

# Conception, Simulation, Réalisation et mesure d'une antenne imprimée rectangulaire 2.4 GHz

F. Daout, S. Jacquet, X. Durocher, G. Holtzmer.

IUT Ville d'Avray, Dep GEII, 50 rue de Sèvres, 92410 Ville D'avray  
auteur@u-paris10.fr

## RESUME

L'étude présentée dans cet article se place dans le cadre de l'enseignement des antennes imprimées. Il décrit un ensemble de travaux pratiques réalisés à l'IUT de Ville d'Avray dans le cadre d'une formation en licence professionnelle. Ainsi il est montré que l'utilisation d'un simulateur électromagnétique permet d'appréhender des lois de comportements sans avoir préalablement recours à un formalisme mathématique, mal appréhendé par des étudiants de licence professionnelle. Cette étude conduit à la réalisation d'une antenne rectangulaire imprimée. Cette approche a provoquée l'adhésion des étudiants.

**Mots clés :** Travaux pratiques d'hyperfréquences, antenne imprimée, mesure du facteur de qualité, antenne patch, fréquence de résonance, résistance d'entrée, simulateur électromagnétique.

## 1. INTRODUCTION

Tout d'abord restreintes aux services publics et militaires, les télécommunications se sont banalisées au cours de ces dernières années. Poussés par l'engouement du public, les systèmes de réception sont devenus portables et les antennes se sont miniaturisées. L'utilisation d'antennes imprimées est devenue usuelle dans les systèmes de radiocommunications. Il devient donc important de présenter ce «capteur» dans le cursus d'un technicien hyperfréquences.

Cet article présente un cas concret de réalisation d'une antenne imprimée rectangulaire. Cette étude se fait dans le cadre de séances de travaux pratiques proposés aux étudiants de licence professionnelle «mesures hyperfréquences et radiocommunication» de l'IUT de Ville d'Avray. Les étudiants sont amenés à concevoir, simuler, réaliser et caractériser une antenne de type «Wifi».

A partir de manipulations (simulations électromagnétiques et mesures), les étudiants déterminent l'influence de la géométrie du patch. Ils en déduisent ensuite des règles de comportement. Cette étude est alors exploitée pour réaliser une antenne imprimée répondant à un cahier des charges propre à chaque binôme.

Ainsi ce projet se décompose en plusieurs parties :

- Une démarche théorique qui se veut simple permettant d'introduire les caractéristiques principales d'une antenne imprimée.
- Une étape de simulation : des règles de comportement sont établies en utilisant un simulateur électromagnétique. Cette étape permet de répondre à des questions du

- type «que fait la fréquence de résonance quand la largeur du patch augmente?». Elle permet d'éviter aussi, des calculs qui peuvent rapidement devenir laborieux.
- Une étape de mesure : ne possédant pas de chambre anéchoïque, la caractérisation de l'antenne est abordée à partir des caractéristiques circuits. Le diagramme de rayonnement n'est pas étudié dans ce travail, par contre le rendement de l'antenne est estimé.
  - Une étape de conception permettant de mettre en œuvre tous les points abordés ci-dessus.

## 2. PARAMETRES CARACTERISTIQUES D'UNE ANTENNE IMPRIMEE

Le concept des antennes imprimées a été proposé dès 1953 par Deschamps [1] mais il n'a été possible de les réaliser efficacement qu'à partir de 1970 (Howel et Muson) grâce à l'arrivée sur le marché de diélectrique à faibles pertes. Depuis, la recherche dans ce domaine n'a cessé de s'intensifier pour exploiter les nombreux avantages des antennes imprimées :

- faible poids,
- faible volume et épaisseur réduite,
- faible coût de fabrication,
- compatibilité avec des circuits intégrés (antennes actives),
- réseau d'antennes.

Ces antennes présentent malheureusement, également des désavantages :

- largeur de bande étroite,
- faible gain.

