

Chapitre 1

Antenne dipôle

1.1 Objectif

Le but est de réaliser une antenne qui résonne autour de 2.45 GHz. Le s_{11} à cette fréquence doit être inférieur à 10 dB.

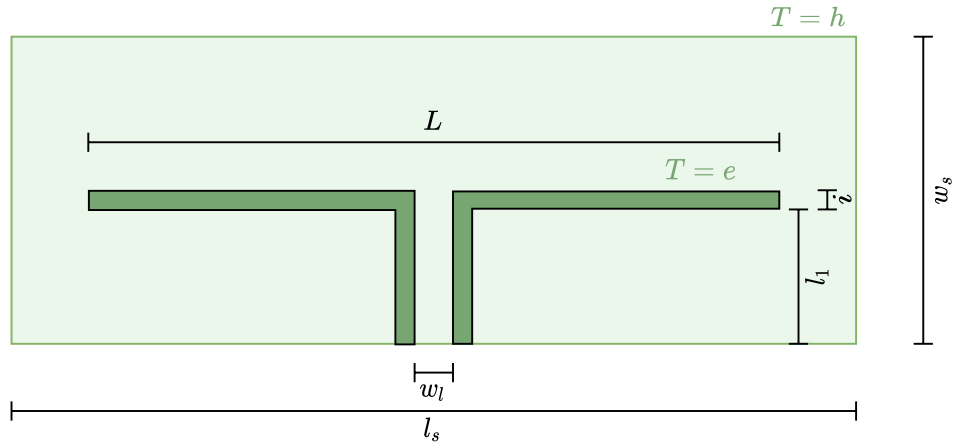


FIGURE 1.1 – Dimensions de l'antenne dipôle

| Variables | | |
|------------|----------------------------|------------|
| l_1 | Hauteur du pied | |
| i | Épaisseur des brins | |
| w_s | Largeur du PCB | 30 mm |
| l_s | Longueur du PCB | 80 mm |
| L | Longueur de l'antenne | |
| Constantes | | Valeur |
| w_l | Espacement entre les brins | 1.7 mm |
| h | Épaisseur du PCB | 1.6 mm |
| e | Épaisseur de cuivre | 35 μ m |

TABLE 1.1 – Liste des dimensions

1.2 FR-4

La longueur d'un brin horizontal est donnée par l'équation 1.1

$$L_2 = \frac{\lambda}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{2 \cdot F_r \sqrt{\epsilon_r}} \Rightarrow L_2 = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2.45 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{4.3}} = \underline{\underline{29.5 \text{ mm}}} \quad (1.1)$$

La dimension du pied est donnée par

$$l_1 = \frac{\lambda}{8} = \frac{c}{8 \cdot F_r} = \frac{3 \cdot 10^8}{8 \cdot 2.45 \cdot 10^9} \Rightarrow l_1 = \underline{\underline{15.3 \text{ mm}}} \quad (1.2)$$

La largeur des brins (i) a été fixée à 0.8 mm pour le moment.

1.2.1 Itérations

Premières itérations

Afin de se familiariser avec le dimensionnement de l'antenne dipôle planaire, la méthode utilisée consiste à modifier un seul des paramètres jusqu'à obtenir le résultat le plus proche possible des performances souhaitées puis de réaliser le même démarche pour un second paramètre et ainsi de suite pour les autres paramètres.

Afin de mettre en évidence l'influence de chaque paramètre de l'antenne sur ses performances, il a été choisi de premièrement trouver les meilleures performances de S_{11} possible en modifiant uniquement la longueur des brins horizontaux de l'antenne, soit L_2 . Le paramètre L_2 correspond à la **longueur d'un seul brin horizontal** du dipôle. Le paramètre L illustré sur le schéma de la figure 1.1 est donc décrit par :

$$L = 2 \cdot L_2 + w_l \quad \text{avec} \quad w_l \ll 2 \cdot L_2 \quad \Rightarrow \quad \boxed{L = 2 \cdot L_2}$$

La figure 1.3 illustre les premières itérations du dimensionnement de l'antenne dipôle sur substrat FR4 :

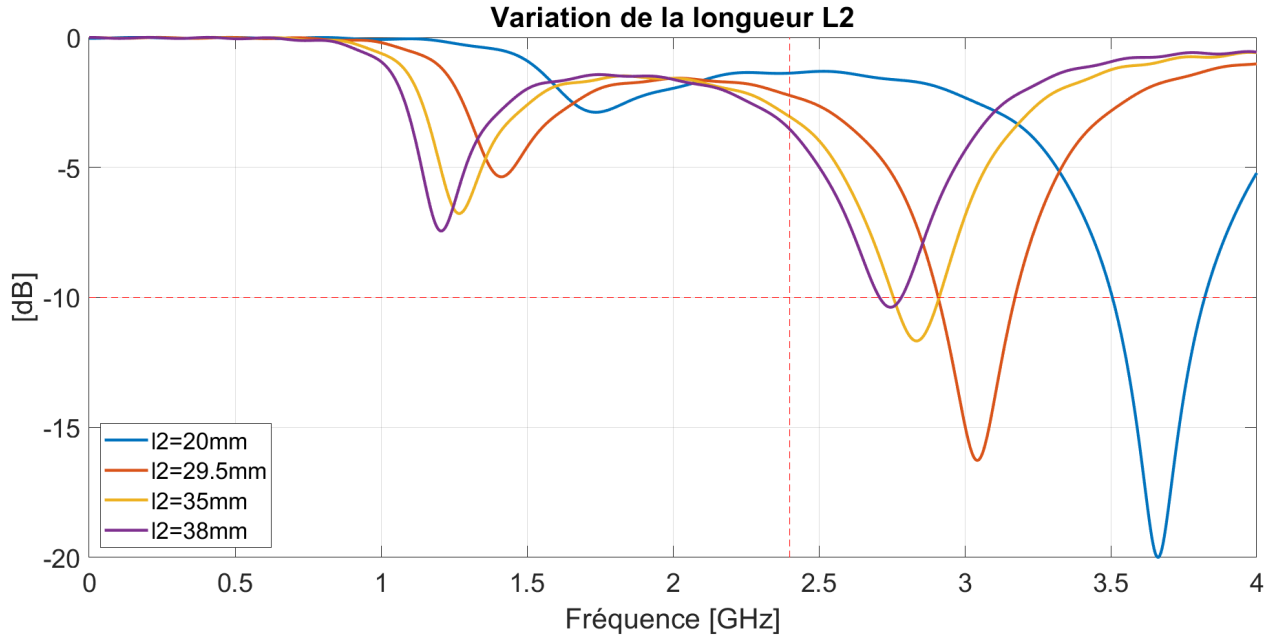


FIGURE 1.2 – Dimensionnement de l'antenne en ne variant que L

La figure 1.3 permet de constater plusieurs points intéressants :

Premièrement, il ressort nettement sur les courbes de S_{11} , obtenues par simulation, que l'antenne possède deux modes résonnants dans la plage de simulation définie (0...4 GHz), typiquement 1.2 GHz et 2.75 GHz pour $L_2 = 38$ mm. Ces modes résonnants sont simplement dues à la géométrie en "équerre" de l'antenne dipôle.

