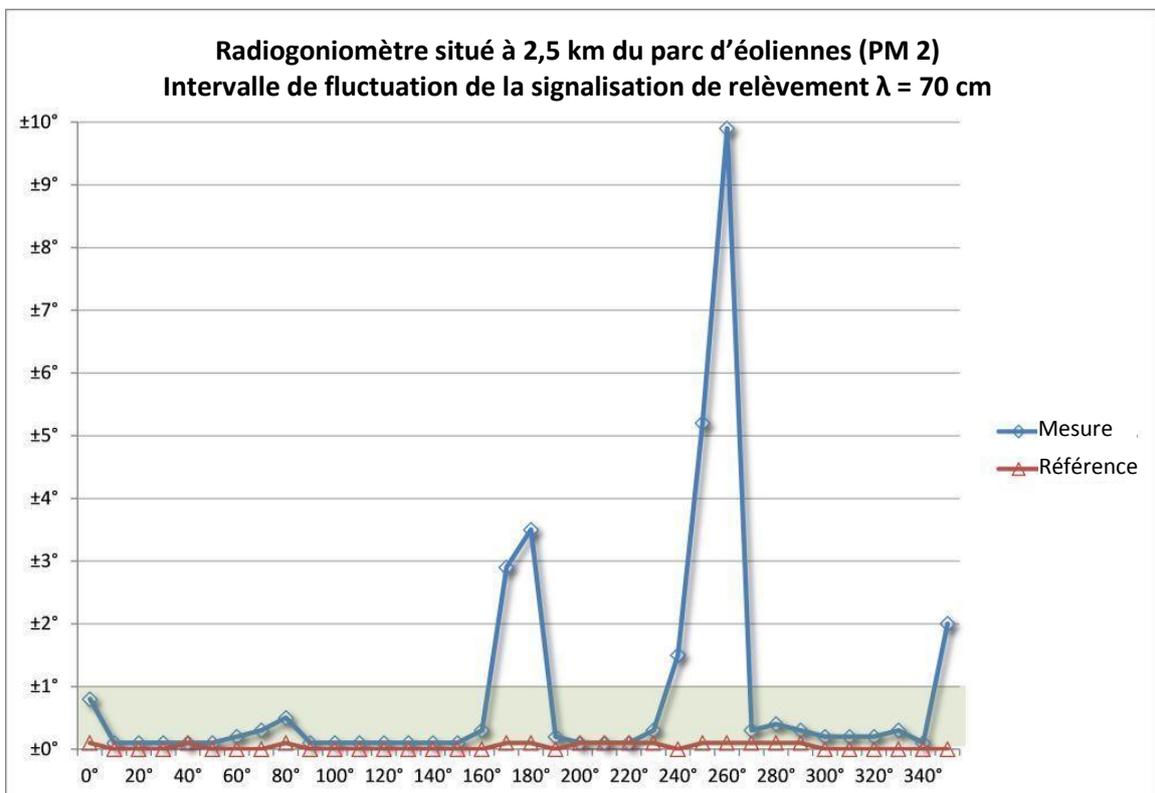
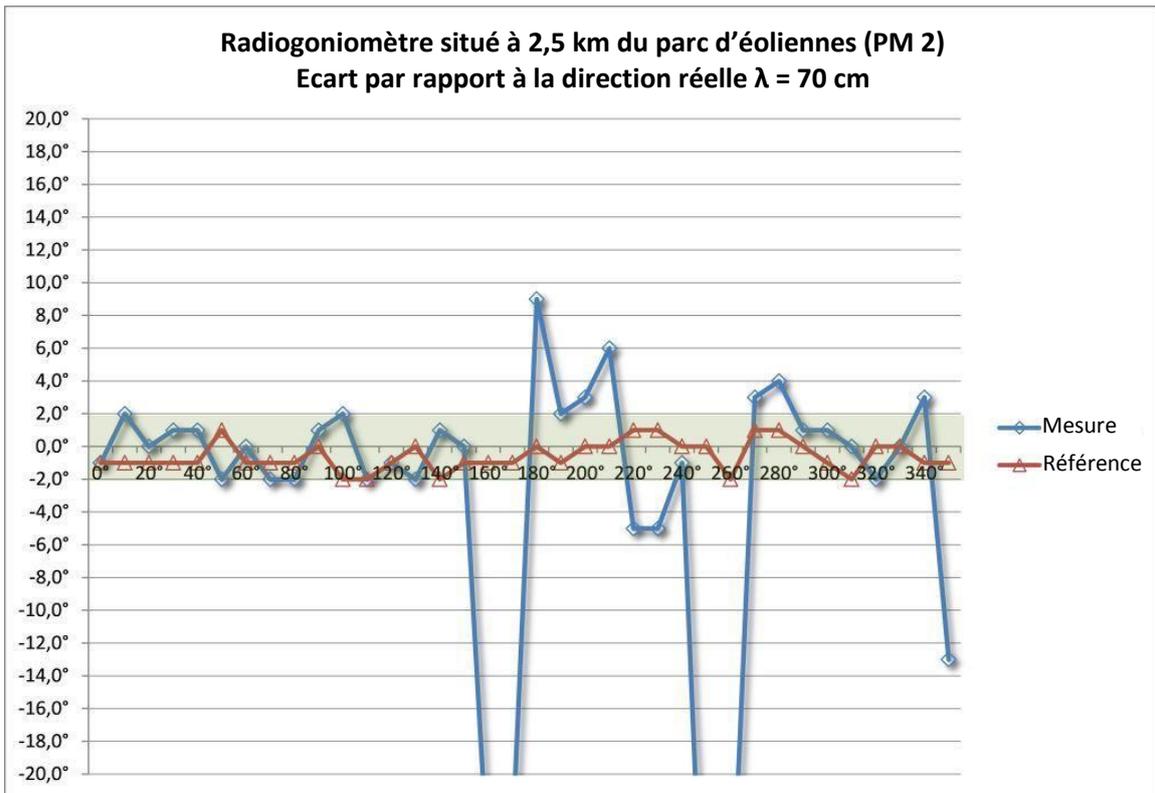
Les captures d'écran ci-dessus montrent deux exemples de relèvements classiques dans cette série de mesures. Le premier est un relèvement effectué dans la bande des 23 cm dans plusieurs directions discrètes. Les petites lignes blanches de l'historique montrent que le radiogoniomètre passe lentement d'une direction de relèvement à une autre. Le second exemple montre un relèvement effectué dans la bande des 13 cm; le résultat semble fluctuer autour d'une valeur moyenne.

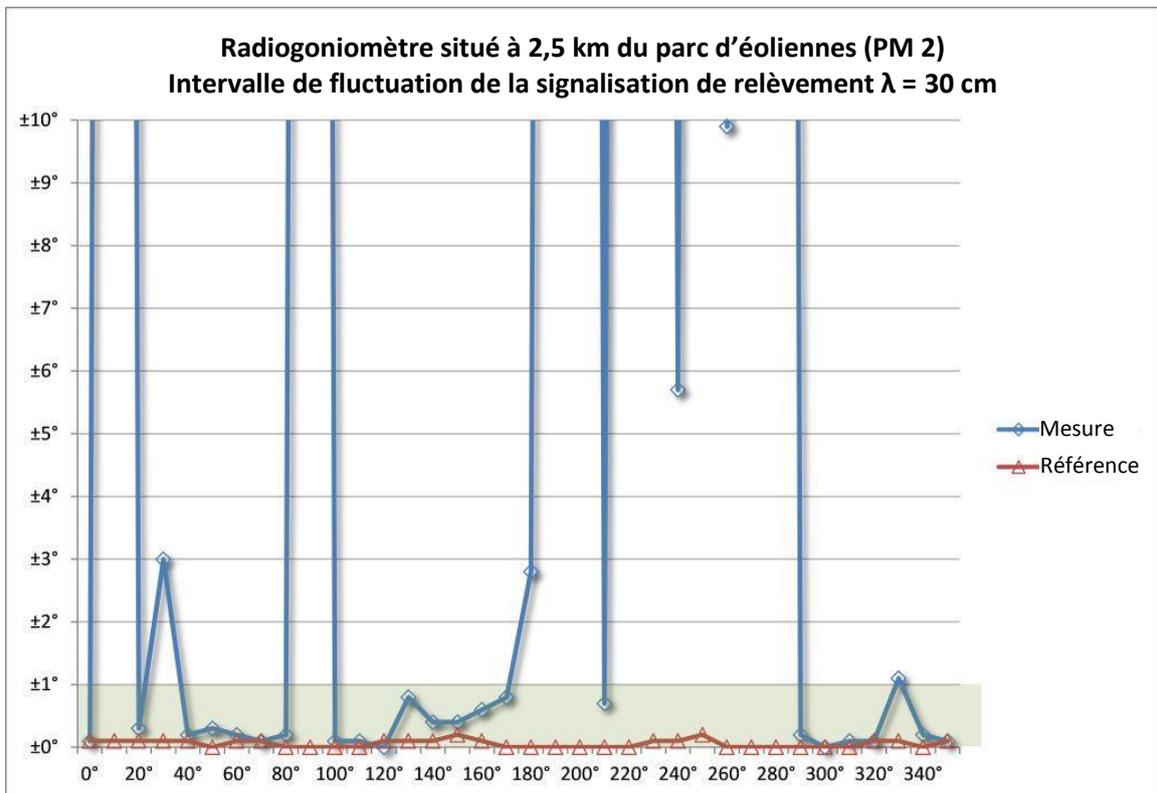
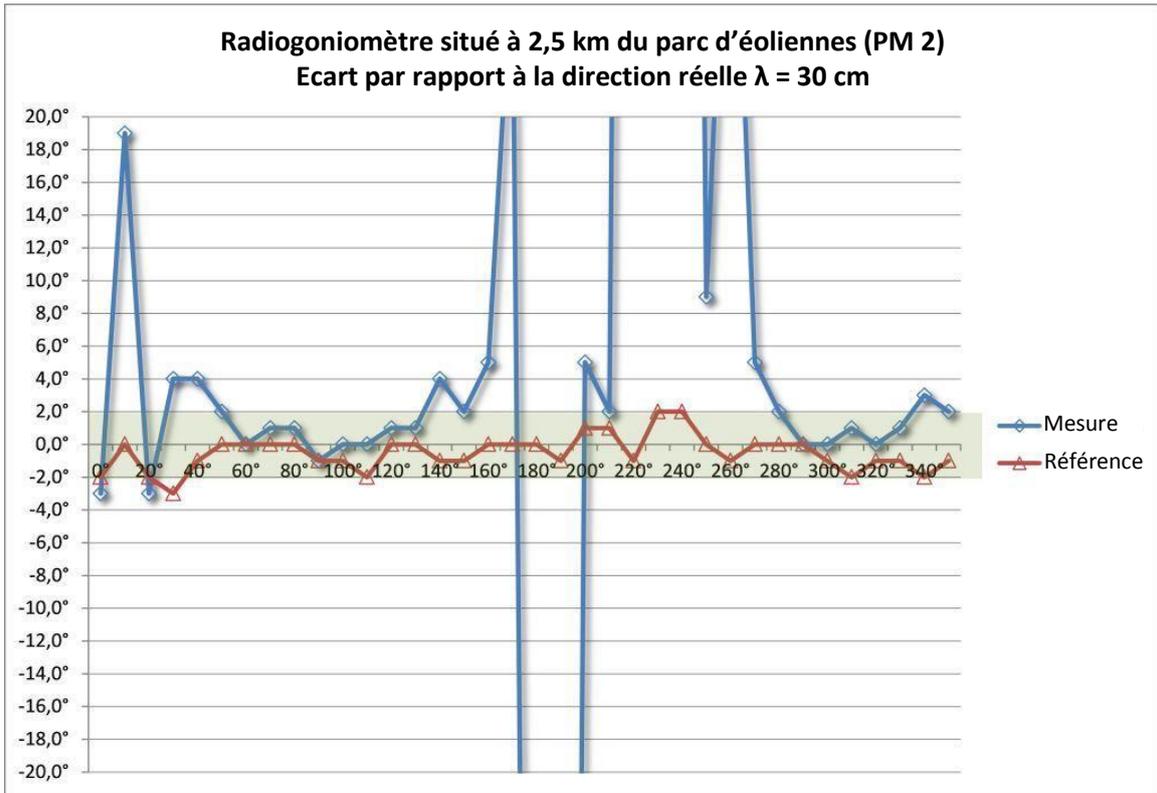
Conclusion: Lorsqu'il est situé en bordure du parc d'éoliennes, le radiogoniomètre ne peut être utilisé que dans la bande des 70 cm, et encore cet usage reste-t-il limité.

