

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE
TOULOUSE

4^{ème} Année Informatique & Réseaux

**MINIATURISATION D'ANTENNES PATCH
POUR APPLICATION SUR BANDE ISM 2.45
GHZ**

Alexandre Boyer
alexandre.boyer@insa-toulouse.fr
www.alexandre-boyer.fr

Novembre 2019

I. Objectif du TP

On souhaite réaliser un motif d'antennes imprimés pour des applications embarquées utilisant la bande ISM à 2.45 GHz (par exemple Bluetooth Low Energy, WiFi).

L'antenne patch rectangulaire a été identifiée comme celui répondant aux contraintes de bande passante et de gain. Cependant, afin de réduire l'encombrement de la partie radiofréquence de l'application, on recherche des moyens pour réduire les dimensions de cette antenne.

Ce TP vise à deux objectifs :

- proposer un motif d'antennes patch rectangulaire répondant aux cahiers des charges (voir partie II)
- évaluer deux méthodes de miniaturisation de ce motif d'antennes

Pour valider les modèle d'antennes, vous disposez de Matlab et de sa toolbox Antenna Designer, installés en salle de TP. Une aide sur la prise en main est donnée dans les parties suivantes.

A l'issue du TP, il vous est demandé de fournir un rapport répondant de manière succincte aux questions posées dans la partie III.

II. Données techniques

Les antennes proposées doivent répondre si possible au cahier des charges ci-dessous :

| | |
|--|--|
| Technologie | Antenne imprimée |
| Impédance d'entrée | 50 Ω |
| Bande de fréquence de fonctionnement | 2400 – 2500 MHz |
| Taux d'onde stationnaire | VSWR < 2 : 1 |
| Gain antenne | > 5 dBi |
| Angle d'ouverture à 3 dB dans les plans horizontaux ou verticaux | > 70° |
| Matériau | Substrat diélectrique : FR4 ($\epsilon_r = 4.8$) Epaisseur du substrat : 2 mm |
| Dimensions du plan de masse | Au plus, 20 % plus large que les dimensions du patch |

Conseils d'utilisation d'Antenna Designer :

- on utilisera le maillage automatique
- avant de lancer une simulation à plusieurs fréquences, on la testera sur un nombre réduit de points de fréquences pour vérifier que le temps de simulation n'est pas excessif.
- pour analyser l'influence d'une variable sur la réponse de l'antenne, procéder en ajoutant une faible perturbation à sa valeur puis en analysant l'impact sur la réponse.

III. Questions

1. Antenne 1 - Patch rectangulaire

On utilisera un objet de type pcbstack pour construire le modèle de l'antenne patch

a. S'agit-il d'une antenne demi ou quart d'onde ?

b. En champ lointain, comment le champ électromagnétique produit par l'antenne est-il distribué dans l'espace ? Quel est sa polarisation ?

c. La première contrainte à vérifier est l'accord entre la fréquence de résonance et la bande de fréquence de fonctionnement. Comment est définie la bande passante de l'antenne ? Proposez une fréquence de résonance et une bande passante acceptable.

d. quels sont les paramètres d'ajustement de la fréquence de résonance ?

e. La deuxième chose à régler est l'impédance d'entrée de l'antenne. Quels sont les paramètres d'ajustement ?

f. Réalisez différents essais pour proposer un motif d'antennes patch satisfaisant le cahier des charges. A l'issue de ce travail, remplissez le tableau suivant :

| | |
|--|--|
| Largeur (mm) | |
| Longueur (mm) | |
| Position (X;Y) du point d'excitation (par rapport au centre du patch) (mm) | |
| Bande passante obtenue (MHz) | |
| S11 minimum (dB) (indiquez à quelle fréquence (MHz)) | |
| Impédance à la fréquence centrale (parties réelle et imaginaires) (Ω) | |
| Gain à la fréquence centrale (dBi) | |
| Angle d'ouverture à 3 dB - plan horizontal ($^{\circ}$) | |
| Angle d'ouverture à 3 dB - plan vertical ($^{\circ}$) | |

g. En supposant que cette antenne soit utilisée en émission et en réception, quel serait la portée radio d'un système équipé d'une telle antenne ? On considère une puissance électrique disponible de 10 dBm et un seuil de réception de -90 dBm. Plusieurs modèles de propagation pourront être employés à titre de comparaison.