Il ressort aussi que les fréquences des modes résonnants de l'antenne sont inversement proportionnelles à la longueur du brin. Plus simplement, une diminution de la longueur du brin horizontal à pour conséquence de "pousser" les modes (pics de résonance) vers la droite et inversement. Ce qui est logique, car il a été mis en évidence, dans la théorie, que la longueur des brins horizontaux était liée à la fréquence de résonance par la relation $L_2 = c / (2 \cdot F_r \cdot \sqrt{\epsilon_r})$. Une augmentation de la fréquence de résonance à donc bien pour conséquence une diminution de la longueur de L_2 et réciproquement.

Deuxièmement, la longueur de brin L_2 calculée dans la théorie ne donne pas les résultats escomptés. Typiquement, une longueur de brin, $L_2 = 29.5$ mm, donne deux modes résonnants, soit 1.412 GHz et 3.044 GHz, ce qui est très éloigné de la fréquence de résonance $F_r = 2.45$ GHz souhaitée.

Troisièmement, lorsque la longueur de brins L_2 diminue et donc que la fréquence de résonance des modes augmente, il apparaît que la valeur du S_{11} diminue rapidement pour le premier mode résonnant.

Une fois la meilleure valeur de L déterminée, ici $L_2 = 38\text{ mm}$, il est ensuite nécessaire d'améliorer les performances de l'antenne en variant cette fois la longueur du pied de l'antenne (l_1) et cela en gardant la longueur L_2 déterminée à l'étape précédente.

La figure 1.3 illustre le dimensionnement de la longueur du pied de l'antenne (l_1) afin d'obtenir le meilleur S_{11} possible pour la fréquence souhaitée de 2.45 GHz :

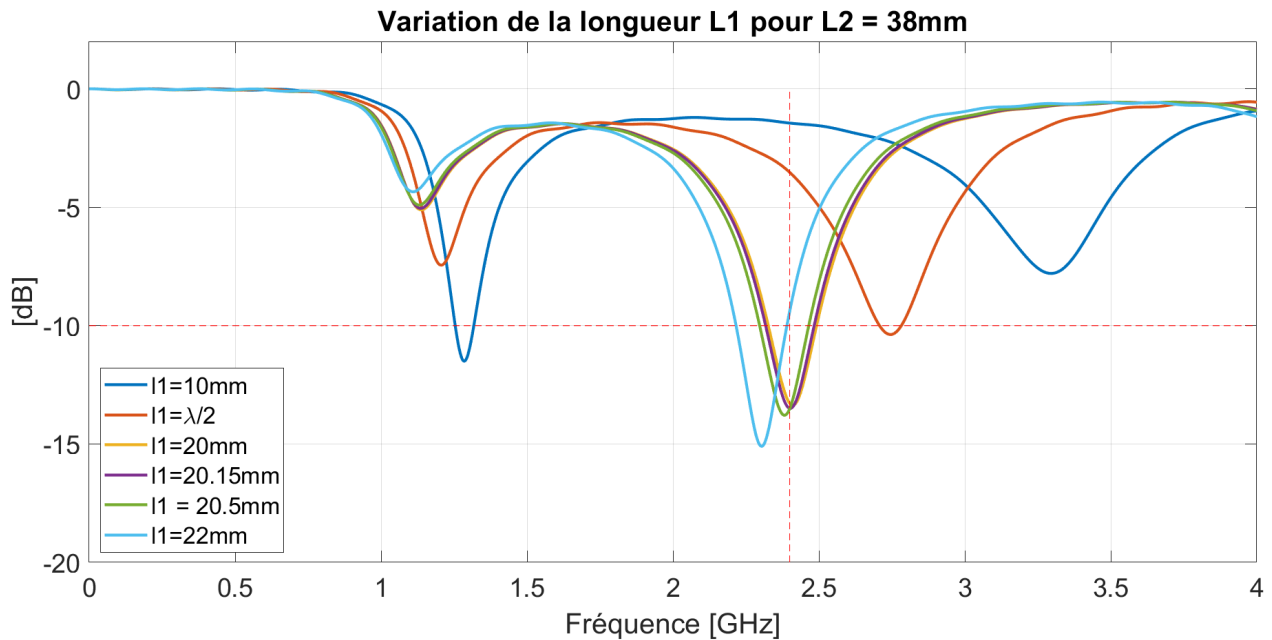


FIGURE 1.3 – Dimensionnement de l'antenne en variant que l_1

La figure 1.3 permet de constater plusieurs points intéressants :

Premièrement, il apparait clairement que la longueur proposée par la théorie, soit $l_1 = \lambda/2$ ne donne pas du tout les meilleures performances.

Deuxièmement, lorsque la longueur du pied de l'antenne (l_1) varie, cela influe sur deux paramètres ; la fréquence de résonance du mode et sa valeur de S_{11} . Il semble par contre que l'influence sur la fréquence du mode est moins prononcée que celle due à la longueur des brins horizontaux (L_2). De plus, l'influence est encore plus faible pour le premier mode que pour le second, ce qui nous arrange.

Troisièmement, La meilleure valeur de S_{11} est obtenu avec la longueur de pied d'antenne l_1 la plus faible. Il faudra donc chercher à diminuer cette valeur au maximum.

Ce procédé a été réalisé jusqu'à obtenir un résultat satisfaisant par rapport à l'objectif fixé dans la première partie, soit un S_{11} inférieur à -10 dB . Les valeurs de paramètres trouvés en ne variant que L_2 et l_1 donnant des performances satisfaisantes est :

$$L_2 = 21\text{ mm} \quad \text{et} \quad l_1 = 0.5\text{ mm}$$

1.2.2 Balayage des paramètres variables

Maintenant que les paramètres principaux de l'antenne ont été grossièrement dimensionnés. Il est intéressant de se pencher sur l'influence des autres paramètres encore disponible, soit :

i : Épaisseur des brins w_s : Largeur du PCB l_s : Longueur du PCB

Une méthode intéressante pour comprendre l'influence de chaque paramètre sur les performances de l'antenne consiste à réaliser une suite de simulation en faisant varier chaque paramètre individuellement afin d'en constater l'impacte sur la courbe du S_{11} .

