

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



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

Mémoire de Fin d'Etudes

De Master Académique

Domaine : **Sciences et technologies**

Filière : **Génie électrique**

Spécialité : **Réseaux et télécommunication**

Présenté par

CHABOUNI MOHAMED YACINE

BOUMRAR MOHAMED LAMINE

Thème :

Simulation d'antennes sous FEKO

Mémoire soutenu publiquement le 02/07/2015 devant le jury composé de :

Mr Youcef ATTAF

M.A.A, ELECTRONIQUE, Président

Mr Hocine KANANE

M.A.A, ELECTRONIQUE, Encadreur

Mr Mohamed TAHANOUT

M.A.A, ELECTRONIQUE, Examineur

Mr Yacine MOHIA

M.A.A, ELECTRONIQUE, Examineur

DEDICACES

Je dédie ce travail à :

A ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans mes moments les plus difficiles.

Et ceux à qui je dois tant :

Mes parents qui ont éclairés mon chemin et qui m'ont encouragé et soutenu tout au long de mes études et que ALLAH les protèges et la gardes pour nous.

Mes sœurs Liza et Imene pour qui je souhaite Inchalah de suivre le meilleur chemin de réussite, puisse dieu les protéger tout au long de leur vie.

Tous mes amis et à toutes personnes m'ayant aidé d'une manière ou d'une autre.

Med Lamine

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma très chère mère A mon très cher père.

*Ils étaient toujours mon soutien, qui grâce à eux j'arrive à finir mes études et de pouvoir
obtenir le diplôme.*

Pour leurs grands amours qui m'a toujours entouré

Pour leurs éducations qui m'ont donné

Pour leur patience et leurs sacrifices.

A ma chère sœur et A mes chers frères lesquelles je leurs souhaite la réussite.

A toute ma famille

*A tous mes amis que je connais avant l'université et ceux que je connais durant mes études
universitaire*

Remerciements

Premièrement, nous aimerions exprimer nos sincères remerciements pour notre enseignant et promoteur Monsieur KANANE, qui nous a confié ce travail de thèse. Nous tenons à saluer sa disponibilité pour nous avoir dirigés, aidé et encourager durant tout le développement de notre projet. Ainsi ses conseils qui nous ont permis de progresser, d'élargir nos connaissances et d'améliorer notre travail.

En outre, nous présentons nos sincères remerciements pour le président et les membres du jury, pour avoir accepté de juger ce travail, et pour le temps qu'ils ont consacré à cette soutenance.

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les antennes

I. Introduction.....	4
I. Définition d'une antenne.....	4
III. Caractéristique de l'antenne	4
III.1. Fréquence d'utilisation	4
III.2. Impédance d'antenne.....	5
III.3. Polarisation	6
III.4. Diagramme de rayonnement.....	6
III.4.1. La directivité	7
III.4.2. Gain.....	7
III.4.3. Lobes et zéros secondaires.....	8
III.4.4. Angle de départ (d'ouverture).....	8
III.5. Le rendement de l'antenne	8
III.6. La puissance maximale.....	9
IV. Zones de rayonnement	9
IV.1. Zone de Rayleigh.....	10
IV.2. Zone de Fresnel	10
IV.3. Zone de Fraunhofer	10
V. Notions sur l'électromagnétisme.....	10
V.1. Origine de rayonnement électromagnétique	11
V.2. Champ proche et champ lointain	12
V.3. Equations de propagation	13
VI. Les équations de Maxwell.....	13
VI.1. Equation de Maxwell-Gauss	14

VI.2. Equation de Maxwell-Thompson	14
VI.3. Equation de Maxwell-Faraday	14
VI.4. Equation de Maxwell-Ampère	15
VII. Quelques types d'antennes	15
VII.1. Antenne dipôle	16
VII.2. Antenne monopôle	17
VII.3. Antenne patch	18
VIII. Conclusion.....	19

Chapitre II : Présentation de logiciel FEKO

I. Introduction.....	19
II. Définition du logiciel.....	19
III. Flot de conception et de simulation de FEKO	20
III.1. Le CADFEKO	20
III.2. Le FEKO Solver	21
III.3. Le POSTFEKO.....	21
IV. Description générale des outils FEKO	22
IV.1. Barre à accès rapide.....	22
IV.2. Barre des outils.....	22
IV.3. Fenêtre des modèles 3D	23
IV.4. Gestionnaire de projet arborescent	23
IV.5. Détails de la géométrie.....	23
IV.6. Fenêtre des messages.....	23
IV.7. Barre des menus	23
IV.8. Le help.....	24
V. Comment créer un projet sur FEKO.....	24
V.1. Création du model	25

V.2. Création des paramètres.....	25
V.2.1. Choix des unités.....	25
V.2.2. Ajouter les variables	25
V.2.3. Définition des milieux de propagation.....	26
V.3. Création de la géométrie.....	27
V.4. Compilation et visualisation des résultats.....	28
V.4.1. La validation de modèle.....	28
V.4.2. Lancement de la simulation	29
V.5. Visualisation des résultats	29
V.5.1.Lancement de POSTFEKO	29
VI. Conclusion	32

Chapitre III : Simulation avec FEKO

I. Introduction.....	33
II. Simulation d'antenne Dipôle.....	33
II.1. Création de model.....	33
II.1.1.Choix des unités	33
II.1.2.Définition des variables.....	33
II.1.3.Création de la géométrie	34
II.1.4.Définition de port	35
II.2.Configuration de la simulation.....	36
II.2.1.Placer les fréquences de simulation	36
II.2.2.Ajout des excitations	37
II.2.3.Configuration du calcul.....	38
II.3.Maillage de modèle.....	39
II.4.Validation des résultats	40
II.5.Lancement de la simulation FEKO.....	40

II.6. Visualisation des résultats	41
III. Simulation d'antenne Monopole	45
III.1. Création de modèle.....	45
III.2. Configuration de la simulation.....	48
III.3. Maillage de modèle	50
III.4. Validation des données.....	50
III.5. Lancement de la simulation FEKO	50
II.6. Visualisation des résultats	50
IV. Simulation d'antenne Patch	53
IV.1. Création de modèle.....	53
IV.1.1. Choix des unités	53
IV.1.2. Définition des variables.....	53
IV.1.3. Définition des milieux de propagation	54
IV.1.4. Création des éléments géométriques	56
IV.1.5. Définition du port	57
IV.1.6. Ajout des excitations	58
IV.2. Configuration de la simulation	59
IV.1.7. Placer les fréquences de simulation.....	59
IV.2.1. Configuration du calcul	59
IV.3. Maillage des modèles géométriques.....	59
IV.4 Validation des résultats	60
IV.5 Lancement de la simulation FEKO	60
IV.6 Visualisation des résultats	60
IV.6.1. Lancement de PostFEKO	60
IV.6.2 Affichage des résultats.....	61
V. Conclusion.....	62
Chapitre IV : Conception et Mesure sous Analyseur Scalaire	
I. Introduction.....	63
II. Problème des hautes fréquences	63

III. L'analyseur de réseaux.....	64
III.1. Principe de fonctionnement.....	64
III.1.1.Schéma de principe de la mesure de S_{11}	65
III.1.2.Schéma de principe de la mesure S_{21}	66
III.1.3.Mesure globale	66
IV. Mesure à l'aide de l'analyseur de réseaux	67
IV.1. Paramètres de dipôle	67
IV.1.1. Résultats de simulation sous FEKO	68
IV.1.2. Résultat avec l'analyseur de réseaux	68
IV.2. Paramètre de patch	69
IV.2.1. Résultats de simulation sous FEKO	69
IV.2.2. Résultat avec l'analyseur de réseaux	70
V. Conclusion.....	70
Conclusion générale	71

INTRODUCTION GENERALE

Le développement des radiocommunications est basé sur la théorie de l'électromagnétisme mise au point au XX^e siècle. Les ondes électromagnétiques, support des radiocommunications, ont été prévues de manière théorique par les équations de Maxwell et mises en évidence expérimentalement par Hertz. Peu de temps après, les premières applications de transmission radio sont apparues. Leur développement s'est fait en parallèle avec celui de l'électronique au début du siècle qui est ponctué d'innovations majeures répondant à des besoins précis.

L'antenne est un élément important de la chaîne de transmission par ondes électromagnétiques c'est-à-dire en utilisant l'air comme support de transmission, ce qui justifie son appellation d'aérien. Le mot « antenne » veut dire capteur, qui convient donc pour la réception. Le rôle d'une antenne en émission est de convertir l'énergie électromagnétique guidée d'un signal en énergie électromagnétique rayonnée et l'inverse en réception.

Avant toute réalisation d'antenne, le concepteur passe obligatoirement par une phase de simulation. Les logiciels existants sont nombreux et permettent de modifier certains paramètres physiques des structures à réaliser afin de répondre à des cahiers de charge de plus en plus exigeants.

La simulation électromagnétique (EM) est un outil essentiel dans la conception moderne des antennes. Les techniques de simulation EM ont évolué rapidement pour atteindre un niveau de précision très important pour les structures micro-ondes ou hyperfréquences. Ces outils de simulation EM ont permis d'accélérer le processus de conception, permettant de concevoir des prototypes virtuels.

Avec l'augmentation de complexité des circuits en hyperfréquences et en ondes millimétriques et dans tous les dispositifs électronique en général, il est devenu nécessaire pour les ingénieurs de conception de prédire le comportement de ces systèmes avec des outils de simulation utilisant des modèles rigoureux. Ces derniers sont basées sur les équations qui régissent le champ électromagnétique et qui ont été établies par Maxwell au XIX^e siècle.

La préoccupation a longtemps porté sur la recherche de solutions de ces équations en présence de géométries quelconques. Si certaines méthodes numériques étaient connues depuis longtemps, leur utilisation était très vite limitée par les faibles moyens de calcul qui

existaient alors. Avec le développement rapide des ordinateurs, ces méthodes ainsi que de nouvelles approches ont reçu beaucoup d'attention. Leur développement permet maintenant la résolution de problèmes où la géométrie et les milieux peuvent être quasi arbitraire avec, cependant, des limitations.

Les outils numériques de calcul électromagnétique sont l'élément indispensable à la conception de dispositifs. Cependant, les ordinateurs ont une puissance de calcul limitée et le coût de calcul croît de façon rapide avec la taille électrique des structures étudiées. Certes, nous vivons une croissance rapide de la puissance de calcul des ordinateurs, malheureusement, cette croissance est toujours compensée par l'augmentation de la complexité des systèmes à étudier.

Il serait ambitieux d'établir une comparaison de toutes les méthodes existantes et d'émettre un classement suivant leurs avantages et inconvénients. Nous nous limiterons donc à mentionner les méthodes principales, qui sont le moteur des logiciels commerciaux et de laboratoires les plus connus, on peut citer :

- **CST Microwave studio** (computer Simulation Technology) : Celui-ci utilise la méthode des intégrales finies qui a été proposée par **Weiland** en 1977. Cette méthode consiste à échantillonner spatialement les équations de Maxwell sous leur forme intégrale. Chaque cellule du maillage est volumique. L'outil de résolution dans le domaine temporel est très avantageux en termes de temps de calcul pour la simulation d'antennes à large bande.
- **HFSS (High Frequency Structure Simulator)** : est un logiciel qui calcule et analyse en détail le comportement électromagnétique d'une structure, le logiciel met à notre disposition des outils d'interprétation post-traitement. Il effectue une modélisation électromagnétique par résolution des équations de Maxwell à l'aide de la méthode des éléments finis.
- **FEKO** : est un outil logiciel électromagnétique complet de simulation pour l'analyse de champ électromagnétique des structures 3D. Il utilise des méthodes numériques multiples pour la solution des équations de Maxwell, permettant à ses utilisateurs de résoudre un large éventail de problèmes électromagnétiques produits dans diverses industries.

FEKO est bien adapté à l'analyse des antennes filaires, des antennes cornet, à ouvertures, des antennes à réflecteur, des antennes micro-ruban, des antennes réseau à commande de phase, des antennes à large bande et plus. Beaucoup de formulations spéciales permettent l'analyse des problèmes pratiques d'antenne.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste essentiellement en la simulation sous FEKO d'antennes filaires et patch et la comparaison avec les résultats des mesures des antennes conçues issus de l'analyseur de réseau scalaire. Ce travail est réparti en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons les généralités sur les antennes et où nous allons décrire leurs caractéristiques ainsi que des rappels sur l'électromagnétisme et les équations de Maxwell.

Dans le deuxième chapitre nous présentons les principales fenêtres du logiciel de simulation électromagnétique **FEKO** c'est-à-dire la manière de le manipuler correctement.

Dans le troisième chapitre, nous allons aborder la simulation proprement dite des antennes filaires et patch et voir les résultats de cette simulation qui présentent les caractéristiques de l'antenne (diagramme de rayonnement, coefficient de réflexion ...)

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation du matériel de mesures pratiques des paramètres S c'est-à-dire de l'analyseur de réseau, puis nous allons les comparées aux résultats de simulation avec le logiciel FEKO.

Finalement, nous terminons notre travail par une conclusion générale

I. Introduction :

En radioélectricité, une antenne est un dispositif permettant de rayonner (émetteur) ou de capter (récepteur) les ondes électromagnétiques. L'antenne est un élément fondamental dans un système radioélectrique et ses caractéristiques de rendement, gain, diagramme de rayonnement, influencent directement les performances de qualité et de portée du système. La détermination de l'onde rayonnée passe par la résolution des équations de Maxwell.

II. Définition d'une antenne :

Une antenne radioélectrique convertit les grandeurs électriques existantes dans un conducteur ou une ligne de transmission (tension et courant) en grandeurs électromagnétiques dans l'espace (champ électrique et champ magnétique). Inversement, en réception, le champ électromagnétique est converti en signal électrique qui peut ensuite être amplifié.

Une antenne d'émission est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie entre un émetteur et l'espace libre où cette énergie va se propager. Réciproquement, une antenne de réception est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie d'une onde se propageant dans l'espace à un appareil récepteur[5].

Le transport d'énergie par une onde électromagnétique va donc permettre le transfert d'information sans support physique à travers un canal ou une liaison radioélectrique, à condition que l'onde électromagnétique soit modulée par un signal informatif. Une liaison radioélectrique est un canal de transmission entre un émetteur et un récepteur, dont le support de transmission est assuré par des ondes électromagnétiques. Comme tous les canaux de communication, il est soumis aux problèmes posés par le bruit et les perturbations, qui vont limiter les performances du système de transmission. Ils sont aussi dépendants des propriétés de l'antenne qui va donner naissance à l'onde électromagnétique, et à l'environnement autour de l'antenne qui va influencer sur la propagation des ondes électromagnétiques. La connaissance et la modélisation de la propagation et des antennes sont complexes, mais nécessaires pour dimensionner un système de transmission sans fils.[2]

III. Caractéristiques de l'antenne :

III.1.Fréquence d'utilisation :

Une antenne s'utilise en général avec des signaux autour d'une fréquence donnée pour laquelle l'antenne possède des capacités optimales pour émettre ou recevoir l'énergie

électromagnétique correspondante dans l'espace environnant. La fréquence de résonance d'une antenne dépend d'abord de ses dimensions propres, mais aussi des éléments qui lui sont ajoutés.. Par rapport à la fréquence de résonance centrale de l'antenne, un affaiblissement de 3 dB détermine les fréquences minimum et maximum d'utilisation ; la différence entre ces deux fréquences correspond à la bande passante.

Par exemple, une antenne classique est l'antenne dipôle demi-onde, qui résonne à la fréquence pour laquelle sa longueur est d'une demi-longueur d'onde avec une largeur de bande d'environ 1 % si elle est très mince. En pratique, et pour les fréquences élevées, le diamètre du conducteur n'est plus négligeable par rapport à la longueur d'onde, ce qui augmente considérablement sa bande passante. En règle générale :

- la bande passante d'une antenne diminue si l'antenne devient petite par rapport à la demi-onde : il n'existe pas d'antennes large bande et compactes. Du moins avec des pertes raisonnables.
- la bande passante d'une antenne filaire augmente si le diamètre du conducteur augmente.

Certaines antennes dites « multi-bandes » peuvent fonctionner correctement sur des segments discontinus de bande de fréquences sans dispositif particulier. D'autres nécessitent l'emploi d'un circuit adaptateur d'impédance pour fonctionner correctement. [4]

III.2. Impédance d'antenne :

L'impédance d'antenne est la généralisation de la notion d'impédance utilisée pour les autres composants passifs (résistances, condensateurs, selfs...) aux antennes. Il s'agit donc du rapport complexe observé entre la tension et le courant à l'entrée d'une antenne en émission. L'utilité de cette notion est importante pour assurer les meilleurs transferts d'énergie entre les antennes et les dispositifs qui y sont connectés grâce aux techniques d'adaptation.

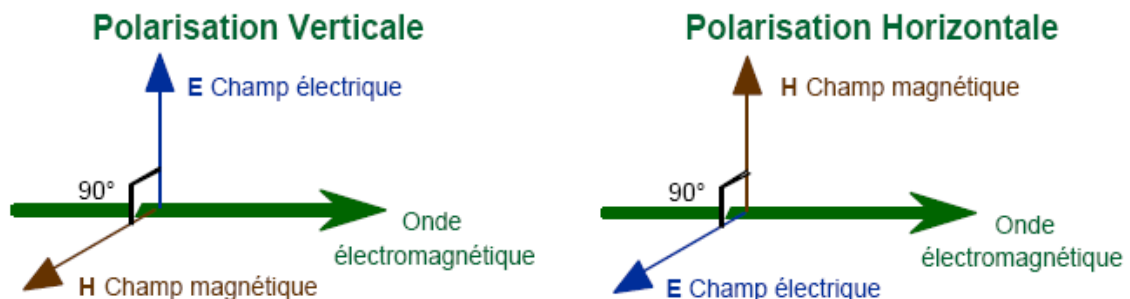
Une antenne prise entre ses deux bornes d'accès constitue donc un dipôle ayant une impédance complexe $R + jX$ où R et X représentent respectivement la résistance et la réactance de l'antenne. La résistance d'antenne R est elle-même la somme de deux types de résistance qui traduisent les différentes utilisations de l'énergie absorbée: la première R_p est la résistance liée aux pertes par effet Joule dans l'antenne tandis que la deuxième R_r est la résistance de rayonnement liée à l'énergie utile rayonnée par l'antenne dans l'espace qui l'entoure. On dit d'une antenne qu'elle résonne sur une fréquence si à cette fréquence le terme imaginaire jX est nul. La puissance absorbée par l'antenne est la puissance absorbée par la résistance R . La

résistance R_r est parfois qualifiée de fictive, car elle n'est pas soumise à la loi de Joule : en effet, la puissance absorbée par cette résistance est, à la différence d'une véritable résistance, transformée en rayonnement électromagnétique.

III.3. La polarisation :

L'onde électromagnétique est rayonnée selon un plan de polarisation. Elle est composée de deux "vecteurs en quadrature" appelés champ électrique "E" et champ magnétique "H".

On dit qu'ils sont en quadrature lorsque qu'ils sont déphasés de 90° l'un par rapport à l'autre.



Par convention, le plan de polarisation est défini selon l'orientation du champ électrique. Lorsque la configuration de l'antenne place le champ électrique verticalement, on dit que la polarisation est verticale. À l'inverse, lorsque la configuration de l'antenne place le champ électrique horizontalement, on dit que la polarisation est horizontale. [4]

III.4. Le diagramme de rayonnement :

L'antenne isotrope, c'est-à-dire rayonnant de la même façon dans toutes les directions, est un modèle théorique irréalisable dans la pratique. En réalité, l'énergie rayonnée par une antenne est répartie inégalement dans l'espace, certaines directions étant privilégiées : ce sont les « lobes de rayonnement ». Le diagramme de rayonnement d'une antenne permet de visualiser ces lobes dans les trois dimensions, dans le plan horizontal ou dans le plan vertical incluant le lobe le plus important. La proximité et la conductibilité du sol ou des masses conductrices environnant l'antenne peuvent avoir une influence importante sur le diagramme de rayonnement.

Le diagramme de rayonnement complet peut être résumé en quelques paramètres utiles :

III.4.1. La directivité :

La directivité de l'antenne dans le plan horizontal est une caractéristique importante dans le choix d'une antenne.

Une antenne omnidirectionnelle rayonne de la même façon dans toutes les directions du plan horizontal.

Une antenne directive possède un ou deux lobes nettement plus importants que les autres qu'on nomme « lobes principaux ». Elle sera d'autant plus directive que le lobe le plus important sera étroit. La directivité correspond à la largeur du lobe principal, entre les angles d'atténuation à 3 dB.

Pour toutes les antennes, la dimension constitue un paramètre fondamental pour déterminer la directivité. Les antennes à directivité et à gain élevés seront toujours grandes par rapport à la longueur d'onde.

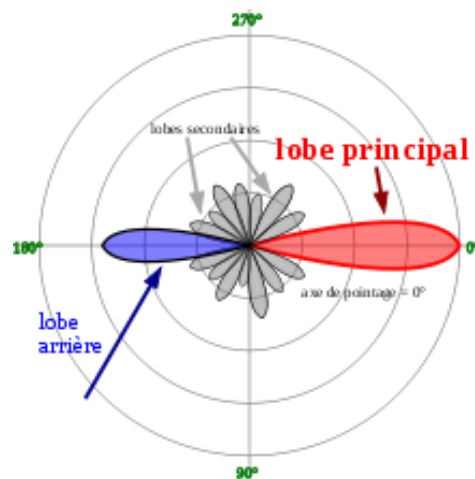


Figure 1 : Diagramme polaire montrant la distribution des intensités en lobes

III.4.2. Gain :

Le gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes. En général, le gain G correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal (θ_0, φ_0) .

Cette propriété caractérise la capacité d'une antenne à focaliser la puissance rayonnée dans une direction. [4]

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_A} \Rightarrow G = 4\pi \frac{P(\theta_0, \varphi_0)}{P_A}$$

III.4.3. Lobes et zéros secondaires :

Aux angles proches du lobe principal, une antenne présente des minima et maxima relatifs appelés « lobes secondaires » qu'on tente de minimiser. Les antennes à grande directivité présentent également des lobes faibles et irréguliers dans tous les autres angles, appelés « lobes diffus ».

Le niveau général de ces lobes secondaires décrit la sensibilité de l'antenne au brouillage (en télécommunications) ou la finesse d'imagerie (en radar). Une direction où le gain est faible peut être mise à profit pour éliminer un signal gênant (en réception) ou pour éviter de rayonner dans une région où il pourrait y avoir interférence avec d'autres émetteurs.

III.4.4. Angle de départ (d'ouverture) :

L'angle d'ouverture (beamwidth) caractérise la largeur du lobe principal. L'angle d'ouverture à 3 dB, $2\theta_3$: représente la portion de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée.

Il s'agit de l'angle entre les 2 directions autour du lobe principal où la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal.

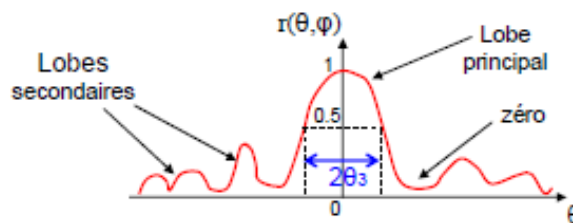


Figure 2 : Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture

III.5. Le rendement de l'antenne :

La somme des puissances émises dans toutes les directions définit la puissance effectivement rayonnée. Le rapport avec la puissance fournie par la ligne de transmission définit son rendement. La résistance (partie réelle de l'impédance) présentée par l'antenne a deux origines :

- la résistance de rayonnement. L'énergie absorbée par la résistance de rayonnement est en fait l'énergie rayonnée par l'antenne.

