

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOULOU MAMMERI, TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

# Mémoire de fin d'études

Présenté en vue de l'obtention

Du Diplôme Master Académique en  
Télécommunication et Réseaux

Option : Electronique

*Thème :*

**Simulations des antennes sous HFSS  
(High Frequency Structure Simulator)**

Promoteur :

Mr. KANANE HOCINE

Présenté par :

Mlle .OUALLI Lamia

Année universitaire 2012/2013

# Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mon promoteur Mr KANANE qui a accepté de m'encadrer et qui ma soutenue tout le long de la préparation de mon mémoire de fin d'études .Ses conseils et son soutien m'ont été de grande aide pour avancer et arriver à réaliser mon travail.

A tous ceux qui m'ont aidés et encouragés de prêt ou de loin dans la concrétisation de ce projet, retrouvent mes meilleurs remerciements en particulier Melle LOUREK qui m'a été d'une grande aide.

Et aussi un grand merci à mes professeurs qui m'ont enseignés durant tout mon cursus universitaire, pour les fondements que j'ai acquis.Qui me permettrons à aller de l'avant pour un meilleur avenir professionnel qui soit.

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui ont toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'aider à faire des choix importants, et veillés à ce que je ne manque de rien depuis ma tendre enfance, ils ont tout mis à ma disposition pour pouvoir étudier dans les meilleures conditions possible, que Dieu les bénisse et que leur vie soit longue.

A mes chers frères : LYES, SARAH, mes grands parents que j'aime beaucoup.

Tous mes oncles & tantes et leurs enfants.

A mes amis:

FAYCAL ,DYHIA,IBTISSAM,LYDIA,THINHINANE ,  
LYDIA N ,SID ALI,SAMIRA ,  
YANES ,SOFIANE,SARAH ,NESSRINE,FADHILA.

A toutes mes copines d'appartement avec qui j'ai passé des moments inoubliables à la cité universitaire HASNAOUA 4.

# Sommaire

# SOMMAIRE

## INTRODUCTION GENERALE

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ANTENNES

### I-1. Introduction

### I-2. Définition d'une antenne

#### I-2-1. Rôle d'une antenne

#### I-2-2. Courant dans une antenne

### I-3. Notions sur l'électromagnétisme

#### I-3-1. Les charges électriques

#### I-3-2. Le Champ magnétique

#### I-3-3. Le Rayonnement électromagnétique

#### I-3-4. Bibliographie sur James Clerk Maxwell

#### I-3-5. Les Equations de Maxwell

##### I-3-5-1. Présentation des équations de Maxwell

##### I-3-5-2. L'équation de Maxwell-Gauss -électrique

##### I-3-5-3. L'équation de Maxwell-Gauss- magnétique

##### I-3-5-4. L'équation de Maxwell-Faraday

##### I-3-5-5. L'équation de Maxwell-Ampère

#### I-3-6. Interprétation du rayonnement EM d'après les équations de Maxwell

#### I-3-7. Rayonnement électromagnétique d'une source électrique

#### I-3-8. Les équations de propagations des champs $\vec{E}$ et $\vec{H}$

### I-4. Modèle électrique et comportement fréquentiel

### I-5. Longueur d'onde

### I-6. Les notions d'ondes

### I-7. Paramètres de base d'une antenne

#### I-7-1. Bande de fréquences d'utilisation

#### I-7-2. Bande passante et facteur de qualité

#### I-7-3. Diagramme du rayonnement

#### I-7-4. Impédance d'entrée d'une antenne

#### I-7-5. Adaptation et condition d'adaptation

#### I-7-6. Analyseur de réseau

#### I-7-7. Polarisation

#### I-7-8. Le vecteur longueur effective

#### I-7-9. Gain d'une antenne

#### I-7-10. Température d'une antenne

#### I-7-11. Régions du champ

#### I-7-12. Vecteur de Poynting

- I-8.Types d'antennes**
- I-8-1. Antennes filaires**
- I-8-2. Antennes fentes**
- I-8-3. Antennes micro rubans**
- I-8-4. Antennes réseaux**
- I-8-5. Antennes réflecteurs**
- I-9.Conclusion**

## **CHAPITRE II : ANTENNE PATCH**

- II-1.Introduction**
- II-2.Définition**
- II-3.Structure de l'antenne**
- II-4. Les différentes formes d'une antenne Patch**
- II-5.Principe de fonctionnement**
- II-5-1.Mécanisme du rayonnement de l'antenne**
- II-6.Diagramme de rayonnement et Polarisation**
- II-7.Impédance d'entrée et bande passante**
- II-8. Les techniques d'alimentations**
- II-8-1.Alimentation par sonde coaxial**
- II-8-2.Alimentation par une ligne microruban**
- II-8-3.Alimentation par couplage a proximité**
- II-9.Avantage et limitation**
- II-11.Conclusion**

## **CHAPITRE III : PRESENTATION DU LOGICIEL HFSS**

- III-1.Introduction**
- III-2.Définition du logiciel**
- III-3.Installation du logiciel**
- III-4.Description général des outils HFSS**
- III-4-1.Barre d'outils**
- III-4-2.Fenêtre des modèles 3D**
- III-4-3.Manager des projets**
- III-4-4.Fenêtre des propriétés**
- III-5.Barre des menus**
- III-6. Comment créer un projet**
- III-7.Conclusion**

## **CHAPITRE IV : SIMULATION DES ANTENNES SOUS HFSS**

**IV-1.Introduction**

**IV-2.Antenne Dipôle**

**IV-3.Antenne Patch alimentée par une ligne microruban**

**IV-4.Antenne Patch alimentée par un câble coaxial**

**IV-5.Antenne microruban Triangulaire**

**IV-6.Antenne RDA (RESONATOR DIELECTRIC ANTENNA)**

**IV-7.Antenne Cornet**

**IV-8.Conclusion**

**CONCLUSION GENERALE**



# **Introduction générale**

L'antenne joue un rôle primordial, elle est indispensable pour établir n'importe quelle liaison entre deux points éloignés, que ce soit dans la téléphonie mobile, la radioastronomie, dans les systèmes de positionnements par satellites (GPS), transmission des signaux TV et Radio, et dans les tours de contrôle des avions et les tours maritimes ...etc, l'antenne est toujours présente et elle est vitale pour le bon fonctionnement de n'importe quel système de télécommunication. Chaque antenne est conçue pour être utilisée dans une application bien précise en tenant compte de ses paramètres de base.

L'ensemble des chapitres s'organisent en partant des concepts fondamentaux de la théorie des antennes, caractéristiques des antennes: diagramme de rayonnement, directivité, gain, polarisation...etc, les notions fondamentales de l'électromagnétisme, et les différents types d'antennes. D'une extrémité à l'autre du spectre radioélectrique, les antennes ont des structures très différentes :

Pylône verticaux en ondes kilométriques et hectométriques.

Longs fils obliques ou horizontaux en ondes décamétriques.

Réflecteurs et ouvertures rayonnante au delà de 1 GHZ et en ondes centimétriques et millimétriques.

Cependant, le rayonnement de ces antennes est étudié et caractérisé au moyen de définitions et propriétés communes qu'il est indispensable de connaître, et ceci fait l'objet du premier chapitre.

Et le second est consacré pour l'étude de l'antenne patch qui est utilisée lorsqu'on veut réduire l'encombrement d'une antenne, par exemple sur les émetteurs-récepteurs portables de radiocommunication, sur les récepteurs GPS. Vu que les générations des téléphones portables de cette décennie devient de plus en plus fin, autrement dit une technologie de pointe, ce qui lance une robuste course vers la miniaturisation des antennes (PIFA).

De nos jours les études et les recherches sur le domaine des antennes sont très évoluées, que ce soit sur le plan théorique ou pratique, ce qui veut dire l'établissement de nouvelles conceptions ; le but principal des chercheurs est de les miniaturiser tout en gardant leurs propriétés voir même les optimiser. Pour économiser les ressources destinées à la conception, on fait appel à la simulation électromagnétique (EM) qui est un outil essentiel dans la conception moderne des filtres et des antennes. Les techniques de simulation EM ont évolués rapidement pour atteindre un niveau de précision très important. Ces outils de simulation ont permis d'accélérer le processus de conception, permettant de concevoir des prototypes virtuels. On prend comme exemple le logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulation) qui est l'un des plus performants sur le marché, ses fonctionnalités sont présentées dans notre troisième chapitre.

Le quatrième chapitre est destiné à la partie applications où on simulera divers types d'antennes telles que le dipôle, antenne cornet, antenne résonateur, deux exemples du patch rectangulaire alimentés par deux méthodes : ligne microruban, et par un câble coaxial, antenne patch avec un élément rayonnant triangulaire à fente.

Enfin nous terminerons par une conclusion générale récapitulative.



# Chapitre I

## I-1.Introduction

Le but de ce chapitre est de comprendre le principe de fonctionnement des antennes. Le chapitre est orienté de la manière suivante: la première partie revient sur la définition et les notions de base d'électromagnétisme afin de mieux comprendre le principe de fonctionnement, la seconde partie sur les caractéristiques principales d'une antenne (impédance d'entrée, diagramme de rayonnement, gain.. puis nous terminerons avec les principaux types d'antennes (dipôles, cornet, antenne patch, ouverture rayonnante ...).

## I-2Définition d'une antenne

Une antenne en réalité est un bout de métal, ou un diélectrique ; avec un langage plus approprié à l'électronique nous dirons que c'est un dispositif métallique qui sert à rayonner ou recevoir des ondes électromagnétiques. En d'autres termes, c'est une structure transitoire entre l'espace libre et un dispositif guidant. Le dispositif guidant peut être une ligne de transmission ou un guide d'onde. Il sert à transmettre l'énergie d'une source vers l'antenne ou de l'antenne vers un récepteur.

En simplifiant on dit qu'un conducteur électrique parcouru par un courant, fournit de l'énergie sous forme de chaleur, de lumière (lampe).De même il fournit un champ magnétique (principe du transformateur) et électrique (principe du condensateur). Le principe de l'antenne d'émission est de faire en sorte que lorsqu'elle est parcourue par un courant variable, sans chauffer ni s'illuminer, va créer un champ magnétique variable autour et ce dernier crée à son tour un champ électrique et ainsi de suite (c'est la description des équations de Maxwell).

Ce champ se propage, c'est alors une onde électromagnétique.

Une onde électromagnétique se transforme en énergie électrique guidée grâce à un conducteur électrique, c'est le principe de l'antenne de réception qui est de faire en sorte que le champ électromagnétique de l'air soit transformé en énergie utilisable (signal électrique).

### I-2-1.Rôle de l'antenne

Voici un système de communication radio qui transmet des informations par l'intermédiaire d'une onde électromagnétique (OEM).

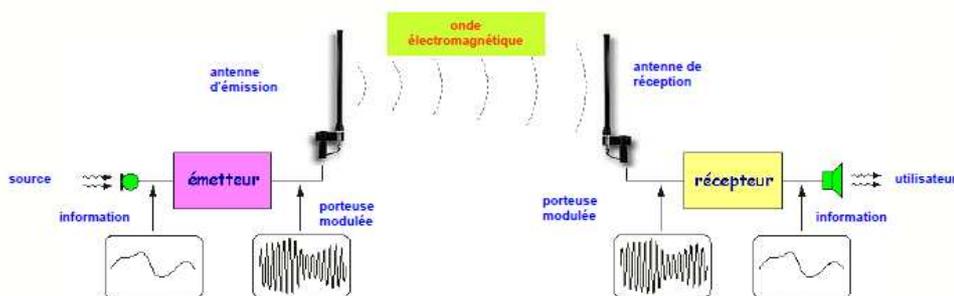


Figure I-1 : Un système de communication radio par (OEM).

L'antenne d'émission reçoit le signal électrique de l'émetteur et produit l'onde électromagnétique.

Cette OEM se propage dans l'espace autour de l'antenne d'émission en fonction du type et de la forme d'antenne utilisée, certaines directions de propagation peuvent être privilégiées.

La puissance produite par l'émetteur ou appliquée à l'antenne se disperse dans l'espace.

L'antenne de réception capte une faible partie de cette puissance et la transforme en signal électrique.

## I-2-2. Courant dans une antenne

Pour le courant dans le brin (antenne) :

L'émetteur produit une porteuse sinusoïdale modulée à la fréquence  $f$  qui est conduite à l'antenne par un câble coaxial.

L'antenne est alors parcourue par un courant  $i(t)$  ayant les caractéristiques suivantes :

Le courant  $i(t)$  est sinusoïdal à la fréquence de la porteuse.

Le courant n'a pas la même intensité en tout point.

Ce courant peut occasionner des pertes Joule si les matériaux utilisés sont de mauvaise qualité. Alimentée par la tension  $v(t)$  et absorbant un courant  $i(t)$ , l'antenne présente donc une impédance équivalente  $Z_a$ .

Cette impédance dépend toujours de la fréquence, elle est résistive pour certaines longueurs uniquement.

Pour que toute la puissance fournie par l'émetteur soit rayonnée, il faut adapter le câble en sortie, ce qui supprime l'onde réfléchie.

Souvent le câble a une impédance  $Z_c = 50$  ohms, on s'efforce donc de fabriquer des antennes d'impédance d'entrée de 50 ohms.



Figure I- 2 : Illustration de l'intensité du courant dans un brin.

Le courant qui circule dans le brin rayonnant produit à son voisinage une onde électromagnétique :

L'OEM est constituée d'un champ électrique E et d'un champ magnétique B

Les vecteurs E et B existent en tout point M autour de l'antenne et oscillent au rythme du courant et donc de la porteuse.

Leur module n'est pas le même partout et dépend du type d'antenne utilisée et de la position du point de mesure.

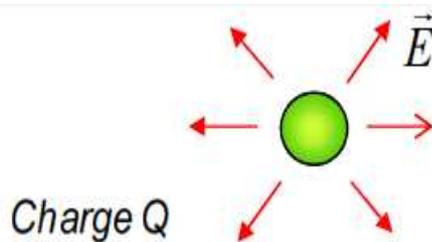
### I-3. Notions sur l'électromagnétisme

Le but est de revenir sur certaines notions fondamentales d'électromagnétisme avant de se concentrer sur les antennes. Il s'agit de répondre aux questions suivantes : pourquoi une antenne rayonne ? Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ?

#### I-3-1. Les charges électriques

Les charges électriques au repos peuvent exercer des forces électriques entre elles, cette action à distance se fait par l'intermédiaire d'un champ électrique. Toute charge électrique Q immobile crée un champ électrique E dans l'espace environnant, qui décroît inversement avec le carré de la distance.

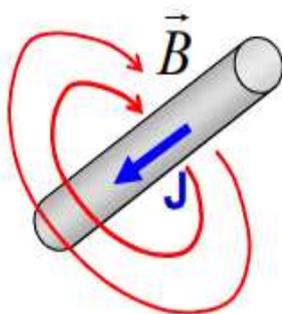
On peut assimiler ça à la force de gravitation qui exerce une force sur les objets pour les déplacer dans une direction bien précise.



$$\vec{E}(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} \vec{u}_r$$

#### I-3-2. Le Champ magnétique

Toute circulation de courant (c'est-à-dire des charges en mouvement) est à l'origine d'un champ magnétique tournant autour de la ligne. Cette ligne exercera une force à distance sur toute autre interconnexion parcourue par un courant.



$$\vec{B}(M) = \iiint_{(\tau)} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{J}(P) \wedge \vec{u}_R(P)}{r^2} d\tau$$

Pour bien comprendre ce phénomène on fait appel à l'expérience d'Ørsted qui le vérifie.

Tout déplacement de charges, que ce soit un faisceau d'électrons dans le vide ou un courant électrique dans un fil crée un champ magnétique.

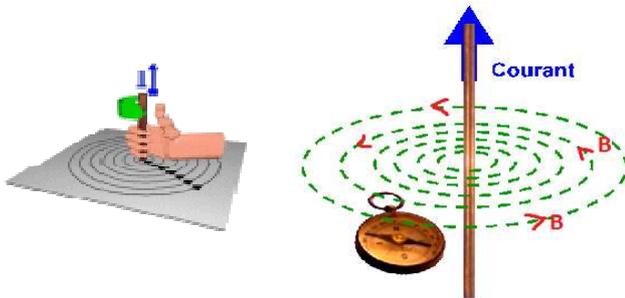
L'expérience d'Ørsted démontre que la circulation d'un courant dans un fil fait dévier l'aiguille d'une boussole placée à proximité.

La direction du champ magnétique (**B**) est celle d'une aiguille au point considéré et son sens est du pôle Sud vers le pôle Nord de l'aiguille aimantée.

Son intensité dépend du courant qui crée le champ, mesurable avec un Teslamètre à sonde de Hall, et s'exprime en Teslas (**T**).

Un fil rectiligne, dans le vide (ou dans l'air) crée un champ **B** en Teslas égal à :  $B_r = \mu_0 \frac{I}{2\pi.r}$

Où  $\mu_0$  est la perméabilité du vide, **I** l'intensité du courant en Ampères et **r** le rayon en mètres de la ligne de champ.



### La règle de la main droite

Pour un conducteur, le pouce dans le sens du courant, les doigts s'enroulent dans le sens du champ. Pour une bobine, les doigts s'enroulent dans le sens du courant et le pouce pointe vers le Nord.

### I-3-3. Le rayonnement électromagnétique

Les charges électriques et les courants constituent donc les sources élémentaires des champs électromagnétiques. Les deux cas précédents correspondent au cas où les charges sont immobiles (électrostatique) et les courants continus (magnétostatique), qui conduisent à des champs constants dans le temps. Cependant, l'action d'une charge ou d'un courant n'est pas instantanée mais retardée par un temps  $t = r/c$ , où  $c$  est la vitesse de la lumière.

Ainsi, tout mouvement de charges ou toute variation de courant induira une variation de champ électrique ou magnétique en un point donné de l'espace après un temps de retard donné. Bien qu'en électrostatique et en magnétostatique les champs électriques et magnétiques soient indépendants, cela n'est plus le cas dès que la quantité de charge ou le courant varient. Les champs électriques et magnétiques sont alors liés. On parle alors de champ électromagnétique.

**Comprendre l'origine du rayonnement électromagnétique**

Toute charge et tout mouvement de charge sont capables de créer des champs électriques et magnétiques autour d'eux et devraient être capables de produire un rayonnement électromagnétique. Cependant, dans la nature, quasiment tous les objets ne rayonnent pas. En effet, la plupart des objets contiennent des charges positives et négatives en équilibre, si bien que les champs électriques que chacune de ces charges génèrent s'annulent. Lorsqu'un courant circule le long d'une interconnexion, les charges véhiculées ne s'accumulent pas au bout de l'interconnexion, mais reviennent par un autre chemin, formant ainsi une boucle.

Ainsi, le champ magnétique créé par chaque élément de cette boucle s'additionne avec la contribution des autres et annulent quasiment le champ magnétique total à grande distance.

Alors comment une antenne fait-elle pour rayonner ?

Intuitivement, on sent qu'il faut qu'il y ait un déséquilibre dans la distribution de charges et les courants parcourant l'antenne, par exemple produit par toute variation temporelle du courant ou toute discontinuité dans l'antenne conduisant à une accumulation de charges. Ceci pour empêcher l'annulation de la contribution de chaque charge et de chaque élément de courant de l'antenne. Dans l'exemple suivant, un courant continu se met à parcourir une petite boucle carrée à  $t = 0$ .

Bien que les contributions des deux côtés de la boucle (notés éléments 1 et 2) soient identiques en amplitude et de signe inverse, la contribution de l'élément 1 de l'antenne arrive un peu avant celle de l'élément 2 (ou les contributions des deux éléments sont déphasées), permettant la création d'un rayonnement électromagnétique pendant un temps très bref. Si maintenant un courant variable se met à parcourir la boucle, un rayonnement électromagnétique sera produit continuellement.

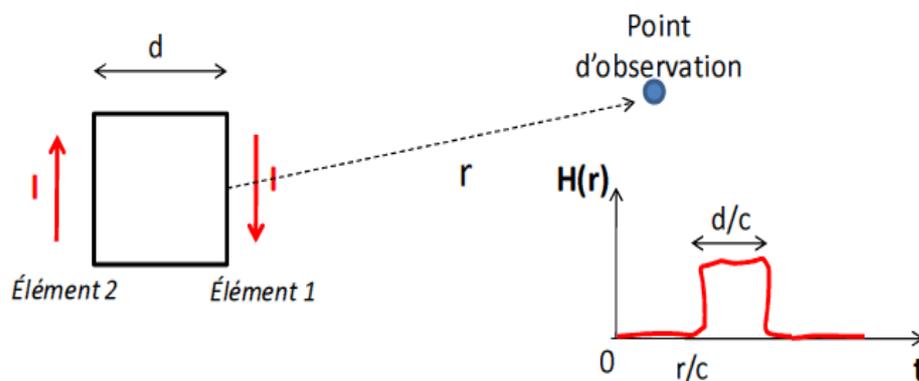


Figure I-3 : Rayonnement EM créé par la variation d'un courant dans un circuit de petite taille.

On peut donc voir le rayonnement électromagnétique comme la résultante des différences de phase des contributions de chaque élément de l'antenne.

On ne peut pas parler d'électromagnétisme sans parler des équations de Maxwell.

### **I-3-4. Bibliographie sur James Clerk Maxwell**

James Clerk Maxwell (13 juin 1831 à Édimbourg, en Écosse - 5 novembre 1879) est un physicien et mathématicien écossais. Il est principalement connu pour avoir unifié en un seul ensemble d'équations, les équations de Maxwell, l'électricité, le magnétisme et l'induction, en incluant une importante modification du théorème d'Ampère. Ce fut à l'époque le modèle le plus unifié de l'électromagnétisme. Il est également célèbre pour avoir interprété, la lumière comme étant un phénomène électromagnétique en s'appuyant sur les travaux de Michael Faraday. Il a notamment démontré que les champs électriques et magnétiques se propagent dans l'espace sous la forme d'une onde et à la vitesse de la lumière.

Ces deux découvertes permirent d'importants travaux ultérieurs notamment en relativité restreinte et en mécanique quantique.

Il a également développé la distribution de Maxwell, une méthode statistique de description de la théorie cinétique des gaz.

Maxwell est considéré par de nombreux physiciens comme le scientifique du XIX<sup>e</sup> siècle ayant eu le plus d'influence au XX<sup>e</sup> siècle. Ses contributions à la science sont considérées par certains comme aussi importantes que celles d'Isaac Newton ou d'Albert Einstein.

En 1931, pour le centenaire de la naissance de Maxwell, Einstein lui-même décrivait les travaux de Maxwell comme les « plus profonds et fructueux que la physique ait connu depuis le temps de Newton ».

Il est également connu pour avoir réalisé la première photographie en vraie couleur en 1861.

### **I-3-5. Equations de Maxwell**

Toute l'électromagnétisme est contenue dans les équations de Maxwell. La présentation des équations de Maxwell permet de donner un cadre un peu plus mathématique à la discussion précédente. En réalité ces équations sont des postulats qui veut dire qu'elles ne se démontrent pas.

#### **I-3-5-1. Présentation des équations de Maxwell**

La répartition des champs électriques et magnétiques dans l'espace produite par une Distribution donnée de charges et de courants peut être déterminée en résolvant les équations de Maxwell. En outre, celles-ci permettent de déterminer comment l'onde électromagnétique se propage dans l'espace. Pour un milieu homogène et isotrope (cas général de la propagation en espace libre ou guidée), celles-ci sont données par les équations ci-dessous :

**L'équation de Maxwell-Gauss-électrique :**  $div\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$  (eq1)

**L'équation de Maxwell-Gauss-magnétique :**  $div\vec{B} = 0$  (eq2)

**L'équation de Maxwell-Faraday :**  $rot\vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$  (eq3)

**L'équation de Maxwell-Ampère :**  $rot\vec{H} = \sigma\vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$  (eq4)

Avec :

$\rho$  : densité volumique de charge (C/m).

$\varepsilon$  : Permittivité électrique (F/m). A noter  $\varepsilon_0$  permittivité diélectrique dans le vide ( $8.85 \cdot 10^{-12}$ )

$\varepsilon_r$  : Permittivité électrique relative telle que  $\varepsilon = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r$ .

$\mu$  : perméabilité magnétique (H/m). A noter  $\mu_0$  : permittivité diélectrique dans le vide ( $4\pi \cdot 10^{-7}$ )

$\mu_r$  : permittivité magnétique relative telle que  $\mu = \mu_0 \times \mu_r$ .

### I-3-5-2. L'équation de Maxwell-Gauss-électrique

Issue du théorème de Gauss, elle indique que toute distribution de charges dans l'espace conduit à l'apparition d'un champ électrique, de telle sorte que pour tout volume contenant ces charges, le flux du champ électrique sortant de cette surface est proportionnel à somme algébrique de toutes les charges intérieures.

### I-3-5-3. L'équation de Maxwell-Gauss-magnétique

Indique qu'un courant induit un champ magnétique qui forme une boucle autour de ce courant. Contrairement au champ électrique créé par une charge, le flux de champ magnétique sortant de toute surface fermée est nul.

Comparant cette équation avec celle de Maxwell-Gauss, on peut en conclure qu'il n'y a pas de charges magnétiques analogues aux charges électriques.

### I-3-5-4. L'équation de Maxwell-Faraday

Elle est issue de la loi de Faraday et décrit le phénomène d'induction d'une force électromotrice par un champ magnétique variable. Le flux d'un champ magnétique variable à travers toute surface incluse à l'intérieur d'un contour fermé donne naissance à une force électromotrice.

### I-3-5-5. L'équation de Maxwell-Ampère

Elle permet de relier le champ magnétique au courant circulant dans un circuit. Elle est issue de la loi d'Ampère  $rot\vec{E} = \vec{J}_c$  qui relie le champ magnétique et le courant de conduction  $\vec{J}_c = \sigma\vec{E}$ . Il s'agit du flux d'électrons apparaissant dans un conducteur électrique entre chaque molécule lorsqu'on le soumet à une force électromotrice.

Cependant, cette équation n'est pas suffisante pour expliquer l'existence d'un courant alternatif dans un circuit comprenant un condensateur. L'isolant présent entre chaque armature d'un condensateur ne permet pas la présence d'un courant de conduction à travers celui-ci. Cependant, sous l'influence du champ électrique variable apparaissant entre les deux armatures chargées du condensateur, la variation de charge est identique sur les deux armatures. Ce flux de charge en mouvement est appelé densité de courant de déplacement

$$\vec{J}_D = \epsilon \frac{\delta \vec{E}}{\delta t}.$$

**I-3-6. Interprétation du rayonnement EM d'après les équations de Maxwell**

Que se passe-t-il lorsqu'un courant de conduction variable du temps traverse un fil (antenne) ; D'après l'équation Maxwell-Ampère, un champ magnétique variable est produit au voisinage de ce fil. Localement autour de ce point, il y a une variation du flux du champ magnétique qui, d'après l'équation de Maxwell-Faraday, va donner naissance à un champ électrique variable. Localement, cette variation de champ électrique donne naissance à un champ magnétique et ce processus continu de proche en proche. Les champs électriques et magnétiques se propagent conjointement à l'image d'une vague. La résolution des équations de Maxwell montre que la vitesse de déplacement des champs est une constante  $c$  égale à la vitesse de la lumière la célérité.

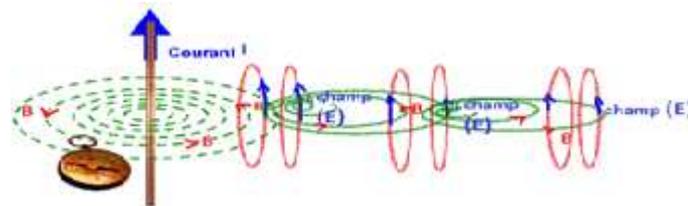
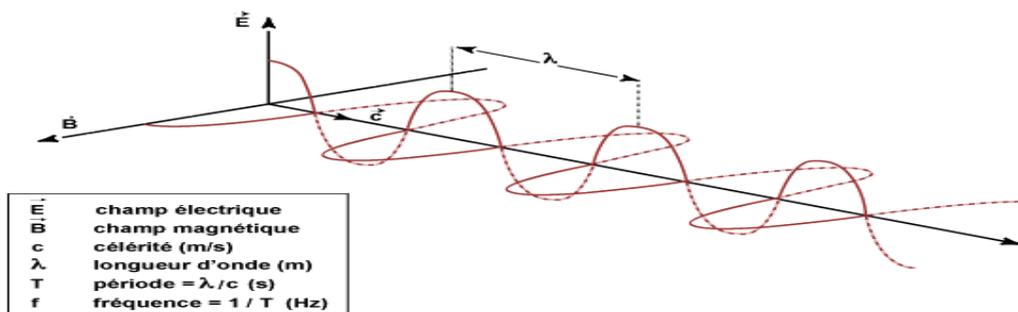


Figure I-4 : Propagation des ondes électromagnétiques.

Voilà un schéma plus familier :



**I-3-7. Rayonnement électromagnétique d’une source électrique**

Les courants et les charges sont les sources primaires du champ électromagnétique. Selon le principe de Huygens, elles rayonnent dans l’espace, des ondes sphériques dont la propagation est en fonction de  $\frac{\exp(-jkr)}{r}$ . Ainsi, tout courant  $I_0$  créé un rayonnement proportionnel à  $I_0 \frac{\exp(-jkr)}{r}$  et chaque charge  $Q_0$  un rayonnement proportionnel à  $Q_0 \frac{\exp(-jkr)}{r}$ .

Il est possible d’exprimer la contribution de toute source primaire caractérisée par une distribution volumique de courant  $I(p)$  et de charge  $Q(P)$  en un point M par les potentiels scalaires V et vecteur A.

$$\vec{A}(M) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_{(\tau)} \vec{J}(P) \frac{\exp(-jkr)}{r} d\tau \text{ (eq5)}$$

$$\vec{V}(M) = \frac{\mu}{4\pi\epsilon} \iiint_{(\tau)} \vec{\rho}(P) \frac{\exp(-jkr)}{r} d\tau \text{ (eq6)}$$

A partir de ces potentiels, il est possible de calculer les champs électriques et magnétiques en Tout point de l’espace :

$$\vec{E} = -\frac{\delta \vec{A}}{\delta t} - \text{grad}V \text{ (eq7)}$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \text{ (eq8)}$$

**I-3-8. Les Equations de propagation du champ E et H**

La résolution des équations de Maxwell va nous permettre de déterminer l’équation de Propagation des champs. Nous ne considérerons ici que le cas d’un milieu de propagation sans pertes caractérisé par une constante diélectrique et magnétique réelle, où il n’y a donc aucune charge et courant. En combinant alors les équations de Maxwell-Ampère et de Maxwell-Faraday, il est possible d’écrire les deux équations différentielles dites de propagation :

$$\Delta \vec{E} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0} \text{ (eq9)}$$

$$\Delta \vec{H} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = \vec{0} \text{ (eq10)}$$

Les solutions à ces deux équations se comportent comme des ondes qui se propagent à la vitesse  $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \times \mu}}$ . Dans le vide ou dans l'air, cette vitesse est notée  $c$  et est égale à

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \times \mu_0}} = 3.10^8 \text{ m / s .}$$

De manière générale, la vitesse peut s'écrire  $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \times \mu_r}}$  en fonction de la permittivité électrique relative  $\epsilon_r$  et la perméabilité magnétique relative du milieu  $\mu_r$ . Une onde qui se propage est appelée onde progressive.

#### I-4. Modèle électrique et comportement fréquentiel

Une antenne rayonne efficacement sur une bande de fréquence étroite qui correspond à sa fréquence de résonance. Lorsqu'un signal variable excite une antenne, des charges sont mis en mouvement le long de l'antenne donnant naissance à un rayonnement.

La résonance correspond à une situation où ces charges sont en oscillation permanente. Pour représenter ce comportement résonant qui varie avec la fréquence, il est possible de modéliser l'antenne par un circuit passif RLC équivalent.

#### Modèle électrique d'une antenne

On peut résumer le comportement de l'antenne passive (qui représente un comportement linéaire), comme une antenne qui stocke des charges (comportement capacitif = stockage d'énergie sous forme d'énergie électrique), s'oppose aux variations des courants qui y circulent (comportement inductif = stockage sous forme d'énergie magnétique) et dissipe une partie de l'énergie (pertes ohmiques et par rayonnement). D'un point de vue électrique, une antenne passive peut donc être modélisée par un circuit équivalent RLC comme illustré dans la figure I-5; et l'impédance  $Z_{in}$  vue à l'entrée de l'antenne est donnée par l'équation ci dessous. A noter que les valeurs du modèle ne sont valides que sur des bandes étroites.

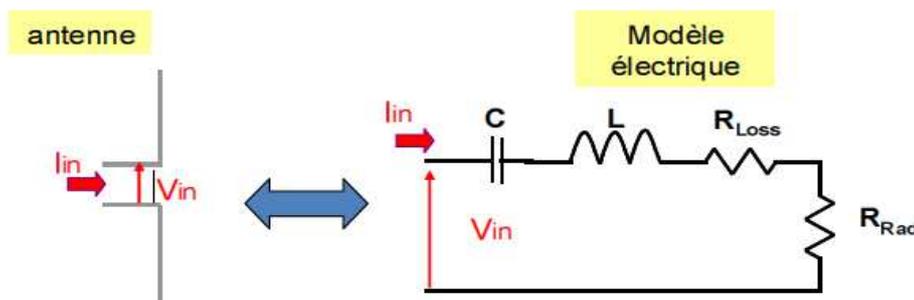


Figure I-5 modélisation d'une antenne par circuit RLC



$$u(\vec{r}, t) = a \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$

Où  $\vec{k}$  est le vecteur d'onde

$\omega$  est la pulsation

$\vec{r} = (x, y, z)$  est le vecteur position

$a$  est l'amplitude complexe de l'onde.

Ce type d'onde est particulièrement utile en physique car il est simple à utiliser, cette dernière est une bonne approximation de nombreuses ondes. En particulier, lorsque l'on est assez loin d'une source d'onde ponctuelle (un laser, une antenne de radio de petite taille) les ondes sphériques concentriques émises par un tel dispositif sont bien approchées localement par une onde monochromatique plane. Cependant il n'existe pas rigoureusement d'ondes planes purement monochromatiques dans la nature car celles-ci devraient transporter une énergie infinie, ce qui est impossible.

### En pratique

Même si une onde plane pure n'existe pas dans la nature, il est possible de s'en approcher dans un domaine limité de l'espace. Il suffit que les fronts d'onde soient suffisamment plans et parallèles dans le volume considéré. De plus, une onde plane est rarement monochromatique, car elle aurait une extension temporelle infinie.

Une onde réelle peut cependant être décomposée en ondes planes monochromatiques, dont les vecteurs d'onde sont parallèles à une seule et même direction :

$$u(\vec{r}, t) = \int a(\vec{k}, \omega) e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} dk d\omega$$

où  $a(\vec{k}, \omega)$  est une fonction à valeurs complexes appelée spectre d'ondes planes.

Cette superposition d'ondes planes monochromatiques permet de décrire toute onde réelle.

Pour obtenir une onde plane, on peut par exemple faire passer de la lumière par un diaphragme puis la collimater avec une lentille convergente.

### L'onde plane

Si on se trouve dans une zone située assez loin de l'antenne, les champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  ont des propriétés simples :

Le vecteur  $\vec{E}$  a le même module en tout point d'un plan perpendiculaire à la propagation,

$\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont liés par :

Le vecteur  $\vec{E}$  est perpendiculaire à  $\vec{B}$ , l'onde est dite plane.

Les deux vecteurs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont perpendiculaires à la direction de propagation.

$\vec{E}$  et  $\vec{B}$  varient en phase, les plans où  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont maximum avancent à la vitesse  $c$  de la lumière.

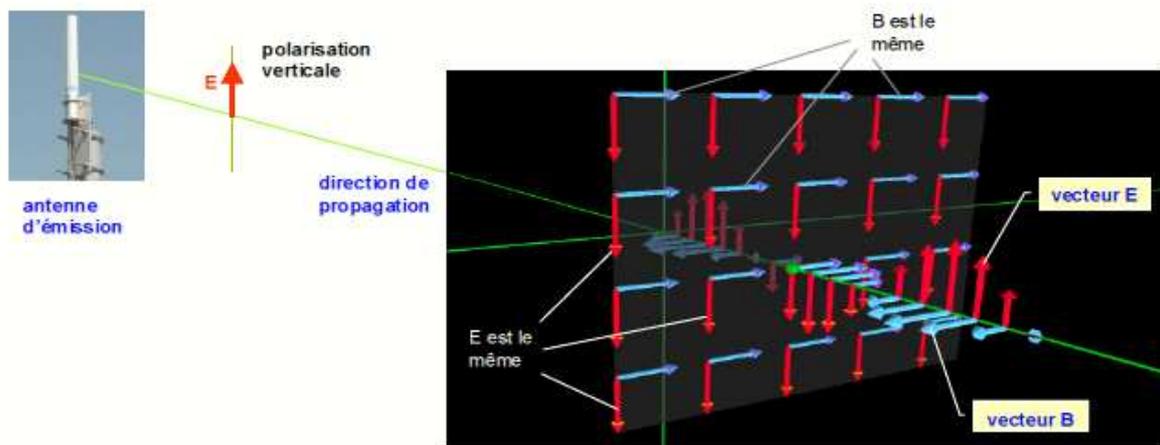


Figure I-7 : Représentation de la propagation de l'onde plane.

## I-7. Paramètres de base d'une antenne

### I-7-1. Bande de fréquences d'utilisation

L'antenne est un dipôle électrique qui se comporte comme un circuit résonant. La fréquence de résonance de l'antenne dépend d'abord de ses dimensions mais aussi des éléments qui lui sont ajoutés. Par rapport à la fréquence de résonance centrale de l'antenne on peut tolérer un certain affaiblissement (généralement 3 décibels) qui détermine la fréquence minimum et la fréquence maximum d'utilisation ; la différence entre ces deux fréquences est la bande passante. Il est fréquent qu'une antenne soit utilisée en réception largement en dehors de sa bande passante, c'est le cas des antennes d'auto-radio dont la fréquence de résonance se situe souvent à plus de 200 MHz et que l'on utilise pourtant pour l'écoute de la bande de radiodiffusion "FM" vers 100 MHz.

### I-7-2. Bande passante et facteur de qualité

La bande passante d'une antenne correspond à la bande de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximale. La bande passante peut être définie en fonction du coefficient de réflexion, à condition que le diagramme de rayonnement ne change pas sur cette bande. Il n'y a pas de critères précis pour la limite du coefficient de réflexion. Un critère typique d'avoir un coefficient de réflexion inférieure à -10 dB ou -15 dB sur la bande passante.

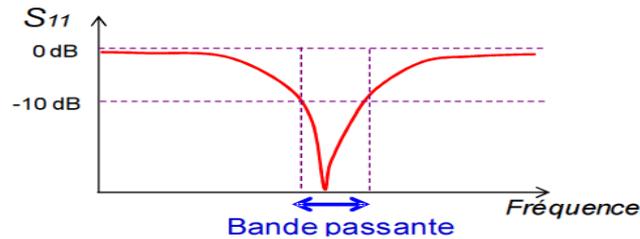


Figure I-8: Bande passante et coefficient de réflexion

Nous avons vu que l'antenne pouvait être vue comme un circuit résonant RLC. La bande passante  $B$  est liée au facteur de qualité  $Q$  du circuit RLC à la fréquence de résonance  $f_{Res}$ . Le facteur de qualité représente la quantité de résistance présente lors de la résonance.

$$Q = \frac{BW}{f_{res}} ; \quad \frac{1}{Q} = \frac{R_{ant}}{2\pi f_{res} \cdot L_{ant}}$$

Une antenne avec un fort facteur de qualité rayonne très efficacement à la fréquence de rayonnement sur une bande de fréquence très étroite, ce qui peut limiter les interférences hors bande. Cependant, si la bande passante est trop étroite, tout signal émis ou reçu près des bornes de la bande de fréquence de fonctionnement sera atténué. Une antenne avec un faible facteur de qualité est large bande mais collecte le bruit présent sur la bande de fonctionnement, dégradant ainsi la qualité du signal reçu.

### I-7-3. diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est défini comme "une fonction mathématique ou une représentation graphique" des propriétés de rayonnement de l'antenne en fonction des coordonnées spatiales, caractérisant la distribution de puissance radiée par une antenne suivant une direction. En effet, une antenne réelle ne rayonne pas de façon omnidirectionnelle (isotrope). Son diagramme de rayonnement présente des directions privilégiées (maximum de rayonnement) et des directions où le champ rayonné est nul. Le tracé de ce diagramme s'effectue dans un système de coordonnées cartésiennes de référence  $(x, y, z)$  et les composantes du champ rayonné sont généralement exprimées en coordonnées sphériques  $(r, \theta, \phi)$ .

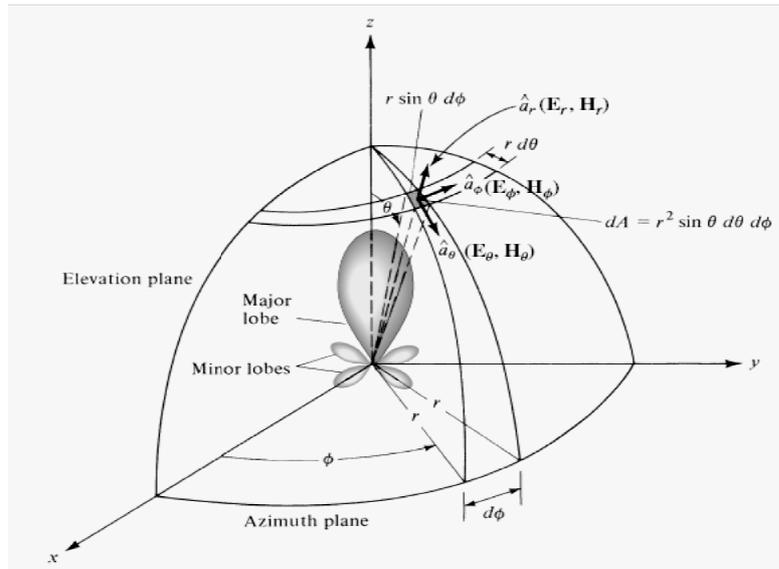


Figure I-8 : diagramme de rayonnement en coordonnées sphériques.

En général, le diagramme de rayonnement est déterminé dans la région du champ lointain et, représenté comme une fonction des coordonnées directionnelles. Les propriétés de rayonnement incluent: la densité du flux de puissance, l'intensité de rayonnement, intensité du champ, la phase, la directivité et la polarisation. Ces grandeurs sont généralement normalisées (par rapport à une valeur maximale).

Les propriétés de rayonnement concernent généralement la distribution spatiale en deux ou trois dimensions, de l'énergie rayonnée comme fonction de la position d'un observateur le long d'un chemin ou une surface de rayon constant.

Dans la pratique, ce diagramme peut être un diagramme de puissance ou un diagramme de champ (électrique ou magnétique). Il consiste à un tracé en fonction de  $\theta$  (à  $\phi$  constante) ou de  $\phi$  (à  $\theta$  constante). Il existe deux représentations:

- En système coordonnées polaires.
- En système de coordonnées cartésiennes.

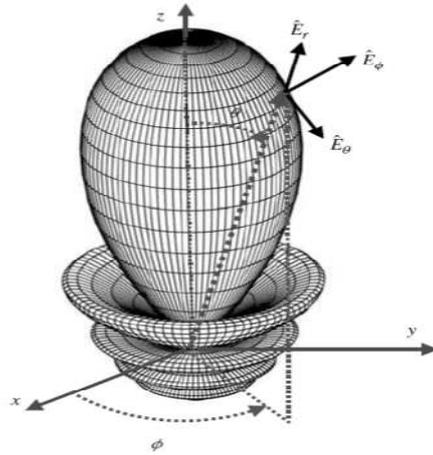


Figure I-9: Diagramme de rayonnement en coordonnées polaires.

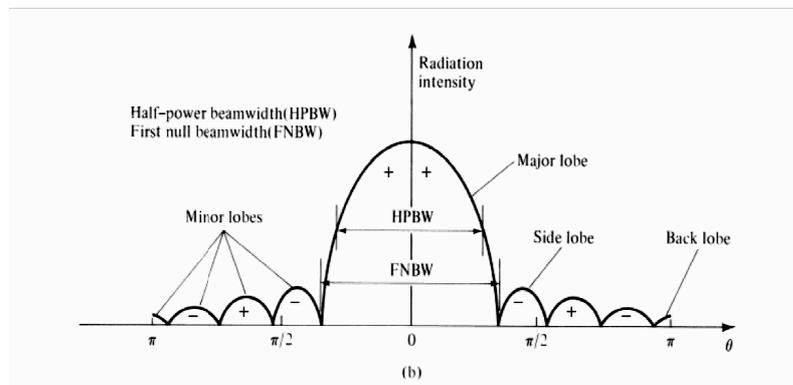


Figure I-10: Diagramme de rayonnement en coordonnées cartésiennes.

On prend l'exemple de l'antenne YAGI-UDA qui est une antenne directionnelle :

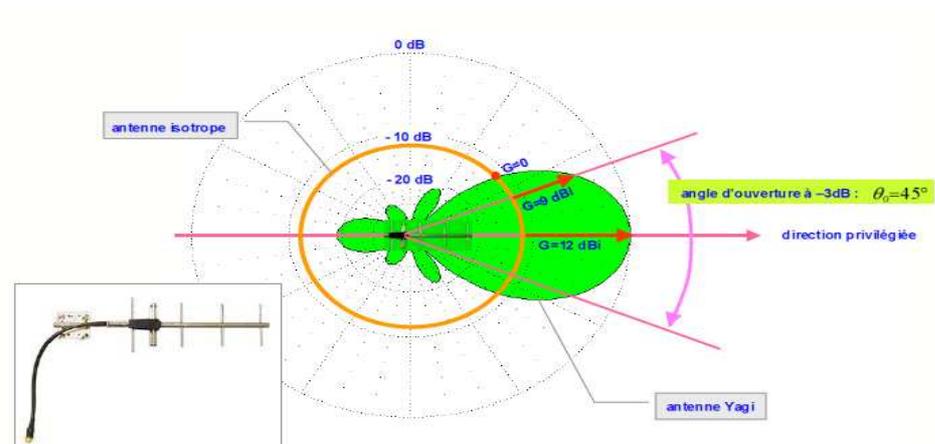


Figure I-11 : Diagramme de rayonnement de l'antenne YAGI-UDA.

**Lobes de rayonnement :**

C'est une portion du diagramme de rayonnement entourée par des régions de rayonnement faibles. Plusieurs parties du diagramme de rayonnement sont référées comme étant des lobes et qui peuvent être classés en lobes secondaires, se trouvant soit de côté ou soit en arrière.

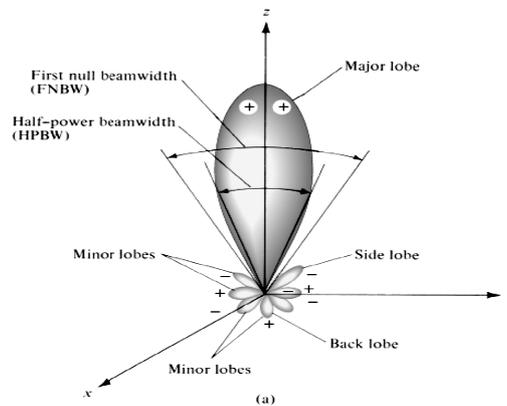


Figure I-12: Lobes de rayonnement et largeur de faisceau du diagramme d'antenne, en coordonnées polaires.

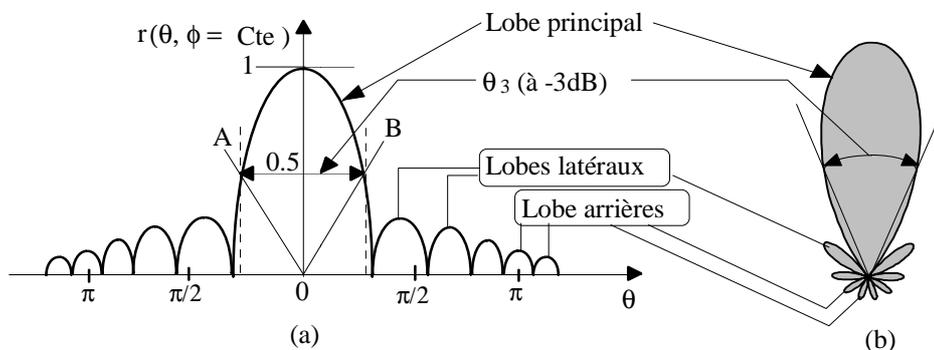


Figure I-13: différents paramètres d'un diagramme de rayonnement bidimensionnel (dans un plan vertical). (a) en coordonnées cartésiennes; (b) en coordonnées polaires.

**a) Lobe principal :**

Un lobe principal est défini comme étant un lobe contenant la direction du rayonnement maximum. Le diagramme de la figure 11 présente un seul lobe principal dont le maximum est situé dans la direction  $\theta = 0$  (axe Oz). Le diagramme de rayonnement de certaines antennes peut présenter plus d'un lobe principal.

## **b) Lobes secondaires**

Les autres lobes, autres que les lobes principaux, sont appelés lobes secondaires et se subdivisent en lobes latéraux et lobes arrières. Les lobes latéraux, imposés par la distribution des amplitudes et des phases sur les sources rayonnantes constituant l'antenne, sont adjacents aux lobes principaux et occupent le même hémisphère. L'amplitude de ces lobes décroît régulièrement à mesure que l'on s'éloigne de la direction du rayonnement maximal.

Les lobes arrières, liés aux imperfections de réalisations, sont situés dans l'hémisphère opposé. Les lobes secondaires représentent généralement le rayonnement dans les directions indésirables et par conséquent leur niveau doit être minimisé. Une antenne ayant un niveau des lobes secondaires de - 20 dB par rapport au niveau du lobe principal peut être satisfaisante dans beaucoup d'applications.

## **I-7-4.l'impédance d'entrée d'une antenne**

### **Notions d'impédance**

**Induction :** L'électromagnétisme est un phénomène réversible. Les variations d'un courant électrique entraînent des variations correspondantes du champ magnétique qu'elles créent de même que, les variations d'un champ magnétique induisent des courants variables dans les conducteurs.

Si l'on approche ou l'on éloigne un aimant d'un bobinage, on fera apparaître un courant dans celui-ci. La variation du champ magnétique proche induira un courant électrique dans les spires de la bobine.

De même, si deux bobinages sont alignés axialement, l'excitation de l'un par un courant électrique produira un champ magnétique induisant dans le second un courant inverse. Le courant induit semble s'opposer aux variations du courant inducteur. L'intensité du courant induit est proportionnelle à la vitesse de variation et à l'intensité du courant induit.

### **La self-induction :**

Si un courant circulant dans un bobinage peut induire un courant dans un autre bobinage se trouvant à proximité, il en induit aussi dans ses propres spires. Ce phénomène est soumis aux mêmes lois que le couple de bobinages inducteur-induit. En conséquence, si l'intensité du courant circulant dans une bobine augmente, un courant de self-induction en sens opposé prend naissance ralentissant ainsi l'augmentation du courant inducteur, et inversement.

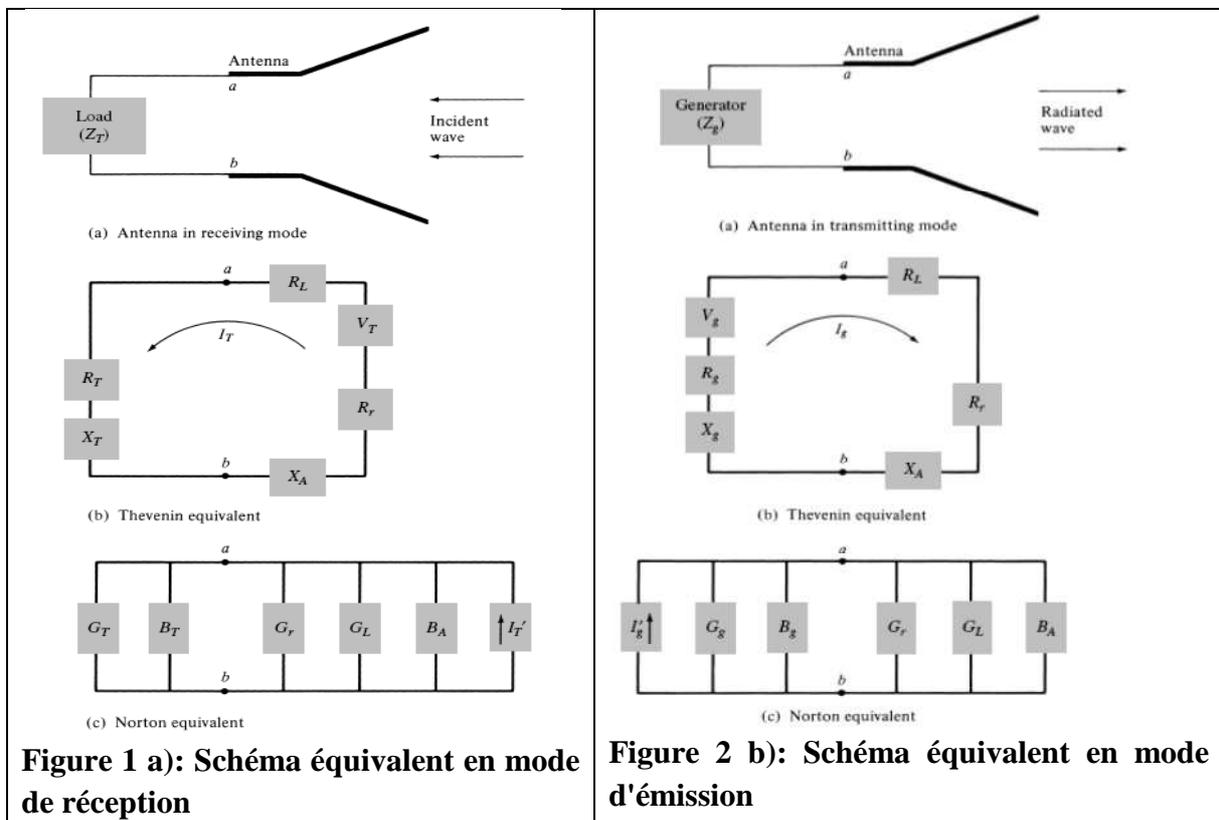
Le bobinage semble s'opposer aux variations d'intensité. Ce phénomène de résistance de self-induction ou inductance (**L** en Henrys) est d'autant plus élevée que la fréquence (**f** en Hertz) de variation est importante.

La résistance totale qu'oppose une bobine au passage d'un courant alternatif s'appelle l'impédance ( $Z$  en ohms) et se calcule par la formule  $z = \sqrt{R^2 + (2\pi.L.f)^2}$  ou  $R$  est la résistance (en ohms) ohmique pure du fil conducteur.

**Impédance d'entrée**

L'impédance d'entrée d'une antenne caractérise la charge apportée par cette antenne au circuit d'excitation. Le cas le plus simple est celui des antennes pour lesquelles on peut définir deux bornes d'entrée telles qu'en régime d'émission, il existe entre elles une tension  $V_e$  lorsque circule un courant  $I_e$  ; L'antenne peut alors être représentée par un dipôle, au sens de la théorie des circuits, dont l'impédance d'entrée serait  $Z_a = R_a + j X_a$

$R_a$  et  $X_a$  Représentent respectivement la résistance et la réactance de l'antenne aux bornes de l'entrée a-b.



En général, la partie résistive  $R_a$  correspond à la somme de la puissance active rayonnée et à la puissance dissipée dans l'antenne. Elle peut donc s'écrire sous la forme

$$R_a = R_r + R_L$$

$R_r$  et  $R_L$  sont respectivement la résistance de rayonnement et la résistance de pertes de l'antenne.

La première est une caractéristique dépendant du champ lointain dont on sait qu'il peut être obtenu à partir de la répartition approchée du courant sur l'antenne, alors que la seconde se déduit de la connaissance du champ dans l'antenne et permet de représenter les pertes électriques et diélectriques. Ceci permet de définir le rendement de l'antenne sous la forme d'un rapport de résistances

$$\eta_{cd} = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (\text{eq10})$$

Pour une barre métallique de longueur  $l$ , de section droite  $A$  et de conductivité  $\sigma$ , la résistance en régime continu est  $R_{dc} = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{A}$  ( $\Omega$ ) (eq11)

Si la profondeur de pénétration (épaisseur de peau) dans le métal  $\delta$  ( $\delta = \sqrt{2 / (\mu_o \sigma \omega)}$ ) est très faible devant la plus faible des dimensions de la section droite de la barre, le courant circule sur une fine couche située au voisinage de la surface du conducteur.

La résistance aux hautes fréquences de cette barre s'écrit  $R_{hf} = \frac{l}{P} R_s = \frac{l}{P} \sqrt{\frac{\mu_o \omega}{2\sigma}}$  ( $\Omega$ )

$P$  est le périmètre de la section droite de la barre ( $P = 2\pi R$  pour un cylindrique de rayon  $R$ ),  $R_s$  est la résistance de la surface du conducteur,  $\omega$  est la pulsation et  $\mu_o$  la perméabilité en espace libre.

En plus de la diminution du rendement  $\eta_{cd}$ , la résistance de pertes  $R_L$  introduit un autre effet indésirable. En effet, comme dans tout système électrique, une résistance ohmique est une source de bruit au niveau de l'antenne. Ainsi, une valeur élevée de cette résistance au niveau d'une antenne de réception introduit du bruit au niveau du récepteur.

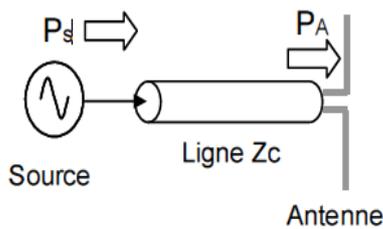
Pour la partie imaginaire  $X_a$  de l'impédance d'entrée représentant l'énergie réactive contenue dans le champ proche, conformément à la théorie des circuits électriques, le problème est moins simple. Toute décomposition de  $X_a$  serait purement arbitraire puisqu'elle reposerait sur le choix d'une surface fermée  $S$  à travers laquelle on évalue le flux du vecteur de Poynting.

Les antennes de dimensions très inférieures à la longueur d'onde, présentent, en plus de leur faible résistance de rayonnement, une réactance de valeur élevée. Ainsi, un doublet électrique présente une réactance capacitive alors qu'un doublet magnétique présente une réactance inductive. Ces résultats sont conformes à la théorie des circuits basse fréquence.

Le transfert maximum de puissance de l'émetteur vers l'antenne d'émission (de l'antenne de réception vers le récepteur) exige l'adaptation d'impédance entre les deux dispositifs. Généralement, un récepteur présente une impédance d'entrée purement réelle, des circuits d'adaptation permettant de compenser la réactance de l'antenne de réception sont donc nécessaires. L'introduction de ce type de circuits engendre deux problèmes: ils sont source de bruit à cause de leur résistance ohmique et ne permettent l'adaptation que sur une bande de fréquence généralement étroite.

**I-7-5. Adaptation et condition d'adaptation**

Une antenne est reliée à la source par une ligne de transmission d'impédance caractéristique  $Z_c$  (en général,  $Z_c = 50\Omega$ ). Pour assurer un transfert maximal de puissance entre l'alimentation et l'antenne, il est nécessaire d'assurer une adaptation d'impédance. L'adaptation permet d'annuler le coefficient de réflexion  $\Gamma_{in}$  ou  $S_{11}$  en entrée de l'antenne.



$$P_A = P_S (-|\Gamma_{in}|^2) \quad \text{et} \quad S_{11} = \Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_c}{Z_{in} + Z_c}$$

Condition d'adaptation
➔
 $S_{11} = 0 \iff Z_{in} = Z_c$

Si l'adaptation n'est pas assurée, une partie de la puissance est renvoyée vers la Source. En pratique, soit on cherchera à concevoir l'antenne de telle manière à ce qu'elle présente une impédance égale à  $Z_c$  à la fréquence de travail, soit on disposera en entrée de l'antenne un circuit de transformation d'impédance qui modifiera l'impédance d'entrée de l'antenne vue depuis la source et assurera l'adaptation d'impédance.

**Remarque**

Bien que les pertes par désadaptation réduisent l'efficacité d'une antenne, celles-ci (ainsi que les pertes par polarisation) ne sont généralement pas incluses dans le calcul de l'efficacité  $\eta$ . Dans les notes d'application d'antennes, l'adaptation de l'antenne est souvent caractérisée par le rapport d'onde stationnaire (ROS) ou Voltage Standing Wave Ratio (VSWR).

Lorsqu'il y a désadaptation, la réflexion d'une partie de l'onde incidente et l'addition avec l'onde réfléchie conduit à l'apparition d'une onde stationnaire dans la ligne qui relie l'antenne à la source (ou au récepteur).

L'amplitude de cette onde stationnaire n'est pas constante le long de la ligne (l'amplitude est maximale en certains endroits (ventres) et minimale à d'autres (nœuds)).

Le rapport d'onde stationnaire est le rapport entre l'amplitude maximale et l'amplitude minimale de cette onde. Le TOS est lié au coefficient de réflexion.

**I-7-6. Analyseur de réseau**

L'impédance d'une antenne peut être mesurée à l'aide d'un analyseur de réseau. Connecté à l'entrée d'une antenne, celui-ci transmet un signal harmonique et est capable de séparer l'onde incidente de l'onde réfléchie, et ainsi de mesurer le coefficient de réflexion et donc d'en déduire l'impédance à la fréquence considérée. Néanmoins, l'utilisation de cet appareil nécessite une étape de calibration précise pour mesurer l'impédance dans le plan de référence de l'antenne.

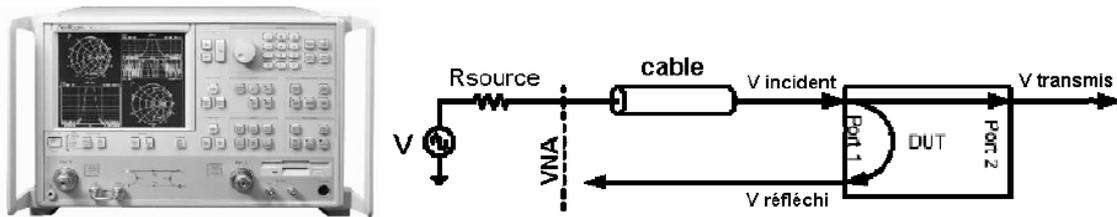


Figure I-14 : Analyseur de réseau.

**I-7-7. la polarisation**

La polarisation d'une antenne dans une direction donnée est définie comme étant la polarisation de l'onde transmise (rayonnée) par l'antenne. Dans la pratique, la polarisation des ondes transmises varie avec leurs directions.

La polarisation d'une antenne est la propriété décrivant la variation temporelle de la direction et du module du champ électrique  $\vec{E}$  rayonné par cette antenne. Elle est caractérisée par la courbe décrite dans le temps par l'extrémité du vecteur  $\vec{E}$  et observée à partir de la direction de propagation.

La polarisation peut être linéaire, circulaire ou elliptique. Si le vecteur  $\vec{E}$  garde une direction constante dans le temps, la polarisation est linéaire ou rectiligne; en général, c'est une polarisation qui est soit horizontale, soit verticale selon  $\vec{E}$ . C'est le cas de la majorité des antennes filaires. Dans le cas général, le champ électrique  $\vec{E}$  décrit une ellipse et la polarisation est alors dite elliptique.

Les polarisations linéaires et circulaires sont des cas particuliers de la polarisation elliptique et sont obtenues respectivement lorsque l'ellipse devient une droite ou un cercle.

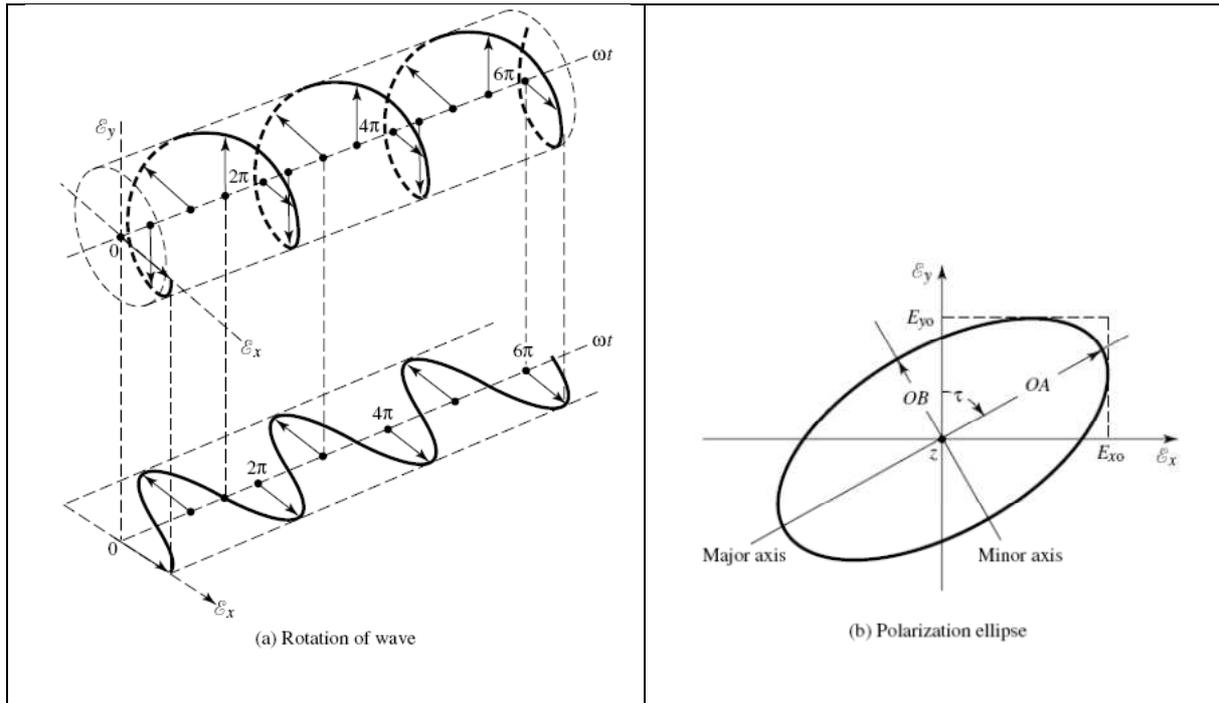


Figure I-15: Polarisation des ondes EM.

