

Union internationale des télécommunications

# UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

**Rapport UIT-R SM.2056-1**  
(06/2014)

## **Vérification, par avion, des diagrammes d'antenne des stations de radiodiffusion**

**Série SM**  
**Gestion du spectre**

**15**   
1865-2015



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

*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, 2015

© UIT 2015

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.2056-1

**Vérification, par aéronef, des diagrammes d'antenne  
des stations de radiodiffusion**

(2005-2014)

**1 Résumé analytique**

Le présent Rapport décrit les procédures de mesure, les équipements requis et les modalités de présentation des rapports pour les mesures de diagrammes de rayonnement d'antennes à partir d'un aéronef. Il s'applique indépendamment de la plate-forme aéroportée choisie et quel que soit le système de radiodiffusion utilisé. Il donne toutefois des indications supplémentaires concernant certaines plates-formes aéroportées et certains systèmes de radiodiffusion, de manière à pouvoir être adapté aux besoins particuliers de chacun.

Le présent Rapport comporte trois annexes:

- L'Annexe 1 présente les différents types de diagrammes d'antenne que l'on peut distinguer et les procédures à utiliser pour les mesurer. Elle décrit les équipements nécessaires pour réaliser ces mesures, de manière suffisamment détaillée pour permettre à chacun d'assembler son propre système, sans toutefois limiter le choix des équipements. Elle décrit en outre l'analyse après le vol – importante pour évaluer la précision des mesures – puis une norme de présentation des rapports.
- Les réglages nécessaires et les considérations importantes dépendent du type de radiodiffusion et de la gamme de fréquences. L'Annexe 2 est consacrée à ces éléments.
- L'Annexe 3 décrit les problèmes spécifiques rencontrés pour certains types d'aéronef et propose des solutions lorsque c'est possible.

**Annexe 1****Vérification, par aéronef, des diagrammes d'antenne des stations  
de radiodiffusion****1 Introduction**

La présente Annexe décrit les procédures de mesure, les équipements requis et les modalités de présentation des rapports pour les mesures de diagrammes de rayonnement d'antennes à partir d'un aéronef. Sa structure est la suivante:

La section 2 décrit les différents types de diagrammes d'antenne que l'on peut distinguer. La section 3 présente la méthode de mesure en général. La section 4 définit les différents types de vols effectués pour réaliser les mesures. La section 5 décrit les équipements nécessaires pour réaliser ces mesures, de manière suffisamment détaillée pour permettre à chacun d'assembler son propre système, sans toutefois limiter le choix des équipements. La section 6 décrit les procédures de mesure à utiliser. Les sections 7 à 9 traitent des différents aspects du traitement des données, du calcul de l'incertitude de mesure et de la présentation des rapports.

Les recommandations figurant dans la présente Annexe s'appliquent indépendamment du type d'aéronef choisi et quel que soit le système de radiodiffusion utilisé. Les Annexes 2 et 3 contiennent d'autres recommandations concernant certaines plates-formes aéroportées et certains systèmes de radiodiffusion.

## 2 Types de diagrammes d'antenne

Toute antenne a un diagramme de rayonnement en trois dimensions. En règle générale, les diagrammes d'antenne mesurés sont des coupes en deux dimensions de ce diagramme en trois dimensions. Les coupes courantes sont le «diagramme d'antenne vertical» et le «diagramme d'antenne horizontal». Le diagramme d'antenne vertical est une coupe du diagramme d'antenne dans un plan vertical passant par l'antenne et correspondant à une direction d'azimut donnée. Le diagramme d'antenne horizontal est une coupe du diagramme d'antenne dans un plan horizontal passant par l'antenne et correspondant à un angle d'élévation ou d'inclinaison vers le bas donné. Voir les Fig. 1 et 2. Les systèmes de coordonnées utilisés sont décrits dans la Recommandation UIT-R BS.705.

FIGURE 1  
Diagramme d'antenne vertical

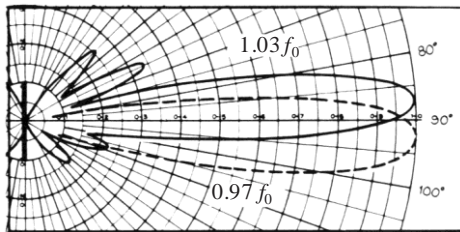
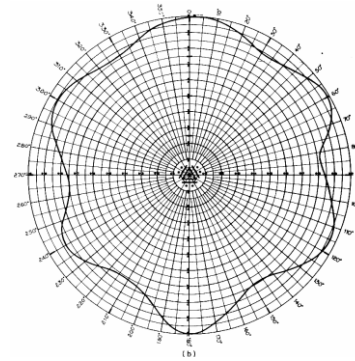


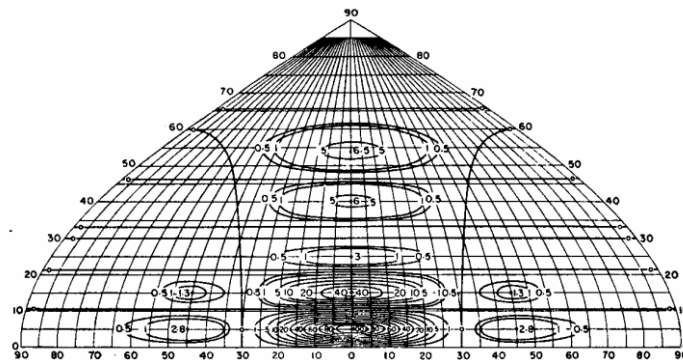
FIGURE 2  
Diagramme d'antenne horizontal



Rapport SM.2056-01

Dans certains cas, on s'intéresse surtout à un secteur donné de l'antenne. En ce qui concerne les antennes de radiodiffusion en ondes décimétriques très directives, la forme et la position exactes du lobe principal ainsi que la puissance apparente rayonnée (p.a.r.) dans ce lobe principal déterminent l'empreinte sur la zone cible, et sont donc très importantes. Des mesures spécifiques pourraient être réalisées pour représenter graphiquement cette partie du diagramme d'antenne. Un exemple d'un tel diagramme d'antenne, la projection de Sanson-Flamsteed, est illustré à la Fig. 3.

FIGURE 3  
Diagramme d'antenne – lobe principal



Rapport SM2056-03

Les mesures peuvent être répétées pour différents azimuts ou différents angles d'élévation afin d'obtenir davantage d'informations sur le diagramme d'antenne complet en trois dimensions. Ces azimuts ou angles d'élévation peuvent être choisis de manière stratégique sur la base de la géométrie de l'antenne, de simulations et de l'expérience acquise lors de campagnes de mesure précédentes.

L'ensemble des vols à effectuer pour réaliser les mesures dépend du type de diagramme d'antenne à mesurer, mais la méthode de mesure reste très semblable si ce n'est identique.

### 3 Méthode de mesure

La mesure d'un diagramme d'antenne consiste à réaliser une série de mesures de champ, chacune étant réalisée à une distance connue avec exactitude par rapport à l'antenne à mesurer. Avec ces deux valeurs, on peut calculer la p.i.r.e. absolue au point considéré. La mesure de la p.i.r.e. en une série de points positionnés sur un cercle autour de l'antenne permet d'obtenir le diagramme d'antenne horizontal. Il est possible, selon les souhaits, de mesurer d'autres diagrammes. La formule à utiliser pour calculer la p.i.r.e. absolue est, sous forme linéaire:

$$P_{EIRP} = \frac{P_{RX} \cdot R^2}{g_{RX}} \cdot \left( \frac{4 \pi f}{c} \right)^2 \quad (1)$$

où:

$P_{EIRP}$ : puissance par rapport à un élément rayonnant isotrope (W)

$P_{RX}$ : puissance aux bornes d'entrée du récepteur (W)

$R$ : distance (m) entre l'antenne de réception et l'antenne d'émission

$g_{RX}$ : gain (valeur linéaire) de l'antenne de réception par rapport à un élément rayonnant isotrope

$f$ : fréquence (Hz)

$c$ : vitesse de la lumière (m/s).

Il faut veiller à mesurer la position et  $P_{RX}$  exactement au même moment. Si cette condition n'est pas remplie, la valeur résultante de la p.i.r.e. n'est pas correcte. Dans cette formule,  $P_{EIRP}$  et  $g_{RX}$  sont exprimés par rapport à un élément rayonnant isotrope. Il convient de tenir compte dans la valeur de  $G_{RX}$  des affaiblissements supplémentaires tels que les affaiblissements dans les câbles, l'affaiblissement dû à un défaut d'alignement de l'antenne ou l'affaiblissement dû à la polarisation. En règle générale, il est plus commode d'utiliser une version logarithmique de la formule:

$$P_{EIRP} = P_{RX} + 20 \log (R) - G_{RX} + 20 \log (f) + 20 \log (4\pi/c) \quad (2)$$

Dans la formule (2),  $P_{EIRP}$  et  $P_{RX}$  sont exprimés en dBW,  $G_{RX}$  en dBi.

En fonction de l'application de radiodiffusion et de la bande de radiodiffusion utilisées, l'antenne de référence normalisée pourra être, non pas l'élément rayonnant isotrope, mais par exemple un doublet demi-onde ou une antenne unipolaire courte sans perte. Pour calculer la p.a.r. (par rapport à un doublet demi-onde), on pourra utiliser la formule suivante:

$$P_{ERP} = P_{EIRP} - 2,15 \text{ dB} \quad (3)$$

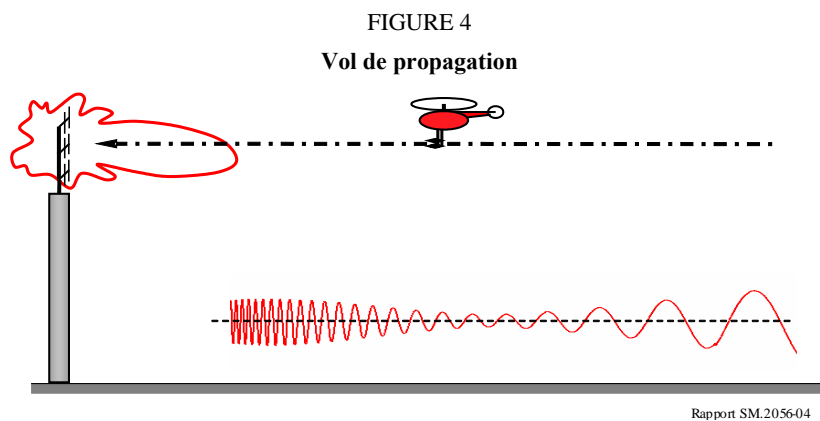
car le gain d'antenne d'un doublet demi-onde est de 2,15 dBi.

#### 4 Types de vols effectués pour réaliser les mesures

Le type de vol effectué dépend entièrement de la situation de l'antenne et de l'aéronef utilisé. Une approche différente est par exemple nécessaire pour la mesure du diagramme d'une antenne de radiodiffusion en ondes métriques avec un hélicoptère et pour la mesure du diagramme d'une antenne réseau en ondes moyennes avec un avion. La présente section décrit les différents types de vols et leur application.

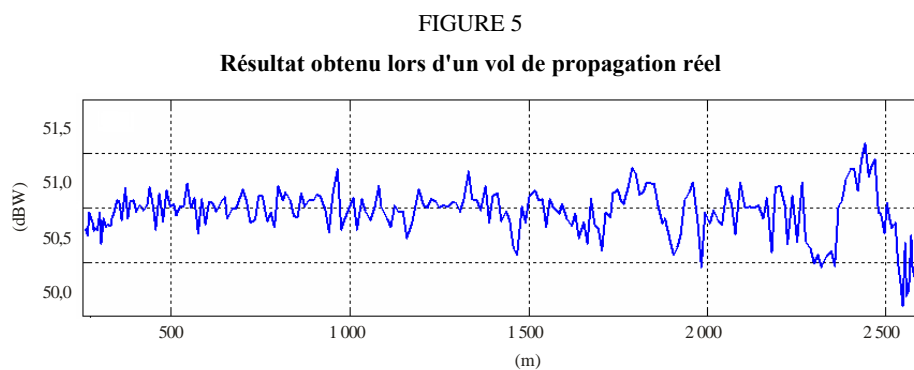
##### 4.1 Vol de propagation

Pour déterminer la distance de mesure optimale, un vol de propagation peut être effectué. C'est un vol en ligne droite en direction de l'antenne d'émission et à la hauteur exacte de ladite antenne. Ainsi, la position angulaire de l'antenne de mesure vue depuis l'antenne d'émission est constante et la p.a.r. émise dans cette direction est également constante. En l'absence de réflexions, la p.a.r. mesurée pendant le vol de propagation sera donc constante. La présence de réflexions au sol ou de diffusion par les bâtiments se traduira par des écarts par rapport à cette ligne droite, comme illustré à la Fig. 4.



Pour un vol de propagation, il est suggéré d'utiliser comme direction de mesure la direction du lobe principal du diagramme de l'antenne. Il est recommandé d'effectuer plusieurs vols de propagation pour des antennes avec plusieurs directions de rayonnement et dans les cas où les conditions au sol et par conséquent les réflexions au sol varient.

Outre le diagramme théorique de la Fig. 4, le résultat d'une mesure réelle est représenté à la Fig. 5. Ce résultat a été obtenu pour un émetteur de radiodiffusion FM en ondes métriques de 50 kW. L'antenne d'émission était constituée d'un réseau d'antennes doublet log-périodiques polarisées verticalement installées sur un pylône à environ 150 m au-dessus du sol. Le cercle indique la distance qui a été retenue pour un vol circulaire ultérieur.



