

Antenne bord iso puissance pour nœud de communications aéroporté

Thomas VITTE

EADS Defence and security Systems SA
Rue Jean Pierre Timbaud
Montigny le Bretonneux
78063 Saint Quentin en Yvelines
France

thomas.vitte@eads.com

RESUME

Les opérations de réseau infocentré (NCO) conduisent à une révolution dans tous les domaines, en particulier celui des télécommunications aéroportées. Ces nouveaux besoins nécessitent de développer de nouvelles technologies. Cet article illustre ces besoins spécifiques au travers de l'exemple de l'antenne bord d'un nœud de communications aéroporté (NCA).

Dans un premier temps sera présenté comment le design de l'antenne:

- *Est influencé par les nouveaux besoins en communications*
- *Est influencé par l'aspect aéroporté (électromagnétisme, mécanique du vol, statistiques météo)*

Dans un deuxième temps seront exposées les étapes de design et de réalisation de l'antenne (choix technologique, logiciels de simulation, réalisation). Ses performances seront illustrées à l'aide des diagrammes du modèle de vol.

1.0 INTRODUCTION

Les futurs besoins en communications militaires, développés dans une optique d'opérations infocentrées, montrent que les systèmes de communication vont devoir s'adapter à des situations imprévues et un environnement changeant. Cela conduit à une profonde modification de la conception et du développement de ces systèmes. La plupart de ces évolutions concernent les couches radio et réseau, mais, en fait, c'est l'ensemble de la chaîne qui se trouve modifiée. De plus, ces nouveaux besoins impliquent une grande interaction entre ces différents domaines.

Ceci sera illustré à travers l'exemple de l'antenne bord du Nœud de Communications Aéroporté (NCA). Alors qu'une simple antenne parabolique ou omnidirectionnelle aurait pu être utilisée pour une communication point à point, il s'avère que toutes les exigences du NCA (mobilité, zone de couverture, type de codage radio utilisé, attitudes de l'avion, qualité de service requise) ont une influence primordiale sur le design de l'antenne qui a conduit à développer une antenne dédiée à cette application. De plus, cette conception a nécessité non seulement les connaissances usuelles de ce domaine (électromagnétisme), mais bien d'autres telles la mécanique du vol, les statistiques météo, montrant qu'une approche système est nécessaire pour chaque élément.

Vitte, T. (2006) Antenne bord iso puissance pour nœud de communications aéroporté. Dans *Gestion dynamique des communications* (pp. 17-1 – 17-18). Compte rendu de réunion RTO-MP-IST-062, Communication 17. Neuilly-sur-Seine, France : RTO. Disponible sur le site : <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp>

Antenne bord iso puissance pour nœud de communications aéroporté

Après la description du NCA seront exposées toutes les étapes nécessaires à l'élaboration de la spécification de l'antenne. Une troisième partie présentera sa réalisation et ses performances.

2.0 LE NOEUD DE COMMUNICATIONS AEROPORTE (NCA)

Le NCA a été développé pour répondre aux futures besoins de communications sur le champ de bataille, en accord avec les nouvelles exigences des réseaux infocentrés.

Basé sur des protocoles au standard IP, il offre une interopérabilité et des communications entre réseaux hétérogènes, sur de larges zones de couverture (200 km pour le système final)

Ces programme est divisé en deux étapes : démonstrateur (dNCA), et système final (NCA) :

- Le démonstrateur, actuellement réalisé par EADS Défense and Security Systems, sous contrat avec la DGA (Délégation Générale pour l'Armement), utilisera un avion volant à 10 000 m. La zone de couverture aura 100 km de diamètre, dans laquelle pourront opérer 10 stations sol. Le débit total sera 20 Mbps, avec 10 Mbps maximum par station. Les premières démonstrations sont prévues en octobre 2006.
- La version finale utilisera un avion volant à 20 000 m. La zone de couverture aura 200 km de diamètre, dans laquelle pourront opérer 50 stations sol. Le débit total sera 100 Mbps , avec 20 Mbps maximum par station.

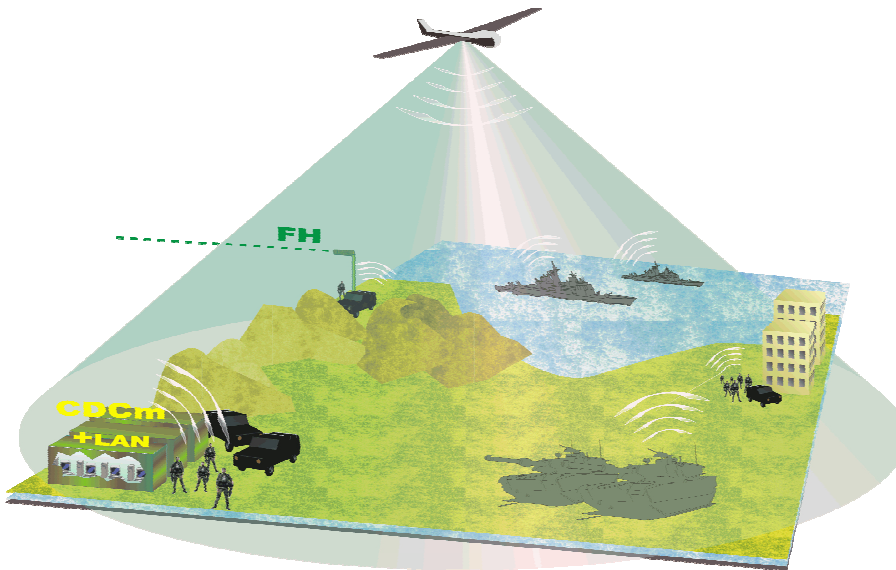


Figure 1: Nœud de communications aéroporté

3.0 DESIGN THEORIQUE DE L'ANTENNE BORD

Ce chapitre décrit toutes les étapes nécessaires à l'établissement des spécifications de l'antenne. La présentation sera axée sur l'influence des besoins en communication dynamiques sur ces spécifications.

3.1 Design préliminaire

Un premier design théorique est effectué en négligeant les mouvements de l'avion.

3.1.1 Les données d'entrée - géométrie

Le démonstrateur, volant à 10 000 m, aura à couvrir une zone au sol de 100 km de diamètre, dans l'optique de pouvoir réutiliser pour le système final la même antenne, qui permettra de couvrir 200 km à l'aide d'une plate-forme volant à 20 000m.

