

ORPB – Rapport 2020-01

Exploitation de mesures sur des transits de radio-sources pour la caractérisation de l'antenne PB8

Rédacteur : A. Gilloire – 29/02/2020 – révisé le 17/03/2020

Résumé

Des essais de transits réalisés en Août 2019 sur plusieurs radio-sources ont fourni des données qui ont permis d'estimer des caractéristiques importantes de l'antenne PB8 à 4000 MHz. On a ainsi obtenu une estimation de la forme et de la largeur du lobe principal de l'antenne et des informations sur les premiers lobes secondaires, et une estimation du rapport G/T et de la température de bruit de la chaîne de réception. Ces résultats sont présentés et discutés. Pour mémoire, la détermination théorique du rapport G/T est développée dans une annexe. Les principales références bibliographiques utilisées sont listées à la fin du rapport.

1. But de l'étude présentée

On dispose d'assez peu d'informations pour caractériser l'antenne PB8.

Une « fiche d'antenne » établie en Septembre 1995 par la DTRE donne les caractéristiques suivantes, résumées dans le tableau 1 :

	Bande passante (MHz)	Gain max. dans la bande* (dBi)	Température de bruit** (°K)
Emission	5925 - 6425	57	
Réception	3700 - 4200	53,5	107,2

* a priori vers le haut de la bande ** avec un LNA en tête donné pour 40°K

Tableau 1 : caractéristiques de l'antenne PB8 – Septembre 1995

Par ailleurs, la notice technique du constructeur décrivant la source d'illumination (voir extraits dans [1]) donne les informations suivantes:

	Bande passante (MHz)	Gain max. dans la bande* (dBi)	G/T* (dB)
Emission	5850 - 6425	$56 + 20 \log F/6$ (F en GHz)	
Réception	3625- 4200	53,5	$33,3 + 20 \log F/4$ (F en GHz)

* avec un système de réception de température équivalente $\leq 60^\circ K$

Tableau 2 : caractéristiques de l'antenne PB8 – données constructeur

La notice donne aussi des indications sur la qualité des polarisations circulaires droite et gauche, sur la variation du gain avec la fréquence, et un gabarit du diagramme de directivité.

Par ailleurs, J. P. Blot a fourni des informations complémentaires, concernant la conformation du réflecteur secondaire pour une illumination optimale et le facteur d'efficacité associé.

Enfin, des données dimensionnelles sur la géométrie des réflecteurs permettent le calcul du diagramme de directivité et du gain théoriques.

Le but de l'étude est de vérifier et compléter ces caractéristiques en exploitant les données fournies par

des essais de transits sur des radio-sources. Il s'agit d'un travail préliminaire dont les résultats doivent être améliorés par de nouvelles données à collecter en 2020.

2. Transits de radio-sources

Les résultats présentés dans ce rapport ont été obtenus en Août 2019, dans le cadre du programme de développement du tracking de PB8. O. Boeffard a écrit un script (pb8_transit.py) permettant de positionner l'antenne pour réaliser des transits de différentes radio-sources et enregistrer le niveau du signal capté au cours du déplacement apparent de la source devant l'antenne.

Le script positionne l'antenne sur une direction de visée fixe censée se trouver sur la trajectoire apparente de l'objet, approximativement au milieu de la phase de transit choisie, puis enregistre le niveau du signal correspondant aux éphémérides courantes de la source au cours du transit. Le temps d'intégration pour obtenir ce niveau est par défaut de 2s (soit la durée de 4 mesures, à vérifier). La durée typique d'un transit est d'environ 300s, ce qui correspond à un peu plus de 600 points de mesure.

3. Radio-sources prises en compte pour l'étude

Les transits ont été réalisés sur des sources étendues : Lune et Soleil, et sur des sources « ponctuelles ». L'exploitation des données sur les sources étendues pose plusieurs problèmes : validité des hypothèses sur la distribution de radiance sur la surface de l'objet, stabilité de la radiance dans le temps (faible pour le Soleil : voir [2] par exemple, assez bonne pour la Lune), obtention du diagramme de directivité par déconvolution d'avec la fonction de distribution de radiance de l'objet. Ces problèmes sont évoqués et traités dans [3] par exemple, où on trouvera de nombreuses références pertinentes.

Trois radio-sources « ponctuelles » sont prises en compte dans ce rapport : deux rémanents de supernovae : Cassiopée A et Taurus A (« nébuleuse du Crabe »), et la radio-galaxie Virgo A. Les caractéristiques astronomiques et radio-astronomiques de ces objets sont rappelées dans le tableau 3 (sources documentaires : [4], [5], [6], [7], [8], wikipédia).

Caractéristiques	radio-source		
	Cassiopee A 3C461, CTA105, CTB110	Taurus A 3C144, M1, NGC1952	Virgo A 3C274, M87, NGC4486
Ascension droite (J2000,0)	23h23m28s	5h34m32s	12h30m49s
Déclinaison (J2000,0)	+58°48'42"	+22°00'52"	+12°23'15"
Extension angulaire radio*	5' (circ.)	7' x 5'	< 1'
Distance (parsec)	3400	2000	16,4.10 ⁶
DSF de référence (Jy)	2720 (J2000,0)	900	285
Fréquence de référence (MHz)	1000	1000	1000
Indice spectral**	-0,77	-0,3	-0,856
Variation séculaire	décroissante	décroissance très lente	-
DSF calculée à 4000 MHz (Jy)	643,54	593,78	86,99

* d'après [6] pour 3C461 et 3C144 ; dépend de la longueur d'onde considérée

** un indice spectral négatif correspond à une DSF décroissante avec la fréquence

Tableau 3 : caractéristiques des radio-sources prises en compte

Pour Cassiopée A, le calcul de la densité spectrale de flux (DSF) à la date de la mesure (9 Août 2019)

tient compte de la décroissance séculaire de la luminosité radio du rémanent de la supernova. Appliquant le modèle de calcul décrit dans [4], on obtient 643,54 Jy comme valeur de la DSF à la date de la mesure. Noter que l'incertitude sur cette valeur est de l'ordre de $\pm 4\%$.