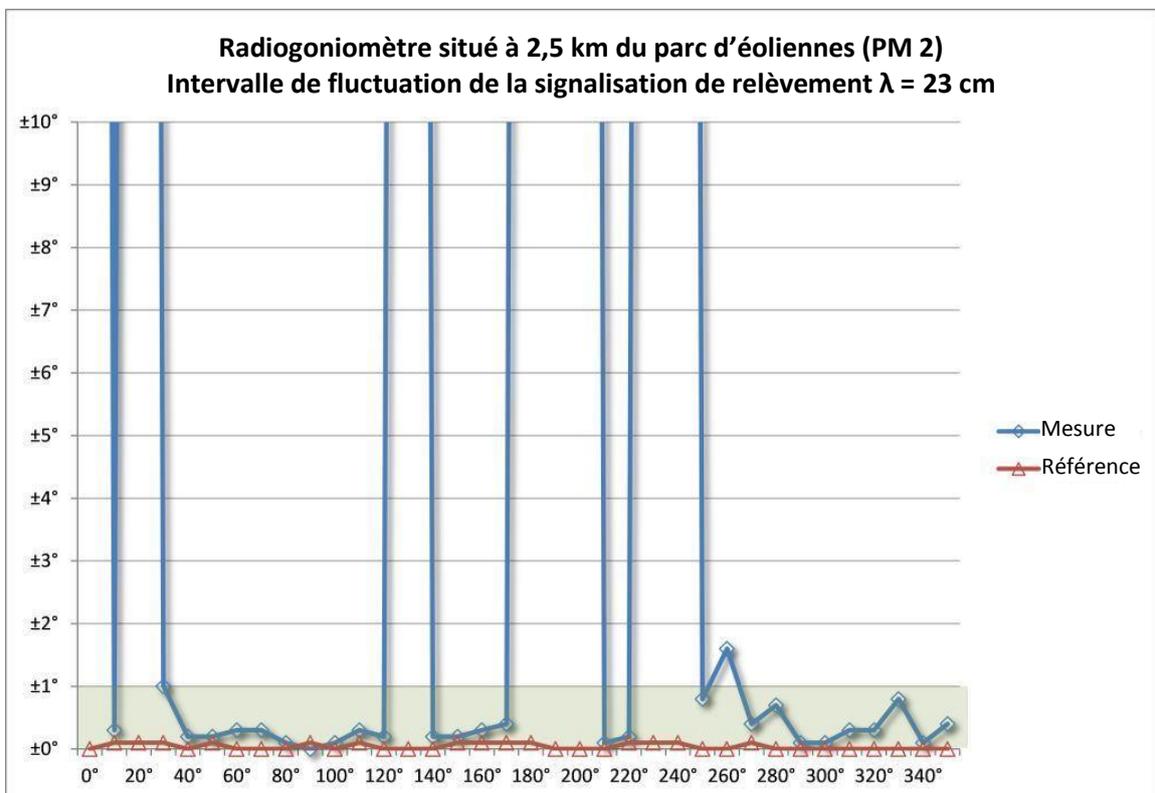
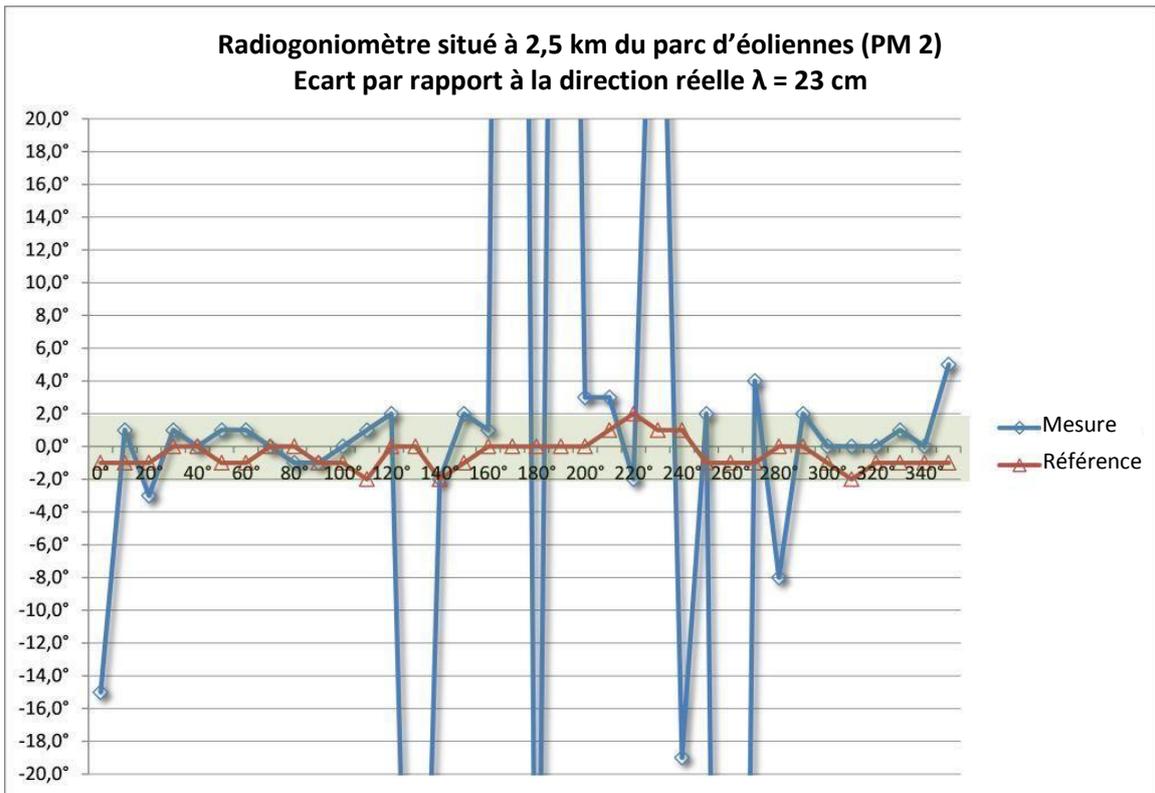
9.2.3 Radiogoniomètre situé à 2,5 km du parc d'éoliennes

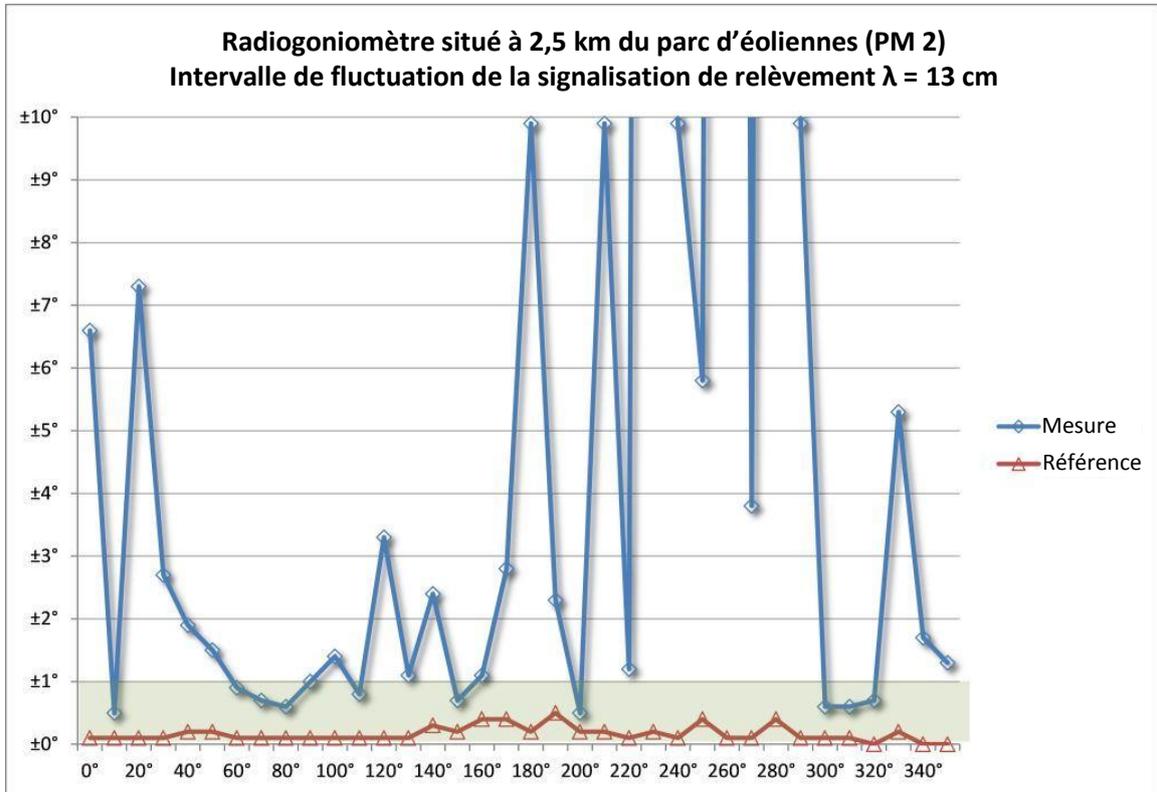
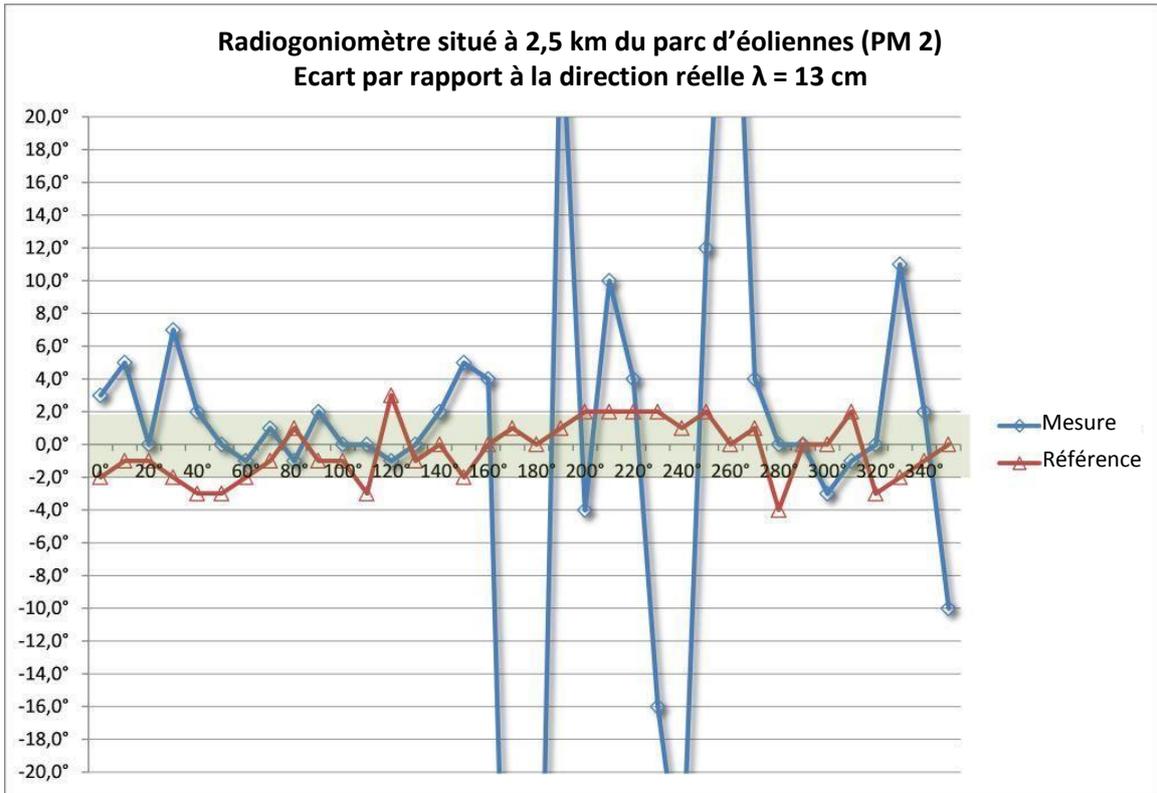


