



ENSEA

Beyond Engineering

COMPTE RENDU DE TP

Antennes

TP 2 : Réseau d'antennes imprimées

3^{eme} année

Année : 2025 - 2026

Camille LANFREDI, Valentin JOSSERON
Décembre 2025

Table des matières

1	Introduction	2
2	Préparation	2
2.1	Permittivité effective et allongement de longueur	2
2.2	Fréquence de résonance fondamentale	2
2.3	Champ lointain et plans de mesure	3
3	Rayonnement des réseaux disponibles	4
3.1	Antenne Patch	4
3.1.1	Diagrammes de rayonnement dans le plan E	4
3.1.2	Diagrammes de rayonnement dans le plan H	5
3.2	Réseau 2 patchs	6
3.2.1	Diagrammes de rayonnement dans le plan E	6
3.2.2	Diagrammes de rayonnement dans le plan H	7
3.3	Réseau 4 patchs	8
3.3.1	Diagrammes de rayonnement dans le plan H	8
3.3.2	Diagrammes de rayonnement dans le plan E	9
4	Mesure du gain	10
4.1	Méthode : formule de Friis	10
5	Annexe	11
5.1	Méthodologie de la simulation	11
5.1.1	Modélisation du patch élémentaire	11
5.1.2	Facteur de réseau	11
5.1.3	Combinaison motif élémentaire – réseau	11
5.1.4	Détermination de l'ouverture à $-3dB$	12

1 Introduction

L'objectif de ce TP est d'étudier le fonctionnement et le rayonnement d'antennes imprimées de type *patch* micro-ruban, ainsi que l'effet de la mise en réseau de plusieurs patchs sur la directivité et le gain.
 Les antennes sont réalisées sur un substrat verre Téflon dont les caractéristiques sont :

- permittivité relative : $\varepsilon_r = 2,55$
- épaisseur : $h = 1,524$ mm

L'élément rayonnant de base est un patch rectangulaire de dimensions :

- largeur : $W = 51$ mm
- longueur : $L = 36,5$ mm

2 Préparation

2.1 Permittivité effective et allongement de longueur

Le champ électromagnétique n'étant pas totalement confiné dans le diélectrique, on utilise une permittivité effective ε_{re} , donnée par :

$$\varepsilon_{re} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

Avec les valeurs du substrat et du patch, on trouve :

$$\varepsilon_{re} \simeq 2,46$$

Comme le champ déborde légèrement aux bords du patch, cet effet est modélisé par une longueur supplémentaire ΔL :

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\varepsilon_{re} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\varepsilon_{re} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,813 \right)}$$

Numériquement, on obtient :

$$\frac{\Delta L}{h} \simeq 0,51 \quad \Rightarrow \quad \Delta L \simeq 0,77 \text{ mm}$$

La longueur électrique effective du patch vaut alors :

$$L_{\text{eff}} = L + 2 \Delta L \simeq 36,5 + 2 \times 0,77 \simeq 38 \text{ mm}$$

2.2 Fréquence de résonance fondamentale

Pour le mode fondamental d'un patch micro-ruban, on a en première approximation :

$$L_{\text{eff}} = \frac{\lambda_g}{2}$$

où λ_g est la longueur d'onde guidée dans le substrat :

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{re}}} \quad \text{avec} \quad \lambda_0 = \frac{c}{f}$$

On en déduit la fréquence de résonance :

$$f_{\text{res}} = \frac{c}{2L_{\text{eff}} \sqrt{\varepsilon_{re}}}$$

En prenant $L_{\text{eff}} \simeq 38$ mm et $\varepsilon_{re} \simeq 2,46$, on obtient :

$$f_{\text{res}} \approx 2,5 \text{ GHz}$$

2.3 Champ lointain et plans de mesure

La plus grande dimension du patch est sa largeur $D = W = 51$ mm La condition classique pour être en champ lointain est :

$$r > \frac{2D^2}{\lambda_0}$$

où λ_0 est la longueur d'onde dans l'air

Pour une fréquence d'environ 2,5 GHz, $\lambda_0 \simeq 0,12$ m, d'où :

$$\frac{2D^2}{\lambda_0} \simeq \frac{2 \times (0,051)^2}{0,12} \approx 4,4 \text{ cm}$$