- la résistance de pertes. L'énergie absorbée par cette résistance est dissipée en chaleur par l'antenne, par effet joule dans les résistances ou par pertes dans les diélectriques.

Le rendement est fonction du rapport entre ces deux résistances. Une antenne aura un bon rendement si la résistance de pertes est faible devant la résistance de rayonnement. Les antennes du type dipôle demi-onde ou monopole ont en général une résistance de rayonnement bien plus élevées que leur résistance de pertes, et leur rendement reste donc bon. Par contre, si l'antenne possède des dimensions faibles par rapport au dipôle demi-onde, sa résistance de rayonnement va diminuer. C'est alors que se posera vraiment le problème du rendement et qu'il faudra chercher à réduire aussi la résistance de pertes (qualité des surfaces conductrices, élargissement des conducteurs...)

Si on considère la puissance appliquée à l'entrée de la ligne de transmission, le rendement est évidemment plus faible, puisqu'une partie de l'énergie est dissipée dans cette ligne. Une ligne est caractérisée par les pertes en dB par unité de longueur, pour une fréquence donnée. Mais si la ligne est le siège d'ondes stationnaires du fait de la désadaptation, les pertes dans la ligne seront encore supérieures.

III.6. La puissance maximale :

Le rendement définit la puissance effectivement rayonnée, la puissance non rayonnée est dissipée thermiquement soit dans les fils, raccords, visseries, etc., ce qui limite la puissance moyenne tolérée. La puissance crête maximale tolérée dépend du champ électrique avant amorçage en chaque point de l'antenne, dans les lignes, pointes, guides, supports, isolants. Le point le plus critique est en général la ligne de transmission, coaxiale ou guide : son diamètre doit être adapté, ainsi que son diélectrique.

IV. Zone de rayonnement :

L'onde électromagnétique n'a pas les mêmes propriétés de propagation dans tout l'espace entourant une source. Pour modéliser la propagation d'une onde dans un environnement global, il convient de découper l'espace en différentes zones. [8]

On distingue trois zones de propagation apparait dans la figure ci-dessous :

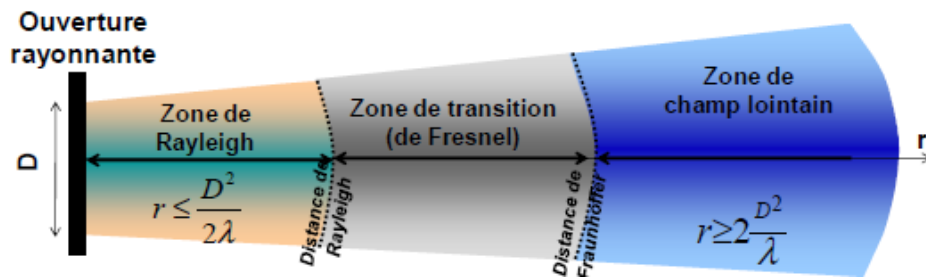


Figure 3 : les zones de rayonnement

IV.1. La zone de Rayleigh :

Elle se situe à une distance comprise entre $\frac{\lambda}{2\pi}$ et $\frac{D^2}{2\lambda}$, D étant la plus grande dimension de l'antenne (pour une antenne GSM de 1m de diamètre, $\frac{D^2}{2\lambda} = 1.5m$). L'énergie électromagnétique est confinée dans un cylindre autour de l'ouverture rayonnante.

IV.2. La zone de Fresnel :

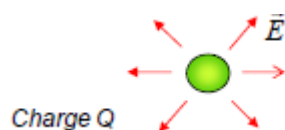
C'est la zone intermédiaire située entre $\frac{D^2}{2\lambda}$ et $\frac{2D^2}{\lambda}$. L'onde diverge naturellement. La limite supérieure L de la zone de Fresnel est donnée par : $L = \frac{2D^2}{\lambda}$

IV.3. La zone de Fraunhofer :

Elle se situe au-delà de $\frac{2D^2}{\lambda}$ et constitue ce que l'on appelle la zone en champ lointain de l'antenne (ou zone de rayonnement) où les ondes sont localement planes. C'est dans cette zone où les calculs vont se faire.

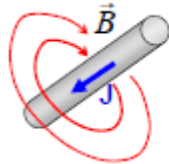
V. Notions sur l'électromagnétisme :

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.



$$\vec{E}(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^3} \vec{r} \quad \text{Équation 1}$$

De la même manière, toute circulation de courant (c'est-à-dire des charges en mouvement) à travers une interconnexion élémentaire 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.



$$\vec{B}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{J} \wedge \vec{r}}{r^3} dv \quad \text{Équation 2}$$

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 et est 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 varie. Les champs électriques et magnétiques sont alors liés. On parle alors de champ électromagnétique. Par exemple, dans un circuit électrique soumis à un champ magnétique, un courant se mettra à circuler en raison de l'apparition d'une force électromotrice, elle-même liée au champ électrique induit par la variation de champ magnétique (loi de Faraday). [2]

V.1. Origine de rayonnement électromagnétique :

Toute charge accélérée est capable de créer des champs électriques et magnétiques autour d'elle et devrait être capable de produire un rayonnement électromagnétique (création d'une onde électromagnétique qui se propage librement dans l'espace). 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 [9], un courant continu se met à parcourir une petite boucle carrée à $t = 0$. Bien que les contributions des 2 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 2 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.

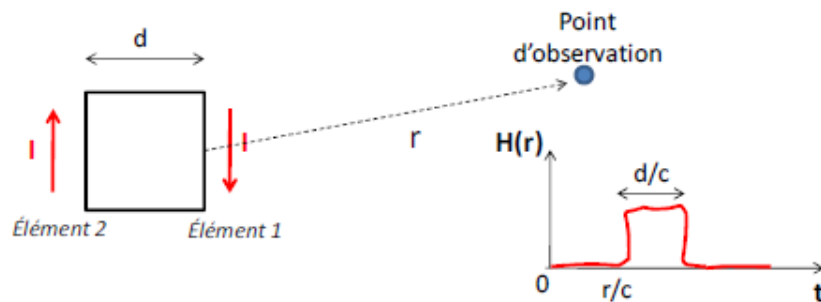


Figure4 : Rayonnement électromagnétique créé par la variation d'un courant dans un circuit petit taille

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

V.2.Champ proche et champ lointain :

On distingue deux régions autour d'une antenne : une zone proche appelée zone de champ proche ou zone réactive à proximité de l'antenne, et une zone de champ lointain ou zone radiative qui s'étend à l'infini. En champ proche, on ne peut pas parler de rayonnement électromagnétique, puisqu'une partie importante de l'énergie électrique et magnétique n'est pas liée à une onde électromagnétique qui se propage. En champ lointain, la partie radiative de l'énergie de l'antenne est prédominante et on peut parler d'une onde électromagnétique sphérique qui se propage.

La limite entre zone de champ proche et zone de champ lointain dépend de la fréquence et des dimensions de l'antenne. On peut considérer qu'on est en zone de champ lointain lorsque la plus grande dimension D de l'antenne est petite devant la distance séparant l'antenne du point

d'observation. En d'autre terme, il est difficile de différencier les contributions de chaque partie élémentaire de l'antenne au champ produit au point d'observation. On définit la limite entre zone de champ proche et champ lointain par les 2 critères suivants :

$$R > \frac{2D^2}{\lambda}$$

$$R > 10.D$$

Il est important de noter que lorsqu'une antenne est placée dans la zone de champ proche d'une autre antenne, un fort couplage existe entre les deux antennes (couplage électrique, assimilable à une capacité) ou magnétique (assimilable à une inductance mutuelle) qui va contribuer à fortement modifier les propriétés de chaque antenne (impédance, diagramme de rayonnement, fréquence de résonance). De même, tout objet métallique placé à proximité de l'antenne va modifier ses propriétés (par exemple le mat d'installation d'une antenne). Lors d'une installation d'antenne, il est important d'évaluer cette modification.

V.3. Equations de propagation :

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 2 équations différentielles dites de propagation :

$$\Delta \vec{E} - \epsilon\mu \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2} = \vec{0}$$

Equation de propagation de champ électrique

$$\Delta \vec{H} - \epsilon\mu \frac{d^2 \vec{H}}{dt^2} = \vec{0}$$

Equation de propagation de champ magnétique

VI. Les 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

Equation de Maxwell-Gauss	$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$ Équation 3
Equation de Maxwell-Thompson	$\text{div } \vec{B} = 0$ Équation 4
Equation de Maxwell-Faraday	$\text{rot } \vec{E} = -\mu \frac{d\vec{H}}{dt}$ Équation 5
Equation de Maxwell-Ampère	$\text{rot } \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{d\vec{E}}{dt}$ Équation 6

Tableau des équations de Maxwell

Avec :

- ρ : densité volumique de charge
- ϵ : permittivité électrique (F/m). A noter ϵ_0 : permittivité diélectrique dans le vide ($8.85 \cdot 10^{-12}$) et ϵ_r : permittivité électrique relative telle que $\epsilon = \epsilon_0 \times \epsilon_r$
- μ : perméabilité magnétique (H/m). A noter μ_0 : permittivité diélectrique dans le vide ($4\pi \cdot 10^{-7}$) et μ_r : permittivité magnétique relative telle que $\mu = \mu_0 \times \mu_r$
- σ : conductivité électrique du milieu (S/m)

VI.1. L'équation de Maxwell-Gauss : (issue du théorème de Gauss)

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 la somme de toutes les charges.

VI.2. L'équation de Maxwell-Thompson :

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 entourant la ligne parcourue par un courant est nul. En 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.

VI.3.L'équation de Maxwell-Faraday :

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.

VI.4.L'équation de Maxwell-Ampère :

Permet de relier le champ magnétique au courant circulant dans un circuit. Elle est issue de la loi d'Ampère $\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{I}_C$ qui relie le champ magnétique au courant de conduction $\mathbf{I}_C = \sigma\mathbf{E}$. 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 2 armatures chargées du condensateur, la variation de charge est identique sur les 2 armatures. Ce flux de charge en mouvement est appelé courant de déplacement. $I_D = \varepsilon \frac{dE}{dt}$.

VII. Quelques types d'antennes :**VII.1. L'antenne dipôle :**

Un dipôle est constitué de 2 tiges cylindriques de diamètre fin ($d < \lambda/100$), connectées à une source d'excitation. Cette fois-ci, sa longueur n'est plus négligeable devant la longueur d'onde et la répartition du courant n'est plus constante le long du fil. L'analyse du rayonnement du dipôle peut se faire en découpant le dipôle en dipôle élémentaire et en sommant leur contribution. La répartition du courant le long du dipôle est quasi sinusoïdale (vrai si le diamètre de la tige est nul), à l'image de la répartition du courant le long d'une ligne bifilaire. Cependant, le courant doit être nul à chaque extrémité du dipôle (le circuit est ouvert donc il ne peut y avoir de courant de conduction aux extrémités). La période de variation du courant le long du dipôle est égale à λ . Les courants sont en opposition de phase en 2 points placés symétriquement sur chaque brin par rapport au centre du dipôle.

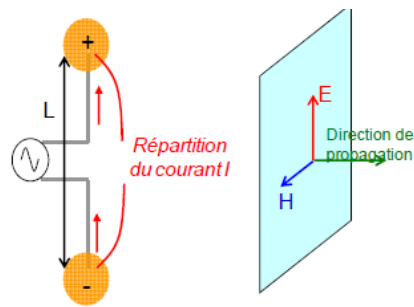


Figure 5 : antenne dipôle

VII.2.L'antenne monopôle :

La présence d'un plan de masse en dessous d'un dipôle va modifier ses propriétés et son diagramme de rayonnement, en raison de la réflexion produite par le plan métallique. Un monopôle correspond à un cas particulier où un demi – dipôle demi-onde (une seule tige de longueur l), est placé verticalement au-dessus d'un plan de masse supposé idéal. L'excitation est connectée entre la tige restante et le plan de masse. Cette antenne s'apparente à un dipôle demi-onde qui fonctionne à une fréquence telle que $l = \lambda/4$. Avant d'expliquer pourquoi, il convient d'introduire la notion de plan image créé par le plan de masse. [2]

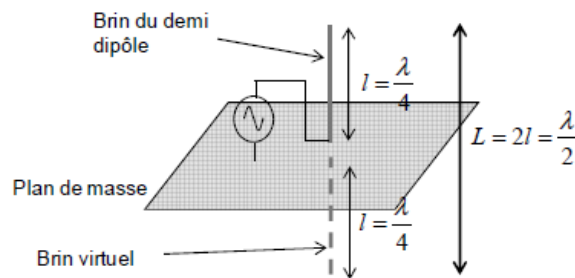


Figure 6 : Antenne monopole

Un plan de masse idéal est un plan infini formé par un conducteur parfait. Electriquement, il représente une équipotentielle. Un plan de masse se comporte comme un plan d'antisymétrie pour tout courant. En effet, supposant qu'un fil parcouru par un courant soit placé au-dessus d'un plan masse. Si le plan est parfaitement conducteur, l'onde émise par le fil vers le plan est entièrement réfléchi et repart vers le fil. Tout se passe comme si le plan de masse se comportait comme un plan d'antisymétrie, c'est-à-dire qu'un fil virtuel serait placé sous le premier fil symétriquement au plan de masse et serait parcouru par un courant opposé en phase. Ce principe

est à la base de la méthode des images, qui permet de déterminer l'effet d'un plan de masse sur une antenne.

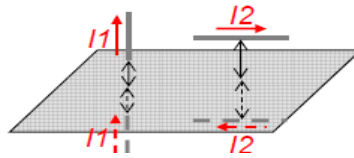


Figure 7 : Le courant dans le plan de masse (plan image)

Le plan de masse crée donc un deuxième brin virtuel sous le premier et parcouru aussi par un courant I_1 opposé en phase. Ces 2 brins forment donc un dipôle demi-onde. Le monopôle aura donc les mêmes propriétés qu'une antenne dipôle pour un encombrement deux fois plus faible ! Contrairement au dipôle qui représente une antenne qui résonne en $\lambda/2$, le monopôle résonne en $\lambda/4$, on parle d'antenne quart-d'onde.

VII.3. Antenne patch :

Le concept d'antennes patch est apparu dans les années 50, mais le véritable développement ne s'est fait que dans les années 70. Les antennes imprimées ou micro ruban, ou « patch » en anglais sont des éléments rayonnants planaires. L'antenne est réalisée par gravure d'un circuit imprimé. De part leur technologie de fabrication, ceux-ci peuvent être intégrés au plus près des circuits électroniques en occupant un volume réduit et se conformant à différents types de surface. Leur principal avantage réside dans leur faible coût de fabrication. Les antennes patch sont utilisées dans de nombreuses applications à partir des bandes VHF

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). Une antenne patch rectangulaire est l'antenne patch la plus courante, sa structure est détaillée ci-dessous. [2]

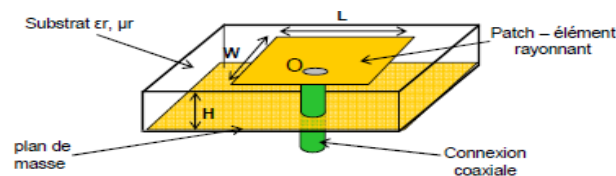


Figure 8 : Antenne patch

- W = largeur (width)
- L = longueur (length)
- H = épaisseur du substrat (Height)

VIII. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu les différentes zones de rayonnement, ainsi que les différents polarisations d'une onde, mais surtout les caractéristiques des antennes, qui nous renseignent sur la qualité et la portée de notre système, et pour déterminer ces caractéristiques, il faut connaître le champ électromagnétique dans la zone au champ lointain, afin qu'ils soient un outil pour le prochain chapitre.

I. Introduction :

Nous consacrons ce chapitre pour la présentation du logiciel **FEKO**, ses fonctionnalités et présenter de façon générale le rôle de chaque fonction que nous allons utiliser pour réaliser nos simulations. On insistera notamment sur les étapes à suivre pour créer un projet.

II. Définition du logiciel :

Le nom FEKO est une abréviation dérivée du la phrase allemand **FE**ldberechnung bei **K**örpern mit beliebiger **O**berfläche. (Calculs de champ impliquant des corps de forme arbitraire). [10]

FEKO est un logiciel commercial développé par la société EMSS dédié à la simulation électromagnétique. Le but de ce type de logiciel est de proposer une résolution numérique plus ou moins exacte des équations de Maxwell. Les champs d'application du logiciel sont variés :

- Conception d'antennes
- Placement d'antennes sur des systèmes
- Conception de composants radiofréquences et micro-ondes
- Analyse de rayonnement
- Analyse de compatibilité électromagnétique
- Analyse des effets biologiques des ondes électromagnétiques

Le logiciel FEKO utilise différentes méthodes d'analyse numérique, comme la montre la figure ci-dessous.

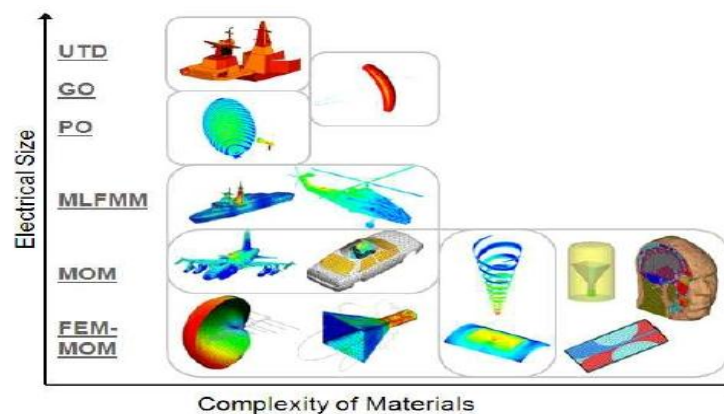


Figure 9 : Les différentes méthodes de résolution numérique des équations de Maxwell utilisées par FEKO

Le choix de la méthode dépend du champ d'application, et de la taille électrique des objets à étudier. Ainsi, des méthodes quasi-exactes telles que la FEM (Finite Element Method) ou la MOM (Method Of Moment) sont adaptées à des objets de petites dimensions (comparées à la longueur d'onde), mais deviennent inadaptées lorsque la taille des objets est très grande devant la longueur d'onde. Dans ce cas, le nombre d'éléments du modèle devient tellement important que le temps de simulation et la mémoire requise « explose » littéralement. On préfère alors des méthodes approchées, qui fournissent un compromis entre le temps de simulation et la précision. [3]

Toutes ces méthodes sont des méthodes fréquentielles, c'est-à-dire résolues dans le domaine fréquentiel.

III. Flot de conception et de simulation de FEKO :

Le logiciel FEKO utilise dans la conception et la simulation trois types d'outils distincts :

.CADFEKO



.FEKO Solver



.POSTFEKO



III.1 .Le CADFEKO :

CADFEKO constitue le point d'entrée du flot de simulation. Le projet est créé à partir de cet outil. La plus grande partie de travail de conception/simulation se fait sous CADFEKO. Le flot de conception commence par la définition de la géométrie des structures. L'outil CADFEKO permet à l'utilisateur de visualiser en 3D les objets géométriques définis par l'utilisateur.

III.2. Le FEKO Solver :

Après la définition de la géométrie, la nature des matériaux et le maillage des structures, il est possible de lancer la simulation proprement dite. L'utilisateur se contente de lancer le simulateur **FEKO Solver** depuis CADFEKO. Qui fait la résolution des équations de Maxwell.

III.3. Le POSTFEKO :

Une fois la simulation terminée, les résultats peuvent être visualisés avec l'outil POSTFEKO, lancé depuis CADFEKO. Seuls les résultats demandés par CADFEKO peuvent être affichés. POSTFEKO propose de présenter les résultats sous forme de graphique 2D, mais aussi de surfaces ou de volumes superposés au modèle géométrique maillé.

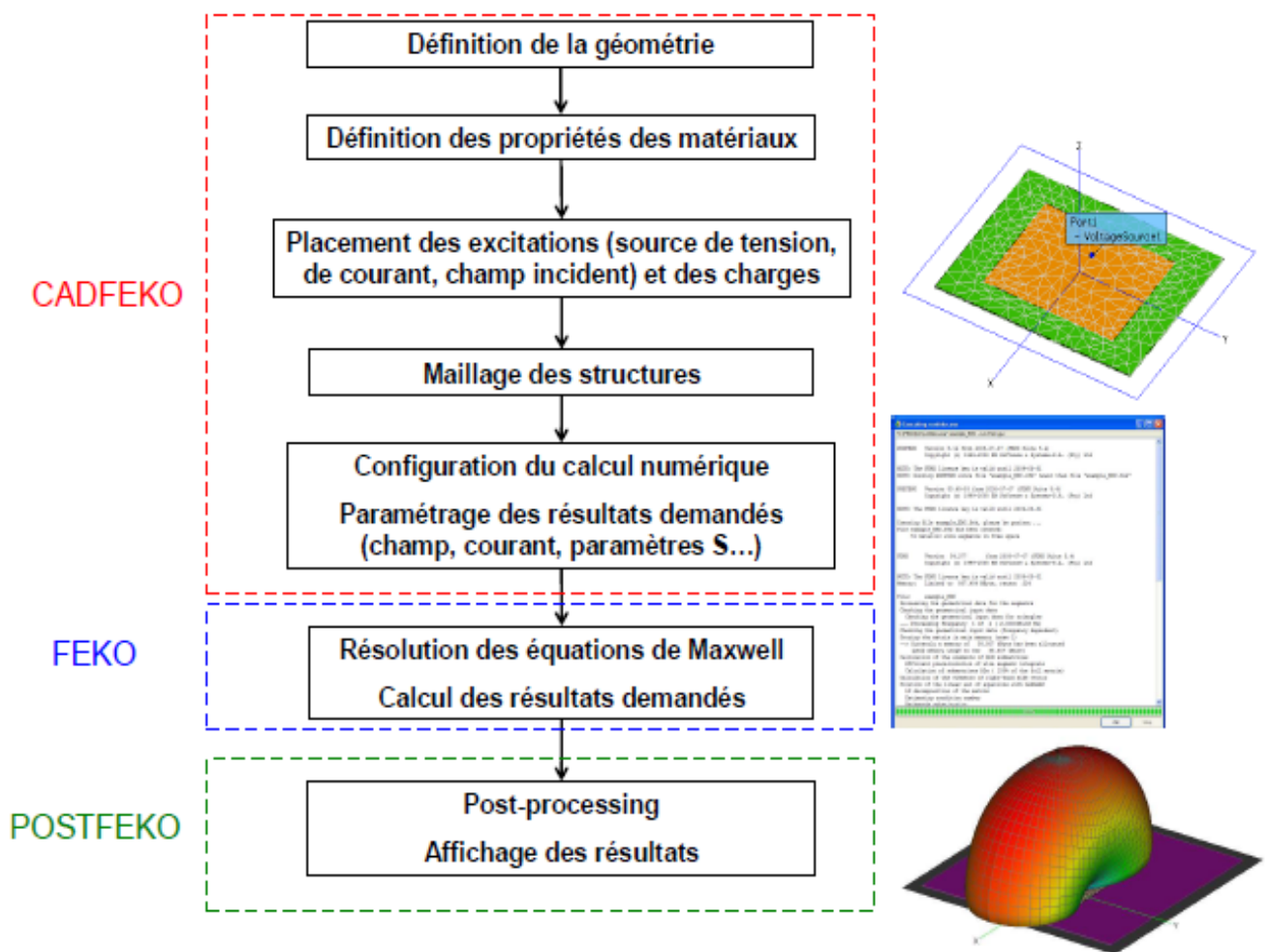


Figure 10: Flot de simulation sous FEKO

IV. Description générale des outils FEKO :

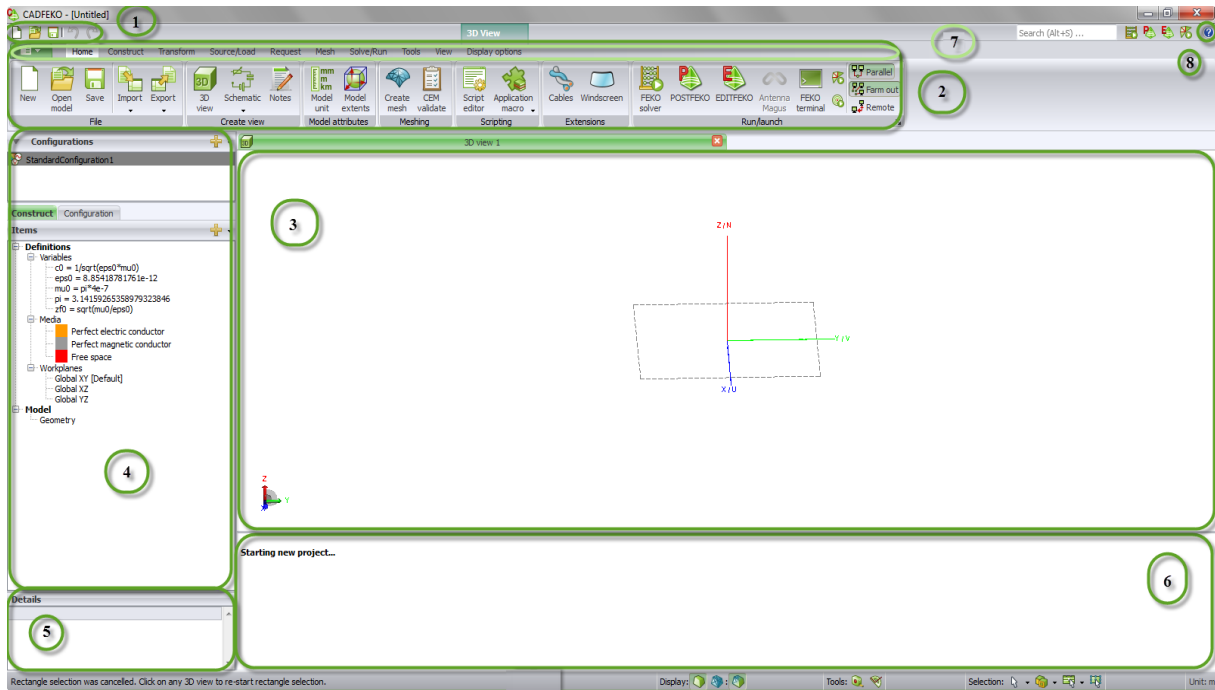


Figure 11 : fenêtre de travail

IV.1. Barre à accès rapide :



Elle permet à l'utilisateur l'accès rapide ou modèle déjà crée, à un nouveau model ou de sauvegarder un modèle.