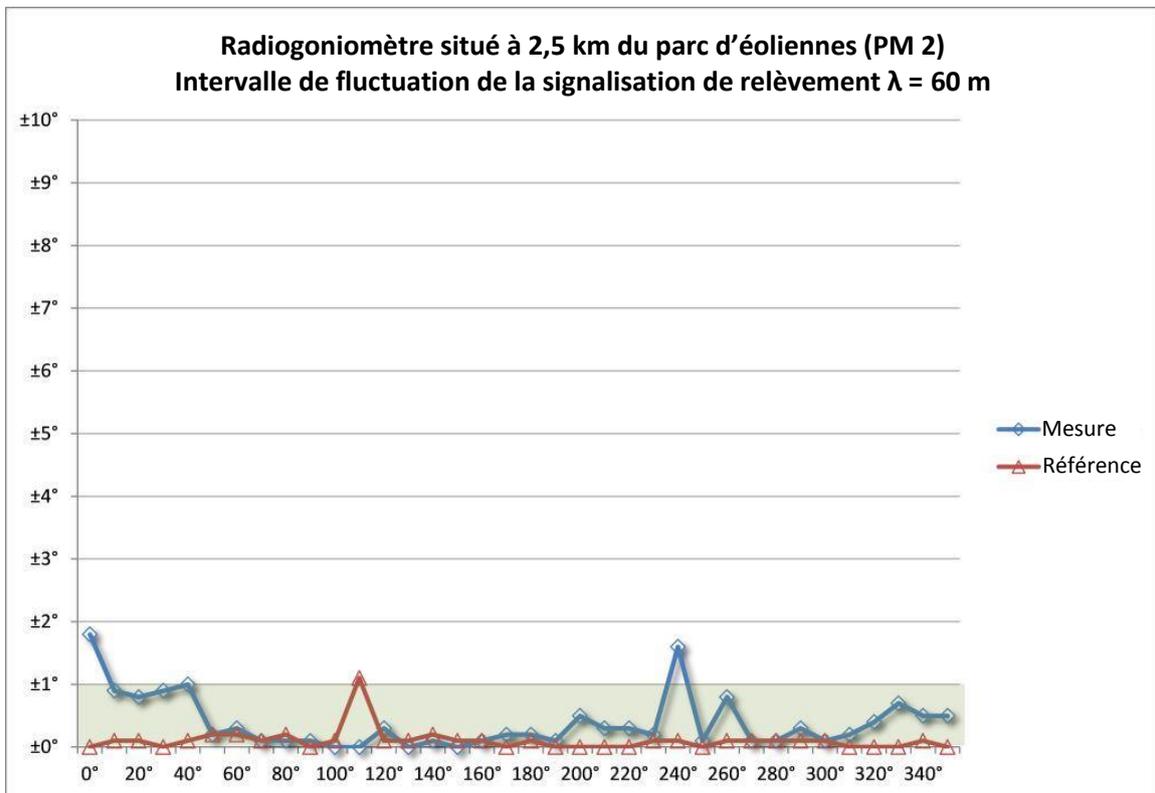
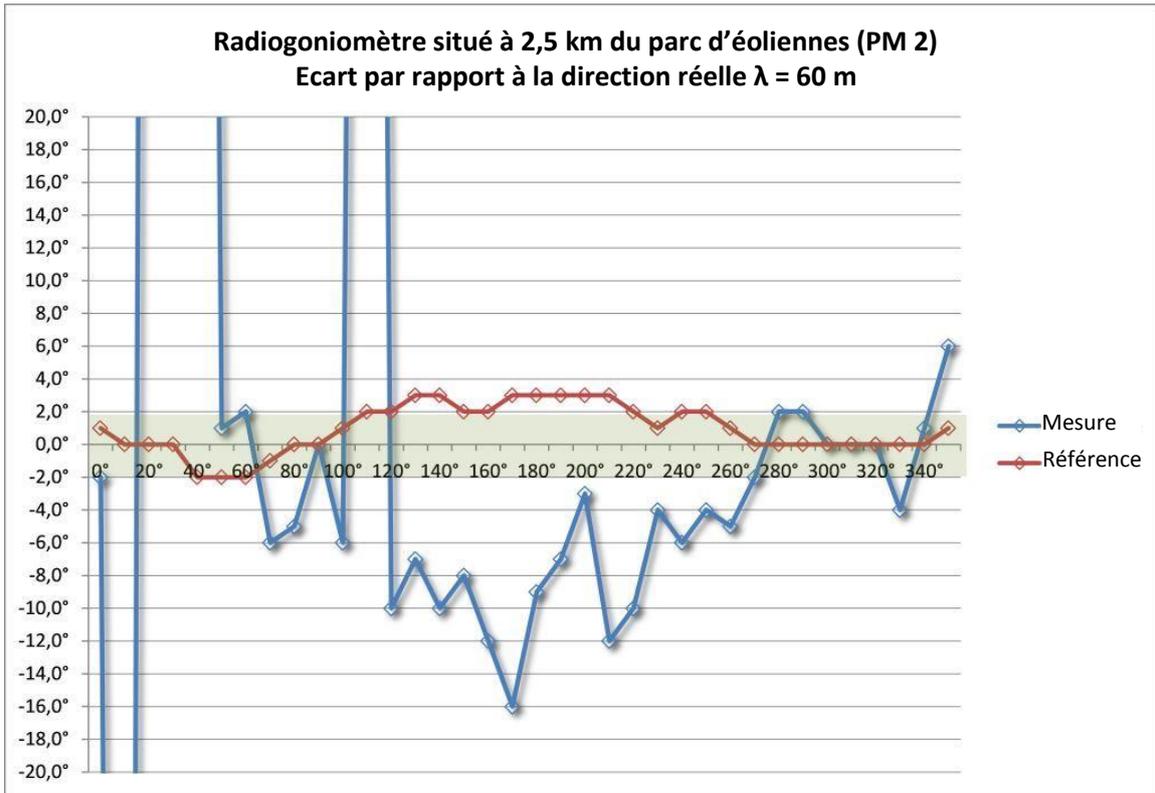












Lorsque le radiogoniomètre se trouvait à 2,5 km du parc d'éoliennes, d'importantes erreurs ont été enregistrées dans toutes les bandes métriques et décimétriques.

Dans les bandes des 4 m et des 2 m, des erreurs marquées ont été observées dans les quatre quadrants.

Dans les autres bandes (70 cm à 13 cm), seules des erreurs mineures ont été enregistrées dans l'intervalle d'angle allant du nord-est au sud-est (c'est-à-dire, globalement, dans la direction du parc d'éoliennes). En revanche, des erreurs marquées ont été observées dans la direction opposée.

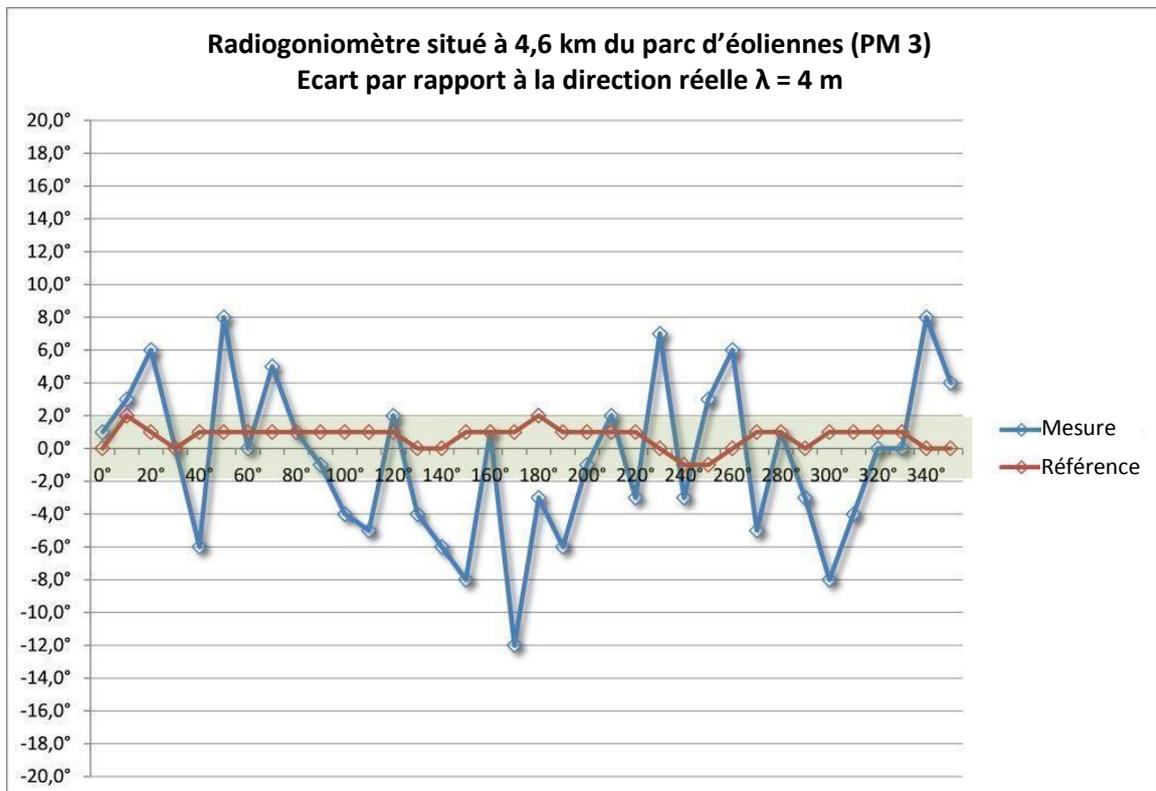
L'intervalle d'angle dans lequel des brouillages particulièrement forts ont été observés forme un arc dont la longueur est nettement corrélée à la longueur de l'arc formé à l'horizon par le parc d'éoliennes vu depuis le radiogoniomètre. Néanmoins, l'intervalle d'angle dans lequel des brouillages sont enregistrés est systématiquement plus grand que l'arc formé par le parc d'éoliennes.

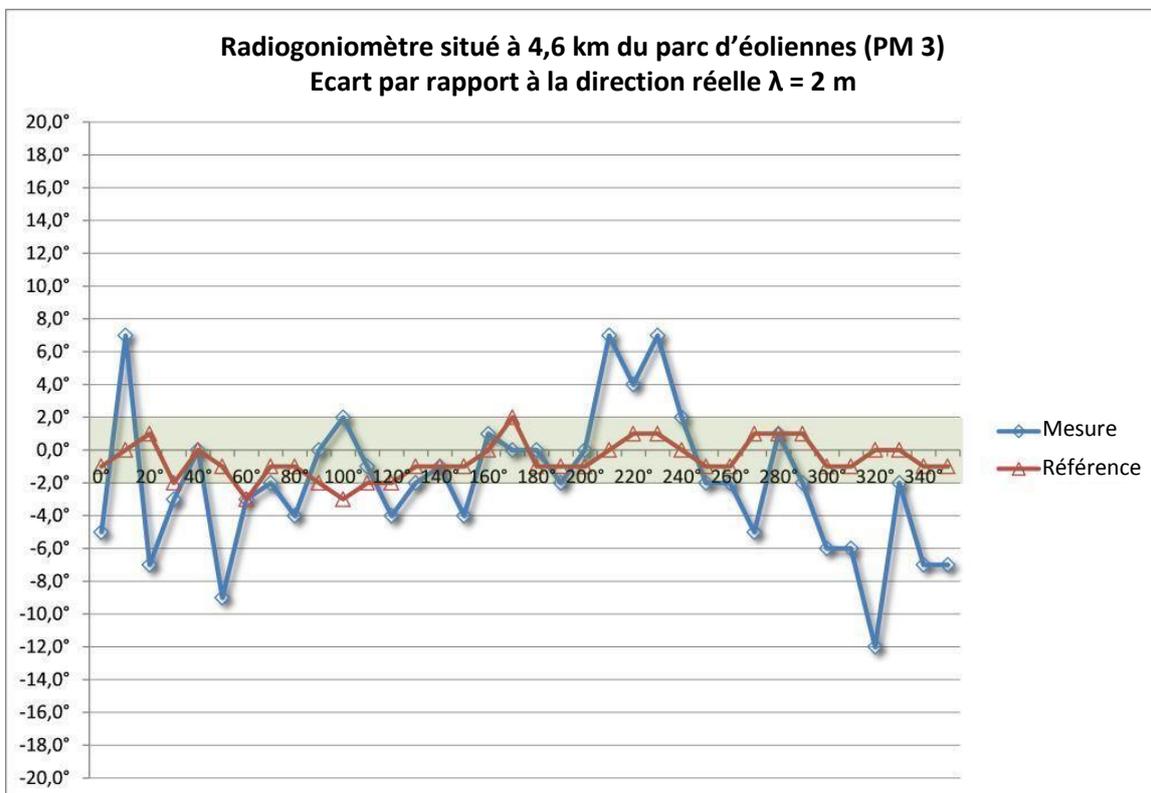
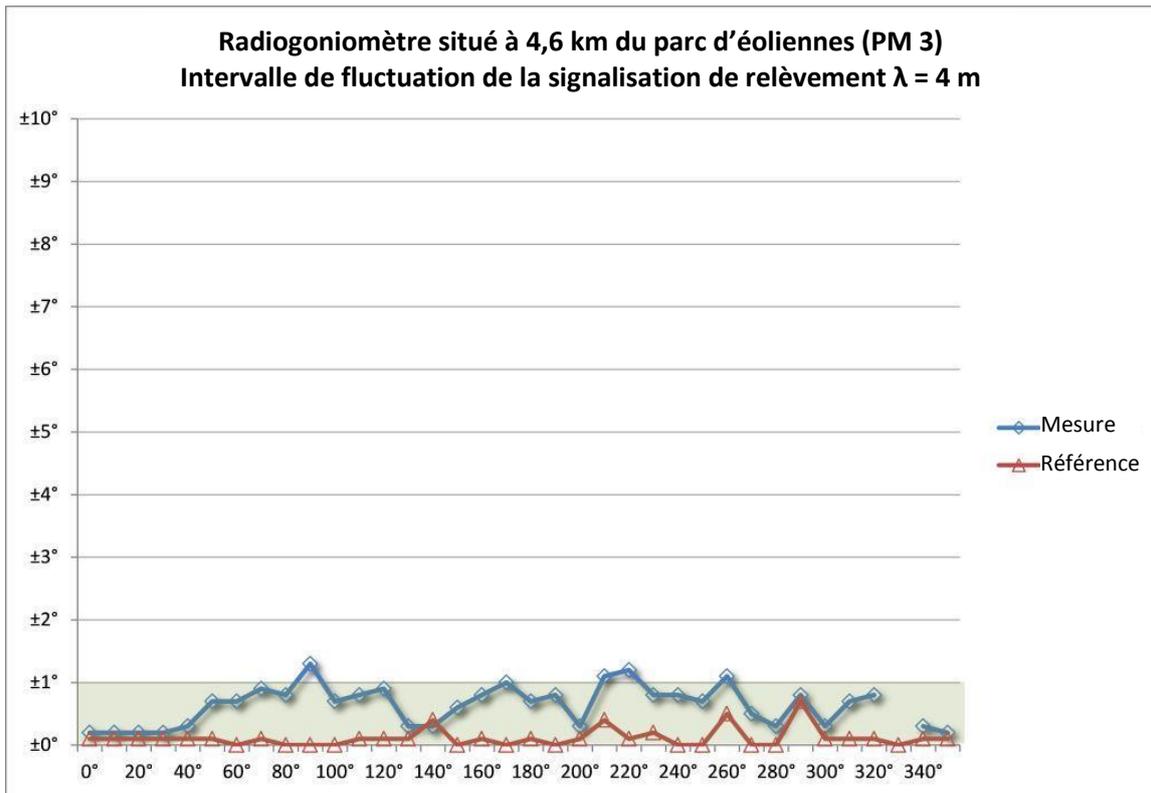
Dans la bande des 70 cm, de fortes fluctuations ont aussi été observées dans les relèvements pour chaque intervalle d'angle, ces fluctuations s'ajoutant aux erreurs radiogoniométriques précitées. L'effet est encore plus prononcé dans des bandes dont la longueur d'onde est encore plus courte (30 cm, 23 cm et 13 cm) et il s'étend sur des intervalles d'angle toujours plus larges à mesure que la longueur d'onde se raccourcit.