L'étendue angulaire de ces radio-sources est de quelques minutes d'arc, donc très inférieure à la largeur du lobe principal de l'antenne à 4000 MHz : la valeur théorique de cette largeur à demi-puissance (HPBW) est $0,404^\circ$ pour une illumination radiale de l'ouverture¹. Ces sources peuvent donc être considérées comme ponctuelles vues par l'antenne, ce qui permet d'obtenir par transit une mesure correcte de son diagramme de directivité.

4. Chaîne de réception²

La chaîne comporte un LNB (Low Noise Block Converter) placé sur la sortie réception du quadripole en polarisation RHCP. Un câble coaxial au standard satellite genre 17PATC (impédance 75 Ohm) descend le signal FI centré sur 1150 MHz dans la salle d'exploitation (longueur ~ 15 m). Le LNB est alimenté (sous 8,8V : choix polarisation adapté) via un té de polarisation.

LNB : California Amplifier (USA) MAG-7, modèle n° C31244, gain : typique 62 dB, mesuré à 4000 MHz : 54,5 dB ; bande passante à l'entrée : 3700 à 4200 MHz ; bande passante en sortie (FI) : 950 à 1450 MHz ; impédance de sortie 75 Ohm ; température de bruit : typique 30 °K, mesurée à 4000 MHz : 50,75°K (soit un facteur de bruit de 0,70 dB). Stabilité de l'oscillateur local inconnue.

Par comparaison, les deux voies de réception RHCP et LHCP de l'antenne en exploitation Télécoms par satellites étaient équipées à partir de 1997 d'amplificateurs à faible bruit couvrant la bande 3400 à 4200 MHz, avec un gain de 60 dB et une température de bruit donnée pour 40°K.

Le signal en sortie du té de polarisation est injecté via un câble coaxial genre KX38 de longueur ~ 1 m à l'entrée d'un module SDR NooELEC R820T (facteur de bruit typique du circuit tuner : 3,5 dB, impédance d'entrée 50 Ohm). Le module SDR est connecté via un lien USB à une carte Raspberry Pi qui envoie chaque demi-seconde les données de niveau vers l'ordinateur principal via le réseau Ethernet local. La largeur de bande du signal acquis par le SDR est de ~ 100 kHz (échantillonnage à 240 kHz), numérisation sur 8 bits. Le gain apporté par le SDR est donné pour 40 dB.

Le spectre du signal peut être examiné sur un analyseur de spectre connecté en dérivation à l'entrée du SDR via un coupleur à -20 dB.

Les caractéristiques des éléments de la chaîne de réception sont récapitulés dans le tableau 4.

Élément	Gain ou atténuation mesurés ou estimés (dB / lin.)	Facteur de bruit mesurés ou estimés (dB / lin.)	Tbruit °K
LNB	54,5 / 281838	0,7 / 1,175	50,75
Câble descente + té	-2,5 / 0,562	2,5 / 1,778	
Désadaptation 75 / 50 ohm	-0,18 / 0,96	0,18 / 1,042	
Perte coupleur -20 dB	-0,04 / 0,99	0,04 / 1,009	
SDR	40 / 10000,0	3,5 / 2,239	
Chaîne complète	91,78 * / 1,505 10⁹	0,7 / 1,17501	50,75

* Le gain effectif estimé directement à partir des mesures sur les signaux vaut **86,63 dB**, cf. section 9

Tableau 4 : caractéristiques des éléments de la chaîne de réception à 4000 MHz

1 c.à.d. en $1 - r^2$, r étant la distance normalisée par rapport au centre de l'ouverture, voir [9]. L'illumination en cosinus donne un résultat voisin.

2 Les valeurs typiques sont des données constructeur.

On notera que le facteur de bruit de la chaîne complète est pratiquement celui du LNB, en raison du gain important de 54,5 dB qui masque quasiment complètement le bruit produit par les autres éléments.

5. Visualisation des données brutes

Pour chaque radio-source, les données brutes sont représentées par la courbe de puissance du signal mesuré en fonction du numéro de la mesure. De cette courbe nous tirerons diverses informations pour caractériser l'antenne et son système de réception, et accessoirement la qualité du positionnement (un rapport ultérieur en traitera).

La figure 1 présente les courbes de puissance du signal pour les sources Cassiopée A, Taurus A et Virgo A, respectivement, sur la même échelle de niveaux. Les pics observés traduisent l'émergence du lobe principal de l'antenne dans le bruit, avec une marge de l'ordre de 1 dB pour la source Cassiopée A qui est la plus puissante. Les différences observées sur la largeur des pics et sur leur position sur l'échelle des numéros de mesure peuvent s'expliquer par les différences entre les coordonnées alt-azimutales des trois objets, qui influent sur la distance angulaire parcourue entre deux mesures successives (on rappelle que l'intervalle de temps entre deux mesures est d'environ 0,5s). La courbe de Virgo A est décalée arbitrairement sur l'échelle des numéros de mesure car le transit a été réalisé sur une durée plus longue et a démarré plus tôt par rapport au passage devant le lobe principal.

On note la différence de hauteur des pics, correspondant aux DSF différentes des trois sources ; on note aussi la différence entre les niveaux du signal en-dehors des pics, due en partie au bruit du ciel qui varie suivant la zone visée et au masquage plus ou moins important des lobes secondaires de l'antenne par le bruit (*NB : la stabilité du gain de la chaîne de réception n'a pas été testée*).

