

# TP Simulation Hyperfréquence :

## *De la ligne microbande à l'antenne patch*

DESS Optoélectronique & Hyperfréquences

Ce TP a pour objectif de donner un bref aperçu sur la modélisation des antennes *patch*. Les bases nécessaires à la conception de ce type d'antenne seront données à titre indicatif, sans démonstrations et l'antenne patch de forme rectangulaire (la plus simple de toutes) sera présentée. A l'issue de ce TP, l'étudiant sera en mesure de concevoir à partir d'un cahier de charge une antenne plane qui pourrait par exemple être plaquée sur des véhicules terrestres, des avions...

## 1 Introduction

Une antenne à éléments rayonnants imprimés, communément appelée *antenne patch* est une ligne microbande de forme particulière. Elle se compose d'un plan de masse et d'un substrat diélectrique dont la surface porte un ou plusieurs éléments métalliques (figure 1).



FIG. 1 – Antenne à éléments imprimés.

### 1.1 Circuit ou antenne ?

Nous savons que la propagation des ondes dans une ligne microbande s'effectue à la fois dans le milieu diélectrique et dans l'air comme le montre la figure 2. Du point de vue modélisation, les deux milieux sont remplacés par un unique milieu effectif caractérisée par une constante diélectrique exprimée par :

$$\epsilon_{eff} = \left( \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right) + \left( \frac{\epsilon_r - 1}{2} \right) \left( 1 + 10 \frac{h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

La répartition des lignes de champs qui s'étendent autour et dans la structure dépend essentiellement :

- de la largeur  $w$  des circuits de métallisation
- des caractéristiques du substrat : à savoir sa constante diélectrique  $\epsilon_r$  et son épaisseur  $h$

Le choix des valeurs de ces paramètres conditionne généralement le type d'application que l'ingénieur peut concevoir avec la technologie microbande (ceci n'est pas totalement vrai, mais

suffisant à ce stade de compréhension). Pour la réalisation de circuits hyperfréquences, il recherchera à minimiser le rayonnement en espace libre de la ligne et choisira en conséquence un substrat tel que l'énergie électromagnétique reste concentrée dans le diélectrique (plus exactement dans la cavité que forme la bande métallique et le plan de masse). L'ingénieur utilisera donc des substrats de constante diélectrique élevé (comme de l'*Alumine*  $\epsilon_r = 9.9$ ) pour concevoir par exemple un amplificateur faible bruit...



FIG. 2 – Lignes de champ électrique.

En ce qui concerne les antennes, le substrat le mieux approprié est celui possédant une constante diélectrique faible, une épaisseur grande (par rapport à la longueur d'onde d'opération) et peu de pertes ( $\tan \delta$ ). Un substrat épais augmente la puissance rayonnée par l'antenne, réduit les pertes par effet Joules et améliore la bande passante de l'antenne. En contrepartie, le poids est augmenté. Une faible valeur de la constante diélectrique (typiquement  $\epsilon_r \ll 2.5$ ) favorise l'extension des champs autour de la ligne et donc la puissance rayonnée.

## 1.2 Avantages et limitations des antennes patch

Les antennes microstrip présentent de nombreux avantages comparés aux antennes micro-ondes classiques et leurs applications couvrent le large domaine de fréquence : 100 MHz à 100 GHz. Certains avantages sont les suivants :

- Faible poids, encombrement réduit, configurations conformes possibles ;
- Faible coût de fabrication, production en masse possible ;
- Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications ;
- Antennes multibandes, multipolarisations possibles ;
- Compatibilité avec les circuits hybrides et MMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuit) ;
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne.

Toutefois, les antennes microruban ont également des limitations que ne présentent pas les antennes traditionnelles :

- Bande passante étroite, souvent associée avec les problèmes de tolérances (géométriques et physiques) ;
- Généralement faible gain ( 6 dB ) ;
- La plupart des antennes rayonnent uniquement dans le demi-plan ;
- Supportent uniquement des faibles puissances ( 100 W ) ;
- Pertes de rayonnement par ondes de surfaces.

