



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Centre universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain Témouchent  
Institut de Technologie  
Département de Génie Electrique



2018/2019

# Travaux Pratiques

## Lignes de transmission et Antennes

3ème année Télécommunications



Mme Belhamiani Née Ferouani Souheyla

## *PREFACE*

Ce support pédagogique décrit des travaux pratiques d'antennes et lignes de transmissions, destiné aux étudiants de la troisième année Télécommunications de *l'Institut de Technologie*.

*IL regroupe cinq travaux pratiques qui facilitent la compréhension des principes de base des micro-ondes aux étudiants.*

Le premier TP est réservé à l'étude théorique avec conception et simulation d'une ligne de transmission « câble coaxial » à l'aide du logiciel CST. Les paramètres caractéristiques du câble coaxial doivent être mesurés et comparés avec les calculs théoriques.

Le second TP présente aussi une étude théorique avec conception logicielle et simulation d'une ligne de transmission micro ruban pour une meilleure compréhension de l'étudiant.

Les troisième et quatrième TP sont consacrés à l'étude et la conception logicielle des antennes filaires type « un dipôle demi onde à rayonnement omnidirectionnel et une antenne YAGI à rayonnement directionnel ». Un calcul théorique est demandé pour entamer le travail expérimental et mesurer tous les résultats. De ce fait, l'étudiant sera capable de comprendre le principe de fonctionnement des antennes filaires ainsi que leurs adaptations à une fréquence de résonance ou à un domaine d'application bien précis.

Le dernier TP présente la conception et la réalisation d'une antenne imprimée rectangulaire. Il est divisé en plusieurs parties pour simplifier la conception de la structure choisie. Un calcul théorique est nécessaire pour réussir la simulation sur le logiciel CST.

En fin, en annexe, une représentation du logiciel « **CST Microwave** » avec une description détaillée des modules de ce dernier afin de réussir une certaine simulation.

*« L'auteur de ce manuscrit sera à l'écoute de toutes les remarques et les suggestions des utilisateurs de ce manuel, dans le but d'apporter les améliorations et les corrections requises dans les éditions futures ».*

## Table des matières

### PREFACE

<b>TP N°1 : Ligne de transmission « câble coaxial »</b> .....	<b>1</b>
1. Objectifs du TP .....	1
2. Partie Théorique .....	1
2.1. Modélisation de la ligne .....	1
2.1.1 Paramètre de phase .....	2
2.1.2 La vitesse de phase est donnée.....	2
2.1.3 L'impédance caractéristique d'un câble coaxial. ....	3
2.1.4 Coefficient de réflexion.....	3
2.1.5 Rapport d'onde stationnaire .....	3
3. Partie Simulation .....	3
3.1 Calcul théorique avec l'Abaque de Smith.....	3
3.2 Conception logicielle.....	3
3.3 Modélisation de la ligne .....	5
3.4 Alimentation de la ligne .....	6
4. Simulation .....	7
4.1 Mesure des caractéristiques de la ligne à l'aide du logiciel CST .....	7
4.2 Adaptation de la ligne .....	8
4.3 Distribution des champs électrique et magnétique.....	8
4.4 Rapport final du TP1 .....	8
<b>TP N°2 : Ligne de transmission « Ligne Micro Ruban »</b> .....	<b>9</b>
1. Objectif du TP .....	9
2. Partie Théorique .....	9
2.1 Caractéristiques d'une ligne microruban.....	9
2.2 Constante diélectrique effective $\epsilon_e$ .....	10
2.3 Formules d'analyse .....	10
2.4 Formules de synthèse .....	10
3. Partie Simulation .....	11
3.1 Calcul théorique .....	11
3.2 Conception logicielle.....	11
3.3 Alimentation de la ligne .....	12
4. Simulation .....	13
4.1 Mesure des caractéristiques de la ligne .....	13
4.2 Distribution des champs électriques et magnétique .....	13
4.3 Rapport final du TP2 .....	13
<b>TP N°3 : Antennes Filaires à rayonnement omnidirectionnel</b> <b>« Dipôle demie onde »</b> .....	<b>14</b>
1. Objectif du TP.....	14
2. Partie théorique .....	14
2.1. Antenne .....	14
2.2. Caractéristiques d'une Antenne .....	14
2.2.1 Diagramme de rayonnement .....	14
2.2.2 Gain d'une antenne .....	14
2.2.3 Angle d'ouverture d'une antenne.....	15
2.2.4 Polarisation d'une onde.....	15
2.2.5 Impédance d'entrée.....	15
2.2.6 Fréquence d'utilisation .....	16
2.2.7 La directivité .....	16
3. Partie Simulation : Antenne dipôle pour la Télévision .....	16

3.1 Calcul théorique .....	17
3.2 Conception logicielle.....	18
3.3 Alimentation.....	19
3.4 Mesurer des paramètres caractéristiques .....	20
3.5 Adaptation .....	20
3.6 Diagramme de rayonnement .....	20
3.7 Polarisation de l'antenne .....	21
3.8 Rapport final du TP3 .....	22
<b>TP N°4 : Antennes Filaires à rayonnent directionnel « Antenne YAGI » .....</b>	<b>23</b>
1. Objectif du TP.....	23
2. Partie théorique .....	23
3. Partie simulation.....	23
3.1 Calcul théorique .....	23
3.2 Conception logicielle.....	24
3.3 Mesure des paramètres caractéristiques .....	24
3.4 Adaptation .....	25
3.5 Distribution des champs électriques et magnétiques.....	25
3.6 Polarisation de l'antenne YAGI .....	25
3.7 Rapport final du TP4 .....	26
<b>TP N°5 : Antenne imprimée à rayonnement omnidirectionnel</b>	
<b>« Antenne imprimée rectangulaire » .....</b>	<b>27</b>
1. Objectif du TP.....	27
2. Partie théorique .....	27
3. Partie Simulation .....	28
3.1 Calcul théorique .....	28
3.2 Conception logicielle.....	29
3.3 Alimentation.....	30
3.4. Mesures des paramètres caractéristiques.....	30
3.5 Adaptation .....	30
3.6 Diagramme de rayonnement .....	31
3.7 Polarisation de l'antenne patch rectangulaire.....	31
3.8 Rapport final du TP5 .....	32
<b>Annexe : Présentation du logiciel CST</b>	
1. Description du logiciel de simulation CST Studio Suite .....	33
2. Modules de CST.....	33
2.1. Un solveur transitoire .....	33
2.2. Un solveur fréquentiel.....	33
2.3. Un solveur intégral .....	33
2.4. Un solveur modal .....	34
3. La méthode FIT utilisée par le logiciel CST .....	34
4. Les modules d'exécution :.....	35
5. La méthode qui décrit la structure .....	36
6. Etapes à suivre pour réussir votre simulation.....	37
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>40</b>

# TP N°1 : Ligne de transmission

## « Câble coaxiale »

### 1. Objectifs du TP

Le TP 1 est consacré à l'étude et la conception logicielle d'une ligne de transmission « câble coaxiale » pour objectif :

- 1.1- Présentation des caractéristiques d'une ligne de transmission.
- 1.2- Calcul théoriques et mesure pratique des paramètres de la ligne.
- 1.3- Simulation et validation des résultats théoriques des paramètres S de la ligne.
- 1.4- visualisation du champ électrique et magnétique sur la ligne de transmission à l'aide du logiciel CST.

### 2. Partie Théorique

Un câble coaxial est formé de deux conducteurs cylindriques concentriques qui sont séparés par un isolant diélectrique. Celui du centre est habituellement un fil plein alors que celui à l'extérieur prend la forme d'un étui et s'appelle souvent le « bouclier ». Le tout est recouvert par une gaine de protection. Le matériau diélectrique maintient une certaine capacité entre les deux conducteurs ce qui est très important en transmission radio. Il est généralement mou et se déforme facilement s'il est enserré trop fortement ou par le mauvais type de gaine [1].

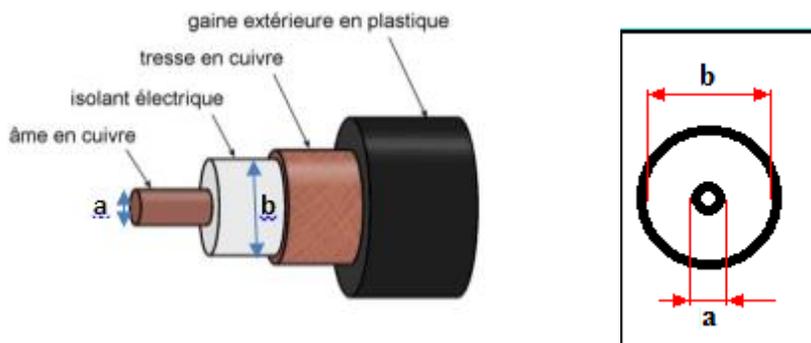


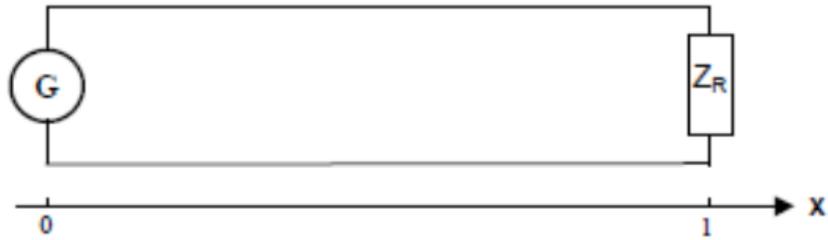
Figure 1.1 : Câble coaxiale [2]

#### 2.1. Modélisation de la ligne

Une ligne de transmission de longueur  $L$  est constituée de deux conducteurs.

La ligne est alimentée à une extrémité par un générateur HF (hautes fréquences) et fermée à l'autre extrémité sur une impédance  $Z_R$  (récepteur) [3,4].

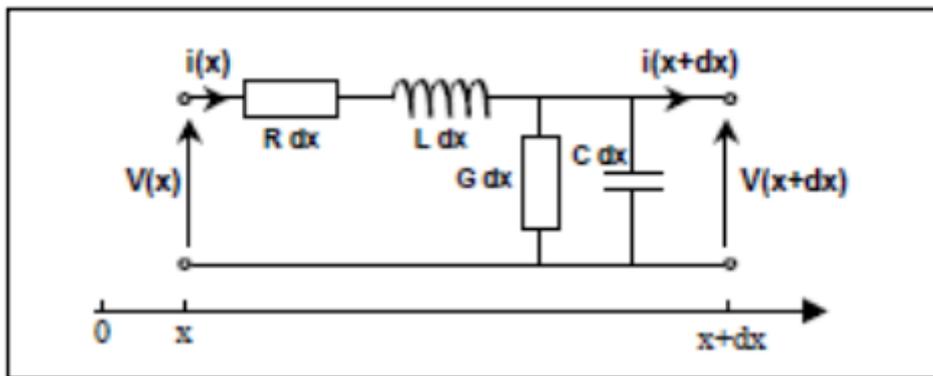
**Remarque importante :** La longueur  $L$  de la ligne est grande devant la longueur d'onde du signal, la tension et le courant seront donc variables le long de la ligne.



**Figure 1.2 :** Modélisation d'une ligne de transmission [3,4].

Pour faire l'étude de la propagation le long de la ligne, il faut modéliser la ligne en la décomposant en une suite de quadripôles mis en cascade.

Une très petite longueur  $dx$  de ligne sera équivalente au schéma ci-dessous :



**Figure 1.3 :** Schéma équivalent d'une ligne de transmission [3,4].

-Les grandeurs  $R$  et  $L$  représentent la résistance et l'inductance du conducteur par unité de longueur ( $R$  en ohms et  $L$  en H/m).

- Les grandeurs  $G$  et  $C$  représentent la conductance et la "capacité" de l'isolant par unité de longueur ( $G$  en S/m et  $C$  en F/m).

### 2.1.1 Paramètre de phase [3,4]

Considérons ici que la ligne est sans pertes ( $R=0$  et  $G=0$ ), le paramètre de phase pour les lignes à faibles pertes :

$$\beta = \omega \sqrt{LC} = 2\pi \frac{c}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_r \mu_0} = 2\pi \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{\lambda_0} \quad (1.1)$$

Comme par définition :  $\beta=2\pi/\lambda$ , il résulte que la longueur d'onde sur la ligne :

$$\lambda = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r} \quad (1.2)$$

est la même qu'en espace libre diélectrique.

### 2.1.2 D'autre part la vitesse de phase est donnée par [3,4]

$$V_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.3)$$

**2.1.3 L'impédance caractéristique** d'un câble coaxial dépend du rapport de **a**, diamètre intérieur du conducteur extérieur, par **b**, diamètre extérieur de l'âme [3,4].

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \left( \frac{b}{a} \right) \quad (1.4)$$

On donne les constantes linéiques d'un câble coaxial sans perte [3,4] :

$$c = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \text{ et } L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (1.5)$$

#### 2.1.4 Coefficient de réflexion

➤ Coefficient de réflexion complexe (en tension ou courant) :

$$\Gamma = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (1.6)$$

➤ Coefficient de réflexion en amplitude :  $\rho = |\Gamma|$  (1.7)

➤ Coefficient de réflexion en puissance :  $\rho = |\Gamma|^2$  (1.8)

**2.1.5 Rapport d'onde stationnaire** :  $ROS = \frac{1+\rho}{1-\rho}$  (1.9)

### 3. Partie Simulation

Soit Un échantillon de ligne coaxial sans perte d'impédance caractéristique  $Z_0 = 50 \Omega$ , est terminée par une charge d'impédance  $Z_L = (20 - j30) \Omega$ . Sa longueur est de 5.2 cm isolé au Téflon (permittivité 2,1) avec une âme de diamètre 1.7 et un diélectrique dont le diamètre est de 5.7 mm. La fréquence de travail est de 750 MHz.

