

# Conception, modélisation et intégration d'une antenne patch microbande pour smartphone à 2,1 GHz

LI YANBO

Sorbonne Université

M2 SYSCOM

12 Décembre 2025

**Résumé**—Ce travail présente la conception et l'analyse d'une antenne patch microbande à 2,1 GHz pour application smartphone. L'antenne est dimensionnée analytiquement sur substrat FR4 ( $\epsilon_r = 4,4$ ,  $h = 0,8$  mm) puis modélisée sous CST Studio Suite. L'adaptation d'impédance est améliorée de  $-2,5$  dB à  $-10,5$  dB par optimisation de fentes symétriques ( $y_o = 8$  mm,  $x_o = 5$  mm). Les résultats montrent une excellente concordance entre solveurs fréquentiel et temporel (avec filtre AR). L'intégration dans un environnement smartphone révèle un décalage fréquentiel significatif de 2,1 GHz vers 1,43 GHz, soulignant la nécessité d'une optimisation in-situ.

## I. INTRODUCTION

L'objectif de ce TP est de concevoir et d'analyser une antenne patch microbande résonant à **2,1 GHz**, destinée à être intégrée dans un smartphone.

Le travail suit la démarche suivante :

- 1) **Dimensionnement analytique** de l'antenne patch (largeur, longueur, substrat, ligne d'alimentation).
- 2) **Modélisation 3D sous CST** (substrat, patch, ligne microstrip, port, conditions aux limites).
- 3) **Validation de la fréquence de résonance et de l'impédance d'entrée** à l'aide des solveurs fréquentiel et temporel (et du filtre AR).
- 4) **Visualisation des champs électriques** pour illustrer l'effet de bord des antennes patch.
- 5) **Amélioration de l'adaptation** par ajout de fentes (paramètres  $y_o$ ,  $x_o$ ).
- 6) **Intégration dans un smartphone simplifié** (boîtier plastique + écran en verre) et étude de l'impact sur les performances.

Le substrat utilisé est un FR4 ( $\epsilon_r = 4,4$ ,  $h = 0,8$  mm), conformément au poly de TP. Toute la modélisation est réalisée en unités **mm / GHz / ns** dans CST.

## II. DIMENSIONNEMENT ANALYTIQUE DE L'ANTENNE PATCH

### A. Données de base

- **Fréquence de travail visée** :  $f_r = 2,1$  GHz =  $2,1 \times 10^9$  Hz
- **Vitesse de la lumière** :  $c = 3 \times 10^8$  m/s =  $3 \times 10^{11}$  mm/s

— **Substrat** : FR4 / époxy

— Permittivité relative :  $\epsilon_r = 4,4$

— Épaisseur :  $h = 0,8$  mm

### B. Largeur du patch ( $W$ )

On utilise la formule classique :

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

1) Demi-longueur d'onde dans l'air :  $\frac{c}{2f_r} = \frac{3 \times 10^{11}}{2 \times 2,1 \times 10^9} \approx 71,43$  mm

2) Facteur diélectrique :  $\sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \sqrt{\frac{2}{5,4}} \approx 0,6086$

3) Largeur du patch :  $W \approx 71,43 \times 0,6086 \approx 43,47$  mm

### C. Permittivité effective ( $\epsilon_{\text{eff}}$ )

La permittivité effective tient compte du fait qu'une partie du champ est dans l'air, l'autre dans le substrat :

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

En remplaçant les valeurs :

$$\frac{\epsilon_r + 1}{2} = 2,7$$

$$\frac{\epsilon_r - 1}{2} = 1,7$$

$$\frac{12h}{W} = \frac{12 \times 0,8}{43,47} \approx 0,2208$$

$$\left( 1 + \frac{12h}{W} \right)^{-1/2} \approx 0,905$$

On obtient :

$$\epsilon_{\text{eff}} \approx 2,7 + 1,7 \times 0,905 \approx 4,24 \quad (3)$$

### D. Allongement électrique ( $\Delta L$ )

L'effet de bord allonge électriquement le patch. L'allongement de chaque côté est donné par :

$$\Delta L = 0,412h \cdot \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0,3)(\frac{W}{h} + 0,264)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0,258)(\frac{W}{h} + 0,8)} \quad (4)$$