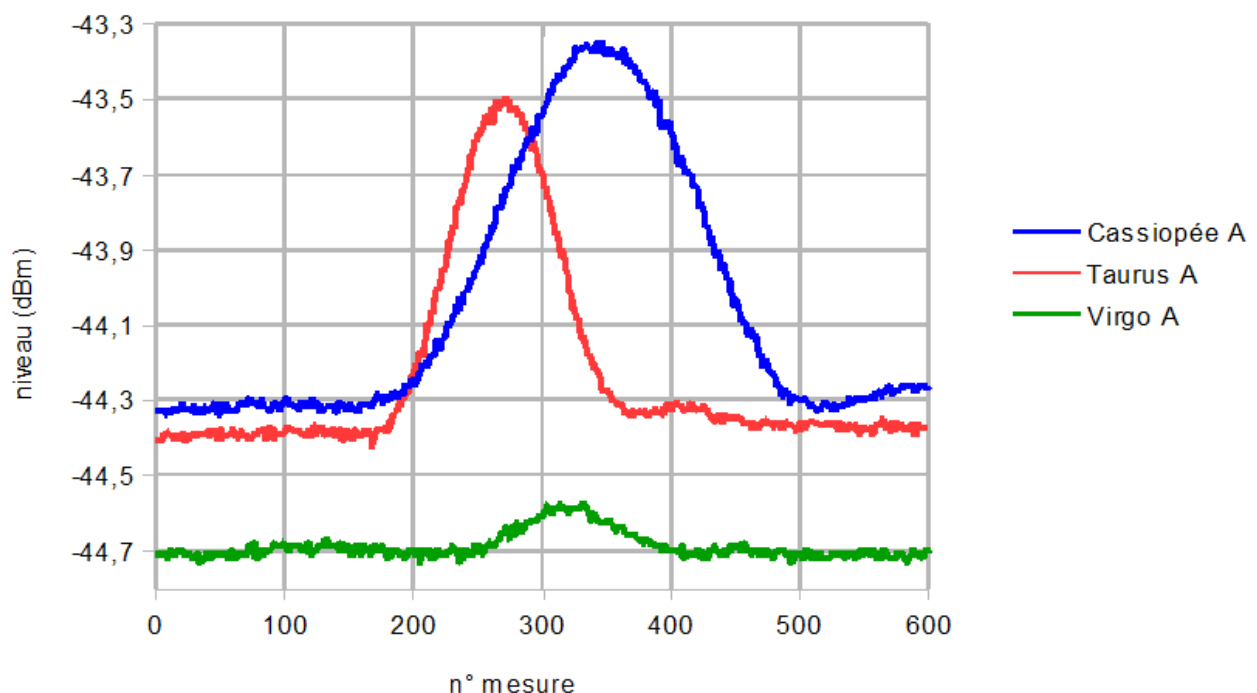


Figure 1 : données de mesure de niveau brutes sur les trois radio-sources

6. Exploitation des données : réponse angulaire de l'antenne et radiométrie

Le but de cette partie de l'étude est de vérifier que les transits réalisés permettent de visualiser

correctement la réponse angulaire de l'antenne, notamment le lobe principal, et aussi les premiers lobes secondaires. C'est aussi d'obtenir la valeur corrigée du niveau maximum, qui peut être mise en correspondance avec la DSF de la source, et ainsi évaluer les performances de l'antenne en radiométrie.

La méthode pour obtenir ces courbes à partir des données de transit brutes de la figure 1 est la suivante :

- soustraction (en puissance) à la mesure du niveau du signal observé le niveau du plancher de bruit estimé sur des portions des transits de niveau minimum ; on obtient ainsi une courbe corrigée du bruit qui montre plus nettement le lobe principal et les premiers lobes secondaires ;
- l'azimut et l'élévation du maximum du lobe sont déterminés visuellement sur cette courbe corrigée par mise en correspondance du numéro de mesure du maximum avec les coordonnées courantes de la source. Pour chaque point de mesure, l'écart angulaire par rapport au maximum du lobe est calculé comme la longueur de l'arc dont le carré est égal à la somme des carrés des écarts angulaires azimut et élévation (distance euclidienne) par rapport à ce maximum : pour les petits angles cette approximation est licite, les arcs pouvant être assimilés à des segments de droite. Le signe de l'écart angulaire par rapport au max. est le signe de l'écart angulaire azimut. La courbe résultante reprend les valeurs de niveau de la courbe précédente, cette fois en fonction de l'écart angulaire par rapport au max. ; elle n'est pas lissée.

6.1. Réponse angulaire de l'antenne

Les résultats obtenus sont assez satisfaisants, comme le montrent les trois figures ci-après, une pour chacune des trois radio-sources observées.

Pour les trois figures, la largeur du lobe à -3 dB du maximum (HPBW) est d'environ $0,4^\circ$ (un peu moins pour Cassiopée A et Taurus A, peut-être à cause d'un léger offset par rapport à la visée optimale). L'estimation est plus difficile pour Virgo A car le niveau est plus faible donc le résultat est plus bruité. Il faudrait ajuster un polynôme sur la partie haute de la courbe pour obtenir une estimation plus précise de cette largeur du lobe (*à faire*).

Pour mémoire, la largeur à -3 dB (HPBW) θ du lobe principal d'une antenne à ouverture circulaire de diamètre D avec illumination pondérée en radial ou en cosinus est donnée par la formule approchée $\theta \approx 70\lambda/D$. Pour $D = 13\text{m}$ et $\lambda = 0,075\text{m}$ (pour la fréquence 4000 MHz), on obtient $\theta \approx 0,404^\circ$ qui correspond assez bien à ce qu'on observe ici sur les trois figures. Sur les figures 2 et 3, le premier zéro est observable à un peu plus de $\pm 0,4^\circ$ du max. du lobe principal, et l'écart entre le max. du premier lobe secondaire et le max. du lobe principal peut être estimé à $\pm 0,6^\circ$; ceci correspond aussi à une illumination radiale ou en cosinus.