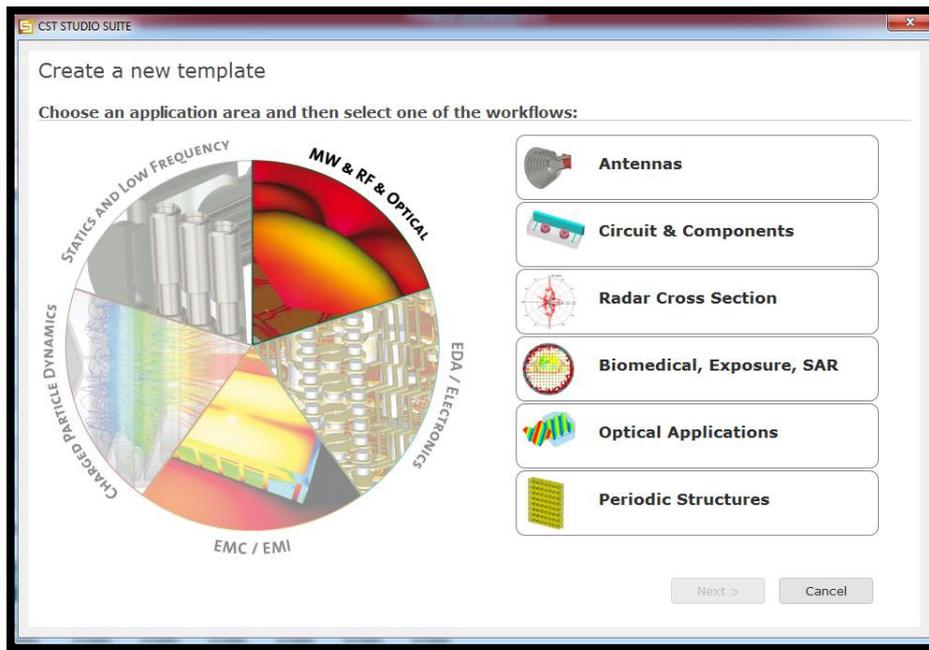
#### 3.1 Calcul théorique avec l'Abaque de Smith

A l'aide de l'abaque de SMITH, calculez le coefficient de réflexion, le coefficient de transmission et le VSWR de la ligne. Adapter l'impédance du tronçon de la ligne.

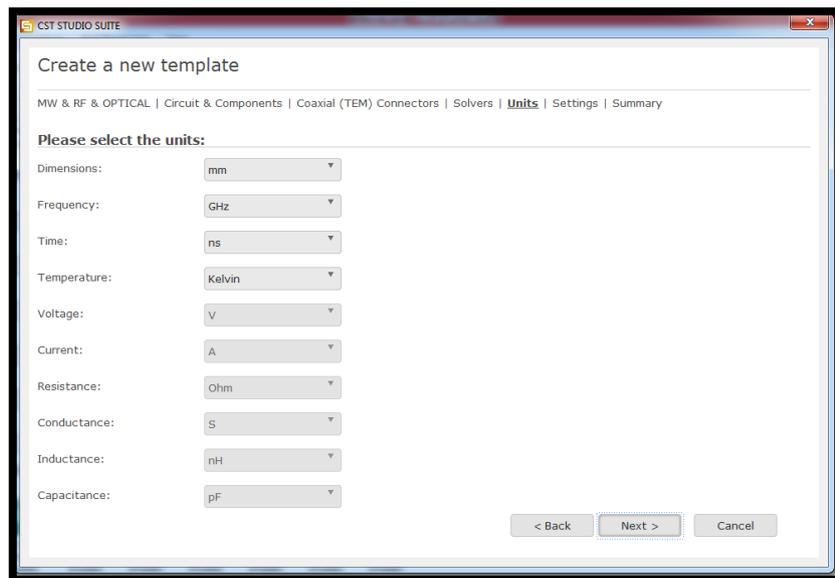
#### 3.2 Conception logicielle

A l'aide du logiciel CST, Concevoir et simuler cette ligne en suivant les étapes citées ci-dessous :

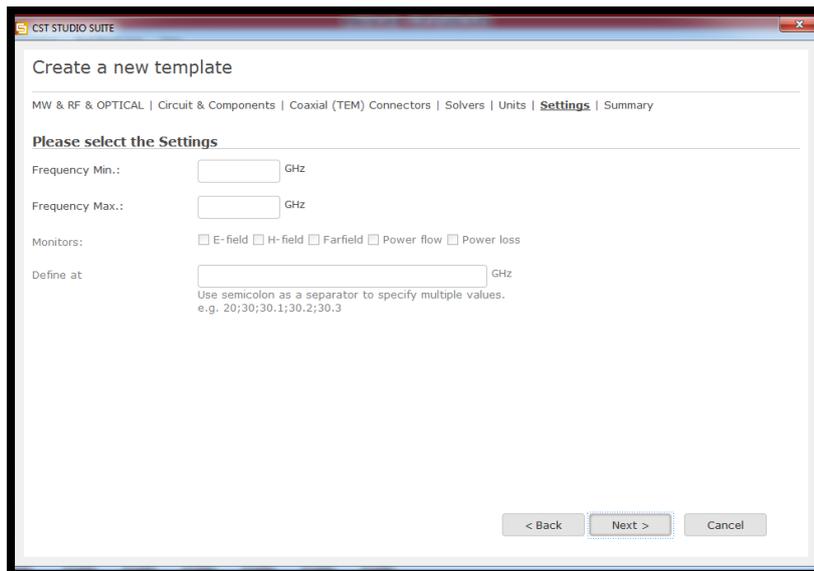
**Lancer le logiciel CST studio**, puis cliquer sur l'icône : « **create new project** », choisissez la zone « **MW and RF and optical** » puis « **circuit and component** »



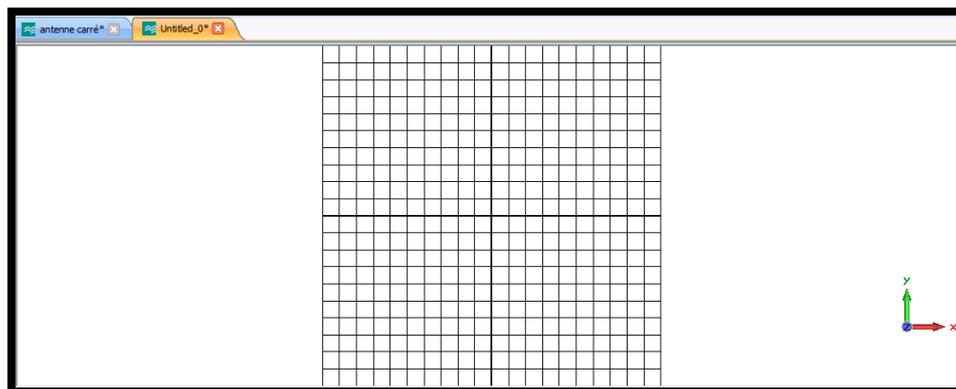
Choisissez dans la fenêtre qui apparaît « **Coaxial TEM Connector** », puis « **TIME domaine** », une fenêtre contenant les unités des paramètres à utiliser s'affichera, Cliquer sur « **Next** » ;



Donnez la plage de fréquence de travail, puis mettez « **Next** » ;

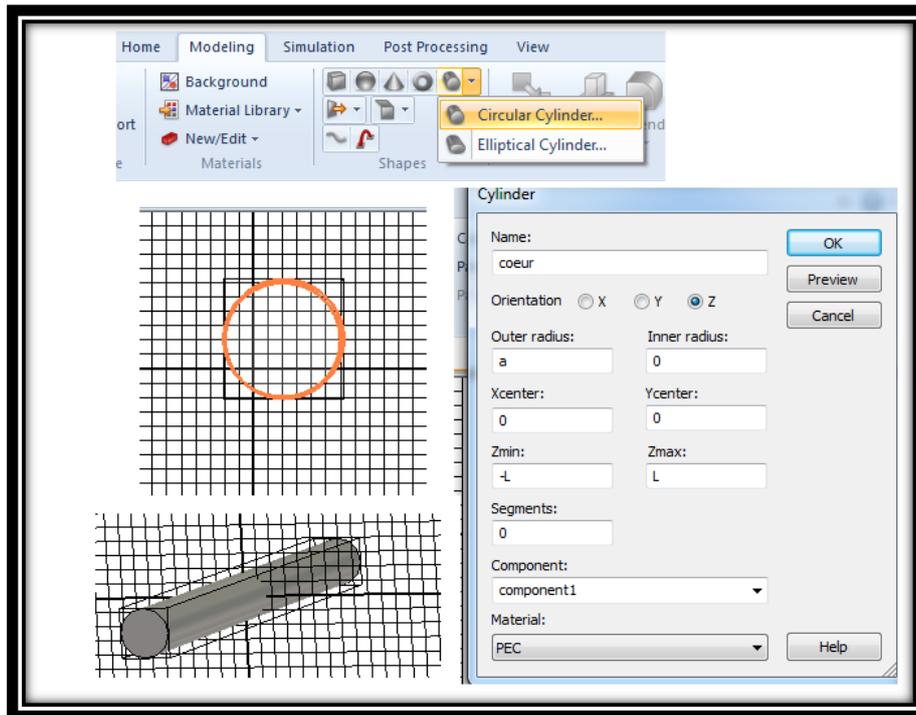


Une fenêtre avec un plan de travail s'affichera, vous pouvez concevoir votre ligne à l'intérieur à l'aide de la barre des menus en haut.

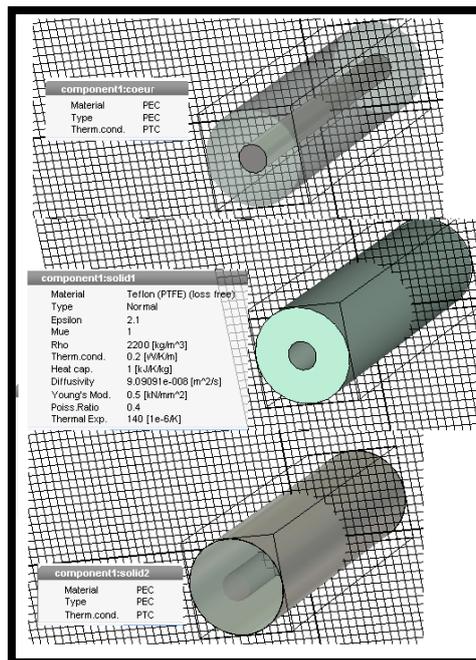


### 3.3 Modélisation de la ligne

Modéliser votre ligne en utilisant le calcul paramétrique effectuer dans la partie théorique :

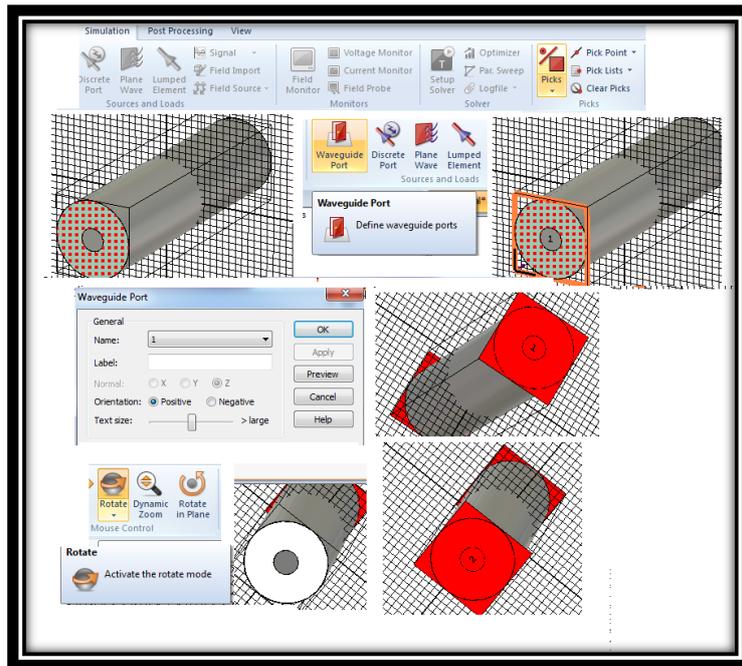


De la même manière terminez la conception de votre câble coaxial de la figure 1 ;



### 3.4 Alimentation de la ligne

Une fois terminer, alimentez votre ligne comme suite :



## 4. Simulation

Lancer votre simulation comme suite :



### 4.1 Mesure des caractéristiques de la ligne à l'aide du logiciel CST

4.1.1 Mesurer et reportez les valeurs de **S11**, **S21**, **ROS** dans Tableau 1 puis comparer vos résultats avec les valeurs théoriques calculés à l'aide de l'abaque de **SMITH**.

	Valeurs mesurées	Valeurs calculées
<b>S11 (dB)</b>		
<b>S21 (dB)</b>		
<b>VSWR (ROS)</b>		

4.1.2 Changer la valeur du rapport des diamètres de la ligne (b/a) puis en déduire la valeur de l'impédance  $Z_0$  (équation 1.4). Mesurer le S11 et comparer vos résultats :

b/a				
Z0 ( $\Omega$ )				
S11 (dB)				

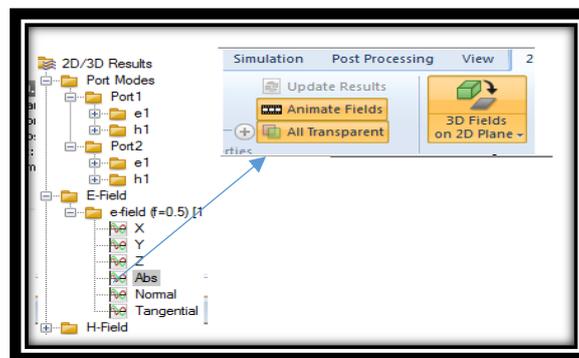
#### 4.2 Adaptation de la ligne

A quelle valeur vous aurez une bonne adaptation de la ligne ? Comparer vos résultats avec l'abaque de SMITH.

4.2.1 Donnez le graphe du S11 adapté en fonction de la fréquence.

#### 4.3 Distribution des champs électrique et magnétique

Visualisez la distribution des champs électriques et magnétique en 2D ou en 3D comme suite :



#### 4.4 Rapport final du TP1

Reportez vos résultats sur un rapport et conclure votre travail.

## **TP N°2 : Ligne de transmission** **« Ligne Micro-ruban »**

### **1. Objectif du TP**

Le TP 2 est consacré à l'étude et la conception logicielle d'une ligne de transmission micro-ruban pour objectif :

- 1.1- Présentation des caractéristiques d'une ligne de transmission.
- 1.2- Calcul théoriques et mesure pratique des paramètres de la ligne.
- 1.3- Simulation et validation des résultats théoriques des paramètres S de la ligne.
- 1.4- visualisation du champ électrique et magnétique sur la ligne de transmission à l'aide du logiciel CST.