Avec  $\frac{W}{h} \approx 54,34$ , on obtient numériquement :  $\Delta L \approx 0,37$  mm

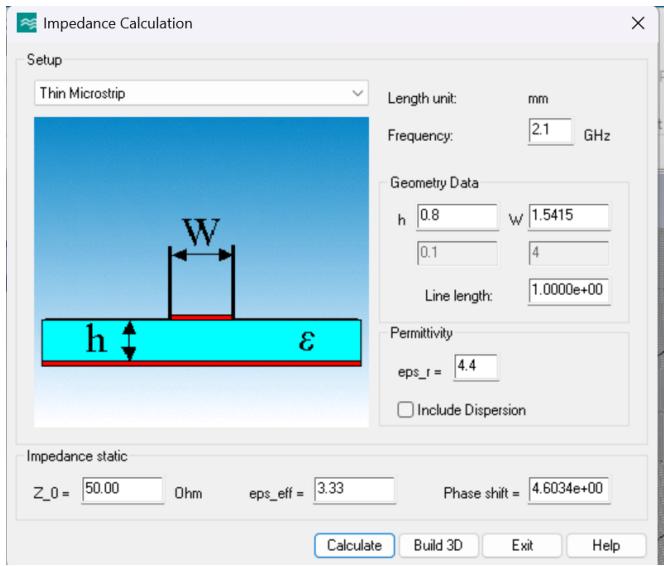


FIGURE 1. Calcul de l'impédance de la ligne microstrip dans CST (macro Impedance Calculation,  $Z_0 \approx 50 \Omega$ ).

### E. Longueur physique du patch ( $L$ )

La longueur électrique effective est :

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2f_r\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \approx \frac{71,43}{\sqrt{4,24}} \approx 34,69 \text{ mm} \quad (5)$$

La longueur physique en tenant compte des deux allongements est :

$$L = L_{\text{eff}} - 2\Delta L \approx 34,69 - 2 \times 0,37 \approx 33,95 \text{ mm} \quad (6)$$

### F. Largeur de la ligne d'alimentation ( $50 \Omega$ )

La ligne d'alimentation est une microligne  $50 \Omega$  réalisée sur le même substrat FR4 ( $\epsilon_r = 4,4$ ,  $h = 0,8 \text{ mm}$ ). La largeur  $A$  est déterminée via le macro « **Impedance Calculation** → **Thin Microstrip** » de CST (Fig. 1) :

- Paramètres saisis :  $h = 0,8 \text{ mm}$ ,  $\epsilon_r = 4,4$ ,  $f = 2,1 \text{ GHz}$ .
- En ajustant la largeur jusqu'à obtenir  $Z_0 \approx 50 \Omega$ , on trouve :

$$A \approx 1,54 \text{ mm} \quad (Z_0 \approx 50,16 \Omega) \quad (7)$$

### G. Longueur de la ligne d'alimentation

Le poly de TP impose que la longueur de la ligne d'alimentation soit égale à une demi-longueur d'onde dans l'air afin d'éviter l'excitation d'ondes évanescentes au niveau du port.

La longueur d'onde dans l'air à 2,1 GHz vaut :

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r} = \frac{3 \times 10^{11}}{2,1 \times 10^9} \approx 142,86 \text{ mm} \quad (8)$$

On en déduit la longueur de la ligne :

$$L_{\text{feed}} = \frac{\lambda_0}{2} \approx 71,43 \text{ mm} \quad (9)$$

### H. Paramètres récapitulatifs

Les dimensions calculées et choisies pour la modélisation sont :