Pendant le TP, la distance entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice est d'environ $d \simeq 2$ m, ce qui est largement supérieur à cette valeur : on est donc bien en champ lointain

On distinguera deux plans de mesure pour les diagrammes de rayonnement :

- le plan E : plan (yOz) contenant l'axe de propagation et la polarisation du champ électrique
- le plan H : plan (xOz) contenant l'axe de propagation et la direction principale du champ magnétique

Ces deux plans serviront pour les mesures sur le patch seul et sur les réseaux.

3 Rayonnement des réseaux disponibles

3.1 Antenne Patch

3.1.1 Diagrammes de rayonnement dans le plan E

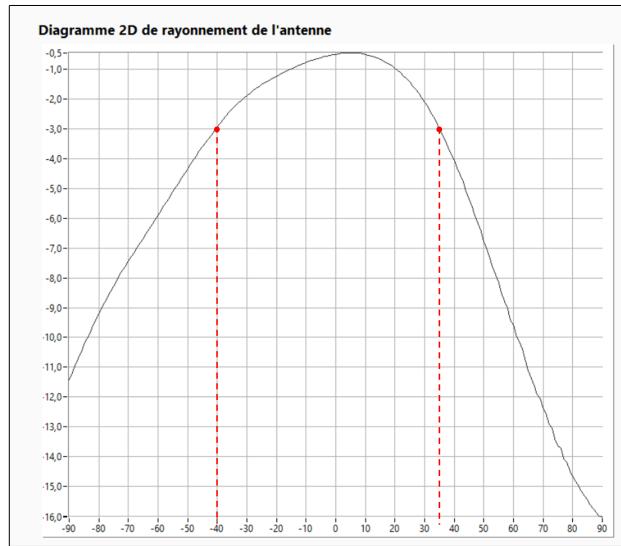


Figure 1: Diagramme de rayonnement mesuré dans le plan E

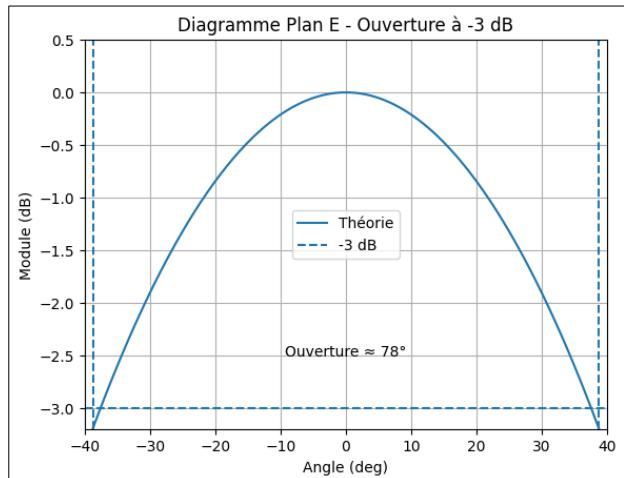


Figure 2: Diagramme de rayonnement théorique dans le plan E

Plan E	1er angle à -3 dB	2ème angle à -3 dB	Angle d'ouverture à -3 dB
Mesuré	-40°	35°	75°
Théorique	-38°	38°	78°

Les mesures du plan *E* montrent un lobe principal globalement similaire au diagramme théorique. L'angle d'ouverture mesuré à -3 dB est de 75° , très proche de la valeur théorique de 78° .

Une légère asymétrie apparaît toutefois dans le diagramme mesuré. Elle provient principalement de la rotation mécanique de l'antenne entre les plans *H* et *E*, rendant l'ensemble antenne–connecteur SMA asymétrique. Malgré cela, la correspondance entre théorie et expérience reste excellente, validant le comportement de l'antenne élémentaire.