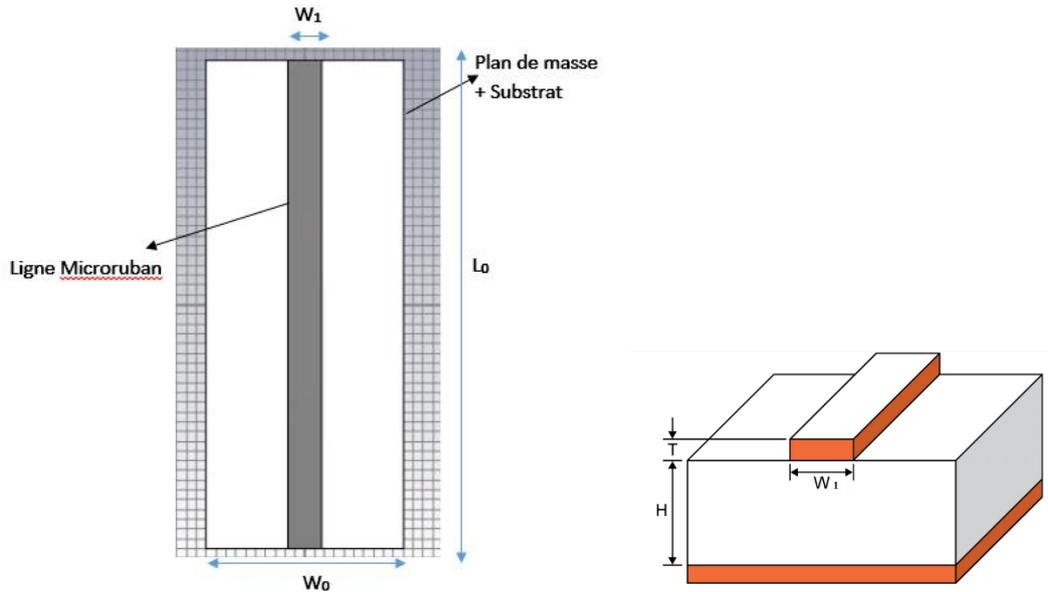
### **2. Partie Théorique**

La ligne microruban (figure 2.1) est constituée par un ruban métallique déposé sur une plaque de diélectrique entièrement métallisée sur l'autre face (plan de masse). Le milieu de propagation n'est donc pas homogène car une partie des lignes de champ est située dans le substrat tandis que l'autre partie est située dans l'air.

#### **2.1 Caractéristiques d'une ligne microruban**

Les caractéristiques des lignes de transmissions sont [5] :

- La vitesse de propagation le long de la ligne  $v_p$
- L'impédance caractéristique  $Z_c$  de la ligne de transmission. Elles dépendent notamment des paramètres suivants :
  - La largeur du ruban  $W_1$
  - L'épaisseur du substrat  $h$
  - La permittivité relative du substrat  $\epsilon_r$



**Figure 2.1 :** Structure d'une ligne micro-ruban

## 2.2 Constante diélectrique effective $\epsilon_e$

En supposant que la ligne est placée dans un milieu diélectrique homogène de permittivité  $\epsilon_e$  (où  $\epsilon_e$  est appelée permittivité effective de la ligne) [5] :

$$v_p = c/\sqrt{\epsilon_e} \quad (2.1)$$

$$Z_c = Z_{c0}/\sqrt{\epsilon_e} \quad (2.2)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 10 \frac{h}{w_1} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

L'impédance caractéristique, la vitesse de propagation, le constant diélectrique effectif dépendent de  $\epsilon_r$  et de la géométrie de la ligne. D'autre part, la longueur d'onde guidée  $\lambda_g$  dans le micro ruban, s'exprime en fonction de la longueur d'onde dans l'air  $\lambda_0$ , par la relation :

$$\lambda_g = \lambda_0/\sqrt{\epsilon_e} \quad (2.4)$$

## 2.3 Formules d'analyse

En connaissant les caractéristiques de la ligne ( $\epsilon_r$  et le rapport  $w_1/h$ ), on peut déterminer son impédance caractéristique à partir des formules suivantes [5] :

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_c = \frac{60}{\sqrt{(\epsilon_e)}} \text{Ln} \left[ \frac{8h}{W} + \frac{w_1}{4h} \right], \quad \frac{w_1}{h} \leq 1 \\ Z_c = \frac{120 \pi}{\sqrt{(\epsilon_e)} \left[ \frac{w_1}{h} + 1.393 + 0.667 \text{Ln} \left( \frac{w_1}{h} + 1.444 \right) \right]}, \quad \frac{w_1}{h} > 1 \end{array} \right. \quad (2.5)$$

## 2.4 Formules de synthèse

La permittivité et la hauteur de substrat sont traditionnellement imposées par le fabricant. Pour

Obtenir une impédance caractéristique donnée, on règle la largeur  $w_1$  de la ligne en utilisant les formules suivantes [5] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{w_1}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}, \text{ avec } A = \frac{Z_c \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{120} + \frac{1}{2} \left( \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right), \text{ pour } \frac{w_1}{h} \leq 2 \\ \frac{w_1}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} (\ln(B - 1) + 0.293 - \frac{0.527}{\epsilon_r}) \right\}, \\ \text{avec } B = \frac{60\pi^2}{Z_c \sqrt{\epsilon_r}}, \text{ pour } \frac{w_1}{h} \geq 2 \end{array} \right. \quad (2.6)$$

### 3. Partie Simulation

#### 3.1 Calcul théorique

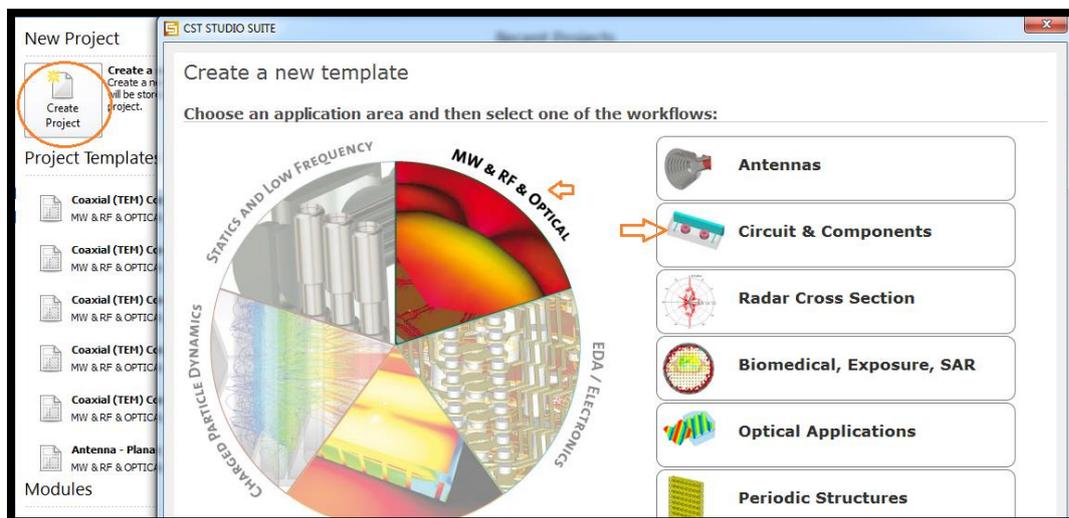
A l'aide de l'équation 2.6, calculer les dimensions de la ligne micro ruban sachant que :

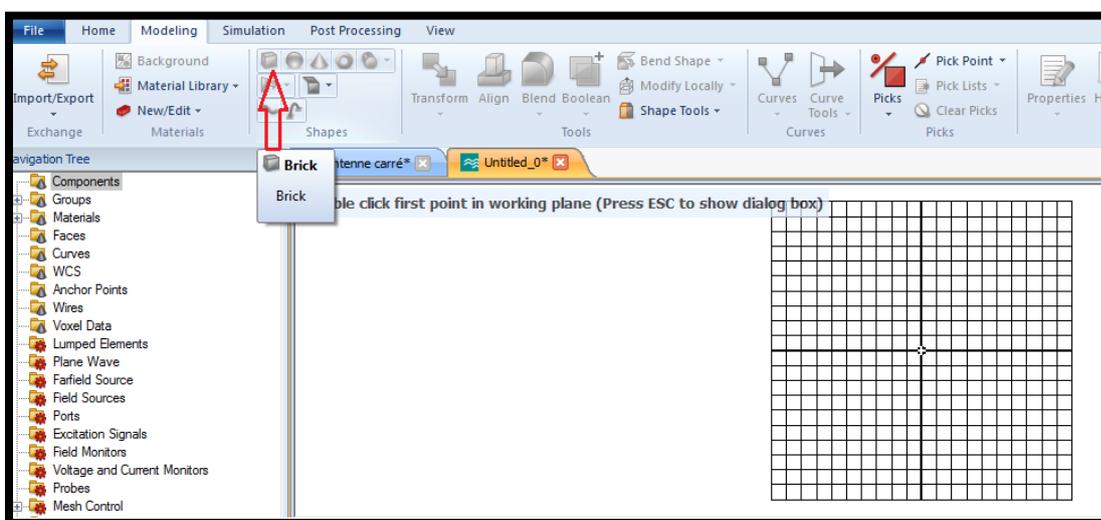
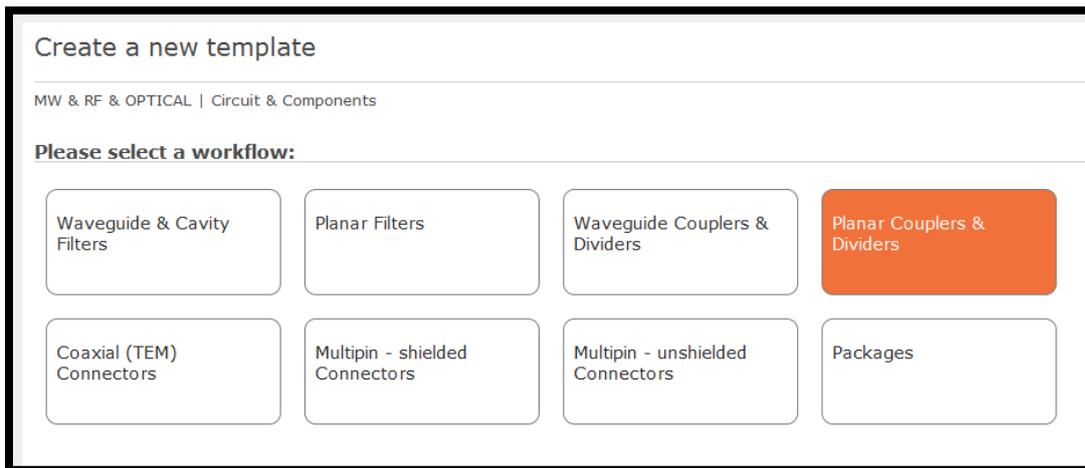
- La fréquence de travail est de 3 GHz.
- L'impédance caractéristique de la ligne est de 50 ohms
- Le substrat à utiliser est de type « FR4 Lossy » avec une permittivité  $\epsilon_r = 4.3$  et une épaisseur  $h=1.6\text{mm}$ .

#### 3.2 Conception logicielle

En utilisant le logiciel CST microwave, donnez la conception de la ligne micro ruban de la figure 2.1.

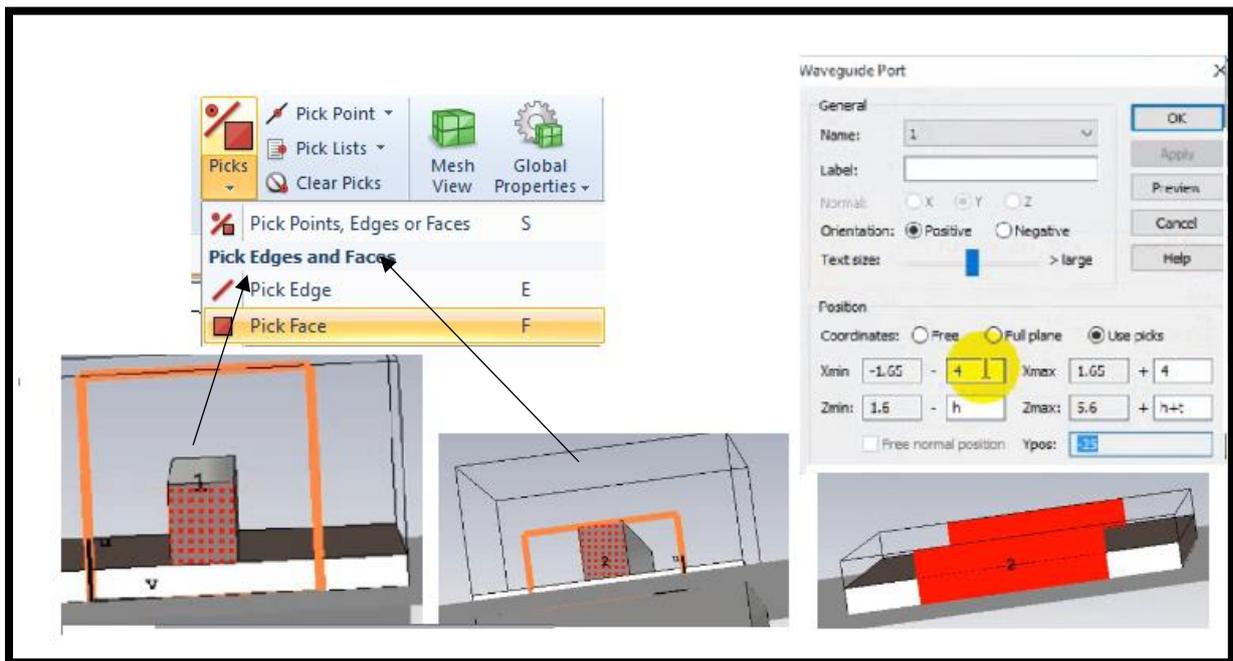
- **Lancer le logiciel CST studio**, puis cliquer sur l'icône : « **create new project** », choisissez la zone « **MW and RF and optical** » puis « **circuit and component** »





### 3.3 Alimentation de la ligne

Alimenter cette ligne avec l'onglet : « **Waveguide port** » aux deux extrémités comme suite :



#### 4. Simulation

Lancer la simulation et donner l'allure du paramètre  $S_{11}$  de la ligne en fonction de la fréquence ;

##### 4.1 Mesure des caractéristiques de la ligne

La longueur de la ligne est de l'ordre de  $n\lambda_g/2$ . Trouvez par simulation l'adaptation de la ligne à la fréquence donnée.

4.1.1 Mesurer le coefficient de réflexion en dB.

##### 4.2 Distribution des champs électriques et magnétique

Visualisez la distribution des champs électriques et magnétique en 2D ou en 3D.

##### 4.3 Rapport final du TP2

Rédigez un rapport détaillé avec vos résultats trouvés.

## TP N°3 : Antennes Filaires à rayonnement omnidirectionnel

### « Dipôle demi onde »

#### 1. Objectif du TP

L'objectif de ce TP est de concevoir et simuler à l'aide du logiciel CST Microwave des antennes filaires de type dipôle demi-onde et antenne YAGI pour retirer ses différentes caractéristiques tel que : paramètre S11, TOS, diagramme de rayonnement (directivité, gain) etc...

#### 2. Partie théorique

##### 2.1. Antenne

En radioélectricité, une antenne est un dispositif permettant de rayonner (émetteur) ou de capter (récepteur), les ondes électromagnétiques. Ses caractéristiques principales sont : le rendement, coefficient de réflexion, gain, diagramme de rayonnement. Ces derniers influencent directement les performances de qualité et de portée du système [6].

##### 2.2. Caractéristiques d'une Antenne

###### 2.2.1 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement présente la distribution dans l'espace de l'énergie rayonnée ou reçue. Il indique les directions de l'espace ( $\theta$ ,  $\phi$ ) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale.