- **Substrat (FR4)** :  $\epsilon_r = 4,4$ ,  $h = 0,8 \text{ mm}$
- **Patch** :  $W = 43,47 \text{ mm}$ ,  $L = 33,95 \text{ mm}$
- **Ligne d'alimentation ( $50 \Omega$ )** : largeur  $A = 1,54 \text{ mm}$ , longueur  $L_{\text{feed}} = 71,43 \text{ mm}$
- **Dimensions globales du substrat** :  $W_{\text{sub}} = 80 \text{ mm}$ ,  $L_{\text{sub}} = 120 \text{ mm}$

## III. PARAMÈTRES CST ET LISTE DE VARIABLES

### A. Création du projet CST

- 1) **Template utilisé** : New Project → Antenna → Planar
- 2) **Unités** :
  - Unités de longueur : mm
  - Unités de fréquence : GHz
  - Unités de temps : ns
- 3) **Bande de fréquence** :
  - $f_{\min} = 1 \text{ GHz}$
  - $f_{\max} = 3 \text{ GHz}$
  - Fréquence de référence : 2,1 GHz

### B. Définition de la liste de paramètres

Les paramètres suivants sont ajoutés dans la **Parameter List** (Fig. 2) :

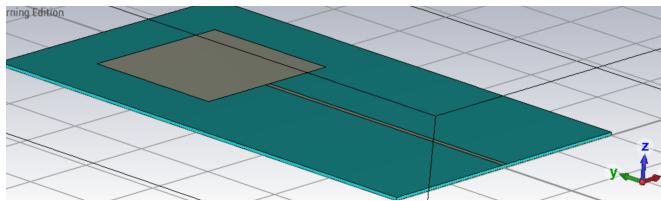
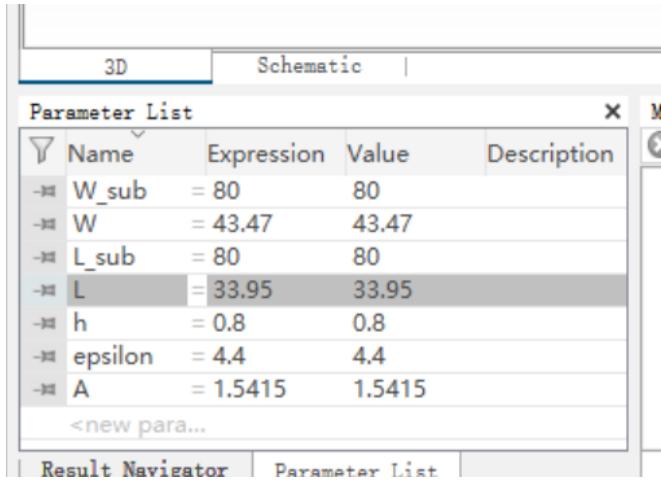
- $\epsilon_{\text{r}} = 4,4$  – Permittivité relative du substrat FR4
- $h = 0,8$  – Épaisseur du substrat en mm
- $W = 43,47$  – Largeur du patch en mm
- $L = 33,95$  – Longueur du patch en mm
- $A = 1,5415$  – Largeur de la ligne d'alimentation  $50 \Omega$
- $L_{\text{feed}} = 71,43$  – Longueur de la ligne d'alimentation ( $\lambda_0/2$  à 2,1 GHz)
- $W_{\text{sub}} = 80$  – Largeur du substrat
- $L_{\text{sub}} = 120$  – Longueur du substrat

## IV. MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE DE L'ANTENNE

### A. Substrat (FR4)

Le substrat est modélisé par un parallélépipède rectangle de dimensions  $W_{\text{sub}} \times L_{\text{sub}} \times h$  :

- **Nom** : Substrate
- **Coordonnées (en mm)** :
  - $X_{\min} = -\frac{W_{\text{sub}}}{2}$ ,  $X_{\max} = +\frac{W_{\text{sub}}}{2}$
  - $Y_{\min} = 0$ ,  $Y_{\max} = L_{\text{sub}}$
  - $Z_{\min} = 0$ ,  $Z_{\max} = h$
- **Matériau** : FR4 (ou Epoxy),  $\epsilon_r = 4,4$ ,  $h = 0,8 \text{ mm}$