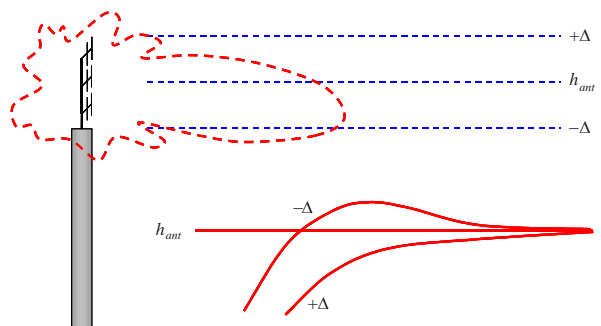
A partir du résultat obtenu lors du vol de propagation, une distance optimale est choisie pour les mesures ultérieures. La distance optimale est la distance pour laquelle:

- l'amplitude des réflexions est minimale; et
- les minima et les maxima sont les plus proches les uns des autres.

Le premier critère est évident, le deuxième peut nécessiter une explication. Si les minima et les maxima causés par les réflexions au sol sont éloignés les uns des autres, et que le sol est plat et homogène, un vol circulaire complet pourrait par exemple être effectué à une distance correspondant à un minimum ou à un maximum. On obtiendrait alors la plus grande erreur de mesure possible et le moins de variations possible dans le résultat de mesure. Il convient donc d'éviter cette situation. Dans l'exemple considéré, la distance de mesure optimale serait d'environ 1 300 m. Elle est indiquée par un cercle dans la Fig. 5.

Si l'altitude du vol de propagation est différente de la hauteur réelle de l'antenne, on observe un fléchissement de la courbe lorsque l'aéronef se rapproche de l'antenne. Lorsque le vol est effectué à une altitude trop basse et que l'antenne d'émission mesurée est inclinée vers le bas, on peut observer une augmentation temporaire de la courbe avant le fléchissement. Cet effet est illustré à la Fig. 6.

FIGURE 6  
Effet d'une altitude incorrecte pendant le vol de propagation

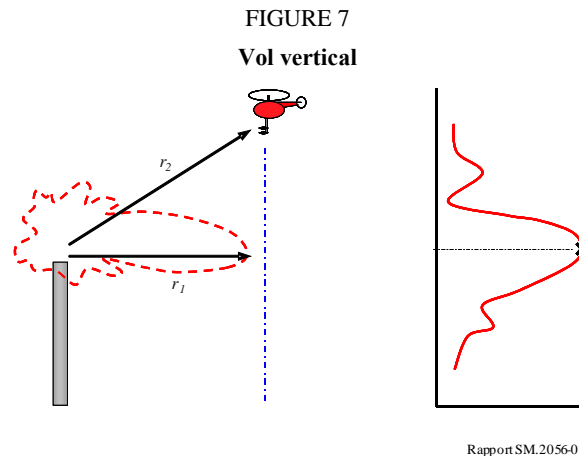


Rapport SM.2056-06

Avant le vol de propagation, le pilote peut voir sur son écran la position réelle de l'aéronef par rapport à l'antenne d'émission, ainsi que la position de départ du vol souhaitée. Cette position peut être décrite au moyen de l'angle d'azimut souhaité par rapport à l'antenne d'émission et de l'altitude souhaitée. Pendant le vol de propagation, le pilote peut voir sur son écran le décalage en mètres par rapport à la trajectoire de vol souhaitée. Un vol de propagation est plus facile à effectuer avec un aéronef qui maintient un bon contrôle et une bonne manœuvrabilité à faible vitesse. Par exemple, un hélicoptère peut voler en ligne droite jusqu'à 200 m du pylône, s'arrêter puis s'en aller, ce qui n'est pas le cas de tous les autres aéronefs. Il faut conserver en permanence une distance minimale par rapport à l'antenne d'émission, afin d'éviter une exposition excessive aux champs électromagnétiques. Si l'antenne d'émission est installée directement au sol, comme c'est le cas de la plupart des antennes en grandes ondes, en ondes moyennes et en ondes courtes, un vol de propagation est impossible.

## 4.2 Vol vertical

Pour obtenir le diagramme d'antenne vertical d'une antenne de radiodiffusion dans une direction d'azimut donnée, un vol vertical peut être effectué. Il peut être nécessaire de mesurer le diagramme d'antenne vertical pour déterminer l'altitude optimale de vol pour la mesure du diagramme d'antenne horizontal, comme indiqué dans la Fig. 7.



Pour effectuer un vol vertical, le pilote commence par se placer dans la direction d'azimut souhaitée, puis il descend à l'altitude de départ souhaitée. Il peut voir sur son écran la position réelle de l'aéronef par rapport à l'antenne d'émission, ainsi que la position de départ du vol souhaitée. Il démarre alors son ascension en ligne droite verticale, en s'efforçant autant que possible de conserver sa position dans le plan horizontal. Dans le cas d'un hélicoptère, la stabilité maximale est obtenue lorsque le vol est effectué d'une altitude basse à une altitude plus élevée à toute vitesse.

Pendant le vol vertical, le pilote peut voir sur son écran le décalage en mètres par rapport à la trajectoire de vol souhaitée, l'aéronef étant par exemple représenté par un point sur un écran circulaire. Le centre du cercle représente la position souhaitée dans le plan horizontal, le cercle proprement dit représentant le décalage maximal autorisé dans le plan horizontal. Le pilote doit maintenir le point à l'intérieur du cercle au cours de son ascension. L'écran circulaire peut être connecté à une boussole afin que son orientation soit alignée sur celle de l'aéronef. Le pilotage est ainsi facilité, étant donné que le vent a une incidence sur la direction de pointage du nez de l'aéronef.

Lorsqu'on ne dispose d'aucun aéronef pour les vols verticaux, le diagramme vertical ne peut pas être obtenu de cette manière. Il doit alors être estimé par interpolation des points de mesure de vols horizontaux successifs.

Pendant le vol vertical, deux facteurs de correction doivent être appliqués, afin de tenir compte, d'une part, de la différence de gain dans le diagramme d'antenne vertical de l'antenne de mesure et, d'autre part, de la différence de distance ( $r_1$  et  $r_2$  dans la Fig. 4).

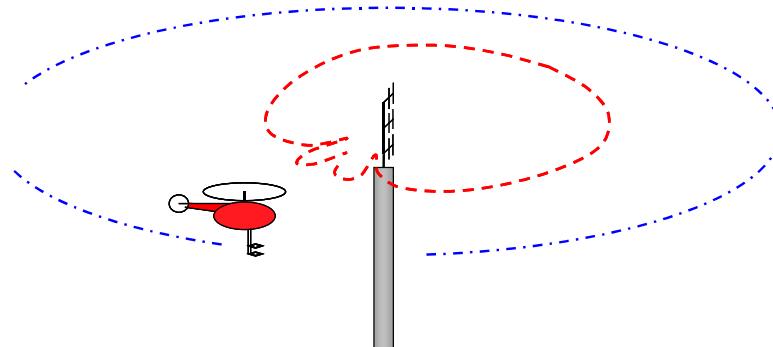
### 4.3 Vol circulaire

Pour obtenir le diagramme d'antenne horizontal d'une antenne de radiodiffusion, le pilote commence par parcourir un cercle autour de l'antenne d'émission tout en corrigeant son altitude et sa distance par rapport à l'antenne d'émission jusqu'à obtenir les valeurs cibles. La mesure peut alors démarrer et le pilote continue à parcourir un cercle autour du pylône, jusqu'à ce que les mesures soient terminées. Pendant ce processus, la tâche du pilote est facilitée par les informations affichées sur son écran, qui indiquent la position réelle de l'aéronef par rapport à la trajectoire idéale autour de l'antenne d'émission en temps réel. Pendant le vol circulaire, le pilote peut voir sur son écran le décalage en mètres par rapport à la trajectoire de vol souhaitée (distance et altitude). En général, le pilote doit parcourir un arc de cercle avant de s'engager sur la trajectoire de vol requise, de sorte qu'il est inutile de définir un azimut de départ prédéterminé. Le plus souvent, le pilote souhaite voir l'objet autour duquel il vole, de sorte que le sens de parcours du cercle – sens horaire ou sens antihoraire – dépend de la configuration du cockpit de l'aéronef. Les logiciels et le système d'antenne doivent être adaptés en conséquence. La meilleure stabilité est obtenue lorsque l'aéronef vole à vitesse constante et pas trop lente. À mesure que l'aéronef tourne autour de l'antenne, la direction relative du vent change en fonction de l'angle d'azimut, de sorte que la partie de l'aéronef pointant vers l'antenne varie au cours



du vol. Il est donc nécessaire dans la plupart des cas de modifier l'orientation de l'antenne au cours du vol.

FIGURE 8  
Vol circulaire



Rapport SM2056-08

#### 4.4 Autres types de vol

Les mesures de diagrammes de rayonnement d'antennes installées au sol, telles que les réseaux d'antennes rideaux en ondes décamétriques et les antennes ou réseaux d'antennes en ondes moyennes, nécessitent une approche différente de celle adoptée pour les émetteurs de télévision ou de radiodiffusion FM installés sur un pylône. Par exemple, des vols circulaires à des altitudes autres que la hauteur du lobe principal permettent d'obtenir les points de mesure nécessaires pour construire une image en trois dimensions du diagramme de rayonnement, des vols en ligne droite à des altitudes basses dans la direction d'azimut du lobe principal permettent de se faire une idée du diagramme de rayonnement vertical.

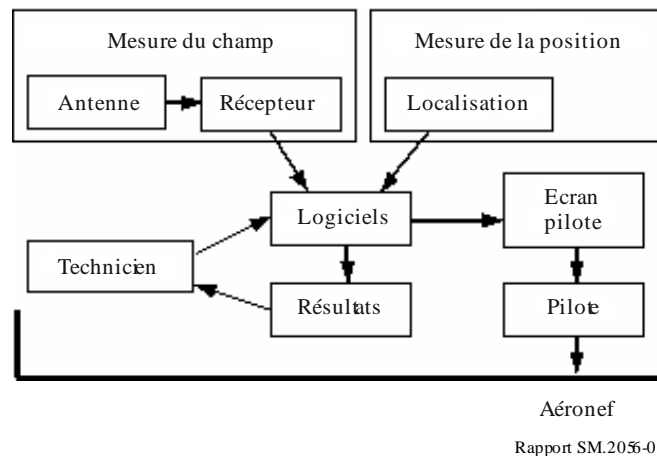
Tant que la position en trois dimensions du point de mesure est connue avec exactitude et que la p.a.r. est calculée en ce point de mesure, il n'y a pas de limites quant à la trajectoire de vol réelle utilisée, sous réserve que l'ingénieur qui interprète les données de mesure ait une connaissance approfondie du sujet.

### 5 Equipements de mesure

Comme indiqué au § 3, la mesure avec exactitude de la position et du champ permet d'obtenir la p.a.r. La position peut être mesurée au moyen de n'importe quel système de localisation qui renseigne avec rapidité et précision sur la position en 3D. Le champ peut être mesuré au moyen d'une antenne étalonnée en espace libre et d'un récepteur de mesure étalonné. Les valeurs de position et de champ sont enregistrées et traitées par un ordinateur. Ce dernier calcule la p.a.r. et la position du point de mesure par rapport à l'antenne mesurée, et affiche les résultats sous une forme appropriée pour le technicien. Celui-ci contrôle le système de mesure et prend des décisions sur la base des résultats affichés à l'écran. En outre, les logiciels génèrent des informations destinées au pilote, pour l'aider à naviguer autour du site de l'antenne. Le pilote est responsable du vol proprement dit et de toutes les questions de sécurité connexes. La Fig. 9 présente un schéma simplifié d'un montage de mesure type, dont les sous-systèmes seront examinés dans les paragraphes qui suivent.

FIGURE 9

Schéma d'un système de mesure de diagrammes d'antenne par aéronef



## 5.1 Système de localisation

Etant donné que la distance utilisée dans les formules est une distance en 3D, la position de la mesure et la position de l'antenne d'émission doivent être connues le long de trois axes (par exemple latitude, longitude et altitude). Il convient de tenir compte de la différence de position en 3D entre l'antenne de mesure et le système de localisation.

Le système de localisation utilisé doit dans tous les cas respecter les critères de précision et de fréquence de mise à jour. La précision dépend de l'application mais elle est généralement de  $\pm 1$  m dans toutes les directions. En ce qui concerne la fréquence de mise à jour requise, on se reportera à la fin du présent paragraphe et au § 5.5 de la présente Annexe. Il est possible d'utiliser des systèmes de localisation hybrides utilisant des balises de référence. La couverture de ces balises peut limiter la souplesse. La précision de la position détermine la précision de la distance calculée par rapport à l'antenne mesurée, qui à son tour détermine la précision de la valeur de p.a.r. calculée et de la position relative. Les mesures à proximité de l'antenne mesurée nécessitent une meilleure précision de la position que les mesures plus éloignées. La distance de mesure optimale dépend de la longueur d'onde, des dimensions de l'antenne mesurée et des conditions environnementales à l'origine de réflexions. La précision de la position requise est de l'ordre de 2 m.

La fréquence de mise à jour du système de localisation doit être suffisamment élevée pour générer suffisamment de points de mesure sur la courbe. Elle est fonction de la vitesse angulaire au sol de l'aéronef. Par ailleurs, l'écran pilote devrait être mis à jour pratiquement en temps réel. Une fréquence de mise à jour de 2 Hz est un minimum absolu, une fréquence de 10 Hz ou plus serait souhaitable.

## 5.2 Antenne de mesure

### 5.2.1 Gain

Pour mesurer le champ absolu, l'antenne doit être étalonnée en espace libre. Le gain doit être exprimé par rapport à l'antenne de référence appropriée. La précision de l'étalonnage de l'antenne est l'un des principaux facteurs ayant une incidence sur la précision globale de la mesure. Une précision de l'étalonnage de 0,5 à 1 dB est possible et souhaitable.

La valeur réelle du gain de l'antenne n'est pas critique tant qu'elle est connue avec exactitude. Toutefois, si le gain d'antenne est inférieur à  $-20$  dBi, les rayonnements non désirés reçus dans le câble d'antenne seront dominants. Et une directivité supérieure à environ 6 dBi se traduira par une précision moins bonne en raison d'erreurs d'alignement.