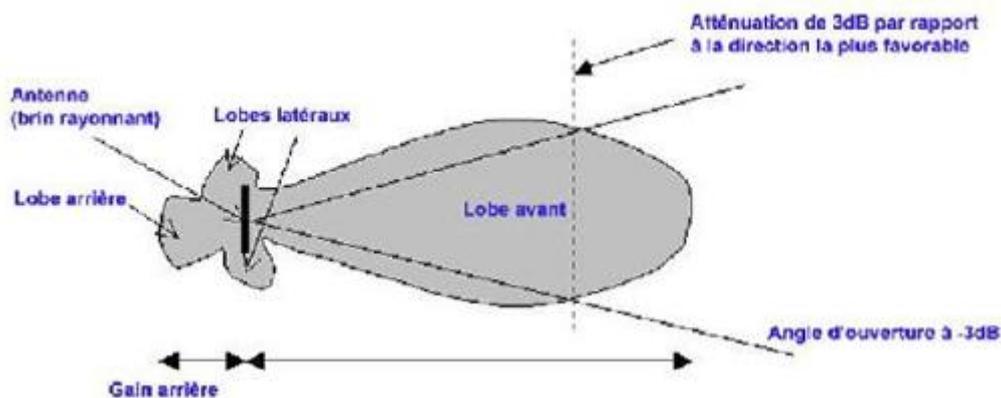


Figure 2.1 : Diagramme de rayonnement [6]

###### 2.2.2 Gain d'une antenne

Le gain d'une antenne est le rapport entre la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne dans la direction ( $\theta$ ,  $\phi$ ) et la densité de puissance à rayonnement isotrope, les deux

antennes étant alimentées par la même puissance. C'est le rapport entre la directivité et le rendement énergétique de l'antenne [6].

### 2.2.3 Angle d'ouverture d'une antenne

L'angle d'ouverture d'une antenne est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié (-3dB) de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable [6].

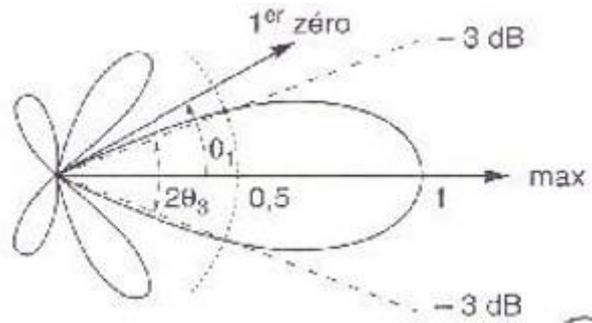


Figure 2.2 : Angle d'ouverture d'une antenne [6].

### 2.2.4 Polarisation d'une onde

On définit la polarisation d'une onde électromagnétique comme la direction du champ électrique. Le rapport axial (RA) est principalement utilisé pour décrire la nature de polarisation des antennes [7, 8].

$RA \leq 3 (dB)$  : Polarisation circulaire.

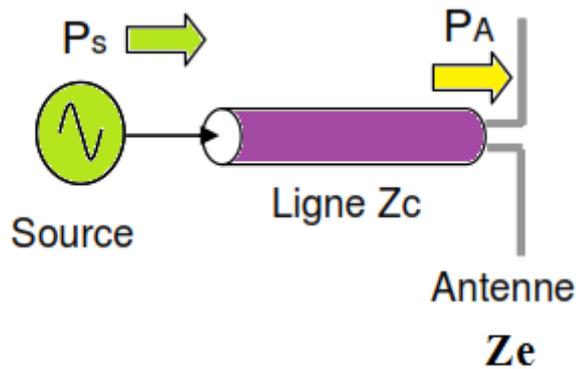
$3 < RA < 10 (dB)$  : Polarisation elliptique.

$RA \gg 10 (dB)$  : Polarisation linéaire.

### 2.2.5 Impédance d'entrée

Une antenne est reliée à la source par une ligne de transmission d'impédance caractéristique  $Z_C$  (en général,  $Z_c = 50 \Omega$ ). Vous devez adapter votre impédance afin de permettre le transfert maximal de l'énergie entre l'alimentation et l'antenne. L'adaptation permet de minimiser le taux du coefficient de réflexion  $S_{11}$  en entrée de l'antenne.

Le coefficient de réflexion est le rapport entre l'onde réfléchiée en entrée de l'antenne et l'onde incidente. Il dépend de l'impédance d'entrée de l'antenne et de l'impédance caractéristique.



**Figure 2.3 :** Ligne de transmission liée à une antenne

### 2.2.6 Fréquence d'utilisation

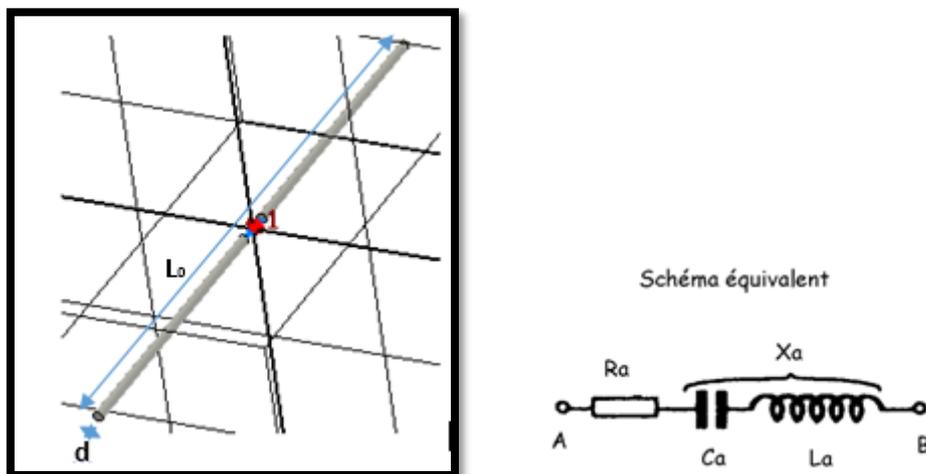
Chaque antenne possède une fréquence de résonance pour laquelle elle présente des capacités optimales pour émettre ou recevoir l'énergie électromagnétique correspondante dans l'espace environnant. La fréquence de résonance d'une antenne dépend d'abord de ses dimensions propres, mais aussi des éléments qui lui sont ajoutés.

### 2.2.7 La directivité

Une directivité présente la concentration de l'énergie dans une direction privilégiée.

## 3. Partie Simulation : Antenne dipôle pour la Télévision

L'antenne dipôle demi-onde, constituée de 2 brins métallique d'environ  $\lambda/4$  et de diamètre  $d$ , a une longueur totale voisine de  $L_0 \approx \lambda/2$  :

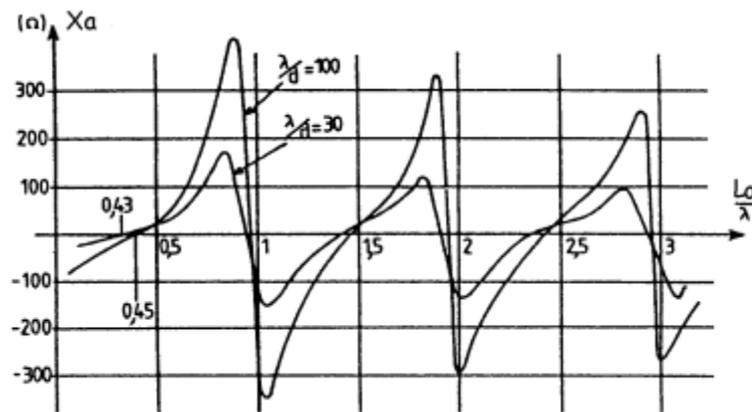


**Figure 2.4 :** Antenne dipôle demie onde

### 3.1 Calcul théorique

3.1.1 Calculer la longueur approximative  $L_0$  d'une antenne dipôle utiliser pour la bande TV-UHF à une fréquence moyenne de  $f = 665$  MHz.

3.1.2 Les courbes suivantes donnent les variations de la réactance  $X_a$  en fonction du rapport  $L_0/\lambda$  pour 2 valeurs différentes du diamètre.



**Figure 2.5 :** Variations de la réactance  $X_a$  en fonction du rapport  $L_0/\lambda$  [9]

Une antenne est optimale si elle est équivalente à une résistance à la fréquence de travail. Si on veut une impédance d'antenne résistive à 665 MHz ( $X_a = 0$ ), la valeur  $L_0 = \lambda/2$  convient-elle pour la longueur de l'antenne ?

3.1.3 La longueur exacte est donnée par la relation  $L_0 = K \cdot \lambda/2$  où  $K$  est le facteur de raccourcissement. Sur la courbe ci-dessous, retrouver la valeur du coefficient  $K$  et la résistance de rayonnement  $R_a$  correspondant à des brins de diamètre  $d = 0,8$  cm et vérifier la longueur optimale de l'antenne trouvée précédemment.



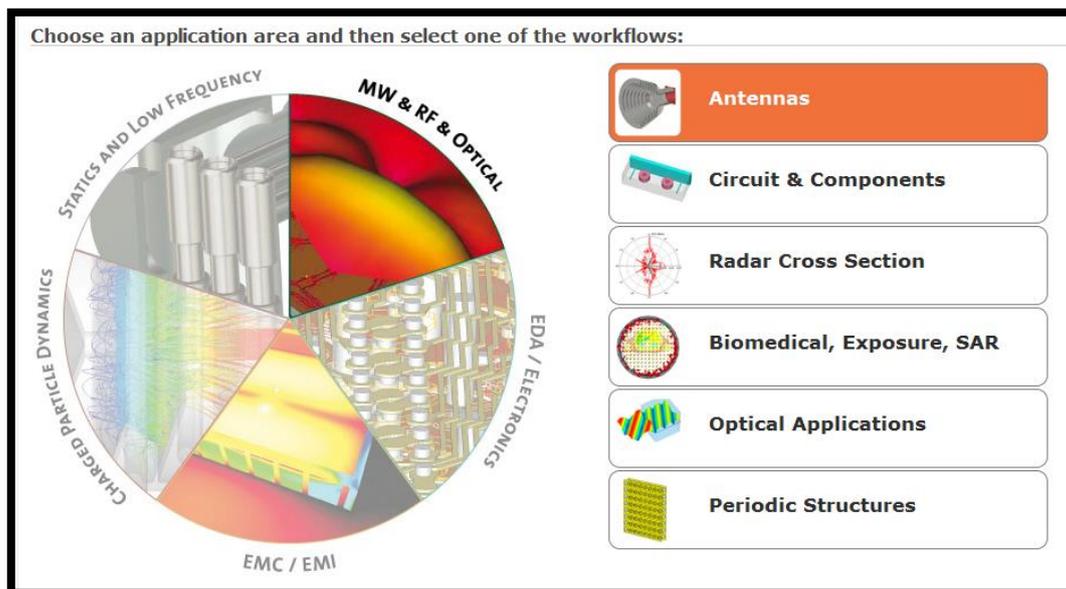
**Figure 2.6 :** Résistance de rayonnement et coefficient de raccourcissement en fonction de la longueur d'onde et du diamètre  $d$  [9]

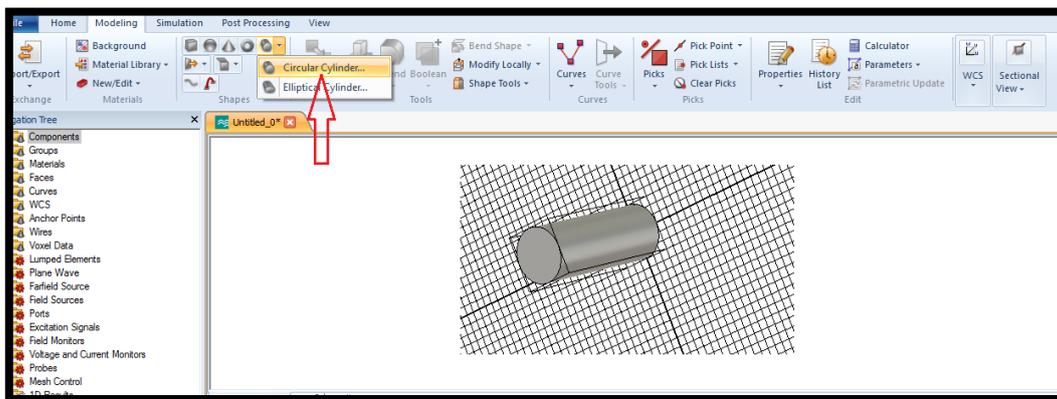
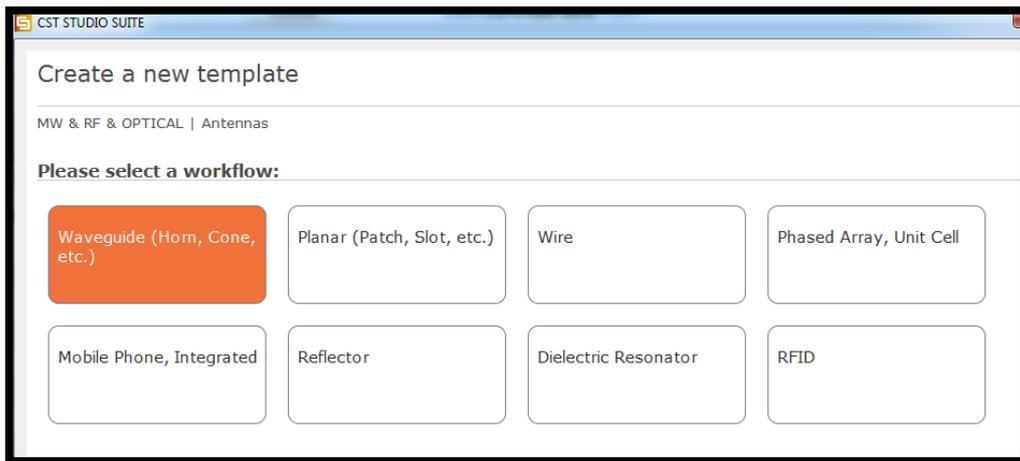
### 3.2 Conception logicielle

3.2.1 En utilisant le logiciel CST, réalisez l'antenne dipôle de la figure 1 à la fréquence 665MHz et pour la longueur approximative  $L_0$ .