3.1.2 Diagrammes de rayonnement dans le plan H

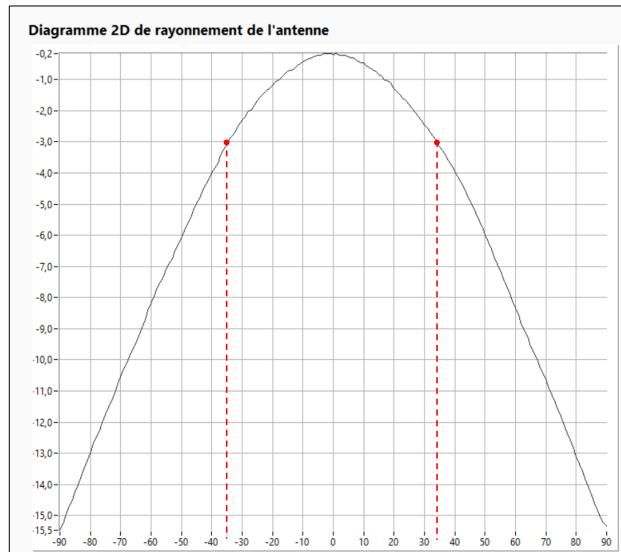


Figure 3: Diagramme de rayonnement mesuré dans le plan H

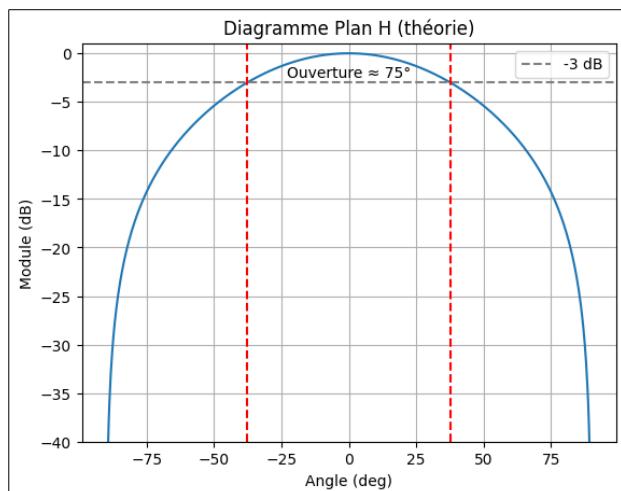


Figure 4: Diagramme de rayonnement théorique dans le plan H

Plan H	1er angle à -3 dB	2ème angle à -3 dB	Angle d'ouverture à -3 dB
Mesuré	-36°	36°	72°
Théorique	-37.6°	37.6°	75°

Dans le plan H , le diagramme mesuré correspond presque parfaitement au diagramme théorique. L'angle d'ouverture mesuré est de 72° contre 75° en théorie.

L'absence d'asymétrie significative dans ce plan explique cette excellente correspondance. Après avoir validé le comportement du patch, nous pouvons maintenant analyser l'effet de la mise en réseau de plusieurs patchs.