### I-7-8. Le vecteur longueur effective (Longueur vectorielle effective)

Une antenne en mode de réception a pour rôle de capter des ondes EM et d'y extraire les puissances transportées. On définit alors pour chaque antenne une longueur équivalente et un nombre de surfaces équivalents. Ces quantités équivalentes sont utilisées pour décrire les caractéristiques de réception d'une antenne lorsqu'elle reçoit une onde incidente.

Le vecteur longueur effective d'une antenne (aussi désigné comme la hauteur effective), qu'elle soit filaire ou une antenne à fente, est une quantité qui est utilisée pour déterminer la tension induite sur les bornes en circuit ouvert de l'antenne lorsqu'il sera empiété par une onde. Le vecteur longueur effective est en général une quantité complexe représentée par:

$$l_e = \hat{a}_\theta l_\theta(\theta, \phi) + \hat{a}_\phi l_\phi(\theta, \phi) \quad (\text{eq. 12})$$

Il est aussi désigné comme la hauteur effective. C'est une quantité de champ lointain qui est relié au champ lointain  $\mathbf{E}_a$  rayonnée par l'antenne parcourue par un courant  $\mathbf{I}_{in}$ :

$$\mathbf{E}_a = \hat{\mathbf{a}}_\theta E_\theta + \hat{\mathbf{a}}_\phi E_\phi = -j\eta \frac{kI_{in}}{4\pi r} l_e e^{-jkr} \quad (\text{eq. 13})$$

Cette longueur effective représente l'antenne en mode de réception et d'émission et elle est particulièrement utilisée pour relier la tension en circuit ouvert d'une antenne réceptrice aux champs incidents. Cette relation peut être exprimée par:

$$V_{oc} = \mathbf{E}^i \cdot \mathbf{l}_e \quad (\text{Eq. 14})$$

où  $V_{oc}$  la tension en circuit ouvert au bornes d'une antenne et  $\mathbf{E}^i$  le champ électrique incident.

**I-7-9.Facteur de pertes de polarisation**

En général, la polarisation d'une antenne de réception est différente de celle de l'onde incidente qui lui parvient. Ceci est désigné souvent comme étant "une désadaptation de polarisation". La puissance reçue par cette l'antenne n'est donc pas maximale à cause des pertes par polarisation. En effet, supposons un champ incident de la forme  $\vec{E}_i = E_i \hat{e}_i$

Où  $\hat{e}_i$  est un vecteur unitaire indiquant la polarisation du champ reçu et soit une antenne de réception polarisée comme suit :

$$\vec{E}_r = E_r \vec{h}_e^r = E_r h_e^r \hat{e}_r \text{ (eq15)}$$

Où  $\vec{h}_e^r$  et  $\hat{e}_r$  indiquent respectivement le vecteur hauteur effective et la polarisation de l'antenne de réception.

Les pertes (en puissance) par polarisation peuvent être caractérisées par le facteur PLF (polarization loss factor) défini par  $PLF = |\hat{e}_i \cdot \hat{e}_r^*|^2 = |\cos \psi_p|^2$  (eq16)

Où  $\psi_p$  représente l'angle entre les deux vecteurs unitaires  $\hat{e}_i$  et  $\hat{e}_r$  (Fig.16). Si ces deux vecteurs ont la même direction, (même polarisation à l'émission et à la réception), le PLF est égale à l'unité (ou 0 dB) et la puissance reçue par l'antenne de réception à partir du champ incident est maximale.

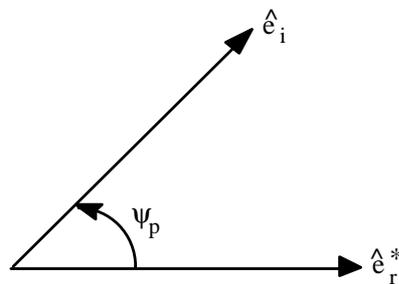


Figure 16: Vecteurs unitaires de polarisation

Un autre paramètre qui est aussi utilisé pour décrire les caractéristiques de la polarisation d'une onde et celle d'une antenne, est le rendement de la polarisation (appelé aussi adaptation de polarisation ou facteur de pertes) et qui est défini comme le rapport de puissance reçue par une antenne d'une onde plane arbitrairement polarisée à la puissance que doit être reçue par la même antenne d'une onde plane de même flux de densité de puissance et de même direction de propagation. Ce qui exprime que la polarisation a été ajustée pour une puissance reçue maximale. Elle est donné par:

$$p_e = \frac{|l_e \cdot E^{inc}|^2}{|l_e|^2 |E^{inc}|^2} \text{ (eq. 17)}$$

Où

$\mathbf{l}_e$  est le vecteur longueur effective de l'antenne.

$\mathbf{E}^{inc}$  le champ électrique incident.

### I-7-10. Gain d'une antenne

Un autre paramètre aussi très utilisable qui sert à décrire les performances d'une antenne est le gain. Malgré que le gain soit relié étroitement à la directivité, c'est une mesure qui tient compte du rendement de l'antenne (donc des pertes) aussi bien que sa capacité directionnelle.

Le gain en puissance d'une antenne dans une direction donnée est défini comme étant le rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction  $\Delta(\theta, \phi)$  sur l'intensité de rayonnement qui peut être obtenue si la puissance acceptée par l'antenne sera rayonnée de façon isotrope. Cette dernière est tout simplement la puissance fournie à l'antenne par la ligne de transmission issue de l'émetteur divisée par  $4\pi$  (tout l'espace).

Il est donc formulé comme suit :

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{\text{Intensité de rayonnement}}{\text{Puissance fournie totale}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_f} \quad \text{eq(18)}$$

Mais, dans la majorité des cas, on a affaire à un gain relatif qui est défini comme étant le rapport du gain en puissance dans une direction donnée  $G_p(\theta, \phi)$  au gain en puissance d'une antenne référence dans sa direction référencée, recevant la même puissance fournie  $P_f$ . L'antenne référence est généralement un dipôle ou n'importe quelle antenne ou son gain peut être calculé ou bien est connu (le plus souvent une source isotrope sans pertes).

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_f (\text{source isotrope sans pertes})} \quad (\text{sans dimensions}) \quad \text{(eq19)}$$

Pour une source isotrope sans pertes  $P_f = P_{ray}$  et son intensité est  $U_0 = \frac{P_{ray}}{4\pi}$

Pour une antenne réelle quelconque  $P_f = P_{ray} + P_d$  ( $P_d$  étant les différentes pertes en puissance dans l'antenne: par effet Joule, dans le diélectrique, désadaptation). Pour une telle

antenne, on définit la notion de rendement :  $\eta_{cd} = \frac{P_{ray}}{P_f}$  (eq 20)

Dans ces conditions le gain relatif de l'antenne s'écrit alors:

$$G(\theta, \phi) = \eta_{cd} \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{ray}} \quad \text{(eq 21)}$$

Et il est relié à la directivité par :  $G(\theta, \phi) = \eta_{cd} D(\theta, \phi)$  (eq 22).

**I-7-11. Température d'une antenne**

On sait que n'importe quel objet avec une température au dessus du 0°K rayonne de l'énergie. Cette quantité d'énergie est généralement exprimée par une température équivalente  $T_B$  connue comme la "température de luminosité" (brightness temperature). Elle est définie par :

$$T_B(\theta, \phi) = \epsilon(\theta, \phi) T_m = (1 - |\Gamma|^2) T_m \quad (\text{eq.23})$$

-  $\epsilon$  est l'émissivité ( $0 \leq \epsilon \leq 1$ )

-  $T_m$  la température moléculaire en K.

-  $\Gamma$  coefficient de réflexion de la surface pour la polarisation de l'onde.

La température de luminosité émise par différentes sources est interceptée par les antennes et apparaît à leurs bornes comme une température d'antennes. Elle est

Donné par :

$$T_A = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi T_B(\theta, \phi) G(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi G(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (\text{eq.24})$$

$T_A$  est la température de l'antenne (température de bruit effective de la résistance de rayonnement de l'antenne en °K) et  $G(\theta, \phi)$  le gain de l'antenne.

En supposant qu'il n'y a pas de pertes ni contribution entre l'antenne et le récepteur, la puissance du bruit transmis au récepteur est donné par:  $P_r = kT_A \Delta f$  (eq.25)

$P_r$  La puissance du bruit de l'antenne.

$k$  constante de Boltzmann.

$T_A$  Température de l'antenne.

$\Delta f$  La bande passante.

**I-7-13.L es Régions du champ**

L'espace qui entoure l'antenne est généralement divisée en trois régions:

Le champ proche réactif: Dénommée également zone de Rayleigh, définie comme étant la région entourant immédiatement l'antenne où un champ réactif est prédominant. Pour la majorité des antennes, cette région s'étend de la surface de l'antenne jusqu'à  $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ .

Où D est la dimension de l'antenne la plus importante. La région de rayonnement du champ proche appelée aussi zone de Fresnel est définie comme étant la région intermédiaire entre la région proche réactive et la région du champ lointain où le champ actif rayonné est Prédominant.

La région du champ lointain: appelée zone de Fraunhofer, est définie comme étant la région où une antenne dont la distribution angulaire du champ est essentiellement indépendante de la Distance de l'antenne. En général, elle est prise à partir de la distance supérieure à  $2D^2/\lambda$  (si D est grand par rapport à  $p/|\gamma|$ ,  $R > |\gamma|D^2/\pi$  où  $\gamma$  est la constante de propagation du milieu). Dans cette région, les composantes du champ sont essentiellement transverses (TEM par rapport à la direction radiale) et la distribution angulaire est pratiquement indépendante de distance radiale.

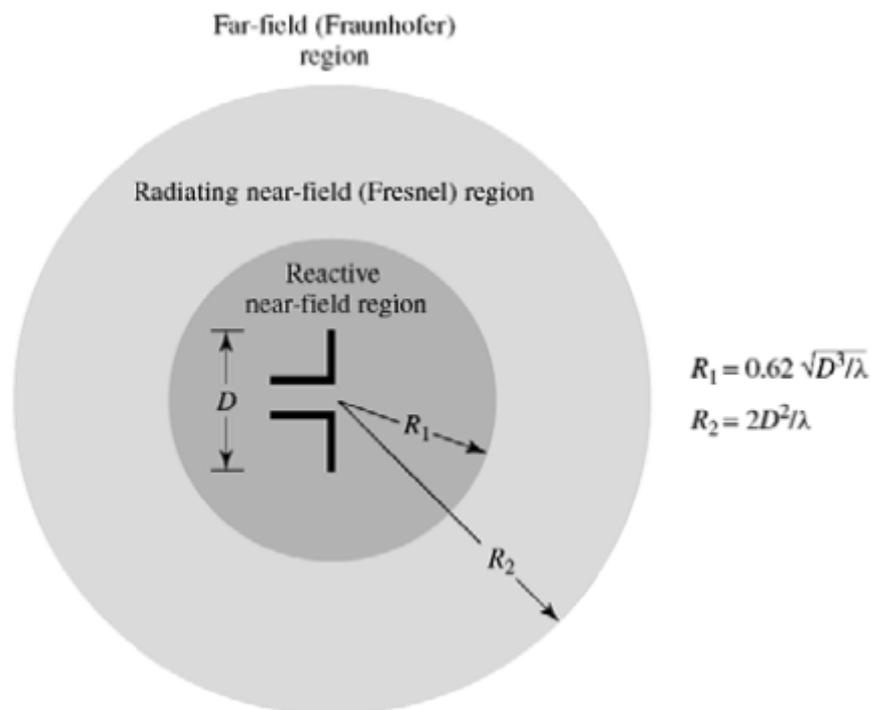


Figure I-17 : montrant les trois régions du champ.

**I-7-14. Vecteur de Poynting**

Les ondes EM sont utilisées pour transporter des informations à travers un milieu (sans fils ou dans des structures guidant) d'un point à un autre. La quantité utilisée pour décrire la puissance associée, est vecteur de Poynting instantané, défini comme :  $\vec{W} = \vec{E} \times \vec{H}$

W: le vecteur de Poynting (watt/m<sup>2</sup>).

E: l'intensité du champ électrique instantané et est égale à  $E = Re(E(x, y, z)e^{j\omega t})$ .

H : l'intensité du champ magnétique instantané et est égale  $H = Re(H(x, y, z)e^{j\omega t})$ .

La densité de puissance rayonnée :

Comme le vecteur de Poynting représente une densité surfacique de puissance, la puissance totale à travers une surface fermée sera donc obtenue en intégrant la composante normale du vecteur de Poynting sur la surface entière. La puissance instantanée est donc donnée par  $P = \oint_S \vec{W} \cdot d\vec{s} = \oint_S \vec{W} \cdot \hat{n} ds$  (eq 26) .

$$P = \oint_S \vec{W} \cdot d\vec{s} = \oint_S \vec{W} \cdot \hat{n} ds \text{ (eq 26) .}$$

Dans beaucoup d'applications, où la variation temporelle du champ électromagnétique est périodique, il est très pratique de trouver la densité de puissance moyenne qui est obtenue en intégrant le vecteur de Poynting instantané sur une période.

Le vecteur de Poynting peut s'écrire alors sous la forme:

$$\vec{W} = \vec{E} \times \vec{H} = \frac{1}{2} Re(\vec{E} \times \vec{H}^*) + \frac{1}{2} Re(\vec{E} \times \vec{H} e^{2j\omega t}) \text{ (eq 27)}$$

Et la valeur moyenne est donnée par :

$$W_{moy}(x, y, z) = \frac{1}{2} Re(\vec{E} \times \vec{H}^*) \text{ (eq 28)}$$

La représentation graphique de la densité de puissance moyenne, comme fonction de la direction, est justement le diagramme de puissance de l'antenne (en termes de diagramme gain ou de puissance relative).

**Remarque:**

Si la partie réelle de cette expression représente la valeur moyenne de la densité de puissance active (prédominante dans la zone du champ lointain) donc rayonnée par l'antenne (sans pertes), il est naturel d'admettre que sa partie imaginaire doit représenter la densité de puissance réactive (emmagasinée dans la zone proche, c'est à dire au voisinage de l'antenne) associée à l'onde EM.

La puissance moyenne rayonnée par une antenne peut s'écrire sous la forme

$$P_{ray} = P_{moy} = \oint_S \vec{W} \cdot \hat{n} ds = \oint_S \vec{W}_{oy} \cdot \hat{n} ds = \frac{1}{2} \oint_S Re[\vec{E} \times \vec{H}^*] \cdot \hat{n} ds .$$

### I-8. Types d'antennes

Une antenne est dite idéale si elle rayonne toute la puissance qu'elle lui a été délivrée à partir de la ligne de transmission, dans une ou plusieurs directions désirées. Dans la pratique, ces performances idéales ne peuvent être réalisés mais peuvent être minutieusement approchées. une grande variété d'antennes existe et chaque type peut prendre une forme afin d'accomplir une caractéristique de rayonnement désirée pour une application donnée.

On va voir les grandes familles d'antennes à l'origine de l'ensemble des structures rayonnantes :

- Les antennes filaires (dipôle, monopôle, Yagi).
- Les antennes à fentes (demi ou quart d'onde).
- Les antennes patchs (planaires).
- Les antennes à ouverture (cornet).
- Les antennes à réflecteurs (paraboles).

#### I-8-1. Antennes filaires

C'est les plus familiers des antennes puisque vue partout : sur les toits, les avions, les voitures... etc il existe une grande variété de forme : rectiligne (dipôle), boucle : circulaire rectangulaire ellipse, hélice...etc.

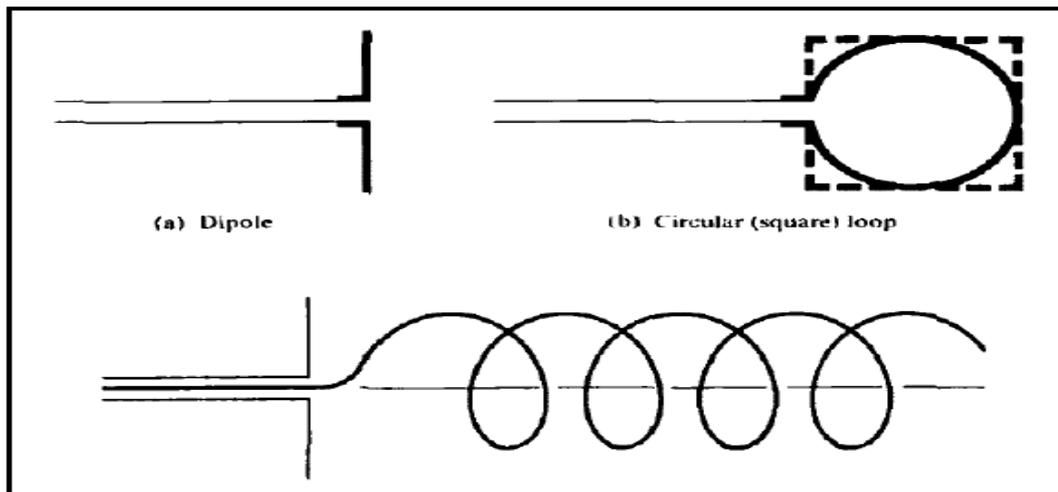


Figure I-18 : antenne dipôle, circulaire, hélice

Le dipôle est l'antenne de référence en radiocommunication et elle est largement utilisée tel quel où en l'association avec d'autres conducteurs pour former une antenne Yagi. Le dipôle a une longueur totale d'une demi-longueur d'onde .



Figure I-19 : Dipôles verticaux d'un émetteur FM

### I-8-2. Antennes fentes :

Ce type d'antenne est très utilisé dans les avions ou les vaisseaux spatiaux car, ils peuvent être facilement montés sur leurs surfaces.

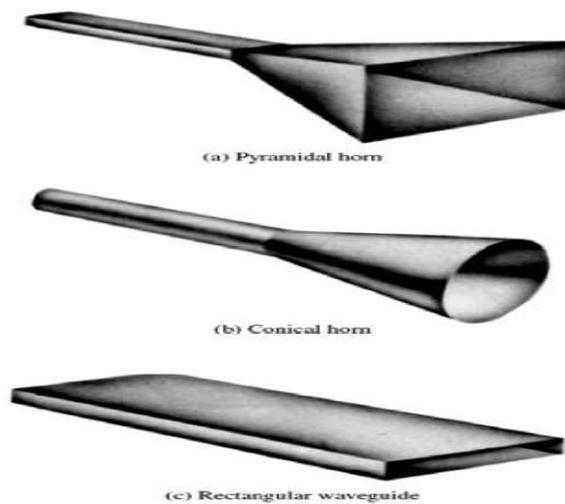


Figure I-20 : Les antennes à fentes.

### I-8-3. Antennes microrubans

Elles sont devenues très populaires depuis les années 70. Au début, pour des applications spatiales puis, dans des applications commerciales.

Ces antennes sont constituées par un patch métallique monté sur un substrat avec un plan de masse. Le patch peut prendre n'importe quelle forme mais les plus populaires sont les formes rectangulaires et circulaires.

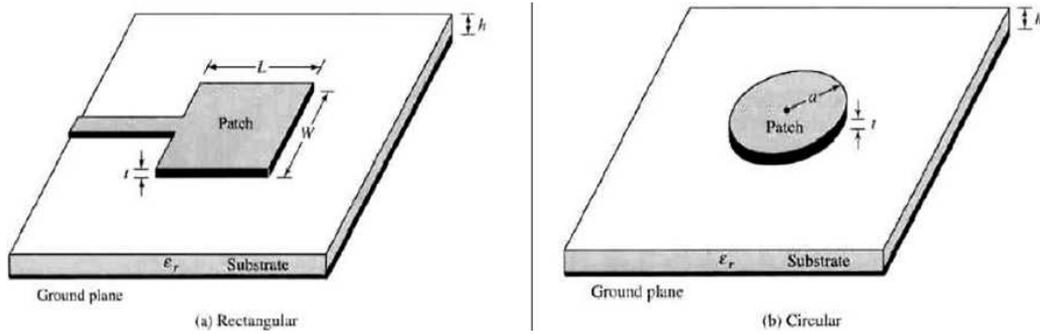


Figure I-20 : Antennes patch à élément rayonnant triangulaire et circulaire.

### I-8-4. Antennes réseaux

Beaucoup d'applications requies des rayonnements qui ne peuvent pas achevées par des éléments simples. Alors, il est possible de former un ensemble d'éléments rayonnants dans un arrangement électrique et géométrique pour avoir la caractéristique de rayonnement désirée.

L'arrangement de ce réseau est tel que le rayonnement des éléments donne un rayonnement maximum dans une direction particulière, minimum dans une autre où autrement suivant les exigences des exemples typiques de réseaux sont représentés par la figure suivante.

En général, le terme réseau est réservé a un arrangement ou dans lequel les éléments rayonnants sont séparés. Toute fois, le même terme et aussi utilisé pour décrire un assemble d'éléments rayonnants sur une structure continue.

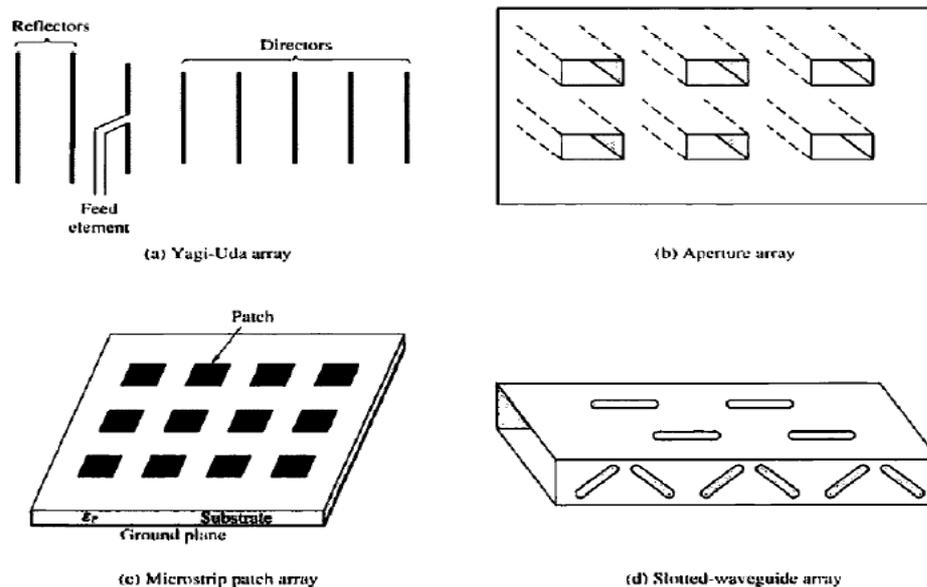


Figure I-21 : Exemples d'antennes réseaux.

### I-8-5. Antennes réflecteurs

Le besoin de communiquer à des grandes distances a permis d'élaborer des formes d'antennes capables de transmettre et de recevoir des signaux qui devraient traverser des millions de kilomètres.

Une forme courante pour de telles applications est le réflecteur parabolique avec des diamètres de plus de 305 m.

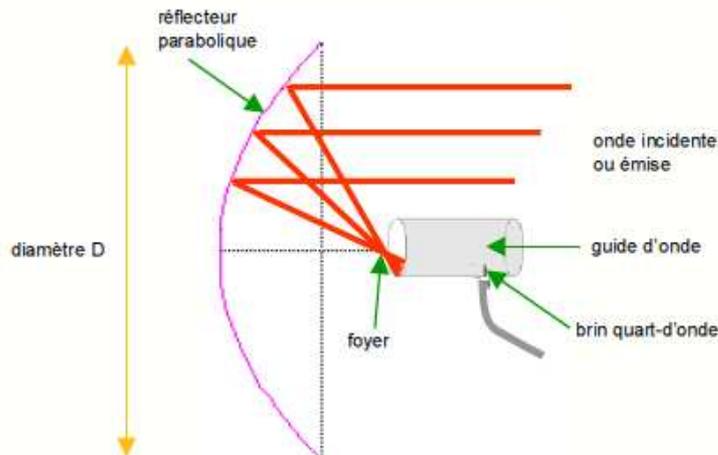


Figure I-22 : Schéma illustrant l'antenne parabolique.

### I-9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons traité les notions d'électromagnétisme et l'importance des équations de Maxwell pour la compréhension des phénomènes de propagation électromagnétique, les caractéristiques de base de toutes les antennes tel que l'impédance d'entrée, le diagramme de rayonnement, le gain, la polarisation...etc, qui devraient être acquises pour se lancer dans n'importe quel étude sur les antennes d'où leur importance, ces notions sont considérées comme fondamentales.

# Chapitre II

### II-1.Introduction

Nous allons faire une brève présentation de l'antenne patch vu que c'est une antenne très populaire de nos jours et très utilisée. Par rapport à sa taille réduite et son pouvoir d'adaptation aux surfaces planes et non plane .elle est également très performante en terme de résonance, de polarisation, d'impédance d'entrée et de diagramme de rayonnement que nous allons traiter dans ce chapitre.

### II-2.Définition

L'antenne planaire ou patch (en anglais) est une antenne plane dont l'élément rayonnant est une surface conductrice généralement carrée, séparée d'un plan réflecteur conducteur par une lame diélectrique. Sa réalisation ressemble à un circuit imprimé double face, substrat, elle est donc favorable à une production industrielle. Elle peut être utilisée seule ou comme élément d'un réseau. Les antennes planaires sont utilisées lorsqu'on veut réduire l'encombrement d'une antenne, notamment sa hauteur au-dessus d'un plan de masse, par exemple sur les émetteurs-récepteurs portables de radiocommunications, sur les récepteurs GPS, ... Les antennes planaires en réseau sont employées en Wi-Fi, en radioamateurisme et dans de nombreuses transmissions professionnelles. L'antenne patch en réseau actif est une des technologies permettant la réalisation des antennes radar à faisceau contrôlé, en navigation aérienne, surveillance ou observation de la Terre par satellite.

Le concept d'antennes patch est apparu dans les années 50, mais le véritable développement ne s'est fait que dans les années 70. L'antenne est réalisée par gravure d'un circuit imprimé. Ceux-ci peuvent être intégrés au plus près des circuits électroniques en occupant un volume réduit et se conformant à différents types de surfaces. Leur principal avantage réside dans leur faible coût de fabrication. Les antennes patchs sont utilisées dans de nombreuses applications à partir des bandes VHF (Fig.1)

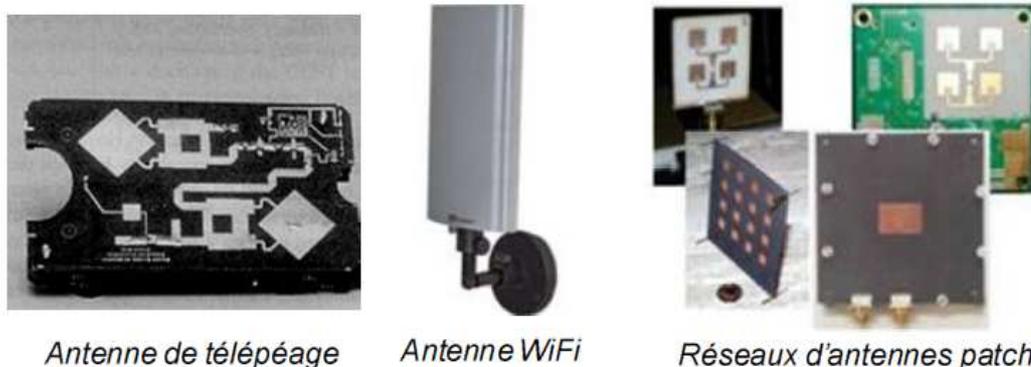


Figure II-1 : Exemple d'antennes patchs.

**Circuit ou antenne ?**

Nous savons que la propagation des ondes dans une ligne microruban s'effectue à la fois dans le milieu diélectrique et dans l'air comme le montre la Figure 2.

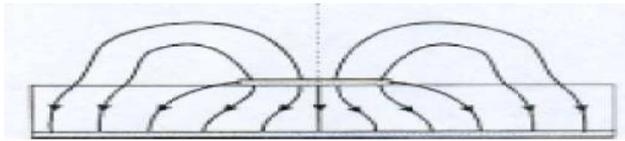


Figure II-2 : Lignes de champ électrique autour d'une ligne microruban.

Du point de vue modélisation, les deux milieux sont remplacés par un unique milieu effectif Caractérisé par une constante diélectrique relative effective exprimée par :

$$\epsilon_{re\text{ff}} = \left( \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right) + \left( \frac{\epsilon_r - 1}{2} \right) \left( 1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2}$$

Remarque : Cette équation est donnée pour  $W/h > 1$ .

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

- de la largeur  $W$  des circuits métallisés.
- des caractéristiques du substrat à savoir sa constante diélectrique  $\epsilon_r$  et son épaisseur  $h$ .

Le choix des valeurs de ces paramètres conditionne généralement le type d'application que nous pouvons envisager en technologie microruban. Pour la réalisation de circuits hyperfréquences, nous rechercherons à minimiser le rayonnement de la ligne en espace libre on choisira en conséquence un substrat tel que l'énergie électromagnétique reste concentrée dans le diélectrique (plus exactement dans la cavité que forme la bande métallique et le plan de masse). Nous utiliserons donc des substrats à constante diélectrique élevée comme de l'Alumine  $\epsilon_r = 9.9$  pour concevoir par exemple un amplificateur faible bruit.

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

**II-3. Structure**

Une antenne patch consiste en un élément métallique de forme quelconque (rectangulaire, Circulaire, à fente, ou formes plus élaborées) déposé sur la surface d'un substrat diélectrique qui présente sur l'autre face un plan conducteur (plan de masse). L'antenne patch rectangulaire est l'antenne patch la plus courante, sa structure est détaillée ci-dessous :

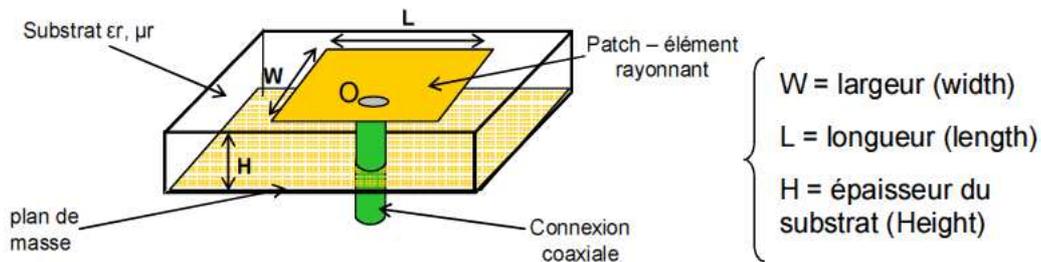


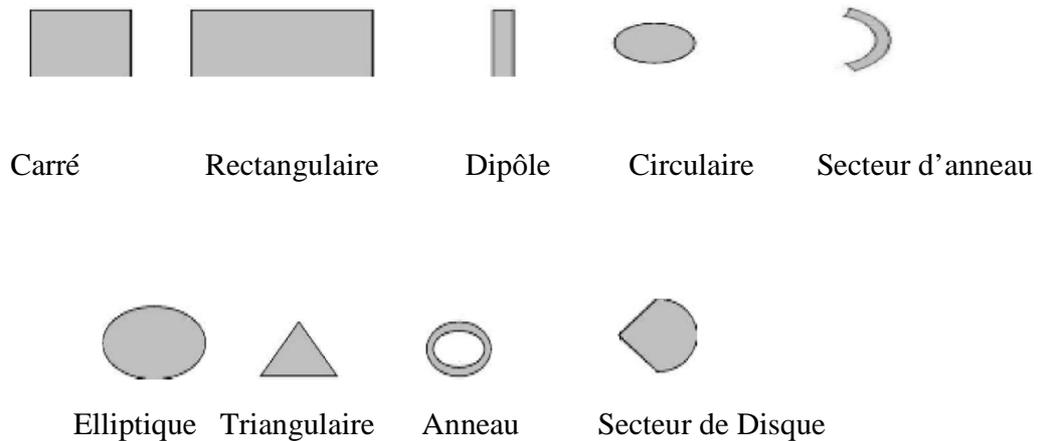
Figure II- 3 : Structure d'une antenne patch rectangulaire

Les dimensions du patch sont généralement de l'ordre de la demi-longueur d'onde. Le choix de la longueur est guidé par la fréquence de résonance à donner à l'antenne. Le plan de masse ne pouvant pas être infini, il peut être égal à trois ou quatre fois la longueur d'onde, ce qui représente parfois un encombrement trop important. Un plan de masse plus petit conduira à une modification des propriétés de l'antenne. Les caractéristiques du substrat influent sur celles de l'antenne. En général, sa permittivité doit être faible, il doit être d'épaisseur négligeable devant la longueur d'onde et présenter de faibles pertes (on caractérise les pertes d'un diélectrique par la tangente des pertes notée  $\tan \delta$ , une valeur typique se situe aux alentours de  $10^{-3}$ ).

Différentes méthodes existent pour polariser une antenne patch. Sur la figure II- 3, l'antenne est alimentée par une connexion coaxiale, le connecteur étant placé à l'intérieur de l'élément rayonnant. L'alimentation peut être apportée par une ligne micro ruban connectée sur un côté de l'antenne. La position du point de l'alimentation aura un impact non négligeable sur l'impédance d'entrée de l'antenne et donc sur son adaptation.

**II-4. Les différentes formes d'une antenne patch**

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes qui peuvent être rectangulaire, carré, circulaire Ou simplement un dipôle. Ces formes sont les plus courantes car elles présentent une grande Facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant.



**Remarque :**

Parmi toutes ces formes, l'élément rectangulaire est sans contexte le plus facile à appréhender pour la compréhension des mécanismes de rayonnements des antennes planaires.

**II-5. Principe de fonctionnement**

L'élément rayonnant le plus classique est un rectangle .Deux modèles sont utilisés pour comprendre le fonctionnement d'une antenne patch et déterminer des formules analytiques de leur rayonnement et de leur impédance d'entrée. Une antenne patch peut être vue comme une ligne de transmission (ligne microruban) ouverte à chacune de ses extrémités. Ces deux discontinuités se comportent comme deux extrémités rayonnantes. La deuxième manière de traiter une antenne patch est de la considérer comme une cavité résonante, formée par le patch, le plan de masse et les quatre bords. En basse fréquence, la cavité peut être considérée comme une capacité qui stocke des charges et dans laquelle un champ électrique uniforme est créé entre le patch et le plan de masse. Tant que l'épaisseur du substrat est faible, le champ électrique est orienté selon l'axe z et indépendant de z. En pratique, l'épaisseur doit

rester telle que : 
$$h \leq \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_r - 1}}$$

Au fur et à mesure que la fréquence augmente, la distribution des charges sur le patch n'est plus uniforme, et celle du courant et du champ électrique dans le plan xy aussi. Un champ magnétique apparaît aussi. La distribution du champ électrique dans la cavité rectangulaire est donnée par l'équation suivante :

$$E_x = E_y = 0 \quad E_x = E_0 = \cos\left(\frac{m\pi x}{L}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{W}\right).$$

Pour des fréquences particulières (fréquences de résonance de cavité) liées aux dimensions de la cavité rectangulaire, la distribution du champ électrique est telle que le rayonnement est optimisé.

$$F_{m,n} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{W}\right)^2}$$

Où m et n sont des entiers supérieurs ou égaux à 0, qui représentent les modes de cavités. Ces Modes caractérisent la distribution du champ électrique le long d'un axe de la cavité. Le mode fondamental est le mode (m,n) = (0,1) si W > L, indiquant que le champ électrique présente un minimum le long de l'axe parallèle à la largeur, et (m,n) = (1,0) si L > W, indiquant que le champ électrique présente un minimum le long de l'axe parallèle à la longueur. Cette formule est valable uniquement si la hauteur de la cavité est négligeable. Si ce n'est pas le cas, il faudra prendre en compte une troisième composante dans le mode de résonance.

Prenons le cas où L > W et étudions la distribution du champ électrique dans la cavité.

Lorsque la longueur L de la cavité est environ égale à  $\lambda/2$ , l'antenne entre en résonance, à la manière d'un dipôle demi onde. Le champ électrique est maximal et en opposition de phase aux deux extrémités séparées par L.

Le long de l'axe Y (parallèle à W), le champ électrique est quasiment uniforme. Par contre, le champ électrique n'est pas uniforme le long de l'axe X (parallèle à L). Il présente un minimum et un maximum et passe par un zéro le long des extrémités séparées par W.

Cette distribution de champ électrique est liée à une accumulation de charges de signes opposées sur les bords séparés par L et un courant orienté le long de l'axe X.

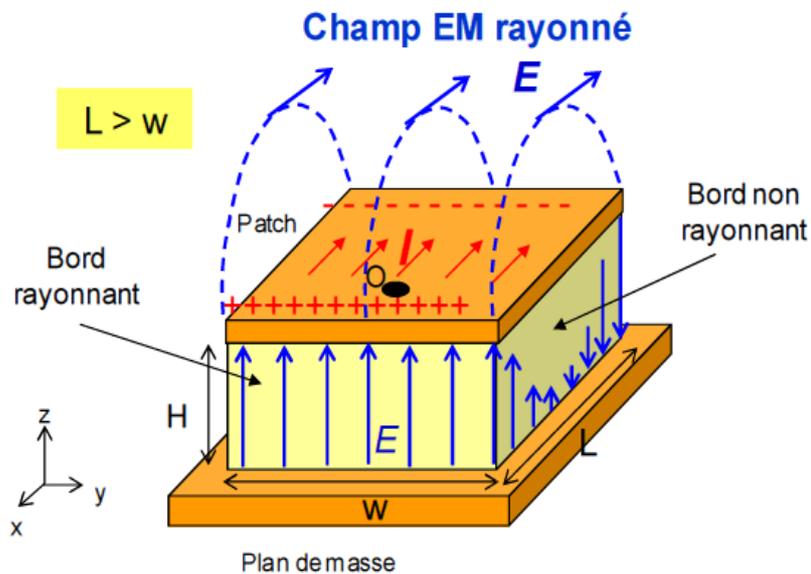


Figure II-4 : Rayonnement d'une antenne patch rectangulaire.

Le champ présent entre les bords du patch et le plan de masse va déborder et contribuer à Générer le champ électromagnétique rayonné : ceux générés par les bords séparés par  $L$  étant maximum et en opposition de phase vont avoir tendance à s'additionner de manière constructive et optimale, et générer un rayonnement inscrit dans le plan  $YZ$ . Ces deux bords sont donc appelés bords rayonnants.

Ceux générés par les bords séparés par  $W$  présentant un zéro, ils ne vont pas contribuer au rayonnement. Cependant, en raison de ce débordement du champ électrique, la résonance ne se fait pas parfaitement lorsque la fréquence est telle que la longueur du patch est égale à la demi longueur d'onde, mais lorsque  $L = 0,49 \lambda$ . Le calcul des performances de l'antenne n'est pas trivial et repose soit sur un calcul analytique et plusieurs hypothèses simplificatrices, soit sur l'utilisation de méthodes numériques exactes. Pour des géométries simples, les méthodes analytiques sont facilement utilisables. Pour des géométries plus complexes, il est nécessaire d'employer des méthodes numériques.

### II-5-1. Mécanismes de rayonnement de l'antenne patch rectangulaire

Le mécanisme de rayonnement d'une antenne patch rectangulaire se comprend aisément à partir de sa forme géométrique. Lorsque vous excitez la ligne d'alimentation avec une source RF, une onde électromagnétique va se propager sur cette ligne puis va rencontrer l'élément rayonnant de largeur plus grande que la ligne, donc plus apte à rayonner. Une distribution de charge va s'établir à l'interface Substrat/Plan de masse, sur et sous l'élément rayonnant.

La Figure II-5 montre cette distribution dans le cas particulier où l'antenne rayonne le plus efficacement c'est à dire lorsqu'elle devient résonante : la longueur de l'élément rayonnant est un multiple de la demi-longueur d'onde guidée. Le cas présenté correspond au mode fondamental de l'antenne. Ces distributions de charge et les densités de courant associées induisent une distribution de champ électrique représentée à la Figure 6 (toujours pour le mode fondamental). Une analyse plus détaillée des distributions de charge et du champ électrique permet de retrouver tous les paramètres caractéristiques d'une antenne : Diagramme de rayonnement et résistance de rayonnement, fréquences de résonance.

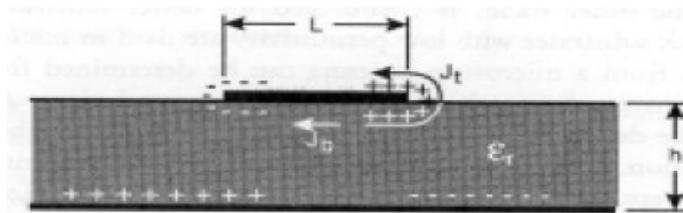


Figure II-5 : Distribution de charge et densités de courant sur une antenne microruban.



Figure II-6 : Distribution de la composante verticale  $E_z$  du champ électrique entre le patch et le plane de masse dans le mode fondamental de l'antenne ( $L$  longueur résonante et on attaque avec la ligne d'alimentation sur le côté  $W$ ).

Nous pouvons constater sur la Figure 8 un renversement de phase des composantes Verticales du champ électrique sur la longueur  $L$  de l'antenne. Ce résultat est évident en lui même car il correspond au cas de la résonance  $\lambda_g/2$  de l'antenne.

La Figure 7 montre les composantes horizontales des lignes de champ entourant l'élément imprimé. Contrairement à précédemment, elles créent des rayonnements qui sont en phase dans le plan de l'antenne, le rayonnement du patch peut être modélisé par celui de deux fentes parallèles couplées distantes de la longueur  $L$  et de dimensions  $W \cdot h$ .

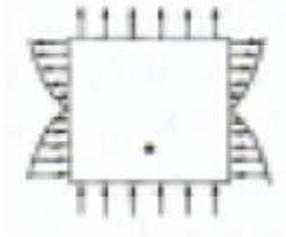


Figure II-7 : Distribution de la composante horizontale du champ électrique dans le mode fondamental de l'antenne.

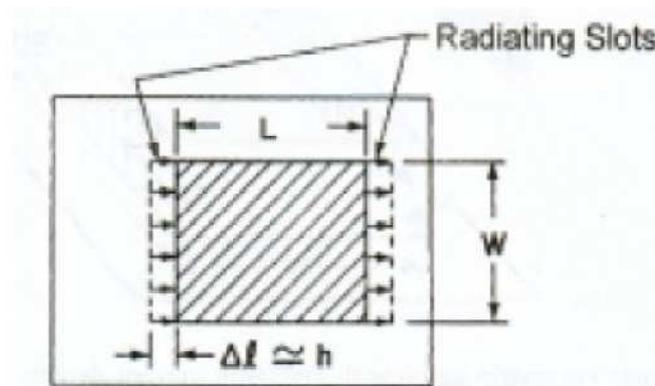


Figure II-8 : Modélisation de l'antenne patch rectangulaire par deux fentes parallèles couplées.

Si nous nous intéressons maintenant à la distribution des charges, nous pourrions montrer par l'étude des composantes tangentes du champ magnétique que le patch rectangulaire peut se modéliser comme une cavité avec quatre murs magnétiques (les bords de la cavité) et deux murs électriques formés par les métallisations (en prenant l'approximation que la composante normale du champ électrique est constante).

En posant les équations de propagations avec les conditions aux limites adéquates, on détermine toutes les fréquences de résonances d'une antenne patch rectangulaire :

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

Avec :

$$W_{eff} = W + \Delta W$$

$$L_{eff} = L + \Delta L$$

$\Delta L$  et  $\Delta W$  représentent respectivement les extensions de longueur et de largeur dues au débordement du champ avec  $\Delta W$  qui s'obtient en remplaçant la largeur  $W$  par la longueur  $L$  dans la formule.

**II-6. Diagramme de rayonnement et polarisation**

Le rayonnement d'une antenne patch rectangulaire est similaire à celui d'un dipôle orienté dans l'axe  $x$ . La polarisation du champ rayonné est rectiligne. Le rayonnement est dépendant de  $\theta$  et  $f$ . Il est concentré dans un lobe principal orienté vers la verticale du patch ( $\theta = 0^\circ$ ). En raison du plan de masse, le rayonnement ne se fait que dans le demi-plan au dessus du plan de masse. La figure II-9 illustre le diagramme de rayonnement de cette antenne.

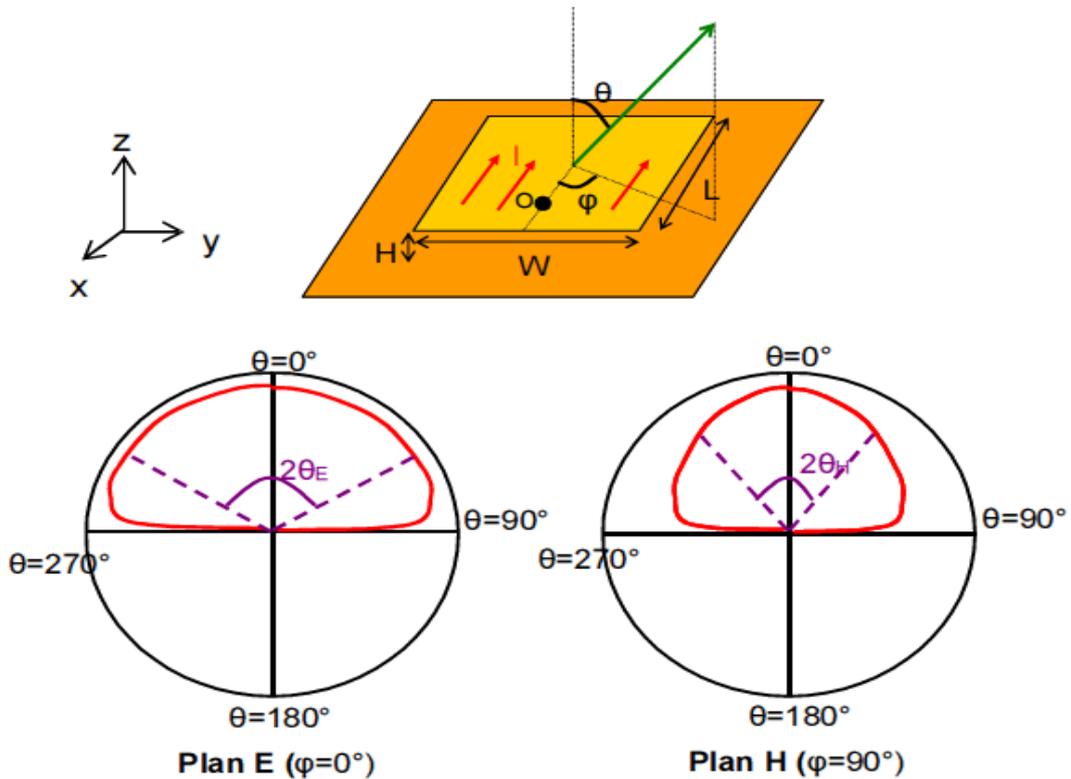


Figure II-9 : Diagramme de rayonnement d'une antenne patch rectangulaire

Remarque : antenne patch à polarisation circulaire

Les antennes patches n'ont pas toutes une polarisation rectiligne. Selon leur structure et leurs méthodes d'alimentation, il est possible de leur donner une polarisation elliptique ou circulaire. Par exemple, en introduisant des fentes dans l'antenne.

### II-7. Impédance d'entrée et bande passante

L'impédance d'entrée d'une antenne patch est assez difficile à calculer et de nombreuses formules approchées existent pour l'évaluer. L'impédance d'entrée dépend de plusieurs paramètres, tels que la constante diélectrique, l'épaisseur et la largeur du substrat, ainsi que de la position du point d'alimentation. Les équations ci-dessous permettent de déterminer approximativement la résistance d'entrée d'une antenne patch rectangulaire :

$$R_{in} = \frac{1}{2G_1}, G_1 = \frac{W^2}{90\lambda_0^2} \text{ si } \frac{W}{\lambda_0} \ll 1, G_1 = \frac{W^2}{120\lambda_0^2} \text{ si } \frac{W}{\lambda_0} \gg 1.$$

L'effet de la position du point d'alimentation peut être pris en compte. Placer le point de polarisation au milieu du patch conduit à une impédance d'entrée nulle et à une dégradation du rayonnement.

$$R_{pos} = R_{in} \cos^2\left(\frac{\pi x}{L}\right) \Leftrightarrow x = \frac{L}{\pi} \arccos\left(\sqrt{\frac{R_{pos}}{R_{in}}}\right)$$

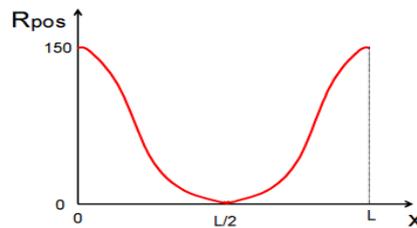


Figure II-10 : Variation de la résistance d'entrée d'une antenne patch rectangulaire en fonction de la position du point d'alimentation.

La bande passante d'une antenne patch est relativement faible, seulement quelques % de la fréquence centrale. Pour accroître la bande passante, il est possible d'augmenter l'épaisseur du substrat pour réduire le facteur de qualité de la cavité résonante (tout en conservant un substrat suffisamment fin pour conserver l'effet de cavité). Il est aussi possible de modifier la méthode d'alimentation du patch, ou couplages entre antennes résonantes (deux patches superposés).

## II-8. Les techniques d'alimentations

**II-8-1. Alimentation par sonde coaxiale :** L'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif.

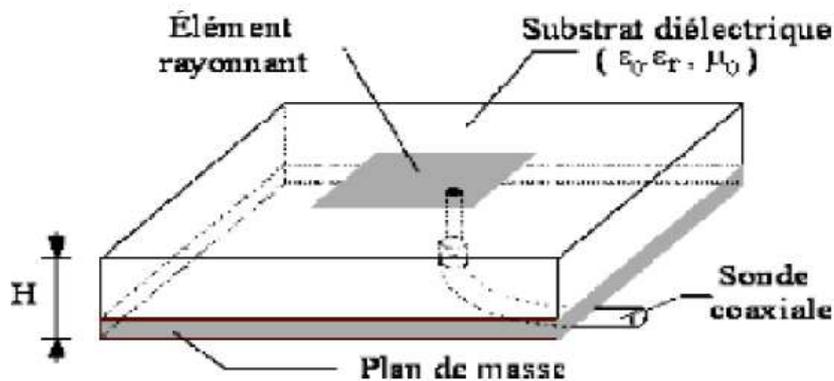


Figure II-11: Alimentation du patch rectangulaire avec un câble coaxiale.

L'alimentation coaxiale où le conducteur intérieur est attaché au patch et le Conducteur externe au plan de masse est également largement utilisée. Ce type d'alimentation est facile à mettre en œuvre et à adapter. Mais il offre une bande passante étroite.

Parmi ces caractéristiques :

- Pas de pertes par rayonnement de ligne.
- Obtention de l'impédance d'entrée par positionnement de la sonde.
- Technique de perçage simple.

## II-8-2. Alimentation par ligne microruban

Dans ce cas d'alimentation, on relie une ligne microstrip au patch. Cette ligne lui amène de l'énergie. Il existe cependant un inconvénient dans ce type d'alimentation vu qu'elle génère un rayonnement parasite.

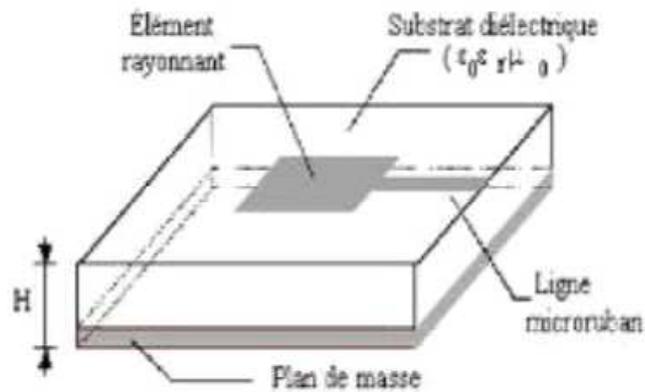


Figure II-12: Alimentation du patch rectangulaire par une ligne microruban.

### II-8-3. Alimentation par le couplage par proximité

Ce type d'alimentation offre la meilleure bande passante, il est facile à modéliser et présente un rayonnement parasite faible. La distance entre la ligne d'alimentation et le patch peut être utilisée pour adapter l'impédance de l'antenne.

Le principal inconvénient de ce type d'alimentation est qu'il est difficile à mettre en œuvre.

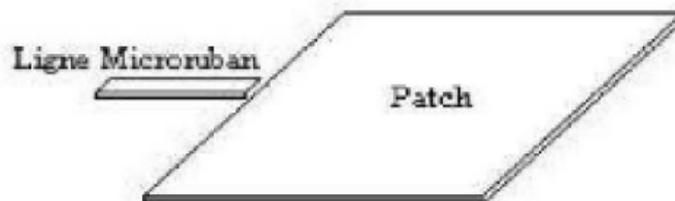


Figure II-13: Alimentation du patch rectangulaire par couplage.

### II-9. Avantages et limitations des antennes patch

Les antennes microrubans présentent de nombreux avantages comparées aux antennes micro-ondes classiques. De plus, elles sont opérationnelles sur un large domaine de fréquence 100MHz à 100 GHz. On peut énumérer les avantages suivants :

Faible poids, encombrement réduit, conformations possibles.

Faible coût de fabrication, production en masse facile.

Rayonnement en polarisation linéaire et circulaire possibles.

Antennes multibandes, multipolarisations.

Compatibilité avec les circuits hybrides (composants discrets rapportés sur le substrat) et les MMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuit, composants intégrés dans les substrats AsGa ou Si).

Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne.

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

Bande passante étroite, souvent associée avec les problèmes de tolérances de fabrication

Généralement faible gain (6 dB).

Sur un grand plan de masse, ces antennes rayonnent uniquement dans le demi-plan.

Supportent uniquement des faibles puissances (<100 W).

Pertes de rayonnement par ondes de surfaces dans le substrat diélectrique.

### II-10. Conclusion

Notre objectif de cette présentation est de se familiariser avec cette antenne et de connaître ses caractéristiques tel que le diagramme de rayonnement que nous essayerons de simuler et de voir tout ses résultats théoriques en pratique et d'être apte de vérifier les résultats de la simulation à l'aide du logiciel de simulation HFSS (High Frequency Structure of Simulation) que nous allons présenter dans le chapitre qui suit.

# Chapitre III

## III-1.Introduction

Ce chapitre nous allons le consacrer uniquement pour la présentation du logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator), ses fonctionnalités et présenter de façon générale le rôle de chaque fonction que nous allons utiliser pour réaliser nos simulations.

Et aussi s'accrocher sur les étapes à suivre pour créer un projet ; vu que leur hiérarchie est très importante pour obtenir des résultats.

## III -2.Définition du logiciel

HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un outil performant à onde électromagnétique Commercial qui fait la simulation du champ d'un model arbitraires en 3D. Il intègre la simulation, visualisation, modélisation des solides, et l'automatisation dans un environnement facile à utiliser où les solutions des problèmes EM 3D sont obtenues rapidement et avec précision. HFSS emploie la méthode des éléments finis (FEM), Ansoft HFSS peut être utilisé pour calculer des paramètres tels que Paramètres S, fréquence de résonance, et des champs électriques et magnétiques En champ proche comme en champ lointain.

Qu'est ce que nous donne HFSS ?

Prototypes virtuel et rapide

Structures Arbitraire en 3D

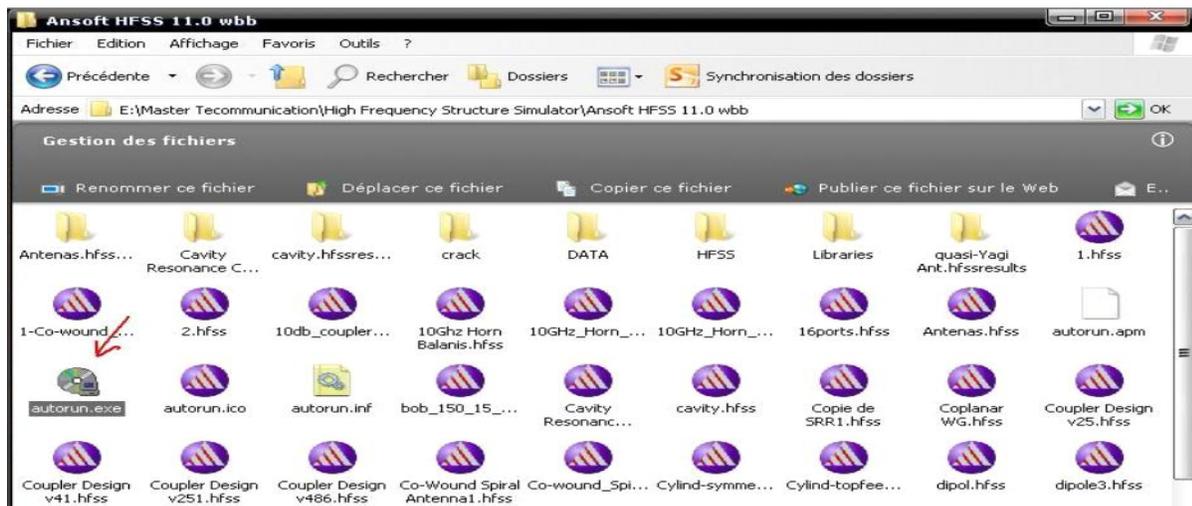
Plusieurs ports / Modes multiples

Supporte tous les matériaux à micro-ondes

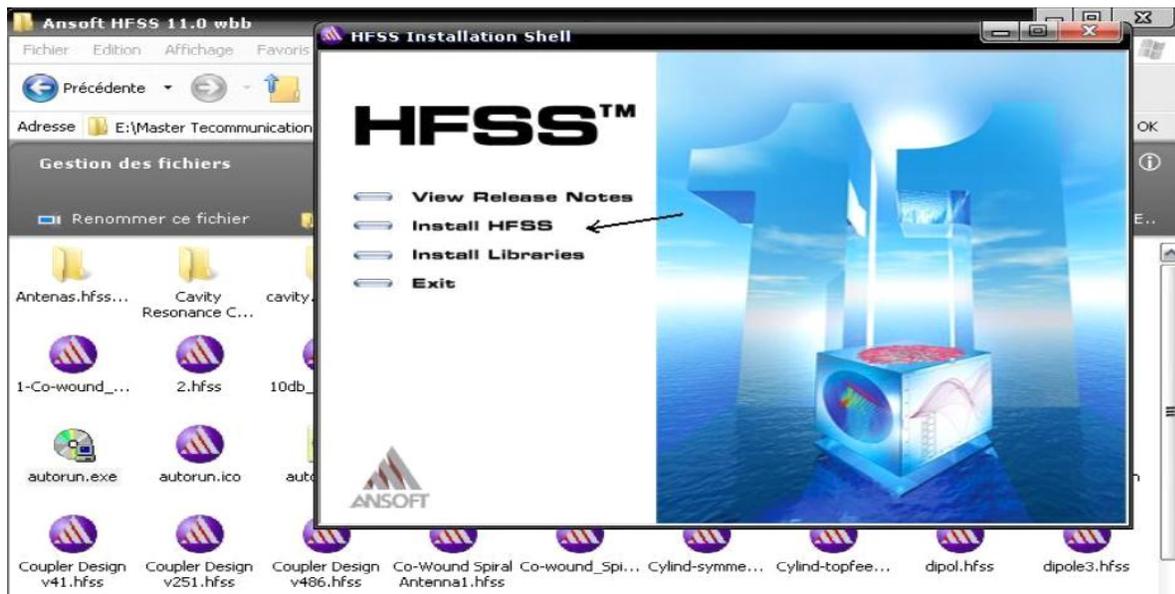
Calcul des paramètres S, Y, Z.