IV.2. Barre des outils :



C'est la barre qui contient les éléments ou les outils qu'on utilise pour crée la géométrie, aussi on trouve les applications des menus.

IV.3. Fenêtre des modèles 3D :

C'est une fenêtre menée d'un plan cartésien ($x ; y ; z$), qui nous permet de visualiser en 3D la géométrie de l'antenne et de voir ses solutions.

IV.4. Gestionnaire de projet arborescent :

On l'appelle gestionnaire de projet ou Manager des projets, car c'est la partie où on peut déclarer les caractéristiques de l'antenne qu'on veut avoir, commençons par déclarer les variables.

Des variables sont déclarées par défaut comme :

C_0 : Vitesse de la lumière.

ϵ_0 : Permittivité dans le vide.

μ_0 : Perméabilité dans le vide.

$\pi = 3.14159$.

Z_{f0} : La caractéristique d'impédance dans le vide.

On peut définir aussi le milieu (Dielectric, Free space, Perfect electric conductor, etc), on trouve aussi Workplanes qui indiquent le plan de travail (Global XY, Global XZ, Global YZ)

Le gestionnaire de projet nous permet aussi de déclarer la géométrie et les ports.

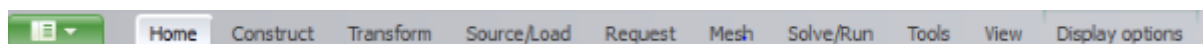
IV.5. Détails de la géométrie :

Elle se trouve au-dessous de l'arborescent, elle indique les détails de la géométrie (Edge, Wire, Face... etc.)

IV.6. Fenêtre des messages :

C'est une fenêtre qui se trouve au-dessous de la fenêtre de 3D, elle décrit (affiche) les étapes qu'on a suivies pour créer la géométrie (l'antenne).

IV.7. Barre des menus :





C'est la barre où se trouvent plusieurs icônes, et dans chaque icône se trouvent plusieurs outils.

IV.8. Le Help :

Le bouton help donne à l'utilisateur de FEKO l'aide et les informations nécessaires pour pouvoir manipuler le logiciel.

V. Comment créer un projet sur FEKO :

Après l'installation de logiciel FEKO, la création de projet commence par ouvrir le CADFEKO après l'ouverture du CADFEKO qui se trouve sur le bureau ou on clique sur le menu **Démarrer=>Tout les programme=>FEKO=>CADFEKO**, une page va apparaître à l'écran (figure4). Sur cette page on trouve plusieurs icônes qui nous aideront à la manipulation et à la compréhension de FEKO, ces icônes sont :

- **Create a new model :** 
Pour créer un nouveau modèle (nouvelle géométrie) on doit cliquer sur **Create a new model** ensuite la fenêtre de travail va nous apparaître (figure11).
- **Open an existing model :** 
Pour ouvrir un modèle qui existe déjà ou que nous avons déjà commencé, l'icône **Open an existing model** nous permet de accéder directement à notre travail déjà enregistré.
- **Documentation :**
Dans la documentation on trouve des fichiers PDF qui servent à la compréhension de ce logiciel FEKO.
- **Videos :**
Dans ce logiciel on trouve des vidéos qui servent aussi à la compréhension et la manipulation de logiciel.
- **Website :**
Le logiciel offre des liens que nous pouvons accéder par internet, qui vont nous permettre de trouver des informations sur ce logiciel.

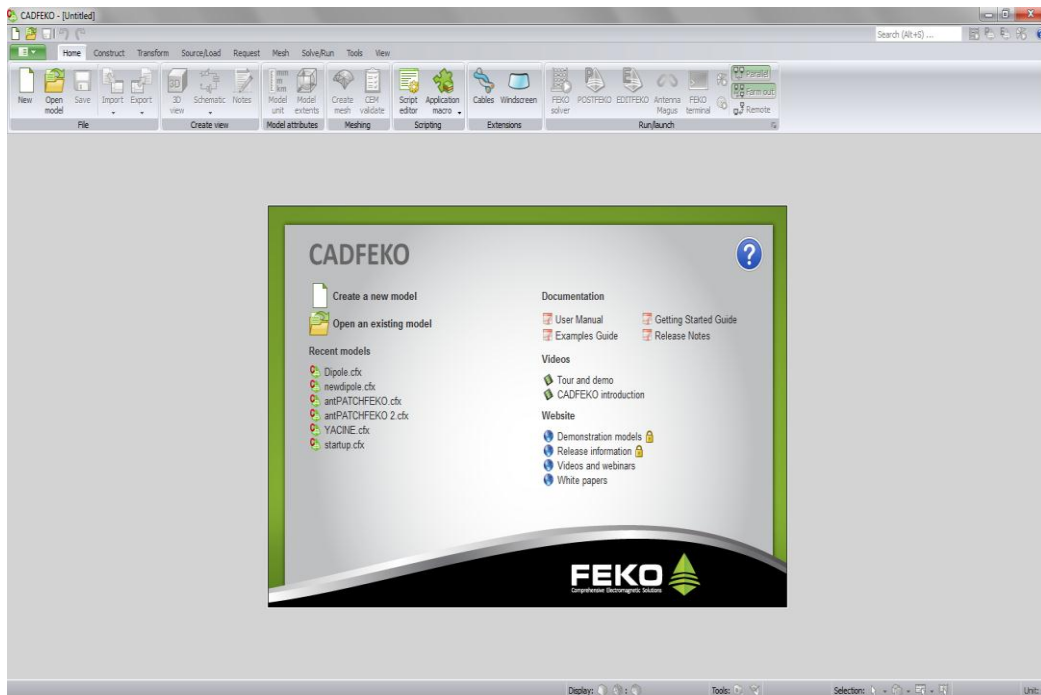



Figure 12 : fenêtre d'accueil du CADFEKO

V.1.Création du model :

Après l'ouverture de CADFEKO et l'apparition de la page d'accueil (figure12), on clique sur l'icône =>**Create a new model**, puis la fenêtre de travail va nous apparaitre (figure11).

V.2.Création des paramètres :

V.2.1.Choix des unités :

On commence d'abord par enregistrer le modèle sous un nom choisis par le constructeur en cliquant sur **File/Save**. La première étape consiste à paramétrer les unités géométriques, en cliquant dans l'onglet **Cosntruct** le bouton **Model Unit** . On choisit mètre comme unité principale.

V.2.2.Ajouter les variables :

La deuxième étape consiste à définir l'ensemble des variables du modèle, ces variables sont les paramètres ou bien les caractéristiques de l'antenne qu'on veut avoir.

Pour créer ces variables, on utilise un clic droit sur **variables** qui se trouve dans le gestionnaire de projet arborescent, puis on clique sur => **Add variable** pour ajouter ces variables. Une fenêtre s'ouvre permettant de définir le nom d'une variable, sa valeur ou son expression mathématique en fonction d'autres variables. Cliquez sur **Create** pour la générer. Celle-ci apparaît alors dans la liste des variables.

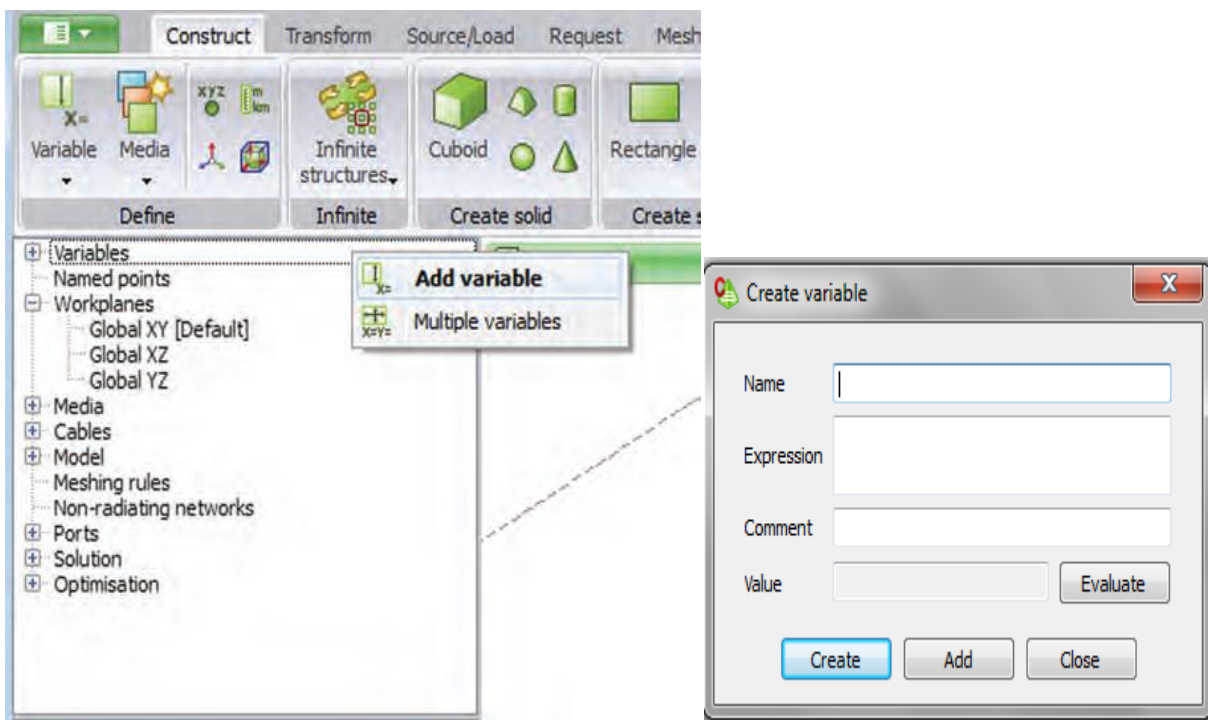


Figure 13 : création des variables

V.2.3. Définition des milieux de propagation :



On crée ensuite les différents milieux ou media de propagation. Ceux-ci sont présents dans l'arborescence projet sous la catégorie **Media**. Par défaut, on trouve 3 milieux par défaut : l'espace libre (free space), les conducteurs électriques parfaits et les conducteurs magnétiques parfaits. Il est ensuite possible de créer 2 principaux types de matériaux :

- Milieu diélectrique.
- Conducteur métallique non parfait.

Comme on peut déclarer le milieu à partir de la barre des outils, cliquons sur **Media**.

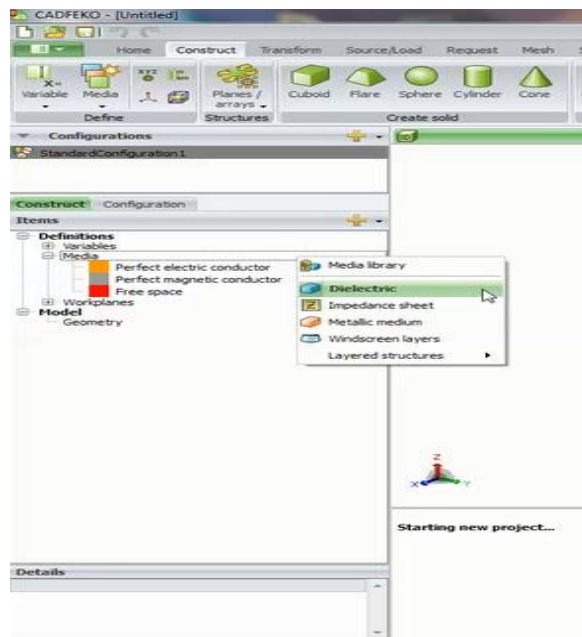
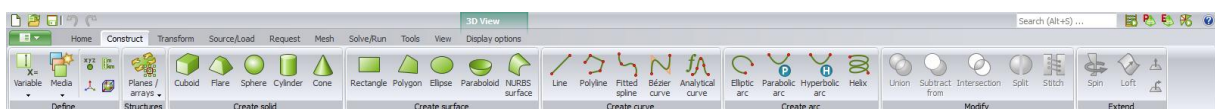


Figure 13 : définition de milieu de propagation

V.3.Création de la géométrie :

La création de la géométrie est la déclaration de type de géométrie qu'on veut avoir et ça c'est selon le type d'antenne qu'on veut réaliser et parmi les types des géométries qu'on en sont : solid, surface, curve, arc. Et pour choisir une de ses géométries, on doit cliquer sur **construct** qui se trouve dans la barre des menus, puis on choisit la géométrie dans la barre des utiles.



Ou bien avec un clic droit sur => **Geometry** qui se trouve dans l'arborescent, un menu va apparaître qui contient toutes les géométries.

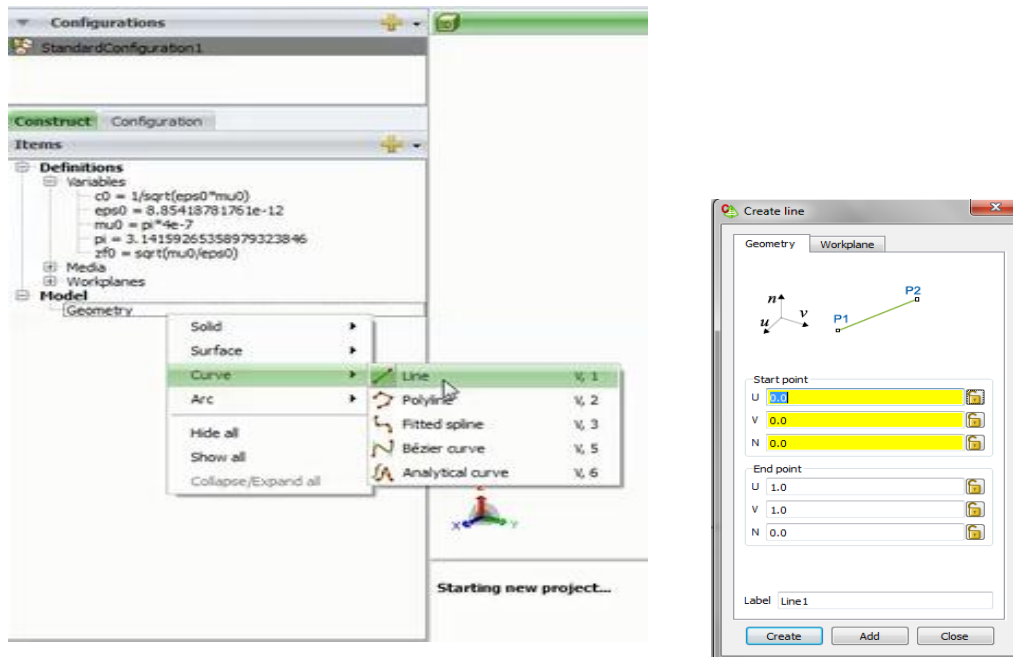



Figure 14 : création de la géométrie

V.4.Compilation et visualisation des résultats :

V.4.1 : La validation de modèle :

Avant de lancer le simulateur, on doit commencer par valider les résultats de la création de modèle. Cliquons dans l'onglet **Solve/Run=> CEM Validate**  pour la cohérence électromagnétique, s'il y'a erreur dans la création de la géométrie, le compilateur va déclarer cette erreur.

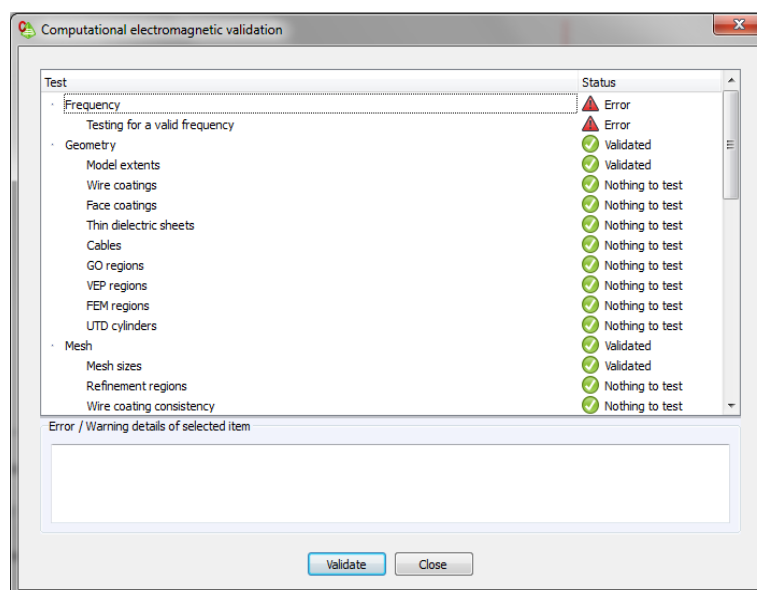


Figure 15: validation de modèle

V.4.2. Lancement de la simulation :

Après la validation de modèle et assurer qu'il y'a pas d'erreur, on commence à lancer la

simulation à partir de **Feko Solver**  qui se trouve dans l'onglet **Solve/Run**.

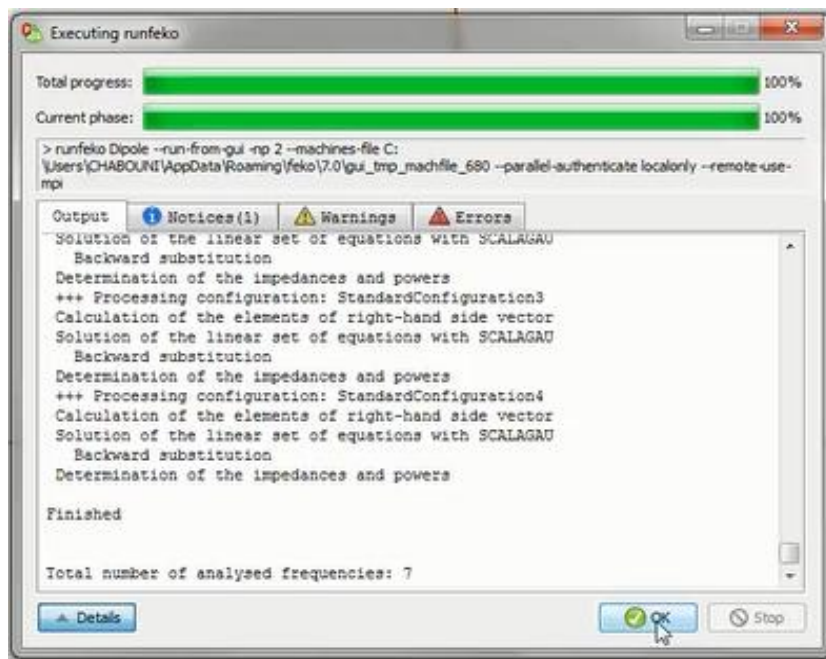





Figure16 : lancement de simulation

V.5. Visualisation des résultats :

V.5.1. Lancement de POSTFEKO :

Une fois les simulations effectuées, on lance l'outil de visualisation POSTFEKO à partir de CADFEKO en cliquant sur le bouton **POSTFEKO**  dans l'onglet **Solve/Run**. POSTFEKO charge directement les résultats du modèle ouvert sous CADFEKO. Néanmoins, il est possible d'afficher sous POSTFEKO des résultats provenant de différents fichiers. On ouvre d'abord POSTFEKO depuis le fichier qu'on avait créé. Lorsque PostFEKO se lance, une fenêtre avec le modèle 3D maillé de la structure simulée apparaît. A partir de cette fenêtre, nous pourrons faire apparaître les résultats soit sous forme 3D autour du modèle géométrique.