Ces limitations sont connues depuis plusieurs années et des progrès considérables ont été réalisés depuis pour améliorer les performances des antennes patch. Notamment, leur bande passante peut être augmentée jusqu'à 70 % en utilisant une configuration multicouche et leur gain peut s'accroître de 30 % en mettant en réseau plusieurs antennes.

## 2 L'antenne patch rectangulaire

### 2.1 Les diverses formes des éléments rayonnants

Les éléments rayonnants les plus simples ont la forme d'un rectangle, d'un carré, d'un disque circulaire ou encore d'un triangle comme le montre la figure 3 :



FIG. 3 – Divers types d'éléments rayonnants.

Parmi toutes ces formes, l'élément rectangulaire est sans contexte le plus facile à appréhender pour la compréhension des mécanismes de rayonnements des antennes microstrip. Mais tout d'abord se pose la question d'alimenter une telle structure :

### 2.2 Alimentation des éléments rayonnants

L'alimentation peut se faire par *connexion directe avec une ligne microbande* (généralement de  $50\ \Omega$ ) dont le point de jonction est sur l'axe de symétrie de l'élément (figure 4a) ou décalé par rapport à cet axe de symétrie (figure 4b) si cela permet une meilleure adaptation d'impédance ; dans ce but, l'alimentation axiale avec une encoche donne de bons résultats (figure 4c).

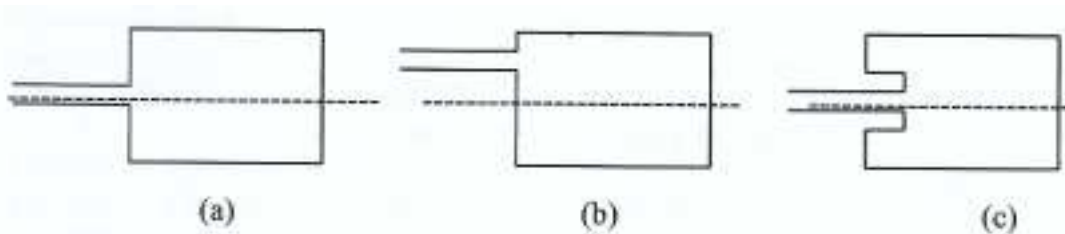


FIG. 4 – Alimentation par une ligne microbande (a) axiale (b) décalée (c) axiale avec encoche.

Il existe d'autres types d'alimentation que nous ne détaillerons pas ici comme *la connexion directe avec une ligne coaxiale* ou *l'alimentation par couplage électromagnétique*...

### 2.3 Mécanismes de rayonnement de l'antenne patch rectangulaire

Le mécanisme de rayonnement d'une antenne patch rectangulaire se comprend aisément à partir de sa forme géométrique. Lorsque vous excitez la ligne d'alimentation avec une source RF, une onde électromagnétique va se propager sur cette ligne puis va rencontrer l'élément rayonnant (de largeur plus grande que la ligne, donc plus apte à rayonner...). Une distribution de charge va s'établir à l'interface Substrat / Plan de masse, sur et sous l'élément rayonnant. La figure 5 montre cette distribution dans le cas particulier où l'antenne rayonne le plus efficacement c'est à dire lorsqu'elle devient résonante (la longueur de l'élément rayonnant est un multiple de la demi-longueur d'onde guidée). Le cas présenté correspond au mode fondamental de l'antenne.

Ces distributions de charge et les densités de courants associés induisent une distribution de champ électrique représentée à la figure 6 dans le mode fondamental.

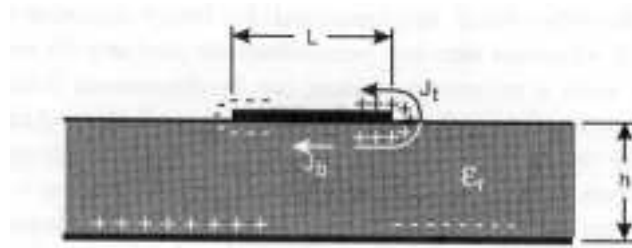


FIG. 5 – Distribution de charge et densité de courant sur une antenne microstrip.