## III -3.Installation du HFSS :

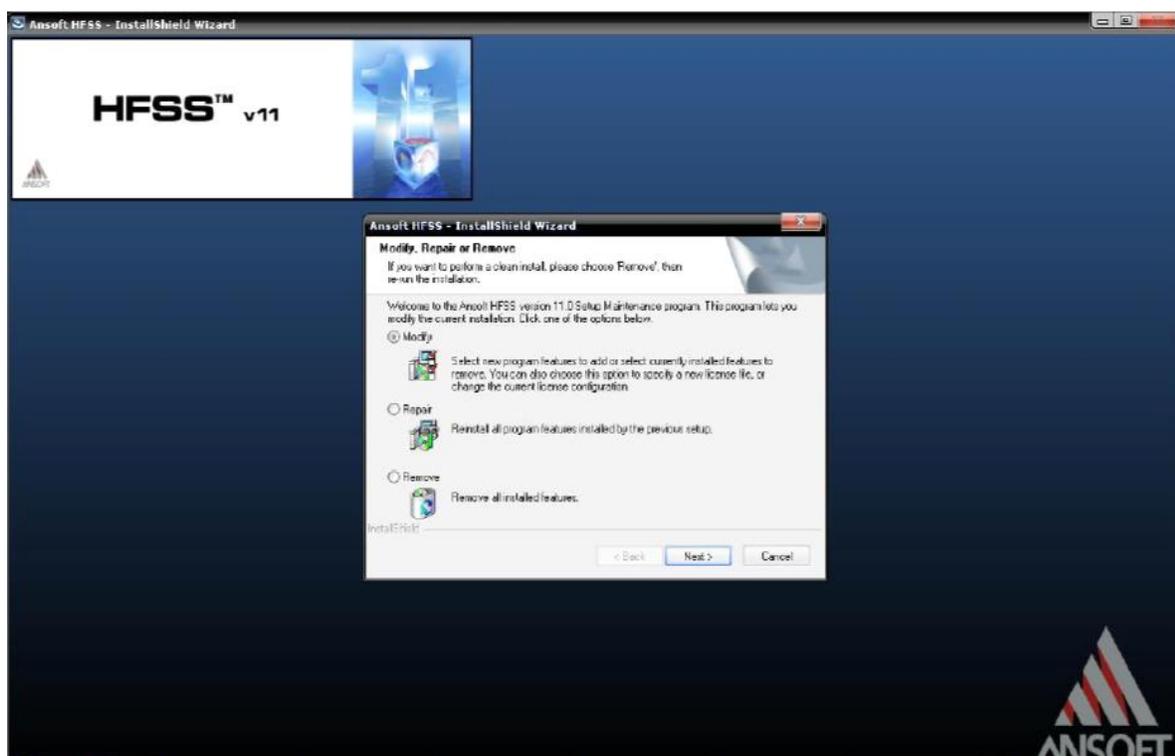
Pour installer HFSS il suffit de commencer par double clic sur Autorun



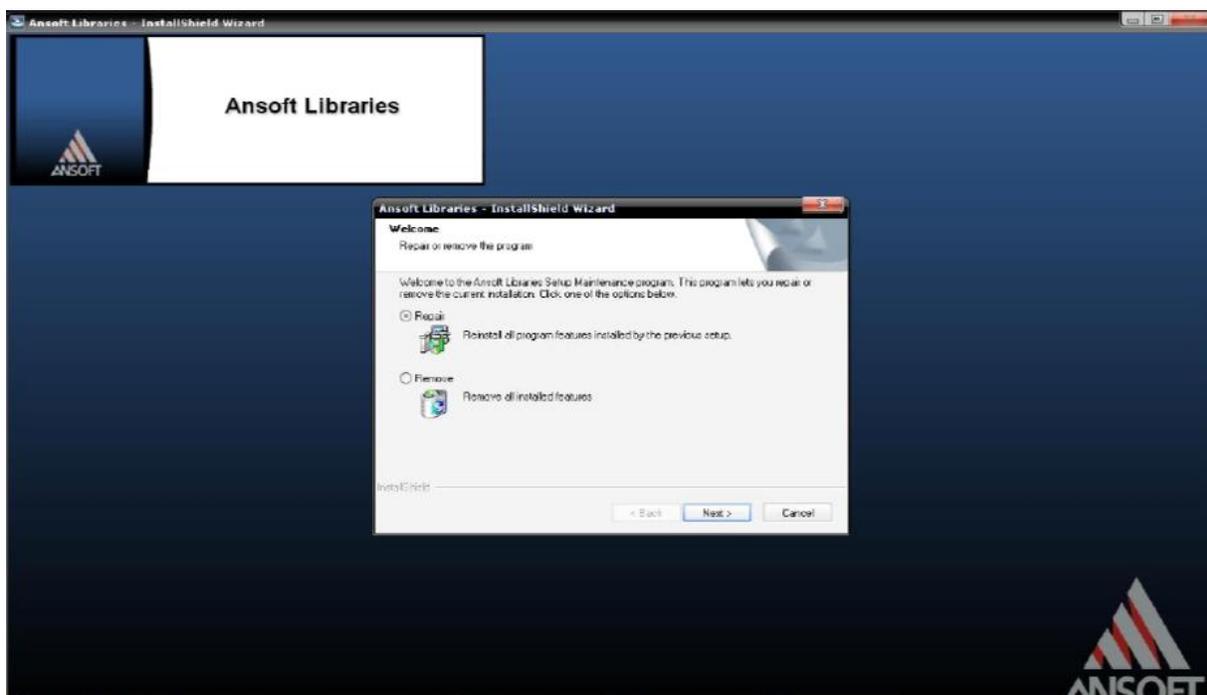
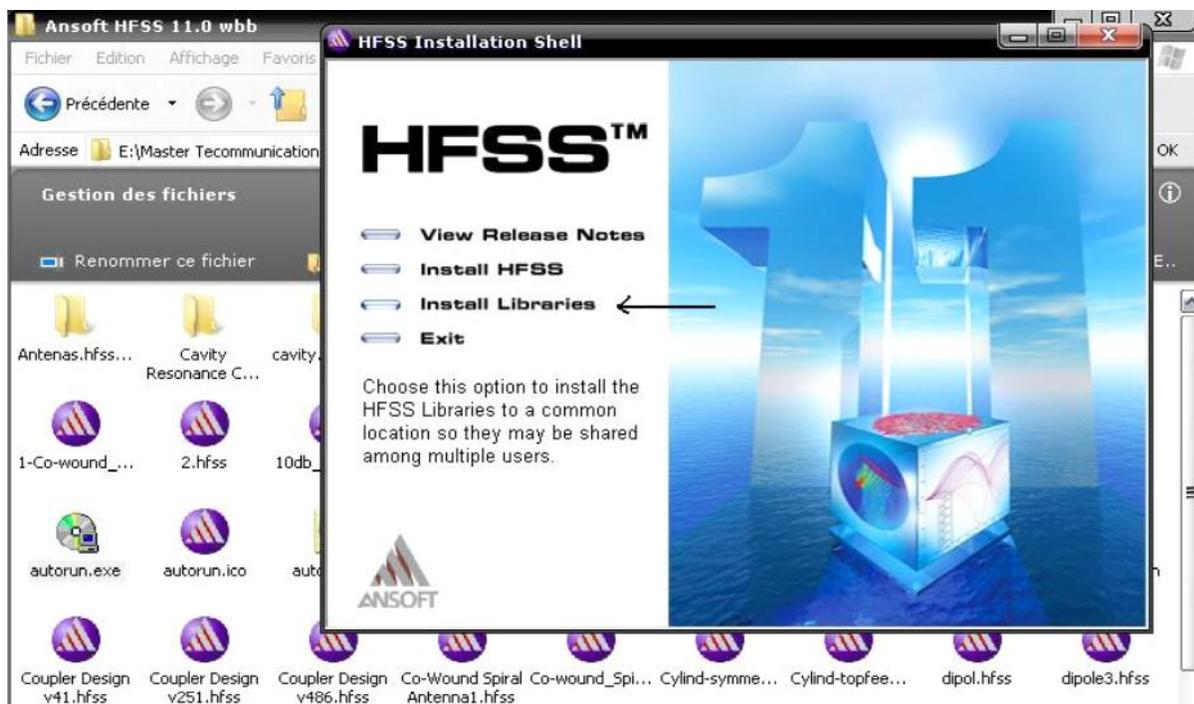
Installer dans un premier temps HFSS, cliquez une seule fois sur Install HFSS



Et suivre les étapes :

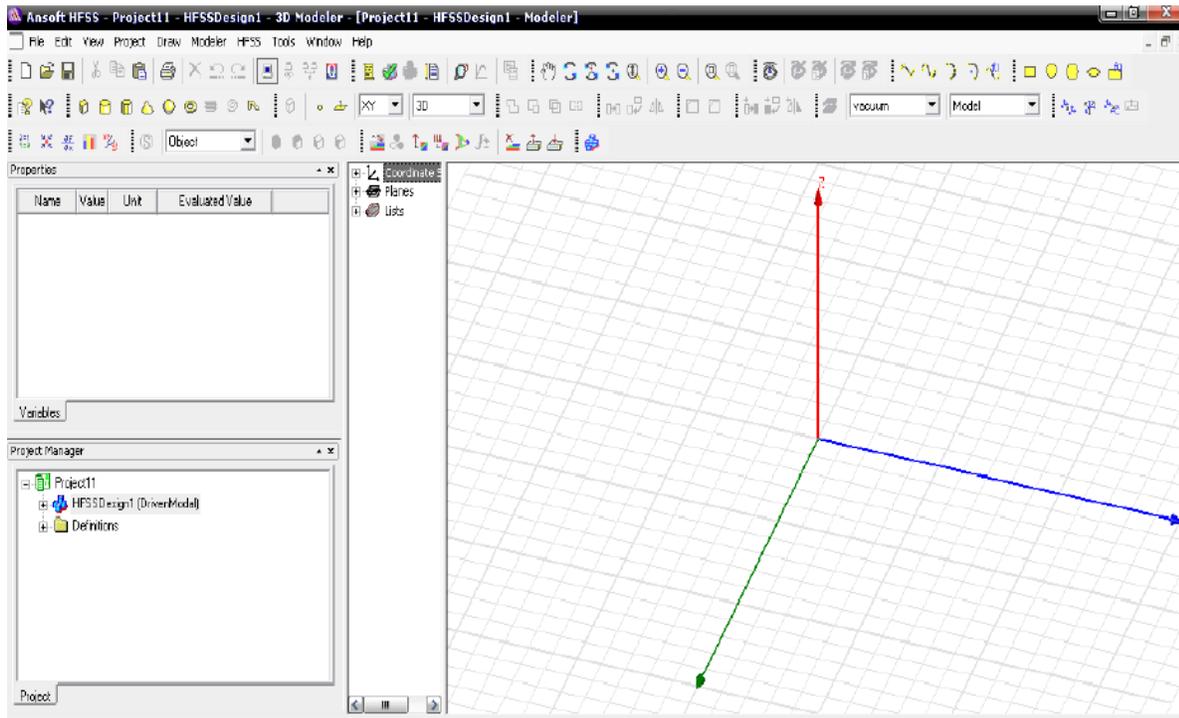


Pour ajouter la bibliothèque : clique sur Install Libraries  
Et suivre les étapes :

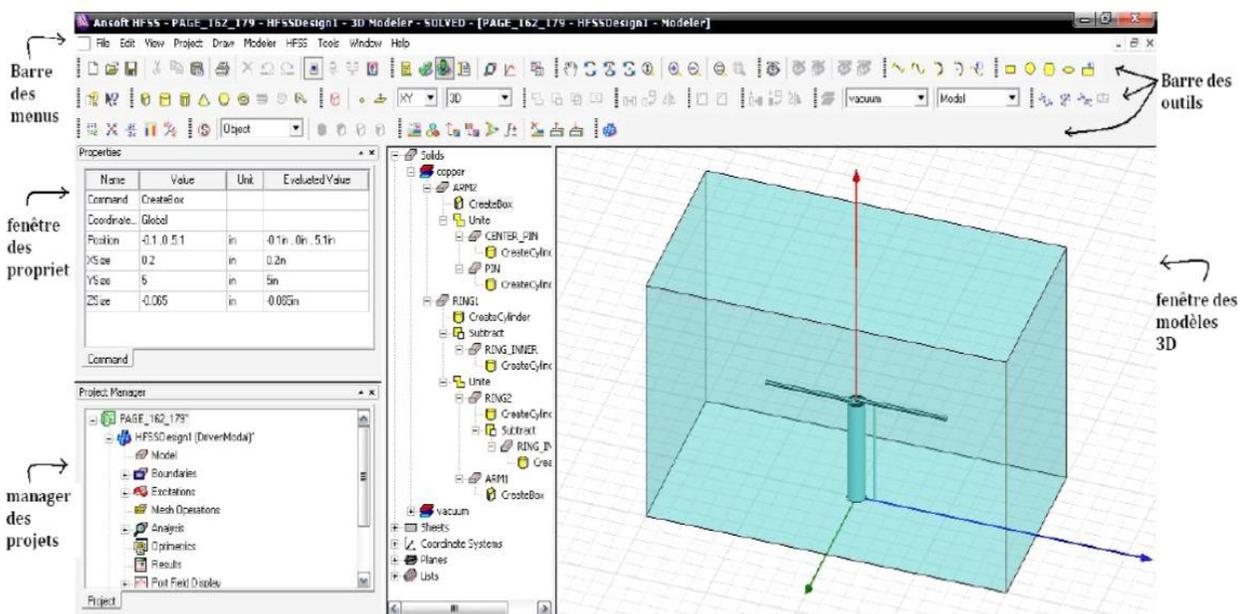


Remarque : L'installation de la bibliothèque est indispensable pour le bon fonctionnement du logiciel.

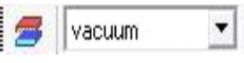
Maintenant vous pouvez accéder à HFSS en cliquant sur l'icône  et cette page apparaît sur vos écrans :



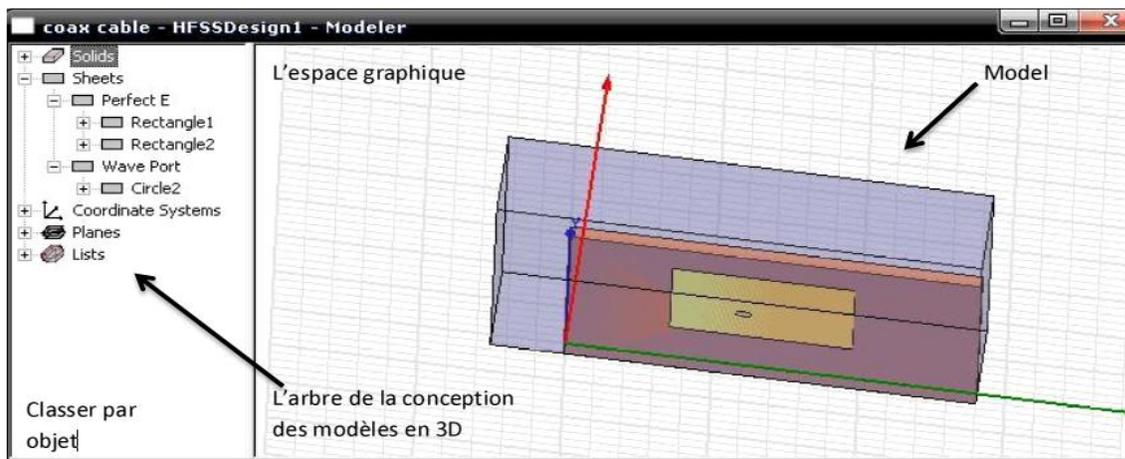
## III -4. Description générale des outils HFSS



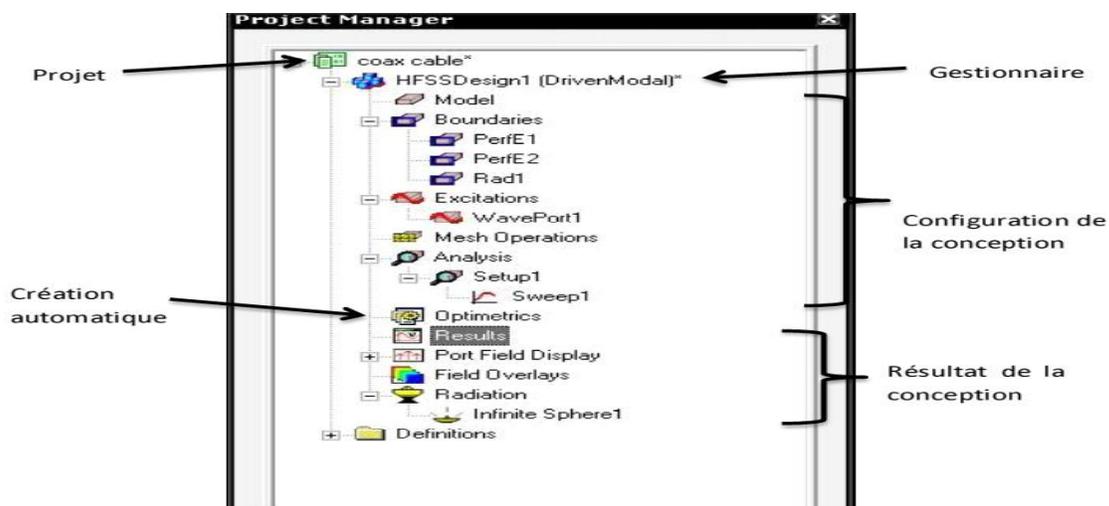
**III -1. Barre des outils** Elle englobe tous les outils pour créer un modèle :

- Rotation et zoom du modèle 
- Type du matériau utilisé 
- Le plan dans lequel on dessine l'objet 
- Raccourci des modèles du carré jusqu'au cône : 
- Sélectionner une face : 

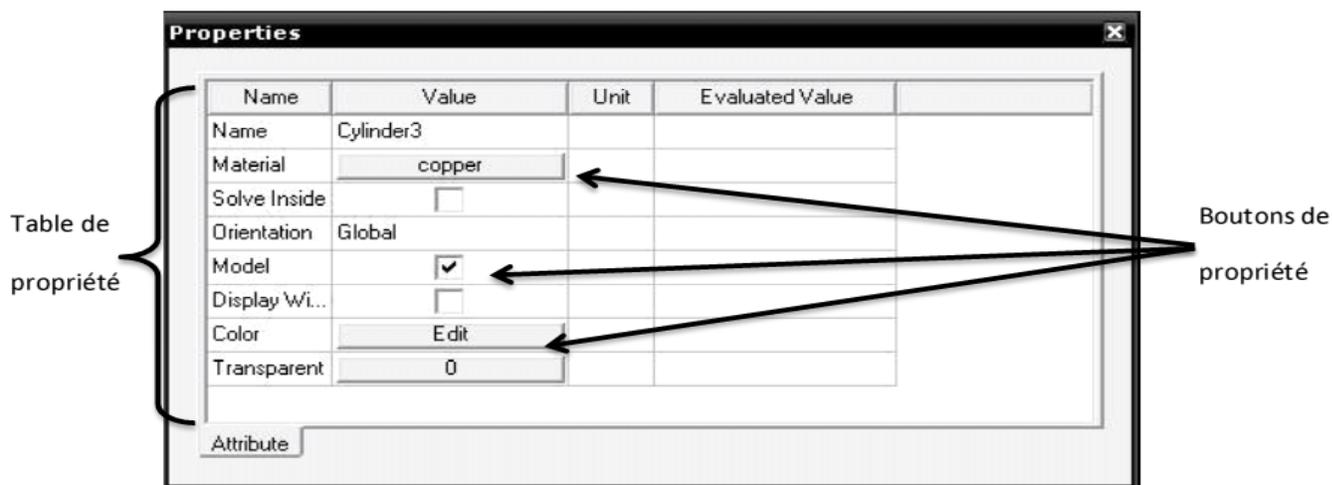
**III -2. Fenêtre des modèles 3D**



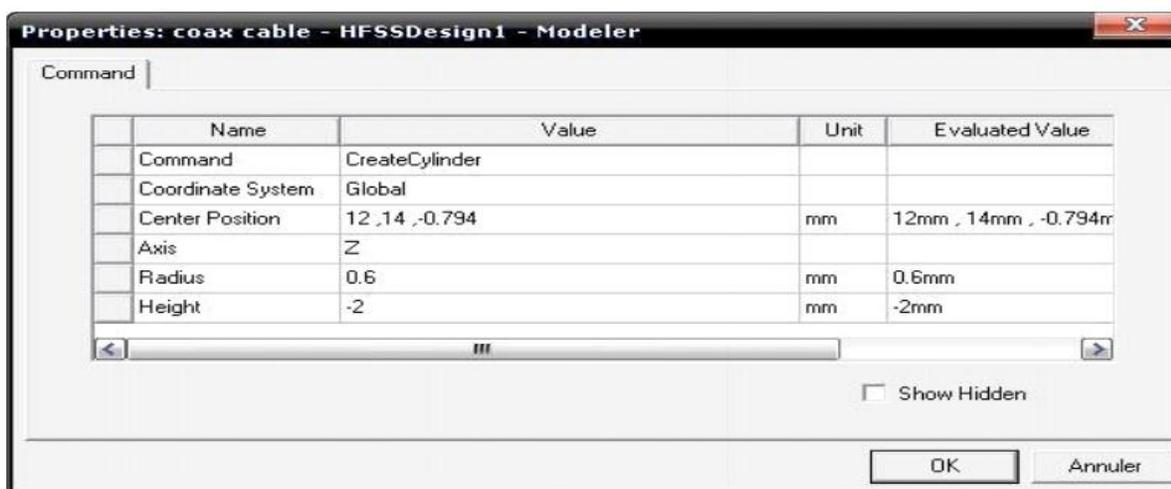
**III -3. Gestionnaire de projet arborescent (Manager des projets)**



**III -4.Fenêtre des propriétés :** elle nous permet d'attribuer le nom, le matériau, la couleur ...etc.



Commandes : on trouve la position et les paramètres (hauteur, largeur) du model, on peut les modifiés à n'importe quel moment durant le travail.



**III -5-.Barre des menus** : Elle contient toutes les options d'HFSS notamment :

➤ HFSS>>Edit :

✚ Arrange >

- Move : traduire un élément de la structure le long d'un vecteur.

- Rotate : déplacer un élément de la structure par un angle.

- Mirror : faire traduire un objet choisi autour d'un plan spécifié.

✚ Offset: Effectue une échelle uniforme en x, y et z.

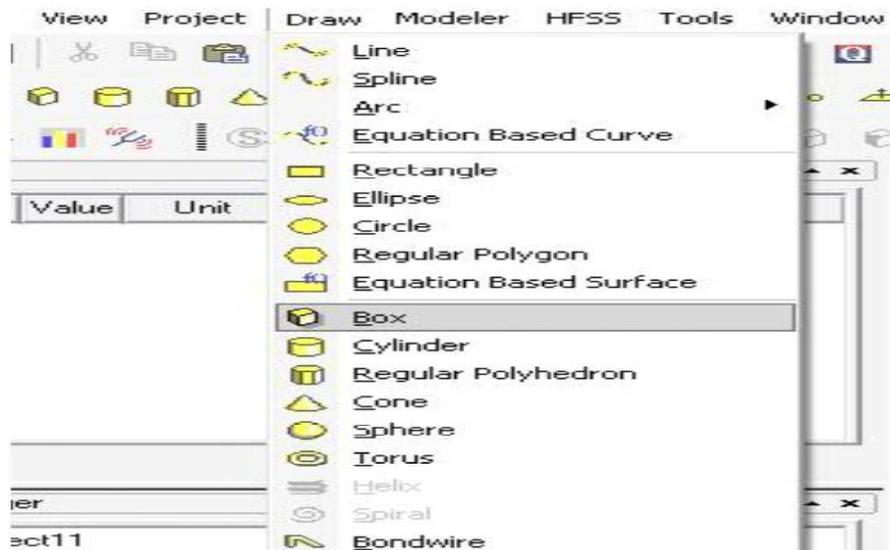
✚ Duplicate>

- Along lines : Créer des copies multiples d'un objet le long d'un vecteur.

- Around axis : créer des copies multiples d'un objet en rotation par un angle fixe autour de x, y ou z.

- Mirror : Fixer l'image d'un objet autour d'un plan spécifié et créer son double.

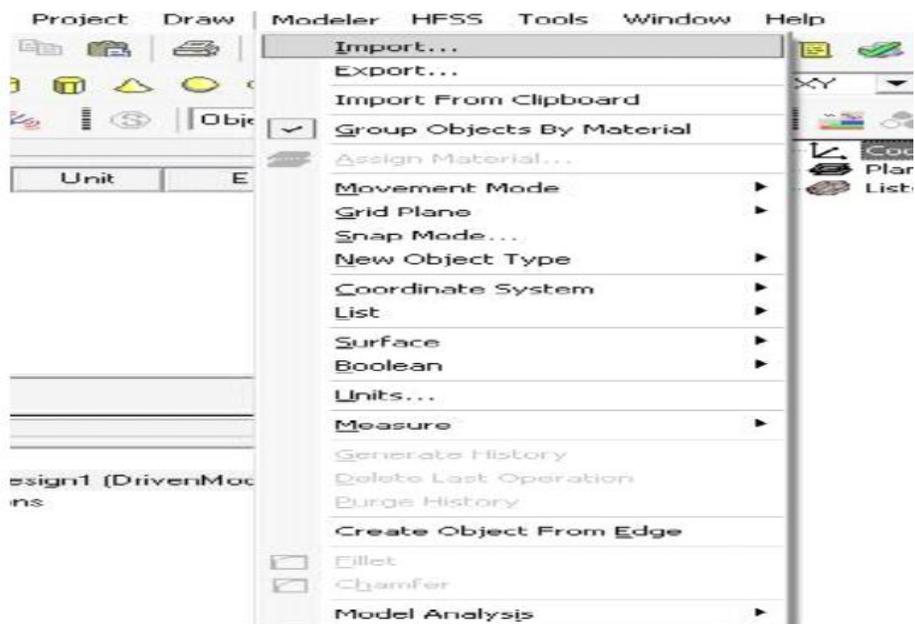
➤ Draw : Regroupe tous les modèles, rectangle, ellipse, cercle, boîte.....



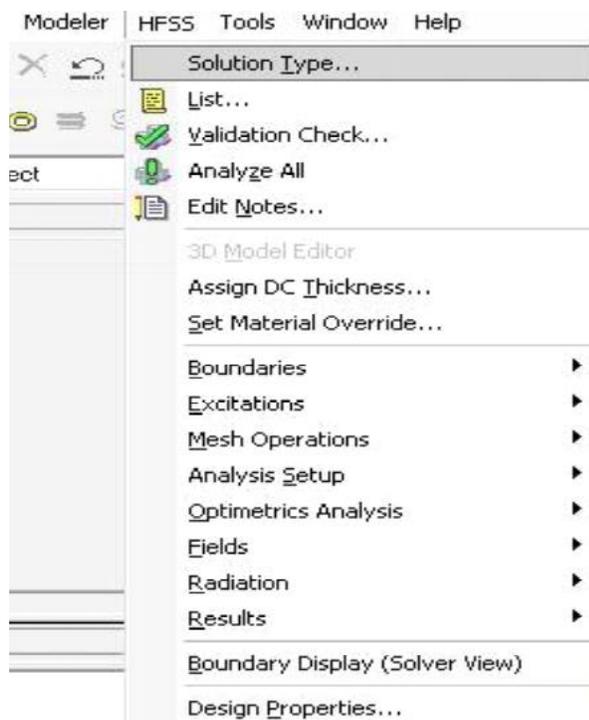
## ➤ **Modeler/3D Modeler :**

On trouve boolean (fusionner deux objets), unité a utilisée (mm,cm,km...), mesures (mesurer les distances), coordinate system (les coordonnées à utilisés)

- mode analysis :(analyse les propriétés et les performances des objets, des surfaces).
- Coordinate system : nous permet de changer le système des coordonnées dans lequel on va travailler.
- Units : choisir l'unité de mesure (in,mm,cm,...)



**HFSS :** contient les fonctionnalités principales :



➤ Solution Type (type de la solution):

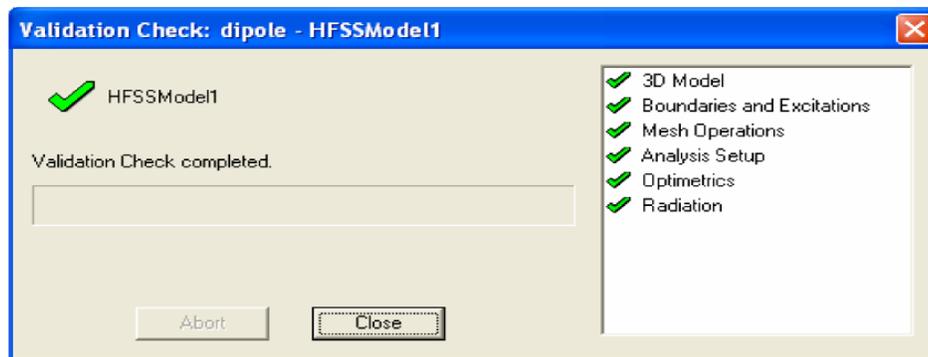
- Driven Modal : calcule des paramètres S, les solutions de la matrice S seront exprimées en termes de puissance incidente et réfléchie.

- Driven Terminal : calcule les paramètres S de ports multiconducteurs de la ligne de transmission.

Les solutions de la matrice S seront exprimées en termes de tensions et des courants aux bornes.

- Eigenmode : calcule les modes propres, ou de résonances d'une structure. La solution des modes propre retourne les fréquences de résonance de la structure et les champs à ses fréquences de résonance.

- Validate :  (compiler le projet) si tout est bon la fenêtre ci-dessous apparait :



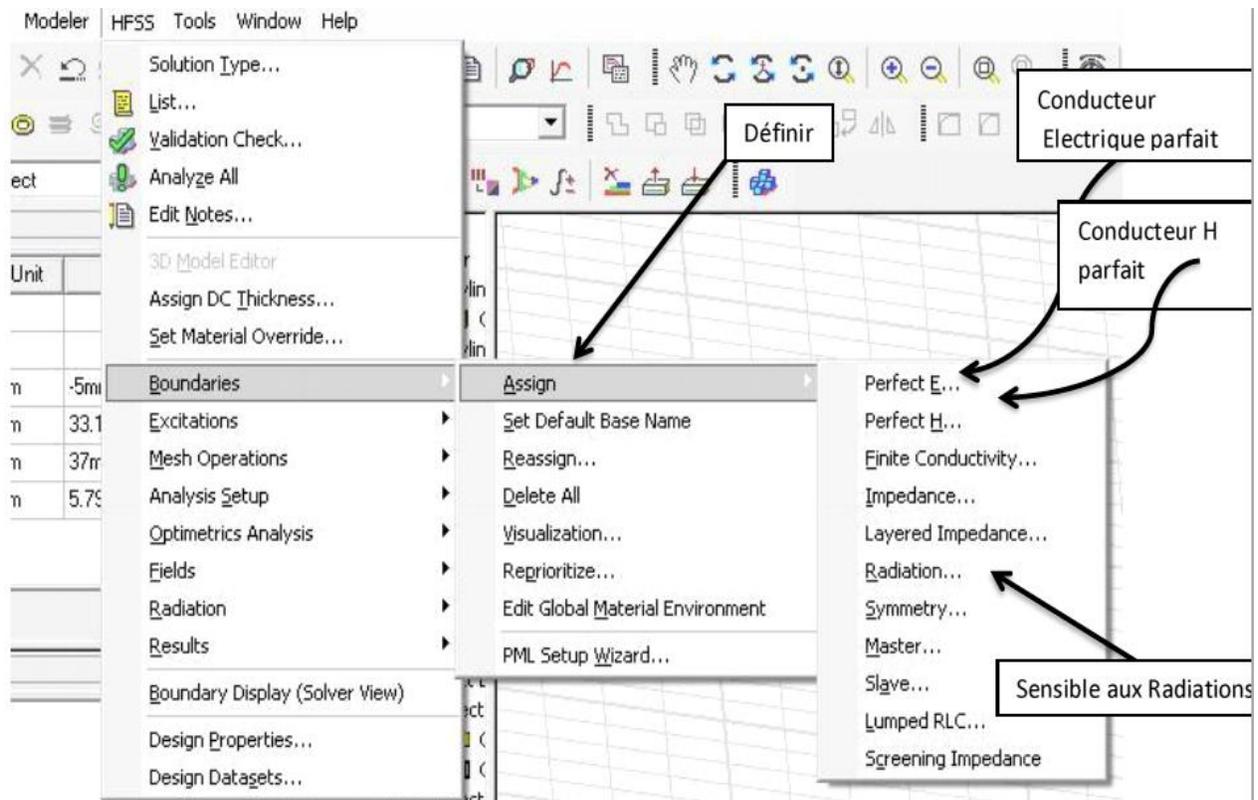
Pour voir s'il ya des erreurs ou des warnings veuillez consultez le message manager qui se trouve en bas de la fenêtre.

- Analyze all :  ça prendra de 5-20min pour faire l'analyse ça dependra de votre machine.

Une barre de progression va paraitre en rouge à la fin de l'analyse vous aurez ce message :

....  Normal completion of simulation on server: Local Machine.

## Boundaries (conditions aux limites)



✚ Perfect E : également appelé conducteur parfait ce type de limite le champ électrique est perpendiculaire à la surface. Il y a également deux affectations définissant un conducteur automatiquement parfait.

- Toute surface de l'objet qui touche le fond est automatiquement définie comme une limite parfaitement conductrice et donné le nom de condition aux limites extérieures.
- Tout objet assigné par un matériel PEC (Perfect Electric conductor) il est automatiquement attribué à la condition aux limites électriquement parfait.

✚ Perfect H : est un conducteur magnétiquement parfait, il est tangentiel à la surface du champ E.

✚ Finite Conductivity : limite de conductivité finie, vous permet de définir la surface d'un objet comme un conducteur avec perte (imparfait).

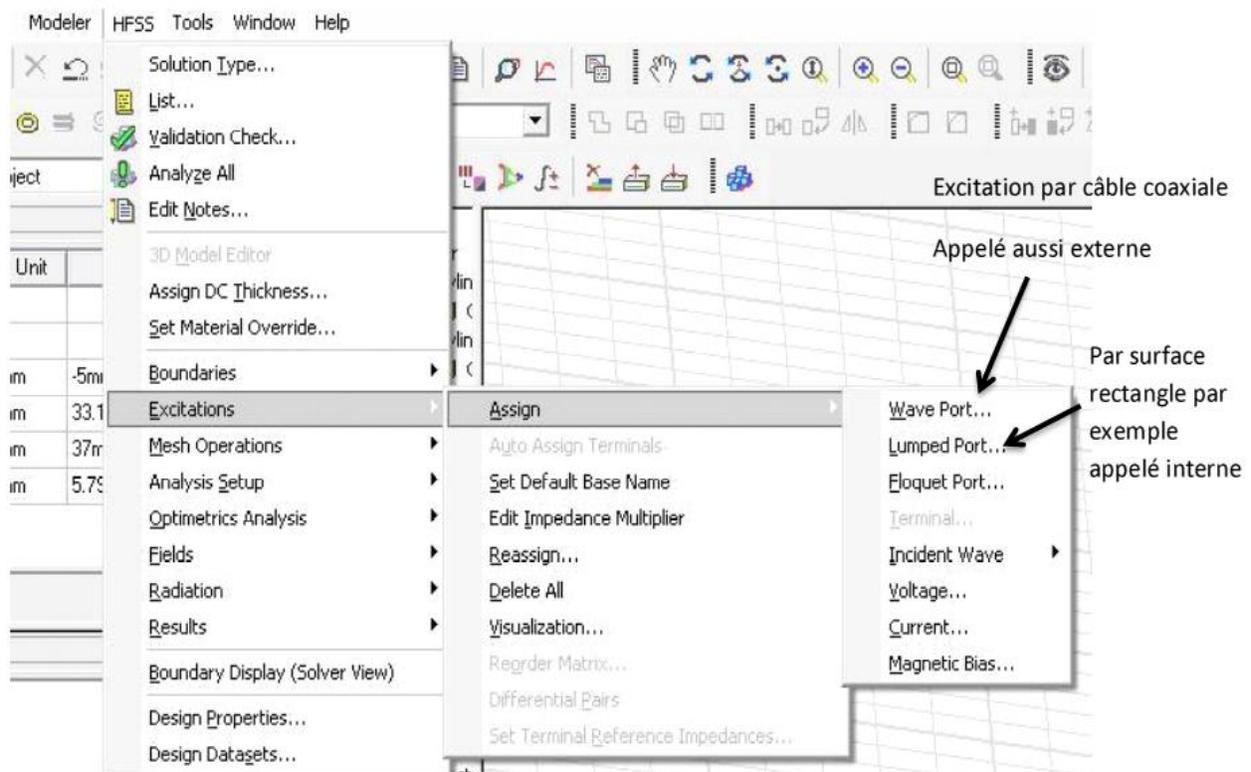
✚ Impedance : surface résistive qui calcule le comportement des champs et des pertes en utilisant des formules analytiques( $R_s + jX_s$ ). Avec  $R_s$  : résistance,  $X_s$  : réactance.

✚ Layered Impedance : plusieurs couches minces dans une structure peuvent être modélisées comme une surface d'impédance.

✚ Lumped RLC : une combinaison en parallèle des résistances localisées, inductance, et /ou de la surface du condensateur, la simulation est similaire à celle d'une impédance.

✚ Radiation : limites de rayonnement, aussi appelé frontières absorbantes, vous permettent de modéliser une surface électriquement ouverte: ondes peuvent alors sortir de la structure et s'arrêter vers la limite du rayonnement.

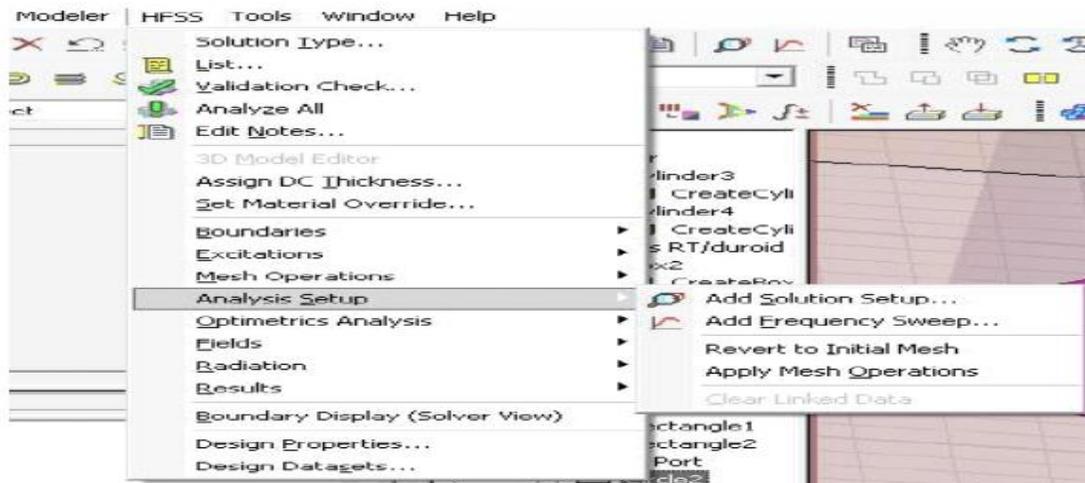
## ➤ Excitations



### • Wave Port /Lumped Port:

Les ports d'ondes ont pour rôle d'indiquer la zone où l'énergie rentre et sort du conducteur comme une alternative à l'utilisation de port d'onde (wave port) et vous pouvez appliquer ports localisés (Lumped port) à une structure, il applique une excitation interne utile au sein d'une structure.

➤ Analyze Setup: les conditions d'analyse notamment la fréquence et son intervalle d'utilisation.



- Add Solution Setup :

Fréquence d'utilisation

Le nombre de calcul du  $\det S$  pour avoir la convergence de la méthode

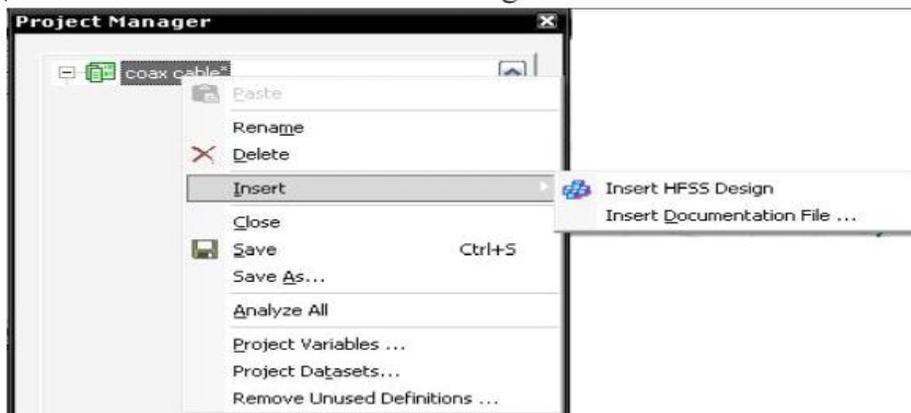
Le seuil du calcul  $\det$  jusqu'à quel valeur du déterminant en arrêt

## III -5.Comment créer un projet

Chaque projet passe de trois étapes essentielles :

- + Création et configuration initial
- + Dessin du model
- + Compilation et visualisation des résultats

**1-Création du projet** file>> new, insertion du HFSS design pour cela clique droit sur le projet et sélectionnez Insert>>insert HFSS design.



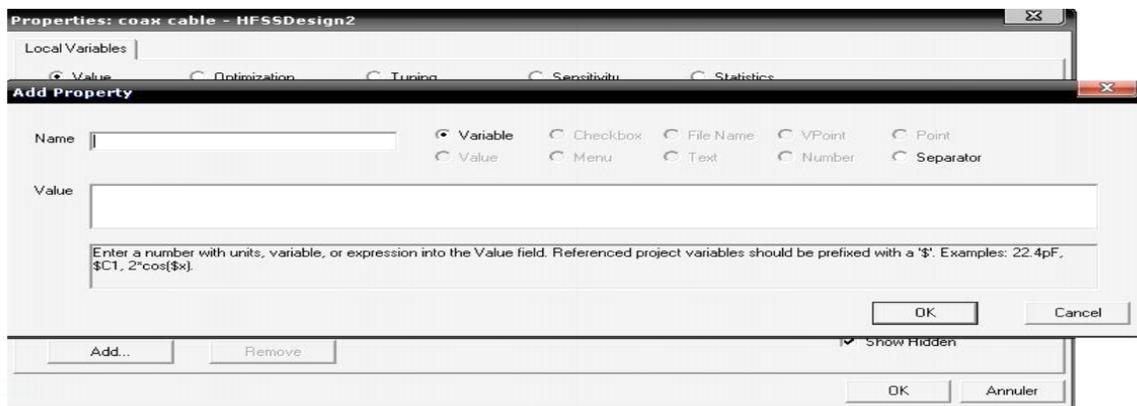
Enregistrer avant de commencer à dessiner dans n'importe quel dossier.

**2-Configuration initiale** : avant de commencer à établir le model il faut s'avoir d'avance la solution voulue (HFSS>>solution type) qui dépend de l'application pour cela il y a trois choix :

- Driven Modal
- Driven Terminal
- Eignemode

Unité de travail Modeler>>units (mm, in, nm...)

Et attribuer les variables qu'on va utiliser HFSS>>design properties:

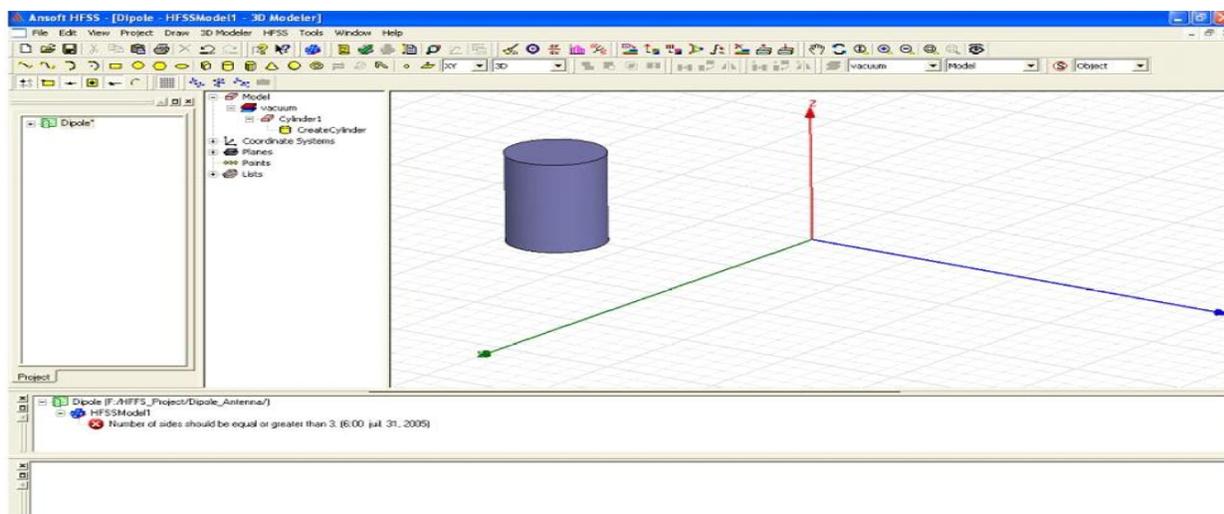


HFSS s'appuie sur des variables pour tout le paramétrage / optimisation au sein du projet. Les variables ont également de nombreux autres avantages qui les rendent nécessaires pour tous les projets.

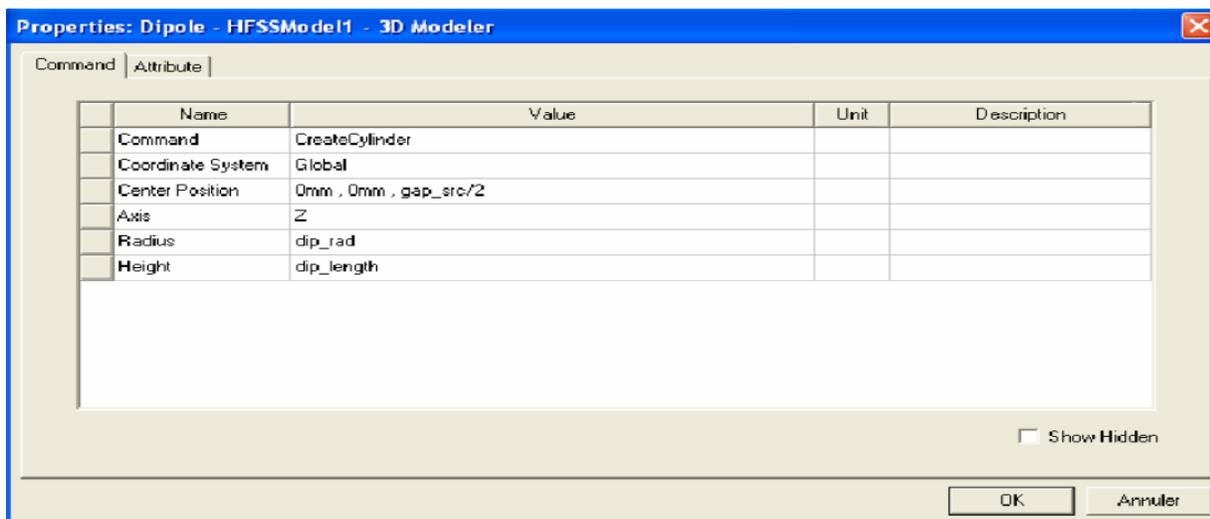
- Rapports fixes (longueur, largeur, hauteur) sont facilement maintenus en utilisant des variables.
- Optimetrics : utiliser des variables pour optimiser la conception selon les critères définis par l'utilisateur.
- Toutes les dimensions peuvent être rapidement changées dans une fenêtre.

**Dessin du model** : cette partie englobe la conception et le paramétrage du model :

Pour établir un model il faut aller à Draw>>choix du model

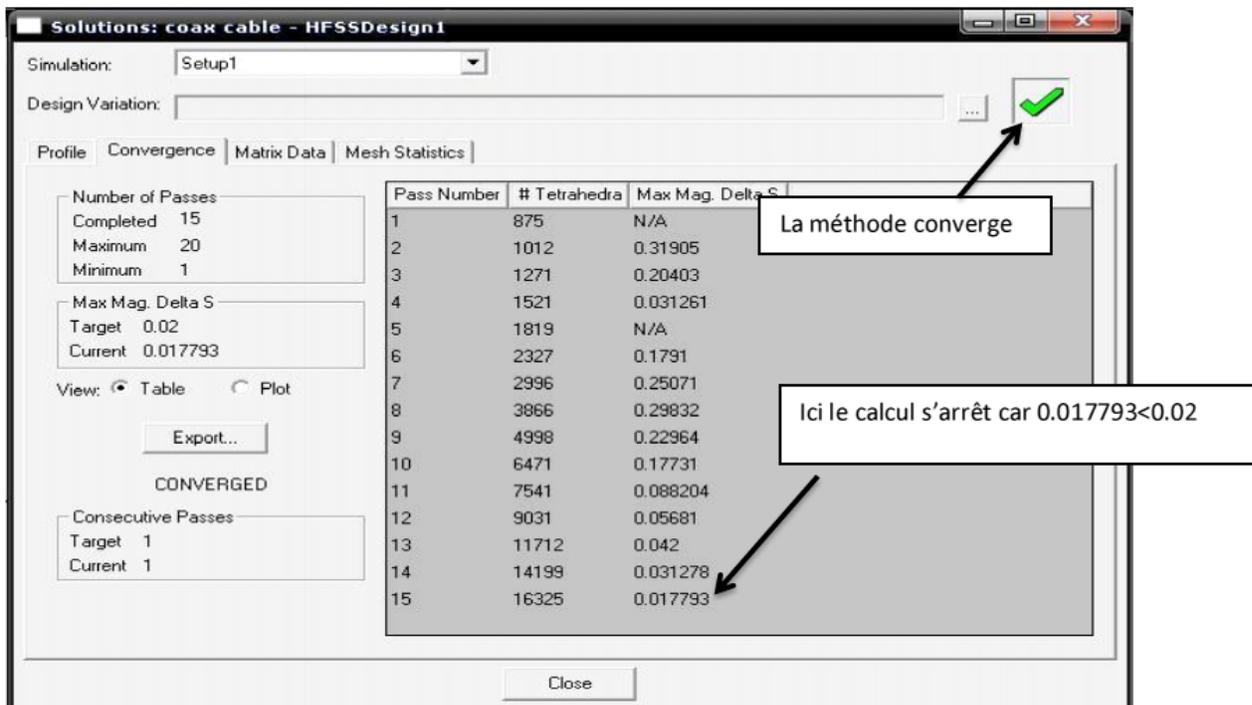


Paramétrage : chaque objet a ses propres paramètres modifiables :

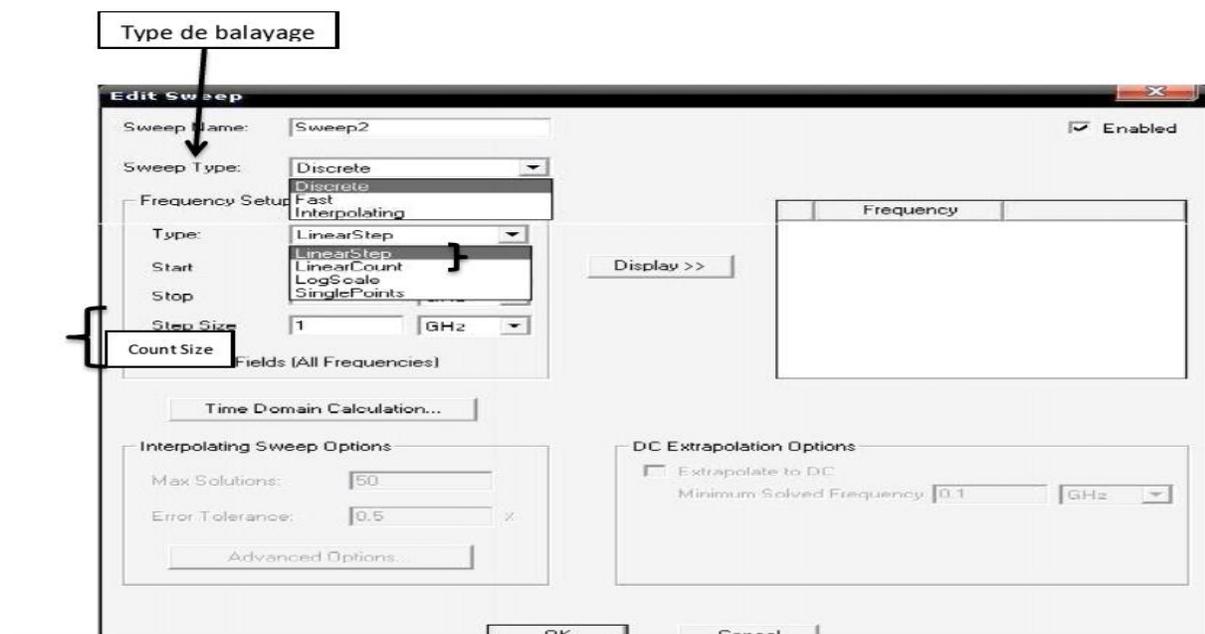
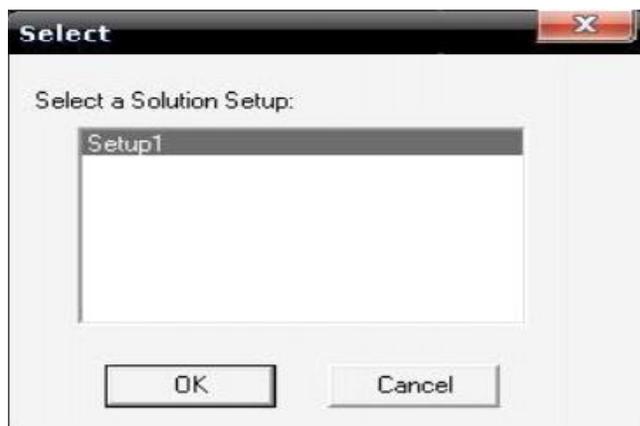


## Compilation et visualisation des résultats

Après avoir dessiné le modèle avec les conditions au bord et l'excitation il faut compiler et analyser le projet  puis il faut aller aux résultats cliquer droit sur results et choisir ce que vous voulez visualiser (diagramme de rayonnement, coefficient de réflexion, gain ...)  
Exemple :(HFSS>Results>Solution Data) :



- Add frequency sweep

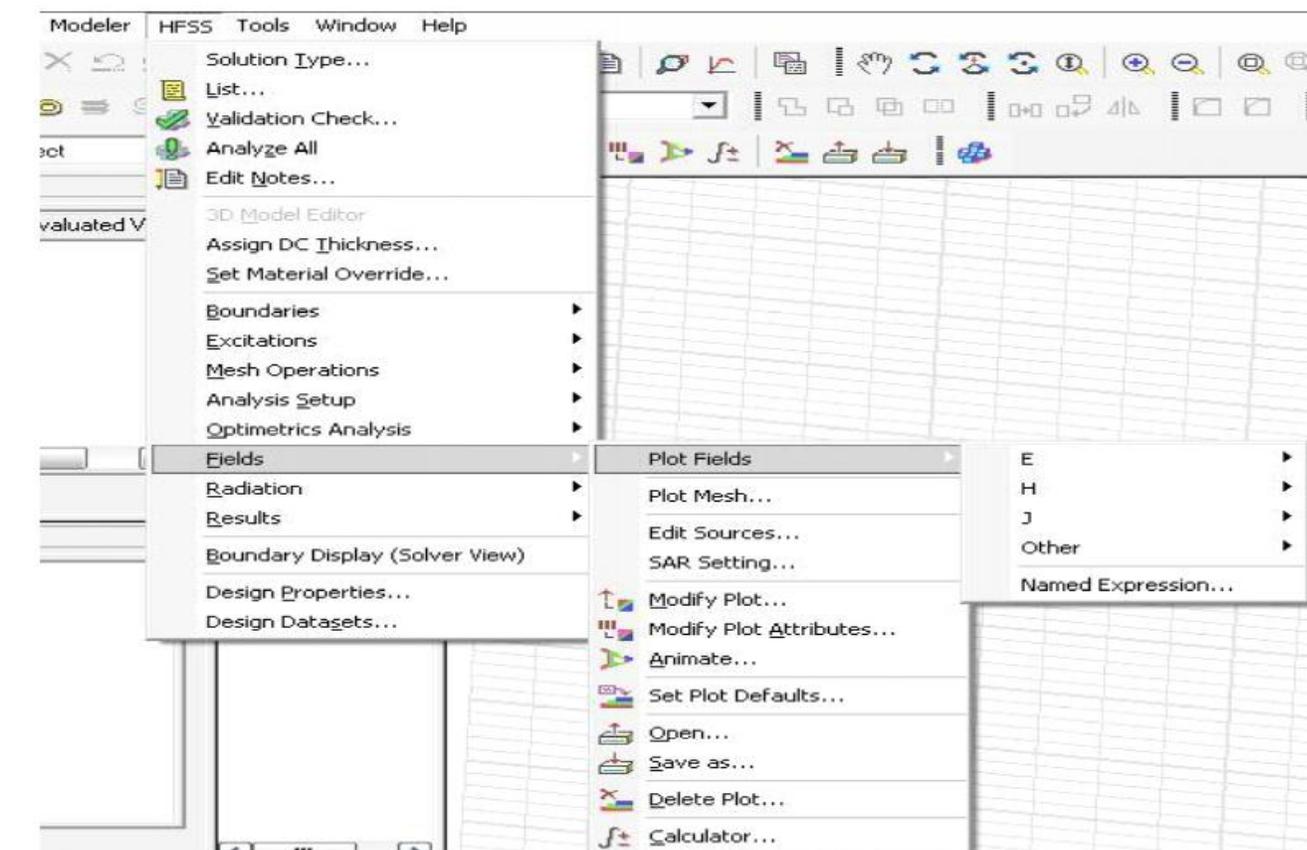


❖ Discrete : effectue une solution complète à toutes les fréquences en utilisant le maillage actuel, le temps requis est la fréquence à résoudre fois le nombre de points de fréquences ainsi que le champ peut être affiché à n'importe quelle fréquence dans la plage de balayage.

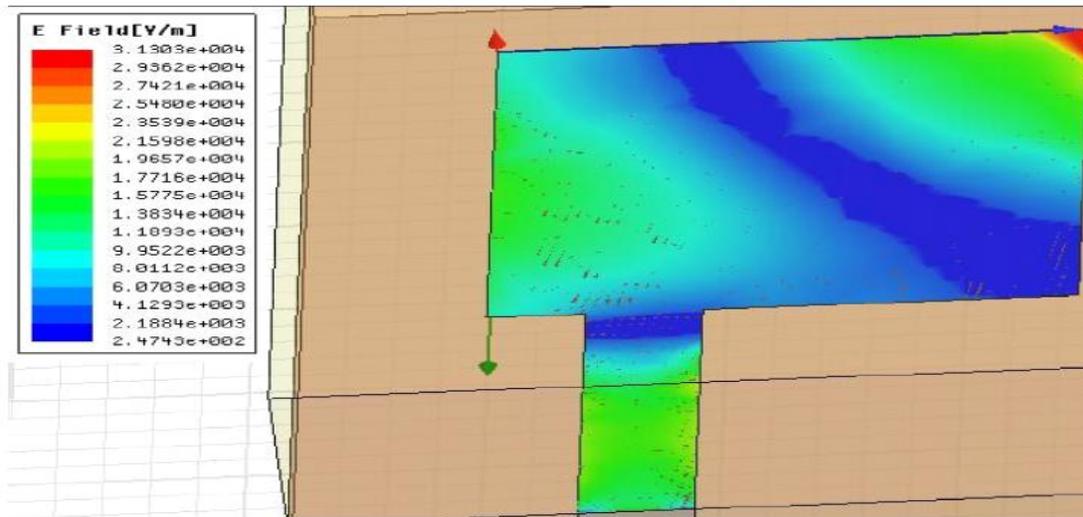
❖ Fast : extrapolé un ensemble d'informations dans une bande passante autour de la fréquence centrale. Le temps et la mémoire nécessaire pour résoudre un balayage de fréquences peut être beaucoup plus grand qu'une seule fréquence à résoudre.

❖ Interpolating : effectue une résolution à des points de fréquences discrètes qui sont adaptés par interpolation.

- ❖ Frequency Setup : la fréquence du travail.
- ❖ Linear Step: spécifier une plage linéaire des valeurs avec un pas constant.
- ❖ LinearCount : spécifier une plage linéaire des valeurs.
- ❖ Star et Stop : Désigne l'intervalle de fréquence afin de calculer les fréquences de résonance.
- Fields (visualiser le champ E et H le long du dispositif) :



Exemple : Représentation du champ Electrique d'une antenne patch :

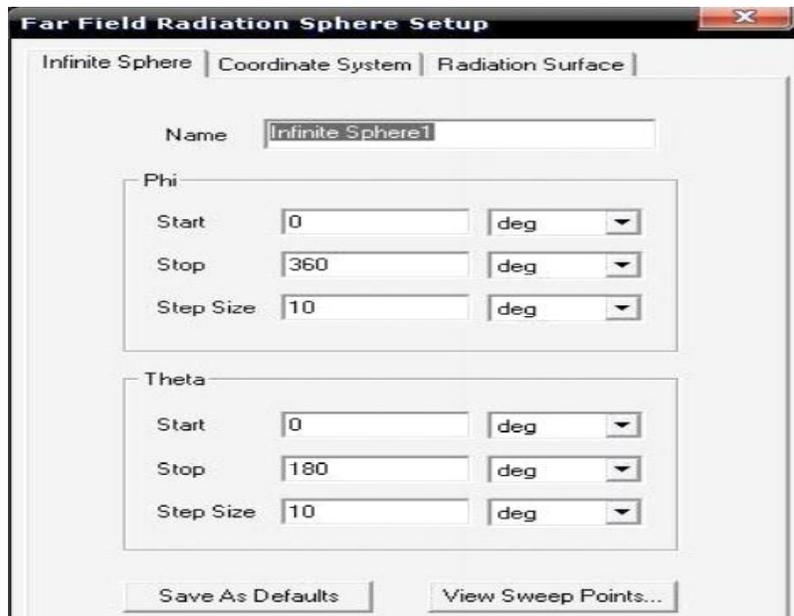


### ➤ Radiations

Définir la forme du champ proche (Near field) (ligne ou sphère) ou du champ lointain (Far field) (sphère),

Cette partie est consacrée au calcul des paramètres d'une antenne qui nécessite une configuration particulière de calcul pour déterminer la région au cours de laquelle les champs doivent être calculés :

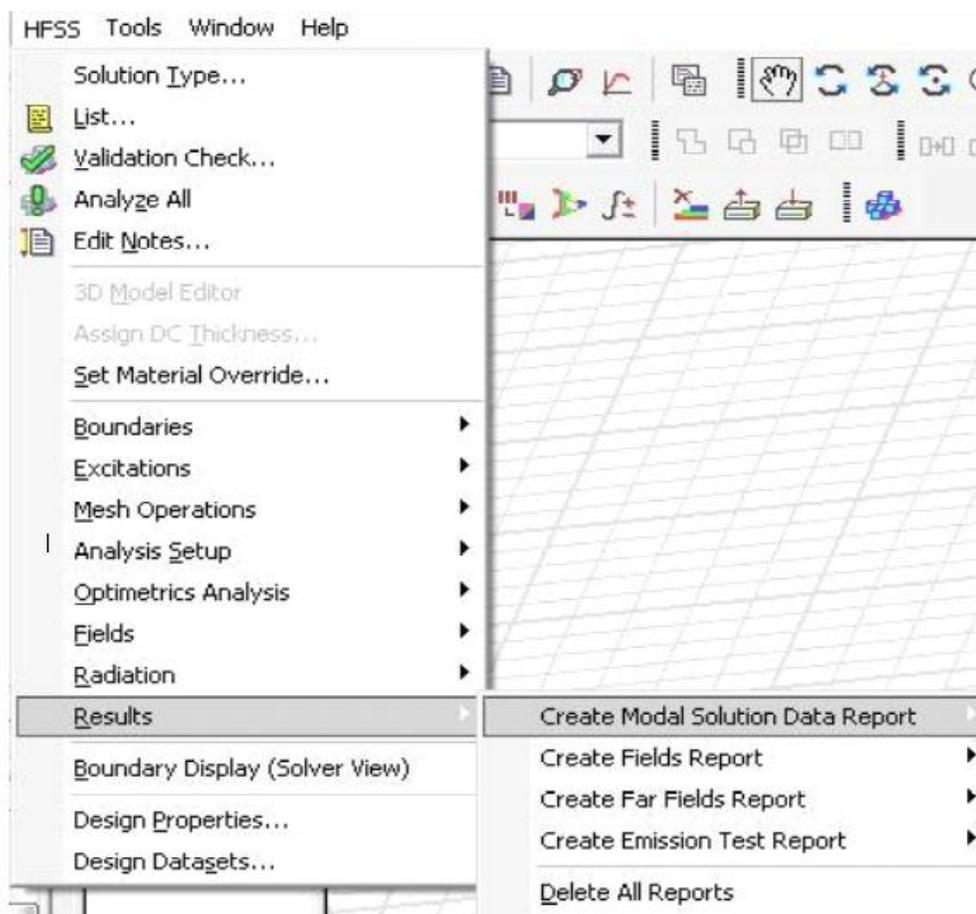
Sélectionner HFSS>>Radiation>>Insert Far Field Setup>>Infinite Sphere



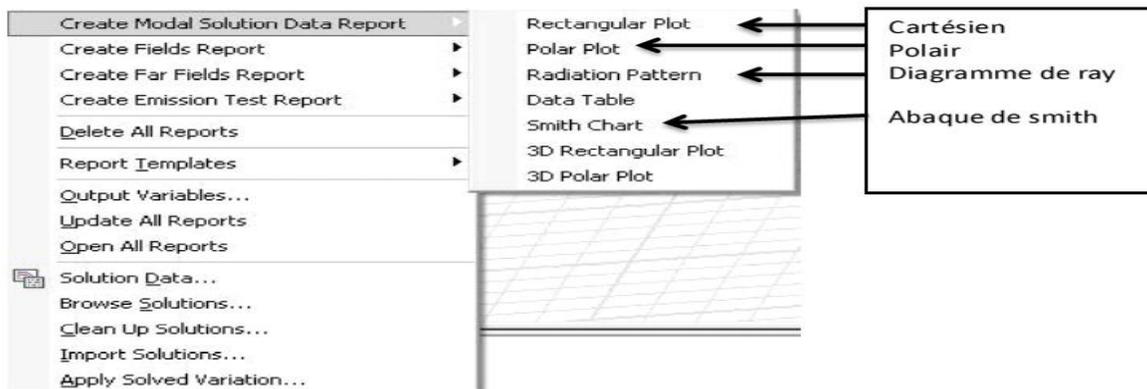
Entrez les valeurs et le pas à suivre pour theta et Phi.

## ➤ Résultats

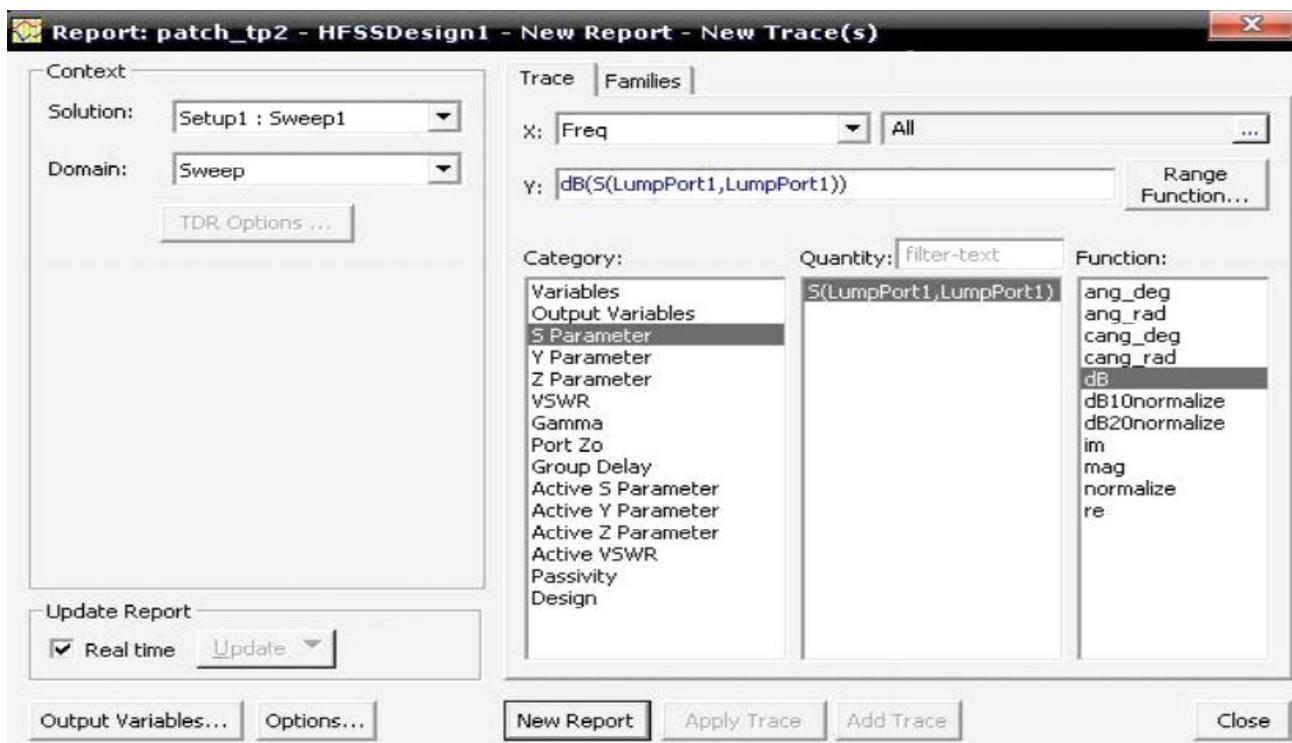
C'est la rubrique la plus intéressante parmi toutes les fonctionnalités du HFSS, Les données de traçage peuvent prendre diverses formes. Le format le plus souvent utilisé est le Tracé cartésien en 2D, mais nous avons aussi la possibilité de tracer en 3D.



- Create modal Solution Data Report : cette partie est consacré pour l'affichage ou la visualisation des paramètres de l'antenne en 2D ou 3D (S, Y, Z, TOS, Gamma...).



Prenons l'exemple de rectangular Plot : pour visualiser il suffit de choisir le paramètre et son unité (db, re, im, ang...) et cliquer sur New Report.



⚡ Remarque : les paramètres S avec un seul port indique le coefficient (que S11) de réflexion ce qui est fortement lié à la fréquence de résonance.

$$TOS = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \text{ et } \Gamma = S_{11} \text{ en général alors } TOS = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|}$$

Or  $S_{11}$  dépend de la fréquence et TOS, alors on cherche dans l'allure les points où le TOS est minimale ce qui signifie le maximum d'énergie transmise.