➤ Affichage de la distribution du courant :

Pour visualiser le graphe de courant, on clique sur **Cartesian**  dans la barre des outils de PostFeko, un plan cartésien en 2D va apparaître dans la fenêtre des modèles 3D. puis on clique sur **currents**  pour afficher le graphe de la distribution du courant en fonction de la fréquence ou en fonction des segments

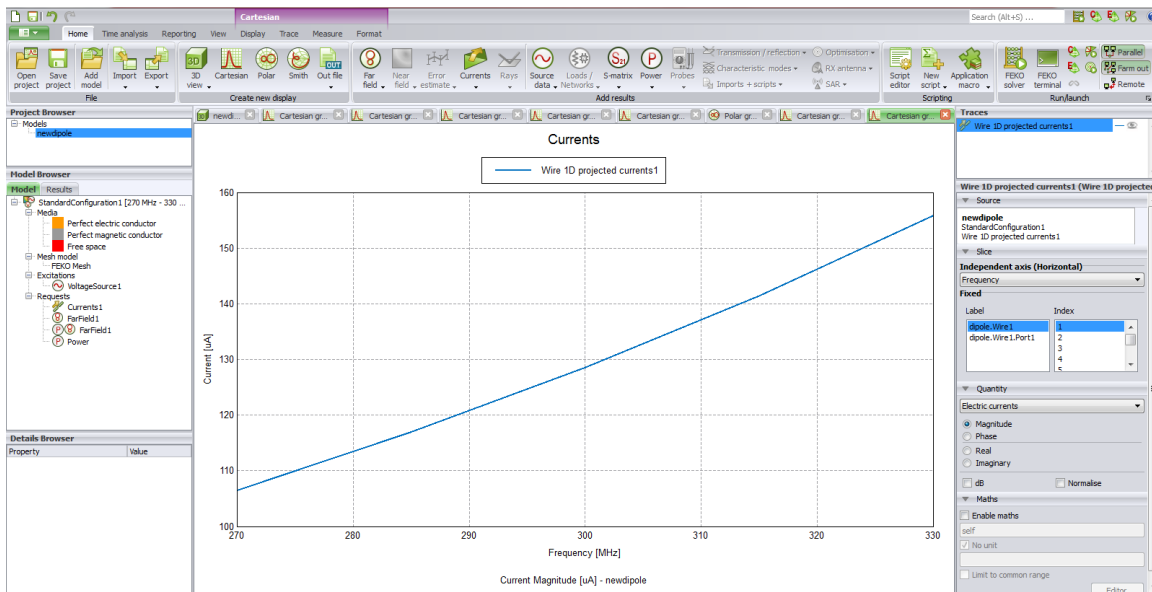


Figure 17 : Distribution de courant en fonction de fréquence

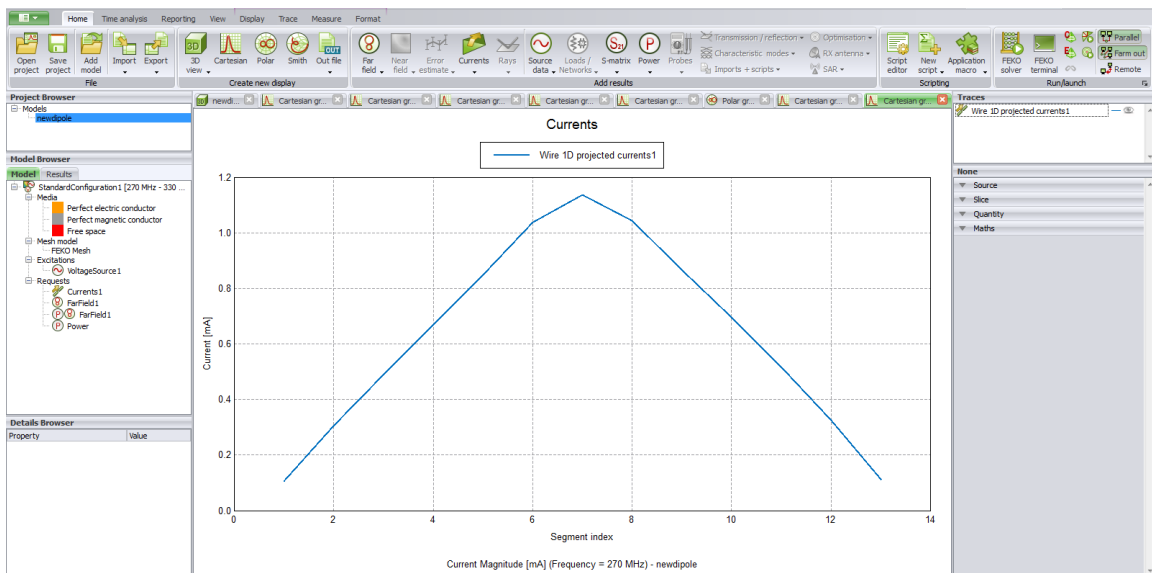


Figure 18 : Distribution de courant en fonction des segments

➤ Affichage des résultats de calcul en champ lointain :

Pour l'affichage en 3D des résultats en champ lointain, on clique sur l'icône

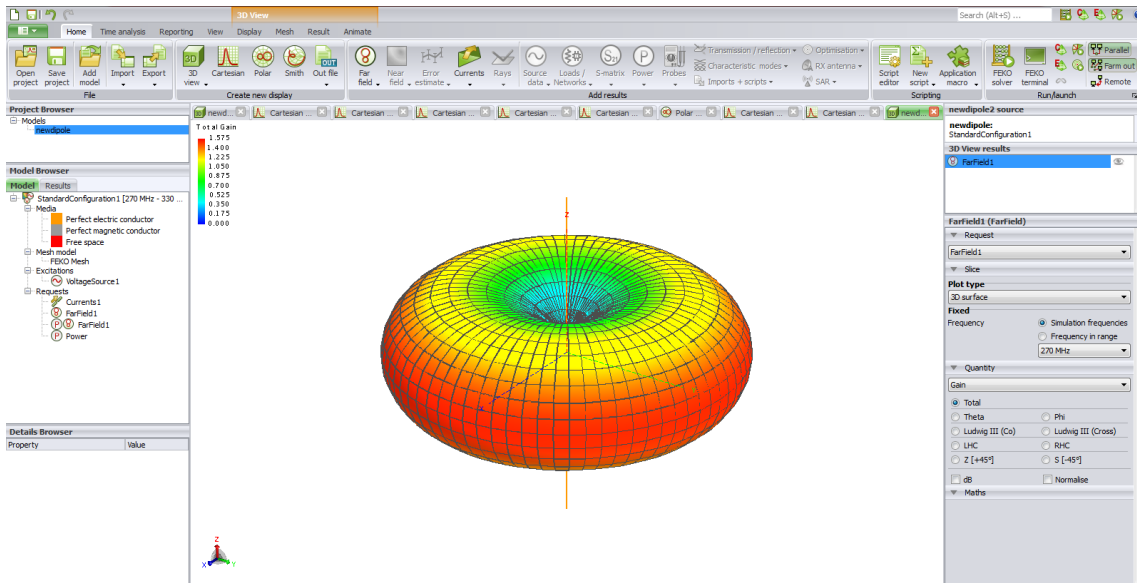
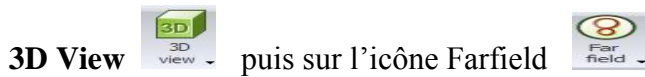

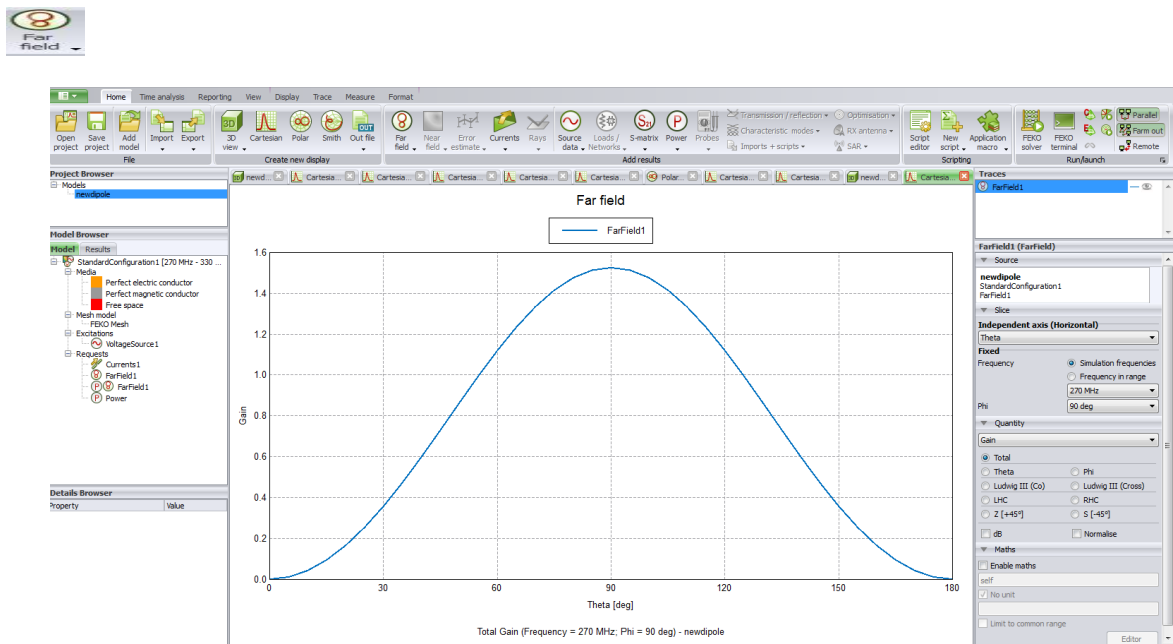


Figure 19 : Résultats en 3D de calculs en champ lointain

Et pour afficher les résultats sur le plan cartésien on clique sur **Cartésien**  puis sur **Farfield**



Résultats en 2D de calculs en champ lointain

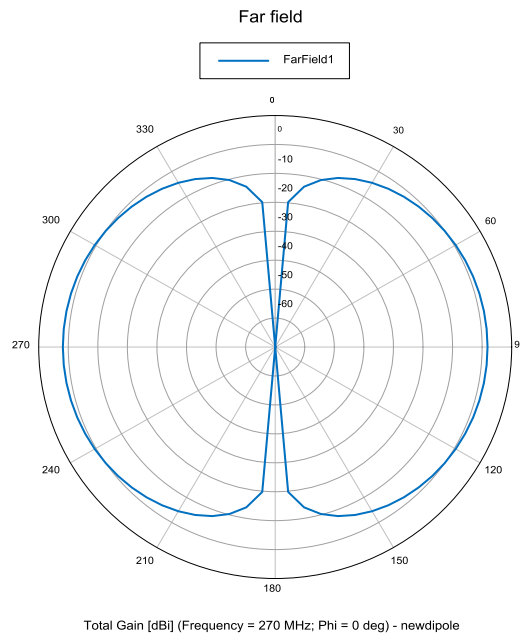


Figure 20 : le gain en coordonner polaire

VI. Conclusion :

Nous avons consacré le deuxième chapitre à présenter notre logiciel de simulation et de conception, FEKO. Pour se familiariser avec le FEKO on avait commencé par définir et cité les différents champs d'application, puis on avait mentionné les différents icones et pouvoir définir leurs utilisations et à quoi sert chaque icone pour pouvoir simuler et voir les résultats de cette simulation.

I. Introduction :

La phase de conception d'une antenne à l'aide d'un logiciel adapté, est une étape incontournable dans un souci de gain de temps et d'optimisation des structures aux paramètres désirés.

Dans ce chapitre on prend pour exemple les antennes filaires, l'antenne patch alimenté par câble coaxial .ces exemples permettent d'illustrer à la fois la simplicité et la puissance de FEKO par la simulation de structures type d'antennes.

II. Simulation d'antenne dipôle :

L'antenne dipolaire, élaborée par Heinrich Rudolph Hertz vers 1886, est une antenne constituée de deux brins métalliques, alimentée en son milieu et destinée à transmettre ou recevoir de l'énergie électromagnétique.

Ce type d'antenne est le plus simple à étudier d'un point de vue analytique. [11]

II.1. Création de modèle :

La création de l'antenne dipôle (modèle) sous Feko passe par les étapes suivantes :

- Définition des variables
- Création de la géométrie
- Définition de port
- Ajout des excitations
- Placer les fréquences de simulation

II.1.1.Définition des variables :

Le choix de ces variables dépend de type et des caractéristiques de l'antenne qu'on veut construire. Nous voulons créer une antenne dipôle demi-onde ($L=\lambda/2$) et pour le réaliser, on déclare les variable suivantes :

- ✓ $\text{Lambda} = c_0/\text{fréquence}$
- ✓ $\text{Fréquence} = 300 \times 10^6$ (300Mhz)
- ✓ $\text{Fréquence min} = 270 \times 10^6$
- ✓ $\text{Fréquence max} = 330 \times 10^6$
- ✓ La longueur de dipôle = $\text{Lambda}/2$ ($L=\lambda/2$)
- ✓ Rayon de dipôle = 1/1000 (dipôle radius =0.001)

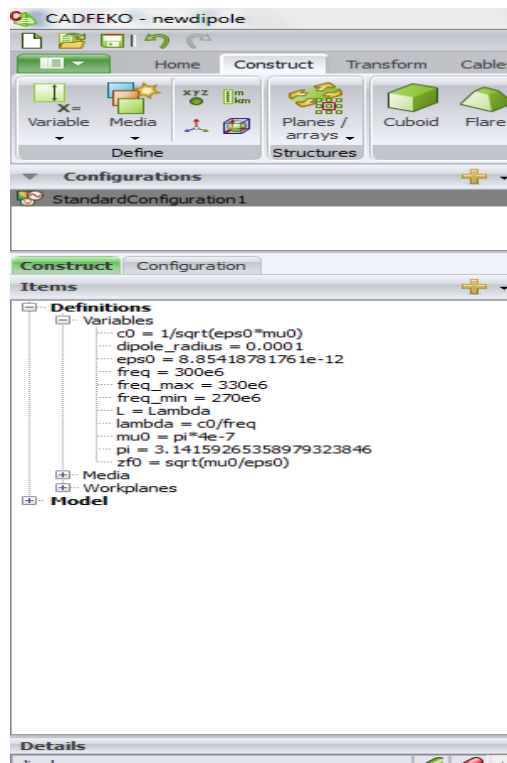
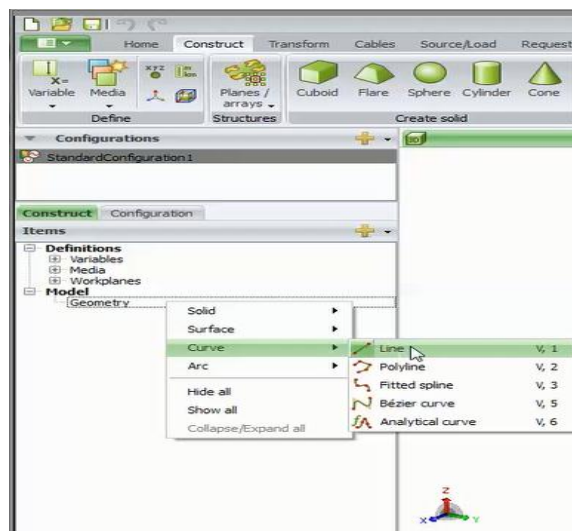


Figure 21 : Déclaration des variables de l'antenne Dipôle

II.1.2. Création de la géométrie :

L'antenne dipôle demi-onde est une antenne filaire c'est-à-dire il a une forme linéaire, donc la création de la géométrie d'un dipôle dépend de la création d'une ligne et définition de rayon de fil (wire radius).



Création de la ligne

On détermine cette ligne par deux coordonnées $(0, 0, -L/2)$ et $(0, 0, L/2)$ qui indique le début et la fin de cette ligne (limites de la ligne).

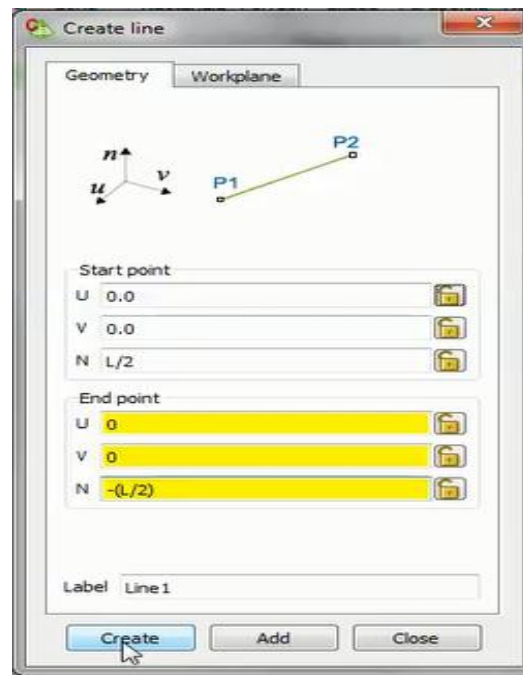


Figure 22 : Définition de la longueur de dipôle

II.1.3. Définition de port :

Un port permet de définir un accès ou un terminal à un objet, afin de placer une excitation ou une charge. [1]

Dans l'arbre des détails, l'ensemble des géométries élémentaires composant l'objet géométrique apparaît.

Dans notre cas, et après la création de la ligne, on ne trouve un fil appelé **Wire**. (Le rectangle jaune devant Wire indique le matériau de Wire, un conducteur électrique parfait).

Avec un clic droit sur **Wire** puis sur **Create Port** => **Wire port**, cliquons sur **Wire Port**, une fenêtre va apparaître qui permettront de choisir la façon de placer le Port et sa localisation dans le fil.

Dans notre dipôle, la façon de placer le Port est en **Segment** et sa localisation dans le fil se trouve au milieu (**Middle**).

Dans **Label** on choisit un nom pour notre port (Port1), puis on clique sur **Create** pour créer ce port.

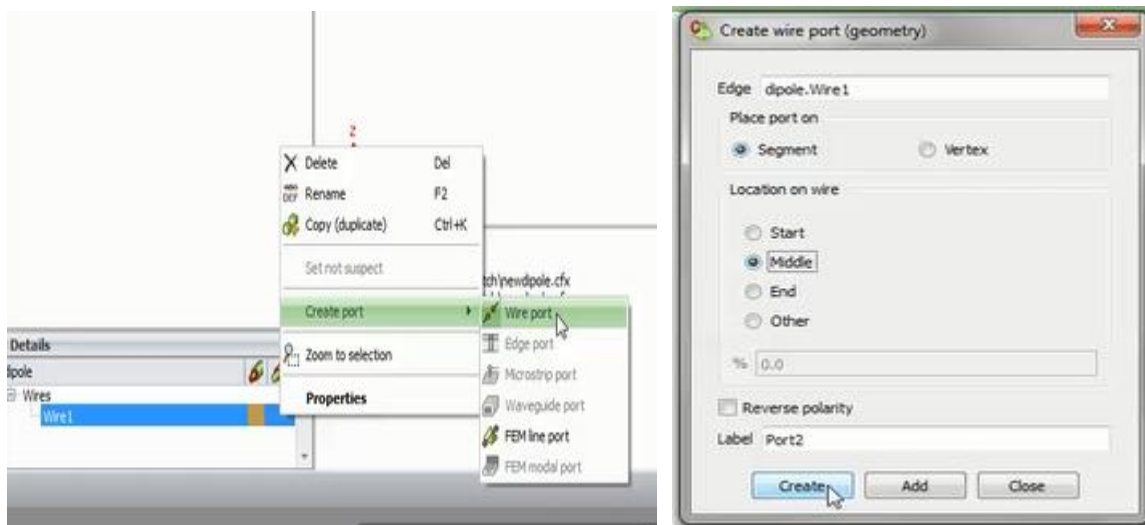


Figure 23 : La création du port

II.2. Configuration de la simulation :

II.2.1. Placer les fréquences de simulation :

La fréquence de simulation est une fréquence de travail qu'on avait défini dans les variables (Fréquence, Fréquence-min, Fréquence-max), elle est relative à l'antenne qu'on a créer, cette fréquence représente une des caractéristiques des antennes.

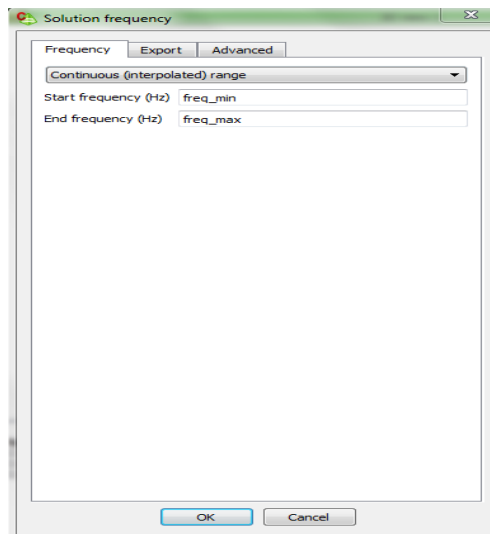
$$\text{Fréquence} = C_0 / \lambda$$

C_0 : Vitesse de la lumière dans le vide.

λ : Longueur d'onde.

FEKO utilise des méthodes fréquentielles de résolution des équations de Maxwell, il est donc nécessaire de lui indiquer à quelles fréquences on veut effectuer le calcul.

On clique sur l'icône **Frequency** dans l'onglet **Source/Load**, puis la fenêtre ci-dessous s'ouvre, là on choisit **continuous (interpolated) range** ensuite en fait (freq_min et freq_max) dans Start et End frequency.



Placer les fréquences

II.2.2. Ajout des excitations :

Pour afficher le diagramme de rayonnement, nous devons créer une excitation appliquons une source de tension. L'excitation doit être placée sur des ports.

Pour ajouter une source, on clique sur l'icône **Voltage Source** dans l'onglet **Source/Load**. La fenêtre ci-dessous s'ouvre. On indique le nom du port sur lequel on connecte la source, et par défaut l'amplitude=1, la phase=0 et l'impédance=50 sont afficher

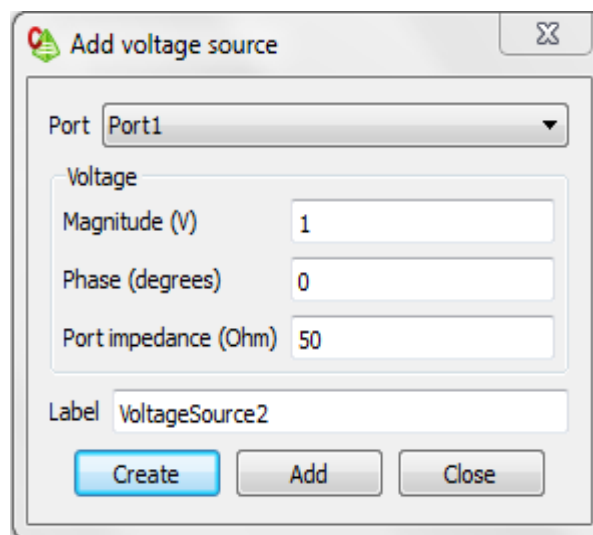


Figure 24 : Création de la source

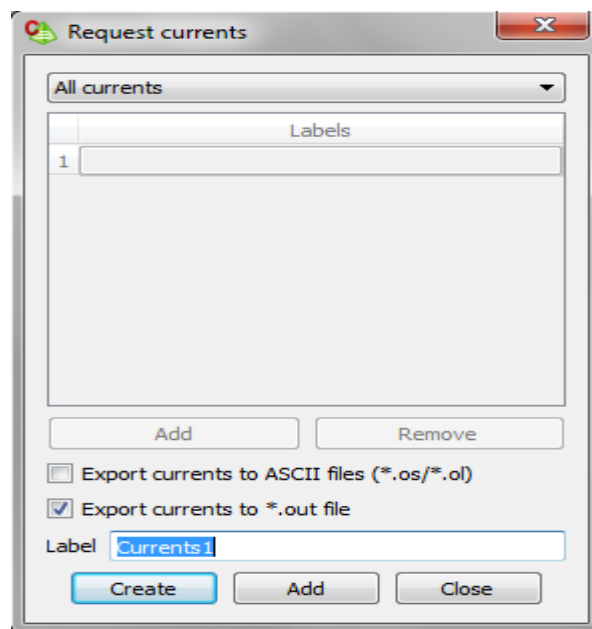
II.2.3. Configuration du calcul :

On définit ensuite les résultats que l'on souhaite obtenir. D'abord, on souhaite calculer les courants circulant sur toutes les structures métalliques de l'antenne. Dans l'onglet **Request**, cliquez sur l'icône **Currents**. On sélectionne dans la fenêtre qui s'ouvre **All Currents**. Les résultats demandés apparaissent dans l'arborescence projet dans la partie **Solution/Currents**.

Ensuite, on veut calculer le rayonnement en champ lointain.

On considère qu'on est en champ lointain lorsque les dimensions de l'antenne sont négligeables par rapport à la distance séparant le point d'observation de l'antenne. En champ lointain, l'onde électromagnétique est considérée comme plane (Transverse Electromagnetic field). Les calculs en champ lointain permettent de déterminer des grandeurs telles que le champ électrique, la directivité, le gain, les angles d'ouverture ...

On clique sur l'icône **Far Fields** dans l'onglet **Request**. La fenêtre ci-dessous s'ouvre. On sélectionne 3D Pattern pour calculer les champs électromagnétiques dans toutes les directions de l'espace. On prend un incrément angulaire de 5°.