3.2 Réseau 2 patchs

3.2.1 Diagrammes de rayonnement dans le plan E

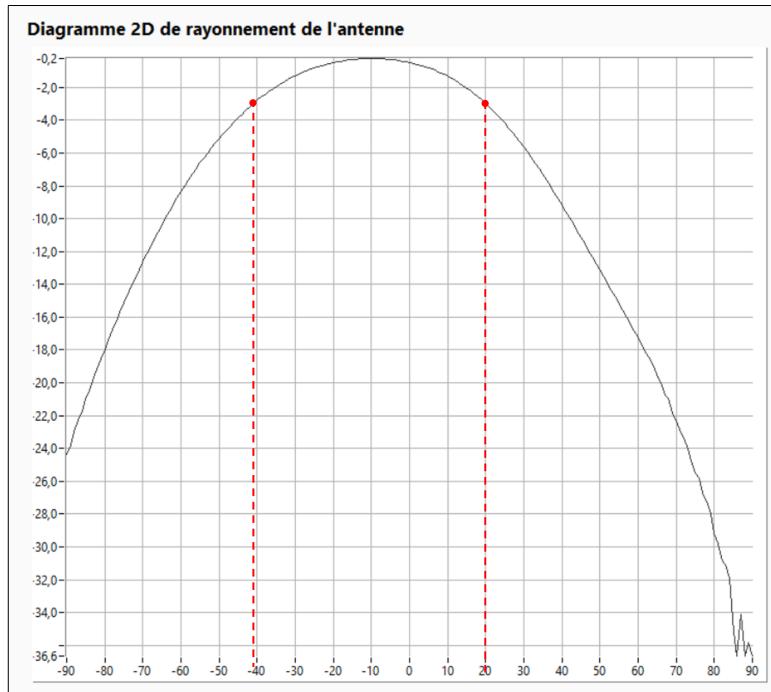


Figure 5: Diagramme de rayonnement mesuré dans le plan E

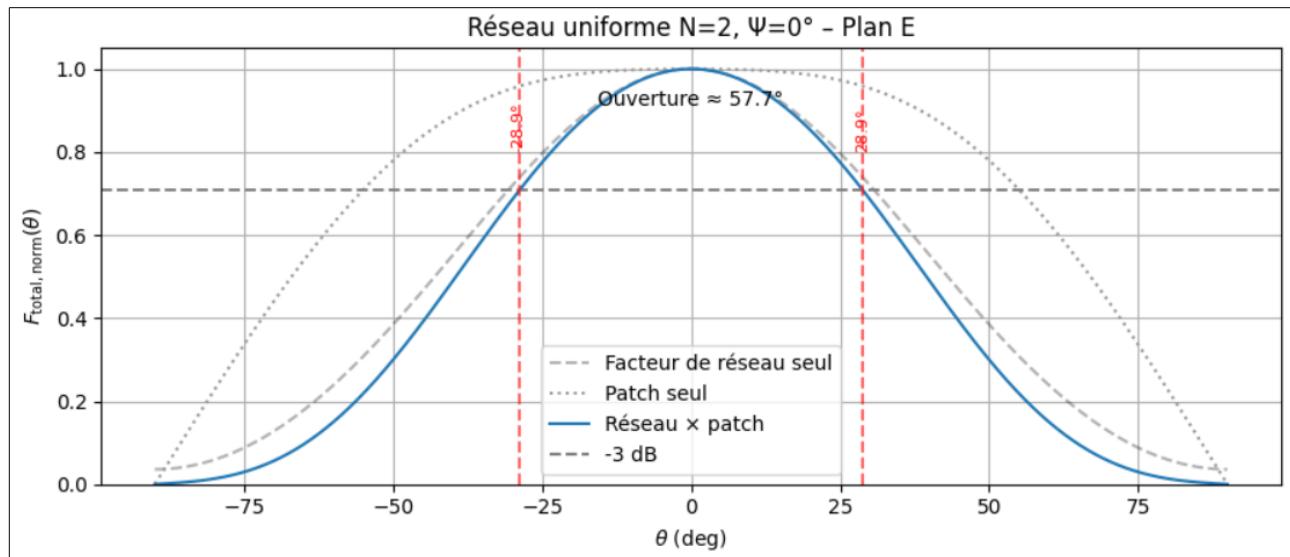


Figure 6: Diagramme de rayonnement théorique dans le plan E

Plan E	1er angle à -3 dB	2ème angle à -3 dB	Angle d'ouverture à -3 dB	Offset
Mesuré	-41.2°	20°	61°	-10 dBm
Théorique	-28.9°	28.9°	57.8	

Nous pouvons voir que l'ouverture du lobe diminue. C'est la conséquence de la mise en réseau dans le plan E. L'antenne est donc plus directive.

3.2.2 Diagrammes de rayonnement dans le plan H

Comme les deux patchs sont espacés dans la direction perpendiculaire au plan H, aucune phase supplémentaire n'est introduite dans ce plan. On retrouve donc le rayonnement du patch seul.