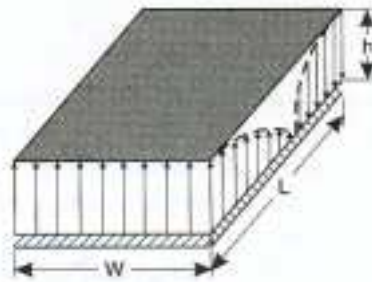


FIG. 6 – Distribution de la composante verticale du champ électrique dans le mode fondamental de l'antenne.

Une analyse plus détaillée des distributions de charge et du champ électrique dans ce mode permet de retrouver tous les paramètres caractéristiques d'une antenne : (diagramme et résistance de rayonnement, fréquences de résonance...).

1. Nous pouvons constater sur la figure 6 un renversement de phase des composantes verticales du champ électrique sur la longueur  $L$  de l'antenne. *Ce résultat est évident en lui-même. Ce cas correspond à la résonance  $\lambda_g/2$  de l'antenne...* Il en résulte une contribution vectorielle de ces composantes de champs **nulle**. Il en est de même pour les composantes verticales sur la largeur  $W$  du patch (non visible sur cette figure). La figure 7 montre les composantes horizontales des lignes de champ entourant l'élément imprimé. Contrairement à précédemment, elles créent des rayonnements qui sont en phase dans le plan de l'antenne. **Enfin, le rayonnement du patch peut être modélisé par celui de deux fentes parallèles distantes de la longueur  $L$  et de dimensions  $W \times h$ .** La théorie de l'électromagnétisme nous fournit alors les expressions des champs rayonnés par le patch à une certaine distance d'observation.

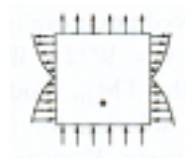


FIG. 7 – Distribution de la composante horizontale du champ électrique dans le mode fondamental de l'antenne.

2. Si nous nous intéressons maintenant à la distribution des charges, nous pourrions montrer par l'étude des composantes tangentielles du champ magnétique que le patch rectangulaire peut se modéliser comme une cavité avec 4 **murs magnétiques** (bords de la cavité) et 2 **murs électriques** (formés par les métallisations et dans l'approximation que la composante normale du champ électrique est constante). En posant les équations de propagations

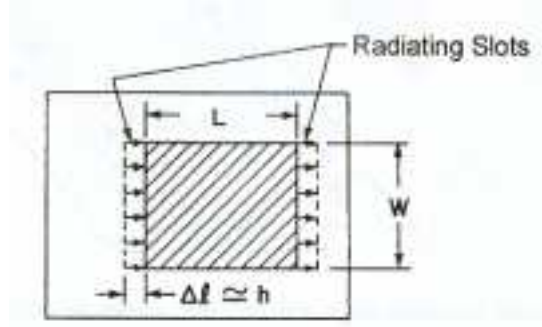


FIG. 8 – Modélisation de l'antenne patch rectangulaire par deux fentes couplées.

avec les conditions aux limites adéquates, on détermine assez facilement les fréquences de résonances de l'antenne patch rectangulaire :

$$f_{mn} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{\pi W_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{n}{\pi L_{eff}}\right)^2} \quad (2)$$

avec

$$W_{eff} = W + \Delta W, L_{eff} = L + \Delta L \quad (3)$$

et

$$\Delta L = 0.412h \left[ \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3)(\frac{W}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{eff} - 0.258)(\frac{W}{h} + 0.813)} \right] \quad (4)$$

$\Delta L$  et  $\Delta W$  représentent respectivement les extensions de longueur et de largeur dues à la courbure des bords.  $\Delta W$  s'obtient en remplaçant la largeur  $W$  par la longueur  $L$  dans la formule précédente.

## 2.4 Influence des paramètres géométriques sur les caractéristiques de l'antenne

### 2.4.1 Largeur $W$ du patch

La largeur du patch a un effet mineur sur les fréquences de résonance et sur le diagramme de rayonnement de l'antenne. Par contre, elle joue un rôle pour l'impédance d'entrée de l'antenne (eqn 5) et la bande passante à ses résonances (eqn 6) :

$$Z_{in} = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left( \frac{L}{W} \right)^2 \quad (5)$$

$$B = 3.11 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r^2} \frac{W}{L} \frac{h}{W} \quad (6)$$

Pour permettre un bon rendement de l'antenne, une largeur  $W$  pratique est :

$$W = \frac{c}{2f_{01}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (7)$$

où le terme  $f_{01}$  représente la fréquence fondamentale de l'antenne.