La figure 1.4 illustre les différentes courbes de S_{11} obtenues par le balayage de la valeur de chaque paramètre :

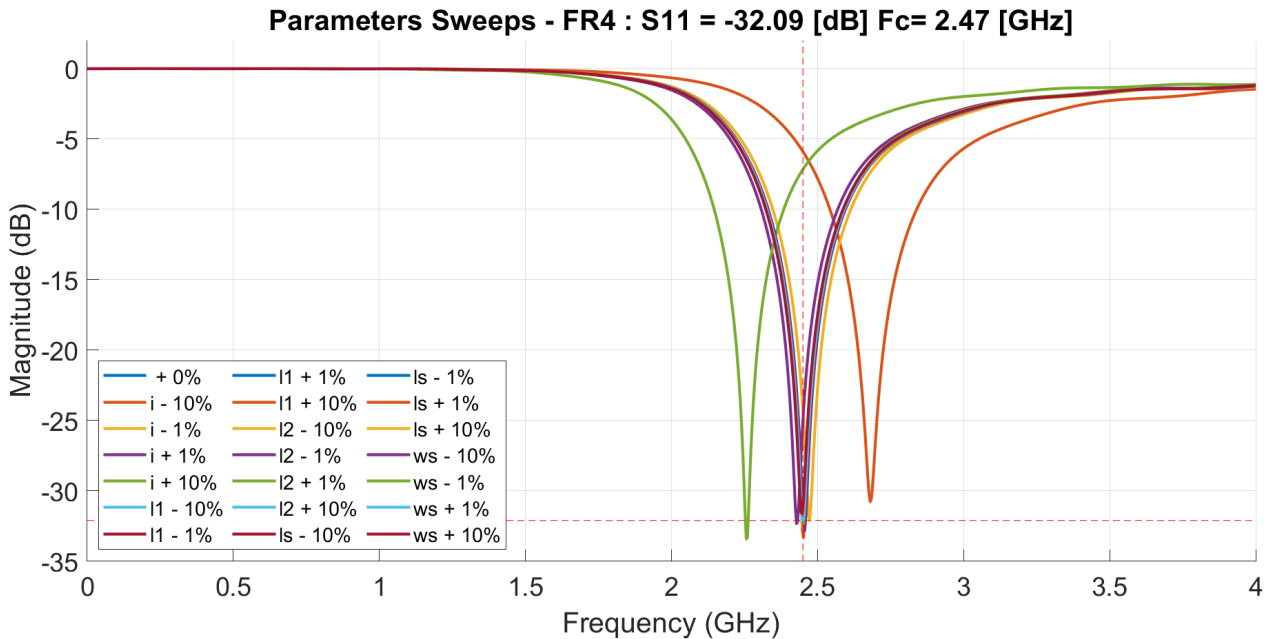


FIGURE 1.4 – Balayage de paramétrie de l'antenne dipôle avec substrat FR4

Il apparait de manière évidente sur la figure 1.4 que certains paramètres ont beaucoup plus d'influence que d'autre sur la courbe du S_{11} . Il ressort même que deux courbes ont été décalées de 250 MHz de part et d'autre de la fréquence visée (2.45 GHz). Les autres courbes restent condensées, proches de la fréquence cible et ne varient que très légèrement.

Afin de mieux mettre en évidence l'influence de chaque paramètre sur les différents critères de performance de l'antenne, il est intéressant d'illustrer la variation normalisée de chaque critère de performance par rapport au changement des dits paramètres.

La figure 1.5 illustre la variation normalisée des critères de performances de l'antenne en fonction du dimensionnement de ses paramètres :

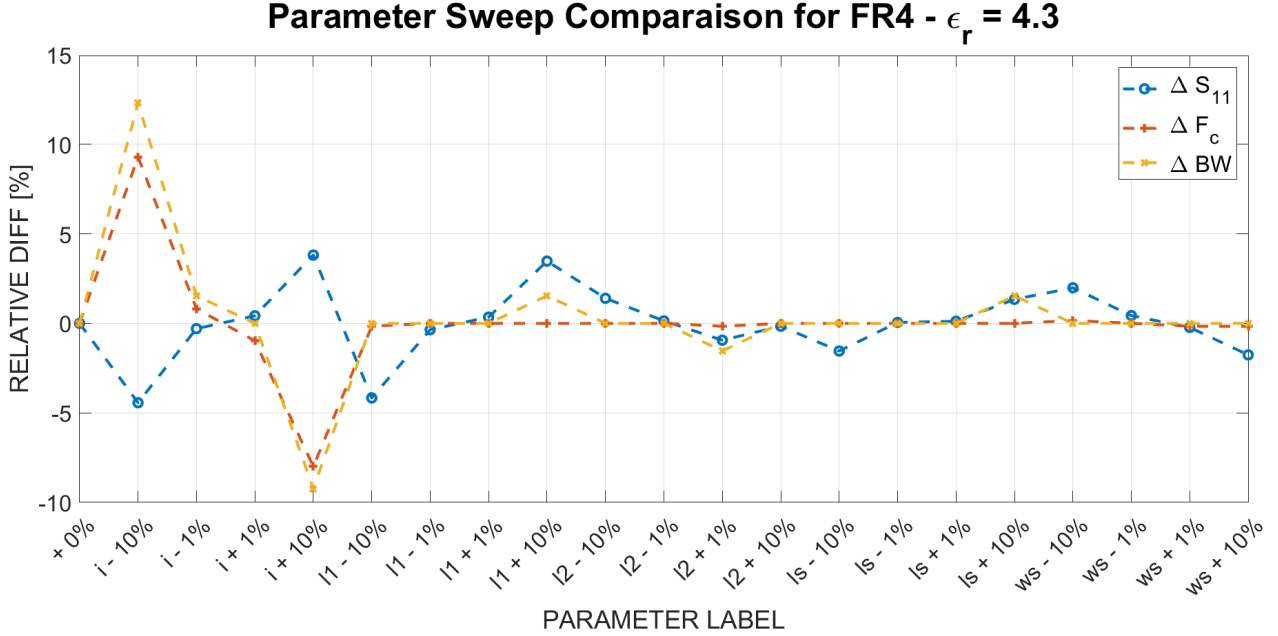


FIGURE 1.5 – Variation normalisée des critères de performance

Il ressort très nettement sur la figure 1.5, que certains paramètres ont une influence sur les critères de performance nettement plus marquée que d'autre, il est possible de remarquer les points suivants :

Larg. de brin i : Le paramètre le plus influant sur les trois critères de performances, soit le S_{11} , la fréquence de résonance et la bande passante. Une diminution de 10 % de i engendre une augmentation d'environ 10 % du de la fréquence de résonance et de la bande passante ainsi qu'une diminution de presque 5 % du S_{11} . Un comportement équivalent, mais de polarité inverse est visible pour une augmentation de 10 % de i .