2. Antenne 2 - Ajout d'une fente à un patch rectangulaire

On reprend le motif de l'antenne patch, sur laquelle on souhaite créer une fente rectangulaire étroite. On considèrera une largeur de fente par défaut de 1 mm.

a. Expliquez pourquoi l'ajout d'une fente sur le patch rectangulaire devrait nous aider à réduire les dimensions de l'antenne.

b. Quels sont les paramètres d'ajustement de cette fente ? Comment influent t-ils individuellement sur la fréquence de résonance de l'antenne ?

c. Réalisez différents essais pour proposer un motif d'antennes patch avec fente satisfaisant le cahier des charges. A l'issue de ce travail, remplissez le tableau suivant :

| | |
|--|--|
| Largeur (mm) | |
| Longueur (mm) | |
| Position (X;Y) du point d'excitation (par rapport au centre du patch) (mm) | |
| Longueur et largeur de la fente (mm) | |
| Bande passante obtenue (MHz) | |
| S11 minimum (dB) (indiquez à quelle fréquence (MHz)) | |
| Impédance à la fréquence centrale (parties réelle et imaginaires) (Ω) | |
| Gain à la fréquence centrale (dBi) | |

| | |
|--|--|
| Angle d'ouverture à 3 dB - plan horizontal (°) | |
| Angle d'ouverture à 3 dB - plan vertical (°) | |

d. Indiquez le gain en surface par rapport à l'antenne patch rectangulaire. Est-il possible d'obtenir les mêmes performances qu'avec une antenne patch sans fente ?

e. En supposant que cette antenne soit utilisée en émission et en réception, quel serait la portée radio d'un système équipé d'une telle antenne ? On considère une puissance électrique disponible de 10 dBm et un seuil de réception de -90 dBm. Plusieurs modèles de propagation pourront être employés à titre de comparaison.

3. Antenne 3 - Antenne PIFA

Pour la construction du modèle, on utilisera le modèle pifa disponible dans Antenna Designer. Aucune fente ne sera ajoutée sur l'antenne.

a. S'agit-il d'une antenne demi-onde ou quart d'onde ? A-t-elle les mêmes caractéristiques d'une antenne patch rectangulaire ?

b. Quels sont les paramètres d'ajustement de la fréquence de résonance ?

c. Quels sont les paramètres d'ajustement de l'impédance d'entrée ?

d. Réalisez différents essais pour proposer un motif d'antennes PIFA satisfaisant le cahier des charges. A l'issue de ce travail, remplissez le tableau suivant :

| | |
|--|--|
| Largeur (mm) | |
| Longueur (mm) | |
| Position (X;Y) du point d'excitation (par rapport au bord court-circuité) (mm) | |
| Bande passante obtenue (MHz) | |
| S11 minimum (dB) (indiquez à quelle fréquence (MHz)) | |
| Impédance à la fréquence centrale (parties réelle et imaginaires) (Ω) | |
| Gain à la fréquence centrale (dBi) | |
| Angle d'ouverture à 3 dB - plan horizontal (°) | |
| Angle d'ouverture à 3 dB - plan vertical (°) | |

e. Indiquez le gain en surface par rapport aux deux antennes précédentes. Est-il possible d'obtenir les mêmes performances qu'avec une antenne patch sans fente.

f. En supposant que cette antenne soit utilisée en émission et en réception, quel serait la portée radio d'un système équipé d'une telle antenne ? On considère une puissance électrique disponible de 10 dBm et un seuil de réception de -90 dBm. Plusieurs modèles de propagation pourront être employés à titre de comparaison.

Prise en main de Matlab - Antenna Toolbox

La conception des antennes passent très souvent par l'utilisation de simulateurs électromagnétiques, permettant la prédiction des performances d'une antenne en fonction de sa géométrie, des matériaux de fabrication employés et de l'environnement. Ces simulateurs réalisent une résolution numérique des équations de Maxwell appliquées sur un modèle géométrique maillé de l'antenne, dans le domaine fréquentiel ou temporel.