En première approche, le diagramme sera dessiné comme si l'antenne était fixe, au dessus du milieu de la zone de couverture

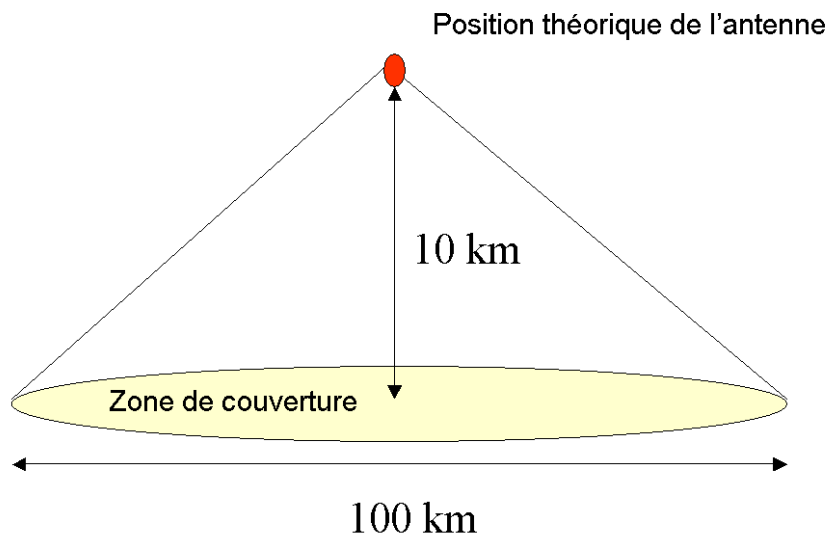


Figure 2 : Donnée géométriques du NCA

On définit l'angle de visée (appelé θ dans l'article) de la façon suivante :

Antenne bord iso puissance pour nœud de communications aéroporté

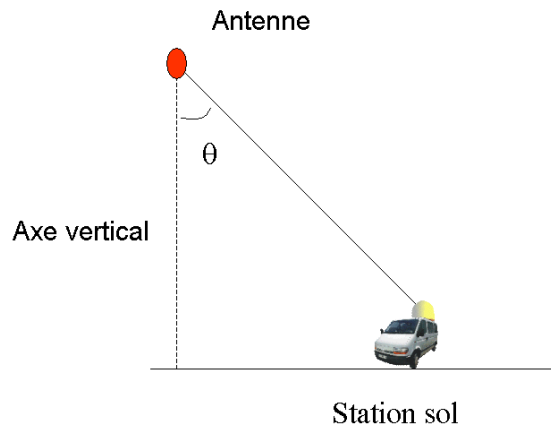


Figure 3 : Définition de l'angle de visée θ

Dans le cas du NCA, l'angle de visée maximum est $\theta_{\max} = \text{Arc tan}\left(\frac{50}{10}\right) = 78.6^\circ$

3.1.2 Une antenne iso puissance

Nous aurions d'abord pu imaginer utiliser une antenne omnidirectionnelle, ou semi omnidirectionnelle, car, reposant sur des technologies éprouvées, elles sont utilisées avec succès depuis plusieurs années pour de nombreuses applications.

Mais, dans le cas du NCA, le débit de chaque station sol est directement proportionnel à la puissance RF reçue. Donc, quel que soit l'endroit de la zone de couverture où se trouve la station sol, elle doit recevoir un maximum de puissance, afin d'optimiser la qualité de service. La solution est donc de concevoir une antenne qui distribue la même puissance RF sur toute la zone.

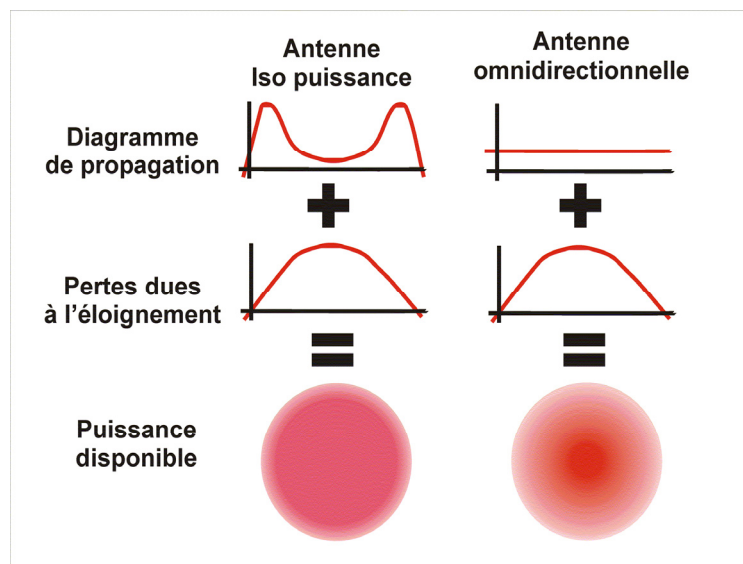


Figure 4 : Antenne iso puissance et antenne omnidirectionnelle

La clé est de compenser les pertes dues à la distance, qui dépend de l'angle de visée suivant l'équation

$$d = \frac{10000}{\cos \theta} \text{ m.}$$

$\theta=0^\circ$ sera considéré comme la référence pour le calcul des pertes, notées dl. Exprimées en dB, on a

$$dl = 20 \log\left(\frac{d}{10000}\right) = 20 \log\left(\frac{1}{\cos(\theta)}\right)$$

Pour $\theta=0^\circ$, sur l'axe vertical, les études préliminaires de la chaîne RF (amplificateurs, ...) ont montré que le gain de l'antenne à 10 000 m devait être -10 dB. Le diagramme préliminaire est donc :

- Pour $\theta \in [-78.6, 78.6]$, $G = -10 + 20 \log\left(\frac{1}{\cos(\theta)}\right)$ (G en dB)
- Sinon $\theta = -\infty$

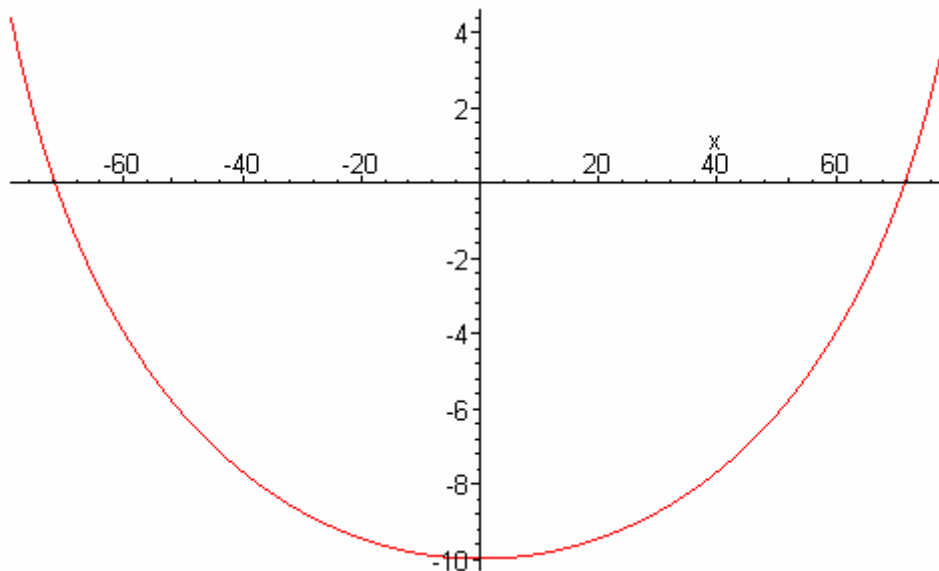


Figure 5 : Diagramme théorique

3.1.3 Dispersion en fréquence

Le système fonctionne dans la bande de fréquence Ku. La liaison montante opérera dans la sous bande [fa, fb], et la descendante dans [fc, fd].

La technique d'accès multiple est le WCDMA, choisi pour ses performances de capacité, discrétion, sécurité et protection contre le brouillage.

En contrepartie, il exige une régulation de la puissance des émetteurs ainsi qu'une dispersion en fréquence aussi faible que possible. La valeur cible est fixée à 1 dB.