### 5.2.2 Diagramme de l'antenne de mesure

L'antenne de mesure ne présente sa valeur de gain étalonnée que lorsque son axe de visée est orienté en direction de l'antenne mesurée. Il est relativement difficile d'orienter précisément l'antenne de mesure pendant le vol, il est donc préférable d'utiliser une antenne de mesure qui présente une variation de gain la plus faible possible autour du lobe principal. Ainsi, l'orientation devient moins critique, ce qui permet d'améliorer la précision de la mesure.

Lorsqu'un vol est effectué à une altitude différente de la hauteur de l'antenne mesurée, par exemple au cours d'un vol vertical, le gain de l'antenne de mesure varie en fonction de l'angle d'arrivée de l'onde. Lorsque le diagramme vertical de l'antenne de mesure est connu, une correction peut être appliquée dans le logiciel de mesure. Pour cela, l'antenne de mesure doit avoir un diagramme régulier.

Il n'est pas nécessaire de concevoir une antenne de mesure qui a un rapport avant/arrière élevé. L'antenne mesurée est relativement proche de l'antenne de mesure et les autres émetteurs de radiodiffusion émettant à la même fréquence sont relativement loin. Etant donné que l'intensité du signal est inversement proportionnelle à la distance, le signal voulu a une intensité supérieure de plusieurs ordres de grandeur à celle des signaux reçus en provenance des autres émetteurs de radiodiffusion installés sur d'autres pylônes de radiodiffusion. Il n'est généralement pas nécessaire de réduire davantage ces signaux en utilisant la directivité de l'antenne de mesure.

### 5.2.3 Orientation de l'antenne de mesure

Dans la plupart des cas, l'antenne de mesure est directive, de sorte que, pendant le vol, elle doit être maintenue aussi proche que possible de l'axe de visée de l'antenne mesurée. Ce maintien peut être assuré à l'aide d'un rotateur mécanique ou électromécanique commandé par le technicien. Une certaine indication de la position réelle de l'antenne est nécessaire dans tous les cas, pour orienter approximativement l'antenne en direction de l'antenne mesurée. Pour une orientation plus précise, un dispositif de visée est nécessaire. Une petite caméra installée sur l'antenne ou à proximité et orientée dans la même direction est une bonne solution qui est efficace par rapport à son coût. Il est nécessaire de filtrer la lumière du soleil pour éviter toute surcharge de la puce de la caméra.

Si on ne prévoit pas de moyens permettant d'orienter l'antenne de mesure en direction de l'antenne mesurée, les résultats obtenus seront incorrects. Il est généralement impossible de stabiliser l'aéronef à un angle fixe par rapport à la direction de l'antenne mesurée, le vent ayant pour effet de dévier la trajectoire du vol. L'orientation dans le plan vertical est généralement impossible.

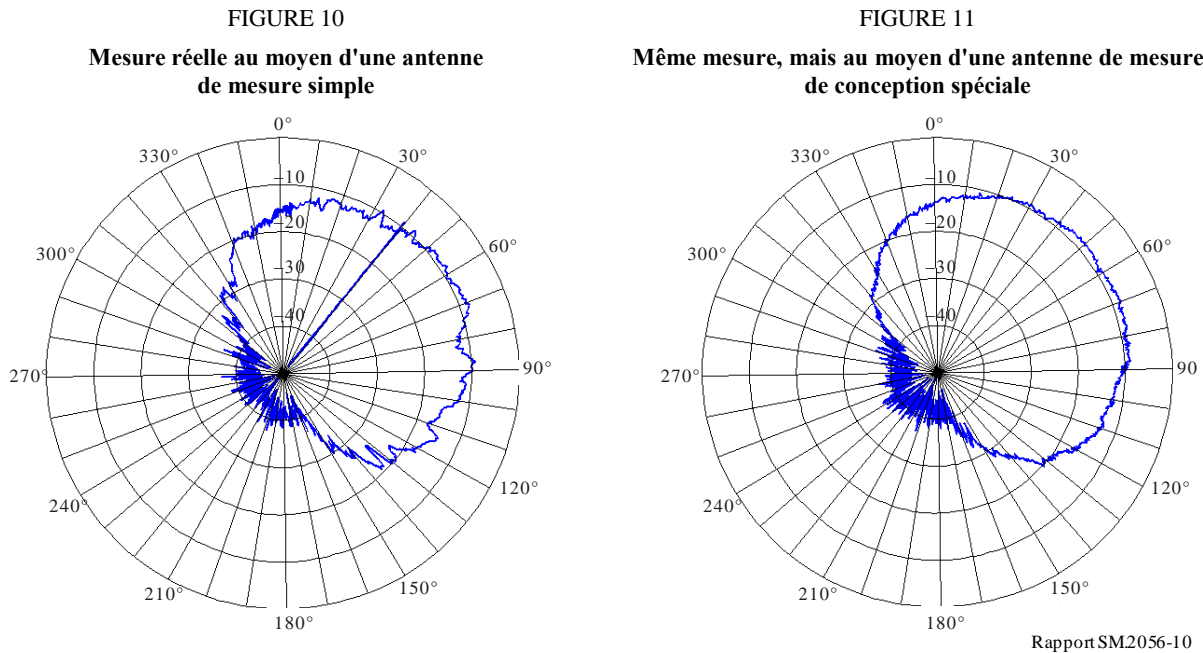
Il convient de tenir compte de la mauvaise orientation et de l'erreur de mesure résultante dans l'analyse de l'incertitude de la mesure.

### 5.2.4 Suppression des réflexions au sol

Pour obtenir une représentation précise du diagramme d'antenne, il convient de mesurer uniquement les ondes directes entre l'antenne d'émission et l'antenne de mesure. Toutefois, tout objet visible par les deux antennes peut être à l'origine d'une réflexion des ondes émises. Il faut bien avoir conscience que si aucune mesure n'est prise, ce sont à la fois les ondes directes et les ondes réfléchies qui sont mesurées, et qu'il en résultera une certaine «modulation» non désirée sur le diagramme d'antenne mesuré et présenté.

Ce problème est étroitement lié à la directivité de l'antenne d'émission et de l'antenne de réception dans le plan vertical, ainsi qu'à la hauteur de l'antenne d'émission par rapport à la distance de mesure. Ainsi, les difficultés en la matière seront beaucoup plus grandes pour des antennes FM en ondes métriques à faible gain sur des sites à faible hauteur que pour des sites de télévision en ondes décimétriques en hauteur dotés d'antennes de gain élevé. Il faut aussi tenir compte de la réflexion du signal reçu contre certaines parties de l'aéronef. Les réflexions au sol, qui constituent l'un des éléments qui contribuent le plus à l'incertitude de mesure totale, doivent également être prises en considération.

Une antenne de mesure bien conçue permet au système de mesure d'être moins vulnérable aux perturbations liées aux réflexions au sol. On peut par exemple concevoir une antenne qui supprime les signaux reçus dans les directions dans lesquelles des réflexions sont attendues et qui privilégie l'onde directe. Un exemple pratique est illustré dans les Fig. 10 et 11:



Dans cet exemple, une antenne de radiodiffusion FM en ondes métriques a été mesurée deux fois, une première fois au moyen d'une antenne de mesure simple et une deuxième fois au moyen d'une antenne conçue spécialement pour les mesures de diagrammes d'antenne par avion. Dans la première mesure, les réflexions se traduisent par des «modulations». L'avantage offert par la deuxième antenne de mesure est évident.

Un autre moyen d'atténuer les réflexions pourrait consister à déployer plusieurs antennes de mesure suivies de plusieurs récepteurs et à utiliser un logiciel de traitement numérique du signal. Ce logiciel peut utiliser un algorithme, par exemple MUSIC, pour extraire le seul signal direct de la somme du signal réfléchi et du signal direct. Quelle que soit la méthode employée pour éliminer les réflexions, il faut veiller à ce que le niveau du signal reproduit constitue toujours une représentation précise du niveau du signal de l'onde directe.

On peut recourir à des simulations pour estimer l'incidence des réflexions au sol dans des cas particuliers. Il convient d'inclure dans le modèle l'altitude de mesure, la distance de mesure, la hauteur de l'antenne mesurée, le diagramme d'antenne vertical attendu, le diagramme vertical connu de l'antenne de réception et un modèle réaliste du sol avec les paramètres réels du sol. Ces simulations permettent de se faire une bonne idée des difficultés particulières susceptibles d'être rencontrées dans une situation de mesure donnée. Toutefois, elles ne peuvent jamais remplacer des mesures réelles.

### 5.2.5 Polarisation

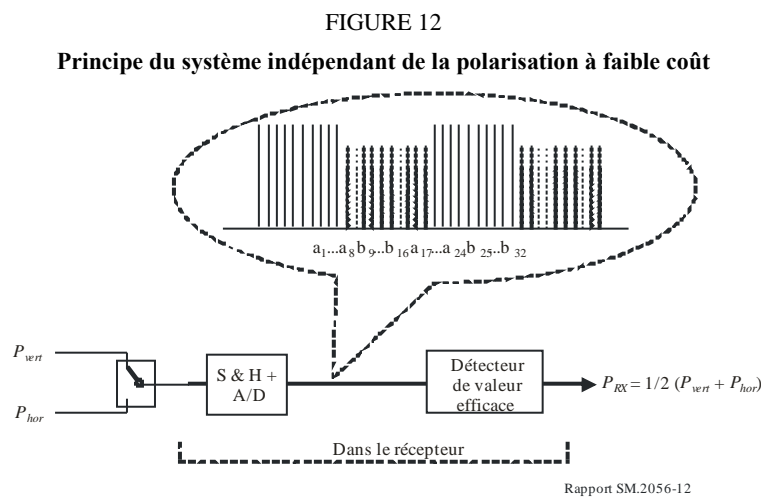
La polarisation de l'antenne de mesure doit être adaptée à la polarisation de l'antenne mesurée. En ondes métriques et en ondes décimétriques, les antennes à polarisation non linéaire sont devenues courantes. Pour ces antennes, la polarisation réelle varie en fonction de la position par rapport à l'antenne. Il est donc utile de réaliser des mesures indépendantes de la polarisation. Pour cela, il existe deux possibilités:

- Utilisation de deux antennes de mesure avec des polarisations orthogonales et de deux récepteurs de mesure. Les deux récepteurs sont synchronisés. La somme des valeurs de la

puissance mesurées par chaque récepteur donnera la puissance totale reçue indépendamment de la polarisation du signal émis. Avec ce montage, il est possible de présenter des diagrammes distincts pour les plans de polarisation horizontal et vertical, ainsi qu'un diagramme d'antenne combiné indépendant de la polarisation.

- Utilisation d'un seul récepteur avec les deux mêmes antennes de mesure. Le récepteur est commuté entre les deux antennes et le détecteur de valeur efficace du récepteur fait la somme de la puissance reçue sur les deux trajets. Il s'agit d'une méthode à faible coût.

Pour cette deuxième méthode, chaque plan de polarisation est mesuré pendant 50% de la durée de la mesure, et le résultat final est exactement inférieur de 3 dB à la valeur réelle (voir la Fig. 12). Il convient de choisir la période de commutation et la durée de la mesure sur la base des propriétés de la modulation du signal mesuré et de la largeur de bande du récepteur. Si elle est conçue correctement, cette méthode peut être aussi précise que la première.



Lorsque pour une période de commutation donnée du commutateur d'antenne:

$$P_{VERT} = \frac{\sqrt{\sum_0^T a_k^2}}{z_0} \quad \text{et} \quad P_{HOR} = \frac{\sqrt{\sum_0^T b_k^2}}{z_0} ,$$

alors:

$$P_{RX} = \frac{\sqrt{\sum_0^{T/2} a_k^2 + \sum_{T/2}^T b_k^2}}{z_0} \approx \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\sum_0^T a_k^2}}{z_0} + \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\sum_0^T b_k^2}}{z_0} \approx \frac{1}{2} (P_{VERT} + P_{HOR})$$

où (en valeurs linéaires):

- $z_0$ : impédance du système
- $P_{VERT}$ : puissance d'entrée efficace provenant de l'antenne à polarisation verticale
- $P_{HOR}$ : puissance d'entrée efficace provenant de l'antenne à polarisation horizontale
- $P_{RX}$ : puissance mesurée par le récepteur, à l'aide d'un détecteur de valeur efficace
- $a_n$ : amplitude de la tension d'un échantillon de mesure provenant de l'antenne verticale

$b_n$ : amplitude de la tension d'un échantillon de mesure provenant de l'antenne horizontale

$T$ : période du commutateur d'antenne.

### 5.2.6 Dimensions

La prise au vent de l'antenne est proportionnelle à la surface équivalente de l'antenne et à la vitesse de l'aéronef pendant la mesure. Par conséquent, les dimensions et le poids autorisés pour l'antenne de mesure dépendent largement du type d'aéronef utilisé et de la solution retenue pour l'installation de l'antenne sur l'aéronef. Par exemple, dans le cas d'une antenne au bout d'une corde attachée à l'arrière d'un avion, la corde doit avoir une faible prise au vent pour éviter de faire caler l'avion. Et dans le cas d'une antenne installée sur un mât déployé sous un hélicoptère, l'antenne ne doit pas gêner le rotor de queue lorsque le mât est replié. Le poids maximal admissible dépend aussi de la manière dont l'antenne est installée. Sur un mât télescopique par exemple, une antenne trop lourde peut empêcher au mât d'être déployé correctement.

### 5.2.7 Sécurité

Etant donné que l'antenne est installée à l'extérieur de l'aéronef, il est nécessaire de disposer d'un certificat de sécurité délivré par l'autorité de réglementation de l'aviation. Lorsque cette autorité évalue la sécurité, l'antenne et son installation sont considérées comme un tout. Dans un grand nombre de cas, la conception électrique optimale et la conception mécanique optimale de l'antenne sont incompatibles. Il est donc recommandé de consulter des spécialistes de la conception des aéronefs lors de la mise au point de l'antenne.