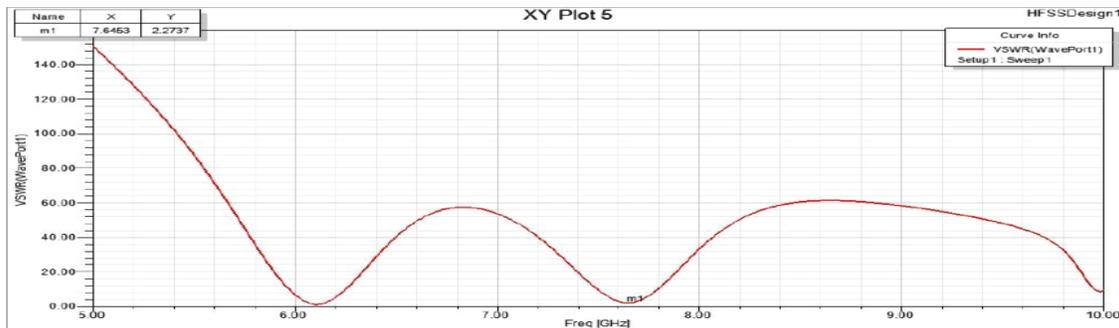
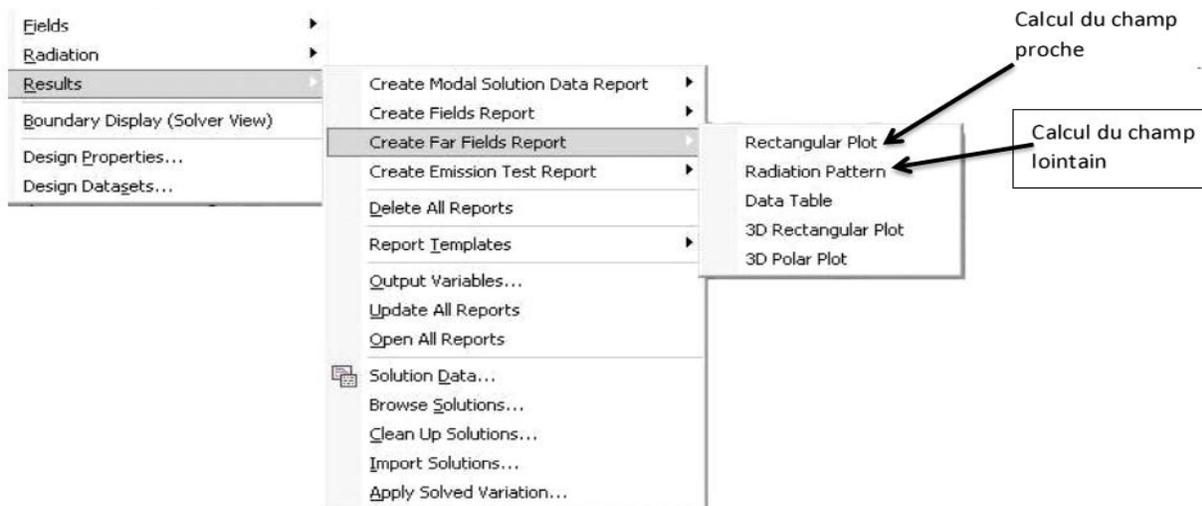


Figure 1: Représentation du VSWR(TOS) en fonction de la fréquence.

▪ Remarque : m1 point où aura lieu la fréquence de résonance.

Create Fields Report/Create Far Fields Report:



Dans les ondes électromagnétiques, chaque paramètre dépend de  $R, \theta, f$  donc il faut définir le champ lointain sous forme d'une sphère HFSS >> Radiation >> Insert Far Field Setup >> Infinit Sphere

Exemple Create Far Fields Report >> Radiation Pattern:

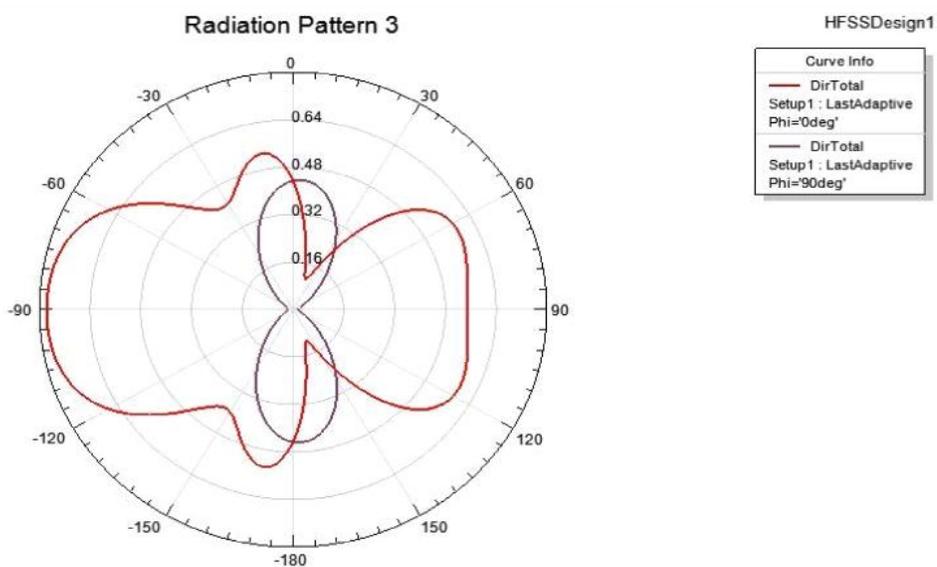
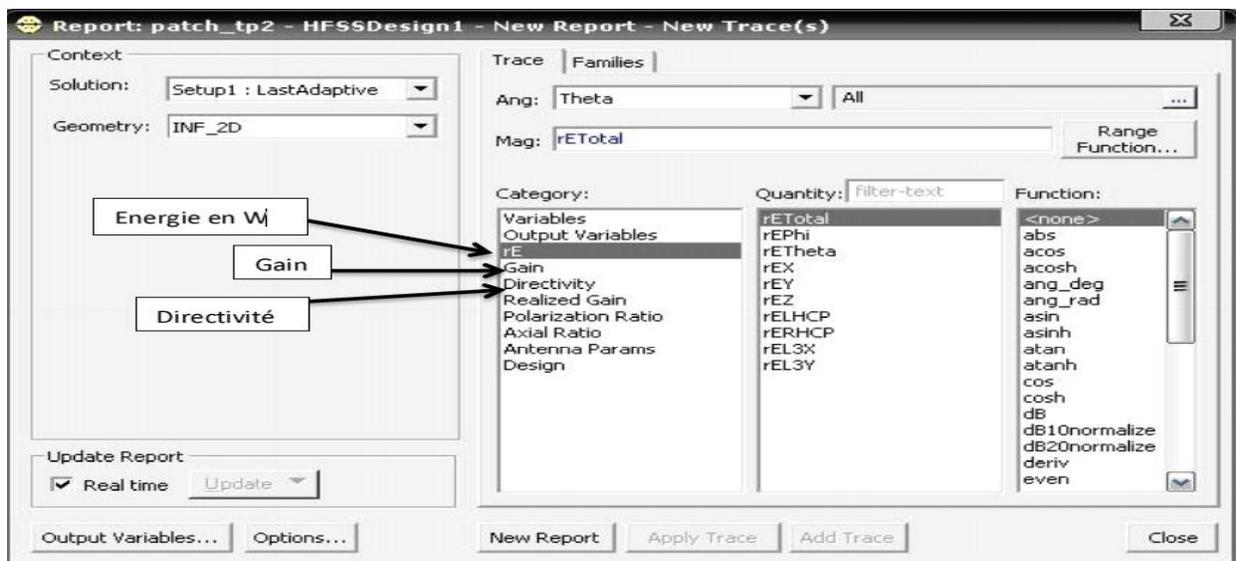


Figure 2 : Le diagramme de rayonnement de la directivité en  $\Phi=0^\circ$  et  $\Phi=90^\circ$

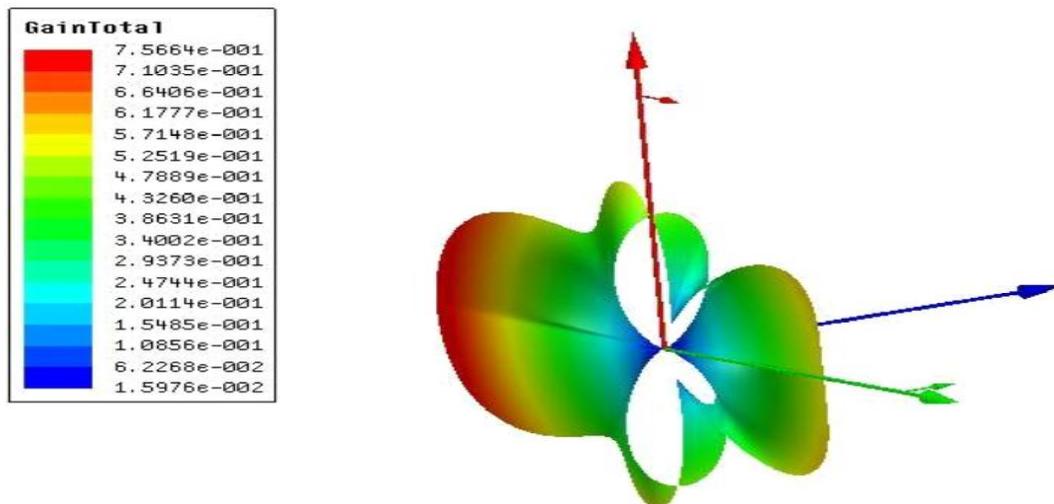


Figure 3: Représentation 3D polar du Gain en  $\phi=0$  et  $\phi=90$

### III- 6.conclusion

Nous avons vu brièvement comment utiliser le logiciel HFSS, descriptions des outils générales : barre d'outils, barres des menus, fenêtre, Manager des projets ou toutes les rubriques sont classées par ordre d'exécution, ce qui simplifie la procédure de la conception du modèle au assignements des conditions aux limites, et l'attribution des excitations, contient aussi une rubrique analyse pour analyser la configuration l'icône résultat d'où on peut créer les rapports et les affichés sur la fenêtre des modèles. Après cette description nous serons aptes à réaliser nos projets c'est ce que nous verrons dans le quatrième chapitre.

# Chapitre IV

## IV-1.Introduction

Dans ce chapitre nous allons voir en détail les étapes que nous allons suivre pour simuler. On prend pour exemple l'antenne dipôle, l'antenne patch triangulaire alimenté par une ligne microruban, l'antenne patch alimenté par un câble coaxial, RDA l'antenne à résonateur diélectrique, et l'antenne cornet. Ces exemples permettront d'illustrer à la fois la simplicité et la puissance de HFSS par la construction et la simulation de ces structures d'antennes. Les notes suivantes sauront fournir un bref résumé des objectifs:

Navigation générale des menus du logiciel, barres d'outils et touches rapides.

Affectation des variables.

Vue d'ensemble des commandes utilisées pour créer des structures.

Une bonne conception et mise en œuvre de limites.

Configuration de l'analyse.

Création rapports et visualisation des résultats (obtenir un diagramme de rayonnement, calcul des paramètres s, y, z et des graphes qui nous aide à déterminer la valeur exacte de l'impédance d'entrée pure...).

## IV -2.Antenne dipôle

L'antenne dipôle est couramment utilisé pour la radiodiffusion cellulaire ; Les téléphones et les communications sans fil en raison de leur propriété omnidirectionnelle.

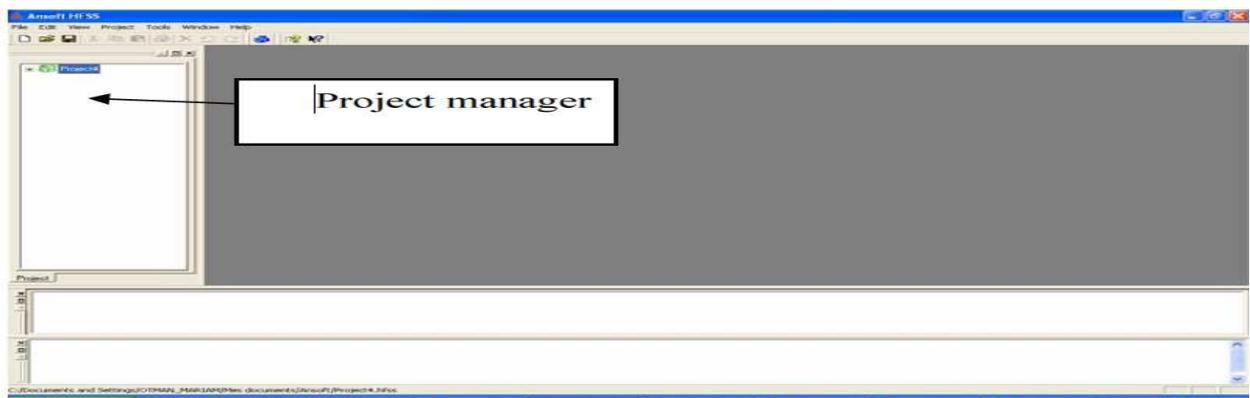
### IV -2-1. HFSS starting

Clique sur HFSS 11 

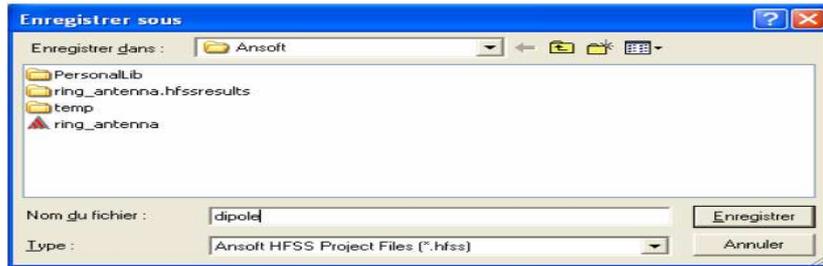
Ou Double-clique sur l'icône HFSS 11 sur le Bureau Windows.

### IV -2-2. Création du projet

Premier lancement de HFSS Simulator.



De la fenêtre du gestionnaire de projet. Cliquez-droit sur le fichier de projet et Enregistrer sous le nom dipôle.

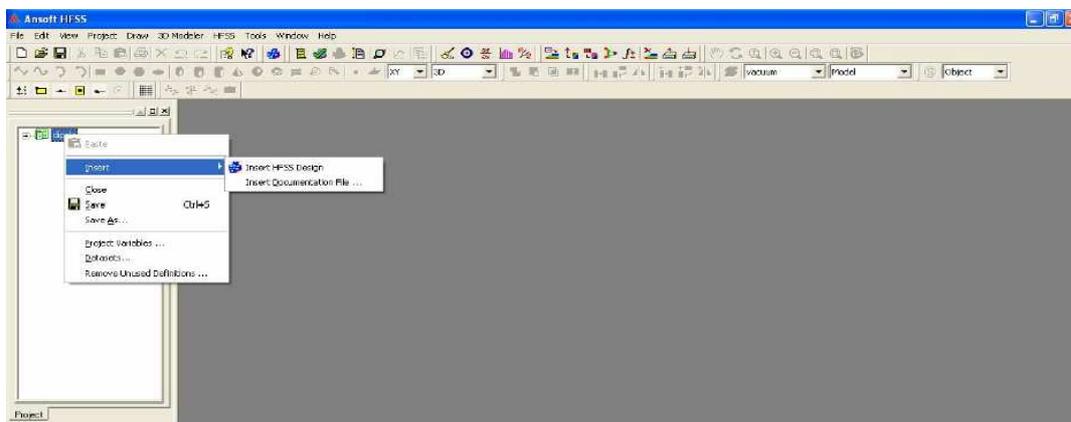


### IV-2-3. Travailler avec les géométries

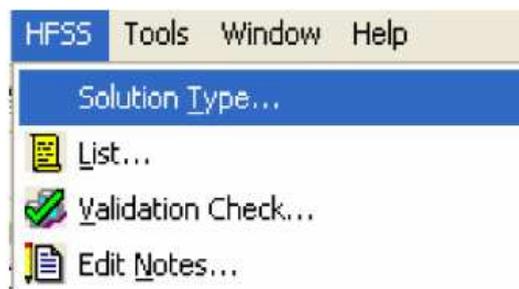
Pour commencer à travailler avec les géométries.

Nous devons insérer une conception HFSS. Cliquez-droit sur le fichier de projet

> Insert HFSS design du menu.

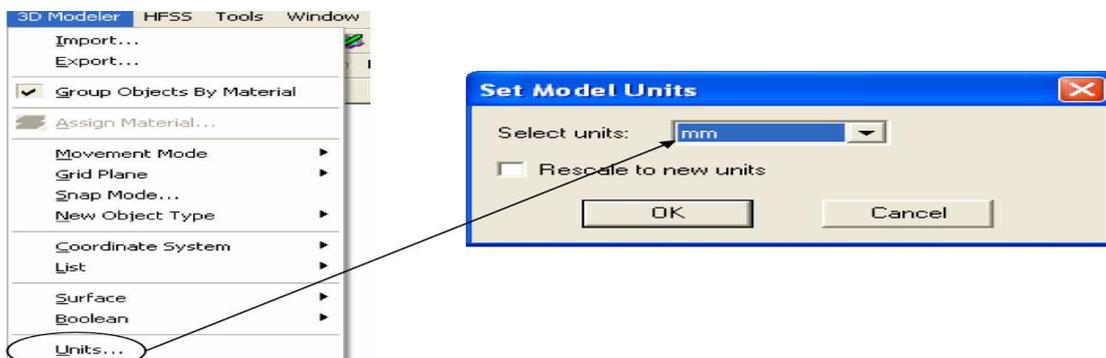


En raison de la nature de cette conception, nous allons utiliser Driven Modal comme type de solution. Dans le menu HFSS select solution type puis Driven Modal.

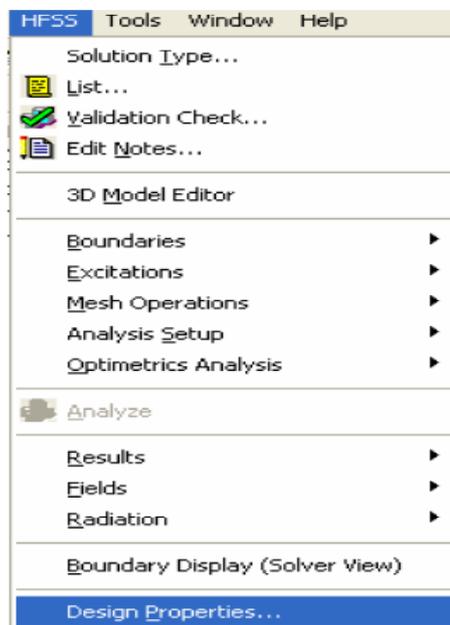




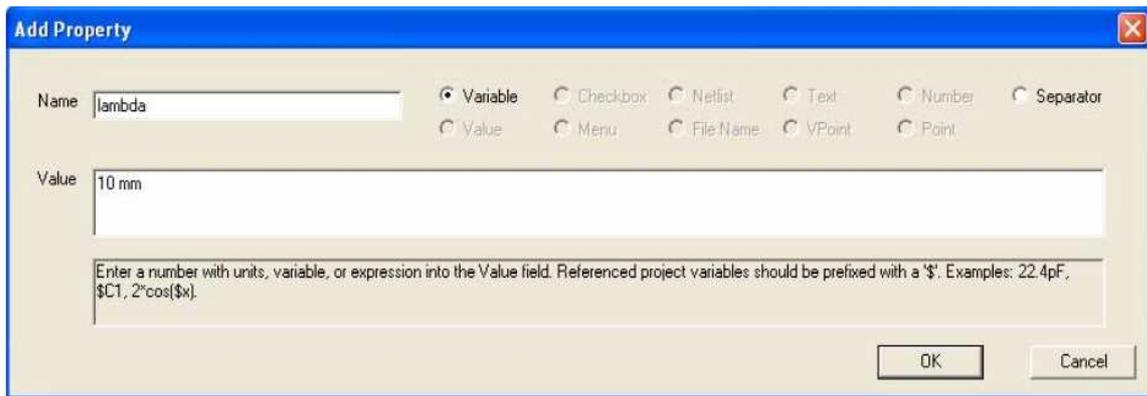
Les unités sont choisies en mm en choisissant la rubrique 3D modeler et units du menu.



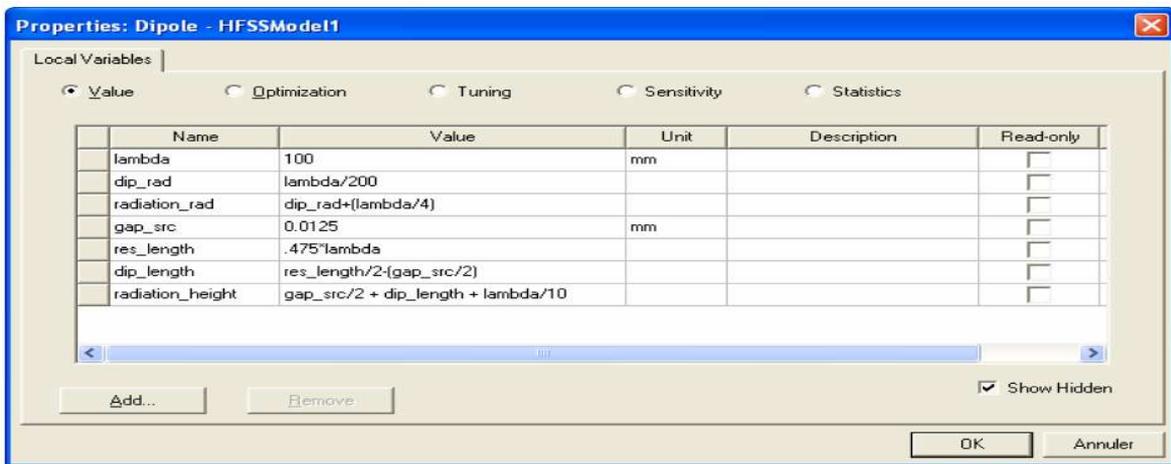
Clique sur la rubrique HFSS et on sélectionne Design properties au bas du menu.



Et ça va entrainer l'ouverture d'une fenêtre appelée table des variables, ajouter les variables tels que la longueur, la hauteur, le rayon... en ajoutant une par une en cliquant sur add a chaque ajout et s'assurer de l'attribution des unités.

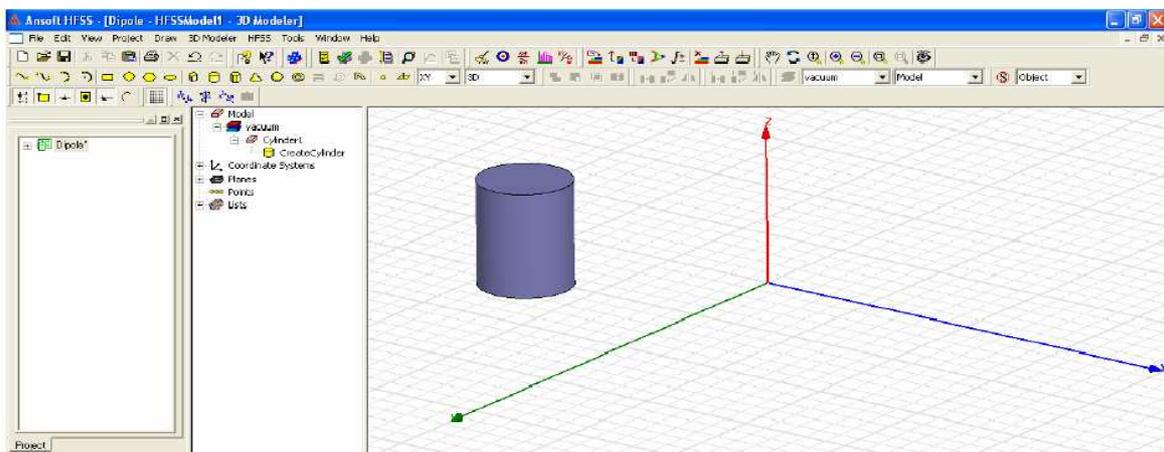


Dans cet exemple voici les variables à ajouter:

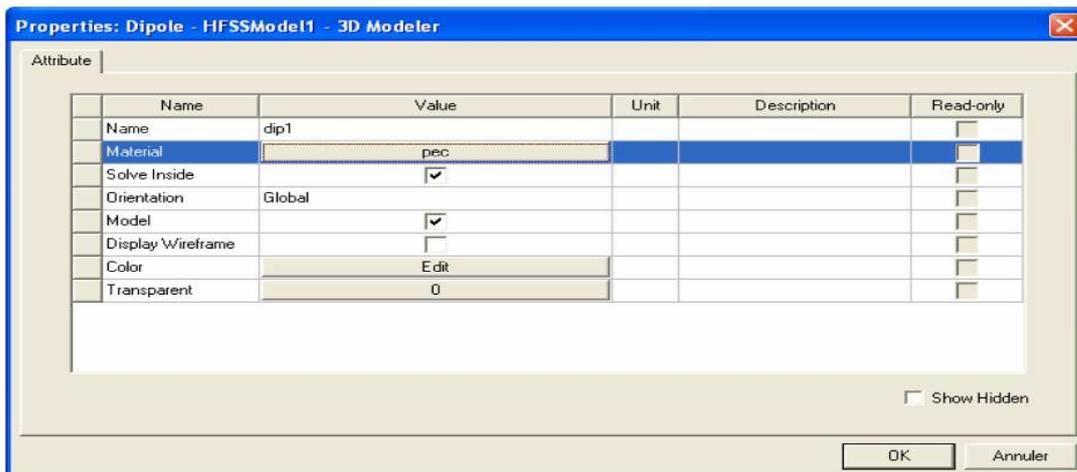
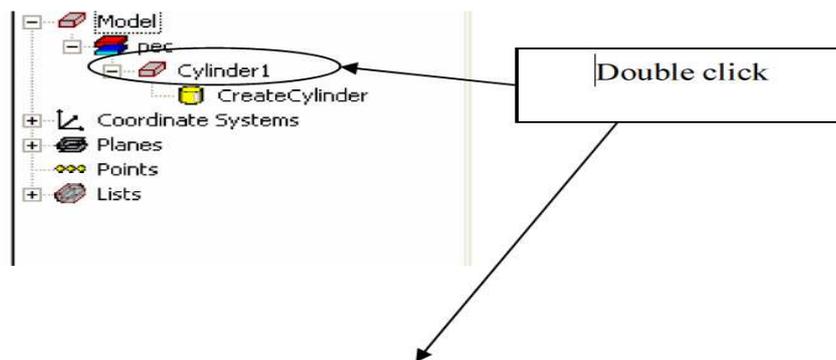
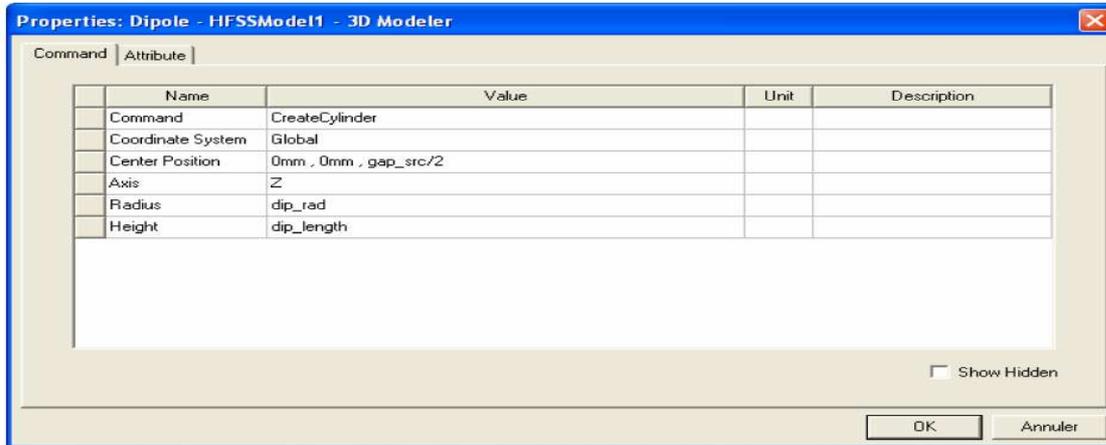


#### IV -2-4.Dessiner le dipôle

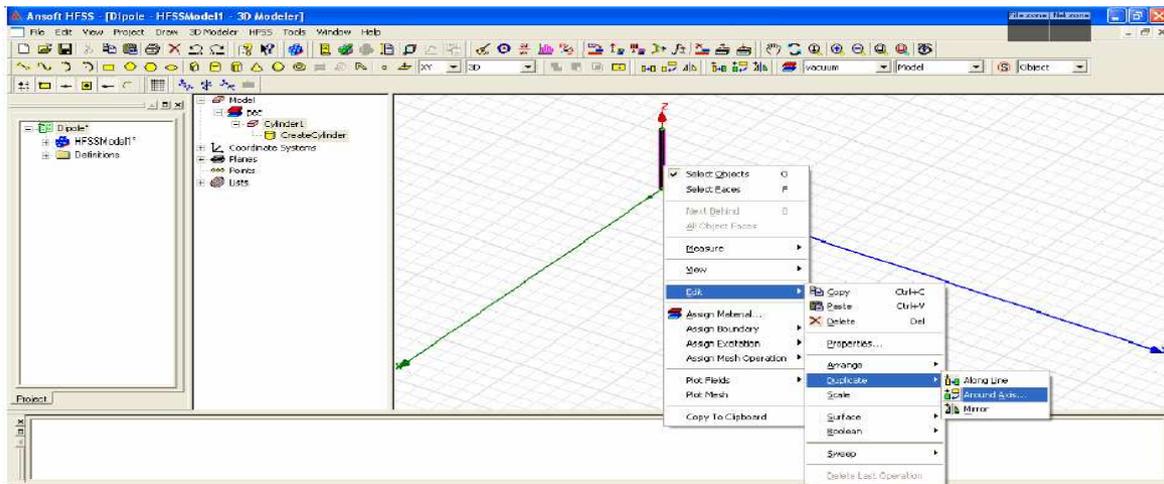
On commence par créer l'élément dipôle en cliquant sur Draw cylinder  de la barre d'outils :



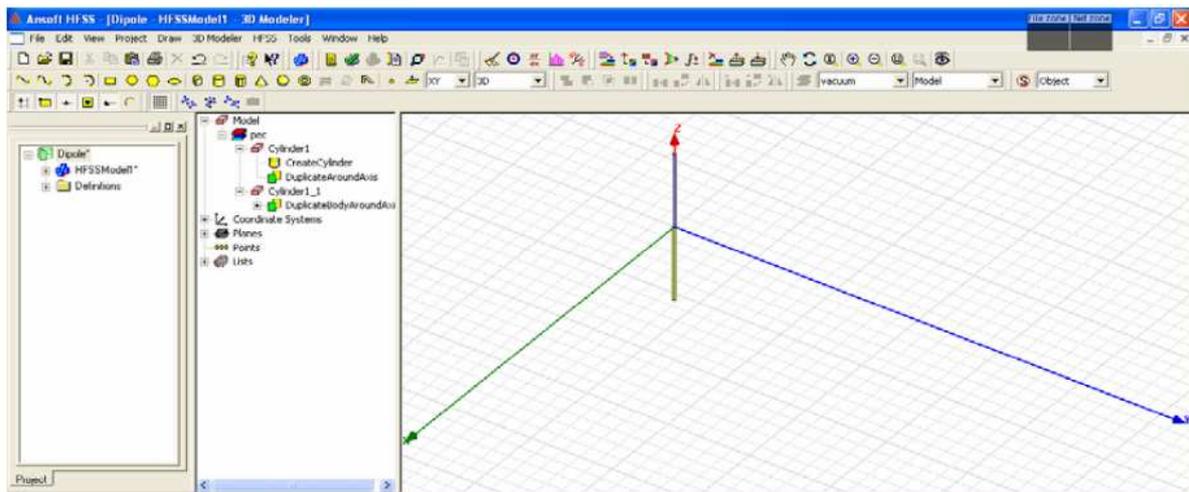
Par défaut la table des propriétés apparait une fois qu'on termine de dessiner l'objet, la position et la taille de l'objet peuvent être modifiés via cette table ainsi que sa couleur et sa transparence.



Nommé dip1, matériel PEC (Perfect Electric Conductor), clique sur OK  
 La prochaine étape est de construire la symétrie du dip1, pour faire cela clique-droit sur l'objet dip1 sélectionnez Edit -> Duplicate -> Around Axis.

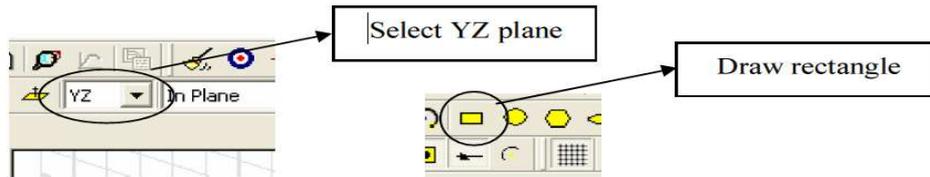


La structure du dipôle est illustrée ci dessous :

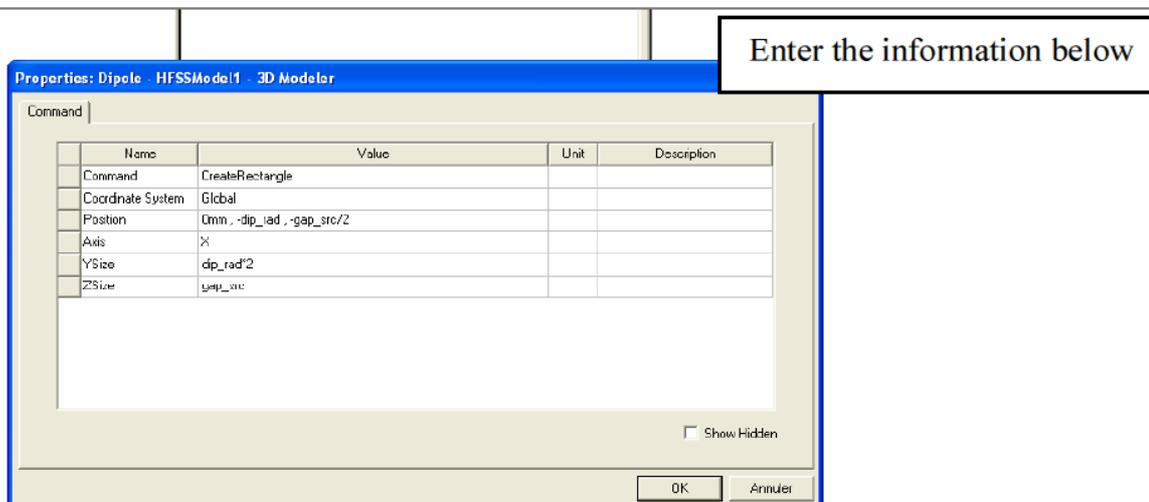
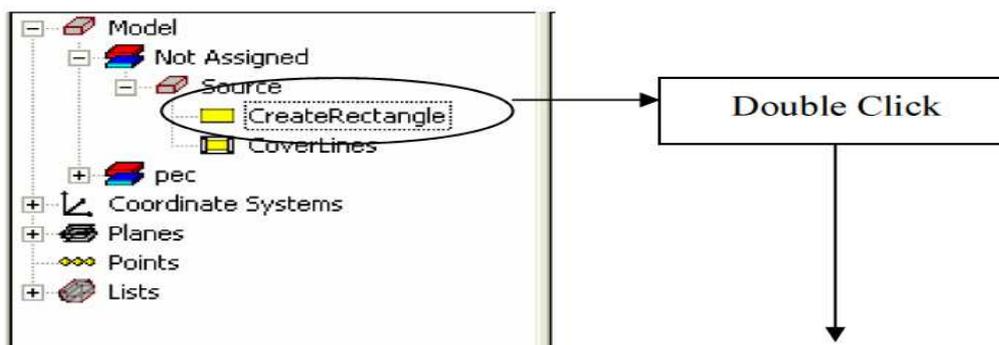
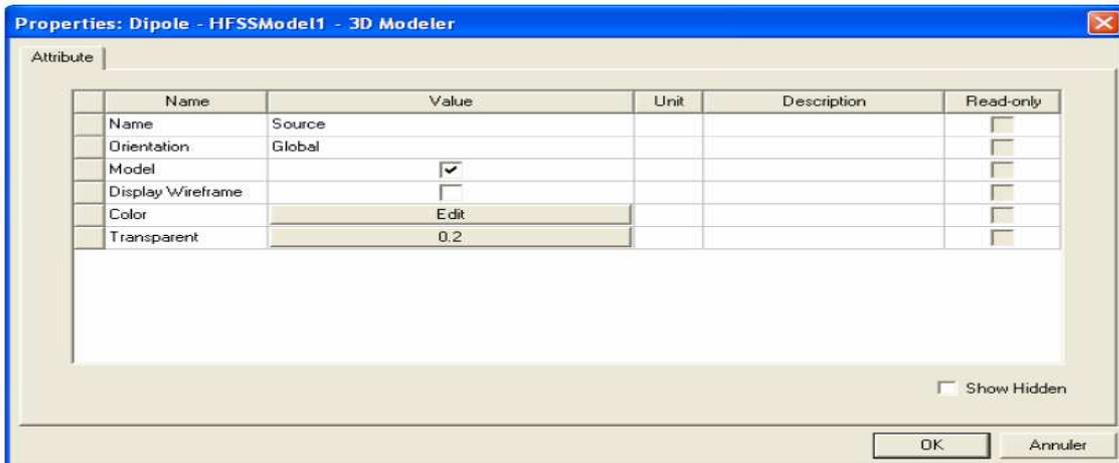


#### IV -2-5. Créer le port d'excitation

Dans cette section nous allons créer la source, pour cela nous allons exploiter le vide au milieu du dipôle pour assigner l'excitation. On sélectionne le plan YZ de la barre des outils, puis on clique sur Draw rectangle et choisir trois point arbitraires.

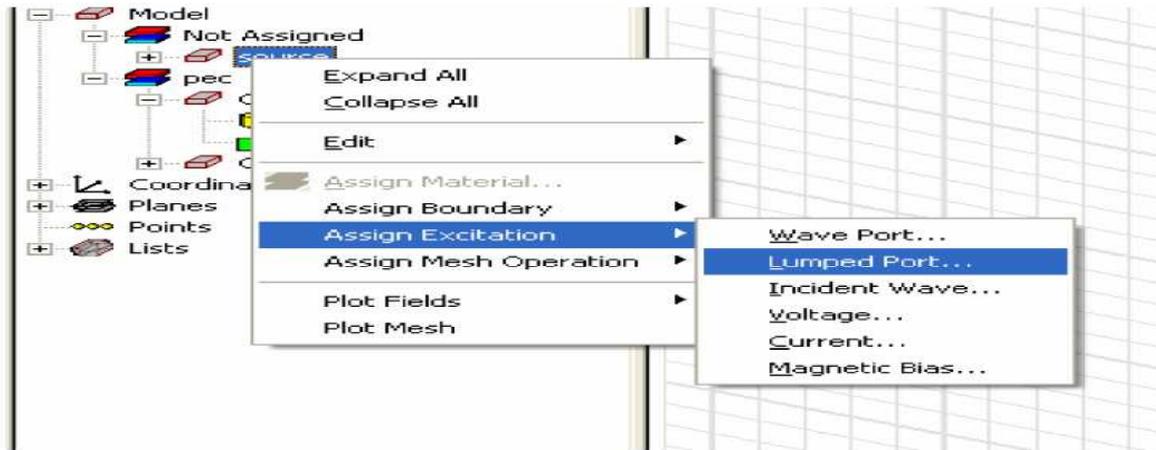


Insérer les informations suivantes :

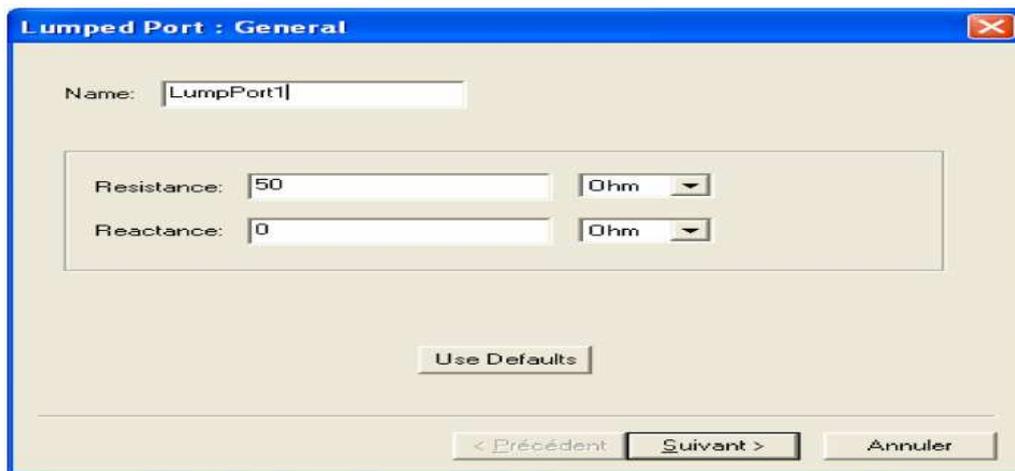


Puisque la source est en place, nous allons maintenant attribuer une excitation pour cela on utilise lumped port. Ce genre d'excitation est généralement utilisé lorsqu'on s'intéresse au champ lointain.

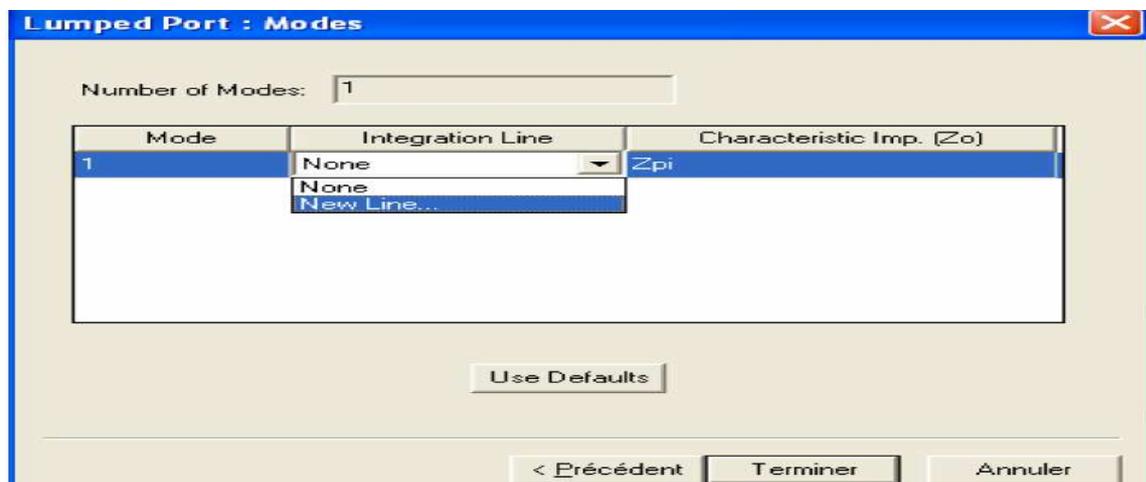
Sélectionnez la source cliquez Excitation -> Assign> Lumped Port :



Nommer le port source et laisser les valeurs de l'impédance par défaut :



Cliquez sur suivant et sur new line :



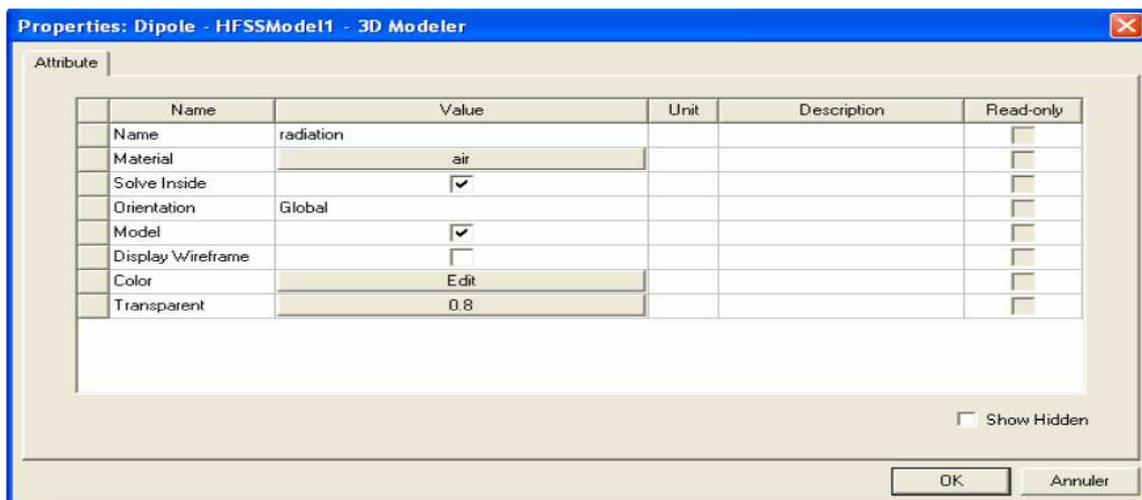
En utilisant la souris on positionne le curseur en dessous du centre on clique puis on place le curseur au dessus du centre, on clique pour terminer l'opération.  
 Pour visionner le résultat on clique sur la rubrique excitation dans le project Manager on aura ceci :

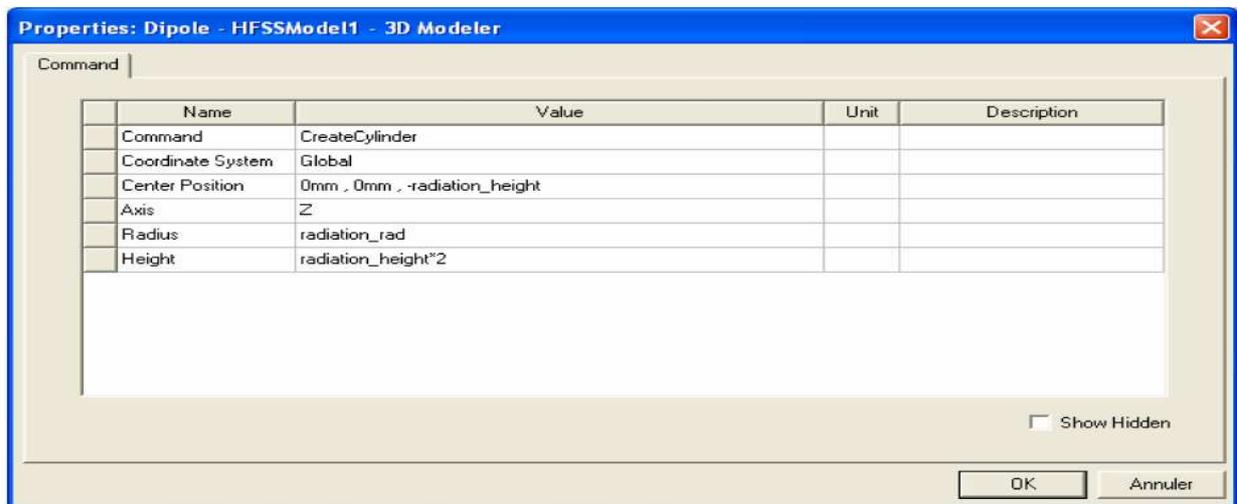


### IV -2-6. Attribuer les conditions aux limites (Radiation Boundary)

Dans cette section, une limite de rayonnement est créée afin que les informations du champ lointain pourront être extraites de la structure.

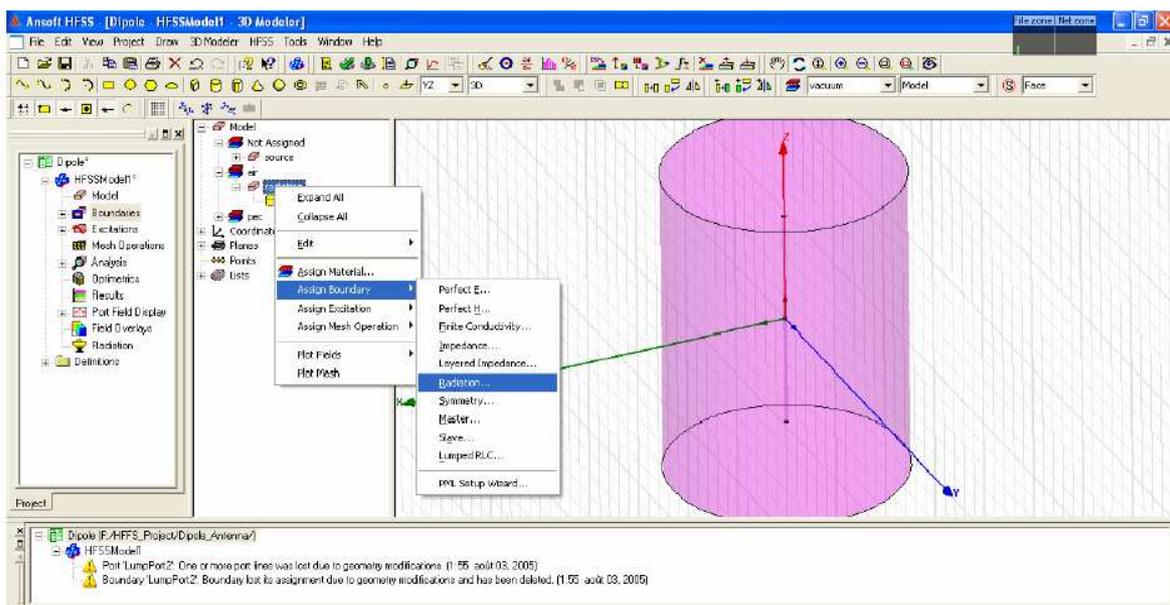
Pour obtenir le meilleur résultat on dessine un cylindre autour du dipôle avec une distance de  $\lambda/4$ . De la barre d'outils, Draw Cylinder.



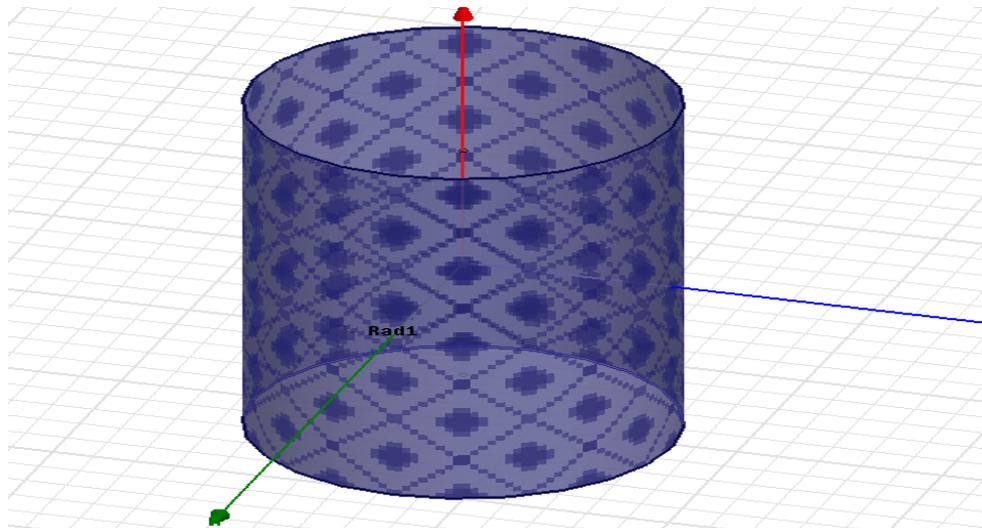


Avec la géométrie complète, la radiation peut être attribuée en sélectionnant toutes les faces.

Clique-droit sur radiation (radiation) > Boundary -> Assign -> Radiation :

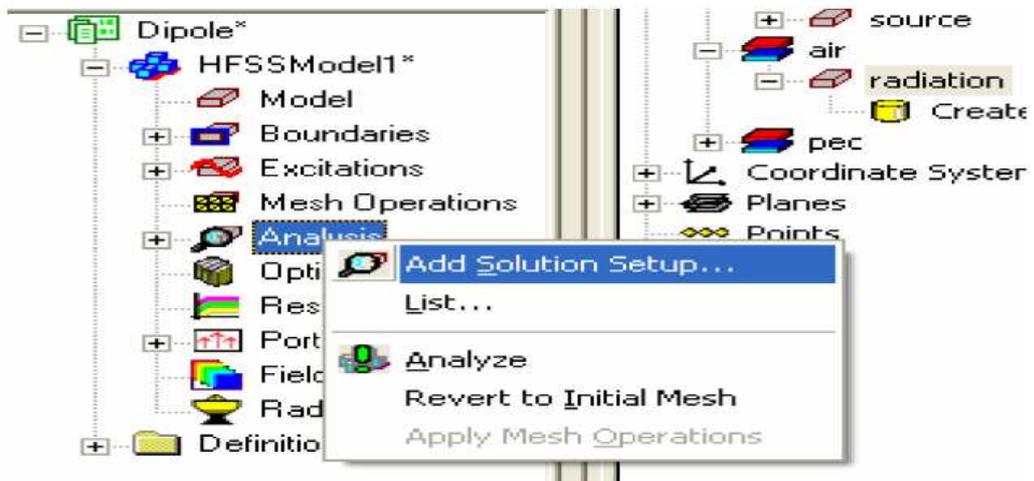


On laisse le nom par défaut rad1 et on clique sur ok  
 On obtient ceci :

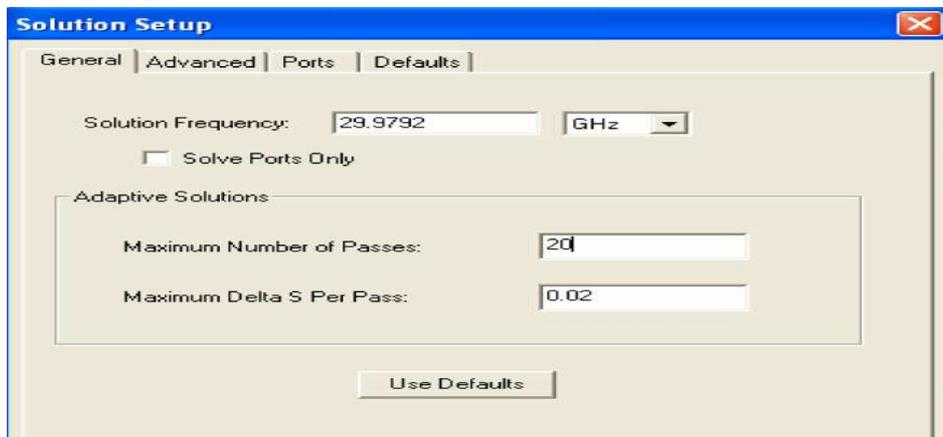


**IV -2-7.Configuration des solutions (Solution Setup)**

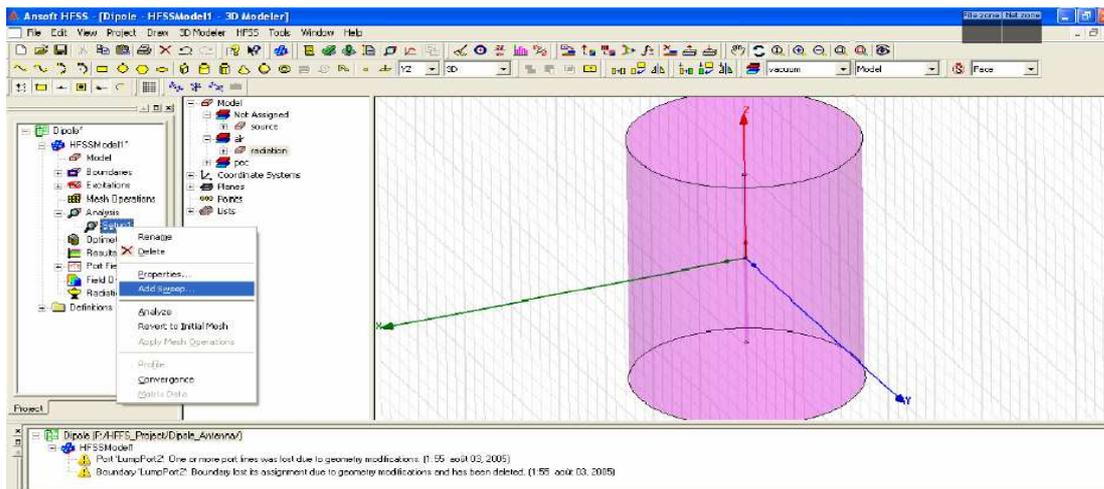
Une solution devrait être définie pour afficher les résultats désirés, on est essentiellement intéressé par la fréquence de résonance de la structure  
 Analysis -> Add Solution Setup.



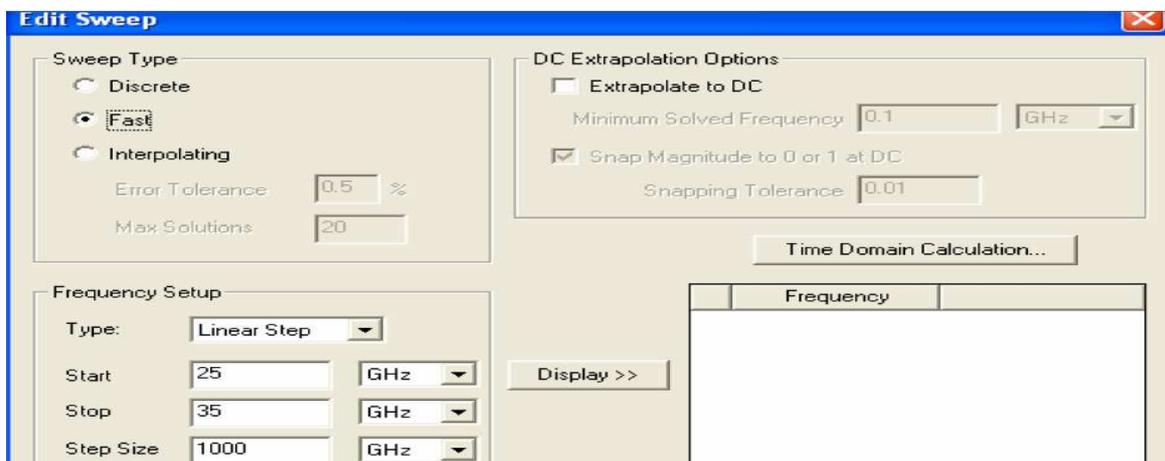
On insère les données suivantes et on clique sur Ok.



Pour avoir la fréquence de résonance de la structure, une fréquence de balayage doit être définie. Setup1 -> Add Sweep.

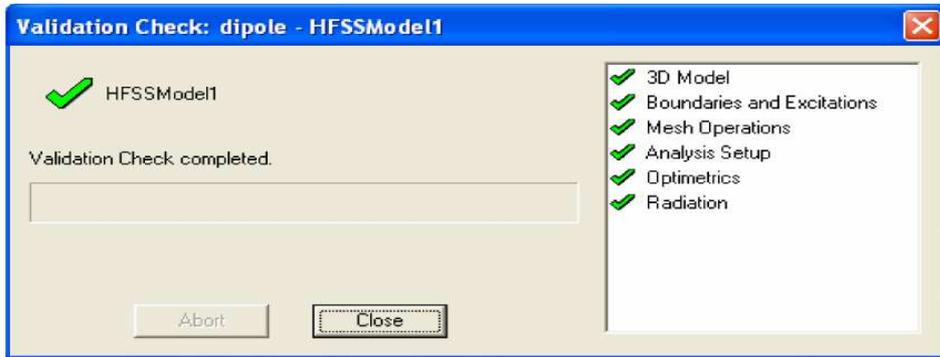


On insère les données suivantes:



**IV -2-8. Analyse de la structure (Structure Analysis)**

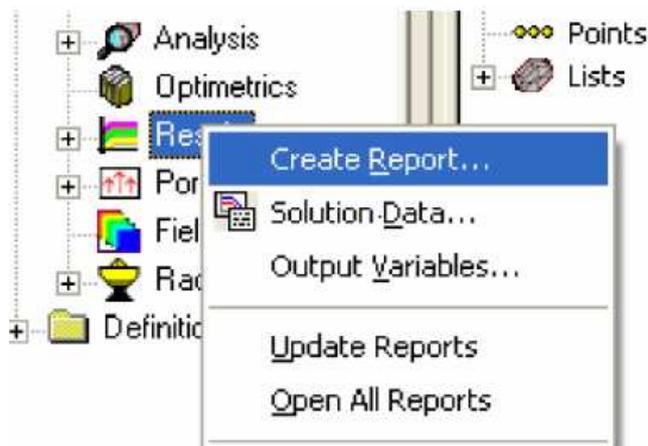
A ce point on devrait être prêt pour compiler  si tout est correct on devrait voir cette fenêtre :

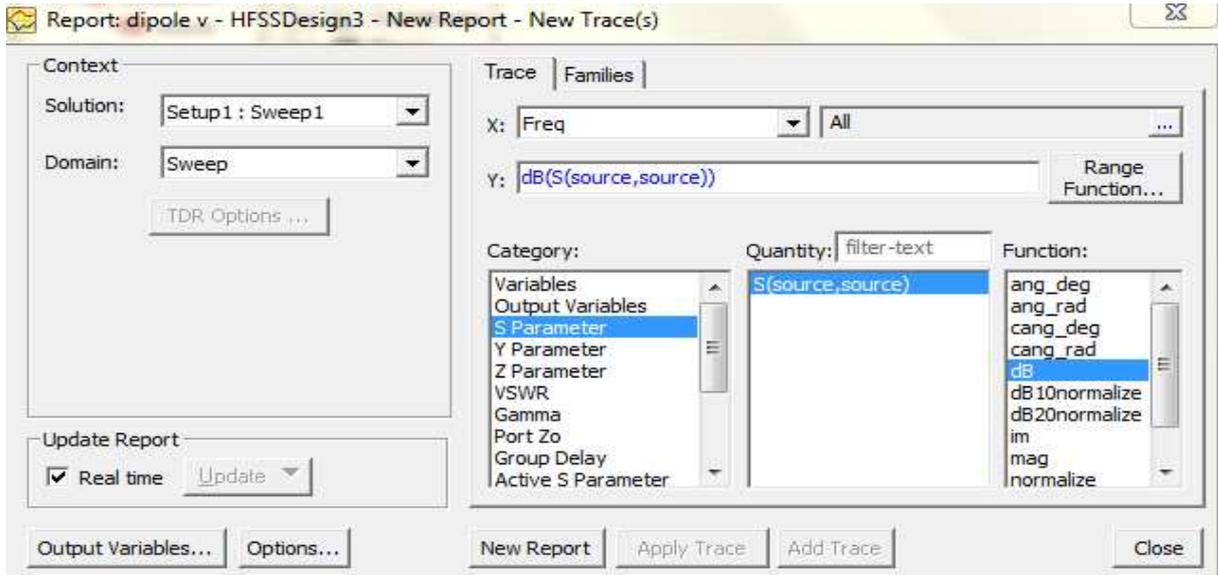


Et on analyse la structure en cliquant sur 

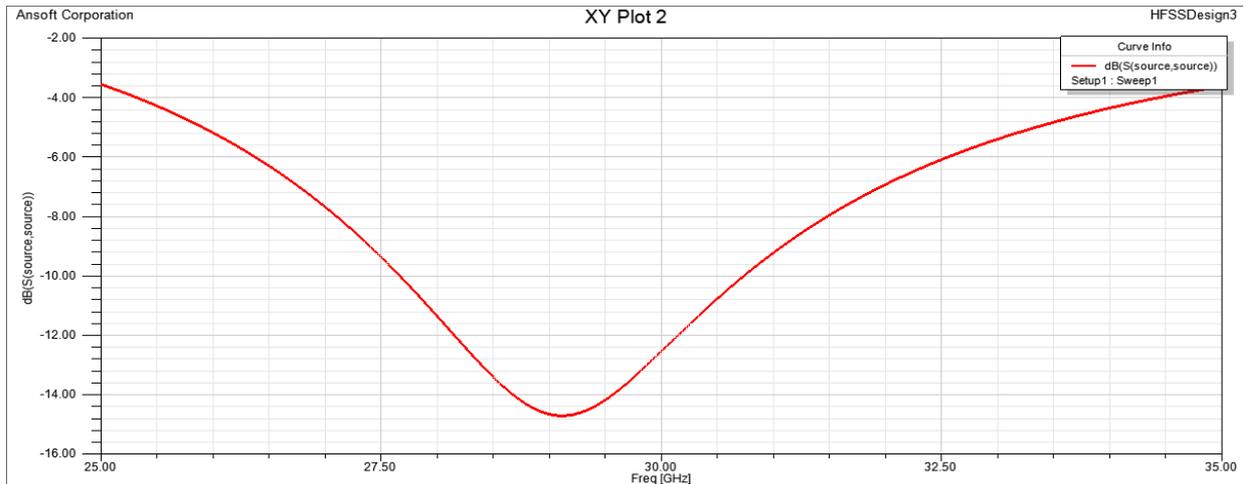
**IV -2-9. Créer les rapports (Create Reports)**

Après la compilation et l'analyse, on va créer des rapports pour afficher chacun des graphes de la fréquence de résonance et du diagramme de rayonnement. Cliquez droit sur Results -> Create modal solution data Reports.

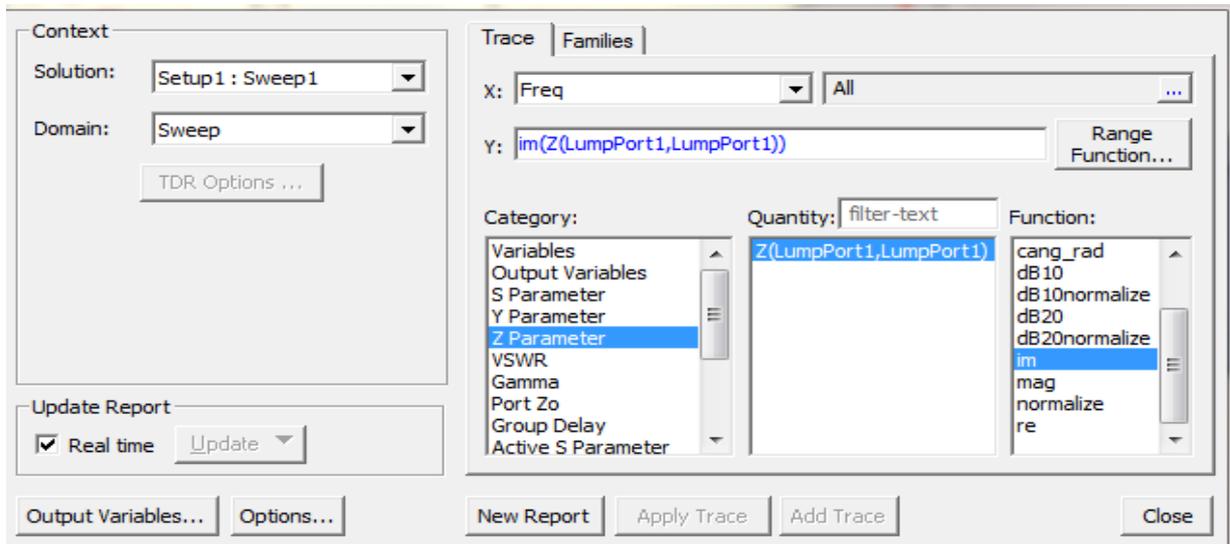




On clique sur new report le graphe est affiché ci-dessous :



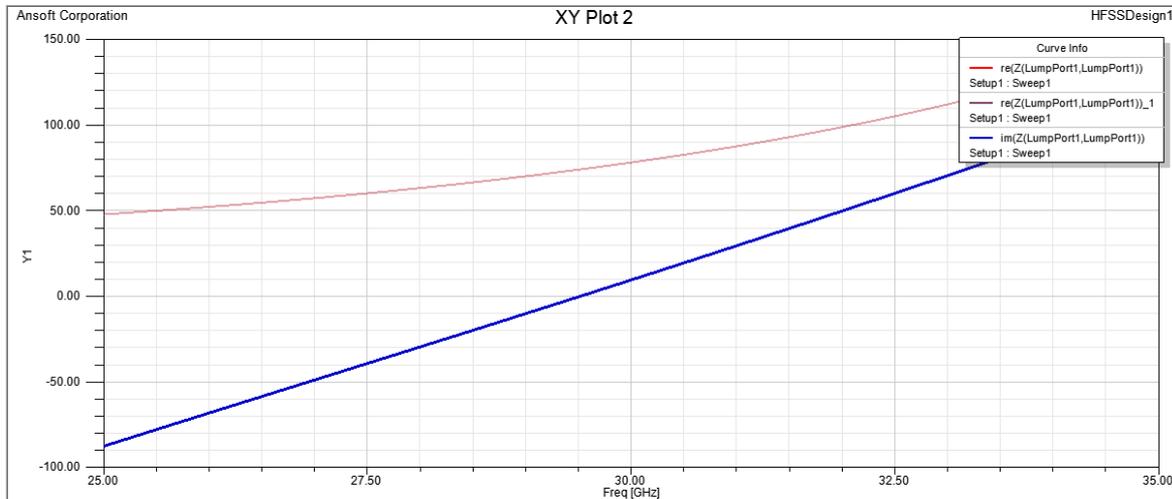
Maintenant afficher le graphe de l'impédance en fonction des fréquences



On clique sur new report la courbe s'affiche puis cliquez sur add :

category : z parameter, quantity :z(lumpPort1,lumpPort1),function :re.