Long. de brin vert. l_1 : Deuxième paramètre le plus influant. Une diminution de 10 % de l_1 engendre principalement une diminution de presque 5 % du S_{11} . À l'inverse, une augmentation de 10 % de l_1 engendre une augmentation de presque 5 % du S_{11} et aussi une faible augmentation de presque 2 % de la bande passante.

Long. de brin hor. L_2 : Influence assez faiblement les critères de performance de l'antenne. Une augmentation de quelques percent apparait lorsque la valeur de L_2 est augmenté. Sinon une légère augmentation de quelques percent du S_{11} est visible lorsque L_2 diminue de 10 %.

Long. du PCB l_s : N'influence quasiment que la valeur du S_{11} , et cela, de manière non linéaire et avec de faibles variations.

Larg. du PCB w_s : N'influence que le S_{11} , cela de manière linéaire et inversement proportionnel à la variation de la valeur de w_s .

La table 1.2 décrit en détail l'influence de chaque paramètre de l'antenne sur les critères de performance de cette dernière :

| Var | ID | S_{11} [dB] | dS_{11} [%] | F_r [GHz] | dF_r [%] | BW [MHz] | dBW [%] |
|--------------|----|---------------|---------------|-------------|------------|------------|-----------|
| +0 % | 1 | -32.19 | 0 | 2.452 | 0 | 260 | 0 |
| $i - 10\%$ | 2 | -30.763 | -4.4337 | 2.68 | 9.2985 | 292 | 12.308 |
| $i - 1\%$ | 3 | -32.095 | -0.29627 | 2.472 | 0.81566 | 264 | 1.5385 |
| $i + 1\%$ | 4 | -32.326 | 0.42274 | 2.428 | -0.97879 | 260 | 0 |
| $i + 10\%$ | 5 | -33.418 | 3.8133 | 2.256 | -7.9935 | 236 | -9.2308 |
| $l_1 - 10\%$ | 6 | -30.849 | -4.1664 | 2.448 | -0.16313 | 260 | 0 |
| $l_1 - 1\%$ | 7 | -32.077 | -0.35265 | 2.452 | 0 | 260 | 0 |
| $l_1 + 1\%$ | 8 | -32.302 | 0.3489 | 2.452 | 0 | 260 | 0 |
| $l_1 + 10\%$ | 9 | -33.309 | 3.4767 | 2.452 | 0 | 264 | 1.5385 |
| $L_2 - 10\%$ | 10 | -32.641 | 1.3998 | 2.452 | 0 | 260 | 0 |
| $L_2 - 1\%$ | 11 | -32.235 | 0.13911 | 2.452 | 0 | 260 | 0 |
| $L_2 + 1\%$ | 12 | -31.888 | -0.93852 | 2.448 | -0.16313 | 256 | -1.5385 |
| $L_2 + 10\%$ | 13 | -32.139 | -0.15899 | 2.452 | 0 | 260 | 0 |
| $l_s - 10\%$ | 14 | -31.693 | -1.5444 | 2.452 | 0 | 260 | 0 |
| $l_s - 1\%$ | 15 | -32.207 | 0.051382 | 2.452 | 0 | 260 | 0 |
| $l_s + 1\%$ | 16 | -32.229 | 0.11976 | 2.452 | 0 | 260 | 0 |
| $l_s + 10\%$ | 17 | -32.621 | 1.3393 | 2.452 | 0 | 264 | 1.5385 |
| $w_s - 10\%$ | 18 | -32.83 | 1.9869 | 2.456 | 0.16313 | 260 | 0 |
| $w_s - 1\%$ | 19 | -32.329 | 0.43203 | 2.452 | 0 | 260 | 0 |
| $w_s + 1\%$ | 20 | -32.117 | -0.22786 | 2.448 | -0.16313 | 260 | 0 |
| $w_s + 10\%$ | 21 | -31.623 | -1.7619 | 2.448 | -0.16313 | 260 | 0 |

TABLE 1.2 – Table de la variation des performances de l'antenne - FR4

1.2.3 Meilleures performances

Grâce au balayage de valeur des paramètres de l'antenne, il est possible de trouver le meilleur compromis pour obtenir les meilleures performances. Le meilleur candidat sélectionné est la simulation N°17, dont les paramètres sont décrits dans la table 1.3 :

| ID | 17 | — |
|-------|-------|----|
| i | 0.8 | mm |
| l_1 | 0.5 | mm |
| L_2 | 20.96 | mm |
| l_s | 88 | mm |
| w_s | 30 | mm |

TABLE 1.3 – Paramètre de l'antenne avec les meilleures performances (FR4)

La figure 1.6 illustre la courbe de S_{11} du candidat de simulation N°17, soit celui possédant les meilleures performances :