## 5.3 Récepteur

Le récepteur utilisé dans ce type d'environnement peut être un récepteur de mesure normal; il est toutefois recommandé d'utiliser un récepteur qui soit léger et résistant aux chocs et aux vibrations. Certains récepteurs modernes utilisent des disques durs mécaniques pour stocker les données. Lorsque ce type de récepteur est utilisé, il est préférable de remplacer ces disques durs par des disques durs SSD.

### 5.3.1 Plage dynamique

La plage dynamique du récepteur devrait être suffisamment grande. Il convient d'abord de veiller à ce que l'étage d'entrée du récepteur ne soit pas surchargé par la totalité des signaux (pas uniquement le signal voulu) présents dans sa bande passante. La puissance totale de ces signaux détermine l'affaiblissement qui est nécessaire à l'entrée du récepteur. Etant donné que la puissance est d'autant plus élevée que la distance est faible, l'atténuateur doit être réglé en fonction de la distance minimale prévue. Il convient de ne pas utiliser d'atténuateurs automatiques, car l'hystérésis peut causer un blocage du récepteur.

Dans le cadre du réglage de l'atténuateur, il convient de veiller à ce que la plage dynamique reste suffisamment grande pour pouvoir mesurer avec précision le diagramme d'antenne voulu. Dans le cas d'un diagramme d'antenne horizontal, la variation de p.a.r. peut facilement dépasser 30 dB. Si la distance varie, cette variation augmente en conséquence. Pour mesurer avec précision le niveau du signal le plus faible, le bruit de fond du récepteur devrait être inférieur de 10 à 20 dB à ce niveau.

### 5.3.2 Sélectivité

La sélectivité du récepteur devrait être telle que la puissance du signal mesuré est complètement transférée au détecteur, tandis que dans le même temps une réjection suffisante des signaux des canaux adjacents est opérée. Si le filtre choisi est trop petit, la modulation de l'émetteur de radiodiffusion voulu entraînera des variations du signal et une dégradation de la précision de la

mesure. Si le filtre est trop large, l'éventuelle puissance provenant des canaux adjacents est ajoutée à la puissance du canal voulu.

La réjection des signaux provenant des émetteurs dans les canaux adjacents installés sur le même pylône deviendra difficile dans les cas où l'antenne de radiodiffusion utilise moins de p.a.r. que les canaux adjacents et où les deux antennes sont très directives. Dans ce cas, il est essentiel de bien planifier les vols et de bien régler l'atténuateur. La plage dynamique et la qualité des filtres du récepteur sont déterminantes pour l'obtention de bons résultats.

Le récepteur devrait être équipé d'un détecteur correspondant à la modulation de la station de radiodiffusion, de manière à mesurer correctement la densité de puissance du signal. Le type préféré de détecteur et les réglages du récepteur à utiliser sont décrits dans l'Annexe 2. Si on ne dispose que d'un détecteur d'échantillon, celui-ci peut être émulé dans le logiciel de mesure sous réserve d'une rapidité suffisante à la fois de la mesure réalisée par le récepteur et de l'ordinateur utilisé pour les mesures.

#### **5.4 Logiciels et matériel informatique**

Pour commander les équipements, la solution la plus pratique consiste à utiliser un petit système de télécommande, par exemple un ordinateur portable ou une tablette. Ce système est raccordé au reste des équipements par un seul faisceau de câbles. Ainsi, le montage n'est pas optimisé pour un seul opérateur, mais tous les opérateurs peuvent trouver la position qui leur convient le mieux dans l'aéronef. Compte tenu de l'espace restreint qui est disponible dans la plupart des aéronefs, le système doit être petit. S'il est possible d'utiliser l'ordinateur intégré du récepteur de mesure, il en résulte un gain de poids et de câbles d'interface ainsi qu'une limitation des perturbations électromagnétiques émanant du matériel informatique.

Une souris ou une boule de commande est très peu pratique dans un aéronef, de sorte que toutes les fonctions logicielles devraient être accessibles depuis le clavier, par exemple au moyen de raccourcis et de touches de fonction. Il convient de choisir avec soin les couleurs de l'interface utilisateur, et d'optimiser les couleurs de l'écran de manière à ce que les informations soient lisibles aussi bien à la lumière du soleil que dans l'obscurité. Pour éviter tout risque de confusion, il convient de ne pas afficher plusieurs courbes sur un même écran. Il convient d'afficher uniquement les données brutes; avec des données traitées ou lissées, il est difficile d'estimer la qualité de la mesure.

Les logiciels devraient contenir toutes les informations nécessaires pour calculer la p.a.r. pendant le vol et afficher la position relative de l'aéronef (position du pylône, hauteur de l'antenne, diagramme d'antenne et p.a.r. prévus, fréquence, etc.). Les trajectoires de vol définies au préalable et les altitudes et distances optimales devraient être stockées en tant que pré-réglages. D'autres informations susceptibles de faciliter la tâche du technicien pourraient aussi être stockées, comme la fréquence, la puissance et la hauteur d'antenne des autres émetteurs installés sur le même pylône. La situation réelle étant toujours légèrement différente de la situation prévue, il devrait être facile de modifier les paramètres pendant le vol.

Les logiciels devraient inclure un contrôle automatique de l'intégrité, qui vérifie l'ensemble du montage et procède à un étalonnage rapide des équipements. Ce contrôle de l'intégrité peut être démarré manuellement et il est également effectué automatiquement avant chaque mesure.

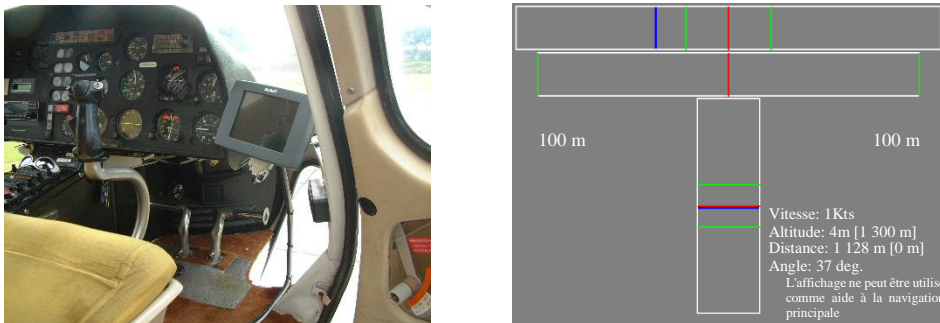
#### **5.5 Ecran pilote**

L'écran pilote est un petit écran installé face au pilote. Avant le début d'une mesure, il guide le pilote vers la position à laquelle il convient de commencer la mesure. Pendant la mesure, il donne des informations en temps réel sur la déviation par rapport à la trajectoire de vol prévue. Pour d'autres types de mesures, on peut utiliser d'autres configurations de l'affichage.

Les écrans utilisés dans l'industrie automobile sont petits et robustes et les câbles d'interface peuvent être plus longs que les câbles standard d'interface informatique (VGA par exemple).

FIGURE 13

#### Ecran pilote et configuration de l'affichage



Rapport SM.2056-13

Dans l'exemple de configuration de l'affichage représenté dans la Fig. 13, le trait bleu dans la barre horizontale supérieure représente la position horizontale réelle de l'aéronef, tandis que le trait bleu dans la barre verticale représente la position verticale réelle de l'aéronef. Les traits verts représentent l'écart maximal admissible par rapport à la position idéale représentée par les traits rouges. La barre horizontale inférieure est un grossissement de la partie comprise entre les traits verts dans la barre supérieure. Des expériences ont montré qu'une fréquence de mise à jour de 5 à 10 Hz est nécessaire afin que le pilote dispose de données suffisantes pour que le vol se déroule normalement.

### 5.6 Techniciens

Les mesures devraient être effectuées par deux techniciens et un pilote. L'un des techniciens effectue la mesure et l'autre s'occupe de l'orientation et du déploiement de l'antenne ainsi que de questions générales comme les communications avec le sol. Les techniciens devraient pouvoir analyser les données pendant les mesures et adapter le programme de mesures à la situation réelle. Ils doivent donc posséder une connaissance approfondie des antennes et des mesures associées. Une connaissance précise des systèmes de radiodiffusion à mesurer est également nécessaire. Comme ce type de mesure est onéreux et stressant, les techniciens devraient être aptes à travailler efficacement en équipe afin de prendre les décisions nécessaires à temps.

### 5.7 Pilote

Le pilote devrait voler en respectant les limites prédéfinies pour la trajectoire de vol, mais suivre avec précision la trajectoire de vol n'est pas le facteur le plus important. Il est tout aussi important d'assurer un vol stable. Le pilote devrait posséder une connaissance suffisante des mesures à effectuer pour pouvoir recommander d'autres trajectoires de vol au cas où celles choisies poseraient des difficultés d'ordre pratique ou des problèmes de sécurité.

### 5.8 Aéronef

Le choix d'un aéronef donné dépend de nombreux facteurs et débouche aussi sur des possibilités et des contraintes spécifiques concernant le système de mesure et les vols effectués pour réaliser les mesures. Il est donc recommandé de concevoir le système de mesure en fonction de l'aéronef qui sera utilisé. On trouvera dans l'Annexe 3 plus d'informations sur ces différences d'un aéronef à l'autre.



## 6 Procédures de mesure

La présente section décrit les étapes successives à suivre afin que les mesures de diagramme d'antenne par aéronef donnent des résultats de grande qualité:

### 6.1 Etude du site

Avant de pouvoir effectuer et même planifier un vol pour réaliser des mesures, de nombreuses informations doivent être collectées concernant le site de radiodiffusion cible:

- La position en 3D du centre de phase de l'antenne de radiodiffusion doit être connue avec précision. Toute orientation est effectuée par rapport à cette position et la distance utilisée dans le calcul de la p.a.r. est également prise par rapport à cette position. La position dans le plan horizontal et la hauteur doivent être déterminées au moyen du système de localisation de l'aéronef, afin de minimaliser les différences d'étalonnage. Il faut mesurer le centre de phase de l'antenne et non pas la position du pylône sur lequel l'antenne est installée. Il ne faut pas se fier aux valeurs théoriques de la hauteur et de la position de l'antenne; ces valeurs doivent être vérifiées par la mesure.
- Les limites du diagramme d'antenne (exprimées en termes de p.a.r.) figurant dans la licence délivrée au radiodiffuseur doivent être connues à l'avance. Elles peuvent être saisies dans le logiciel de mesure afin de faciliter la tâche du technicien.
- Le type d'antenne de radiodiffusion, son orientation et ses dimensions sont nécessaires pour pouvoir estimer l'incidence des réflexions au sol et planifier les vols à effectuer pour réaliser les mesures.
- Le type et la morphologie du sol doivent être connus afin de tenir compte des obstacles et des éventuels problèmes de réflexion.
- La puissance RF et les diagrammes d'antenne des autres émetteurs sur le même site doivent être connus pour pouvoir estimer la dégradation de la mesure du diagramme d'antenne due aux signaux des canaux adjacents et calculer le réglage optimal de l'atténuateur du récepteur. Il faut aussi calculer la distance minimale par rapport au pylône, pour éviter toute surexposition des personnes et de l'aéronef aux champs électromagnétiques.
- La largeur de bande occupée et la forme du spectre de l'émetteur voulu doivent être vérifiées afin de faire en sorte que les filtres du récepteur soient réglés correctement. La largeur de bande occupée des émetteurs dans les canaux adjacents doit être vérifiée afin de garantir une protection suffisante.

Etant donné que la plupart de ces informations collectées concernent le site de radiodiffusion, cette phase de collecte des données est appelée *étude du site*.

### 6.2 Planification des mesures

Une campagne de mesure par aéronef doit être planifiée avec soin pour obtenir les meilleurs résultats possible. Souvent, plusieurs sites de radiodiffusion doivent être mesurés successivement et, dans de nombreux cas, plusieurs diagrammes d'antenne sont à mesurer au même endroit. Une planification minutieuse est nécessaire pour réaliser efficacement les différentes mesures.

La planification des mesures consiste notamment à calculer la durée de vol jusqu'aux sites de radiodiffusion et entre ces sites, ainsi que la durée nécessaire pour effectuer tous les vols souhaités. Les types de vol nécessaires et les altitudes de vol, distances et trajectoires optimales peuvent être déterminés à l'aide des informations collectées pendant l'étude du site. Il est généralement, mais pas toujours, possible de mesurer plusieurs diagrammes lorsque plusieurs émetteurs utilisent la même antenne. Les moments et lieux de ravitaillement ainsi que d'autres éléments liés au vol doivent être discutés avec le pilote, qui est chargé d'assurer la sécurité du vol.

### 6.3 Tests avant le vol

Etant donné que pour la réalisation des mesures, la durée de vol est la composante la plus onéreuse, tous les équipements doivent être testés minutieusement après leur installation dans l'aéronef et avant le décollage, afin d'éviter toute surprise en cours de vol.

### 6.4 Vols effectués pour réaliser les mesures

Le type de vol effectué dépend entièrement de la situation de l'antenne et de l'aéronef utilisé. Une approche différente est par exemple nécessaire pour la mesure du diagramme d'une antenne de radiodiffusion en ondes métriques avec un hélicoptère et pour la mesure du diagramme d'une antenne réseau en ondes moyennes avec un avion. Les différents types de vols et leur application sont décrits aux § 6 et 7. Pendant les mesures, le signal provenant de l'antenne mesurée doit être surveillé au sol, pour s'assurer que le signal émis reste suffisamment stable.

### 6.5 Evaluation des équipements après le vol

Directement après le vol, les tests réalisés avant le vol doivent être répétés pour s'assurer que tous les équipements continuent de fonctionner comme prévu. Toute anomalie doit être journalisée pour faciliter le post-traitement.