Le diamètre du dipôle est donné par :  $d = 0.003369\lambda$

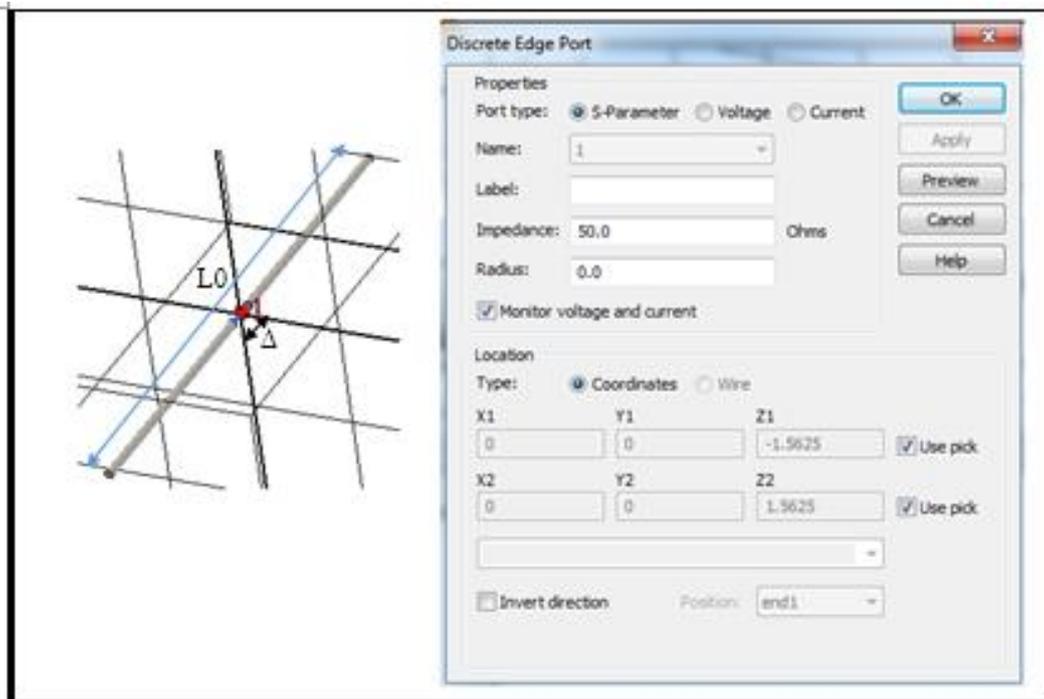
La distance entre les deux brins est :  $\Delta = 0.025\lambda$ .





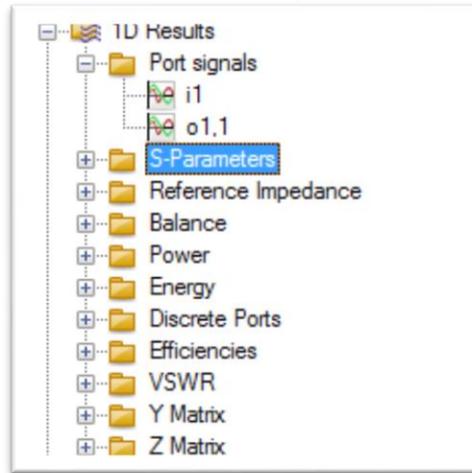
### 3.3 Alimentation

Alimenter votre dipôle avec une sonde coaxial en utilisant l'onglet « discret port »



### 3.4 Mesurer des paramètres caractéristiques

3.4.1 Sur la barre située à gauche « 1D Results », Mesurer le coefficient de réflexion S11 et le TOS (VSWR) de l'antenne dipôle ? Est ce qu'il y a une adaptation à la fréquence de résonance 665 MHz,



3.4.2 Refaire le même travail en utilisant la longueur effective de l'antenne donnée par la relation précédente. Comparer les deux résultats obtenus ?

### 3.5 Adaptation

3.5.1 Faites changer la longueur  $L_0$  du dipôle pour avoir une meilleure adaptation à la fréquence 665MHz.

3.5.2 Mesurer le coefficient de réflexion S11. Que remarquez-vous ?

3.5.3 Changer la valeur de l'impédance d'entrée du dipôle et remplissez le tableau suivant :

Z ( $\Omega$ )	45	50	55	60	65	70	75
S11 (dB)							

Quelle valeur présente une bonne adaptation ?

### 3.6 Diagramme de rayonnement

3.6.1 Simuler le diagramme de rayonnement en directivité et en gain



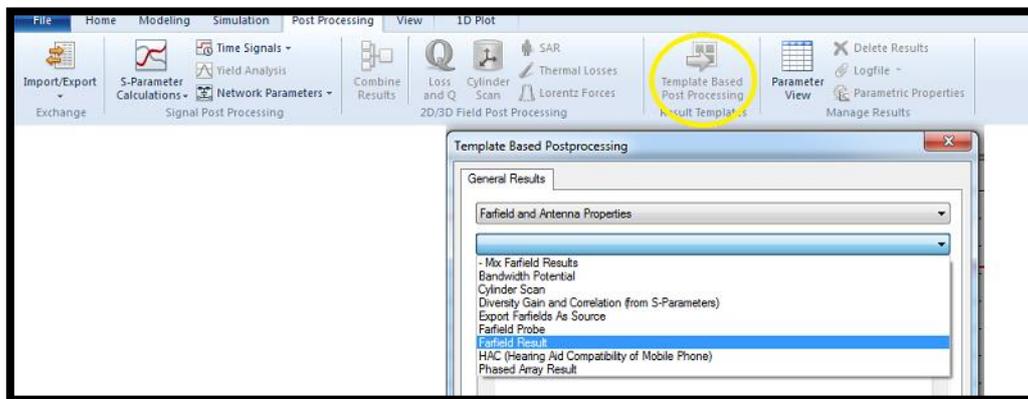
3.6.2 Reporter votre résultat sur le tableau suivant :

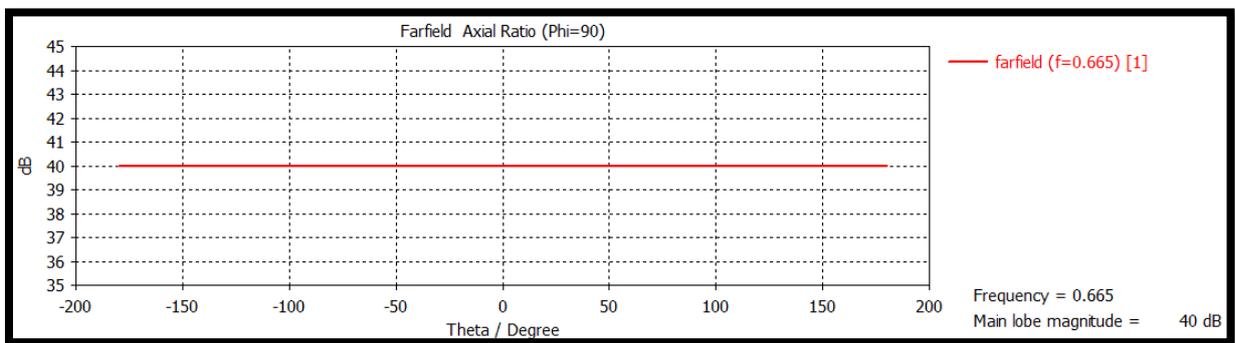
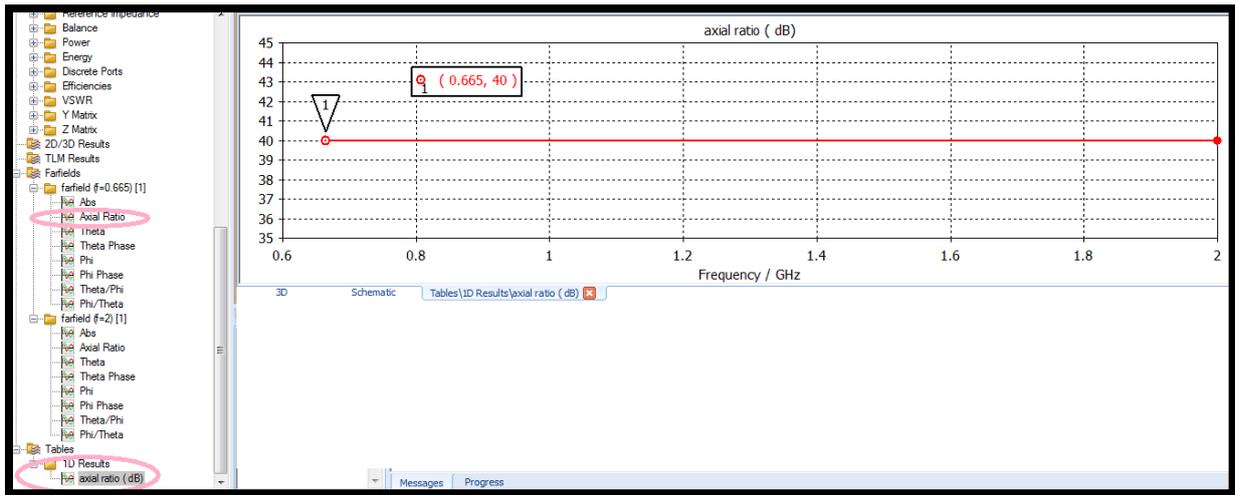
F (MHz)	S11	Gain (dB)	Directivité (dB)

3.6.3 Mesurer l'angle d'ouverture à -3dB de l'antenne dipôle demie onde adaptée.

### 3.7 Polarisation de l'antenne

Tracez le Rapport axial en fonction de la fréquence en suivant les étapes citées ci-dessous. Quel est le type de polarisation de ce dipôle ?





### 3.8 Rapport final du TP3

Reportez vos résultats sur un rapport et conclure votre travail.

## TP N°4 : Antennes Filaires à rayonnent directionnel « Antenne YAGI »

### 1. Objectif du TP

L'objectif de ce TP est de concevoir et simuler à l'aide du logiciel CST Microwave une antenne YAGI à rayonnement directives puis mesurer ses différents paramètres caractéristiques tel que : le coefficient de réflexion S11, TOS, diagramme de rayonnement (directivité, gain) etc...

### 2. Partie théorique

L'antenne YAGI est une antenne directive dont le gain est supérieur à celui du dipôle dans la direction avant et inférieur dans la direction arrière. Elle se compose de [10] :

- Un dipôle demi-onde, alimenté comme il se doit en son milieu, c'est l'élément **radiateur**
- Un (ou plusieurs) élément **réflecteur**, non alimenté
- Un (ou plusieurs) élément **directeur**, non alimenté

Les éléments non alimentés sont qualifiés de "parasites". La configuration minimum pour une antenne YAGI correspond à un dipôle accompagné d'un seul élément parasite, un réflecteur (le plus souvent) ou un directeur.

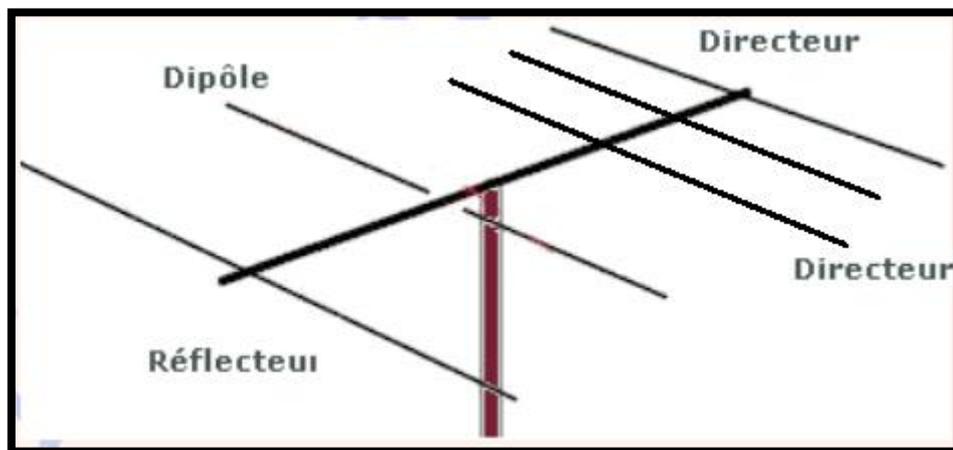
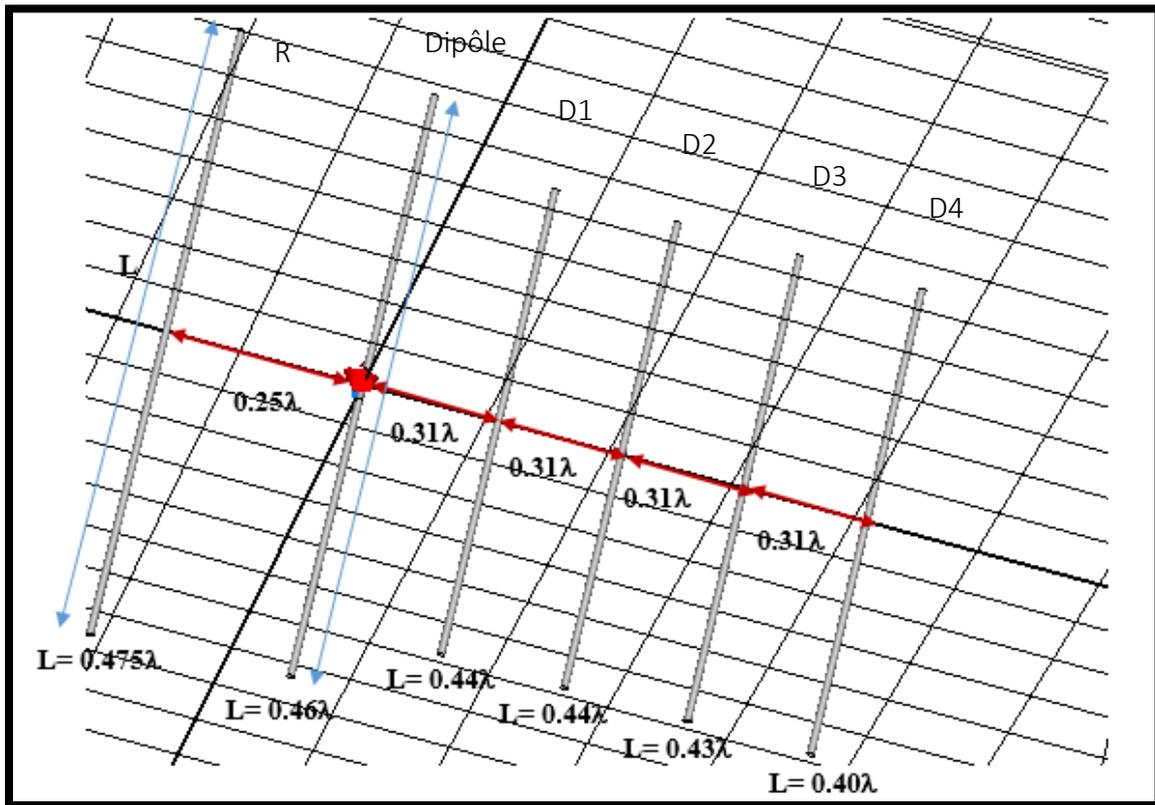


Figure 4.1 : Antenne YAGI

### 3. Partie simulation

#### 3.1 Calcul théorique

On propose de simuler avec CST Microwave une antenne YAGI VHF travaillant dans la gamme de fréquence 169 MHz constituée d'un réflecteur (R), d'un dipôle et de quatre directeurs (D1, D2, D3, D4). Les dimensions de cette antenne sont données sur la figure 2 :



**Figure 4.2 : Schéma de l'antenne YAGI**

Afin de comprendre le rayonnement de cette antenne, la simulation sera divisée sur plusieurs étapes :

### 3.2 Conception logicielle

3.2.1 Concevoir l'antenne YAGI de la même façon que le dipôle demie onde et alimenter votre dipôle avec une ligne coaxial en utilisant l'onglet « discret port ».

