

L1 Rapport de performances simulées

Date : 09/02/2024	Révision : v2.0
Projet ou contrat concerné : DERAPOD	Code projet :
N / Réf. : DERAPOD_L1_v2	V / Réf :

Participants :	Serge BORIES, Olivier CLAUZIER				
	Nom	Fonction	Entité	Date	Signature
Rédacteur(s) :	S. Bories	Ingénieur R&D	CEA	09/02/24	
Vérificateur(s)	Ch. Delaveaud	Chef de laboratoire	CEA	09/02/24	
Approbateur(s)	Ch. Delaveaud	Chef de laboratoire	CEA	09/02/24	
Liste de diffusion	Frédéric Sève (CEA), Marc Houry (Avantix) , Philippe Charton (Avantix)				

DIFFUSION RESTREINTE

HISTORIQUE

Objet des modifications	Date	Version
Version initiale	05/01/2024	V1.0
Ajout d'un paragraphe 4.6 sur analyses de BCR par secteur angulaire	09/02/2024	V2.0

RESUME

Ce rapport présente les résultats de l'intégration d'un réseau antenne (RA) de goniométrie dans le contexte d'une nacelle aéronautique fixée sous aile. Les performances RF (impédance, gain) et de goniométrie (Borne de Cramer-Rao, ambiguïté) sont issues de simulation ElectroMagnétique (EM) 3D. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus dans le précédent projet ECLAIR.

MOTS-CLES

Réseau antenne de goniométrie, intégration nacelle sous aile

SOMMAIRE

1. Introduction.....	4
2. Configuration du réseau antenne.....	5
2.1. RA seul.....	5
2.2. RA sous aile	6
3. Performance du RA seul	7
3.1. Adaptation d'impédance	7
3.2. Couplage entre éléments.....	8
3.3. Efficacité de rayonnement	9
3.4. Diagrammes de gain réalisé	10
4. Performances du RA sous aile.....	11
4.1. Adaptation d'impédance	11
4.2. Couplage entre éléments.....	12
4.3. Efficacité de rayonnement du RA sous aile	13
4.4. Diagrammes de gain réalisé RA sous aile	13
4.5. Gain moyen réalisé RA sous aile.....	14
4.6. Borne de Cramer Rao (BCR) du RA.....	15
4.7. Ambiguïtés du RA sous aile	18
5. Comparaison au RA FH simulé (ECLAIR)	19
5.1. Comparaison des Gains moyen/minimum.....	19
5.2. Comparaison des précisions de goniométrie.....	20
Conclusion.....	21
Référence	22

Liste des acronymes

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
BB	Bande Basse
BH	Bande Haute
CE	Capteur Embarqué
FH	FlashHawk
HF	High Frequency
RA	Réseau Antennaire
VHF	Very High Frequency

1. Introduction

Le projet ECLAIR de démonstration d'un système de surveillance du spectre et de goniométrie 3D aéroporté a débouché sur le produit FlashHawk (FH) d'Avantix dont le réseau antenne possède un facteur de forme cylindrique de diamètre 80 cm par 50 cm de hauteur. Ce dernier est prévu pour être fixé sous le fuselage de différents porteurs. Dans le projet DERAPOD, l'objectif est d'intégrer l'ensemble du système dont un réseau antenne équivalent dans une nacelle (ou pod) se fixant sous l'aile d'un porteur à voilure fixe. Les nouvelles contraintes aéronautiques (notamment de trainée) imposent deux modifications importantes. La première concerne le facteur de forme du RA désormais bien moins large mais plus long. La seconde concerne le contexte métallique immédiat qui est bien moins contraint dans le cas de la nacelle (aile à 25 cm au-dessus du RA) par rapport au scénario d'intégration sous le fuselage (fuselage à 5 cm derrière le RA).

Ce rapport présente les résultats de l'étude de dérisquage de l'intégration du réseau antenne de goniométrie dans la nacelle proposée par Avantix. Il détaille d'abord la configuration géométrique des différents éléments rayonnants ainsi que le contexte du porteur (chapitre 2). Puis il présente les principales métriques de performances d'antennes et de goniométries sans (chapitre 3) et avec le contexte du porteur (chapitre 4). Enfin une comparaison de ces performances simulées, est menée avec les performances simulées du précédent RA ECLAIR sous fuselage de DA42.

2. Configuration du réseau antennaire

2.1. RA seul

La géométrie de la nacelle est fournie par Avantix. Ces dimensions ont évolué au tiers du projet (largeur constante et +30% sur la longueur). Il peut être assimilé à une ellipsoïde horizontale de longueur environ 2.5 m, de largeur 0.56 m et de hauteur 0.39 m, Figure 1. Pour tenir compte des marges et zone d'arrondis, le volume exploité par le RA et le capteur embarqué est cependant réduit à $1.92 \times 0.44 \times 0.34 \text{ m}^3$ (zone verte).

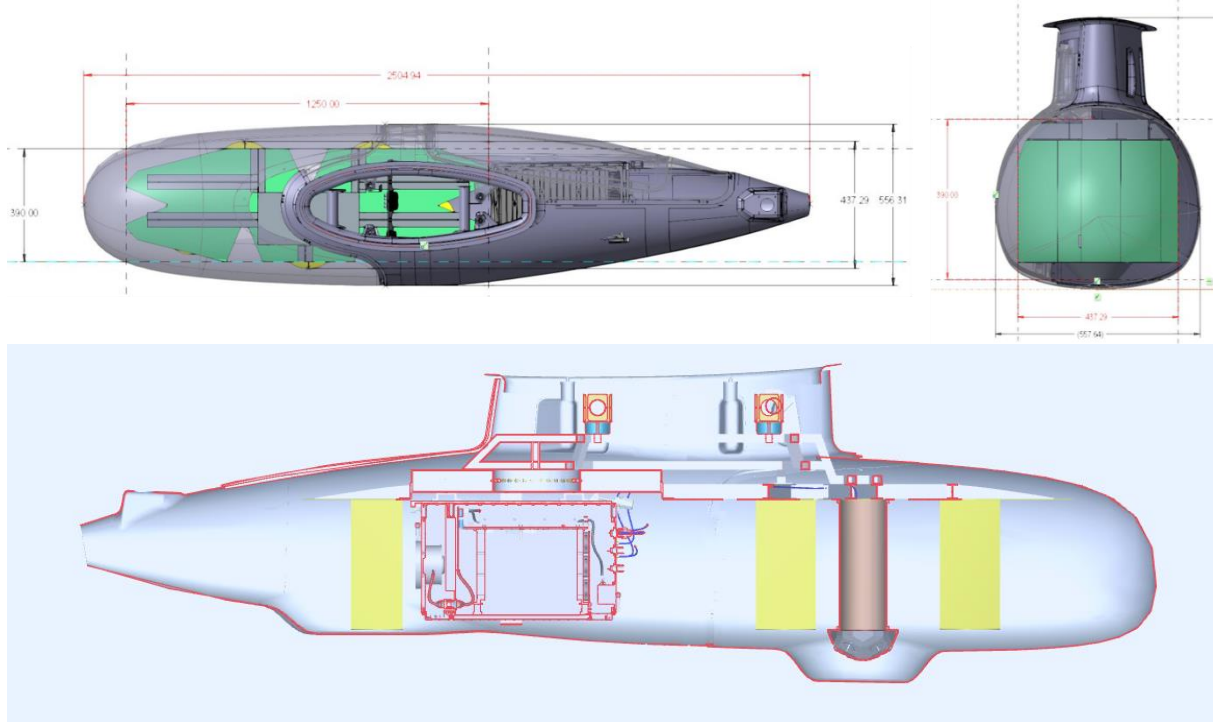


Figure 1 Représentation de la nacelle et de ses dimensions (en haut), Coupe transversale de la mise à jour de la géométrie garantissant une hauteur identique pour les 5 monopoles (en bas)

Par rapport à la configuration FlashHawk, le capteur embarqué est intégré entre les antennes (bloc rectangulaire couleur kaki, Figure 2). Pour couvrir la bande de fréquence dite basse BB (30~800 MHz), le RA comporte cinq antennes monopoles large bande à polarisation majoritairement verticale et cinq antennes fentes large bande à polarisation majoritairement horizontale. La bande de fréquence haute BH (~800- 3000 MHz) est couverte via un sous-réseau, équivalent à celui du FH, fixé sur un pylône vertical (cylindre et demi sphere couleur kaki, Figure 2).

Plusieurs configurations des positions des éléments BB ont été étudiées. Celle choisie est le résultat d'un compromis entre écartement maximal des éléments rayonnants, pour minimiser le couplage entre antennes et augmenter l'ouverture du RA (résolution angulaire de goniométrie), et les contraintes d'implémentation notamment du capteur embarqué (position centrale sous les points d'ancrage de la nacelle).

Il en résulte la configuration suivante décrite en commençant par le nez de la nacelle, Figure 2. On trouve dans l'axe de la nacelle :

- une première fente (port d'antenne 1),
- puis deux monopoles (ports d'antenne 6 et 7) de chaque côté de la fente 1,
- puis une seconde fente (port 2) ouverte (côté fuselage),
- puis centré le pylône du réseau BH,
- puis une alternance fente (ouverte vers le saumon d'aile port 3), monopole (port 8), fente (port 4) et monopole (port 9) ce dernier étant positionné à seulement 5 cm de l'arrêt du CE ;
- enfin derrière le CE, on trouve le dernier monopole (port 10)
- et la dernière fente axiale (port 5).

La nomenclature des ports d'antenne est détaillée sur la Figure 3.

Tous les monopoles sont identiques de hauteur 30 cm, diamètre 20 cm. Toutes les fentes sont identiques de profondeur 35 cm. La surface occupée par les fentes a fait l'objet d'un compromis avec celle du plan de masse des monopoles. L'objectif visé (et partiellement atteint, optimisation non aboutie à ce stade de l'étude) a été une adaptation d'impédance (seuil à -1 dB) à partir de 100 MHz, soit 2.5 fois plus bas que dans le FH.