### 6.6 Traitement et analyse des données

Pendant le vol, toutes les données de mesure brutes sont enregistrées. La combinaison de ces données avec des valeurs connues comme le gain de l'antenne de mesure, la position de l'antenne d'émission et d'autres facteurs de correction permet de produire les diagrammes d'antenne souhaités en temps réel, et le technicien peut ainsi se faire une bonne idée de la mesure pendant le vol. Une analyse plus détaillée ne peut être faite qu'au sol, lorsqu'on dispose de plus de temps. Les informations statistiques obtenues à partir des données de mesure et des informations d'étalonnage des équipements sont utilisées pour estimer la précision de la mesure. Et les trajectoires de vol qui sont répétées et celles qui se coupent peuvent être utilisées pour corréler les données de mesure. Ces éléments sont décrits au § 7.

### 6.7 Présentation des rapports

Pour la présentation des rapports, il est recommandé d'utiliser un format normalisé, avec des parties standard, des graphes normalisés et certaines échelles, permettant ainsi d'interpréter rapidement les résultats et de comparer beaucoup plus facilement des mesures différentes. Ces éléments sont traités au § 9. Il est essentiel de faire figurer dans le rapport une analyse de l'incertitude de mesure, sans laquelle le rapport de mesure n'aurait que peu d'utilité. Un exemple d'un tel calcul est présenté au § 8.

## 7 Traitement des données de mesure

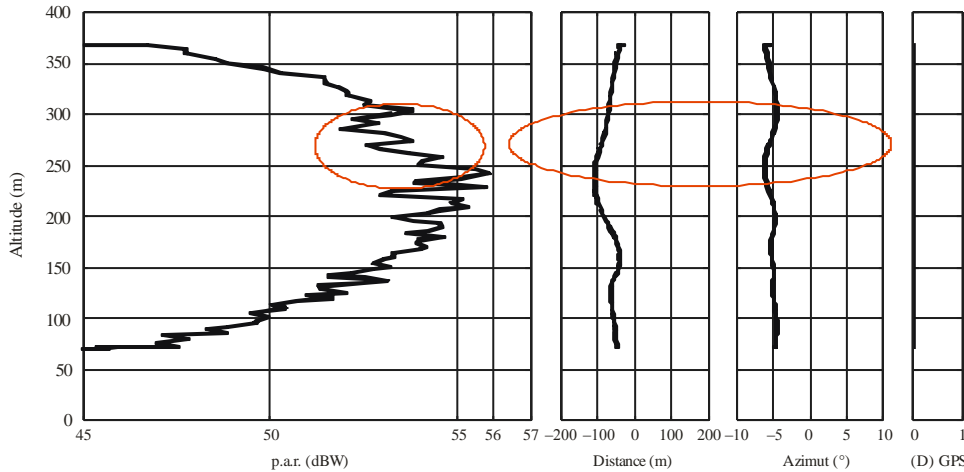
### 7.1 Examen des données

Après avoir terminé les mesures, il faut analyser les données afin de déterminer si les critères de précision sont respectés. Pour ce faire, on représente graphiquement toutes les données de mesure collectées. Des informations supplémentaires telles que les erreurs d'altitude et de trajectoire devraient être représentées sur le même graphique que les résultats de mesure afin de pouvoir par exemple établir une corrélation entre les erreurs de vol et des anomalies présentes dans les résultats de mesure. Un exemple est illustré dans la Fig. 14, montrant un diagramme d'antenne vertical conjointement avec trois autres courbes. De gauche à droite, sont représentés la p.a.r., le décalage par rapport à la distance cible, le décalage par rapport à l'azimut cible et l'erreur du système de

localisation. La partie repérée sur le diagramme n'est peut-être pas utilisable en raison à la fois d'une erreur en distance et d'une erreur en azimut. Cette première analyse permet d'exclure certaines parties des diagrammes ou de décider de mesurer à nouveau ces parties. Il convient de procéder de la même façon pour les vols circulaires et les vols horizontaux.

FIGURE 14

Diagramme vertical avec des informations concernant le vol



Vol vertical		LOPIK 2004-05-11 LPs 94.3 MHz Radio 4				
Altitude		Distance	Azimut	Date	Heure	Fichier des données de mesure
De	A					
70 m	367 m	950 m	314°	12 mai 2004	10:15 uur	LOPIK 2004-05-11 LPs.M01

Rapport SM.2056-14

### 7.2 Corrélation de différents vols

Lorsque différents vols sont effectués concernant un émetteur donné, il est souvent possible de corréler les mesures réalisées. C'est le cas lorsque le même type de vol est répété, mais aussi lorsque des trajectoires de vol différentes se coupent. En prenant un nombre suffisant de points de chaque vol autour de cette intersection, on peut calculer la valeur moyenne et l'écart type et les utiliser pour évaluer la corrélation et estimer la précision obtenue.

### 7.3 Traitement des données

La précision de mesure requise nécessite de prévoir un nombre de points de mesure supérieur au nombre de données à présenter. Il est donc possible d'utiliser une réduction des données, qui a pour effet d'augmenter la précision finale par donnée présentée, et le diagramme présenté devient plus lisse et est plus facilement comparable aux autres diagrammes ou aux courbes de référence.

Par exemple, si un point de mesure par degré d'azimut est nécessaire pour un diagramme de rayonnement horizontal et que 20 mesures par degré sont réalisées, la moyenne sur un intervalle d'un degré donnera une valeur présentée qui sera plus proche de la valeur réelle.

La solution la plus couramment retenue consiste à faire une moyenne sur une fenêtre pour un intervalle donné. La forme et la longueur de la fenêtre devraient être adaptées à l'intervalle sur lequel des modifications importantes de la valeur sont attendues. La méthode préférée consiste à faire une moyenne sur une fenêtre glissante pour l'intervalle considéré. Outre la valeur moyenne, on peut aussi calculer l'écart type sur la fenêtre. La taille et la forme de la fenêtre ont une incidence importante sur les résultats finals et devraient être choisis avec soin. C'est aussi la raison pour laquelle il convient de faire figurer dans le rapport de mesure final le degré et le type de lissage.

## 8 Calcul de l'incertitude de mesure

Chaque diagramme d'antenne mesuré devrait être accompagné d'un calcul de l'incertitude de mesure. Sans ce calcul, on ne peut utiliser la mesure à des fins de vérification.

### 8.1 Incertitude de mesure type

On peut utiliser un calcul généralisé de l'incertitude de mesure pour caractériser la précision de mesure type du système de mesure. Toutes les sources d'incertitude qui sont normalement présentes dans le système de mesure et pendant la mesure sont identifiées et estimées et on calcule ensuite l'incertitude d'ensemble, appelée *incertitude de mesure type du système*. Cette valeur donne une idée générale de la précision du système de mesure pour une situation de mesure moyenne. Une incertitude de mesure type comprise entre 1,5 dB et 2,5 dB pour un intervalle de 95% peut être considérée comme un bon résultat, qui ne peut être obtenu que lorsque toutes les sources d'erreur principales contribuant à l'incertitude sont réduites au minimum et lorsque la mesure est effectuée avec une très grande précision.

### 8.2 Incertitude de mesure réelle

Toutefois, pour chaque mesure, il faut calculer une incertitude de mesure associée, tenant compte des conditions particulières qui existent pendant la mesure réelle. Par exemple, les variations dues aux réflexions et aux erreurs de vol seront différentes en fonction de la mesure et en fonction du site d'émission et de la configuration de l'antenne d'émission. C'est uniquement en tenant compte de ces différences qu'il est possible de présenter une valeur correcte de l'incertitude de mesure pour chaque mesure.

Une bonne façon de faire consiste, à partir du calcul généralisé de la précision de la mesure, à examiner toutes les valeurs de ce calcul et à les corriger en fonction des conditions particulières qui existaient pendant la mesure. L'analyse des données de mesure décrite au § 7 donnera des résultats importants pour ce calcul de l'incertitude. La valeur calculée de cette manière, appelée *incertitude de mesure réelle*, est unique pour chaque mesure. C'est cette valeur qu'il faut faire figurer dans le rapport de mesure, et *non* la valeur type.

### 8.3 Méthodologie

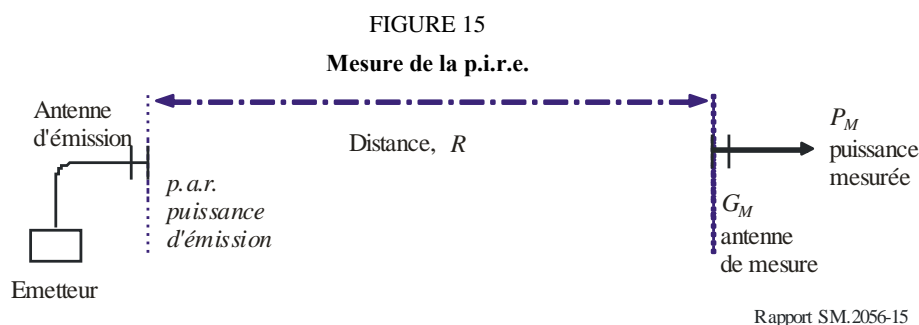
Le calcul de l'incertitude de mesure devrait être effectué et présenté conformément aux normes internationales applicables, par exemple le «Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure» de l'ISO.

Dans le cadre de cette méthode, on présente d'abord chaque mesure, suivie de la formule mathématique utilisée pour calculer le résultat final à partir des différentes variables concernées. On présente ensuite toutes ces variables avec leurs incertitudes, ainsi que les facteurs de pondération de leur influence sur le résultat final. Lorsque les variables d'origine sont exprimées sous forme logarithmique, elles doivent d'abord être converties en valeurs linéaires. A partir de ces informations, l'incertitude du résultat final est calculée et présentée sous forme normalisée. De plus, les principaux contributeurs à l'incertitude d'ensemble sont identifiés.

### 8.4 Exemple de calcul de l'incertitude de mesure

La présente section donne un exemple pratique de calcul de l'incertitude réelle pour un système de mesure de diagramme d'antenne. Cet exemple a pour objet d'illustrer l'influence de différentes sources d'erreur et d'aider le lecteur à réaliser sa propre analyse de l'incertitude de mesure. Les valeurs utilisées dans cet exemple sont arbitraires et pourraient dans la pratique être meilleures ou pires en fonction des efforts déployés pour optimiser la conception.

Dans cet exemple, on considère un système de mesure fictif par hélicoptère utilisé pour mesurer le diagramme d'antenne horizontal d'un émetteur de radiodiffusion FM en ondes métriques, exprimé en termes de p.a.r. On commence par mesurer la p.i.r.e. (EIRP si elle est exprimée en dB, et eirp sinon). La puissance  $p_M$  est mesurée à une distance  $R$  de l'antenne d'émission, à l'aide d'une antenne de mesure de gain  $g_M$  et d'un récepteur de mesure (voir la Fig. 15):



Pour chaque point de mesure, on effectue le calcul suivant à l'aide de la formule (1):

$$eirp = \frac{16\pi^2}{c^2} \cdot \frac{P_M \cdot R^2 \cdot f^2}{g_M}$$

où:

- $P_{EIRP}$ : puissance par rapport à un élément rayonnant isotrope (W)
- $P_{RX}$ : puissance aux bornes d'entrée du récepteur (W)
- $R$ : distance (m) entre l'antenne de réception et l'antenne d'émission
- $g_{RX}$ : gain (valeur linéaire) de l'antenne de réception par rapport à un élément rayonnant isotrope
- $f$ : fréquence (Hz)
- $c$ : vitesse de la lumière (m/s).

La formule ci-dessus donne uniquement la p.i.r.e. mesurée au point considéré de l'espace. Certains facteurs additionnels peuvent avoir pour effet que la p.i.r.e. mesurée est différente de la p.i.r.e. réelle de l'antenne d'émission. Lorsqu'on tient compte de ces facteurs, la formule devient:

$$P_{EIRP} = \frac{16\pi^2}{c^2} \cdot \frac{P_M \cdot R^2 \cdot f^2}{g_M} \cdot a_{REF} \cdot a_H$$

où:

- $a_{REF}$ : réflexions: interférence de l'onde directe et des ondes réfléchies
- $a_H$ : influence d'une altitude de vol incorrecte.

La p.i.r.e. obtenue est convertie en p.a.r. à l'aide de la formule (3). Etant donné que cette formule contient uniquement une constante théorique, la contribution à l'incertitude de mesure combinée est nulle. L'incertitude de mesure de la p.a.r. découle de l'incertitude de mesure des paramètres d'entrée. Pour certains de ces paramètres, plusieurs sources d'erreur sont à l'origine de leur incertitude. Les sources d'erreur entrant en ligne de compte dans cet exemple sont examinées ci-après.

**Constantes** La formule contient les constantes 16,  $\pi$  et la vitesse de la lumière ( $c$ ). Comme elles sont complètement invariables et parfaitement connues, leur contribution à l'incertitude d'ensemble du système est nulle.

*Fréquence* La fréquence  $f$  utilisée dans la formule correspond à la fréquence porteuse, soit 100,1 MHz dans cet exemple. En réalité, les composantes de puissance mesurées ne sont pas toutes à cette fréquence en raison de la modulation de l'émetteur. Dans l'hypothèse où la plus grande partie de la puissance est concentrée dans une bande de 100 kHz autour de la porteuse, l'incertitude relative  $\Delta f$  est d'environ 0,1%. La distribution de l'erreur est supposée être uniforme.