### 3.3 Mesure des paramètres caractéristiques

3.3.1 Simuler et mesurer le paramètre S11 et le diagramme de rayonnement de l'antenne pilote ( $L=0.46\lambda$ ) seule.

3.3.2 Simuler et mesurer le paramètre S11 et le diagramme de rayonnement de l'antenne pilote ( $L=0.46\lambda$ ) avec le réflecteur.

3.3.3 Simuler et mesurer le paramètre S11 et le diagramme de rayonnement de l'antenne pilote ( $L=0.46\lambda$ ) avec le réflecteur et un seul brin.

3.3.4 Simuler et mesurer le paramètre S11 et le diagramme de rayonnement de l'antenne pilote ( $L=0.46\lambda$ ) avec réflecteur et les quatre brins.

3.3.5 Mesurer le gain de l'antenne YAGI et comparer le avec celui du dipôle élémentaire.

### 3.4 Adaptation

3.4.1 Modifier la longueur des directeurs afin d'adapter votre paramètre S11.

3.4.2 Reportez vos résultats sur le tableau suivant :

<b>L<sub>D1</sub></b>				
<b>L<sub>D2</sub></b>				
<b>L<sub>D3</sub></b>				
<b>L<sub>D4</sub></b>				
<b>S11</b>				

3.4.3 Mesurer l'angle d'ouverture à -3dB de l'antenne YAGI.

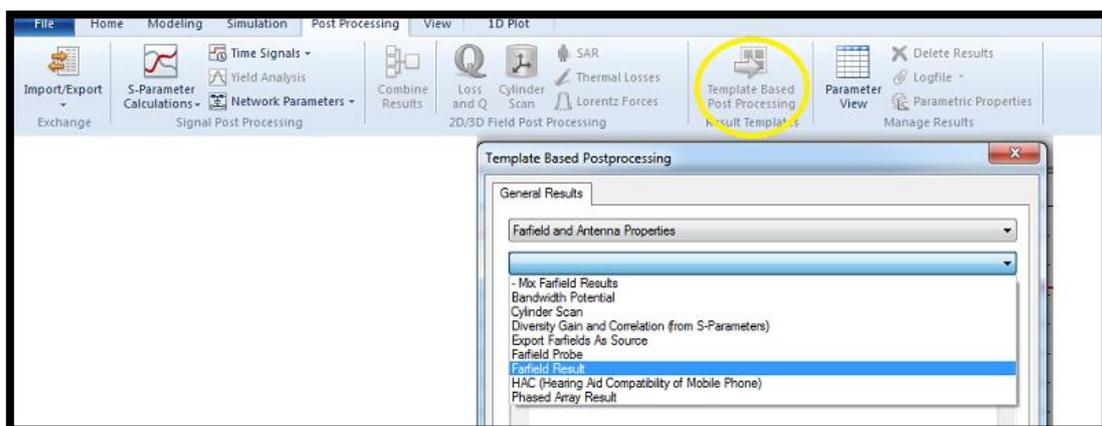
### 3.5 Distribution des champs électriques et magnétiques

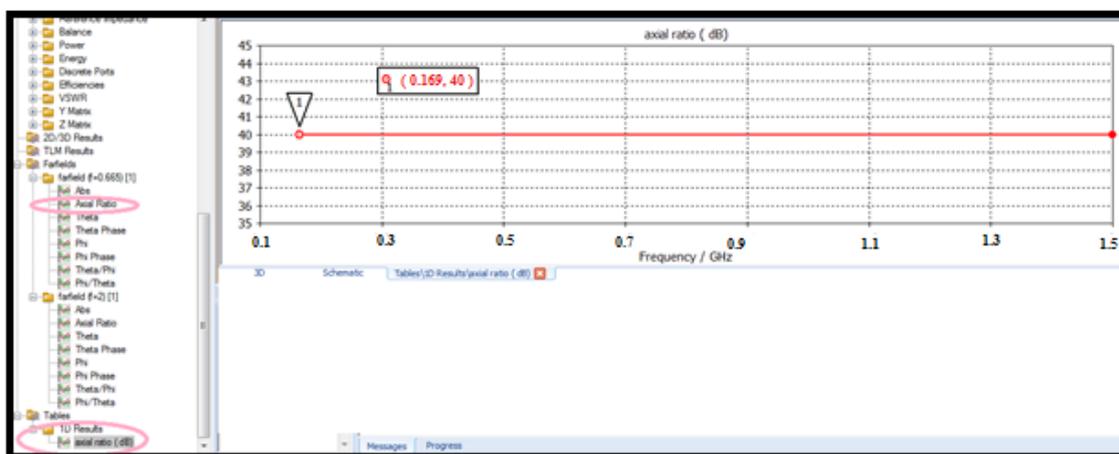
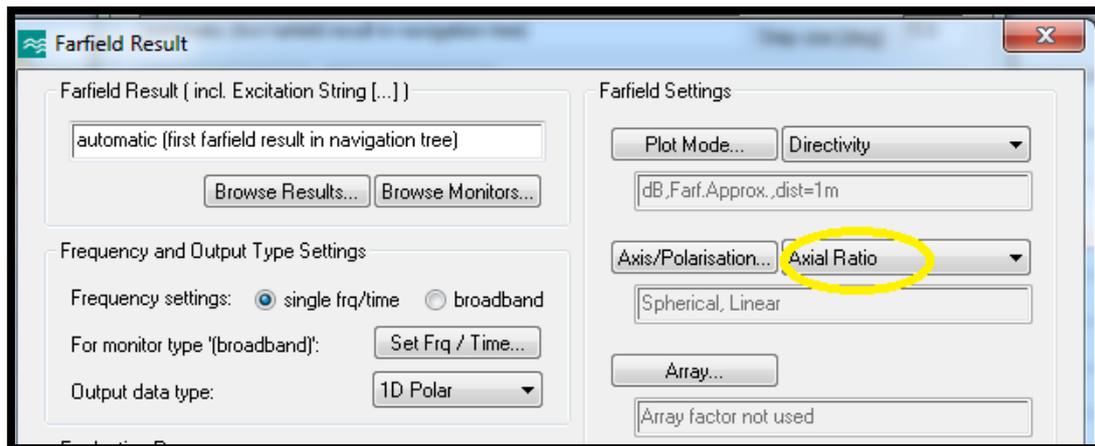
Visualisez la distribution des champs électriques et magnétiques en 3D.

### 3.6 Polarisation de l'antenne YAGI

Tracez le Rapport axial en fonction de la fréquence en suivant les étapes citées ci-dessous.

Quel est le type de polarisation de l'antenne YAGI ?





### 3.7 Rapport final du TP4

Reportez vos résultats sur un rapport et conclure votre travail.

## TP N°5 : Antenne imprimée à rayonnement omnidirectionnel « Antenne imprimée rectangulaire »

### 1. Objectif du TP

L'objectif de ce TP est d'étudier et de concevoir une antenne imprimée rectangulaire. Ces antennes sont simulées à l'aide du logiciel CST Microwave Studio pour calculer les champs rayonnés par les antennes, et visualiser le diagramme de rayonnement en gain (ouverture à -3 dB, lobes secondaires, etc...).

### 2. Partie théorique

L'antenne à étudier est une antenne patch rectangulaire, alimentée et adaptée par une ligne micro ruban ( $50 \Omega$ ), elle fonctionne à la fréquence 2,4 GHz pour des applications wifi. Le substrat utilisé est de type FR4 avec une permittivité  $\epsilon_r$  de 4.3 et une hauteur  $h=1.6\text{mm}$ . La structure d'une antenne imprimée est présentée à la figure 5.1 et les paramètres géométriques de la forme rectangulaire sont représentés à la figure 5.2 ;

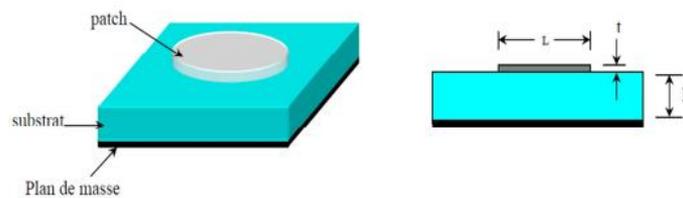


Fig 5.1 Structure d'une Antenne Imprimée

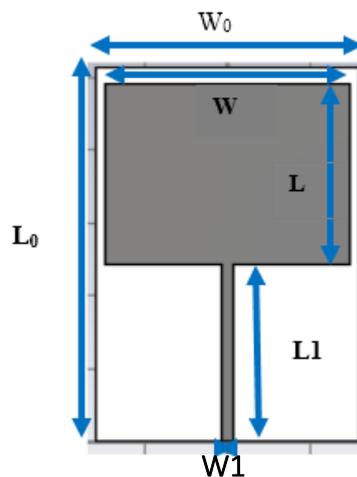


Figure 5.2. Géométrie de l'Antenne

Les formules de calcul des paramètres de l'antenne patch rectangulaire sont données dans le tableau 5.1 [11,12] :

Paramètres de d'antenne patch rectangulaire		Equations
Patch	La largeur	$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$
	Constant diélectrique ( $\epsilon_{eff}$ )	$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}}$
	La longueur	$L = L_{eff} - 2\Delta L$
	L'extension de la longueur ( $\Delta L$ )	$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)}$
Substrat et plan de masse	La longueur	$L_0 = L + L_1 + 6 \times h$
	La largeur	$W_0 = W + 6 \times h$
La longueur de la ligne	simple	$L_1 = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_{reff}}}$
	quart d'onde	$L_1 = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_{reff}}}$
l'impédance caractéristique de la ligne microruban		$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left[ \frac{8h}{W_1} + \frac{W_1}{4h} \right], & \frac{W_1}{h} \leq 1 \\ \frac{120}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[ \frac{W_1}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_1}{h} + 1.44 \right) \right]}, & \frac{W_1}{h} \geq 1 \end{cases}$

Tableau 5.1 : Paramètres de l'antenne patch rectangulaire.

### 3. Partie Simulation

#### 3.1 Calcul théorique

Calculer les dimensions de l'antenne imprimée à la fréquence 2.4GHz à l'aide des équations citées au tableau 5.1 :

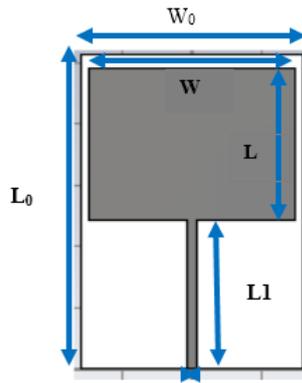
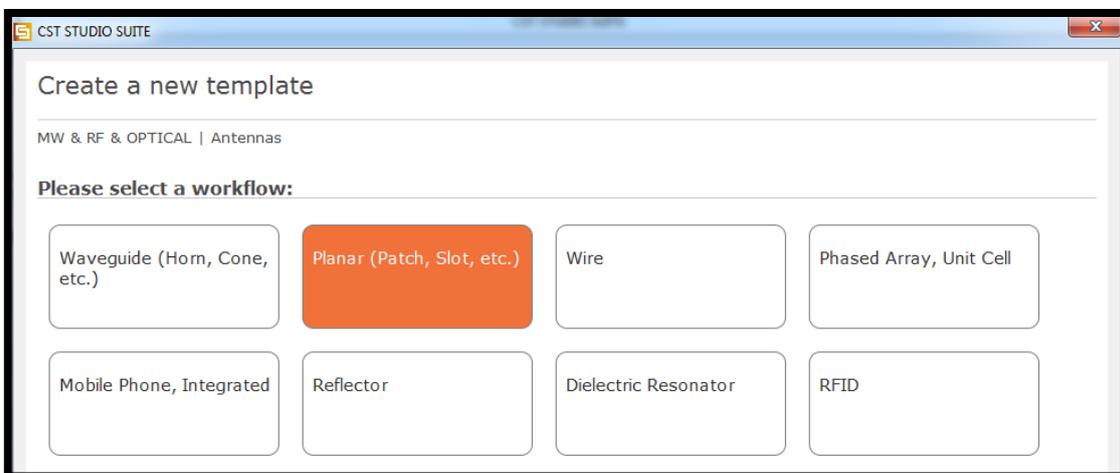
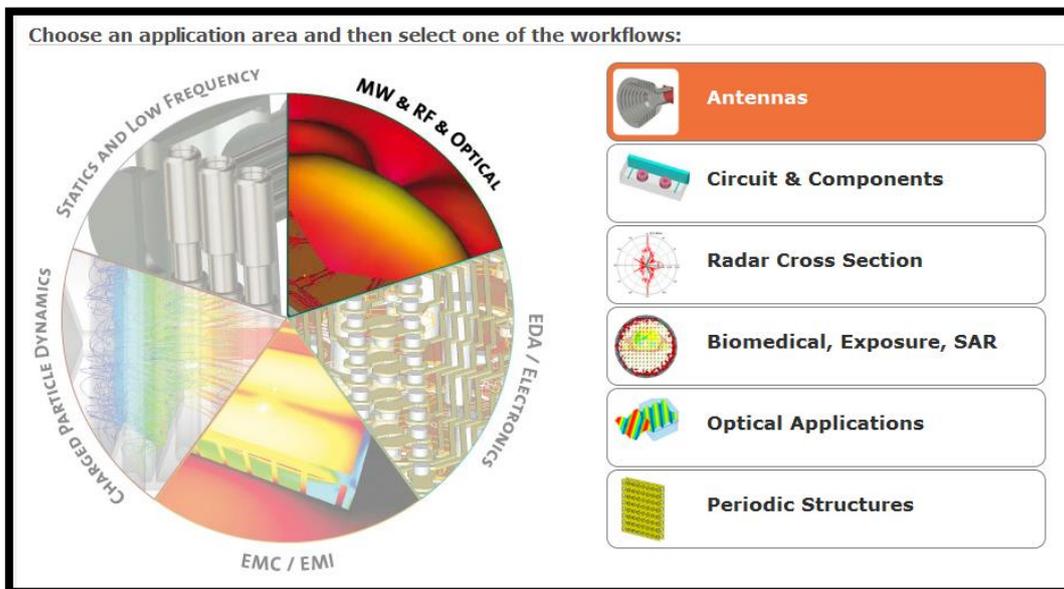
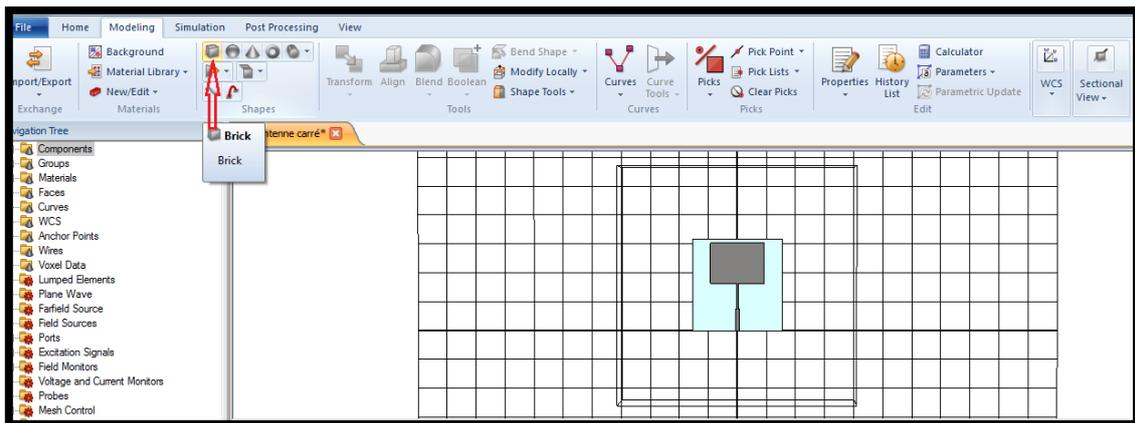