Il est important de rappeler les espacements inter-antennes (16 cm sur Ox (axial), 20 cm sur Oy (transversal) entre 2 monopoles consécutifs) pour les relier aux niveaux de couplage ; ainsi que les ouvertures de réseau axiale (156 cm) et transversale (20 cm) entre les monopoles 6 et 10 pour les relier à la précision de goniométrie. Par exemple dans le pire cas, 2 monopoles sont séparés de 20 cm ce qui correspond à $\lambda/2$ de la fréquence 750 MHz.

Les simulations EM tiennent compte du comportement conducteur du CE et du pylône BH. L'enveloppe de la nacelle est simulée par un diélectrique (équivalent EM d'un plastique type ABS).

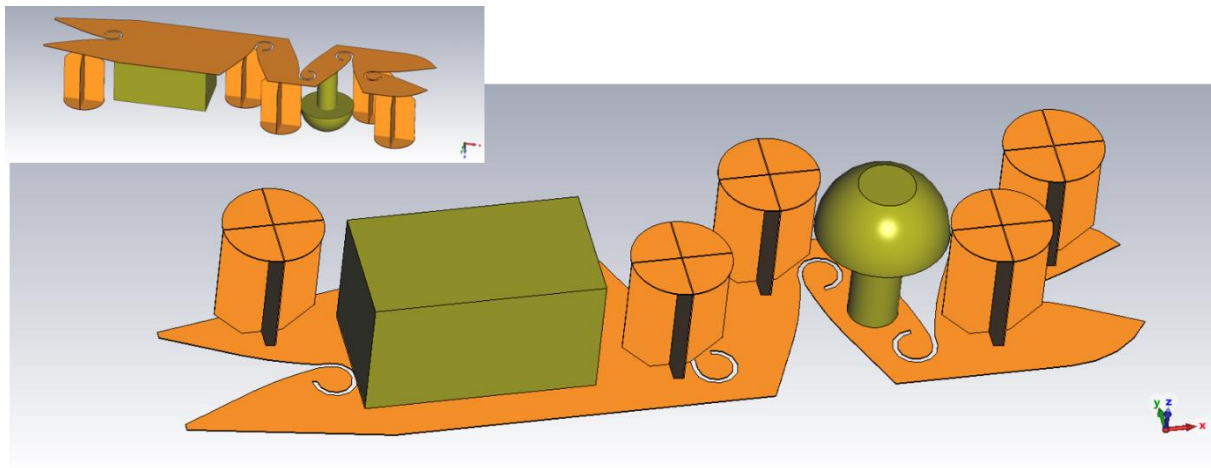


Figure 2 Représentation des éléments rayonnants du RA : 5 monopoles, 5 fentes dans le repère centré sur le pylône Bande Haute (BH) et orienté Ox dans l'axe de l'avion, Oy vers le fuselage et Oz vers le Nadir (vertical au sol). En encart, autre vue le RA

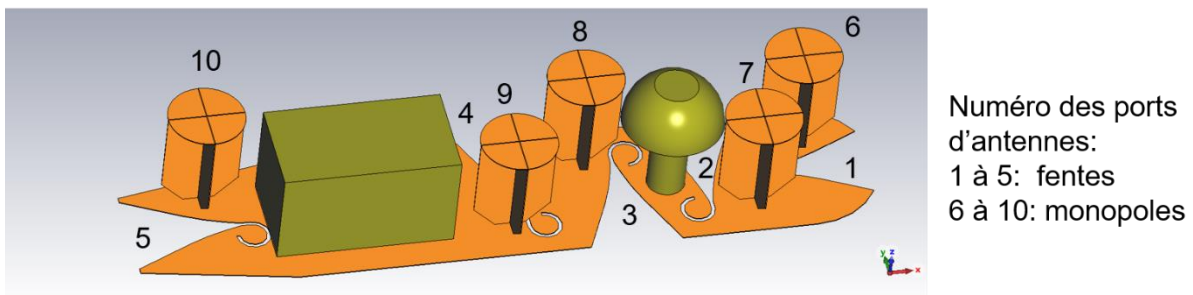


Figure 3 Nomenclature des ports d'antennes dans le RA

2.2. RA sous aile

Les performances du RA sont également estimées avec le contexte conducteur du drone Patroller de Safran (avec les dimensions des parties prises en compte dans la simulation EM):

- Pylônes d'ancrage (hauteur 30 cm)
- Aile (longueur 5.7m, largeur moyenne 1.2 m)
- Fuselage sans la dérive (longueur 6.6 m, diamètre moyen 60 cm)

La nacelle est fixée à 1.55 m du fuselage. Sur l'axe Oz, le centre du RA est à peu près à la même hauteur que l'axe du fuselage. La Figure 4 illustre quelques vues du RA intégré sous l'aile d'un Patroller tel qu'il a été simulé.

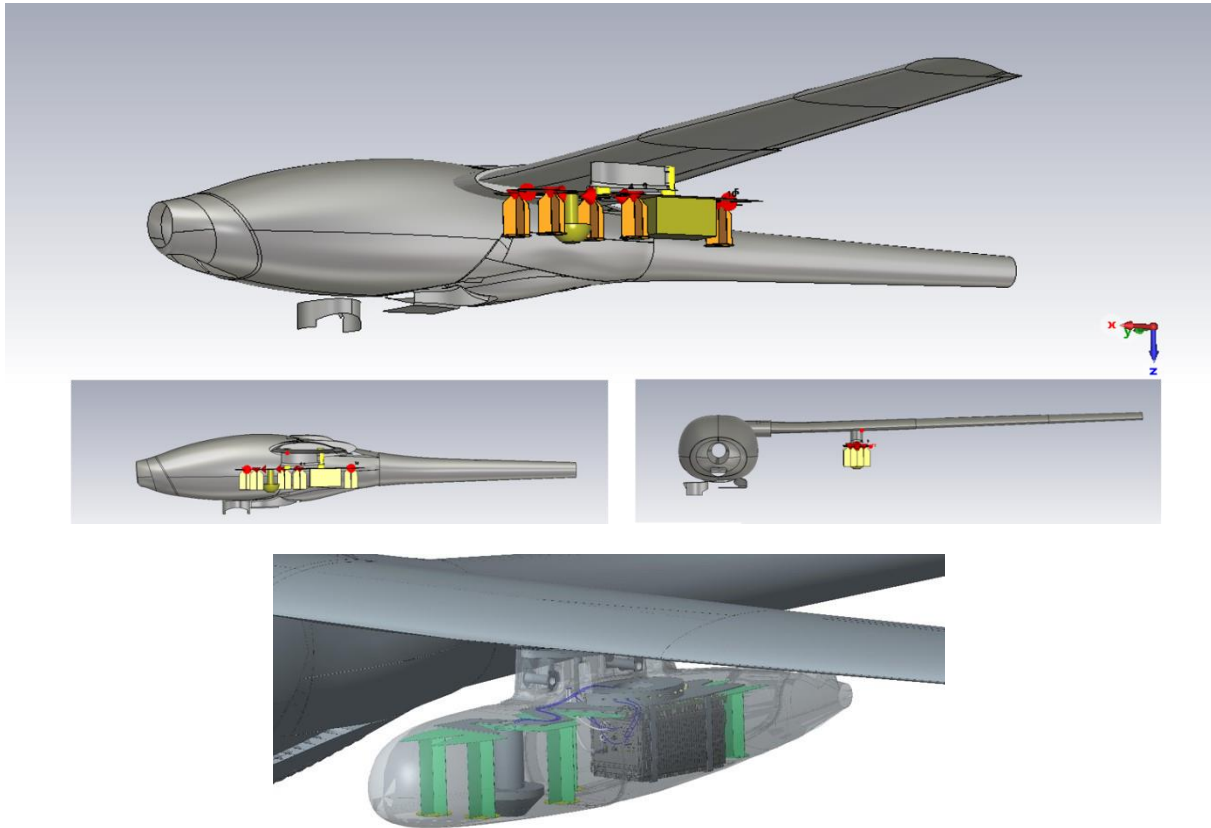


Figure 4 Intégration de la nacelle 25 cm sous l'aile babord d'un porteur (type drone Patroller de Safran)

3. Performance du RA seul

Les performances d'antennes du RA seul, c'est-à-dire sans le contexte de l'aile ni du fuselage, ont fait l'objet du Jalon 2 (08 Nov. 23), sont présentées dans ce chapitre 3. Les simulations de toutes les antennes sont calculées sur 30-800 MHz sous CST MWS (solveur temporel).

3.1. Adaptation d'impédance

Le coefficient de réflexion et l'impédance réduite sur 50Ω sur l'abaque de Smith, sont tracés sur la Figure 5 pour la fente 1 en rouge et le monopole 6 en orange dans le plan de référence des accès antennes. On observe un comportement large bande sur les deux antennes bien qu'à ce stade de l'étude les détails d'implémentation antennes ne sont pas inclus, ni la phase d'optimisation menée. Le coefficient de réflexion du monopole passe sous le seuil de -1 dB à partir de 43.8 MHz contre 85 MHz pour la fente. En particulier pour les fentes, l'adaptation est bien meilleure que celles du FH ; Ceci s'explique par une surface plus grande et un éloignement du contexte métallique (pylône et disque métallique) et des antennes. Une phase d'optimisation des impédances en UHF devra être menée ultérieurement par exemple pour réduire la forte désadaptation de la fente à 500 MHz.