### B. Patch (PEC)

Le patch est une surface conductrice située à la surface supérieure du substrat (plan  $Z = h$ ) :

- **Nom :** Patch
- **Matériaux :** PEC (Perfect Electric Conductor)
- Coordonnées :
  - $X_{min} = -\frac{W}{2}$ ,  $X_{max} = +\frac{W}{2}$
  - $Y_{min} = L_{feed}$ ,  $Y_{max} = L_{feed} + L$
  - $Z_{min} = h$ ,  $Z_{max} = h$

### C. Ligne d'alimentation microstrip (Feed)

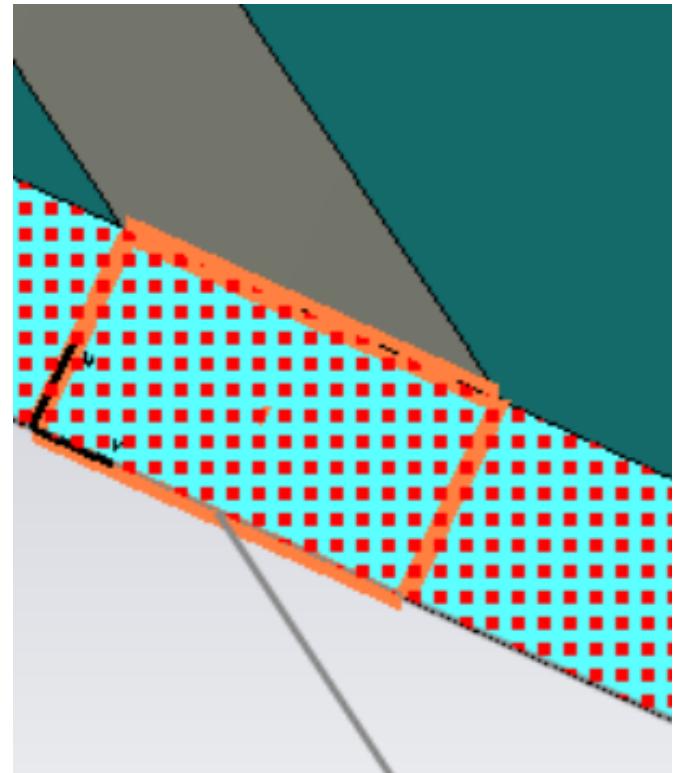
La ligne d'alimentation est une microligne de largeur  $A$ , de longueur  $L_{feed}$  :

- **Nom :** FeedLine
- **Matériaux :** PEC
- Coordonnées :
  - $X_{min} = -\frac{A}{2}$ ,  $X_{max} = +\frac{A}{2}$
  - $Y_{min} = 0$ ,  $Y_{max} = L_{feed}$
  - $Z_{min} = h$ ,  $Z_{max} = h$

La Fig. 3 montre la vue 3D du patch et de la ligne d'alimentation sur le substrat.

### D. Remarque sur le plan de masse

Le plan de masse infini n'est pas modélisé par un objet PEC séparé, mais par la condition aux limites Perfect E appliquée sur le plan  $Z_{min} = 0$ .



## V. CONDITIONS AUX LIMITES (BOUNDARIES)

Les conditions aux limites sont configurées comme suit :

- **Xmin, Xmax :** Open (add space)
  - **Ymin, Ymax :** Open (add space)
  - **Zmax :** Open (add space)
  - **Zmin :** Electric ( $E_t = 0$ ) (Perfect E)
- Le plan **Zmin = 0** est imposé comme conducteur parfait (Perfect E) et joue le rôle de **plan de masse infini**.