Figure 5.3. Géométrie de l'Antenne patch rectangulaire

### 3.2 Conception logicielle

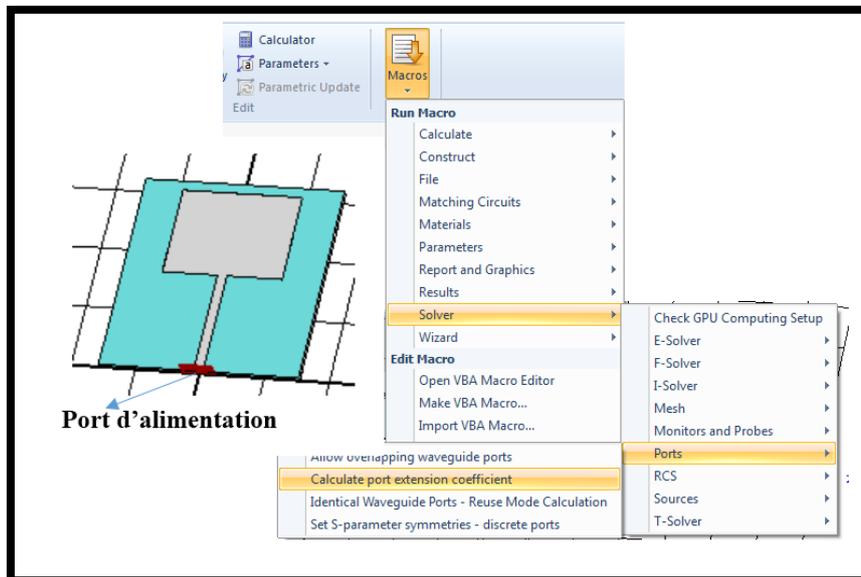
3.2.1 En utilisant le logiciel CST, réalisez l'antenne rectangulaire de la figure 1.





### 3.3 Alimentation

Alimentez cette antenne avec une ligne micro-ruban d'impédance 50ohms.

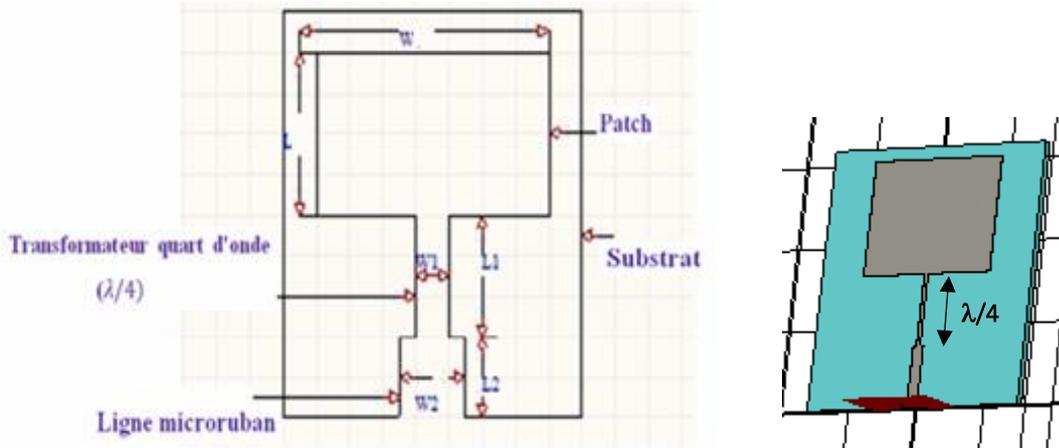


### 3.4. Mesures des paramètres caractéristiques

Mesurer le coefficient de réflexion S11 ? À qu'elle fréquence est réalisée l'adaptation de cette antenne ?

### 3.5 Adaptation

Adapter cette antenne en utilisant une ligne micro ruban quart d'onde comme le montre la figure 5.4 :



**Figure 5.4 :** Antenne patch avec ligne quart d'onde

3.5.1 Déterminez par simulation la longueur L afin d'avoir une meilleure adaptation de l'antenne imprimée à la fréquence donnée.

3.5.2 Mesurez le coefficient de réflexion S11.

### 3.6 Diagramme de rayonnement

3.6.1 Simulez le diagramme de rayonnement en trois dimensions (en gain et en directivité).

3.6.2 Mesurer l'angle d'ouverture à -3dB de l'antenne imprimée adaptée.

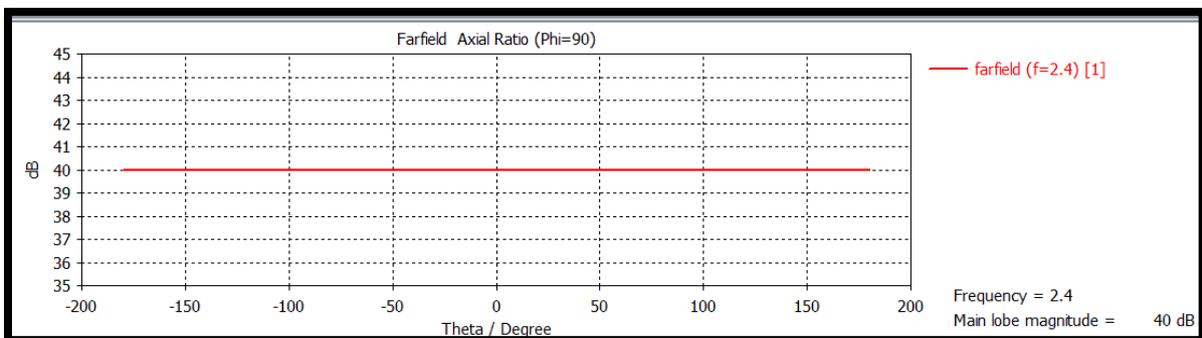
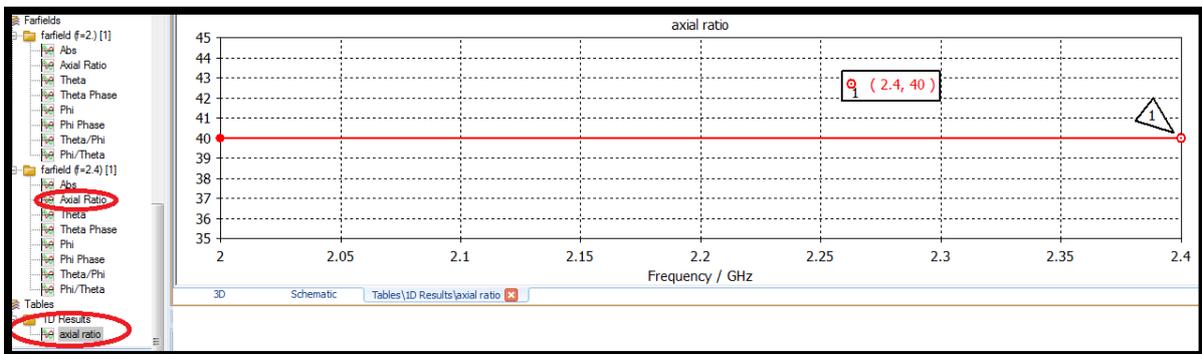
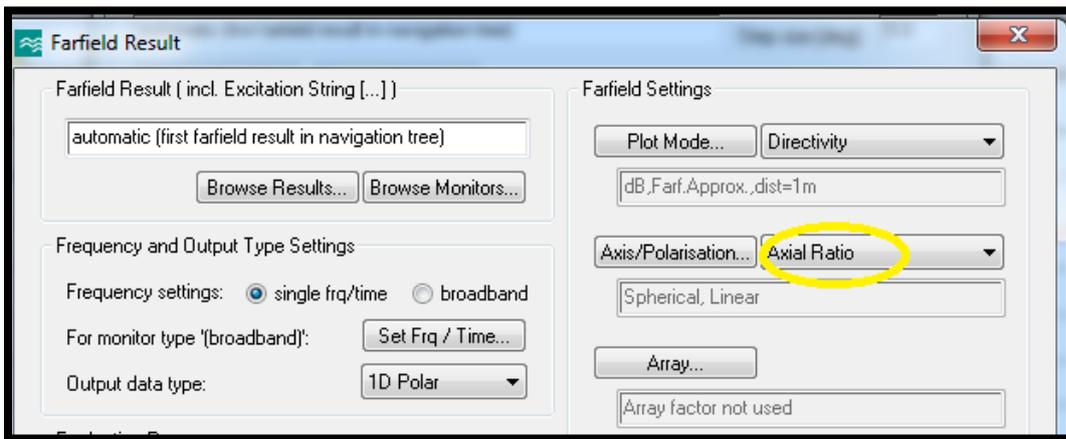
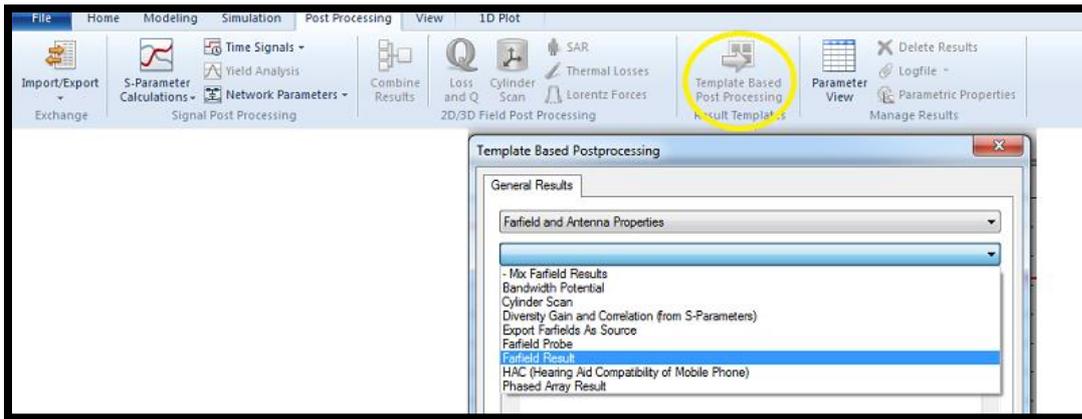
3.6.3 Visualisez la distribution des champs électriques et magnétiques en 2D ou en 3D.

3.6.4 Reportez vos résultats sur le tableau suivant :

F (GHz)	S11 (dB)	Gain (dB)	Directivité (dB)	Angle d'ouverture à -3dB

### 3.7 Polarisation de l'antenne patch rectangulaire

Tracez le Rapport axial en fonction de la fréquence. Quel est le type de polarisation de l'antenne patch rectangulaire conçue ?



### 3.8 Rapport final du TP5

Rédiger un rapport de vos résultats trouvés.

## **1/ Description du logiciel de simulation CST Studio Suite**

Fondé en 1992, le logiciel de simulation électromagnétique CST STUDIO SUITE est l'aboutissement de nombreuses années de recherche et de développement dans les solutions les plus efficaces et précises de calcul pour la conception électromagnétique [13, 14].

CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structures passives en trois dimensions basé sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales (FIT, Finite Integration Technic). Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3D de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle. De plus, contrairement à la plupart des logiciels de simulation électromagnétique, CST discrétise la forme intégrale des équations de Maxwell plutôt que leurs formes différentielles. C'est l'une des caractéristiques clé de ce simulateur [13, 14].

CST Microwave Studio fait partie de CST DESIGN STUDIO suite, et offre un certain nombre de solveurs différents selon le type d'application et du problème rencontré [13, 14].

## **2/ Modules de CST**

L'outil CST est constitué d'un certain nombre de modules appelés « solveurs » [13, 14].

### **2.1.Un solveur transitoire**

Il s'agit d'un module 3D général qui permet d'obtenir des simulations en temps réel, ce qui peut être intéressant pour étudier la propagation du champ dans un composant électronique en fonction du temps [13, 14].

### **2.2.Un solveur fréquentiel**

Comme le solveur transitoire, il est constitué d'un solveur général basé sur une méthode fréquentielle. Le type de maillage change selon la structure étudiée [13, 14].

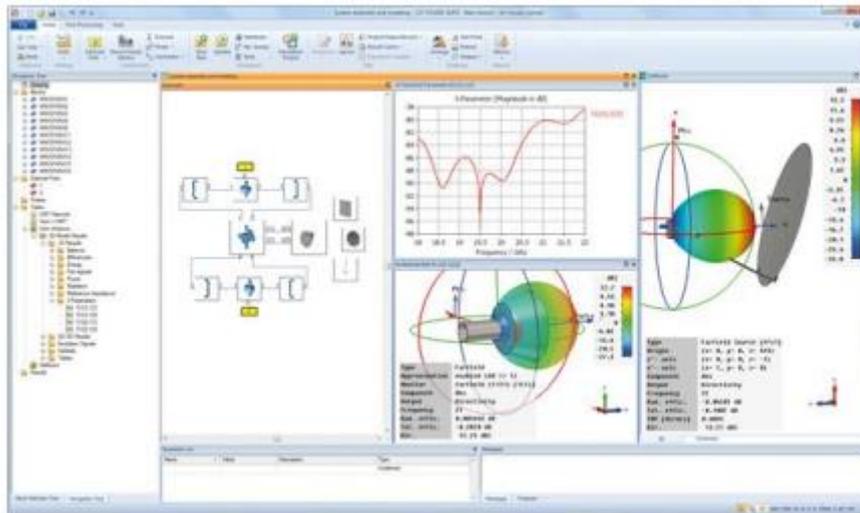
### **2.3.Un solveur intégral**

Ce solveur est dédié aux plus grandes structures électriques. Il se fonde sur la méthode des moments avec une formulation intégrale des champs électriques et magnétiques. Afin de réduire

la complexité numérique l'approche MLFMM (Multi Level Fast Multipole Method) est utilisée [13, 14].