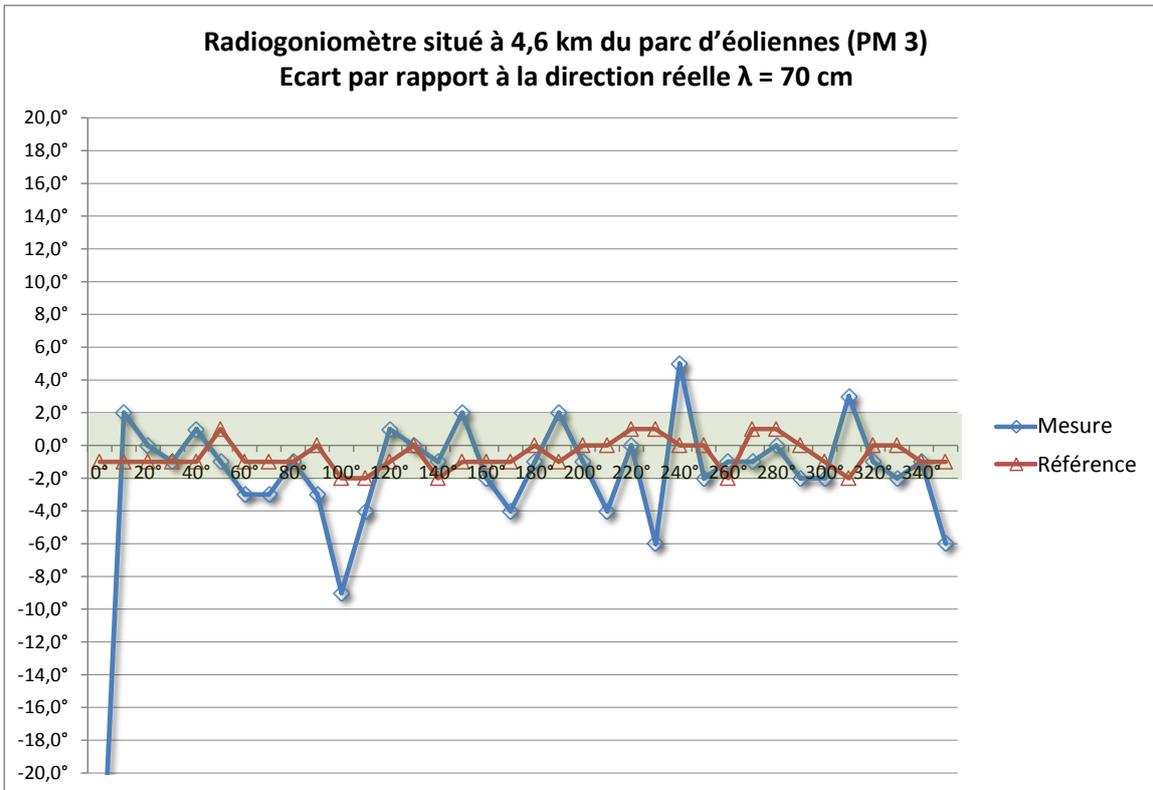
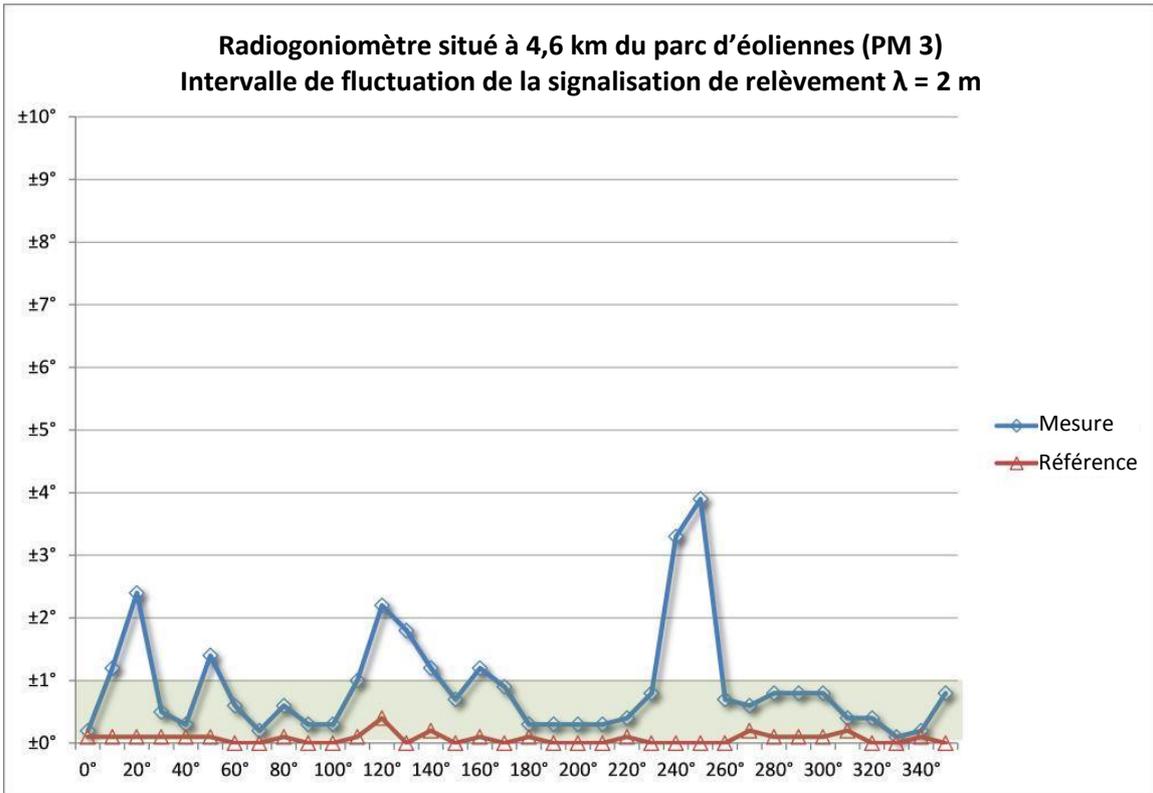
Dans l'intervalle des ondes décimétriques, d'importantes erreurs ont été enregistrées dans les quatre quadrants, sauf dans un secteur étroit transversal par rapport au parc d'éoliennes. Dans la direction de ce parc, les erreurs radiogoniométriques étaient si prononcées qu'il n'était même plus possible de déterminer le bon quadrant.

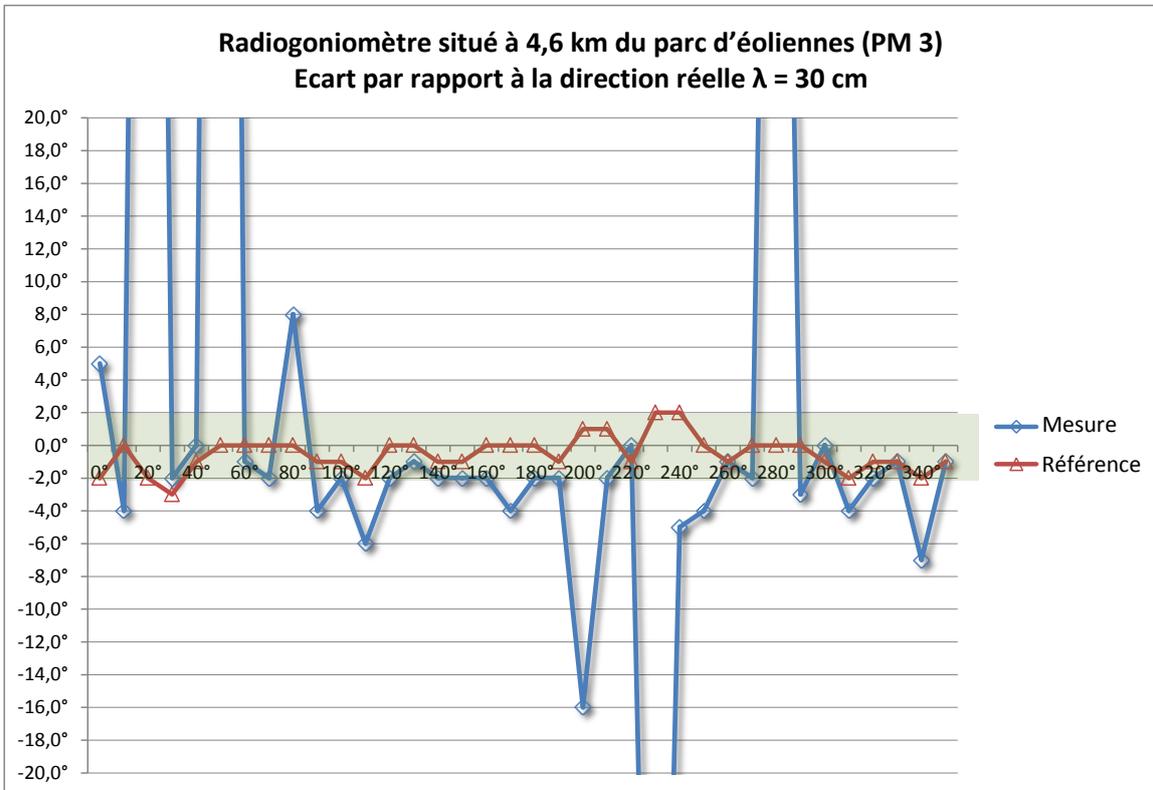
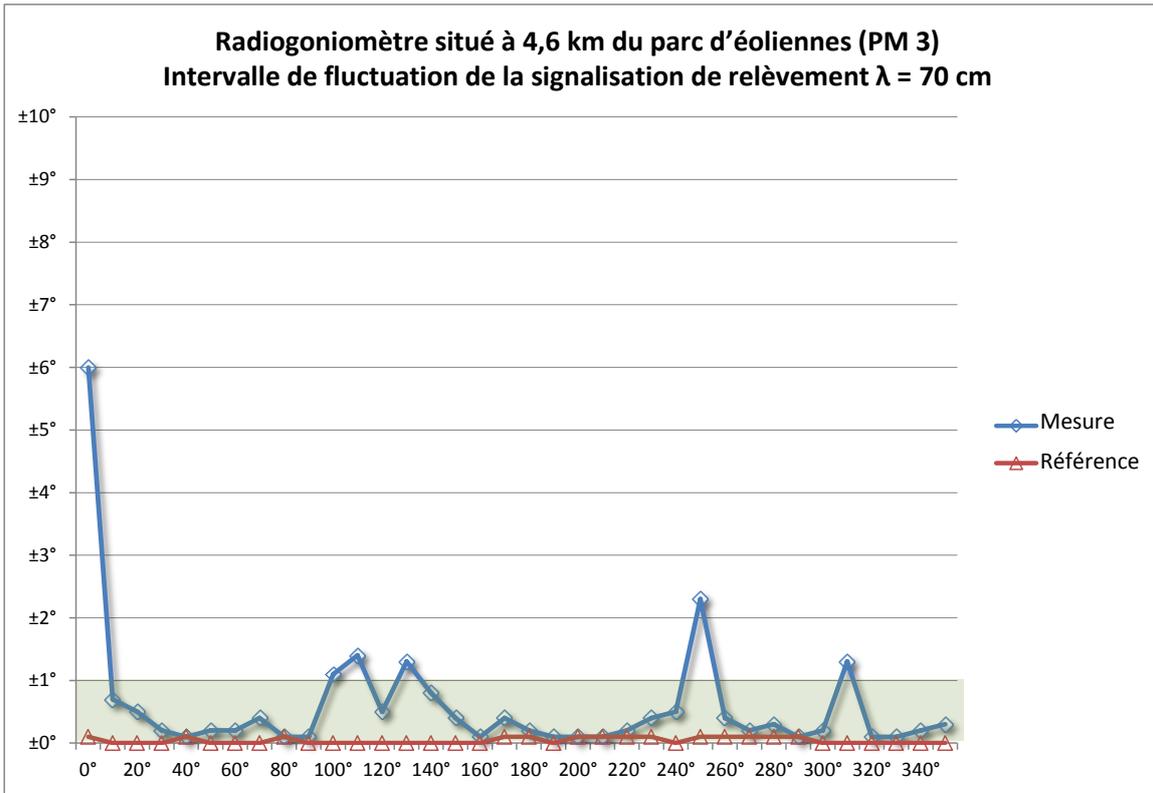
Conclusion: Un radiogoniomètre fixe situé à 2,5 km du parc d'éoliennes ne peut être utilisé que dans la bande des 70 cm, et encore cet usage ne peut-il se faire que dans un intervalle d'angle limité.