*Distance* L'incertitude concernant la distance est liée à l'incertitude de mesure de la position en 3D de l'antenne d'émission et de l'antenne de mesure sur l'aéronef. Dans cet exemple, un cercle est parcouru à une altitude correspondant à peu près à la hauteur de l'antenne d'émission, inclinée vers le bas de 5°. Par conséquent, les erreurs dans le plan horizontal ont une incidence beaucoup plus importante sur la précision résultante que les erreurs dans le plan vertical, de sorte que des coefficients de sensibilité sont calculés et utilisés. En outre, la position du centre de phase électrique de l'antenne d'émission ainsi que la différence de position dans le plan horizontal et dans le plan vertical entre l'antenne de mesure et le système de localisation à bord de l'aéronef sont des sources d'incertitude. L'incertitude de distance  $R$  est calculée séparément en vue de son utilisation dans les calculs ultérieurs. (Le calcul de l'incertitude de  $R$  figure normalement dans le rapport mais il est omis ici.) L'incertitude résultante est de 6 m, avec une distribution normale et une probabilité de 95%. Dans cet exemple, dans lequel un cercle est parcouru à une distance de 1 100 m, l'incertitude est de 0,56%.

*Gain d'antenne* L'incertitude concernant le gain d'antenne est liée à l'incertitude d'étalonnage de l'antenne, aux câbles RF, au défaut d'adaptation de la polarisation résiduel et à la mauvaise orientation de l'antenne dans le plan horizontal et dans le plan vertical. La formule est la suivante ( $g_M$  étant la valeur linéaire et  $G_M$  la valeur en dB):

$$g_M = g_{CAL} \cdot a_{CBL} \cdot a_{HOR} \cdot a_{VERT} \cdot a_{POL}$$

*Puissance reçue* L'incertitude concernant la puissance reçue est liée à l'incertitude d'étalonnage du récepteur, au défaut d'adaptation entre l'antenne et le récepteur, aux pertes dans le filtre FI dues à la trop grande largeur de bande de l'émetteur et aux fuites de puissance des émetteurs émettant dans les canaux adjacents. La formule est la suivante ( $p_M$  étant la valeur linéaire et  $P_M$  la valeur en dBW):

$$P_M = P_{M-CAL} \cdot a_{MIS} \cdot a_{FILT} \cdot a_{NABU}$$

*Réflexions* Les réflexions au sol constituent l'un des principaux contributeurs à l'incertitude de mesure globale. L'amplitude relative des réflexions dépend de la réflectivité du sol et des objets implantés au sol. Les réflexions sont atténuées par la différence relative de longueur de trajet entre l'onde directe et les ondes réfléchies et par le diagramme vertical de l'antenne d'émission et de l'antenne de réception. Dans cet exemple, l'amplitude des réflexions au sol a été déterminée à partir de l'analyse des mesures réelles, à savoir 1,7 dB.

*Erreur d'altitude* Si l'altitude de vol est différente de celle à laquelle le diagramme devrait être mesuré, la p.a.r. présentée est différente de la p.a.r. de l'antenne d'émission. L'erreur d'altitude est liée à l'incertitude de la mesure de hauteur de l'antenne effectuée lors de l'étude du site, à l'incertitude de mesure du système de localisation dans l'aéronef et à l'erreur de vol pendant la mesure. L'erreur de p.a.r. résultante dépend de la distance par rapport à l'antenne d'émission et de la directivité de l'antenne d'émission dans le plan vertical.

Dans l'exemple, l'erreur d'altitude combinée était de 23 m, avec une distribution normale et une confiance de 95%. A une distance de 1 100 m, cela correspond à un angle dans le plan vertical de 1,2°. Le diagramme vertical d'une antenne de radiodiffusion à 4 couches est tel que l'erreur résultante de p.a.r. est d'environ 0,1 dB.

Le calcul de l'incertitude de mesure totale dans cet exemple est présenté dans le Tableau 1:

TABLEAU 1  
Calcul de l'incertitude de mesure totale

Symbole	Source	Incertitude		Distribution	Diviseur	Coefficient de sensibilité $c_i$	Ecart type de la source $u_i(a_x)$ (%)	Degrés de liberté $\nu_i$ ou $\nu_{eff}$
		(±dB)	(%)					
<b>Vitesse de la lumière</b>								
$c$	Vitesse de la lumière	Nulle						
<b>Fréquence</b>								
$f$	Fréquence RF		0,1	Uniforme	1,7321	2	0,1	$\infty$
<b>Distance</b>								
$R$	Distance entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception		0,6	Normale	2	2	0,6	$\infty$
<b>Gain d'antenne</b>								
$g_{M-CAL}$	Etalonnage du gain d'antenne	1,0	26	Normale	2	1	12,9	$\infty$
$a_{HOR}$	Mauvaise orientation dans le plan horizontal	0,2	4,7	Uniforme	1,7321	1	2,7	$\infty$
$a_{VERT}$	Mauvaise orientation dans le plan vertical	0,3	7,2	Uniforme	1,7321	1	4,1	$\infty$
$a_{POL}$	Affaiblissement de polarisation	0,3	7,2	Uniforme	1,7321	1	4,1	$\infty$
<b>Mesure de la puissance</b>								
$p_{RX-CAL}$	Etalonnage du récepteur	1,5	41	Normale	2	1	20,6	$\infty$
$a_{MIS}$	Défaut d'adaptation	0,09	2,1	En forme de U	1,4142	1	1,5	$\infty$
$a_{FILT}$	Energie située en dehors de la largeur de bande du filtre	0,15	3,5	Uniforme	1,7321	1	2,0	$\infty$
$a_{ADI}$	Brouillage émanant des canaux adjacents	Négligeable						
<b>Réflexions</b>								
$a_{REF}$	Influence des réflexions	1,7	47,9	Uniforme	1,7321	1	27,7	$\infty$
<b>Erreur d'altitude</b>								
$a_H$	Influence de l'erreur d'altitude	0,1	2,3	Normale	2	1	1,2	$\infty$
$U_{ERP}$	Incertitude standard combinée			Normale			38	$\infty$
$U$	Incertitude standard élargie (confiance de 95%)			Normale ( $k=2$ )			75	$\infty$

L'incertitude de mesure réelle pour cet exemple est donc  $10 \log_{10} (1 + U) = 2,4$  dB.

## 9 Présentation des rapports

Il convient de présenter dans un rapport le diagramme de rayonnement d'antenne mesuré, accompagné d'un résumé et de conclusions. Il est préférable d'utiliser un format normalisé, afin de pouvoir comparer différentes mesures. Il convient de faire en sorte que ce format soit aussi compact que possible, sans omettre les paramètres principaux.

## 9.1 Rapport normalisé

Concernant la description du rapport normalisé, le plus simple est de se reporter à l'exemple qui suit. Les chapitres du rapport sont présentés en *course*, les informations qui doivent être données en fonction de la situation considérée sont soulignées. Selon les résultats ou les événements particuliers qui se produisent pendant les mesures, le texte pourra être adapté. La structure générale reste la même.

### 9.1.1 Résumé

Les 12 et 14 septembre 2003, l'agence radio du pays A a réalisé des mesures de diagramme d'antenne par aéronef autour d'un pylône d'émission situé dans la ville B. Pendant cette campagne de mesure, des mesures ont été réalisées sur le signal de la radio C à 102,2 MHz. Elles ont permis de déterminer le diagramme du système d'antenne utilisé.

### 9.1.2 Conclusions

La puissance apparente rayonnée par la radio C dans la ville B, émettant à 102,2 MHz, dépasse les limites fixées dans la licence d'une valeur allant jusqu'à 15 dB dans la direction d'azimut comprise entre 210 et 270°. Dans la direction d'azimut comprise entre 340 et 0°, elle est inférieure au niveau prévu d'une valeur allant jusqu'à 7 dB.

### 9.1.3 Introduction

Des plaintes concernant la réception de la radio C dans la zone septentrionale de la ville B sont à l'origine de cette enquête. Les résultats de mesures mobiles du champ ont donné à penser que le diagramme d'antenne de la radio C n'était pas optimal, c'est la raison pour laquelle des mesures par aéronef ont été réalisées. Le 12 septembre 2003, l'agence radio du pays A a réalisé des mesures de diagramme d'antenne par aéronef autour du pylône d'émission dans la ville B. Pendant cette campagne de mesure, des mesures ont été réalisées sur le signal de la radio C à 102,2 MHz. Elles ont permis de déterminer le diagramme du système d'antenne utilisé. Les mesures ont été répétées le 14 septembre 2003 afin de prouver leur reproductibilité. Le présent rapport ne fait que présenter les résultats des mesures mais il pourrait servir de base à des activités d'inspection ou à des mesures correctrices.

### 9.1.4 Résultats de mesure

Le 12 septembre 2003, le diagramme de rayonnement d'antenne horizontal de la radio C dans la ville B, émettant à 102,2 MHz, a été mesuré deux fois. Les deux diagrammes étaient quasiment identiques, preuve de la reproductibilité des mesures. Le 14 septembre 2003, le même diagramme a de nouveau été mesuré deux fois. La corrélation entre les points de mesure de tous les vols était telle qu'il était impossible de faire une distinction entre les diagrammes. La reproductibilité est donc excellente.

Le diagramme de rayonnement d'antenne est représenté à la Fig. 16. La puissance apparente rayonnée dans les différentes directions d'azimut est exprimée sur l'axe radial (dBW). La courbe en rouge correspond aux limites fixées dans la licence. La courbe en bleu correspond au diagramme de rayonnement d'antenne mesuré.

### 9.1.5 Précision de la mesure

La précision de la mesure de la puissance apparente rayonnée absolue est de 1,5 dB avec une confiance de 95% pour cette mesure particulière. Le système de mesure et le calcul de l'incertitude de mesure sont décrits dans un autre rapport.

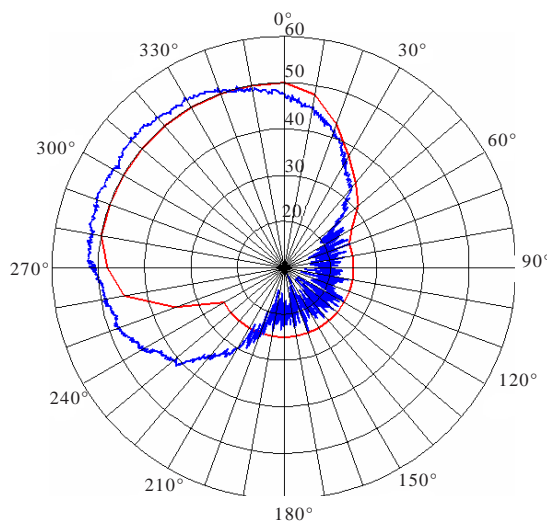


### 9.1.6 Violation des conditions fixées dans la licence

Le Tableau 2 présente une comparaison des résultats de mesure et des limites fixées dans la licence. Le diagramme horizontal dépasse les limites de puissance apparente rayonnée fixées dans la licence dans les directions d'azimut comprises entre 210° et 270° d'une valeur allant jusqu'à 15 dB. Dans les directions d'azimut comprises entre 340° et 360°, la puissance apparente rayonnée est inférieure au niveau fixé dans la licence d'une valeur allant jusqu'à 7 dB.

FIGURE 16

Diagramme de rayonnement d'antenne de la radio C – Ville B – 102,2 MHz



RapportSM.2056-16

TABLEAU 2

Données de puissance apparente rayonnée et données de licence sous forme de tableau

Direction d'azimut	Licence	Mesuré	Différence	Direction d'azimut	Licence	Mesuré	Différence
	(dBW)				(dBW)		
0°	50	43	-7 dB	180°	25	17	-6 dB
10°	48	41	-7 dB	190°	25	18	-7 dB
20°	43	37	-6 dB	200°	25	20	-5 dB
30°	38	32	-6 dB	210°	25	25	-0 dB
40°	34	29	-6 dB	220°	25	31	+5 dB
50°	31	20	-11 dB	230°	26	37	+10 dB
60°	27	18	-9 dB	240°	25	41	+15 dB
70°	25	18	-7 dB	250°	35	44	+8 dB
80°	25	17	-8 dB	260°	45	45	-1 dB
90°	25	16	-9 dB	270°	48	47	-1 dB
100°	25	18	-7 dB	280°	50	48	-2 dB
110°	25	17	-8 dB	290°	50	49	-1 dB
120°	25	19	-7 dB	300°	50	48	-2 dB
130°	25	18	-7 dB	310°	50	49	-1 dB
140°	25	17	-9 dB	320°	50	48	-2 dB
150°	25	17	-8 dB	330°	50	48	-3 dB
160°	25	19	-6 dB	340°	50	47	-4 dB
170°	25	18	-8 dB	350°	50	45	-6 dB

### 9.2 Normalisation de la présentation des diagrammes d'antenne dans le rapport

Toute modification d'échelle aura une incidence considérable sur l'aspect visuel du diagramme d'antenne représenté. Il est donc recommandé d'établir des formats préférés, de façon à faciliter la

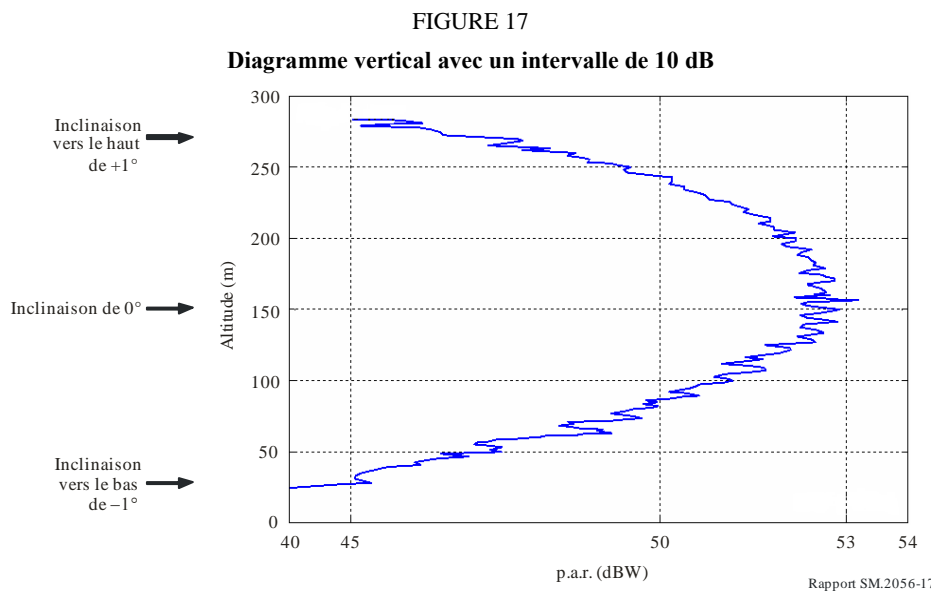
comparaison des résultats obtenus lors de différentes campagnes voire par des administrations différentes. Quelques formats préférés pour les types de vol les plus courants sont présentés ici.