### **2.4.Un solveur modal**

Ce solveur est dédié à la simulation des structures fermées résonantes. Les résultats qui peuvent être obtenus sont par exemple la distribution des modes ainsi que les fréquences de résonance de la structure. CST nous permet donc de décrire nos dispositifs hyperfréquences tel qu'ils sont réalisés en pratique. Dans Microwave Studio, chaque cellule du maillage est cubique. L'outil de résolution temporelle remplace les dérivées partielles par des différentielles  $\Delta t$  [13, 14].



**Figure1** : *Illustration de l'interface de l'outil CST.*

### **3/ La méthode FIT utilisée par le logiciel CST**

La FIT est utilisée par le logiciel d'analyse électromagnétique 3D Microwave Studio de CST qui présente de nombreuses optimisations de calcul et une interface graphique conviviale, elle est appliquée dans le domaine temporel. La discrétisation des dérivées temporelles est faite par le schéma leap-frog. L'utilisation ici de la forme intégrale locale permet d'appliquer la technique des PBA (Perfect Boundary Approximation). Cette technique découpe une cellule élémentaire en deux et assigne à chacune des parties un matériau différent. La frontière entre les deux matériaux peut être une surface de forme quelconque. Pour des structures relativement complexes géométriquement ou contenant des singularités, la technique PBA diminue significativement le nombre de mailles nécessaires. Grace à cette technique de maillage, Microwave Studio peut prendre par exemple en compte les épaisseurs des feuilles métalliques sans avoir besoin de les mailler directement et ce qui nous fait gagner du temps en termes de calcul. Comme il a déjà été cité le principe de la technique d'intégration finie FIT repose sur

la discrétisation des équations de Maxwell sous leurs formes intégrales [13, 14].

- $\oint_c E \cdot d\vec{L} = - \iint_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot ds$
- $\oint_c H \cdot d\vec{L} = \iint_s (\frac{\partial B}{\partial t} + \vec{j}) \cdot ds$
- $\iint_s D \cdot d\vec{s} = \iiint_v p \cdot dv$
- $\iint_s B \cdot d\vec{s} = 0$

**4/ Les modules d'exécution :**

Le tableau suivant résume les modules d'exécution de logiciel CST [13, 14] :

<p>- CST EM Studio</p> 	<p>- CST EM STUDIO est un outil facile à utiliser pour l'analyse et la conception des structures statiques et basses fréquences.</p> <p>-Les applications incluent: les actionneurs, les freins, EMC, énérateurs, de mesure, moteurs, capteurs et le blindage.</p>
<p>-CST particule studio</p> 	<p>- PARTICULES CST STUDIO est un outil spécialisé pour la conception rapide et précise. Il inclut l'analyse des canons à électrons 3D, les tubes cathodiques.</p>
<p>-CST Mphysics Studio</p> 	<p>- CST MPHYSICS STUDIO est un outil d'analyse pour les contraintes thermique et structurale, et des problèmes de mécanique.</p>

<p>-CST Design Studio</p> 	<p>-CST DESIGN STUDIO est une plate-forme universelle pour gérer les processus de conception d'un système complexe. En construisant des sous-systèmes élémentaires, l'utilisateur peut analyser le comportement du système complet en petits segments.</p>
<p>-CST PCB Studio</p> 	<p>- CST PCB STUDIO est un outil pour l'étude des signaux et la simulation des effets EMC et EMI (Electromagnétique Compatibility/ Electromagnétique Interférence) sur cartes de circuits imprimés (PCB).</p>
<p>-CST Câble Studio</p> 	<p>- CST CABLE STUDIO est un outil pour l'analyse des effets dans les systèmes de câble, y compris les fils unique, paires torsadées ainsi que des faisceaux de câbles complexes.</p>
<p>-CST Micros Tripes</p> 	<p>-CST Micro Stripes analyse les structures de rayonnement d'antennes complexes, et résous les problèmes EMC/EMI.</p>
<p>-CST Microwave Studio</p> 	<p>-CST MWS est un outil de simulation 3D spécialisé pour le traitement rapide et précis des problèmes à haute fréquence avec un large champ d'application.</p>

*Tableau 1. Les modules d'exécution de logiciel CST [13, 14].*

**5/ La méthode qui décrit la structure [13, 14]**

Les méthodes qui décrivent la structure sont :

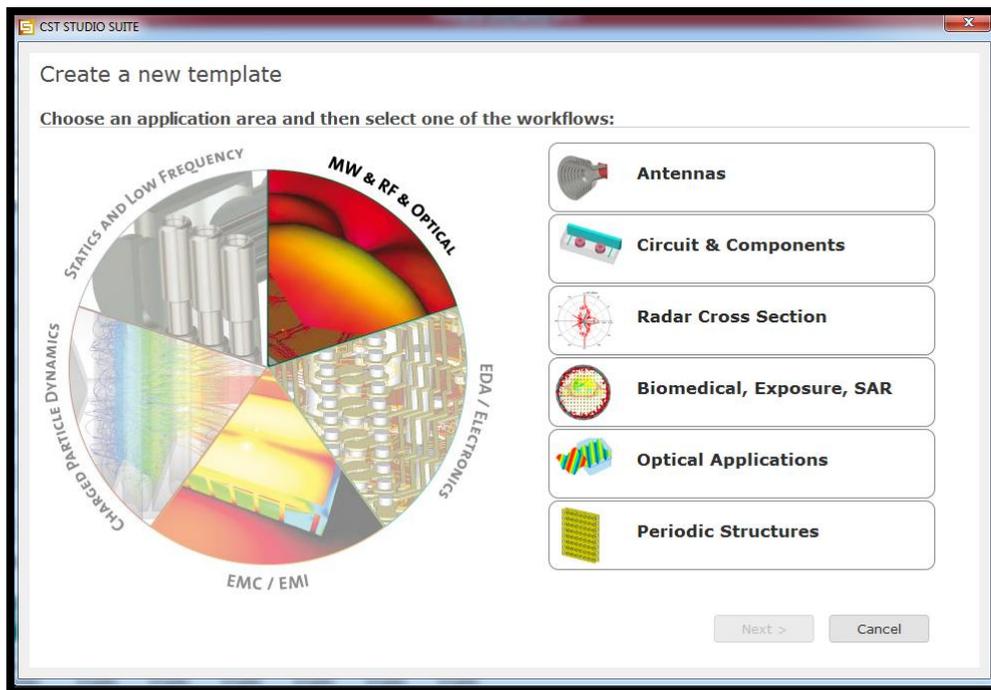
- Modélisation du diélectrique.
- Modélisation du conducteur interne à l'intérieur de la partie diélectrique.

Après démarrage de l'environnement CST de conception et la création d'un nouveau projet CST Microwave Studio, la sélection du modèle de base doit être le plus proche possible du diélectrique à concevoir.

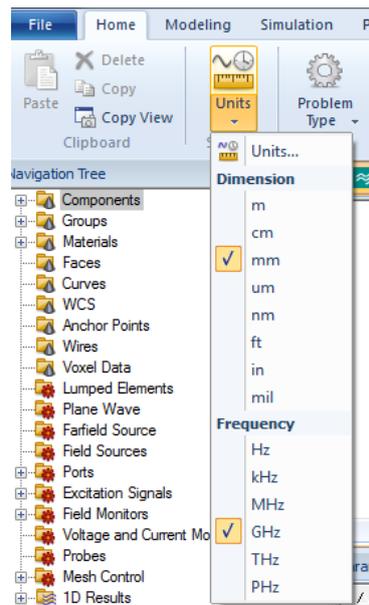
### 6/ Etapes à suivre pour réussir votre simulation

Voici les étapes nécessaires pour la réussite d'une simulation :

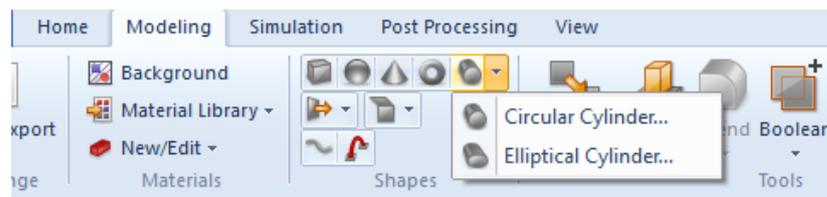
- 3 **Lancer le logiciel CST studio**, puis cliquer sur l'icône : « **create new project** », choisissez la zone « **MW and RF and optical** », puis choisissez ce qui convient votre TP, comme « **Antennas** » pour concevoir des antennes ;



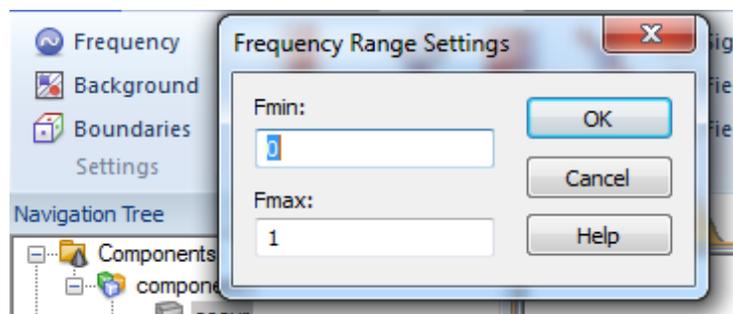
- Définition des unités comme le montre la fenêtre suivante :



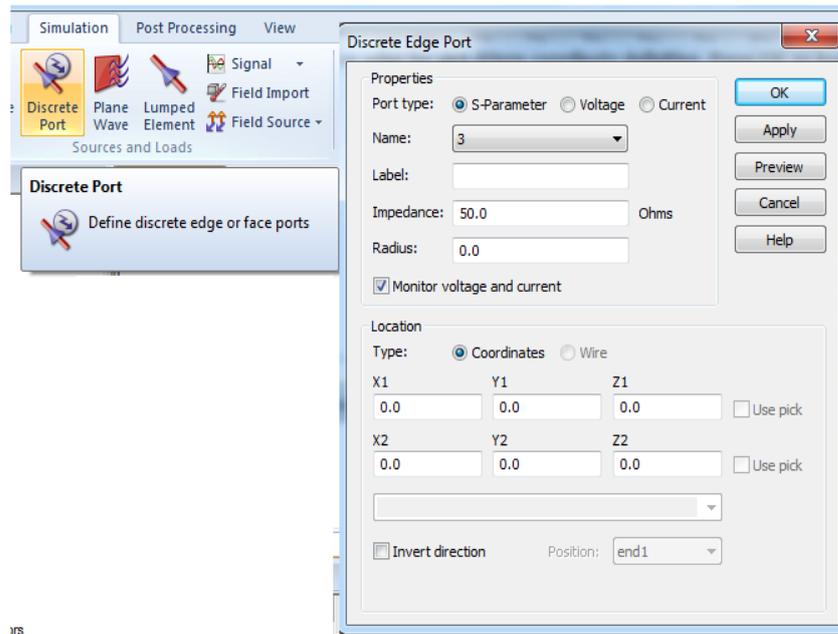
- Définition des matériaux de base.
- Modélisation de la structure comme suite :



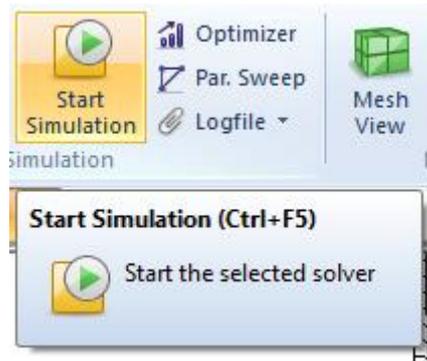
- Définition de la gamme de fréquence :



- Définition des ports et des conditions aux limites :



- Début de la simulation : Vous pouvez lancer votre simulation une fois que vous avez terminés ces étapes :



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] [https://perso.esiee.fr/~vasseurc/cables\\_coaxiaux.html](https://perso.esiee.fr/~vasseurc/cables_coaxiaux.html)
- [2] <http://sogetel-energy.fr/installation-cable-coaxial/infrastructure-reseau-coaxial/>
- [3] **T. Ditchi**, « Travaux Dirigés et Travaux Pratiques de Lignes de transmission », Université de Sorbone, 2013/2014.
- [4] « Calcul de la fonction de transfert d'une ligne coaxiale », TP calcul fonction de transfert d'une ligne coaxiale, université de technologie HOUARI Boumediene USTHB, 2015/2016.
- [5] **Sophie Carignan**, « généralité sur la ligne micro ruban », T.P. Télécommunications, ESINSA, 2016.
- [6] **Aline Saidane Latiri**, « Généralité sur les antennes », support de cours, Institut Supérieur d'Informatique et des Techniques de Communication Hammam Sousse, Décembre 2011.
- [7] **Ketavath Kumar Naik, and Pasumarthi Amala Vijaya Sri**, « Design of Hexadecagon Circular Patch Antenna with DGS at Ku Band for Satellite Communications », Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 63, 163–173, 2018
- [8] **Amine Habani**, « Étude, Conception Et Realisation Des Antennes À Polarisation Lineaire/Circulaire Pour Les Communications Corporelles Dans Les Mines Souterraines », Université Du Québec En Abitibi-Témiscamingue, juin 2018.
- [9] **Jean-philippe muller**, « ondes et antenne », physique appliquée, 2009.
- [10] <http://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM08/RM08y/RM08y00.html>
- [11] **Souheyla Ferouani, Zhor. Bendahmane, Abdelmalik. Taleb Ahmed** « Design and Analysis of Dual Band Star Shape Slotted Patch Antenna », Microwave Review, Vol 23, juin 2017.
- [12] **Devan Bhalla, Krishan Bansal**, « Design of a Rectangular Microstrip Patch Antenna Using Inset Feed Technique », IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE), Volume 7, Issue 4 (Sep. - Oct. 2013).
- [13] **Belgacem Nassima**, « conception des antennes pifa mono-bande et multi-bandes GSM, DCS, PCS, UMTS et wifi pour téléphones mobiles », mémoire de master, Université de Tlemcen, juin 2013.

[14] **Bendiabdallah Zakaria Amine, Boudjelal Yasmina Ikram**, «nouvelles topologies des filtres passe- bandes à Base de la technologie SIW opérant en bandes ku, C et S pour des applications satellitaires », mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2015.

*Livres sur les Antennes*

[1] **Martine VILLEGAS et coll**, « Radiocommunications numériques/1 : principes, modélisation et simulation » ; 2ème édition, DUNOD, Tome 1, 672 p,2007.

[2] **Martine VILLEGAS et coll**, « Radiocommunications numériques/2 : conceptions de circuits RF et microondes », 2ème édition, DUNOD, Tome 2, 368 p. 2007.

[3] **Dominique PARET**, « RFID en ultra et super hautes fréquences UHF-SHF », DUNOD, 496 p, Mars 2008.

[4] **Odile Picon et coll**, « Les antennes : théorie, conception et application », DUNOD,367p, 2009.