Ces outils étant en général couteux et leur prise en main difficile, ils sont réservés à des ingénieurs et chercheurs expérimentés. Depuis la version 2016 de Matlab, Mathworks a développé la toolbox Antenna, dédiée à la conception, l'analyse et la visualisation d'antennes courantes et de réseaux d'antennes simples. Bien que les performances de cette toolbox ne soient pas équivalentes aux outils professionnels de simulation électromagnétique, elle est adaptée à la réalisation de motifs d'antennes simples et convient parfaitement à un enseignement d'introduction aux antennes. En plus de son coût modeste par rapport aux autres outils de simulation électromagnétique, cette toolbox s'intègre à un outil de modélisation et de calcul puissant comme Matlab, et peut être couplé à d'autres toolboxes orientées télécommunication et RF pour simuler une chaîne de radiocommunication complète et le canal radio associé. Des informations supplémentaires sur cette toolbox peuvent être trouvées ici : <https://fr.mathworks.com/help/antenna/index.html>.

Ce document n'a pas vocation à détailler toutes les fonctionnalités de la toolbox Antenna. Toutes les fonctions de la toolbox Antenna sont disponibles dans l'aide en ligne de Matlab ou à l'adresse suivante : <https://fr.mathworks.com/help/antenna/referencelist.html?type=function>.

Le système d'unité utilisé par la toolbox est le système MKS. Toutes les distances sont exprimées en mètres et les fréquences en Hz. Les angles sont exprimés en degrés.

I. Lancement de l'environnement Matlab et création du workspace

Lancez Matlab (version 2019) en cliquant sur l'icône  apparaissant sur le bureau ou dans le menu Démarrer. Le lancement de l'environnement prend plusieurs dizaines de secondes. La fenêtre ci-dessous apparaît. Matlab se lance avec un workspace par défaut.

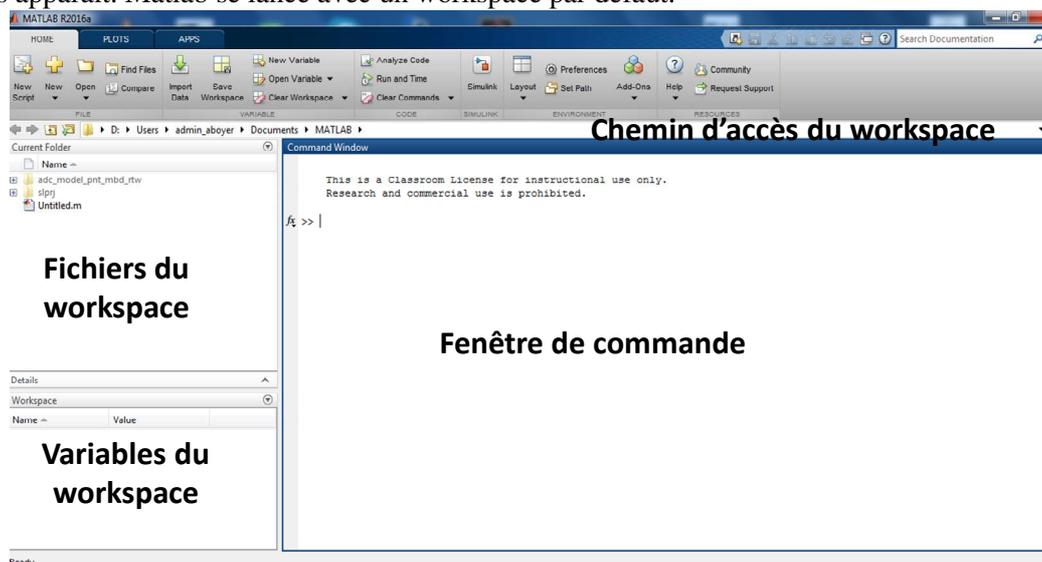


Fig. 1 - Fenêtre principale de Matlab (version 2016)

Une chose à comprendre sur Matlab est la notion de Workspace. Il s'agit d'un dossier dans lequel l'ensemble des scripts de calcul, des modèles et des variables sont définis à l'intérieur. Celui-ci peut-être changé à tout moment par l'utilisateur. Néanmoins, lorsque vous lancez un script de calcul, il est indispensable que le workspace soit associé à ce dossier.