Configuration du calcul de courant

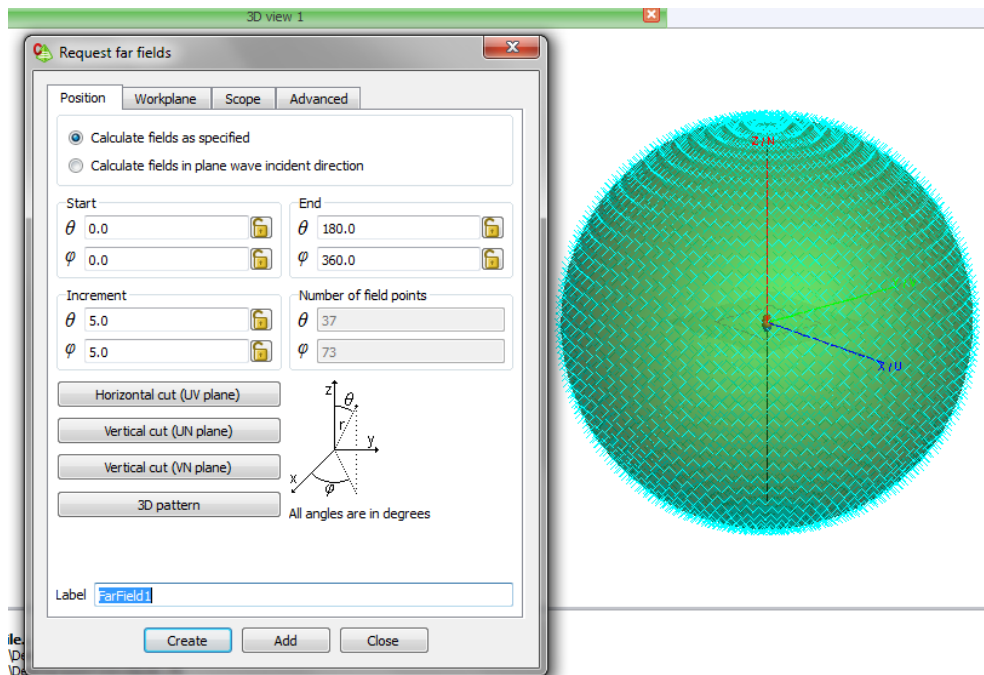


Figure 25 : Configuration du calcul de champ lointain

II.3. Maillage de model :

Un maillage est la discrétisation spatiale d'un milieu continu, ou aussi, une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments proportionnés finis et bien définis. L'objet d'un maillage est de procéder à une simplification d'un système par un modèle représentant ce système et, éventuellement, son environnement (le milieu), dans l'optique de simulations de calculs ou de représentations graphiques.

Le maillage de dipôle se fait comme suite : dans la barre des menus on clique sur **Mesh=>Creat Mesh**, puis la fenêtre ci-dessous s'ouvre :

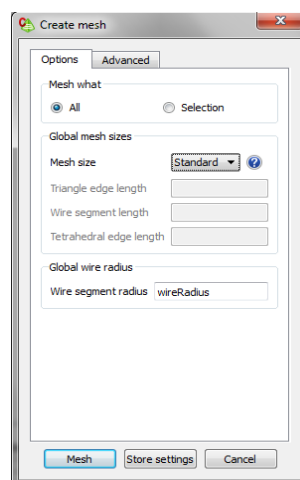


Figure 26 : Maillage de Dipôle

II.4. Validation des données :

Après la construction, la configuration et le maillage de dipôle, on fait la validation de modèle.

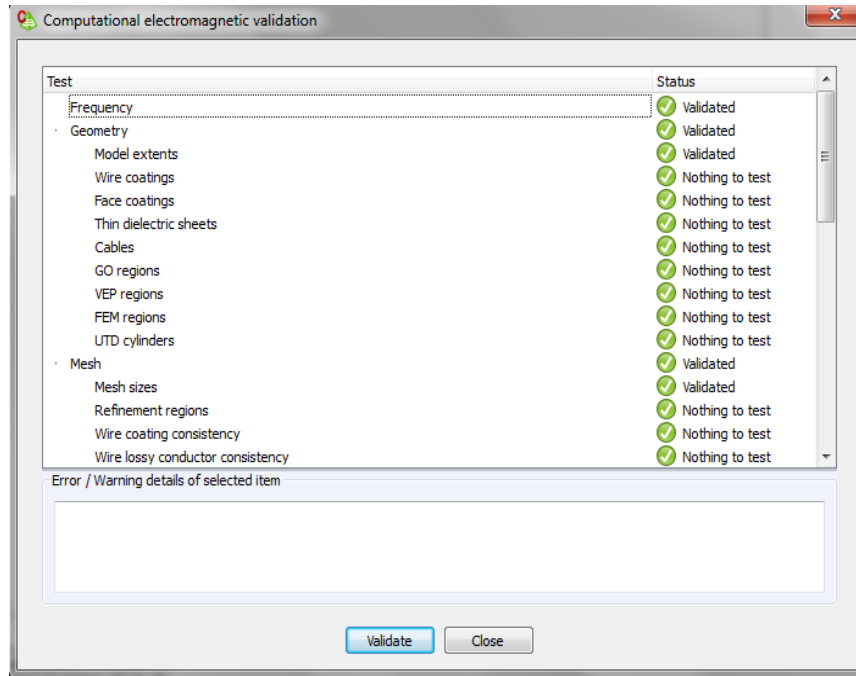


Figure 27 : Validation des résultats

II.5. Lancement de la simulation FEKO :

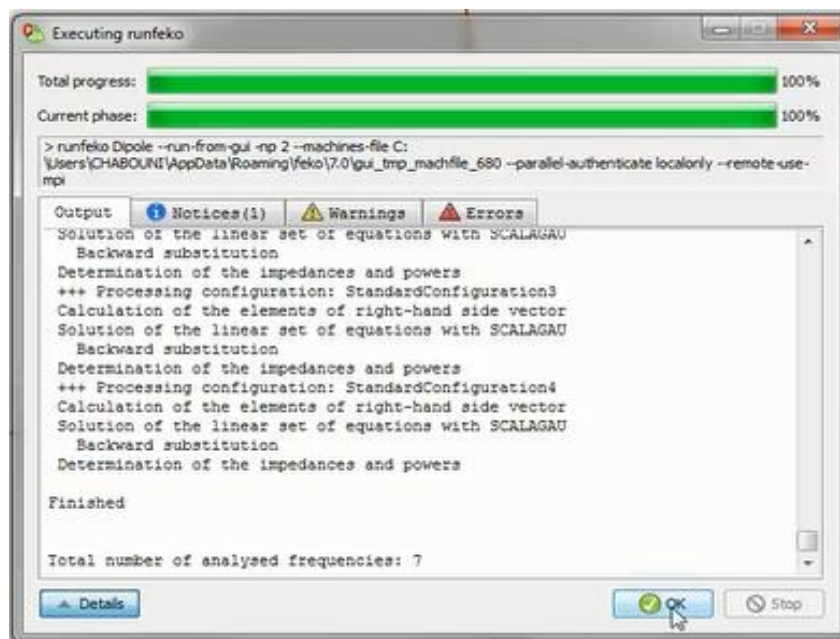


Figure 28 : La fenêtre de la simulation

II.6. Visualisation des résultats :

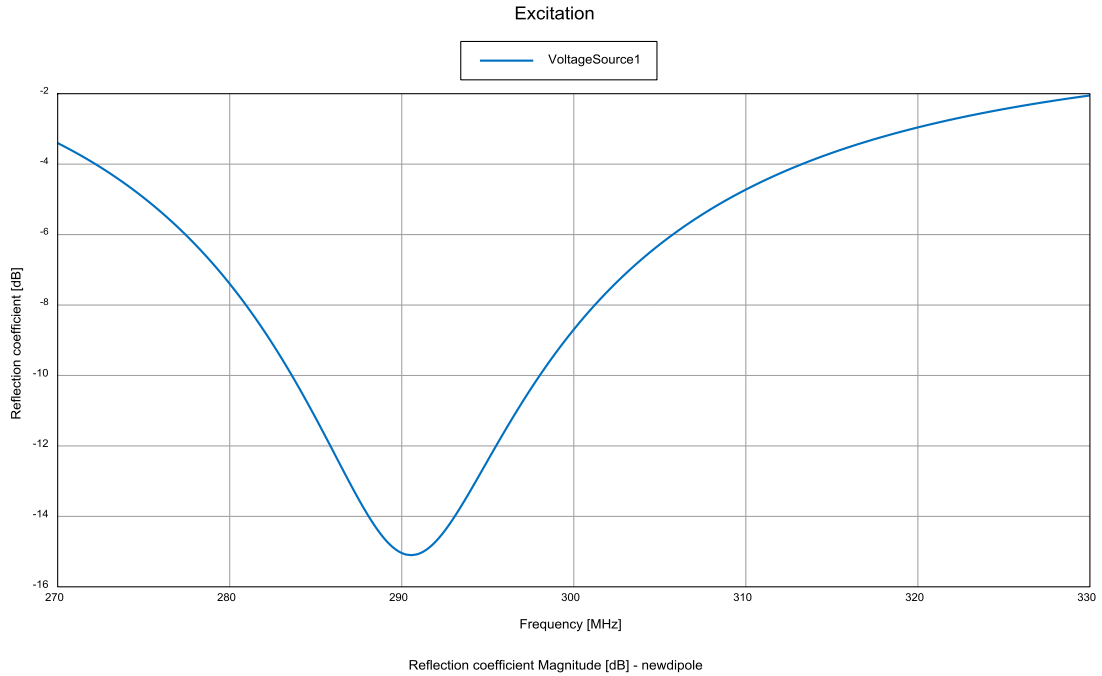


Figure 29 : Coefficient de réflexion

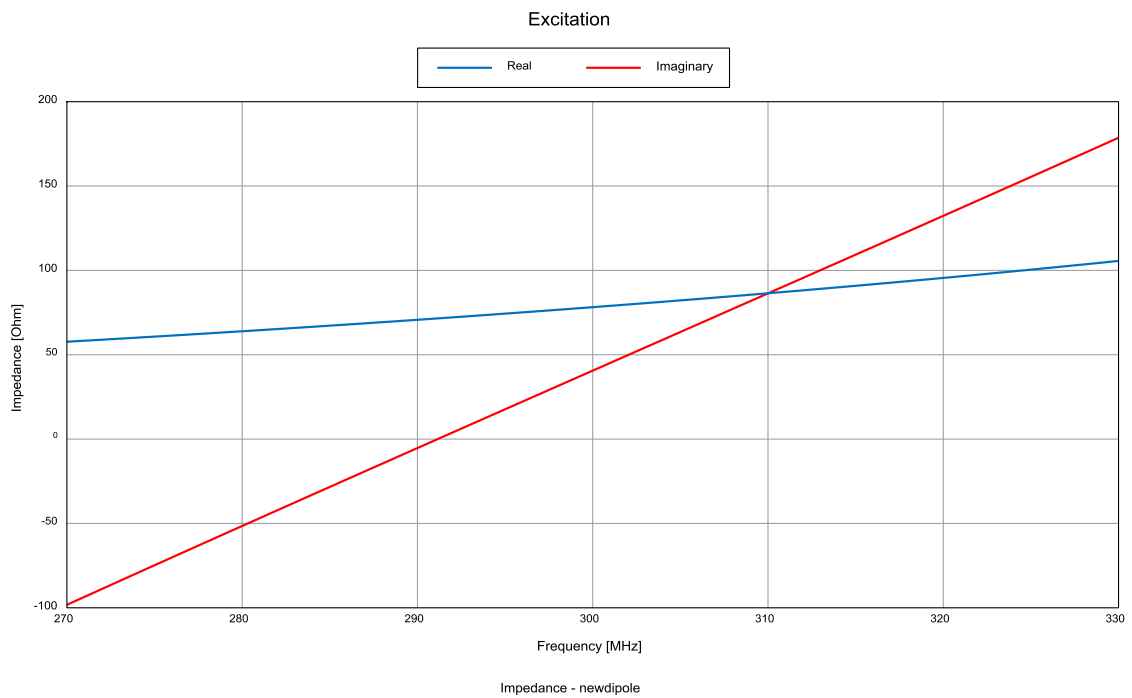


Figure 30 : Diagramme des impédances

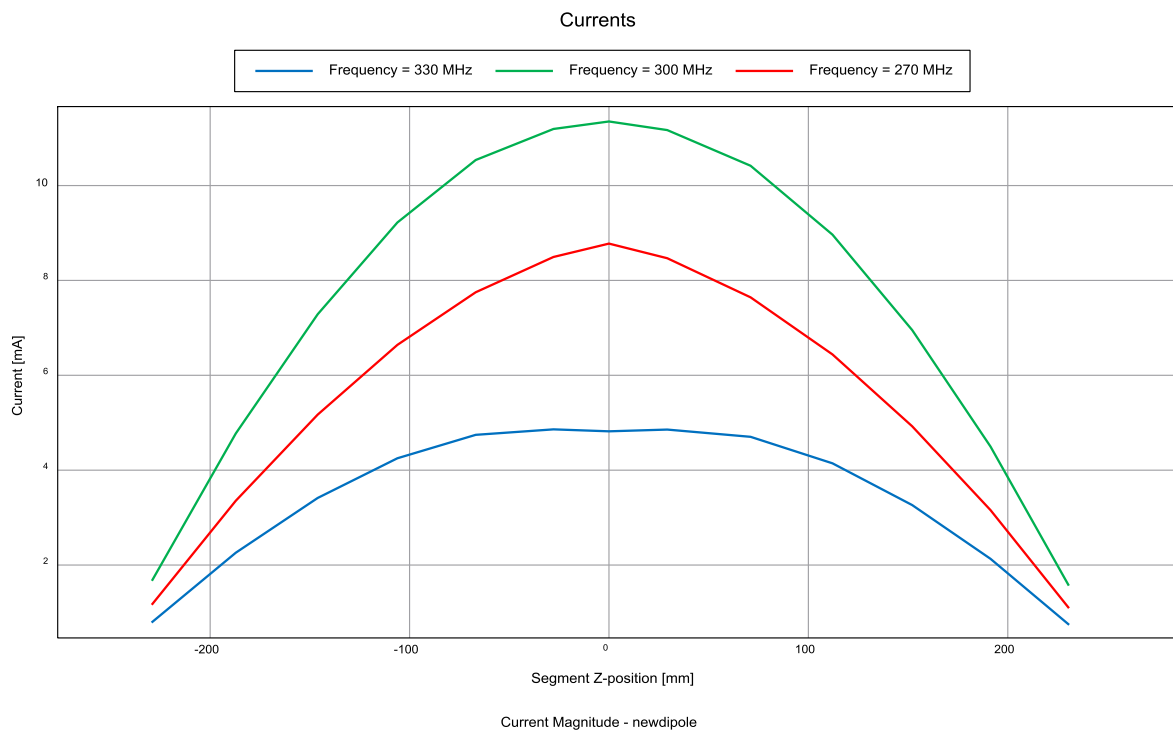


Figure 31 : Distribution de courant

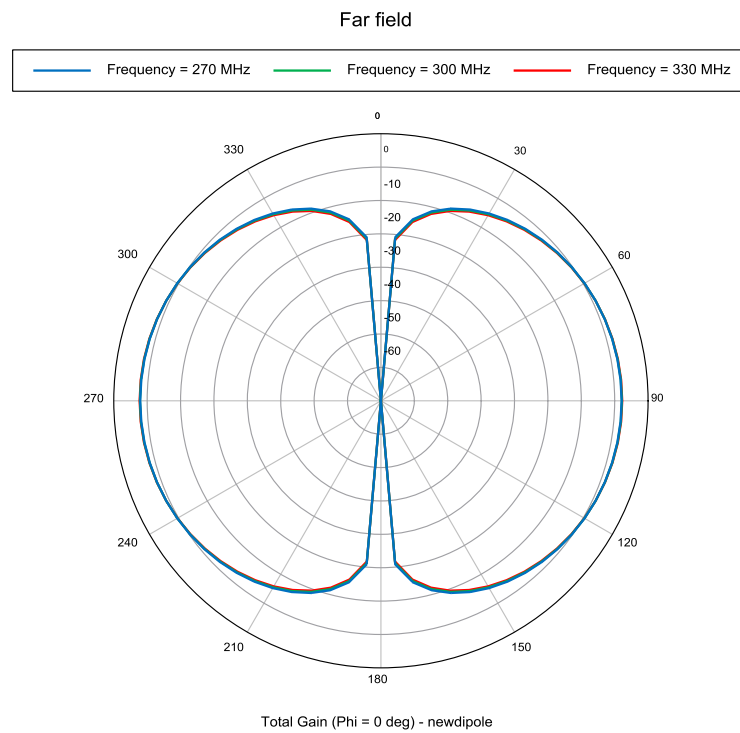


Figure 32 : Diagramme de rayonnement

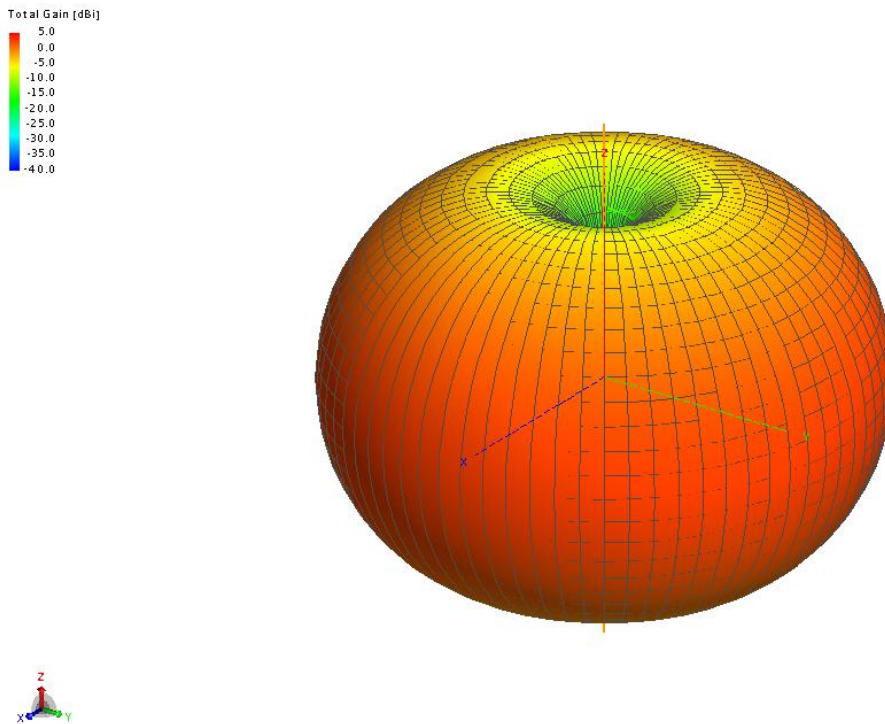


Figure 33 : Visualisation du diagramme de rayonnement en 3D

➤ **Résultats de la simulation d’une antenne élémentaire travaillant avec une longueur d’onde $\lambda/10$ et $\lambda/20$:**

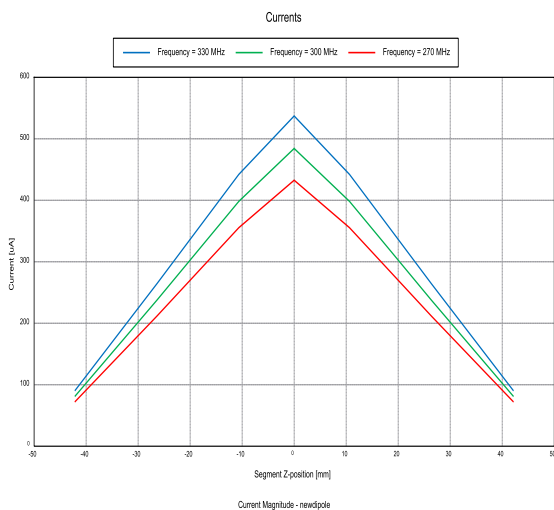


Figure 34.a : Distribution du courant avec $L=\lambda/10$

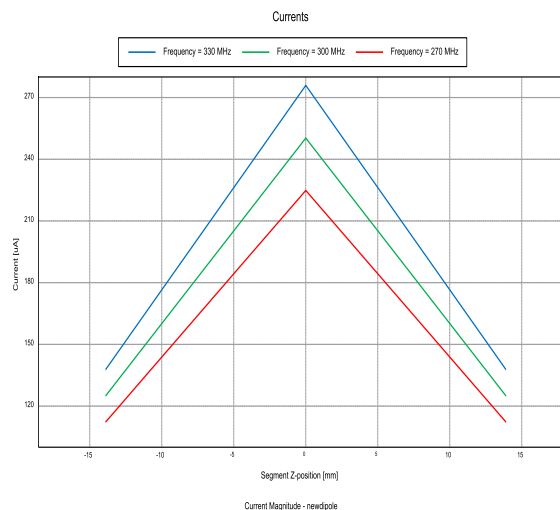


Figure 34.b : Distribution du courant avec $L=\lambda/20$

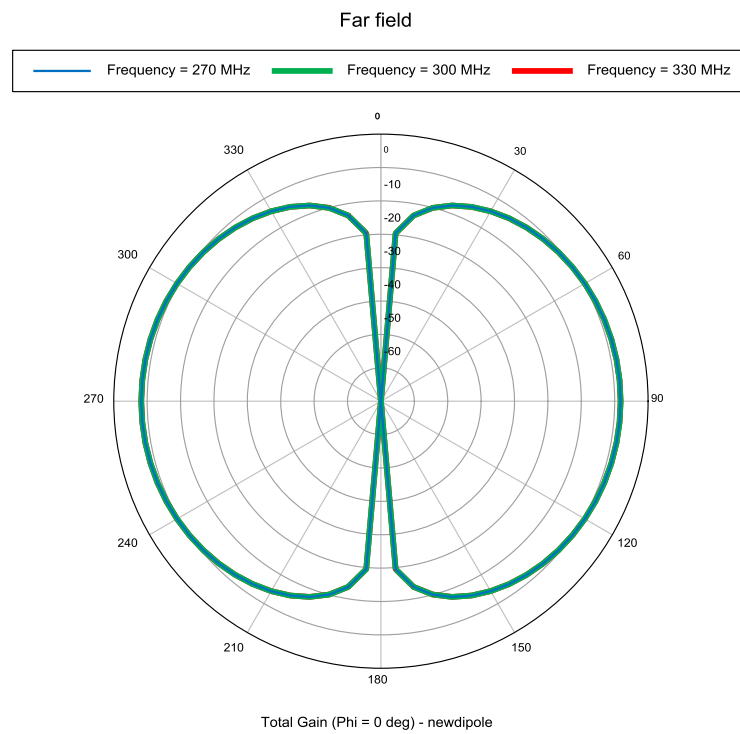


Figure 35 : Diagramme de Gain totale avec $L=\lambda/10$

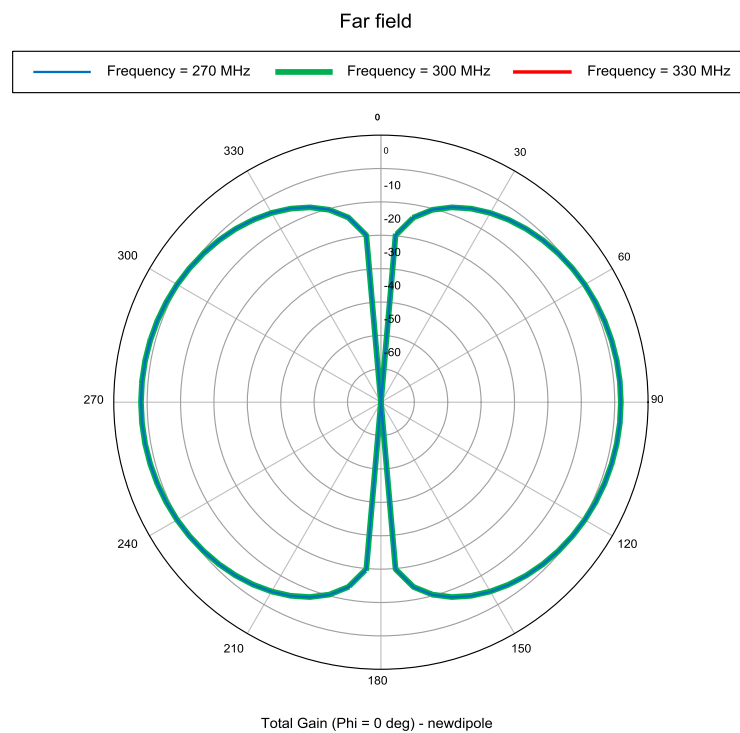
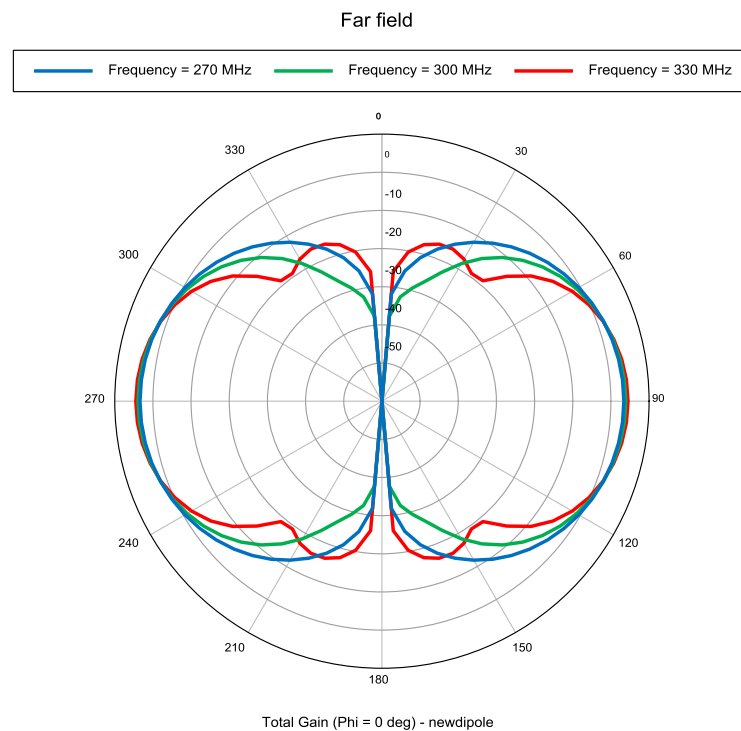