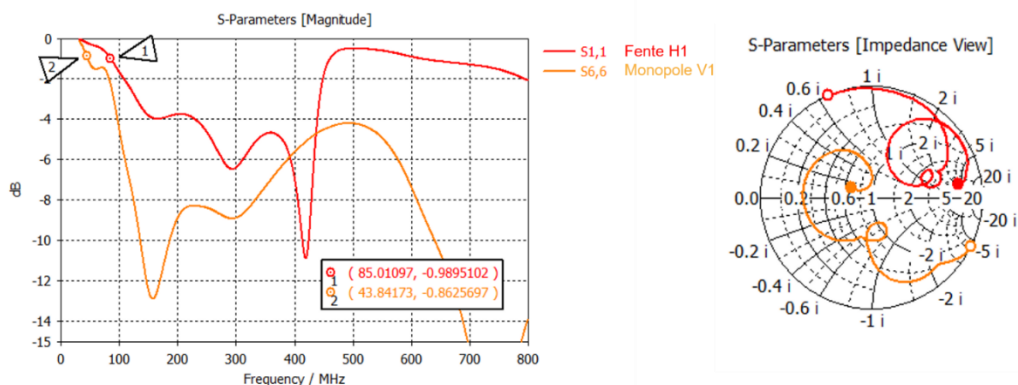


Figure 5 Coefficients de réflexion en fonction de la fréquence pour le monopole 1 et la fente 1 (gauche), représentation complexe sur l'abaque de Smith (à droite), fente en rouge et monopole en orange, plan de référence des accès antennes.

La perte de la symétrie cylindrique du RA FH et la présence du CE nous incite à contrôler l'hétérogénéité des performances des différents éléments rayonnants du RA actuel, Figure 6.

Globalement tous les monopoles possèdent le même comportement en impédance. Pour autant, on constate effectivement que les monopoles (6, 7, 8) les plus éloignés du CE sont les mieux adaptés en impédance sous 100 MHz. Inversement, les monopoles 9 et 10 qui entourent le CE, fonctionnent quelques dizaines de MHz plus haut en fréquence, Figure 6 gauche.

Concernant les fentes, on observe un comportement sensiblement différent expliqué par la position de la fente sur le plan de masse. Les deux fentes axiales (1 et 5) sont moins bien adaptées sous 100 MHz que les transversales (2 à 4) car elle « voit » moins de plan de masse. Comme évoqué, une forte désadaptation entre 450 et 600 MHz devra être traitée en optimisant le profil du début de l'ouverture ainsi qu'en optimisant l'excitation par ligne micro-ruban (même technique que sur le FH).

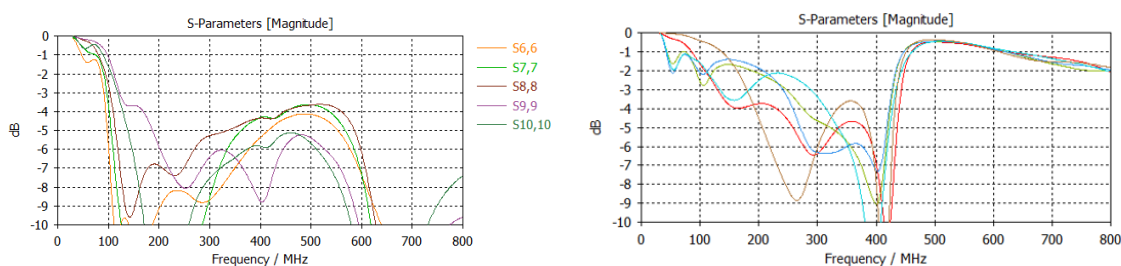


Figure 6 Coefficient de réflexion des 5 monopoles (à gauche) et des 5 fentes (à droite)

3.2. Couplage entre éléments

Le couplage entre éléments rayonnant renseigne sur la quantité d'énergie 'passant' d'une antenne à l'autre sans être rayonnée. Pour assurer une diversité des réponses d'antennes (en module, en phase et sur la polarisation), il est important que le couplage soit le plus faible possible ; sachant que ce dernier est lié à la distance électrique entre antennes et également au niveau d'adaptation d'impédance des deux antennes. Ce dernier point explique pourquoi le maximum de couplage n'apparaît pas forcément aux fréquences les plus basses mais plutôt entre 100 et 300 MHz, Figure 9.

Sur la Figure 9, on ne trace que les couplages les plus forts. Sur le graphique du haut, on trace les couplages entre une paire fente / monopole en proximité. Des niveaux supérieurs à -8 dB sont relevés entre la fente axiale et les deux premiers monopoles (6 et 7). On retrouve ce phénomène pour la paire à l'arrière du plan de masse (fente 5 et monopole 10). Le niveau est plus faible pour les fentes transversales sauf sur la paire (4/9), celle au plus près du CE, autour de 400 MHz. Sur le graphique du bas, on trace les couplages entre une paire de même éléments rayonnant. Même dans le pire cas de fentes voisines, le couplage est inférieur à -10 dB. En revanche entre 2 monopoles voisins, le niveau de couplage dépasse les -5 dB autour de 130 MHz.

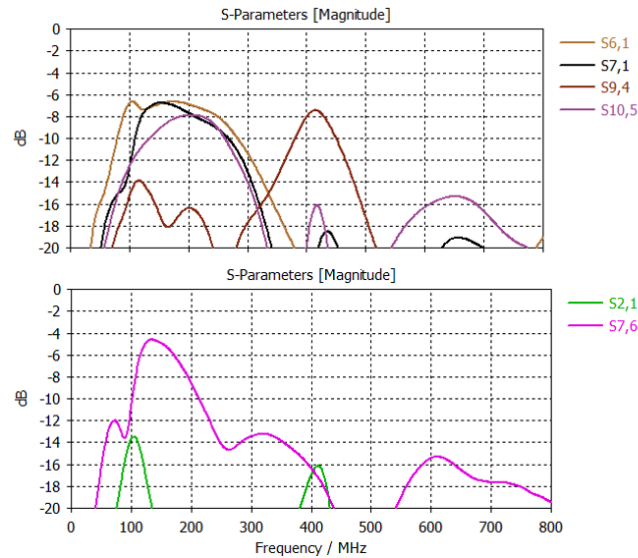


Figure 7 Couplages entre paire hétérogène d'éléments (fente / monopole) (en haut) et couplage entre paire homogène d'éléments (fente/fente ou monopole/monopoles) (en bas)

3.3. Efficacité de rayonnement

L'efficacité de rayonnement totale est analysée dans cette section. On précise qu'elle prend en compte l'adaptation d'impédance non optimisée à ce stade des travaux. La Figure 8 illustre celles des cinq monopoles (graphique du haut) et celles des cinq fentes (graphique du bas) en fonction de la fréquence. On constate que l'efficacité des monopoles positionnées en extrémité du plan de masse sont supérieures à -10 dB dès 50 MHz. Les monopoles du centre (6,7,8) ne bénéficient pas autant de toute la longueur du plan de masse et leur efficacité dépassent le seuil de -10 dB qu'à partir de 100 MHz. Sur le reste de la bande, l'efficacité des monopoles est supérieure à -5 dBi pour tous les monopoles. Pour les fentes, c'est l'inverse, on a vu que les fentes axiales (1 et 5) sont moins bien adaptées que les transversales ce qui se traduit par une efficacité totale dégradée (inférieure à -10 dB) en deçà de 150 MHz. Sur le reste de la bande, toutes les fentes ont la même efficacité qu'une optimisation d'impédance permettra de maintenir au-dessus de -5 dB.

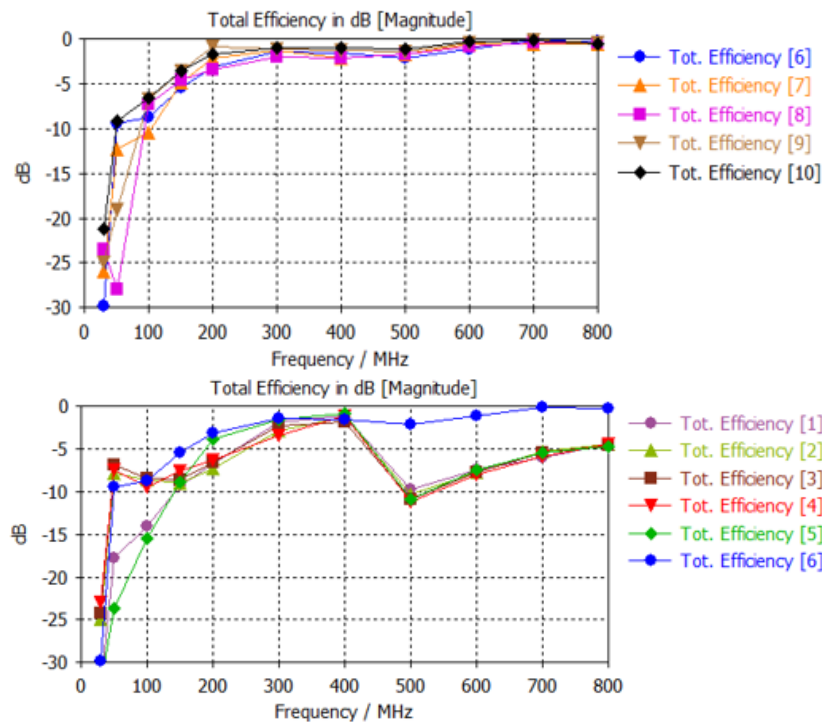


Figure 8 Efficacité de rayonnement totale pour les 5 monopoles (en haut) et les 5 fentes (en bas, avec un monopole en bleu pour la comparaison) en fonction de la fréquence

3.4. Diagrammes de gain réalisé

Pour chaque composante de polarisation, le diagramme 3D de gain (mais également de phase) des différents éléments du RA seul est tracé sur la Figure 9. Les cadres oranges illustrent les composantes de polarisation principale de chacune des antennes.

Une première analyse qui compare les différentes antennes de même nature, montre qu'aux deux fréquences, la position de l'antenne impacte significativement la forme du diagramme de rayonnement ; ce qui est bénéfique pour la goniométrie (tant que suffisamment d'antennes captent). Par exemple si on compare les deux monopoles (2 dernières colonnes), on observe que le diagramme est dépointé vers l'arrière dans le cas du monopole 1 (devant) et inversement pour le monopole 5 (derrière) par l'effet du plan de masse à 100 MHz. Alors qu'à 300 MHz on observe l'inverse (ie. Un dépointage vers l'avant du monopole 1).