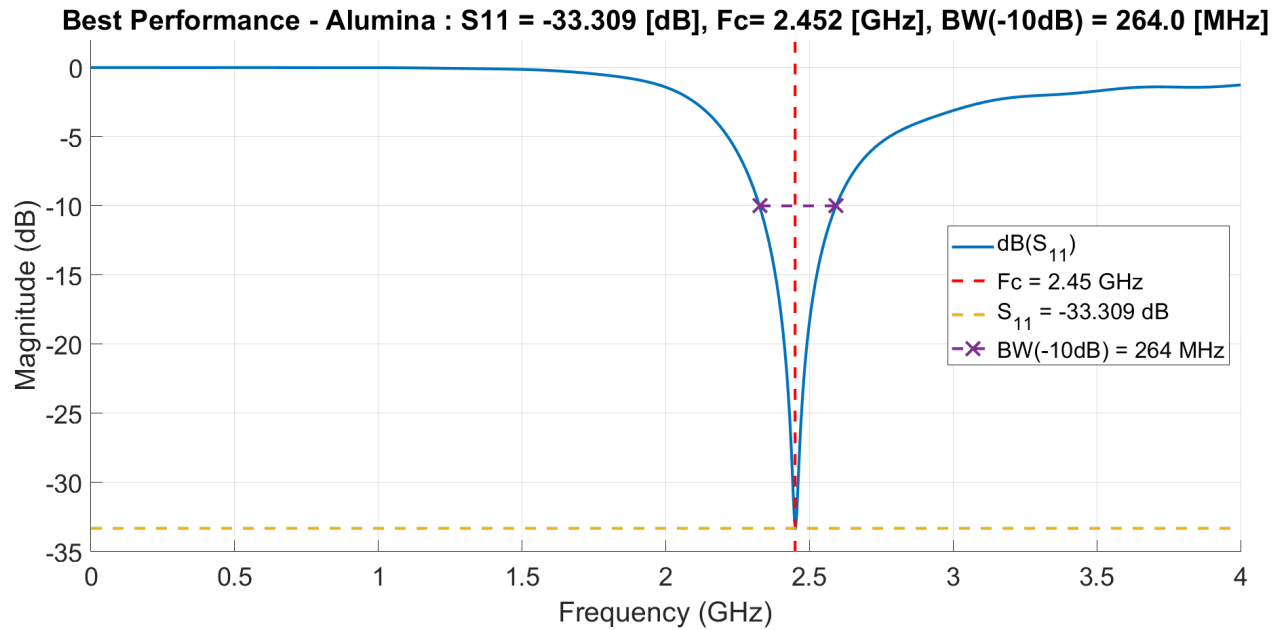


FIGURE 1.6 – Courbe S_{11} avec les paramètres donnant les meilleures performances générales (FR4)

L'antenne ainsi dimensionnée remplit bien les objectifs souhaités, car elle possède un $S_{11} = -33.3$ dB et une bande passante à -10 dB $BW = 264$ MHz ainsi qu'une fréquence de résonance de 2.45 GHz.

1.2.4 Rayonnement (champ lointain) avec les meilleures performances

Maintenant que l'antenne dipôle a été dimensionnée et qu'elle remplit les objectifs de concernant la bande passante et le S_{11} , il est encore intéressant de se pencher sur le diagramme de rayonnement en champ lointain.

La figure 1.7 illustre le rayonnement de l'antenne dipôle avec substrat en FR4 :

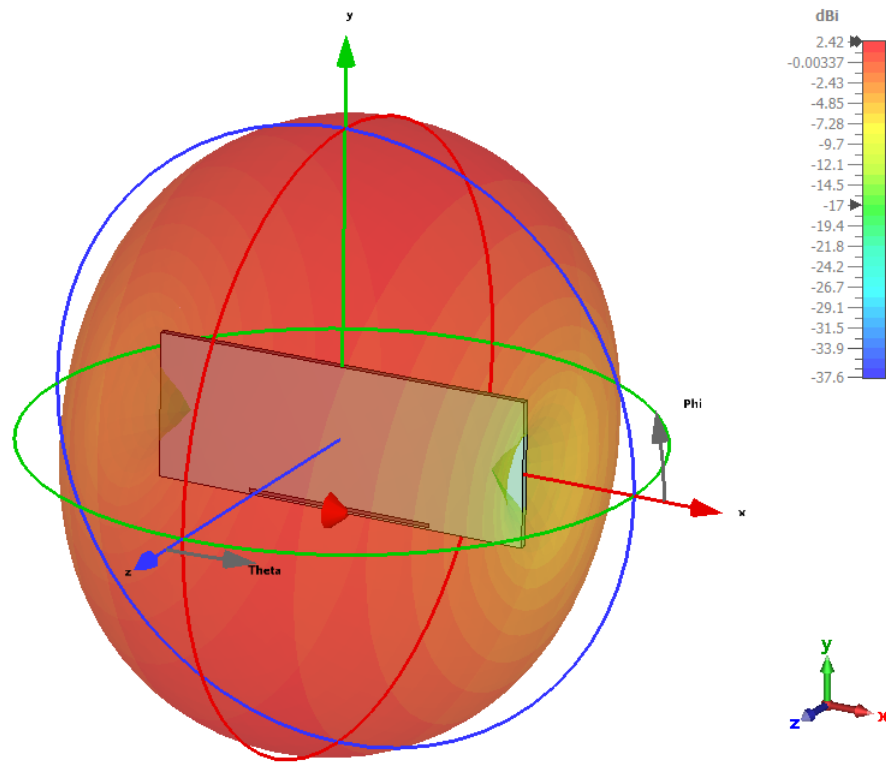


FIGURE 1.7 – Directivité de l'antenne - Céramique

Le diagramme de rayonnement de la figure 1.7 permet de constater que le rayonnement de l'antenne dipôle est isotrope et qu'il n'est par conséquent pas directionnel.

La table 1.4 décrit les performances concernant le rayonnement de l'antenne dipôle avec substrat en FR4 :

| | |
|-----------------|-------------------------------------|
| Type | Farfield |
| Approximation | enable($kR \gg 1$) |
| Component | Abs |
| Frequency | 2.45 GHz |
| Radial Efficacy | -0.010 15 dBi \Rightarrow 99.77 % |
| Total Efficacy | -0.012 56 dBi \Rightarrow 99.71 % |
| Directivity | 2.421 dBi |
| Gain (IEEE) | 2.411 dBi |
| Realized Gain | 2.408 dBi |

TABLE 1.4 – Caractéristique de rayonnement de l'antenne dipôle avec substrat FR4

1.3 Céramique

La méthode de prédimensionnement de l'antenne avec substrat en céramique est similaire à celui réalisé pour l'antenne avec substrat en FR4. Cette étape étant rébarbative, le choix est fait de passer directement au balayage des valeurs de paramètres.