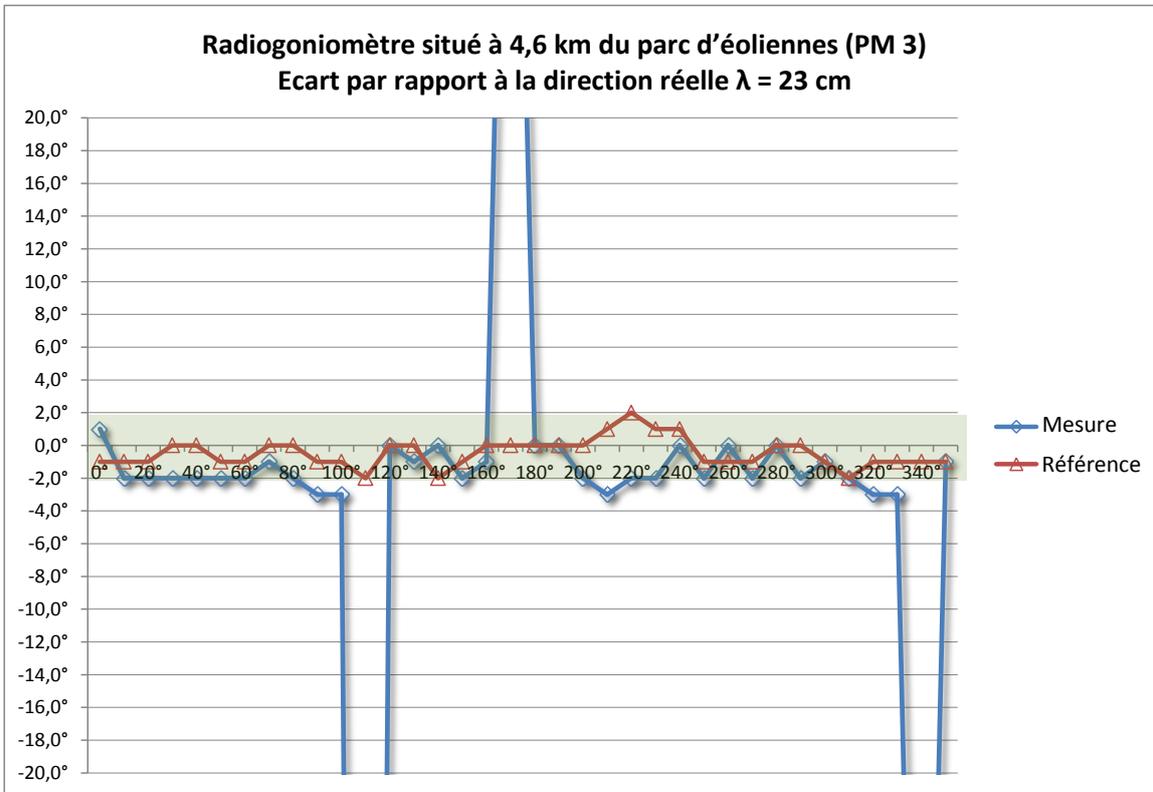
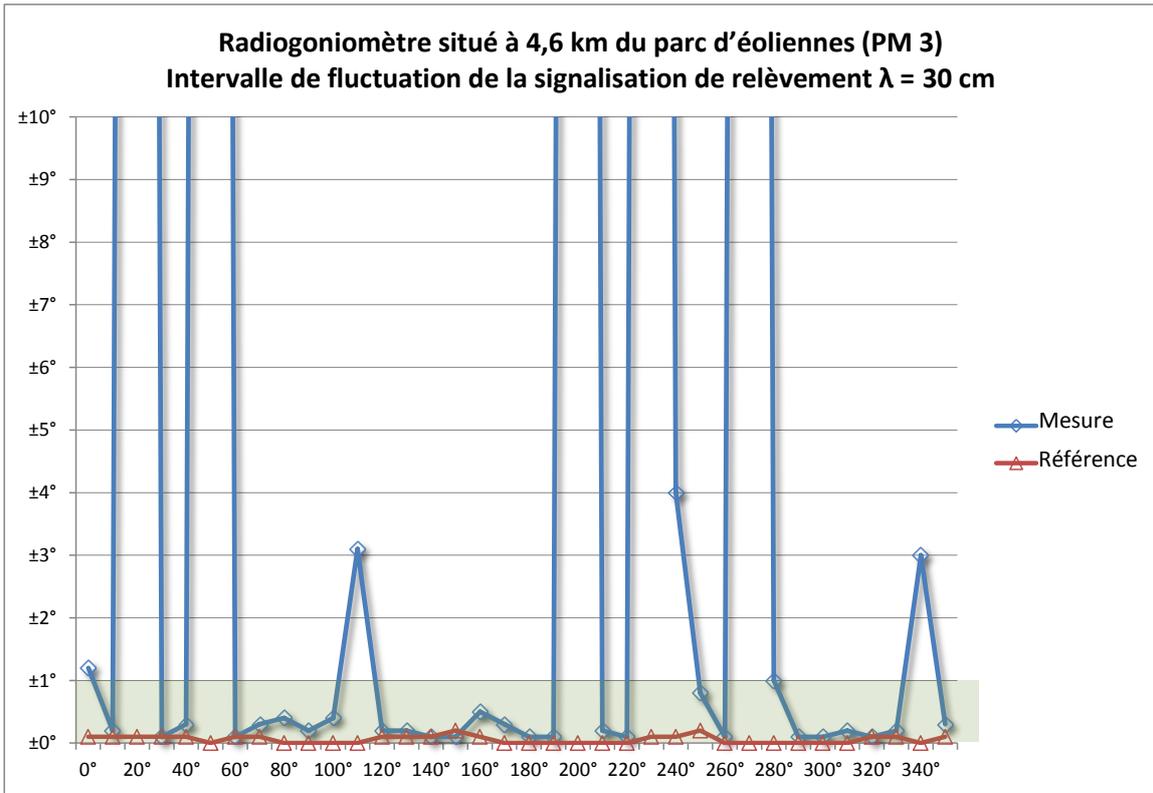
9.2.4 Radiogoniomètre situé à 4,6 km du parc d'éoliennes

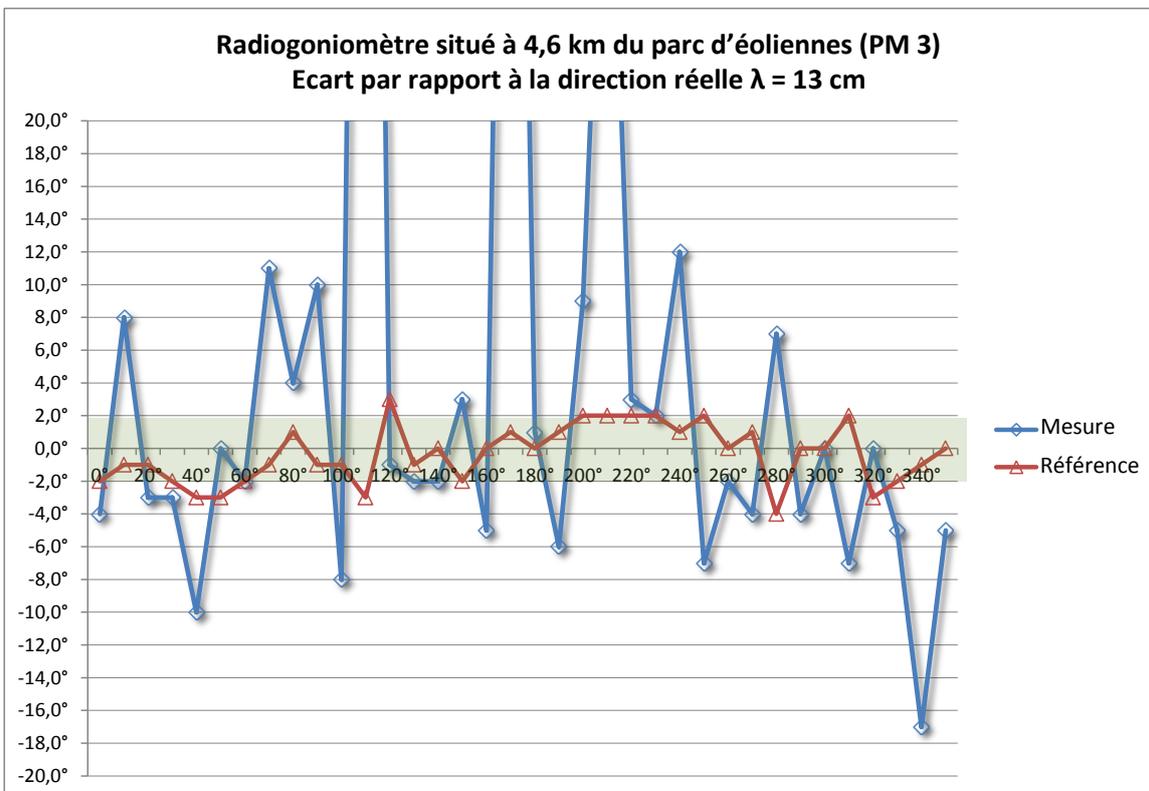
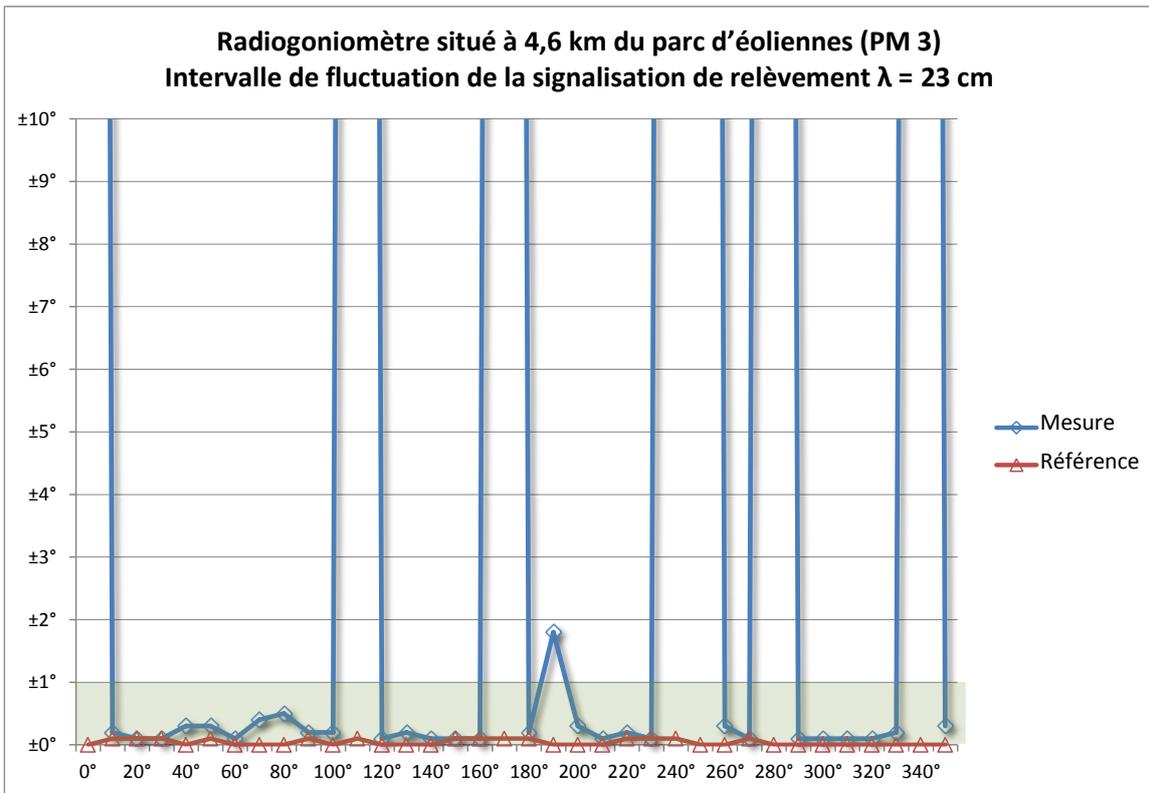