Le contenu du workspace est affiché dans les deux volets de gauche de la fenêtre affichée sur la Fig.

1. Pour sélectionner un nouveau workspace, cliquez sur l'icône  située à côté du chemin d'accès du workspace, puis sélectionner le dossier qui servira de workspace. Vous y sauvegardez vos scripts de calcul et y ferez les calculs.

II. Création et simulation d'une antenne à l'aide de commandes

L'ensemble des fonctions de la toolbox Antenna peuvent être exécutées depuis la fenêtre de commande en tapant le nom de la fonction suivie des éventuelles paramètres placés entre parenthèses. Par exemple, supposons que nous souhaitions concevoir une antenne patch circulaire. La fonction **patchMicrostripCircular** permet de construire un modèle d'antenne patch circulaire, dont les dimensions géométriques et les caractéristiques électriques pourront être modifiés. En tapant la commande ci-dessous :

```
MyPatch = patchMicrostripCircular
```

Un nouveau modèle d'antenne patch circulaire, appelé MyPatch, est créé. Celle-ci présente les caractéristiques par défaut. Pour les modifier, il faut les spécifier dans les paramètres de la fonction.

Remarque : paramètres et fonctions

Chaque type d'antennes de la toolbox peut être vue comme un objet auquel sont associés des propriétés et des fonctions. Les propriétés définissent, entre autres, les dimensions géométriques, les caractéristiques des matériaux, la position des points d'excitation, ... Les fonctions permettent de visualiser les modèles d'antennes, de définir le maillage, de lancer le calcul et visualiser les résultats. Les fonctions et les propriétés sont en général communes à plusieurs antennes.

Ceux-ci sont précisés dans l'aide en ligne de Matlab. Par exemple, supposons que l'on souhaite fixer le rayon (Radius) du patch, sa hauteur par rapport au plan de masse (Height), la nature du substrat (Substrate) et la position du point d'excitation (FeedOffset), on pourrait taper la commande suivante :

```
MyPatch = patchMicrostripCircular('Radius',0.05,'Height',0.002,  
'Substrate',dielectric('FR4'),'FeedOffset',[-0.025 0])
```

Le nom des propriétés est donné entre ''. Les valeurs associées peuvent :

- scalaire (nombre)
- vecteur ou matrice (entre [], le symbole ';' indique un changement de ligne)
- chaîne de caractères (entre '')

Le modèle d'antenne créé serait un patch circulaire de rayon 5 cm, à 2 mm au-dessus du plan de masse, séparé par un substrat de type FR4 (il s'agit d'un des 16 matériaux diélectriques par défaut proposés par la toolbox). L'excitation de l'antenne est considérée comme ponctuelle, située à 2.5 cm du centre du patch. Par défaut, l'amplitude de l'excitation est de 1 V et sa phase est de 0°.

Pour visualiser le modèle géométrique, la fonction show peut être utilisée, en tapant la commande ci-dessous. La fenêtre présentée à la Fig. 2 apparaît.

```
show(MyPatch)
```