Le calcul du rayonnement et des caractéristiques radioélectriques des antennes imprimées est assez complexe. Plusieurs approches ont été proposées : modèle de la ligne de transmission, modèle de la cavité, approche spectrale. Compte-tenu de leurs complexités ces approches ne sont pas développées dans cet article et ne sont pas abordées avec nos étudiants de licence professionnelle. Pour de plus amples informations le lecteur se référera à [1-2]

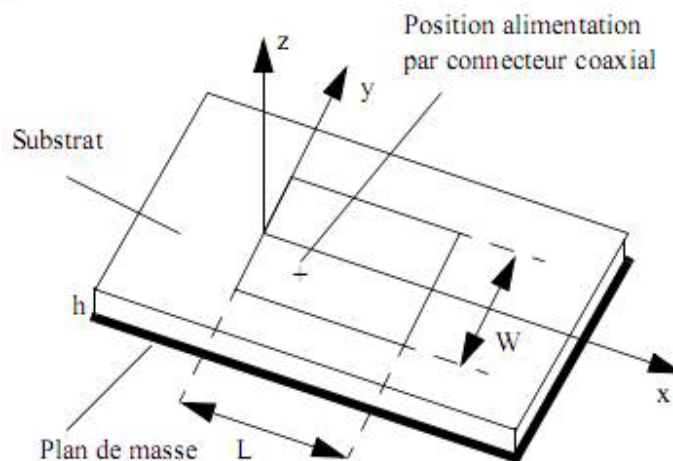


Figure 1 : antenne imprimée rectangulaire.

L'antenne la plus simple à étudier est sans doute le patch rectangulaire (figure 1) qui est définie par :

- Ses caractéristiques électromagnétiques : son gain, son diagramme de rayonnement, sa largeur de faisceau, sa polarisation.
- Ses paramètres d'utilisations : sa fréquence de résonance  $f_r$ , sa résistance d'entrée  $R_{in}$  et sa bande passante  $B$ .
- Ses paramètres internes : son facteur de qualité  $Q$ , sa résistance de rayonnement  $R_r$ , son rendement  $\eta$  et ses pertes métal et diélectrique mesurées par  $Q_c$ ,  $Q_d$ .

La première étape est le choix du substrat et du conducteur pour lesquels les caractéristiques à connaître sont :

- pour le substrat :  $\epsilon_r$ , sa permittivité relative,  $\tan \delta$  sa tangente de perte et sa hauteur  $h$ ,
- pour le conducteur : sa conductivité  $\sigma$  et son épaisseur  $t$ .

La conception consiste alors à déterminer :

- la longueur et la largeur du patch ( L et W),
- la position et le type de l'alimentation (coaxiale, microstrip, fente).

Dans cet article un seul type d'alimentation est présenté. Il s'agit d'une alimentation par une ligne coaxiale (figure 2).

Afin de formaliser notre étude, le cahier des charges suivant est fourni aux étudiants :

- substrat FR4 (choisi pour des raisons de coût):  $\epsilon_r = 4,6$ ,  $\tan \delta = 0,018$ ,  
conducteur : cuivre,  $t = 35 \mu m$ ,  $h = 1,6 mm$ .
- L'alimentation est choisie de type coaxiale (figure 2).
- La polarisation est horizontale et la fréquence de résonance de 1GHz.

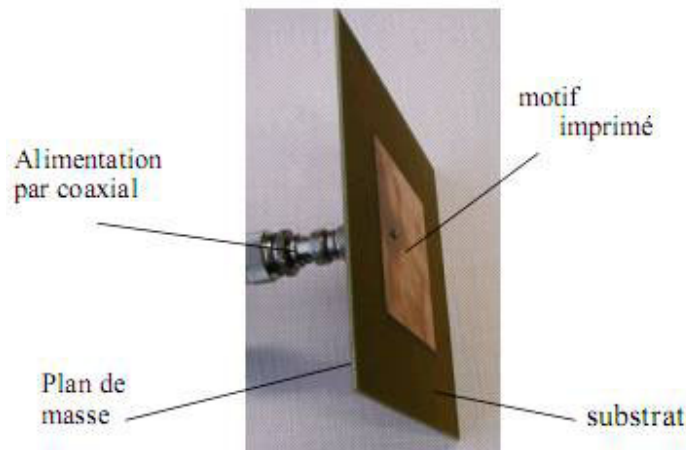


Figure 2 : *alimentation par ligne coaxiale.*

### 3. ETUDE THEORIQUE : CALCUL DES DIMENSIONS DE L'ANTENNE

La démarche adoptée pour déterminer les paramètres géométriques du motif imprimé s'articule autour des deux étapes suivantes :