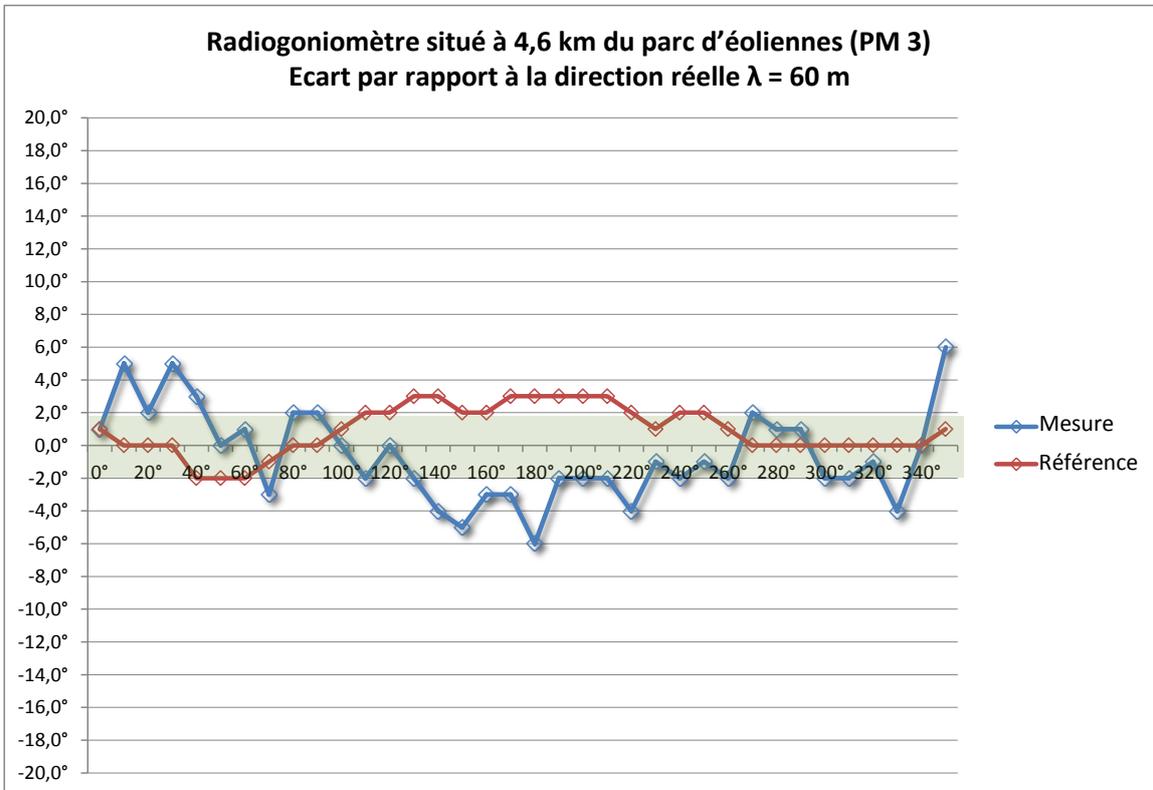
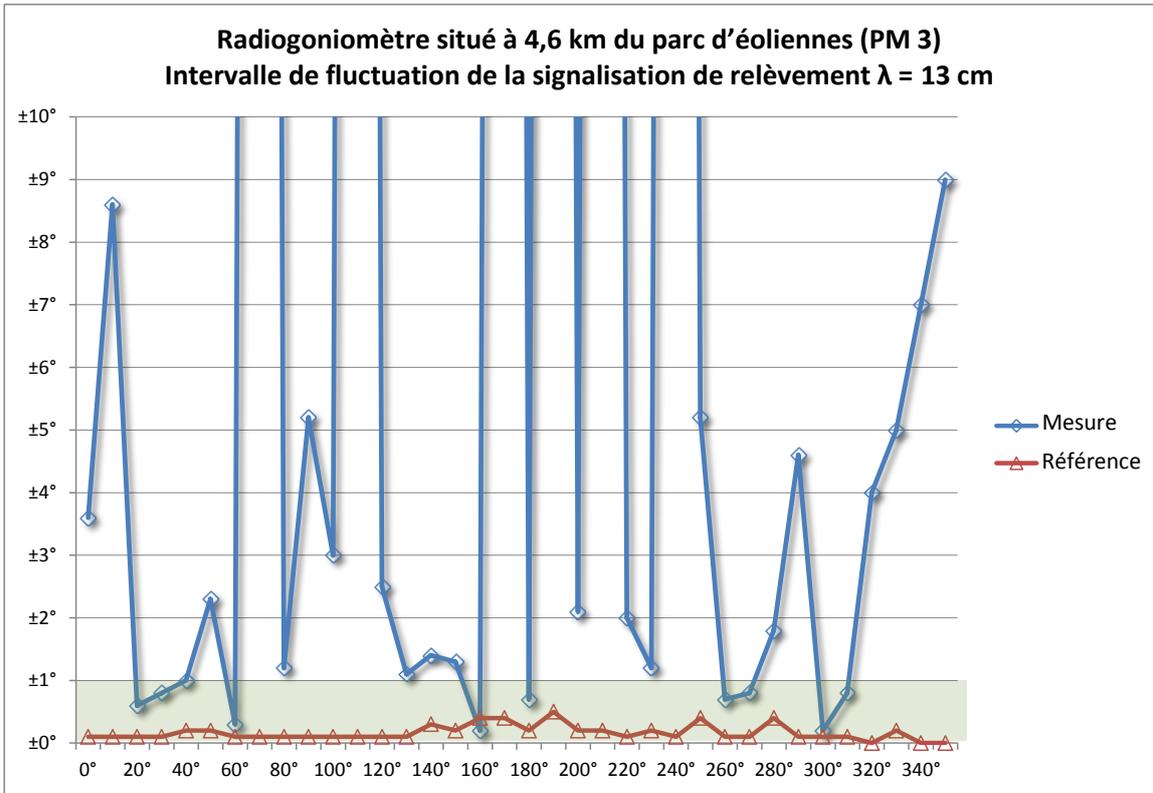


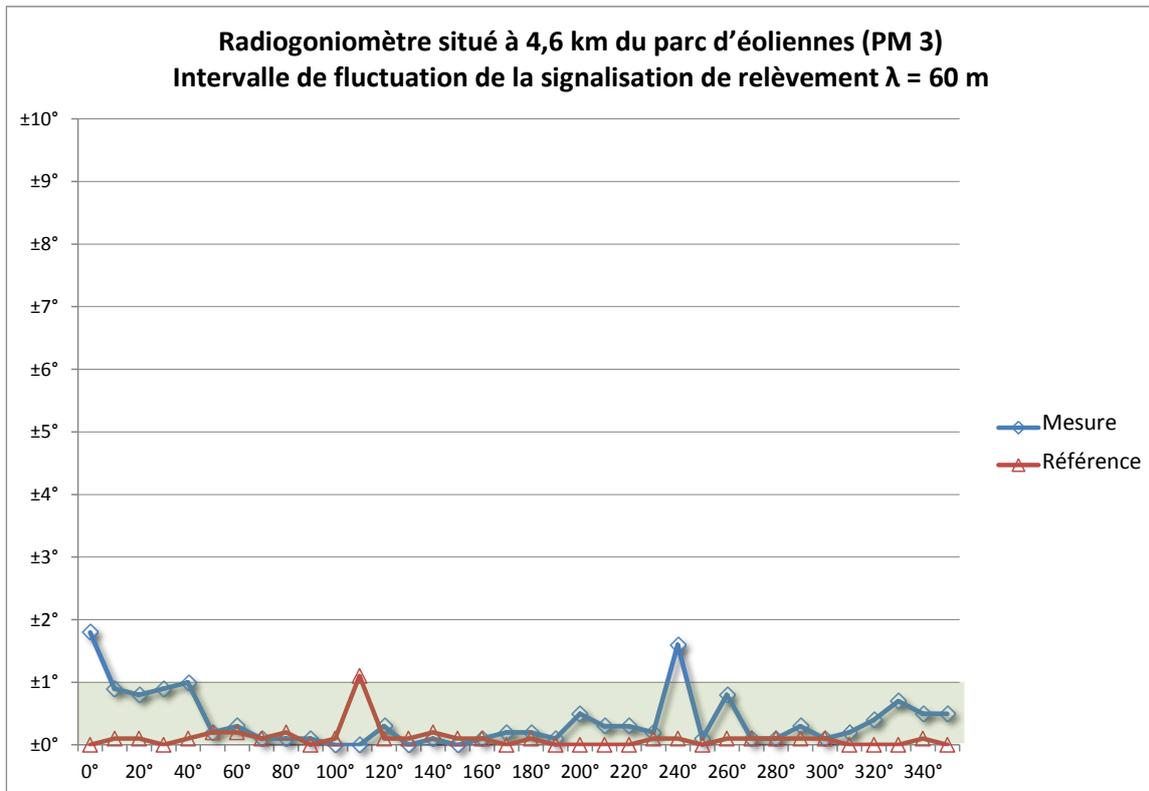












Lorsque le radiogoniomètre se trouvait à 4,6 km du parc d'éoliennes, d'importantes erreurs ont été enregistrées dans toutes les bandes métriques et décimétriques.

Dans les bandes des 4 m et des 2 m, des erreurs marquées ont été observées dans les quatre quadrants. Dans l'ensemble, elles étaient moins prononcées que les erreurs relevées à 2,5 km (voir la section 9.2.3), bien que dans la bande des 4 m, certaines erreurs encore plus prononcées aient parfois été enregistrées dans la direction opposée à celle du parc d'éoliennes.

Dans la bande des 70 cm, les erreurs particulièrement marquées qui avaient été relevées à une distance de 2,5 km dans la direction opposée au parc n'ont plus été observées. En revanche, des erreurs considérables ont été notées dans les quatre quadrants, sauf dans un petit intervalle d'angle situé dans la direction du parc. Cette constatation est cohérente avec l'observation précédente, selon laquelle l'arc formé par le parc d'éoliennes, tel que vu depuis le radiogoniomètre, se raccourcit à mesure que la distance augmente.

Dans la bande des 30 cm, des erreurs très marquées ont à nouveau été mises en évidence dans la direction opposée au parc. Ce qui était nouveau, en revanche, c'est que des erreurs très prononcées ont été enregistrées dans la direction du parc. Seuls quelques intervalles d'angle très étroits, transversaux au parc, affichaient des erreurs plus faibles, mais néanmoins marquées.