Le niveau relatif du premier lobe secondaire est trop élevé par rapport à la valeur théorique attendue, surtout avec une illumination en cosinus. On observe sur les figures 2 et 3 un rapport lobe secondaire / lobe principal de l'ordre de -13 dB, alors que la valeur attendue de ce rapport, compte tenu de la pondération de l'illumination, se situe nettement en-dessous de -20 dB. Cette anomalie pourrait être liée au point suivant.

On note en effet la dissymétrie des premiers lobes secondaires, nettement visible sur Cassiopée A et sur Taurus A: le lobe à droite est plus haut que l'autre de plusieurs dB. On observe aussi cette dissymétrie sur les transits avec le Soleil et la Lune (à analyser dans un rapport ultérieur). Elle pourrait être due à un désalignement d'éléments de l'optique de l'antenne (réflecteur secondaire et / ou cornet) par rapport à l'axe du réflecteur principal. Ce point sera à approfondir au moyen de nouvelles expériences et de mesures géométriques sur l'antenne.

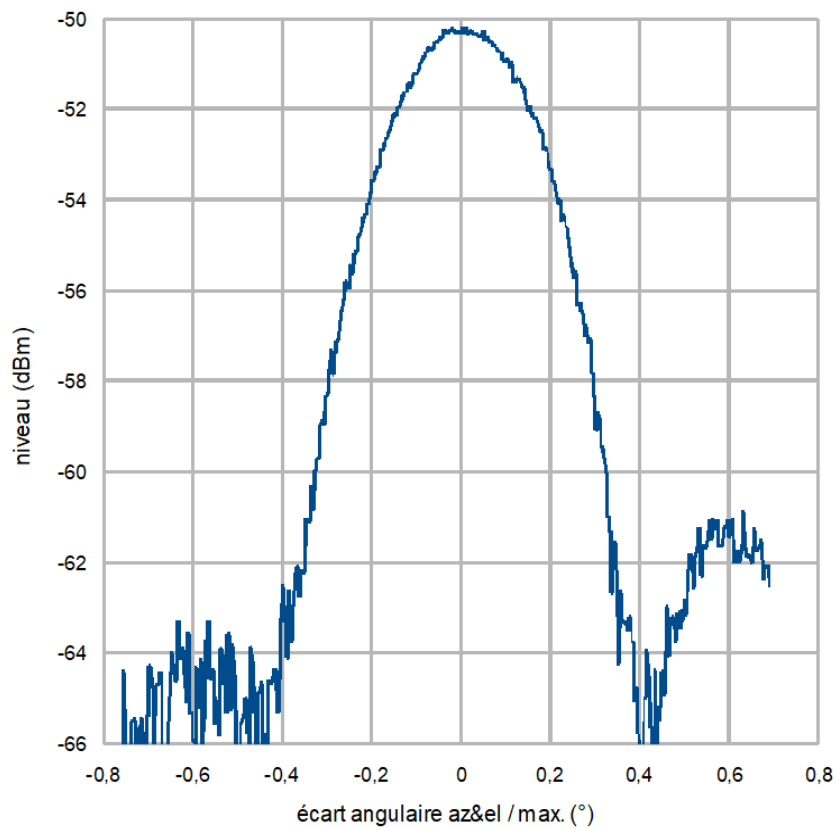


Figure 2 : réponse angulaire de l'antenne pour la radio-source Cassiopee A
maximum estimé : -50,21 dBm, coordonnées : AZ= 314,89° EL= 43,83°
passage au maximum attendu à 07 :55 :14 TU le 09/08/2019

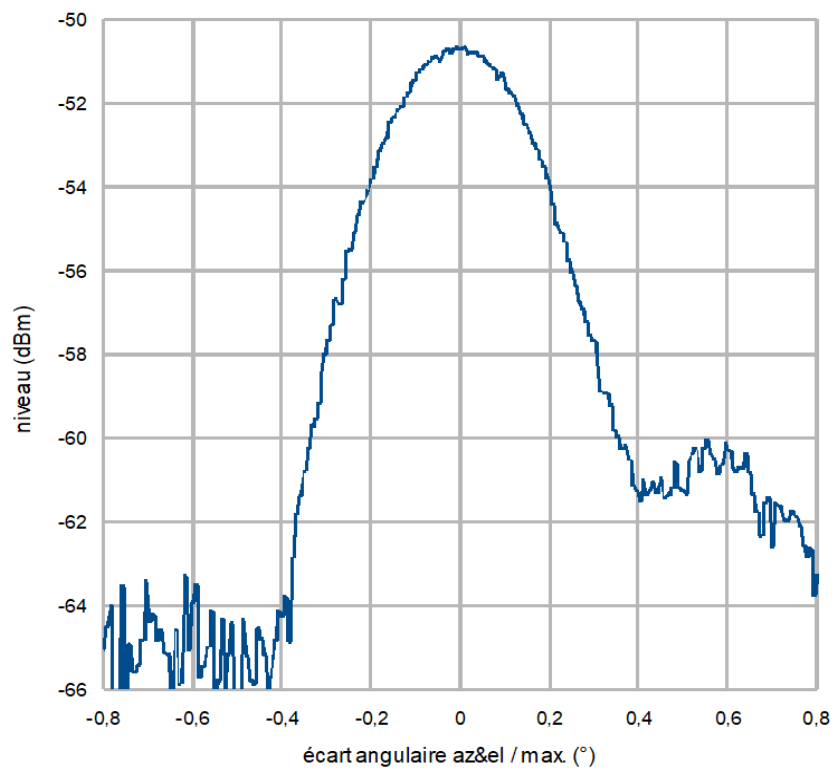


Figure 3 : réponse angulaire de l'antenne pour la radio-source Taurus A
maximum estimé : -50,68 dBm, coordonnées : AZ= 272,25° EL= 27,91°
passage au maximum attendu à 13 :32 :11 TU le 08/08/2019