Figure 36 : Diagramme de Gain totale avec $L=\lambda/4$

Figure 37 : Diagramme de Gain totale avec $L=\lambda$

III. Simulation d'antenne Monopole :

Comme on a vu avec le dipôle que la création et la simulation de l'antenne passe par plusieurs étapes, même chose pour l'antenne Monopole il suit les étapes suivantes :

III.1.Création de modèle :

Les étapes pour créer le modèle sont comme suit :

- Définition des variables
- Création de la géométrie
- Définition de port
- Ajout des excitations
- Placer les fréquences de simulation


III.1.1.Définition des variables :

Nous voulons créer une antenne Monopôle ($L=\lambda/4$) et pour le réaliser on déclare les variables suivantes :

- ✓ $\text{freq} = 75\text{e}6$ (Hz)
- ✓ $\text{freq_min} = 60\text{e}6$ (Hz)
- ✓ $\text{freq_max} = 90\text{e}6$ (Hz)
- ✓ $\lambda = c_0/\text{freq}$ (Longueur d'onde)
- ✓ $R = 3*\lambda / (2*\pi)$ (Rayon de plan de masse)
- ✓ $\text{wireRadius} = 1\text{e-}3$ (Rayon de Monopole)

III.1.2. Création de la géométrie :

La création de la géométrie dans le Monopole dépend de la création d'un plan de masse et une ligne.

Pour créer le plan de masse on clique sur **Construct=>Ellipse** , la fenêtre ci-dessous va apparaître

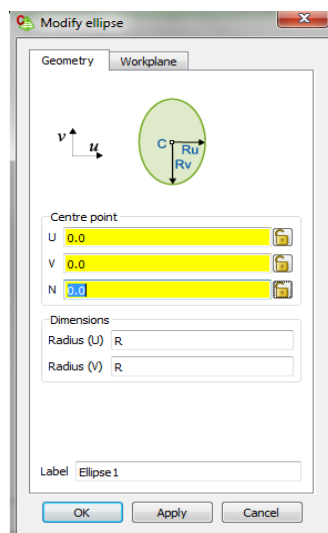


Figure 38 : La création du plan de masse

Dans cette fenêtre on choisit les dimensions du plan de masse, on fait entrer le rayon R de l'ellipse (Radius (U), Radius (V)) puis cliquer sur OK pour la validation.

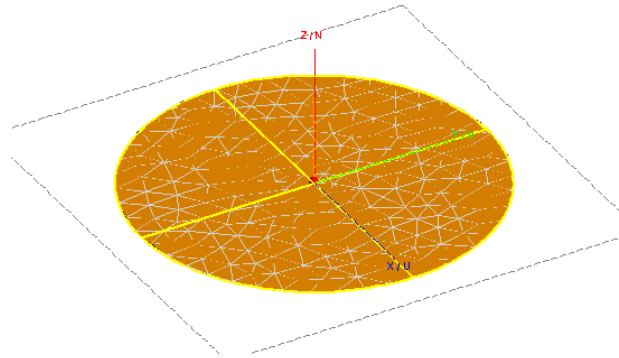



Figure 39 : le plan de masse sous forme Ellipse

Après la création de plan de masse, on doit créer la ligne pour ce monopole avec les coordonnées suivant $(0, 0, 0)$ et $(0, 0, \lambda/4)$. on donne le nom Monopole pour cette ligne puis on clique sur Ok pour la validation.

Une fois on a créé le plan de masse et la ligne, il reste à réunir ces deux géométrie pour avoir le model Monopole. Pour se faire, on sélectionne le Ellipse et le Monopole qui se trouve sur l'arborescence, puis sur la barre des menus on clique sur **Construct=>Union** .

III.1.3.Définition de port :

L'accès de l'excitation de Monopole se fait par un port. Ce port est situé à la jonction entre le fil et le plan de masse.

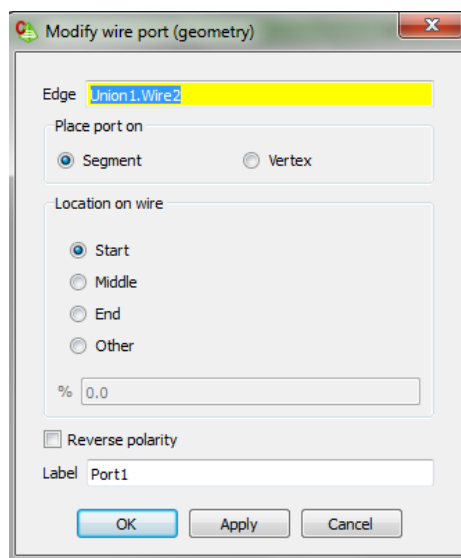


Figure 40 : Création du port

III.2. Configuration de la simulation :

III.2.1. Placer les fréquences de simulation :

On clique sur l'icône **Frequency** dans l'onglet **Source/Load**, puis la fenêtre ci-dessous s'ouvre, là on choisit **continuous (interpolated) range** ensuite en fait (freq_min et freq_max) dans Start et End frequency.

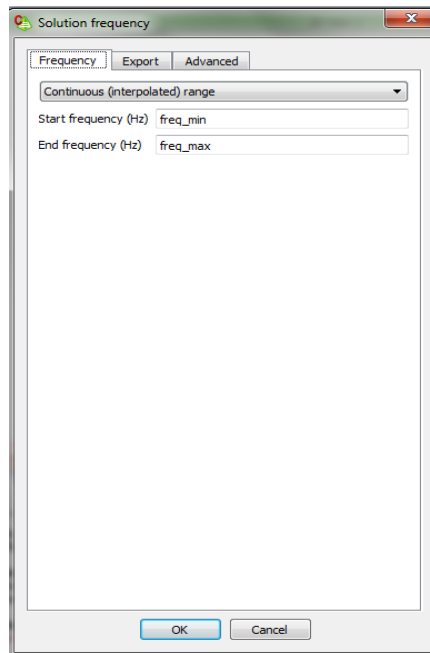


Figure 41 : Définition des fréquences de simulation

III.2.2. Ajout des excitations :

Pour afficher les résultats de la simulation il est obligatoire d'ajouter une source d'excitation.

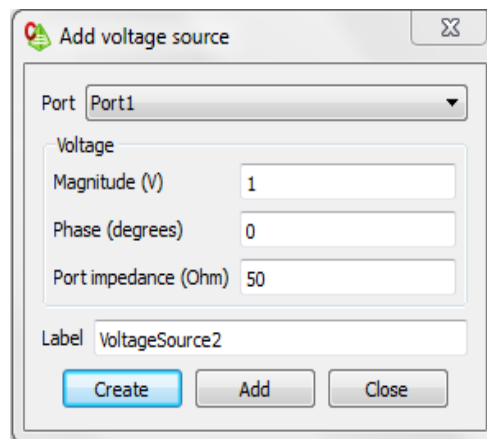


Figure 42 : Création de la source

III.2.3. Configuration du calcul :

Dans la configuration de calcul, on intéresse à désigner le courant qui circule dans toutes les surfaces métallique de l'antenne.

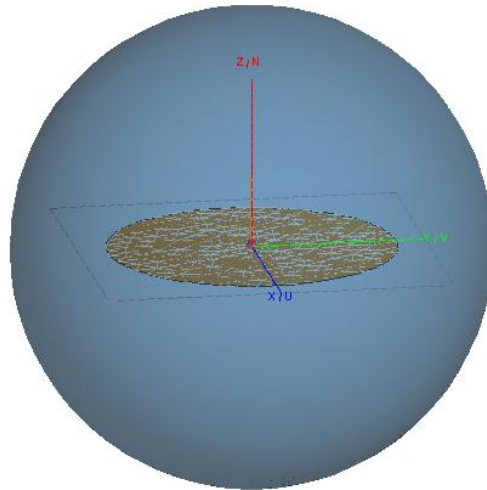


Figure 43 : Configuration du calcul de courant

Ensuite, on veut calculer le rayonnement en champ lointain pour déterminer des grandeurs telles que le champ électrique, la directivité, le gain...

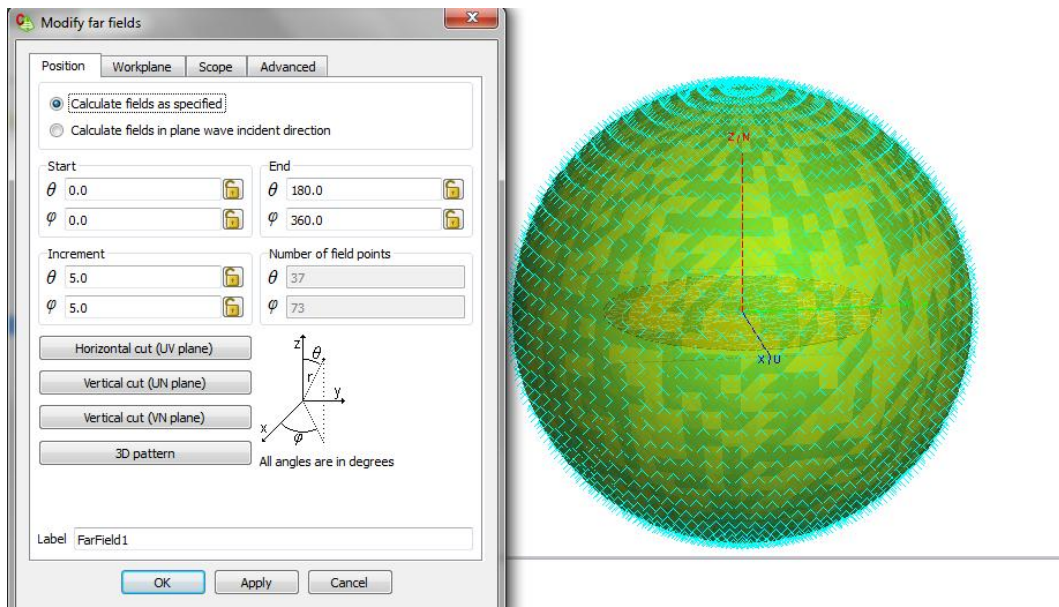


Figure 44 : Configuration du calcul de champ lointain

III.3. Maillage de modèle :

Dans la barre des menus on clique sur **Mesh**=>**Creat Mesh**, dans la fenêtre qui s'ouvre on choisit la taille de maillage **Standart**, et **wireRadius** pour le rayon de fil (Wire sigment radius).

III.4. Validation des données :

Après avoir le monopole construit, configuré et maillé, on fait la validation des données qu'on avait utilisées pour la création de l'antenne. (Figure 26)

III.5. Lancement de la simulation FEKO :

Le lancement de la simulation par **FEKO Solver** vient après que toutes les données sont validées par le FEKO, donc il est prêt à calculer pour pouvoir afficher les résultats. (Figure 28)

III.6. Visualisation des résultats :

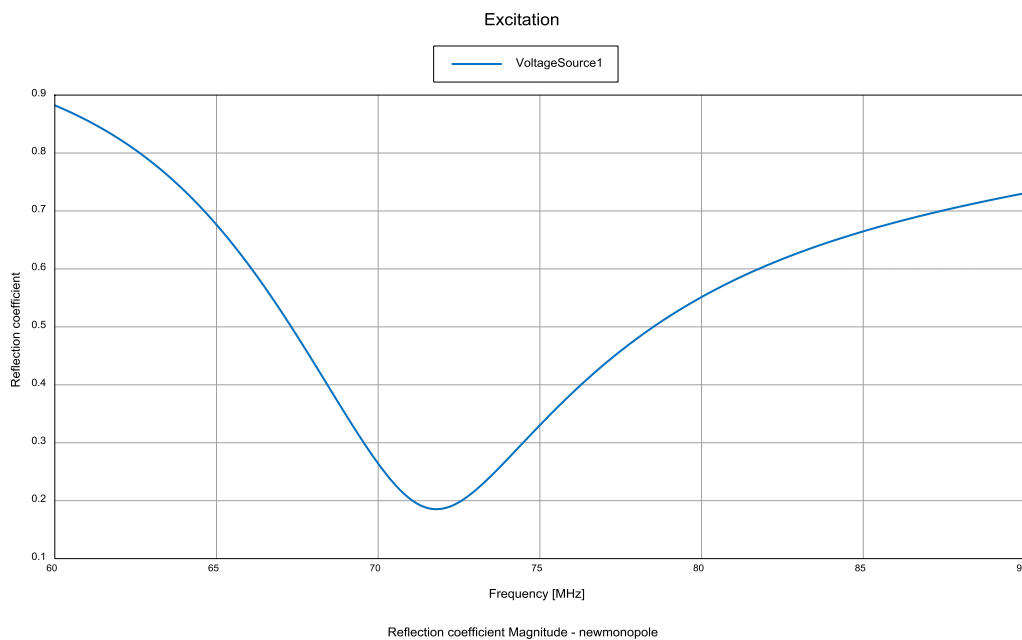


Figure 45 : coefficient de réflexion S_{11}

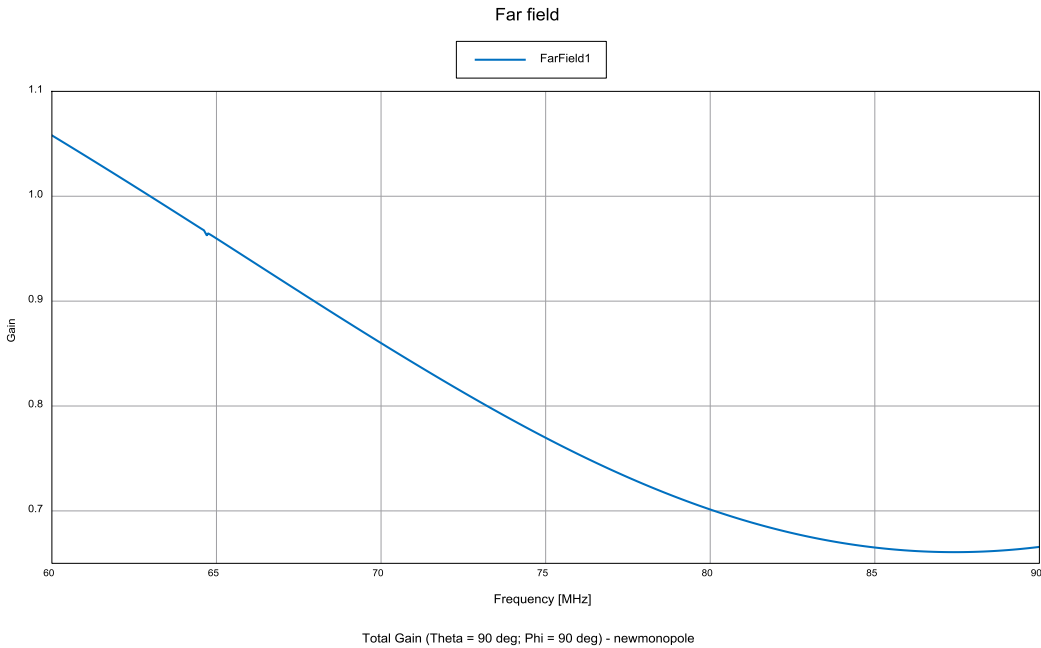


Figure 46 : le Gain total du monopole

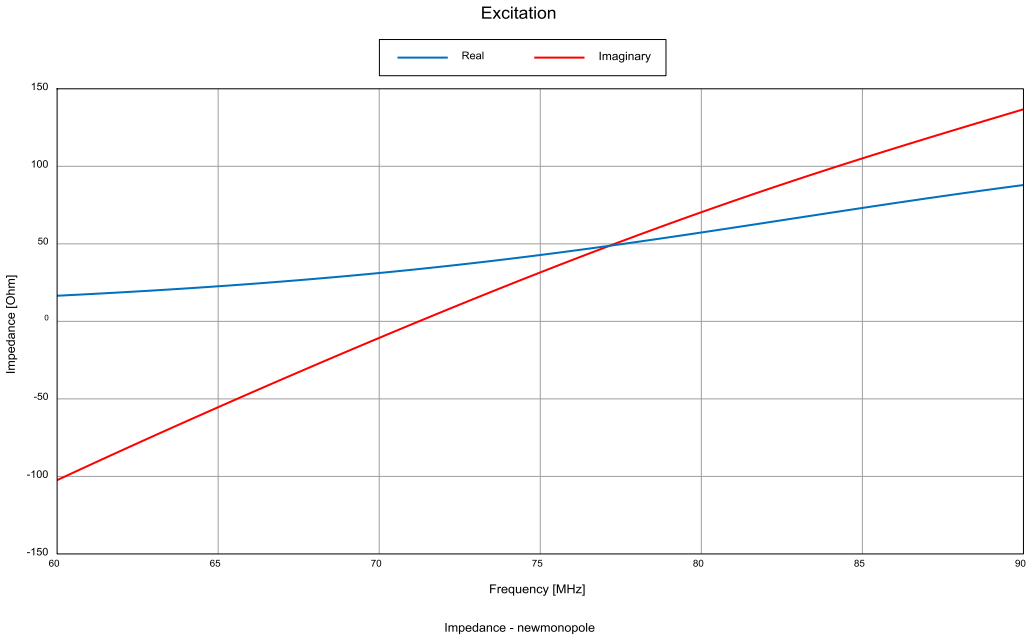


Figure 47 : partie réelle et imaginaire de l'Impédances d'entrée en fonction de fréquence

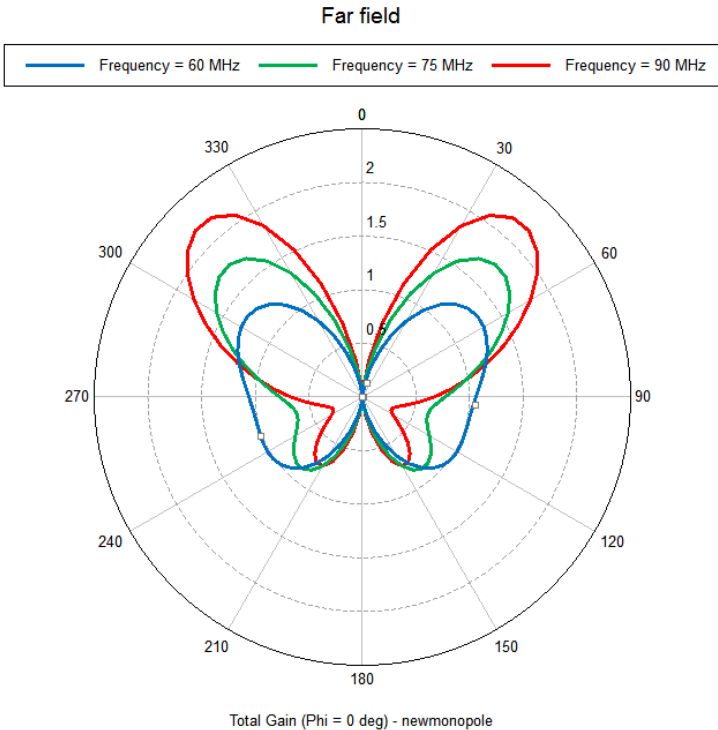


Figure 48 : Diagramme de rayonnement

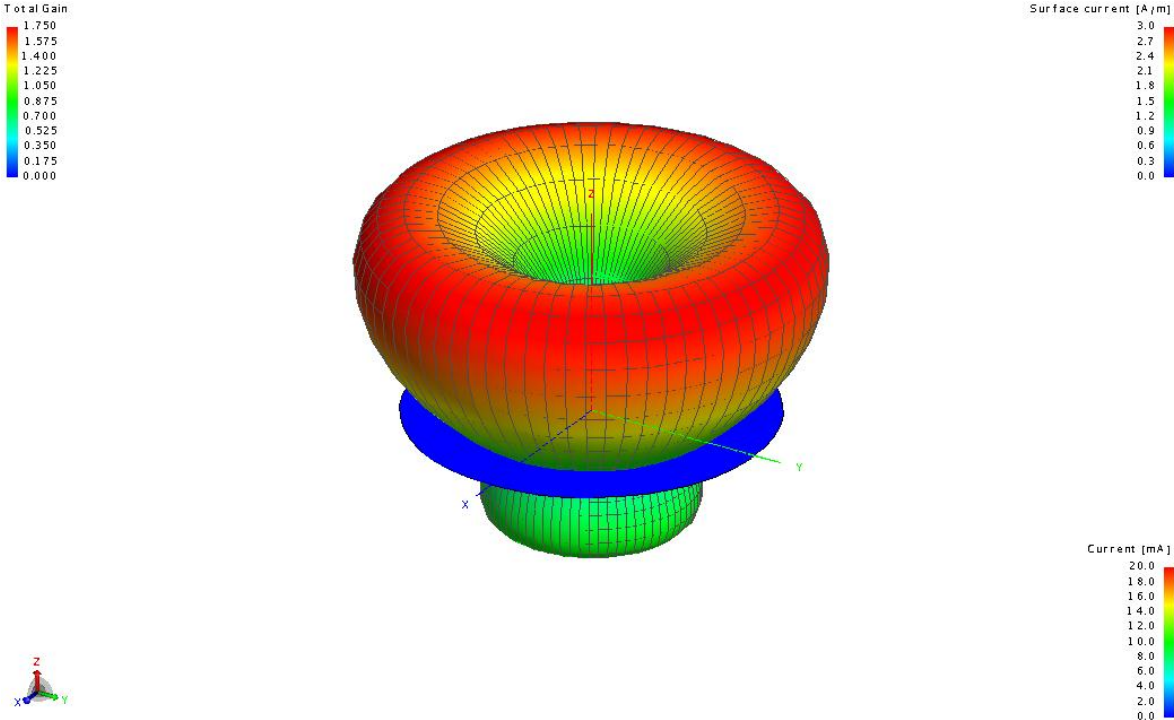


Figure 49 : Diagramme de rayonnement en 3D

IV. Simulation d'antenne patch :

Dans cette partie, nous allons détailler les différentes étapes du flot de conception, d'une antenne Patch rectangulaire alimenté par câble coaxial, réalisé à la surface d'un circuit imprimé.