Antenne bord iso puissance pour nœud de communications aéroporté

Cela signifie que, par exemple pour la liaison montante $[f_a, f_b]$ (avec $G(f, \theta)$ le gain de l'antenne (dB) dans la direction θ , à la fréquence f) :

- $\forall \theta \in [-78.6, 78.6], \forall (f_1, f_2) \in [f_a, f_b] \times [f_a, f_b], |G(f_1, \theta) - G(f_2, \theta)| \leq 1$

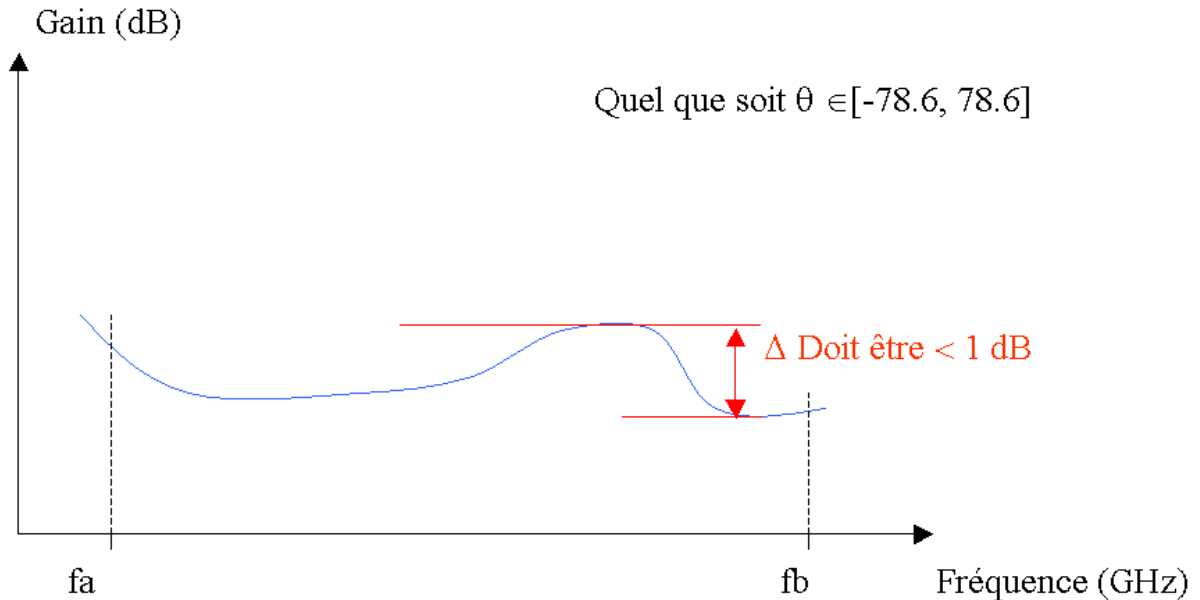


Figure 6 : Spécification de dispersion en fréquence

Et idem pour $[f_c, f_d]$.

3.2 Les contraintes dues à la mobilité

Après ce design préliminaire, où l'antenne était juste considérée comme statique au dessus de la zone de couverture, il faut inclure l'influence de la mobilité de l'avion : déplacements et attitudes. Ici apparaîtra donc l'effet de l'aspect aéroporté, rendu indispensable pour proposer le service n'importe où, et suivre le théâtre d'opérations.

3.2.1 Plan de vol de l'avion

Le premier paramètre à prendre en compte est le choix de la route. Ses caractéristiques vont modifier la distance avion – centre de la zone de couverture. Pour le démonstrateur, il a été décidé d'avoir (à vent nul) une trajectoire circulaire, effectuée à vitesse constante, afin de ne pas avoir à utiliser un système de stabilisation coûteux et problématique à intégrer. L'antenne sera fixée sous le fuselage de l'avion, avec un calage en roulis et tangage compensant l'attitude moyenne de l'avion.

L'avionneur a fixé la vitesse de croisière, en prenant des marges suffisantes par rapport au décrochage à 88 m/s (320 km/h, 170 KTAS). Au vu des caractéristiques aérodynamiques de l'avion, ceci donne une assiette de 6° .

Le seul paramètre sur lequel on peut réellement jouer est le rayon du cercle. Si il est petit, vous êtes proche du centre de la zone de couverture, ce qui est meilleur car l'antenne sera moins mobile, mais, en contrepartie, on risque d'avoir le diagramme perturbé par l'aile.

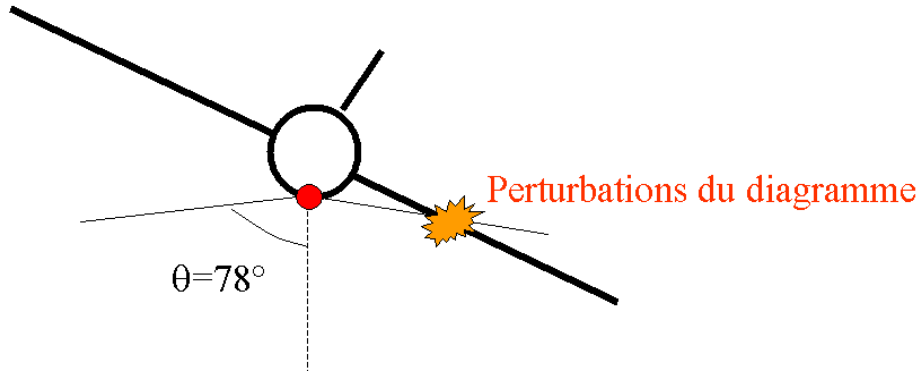


Figure 7 : Perturbation du diagramme par un angle de roulis trop élevé

Les équations de mécanique du vol permettent de déterminer la relation entre rayon et angle de roulis (appelé φ). Les hypothèses sont les suivantes : Virage stabilisé, pas de dérapage. Ces hypothèses sont réalistes pour le cas du NCA.

On se place dans le référentiel de l'avion, qui est non galiléen. Trois forces s'appliquent à l'avion (on néglige poussée et traînée qui se compensent) :

- La portance \vec{F} , qui est verticale dans le repère de l'avion, conformément à l'hypothèse de non dérapage.
- Le poids $\vec{P} = m \cdot \vec{g}$, avec m masse de l'avion, \vec{g} la gravité. \vec{P} est vertical dans le repère terrestre.
- Les forces d'inertie (ici centrifuges) \vec{I} . On a $\vec{I} = \frac{mV^2}{R} \vec{y}_0$, avec m masse de l'avion, r rayon de virage et V vitesse sol de l'avion.