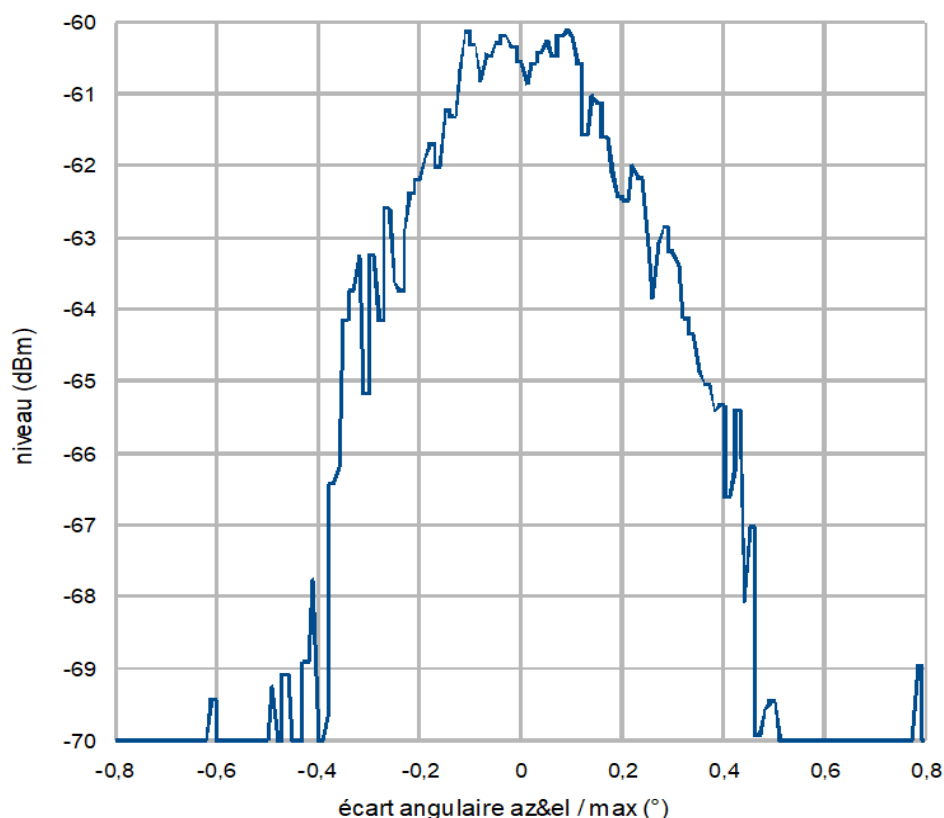


Figure 4 : réponse angulaire de l'antenne pour la radio-source Virgo A
maximum estimé : -60 dBm, coordonnées : AZ= 189,01° EL= 53,22°
passage au maximum attendu à 16 :00 :36 TU le 08/08/2019

Noter qu'avec un LNB moins bruyant et des mesures complémentaires, on devrait a priori obtenir une meilleure visibilité des lobes secondaires et donc une meilleure caractérisation de la directivité réelle de l'antenne.

6.2. Résultats en radiométrie

Il s'agit ici de radiométrie relative, car le calibrage absolu de l'antenne avec sa chaîne de réception n'a pas encore été réalisé. On verra cependant dans la section 9 que l'on peut obtenir certains résultats en absolu.

Admettant que l'antenne pointe correctement vers les radio-sources, on peut comparer le rapport des niveaux max. du signal débruité au rapport des densités spectrales de flux à 4000 MHz pour les sources correspondantes. Le tableau 5 compare les niveaux max. obtenus avec Taurus A et Virgo A à celui obtenu avec Cassiopée A, en regard des rapports des densités spectrales de flux calculées à 4000 MHz.

Radio-source	DSF à 4000 MHz (Jy)	Rapport DSF / Cas A (dB)	Max. mesuré (dBm)	Rapport Max. / Cas A (dB)
Cassiopée A	643,54	-	-50,21	-
Taurus A	593,78	-0,36	-50,68	-0,47
Virgo A	86,99	-8,54	-60	-9,32

Tableau 5 : comparaison des DSF et des niveaux max. pour les radio-sources Taurus A et Virgo A par rapport à ceux de Cassiopée A

Pour chacune des radio-sources Taurus A et Virgo A, la comparaison des rapports de la troisième et de

la cinquième colonne fait apparaître des valeurs assez proches. Ce résultat n'est pas étonnant, mais il est plutôt satisfaisant, eu égard au traitement basique effectué sur les données et au niveau du bruit d'observation assez élevé. Il montre les capacités de l'antenne pour faire de la radiométrie de précision des radio-sources et nous encourage à poursuivre dans cette voie. On en déduit aussi que les transits sont bien passés par le maximum du lobe principal de l'antenne (ou très près de ce maximum).

7. Estimation du rapport G/T de l'antenne à 4000 MHz

Les estimations du rapport G/T présentées ici ont été obtenues à partir des résultats des transits sur les radio-sources Cas A, Taurus A et Virgo A, par application de la formule (A15) de l'annexe.