Puis clique une deuxième fois sur add, on aura les deux courbes sur le même graphe comme suit :



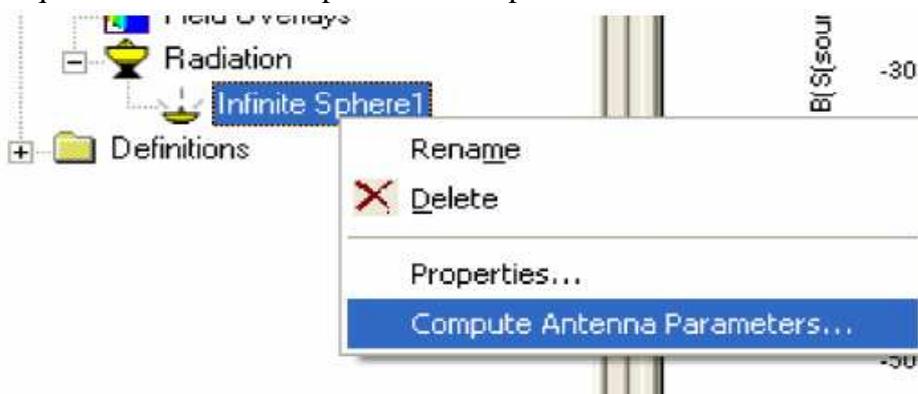
HFSS a l'aptitude de calculer les paramètres S,Y,Z automatiquement. Mais on doit définir une sphère infinie pour afficher la représentation du champ lointain.

Clique droit sur l'icône Radiation dans project manager et on sélectionne Insert Far Field Setup -> Infinite Sphere.

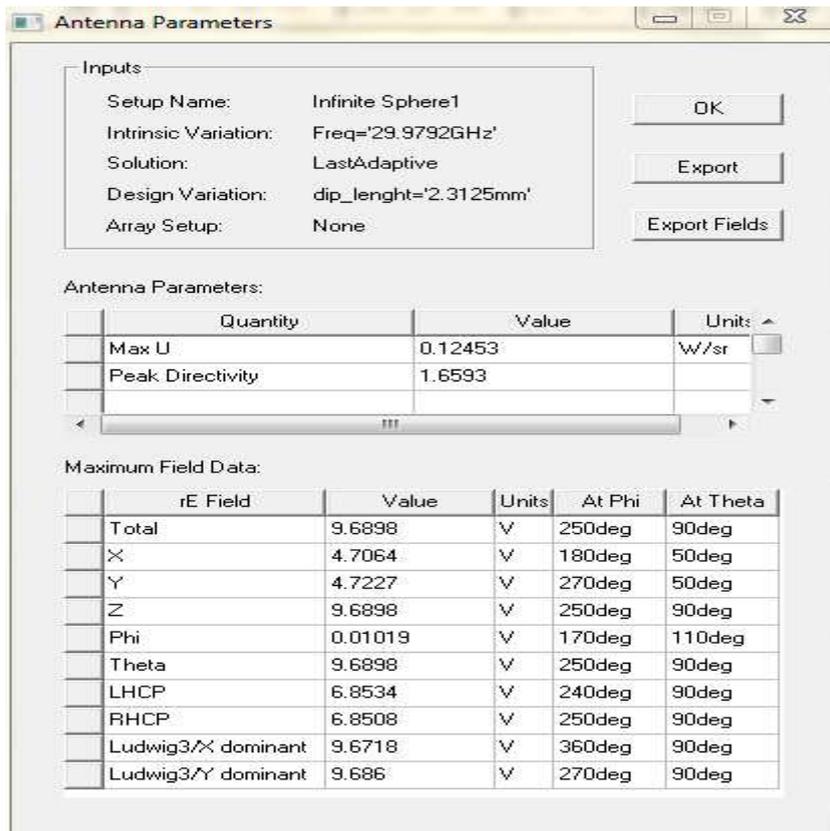


Accepter tout les paramètres par défaut et on clique sur OK

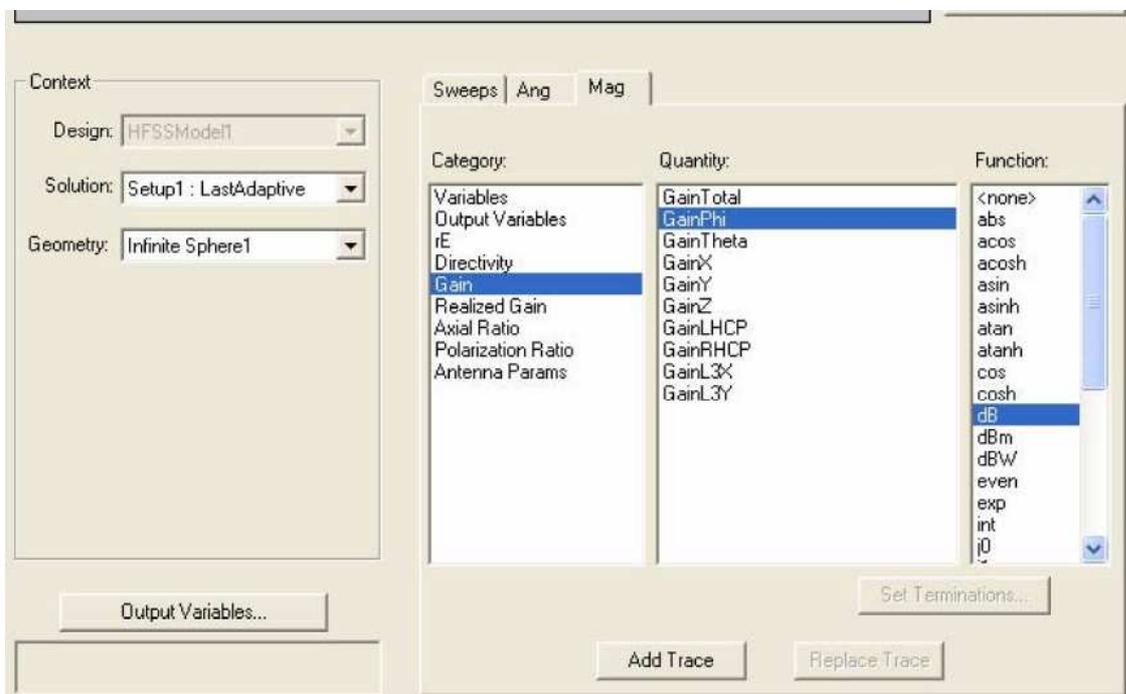
Clique droit sur Infinite Sphere1 ->Compute Antenna Parameters...



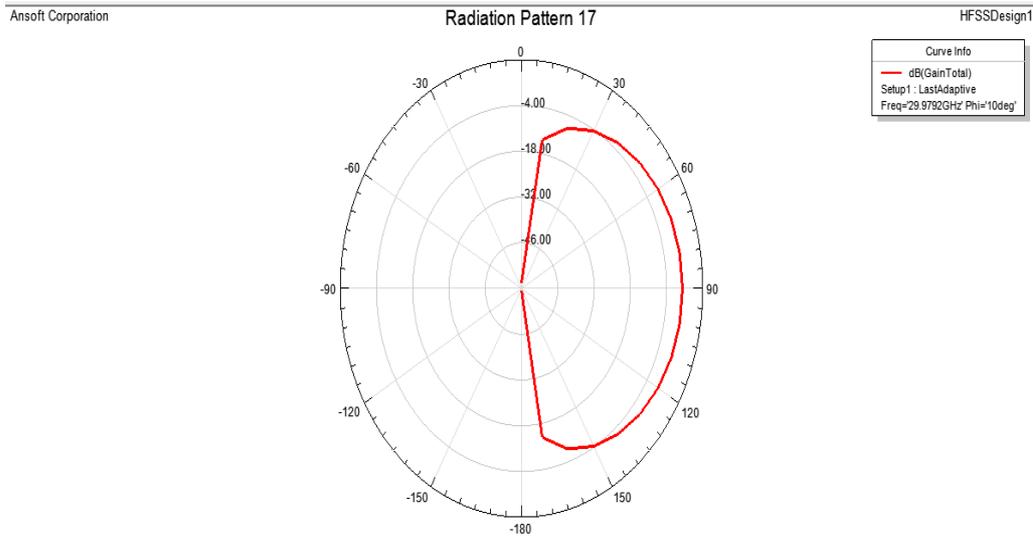
Cliquez sur OK



Results>create far field report>radiation pattern



On obtient le diagramme de rayonnement du dipôle :

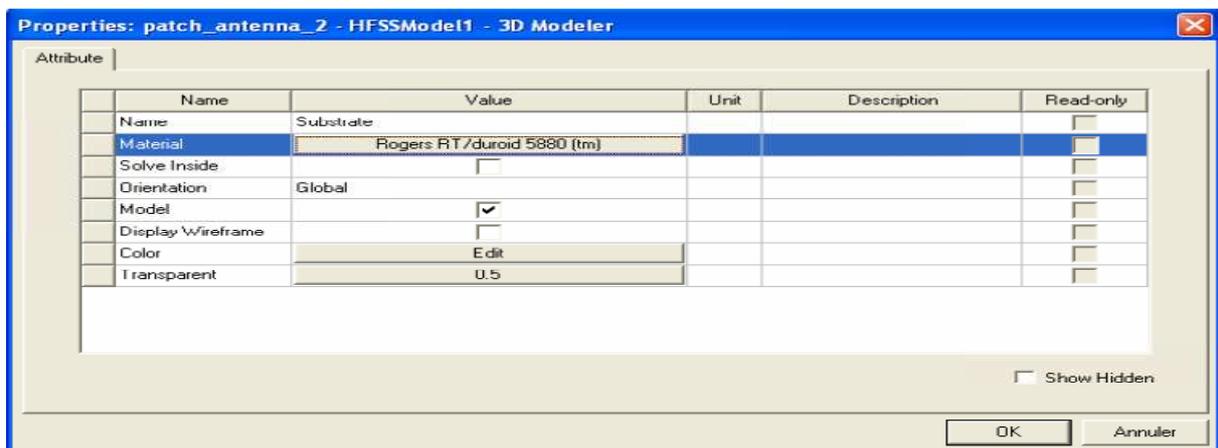


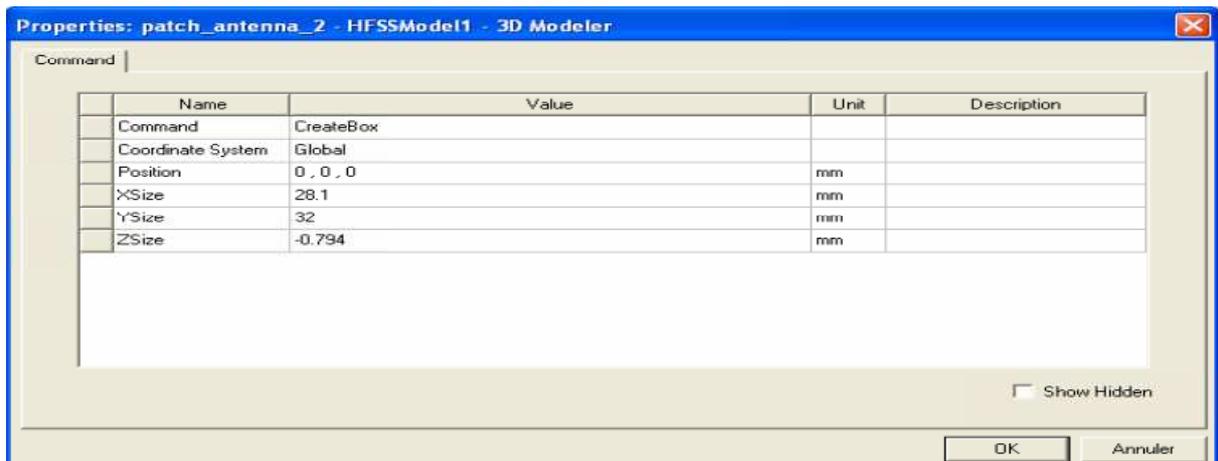
## IV -3. Antenne patch triangulaire alimentée par une ligne microruban

Ouvrir un nouveau projet nommé le patch.

### IV-3-1. Substrat

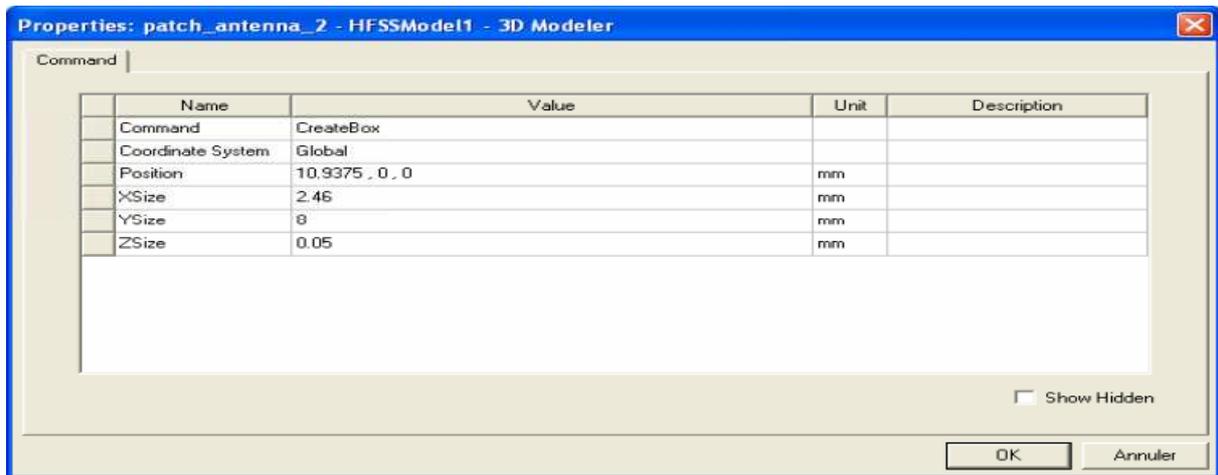
Pour dessiner le substrat >Draw Box et entrez les variables suivantes :



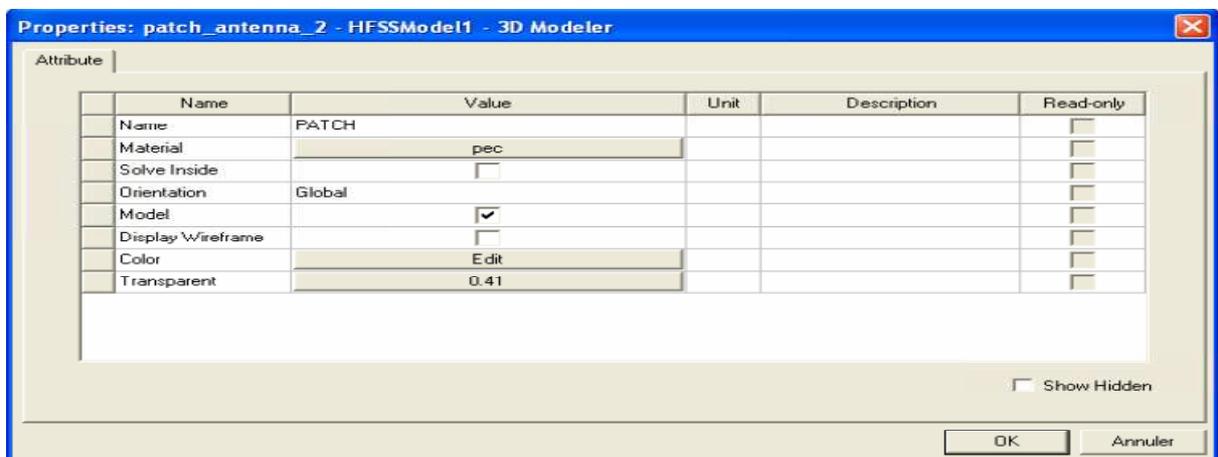


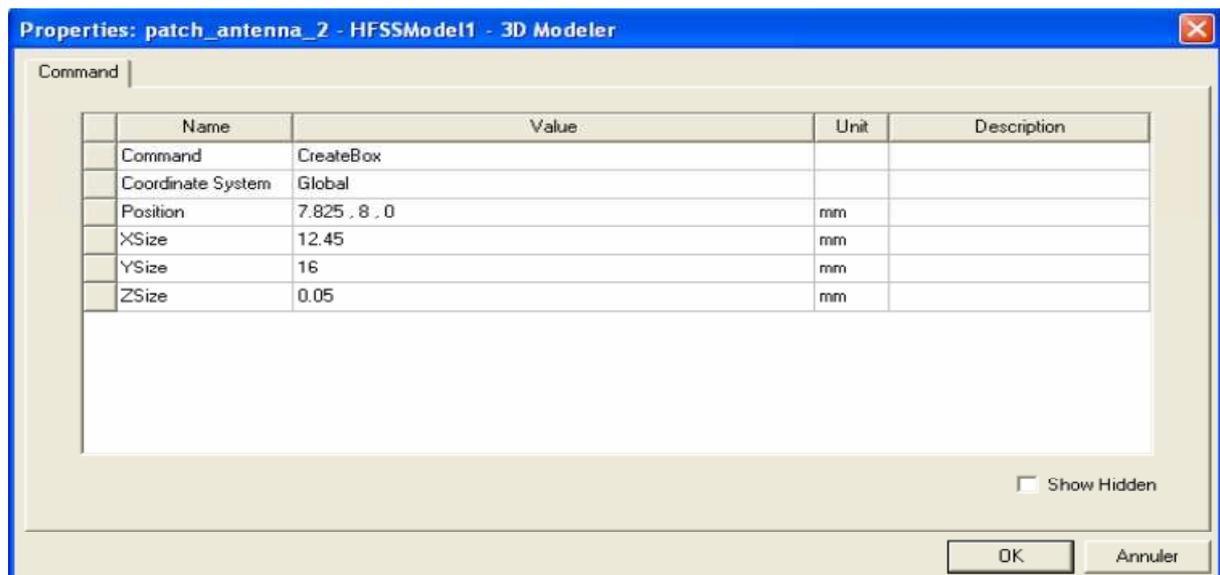
**IV -3-2. Dessiner la ligne d'alimentation**

Pour dessiner il suffit de cliquer sur  et entrez les valeurs suivantes :

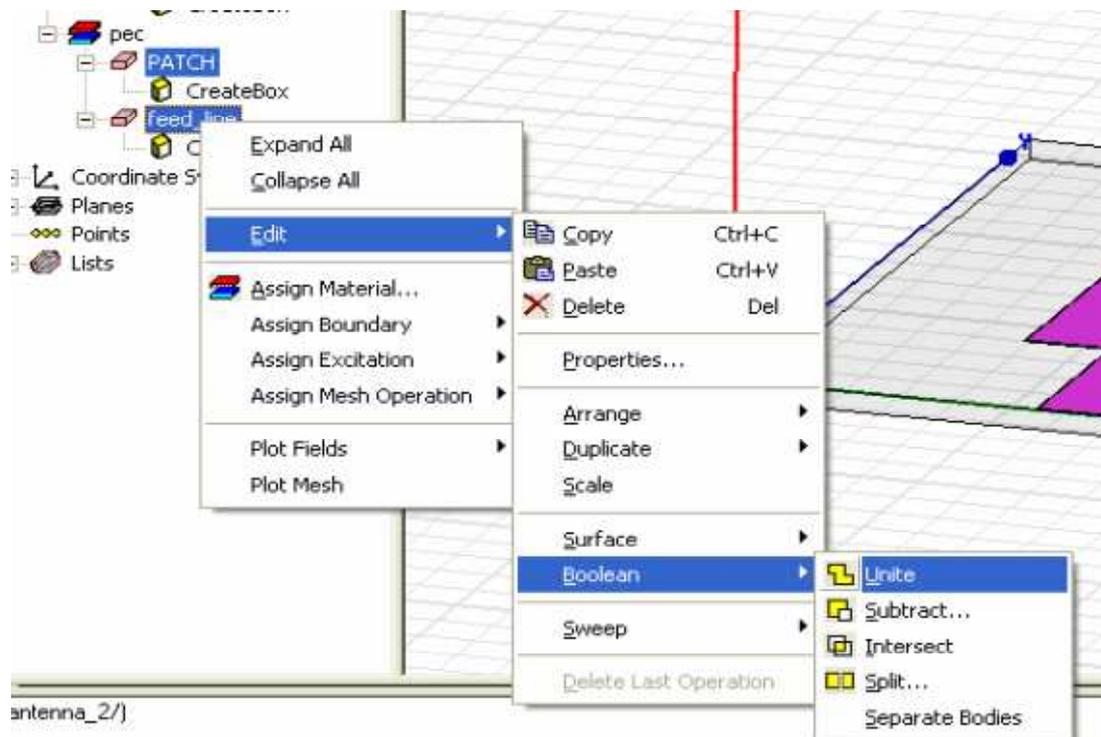


**IV-3-3. Dessiner Patch (élément rayonnant):** dessiner  et suivez les étapes suivantes:



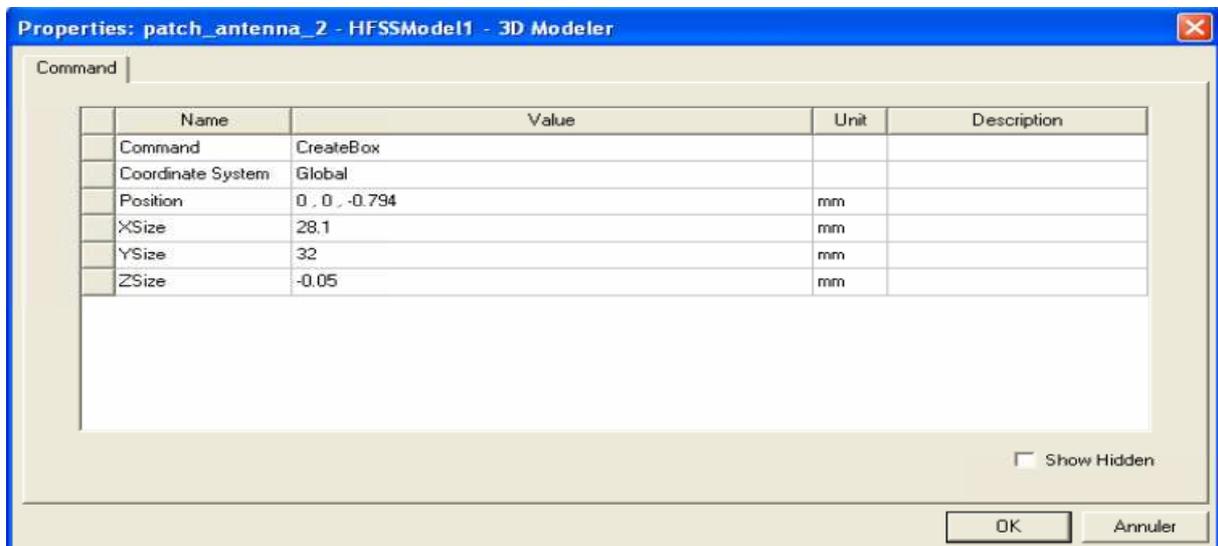
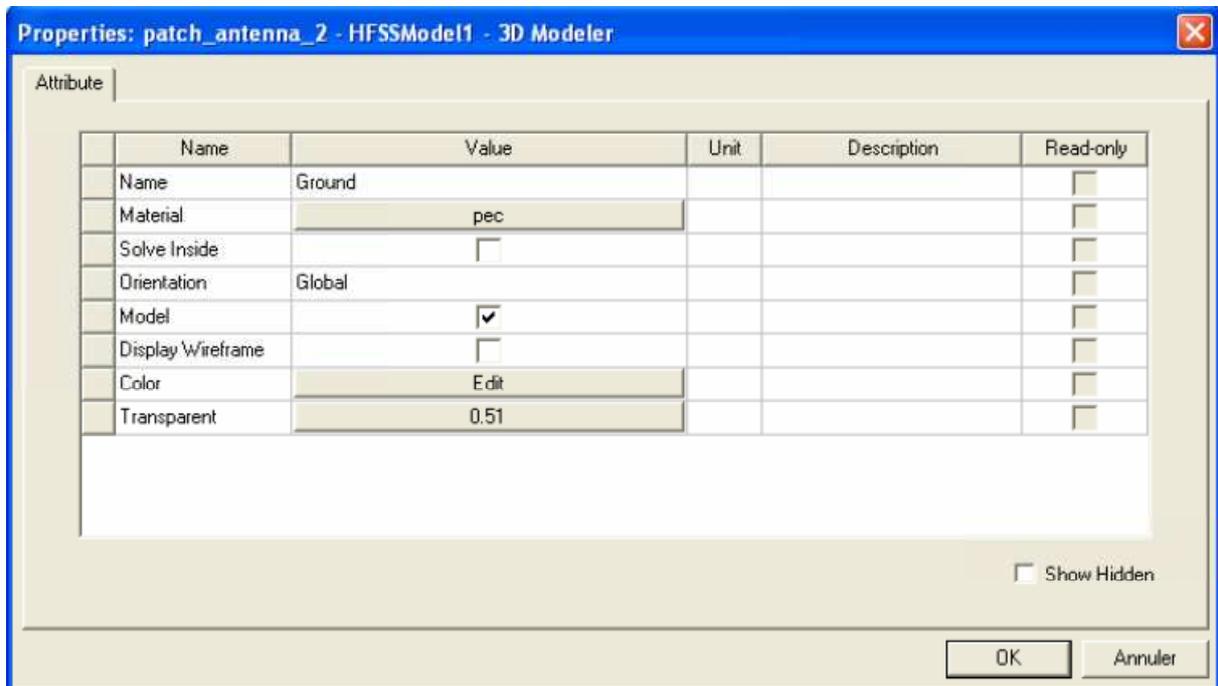


On sait que le patch et la ligne d'alimentation doivent être un seul objet, donc on a besoin de les unir. Cliquez sur les deux objets Patch and Feed\_line, cliquez droit **Edit > Boolean > Unite**.

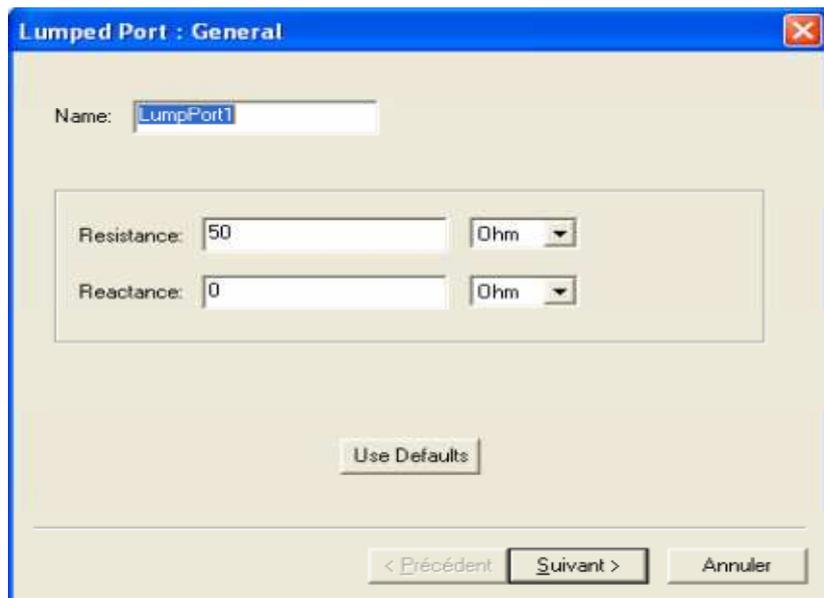
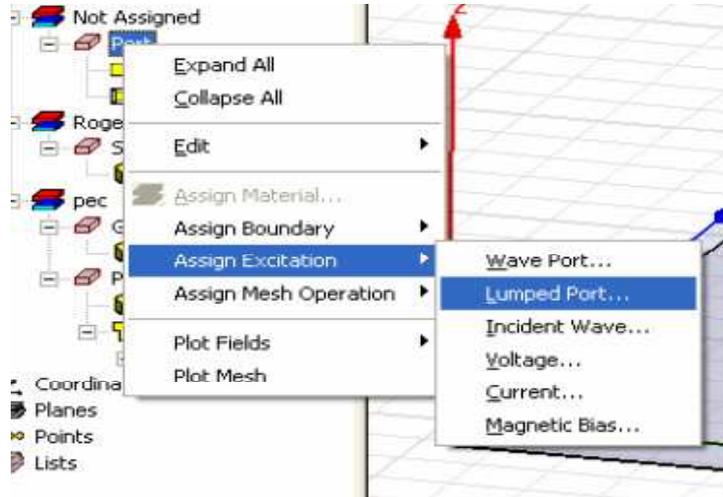


## IV -3-4. Plan de masse (Ground Plane)

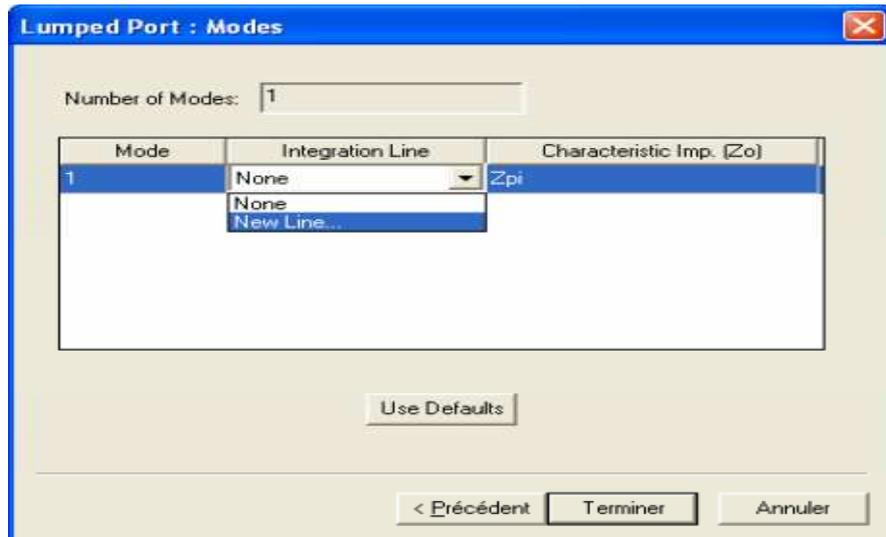
Pour dessiner le plan de masse cliquez sur  et remplir la table des propriétés :



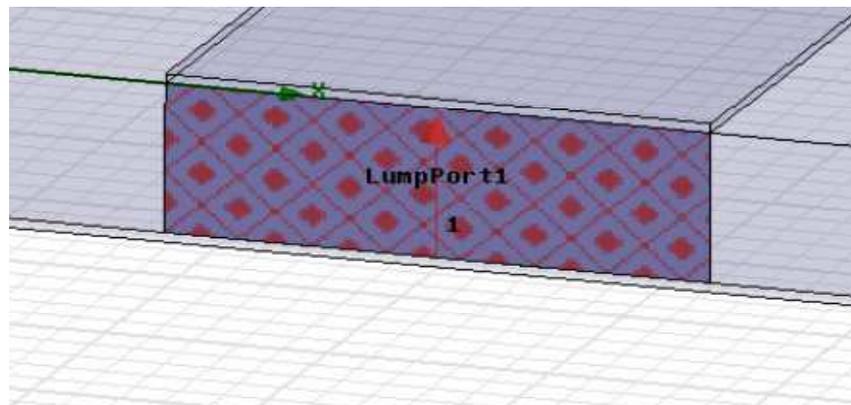
IV -3-5 .Attribuer une excitation



On clique sur 'suivant' et choisir new line



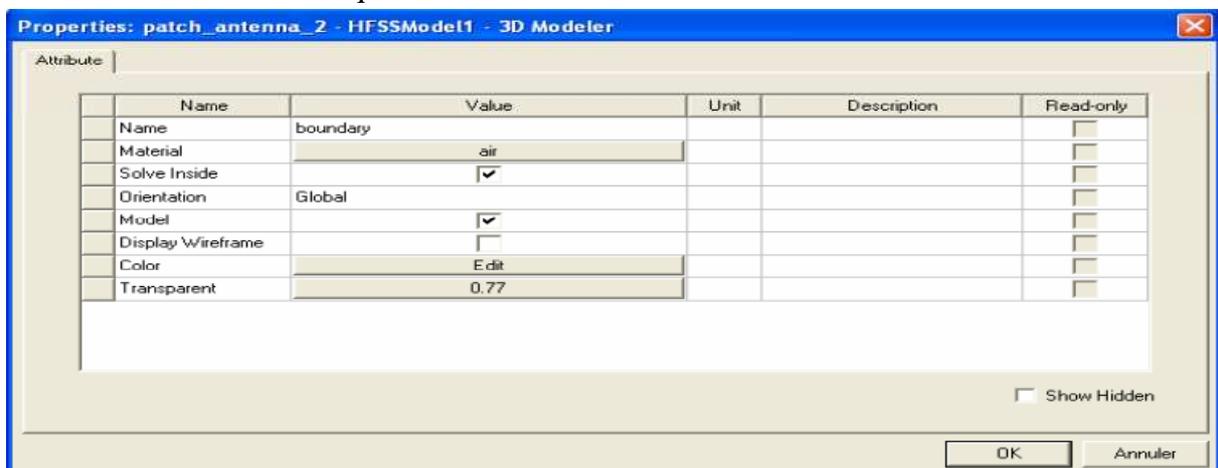
Le port d'excitation est illustré sur cette figure :

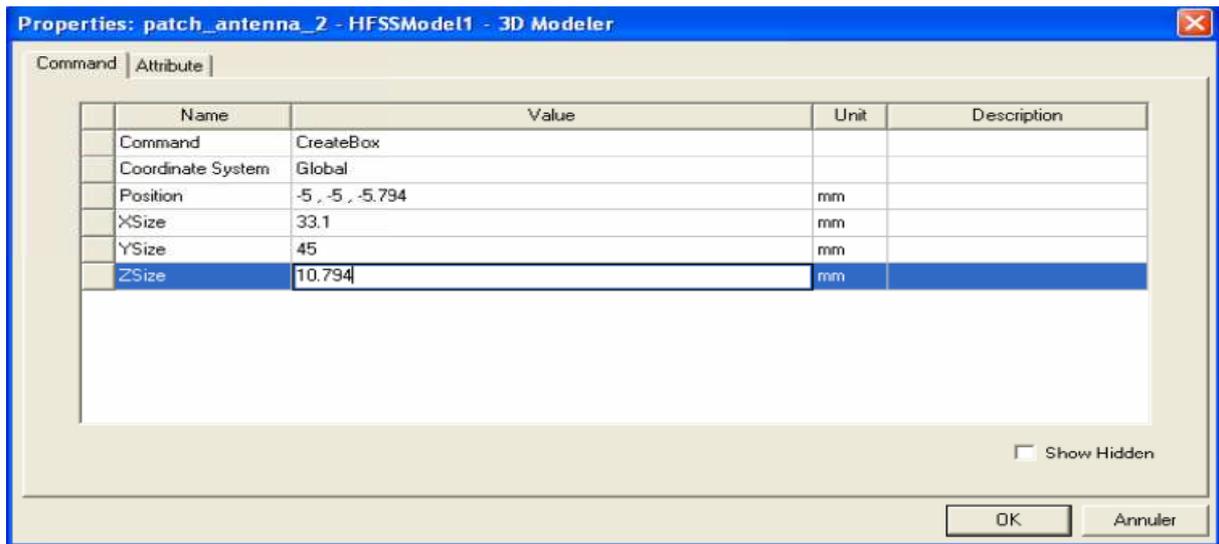


#### IV -3-6. Assigner les conditions aux limites

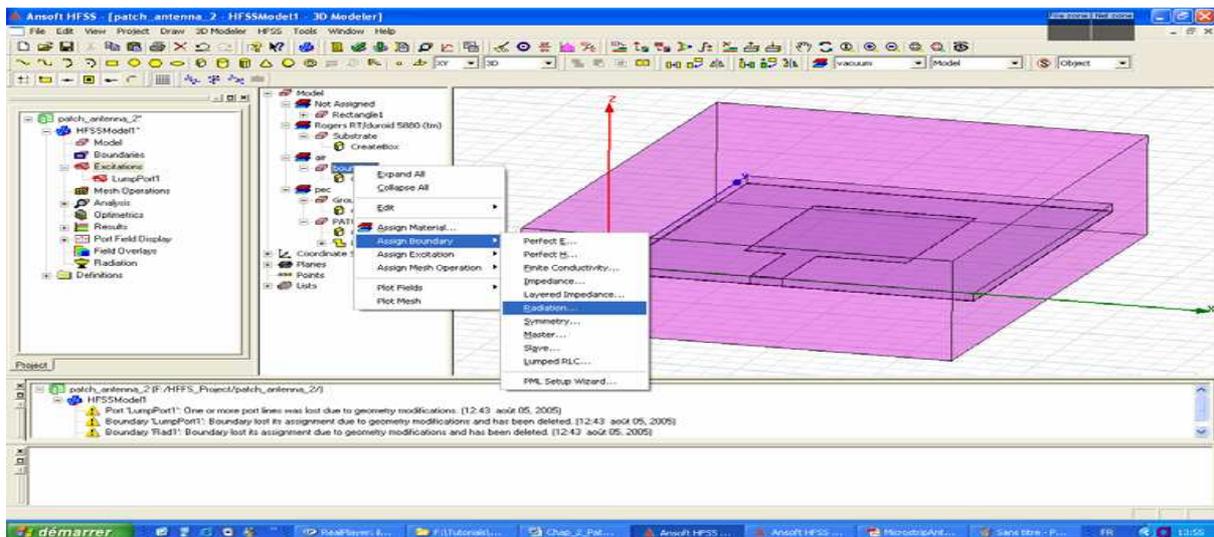
Maintenant que le model est crée, on a besoin d'attribuer les conditions aux limites. Dans HFSS, les radiations aux limites sont utilisées pour simuler les problèmes que trouvent les ondes pour se propager infiniment loin dans l'espace. HFSS s'imprègne de l'onde jusqu'à la limite. Dans notre cas notre ABC (Absorbing Boundary condition) est un air box.

Pour dessiner l'Air Box cliquez sur Draw>Box

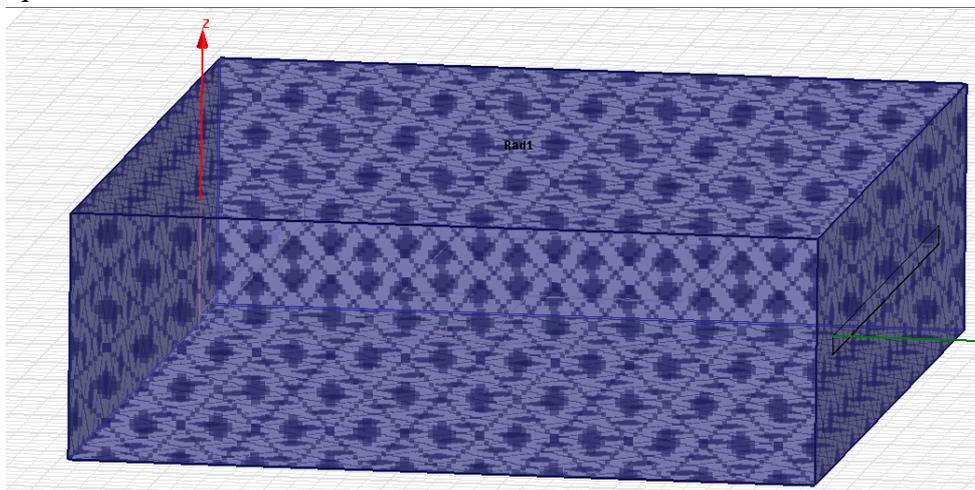




Boundary, clique droit > Assign Boundary > radiation



Voilà ce qu'on obtiendra comme résultat:



**IV-3-7 .Configuration d’analyse ( Analysis Setup)**

Maintenant notre model est prêt a être exécuté. Pour identifier notre analyse on doit créer ce qu’on appelle solution setup pour cela :

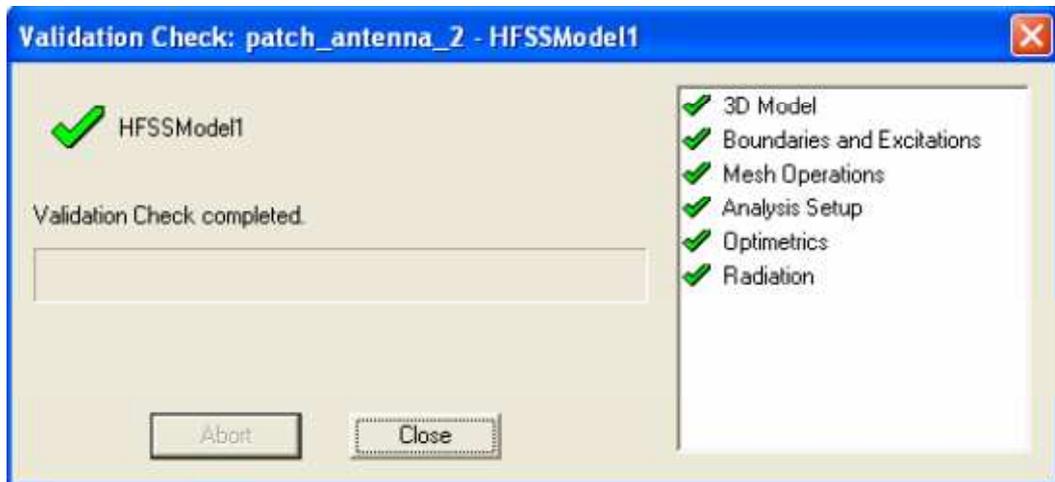
HFSS > Analysis Setup > Add Solution Setup clique general tab, Solution frequency: 7.5 GHz, Maximum Number of Passes: 20 and Maximum Delta S per pass: 0.02.

**IV-3-8. Ajouter une fréquence de balayage (Frequency Sweep):**

Pour ajouter une fréquence de balayage : HFSS > Analysis Setup > Add Sweep .Solution Setup: Setup1.cliquez OK. Sweep Type: Fast, Frequency Setup Type: Linear Count, Start: 5 GHz, Stop: 10 GHz, Count: 500. Cliquez sur OK.

**IV-3-9 .Validation**

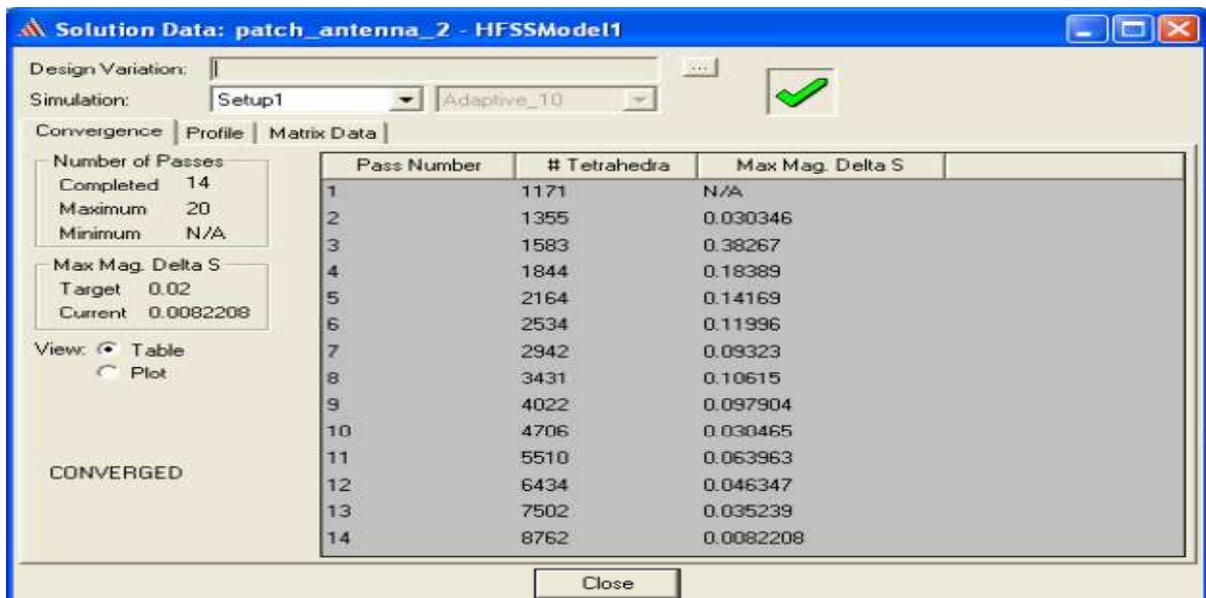
HFSS > Validation Check.



**IV-3-10 Analyser tout**

HFSS > Analyze pour analyser s’il ya des erreurs elles seront affichées en bas de la fenêtre.

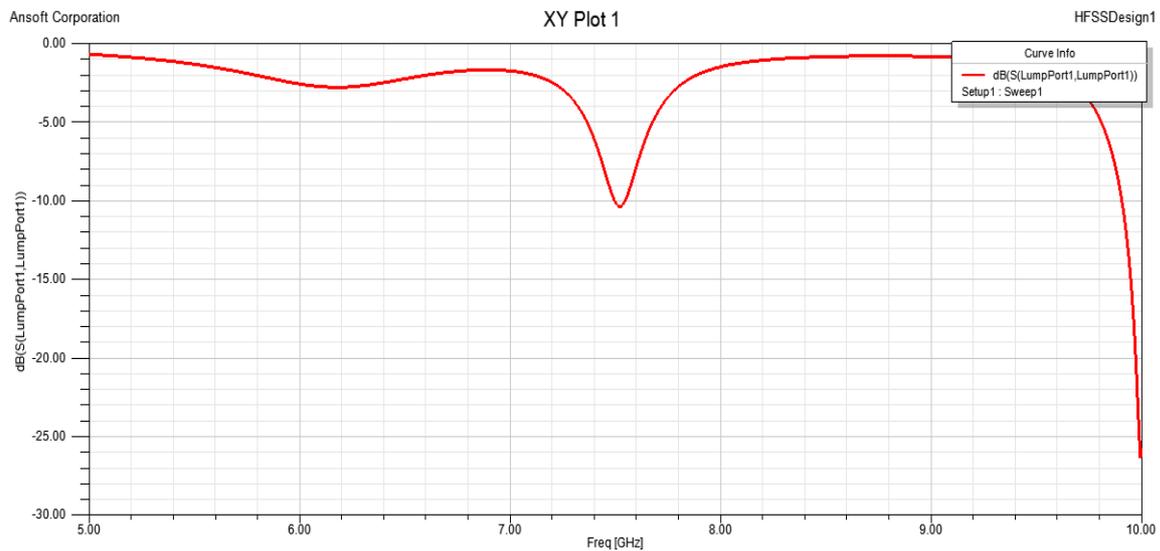
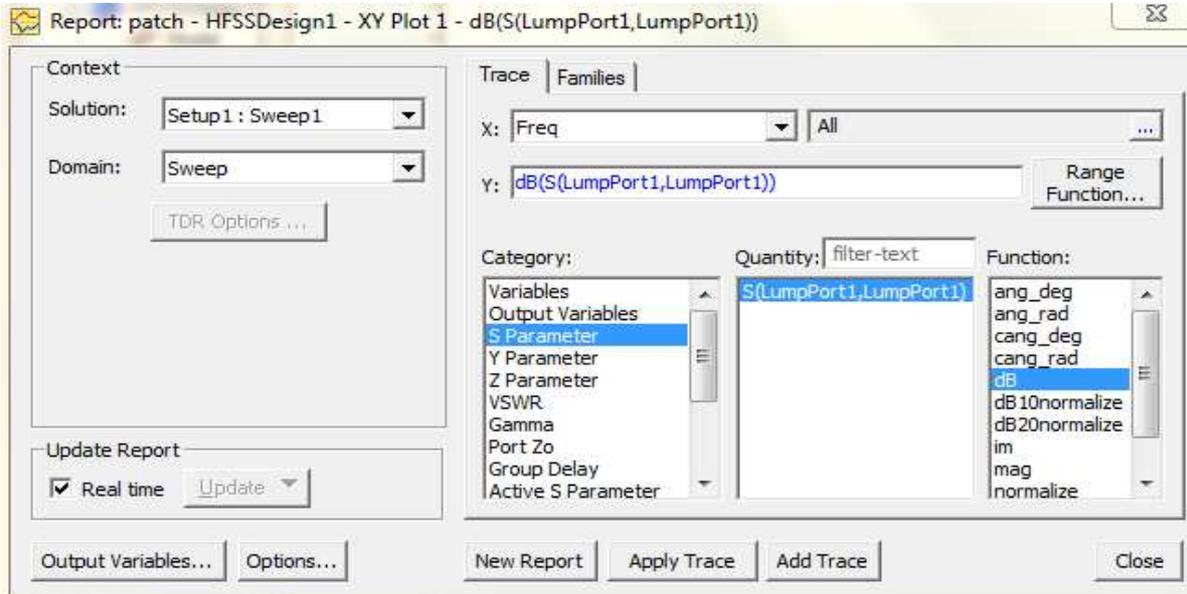
**IV-3-11. Les données de la solution (Solution Data)**



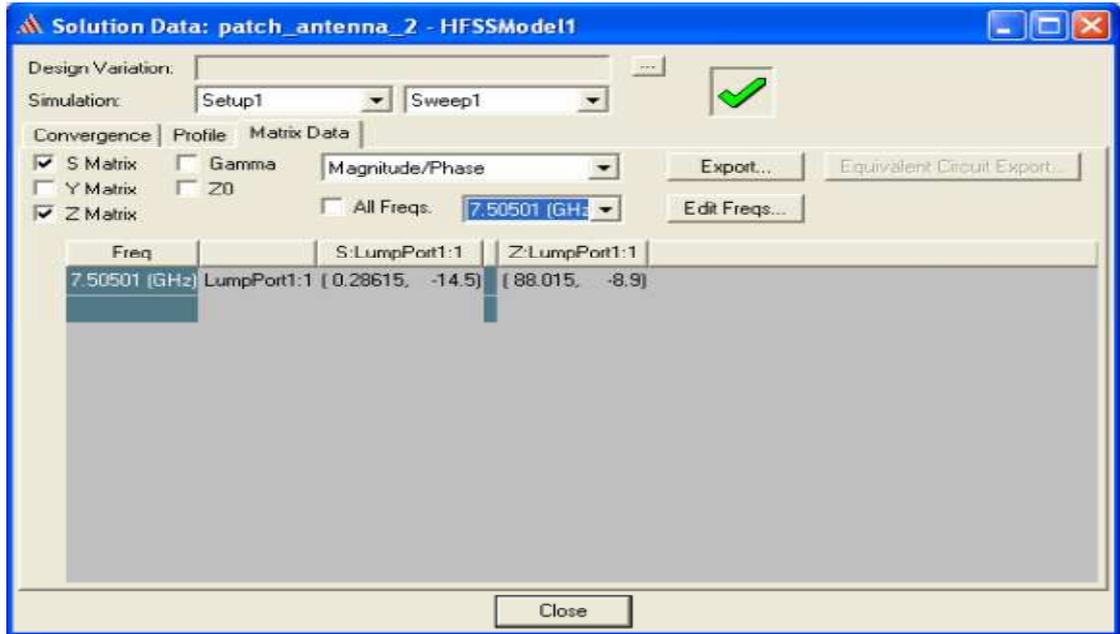
**IV-3-12. Créer les rapports**

Results > Create Modal solution Data Report:

Traces Window: Setup1: Adaptive1. Category: S Parameter, Quantity: S (lumpPort, lumpPort), Function dB puis clique sur new report.

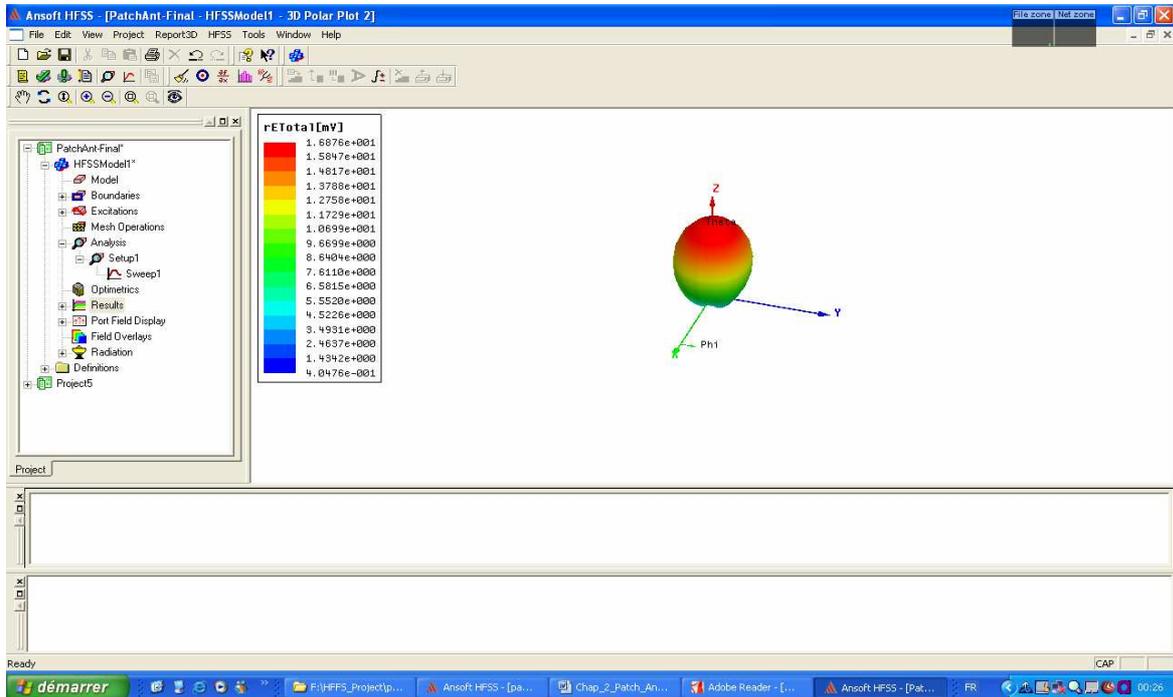


L'antenne résonne au alentour de 7.5GHz. Pour un résultat précis on peu zoomer sur le graphe entre 7.00 GHz et 8.00 GHz (changer le début et la fin a 7GHz et 8GHz respectivement puis réexécuter).

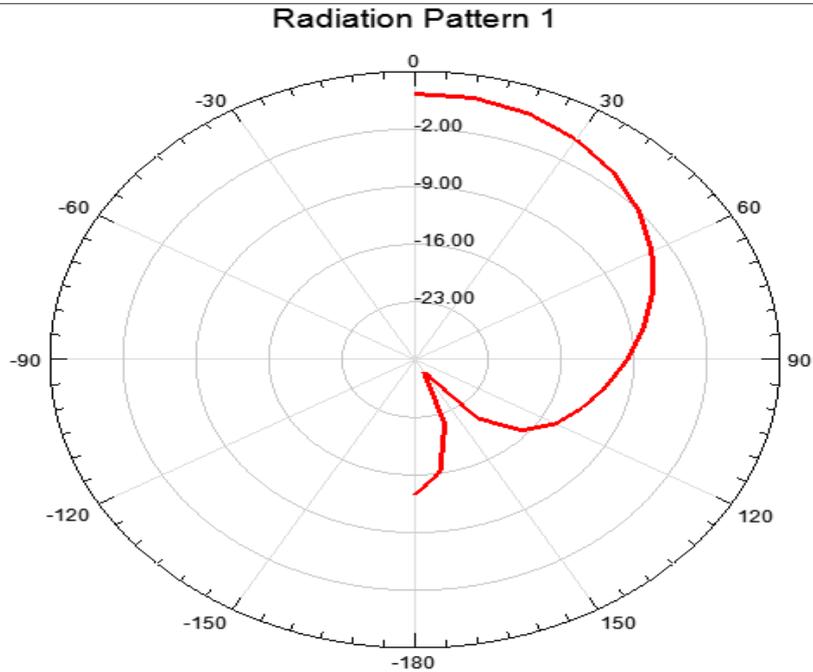


**Radiation Pattern (diagramme de rayonnement)**

Créer une sphère infinie. Puis aller à Results < Create far field Report > 3D Polar Plot. Cliquez new report.



Pour un diagramme de rayonnement en 2D on clique sur Results < Create far field Report > Radiation Pattern.



#### IV-4. Antenne patch alimentée par un câble coaxial

Ouvrir un nouveau projet et nommer le probe\_feed\_patch\_antenna :

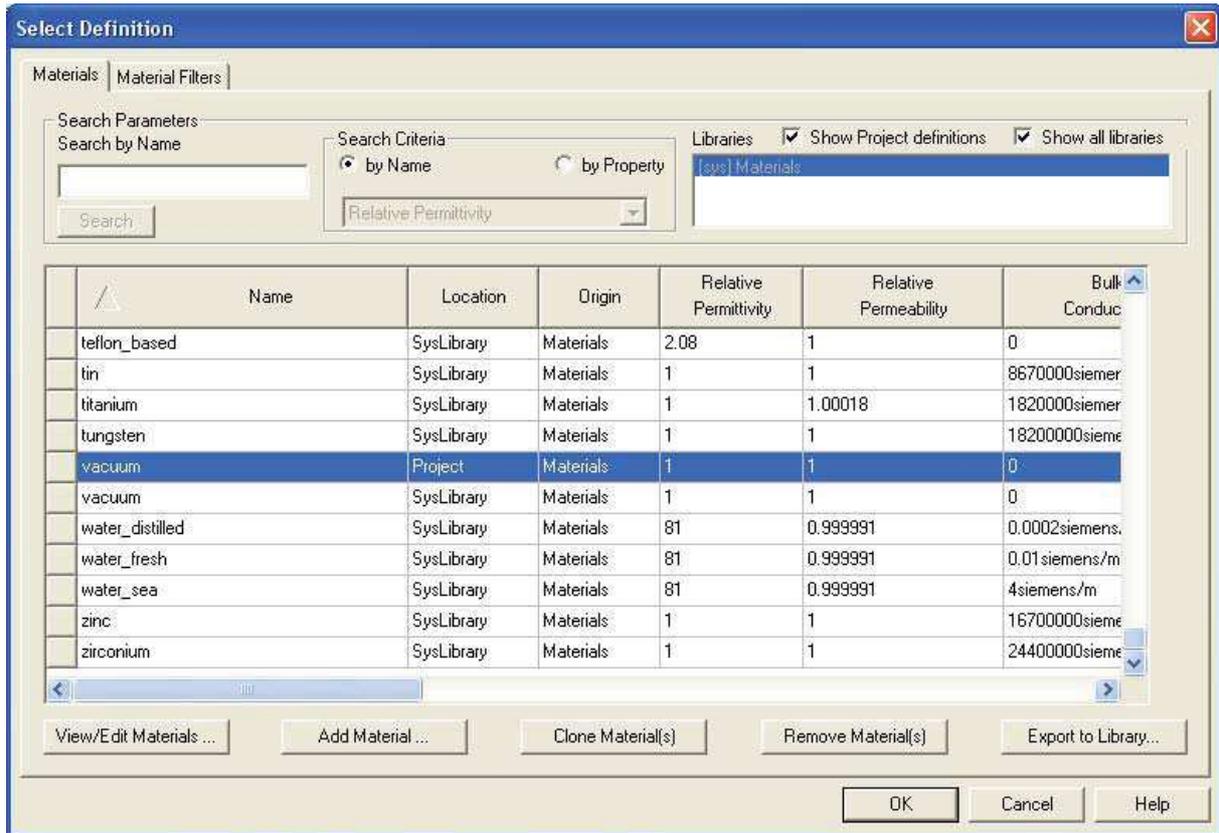
HFSS > Solution Type Driven Terminal

Choisir l'unité

3D Modeler > Units > cm puis OK.



Attribuer d'abord le matériel



Dans le champ recherche on tape Rogers RT/ duroid 5880 (tm), clique OK.

#### IV-4-1.Créer le substrat

Draw>Box ou clique sur 

En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez la position de la boîte.

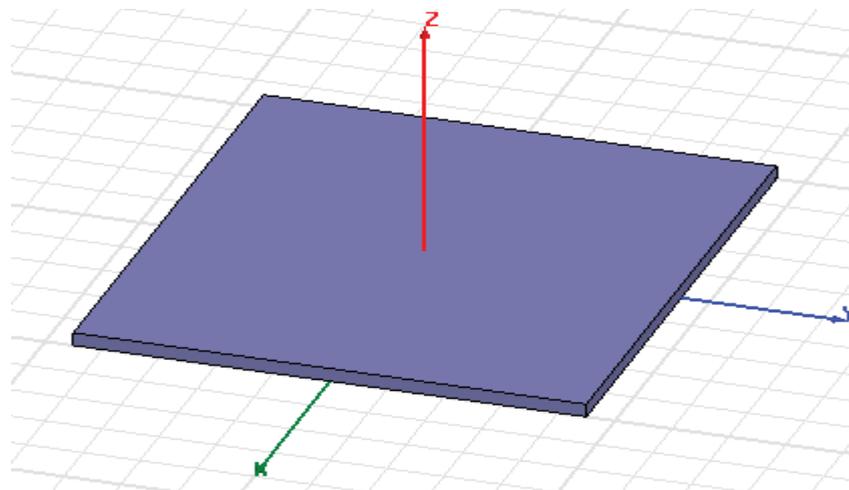
X: -5.0 Y: -4.5, Z: 0.0, appuyez sur la touche Entrée.

À l'aide des champs de saisie des coordonnées, entrez le coin opposé de la boîte.

Dx : 10.0, dy: 9.0, dZ: 0,32, appuyez sur la touche Entrée.

Ouvrez la fenêtre des Propriétés tapez: Sub1

Cliquez View>Fit All>Active View, ou cliquez CTRL+D.Le substrat ressemblera à ceci :



**IV-4-2. Créer le plan de masse infini**

Draw>Rectangle

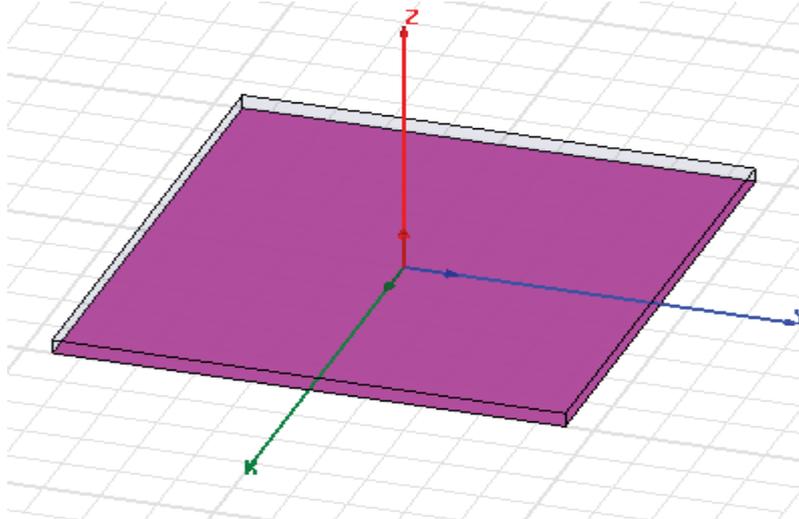
En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez la position du rectangle.

X: -5.0, Y: -4.5, Z: 0.0, appuyez sur la touche Entrée.