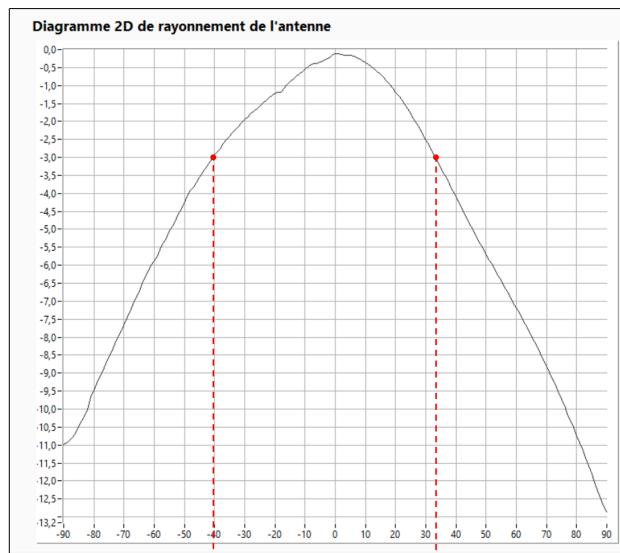


Figure 7: Diagramme de rayonnement mesuré dans le plan H

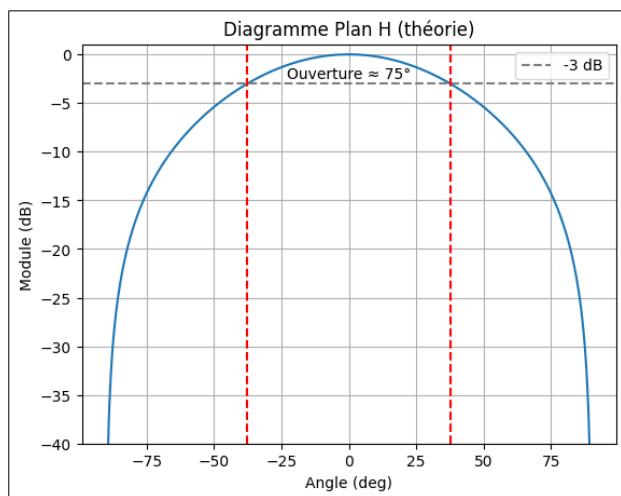


Figure 8: Diagramme de rayonnement théorique dans le plan H

	1er angle à -3 dB	2ème angle à -3 dB	Angle d'ouverture à -3 dB
Plan H	-40°	33°	73°
Théorique	-37.6°	37.6°	75°

3.3 Réseau 4 patchs

3.3.1 Diagrammes de rayonnement dans le plan H

Dans le plan H, le réseau 2×2 se comporte comme un réseau de deux éléments puisque seule une ligne de deux patchs contribue.