En contrepartie, le diagramme de rayonnement se dégrade (apparition de plusieurs lobes secondaires).

### 2.4.2 Longueur $L$ du patch

La longueur du patch détermine les fréquences de résonance de l'antenne. Il ne faut surtout pas oublier de retrancher la longueur  $\Delta L$  correspond aux extensions des champs (cf figure 2).

$$L = \frac{\lambda_{dielectric}}{2} - 2\Delta L = \frac{c}{2f_{01}\sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta L \quad (8)$$

## 2.5 Méthodologie

**Cahier de charge** Etant donné un substrat et une fréquence d'utilisation, trouver les dimensions de l'antenne path rectangulaire.

**Solution** Il y a principalement 4 étapes :

1. Calculer  $W$  (eqn 1)
2. Calculer la constante diélectrique effective (eqn 7)
3. Déterminer l'extension  $\Delta L$  (eqn 3)
4. Finalement calculer  $L$  (eqn 8)

## 3 Manipulations sous le logiciel Microwave Office

1. Concevoir une antenne patch rectangulaire qui fonctionne à 10 GHz sur du téflon MY1 ( $\epsilon_r = 2.17$ ,  $\tan\delta = 0.0013$ ,  $h=0.762\text{mm}$ ).
2. Améliorer l'adaptation de l'antenne en changeant la configuration de l'alimentation (cf figure 4).
3. Etudier la mise en réseau de 2 éléments.

### Quelques étapes...et rappels

Calculer toutes les dimensions nécessaires pour le projet (ne pas oublier la largeur de la ligne d'alimentation, pour sa longueur on prendra 10mm). Dans un premier temps l'antenne sera alimentée par une ligne microbande axiale (cf figure 4 (a) ).

Déterminer les dimensions de l'environnement de l'antenne (en pratique légèrement plus grande que l'antenne...La ligne doit être accolée à un bord)

Saisir un domaine de fréquence d'étude (9 à 11 par pas de 200 MHz pour débiter).

Notre modèle contiendra 2 couches (air et diélectrique).

Fixer des pas de cellules convenables sur X et sur Y (la taille minimale d'une cellule doit être de  $\lambda/10$  où  $\lambda$  représente la longueur d'onde associée à la fréquence maximale d'étude. En outre il est impossible avec ce logiciel d'avoir des dimensions très précises puisque c'est le pas d'une cellule qui fixe le tracé de la structure).

Le logiciel évalue le temps de calcul et les ressources nécessaires pour le projet en cliquant sur *Information*.

Visualiser et interpréter le module du coefficient de réflexion  $S_{11}$  en représentation cartésienne et exprimé en dB.

Visualiser  $S_{11}$  dans l'abaque de Smith. Que constatez-vous ?

Visualiser le diagramme de rayonnement de l'antenne (choisir un tracé de type *Antenna Plot* et les composantes  $E_\theta$  et  $E_\phi$  dans la rubrique *Antenna*)

Déterminer le gain de l'antenne.

Essayer d'améliorer l'adaptation en prenant la configuration (cf figure 4 (c) ) comme type d'alimentation. En pratique la largeur des rainures est identique à celle de la largeur de la ligne d'alimentation et la profondeur de l'encoche est à peu près  $L/6$  pour avoir une impédance d'entrée de  $50 \Omega$ .

Une autre manière d'adapter est d'insérer entre le patch et la ligne d'alimentation une ligne  $\lambda/4$ . Pour cela, vous devrez déterminer au préalable l'impédance du patch (à sa fréquence de résonance). Ceci nécessite de déplacer le plan de référence du port (deembedding) jusqu'au bord du rectangle puis de mesurer dans l'abaque de Smith l'impédance.

Mettre en réseau 2 antennes identiques espacées de  $\lambda/2$ , alimentées chacune par une ligne de  $100 \Omega$ . Les deux lignes seront raccordées en parallèle à une ligne de  $50 \Omega$  (cf figure 9).

Visualiser et interpréter le diagramme de rayonnement du réseau.

Comment a évolué le gain ?



FIG. 9 – Réseau de 2 antennes patch rectangulaires.