Une seconde analyse en fréquence, permet de retrouver la tendance de l'efficacité de toutes les antennes qui augmente avec la fréquence.

Enfin si on compare les composantes de polarisation, on constate que les isolations entre polarisations ne sont pas si marquées. Les monopoles majoritairement sur u_θ montrent des niveaux de gain sur u_ϕ inférieurs d'environ 5 dB à 15 dB. Même remarque pour les fentes. Le point important est que pour une même antenne les diagrammes sont différents et souvent complémentaires (un maximum sur une composante correspond à un minimum de l'autre composante) sur les deux composantes de polarisation ce qui enrichie la diversité des réponses d'antennes pour la goniométrie et la catégorisation de la polarisation du signal reçu.

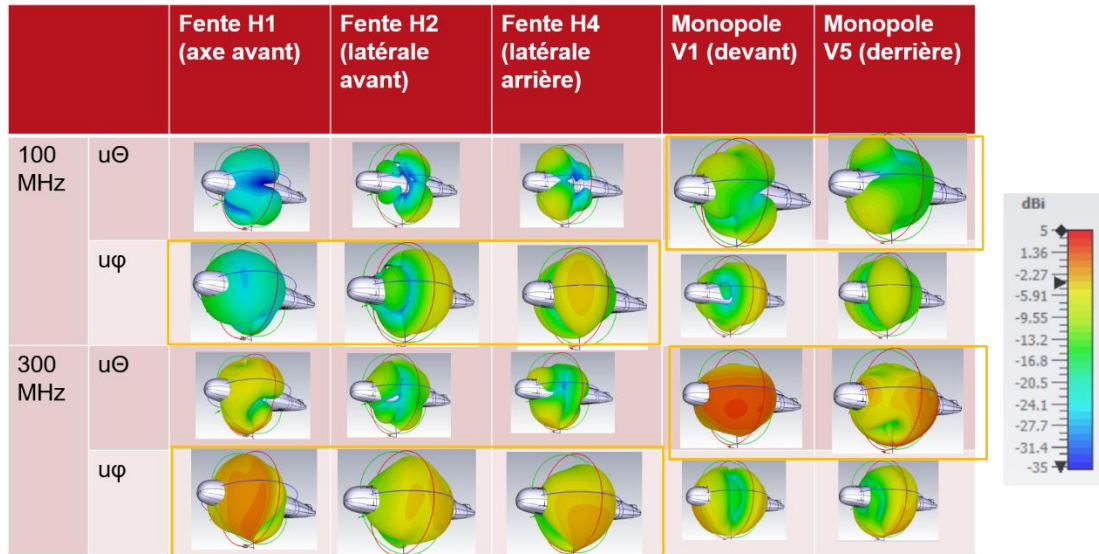


Figure 9 Diagrammes 3D de Gain réalisé pour 3 fentes (1^{ère}, 2^{nde} et 3^{ème} colonnes) et 2 monopoles (4^{ème} et 5^{ème} colonnes) et pour les 2 composantes de polarisation à deux fréquences (100 et 300 MHz)

4. Performances du RA sous aile

Dans ce chapitre 4, on analyse les performances d'antennes et de goniométrie du RA sous aile et avec le contexte métallique du fuselage décrit en section 2.2, en les comparant à la configuration RA seul décrite au chapitre précédent.

4.1. Adaptation d'impédance

En intégrant le RA sous l'aile, on ne constate pas de modifications majeures du comportement des coefficients de réflexion des antennes, monopoles comme fentes, Figure 10. Pour les monopoles, on note toutefois une légère dégradation de l'adaptation en basse fréquence (décalage de 100 à 150 MHz) pour les trois derniers monopoles (ceux qui sont sous l'aile, voir la vue de profil Figure 4). Pour les fentes, on observe également un impact important de couplage avec l'aile, plutôt bénéfique sur le niveau d'adaptation en deçà de 150 MHz pour les trois fentes (3 à 5) situées sous l'aile.

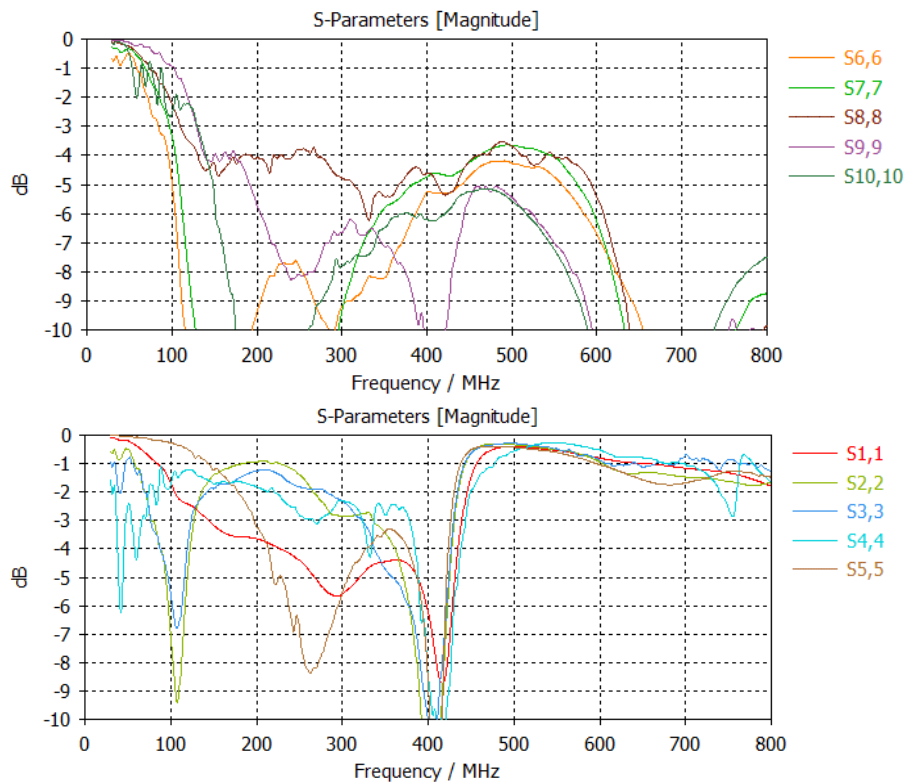


Figure 10 Coefficients de réflexion des monopoles (en haut) et des fentes (en bas) pour un RA sous aile

4.2. Couplage entre éléments

On ne constate pas de modifications sur les niveaux de couplage par rapport à la configuration RA seul, Figure 11.

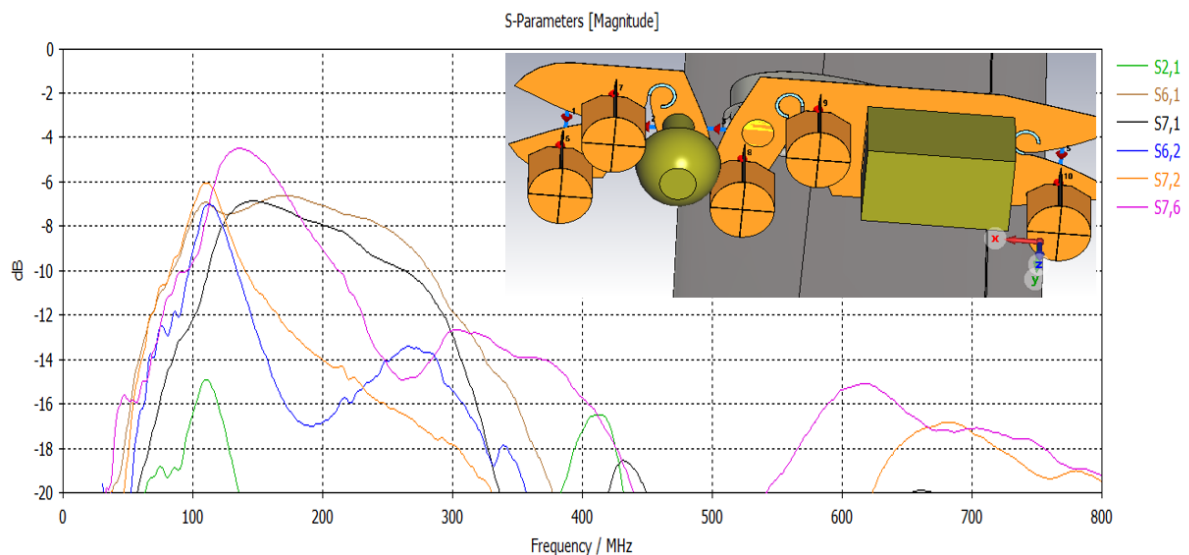


Figure 11 Couplages entre antennes en fonction de la fréquence pour le RA sous aile (à comparer avec RA seul, Figure 7)

4.3. Efficacité de rayonnement du RA sous aile

Les efficacités de rayonnement du RA sous aile sont tracées sur la Figure 12 (monopoles en haut et fentes en bas). Au-delà de 150 MHz, on ne constate pas d'impact de la présence de l'aile située 25 cm au-dessus du plan de masse du RA (soit $\lambda/8$ à 150 MHz).

Sur la bande 30 -150 MHz, on observe un impact sur le niveau d'efficacité liée à celle du niveau d'adaptation d'impédance (voir Figure 10). Pour les fréquences 30 et 50 MHz, cet impact est positif ou négatif suivant les monopoles considérés. Comme dans le cas du RA seul, les monopoles d'extrémité montrent de meilleurs niveaux plus haut dans cette bande.

Concernant les fentes, on observe une nette amélioration de l'adaptation en impédance des trois fentes transversales par couplage avec l'aile en deçà de 100 MHz; ce qui se traduit par une efficacité de rayonnement améliorée ou dégradée de 5 dB suivant la position de la fente transversale. En effet l'intrados de l'aile est suffisamment proche et large pour favoriser le couplage de courants horizontaux axiaux comme transverses. Les autres fentes axiales ne montrent pas d'impact de l'aile ; ni d'ailleurs au-delà de 150 MHz et ce pour toutes les fentes.