Pour chacune des trois radio-sources, la valeur du facteur Y est calculée à partir des données brutes d'énergie, comme le rapport du maximum observé (pic au passage du lobe principal devant la radio-source) sur le minimum estimé sur les zones les plus éloignées du pic. L'imprécision sur cette dernière estimation n'a pas été évaluée. Noter que ces zones sont peu étendues et assez proches du pic, donc sources d'un biais dû aux lobes secondaires du diagramme de l'antenne et d'une variance élevée. Les valeurs des densités spectrales de flux des trois radio-sources sont reprises du tableau 3 page 2.

La température de bruit de la chaîne de réception peut être calculée à partir de la formule (A13) suivant :

$$T_{rec} = \frac{A_{eff} S_{obj}}{2k(Y-1)} \quad (1)$$

ou de façon équivalente, en posant $R = G/T_{rec}$:

$$T_{rec} = \frac{G}{R} \quad (2)$$

où G est donné par la formule (A14).

La surface efficace de l'antenne est calculée comme le produit de la surface de l'ouverture du réflecteur parabolique de diamètre D (réduite de la surface du réflecteur secondaire de diamètre d pour tenir compte de l'effet d'ombre) par un facteur d'efficacité η estimé à 70%. Pour mémoire, le facteur de directivité³ d'une antenne à ouverture circulaire à illumination radiale est de 75% de celui de la même antenne illuminée uniformément, voir [9]. Le chiffre de 70% paraît donc acceptable compte tenu des pertes ohmiques et des imperfections de la surface du réflecteur principal. On a donc :

$$A_{eff} = \eta \pi (D^2 - d^2) / 4 \quad (3)$$

Avec $D = 13$ m et $d = 1,4$ m pour PB8, on obtient la surface efficace $A_{eff} = 91,83$ m² .

Le tableau ci-dessous donne les valeurs estimées du rapport G/T et de la température de bruit T_{rec} .

Radio-source	Niveau max (dBm)	Niveau min (dBm)	Facteur Y	G/T estimé (dB)	T _{rec} estimé (°K)
Cas A	-43,36	-44,33	1,25	33,78	85,85
Taurus A	-43,50	-44,39	1,23	33,73	86,91
Virgo A	-44,58	-44,71	1,03	33,33	95,25

Tableau 6 : valeurs estimées du rapport G/T et de la température de la chaîne de réception

Ces résultats sont assez cohérents, mais ils ont été obtenus sur un seul transit. Il faudrait faire des

³ identique au gain d'une antenne idéale sans pertes ohmiques et à surface parfaite.

moyennes sur un nombre suffisant de transits pour avoir des résultats plus fiables. Il faudrait aussi prendre en compte des zones qui s'écartent suffisamment des radio-sources pour que les mesures de puissance de "ciel froid" ne soient pas biaisées par les lobes secondaires de l'antenne.

Les valeurs de G/T et de T_{rec} obtenues à partir du transit sur Virgo A sont peu précises, car l'écart entre puissance du signal sur le passage en face de la radio-source et puissance du signal en zone de "ciel froid" est très faible, ce qui donne un facteur Y très proche de 1. Des valeurs moins pénalisantes de cette puissance seraient obtenues par visée dans la zone zénithale.

8. Correspondance avec les caractéristiques connues de l'antenne

Le rapport G/T à 4000 MHz donné dans le tableau 2 page 1 est de 33,3 dB, avec un système de réception de température équivalente $\leq 60^\circ \text{K}$ (?). Les valeurs du rapport G/T estimé dans le tableau 5 sont très proches de cette valeur. Noter que la température de bruit affichée dans le tableau 1 pour un LNA à 40°K est de plus de 20° supérieure à celle obtenue ici avec le LNB mesuré à 50,7°K. (*explication plausible de cet écart?*)

Les tableaux 1 et 2 donnent un gain maximum dans la bande 3700 à 4200 MHz de 53,5 dBi ; le gain théorique à 4000 MHz calculé d'après (A14) est de 53,17 dBi, compatible avec cette valeur.

9. Correspondance des valeurs absolues mesurées avec celles déduites des caractéristiques de l'antenne et de la chaîne de réception

Considérons par exemple la radio-source Taurus A. La puissance recueillie par l'antenne est égale à :

$$P_{Tau} = DSF_{Tau} A_{eff} B \quad (4)$$

Pour la largeur de bande $B = 100 \text{ kHz}$ autour de 4000 MHz et une surface efficace de 92 m^2 , on obtient $P_{Tau} \approx 55 \cdot 10^{-15} \text{ mW}$, ce qui correspond à une température d'antenne de $39,8^\circ\text{K}$.

D'après la relation (A2) de l'annexe, la puissance de bruit propre à l'entrée de la chaîne de réception vaut $P_{rec} \approx 70 \cdot 10^{-15} \text{ mW}$, pour une température équivalente de bruit mesurée $T_{rec} = 50,75^\circ\text{K}$ (voir tableau 4).

Si g est le gain en puissance de la chaîne de réception dans la bande B , la puissance totale mesurée en sortie de la chaîne lorsque l'antenne pointe vers la radio-source est donnée par la relation (A3). On en déduit l'expression du gain :

$$g = \frac{P_{mes}}{0,5 P_{Tau} + P_{rec}} \quad (5)$$

Pour $P_{mes} = -43,5 \text{ dBm}$ (voir tableau 6), soit $4,47 \cdot 10^{-5} \text{ mW}$, on obtient $g = 45,85 \cdot 10^7$, soit 86,63 dB. Noter que cette valeur est plus faible que celle du gain calculé à partir des données du tableau 4, soit 91,78 dB. Supposant une incertitude sur l'atténuation de certains éléments de la chaîne et sur le gain réel du SDR, on admettra que la valeur correcte du gain est celle fournie par le raisonnement ci-dessus, soit 86,63 dB.

Le niveau du signal issu de la radio-source en sortie de la chaîne, soit $0,5 g P_{Tau}$, vaut -49 dBm, assez proche de la valeur du maximum -50,68 dBm observé sur la figure 3 (*analyser cet écart*).