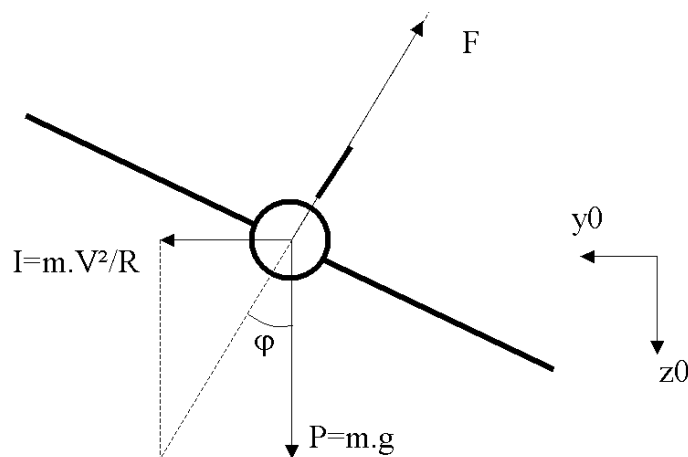


Figure 8 : Forces appliqués à l'avion en virage

Antenne bord iso puissance pour nœud de communications aéroporté

Selon l'hypothèse de virage stabilisé, la somme est nulle. Donc $\vec{I} + \vec{P}$ est parallèle à l'axe vertical de l'avion.

$$\text{D'où } \tan(\varphi) = \frac{mV^2}{mRg} \text{ soit } \varphi = A \tan\left(\frac{V^2}{Rg}\right)$$

g est constant (9.81m/s²) et V connu (88 m/s). On peut alors tracer la polaire suivante :

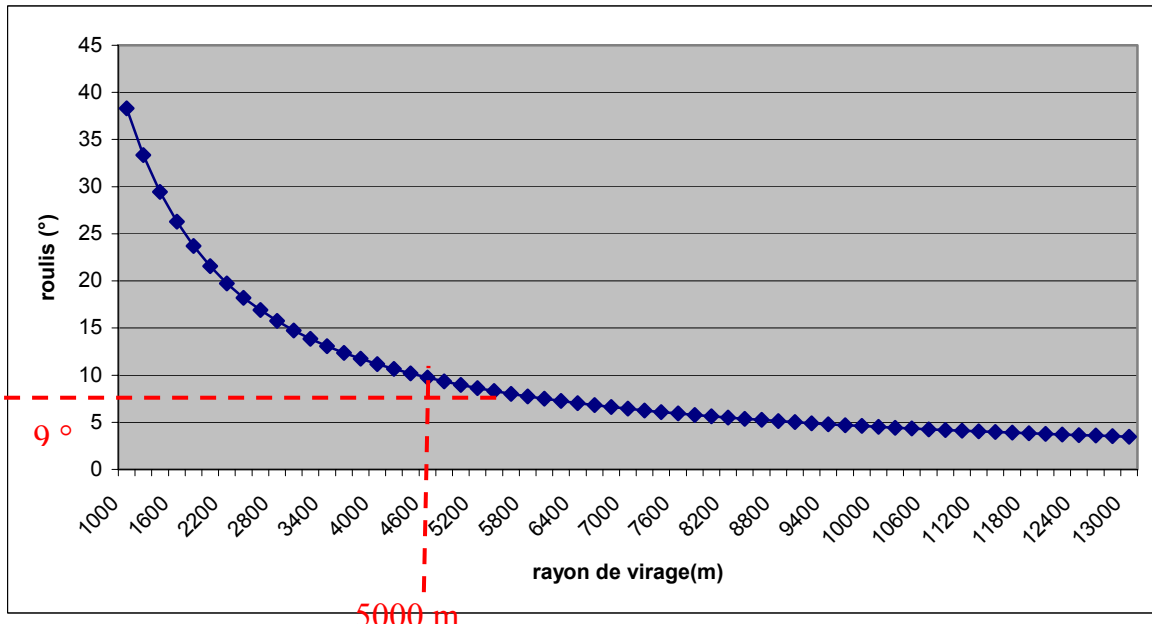


Figure 9 : polaire (angle de roulis, rayon de virage) pour la trajectoire du NCA

La paire (5000 m, 9°) a été considérée comme un bon compromis, parce que à 9°, l'influence de l'avion sur le diagramme était minimale. Certains problèmes apparaissent au delà.

Cela a modifié le diagramme de la façon suivante : l'antenne est à présent au dessus de la zone de couverture, toujours verticale car, avec les hypothèses formulées, l'attitude de l'avion est fixe (assiette =6°, roulis=9°), et l'antenne est fixée sous l'avion de manière à compenser ces angles. Le seule différence est que l'antenne se déplace le long d'un cercle de 5 km.

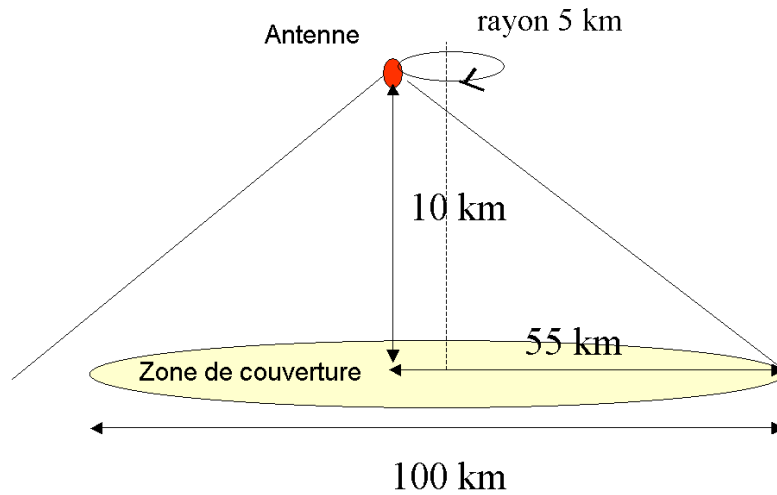


Figure 10 : antenne sous l'avion stabilisé

La seule modification à effectuer pour avoir la puissance RF requise sur toute la zone de couverture est d'élargir l'angle de vue de l'antenne afin de pouvoir atteindre un point situé à 55 km. On gardera donc la même formule pour le diagramme, en élargissant l'intervalle de $[-78.6, 78.6]$ à $[-\text{Arctan}(55/10), \text{Arctan}(55/10)] = [-79.6^\circ, 79.6^\circ]$.

3.2.2 Influence de la météo

Malheureusement, les attitudes de l'avion restent constantes uniquement si le vent est nul. La troisième, et dernière étape est donc de prendre en compte l'effet du vent, qu'il soit constant ou en rafales.

Auparavant, il est indispensable de savoir quel type de vent peut être rencontré durant les vols. Les statistiques, fournies par Météo France pour la zone d'opérations du NCA à 10 000 m donnent les résultats suivants :

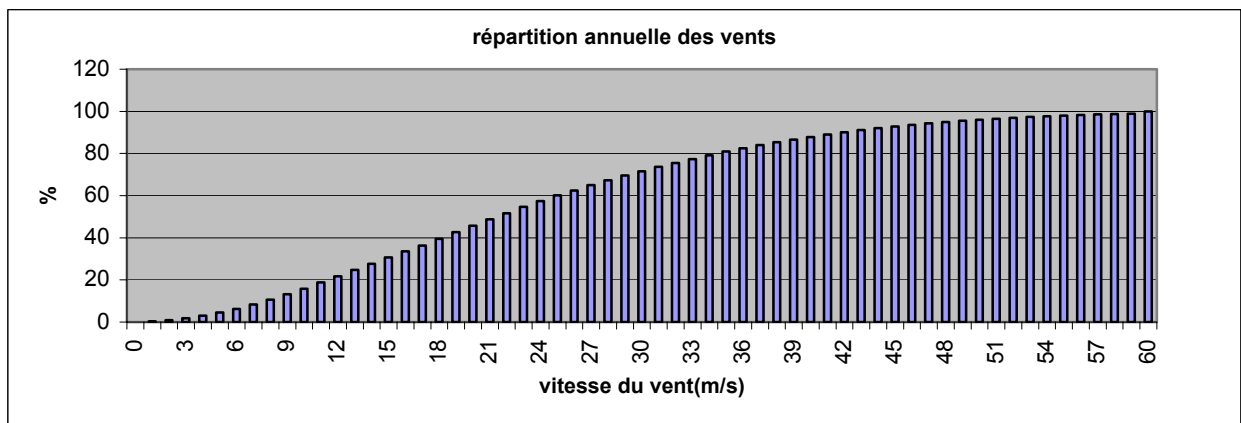


Figure 11 : Distribution annuelle des vents maximums

Antenne bord iso puissance pour nœud de communications aéroporté

Ce graphique donne la répartition annuelle des vents. Par exemple, pour 36 m/s, on a 80%. Cela signifie que pendant l'année, dans 80 % des cas, la vitesse du vent sera entre 0 et 36 m/s.