- Calcul de la permittivité effective  $\epsilon_e$  en fonction de la largeur du motif  $W$ .
- Calcul de la longueur  $L$  du motif imprimé en fonction de la permittivité effective.

Le calcul de la permittivité effective d'une ligne microstrip repose sur la largeur de la ligne et sur la hauteur du substrat :

$$\epsilon_e = \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2}\right) + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2}\right) \frac{1}{\sqrt{1 + 10 \frac{h}{W}}} \quad (1)$$

Dans le cas d'un motif carré, la largeur de la ligne est demi-onde :

$$W = \frac{\lambda_e}{2} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_e}} \quad (2)$$

Les équations 1 et 2 sont liées. Ainsi  $W$  dépend de  $\epsilon_e$  et  $\epsilon_e$  de  $W$ . Dès lors il devient nécessaire de réaliser des récurrences jusqu'à convergence du résultat. Dans cette optique, après avoir fixé la fréquence de résonance, les étudiants ont à remplir le tableau suivant :

n	W	$\epsilon_e$
0	0	$\left(\frac{\epsilon_r + 1}{2}\right)$
1	(a)	(b)
2	(c)	

Tableau 1 : calcul de la largeur du motif et de la permittivité effective.

$n$  est l'ordre de récurrence. La première itération (case (a) du tableau) est complétée à partir de l'équation 1 dans laquelle  $W = 0$ , soit  $\epsilon_e = (\epsilon_r + 1)/2$ . L'itération est stoppée quand l'écart entre deux longueurs est inférieur à la résolution que l'on peut obtenir vis à vis de nos possibilités de gravure.

Cette étape est finalisée par l'écriture d'un programme en langage MATLAB calculant la largeur de l'antenne imprimée en fonction de la permittivité relative du substrat et de la fréquence de résonance.

La longueur de l'antenne est légèrement inférieure à  $\lambda_e / 2$  :

$$L = W - 2\Delta L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta L \quad (3)$$

Avec  $\Delta L$  obtenue à partir de l'abaque de la figure 3.

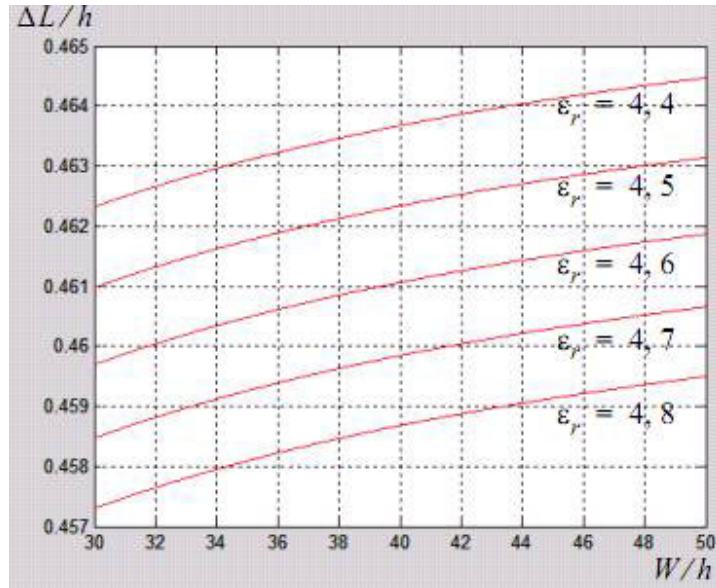


Figure 3 : paramètre  $\Delta L/h$  en fonction du rapport  $W/h$  pour différentes valeurs de permittivité relative.