Dans la bande des 23 cm, on n'observe que de petites erreurs dans deux intervalles d'angle plus grands, transversaux par rapport au parc d'éoliennes. Dans l'intervalle d'angle entre 230° et 330° , en revanche, des fluctuations très importantes des valeurs radiogoniométriques ont été relevées; il ne restait donc qu'un seul secteur utilisable dans la direction du parc.

Dans la bande des 13 cm, de puissants brouillages et des erreurs radiogoniométriques chaotiques ont été observés dans les quatre quadrants.

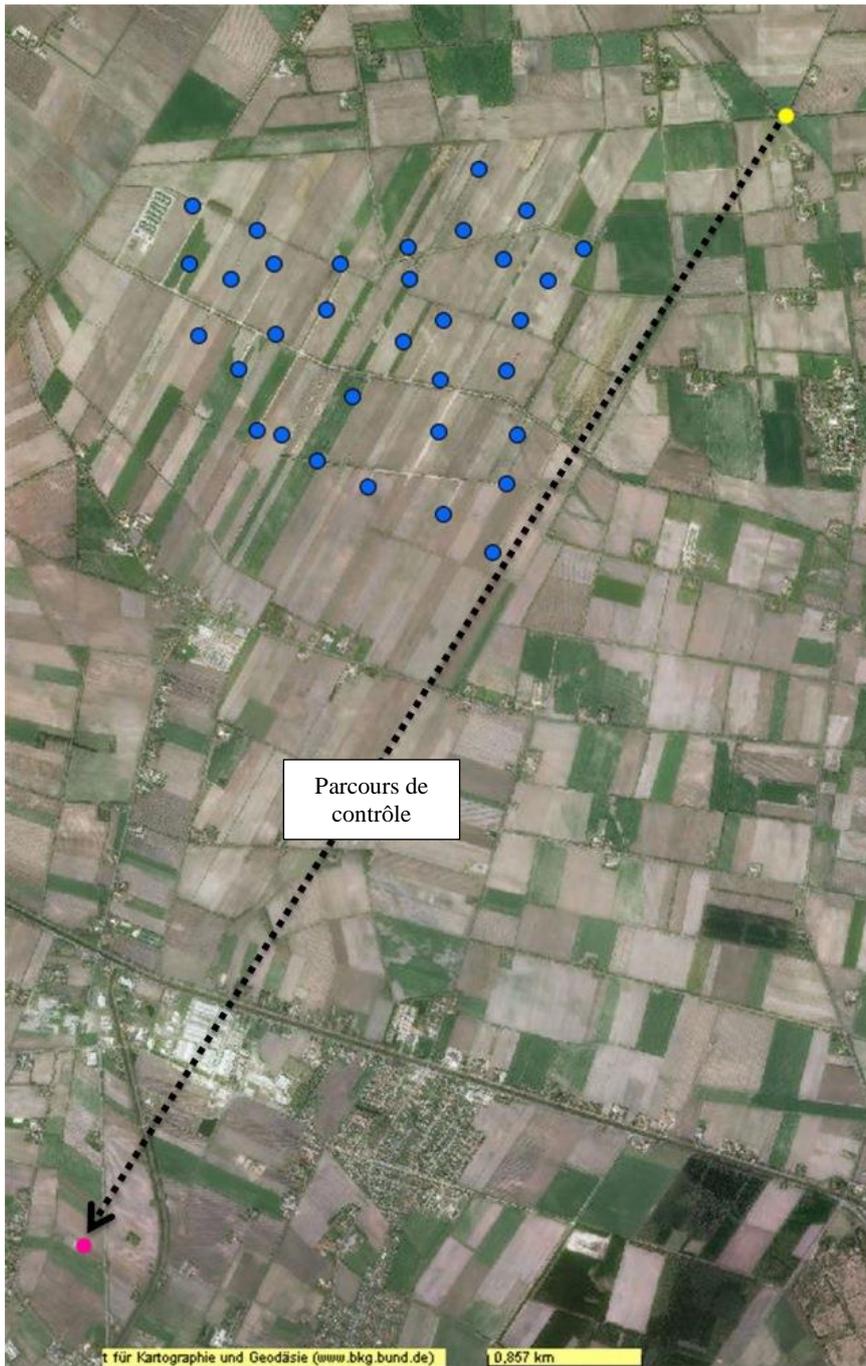
Dans la bande des ondes décamétriques, des erreurs inacceptables ont aussi été enregistrées à cette distance, tant dans la direction du parc que dans la direction opposée. Cependant, ces erreurs sont beaucoup moins prononcées que celles relevées à une distance de 2,5 km. A ce stade, il convient de rappeler les explications données dans la section 9.1.2 et de se demander si ces mesures sont transposables à un radiogoniomètre fixe fonctionnant par ondes décamétriques ionosphériques.

Conclusion: Un radiogoniomètre fixe situé à 4,6 km du parc d'éoliennes ne peut être utilisé dans aucune des bandes métriques et décimétriques spécifiées.

10 Mesures du niveau de réception

Pour examiner les effets des éoliennes sur les niveaux de réception, un parcours de contrôle des émissions radioélectriques mesurant environ 7,5 km de long a été établi à la périphérie sud-est du parc d'éoliennes de Haren. Ce contrôle visait à détecter toute fluctuation du niveau de réception à l'emplacement du radiogoniomètre et à établir un lien de causalité direct entre ces fluctuations et les éoliennes avoisinantes.

Parcours de contrôle des émissions radioélectriques.
Le radiogoniomètre est illustré par un point rouge et l'émetteur par un point jaune.



Emplacement de l'émetteur pour mesurer les niveaux de réception

Pour que le fonctionnement d'une éolienne soit optimal, la vitesse du rotor doit être réglée par rapport à la vitesse du vent. Lorsque l'éolienne fonctionne en mode de charge partielle (régulation du couple), le rapport entre l'angle de la pale et la vitesse à la pointe de la pale est optimisé de telle sorte que la vitesse du rotor est approximativement proportionnelle à la vitesse du vent. Les éoliennes modernes à trois pales fonctionnent dans un intervalle efficace de 5 à 32 tours/minute. Les mesures de la vitesse des rotors effectuées en même temps que les mesures du niveau de réception dans le parc d'éoliennes de Haren ont montré que la vitesse de rotation variait entre 5,1 et 6,5 secondes.

10.1 Sensibilité du système

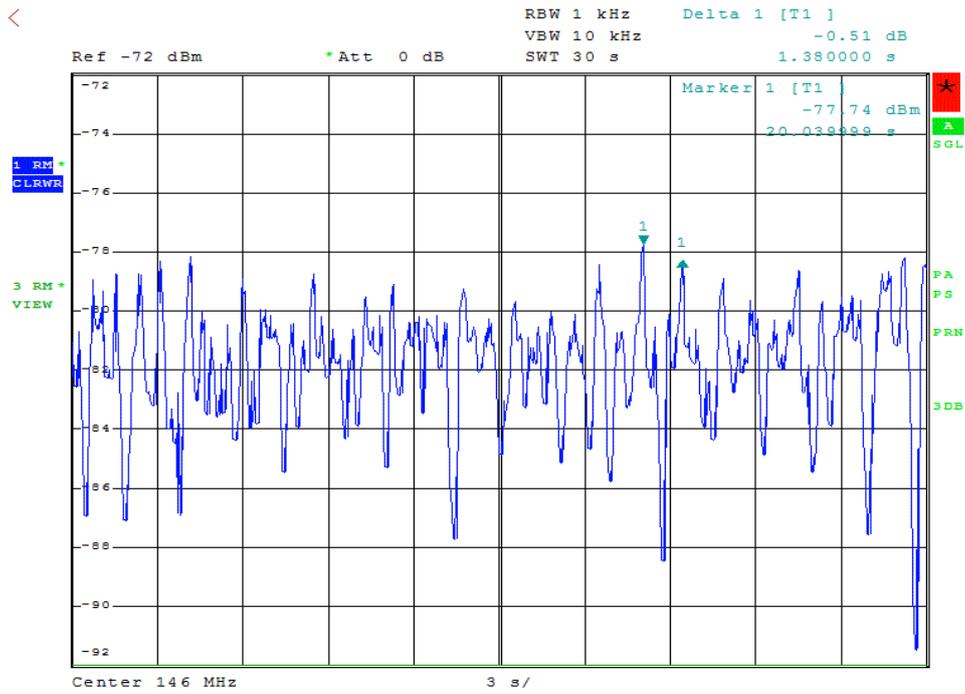
La sensibilité du système de réception employé, qui se composait de l'analyseur de spectre et d'une antenne au sol réglée pour l'intervalle de fréquences pertinent, était supérieure à -134 dBm pour toutes les fréquences examinées.

10.2 Enregistrement dans le temps

Pour établir un premier aperçu des fluctuations du niveau de réception, les niveaux ont tout d'abord été enregistrés dans tous les intervalles de fréquences pendant trois secondes dans le domaine temporel (excursion en fréquence nulle). Les essais ont été effectués avec un signal NON (porteuse continue non modulée, puissance d'émission continue/onde entretenue).

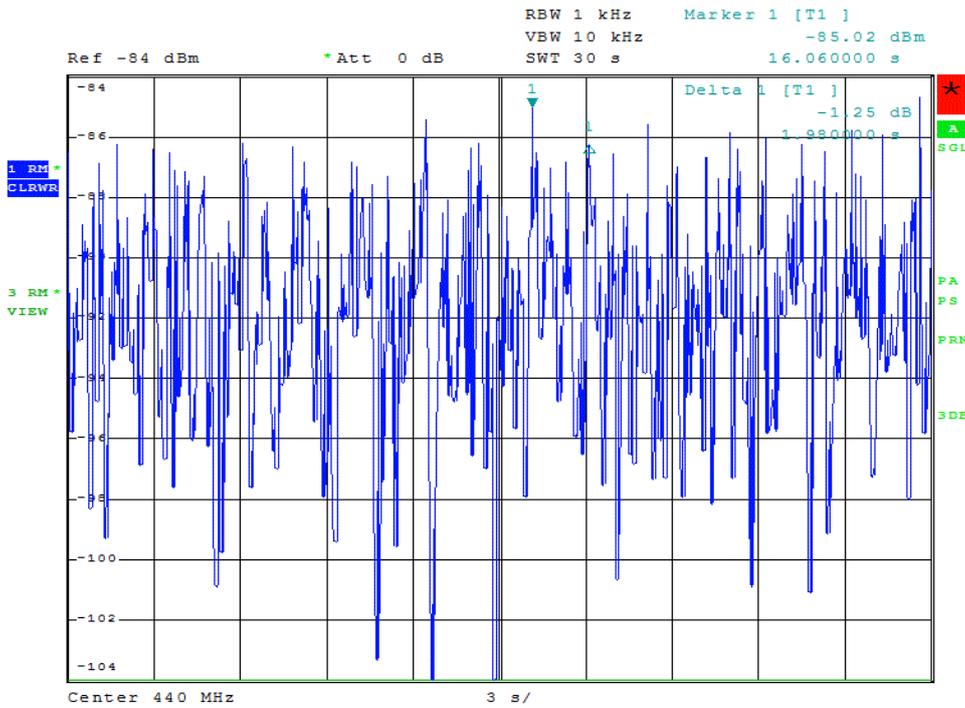
Dans toutes les mesures suivantes, la courbe bleue représente le niveau de signal reçu tandis que la courbe verte représente la sensibilité du système. Dans certains cas, le niveau du signal reçu est si élevé par rapport au bruit que la courbe verte illustrant le niveau plancher du bruit n'est plus visible.