1.3.1 Balayage des paramètres variables

La figure 1.8 illustre les différentes courbes de S_{11} obtenues par le balayage de la valeur de chaque paramètre :

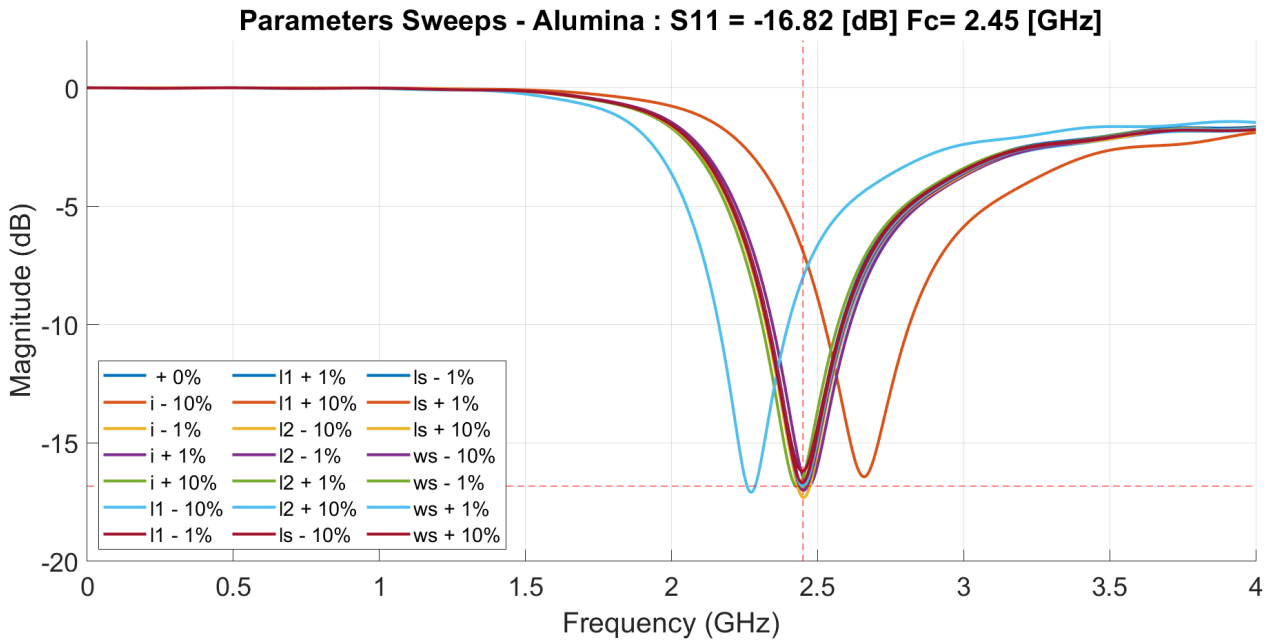


FIGURE 1.8 – Balayage de paramétrique de l'antenne dipôle avec substrat en céramique

Il apparait de manière évidente sur la figure 1.8 que certains paramètres ont beaucoup plus d'influence que d'autre sur la courbe du S_{11} . Il ressort aussi que deux courbes sont décalées de 250 MHz de part et d'autre de la fréquence visée (2.45 GHz). Les autres courbes restent condensées, proches de la fréquence cible et ne varient que très légèrement.

Comme pour l'antenne avec substrat FR4, il est aussi intéressant d'illustrer la variation normalisée de chaque critère de performance par rapport au changement des dits paramètres.

La figure 1.9 illustre la variation normalisée des critères de performances de l'antenne en fonction du dimensionnement de ses paramètres :

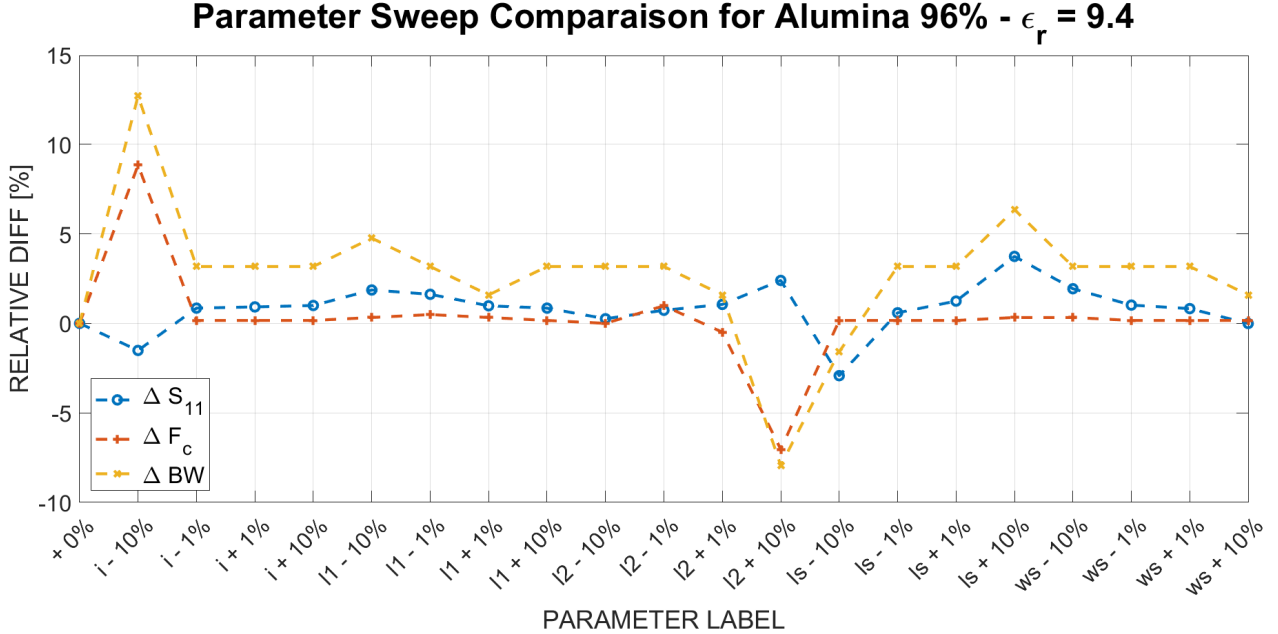


FIGURE 1.9 – Variation normalisée des performances

Il ressort aussi très nettement sur la figure 1.9, que certains paramètres ont une influence sur les critères de performance nettement plus marquée que d'autre, il est possible de remarquer les points suivants :

Larg. de brin i : Le paramètre le plus influant sur les trois critères de performances, soit le S_{11} , la fréquence de résonance et la bande passante. Une diminution de 10 % de i engendre une augmentation de plus de 10 % de la bande passante et presque de 10 % pour la fréquence de résonance ainsi qu'une diminution de presque 2 % du S_{11} . Contrairement à l'antenne sur FR4, il n'apparaît pas un comportement de polarité inverse équivalent pour une augmentation de 10 % de i . Seul la bande passante semble être significativement impacté par la variation de i .

Long. de brin vert. l_1 : Influence quasiment uniquement la bande passante de l'antenne. Une augmentation oscillant entre 2 % et 4 % est visible pour toutes les variations de la valeur de l_1 .