Appliqué à notre exemple, ce calcul conduit à :

$$\begin{aligned} \varepsilon_e &= 4,43 \\ W &= 71,3\text{mm} \\ L &= 69,8\text{mm} \end{aligned} \quad (4)$$

Les valeurs de  $W$  et de  $\varepsilon_e$  sont obtenues après 7 itérations avec une erreur 10nm (ce qui est bien plus précis que notre résolution technologique). A partir de l'abaque (figure 3), on obtient  $\Delta L = 738\mu\text{m}$ .

Notons que le choix  $W = \lambda_e/2$  pour l'équation (2) n'est conditionné que par la forme carrée de notre motif. D'une façon générale,  $W$  peut varier dans une large mesure autour de  $\lambda_e/2$  (elle peut être inférieure mais la bande passante est plus faible). La longueur  $L$  conditionne la fréquence de résonance de l'antenne, elle est proche de  $\lambda_e/2$ .

### 3.1 Fréquence de résonance, résistance d'entrée

Le paramètre  $S_{11}$  d'une antenne rectangulaire est représenté sur la figure 4. Il est possible alors d'en déduire :

- La fréquence de résonance  $f_r$  : fréquence pour laquelle l'impédance d'entrée est purement réelle.
- La résistance d'entrée  $R_{in}$  : résistance d'entrée de l'antenne pour  $f = f_r$ .

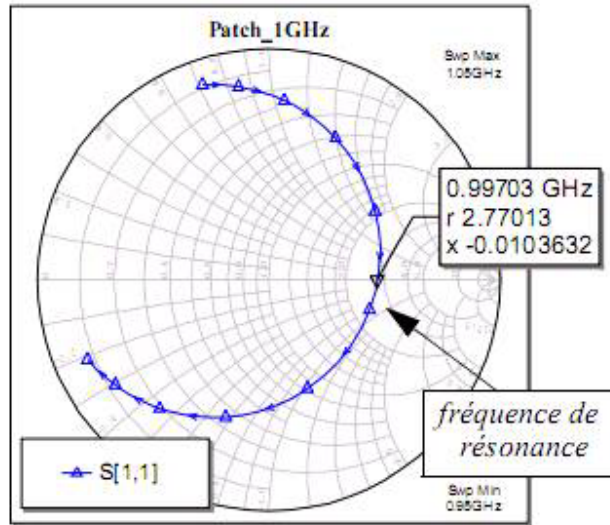


Figure 4 : paramètre  $S_{11}$  d'une antenne imprimée 1GHz - La fréquence de résonance correspond à une impédance d'entrée réelle.

Deux autres paramètres peuvent être déduits de l'observation de  $S_{11}$ . Il s'agit du coefficient de qualité  $Q$  et de la bande passante de l'antenne  $B$ .

### 3.2 Coefficient de qualité et bande passante

La détermination du coefficient de qualité permet d'avoir une information sur la capacité de l'antenne à rayonner la puissance fournie par la source et cela sans avoir recours à une mesure des diagrammes de l'antenne, dans une chambre anéchoïque ([3]). Le rendement de l'antenne est déterminé à partir de la comparaison entre la valeur idéale du coefficient de qualité noté  $Q_r$ , calculée sans les pertes et celle mesurée. Le coefficient de qualité d'une antenne réelle est donné par :

$$Q = \frac{\omega \cdot \text{énergie emmagasinée}}{\text{puissance rayonnée}} \quad (5)$$

L'expression (5) s'écrit aussi :

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_r} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} \quad (6)$$

Avec  $Q_c$  le coefficient de qualité dû aux pertes dans le cuivre. Il s'exprime ainsi :

$$Q_c = h \sqrt{\pi f_r \mu \sigma} \quad (7)$$

Notons que le terme  $1/\sqrt{\pi f_r \mu \sigma}$  correspond à l'épaisseur de peau. A 1GHz, pour le cuivre, l'épaisseur de peau est de 1 micron, le  $Q_c$  théorique est de 1000.