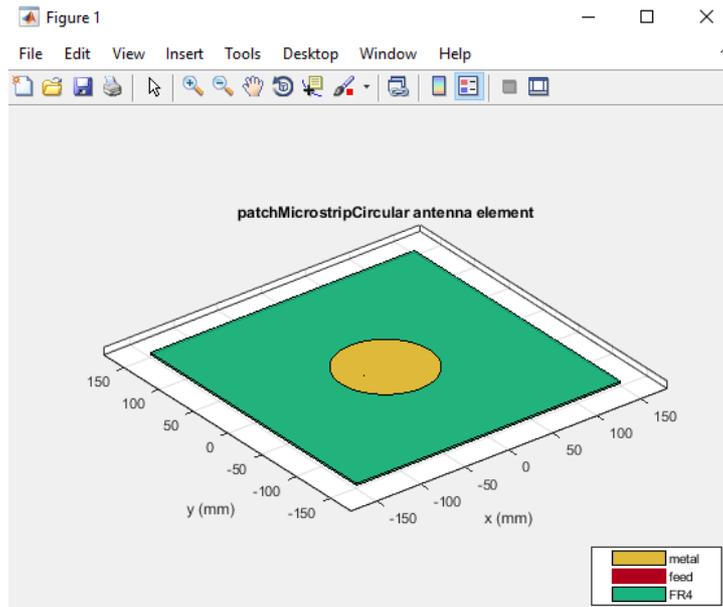


Fig. 2 - Visualisation d'une antenne

Le maillage correspond à la discrétisation de la structure géométrique étudiée pour exécuter le calcul numérique de résolution des équations de Maxwell. La toolbox Antenne utilise la méthode des moments comme méthode de résolution. La taille de maillage est choisie par défaut par Matlab, mais peut être modifiée à l'aide de la fonction **mesh**. Celle-ci maille la structure étudiée selon les paramètres précisés et affiche le modèle maillé.

A partir du modèle maillé, il est possible de lancer différents types analyses sur l'antenne, telles que :

- impedance
- returnLoss
- sParameters
- vswr
- pattern, patternAzimuth, patternElevation, patternCustom
- polarpattern : affichage interactif du diagramme de rayonnement
- beamwidth
- EHfields
- fieldsCustom
- charge
- current
- smithplot

Par exemple, en tapant la commande : `impedance(MyPatch, 800e6:1e7:1e9)`, on lance le calcul de l'impédance d'entrée de l'antenne vue depuis son point d'excitation entre 800 MHz et 1 GHz. Au bout de quelques dizaines de secondes, le calcul est terminé et le résultat s'affiche sous la forme de la partie réelle et imaginaires, comme le montre la figure ci-dessous.

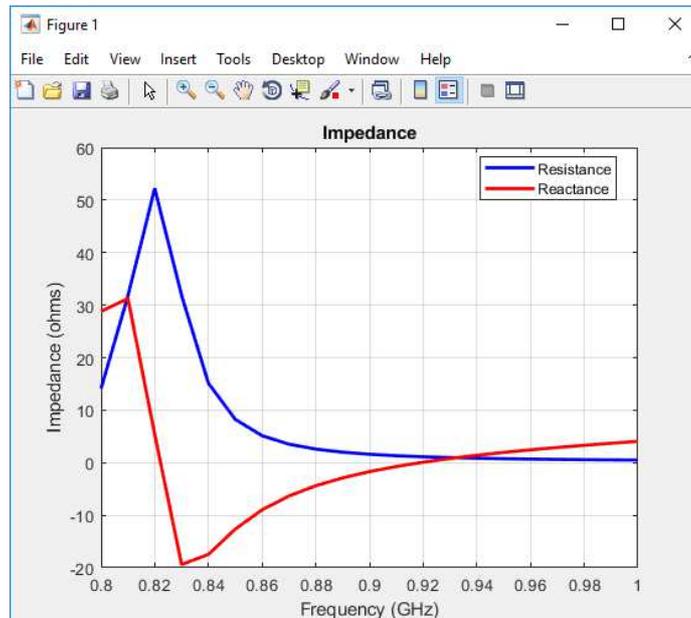


Fig. 3 - Impédance d'entrée d'une antenne patch circulaire

La commande : `pattern(MyPatch,800e6)` permet de lancer le calcul et l'affichage du diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne à 800MHz. Le résultat s'affiche, comme le montre la Fig. 4. Par défaut, le résultat est exprimé en terme de directivité.