Le niveau de bruit observé en sortie lorsque la radio-source est suffisamment décalée par rapport à l'axe de visée de l'antenne est de -44,39 dBm (voir tableau 6). Pour la valeur estimée du gain de 86,63 dB, la puissance correspondante de bruit à l'entrée de la chaîne est de $79,4 \cdot 10^{-18} \text{ W}$, qui correspond à une température de bruit $T_{cold} = 57,54^\circ\text{K}$. Cette puissance représente la somme de la puissance de bruit propre de la chaîne ramenée à l'entrée et de la moitié de la puissance produite par le rayonnement de ciel froid, suivant la relation (A5). Il en résulte une température de « ciel froid »

$$T_{sky} = 2(T_{cold} - T_{rec}) = 13,58^{\circ}\text{K}, \text{ valeur « raisonnable » (on utilise souvent la valeur } 10^{\circ}\text{K}).$$

On observe enfin que la température équivalente de la chaîne estimée à partir des niveaux mesurés et du gain théorique de l'antenne vaut $86,91^{\circ}\text{K}$ (voir tableau 6), nettement supérieure aux $50,75^{\circ}\text{K}$ de la chaîne. Cet écart sera à analyser : incertitudes sur certains paramètres comme la bande passante, pertes en amont de l'entrée de la chaîne par dépolarisation, etc.

Conclusion et indications pour la poursuite de l'étude

L'exploitation des transits réalisés sur trois radio-sources couramment utilisées pour l'étalonnage des antennes a fourni des résultats utiles qui confirment les caractéristiques déjà connues de l'antenne et les complètent. La méthodologie de mesure et de traitement des données est également validée par ces résultats.

Il faudra cependant les affiner par d'autres essais de transits sur ces mêmes radio-sources et en réaliser sur d'autres sources, notamment la Lune et une balise de satellite géostationnaire en bande C (une balise de satellite est assimilable à une source ponctuelle, et fournit une densité de flux connue et importante, d'où un bon contraste S/B).

La durée totale des essais de transits pourra être augmentée pour disposer de segments de bruit non biaisés par les lobes, et l'estimation de la puissance de bruit de ciel froid pourra être améliorée par des enregistrements de données venant de zones proches du zénith. L'utilisation d'un LNB (ou d'un LNA) moins bruyant est aussi un moyen pour améliorer la qualité de mesures.

Pour s'assurer de la validité de la mesure du niveau max., des transits pourront être répétés en cherchant par « balayage » le positionnement préalable de l'antenne qui maximise la hauteur du lobe principal observé.

Les incertitudes et écarts sur les résultats devront être expliqués à partir de leurs causes au niveau des données et de la méthodologie utilisée pour les exploiter.

Il faudra expliquer la dissymétrie du premier lobe secondaire, dont l'origine peut être radioélectrique (excitation de modes TM supérieurs, suivant remarque de J.P. Blot) et/ou mécanique (défaut d'alignement de l'optique), et essayer de corriger ce défaut.

Pour compléter la connaissance des caractéristiques de l'antenne dans les bandes où elle peut être utilisée, l'étude des transits pourra être répétée à d'autres fréquences en bande C, par exemple dans la bande EME autour de 5760 MHz avec une autre chaîne de réception, et aussi en bande L avec une source collectrice et une chaîne de réception appropriées.

Références bibliographiques

- [1] Notice technique antenne PB8. Révisée (avec photos prises par L. Macé), 06/06/2019.
- [2] Ho, C. & Coll., *Solar Brightness Temperature and Corresponding Antenna Noise Temperature at Microwave Frequencies*. IPN Progress Report 42-175, November 15, 2008.
- [3] Šekuljica, D., *Quality Factor G/T Direct Measurement Method of 7m - 13m Parabolic Reflector Antenna System With Moon as an RF Source*. Masters thesis, Ljubljana University, 2017.
- [4] Tonna, F. F5SE, « Radio-sources: données utiles pour la mesure et l'optimisation des équipements EME », CJ 2012 (https://cj.r-e-f.org/proceedings/2012/cj2012_10_f5se_Radio_Sources_Frc_new_55.pdf)
- [5] Recommandation UIT-R S.733-2 : *Détermination du rapport G/T des stations terriennes du*

service fixe par satellite, édition 2000.

[6] Green, D. A., « A revised catalogue of 294 Galactic supernova remnants », *Journal of Astrophysics and Astronomy*, vol. 40, 2019 (<https://arxiv.org/abs/1907.02638v2>)

[7] Bases de données Simbad et Vizier de l'observatoire de Strasbourg : <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/> , <https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>

[8] NASA/IPAC Extragalactic Data Base : <http://ned.ipac.caltech.edu/>

[9] Balanis, C. A., *Antenna Theory. Analysis and Design*. 3rd Ed., Table 7.2 page 422, Wiley, 2005.

Annexe : détermination directe du rapport G/T d'une antenne

La puissance mesurée en sortie de la chaîne de réception est constituée de deux composantes : la puissance correspondant au signal capté par l'antenne, et la puissance correspondant au bruit produit par l'antenne elle-même⁴ et par la chaîne de réception. Dans ce qui suit, le bruit propre de l'antenne est intégré dans celui de la chaîne de réception, ce qui revient à considérer une antenne idéale non bruyante.

La puissance du signal recueillie par l'antenne s'écrit⁵ :

$$P_{ant} = k T_{ant} B \quad (A1)$$

où k est la constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} J/^\circ K$) et B la bande de fréquences (en Hertz) dans laquelle la puissance est mesurée.

La température d'antenne T_{ant} est liée à la contribution des flux de puissance des sources vues par l'antenne : c'est l'ensemble des flux provenant de toutes les directions du ciel pondérés par sa fonction de directivité, et limités à la bande B.