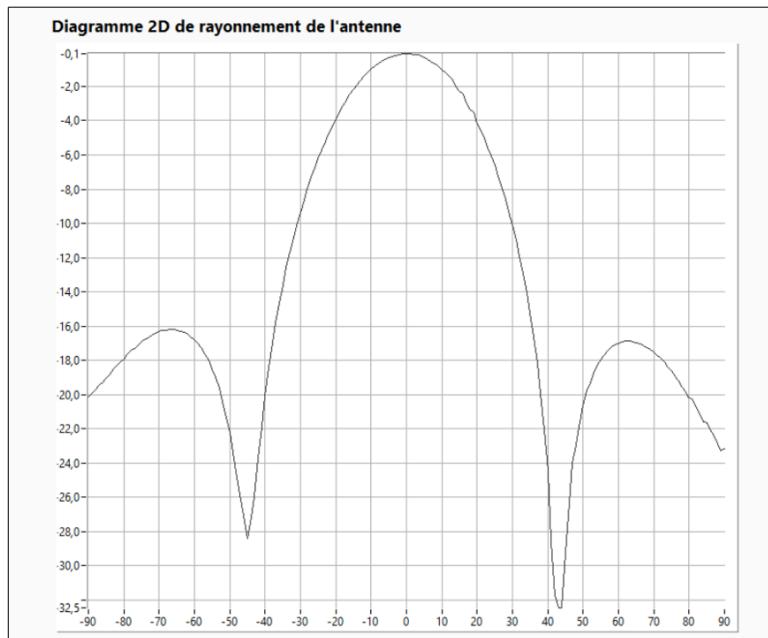


Figure 9: Diagramme de rayonnement mesuré dans le plan H

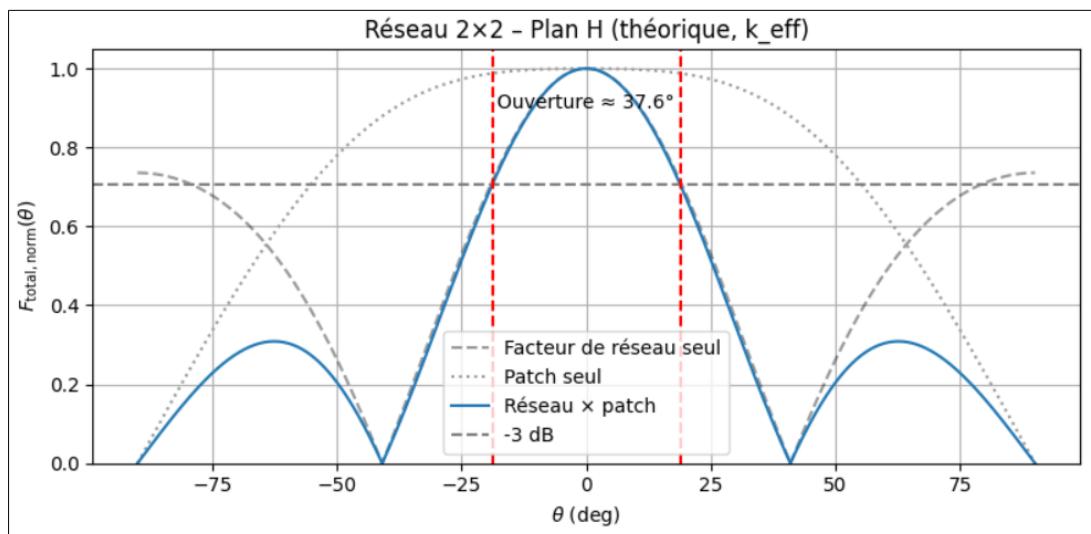


Figure 10: Diagramme de rayonnement théorique dans le plan H

Plan H	1er angle à -3 dB	2ème angle à -3 dB	Angle d'ouverture à -3 dB	1er zéro	2ème zéro
Mesuré	-17°	17°	34°	-45°	42°
Théorique	-18.8°	19.8°	37.6°	-43°	43°