## VI. PORT D'ALIMENTATION ET CALCUL DU MODE

### A. Définition du port d'alimentation

Le port est placé à l'extrémité de la ligne d'alimentation, sur la face  $Y = 0$  (Fig. 4). Le port est défini dans le plan  $Y = 0$  et doit :

- recouvrir entièrement la section de la ligne microstrip
- inclure l'épaisseur complète du substrat (de  $Z = 0$  à  $Z = h$ )
- laisser quelques millimètres d'air au-dessus de la ligne

### B. Calcul du mode de la ligne

Pour vérifier l'impédance de la ligne, on utilise le solveur temporel en mode « calculate modes only » avec :

- $f_{min} = 1$  GHz
- $f_{max} = 3$  GHz

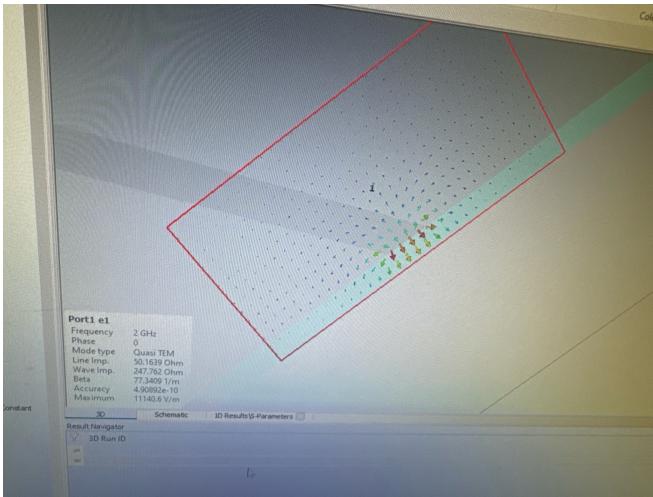


FIGURE 5. Vue du mode du port (Port 1, mode 1) avec la boîte d'information affichant Line impedance  $\approx 50 \Omega$ .

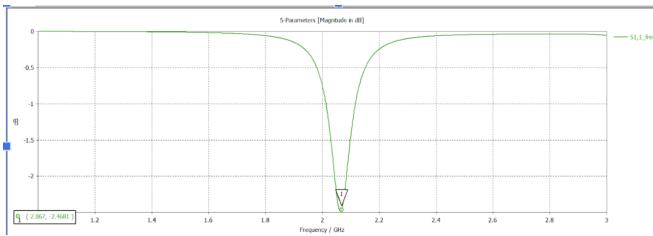


FIGURE 6. Courbe  $|S_{11}|$  (dB) obtenue avec le solveur fréquentiel pour le patch simple (sans fentes), montrant un minimum d'environ  $-2,5$  dB vers  $2,1$  GHz.

### C. Résultat : impédance de la ligne $\approx 50 \Omega$

Après le calcul, l'analyse du mode du port (Fig. 5) montre :

- **Mode type** : quasi-TEM (mode fondamental de la ligne microstrip)
- **Line impedance** :  $Z_0 \approx 50,16 \Omega$  (à  $f \approx 2$  GHz)

Cette valeur est en excellent accord avec la conception analytique.

## VII. SOLVEUR FRÉQUENTIEL ET PREMIER S11

### A. Configuration du solveur fréquentiel

Le solveur fréquentiel est configuré avec :

- Bande de fréquence :  $f_{min} = 1$  GHz,  $f_{max} = 3$  GHz
- Port excité : Port 1

### B. Résultat : premier S11 du patch simple

On trace la magnitude de  $S_{11}$  en dB sur l'intervalle 1–3 GHz (Fig. 6). La courbe obtenue présente :

- un minimum de  $|S_{11}|$  situé aux alentours de  $f \approx 2,07\text{--}2,10$  GHz
- une profondeur de ce minimum d'environ  $|S_{11}|_{min} \approx -2,5$  dB

On en déduit que la fréquence de résonance est correcte, mais l'adaptation est mauvaise.