En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez le coin opposé du rectangle:

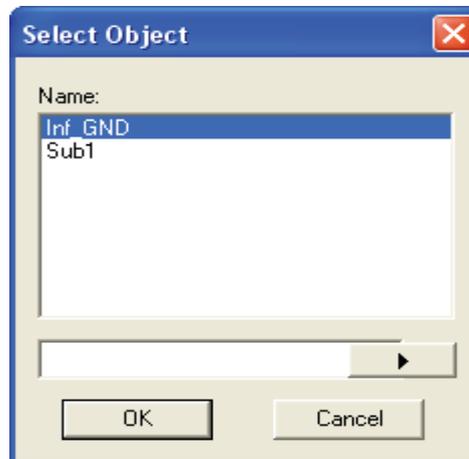
Dx : 10.0, dy: 9.0, dZ: 0.0, appuyez sur la touche Entrée

Nommé le : Inf\_GND .La figure ci-dessous montre le résultat :



**IV-4-3. Attribuer une frontière perfect E au plan de masse infini**

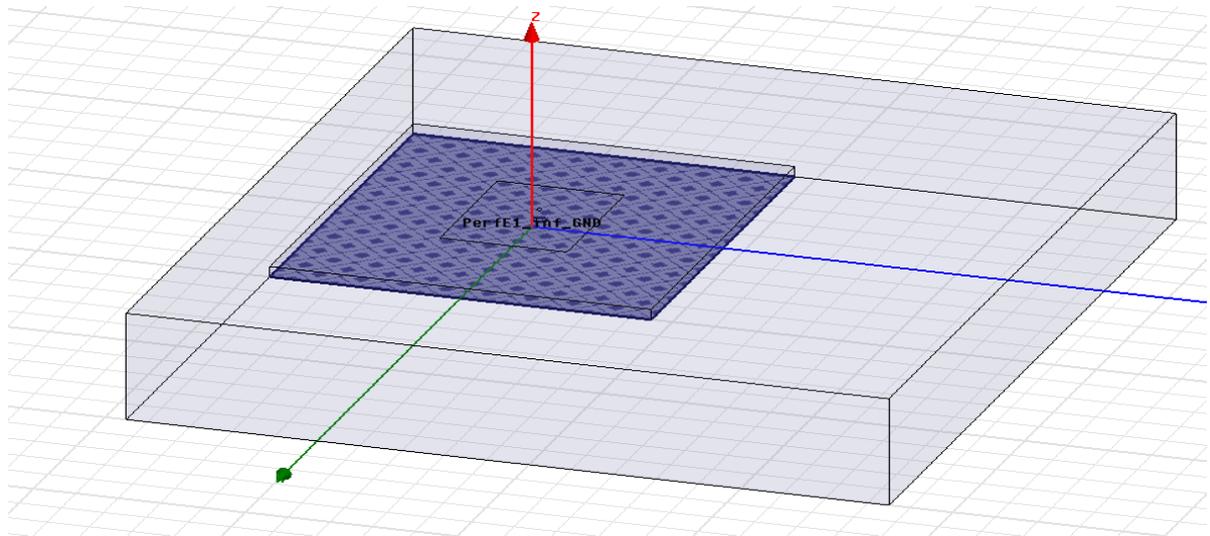
Edit>Select>By Name On sélectionne: Inf\_GND



HFSS>Boundaries>Assign>Perfect E

La fenêtre s'ouvre, entrez le nom suivant : PerfE\_Inf\_GND

La radiation est illustrée ci-dessous :



#### IV-4-4. Créer le plan de masse infini Cut Out

Draw>Circle

En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez la position centrale

X: -0.5, Y: 0.0, Z: 0.0, appuyez sur la touche Entrée

En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez le rayon:

Dx : 0.16, dy: 0.0, dZ: 0.0, appuyez sur la touche Entrée

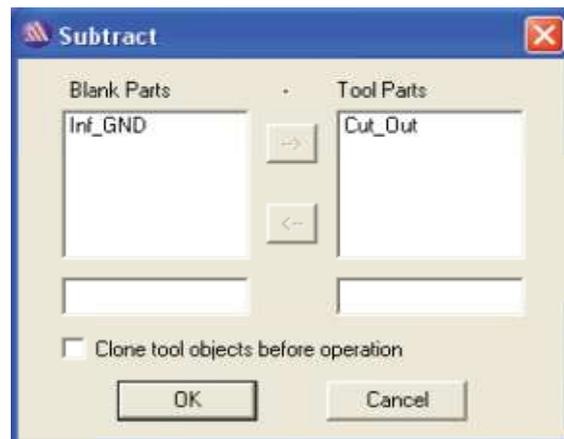
Définir le nom: Cut\_Out

Sélectionnez les deux objets Inf\_GND et Cut\_Out:

Modeler>Boolean>Subtract:

Blank Parts: Inf\_GnD

Tool Parts: Cut\_Out



#### IV-4-5. Créer le Patch

Draw>Rectangle

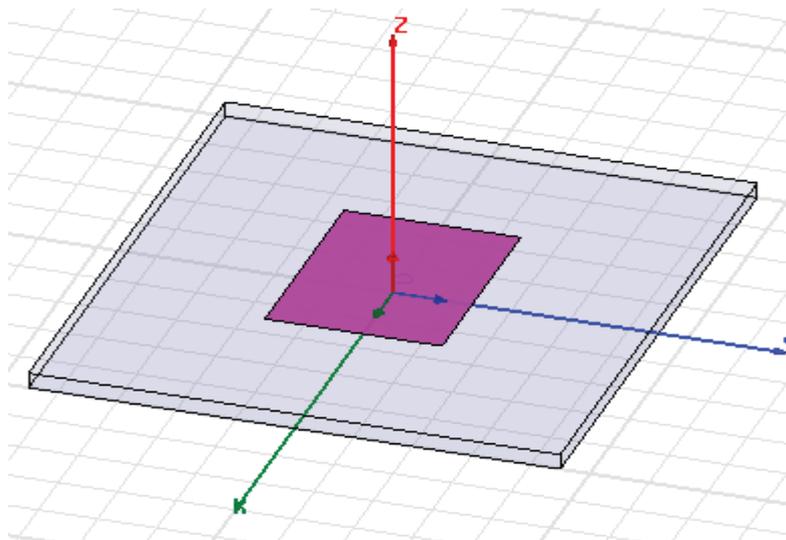
En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez la position du rectangle

X: -2.0, Y: -1,5 Z: 0,32, appuyez sur la touche Entrée

En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez le coin opposé du rectangle:

Dx : 4.0, dy: 3.0, dZ: 0.0, appuyez sur la touche Entrée

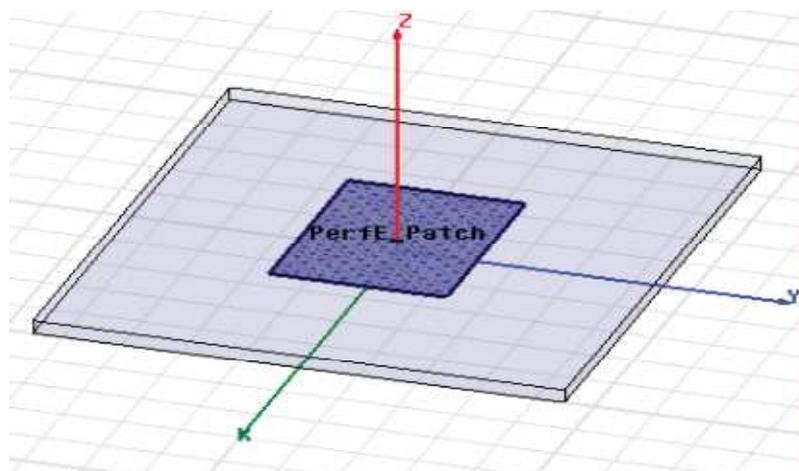
La fenêtre des propriétés s'ouvre automatiquement entrez le nom: Patch



#### IV-4-6. Attribuer un champ perfect E pour le patch

Sélectionnez le patch allez vers HFSS>Boundaries>Assign>Perfect E

Nommé: PerfE\_Patch cliquez sur OK.



## IV-4-7. Créer le câble coaxial

Choisir: vacuum(Aluminium)



Pour le dessin du coaxial:

Draw>Cylinder

En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez la position du cylindre

X: -0.5, Y: 0.0, Z: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

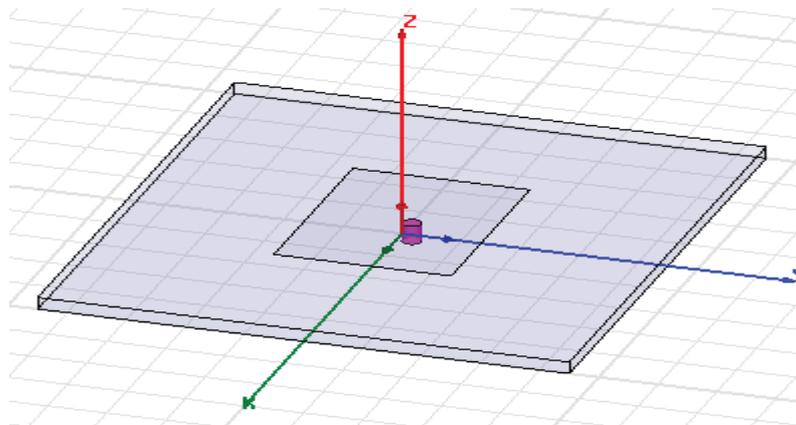
À l'aide des champs de saisie des coordonnées, entrez le rayon:

dX: 0.16, dY: 0.0, dZ: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

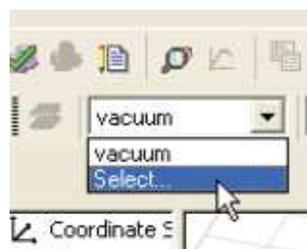
Utiliser les champs de saisie des coordonnées, entrez la hauteur:

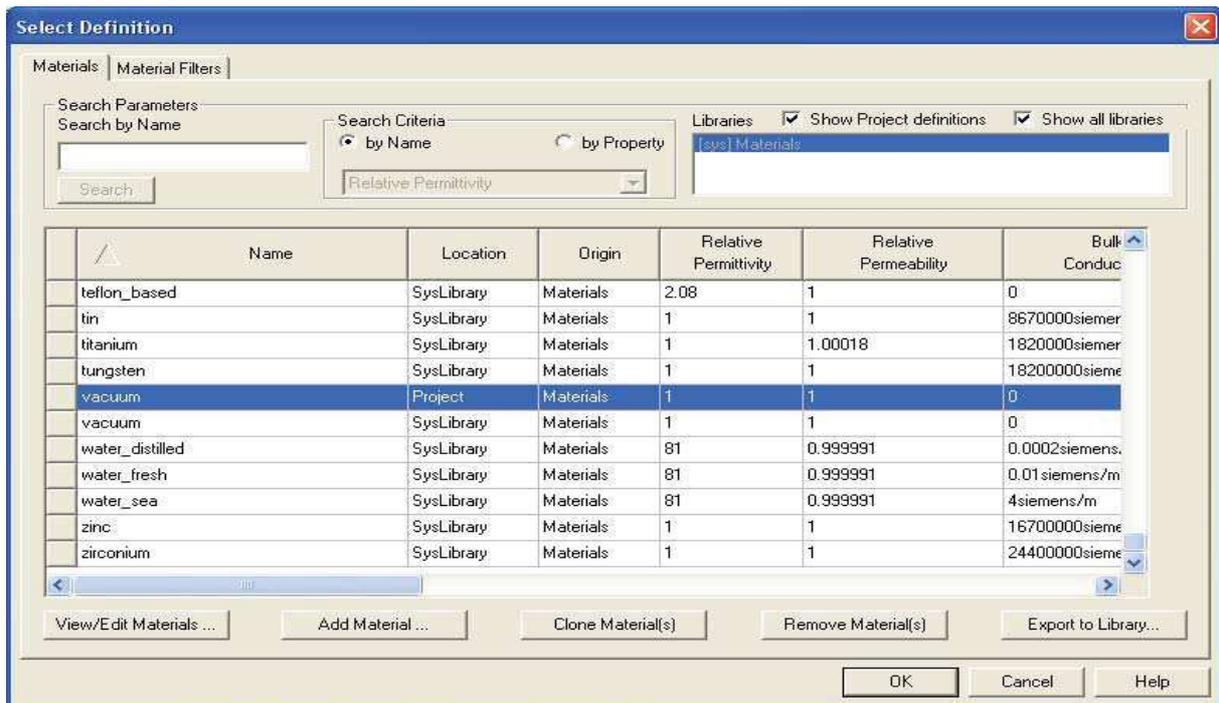
dX: 0.0, dY: 0.0, dZ: -0.5 Appuyez sur la touche Entrée

Nommé : Coax cliquez sur Ok



Attribuer un materiel:





- Taper PEC (perfect electric conductor)



#### IV-4-8. Créer l'âme du coaxial

Draw>Cylinder

En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez la position du cylindre

X: -0.5, Y: 0,0, Z: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

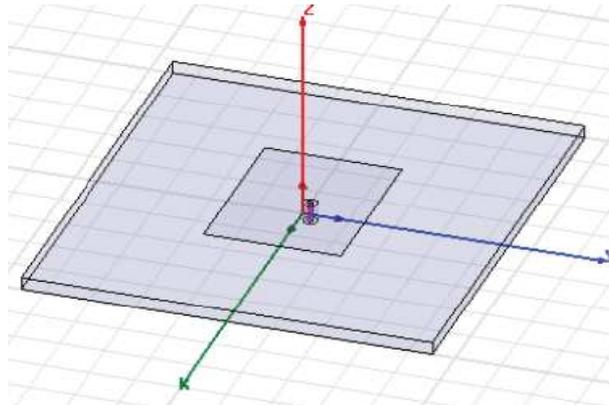
À l'aide des champs de saisie des coordonnées, entrez le rayon:

DX 0.07, dy: 0.0, dZ: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

4 Utiliser les champs de saisie des coordonnées, entrez la hauteur:

DX 0.0, dy: 0.0, dZ: -0.5 Appuyez sur la touche Entrée

Nommé: Coax\_Pin.



#### IV-4-9. Créer le port d'onde (wave port)

Pour créer un cercle qui représente le port:

Cliquez sur Draw> Cercle

En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez la position centrale

X: -0.5, Y: 0,0, Z: -0.5 Appuyez sur la touche Entrée

À l'aide des champs de saisie des coordonnées, entrez le rayon du cercle

DX 0.16, dy: 0.0, dZ: 0.0: Appuyez sur la touche Entrée

Dans la fenêtre Propriétés nom: Port1

Cliquez sur le bouton OK

Sélectionnez: Port1

#### IV-4-10. Attribuer une excitation au port d'onde

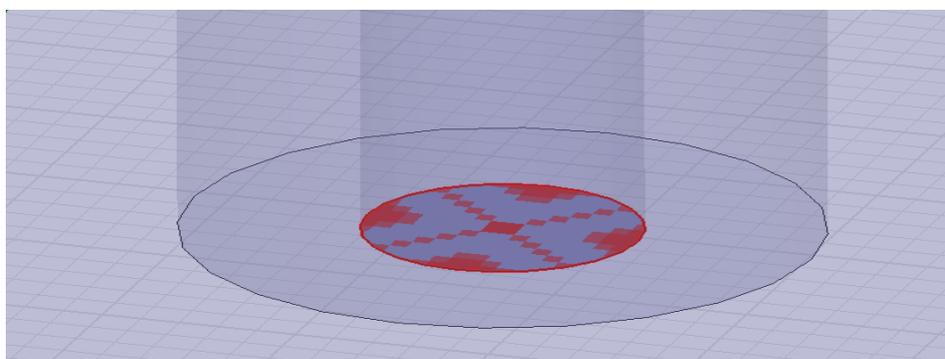
HFSS>Excitations>Assign>Wave Port

Spécifié le nom: p1

Le terminal est p1 dans l'arborescence du projet.



L'excitation est illustrée ci dessous:



## IV-4-11. Création de la sonde (probe):

Cliquez sur Draw> Cylinder

En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez la position du cylindre

X: -0.5, Y: 0,0, Z: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

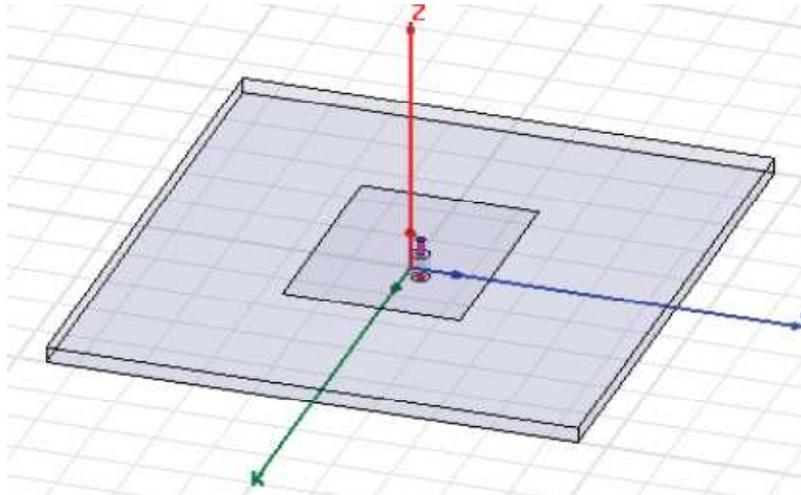
À l'aide des champs de saisie de coordonnées, entrez le rayon:

Dx : 0.07, dy: 0.0, dZ: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

Utiliser les champs de saisie des coordonnées, entrez la hauteur:

DX 0.0, dy: 0.0, dZ: 0,32 Appuyez sur la touche Entrée

Définir le nom: Probe



Pour définir le matériau par défaut: Utilisez de la barre d'outils Modeler Matériaux 3D.

Choisir vaccum.

## IV-4-12. Créer l'Air

Cliquez sur **Draw>Box**

En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez la position de la boîte

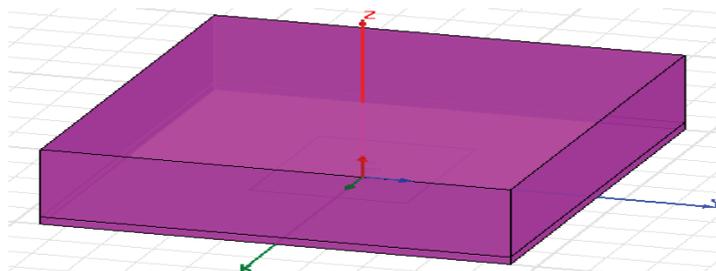
X: -5.0, Y: -4.5, Z: 0.0, appuyez sur la touche Entrée

À l'aide des champs de saisie des coordonnées, entrez le coin opposé de la boîte

DX 10.0, dy: 9.0, dZ: 3.32.

Définir le nom: Air

Pour s'adapter à la vue: Cliquez sur **View>Fit All>Active View**



### IV-4-13. Assigner les conditions aux limites (Radiation Boundary)

Sélectionnez les faces :

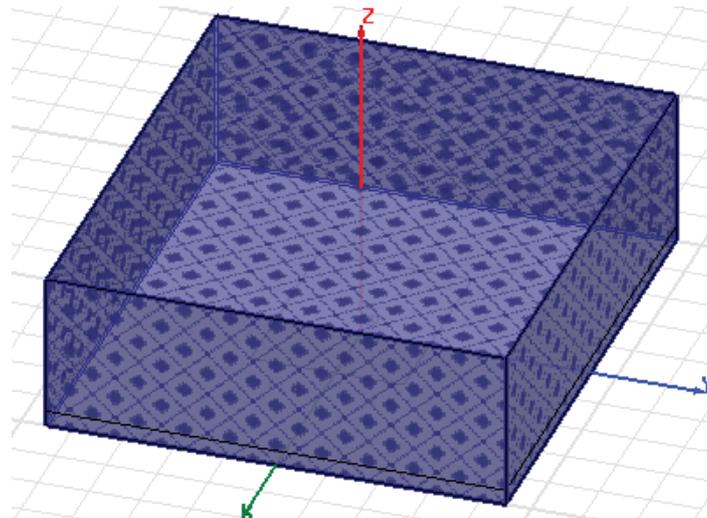
Cliquez sur **Edit>Select>Faces**

Sélectionner graphiquement toutes les faces de l'objet, sauf la face à  $Z = 0.0\text{cm}$  (le fond).

Pour créer une limite de rayonnement HFSS>Boundaries>Assign>Radiation

La boîte de dialogue des limites des rayonnements s'ouvre, nommé: Rad1

La radiation est illustrée ci dessous:



### IV-4-14. Créer une configuration du rayonnement (radiation setup)

Pour définir la configuration de rayonnement

HFSS>Radiation>Insert Far Field Setup>Infinite

La boîte de dialogue Far Field Radiation Sphere Setup s'ouvre.

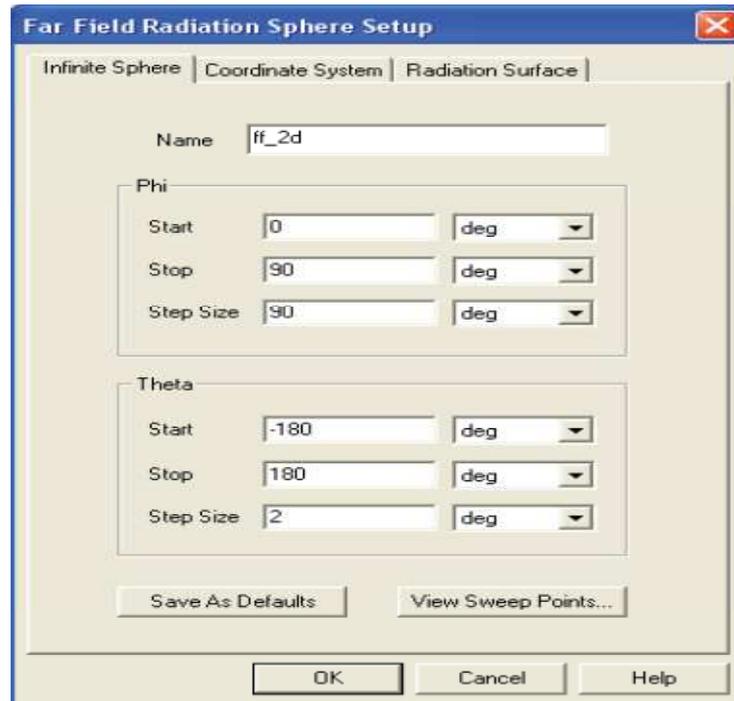
Sélectionnez l'onglet sphère infinie :

Nom: ff\_2d

Phi: (Début: 0, Arrêt: 90, Step Taille: 90)

Theta: (Début: -180, Arrêt: 180, Step Taille: 2)

Cliquez sur OK.



**IV-4-15. Configuration de l'analyse (Analysis Setup)**

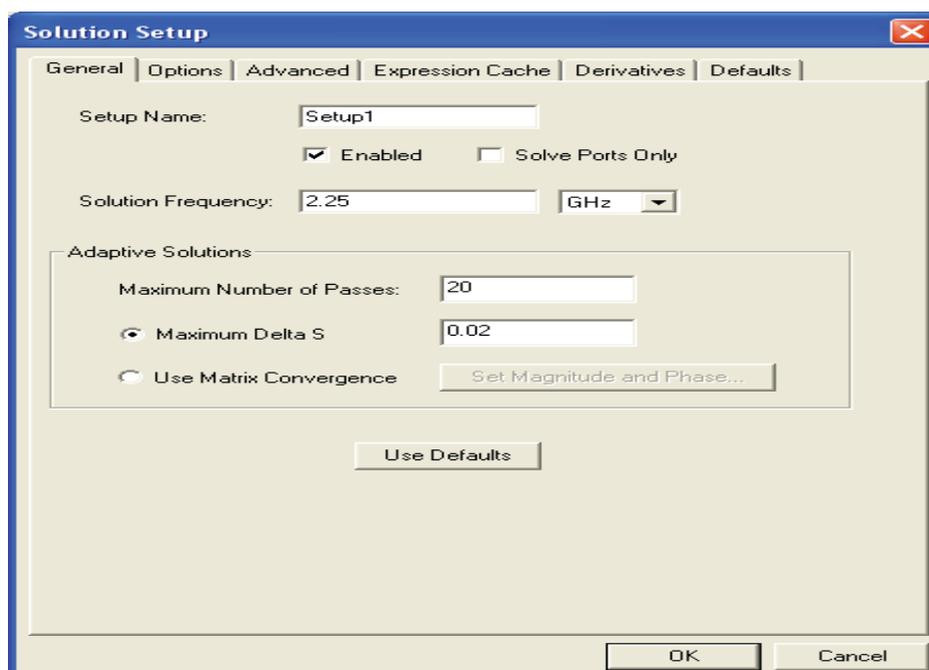
Création d'une configuration d'analyse HFSS>Analysis Setup>Add Solution Setup

Dans l'onglet Général:

Solution fréquence: 2,25 GHz

Nombre maximum de passes: 20

Delta maximale: 0.02



### IV-4-16. Ajout d'une fréquence de balayage (Frequency Sweep)

HFSS>Analysis Setup>Add Sweep

Add/Edit Sweep.

Indiquez les éléments suivants:

Sweep Type: Fast (Type de balayage: Rapide)

Frequency Setup Type: Linear Count

Start: 1.0GHz

Stop: 3.5GHz

Count: 201

### IV-4-17. Analyse

Validation du modèle>HFSS>Validation Check

Cliquez sur HFSS>Analyze All

Pour afficher les données de la solution:

Cliquez HFSS>Results>Solution Data la boîte de dialogue de données solution s'ouvre.

### IV-4-18. Création des rapports

HFSS>Results>Create Terminal Solution Data Report.

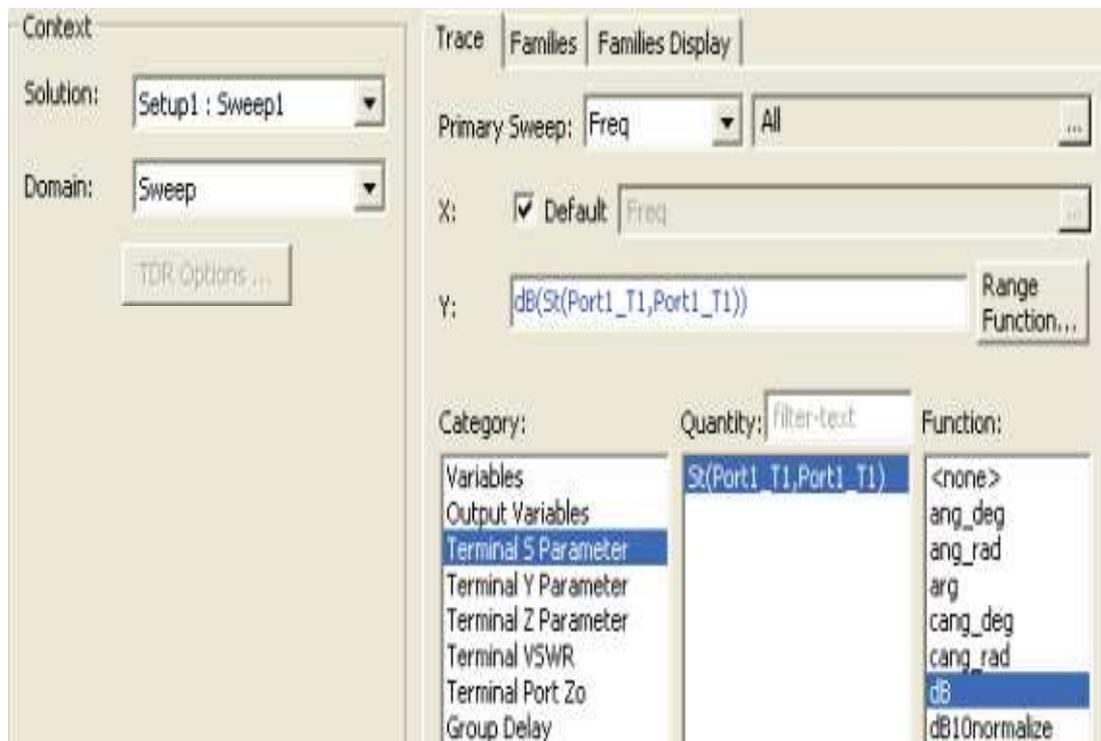
Solution: Setup1: Balayage1

Domaine: Sweep

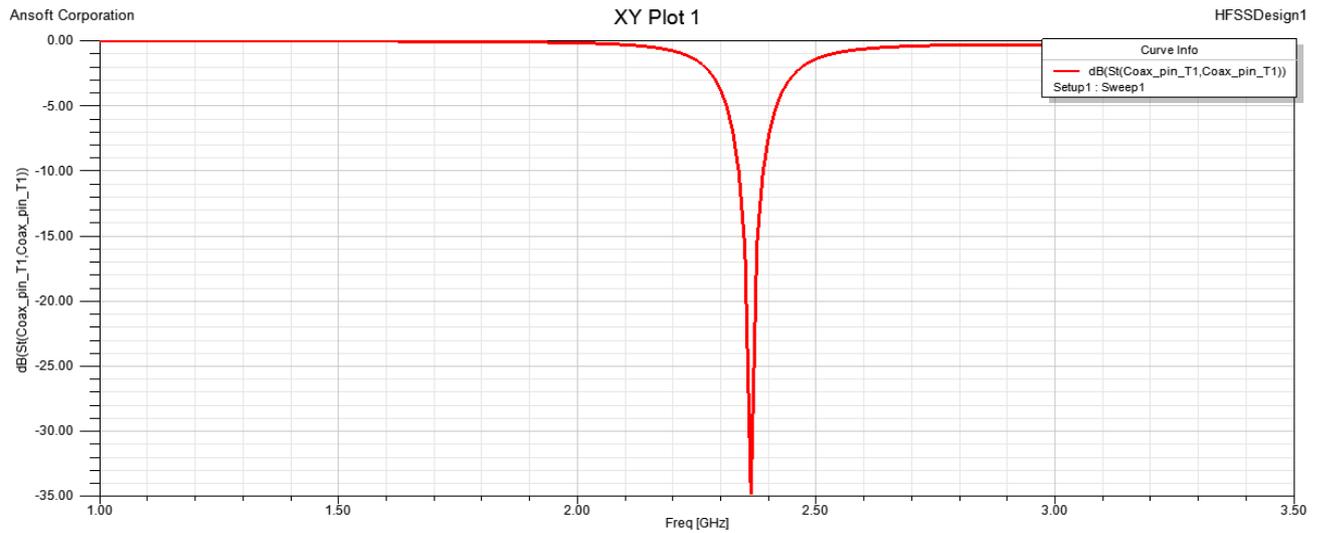
Catégorie: Terminal S Paramètre

Quantité: St (Port1\_T1, Port1\_T1),

Fonction: dB



Cliquez sur **New Report**



## IV-4-19. Créer un rapport de Champ lointain

HFSS>Results>Create Far Fields Report>Radiation Pattern.

Solution: Setup1: sweep1

Géométrie: ff\_2d

Dans l'onglet Trace:

Sélectionnez Theta le balayage primaire.

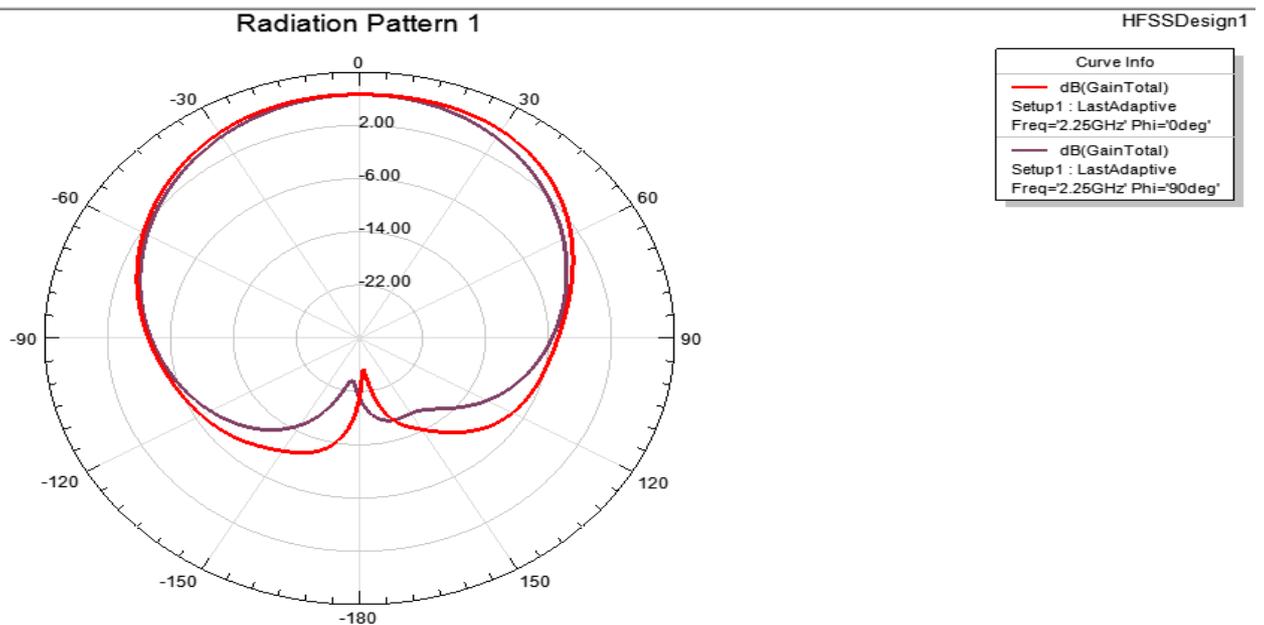
Catégorie: Gain

Quantité: GainTotal

Fonction: dB

Cliquez sur New rapport.

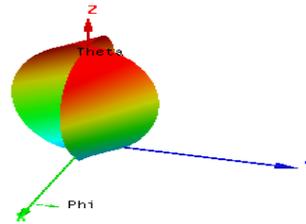
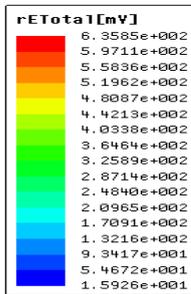
Le diagramme de rayonnement en 2D s'affiche:



Pour l'affichage en 3D

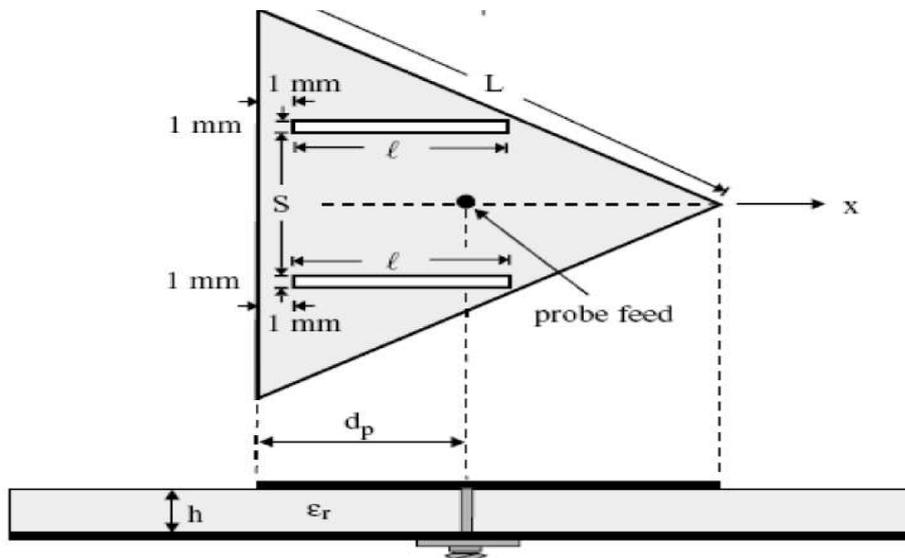
HFSS>Results>Create Far Fields Report>3D polar plot.

Cliquez sur New report:



### IV-5. Antenne Microruban Triangulaire

Simuler et analyser une Antenne complexe comme l'antenne bi fréquences triangulaire équilatéral avec une paire de fentes étroites en utilisant l'Ansoft HFSS. Notre objectif principal est de montrer comment créer le dessin compliqué.



Cette figure représente la géométrie de l'antenne triangulaire équilatéral double avec une paire de fentes étroites.

#### IV-5-1. Débuté le projet

A présent, vous pouvez lancer HFSS, l'ouverture d'un projet et nommez-le "Triangular\_Antenna".

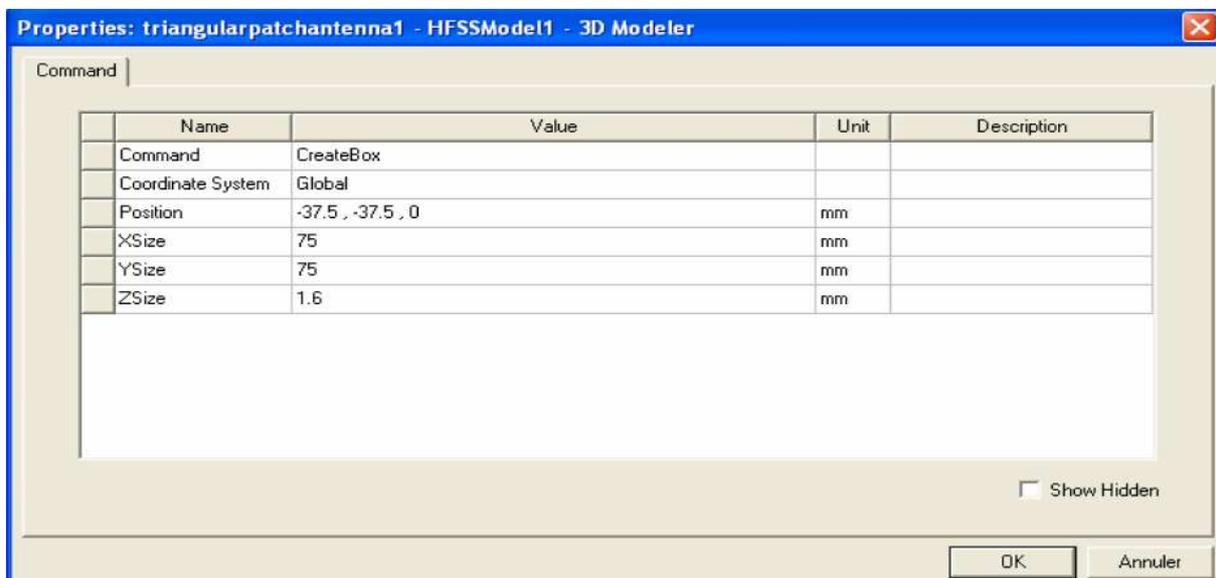
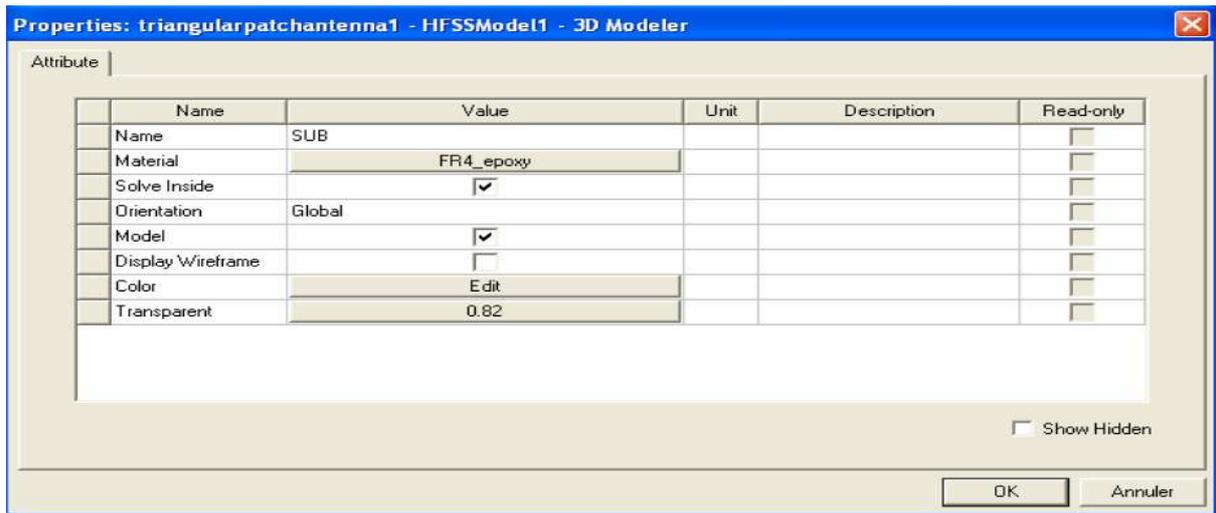
Ensuite, réglez le type de solution:

- Sélectionner le menu HFSS >Solution Type

- Choisissez Driven Terminal
- Cliquez sur le bouton Ok
- Pour définir les unités
- Sélectionner l'élément de menu 3D modeler > Units
- Sélectionnez l'unité: mm
- Cliquez sur le bouton OK

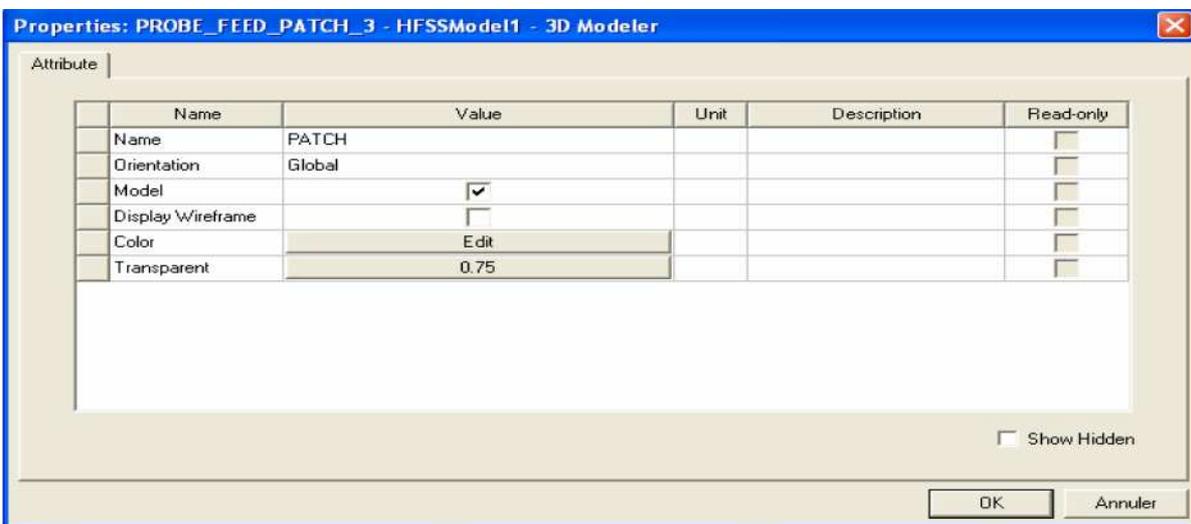
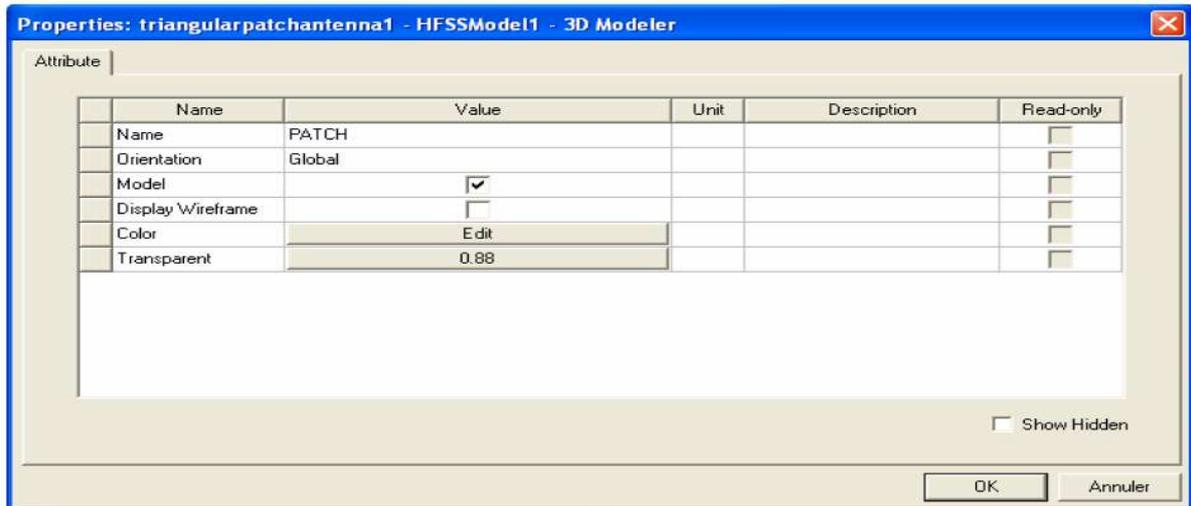
### IV-5-2. Créer le substrat

Pour dessiner le substrat, cliquez sur  de la barre d'outils. Puis remplissez la table :

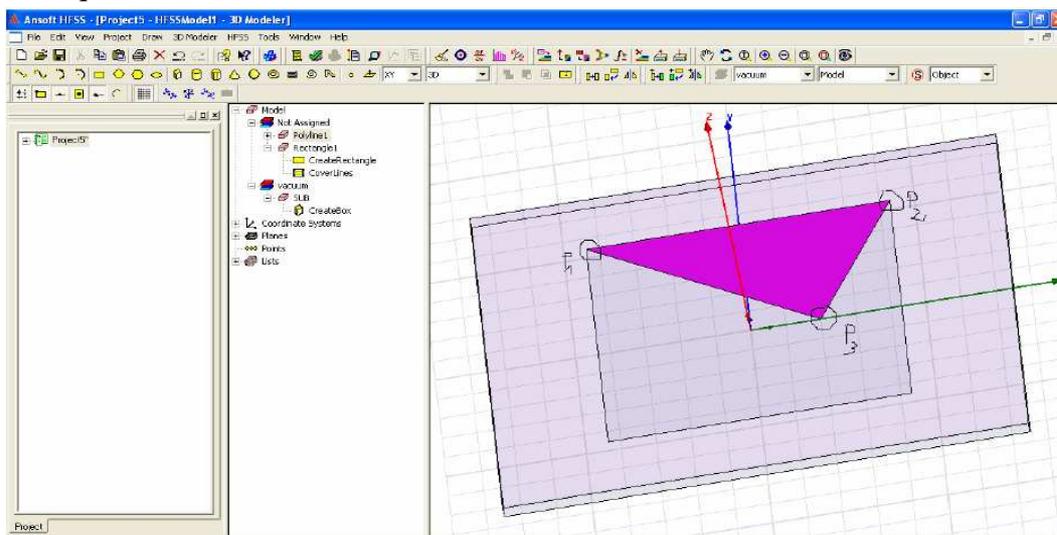


### IV-5-3. Dessiner le Patch triangulaire

Dessiner le patch, cliquez sur  de la barre d'outils. Ensuite, dessinez un rectangle en remplissant les données ci-dessous :

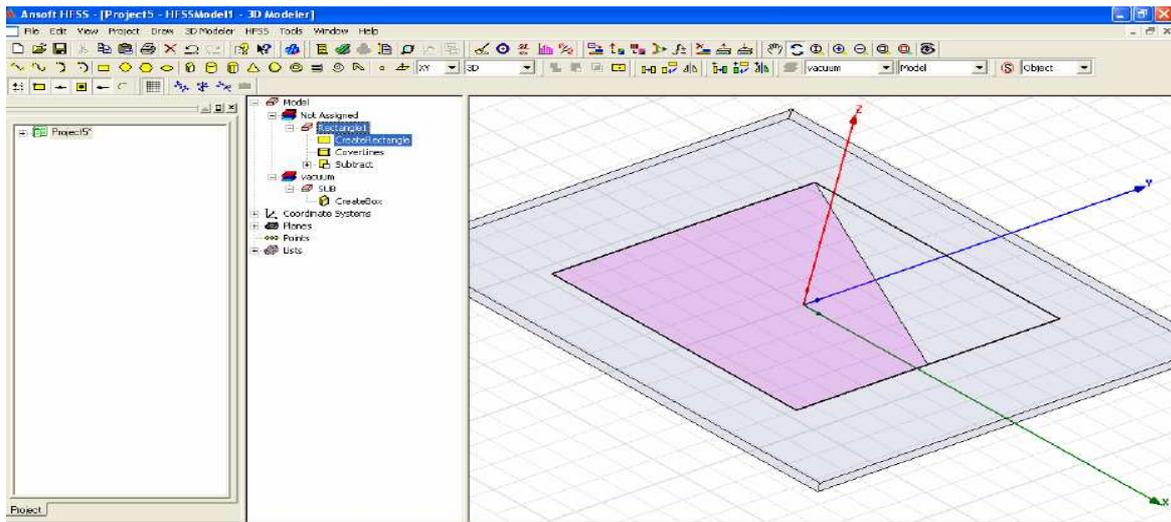


Nous commençons à tracer une ligne poly pour former un triangle, comme indiqué ci-dessous en cliquant sur cette icône  sur la barre d'outils.

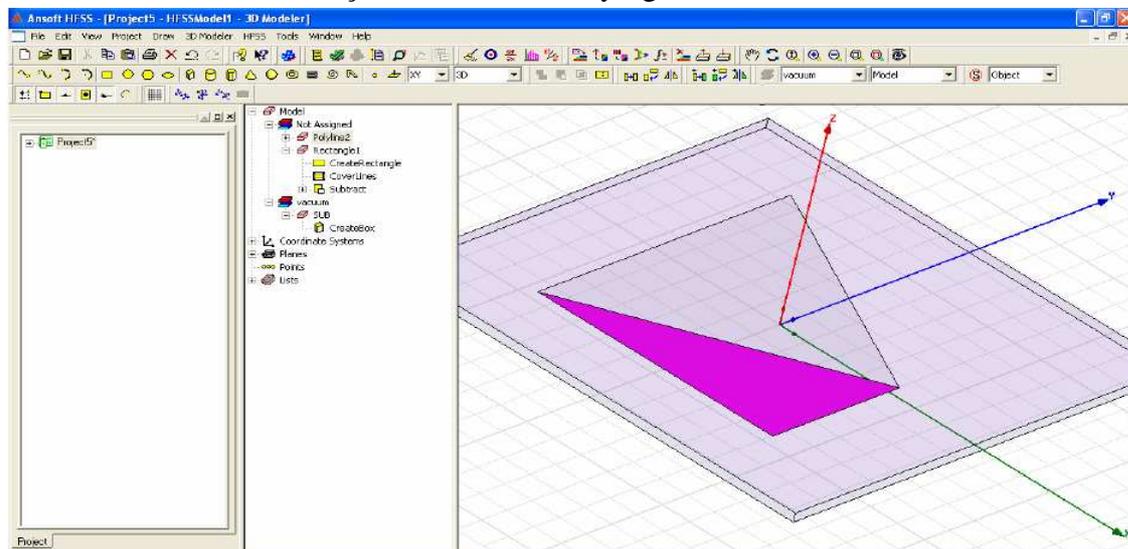


Puis commencer à saisir les positions des points (P1, P2 et P3).

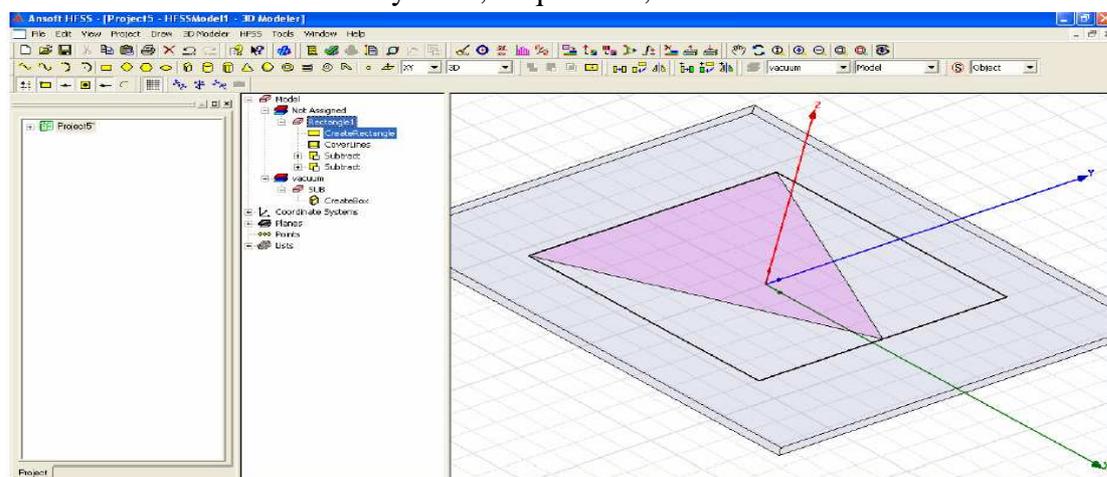
Ensuite, sélectionnez le Patch & Polyline1, clique droit, sélectionnez Edit > Boolean > Subtract



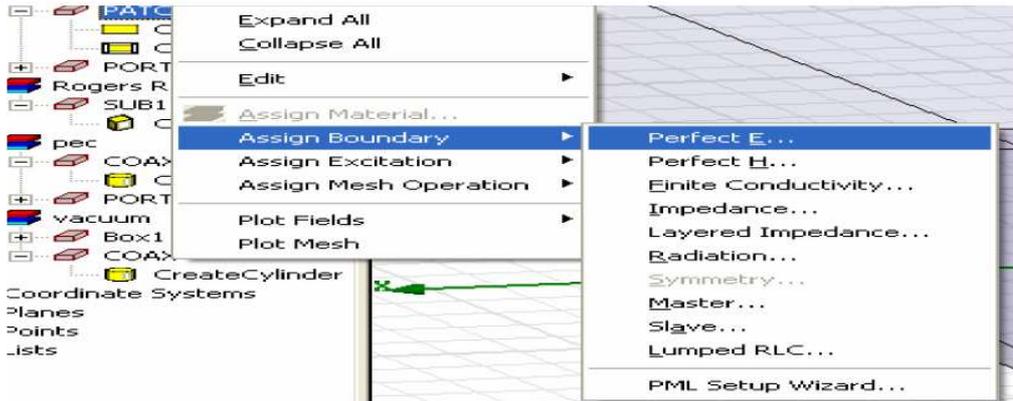
Maintenant, nous commençons un second Poly ligne



Entrez ensuite les positions des points appropriés à la poly ligne 2, lorsque vous aurez terminé de sélectionner le Patch & Poly line2, cliquez droit, sélectionnez Edit > Boolean > Subtract

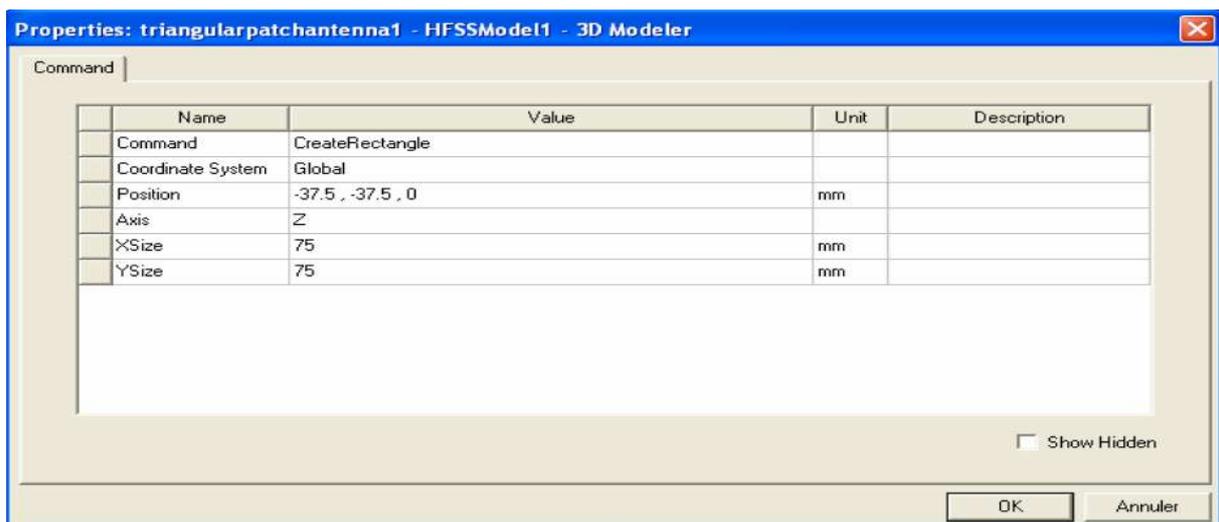
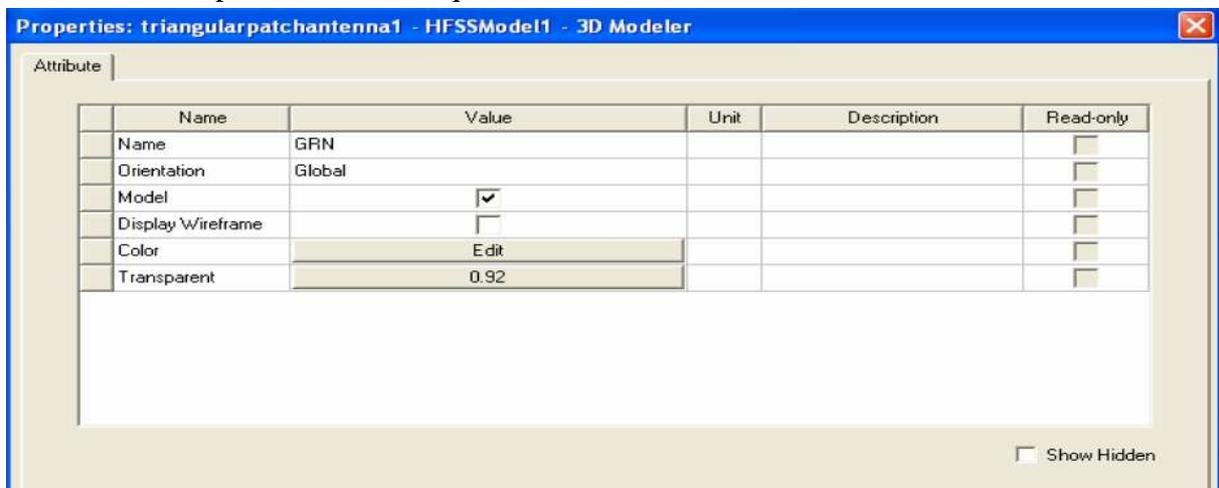


Attribuer une frontière perfect E pour le patch. Sélectionnez Patch, cliquez droit Boundary > Perfect E...

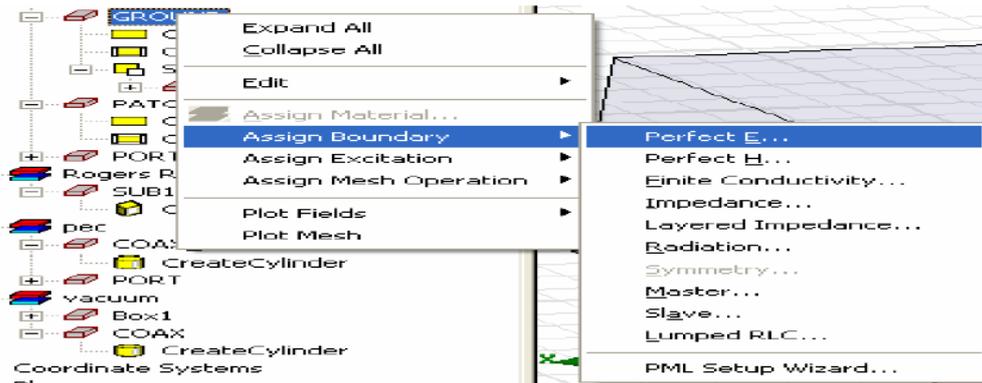


#### IV-5-4. Plan de masse

Pour dessiner le plan de masse, cliquez sur  de la barre d'outils.

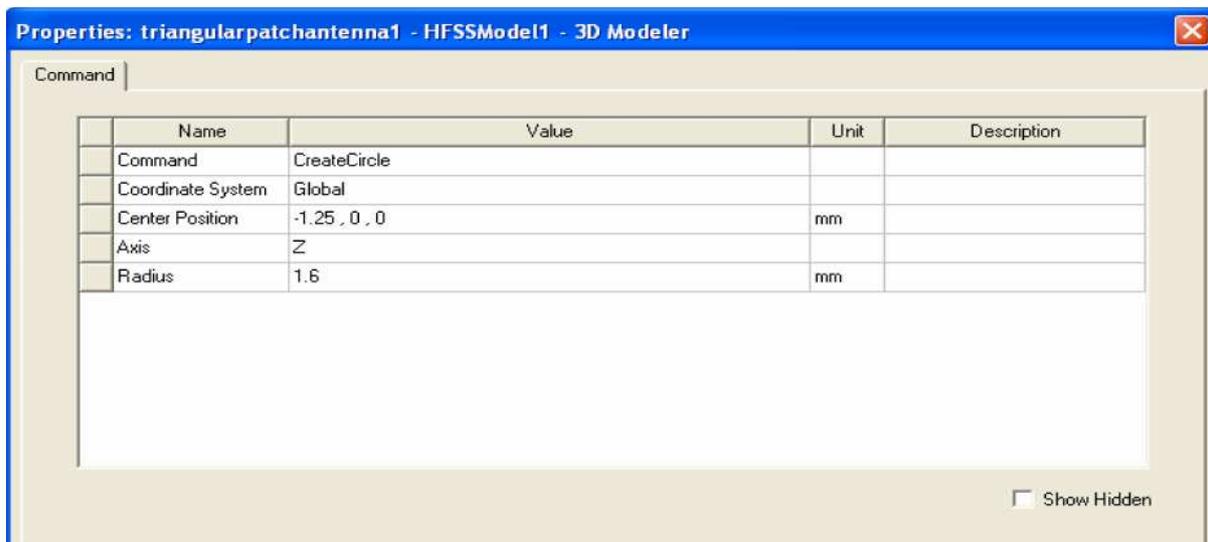
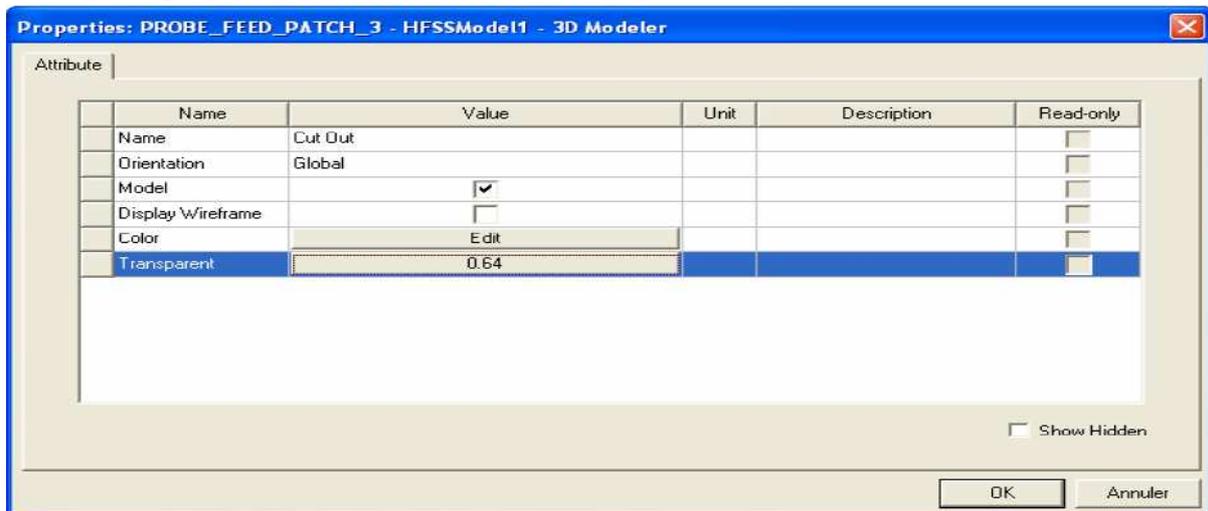


Puis assignez une frontière perfect E pour le patch. Sélectionnez le plan de masse, cliquez droit sélectionnez assign>Boundary> Perfect E ...