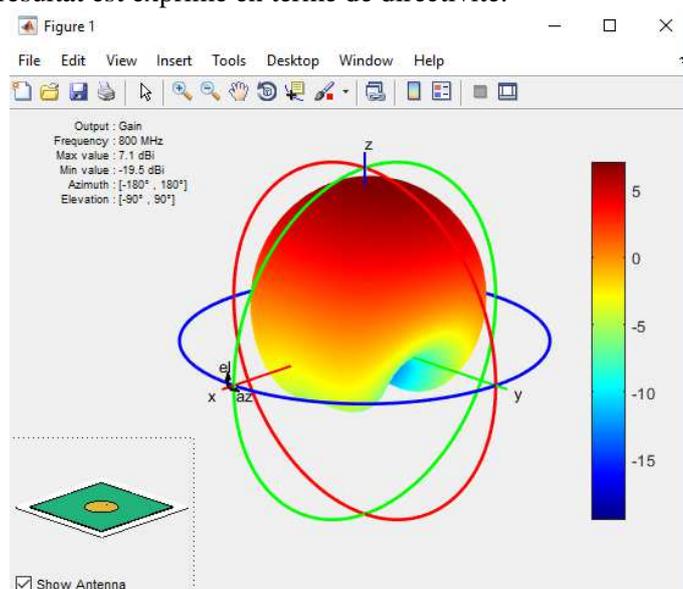


Fig. 4 - Diagramme de rayonnement d'une antenne patch circulaire

III. Création et simulation d'un script Matlab

L'utilisation unique de lignes de commande est rapidement limitée dès que l'on souhaite optimiser les paramètres de conception d'une antenne et lancer différents types d'analyse. Il est préférable d'écrire un script Matlab, dans lequel on pourra définir les différentes variables, exécuter les différentes fonctions et configurer précisément les grandeurs à afficher. En outre, un script permet de bâtir un algorithme de génération de modèles géométriques et de gestion efficace des calculs.

Pour créer un nouveau script, cliquez sur l'icône New  et sélectionnez Script (raccourci Ctrl+N). L'éditeur de texte s'ouvre permettant d'éditer le contenu du script. Sauvez le script en cliquant sur l'icône Save . Les fichiers script Matlab sont sauvegardés au format .m.

Le script peut créer et manipuler toutes les variables du Workspace. Il peut utiliser toutes les fonctions natives de Matlab et des toolboxes installées, ainsi que les autres fonctions définies dans le Workspace.

Après avoir écrit le script, celui-ci peut être exécuté directement en cliquant sur l'icône Run  (raccourci F5). En cas d'erreurs, celles-ci seront affichées dans la fenêtre de commande. Dans les deux parties suivantes, deux exemples de script sont présentés.

IV. Création et simulation d'une antenne simple

Nous allons d'abord détailler un premier script Matlab permettant de construire le modèle d'une antenne simple et unitaire, dont le modèle géométrique est intégré dans la toolbox Antenna. Nous allons considérer une antenne patch circulaire devant fonctionner à 1.5 GHz, dont le modèle peut être créé par la fonction **patchMicrostripCircular**. Le script va permettre d'afficher le modèle géométrique et de tracer différents résultats associés à l'analyse de cette antenne, entre 1.3 et 1.7 GHz : calcul de l'impédance d'entrée, du coefficient de réflexion tracé dans le diagramme de Smith, de la distribution du courant sur le patch, du diagramme de rayonnement en 2D et en 3D. Des analyses pourraient être ajoutées à ce script. La géométrie de l'antenne est configurable via les variables du script.

```
%simulation d'une antenne patch circulaire fonctionnant à 1.5 GHz

%calcul de la longueur d'onde dans le patch à 1.5 GHz
c0 = 3e8;
f0 = 1.5e9;
epsr = 2.2; %constante diélectrique du substrat
tan_d = 0.01; %tan de pertes du substrat
lambda_0 = c0/(2*sqrt(epsr)*f0);

%dimensions géométriques du patch
r_patch = 0.99*1.841*c0/(2*pi*f0*sqrt(epsr));
h_patch = 2e-3; %hauteur du patch = séparation entre le patch et le plan de
masse
pos_exc = 0.36*r_patch; %position du point d'excitation par rapport au
centre du patch
W_gnd = 3*r_patch; %dimensions du plan de masse (forme carrée)

%création du diélectrique composant le substrat
d =
dielectric('Name', 'Mon_dielectrique', 'EpsilonR', epsr, 'LossTangent', tan_d);

%création du modèle de l'antenne
MyPatch = patchMicrostripCircular('Radius', r_patch, 'Height', h_patch, ...
    'GroundPlaneLength', W_gnd, 'GroundPlaneWidth', W_gnd, 'Substrate', ...
    d, 'FeedOffset', [pos_exc 0]);

%maillage et affichage du modèle
figure(1);
show(MyPatch);
```

```

%définition des fréquences de calcul
freq_calc = linspace(1.3e9,1.7e9,21);

%lancement des différents calculs et affichage
%impédance
figure(2);
impedance(MyPatch,freq_calc);

%diagramme de Smith
figure(3);
ParamS = sparameters(MyPatch,freq_calc);
Smith = smithplot(ParamS,'GridType','Z');

%affichage de la distribution du courant à la fréquence f0
figure(4);
current(MyPatch,f0);

%affichage du diagramme de rayonnement (gain) en 3D
figure(5);
pattern(MyPatch,f0,'Type','gain');

%beamwidth en fonction de l'angle d'élévation (azimuth = 0°)
figure(6);
beamwidth(MyPatch,f0,0,1:1:360);