### 9.2.1 Diagramme de rayonnement horizontal

Concernant le diagramme de rayonnement horizontal tel que présenté dans l'exemple, l'échelle radiale devrait être linéaire logarithmique avec un intervalle de 50 dB. Il n'est pas utile de prendre un intervalle de plus de 50 dB car même les grands réseaux d'antennes ont un rapport avant/arrière qui ne dépasse pas 50 dB. De même, il est peu probable d'avoir des coupures de plus de 50 dB dans le diagramme.

### 9.2.2 Diagramme de rayonnement vertical

Dans l'exemple considéré, le diagramme vertical ne figure pas dans le rapport, même si en réalité il a été établi pour déterminer l'altitude de mesure correcte avant d'effectuer un vol circulaire. Dans certaines situations, le diagramme de rayonnement vertical présente un intérêt particulier et doit donc figurer dans le rapport. Dans ce cas, un intervalle de 10 dB suffit. Avec une telle échelle, il est très facile de déterminer l'angle d'inclinaison du lobe principal et l'ouverture de faisceau de l'antenne dans le plan vertical. La Fig. 17 illustre un diagramme vertical avec une variation d'environ 3 dB due aux réflexions au sol. Si on souhaite supprimer, par exemple, les rayonnements aux angles élevés, il convient de prendre une échelle avec un intervalle de 50 dB, comme pour le diagramme de rayonnement horizontal.



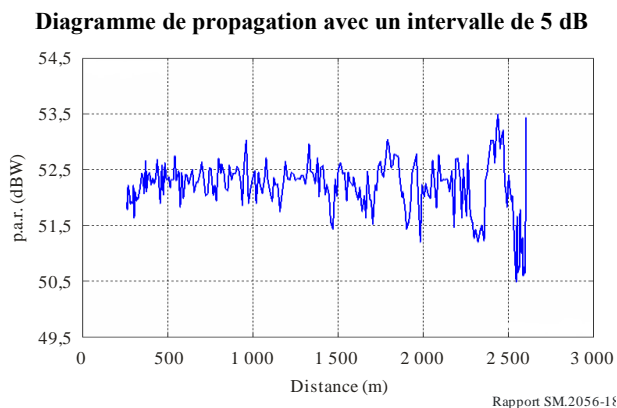
Dans le diagramme représenté, l'échelle verticale est en mètres par rapport au niveau du sol.

Moyennant la hauteur réelle de l'antenne et sa distance par rapport à l'aéronef, il est également possible d'exprimer cette échelle sous la forme de l'angle d'inclinaison en degrés.

### 9.2.3 Diagramme de propagation

Les diagrammes pour les vols horizontaux qui sont effectués pour déterminer un point pour lequel les réflexions au sol sont les plus faibles devraient avoir un axe vertical d'environ 5 dB. Cet intervalle suffit pour avoir une idée de l'écart de puissance en ce point car la p.a.r. devrait être constante tout au long de la trajectoire du vol.

FIGURE 18



#### 9.2.4 Autres diagrammes

On peut tout à fait utiliser d'autres diagrammes adaptés à certaines fins, mais il convient d'utiliser les diagrammes préférés chaque fois que c'est possible.

## Annexe 2

### Applications

#### 1 Introduction

L'Annexe 1 a décrit les procédures de mesures recommandées, les équipements requis et les modalités de présentation des rapports pour les mesures de diagrammes de rayonnement d'antennes à partir d'un aéronef. Les recommandations qui y figurent s'appliquent indépendamment du type d'aéronef choisi et quel que soit le système de radiodiffusion utilisé.

La présente Annexe contient d'autres recommandations relatives à certains systèmes de radiodiffusion, concernant par exemple les vols à effectuer pour réaliser les mesures, les antennes de mesure à utiliser et les réglages du récepteur à choisir. Les systèmes de radiodiffusion mentionnés ne sont que des exemples, la liste n'est pas censée être exhaustive. Les types de vols mentionnés dans la présente Annexe sont décrits plus en détail au § 4 de l'Annexe 1. Dans la pratique, les types de vols recommandés dépendent aussi dans une large mesure de l'aéronef utilisé, mais les recommandations relatives à certains aéronefs ne sont pas abordées ici, car elles sont traitées dans l'Annexe 3.

#### 2 Radiodiffusion FM en ondes métriques

Les recommandations qui suivent sont valables pour la radiodiffusion sonore à modulation de fréquence ou de phase dans la bande 87,5-108 MHz:

##### 2.1 Diagramme de rayonnement

Pour la radiodiffusion FM en ondes métriques, un diagramme de rayonnement d'antenne horizontal est mesuré à l'altitude à laquelle la valeur du diagramme de rayonnement vertical est maximale. Le diagramme d'antenne mesuré est exprimé en termes de p.a.r., avec une antenne doublet demi-onde comme antenne de référence.

## 2.2 Vols effectués pour réaliser les mesures

Pour obtenir la valeur maximale du diagramme de rayonnement vertical, on effectue un vol vertical à une ou plusieurs directions d'azimut. Cette valeur maximale détermine l'altitude à laquelle un vol circulaire est effectué. Etant donné que les mesures de diagramme d'antenne en ondes métriques sont particulièrement sensibles aux réflexions au sol, il convient de choisir une distance de mesure à laquelle les réflexions sont acceptables. Pour déterminer cette distance, on peut effectuer un vol de propagation. Connaissant l'altitude optimale et la distance optimale, on effectue alors un vol circulaire pour obtenir le diagramme de rayonnement d'antenne voulu. Au moins deux vols circulaires doivent être effectués à l'altitude et à la distance déterminées au préalable afin de vérifier la reproductibilité. La séquence de mesures est la suivante: un ou plusieurs vols de propagation, un ou plusieurs vols verticaux, un ou plusieurs vols circulaires.

## 2.3 Antenne de mesure

Les mesures sont réalisées avec une polarisation adaptée. Lorsque la polarisation à l'émission est elliptique ou varie en fonction de l'angle d'azimut, la mesure doit être réalisée à la fois pour la polarisation horizontale et pour la polarisation verticale simultanément, ou à l'aide d'une méthode indépendante de la polarisation, comme décrit dans l'Annexe 1, au § 5.2.5.

Une bonne antenne de mesure pour cette application a un angle d'ouverture dans le plan vertical suffisamment petit pour supprimer correctement les réflexions au sol, ainsi qu'un gain constant raisonnable à la fois dans le plan vertical et dans le plan horizontal autour de la direction principale pour faciliter l'orientation. Il n'est pas nécessaire que l'antenne de mesure ait un gain élevé, même des gains à partir de  $-15$  dBd sont utiles. Les antennes de grande taille ne sont pas très pratiques dans cette gamme de fréquences, compte tenu de la prise au vent et d'autres aspects mécaniques.

## 2.4 Réglages du récepteur

Le réglage du filtre du récepteur est un compromis entre le brouillage émanant des canaux adjacents et la modulation d'amplitude indésirable générée par le filtre. La largeur de bande des signaux de radiodiffusion FM est limitée par la réglementation mais il convient de la vérifier avant la mesure à l'aide de la méthode du gabarit décrite dans la Recommandation UIT-R SM.1268. Lorsque les signaux sont trop larges par rapport au filtre utilisé, une modulation d'amplitude indésirable vient s'ajouter au signal mesuré, ce qui entraîne une augmentation de l'incertitude de mesure. Si l'occupation des canaux adjacents le permet, il convient de choisir un filtre large avec un facteur de forme élevé (gaussien).

Il convient de choisir un détecteur de valeur efficace pour les mesures indépendantes de la polarisation mais lorsque cette technique n'est pas utilisée, on peut utiliser un détecteur de valeur moyenne. On peut utiliser un détecteur de valeur de crête ou d'échantillon lorsqu'on dispose d'un nombre suffisant de points de mesure pour ensuite calculer des moyennes. Le dernier peut être nécessaire pour limiter les effets des petites erreurs de mesure dues au brouillage émanant des canaux adjacents ou à la largeur de bande du filtre du récepteur par rapport au signal mesuré.

## 3 Radiodiffusion (AM) en ondes moyennes

Les systèmes d'antenne utilisés pour la radiodiffusion en ondes moyennes sont de grandes dimensions. D'un point de vue mécanique, la condition de champ lointain commence parfois au-delà de  $1\lambda$  par rapport à l'antenne, dans le cas de réseaux d'antennes de grandes dimensions. En règle générale, la puissance est élevée, de sorte que des antennes de petites dimensions, moins efficaces, peuvent être utilisées pour la mesure. La polarisation est verticale dans la plupart des cas. Les stations de radiodiffusion en ondes moyennes sont souvent conçues pour desservir des régions relativement vastes et n'utilisent pas de faisceaux crayons ou en éventail. La largeur de bande est plus ou moins constante, de sorte qu'on peut utiliser un filtre de canal avec un facteur de forme faible (filtre de

canal). La modulation est de type A3E, de sorte que le détecteur préféré est le détecteur de valeur moyenne. Pendant la mesure, les systèmes d'économie d'énergie comme le système de modulation d'amplitude dynamique (DAM) devraient être désactivés. Les antennes en ondes moyennes sont généralement installées au sol et elles ont un angle de rayonnement dans le plan vertical très faible. En général, elles sont équidirectives, ou ne sont que légèrement directives: une directivité de plus de 8 dB est exceptionnelle. Pour obtenir une bonne représentation du diagramme de rayonnement de l'antenne en trois dimensions, on peut effectuer plusieurs vols circulaires autour de l'antenne à différentes altitudes, ainsi que quelques survols. A partir de ces points de mesure, on peut construire le diagramme de rayonnement réel en trois dimensions, sachant que le diagramme d'antenne réel ne peut pas varier beaucoup sur de petits incréments d'angle.

#### **4 Radiodiffusion (AM) en ondes décamétriques**

Les systèmes d'antenne utilisés pour la radiodiffusion en ondes décamétriques sont de grandes dimensions. D'un point de vue mécanique, la condition de champ lointain commence à partir de plusieurs longueurs d'onde par rapport à l'antenne, dans le cas de réseaux d'antennes de grandes dimensions. En règle générale, la puissance est élevée, de sorte que des antennes de petites dimensions, moins efficaces, peuvent être utilisées pour la mesure. La polarisation est horizontale dans la plupart des cas. La largeur de bande est plus ou moins constante, de sorte qu'on peut utiliser un filtre de canal avec un facteur de forme faible (filtre de canal). La modulation est de type A3E, de sorte que le détecteur préféré est le détecteur de valeur moyenne. Pendant la mesure, les systèmes d'économie d'énergie comme le système de modulation d'amplitude dynamique (DAM) devraient être désactivés.

Les antennes de radiodiffusion en ondes décamétriques existent sous toutes les formes possibles, allant d'éléments rayonnants équidirectifs présentant un angle élevé jusqu'à des faisceaux crayons pour la desserte de zones particulières éloignées. La stratégie de mesure doit être déterminée en fonction du diagramme d'antenne attendu. Dans le cas d'un réseau d'antennes rideaux en ondes décamétriques présentant un angle faible, on peut effectuer à la fois des vols verticaux et des vols horizontaux dans la zone autour du faisceau principal. Ces points de mesure peuvent être utilisés pour représenter graphiquement le diagramme de rayonnement dans le secteur autour du lobe principal et dans les premiers lobes secondaires. Plusieurs vols circulaires à différentes altitudes pourraient permettre de se faire une idée plus générale du rayonnement en dehors du faisceau principal.

#### **5 Radiodiffusion T-DAB**

La radiodiffusion T-DAB est généralement déployée dans le cadre de réseaux monofréquence. Pour obtenir des résultats précis et mesurer uniquement l'émetteur voulu, il est nécessaire d'utiliser des antennes de mesure directives avec un rapport avant/arrière élevé. La largeur de bande est de 1,5 MHz et constante, de sorte qu'on peut utiliser un filtre de canal. Souvent, les antennes d'émission utilisées ont un petit angle d'ouverture dans le plan vertical et sont inclinées vers le bas, et le diagramme horizontal est généralement équidirectif. Les types de vols mentionnés dans le paragraphe relatif à la radiodiffusion FM sont valables ici. Les exigences relatives à l'antenne de mesure pour la radiodiffusion T-DAB en ondes métriques sont analogues à ce qu'elles sont dans le cas de la radiodiffusion FM. Un système de radiodiffusion T-DAB est un système numérique employant la technique OFDM, de sorte qu'il convient de choisir un détecteur de valeur efficace.

## 6 Radiodiffusion DVB-TH1

La télévision numérique peut fonctionner en mode monofréquence synchronisé et fonctionne ainsi la plupart du temps. Pour obtenir des résultats précis et mesurer uniquement l'émetteur voulu, il est nécessaire d'utiliser des antennes de mesure directives avec un rapport avant/arrière élevé. La largeur de bande est de 2 ou 8 MHz et constante, de sorte qu'on peut utiliser un filtre de canal. Souvent, les antennes d'émission utilisées ont un petit angle d'ouverture dans le plan vertical et sont inclinées vers le bas, et le diagramme horizontal est généralement équidirectif. Les types de vols mentionnés dans le paragraphe relatif à la radiodiffusion FM sont valables ici. Les antennes de mesure pour cette gamme de fréquences ont généralement une directivité suffisante dans le plan vertical pour supprimer les réflexions. Il convient d'éviter d'utiliser une ouverture de faisceau trop étroite, car il peut alors être difficile d'orienter correctement l'antenne.