Noter que dans la formule (A1) on suppose implicitement que le flux de puissance des sources est constant dans la bande B, ce qui est en général correct si cette bande est suffisamment étroite.

La puissance du bruit de la chaîne de réception ramenée à l'entrée de celle-ci (donc à la sortie de l'antenne) s'écrit :

$$P_{rec} = k T_{rec} B \quad (A2)$$

T_{rec} est la température de bruit de la chaîne de réception.

Supposant la chaîne de réception linéaire de gain en puissance g dans la bande B, la puissance totale mesurée en sortie de la chaîne s'écrit :

$$P_{mes} = g(0,5 P_{ant} + P_{rec}) \quad (A3)$$

où le facteur 0,5 traduit la prise en compte d'une seule polarisation dans la mesure de la puissance recueillie par l'antenne, la sélection de cette polarisation étant effectuée au niveau des équipements RF précédant le récepteur.

Dans la suite, on ne tiendra pas compte du gain g et on utilisera les puissances en sortie comme si elles étaient mesurées à l'entrée, car on ne considérera que des rapports de puissances pour établir le résultat final.

La méthode directe pour obtenir le rapport G/T est basée sur la mesure en sortie de la chaîne de réception de deux puissances correspondant à des sources célestes, choisies de telle sorte que ces deux puissances soient sensiblement différentes.

On choisit ainsi une source « chaude » (c.à.d. lumineuse dans le domaine radio) fournissant une contribution forte à la puissance en sortie, et une source « froide » (c.à.d. moins lumineuse) fournissant une contribution plus faible.

Soit P_{hot} la puissance mesurée lorsque l'antenne est pointée vers une source chaude (un objet céleste lumineux en radio) et P_{cold} la puissance mesurée lorsque l'antenne est pointée vers une zone froide du ciel.

4 Le bruit propre de l'antenne est généré par les éléments rayonnants et non rayonnants de celle-ci ; ce sont des corps conducteurs soumis à la température ambiante, qui produisent donc une puissance électromagnétique non nulle.

5 Cette relation bien connue résulte de l'équilibre thermique entre l'antenne et le rayonnement qu'elle collecte : voir [A1].

On a :

$$P_{hot} = 0,5 P_{obj} + P_{rec} \quad (A4)$$

et :

$$P_{cold} = 0,5 P_{sky} + P_{rec} \quad (A5)$$

P_{obj} dans (A4) représente la contribution de la source chaude à la puissance mesurée, et P_{sky} dans (A5) représente la contribution du fond du ciel.

Identifiant P_{obj} à la puissance recueillie par l'antenne donnée par (A1) lorsque celle-ci pointe vers la source chaude, on a :

$$P_{obj} = k T_{obj} B \quad (A6)$$

où T_{obj} est la température d'antenne correspondante.

De même, identifiant P_{sky} à la puissance recueillie par l'antenne donnée par (A1) lorsque celle-ci pointe vers le fond du ciel, on a :

$$P_{sky} = k T_{sky} B \quad (A7)$$

où T_{sky} est la température d'antenne correspondante, prise fréquemment égale à 10°K ⁶.

Connaissant la densité spectrale de flux S_{obj} de la source, supposée constante dans la bande B, la puissance P_{obj} s'exprime suivant⁷ :

$$P_{obj} = A_{eff} B S_{obj} \quad (A8)$$

où A_{eff} est la surface efficace de l'antenne dans la bande B.

De (A6) et (A8) on tire :

$$T_{obj} = \frac{A_{eff} S_{obj}}{k} \quad (A9)$$

Dans la méthode directe, on mesure le rapport entre les puissances P_{hot} et P_{cold} , appelé facteur Y :

$$Y = \frac{P_{hot}}{P_{cold}} = \frac{0,5 P_{obj} + P_{rec}}{0,5 P_{sky} + P_{rec}} \quad (A10)$$

qui s'exprime en fonction des différentes températures suivant :

$$Y = \frac{0,5 T_{obj} + T_{rec}}{0,5 T_{sky} + T_{rec}} \quad (A11)$$

Pour une chaîne de réception non refroidie, la température de bruit correspondante est très supérieure à la température du fond du ciel. L'expression (A11) se simplifie alors :

⁶ Cette quantité peut varier appréciablement suivant l'élévation de la direction de pointage de l'antenne par rapport à l'horizon : voir par exemple [A2].

⁷ Cette relation suppose implicitement que la source est entièrement contenue dans l'angle solide correspondant à la directivité maximale de l'antenne (le lobe principal pour une antenne à ouverture telle qu'une antenne parabolique). Un facteur de correction doit être appliqué à la densité de flux dans le cas d'une source étendue (la Lune par exemple) où cette condition n'est pas respectée.

$$Y \approx \frac{0,5T_{obj}}{T_{rec}} + 1 \quad (A12)$$

Remplaçant T_{obj} par son expression (A9) dans (A12), on obtient :

$$\frac{A_{eff} S_{obj}}{k T_{rec}} = 2(Y - 1) \quad (A13)$$

Utilisant l'expression du gain de l'antenne pour la longueur d'onde λ (comprise dans la bande B) :

$$G(\lambda) = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff} \quad (A14)$$

(on le notera simplement G), on obtient finalement le rapport recherché :

$$\frac{G}{T_{rec}} = \frac{8\pi k}{\lambda^2 S_{obj}} (Y - 1) \quad (A15)$$

Références de l'annexe

[A1] Dicke, R. H., « The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies », *Review of Scientific Instruments*, Volume 17, Issue 7, p.268-275, July 1946.

[A2] Milligan, T. A., *Modern Antenna Design*. Wiley, 2nd Ed., Fig. 1-8 p. 31, 2005.