$Q_d$  traduit les pertes dans le diélectrique :

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (8)$$

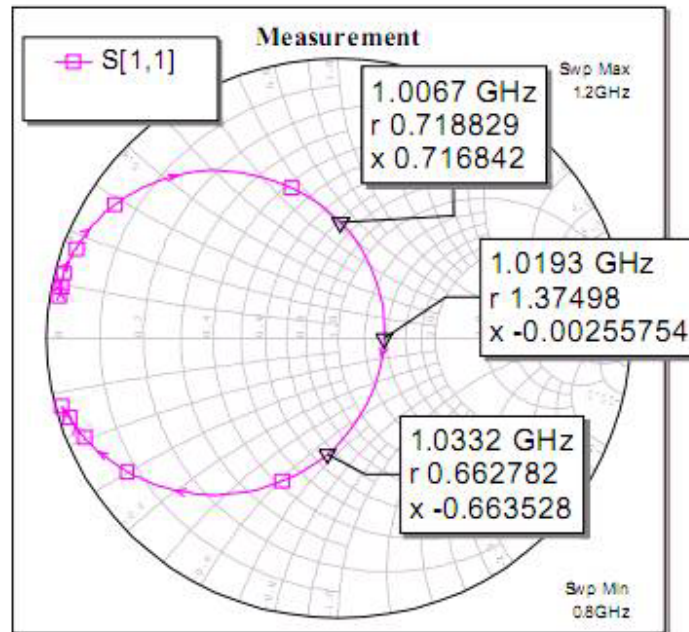


Figure 5 : détermination du facteur de qualité  $Q = f_r / \Delta f$  avec pour cet exemple  $f_r = 1,0193\text{GHz}$  ,  $\Delta f = 0,0265\text{GHz}$  soit  $Q = 38$  .

Avec notre substrat,  $Q_d = 56$  . En utilisant un autre type de substrat tel que du verre-téflon, on peut obtenir  $Q_d = 1000$  .

Dans le cas d'une antenne idéale, c'est à dire une antenne avec des conducteurs parfaits et un diélectrique sans perte, le coefficient de qualité s'exprime ainsi :

$$Q_r = \frac{\omega \cdot \text{énergie emmagasinée}}{\text{puissance rayonnée}} \quad (9)$$

En supposant que les deux antennes ont le même comportement (même répartition des courants), le rendement s'exprime comme le rapport :

$$\eta = \frac{Q}{Q_r} = \frac{\text{puissance rayonnée}}{\text{puissance rayonnée} + \text{puissance dissipée}} \quad (10)$$

En utilisant les résultats précédents, il est possible de calculer  $\eta$  à partir de  $Q$  ,  $Q_d$  et  $Q_c$  . C'est cette démarche qui est demandée aux étudiants.

La détermination expérimentale de  $Q$  se fait à partir de la mesure de  $S_{11}$  et de l'expression suivante (mesure à -3dB) :

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f} \quad (11)$$

$\Delta f$  est définie comme la différence entre les fréquences pour lesquelles la résistance est égale à la réactance (figure 5).

La bande de fréquence n'est pas définie par rapport à  $\Delta f$  mais vis à vis du TOS. Ainsi une convention classique consiste à définir un TOS inférieur à 2. Les étudiants sont donc conduits à déterminer à partir du coefficient  $S_{11}$  , les variations du TOS et à mesurer de cette façon la bande passante. Finalement, les étudiants vérifient la relation suivante

(valable uniquement dans le cas où il y a adaptation de l'antenne à la ligne d'alimentation) :

$$B = \frac{1}{Q} f_r \left( \frac{\text{TOS} - 1}{\sqrt{\text{TOS}}} \right) = \frac{1}{Q} f_r \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

#### 4. SIMULATION ELECTROMAGNETIQUE : INFLUENCE DES PARAMETRES GEOMETRIQUES

L'établissement s'est doté depuis quelques années du logiciel hyperfréquence Microwave Office qui possède un simulateur électromagnétique. Il utilise la méthode des moments afin de résoudre les équations de Maxwell. Il nécessite un maillage du motif. L'utilisation de ce logiciel permet aux étudiants de se familiariser avec les simulateurs électromagnétiques où l'on retrouve généralement le même procédé de description :

- nature du substrat, du conducteur,
- définition de la bande de fréquence simulée,
- description de l'environnement,
- géométrie du maillage.