#### IV-5-5. Créer le câble coaxial

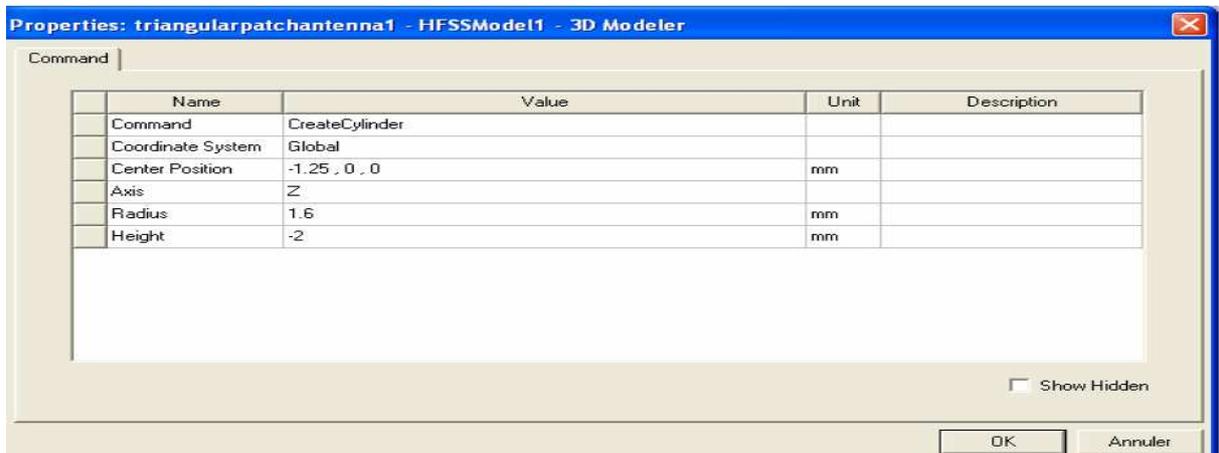
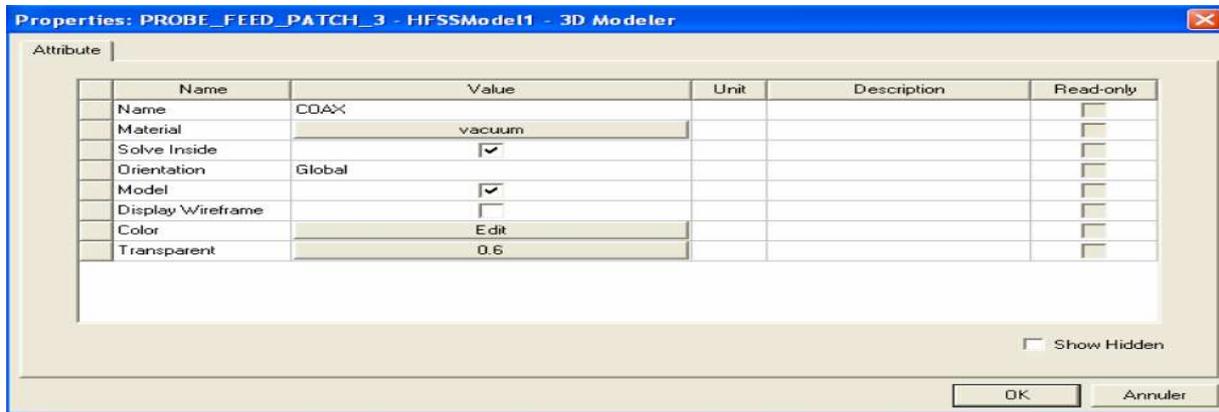
L'antenne est excitée à l'aide d'un câble coaxial. Ce port est situé sous le patch. Pour dessiner le câble coaxial, nous commençons par dessiner le plan de masse infini Cut\_Out comme indiqué ci-dessous :



Ensuite, sélectionnez le plan de masse et Cut\_Out, cliquez droit, sélectionnez Edit > Boolean > Subtract

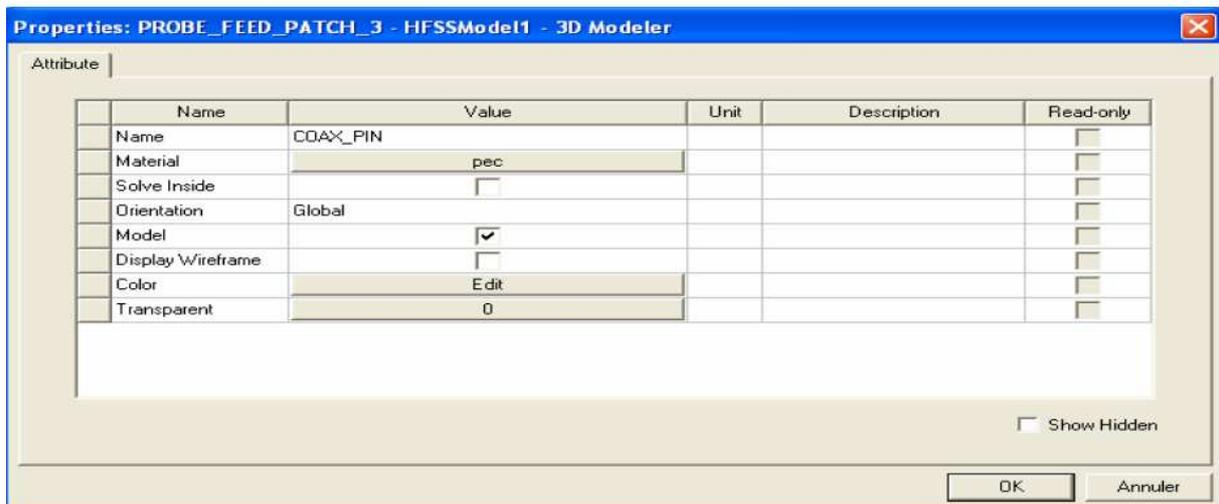
## Créer le câble coaxial

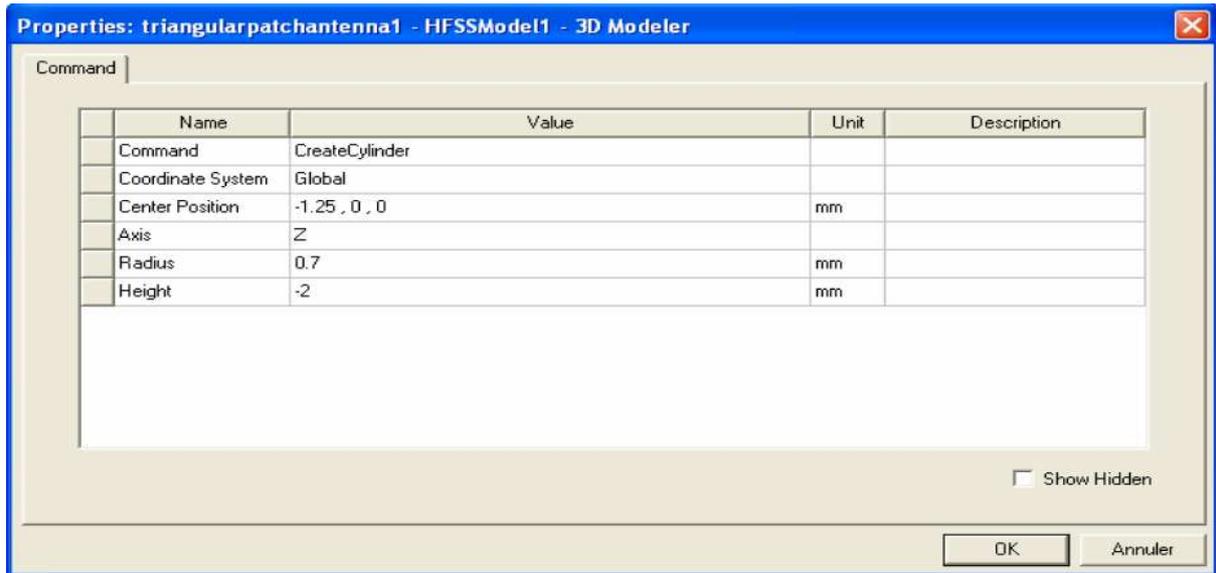
Pour créer le câble coaxial, sélectionnez l'élément de menu Draw> Cylinder, puis entrez les données décrites ci-dessous :



## IV-5-6. Créer l'âme centrale du coaxial

Sélectionnez l'élément de menu Draw> Cylinder, puis entrez les données comme décrites ci-dessous :

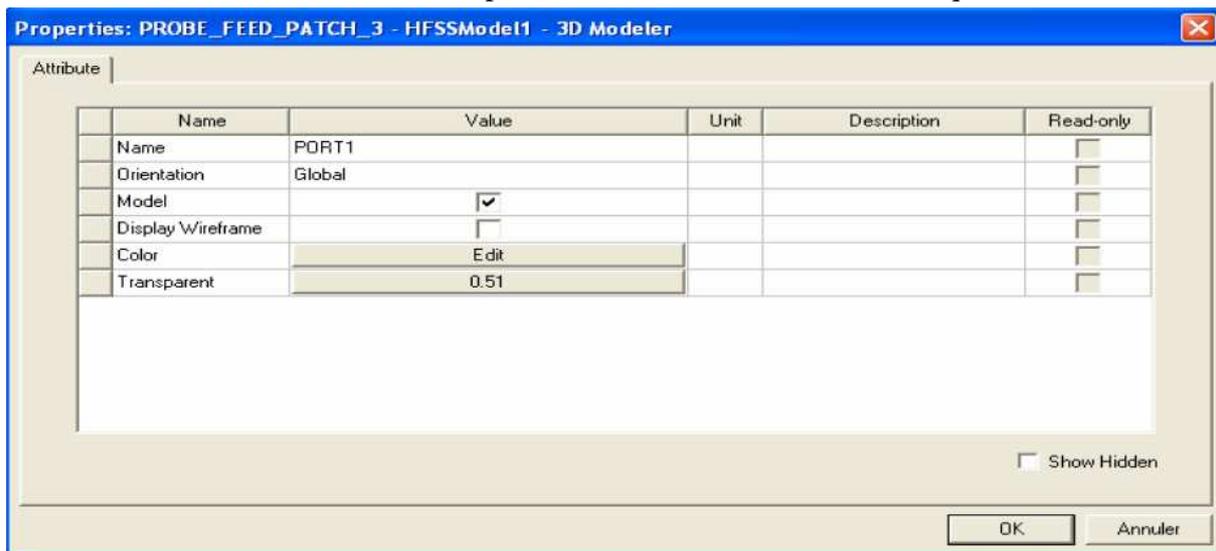


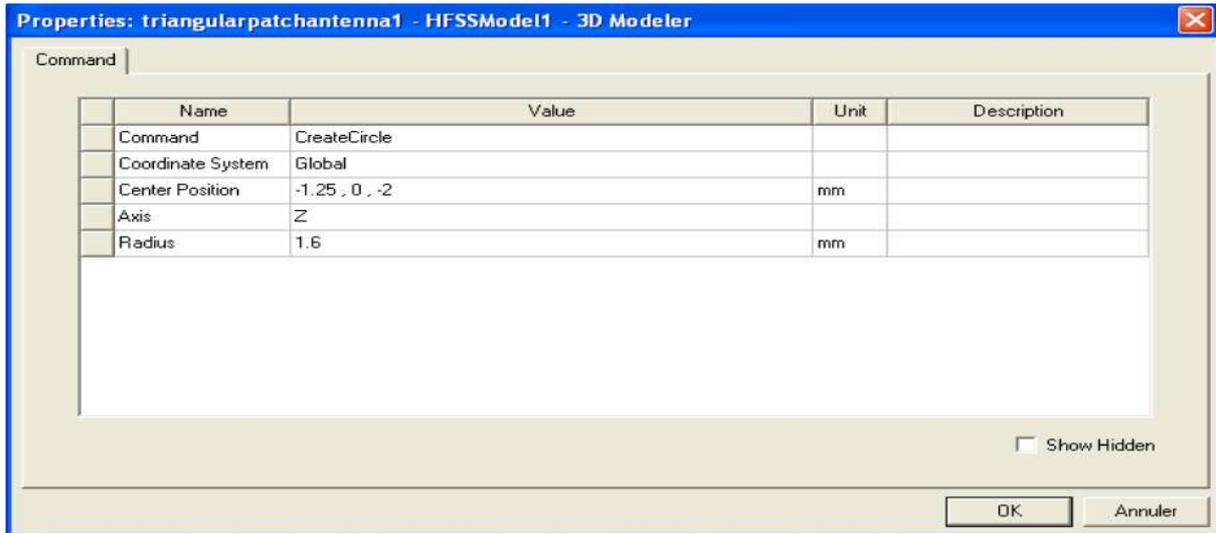


#### IV-5-7. Créer le port d'onde

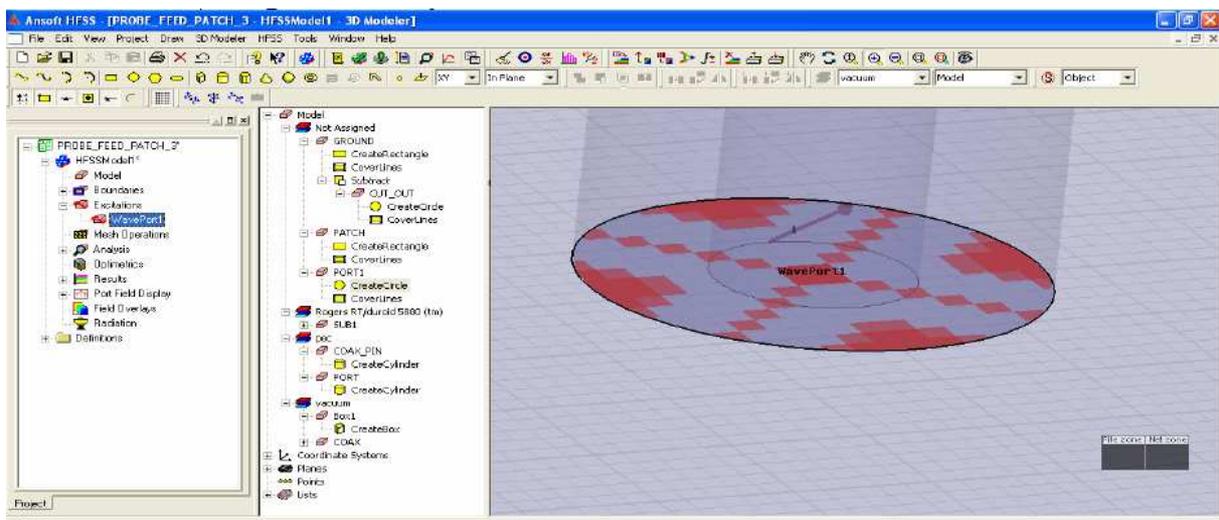
Pour créer un cercle qui représente le port:

Sélectionnez le menu Draw > Circle, puis entrez les données comme indiqué ci-dessous :



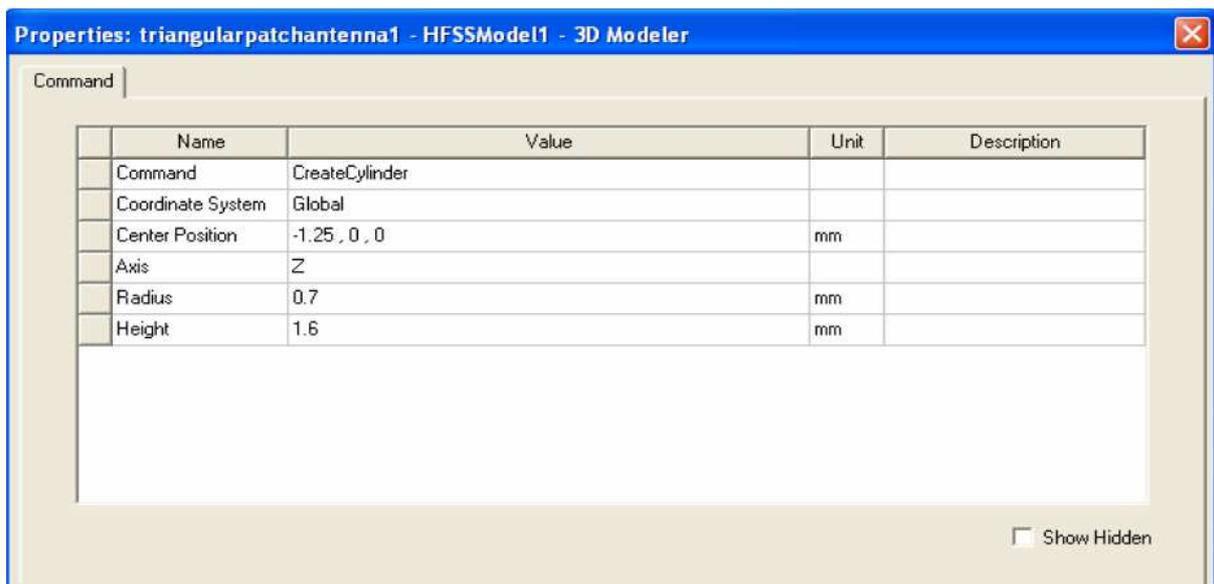
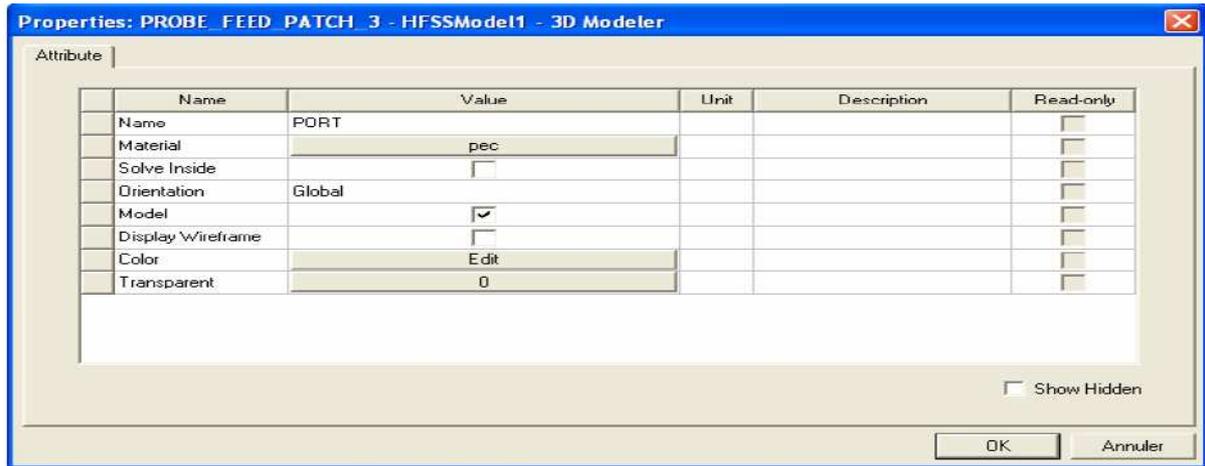


Pour attribuer une excitation au port d'onde, sélectionnez Port 1, puis allez à Menu HFSS > Excitations > Assign > Wave port



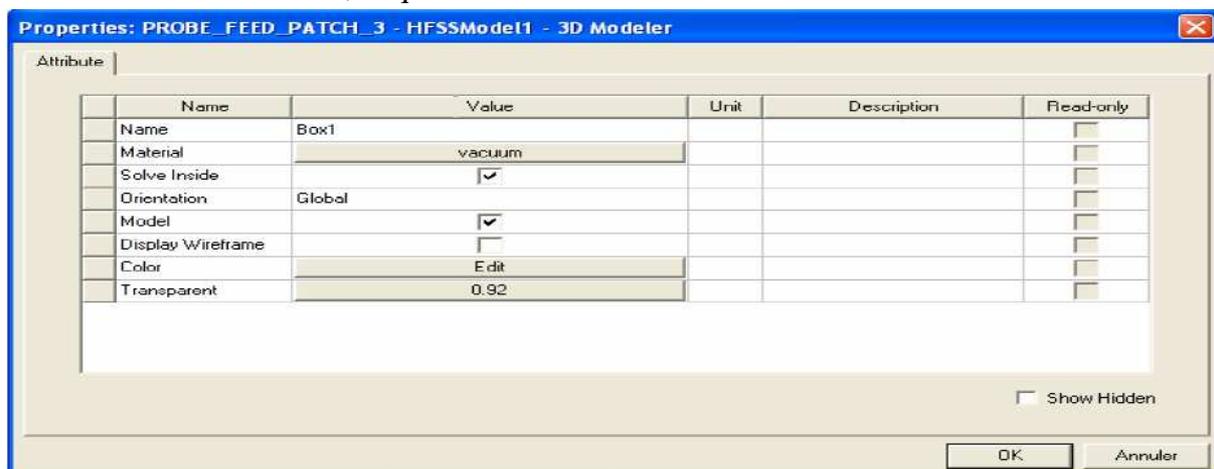
#### IV-5-8. Créer la sonde

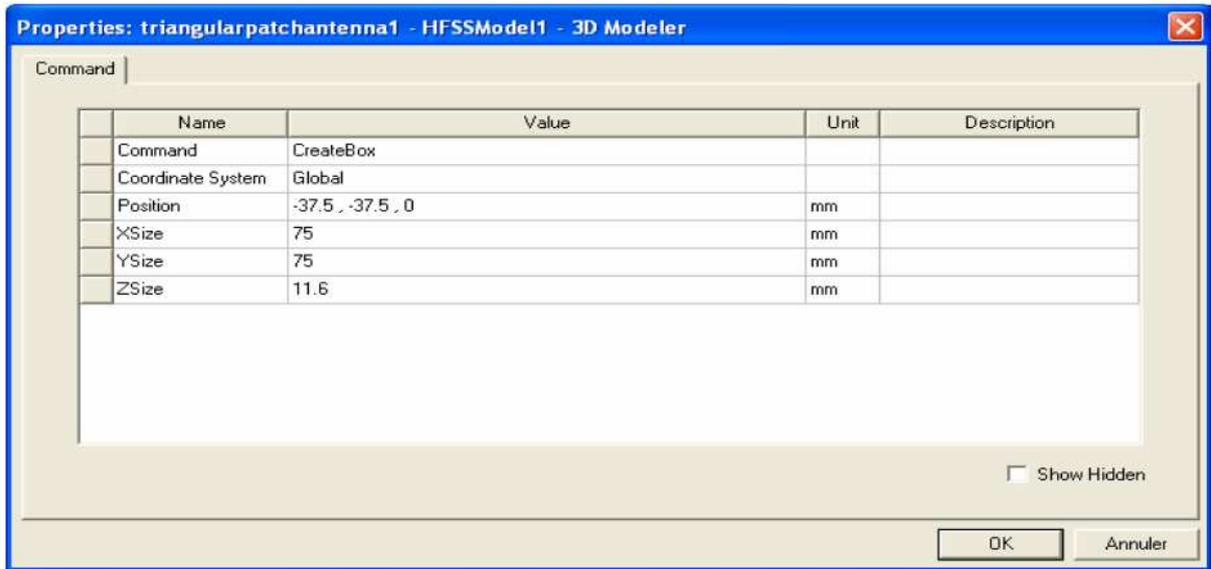
Pour créer la sonde, sélectionnez l'élément de menu Draw > Cylinder, puis entrez les données Ci-dessous :



#### IV-5-9. Assigner les conditions aux limites

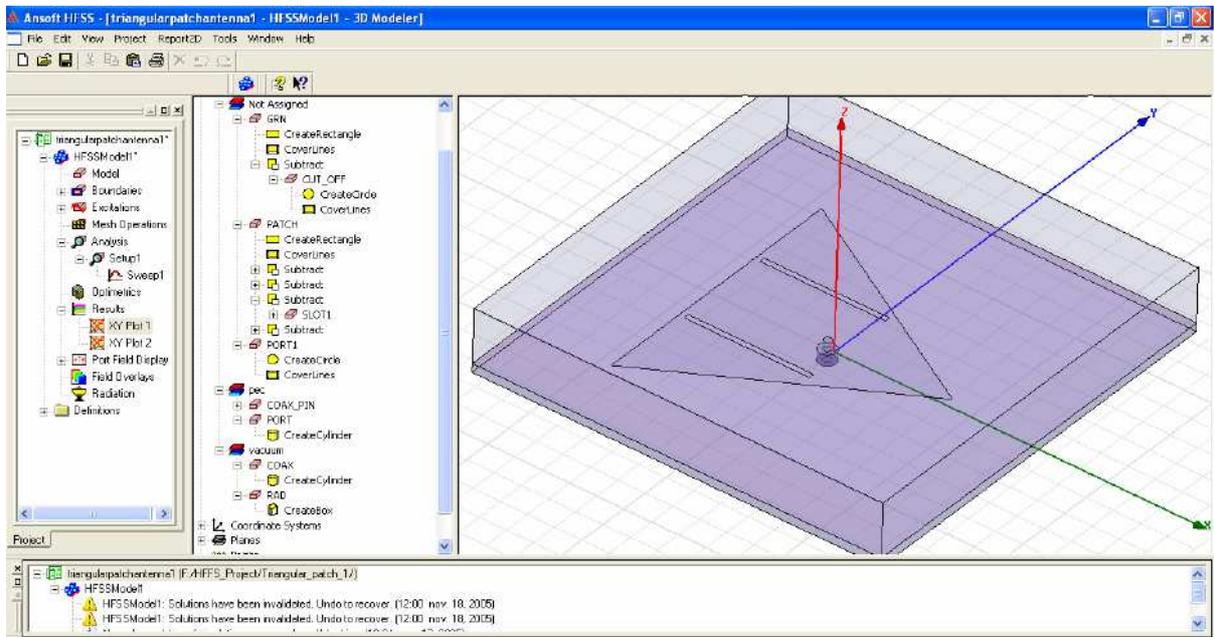
Pour dessiner la boîte à air, cliquez sur  la barre d'outils.





Maintenant, sélectionnez Box1, clique droit > Assign Boundary > radiation

L'antenne finale devrait ressembler à ceci :



#### IV-5-10. Configuration de l'Analyse

Enfin, nous avons notre modèle prêt à fonctionner. Maintenant, nous allons effectuer une configuration d'analyse, HFSS > Analysis Setup > Add Solution Setup.

Dans la fenêtre de configuration des solutions, cliquez sur l'onglet général, Solution Frequency: 1, 8 GHz, Maximum Number of Passes: 20 and Maximum Delta S: 0.02

## IV-5-11. Ajout d'un balayage de fréquences

Pour ajouter un balayage de fréquences, HFSS > Analysis Setup > Add Sweep.

Sélectionnez Configuration de la solution: Setup1. Cliquez sur le bouton OK.

Sweep Type: fast, Frequency Setup Type: Linear Count, Start: 1 GHz, Stop: 3 GHz

Count: 200.

## IV-5-12. Validation du modèle

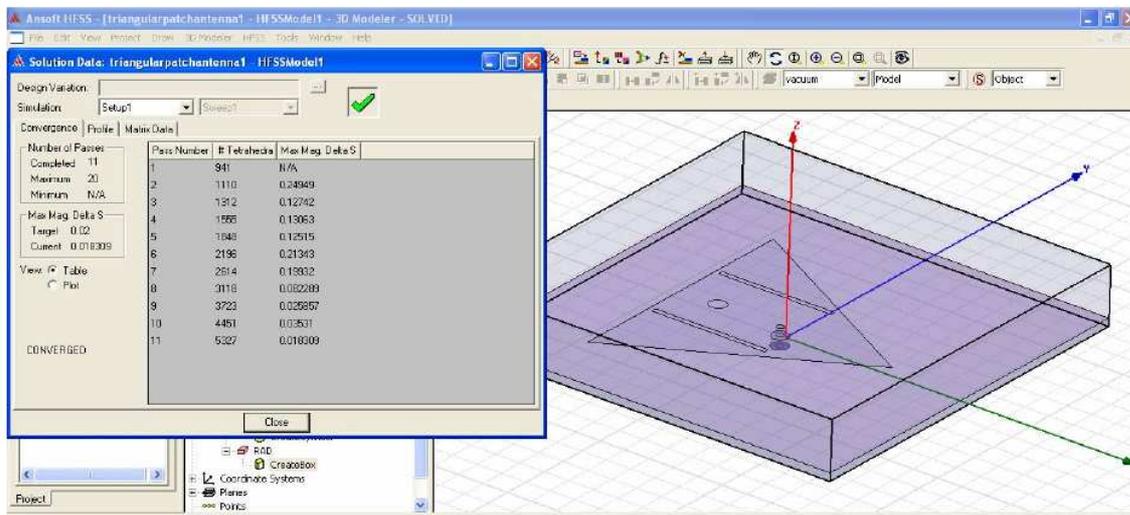
Pour valider le modèle, sélectionnez le HFSS de menu > Validation Check. Cliquez sur le

## IV-5-13. Analyser tout

Pour démarrer le processus, sélectionnez le menu HFSS > Analyser.

Ou cliquez sur l'icône .

## IV-5-14. Les données de la solution

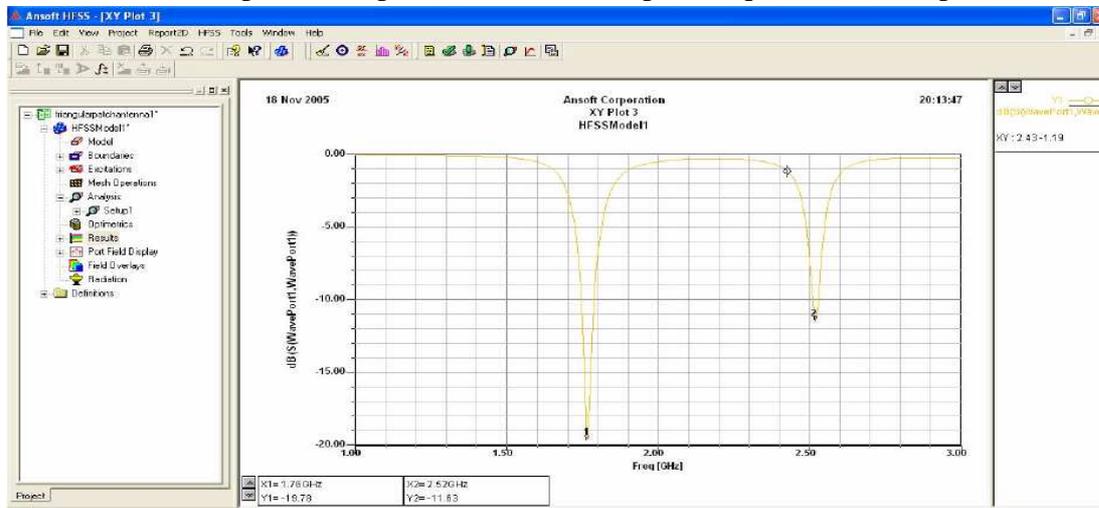


## IV-5-15. Créer les rapports

Results > Create modal solution data Report > rectangular plot

Dans la fenêtre, régler la solution pour Setup1: Adaptive1. Dans l'onglet Y : S Parameter,

Quantité : S (waveport, waveport), fonction : dB, puis cliquez sur new report.



## IV-6. Antenne RDA (Resonant dielectric antenna)

### IV-6 -1. Créer le nouveau projet

La première étape dans l'utilisation HFSS pour résoudre un problème, consiste à créer un projet dans lequel les données associées au problème peuvent être sauvegardées. Par défaut, lorsque vous exécutez HFSS 11, un nouveau projet nommé project n est créé et il insère une conception nommée HFSSDesignn.

### Insérez une conception HFSS

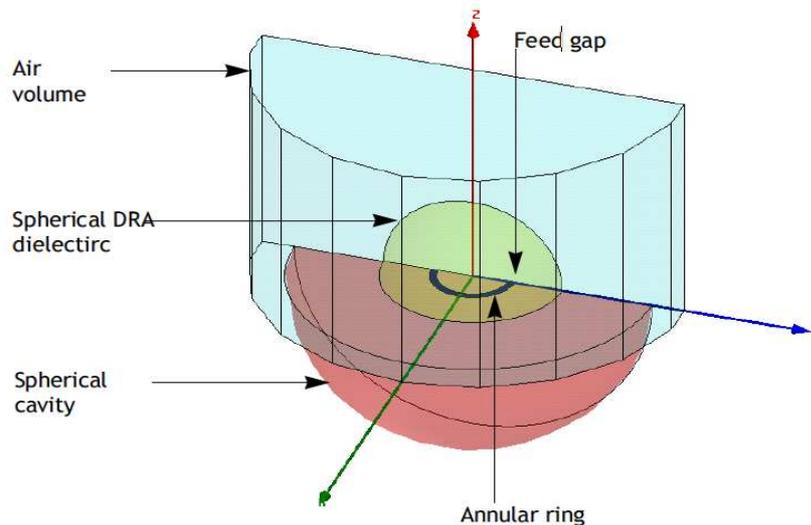
Pour insérer une conception HFSS dans le projet, effectuez l'une des actions suivantes:

- Cliquez sur Project > Insert HFSS Design.
- Cliquez-droit sur le nom du projet dans la fenêtre du gestionnaire de projet, et puis cliquez sur Insert > Insert HFSS Design.

### IV-6 -2. Création du modèle

Cette section vous montre comment créer la géométrie de l'antenne.

La géométrie de ce modèle d'antenne est indiquée sur la figure ci-dessous:



### IV-6 -3. Sélectionner le type de solution

Avant de dessiner le modèle d'antenne, vous devez d'abord spécifier le Type de la solution. Lorsque vous configurez votre modèle, les options disponibles dépendent du type de la solution de conception.

Pour spécifier le type de la solution:

-Cliquez sur HFSS>Solution Type.

Sélectionnez Driven modal.

### Réglages des unités

Maintenant, spécifier l'unité du dessin pour votre modèle. Pour ce problème d'antenne, définir les unités du dessin pour millimètres.

\*La géométrie de cette antenne à résonateur diélectrique (DRA) consiste des cinq objets élémentaires ci-dessous avec leurs dimensions:

Air volume de 30 mm d'air et une hauteur de 35 mm  
 Spherical Cavity est de 25 mm de rayon  
 Spherical DRA 12,5 mm de rayon  
 Annular ring 5,8 mm de rayon extérieur et d'une largeur de 1,0 mm.  
 Feed gap 1mm d'épaisseur.

### IV-6 -4. Dessiner la cavité

Le premier objet que vous allez en tirer est la cavité de l'antenne, qui est constitué par une sphère, puis la diviser en un solide hémisphérique.

### IV-6 -5. Dessiner la Sphère

Cliquez sur Draw>Sphere, ou cliquez sur le bouton sphère  de la barre d'outils.

Sélectionnez le point central de la sphère en entrant les valeurs suivantes dans les boîtes des coordonnées: X coordinate 0, Y coordinate 0, Z coordinate 0

Appuyez sur la touche de tabulation pour passer à la zone de texte de coordonnées suivante.

La barre d'état vous invite maintenant à entrer un rayon de la sphère.

Appuyez sur Entrée pour accepter le point central.

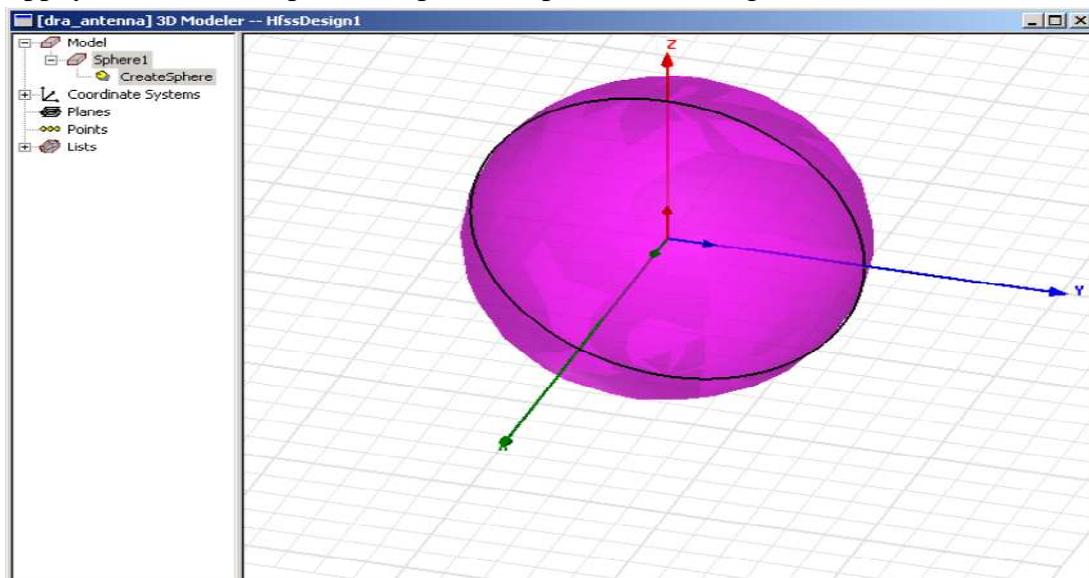
Tab dans la zone X et entrez 25.

Appuyez sur Entrée pour accepter la valeur du rayon.

La fenêtre Propriétés apparaît. Cliquez sur OK.

La sphère apparaît dans la zone de dessin.

Appuyez sur Ctrl + D pour s'adapter à la sphère dans la région dessin.



Renommez la sphère : Cavity

### Diviser la cavité

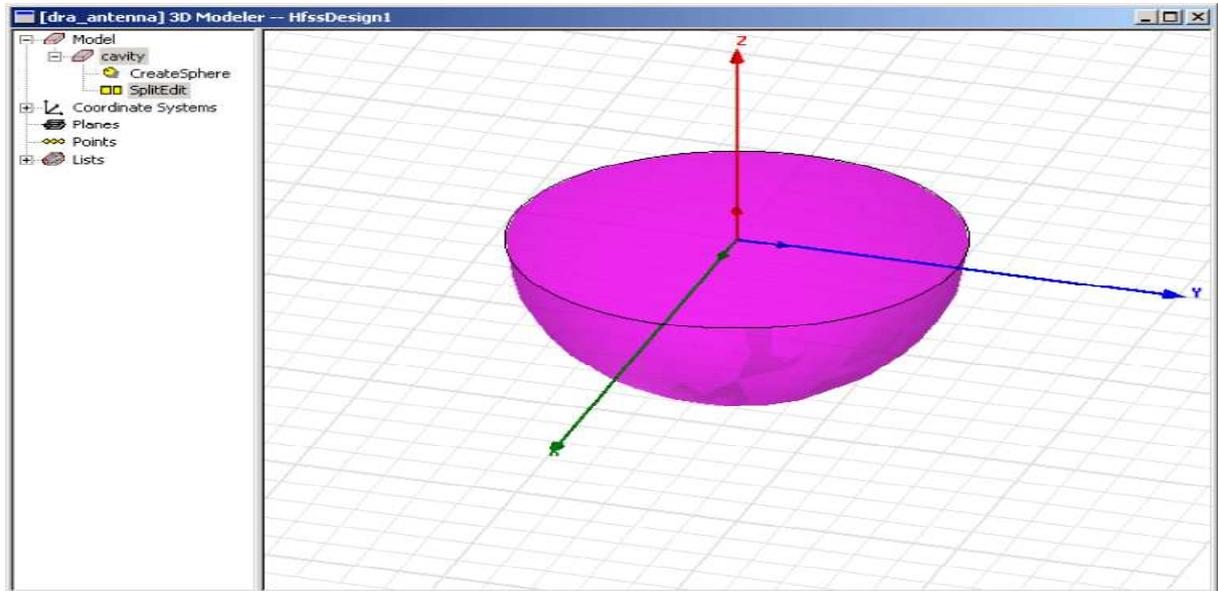
Diviser la cavité en un solide hémisphérique. Pour cela :

Sélectionnez la cavité, Cliquez Modeler> Boolean> Split.

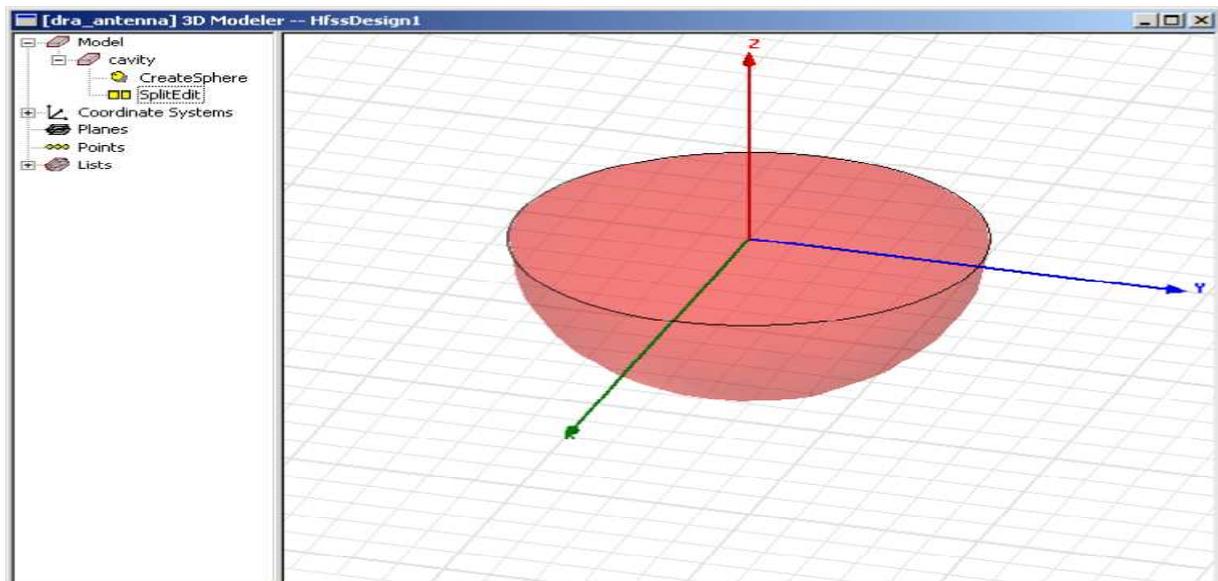
La boîte de dialogue de Split apparaît.

Sélectionner XY split plane qui sera utilisé pour diviser la cavité .

Sélectionnez Negative side. La cavité est subdivisée en un solide hémisphérique, comme indiqué ci-dessous:



Attribuer une couleur red (RGB settings 255, 0, 0) et une transparence 0.07.



#### IV -6-6. Dessiner le DRA

Maintenant, dessinez le résonateur diélectrique (DRA).

Draw> Sphere.

Sélectionnez le point de centre (0, 0, 0) de la sphère en saisissant les valeurs dans X, Y, Z et des boîtes de coordonnées.

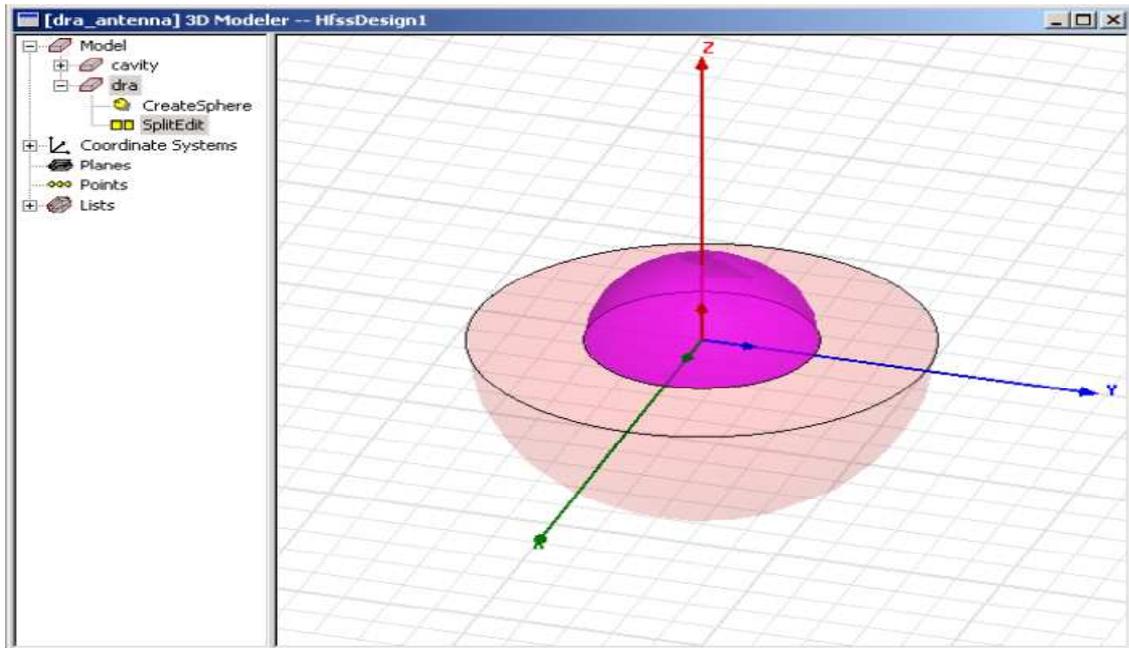
Appuyez sur Entrée pour accepter le point central.

Tab dans la boîte DX et entrer 12.5 que le rayon de la sphère.

Appuyez sur Entrée pour accepter la valeur du rayon.

La sphère apparaît dans la zone de dessin.

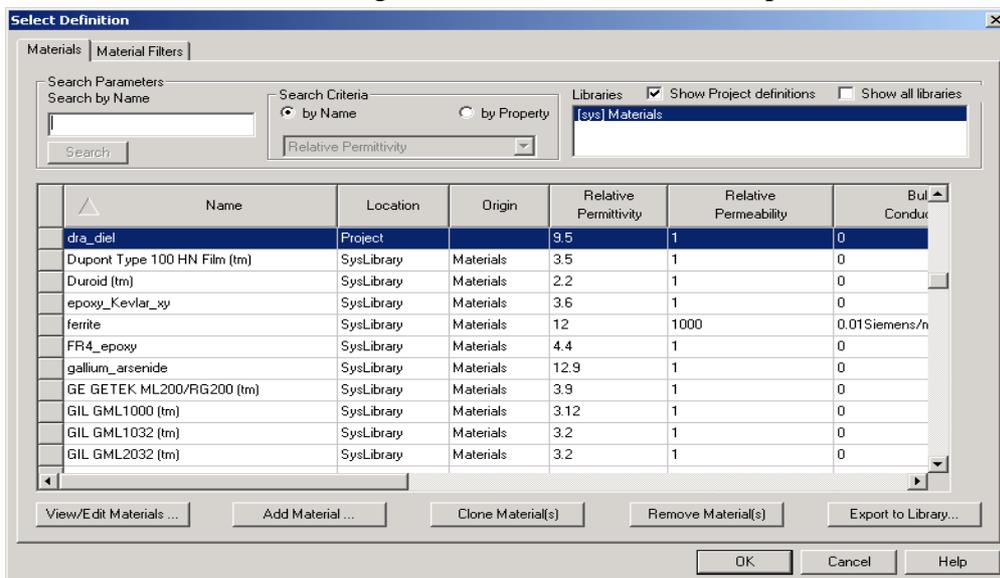
La sphère doit apparaître comme indiqué ci-dessous:



Renommer la sphère :DRA

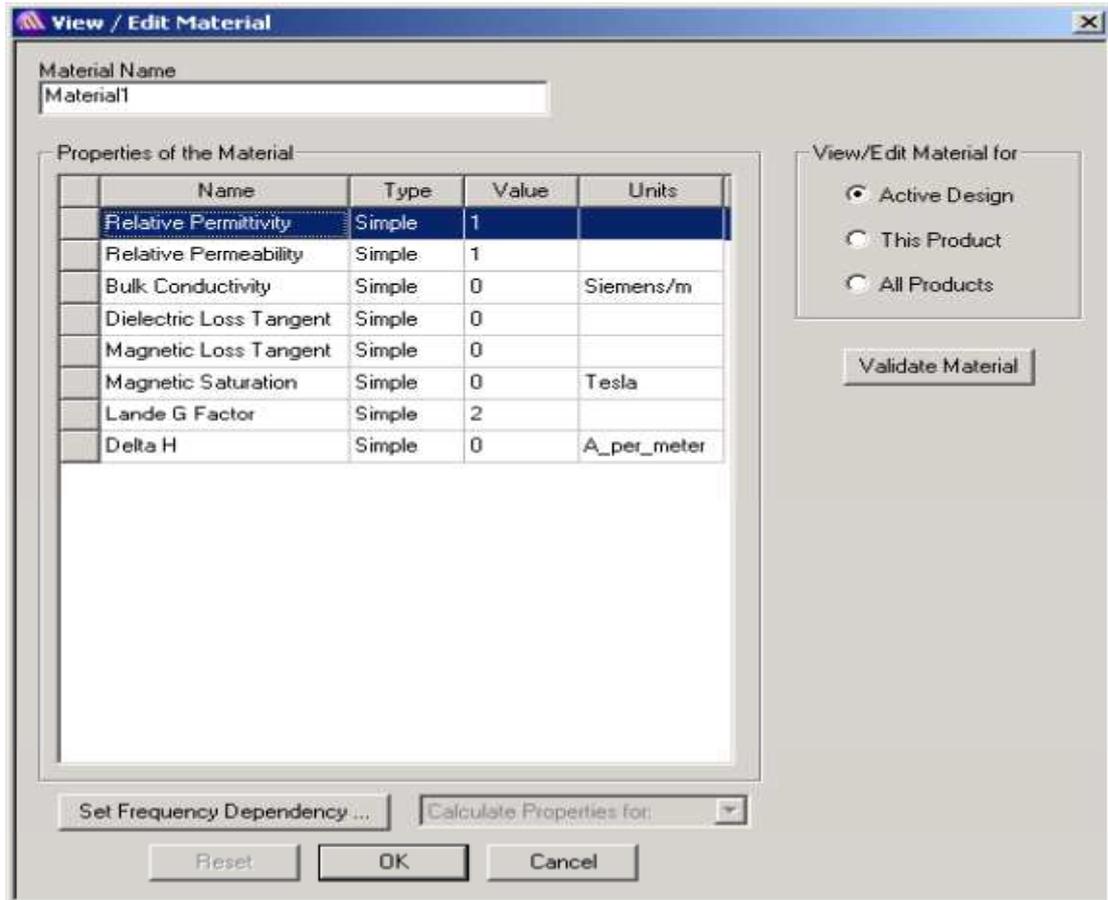
créer un nouveau matériau et l'assigner à DRA

-Sélectionnez dRA, sous l'onglet Attribute de la fenêtre PropriétésMM



Cliquez sur Add Material.

La boîte de dialogue matériau apparaît:



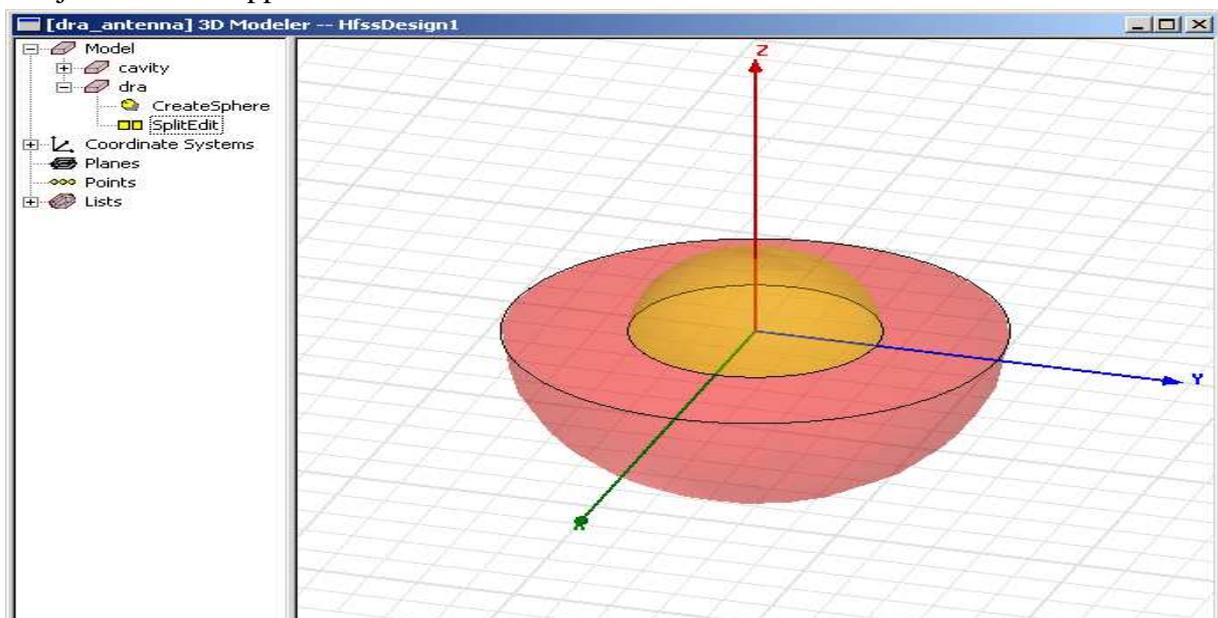
- Tapez dra\_diel dans la zone de texte name material pour nommer le nouveau matériel.
- Dans la ligne de la permittivité relative, tapez 9,5 , puis appuyez sur Entrée pour accepter la valeur.

Cliquez sur OK.

Le dra\_diel matériel apparaît maintenant dans le navigateur de matériel.

Le nouveau dra\_diel matériel est maintenant assigné au DRA .

L'objet DRA doit apparaître dans votre modèle d'antenne ci-dessous:



## IV-6 -7. Créer l'anneau d'alimentation

Dans ce modèle d'antenne, l'anneau d'alimentation est contrôlé par l'ouverture à travers lequel le-champ E va rayonner.

Dessinez Circle1

Cliquez sur Draw> Circle, ou cliquez sur le bouton cercle Dessin  de la barre d'outils. Sélectionnez le point de centre (0, 0, 0) du cercle en tapant les valeurs dans les boîtes deS coordonnées

Appuyez sur Entrée.

Tab dans la zone X et entrez 4.8 comme rayon.

Appuyez sur Entrée pour accepter la valeur.

La fenêtre Propriétés apparaît.

Circle1 apparaît maintenant dans le modèle.

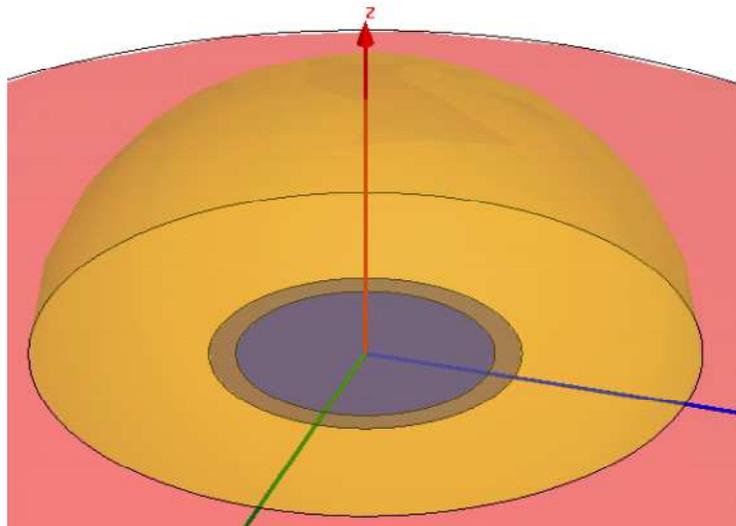
Dessinez Circle2

Cliquez sur Draw> Circle, ou cliquez sur le bouton cercle Dessin  de la barre d'outils. Sélectionnez le point de centre (0, 0, 0) du cercle en tapant les valeurs dans les boîtes des coordonnées

Tab dans la boîte DX et entrez 5.8 comme rayon.

Appuyez sur Entrée pour accepter la valeur du rayon.

Circle1 et Circle2 devrait maintenant apparaître à la fois dans le modèle, comme le montre ci-dessous:

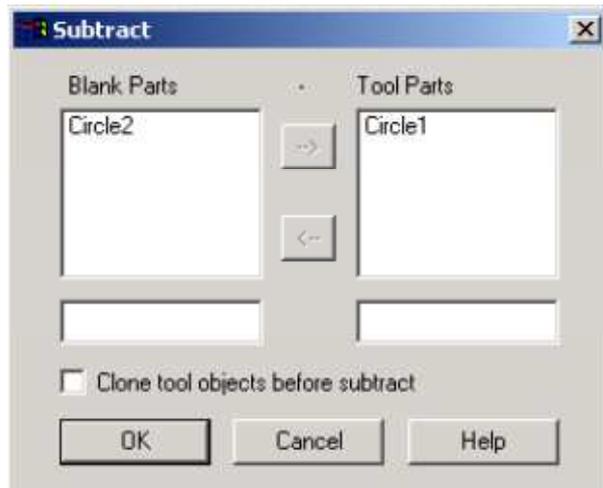


Ensuite, soustraire Circle1 de Circle2, ce qui se traduira par l'anneau d'alimentation de 1 mm de large.

Sélectionnez Circle2 en cliquant sur son nom dans l'arborescence .

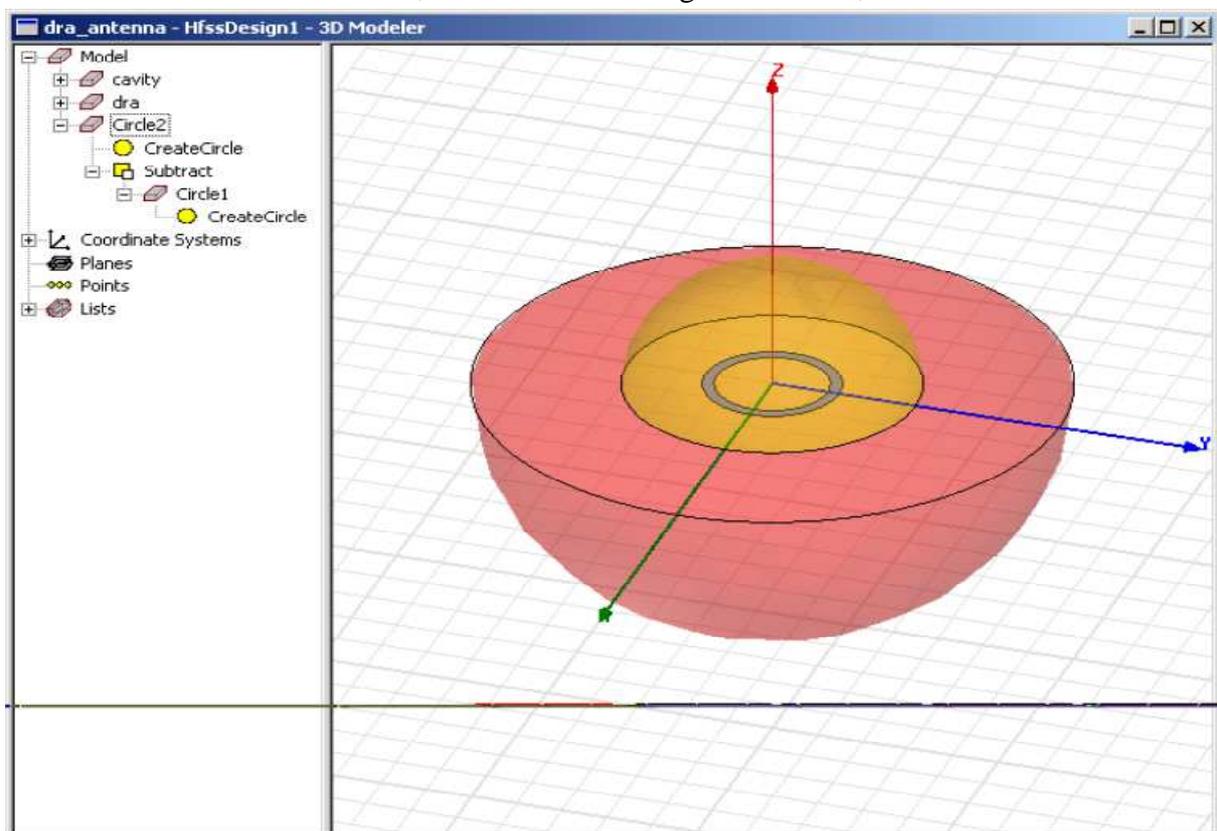
Circle1 et Circle2 devraient être sélectionné à la fois.

Cliquez Modeler>Boolean>Subtract Soustraire ou cliquez sur Subtract



Cliquez sur OK pour effectuer la soustraction.

Cercle1 est soustraite de Circle2, résultant en une largeur de 1 mm, comme illustré ci-dessous:



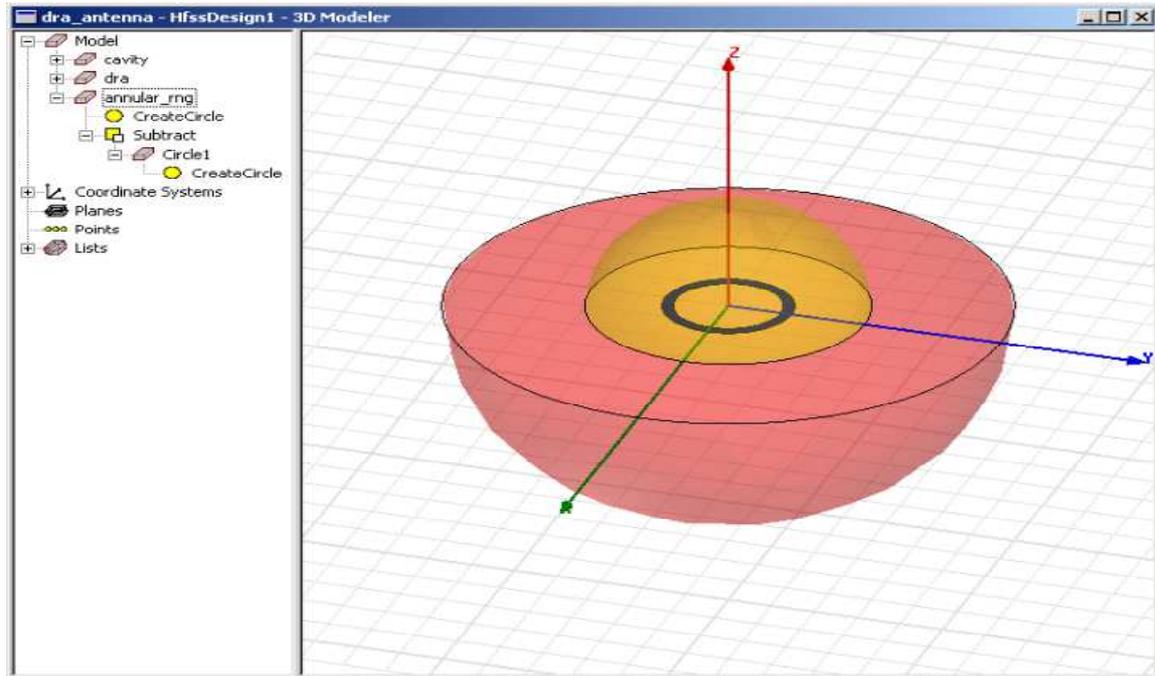
Nommer l'anneau annular\_ring

**Modifier les attributs de l' anneau de l'alimentation**

Clique droit sur annular ring modifier la couleur

Blue( RGB 0.0.128) transparence :0.09

Il doit apparaitre comme illustré ci-dessous :



#### IV-6 -8. Dessiner le gap d'alimentation

Cliquez sur Draw> Rectangle,

Tab dans les boîtes de coordonnées et entrez les valeurs suivantes pour spécifier l'origine du rectangle:

X coordonner -0.5

Coordonnée Y 0

Coordonnée Z 0

Appuyez sur Entrée pour accepter les valeurs.puis entrez les valeurs suivantes à spécifier le point de fin:

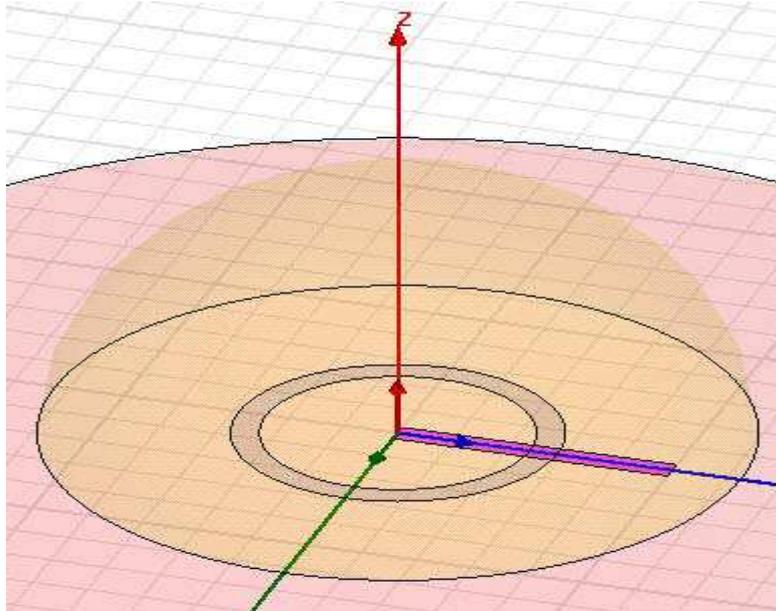
dX coordonnées 1

dY coordonnées 10

dZ coordonnée 0

Appuyez sur Entrée pour accepter les valeurs.

Le rectangle apparaît dans le modèle comme indiqué ci-dessous:



**IV-6 -9. Croiser le rectangle et l'anneau de l'alimentation**

Croiser le rectangle et l'anneau d'alimentation pour produire la fente d'alimentation

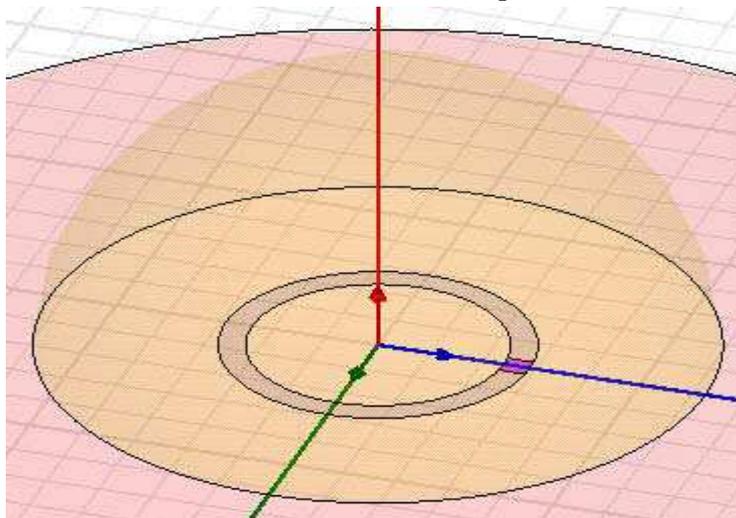
Cliquez sur Tools > Options > Modeler Options.

La boîte de dialogue Options de 3D Modeler s'affiche.

Les objets Retangle1 et annular\_rng devraient maintenant être à la fois sélectionnés.

Cliquez Modeler > Boolean > Intersect., ou cliquez sur le bouton Intersect, à partir de la barre d'outils, pour effectuer l'intersection.

À la suite de l'intersection, la fente d'alimentation est produite sans la suppression de la fente annulaire, il est destiné à alimenter, comme indiqué ci-dessous:



Nommé le rectangle : gap

Clique droit modifier la couleur green (RGB settings 0, 255, 0)

Transparence : 0

**IV -6-10. Dessiner le volume Air**

Pour analyser les effets des rayonnements, vous devez créer un objet virtuel qui représente la limite de rayonnement. Pour ce modèle d'antenne, vous allez créer un volume d'air suffisamment loin du modèle.

Ensuite, vous allez dessiner un polyèdre régulier avec 18 segments pour représenter cet objet virtuel.

Dessinez le polyèdre

Choisissez Draw> Regular Polyhedron

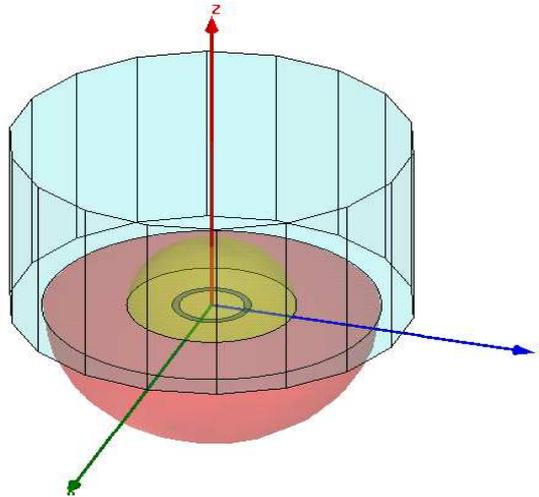
Sélectionnez le point de centre (0, 0, 0) du cercle en tapant les valeurs dans les boîtes de coordonnées .

Tab dans la boîte DX et entrez une valeur de rayon de 30, puis appuyez sur Entrée.

La barre d'état vous demande maintenant d'entrer une hauteur du polyèdre.

Tab dans la boîte coordonnées dZ et entrez une valeur de hauteur de 35, et puis appuyez sur Entrée .

La fenêtre Numéro de segment apparaît choisissez 18 segments



**IV-6-11. Diviser le modèle par symétrie**

Ce modèle tel que construit est symétrique par rapport au plan yz. Maintenant, divisez le modèle le long du plan yz.