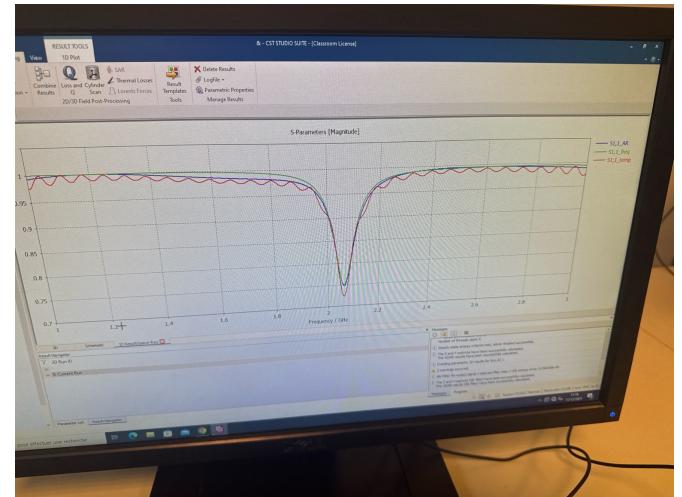


FIGURE 7. Comparaison des paramètres  $|S_{11}|$  en dB obtenus par les différentes méthodes : temporel brut (rouge), après filtre AR (bleu), et solveur fréquentiel (vert).

## VIII. SOLVEUR TEMPOREL, FILTRE AR ET COMPARAISON

### A. Simulation avec le solveur temporel

Le solveur temporel est configuré avec les mêmes paramètres. La courbe présente des ondulations importantes dues aux effets de fenêtre temporelle.

### B. Application du filtre AR

Pour améliorer la qualité spectrale, on applique le filtre AR sur les signaux de port. CST recalcule les paramètres S à partir des signaux filtrés.

### C. Comparaison des courbes S11

On superpose trois courbes (Fig. 7) :

- $|S_{11}|_{freq}$  : résultat du solveur fréquentiel
- $|S_{11}|_{temp}$  : résultat brut du solveur temporel (avec ondulations)
- $|S_{11}|_{AR}$  : résultat après filtre AR (lisse)

Les courbes  $|S_{11}|_{AR}$  et  $|S_{11}|_{freq}$  sont quasi confondues, validant l'utilisation du filtre AR.

## IX. VISUALISATION DES CHAMPS E ET EFFET DE BORD

### A. Mise en place du monitor de champ E

Un monitor de champ électrique est ajouté à la fréquence  $f = 2,1$  GHz.

### B. Visualisation du champ E sur le plan du patch

On affiche le champ E dans le plan  $Z = h$  (Fig. 8). Les observations principales sont :

- Le champ est maximal au niveau des bords rayonnants du patch
- Le champ au centre du patch est nettement plus faible
- Effet de bord clairement visible

Cette distribution confirme le modèle de cavité d'une antenne patch : les deux bords opposés se comportent comme des ouvertures rayonnantes.

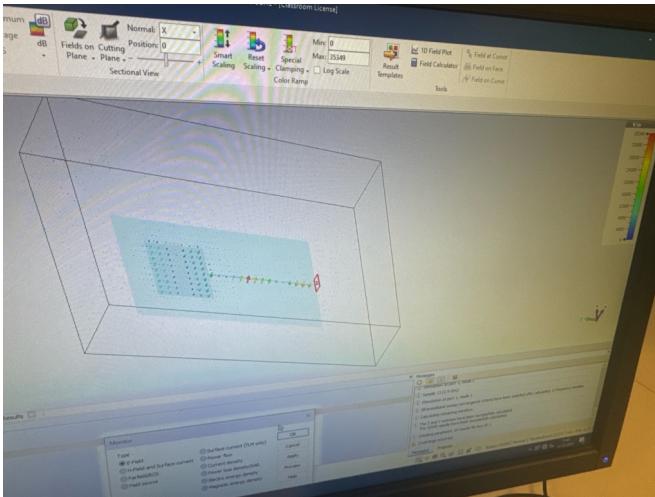


FIGURE 8. Vue 2D/3D du champ électrique à  $f = 2,1$  GHz montrant la distribution du champ sur le patch, avec des maxima au niveau des bords rayonnants.