Pendant une rotation, le vent a un effet sur l'attitude. En cas de vent de face, la vitesse aérodynamique augmente, donc on réduit l'incidence. Si le vent est arrière la vitesse aérodynamique diminue, donc on augmente l'incidence. Le vent de côté crée une force aérodynamique latérale, que l'on compense en modifiant l'angle de roulis, ce qui crée une composante latérale de la portance.

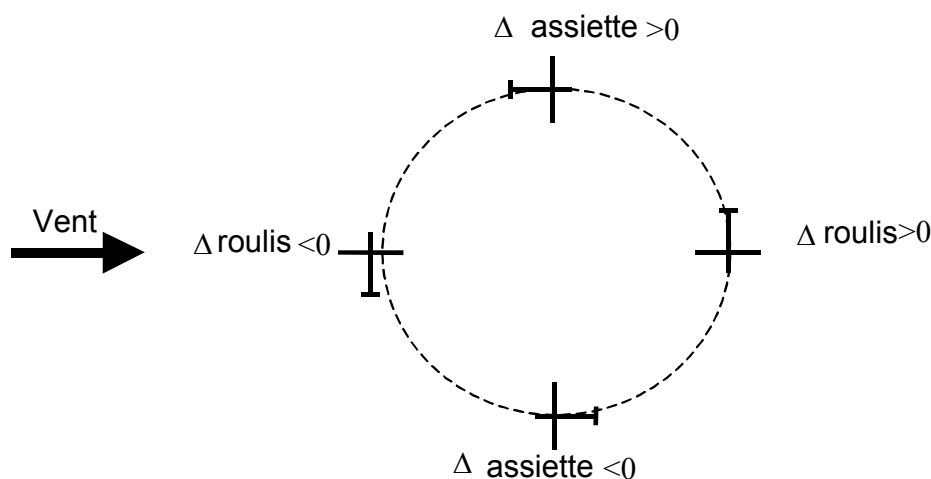


Figure 12 : Effet du vent constant sur les attitudes

La valeur de ces variations en fonction de la vitesse du vent dépend de la géométrie de l'avion. Les données suivantes ont été transmises par l'avionneur.

Vitesse du vent (m/s)	0	20	30	40	60
Assiette (°)	6.2	5.5 à 6.4	5 à 6.6	4.5 à 6.8	4.5 à 6.8
Roulis (°)	9	5.6 à 12.3	3.9 à 14.1	0 à 18.1	-13 à 31

Table 1 : Effet du vent constant sur les attitudes de l'avion

Influence des rafales

Les rafales également influent l'attitude. Le tableau suivant donne leur effet, en fonction de la probabilité d'occurrence par heure de vol.

Probabilité d'occurrence par heure de vol	0.02	0.28	1	2.3	2.97	3	2.4	1.1	0,29	0.02
Δ Roulis	-2.3°	-1.2°	-0.6°	-0.25°	-0.15°	0.15°	0.25°	0.6°	1.2°	2.3°
Δ Assiette	-3.1°	-1.6°	-0.8°	-0.3°	-0.15°	0.15°	0.3°	0.8°	1.6°	3.1°

Table 2 : Effet des rafales sur les attitudes

L'influence des rafales est donc négligeable par rapport à celle du vent constant.

On a donc choisi de spécifier l'antenne pour une variation d'attitude de $\pm 5^\circ$, qui se produit à un vent de 30 m/s. Augmenter plus cette marge aurait provoqué d'autres désagréments dus aux interférences avec la structure de l'avion. Les $\pm 5^\circ$ sont un bon compromis, le système fonctionne alors parfaitement dans 75% des cas. Et, en cas de vent plus élevé, on aura une légère réduction de la capacité en bord de zone de couverture.

Cette marge a été intégrée au diagramme de la façon suivante : pour un angle de visée donnée, vous devez envoyer le gain requis alors que l'avion (et donc l'antenne) peut avoir une variation d'attitude de $\pm 5^\circ$. Il suffit donc d'effectuer une translation de $+5^\circ$ et -5° en θ de la courbe de gain théorique, puis de conserver le majorant de ces courbes.

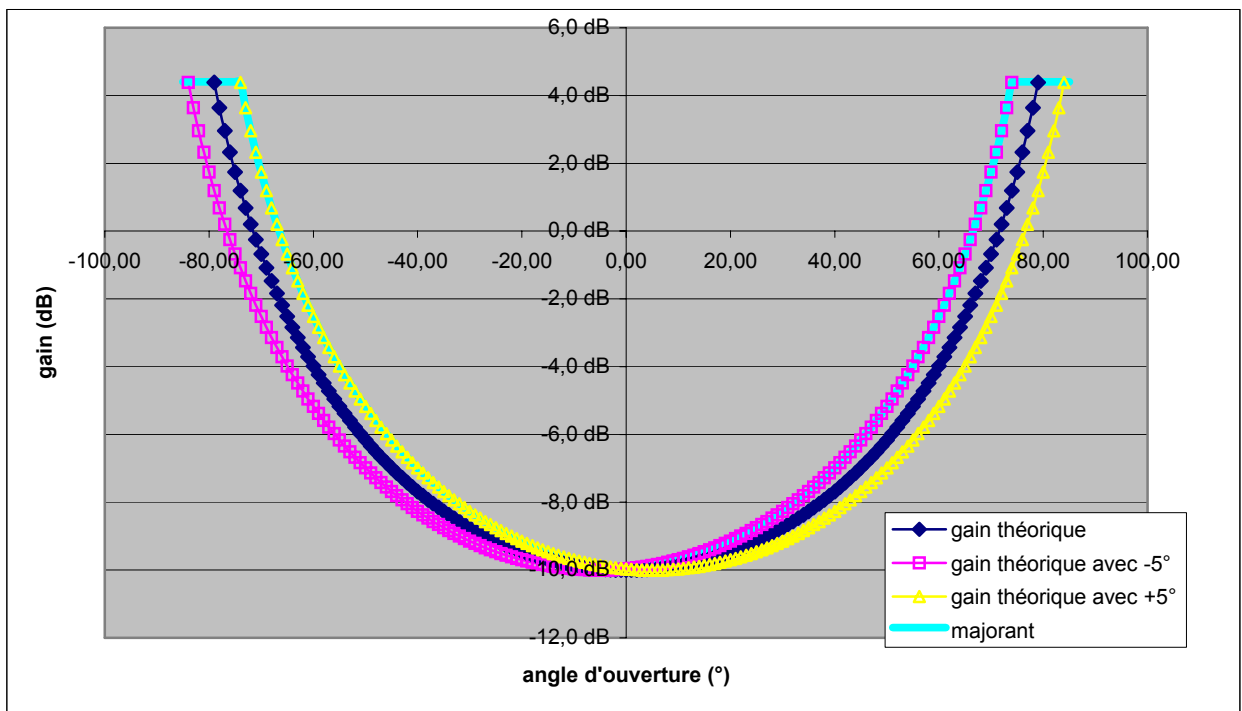


Figure 13 : Diagramme d'antenne incluant la marge de variation d'attitude de $\pm 5^\circ$

Ce majorant apparaît sur la figure 13 en turquoise. Cette courbe est le diagramme théorique parfait de l'antenne, incluant les mouvements de l'avion.