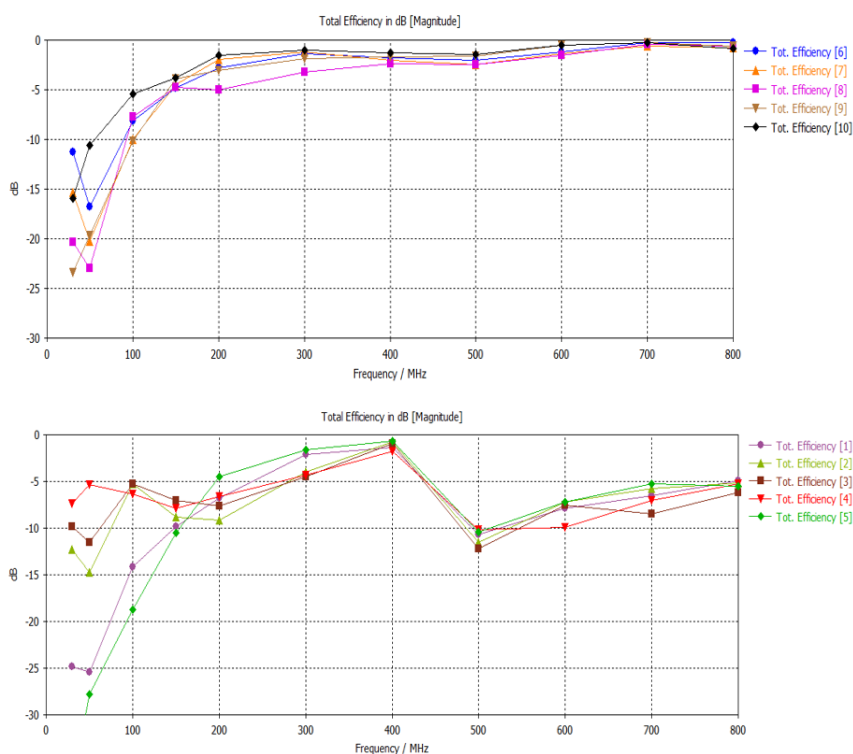


Figure 12 Efficacité de rayonnement totale pour les 5 monopoles (en haut) et les 5 fentes (en bas,) du RA sous aile, en fonction de la fréquence

4.4. Diagrammes de gain réalisé RA sous aile

La Figure 13 présente l'évolution fréquentielle des diagrammes de gain réalisé pour la fente 1 (composante u_ϕ) et le monopole 6 (composante u_θ) sur leur composante principale seulement. Sur les deux antennes, on retrouve l'augmentation du niveau de gain en fonction de la fréquence. Dès 100 MHz, les diagrammes typiques de la fente et du monopole sont formés et restent à peu près stable (mise à part la sur-modulation par le contexte et l'accroissement de la taille électrique de l'élément près). On peut relever une bonne orthogonalité des champs (même forme de diagramme, mais composantes orthogonales)

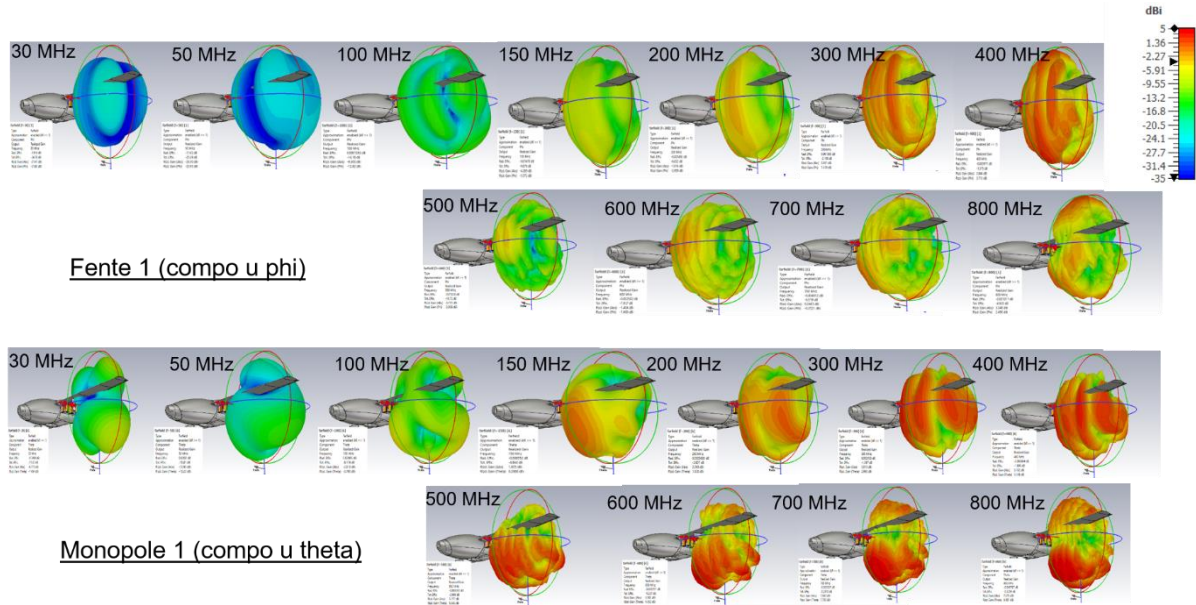


Figure 13 Evolution fréquentielle des diagrammes de gain réalisé 3D pour la fente 1 et le monopole 6 sur leur composante majoritaire, configuration du RA sous aile.

4.5. Gain moyen réalisé RA sous aile

Les définitions du gain moyen et minimal du RA sont reprises de l'annexe 1 du document de spécifications « DP076950STB001_00_Nouvau_RA » fourni par Avantix. On rappelle les deux définitions ci-dessous :

$$Gain_p \min(f) = \min_{(\theta, \varphi) \in Z_{GII}} \left[\max_N (G_{p,n}(\theta, \varphi, f)) \right]$$

$$Gain_p \text{ moy}(f) = \text{moyenne} \left[\max_N (G_{p,n}(\theta, \varphi, f)) \right]_{(\theta, \varphi) \in Z_{GII}}$$

Où l'indice n correspond à la nième antenne élémentaire du RA qui en compte N. Z_{GII} est l'angle solide en stéradian couvrant le domaine angulaire d'intérêt. p correspond à l'indice de la composante de polarisation. La zone Z_{GII} est décrite par :

- $0^\circ < \theta < 85^\circ$ et non 80° comme indiqué dans l'annexe 1
- $0^\circ < \varphi < 360^\circ$

Sur la Figure 14, on trace le gain moyen et minimal pour chacune des composantes. Globalement la tendance du gain moyen suit celle de l'efficacité en fonction de la fréquence. Le gain moyen est supérieur à -10 dBi sur les deux composantes. Le creux de gain sur la composante u_φ autour de 500 MHz devrait être comblé après optimisation de l'impédance des fentes à cette fréquence (désadaptation d'impédance significative).

Quant au gain minimal du RA sous aile, il est plus délicat à interpréter. Il est supérieur à -15 dBi à partir de 100 MHz sur les 2 composantes. Les valeurs sur les deux composantes sont identiques en dessous de 100 MHz.

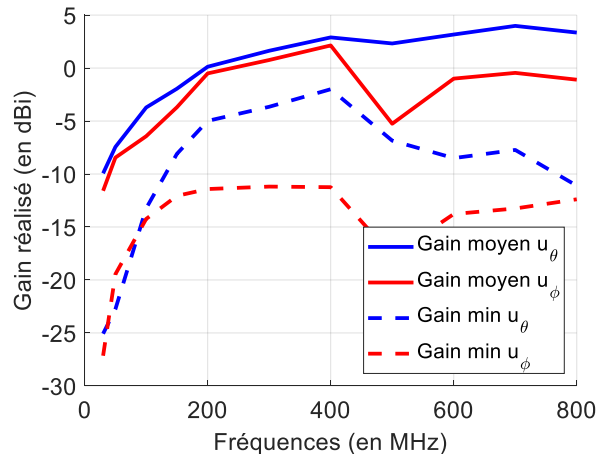


Figure 14 Calcul du gain moyen et minimum (d'après la définition indiquée dans [1]) en fonction de la fréquence et pour chaque composante de polarisation pour la configuration RA sous aile

4.6. Borne de Cramer Rao (BCR) du RA

Différentes bornes de Cramer-Rao (BCR) du RA seul sont comparées à celles du RA sous aile sur la Figure 15. Sa définition est reprise des livrables ECLAIR et de l'annexe 1 des spécifications du besoin du RA v2 Avantix [1]. On distingue la précision sur l'angle d'azimut (en bleu sur la Figure 15) et sur l'angle d'élévation (en rouge), ainsi qu'une erreur moyenne des 2 précédentes (définition identique à ECLAIR) (en noir)

Au dessus de 150 MHz, les précisions atteignables sont inférieures à 5° sur la composante u_θ et plutôt 15° sur u_ϕ pour le RA seul. Ces limites sont réduites à 3° pour la configuration RA sous aile. De manière générale, la précision sur l'azimut est meilleure que celle sur l'élévation. Ceci s'explique par les dimensions et donc les ouvertures du RA projetées sur l'horizontale et la verticale. Il existe toutefois une exception sous les 100 MHz, sur la BCR en élévation du RA sous aile qui est meilleure que la BCR en azimut.