Long. de brin hor. L_2 : Deuxième paramètre le plus influent sur les performances de l'antenne. Seul une diminution de 10 % de L_2 engendre une diminution d'approximativement 8 % de la fréquence de résonance et de la bande passante. Sinon, une augmentation quasiment constante d'environ 4 % est visible pour les autres valeurs de l_2 .

Long. du PCB l_s : N'influence quasiment que la valeur du S_{11} ainsi que la bande passante, et cela, avec une augmentation maximum de 6 % de la bande passante et de 4 % du S_{11} .

Larg. du PCB w_s : N'influence que le S_{11} , cela de manière uniquement positive et seulement de quelques percent.

La table 1.5 décrit en détail l'influence de chaque paramètre de l'antenne sur les critères de performance de cette dernière :

| Var | ID | S_{11} [dB] | dS_{11} [%] | F_r [GHz] | dF_r [%] | BW [MHz] | dBW [%] |
|--------------|----|---------------|---------------|-------------|------------|------------|-----------|
| +0 % | 1 | -16.683 | 0 | 2.444 | 0 | 252 | 0 |
| $i - 10\%$ | 2 | -16.431 | -1.5122 | 2.66 | 8.838 | 284 | 12.698 |
| $i - 1\%$ | 3 | -16.825 | 0.85148 | 2.448 | 0.16367 | 260 | 3.1746 |
| $i + 1\%$ | 4 | -16.836 | 0.91825 | 2.448 | 0.16367 | 260 | 3.1746 |
| $i + 10\%$ | 5 | -16.849 | 0.99857 | 2.448 | 0.16367 | 260 | 3.1746 |
| $l_1 - 10\%$ | 6 | -16.994 | 1.8642 | 2.452 | 0.32733 | 264 | 4.7619 |
| $l_1 - 1\%$ | 7 | -16.954 | 1.6232 | 2.456 | 0.491 | 260 | 3.1746 |
| $l_1 + 1\%$ | 8 | -16.846 | 0.98059 | 2.452 | 0.32733 | 256 | 1.5873 |
| $l_1 + 10\%$ | 9 | -16.825 | 0.85118 | 2.448 | 0.16367 | 260 | 3.1746 |
| $L_2 - 10\%$ | 10 | -16.726 | 0.25835 | 2.444 | 0 | 260 | 3.1746 |
| $L_2 - 1\%$ | 11 | -16.805 | 0.73117 | 2.468 | 0.982 | 260 | 3.1746 |
| $L_2 + 1\%$ | 12 | -16.859 | 1.0583 | 2.432 | -0.491 | 256 | 1.5873 |
| $L_2 + 10\%$ | 13 | -17.083 | 2.3976 | 2.272 | -7.0376 | 232 | -7.9365 |
| $l_s - 10\%$ | 14 | -16.195 | -2.9234 | 2.448 | 0.16367 | 248 | -1.5873 |
| $l_s - 1\%$ | 15 | -16.781 | 0.59067 | 2.448 | 0.16367 | 260 | 3.1746 |
| $l_s + 1\%$ | 16 | -16.89 | 1.2434 | 2.448 | 0.16367 | 260 | 3.1746 |
| $l_s + 10\%$ | 17 | -17.307 | 3.7399 | 2.452 | 0.32733 | 268 | 6.3492 |
| $w_s - 10\%$ | 18 | -17.005 | 1.9337 | 2.452 | 0.32733 | 260 | 3.1746 |
| $w_s - 1\%$ | 19 | -16.853 | 1.0201 | 2.448 | 0.16367 | 260 | 3.1746 |
| $w_s + 1\%$ | 20 | -16.82 | 0.82384 | 2.448 | 0.16367 | 260 | 3.1746 |
| $w_s + 10\%$ | 21 | -16.682 | -0.0064138 | 2.448 | 0.16367 | 256 | 1.5873 |

TABLE 1.5 – Table de la variation des performances de l'antenne - Céramique

1.3.2 Meilleures performances

Comme pour la première antenne, le candidat possédant les meilleures performances est le N°17, dont les paramètres sont décrits dans la table 1.6 :

| ID | 17 | – |
|-------|-----|----|
| i | 0.8 | mm |
| l_1 | 0.5 | mm |
| l_2 | 17 | mm |
| l_s | 88 | mm |
| w_s | 30 | mm |

TABLE 1.6 – Paramètre de l'antenne avec les meilleures performances (céramique)

La figure 1.10 illustre la courbe de S_{11} du candidat de simulation N°17, soit celui possédant les meilleures performances :

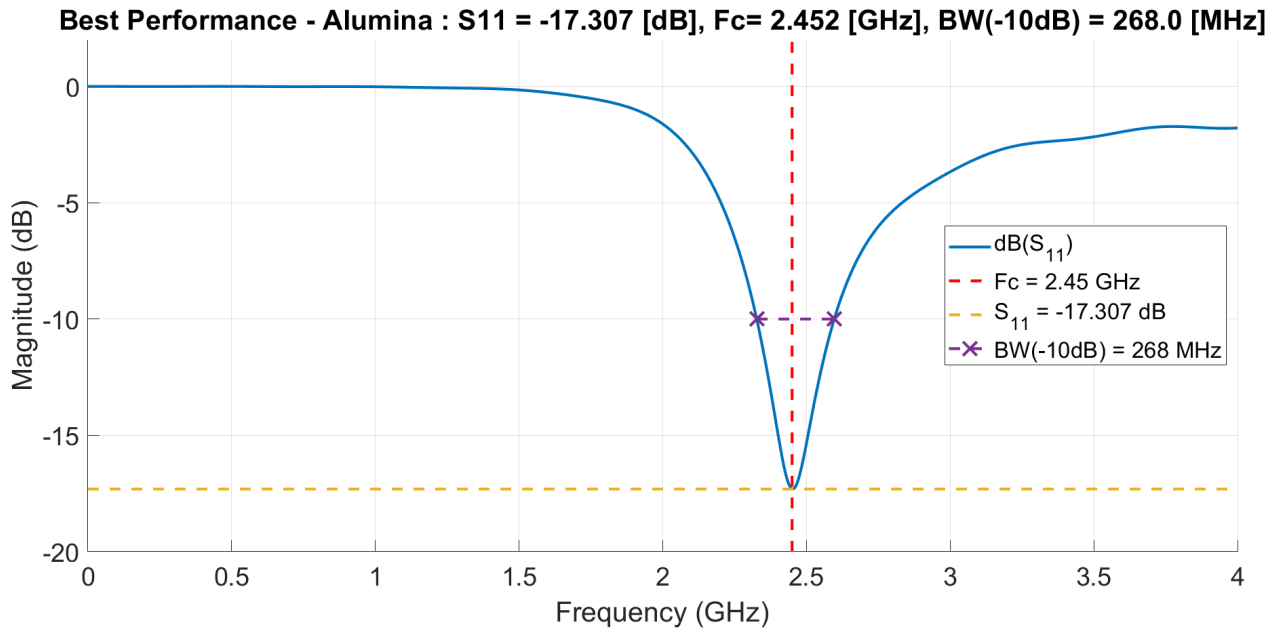


FIGURE 1.10 – Courbe S_{11} avec les paramètres donnant les meilleures performances générales (Céramique)