A ce stade, des règles arbitraires sont fournies aux étudiants (par exemple la taille d'une cellule élémentaire est de  $\lambda / 20$ ).

L'antenne peut être décrite sous la forme fonctionnelle suivante (figure 6) :

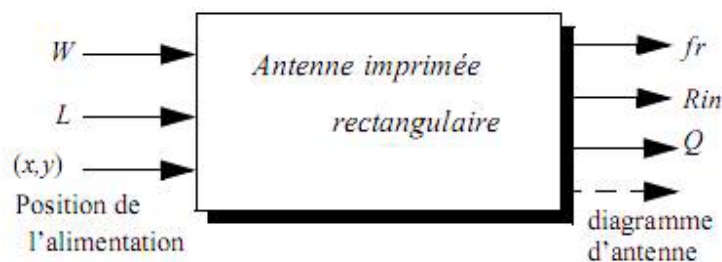


Figure 6 : définitions fonctionnelles d'une antenne imprimée rectangulaire.

Les paramètres d'entrée correspondent aux dimensions géométriques de l'antenne imprimée ainsi qu'à la position de son alimentation. Les données observées sont la fréquence de résonance, la résistance d'entrée et le coefficient de qualité. En supposant le système linéaire (variation faible autour du point de repos), le théorème de superposition permet d'étudier l'incidence des différents paramètres. Ainsi pour évaluer l'influence de la longueur ( $L$ ), les entrées  $W$  et  $(x,y)$  sont maintenues constantes.

##### 4.1 Influence de la taille du motif imprimé

Il s'agit ici de caractériser l'influence de la longueur et de la largeur de l'antenne imprimée sur la fréquence de résonance, la résistance d'entrée et sur le coefficient de qualité. Le Taux d'onde stationnaire (TOS) est aussi calculé. Dans cette optique, les étudiants sont amenés à remplir les deux tableaux suivant (les valeurs en italiques correspondent aux résultats des étudiants) :



L (mm)	fr(GHz)	Rin ( $\Omega$ )	Q	TOS
63	1,1266	110	31,5	2,2
70	0,99114	113	32	2,26
77	0,92535	106	31,9	2,12
W=70mm et (x,y)=(0mm,0mm)				

Tableau 2 : influence de la longueur de l'antenne imprimée

W (mm)	fr (GHz)	Rin ( $\Omega$ )	Q	TOS
63	1,0074	122	32,1	2,44
70	0,99114	113	32	2,26
77	0,98981	103	30,6	2,06
L=70mm et (x,y)=(0mm,0mm)				

Tableau 3 : influence de la largeur de l'antenne imprimée

Notons que la distance de 70mm correspond approximativement à  $\lambda/2$ . Ces deux tableaux permettent de déterminer des règles de comportement liées à la taille de l'antenne. Il reste à déterminer l'influence du point d'alimentation.

#### 4.2 Influence de la position du point d'alimentation

Comme précédemment, les étudiants sont amenés à compléter le tableau suivant :

(x,y) mm	fr (GHz)	Rin ( $\Omega$ )	Q	TOS
(0,0)	0,99114	113	32	2,28
( $\lambda/16,0$ )	0,99123	91,6	33	1,83
( $\lambda/8,0$ )	0,99142	57,3	33,4	1,15
( $3\lambda/16,0$ )	0,99261	23,6	31,9	2,12
( $\lambda/4,0$ )	1,0024	2,9	?	17,18
( $\lambda/8,-\lambda/8$ )	0,9951	61,2	31,5	1,22
( $\lambda/8,\lambda/8$ )	0,9974	82	31,9	1,64
W=70mm= $\lambda/2$ , L=70mm				