IV.1. Création de modèle :

La création de l'antenne Patch sous Feko passe par les étapes suivantes :

- Choix des unités
- Définition des variables.
- Définition des milieux de propagation.
- Création des éléments géométriques.
- Définition du port.
- Ajout des excitations
- Placer les fréquences de simulation.
- Configuration du calcul

IV.1.1. Choix des unités :

Choisir l'unité en cliquant dans l'onglet **Construct** le bouton **Model Unit**

IV.1.2. Définition des variables :

On a besoin des variables suivantes :

Variables	Expressions
freq_min	2.6e9 Hz
freq_max	3.0e9 Hz
lambda_min	$c0/freq_max*1000$
patch_d	33.2

patch_w	46.8
substrate_er	2.2
substrate_h	2.87
feed_dist	8.9
feed_rad	1.3/2


IV.1.3. Définition des milieux de propagation :

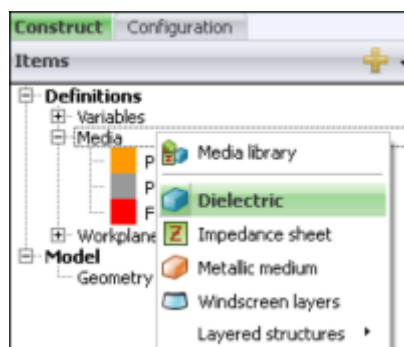
On crée ensuite les différents milieux ou media de propagation. Ceux-ci sont présents dans L'arborescence projet sous la catégorie **Media**. Par défaut, on trouve 3 milieux par défaut : l'espace libre (free space), les conducteurs électriques parfaits et les conducteurs magnétiques parfaits. Il est ensuite possible créer 2 principaux types de matériaux :

- ✓ Milieu diélectrique
- ✓ Conducteur métallique non parfait

Dans notre exemple, on aura besoin des 2 premiers, ainsi que du milieu diélectrique du substrat. On doit donc le définir.

Pour cela, on fait un clic droit sur **Media** et on clique sur **Dielectric**, ou dans l'onglet **Construct**

en cliquant sur le bouton **Media** . On a créé un milieu diélectrique appelé Substrat de constante diélectrique epsr et sans pertes ($\tan \delta = 0$). On clique sur **Create** puis **Close** pour générer le milieu et fermer la fenêtre.



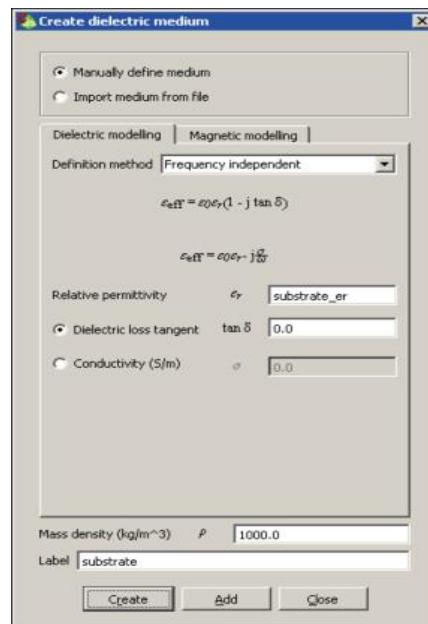


Figure 50 : Création d'un nouveau médium de propagation

IV.1.4. Création des éléments géométriques :

Avant de construire un modèle géométrique numérique d'une structure, il convient de se fixer un repère (cartésien) et une origine. On va utiliser comme repère le repère cartésien absolu (x,y,z) par défaut sous FEKO et placer l'origine (0 ;0 ;0) du repère au milieu du patch.

On crée maintenant l'élément rayonnant de l'antenne. Celle-ci peut être modélisée par un rectangle. Pour cela, dans l'onglet **Construct**, on clique sur le bouton **Rectangle**.

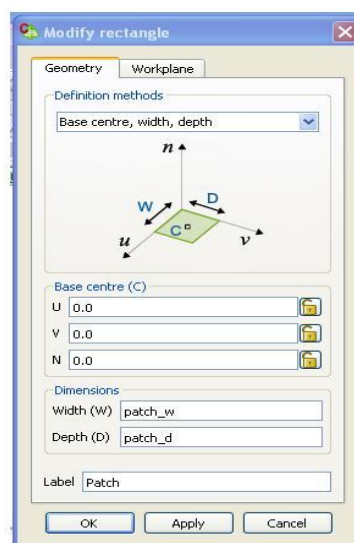
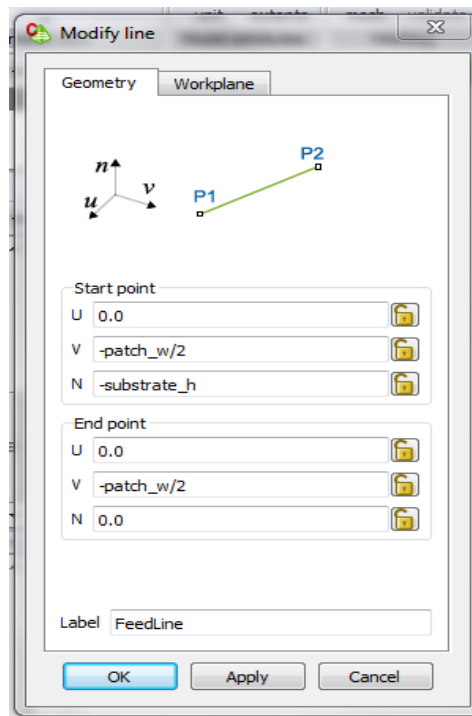


Figure 51 : Création de l'élément rayonnant

Le deuxième élément géométrique à construire est la broche d'alimentation représentant l'alimentation coaxiale. Celle-ci sera représentée par un fil connectant le patch au plan de masse. Un port d'alimentation sera placé à l'intérieur du fil par la suite, représentant ainsi une excitation connectée entre le patch et le plan de masse.

Pour créer un fil, cliquez dans l'onglet **Construct** sur le bouton **Line**. Entrez les coordonnées dans le repère (u,v,n) des points de départ et d'arrivée du fil : respectivement (0 ; -patch_w/2 ; -substrate_h) et (0 ; -patch_w/2;0). On lui donne comme nom FeedLine. Pour l'instant, ce fil n'a pas de rayon. On le définira au moment du maillage.



Paramètres de la line

IV.1.5. Création d'un substrat infini :

On crée ensuite le substrat et le plan de masse. Ceux-ci sont considérés comme infiniment larges. Pour les définir, on clique sur l'icône **Infinite Structure/Infinite Plane** dans l'onglet **Construct**. La fenêtre présentée à la figure 52 s'ouvre. On sélectionne **Planar Multilayer Substrate** pour choisir un substrat planaire multicouche (typique d'un circuit imprimé). Les

layers 0 et 2 correspondent aux couches d'air au-dessus et en dessous de l'antenne, le layer 1 correspond à la couche substrat. On définit l'épaisseur et le medium du layer 1. On indique la position du plan de masse (Bottom du layer1). Le substrat est forcément dans le plan XY, on définit aussi la coordonnée Z du haut du substrat. On la fixe à $z=0$.

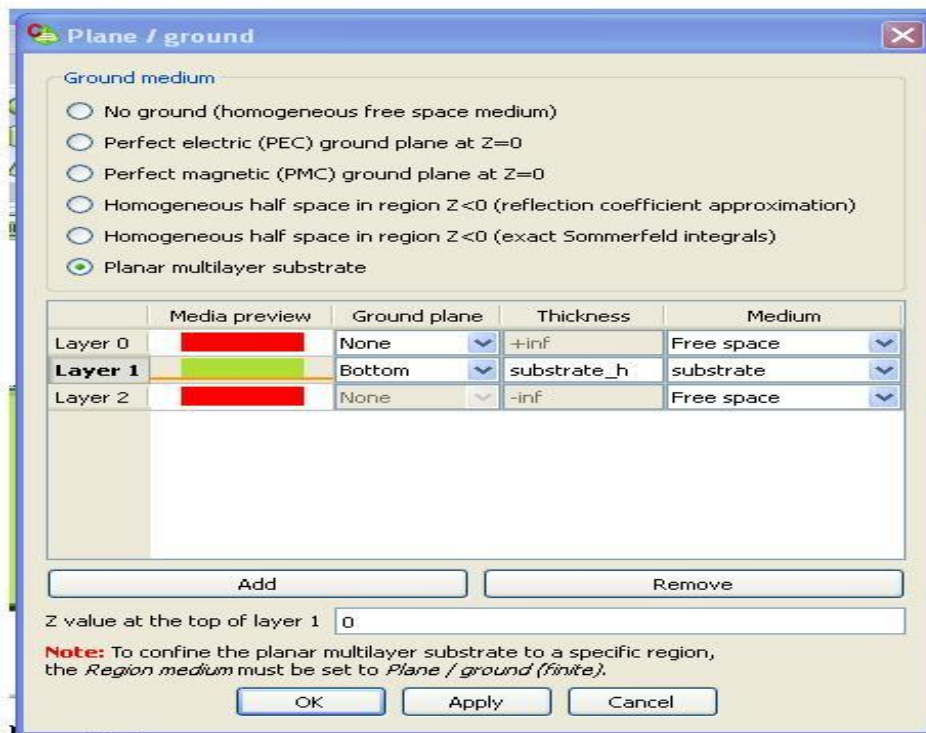


Figure 52 : Création d'un substrat planaire multicouche infini

IV.1.6. Ajout d'un port :



On clique sur le bouton **Wire Port** dans l'onglet **Source/Load**. La fenêtre ci-dessous s'ouvre. On place le port au milieu du fil, on le nomme Port 1.

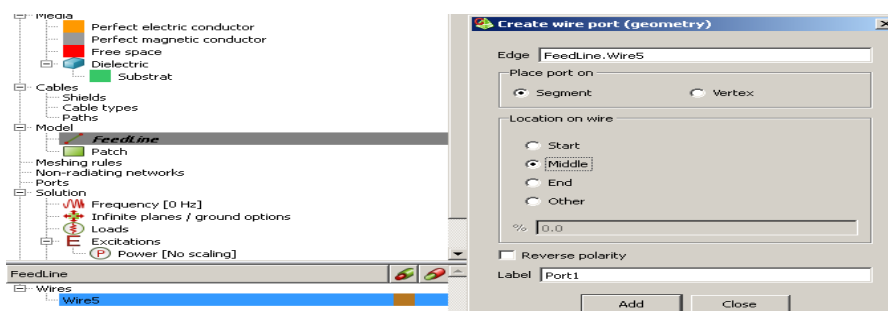



Figure 53 : Création d'un port

IV.1.7. Mise à plat du modèle géométrique :

Au moment où le modèle sera maillé, il est nécessaire que les mailles des différents objets géométriques ne se superposent pas, sous peine de générer des erreurs. Pour s'en assurer, il est nécessaire de mettre à plat le modèle en unissant les différentes parties.

Pour cela, on sélectionne les 2 objets Patch et FeedLine en cliquant dessus en appuyant sur la touche Ctrl, puis on clique sur l'icône **Union**  dans l'onglet **Construct**. Dans l'arborescence projet, les 2 objets géométriques se retrouvent sous un nouvel objet appelé Union1, que l'on peut renommer.

Le modèle géométrique est terminé. Le résultat doit ressembler à quelque chose proche de la figure 53.

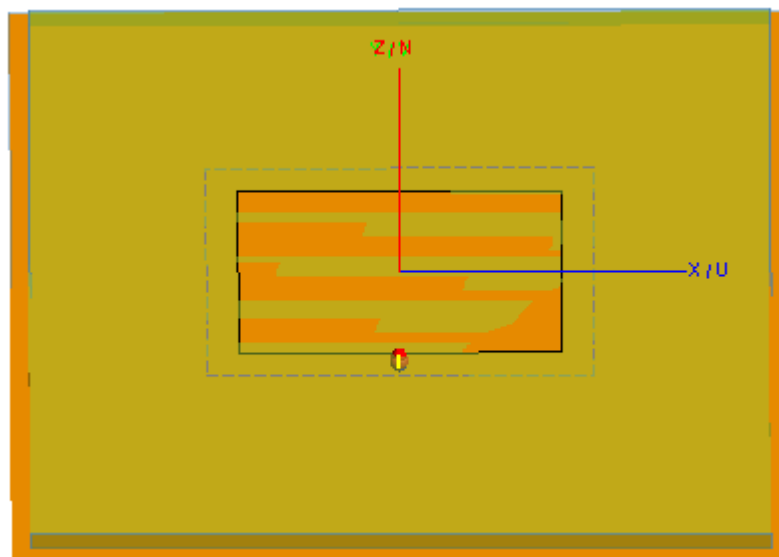


Figure 54 : Modèle géométrique du patch avec substrat infini

IV.1.8. Ajout des excitations :

Nous cliquons sur l'icône **Voltage Source**  dans l'onglet **Source/Load**

IV.2. Configuration de la simulation :

IV.2.1. Placer les fréquences de simulation :

Nous cliquons sur l'icône **Frequency** dans l'onglet **Source/Load**. La fenêtre ci-dessous s'ouvre.

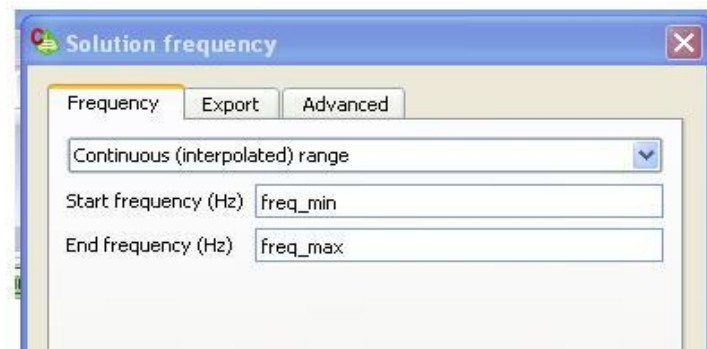



Figure 55 : Définition des fréquences de simulation

IV.2.2 Configuration du calcul :

Nous définissons ensuite les résultats que l'on souhaite obtenir

- les courants circulant sur toutes les structures métalliques de l'antenne => Dans

l'onglet **Request**, cliquez sur l'icône **Currents** . On sélectionne dans la fenêtre qui s'ouvre **All Currents**. Pour les courants circulant sur toutes les structures métalliques de l'antenne.

- Le rayonnement en champ lointain=> On clique sur l'icône **Far Fields** dans l'onglet

Request 

IV.3. Maillage des modèles géométriques :

Nous cliquons sur l'icône **Create Mesh**  dans l'onglet **Mesh**. La fenêtre de la figure 56 s'ouvre.

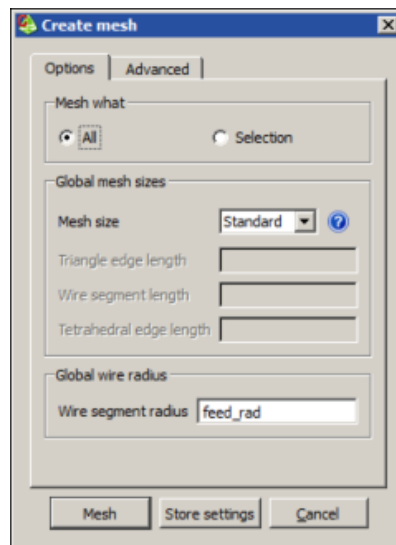




Figure 56 : Paramétrage du maillage

IV.4. Validation des résultats :


Une fois les modèles maillés et la simulation configurée, nous pouvons lancer le solveur FEKO. Pour cela, dans l'onglet **Solve/Run**, cliquez sur l'icône  **CEM validate**. Une fenêtre s'ouvre vous indiquant les erreurs et les warnings éventuels.

IV.5. Lancement de la simulation FEKO :

Pour lancer le simulateur, cliquez dans l'onglet **Solve/Run** sur l'icône **FEKO Solver** . Une fenêtre s'ouvre indiquant le statut et l'avancement de la simulation.

IV.6 .Visualisation des résultats :

IV.6.1. Lancement de PostFEKO :

Une fois les simulations effectuées, nous lançons l'outil de visualisation POSTFEKO à partir de CADFEKO en cliquant sur le bouton **POSTFEKO**  dans l'onglet **Solve/Run**. POSTFEKO charge directement les résultats du modèle ouvert sous CADFEKO.

IV.6.2 Affichage des résultats :

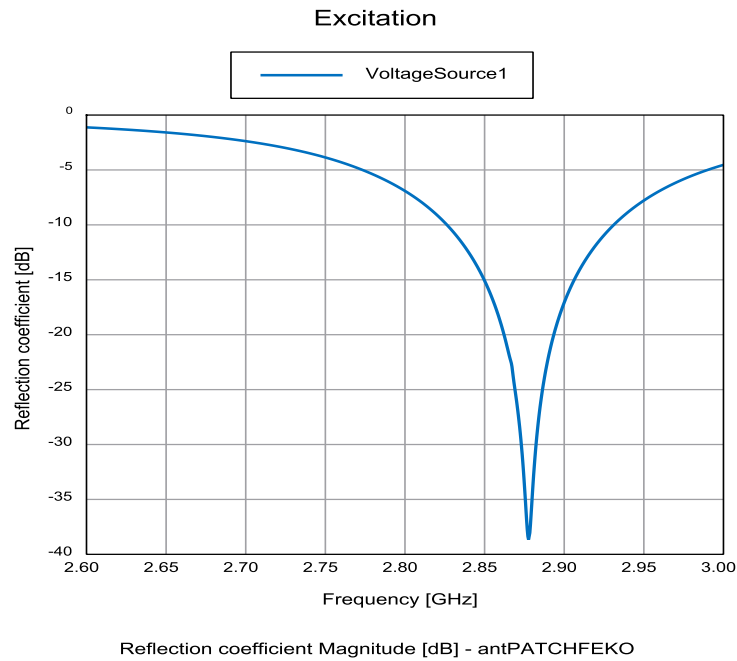


Figure 57 : Coefficient de réflexion

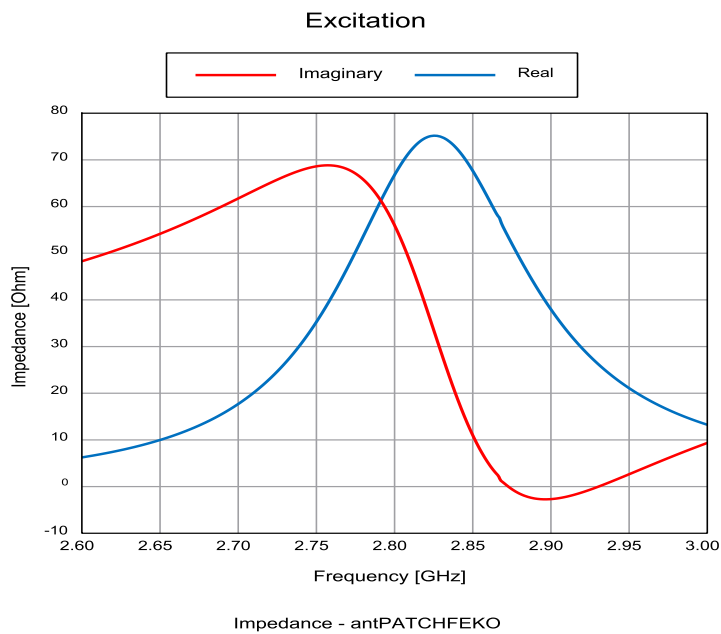


Figure 58 : Diagramme des impédances

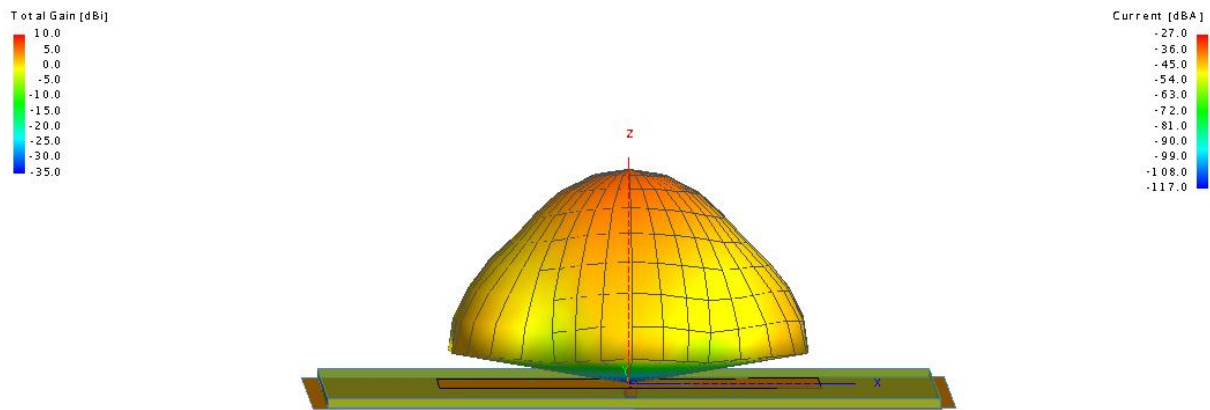


Figure 59 : Diagramme de rayonnement en 3D

V. Conclusion :

L'utilisation des logiciels de simulation électromagnétique se démocratise dans le département de recherche et développement d'antennes. Ces logiciels sont basés sur des méthodes numériques complexes nécessitant des compétences approfondies sur les techniques de modélisation électromagnétique.

A l'aide de programme de simulation, type FEKO, nous avons développé, à partir d'un cahier des charges, différents antennes et nous les avons simulées pour en étudier les effets.

De plus, en combinant simulation et mesure nous mettons en évidence la complémentarité qui existe entre simulation électromagnétique et caractérisation expérimentale des antennes.

I. Introduction :

Les paramètres S tels que introduits et utilisés ne prennent leur vrai sens que parce que qu'il existe dorénavant un appareil, l'Analyseur de Réseau Vectoriel qui permet aisément leur mesure de quelques dizaines de Mhz jusqu'à plus de 110Ghz.

Il ne faut toutefois pas perdre de vue que la technique de mesure est complexe et met en jeu de nombreux éléments actifs ou passifs qui sont tous imparfaits. En pratique la précision des mesures réalisées est dépendante à la fois du soin apporté par l'expérimentateur aux diverses manipulations, tout particulièrement lors de la procédure de calibration dont la description clôt ce chapitre.

II. Problème des hautes fréquences :

Les fréquences de l'ordre de grandeur de quelques GHz ont ceci de particulier, c'est qu'elles mettent en jeu des longueurs d'onde comparables aux dimensions du circuit ce qui ne permet pas d'utiliser les hypothèses simplificatrices du formalisme employé en base fréquence.

Ceci implique que :

- La mesure directe des courants et des tensions n'est pas possible à cause de la fréquence très élevée des signaux. Les appareils de mesure doivent intégrer des étages de conversion.
- A chaque mesure doit être associée une référence géométrique, appelée plan de référence, rendue nécessaire par le fait que ces grandeurs peuvent varier rapidement sur quelques centimètres.
- Les références en circuit ouvert sont difficiles à réaliser du fait des dimensions physiques proches de la longueur d'onde. Le rayonnement est alors difficile à éviter
- Les transistors peuvent ne pas supporter des courts circuits (courant maximum) et des circuits ouverts (tension maximum) à leurs extrémités.