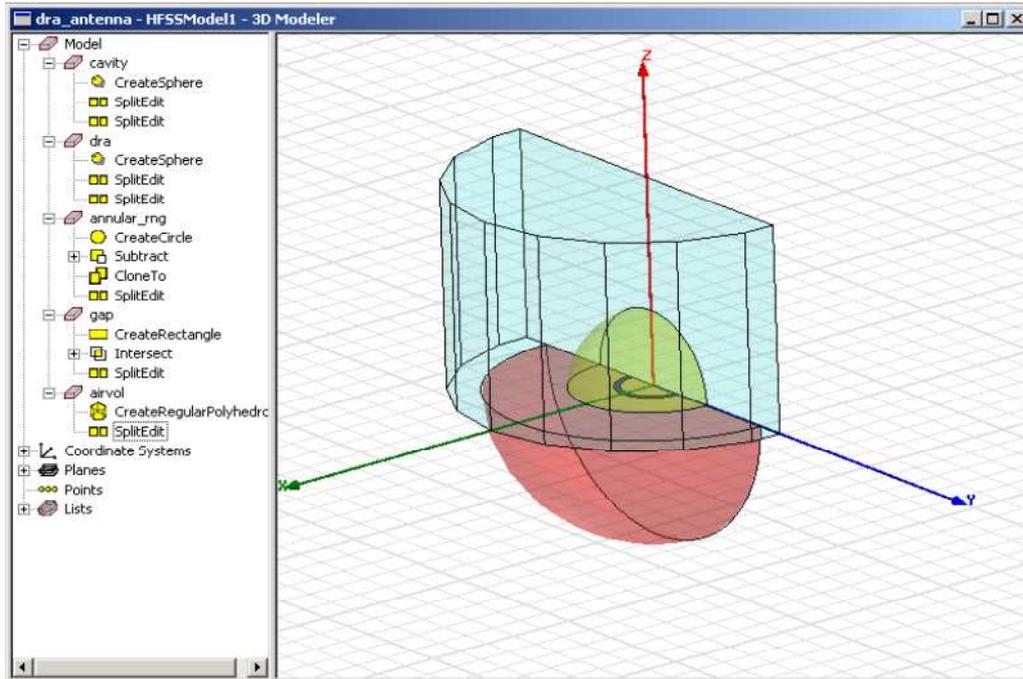
Cliquez 3D Modeler> Boolean> Split

La fenêtre de partage apparaît.

Sélectionner YZ plan de séparation et le côté positif

Cliquez sur OK pour fractionner l'ensemble du modèle.

Votre modèle final devrait ressembler à celui présenté ci-dessous:



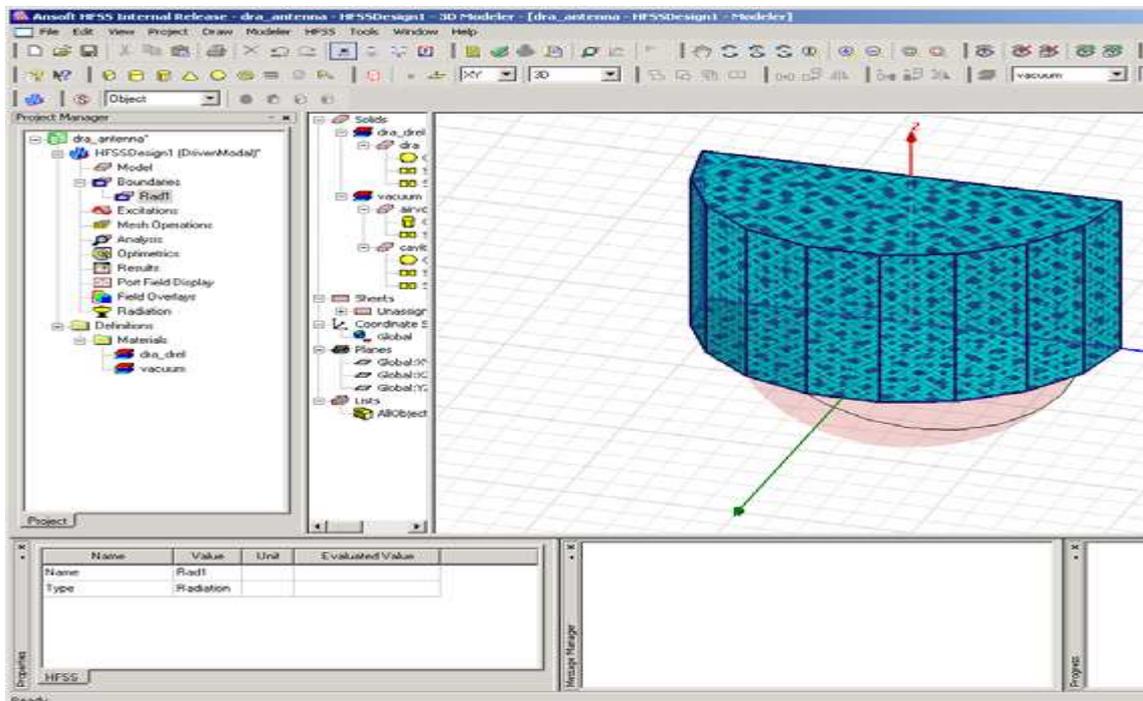
#### IV-6 -12. Affecter une limite de rayonnement l'Air

Sélectionnez le Airvol en cliquant dessus dans la Modeler 3D

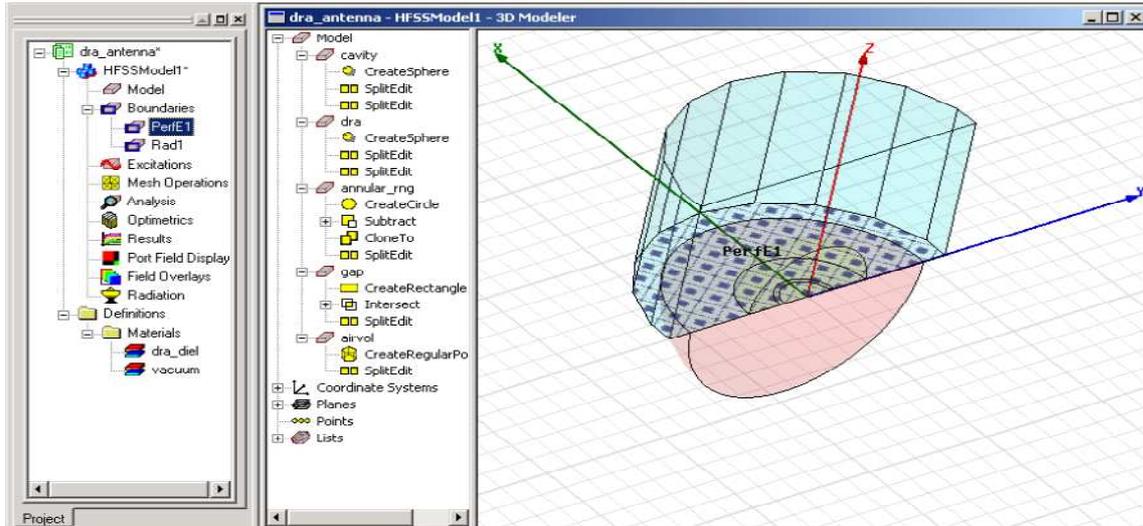
Cliquez sur HFSS du menu, Boundaries>Assign>Radiation.

Cliquez OK pour accepté le nom par défaut Rad1

Le résultat est illustré ci-dessous :



Attribuer un champ E parfait pour la base du polydère HFSS >Boundaries>Assign>Perfect E.



#### IV-6 -13. Assigner un champ H parfait à Annular\_Feed\_Ring

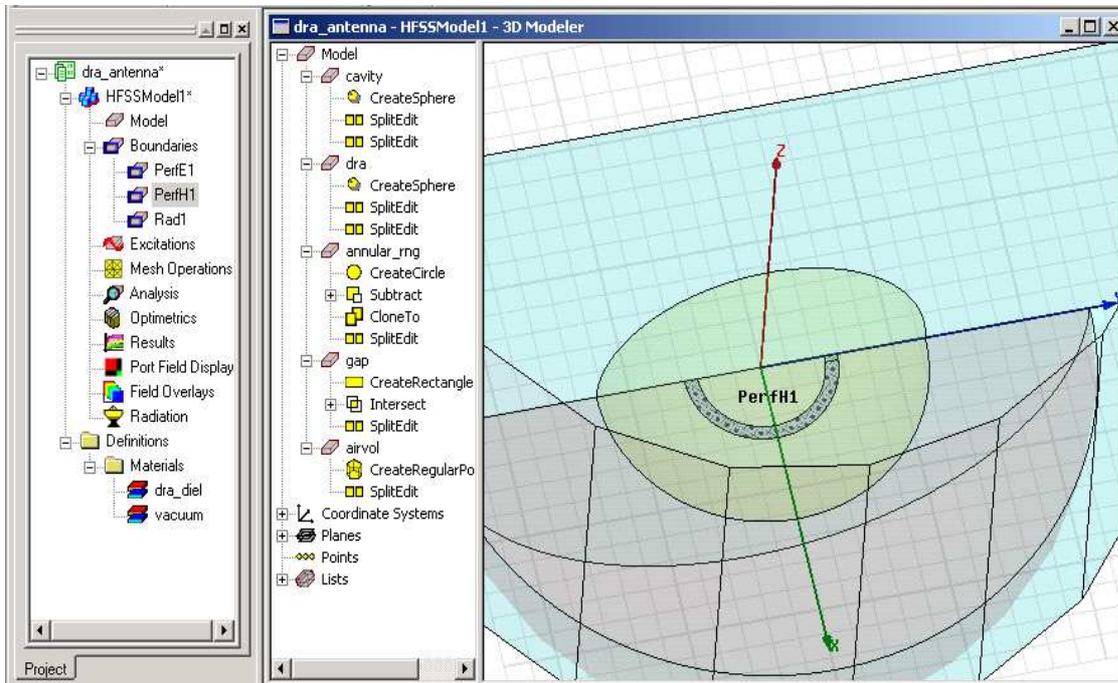
Selectionnez annular\_rng.

Dans le menu HFSS, cliquez Boundaries>Assign>Perfect H.

La fenêtre de la frontière Parfait H apparaît.

Cliquez sur OK pour accepter le nom PerfH1 par défaut et appliquer le H parfaite limite.

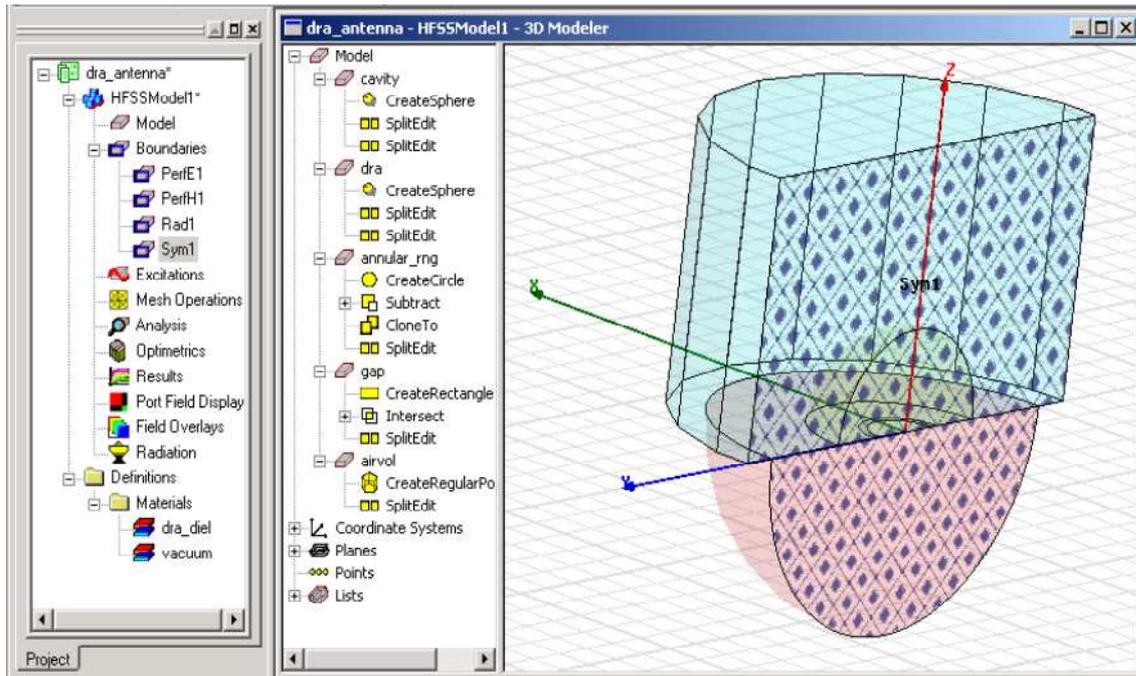
La condition limite H parfaite résultant est affectée à la face de annular\_rng de l'objet, comme illustré ci-dessous:



#### IV-6 -14. Attribuer une frontière symétrique au modèle

Boundaries>Assign>Symmetry.

Sélectionner Perfect H cliquez sur ok pour accepter le nom par défaut sym1



#### IV-6 -15. Attribuer une excitation

Cliquez sur View > Zoom In

En mode de sélection des faces, sélectionnez le gap ou utilisez l'arborescence . Dans le menu HFSS, cliquez excitations> Assign> Port Lumped.

Dans Lumped Port:General, entrez les valeurs indiquées ci-dessous, et puis cliquez sur Suivant :

Nom : LumpPort1

Résistance 100 Ohms de la résistance ou impédance réelle de port.

Réactance 0 Ohms La réactance,

Dans le Port Lumped: Modes étape, cliquez dans la liste de la ligne d'intégration, puis sélectionnez New Line.

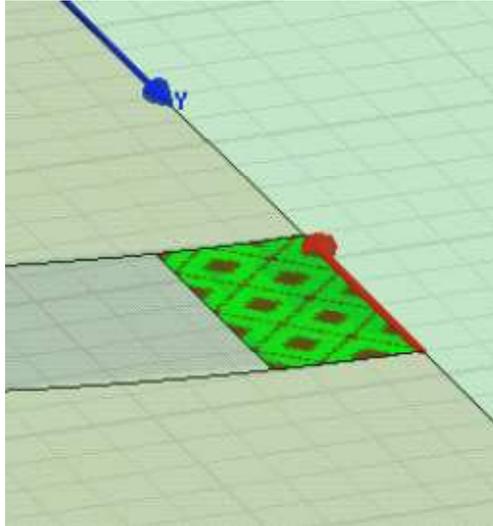
L'assistant Port Lumped disparaît pendant que vous dessinez le vecteur.

Définissez la ligne d'intégration

Sélectionner le point de départ en cliquant sur (0,5.8, 0).

Sélectionner le point d'extrémité (0,4.8, 0).

Acceptez Zpi comme méthode de calcul des caractéristique d'impédance, puis cliquez sur Terminer. On obtient ce ci :

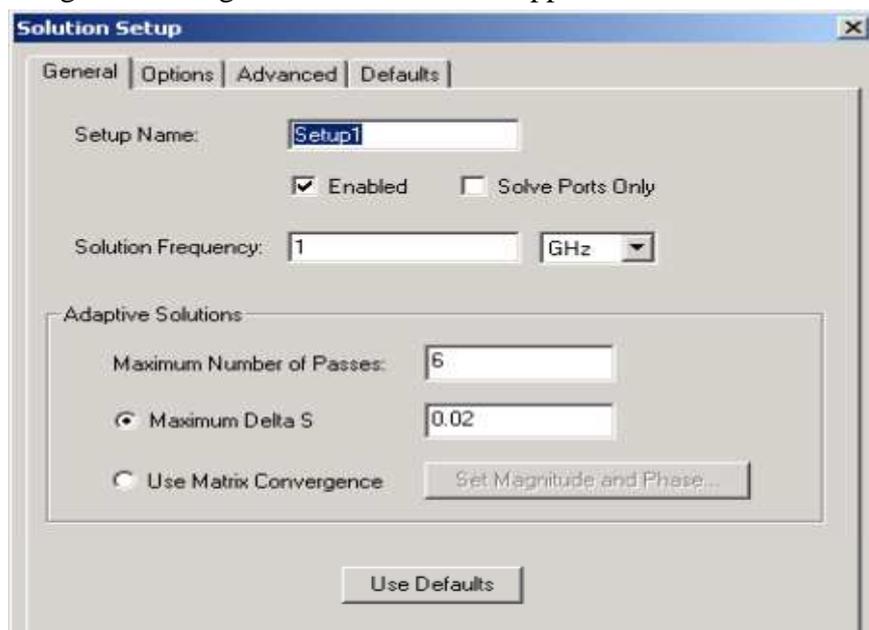


#### IV-6 -16. Configuration de la solution

Pour ajouter une configuration de solution à la conception:

Cliquez sur HFSS>Analysis>Add Solution Setup.

La boîte de dialogue de configuration de la solution apparaît:

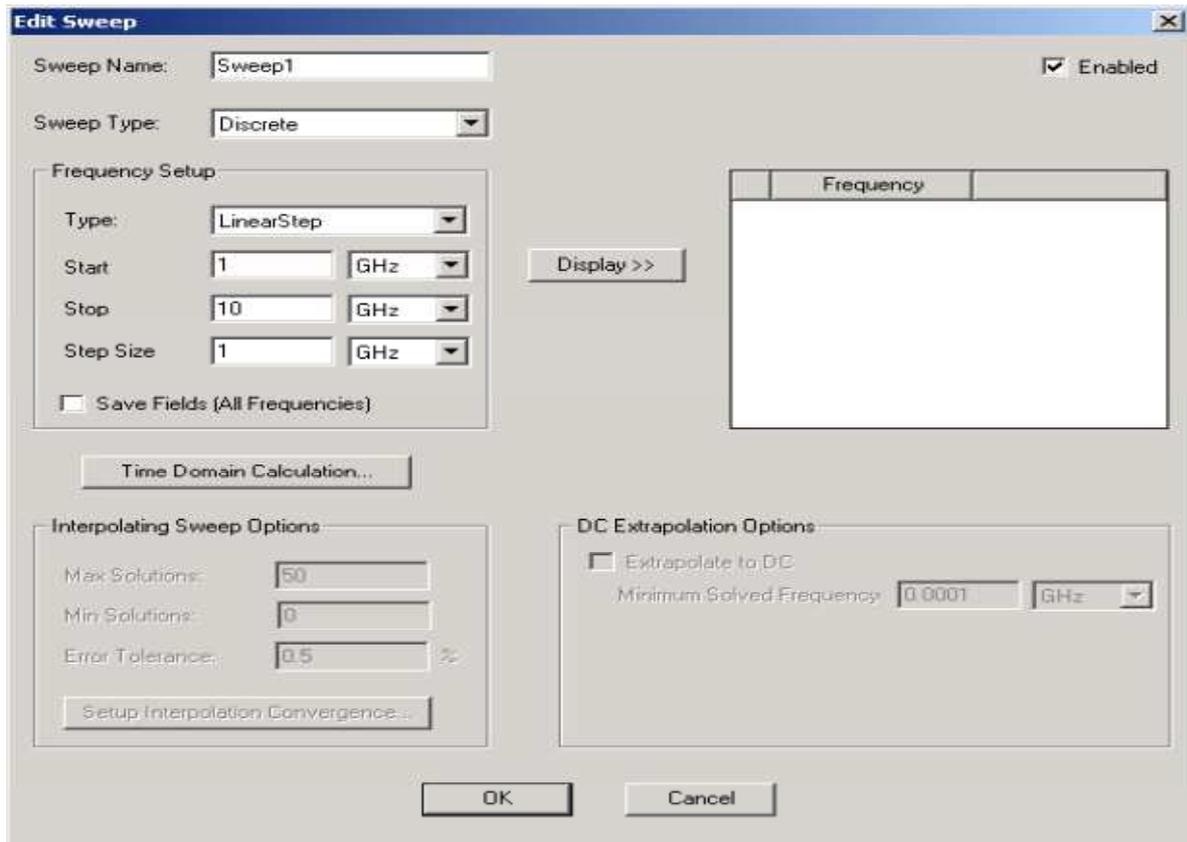


#### IV -6-17. Ajouter une fréquence de balayage

Ajouter un balayage de fréquence à la configuration de la solution

Pour générer une solution à travers une gamme de fréquences, ajoutez une fréquence de balayage à la configuration de la solution. HFSS effectue le balayage après l'adaptation de la solution.

Cliquez sur HFSS>Analysis Setup>Add Sweep.



Sélectionner sweep type: fast

Type: Linear Step

Entrez les valeurs :

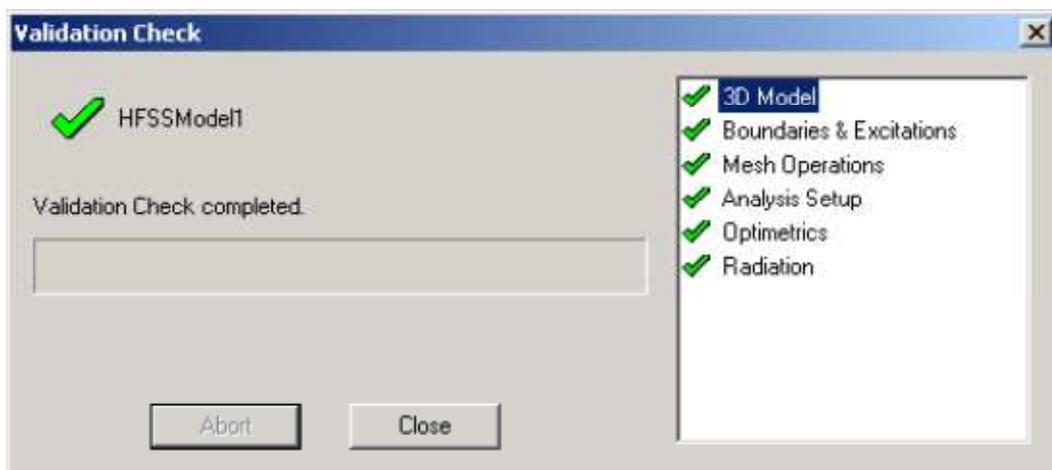
Start 2.5 GHz

Stop 5 GHz

Step Size 0.01 GHz

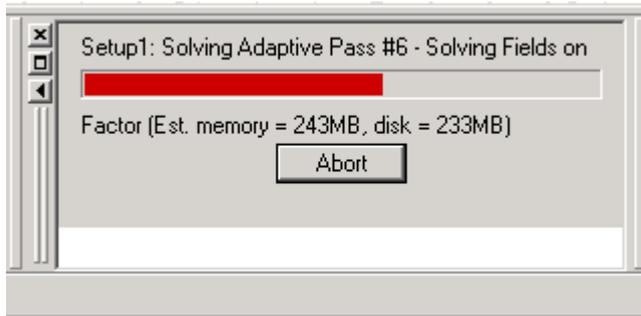
#### IV -6-18.Validation du model

HFSS>validation check



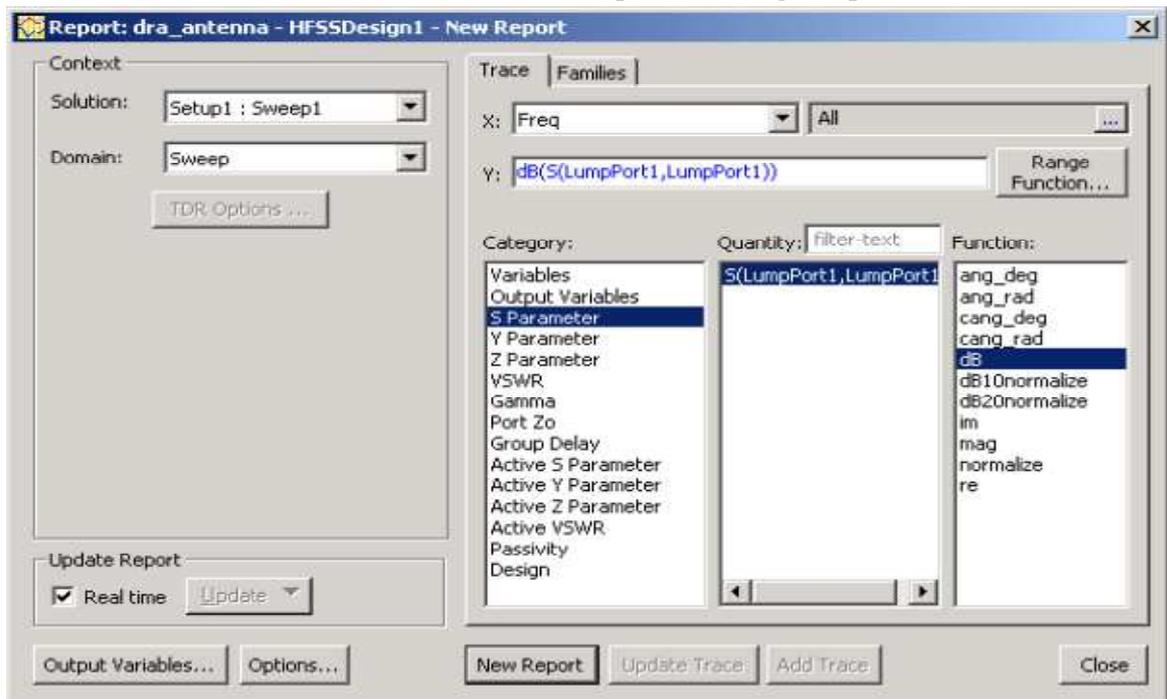
#### IV-6-19.Analyse du model

HFSS>analyse all



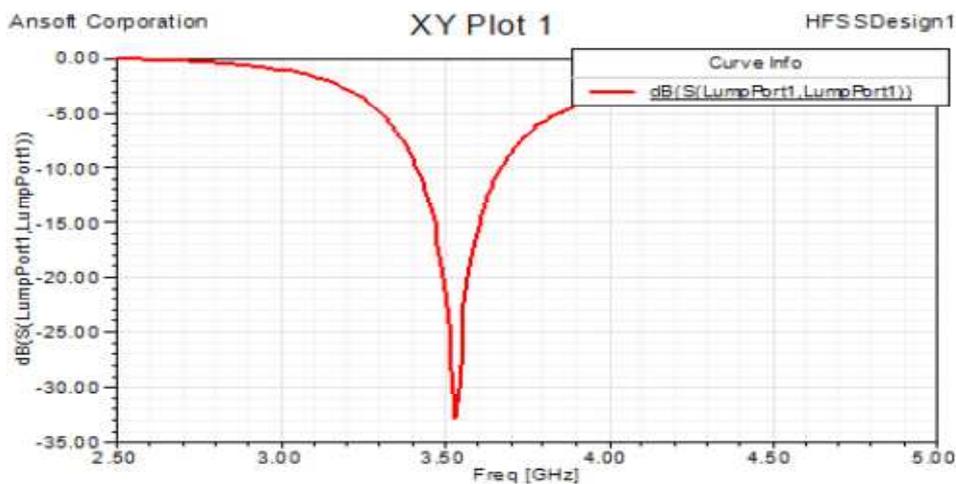
**IV-6 -20. Créer un rapport du paramètre S11**

HFSS>Results>Create Modal Solution Data Report>Rectangular plot



Cliquez sur New Report

On aura ce graphe :



**IV-6 -21. Créer un rapport du paramètre Z**

HFSS>Results>Create Modal Solution Data Report>Rectangular plot

Choisissez :

Category : Z Parameter

Quantity : Z (LumpedPort1, LumpedPort1)

Function : re

Cliquez sur New Report

Puis cliquez add pour rajouter le graphe de la partie imaginaire

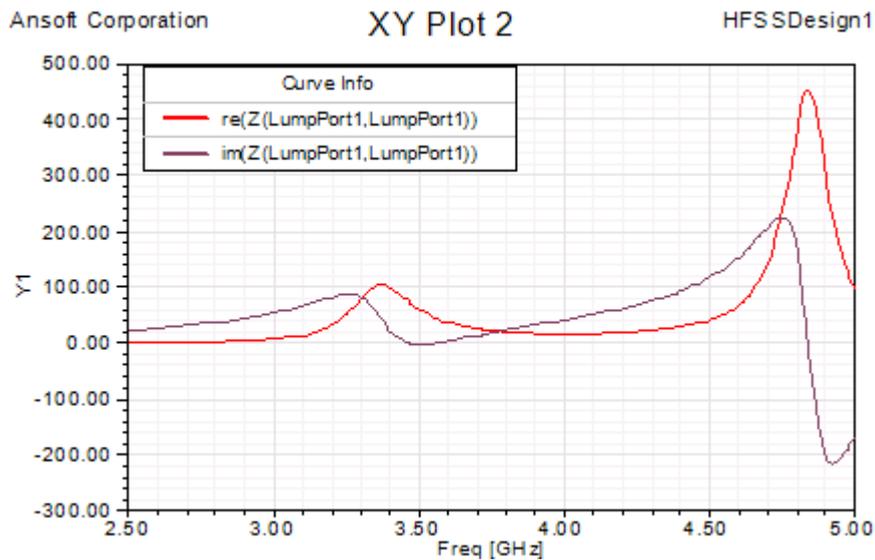
Et choisissez :

Category : Z Parameter

Quantity : Z (LumpedPort1, LumpedPort1)

Function : im

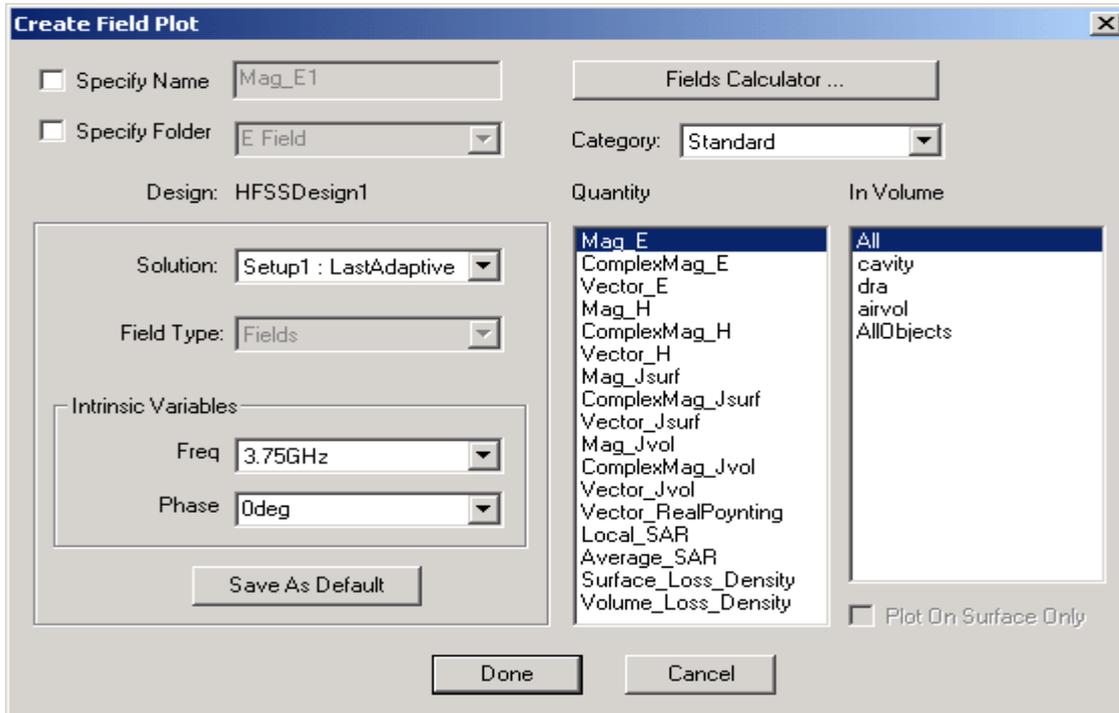
On aura les deux graphes comme illustré ci-dessous :



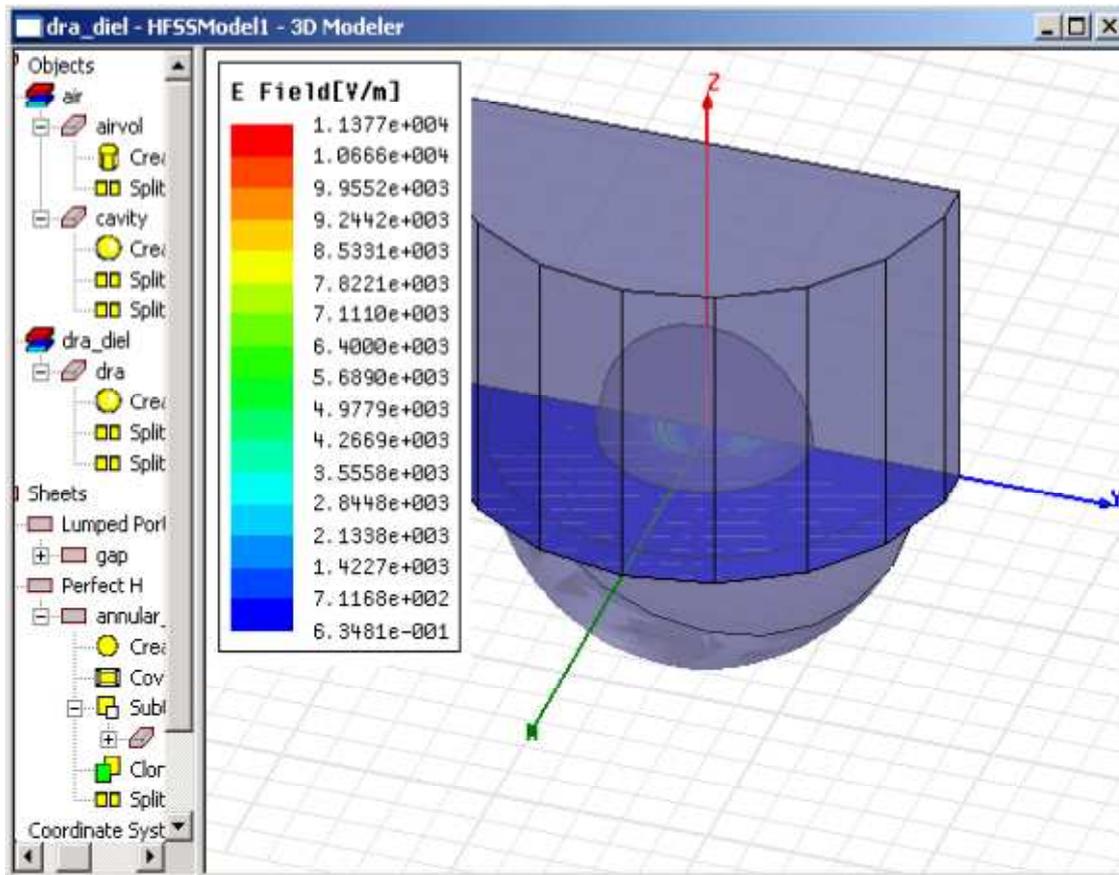
**IV-6 -22. Créer un rapport du champ E**

HFSS>Fields>Plot Fields>E>Mag\_E.

Puis cliquez sur done.

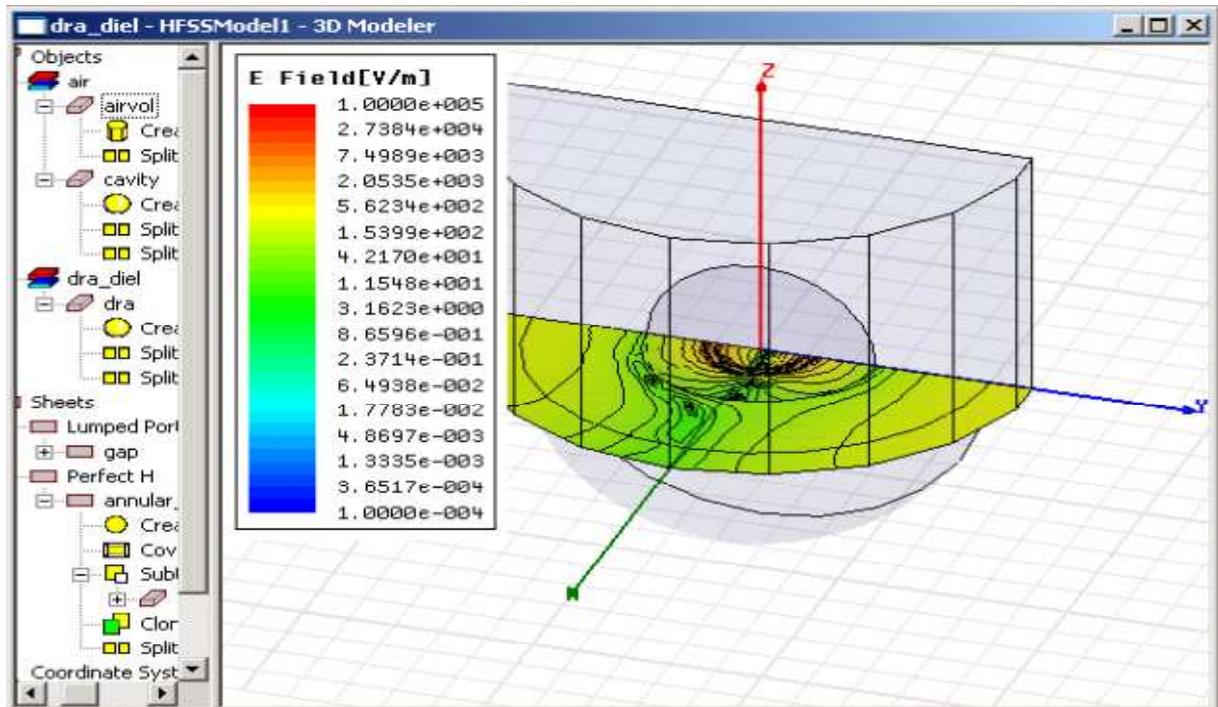


Notre rapport ressemblera a ce ci :



**IV-6 -23.Créer une animation du champ E sur le model**

Selectionnez Mag\_E1 de l'arborescence  
Cliquez HFSS>Fields>Animate.



**IV-7.Antenne Cornet**

**IV-7-1.Ouvrir un nouveau projet**

Aller vers File>New  
Puis sélectionner Insert HFSS Design

**IV-7-2.Le type de solution**

Sélectionner HFSS>Solution type  
Choisir Driven Modal  
Cliquez sur OK

**IV-7-3.Choisir l'unité de mesure**

Modeler>units sélectionner in  
Pour le matériau laisser le par défaut Vaccum.

**IV-7-4.Créer le model**

- Créer le guide d'onde

Draw>Cylinder

En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez la position du cylindre  
X: 0.0, Y: 0.0, Z: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

À l'aide des champs de saisie des coordonnées, entrez le rayon:  
dX: 0.838, dY: 0.0, dZ: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

Utiliser les champs de saisie des coordonnées, entrez la hauteur:  
dX: 0.0, dY: 0.0, dZ: 3.0 Appuyez sur la touche Entrée

Nommé :Waveguide cliquez sur Ok

- Déplacer le système des coordonnées

Modeler>ordinate System>create>relative CS>Offset

À l'aide des champs de saisie de coordonnées, entrez l'origine

dX: 0.0, dY: 0.0, dZ: 3.0 Appuyez sur la touche Entrée

Créer la région de transition

- Créer le guide d'onde de transition

Draw>Cône

En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez la position du cône

X: 0.0, Y: 0.0, Z: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

À l'aide des champs de saisie des coordonnées, entrez le petit rayon:

dX: 0.838, dY: 0.0, dZ: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

À l'aide des champs de saisie des coordonnées, entrez le grand rayon:

dX: 1.547, dY: 0.0, dZ: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

Utiliser les champs de saisie des coordonnées, entrez la hauteur:

dX: 0.0, dY: 0.0, dZ: 1.227 Appuyez sur la touche Entrée

Nommé :Taper cliquez sur Ok

- Déplacer le système des coordonnées

Modeler>ordinate System>create>relative CS>Offset

À l'aide des champs de saisie de coordonnées, entrez l'origine

dX: 0.0, dY: 0.0, dZ: 1.227 Appuyez sur la touche Entrée

- Créer le Throat

Draw>Cylinder

En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez la position du cylindre

X: 0.0, Y: 0.0, Z: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

À l'aide des champs de saisie des coordonnées, entrez le rayon:

dX: 1.547, dY: 0.0, dZ: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

Utiliser les champs de saisie des coordonnées, entrez la hauteur:

dX: 0.0, dY: 0.0, dZ: 3.236 Appuyez sur la touche Entrée

Nommé : Thorat cliquez sur Ok

- Sélectionnez tout les objets et renommer : Horn Air

- Créer le Horn Wall

Draw>Cylinder

En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez la position du cylindre

X: 0.0, Y: 0.0, Z: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

À l'aide des champs de saisie de coordonnées, entrez le rayon:

dX: 1.647, dY: 0.0, dZ: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

Utiliser les champs de saisie de coordonnées, entrez la hauteur:

dX: 0.0, dY: 0.0, dZ: 7.463 Appuyez sur la touche Entrée

Nommé : Horn cliquez sur Ok

➤ Créer Air

Draw>Cylinder

En utilisant les champs de saisie de coordonnées, entrez la position du cylindre

X: 0.0, Y: 0.0, Z: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

À l'aide des champs de saisie des coordonnées, entrez le rayon:

dX: 2.2, dY: 0.0, dZ: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

Utiliser les champs de saisie des coordonnées, entrez la hauteur:

dX: 0.0, dY: 0.0, dZ: 8.2 Appuyez sur la touche Entrée

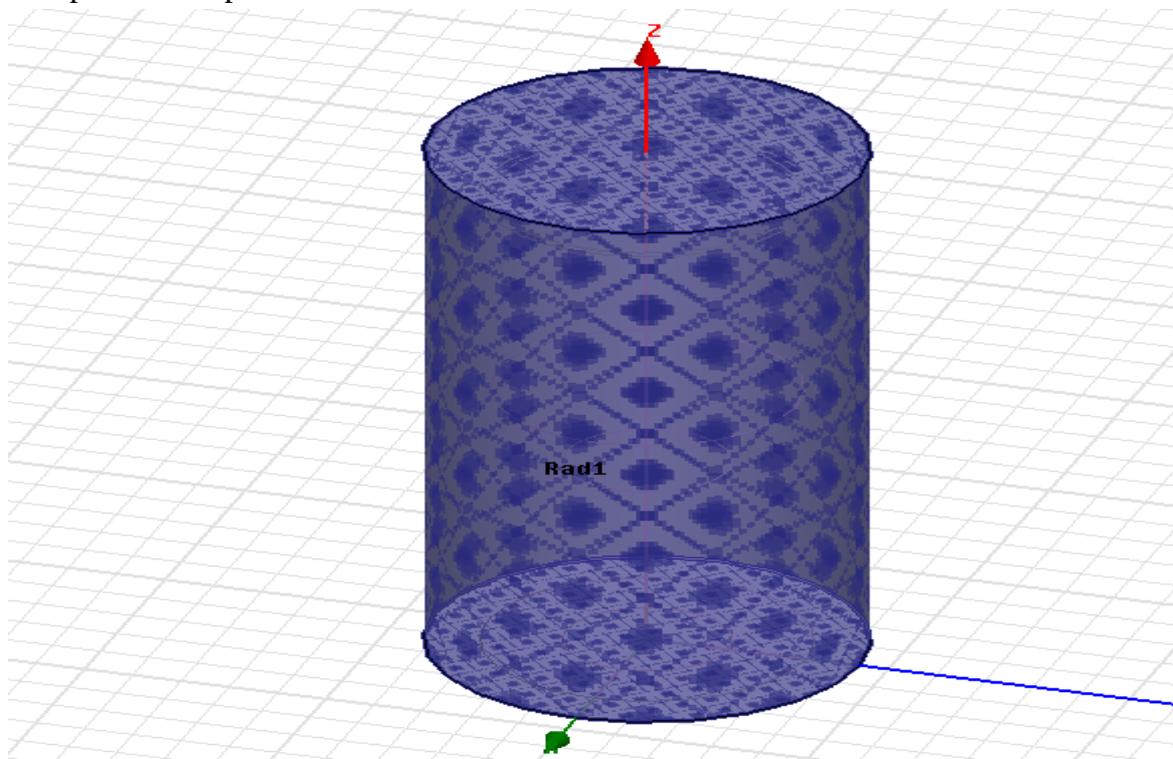
Nommé : Air cliquez sur Ok

## IV-7-5. Les conditions aux limites

### Sélectionnez Air

Du menu cliquez sur HFSS>Boundaries>Assign>Radiation

Accepter le nom par défaut : Rad1



➤ Créer un port

Draw>Circle

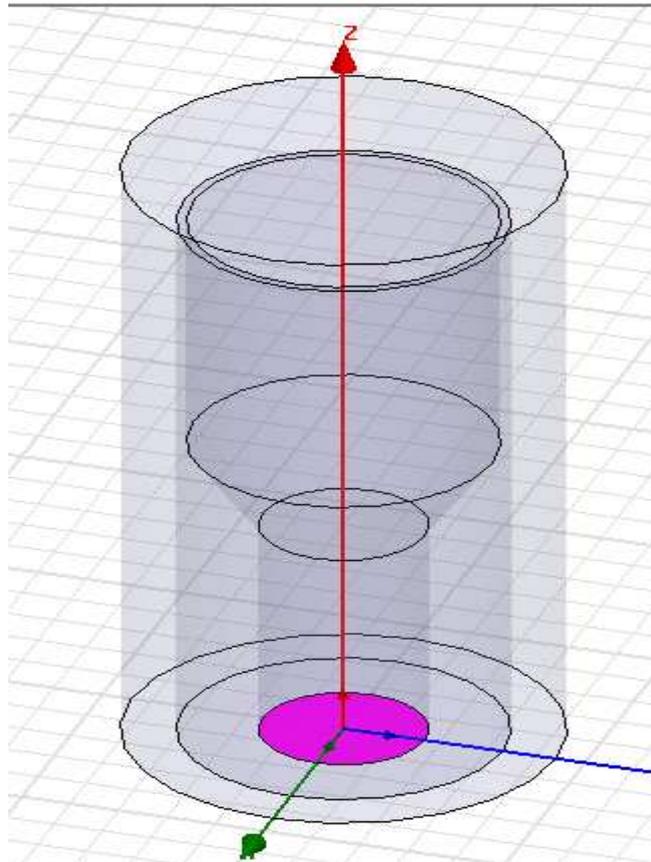
En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez la position centrale

X: 0.0, Y: 0.0, Z: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

À l'aide des champs de saisie des coordonnées, entrez le rayon du cercle:

Dx : 0.838, dy: 0.0, dZ: 0.0: Appuyez sur la touche Entrée

Définir le nom:P1



**IV-7-6. Attribuer une excitation au port**

HFSS>Excitation>Assign>Wave Port

Wave Port: General

Name: P1

Cliquez sur Suivant

Number of modes: 2

Sélectionner New line

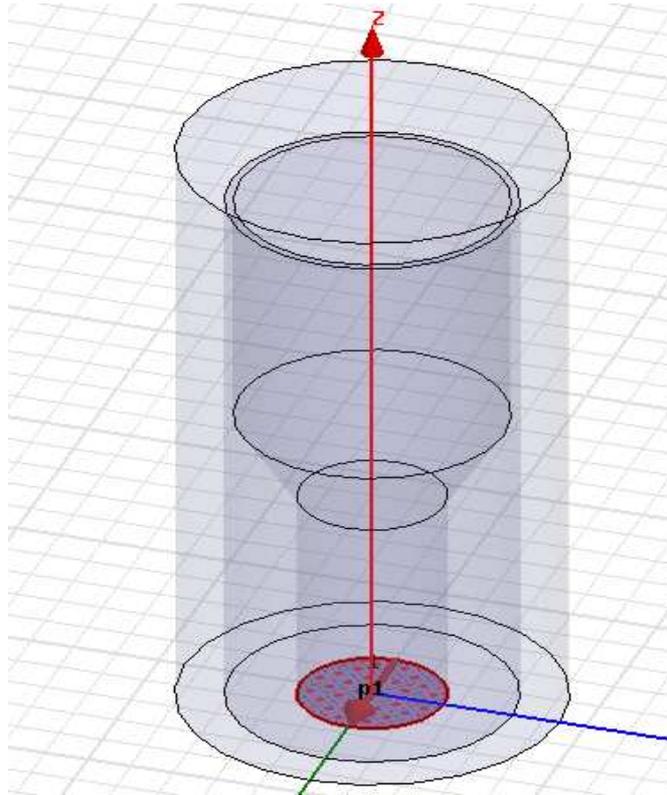
En utilisant les champs de saisie des coordonnées, entrez la position du vecteur

X: -0.838, Y: 0,0, Z: 0.0 Appuyez sur la touche Entrée

À l'aide des champs de saisie des coordonnées, entrez le sommet

Dx : 1.676, dy: 0.0, dZ: 0.0: Appuyez sur la touche Entrée

L'excitation du port est illustrée ci-dessous :



➤ Déplacer le système des coordonnées

Modeler>ordinate System>create>relative CS>Offset

À l'aide des champs de saisie de coordonnées, entrez l'origine

dX: 0.0, dY: 0.0, dZ: 7.463 appuyez sur la touche entrée

#### IV-7-7. Créer une configuration de la radiation

HFSS>Radiation>Insert Far Field Setup>Infinite Sphere

Entrez les données suivante:

Name: ff\_2de

Phi: (Start: 0, Stop: 90, Step Size: 90)

Theta: (Start:-180, Stop: 180, Step Size: 2)

#### IV-7-8. Configuration des analyses

HFSS>Analysis Setup>Add Solution Setup

Solution Frequency: 5.0GHZ

Maximum Number of Passes: 10

Maximum Delta S per Pass: 0.02

Cliquez sur OK

#### IV-7-9. Validation et Analyse

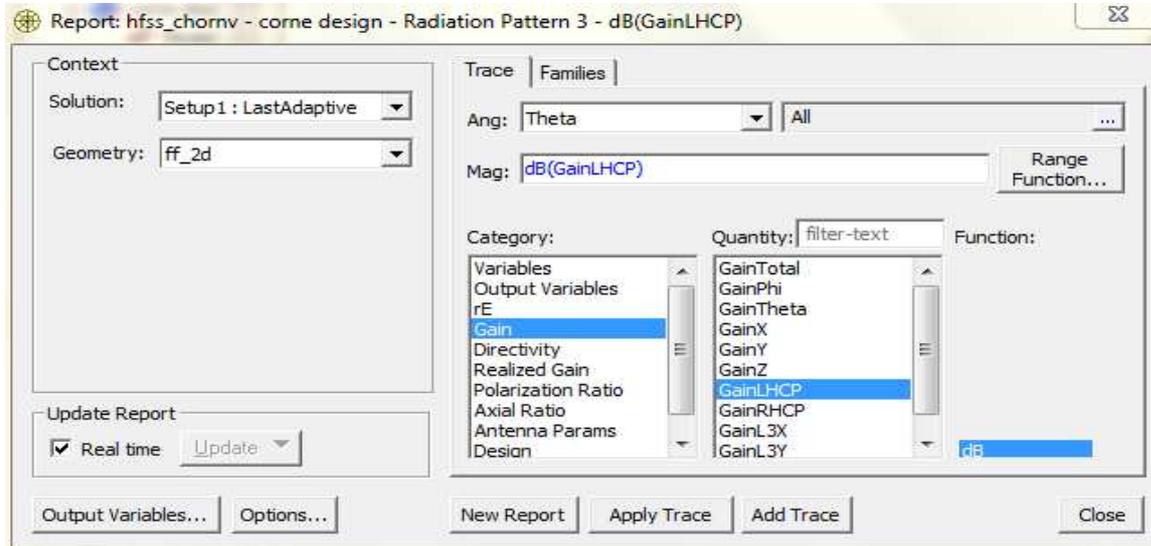
HFSS >Validation Check

HFSS >Analyse All

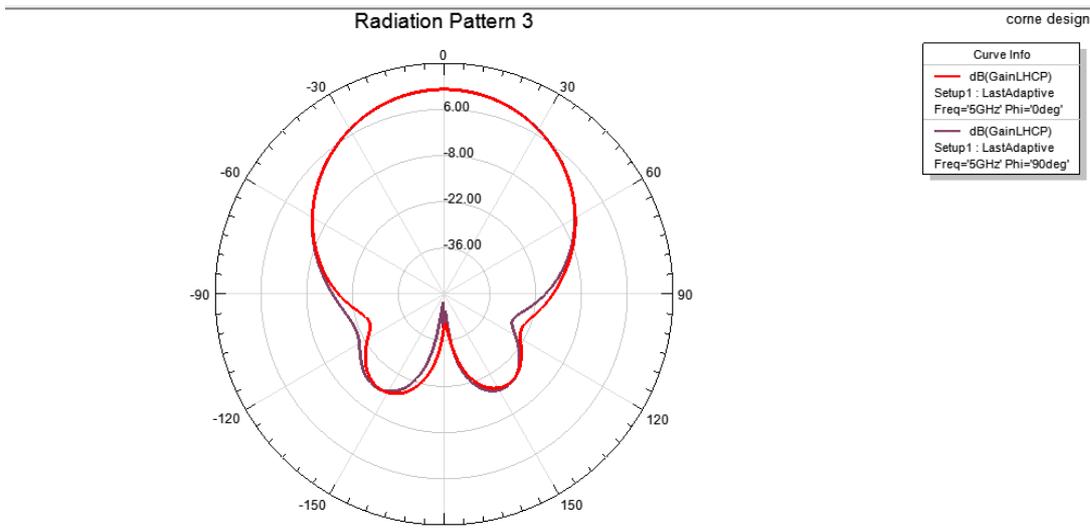
## IV-7-10. Créer le diagramme de rayonnement

HFSS>Results>Create Far field report>Radiation Pattern

Entrez les données figurantes sur la table ci- dessous:

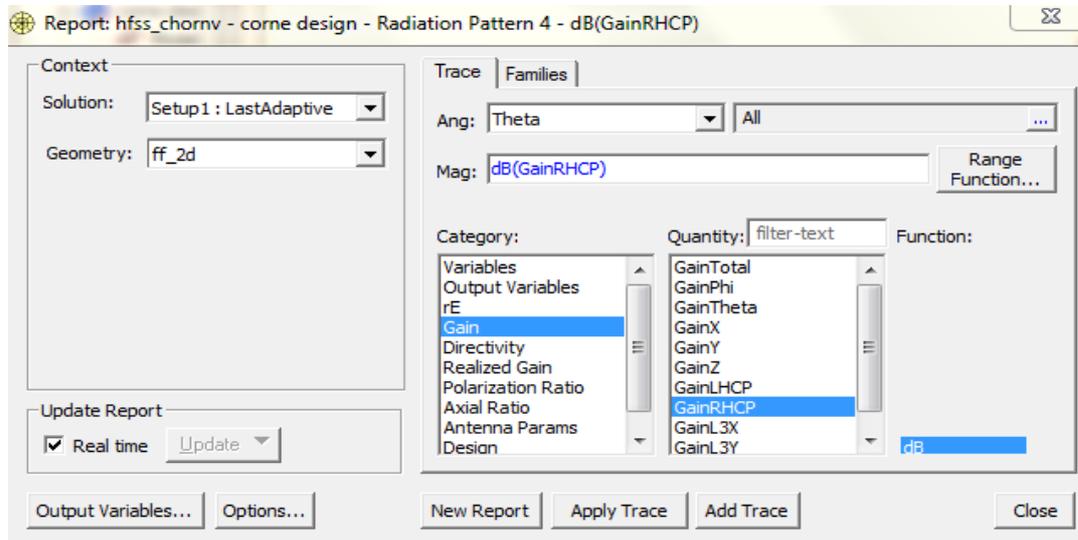


Cliquez sur new report

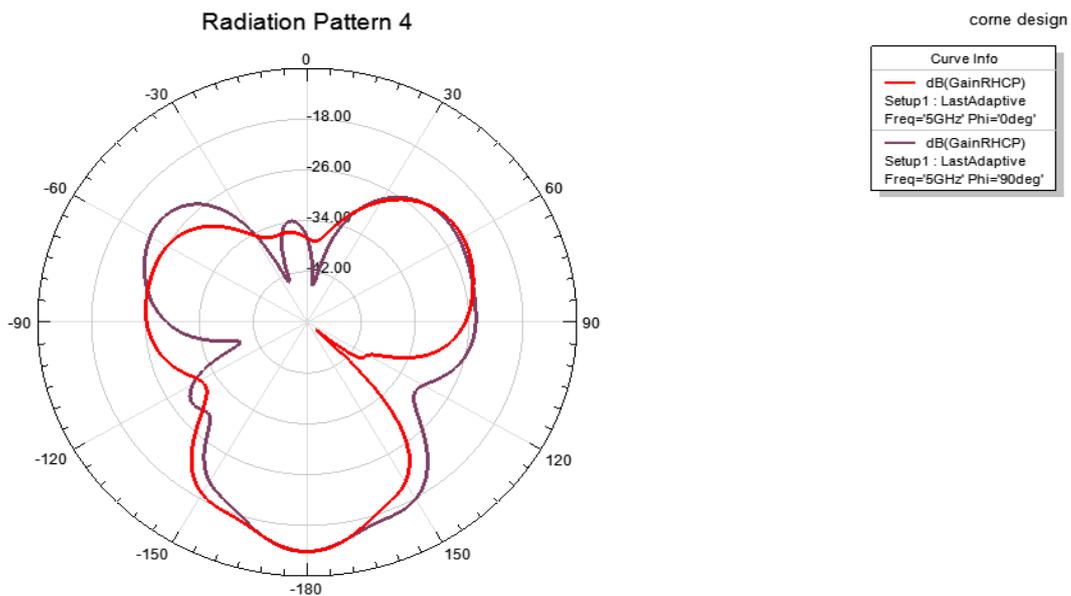


HFSS>Results>Create Far field report>Radiation Pattern

Entrez les données figurantes sur la table ci-dessous:



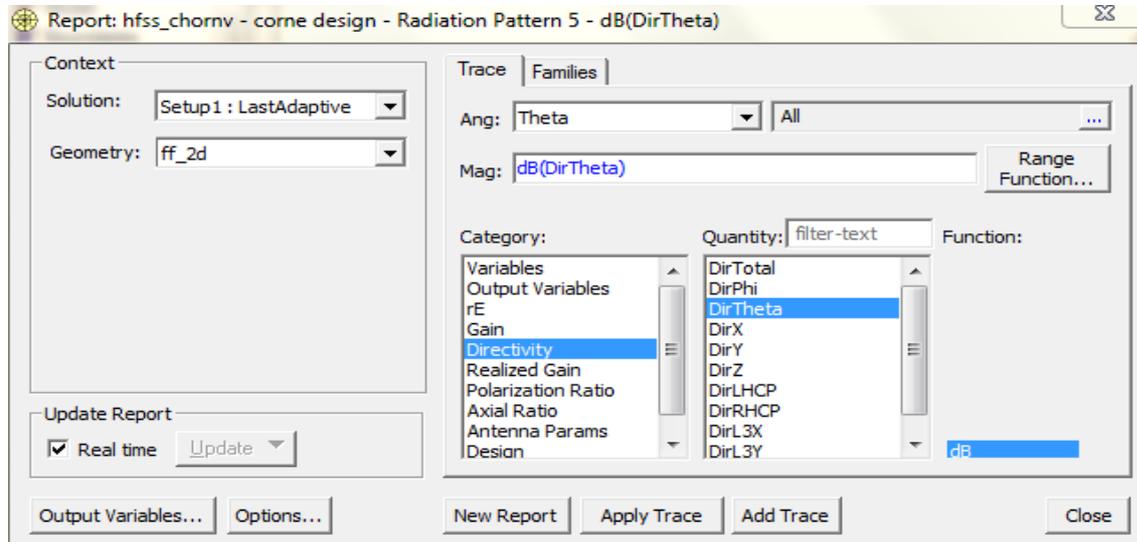
Cliquez sur new report



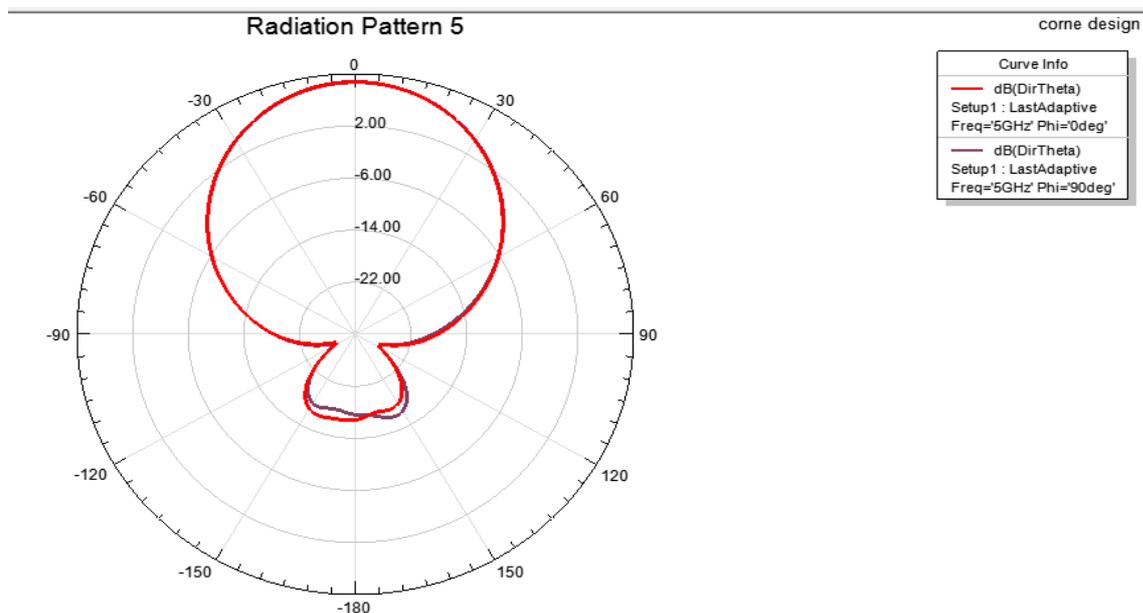
**Pour la directivité**

HFSS>Results>Create Far field report>Radiation Pattern

Entrez les données figurantes sur la table ci-dessous :



Cliquez sur new report



**IV-8.Conclusion**

Nous avons vue dans ce chapitre six exemples de simulations différentes comportant chacune toutes les étapes à suivre pour obtenir des résultats. Ainsi nous avons atteint notre but qui consiste à métriser le logiciel HFSS et de pouvoir l'utiliser à l'avenir pour des projets d'études pratiques dans lesquels on aura à créer de nouvelles antennes. Mais tout d'abord on passera par la simulation puis à la réalisation, le logiciel HFSS nous facilitera la tâche, et nous permettra d'économiser.



# **Conclusion Générale**

Dans le cadre général de notre travail nous avons présenté les caractéristiques des antennes qui sont communes à toutes les antennes tel que : le diagramme de rayonnement, le gain, l'impédance d'entrée... et les notions de base d'électromagnétisme, ce premier chapitre a un caractère fondamental, ce qui est capital afin d'être qualifié à apporter des perspectives. Et nous avons eu une vue d'ensemble des différents types d'antennes rencontrés dans les applications actuelles telle que l'antenne patch qui est au cœur du développement actuel. On a consacré tout un chapitre pour définir sa structure et ses caractéristiques, les méthodes d'alimentations, ses avantages...etc. Elle s'intègre facilement à toutes les surfaces par rapport à sa taille réduite et plane, elle présente un faible coût de fabrication.

Dans n'importe quel domaine d'étude où on est amené à la conception il y'a des paramètres qui interviennent, et qui peuvent être des handicaps tel que les contraintes financières, alors on fait appel à la simulation.

Le rôle des outils de simulation numérique et leurs utilité dans la conception vu, qu'ils facilitent la procédure. Nous avons opté pour un logiciel de simulation des antennes qui est le HFSS (High Frequency Structure Simulation) que nous avons présenté dans le troisième chapitre où on a décrit ses outils, ses différentes fonctionnalités, et les procédures à suivre pour obtenir des résultats.

Dans le quatrième chapitre on a commencé par simuler l'antenne dipôle où on a obtenu des résultats satisfaisants : diagramme de rayonnement, fréquence de résonance, distribution du courant... etc puis l'antenne patch rectangulaire avec deux méthodes d'alimentations où les résultats concordaient avec ceux de la théorie. Puis l'antenne cornet qui est non moins importante car elle intervient dans tous les bancs de mesure d'antennes, sa simulation été de plus compliquée, les résultats étaient bons et nous nous sommes rendus compte du degré d'importance de chaque étape de la simulation.

Et l'antenne à résonateur diélectrique où nous avons rencontré pas mal de problèmes vu son design complexe sphérique en 3D, du dessin du modèle, l'attribution des matériaux, à l'assignement des conditions aux limites pour arriver à la fin à obtenir son diagramme de rayonnement. L'antenne patch à élément rayonnant triangulaire à fentes, ayant une géométrie abstrus nous avons eu des difficultés à y parvenir. Mais dans l'ensemble notre objectif est atteint puisque nous sommes arrivés à avoir des résultats corrects.

Le travail futur sera d'étudier d'autres logiciels de simulation tels que le CST microwave, le FEKO, l'IE3D Zéland...etc et d'établir une comparaison.



# **Bibliographie**

- .
- [1] Alexandre Boyer alexandre.boyer@insa-toulouse.fr [http://lesia.insa-toulouse.fr/~a\\_boyer](http://lesia.insa-toulouse.fr/~a_boyer).
  - [2] HFSS tutoriel Dr. Otman El Mrabet & M. Essaadi.
  - [3] Les antennes Jean-philippe muller.
  - [4] [www.mémoireOnline.fr](http://www.mémoireOnline.fr). Antenne Patch
  - [5] Cours de physique de Feynman - Les cours de référence - Éditions Dunod.
  - [6] [www.google.fr](http://www.google.fr) WIKIPEDIA.
  - [7] Shyh-Tirng Fang and Kin-Lu Wong  
Department of Electrical Engineering National Sun Yat-Sen University Kaohsiung  
804,Taiwan,R.O.C.
  - [8] Antenne patch pour le 23cm Par Yves OESCH / HB9DTX, janvier/avril 2010
  - [9] Equations de Maxwell de Dr Mr BOUZOUAD UEF : Électromagnétisme et canaux de transmission Année universitaire: 2011/2012.
  - [10] User's guide – High Frequency Structure Simulator (HFSS).