Tableau 4 : influence de la position de l'alimentation

Il est ensuite demandé aux étudiants de vérifier une loi mathématique de variation de la résistance Rin en fonction de x pour y=0 (c'est à dire dans l'axe de l'antenne). Pour cela la loi proposée est la suivante :

$$R_{in} = K \cos^2 \beta x \quad (13)$$

Il suffit donc d'identifier le paramètre K (obtenu pour (x=0,y=0)) et la valeur de  $\beta$ . On observe que  $R_{in} \cong 0$  pour  $x = \lambda/4$  soit  $\beta(\lambda/4) = \pi/2$ , c'est à dire :

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (14)$$

Ce qui correspond à la constante de propagation. Notons que dans le cas d'une antenne sans perte  $K = R_r$ .

## 5. MESURE DES CARACTERISTIQUES D'UNE ANTENNE IMPRIMEE

Une étape de mesure sur un ensemble d'antennes à 1GHz (figure 7) permet de valider les étapes de simulation.



Figure 7 : antennes imprimées 1GHz avec différentes positions de l'alimentation.

Pour effectuer la mesure, les étudiants doivent :

- Etalonner les analyseurs de réseaux en réflexion dans la bande de fréquence 800MHz - 1200MHz en utilisant un kit N.
- Décaler le plan de mesure afin de se positionner dans le plan d'entrée des antennes à l'aide d'un étalon en court-circuit.
- Mesurer le paramètre S11 et en déduire la fréquence de résonance, la résistance d'entrée, le TOS, la bande passante  $B$  ainsi que le coefficient de qualité  $Q$ .

Ainsi les étudiants doivent remplir le tableau suivant :

x (mm)	fr (GHz)	Rin ( $\Omega$ )	TOS	B (MHz)	Q
0	1,0277	88,4	1,77	13,6	38
$\lambda/16$	1,0182	75	1,5	17,4	38
$\lambda/8$	1,0205	43	1,16	17,2	37
$3\lambda/16$	1,0175	10	5	?	35
$\lambda/4$	?	0	inf	?	?

Tableau 5 : résultat de mesures.

Afin de conclure cette étude, il est demandé aux étudiants d'établir des règles de comportement ainsi qu'une méthode de conception d'une antenne imprimée. Ces remarques sont ensuite utilisées pour réaliser une antenne répondant à un cahier des charges propre à chaque binôme.

## 6. APPLICATION PRATIQUE : REALISATION D'UNE ANTENNE IMPRIMEE

Dans cette partie, un cahier des charges est fourni aux étudiants. A titre d'exemple voici le cahier des charges proposé aux différents binômes. Il faut noter que deux binômes réalisent la même antenne. «Concevoir une antenne imprimée rectangulaire qui résonne

à  $f_r = \{1,8;2;2,2;2,4;2,6\}$ GHz sur un substrat FR4 ( $\epsilon_r = 4,6$ ,  $\tan \delta = 0,018$  et  $t = 1,6$ mm). Réaliser l'adaptation d'impédance de l'antenne  $R_0 = 50\Omega$  pour avoir un TOS < 1.2 à  $f_r$  "

Les étudiants doivent, à partir des éléments précédents :

- Réaliser une simulation électromagnétique. Auparavant, les étudiants ont calculé les paramètres géométriques de l'antenne imprimée. Une étape permet d'optimiser ces paramètres géométriques (avec l'aide du simulateur électromagnétique) de façon à vérifier le cahier des charges.
- Fabriquer l'antenne et réaliser son alimentation (ligne coaxiale).
- Mesurer les caractéristiques de leur antenne
- Réaliser les ajustements nécessaires pour répondre au cahier des charges.

Pour cette dernière étape, les étudiants sont amenés généralement à rectifier la longueur de leur antenne. En effet, compte tenu de la dispersion de la constante diélectrique du substrat, il est fréquent que l'antenne ne résonne pas à la fréquence attendue. Ainsi en utilisant des bandes de cuivre autocollantes (figure 8) les dimensions du motif sont corrigées (ou en grattant leur circuit).