3.3.2 Diagrammes de rayonnement dans le plan E

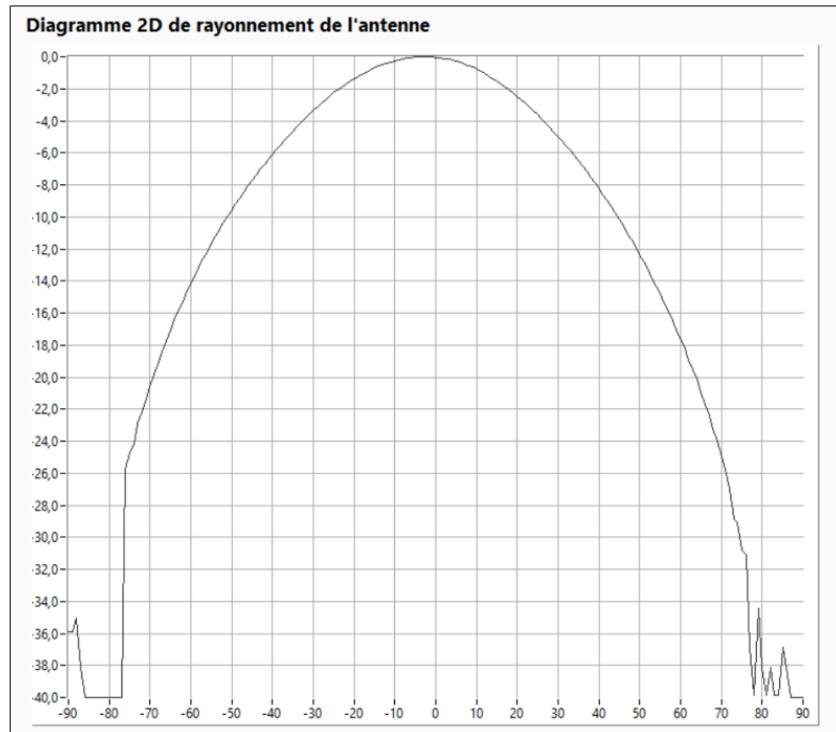


Figure 11: Diagramme de rayonnement mesuré dans le plan E

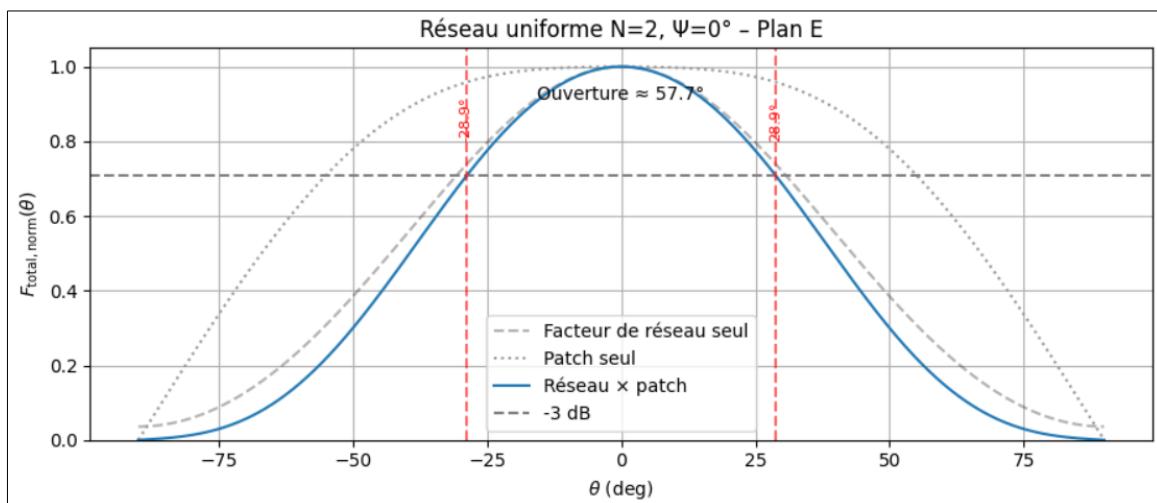


Figure 12: Diagramme de rayonnement théorique dans le plan E

Plan E	1er angle à -3 dB	2ème angle à -3 dB	Angle d'ouverture à -3 dB
Mesuré	-28.23°	28°	56.23°
Théorique	-28,9°	28,9°	57.8°

4 Mesure du gain

4.1 Méthode : formule de Friis

Pour deux antennes en champ lointain, la puissance reçue P_2 est liée à la puissance émise P_1 par la formule de Friis (en linéaire) :

$$\frac{P_2}{P_1} = G_1 G_2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \text{Att}_1 \text{Att}_2$$

où :

- G_1, G_2 sont les gains linéaires des antennes émettrice et réceptrice
- d est la distance entre les antennes
- λ est la longueur d'onde
- Att_1 et Att_2 sont les coefficients d'atténuation des deux câbles coaxiaux (en linéaire)

En pratique, on travaille en décibels, avec les puissances en dBm et les gains/atténuations en dB. On commence par mesurer les câbles seuls avec un atténuateur de 20 dB. Celui-ci est primordial afin de ne pas faire saturer le powermètre en mode *overload* :

$$P_e = 0 \text{ dBm} \quad P_s = -25,45 \text{ dBm}$$

L'atténuation totale vaut donc :

$$20 \text{ dB} + \text{Att}_1 + \text{Att}_2 = 25,45 \text{ dB} \quad \Rightarrow \quad \text{Att}_1 + \text{Att}_2 \approx 5,45 \text{ dB}$$

On effectue ensuite la mesure avec les antennes en vis-à-vis (distance $d \simeq 2 \text{ m}$) :

$$P_e = 0 \text{ dBm} \quad P_s = -33 \text{ dBm}$$

En prenant $f \simeq 2,5 \text{ GHz}$, la longueur d'onde est $\lambda \simeq 0,12 \text{ m}$. La formule de Friis s'écrit alors en dB :

$$P_s = P_e + G_1 + G_2 + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) - (\text{Att}_1 + \text{Att}_2)$$