```

V. Création et simulation d'une antenne imprimée avec pcbstack

La toolbox Antenna fournit une quarantaine de modèles d'antennes unitaires, de géométrie relativement simples. Cela peut être intéressant si le but est d'analyser le fonctionnement de ces types d'antennes et de déterminer une stratégie de conception. Néanmoins, cela peut s'avérer insuffisant si l'on souhaite complexifier la géométrie de cette antenne et ajouter des éléments supplémentaires.

Matlab offre des moyens de construire des modèles géométriques, pouvant être utilisés pour des antennes, mais nous ne les détaillerons pas ici.

La toolbox Antenna offre cependant la possibilité de construire des motifs d'antennes planaires complexes, composées de multiples éléments rayonnants, sur des substrats multicouches. Pour cela, l'objet **pcbstack** est utilisé. Celui-ci permet de définir une antenne imprimée sur PCB, composée de plusieurs éléments rayonnants basés sur des motifs géométriques simples (rectangles, polygones, cercles) et excités par plusieurs sources.

Un objet **pcbstack** possède de nombreuses propriétés, que nous ne détaillerons pas toutes. La géométrie de cet objet est déterminée par différentes couches (propriété **Layers**), de type :

- couches métalliques, formées par les différents éléments géométriques
- diélectriques, séparant les différents Layers

Une des couches métalliques doit être considérée comme le plan de masse. Les excitations seront toutes référencées par rapport à cette couche.

L'objet **pcbstack** est aussi défini par son épaisseur (**BoardThickness**), ses dimensions latérales (elles doivent correspondre à la couche la plus large). Des excitations sont liées à un objet **pcbstack**. Leurs positions est définies par la propriété **FeedLocations**. La tension et la phase des excitations sont définies par les propriétés **FeedVoltage** et **FeedPhase**.

Les fonctions typiques d'affichage, de maillage et de calcul sont aussi associées à un objet **pcbstack**.

Le script ci-dessous est un exemple permettant de simuler une antenne planaire formée de deux patch circulaires (l'élément rayonnant présenté dans la partie précédente est repris). Les mêmes analyses sont effectuées. La Fig. 5 présente le modèle géométrique de l'antenne modélisée par ce script. La géométrie et la position des deux éléments rayonnants ainsi que de leurs excitations est configurable via les variables du script.

```

%simulation d'une antenne formée de deux patch circulaire fonctionnant à
1.5 GHz

%calcul de la longueur d'onde dans le patch à 1.5 GHz
c0 = 3e8;
f0 = 1.5e9;
epsr = 2.2; %constante diélectrique du substrat
lambda_0 = c0/(2*sqrt(epsr)*f0);

%dimensions géométriques du patch
r_patch = 0.99*1.841*c0/(2*pi*f0*sqrt(epsr));
h_patch = 2e-3; %hauteur du patch = séparation entre le patch et le plan de
masse
pos_exc = 0.36*r_patch; %position du point d'excitation par rapport au
centre du patch
sep = 3*r_patch; %séparation centre à centre entre les deux patches
circulaires
%dimensions du plan de masse (forme rectangulaire)
L_gnd = 6*r_patch;
W_gnd = 3*r_patch;

%création du modèle de l'antenne
%plan de masse
GndPlane = antenna.Rectangle('Length',L_gnd,'Width',W_gnd);
% les deux patches
RadElement1 = antenna.Circle('Radius',r_patch,'Center',[-sep/2 0]);
RadElement2 = antenna.Circle('Radius',r_patch,'Center',[sep/2 0]);
RadElement = RadElement1+RadElement2; %assemblage sur la même couche
%création du diélectrique composant le substrat
MonDielec =
dielectric('Name','Mon_dielectrique','EpsilonR',epsr,'LossTangent',tan_d);

%génération du modèle de l'antenne
MyPatch = pcbStack;
MyPatch.Name = 'Deux Patches circulaires';
MyPatch.BoardThickness = h_patch;
MyPatch.BoardShape = GndPlane; %les bords de l'antenne sont définis par les
dimensions
    %du plan de masse
MyPatch.Layers = {RadElement,MonDielec,GndPlane}; %définition des
différentes couches
    %du pcb, en commençant par la couche supérieure.
%ajout de deux excitations (sur chaque patch)
MyPatch.FeedLocations = [-sep/2+pos_exc 0 1 3;sep/2+pos_exc 0 1 3]; %[x y
Couche_signal Couche_gnd]

%maillage et affichage du modèle
figure(1);
show(MyPatch);

%définition des fréquences de calcul