3.3 La spécification finale

Finalement, ce sont les données suivantes qui furent transmises aux fabricants d'antennes. Pour remplir le cahier des charges, ces deux caractéristiques étaient requises :

- Il est souhaitable d'avoir moins de 1dB de dispersion dans chaque sous bande (voir chapitre 3.1.3)
- Il est également requis, pour avoir suffisamment de puissance RF sur toute la zone – et ainsi obtenir le débit souhaité– que le diagramme de gain de l'antenne réelle soit au dessus du diagramme théorique (voir chapitre 3.2.2)

Antenne bord iso puissance pour nœud de communications aéroporté

Le second critère a été formulé de cette manière après que les premières discussions avec les antennistes eurent montré qu'il serait impossible d'avoir à la fois moins de 1 dB de dispersion et un respect exact du diagramme théorique. Dès lors, avoir le diagramme réel au dessus du théorique donnait plus de degrés de liberté pour respecter le critère de dispersion, tout en ne réduisant pas les performances du système.

4.0 REALISATION ET PERFORMANCES DE L'ANTENNE

Cette antenne a été conçue et réalisée par France Telecom R&D.

4.1 Design

4.1.1 Choix technologique

Plusieurs technologies ont été envisagées pour la réalisation de cette antenne : hélice, choke ring, lentille conformée. La seule solution viable était le réflecteur- subréflecteur, avec le polariseur intégré au réflecteur principal.

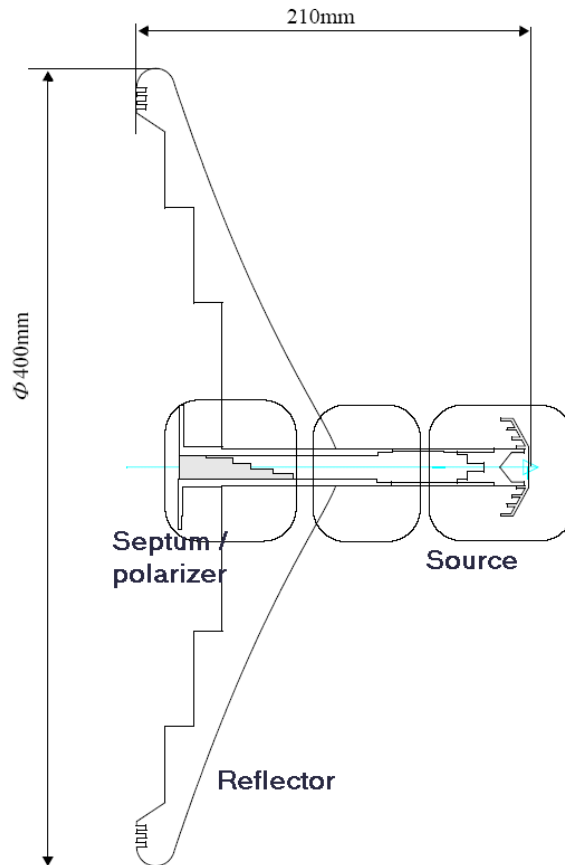


Figure 14 : antenne à réflecteur - subréflecteur

4.1.2 Logiciels de design

Le design a été effectué suivant la méthode 'cut and try', par itérations successives, à l'aide du logiciel SRSR (Software for the analysis of Radiating structures with Symmetry of Revolution). Ce dernier, développé par France Telecom R&D permet, à partir de la géométrie de n'importe quelle structure

conductrice à symétrie de révolution, de calculer ses caractéristiques électromagnétiques (coefficient de réflexion, directivité, diagramme on co et cross polar, en champ proche et en champ lointain) avec une grande fiabilité et une grande précision

4.1.3 Dessin de l'antenne, et diagrammes simulés

Le design du réflecteur et du subréflecteur on été effectuées par itérations successives, afin de respecter les spécifications du NCA.

Les deux graphiques suivant donnent les simulations de diagramme dans chacune des sous bandes : 5 fréquences sont tracées en couleur, et le diagramme théorique établi lors de la phase de spécifications est rappelé en noir.