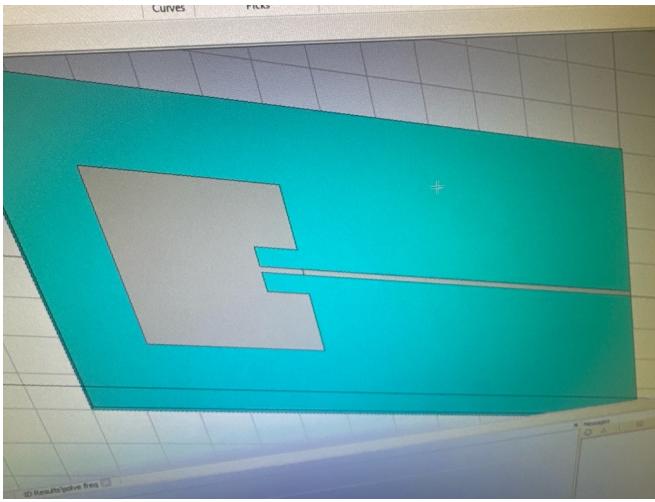


FIGURE 9. Vue 3D du patch fendu avec les deux fentes symétriques de longueur  $y_o = 8$  mm et de largeur  $x_o = 5$  mm.

## X. AMÉLIORATION DE L'ADAPTATION PAR FENTES ( $y_o, x_o$ )

### A. Principe des fentes (slots) $y_o, x_o$

On ajoute deux fentes rectangulaires symétriques de part et d'autre de la ligne d'alimentation. Ces fentes permettent de modifier l'impédance d'entrée et de la rapprocher de  $50 \Omega$ .

### B. Paramétrisation et modélisation

Deux nouveaux paramètres sont introduits :

- $y_o$  : longueur des fentes le long de Y (en mm)
- $x_o$  : largeur de chaque fente le long de X (en mm)

Les fentes sont modélisées par opération booléenne (Subtract) sur le patch (Fig. 9).

### C. Méthode d'optimisation

L'optimisation a été réalisée de manière itérative :

- 1) Variation de  $y_o$  à  $x_o$  fixé



FIGURE 10. Courbe  $|S_{11}|$  comparant le patch simple (minimum  $\approx -2,5$  dB) et le patch avec fentes optimisées (minimum  $\approx -10,5$  dB).

### 2) Ajustement de $x_o$ à $y_o$ fixé

### D. Résultat optimisé

Après optimisation, on obtient :

$$y_o = 8 \text{ mm}, \quad x_o = 5 \text{ mm} \quad (10)$$

Les résultats montrent (Fig. 10) :

- Patch simple :  $|S_{11,min}| \approx -2,5$  dB à  $f \approx 2,07$  GHz
- Patch avec fentes optimisées :  $|S_{11,min}| \approx -10,5$  dB à  $f \approx 2,11$  GHz

On observe une amélioration très nette de l'adaptation.

## XI. INTÉGRATION DANS UN SMARTPHONE

### A. Modélisation du smartphone

Le smartphone est représenté par (Fig. 11) :

- une coque plastique, dimensions  $58,27 \times 123,81 \times 7,62$  mm $^3$ ,  $\epsilon_r \approx 3$
- un écran en verre,  $\epsilon_r \approx 5,5$

### B. Comparaison et observations

L'ajout du boîtier plastique et de l'écran en verre modifie fortement la courbe  $|S_{11}|$  (Fig. 12) :

- Glissement fréquentiel : la résonance principale se décale vers  $\approx 1,43$  GHz
- Désadaptation à 2,1 GHz :  $|S_{11}|$  proche de 0 dB
- Résonances supplémentaires vers  $\approx 2,4$  GHz (modes parasites)

### C. Interprétation physique

Le comportement observé est dû à :

- 1) **Augmentation de la permittivité effective** : le verre et le plastique augmentent  $\epsilon_{eff}$ , entraînant un décalage vers les basses fréquences
- 2) **Modification des couplages** : apparition de modes parasites
- 3) **Réseau d'adaptation non optimal in-situ** : les fentes optimisées en espace libre ne conviennent plus