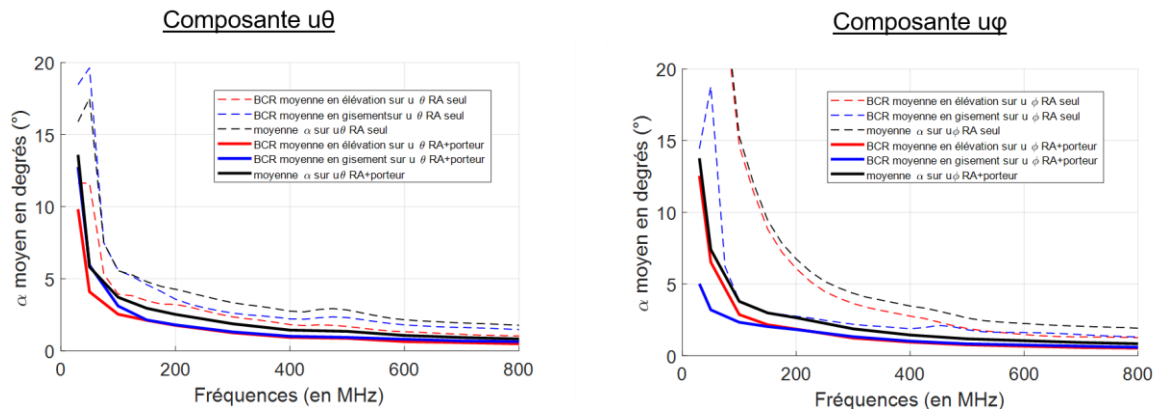


Figure 15 BCR moyenne sur la ZGII sur l'élévation (rouge) et sur l'azimut (bleu), ainsi que l'erreur moyenne (en noir) en fonction des configurations RA seul et RA sous aile et pour les 2 composantes de polarisation.

Cette représentation réduit les dimensions angulaires et ne permet plus d'observer la différence de précision de goniométrie notamment en fonction de l'azimut. C'est pourquoi on trace pour quelques points de fréquence la BCR en fonction des angles de la ZGII.

On observe bien pour les angles élévations proches l'horizon ($\theta=85^\circ$) une dégradation de la précision dans les directions axiales de l'azimut ($\phi=0^\circ$ et 180°) et inversement une amélioration dans les directions centrées sur $\phi=90^\circ$ et 270° . On lit environ un facteur 2 entre ces minima et maxima de BCR.

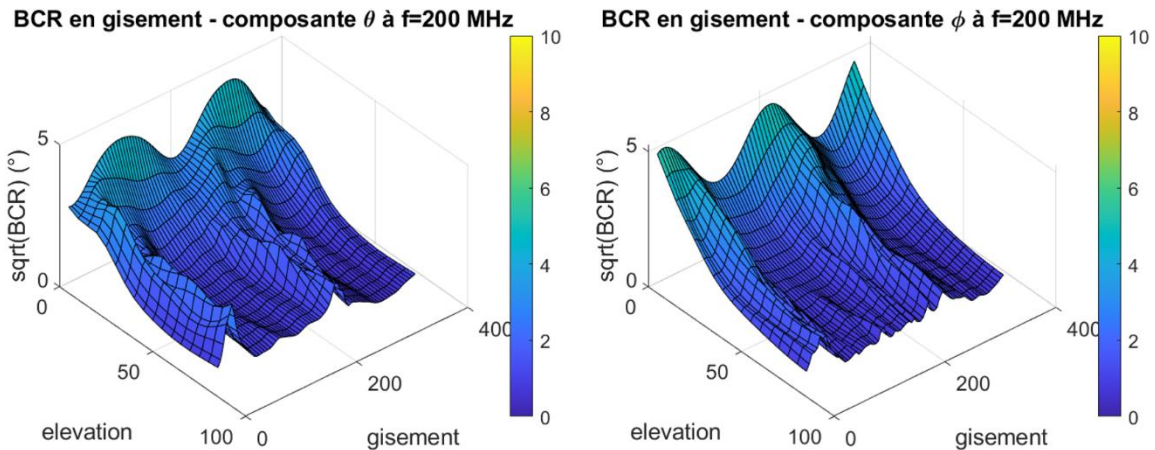


Figure 16 BCR du RA sous aile à 200 MHz pour les deux composantes de polarisation sur la demi-sphère de la ZGI

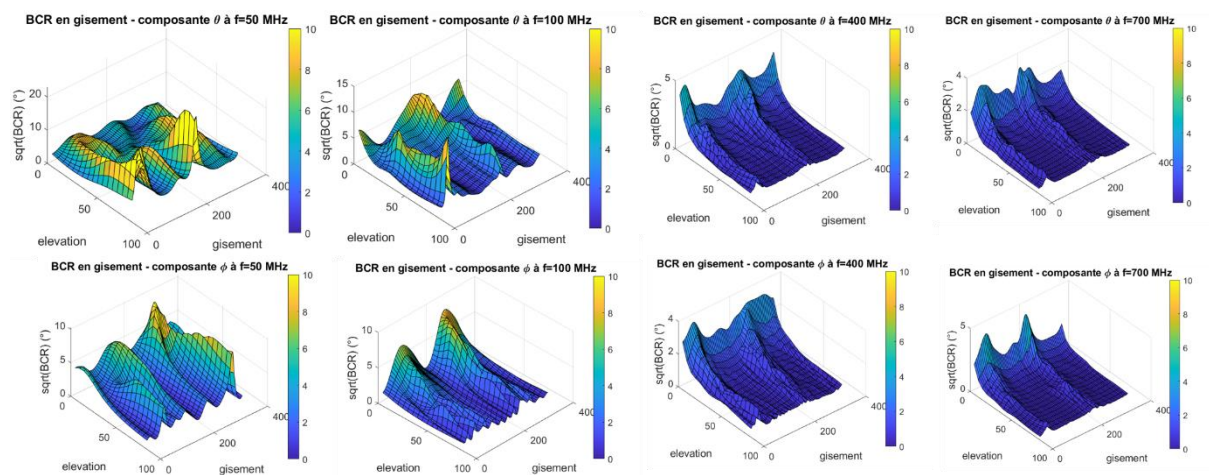


Figure 17 BCR sur l'azimut du RA sous aile : composante $u\theta$ (ligne du haut) et composante $u\phi$ (ligne du bas), pour quatre fréquences (en colonnes) 50, 100, 200 et 700 MHz

Analyses des BCRs par secteur d'azimuts (Paragraphe ajoutée suite à réunion de clôture du 25/01/2024)

Une analyse plus fine des performances de précision atteignable en fonction de secteurs angulaires en azimut (secteur avant, arrière, bâbord (zone dégagée) et tribord (zone fuselage)). Sur la Figure 18, sont tracées les BCR sur l'azimut moyennée sur ces quatre secteurs angulaires d'intérêt. On ne constate pas de différences majeures entre les précisions atteignables sur ces secteurs qu'elles que soient les fréquences et les composantes de polarisations (excepté en deçà de 100 MHz sur la composantes $u\phi$ où la précision est meilleur dans l'axe de l'avion (en fait sur la normale à l'aile du au fort couplage au contexte sur les fentes à ces fréquences). Pour comprendre ce résultat contre-intuitif, on détaille l'analyse comme suit.

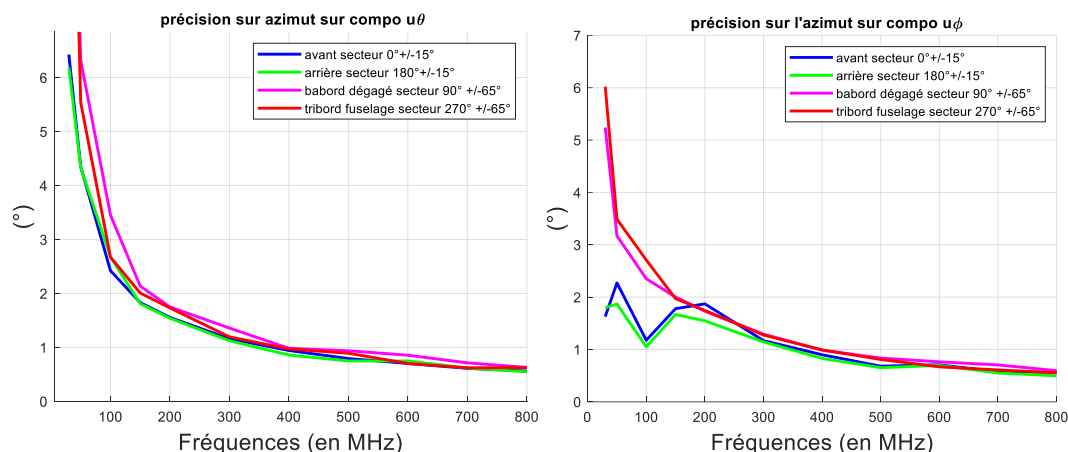


Figure 18 BCR sur l'azimut moyennée sur quatre secteurs angulaires d'intérêt (avant, arrière, babord et tribord) en fonction de la fréquence et pour chaque composante u_θ (à gauche) et u_ϕ (à droite)

On trace sur la Figure 19, une coupe moyennée sur l'élévation ; ce qui correspond à des coupes des Figure 17 et Figure 16 et ce pour les 10 fréquences entre 50 et 800 MHz et pour les différentes composantes sur les deux graphiques.

On aurait pu s'attendre à observer un maximum (imprécision sur la goniométrie en azimut) dans la direction où le RA présente sa plus petite ouverture ie devant et derrière. Or ces maximums sont plutôt observés à 45° et 225° (comme sur les Figure 17 et Figure 16). En fait un autre comportement prime sur ce dernier argument. Dans ces deux directions, deux paires de monopoles comme de fentes sont alignées (Figure 20) ; réduisant (de 5 à 3 par composante) le nombre d'éléments contribuant indépendamment à la précision de goniométrie. En conclusion avec ce nouveau RA, il y a donc bien une précision en azimut qui dépend de l'azimut mais les deux secteurs dégradés n'apparaissent pas forcément dans l'axe de la nacelle mais dans celui d'alignement des éléments rayonnants.

Pour la suite, il semble donc possible de contrôler la position de ces deux secteurs à précision dégradée (et toujours séparés de 180°) en jouant sur la position relative des éléments. De manière optimale, il faudrait éviter les périodicités spatiales entre les cinq éléments identiques mais ceci est contraint par le respect d'espacement suffisant entre eux pour réduire le couplage et favoriser des gains équivalents pour chaque élément du RA.