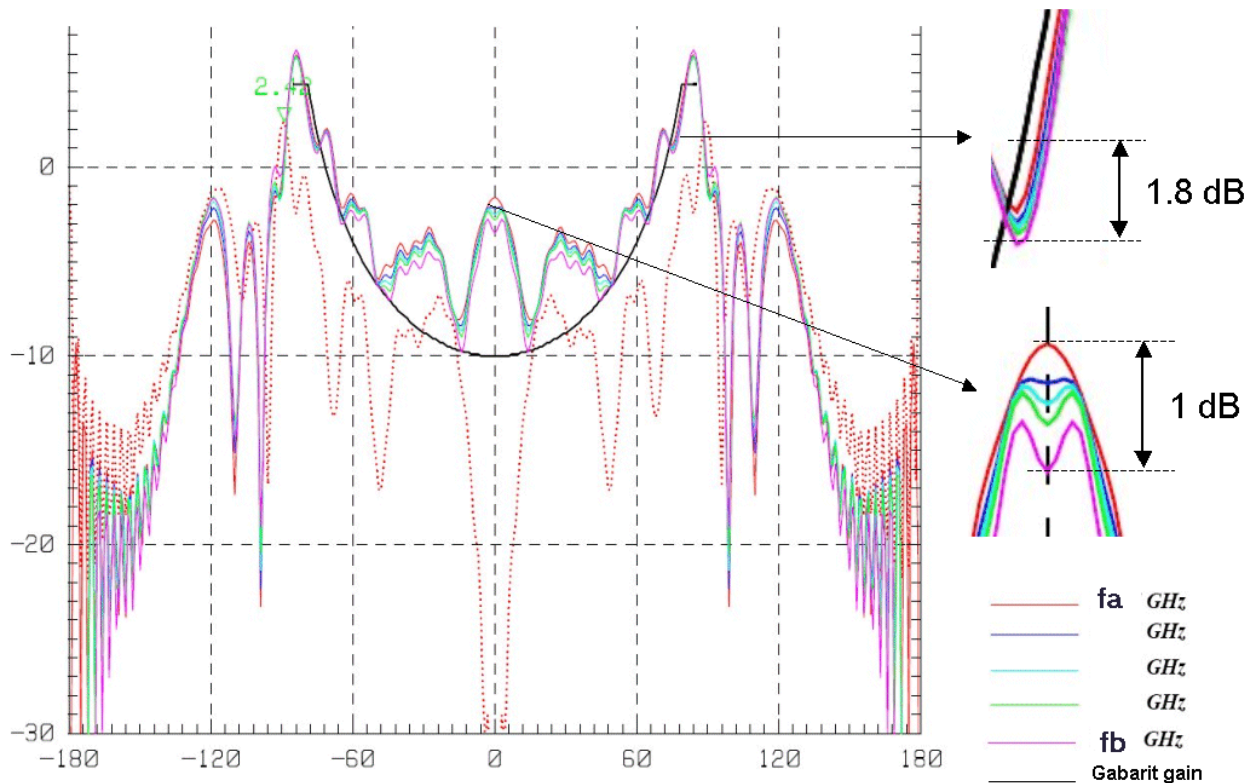
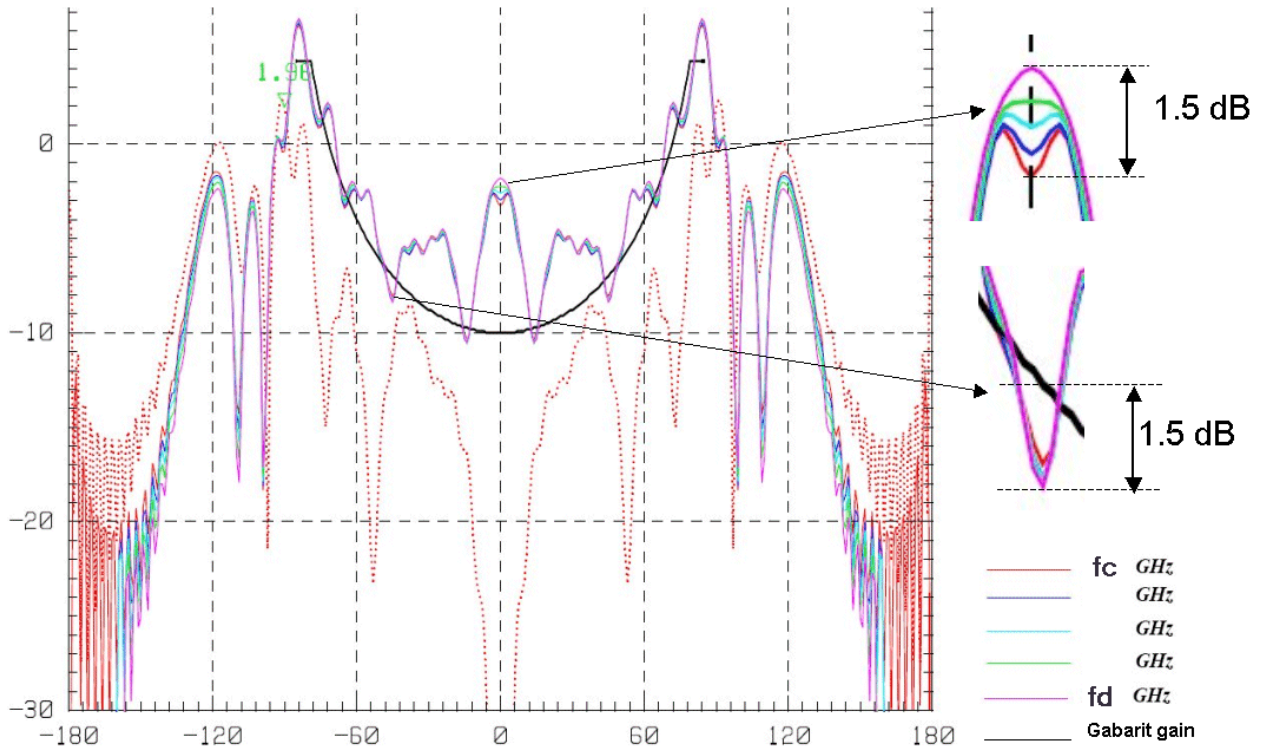


Figure 15 : Simulation de diagramme, bande basse

Antenne bord iso puissance pour nœud de communications aéroporté

Figure 16 : Simulation de diagramme, bande haute

Pour la bande basse, la spécification de dispersion en fréquence est respectée, et l'écart négatif maximum entre le diagramme réel et le théorique est 1.8 dB.

Pour la bande haute, la dispersion maximale est 1.5 dB, sur une très petite ouverture, et l'écart négatif maximum entre le diagramme réel et le théorique est 1.5 dB.

4.1.4 Réalisation mécanique

La structure est réalisée en aluminium, avec un poids de 10.9 kg. La précision d'usinage est 3.5/100 mm.

4.2 Mesure de l'antenne

L'antenne a été testée en chambre anéchoïde chez France Telecom R&D, avec la techniques des champs proches sphériques.