Figure 8 : correction géométrique d'une antenne imprimée à l'aide d'une bande de cuivre autocollante.

Les deux antennes réalisées à la même fréquence permettent de réaliser une liaison : une antenne est placée en émission, l'autre en réception. Les notions de directivité et de polarisation sont alors illustrées. Le gain des antennes est déterminé en utilisant la méthode des trois antennes. Pour cela les étudiants disposent d'une antenne yagi et d'un dipôle imprimé (figure 9). En utilisant la relation de Friis  $P_R / P_T = (\lambda / 4\pi d)^2 G_1 G_2$  avec  $d$  la distance entre les deux antennes,  $G_1$  et  $G_2$  leurs gains à déterminer,  $P_R$  la puissance reçue et  $P_T$  la puissance émise. Les étudiants construisent, alors, un système de trois équations. Le gain de chaque antenne est obtenu à partir de la résolution de ces équations.



Figure 9 : (a) antenne yagi (b) dipôle imprimé

## 7. CONCLUSION

Dans le domaine de l'apprentissage des antennes, nous venons de voir qu'il est possible d'adopter la démarche de la physique expérimentale : l'étape théorique préliminaire est réduite au minimum nécessaire et l'étudiant observe comment l'antenne rayonne la puissance fournie par une source. Cette observation est faite en simulation dans le domaine spatial (2.5D). De nombreuses observations peuvent être faites par l'étudiant en un temps court et de manière autonome, lui permettant de comprendre le comportement de l'antenne et de définir une méthodologie de conception. Une étape de mesure permet de vérifier les résultats essentiels de la simulation et valide la méthode employée. Le formalisme est proposé par l'enseignant en dernière étape, pour quantifier plus finement les observations.

## 8. REFERENCES

- [1] K. R. Carver, J. W. Mink, "Microstrip Antenna Technology", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol AP-29, N°1, pp 2 -24, January 1981.
- [2] P.F. Combes, "Micro-ondes - Vol 2 - circuits passifs, propagation, antennes, cours et exercices", ed. Dunod, chap. 15, pp 299-323.
- [3] E. H. Newman, P. Bohley, C. H. Walter, "Two Methods for the Measurement of Antenna Efficiency", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol AP-23, N°4, pp 457-461, July 1975.

## 9. BIBLIOGRAPHIE DES AUTEURS

Franck Daout a soutenu une thèse de doctorat de l'université de Nantes, spécialité électronique, en 1996. D'abord enseignant chercheur contractuel à l'École Navale (Brest) entre 1997 et 1999 puis maître de conférence à l'I.U.T. de Ville d'Avray (Paris) depuis 1999, ses enseignements portent principalement sur l'électronique analogique et numérique ainsi que sur l'électronique haute fréquence. Chercheur au laboratoire Satie dans le pôle Traitement de l'Information et Multi-capteurs (TIM), ses activités de recherche portent sur la modélisation des phénomènes de diffusion (électromagnétique et acoustique) ainsi que sur les systèmes imageurs multistatique.

Sylvie Jacquet, enseignante à l'IUT de Ville d'Avray, s'est spécialisée dans le domaine des hautes fréquences. Elle est responsable de la licence professionnelle "Mesures Hyperfréquences et Radiocommunication".

Xavier Durocher est technicien en électronique à l'IUT, il accompagne les étudiants dans leurs projets au département GEII, Ce qui lui a permis de réaliser d'intéressantes études et réalisations d'antennes patch en 2,4 Ghz pour les projets HYPERFREQUENCES .

Gilles Holtzmer est technicien dans le domaine électronique, chargé de la maintenance et de la création de maquettes pédagogiques à l'IUT de Ville d'Avray. Son intérêt pour la construction mécanique lui permet de concevoir des systèmes pour les applications hyperfréquences et de former des étudiants dans ce domaine.