Ce phénomène est d'autant plus important que la fréquence décroît, jusqu'à ce que le couplage avec le contexte apparaisse progressivement à partir de 100 MHz et jusqu'à la fréquence la plus basse.

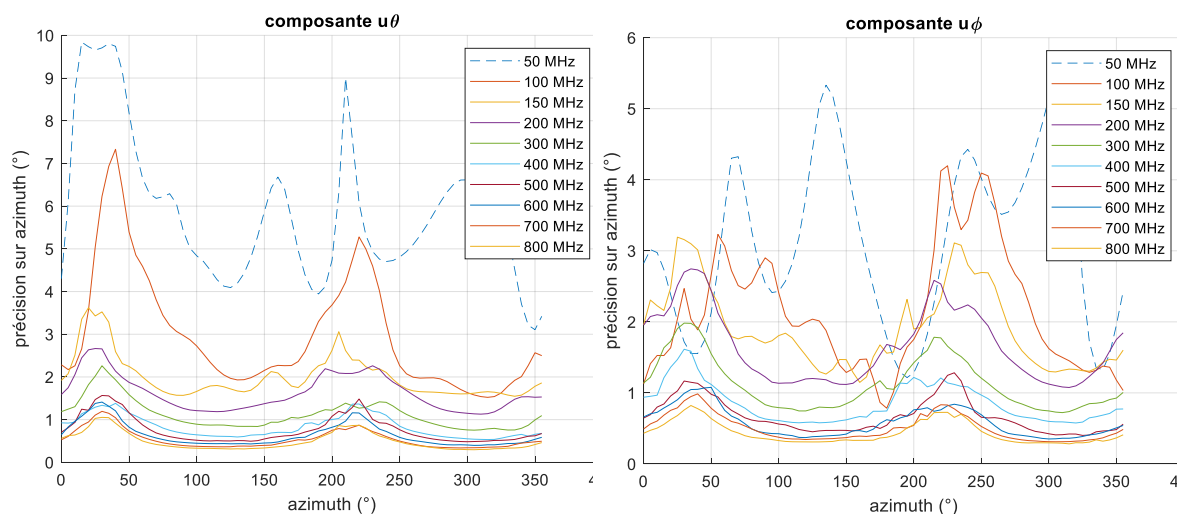


Figure 19 BCR sur l'azimut (moyennée sur les élévations entre 15° et 75°) en fonction de l'azimut et pour 10 fréquences entre 50 et 800 MHz, calculée sur les composantes u_θ (à gauche) et u_ϕ (à droite)

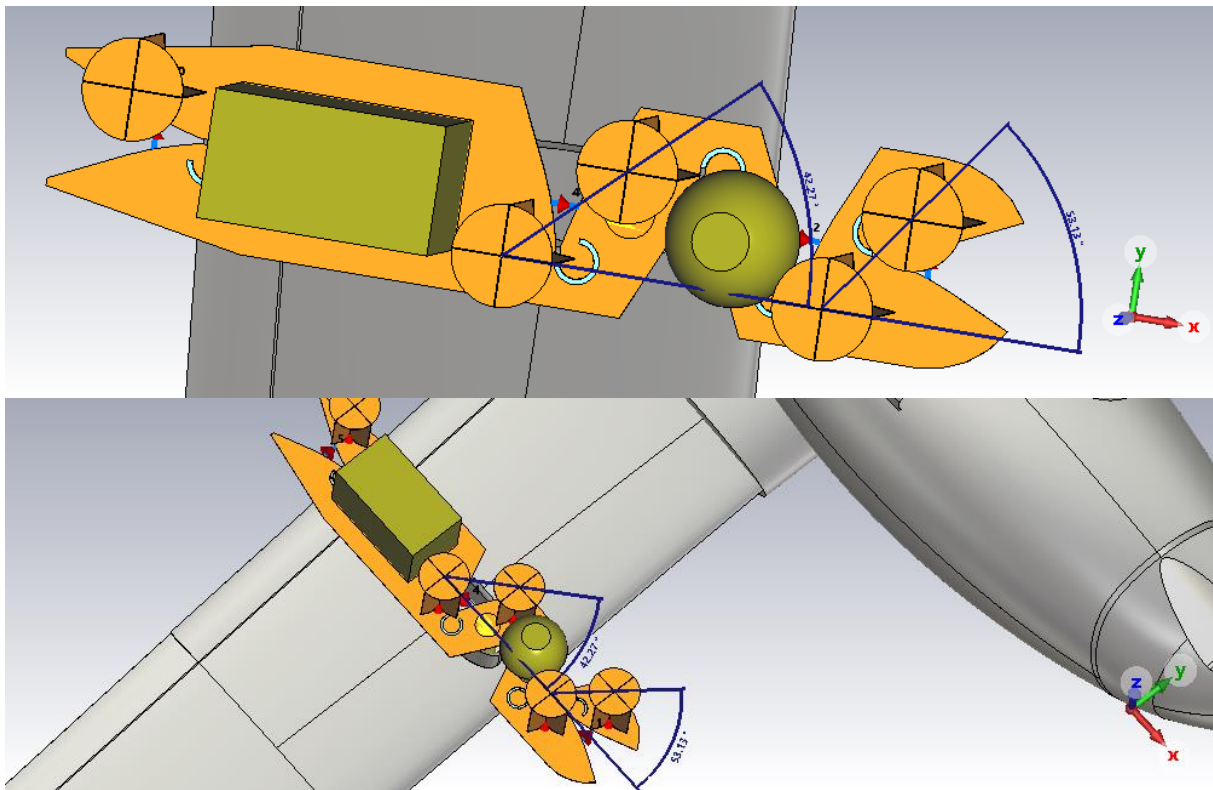


Figure 20 vues de dessous du RA soulignant les alignements des antennes (notamment sur 45° et son azimut opposé 225°)

4.7. Ambiguïtés du RA sous aile

Avec une plus grande longueur sur son axe et une distance inter-élément plus grande que sur le RA du FH, on doit vérifier l'absence d'ambiguïtés pouvant apparaître aux fréquences les plus élevées. On rappelle qu'il y a ambiguïté d'ordre 1, dès lors qu'il existe au moins une direction angulaire présentant une réponse de réseau ressemblant (à un seuil donné près) à une réponse de réseau dans une direction d'observation donnée. Ici le seuil de ressemblance est choisi à 0.99 (comme dans ECLAIR). Les graphiques d'ambiguïté 3D sont des projections (via un produit scalaire) des réponses du RA sur toute la ZGII sur la réponse dite d'observation (voir livrable ECLAIR L2). En faisant varier cette dernière on vérifie l'absence d'ambiguïté.

La Figure 21 illustre la recherche d'ambiguïté dans le plan horizontal ($\theta=85^\circ$), en faisant varier l'angle d'azimut sur 360° . Pour le RA seul ou sous aile, on n'observe aucune remontée significative (au-dessus de 0.99) en dehors de la diagonale. Au passage la largeur de cette diagonale permet d'estimer la précision de goniométrie.

Sur la Figure 22, on recherche sur toute la ZGII, en balayant tous les couples d'angles d'observations séquentiellement. On ne montre ici que le couple ($\varphi_{\text{obs}}=330^\circ$ $\theta_{\text{obs}}=55^\circ$) pour deux fréquences 100 et 800 MHz. Comme précédemment, on ne constate aucune seconde 'tâche' détachée de celle correspondant à la direction d'observation. Par ailleurs, on remarque qu'à la fréquence basse, cette tâche est bien plus étalée, indiquant que la résolution est dégradée par rapport à celle à 800 MHz.

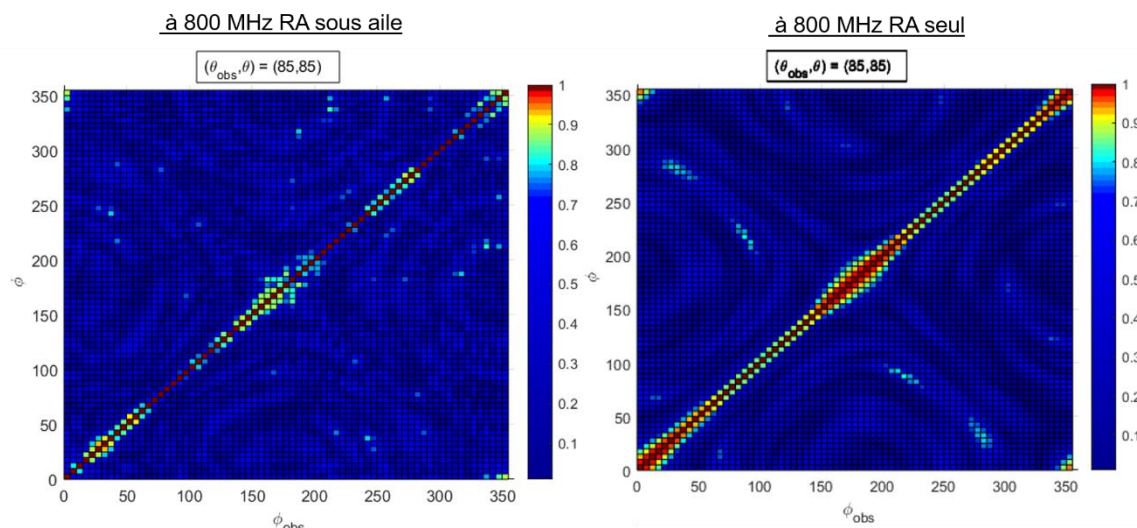


Figure 21 Vérification de l'absence d'ambiguïté à l'horizon ($\theta_{obs}=85^\circ$ et $\theta=85^\circ$) sur le pseudo-spectre du RA sous aile (gauche) comparée au RA seul (droite)