Figure 17 : Antenne en chambre anéchoïde

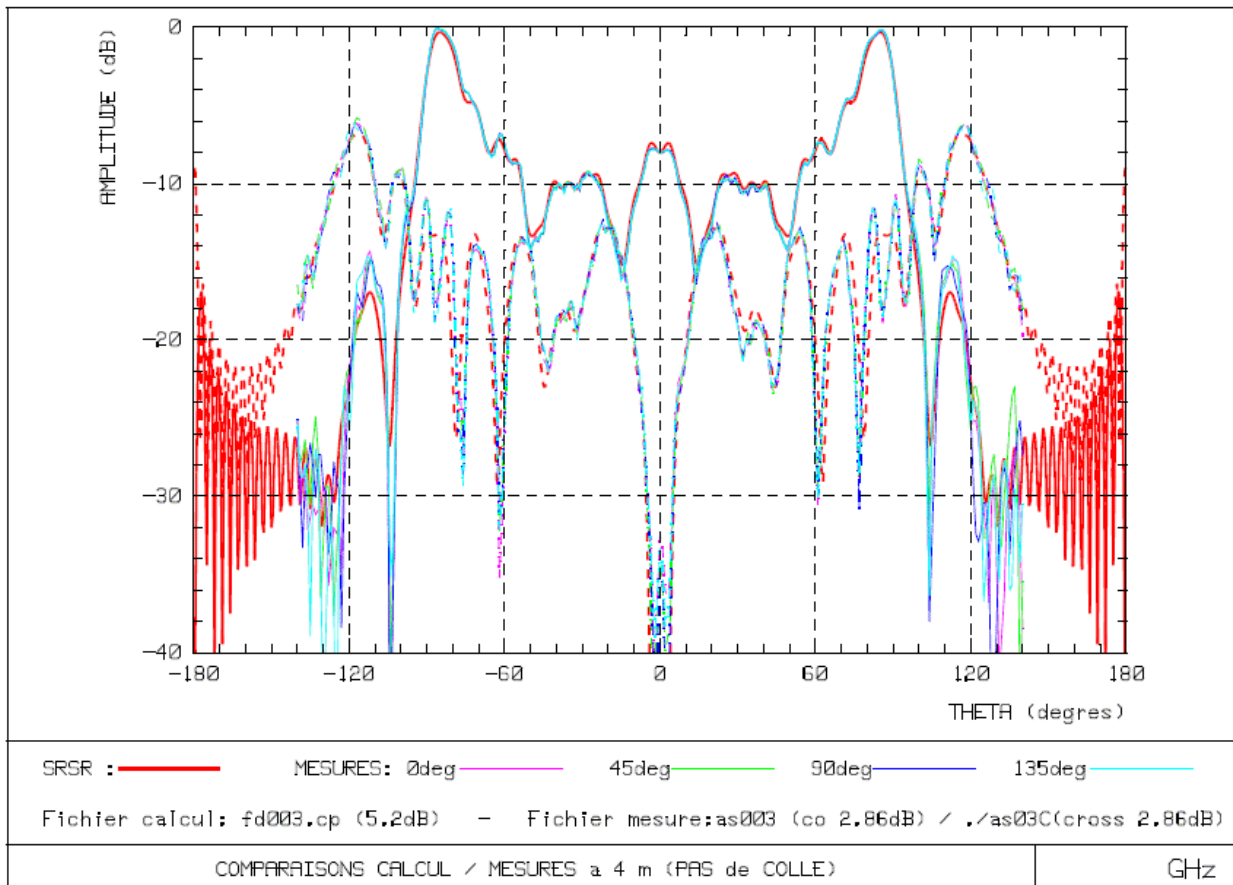


Figure 18 : Mesures de diagramme en milieu de bande basse

Antenne bord iso puissance pour nœud de communications aéroporté

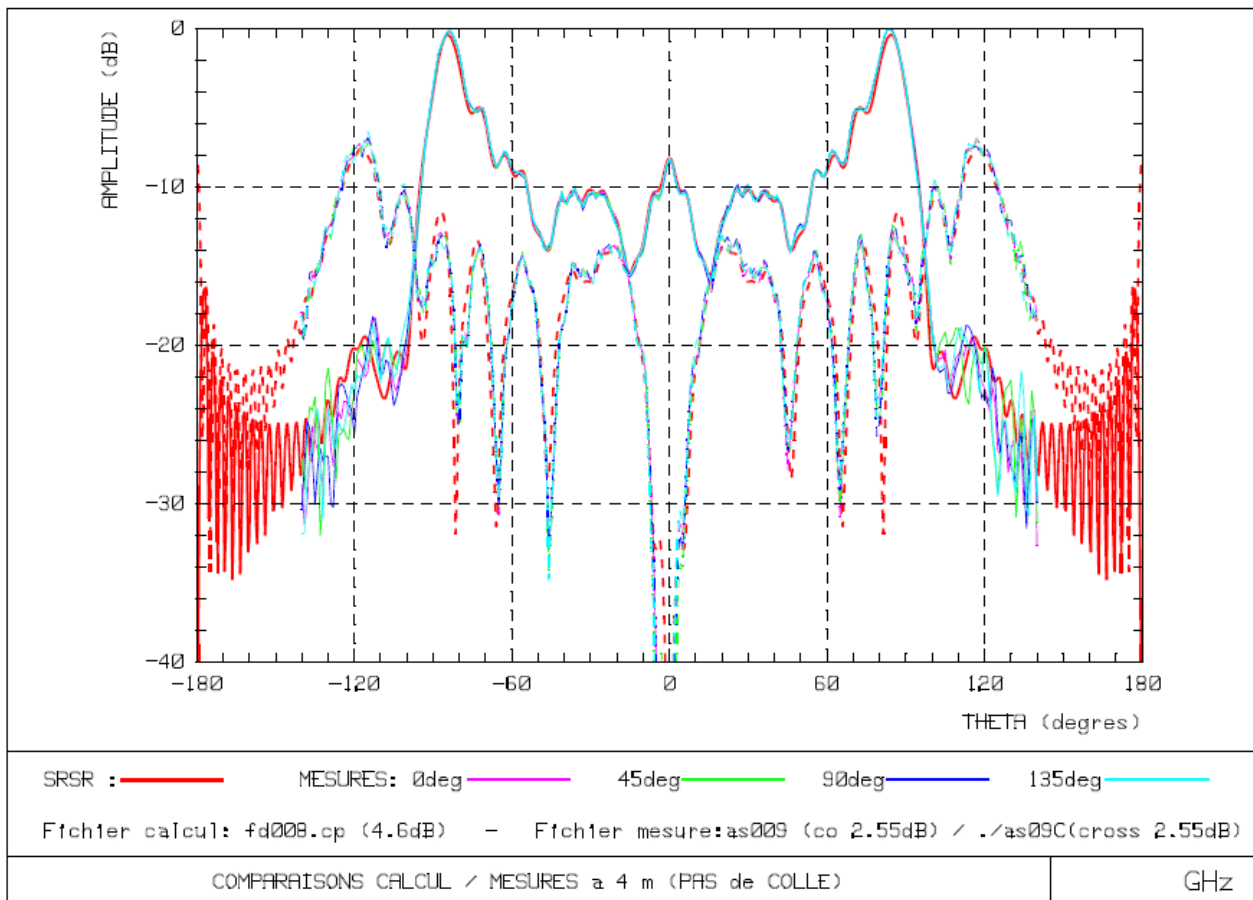


Figure 19 : Mesures de diagramme en milieu de bande haute

Chaque graphique présente les mesures du diagramme dans 4 directions (0, 45, 90 et 135 °), plus une comparaison avec la simulation (en rouge). On a un diagramme pour la liaison montante, et un pour la liaison descendante.

On peut voir que l'antenne est parfaitement symétrique (même courbe dans les 4 plans), et que les simulations SRSR sont très précises (moins de 0.4 dB cas pire, et 0dB sur plus de 85 % de l'ouverture)

L'antenne réalisée est donc très proche des spécifications, à l'exception des zones très réduites, et avec une influence minime sur les performances.

5.0 CONCLUSION

Les opérations de réseau infocentré (NCO) ont créé de nouvelles contraintes, concernant l'adaptabilité à l'environnement, la sécurité et la qualité de service. Ces dernières ont une grande influence sur la conception des nouveaux systèmes de communication, à tous les niveaux. L'exemple de l'antenne bord du NCA illustre parfaitement ceci : les usuelles antennes omnidirectionnelles ont été remplacées par une antenne spécifique iso puissance, qui optimise la qualité de service sur l'ensemble de la zone de couverture, assurant des communications sécurisées et s'adaptant aux contraintes de mobilité et pouvant par conséquent proposer ce service n'importe où, sans aucune infrastructures.

Antenne bord iso puissance pour nœud de communications aéroporté

Tous ces besoins sont parfaitement respectés par l'antenne de France Telecom R&D. Elle sera utilisée dès mi octobre 2006 pour les démonstrations en vol du NCA, à Tarbes.



Fig 20 : antenne sous avion

6.0 REFERENCES

- [1] Conception d'une antenne à diagramme cosécanté en bande Ku – P Brachat – France TELECOM R&D
- [2] Antenne bord KU aéroportée - Dimensionnement du prototype radioélectrique P.Brachat, R.Bills, Ch. Sabatier – France TELECOM R&D
- [3] Antenne bord KU aéroportée – Caractéristiques du modèle de vol n°3 – C.Sabatier, E.Seguenot - France TELECOM R&D

Antenne bord iso puissance pour nœud de communications aéroporté