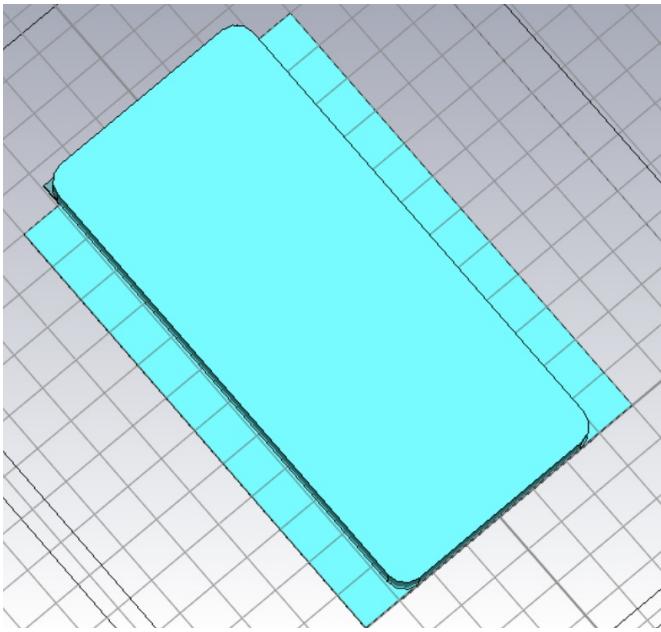


FIGURE 11. Vue 3D de l'antenne intégrée dans le smartphone (coque plastique arrondie + écran en verre).

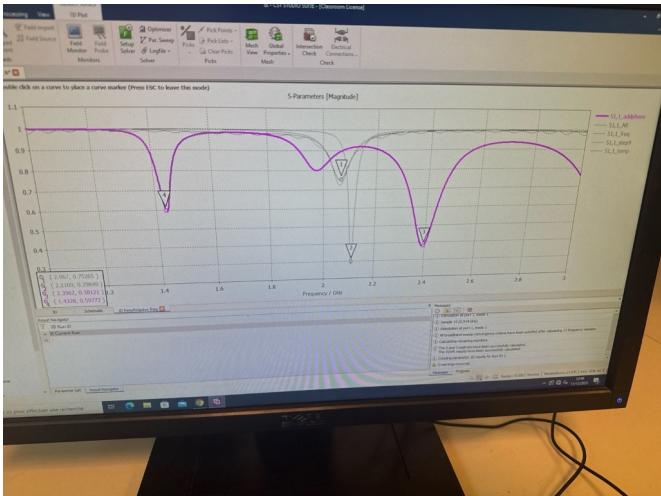


FIGURE 12. Courbes  $|S_{11}|$  superposées : antenne optimisée (sans smartphone) vs  $|S_{11}|_{addphone}$  (avec smartphone).

## XII. CONCLUSION

Une antenne patch microbande à 2,1 GHz a été dimensionnée analytiquement, modélisée sous CST, puis optimisée. Les principaux résultats sont :

- Sur FR4 ( $\epsilon_r = 4,4$ ,  $h = 0,8$  mm), les dimensions sont :  $W = 43,47$  mm,  $L = 33,95$  mm
- La ligne microstrip  $50 \Omega$  a été validée avec  $Z_0 \approx 50,16 \Omega$
- Le solveur temporel avec filtre AR coïncide parfaitement avec le solveur fréquentiel
- La visualisation du champ E illustre clairement l'effet de bord

- Les fentes optimisées ( $y_o = 8$  mm,  $x_o = 5$  mm) améliorent l'adaptation de  $-2,5$  dB à  $-10,5$  dB
- L'intégration smartphone détériore les performances et nécessite une re-optimisation in-situ

L'antenne peut être efficacement adaptée à 2,1 GHz en espace libre, mais son intégration dans un smartphone nécessite une optimisation spécifique tenant compte des matériaux et de l'environnement réel.