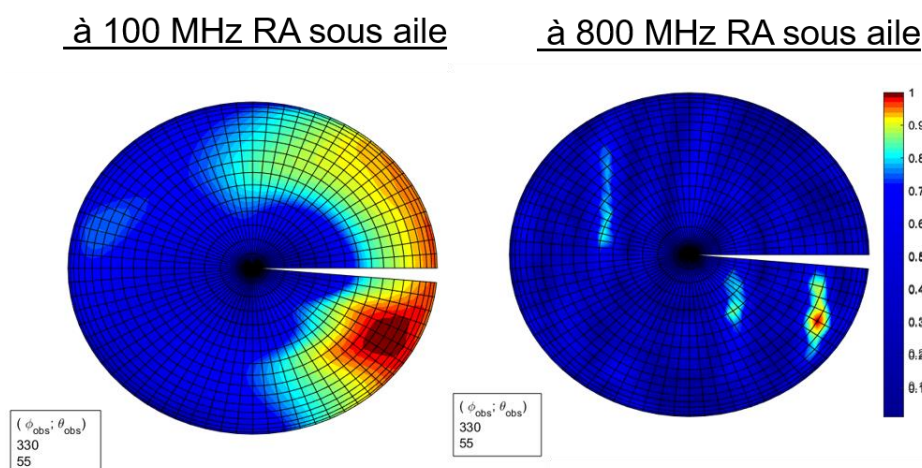


Figure 22 Représentation polaire des pseudo spectres pour la recherche d'ambiguïté entre la direction angulaire d'observation (encart en bas à gauche, ici 55° d'élévation et 330° d'azimut) et l'ensemble des autres directions angulaire de la ZGII, à 100 MHz à gauche et à 800 MHz à droite

5. Comparaison au RA FH simulé (ECLAIR)

A ce stade de l'étude, on compare les performances simulées du RA sous aile à celles du FH obtenu à partir des simulations du RA montés sous DA42 (ECLAIR).

5.1. Comparaison des Gains moyen/minimum

Les gains minimal et moyen du RA sont tracés sur la Figure 23. On peut alors comparer le nouveau RA sous aile et le précédent sous DA42.

Avant 100 MHz, le gain minimal (Figure 23 gauche) est similaire sur la composante u_θ (monopoles) et 5 dB meilleurs sur la composante u_ϕ (fentes). Entre 100 et 400 MHz, le gain minimal est meilleur de 5 dB en moyenne sur les deux composantes. Après 400 MHz, le gain minimal est plus faible que sur le FH mais reste supérieur à -10 dBi pour les monopoles. Pour les fentes, l'optimisation de l'impédance devrait conduire au même niveau supérieur à -10 dBi.

Concernant le gain moyen du RA (Figure 23 droite), l'amélioration (RA sous aile par rapport à celui du FH) est significative avant 100 MHz (+5 dB sur les monopoles et +10 dB sur les fentes). Cette

amélioration est d'environ +5 dB sur la bande 100-400 MHz. Les mêmes conclusions que précédemment peuvent être tirées sur la bande au-delà de 400 MHz.

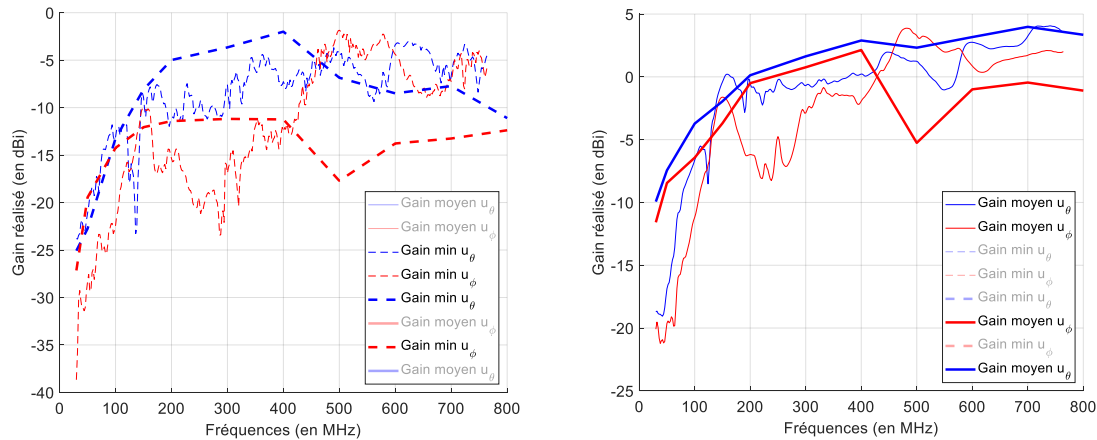


Figure 23 Comparaison des gains de RA minimal (à gauche) et moyen (à droite) pour le RA sous aile (trait gras) et le FH sous DA42 (trait fin).

5.2. Comparaison des précisions de goniométrie

Enfin sur la précision de goniométrie via l'analyse de la BCR que ce soit sur l'élévation ou l'azimut, on observe une amélioration sur le nouveau RA par rapport à celui du FH. Sur la Figure 24 gauche, on visualise à 400 MHz, les BCR en azimut pour toutes les directions angulaires. On note une hétérogénéité des précisions en azimut et la présence de dégradations de la BCR en azimut dans les directions de l'axe du RA qui ne sont pas présentes sur le RA FH. Ceci sur les deux composantes de polarisation.

Sur la Figure 24 droite, on visualise les BCR moyennées sur les directions de la ZGII pour les deux RA sous porteur. On constate une amélioration moyenne entre 50% et 66% quelle que soit la fréquence du RA sous aile par rapport au RA du FH.

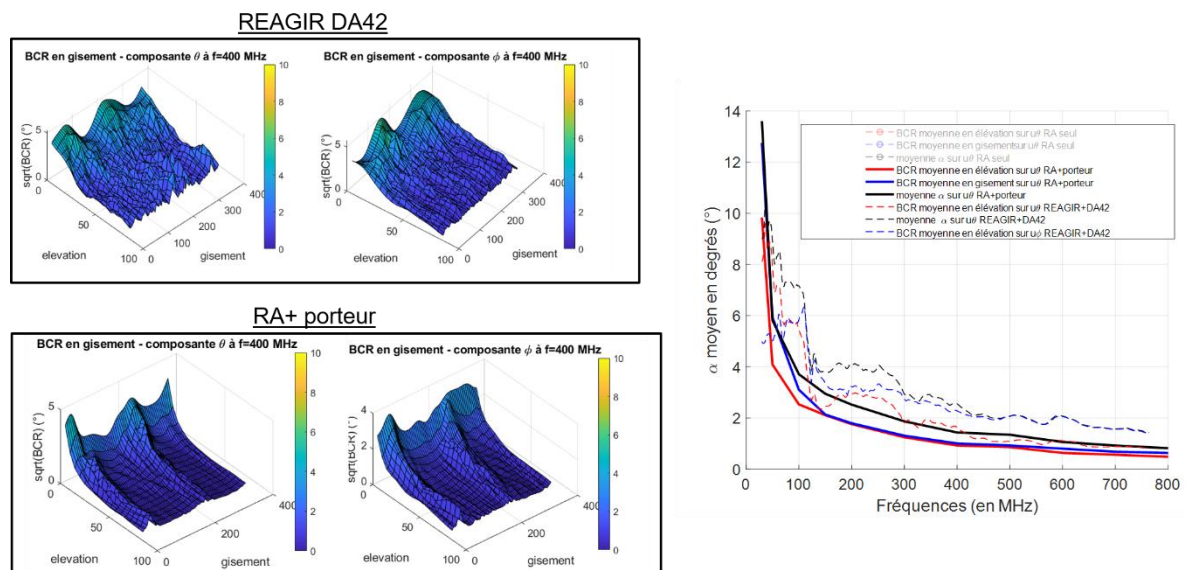


Figure 24 Comparaison des BCR à 400 MHz (à gauche) et moyenne (à droite) entre le RA sous aile et le RA du FH sous DA42.

Conclusion

Ce rapport présente les résultats de l'étude de dérisquage d'une nouvelle configuration de réseau antenne dérivé du RA FH. Le RA est intégré dans une nacelle sous aile et non directement sous le fuselage. Pour des raisons de trainée aéronautique, cette nouvelle configuration ne permet plus de conserver un RA de forme cylindrique mais impose plutôt une répartition étirée (plus longue mais moins large) des antennes le long de l'axe de la nacelle. En plus d'un plan de masse bien plus long pour les monopoles, un nouveau contexte métallique moins contraint et une augmentation de la surface des fentes permet une amélioration significative de leur performance (notamment en adaptation d'impédance) entre 30 et 200 MHz par rapport à la configuration FH.

Ce dernier point a une incidence bénéfique sur l'efficacité de rayonnement et le gain des antennes fentes. Pour les monopoles, les performances en rayonnement restent similaires. Cependant la présence de l'aile à 25 cm au-dessus du plan de masse du RA, induit une certaine disparité des performances d'antennes (et de leur réponse en module et phase).

Pour valider l'impact de cette hétérogénéité, les performances de goniométrie (Gain moyen et minimal de RA, BCR et ambiguïté) sont calculées puis comparées au cas FH sous DA42. On conclut à une amélioration significative sur la bande de fréquence située sous 100 MHz et aucune ambiguïté n'a été relevée.

C'est donc avec une certaine confiance que la suite de ce projet de RA intégré dans une nacelle avec le CE peut être engagée quant aux performances radio et de goniométrie. On relèvera cependant les points suivants de vigilance et d'étude à mener. A cause de la proximité du CE au milieu du RA, certaines vérifications préliminaires sont à prévoir (impacts des câbles sur le monopole le plus proche, incertitude sur la table d'étalonnage). L'étude mécanique (statique et dynamique) est probablement plus complexe à cause des dimensions et masses plus importantes. Enfin une optimisation de l'impédance d'entrée des fentes devra être menée pour maintenir le gain des fentes au niveau de celui des monopoles dans la bande 400-700 MHz. Une amélioration de l'adaptation d'impédance des antennes monopole sera également envisagée.

Référence

[1] Avantix : Spécification Technique de Besoin du RESEAU ANTENNAIRE V2, DP076950STB001
Version 00 du 06/07/2023