Bande des 2 m



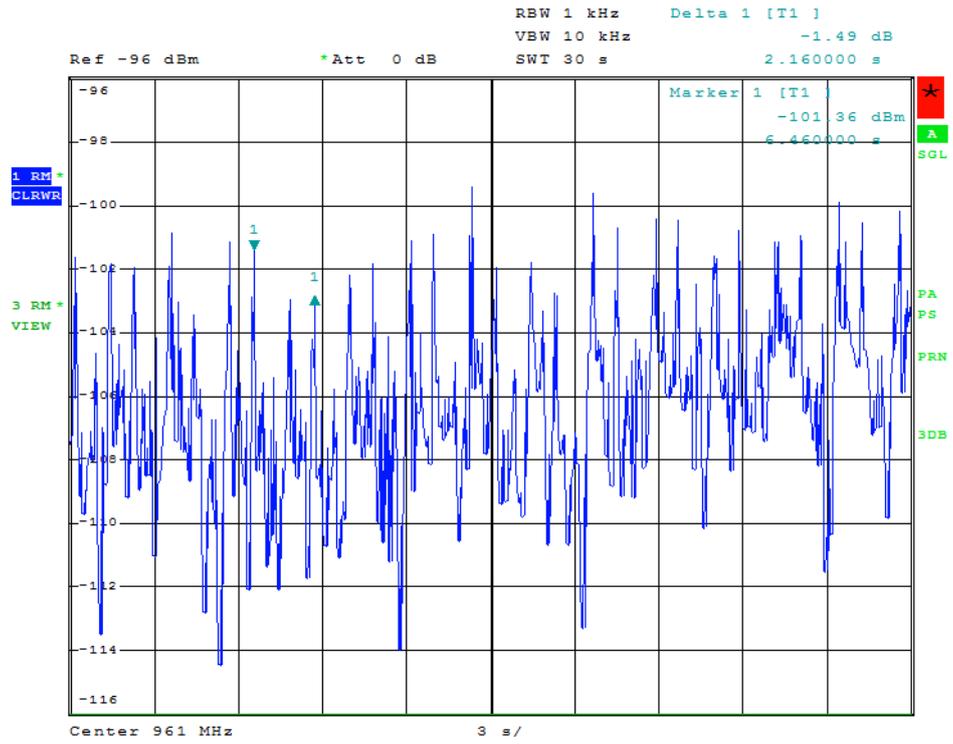
Date: 8.FEB.2015 17:07:29

Bande des 70 cm



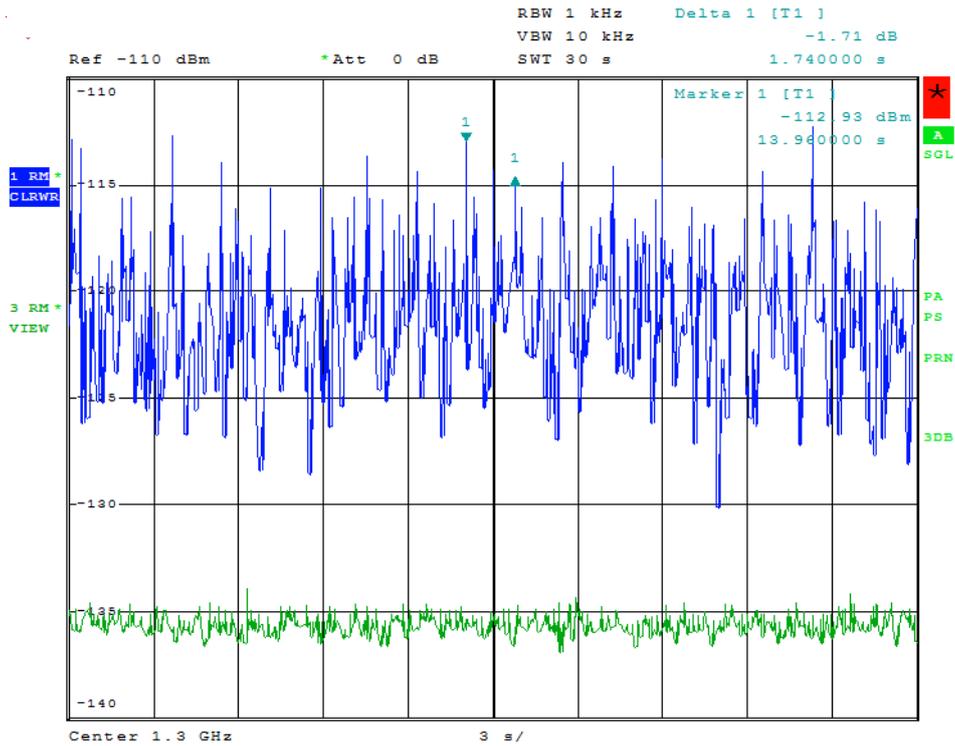
Date: 8.FEB.2015 16:45:42

Bande des 30 cm



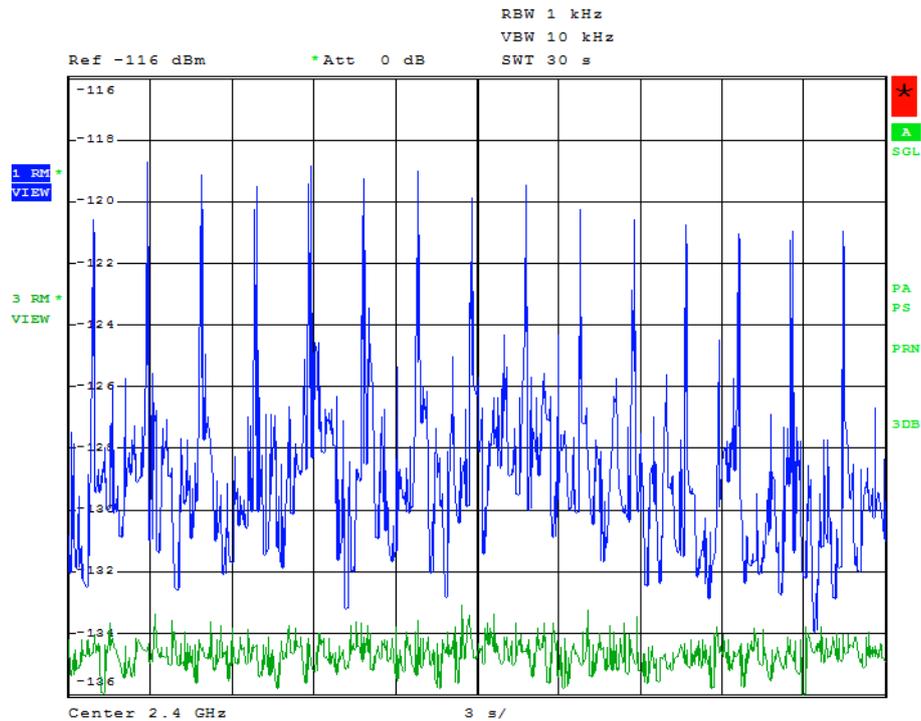
Date: 8.FEB.2015 16:24:49

Bande des 23 cm



Date: 8.FEB.2015 15:57:12

Bande des 13 cm



Date: 8.FEB.2015 15:26:16

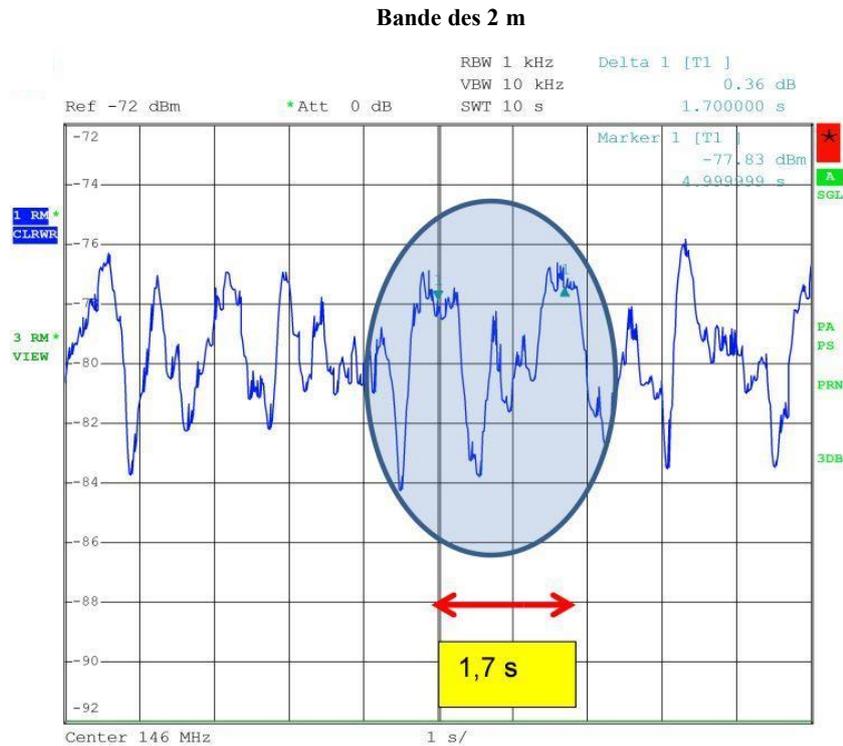
Il est évident que non seulement les niveaux de réception s'améliorent et se réduisent à des intervalles récurrents réguliers, mais aussi qu'il existe un effet de chevauchement en raison d'un certain nombre de variables de brouillage différentes. L'évolution particulière de ces niveaux semble aussi dépendre dans une large mesure de la longueur d'onde du signal radioélectrique.

Si l'on mesure la distance entre deux niveaux de crête, la différence de temps observée va de 1,7 à 2,16 secondes, ce qui correspond à une vitesse de rotation du rotor de 5,1 à 6,48 secondes (pour une éolienne à trois pales). Ces valeurs correspondent aux mesures purement visuelles des vitesses de rotation du rotor qui ont été effectuées pendant l'enregistrement des valeurs, et qui sont de 5,1 à 6,5 secondes. Il semble donc que chaque pale de chacune des 29 éoliennes soit responsable de ces crêtes et de ces creux dans le niveau de réception. Suivant la longueur d'onde, les effets de plusieurs pales peuvent se chevaucher, ce qui provoque des fluctuations du niveau de réception presque chaotiques. Il est alors difficile d'attribuer ces fluctuations à une pale particulière. Les points remarquables dans le temps sont signalés par un triangle.

La différence entre les niveaux maximum et minimum, qui dans le cas présent est mesurée par un détecteur RMS, peut atteindre 20 dB.

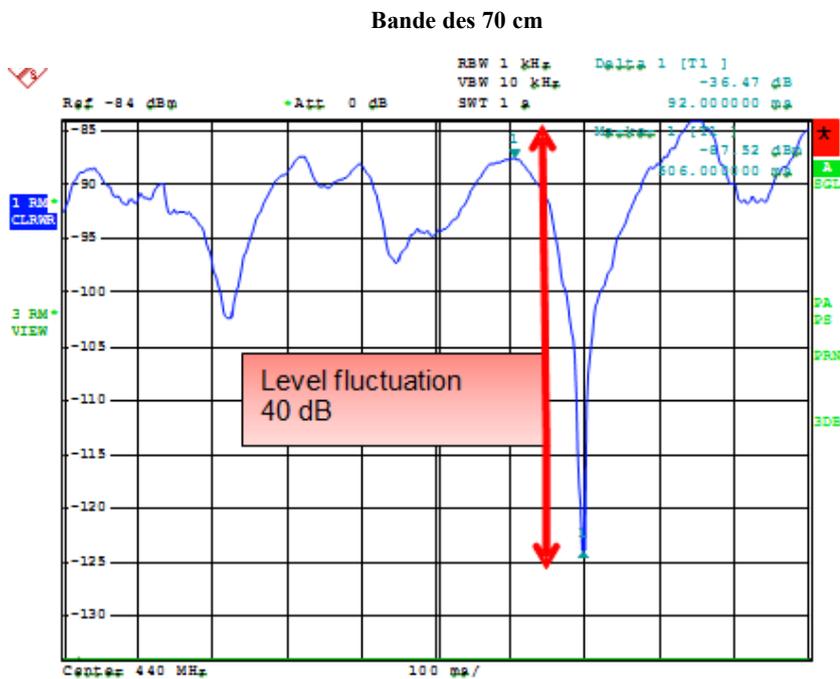
10.3 Analyse des niveaux

Si l'enregistrement est ramené à une durée inférieure ou égale à une seconde, il devient encore plus évident que des niveaux de crête récurrents peuvent être regroupés et attribués à la même cause.



Date: 8.FEB.2015 17:09:54

Si les mesures sont effectuées dans des fréquences plus élevées, les fluctuations de niveau peuvent atteindre 40 dB. Dans la pratique, cela signifie que les fluctuations s'annulent mutuellement.



Date: 8.FEB.2015 16:49:52

L'évolution du niveau de réception dans le temps démontre aussi que les chutes de ce niveau ne sont pas provoquées par le fait que les pales occultent directement le signal radioélectrique; ce phénomène serait de toutes manières impossible car le parcours de mesure contourne le parc d'éoliennes. En réalité, comme les pales du rotor provoquent des réflexions qui se chevauchent constamment et dont la polarisation et la durée ne cessent de changer, la réception s'effectue par trajets multiples. Si ces trajets multiples se superposent en opposition de phase, ils s'annulent presque complètement les uns les autres. Il serait donc théoriquement possible d'observer des chutes de niveau de réception encore plus prononcées que celles documentées ici.

Dans de telles conditions de réception, il n'est plus possible d'effectuer une mesure étalonnée du champ. Il peut aussi devenir impossible de décoder des signaux modulés de manière numérique.

Quoi qu'il en soit, une forte perte de sensibilité survient pendant le décodage de signaux modulés de manière analogique et numérique et elle ne peut être entièrement compensée par des mesures techniques (comme l'augmentation du gain d'antenne).