```

```

freq_calc = linspace(1.3e9,1.7e9,21);

%lancement des différents calculs et affichage
%impédance
figure(2);
impedance(MyPatch,freq_calc);

%diagramme de Smith
figure(3);
ParamS = sparameters(MyPatch,freq_calc);
Smith = smithplot(ParamS,'GridType','Z');

%affichage de la distribution du courant à la fréquence f0
figure(4);
current(MyPatch,f0);

%affichage du diagramme de rayonnement (gain) en 3D
figure(5);
pattern(MyPatch,f0,'Type','gain');

%beamwidth en fonction de l'angle d'élévation (azimuth = 0°)
figure(6);
beamwidth(MyPatch,f0,0,1:1:360);

```

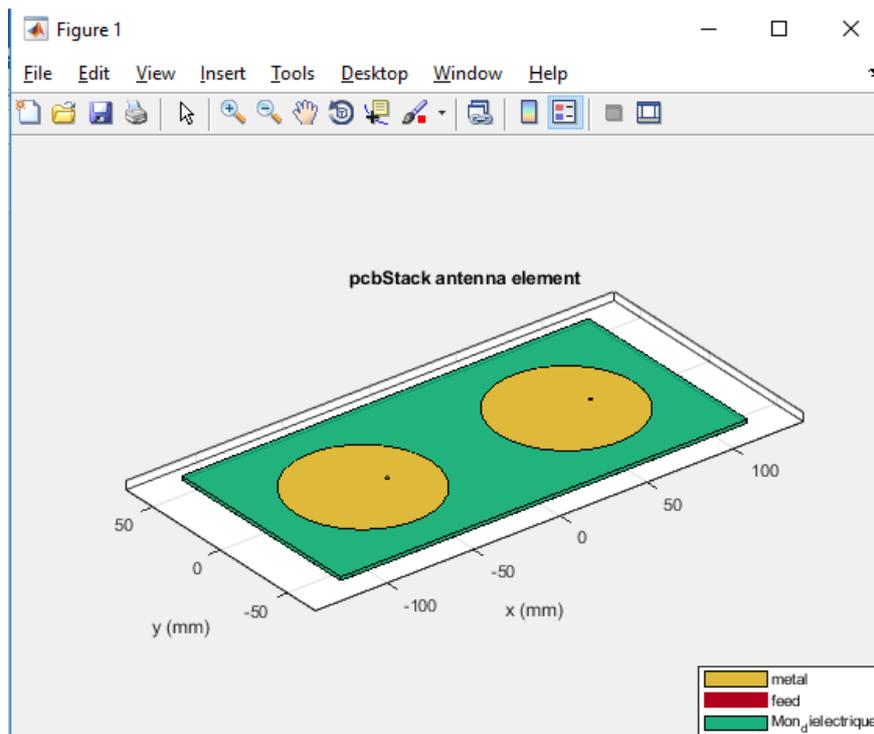


Fig. 5 – Réseau de deux antennes patch circulaires modélisé à l'aide de la fonction pcbstack