Le terme géométrique vaut :

$$20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{0,12}{4\pi \times 2} \right) \simeq -46,4 \text{ dB}$$

On obtient alors :

$$-33 \simeq 0 + G_1 + G_2 - 46,4 - 5,45 \quad \Rightarrow \quad G_1 + G_2 \simeq 18,9 \text{ dB}$$

En prenant pour l'antenne émettrice (patch unitaire) un gain $G_1 \approx 10 \text{ dBi}$, on en déduit le gain de l'antenne réceptrice (réseau) :

$$G_2 \simeq 8,9 \text{ dBi}$$

Cette valeur donne l'ordre de grandeur du gain du réseau mesuré, cohérent avec ce que l'on attend pour un réseau de patchs micro-ruban.

5 Annexe

5.1 Méthodologie de la simulation

Les diagrammes théoriques ont été obtenus à l'aide d'un script Python reprenant exactement les modèles présentés dans le cours. L'objectif est de comparer rigoureusement le comportement théorique de l'antenne (élément seul, réseau 2×1 et réseau 2×2) aux mesures expérimentales réalisées en chambre anéchoïque.

5.1.1 Modélisation du patch élémentaire

Le patch rectangulaire est modélisé à partir de l'approximation par ligne de transmission.

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-1/2}. \quad (1)$$

L'allongement de longueur est donné par :

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\varepsilon_{\text{eff}} + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\varepsilon_{\text{eff}} - 0.258)(W/h + 0.813)}. \quad (2)$$

La longueur effective du patch est donc :

$$L_e = L + 2\Delta L. \quad (3)$$

À partir de ces paramètres, le diagramme élémentaire du patch est calculé selon l'expression fournie dans le cours. Dans le plan H ($\varphi = \pi/2$), le champ rayonné s'écrit :

$$E(\theta) \propto \sin \theta \frac{\sin \left(\frac{kh \sin \theta}{2} \right)}{\frac{kh \sin \theta}{2}} \frac{\sin \left(\frac{kW \cos \theta}{2} \right)}{\frac{kW \cos \theta}{2}} \cos \left(\frac{kL_e}{2} \sin \theta \right). \quad (4)$$

Le motif élémentaire est normalisé afin d'obtenir un maximum égal à 1.

5.1.2 Facteur de réseau

Le réseau considéré est uniforme, constitué de N éléments identiques, séparés d'une distance d . Le facteur de réseau normalisé est :

$$AF(\theta) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left| \frac{\sin \left(\frac{N}{2}(kd \sin \theta - \Psi) \right)}{\sin \left(\frac{1}{2}(kd \sin \theta - \Psi) \right)} \right|, \quad (5)$$

avec un pointage ($\Psi = 0$).

Longueur d'onde effective. Les interactions entre patchs se propagent en partie par une onde quasi-guidée dans le substrat. Pour cette raison, la longueur d'onde utilisée pour le facteur de réseau n'est pas celle dans l'air λ_0 , mais une longueur d'onde effective :

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}}, \quad k_{\text{eff}} = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{eff}}} = k_0 \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}. \quad (6)$$

Ce choix permet d'obtenir des ouvertures plus proches des mesures.

5.1.3 Combinaison motif élémentaire – réseau

Le diagramme total est obtenu en multipliant le motif élémentaire par le facteur de réseau :

$$F_{\text{total}}(\theta) = |E_{\text{patch}}(\theta)| \times |AF(\theta)|. \quad (7)$$

Chaque contribution est normalisée afin de distinguer clairement l'effet du réseau et celui du patch.

5.1.4 Détermination de l'ouverture à $-3dB$

L'ouverture angulaire est définie comme la largeur du lobe principal pour laquelle la puissance tombe à -3 dB, soit une amplitude égale à :

$$|F(\theta)| = \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (8)$$

Les deux angles θ_{-3dB} et θ_{+3dB} sont déterminés par interpolation linéaire, puis l'ouverture est :

$$\text{HPBW} = \theta_{+3dB} - \theta_{-3dB}. \quad (9)$$