## Annexe 3

### Aéronefs pour les mesures de diagramme d'antenne

#### 1 Introduction

Les recommandations figurant dans l'Annexe 1 s'appliquent indépendamment du type d'aéronef choisi et quel que soit le système de radiodiffusion utilisé. Le choix d'un aéronef donné dépend de nombreux facteurs, et débouche aussi sur des possibilités et des contraintes spécifiques concernant le système de mesure et les vols qui peuvent être effectués pour réaliser les mesures. Ces questions sont traitées dans la présente Annexe.

La structure de la présente Annexe est la suivante: la section 2 traite des questions générales qui doivent être prises en considération pour tous les types d'aéronef. Les sections 3 et 4 portent sur deux des aéronefs les plus couramment utilisés pour les mesures de diagrammes d'antenne, à savoir l'hélicoptère et l'avion. La section 5 porte sur d'autres aéronefs moins courants.

#### 2 Concernant tous les types d'aéronef

Certaines questions concernant tous les aéronefs en rapport avec les équipements de mesure sont résumées ici:

- Les vibrations peuvent endommager des éléments du système de mesure. En particulier, les disques durs présents dans les ordinateurs et les récepteurs modernes, les relais présents dans les récepteurs et l'écran pilote y sont sensibles. Le montage de mesure devrait être installé sur des supports amortisseurs, et la résonance mécanique caractéristique de l'ensemble du montage devrait se situer en dehors des fréquences de vibration de l'aéronef pendant le vol.
- Des signaux RF sont générés dans l'aéronef par des équipements tels que les onduleurs et les boussoles gyroscopiques. Il convient d'en tenir compte en plaçant les antennes, y compris celles utilisées pour la navigation, dans une position leur permettant de capter le moins possible de signaux RF. Il convient d'installer des bobines d'arrêt et des pinces en ferrite autour des câbles rayonnant des signaux RF. Ce peut être difficile, mais chaque aéronef doit être ouvert régulièrement pour le service; il convient de profiter de l'occasion.
- L'alimentation électrique d'un aéronef est généralement instable; il convient de toujours utiliser un onduleur/stabilisateur à part.

- Un socle fixé à l'aéronef doit être utilisé pour fixer les équipements à l'aéronef. Pour ce faire, la solution la plus simple consiste à utiliser les points d'attache existants dans l'aéronef, ils sont déjà certifiés pour une charge donnée.
- Il convient de tenir compte de la durée de vol maximale admissible, car l'atterrissage et le ravitaillement ne sont pas toujours possibles à proximité des objets à mesurer.
- Charge utile: l'aéronef devrait être capable de transporter les équipements et les ingénieurs.

### **3 Hélicoptère**

Un hélicoptère est souvent choisi pour ce type de mesures, probablement en raison de sa manœuvrabilité et de la possibilité d'effectuer un vol vertical ou de se déplacer très lentement vers une position donnée. Mais il présente des inconvénients très spécifiques: les vibrations sont beaucoup plus problématiques qu'avec les avions et l'heure de vol est relativement onéreuse. Lorsqu'on choisit un hélicoptère pour réaliser des mesures, il convient d'accorder une attention particulière aux facteurs suivants.

#### **3.1 Manœuvrabilité**

Le plus gros avantage d'un hélicoptère est sa manœuvrabilité. Un hélicoptère peut facilement corriger sa position le long de trois axes, ce qui lui permet d'effectuer des vols de propagation, des vols circulaires et des vols verticaux. Il convient de noter que sa capacité à voler verticalement est exceptionnelle. En outre, un hélicoptère peut voler à une vitesse très faible, permettant un positionnement très précis, si on le souhaite. Lors d'un vol suivant une trajectoire prédéfinie à vitesse faible, le nombre de mesures en fonction de la distance parcourue est relativement élevé. Toutefois, une vitesse faible a des conséquences négatives lorsque la sensibilité au vent est prise en considération.

#### **3.2 Sensibilité au vent**

Un hélicoptère a une vitesse relativement faible, ce qui le rend sensible au vent. Son orientation par rapport au pylône de l'antenne variera en fonction de la direction et de la force du vent, de sorte qu'il est difficile de conserver l'orientation de l'antenne de mesure. Celle-ci doit donc être orientée en temps réel pendant le vol.

Lors d'un vol circulaire, tout aéronef a une vitesse au sol qui varie en fonction de l'angle d'azimut. Des parties opposées du cercle sont exposées pour l'une à un vent arrière et pour l'autre à un vent de face. Il en résulte un nombre variable de mesures par angle d'azimut parcouru sur le cercle complet. Cet effet est beaucoup plus marqué avec un hélicoptère en raison de sa vitesse faible.

#### **3.3 Coût**

Il est relativement onéreux de faire voler un hélicoptère. On peut considérer que c'est le principal inconvénient lorsqu'on choisit un hélicoptère. Toutefois, certains coûts sont inférieurs à ceux encourus dans le cas d'un avion: les coûts d'atterrissage peuvent être réduits car les terrains d'aviation avec des pistes d'atterrissage ne sont pas toujours nécessaires.

#### **3.4 Souplesse**

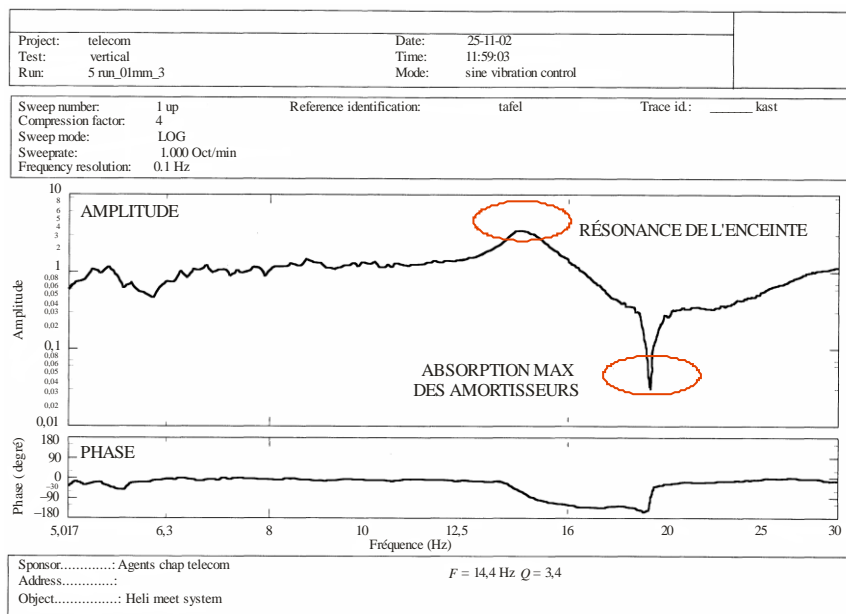
Le décollage et l'atterrissage, voire le ravitaillement, peuvent avoir lieu pratiquement n'importe où sous réserve de disposer d'une zone libre suffisante. C'est très pratique lorsque plusieurs sites doivent être mesurés les uns après les autres. La distance de vol est limitée, et la fréquence des atterrissages et des ravitaillements constitue l'un des inconvénients de l'hélicoptère.

### 3.5 Vibrations

Un hélicoptère produit de fortes vibrations mécaniques susceptibles d'endommager les équipements de mesure. Ces vibrations sont produites essentiellement à la fréquence des pales du rotor principal. Cette fréquence, qui est d'environ 10 Hz, dépend du type d'hélicoptère et du nombre de pales de rotor. Les éléments sensibles aux vibrations sont les relais, les connecteurs sans blocage comme les cartes de circuit imprimé dans leurs logements et les disques durs informatiques. Si la fréquence de résonance d'un élément du système de mesure correspond à la fréquence des vibrations de l'hélicoptère, les vibrations sont amplifiées. Les différents éléments du système de mesure ont des fréquences de résonance relativement élevées. La fréquence de résonance de l'assemblage complet peut toutefois s'approcher de la fréquence des pales du rotor.

Pour résoudre ce problème, il convient de rigidifier le socle pour augmenter sa fréquence de résonance. De plus, le socle peut être installé sur des supports amortisseurs pour supprimer encore mieux les vibrations dues aux pales du rotor. Les supports amortisseurs devraient donc assurer leur amortissement maximal à la fréquence des pales du rotor. En dépit de ces mesures, certains éléments du système de mesure peuvent malgré tout être sensibles aux vibrations restantes. Il convient d'envisager des solutions propres à chaque élément. Il est recommandé de tester le montage sur un banc d'essai de vibration après la construction du prototype. La Fig. 19 montre un balayage de fréquence mécanique d'un socle dont la fréquence de résonance est d'environ 13 Hz.

FIGURE 19  
Résultats d'un test de vibration



Rapport SM.2056-19

Cette mesure a permis d'expliquer les graves problèmes de vibration rencontrés lors des premiers vols de test. La modification du socle pour augmenter la fréquence de résonance et le remplacement des supports amortisseurs par d'autres types présentant une fréquence d'amortissement inférieure ont permis de remédier aux problèmes.

### 3.6 Installation des antennes

Lors de l'installation d'une antenne sur l'hélicoptère, plusieurs facteurs sont à prendre en considération. D'un point de vue électrique, l'objectif est que l'antenne fonctionne comme si elle était en espace libre, de sorte qu'il convient de veiller à éviter les réflexions sur le fuselage de l'hélicoptère



ou les pales du rotor. Un mât télescopique sous l'hélicoptère permet d'assurer une séparation supplémentaire entre l'antenne de mesure et ces réflecteurs, et il convient de concevoir une antenne dont l'angle d'ouverture dans le plan vertical est le plus petit possible. La vitesse faible et le décollage vertical permettent de déployer un mât d'antenne sous l'hélicoptère. Comme l'antenne est installée à l'extrémité du mât, la prise au vent pose toujours problème, et l'antenne doit être conçue en conséquence. L'antenne et le mât d'antenne sont des parties extérieures de l'aéronef, et doivent respecter toutes les réglementations relatives à la sécurité des aéronefs.

### **3.7 Facteurs liés à la réglementation**

Des restrictions spécifiques s'appliquent aux hélicoptères, elles varient en fonction du pays dans lequel les mesures sont réalisées. Des restrictions supplémentaires sont parfois imposées aux compagnies d'hélicoptères étrangères opérant en dehors de leur pays d'origine. Les restrictions peuvent concerner l'altitude minimale de vol, les zones d'exclusion aérienne, ou la limitation du survol des villes aux monomoteurs. La compagnie d'hélicoptères devrait pouvoir fournir des informations détaillées sur ces questions, et devrait s'occuper des questions de réglementation liées aux mesures de diagramme d'antenne. Il existe par ailleurs des réglementations qui favorisent les hélicoptères plutôt que les autres aéronefs: un vol bas au-dessus d'une ville est souvent davantage accepté avec un hélicoptère qu'avec un avion, et un atterrissage sur un terrain d'atterrissage improvisé est souvent autorisé.

## **4 Avion**

Lorsqu'on choisit un avion pour réaliser des mesures, il convient d'accorder une attention particulière aux facteurs suivants.

### **4.1 Manœuvrabilité**

Il est impossible avec un avion d'effectuer un vol vertical stable pour réaliser des mesures. De même, il est impossible de voler en ligne droite en direction d'un pylône d'antenne et de quitter la trajectoire à proximité. Du fait de sa stabilité intrinsèque, un avion convient toutefois parfaitement pour les vols en ligne droite et les vols circulaires.

### **4.2 Sensibilité au vent**

En raison de sa vitesse élevée, un avion est moins sensible au vent. Parcourir un cercle parfait en présence de vent n'est pas un problème. Bien évidemment, le pilote doit être expérimenté et il doit disposer des bons équipements de navigation. Du fait de la vitesse élevée, le nombre de mesures en fonction de la distance parcourue est relativement faible, mais la répartition des mesures est relativement régulière même lorsque la vitesse du vent est élevée.

### **4.3 Coût**

Avec un avion, l'heure de vol est relativement bon marché. Cet avantage est moins important dans les zones où les taxes d'atterrissage sont élevées.

### **4.4 Souplesse**

Un avion peut parcourir une distance relativement grande. Ce peut être très pratique lorsque des mesures doivent être réalisées sur plusieurs sites, ou sur des sites qui sont éloignés les uns des autres. Toutefois, pour décoller et atterrir, une piste d'atterrissage officielle est nécessaire, ce qui limite la souplesse.

#### **4.5 Installation des antennes**

En raison de la vitesse de l'avion, il faut installer l'antenne de mesure à proximité du fuselage. Une autre solution consiste à utiliser une antenne au bout d'une corde attachée à l'arrière de l'avion, auquel cas on a une erreur de position supplémentaire mais c'est parfois inévitable.

#### **4.6 Facteurs liés à la réglementation**

Dans les pays densément peuplés, le survol des villes avec un avion est souvent interdit. Dans ce cas, il est impossible de mesurer les diagrammes d'antenne des émetteurs situés à l'intérieur des zones urbaines.

### **5 Autres aéronefs**

On peut également envisager d'autres solutions. Dans certaines conditions, il pourrait s'avérer judicieux de recourir à d'autres aéronefs, tels que des dirigeables ou des drones sans pilote. On pourrait aussi envisager de réaliser des mesures inverses, par exemple faire voler un modèle réduit d'avion équipé d'une source RF autour d'un pylône d'antenne et mesurer le signal reçu au niveau de l'antenne d'émission proprement dite. Pour chaque application, les exigences particulières et les possibilités spécifiques relatives à l'aéronef doivent être évaluées, et le système de mesure doit être adapté à l'aéronef.

---