L'antenne ainsi dimensionnée remplit bien les objectifs souhaités, car elle possède un $S_{11} = -17.3$ dB et une bande passante à -10 dB $BW = 268$ MHz ainsi qu'une fréquence de résonance de 2.45 GHz.

1.3.3 Rayonnement (champ lointain) avec les meilleures performances

Maintenant que l'antenne dipôle a été dimensionnée et qu'elle remplit les objectifs de concernant la bande passante et le S_{11} , il est encore intéressant de se pencher sur le diagramme de rayonnement en champ lointain.

La figure 1.11 illustre le rayonnement de l'antenne dipôle avec substrat en céramique :

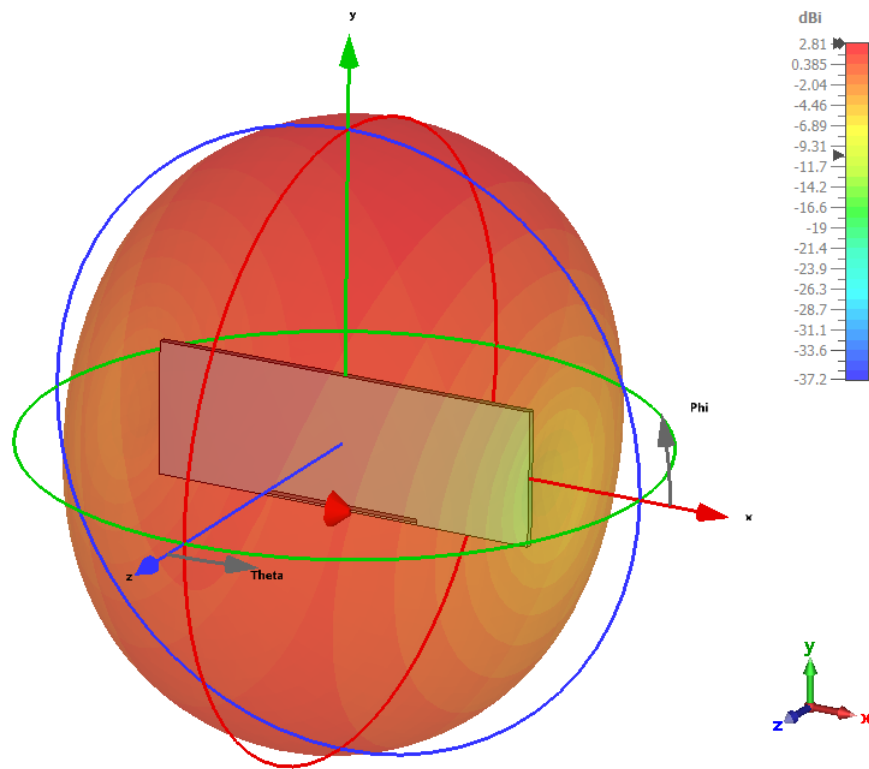


FIGURE 1.11 – Directivité de l'antenne - Céramique

Le constat est similaire à celui de l'antenne sur substrat en FR4.

La table 1.7 décrit les performances concernant le rayonnement de l'antenne dipôle avec substrat en céramique :

| | |
|-----------------|---------------------------------------|
| Type | Farfield |
| Approximation | enable($kR \gg 1$) |
| Component | Abs |
| Output | Directivity |
| Frequency | 2.45 GHz |
| Radial Efficacy | -0.011 19 dBi \Rightarrow 99.74 % |
| Total Efficacy | -0.092 94 dBi \Rightarrow 97.8827 % |
| Directivity | 2.820 dBi |
| Gain (IEEE) | 2.809 dBi |
| Realized Gain | 2.727 dBi |

TABLE 1.7 – Caractéristique de rayonnement de l'antenne dipôle avec substrat céramique

1.4 Conclusion

Cette première partie de laboratoire a permis de se familiariser et de mettre en pratique le dimensionnement d'une antenne dipôle planaire. Ceci par la mise en pratique de deux méthodes.

Dans un premier temps, en commençant par définir la longueur des brins horizontaux de l'antenne puis, une fois les meilleures performances obtenues, de dimensionner la longueur des brins verticaux (pied) de l'antenne dipôle.

La deuxième méthode consiste à réaliser un balayage de valeur pour les paramètres variable de l'antenne. Ce balayage permet ensuite de comprendre l'influence de chaque paramètre de l'antenne sur ces performances. Il est ensuite possible de sélectionner les paramètres donnant les meilleures performances globales.

Le dimensionnement satisfaisant a ainsi été trouvée, car il a permis de garantir, en simulation en tout cas, que l'antenne respectait des contraintes de fréquence de résonance (2.45 GHz) ainsi que de $S_{11} < 10$ dB, et cela, autant pour l'antenne avec substrat en FR4 que celui en céramique.

La comparaison des deux substrats est donnée dans la table 1.8 :

| Substrat | Céramique | FR4 |
|-----------------|-----------|-----------|
| Frequency | 2.45 GHz | 2.45 GHz |
| Radial Efficacy | 99.74 % | 99.77 % |
| Total Efficacy | 97.8827 % | 99.71 % |
| Directivity | 2.820 dBi | 2.421 dBi |
| Gain (IEEE) | 2.809 dBi | 2.411 dBi |
| Realized Gain | 2.727 dBi | 2.408 dBi |

TABLE 1.8 – Comparaison entre l'antenne sur substrat céramique et FR4

Il a été mis en évidence que le substrat céramique permet de diminuer la taille d'une antenne dipôle par rapport à son équivalent sur substrat en FR4. Il a par contre été constaté que l'antenne avec substrat en FR4 possède une efficacité légèrement supérieure à celle de la céramique. Cependant, le gain et la directivité des antennes sont légèrement meilleur avec le substrat en céramique.