La caractérisation des circuits électrique fait souvent appel à des grandeurs qui varient peu en fonction de la position de la sonde de mesure, ce qui est le cas de la tension et du courant aux fréquences basses. Aux fréquences plus élevées, la grandeur invariante est la puissance transportée sur la ligne. Ce sera la grandeur fondamentale mesurée en hyperfréquences. Elle

présente l'avantage de pouvoir être mesurée directement. Par contre, celle-ci s'exprime de façon complexe en fonction des paramètres tension-courant :

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re}$$

Il faut donc introduire de nouveaux paramètres caractéristiques permettant de manipuler aisément les puissances mises en jeu en tenant mieux compte des phénomènes physiques. [12]

III. L'analyseur de réseaux :

L'analyseur de réseaux est l'outil principal de mesure aux hautes fréquences. Il permet de mesurer les ondes transmises et réfléchies sur un dispositif sous test. On a ainsi directement accès aux paramètres S. Il existe deux catégories d'analyseur de réseaux :

- ✓ Les scalaires qui ne donnent accès qu'au module des paramètres S.
- ✓ Les vectoriels qui donnent le module et la phase des paramètres.



Figure 60 : Analyseur de réseaux scalaire

III.1. Principe de fonctionnement :

L'analyseur comporte une source radiofréquence qui produit un signal incident auquel est soumis le composant à tester. Ce dernier répond en réfléchissant une partie du signal incident et en transmettant la partie restante. S'il s'agit d'un composant passif, une partie du signal transmis est absorbée, révélant ainsi un dispositif avec perte (ou de type « dissipatif »).

Soient deux ondes représentées en valeurs instantanées par :

$$a=A \cos (\omega \tau+\varphi a)$$

$$b=B \cos (\omega \tau+\varphi b)$$

Si la fréquence est trop élevée (à partir des 100MHz), on ne peut mesurer directement les déphasages relatives. il faut donc effectuer une transposition en fréquences plus basses.

$$a^{\prime}=A^{\prime} \cos (\omega \tau+\varphi^{\prime} a)$$

$$b^{\prime}=B^{\prime} \cos (\omega \tau+\varphi^{\prime} b)$$

Il faut cependant respecter :

$$A^{\prime} / B^{\prime}=A / B \text { et } \left(\varphi^{\prime} a-\varphi^{\prime} b\right)=\left(\varphi a-\varphi b\right)$$

Comme les analyseurs de réseaux permettent d'effectuer des mesures sur des plages de fréquences importantes, il y a nécessité d'un étalonnage des amplitudes et phases en fonction de la fréquence de mesure. [12]

III.1.1. Schéma de principe de la mesure de S_{11} : D.U.T

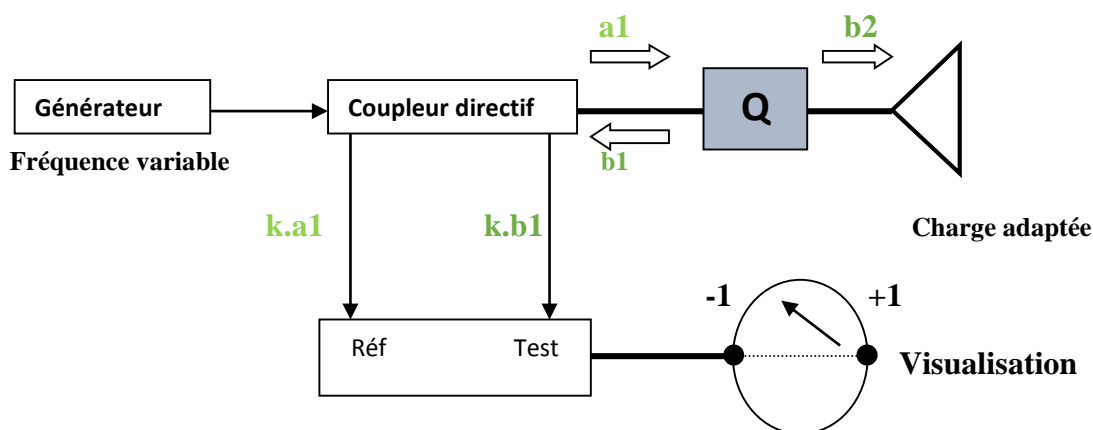


Figure 61 : Synoptique de la mesure de S_{11}

III.1.2. Schéma de principe de la mesure S_{21} :

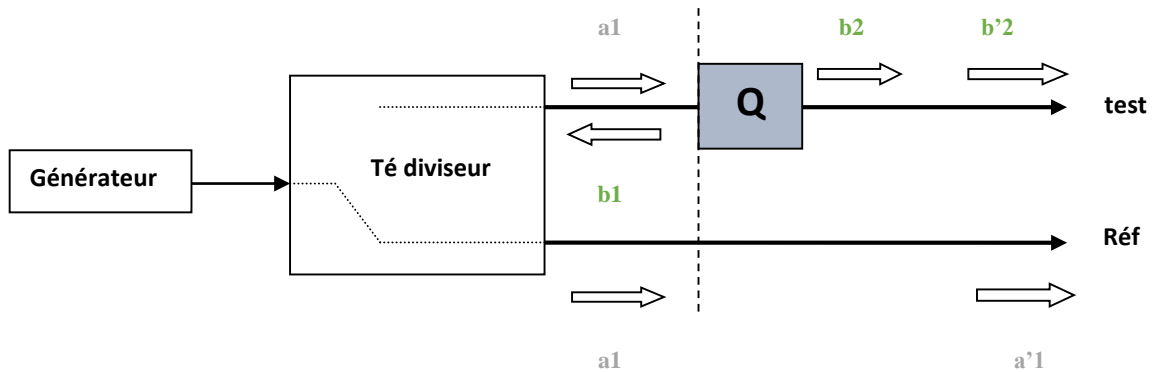


Figure 62 : Synoptique de la mesure de S_{21}

L'égalisation des déphasages dus aux parcours est nécessaire, pour cela il faut respecter :

$$\frac{b'_2}{a'_1} = \frac{b_2}{a_1}$$

III.1.3. Mesure globale :

Nous avons vu qu'il est nécessaire pour pouvoir calculer les paramètres S de connaître les signaux réfléchis et transmis mais aussi le signal incident. La figure 63 suivante montre un schéma simplifié du prélèvement des signaux.

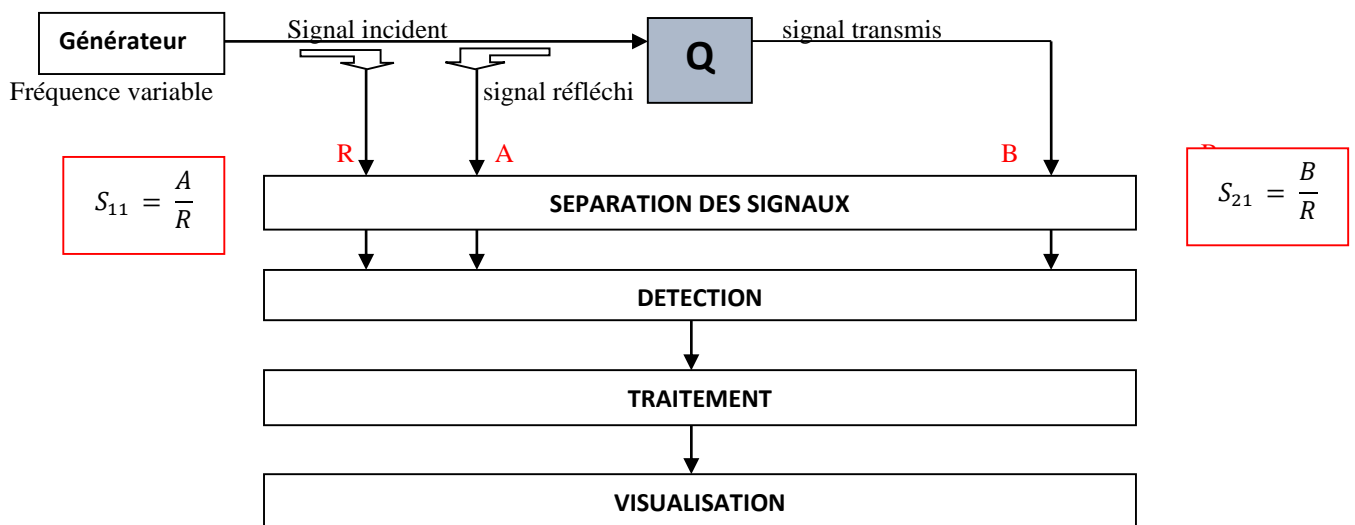


Figure 63 : Synoptique de la mesure des différents signaux

Le signal émis par une source RF est divisé en deux (en général à l'aide d'un diviseur de Wilkinson). La partie prélevée servira de référence (R). L'autre partie attaque le DUT (Dispositif Under Test ou quadripôle Q). Une partie est réfléchiée et l'autre est transmise (en supposant que le quadripôle est sans pertes). A l'aide de coupleurs, nous dérivons une portion des signaux (A et B).

En résumé la première étape est de séparer les signaux (à l'aide des coupleurs) puis de mesurer le module et la phase des signaux et enfin la dernière étape est de traiter les données ainsi mesurées (passage domaine temporel, échelle dB,...) à l'aide d'un processeur.

IV. Mesure à l'aide de l'analyseur de réseaux :

Avant de commencer les mesures il faut d'abord construire notre antenne sur laquelle on fait ces mesures. La construction de l'antenne est faite en suivant un cahier de charge qui contient les paramètres de l'antenne qu'on veut avoir.

IV.1. Paramètres de dipôle :

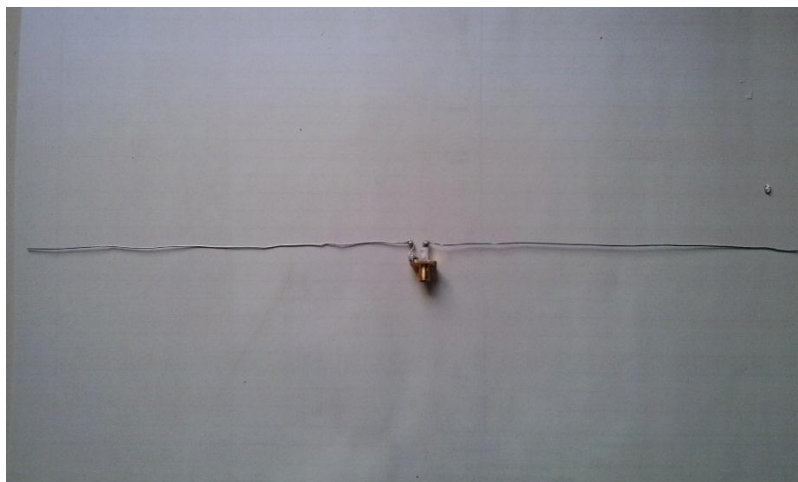


Figure 64 : antenne dipôle réalisée dans le laboratoire

- ✓ $\lambda = c/f$ = 1m
- ✓ Fréquence = 300Mhz
- ✓ Fréquence min = 270 Mhz
- ✓ Fréquence max = 330 Mhz

- ✓ La longueur de dipôle = $\lambda/2$ ($L = \lambda/2$)
- ✓ Rayon de dipôle = 1/1000 (dipôle radius = 0.001)

IV.1.1. Résultats de simulation sous FEKO :

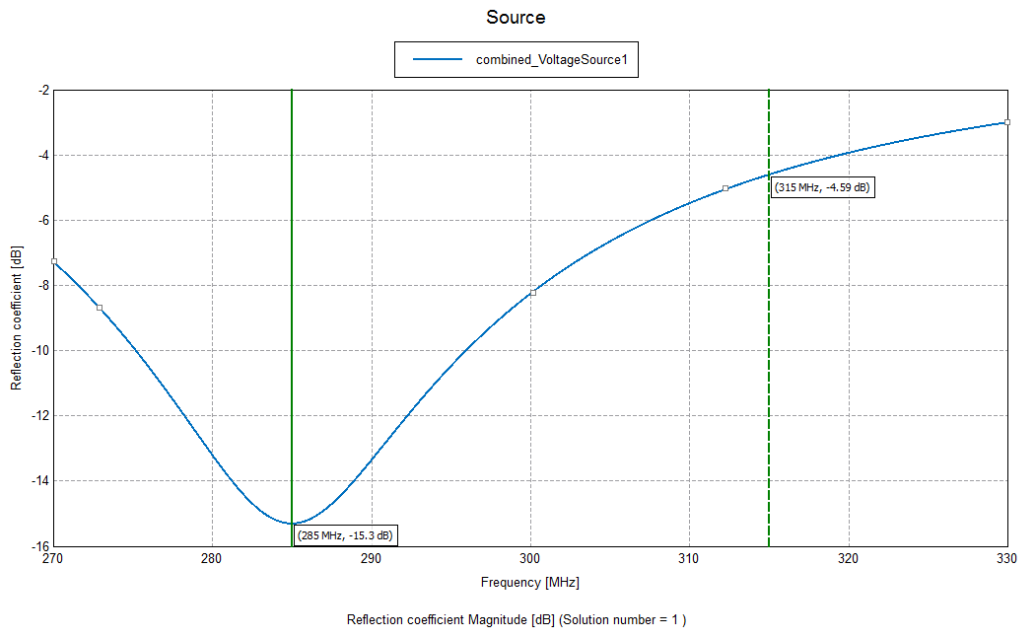


Figure 65 : coefficient de réflexion sous FEKO

IV.1.2. Résultat avec l'analyseur de réseaux :

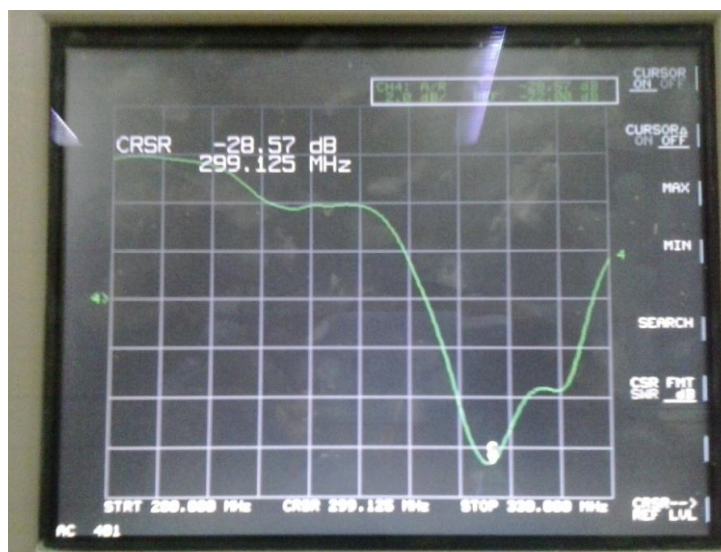


Figure 66 : coefficient de réflexion sous l'analyseur de réseaux

IV.2. Paramètre de patch :



Figure 67 : patch réalisé dans le laboratoire

- ✓ Fréquence = 2.0 GHz
- ✓ Fréquence max = 3.0 GHz
- ✓ Fréquence min = 1.0 GHz
- ✓ Largeur de patch = $W = 65$ mm
- ✓ Longueur de patch 33 mm
- ✓ Permittivité relative $\epsilon_r = 4.4$
- ✓ Hauteur de substrat $L = 1.6$ mm

IV.2.1. Résultats de simulation sous FEKO :

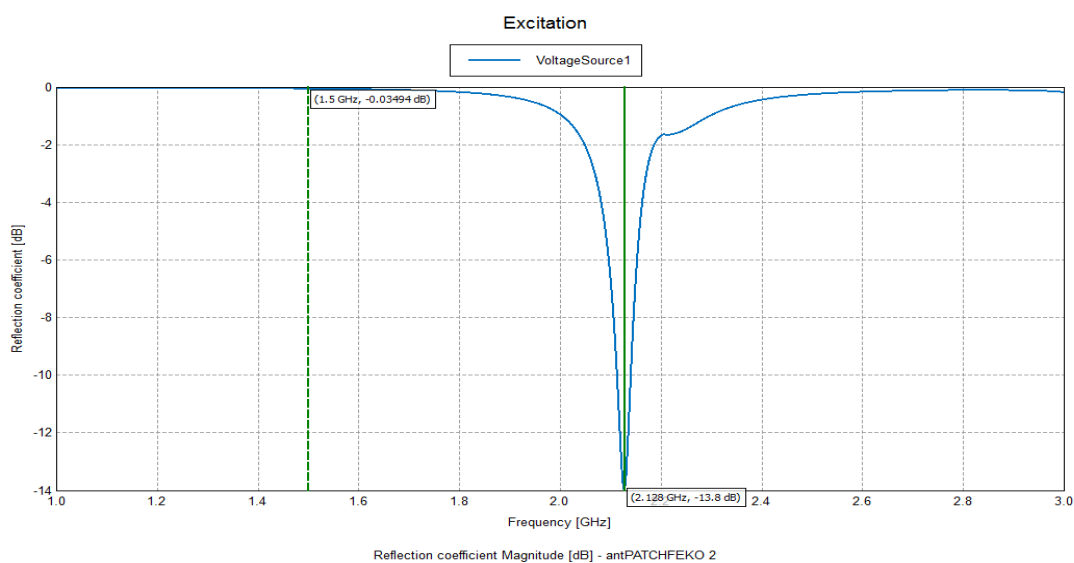


Figure 68 : coefficient de réflexion sous FEKO

IV.2.2. Résultat avec l'analyseur de réseaux :

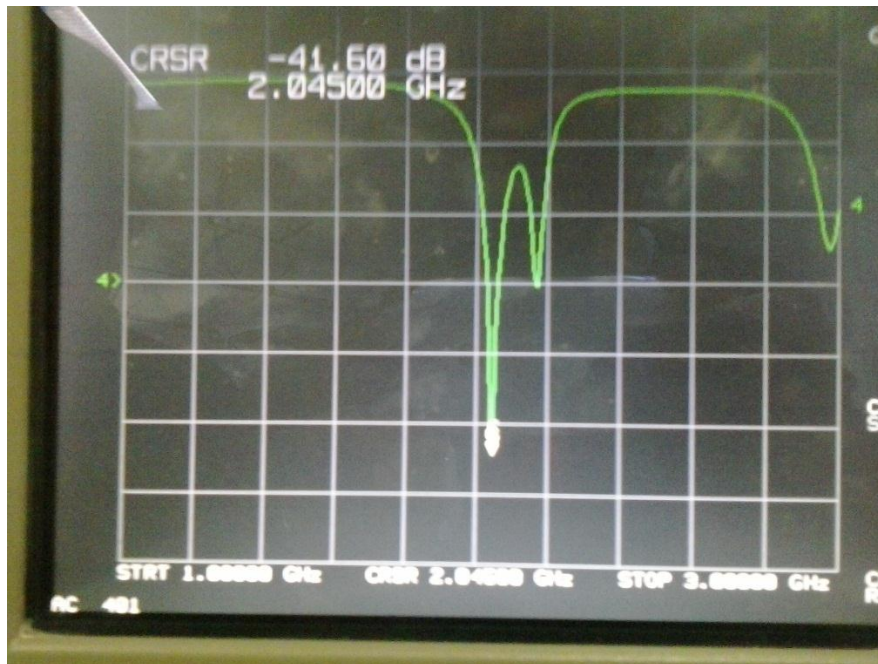


Figure 69 : coefficient de réflexion sous l'analyseur de réseaux

V. Conclusion :

A l'aide de l'analyseur de réseaux, une mesure du paramètre S_{11} a pu être effectuée. Cette mesure permet de voir à quelles fréquences la réflexion est la plus faible.

Les résultats du test sont satisfaisants, la fréquence de résonance ne sont pas tous à fait similaires. Ceci est dû, soit à la ligne qui n'est pas adaptée de la meilleure des manières, soit à l'imprécision de quelques paramètres du substrat utilisé qui ne sont pas totalement similaires à ceux utilisés lors de la simulation. En effet, la machine utilisée pour fabriquer le brin a peut-être une précision limitée, ce qui permet d'avoir des dimensions de lignes éloignées de celles désirées.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de notre travail rapporté dans ce mémoire a été de maîtriser le logiciel de simulation FEKO appliqué particulièrement aux antennes. Pour cela, nous avons présenté dans le premier chapitre les caractéristiques générales des antennes, puis nous l'avons présenté dans le second chapitre où ses principales fonctionnalités sont décrites de façon complète. C'est une étape importante car c'est le premier contact avec le simulateur.

Dans le troisième chapitre nous avons simulé quelques antennes des plus fondamentales dont l'étude de leurs fonctionnements a été faite et établie de façon exhaustive. Ce sont l'antenne dipôle demi-onde, l'antenne monopole, l'antenne patch.

En effet, nous avons retrouvé par simulation que l'impédance d'entrée d'une antenne demi onde est de l'ordre de 73Ω , que le rayonnement le long de l'antenne est nul et qu'il est maximum dans le plan équatorial. Le coefficient de réflexion S_{11} est quant à lui minimum à la fréquence de résonance qui montre que nous avons la meilleure adaptation de l'antenne à cette fréquence de travail. Nous avons aussi retrouvé la distribution du courant le long de cette antenne qui nous permet de valider l'approximation sinusoïdale classique. L'antenne patch est très utilisée à cause de son intégration aisée dans les circuits imprimés. La simulation avec FEKO a confirmé que le rayonnement est maximum dans la direction perpendiculaire au patch, que sa longueur L influe sur la fréquence de résonance et que son impédance d'entrée dépend de sa largeur W .

Pour terminer, nous avons fabriqué nous-même une antenne demi-onde et une antenne patch que nous avons simulées et dont nous avons mesuré les S_{11} . Des différences légères sont constatées pour l'antenne patch, que nous pouvons expliquer par la mauvaise qualité du substrat. En effet, nous l'avons conçue sur une simple plaque de circuit imprimé dont le but premier est l'isolation. Tout ceci a fait l'Object du quatrième chapitre.

Le travail futur sera d'étudier d'autres logiciels de simulation tel que le HFSS, IE3D, le CST car l'utilisation de deux simulateurs différents, basés sur deux méthodes numériques différentes peut donner une meilleure idée sur la qualité des résultats de simulation.

- [1] <http://www.alexandre-boyer.fr/enseignements.htm>
- [2] http://www.alexandre-boyer.fr/alex/enseignement/cours_antennes_oct11_v4_5RT.pdf
- [3] http://www.alexandre-boyer.fr/alex/enseignement/Aide_logiciel_FEKO_octobre2014.pdf
- [4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Antenne_radio%C3%A9lectrique
- [5] Paul François Combes, « Micro-ondes tome II – Circuits passifs, propagation, antennes », Dunod, 1997
- [6] FEKO tutoriel .YouTube
- [7] Atef Z. Elsherbeni, Payam Nayeri and C. J. Reddy .2014 by SciTech Publishing
- [8] Mémoire de fin d'études « Etude des antennes filaires et leurs techniques de miniaturisation ». Présenté par Larabes Samir et Oukil AHCEN. 2013
- [9] D. M. Dobkin, « The RF in RFID – Passive UHF RFID in Practice », Newness, 2008, 978-0-7506-8209-1
- [10] Help de logiciel FEKO
- [11] https://fr.wikipedia.org/wiki/Antenne_dipolaire
- [12] Mémoire de fin d'études « Conception, Simulation d'antennes sous HFSS et Mesures par l'analyseur de Réseaux vectoriel HP8753ES ». Présenté par Boudjedaimi Lyes et El Kechai Nassim. 2014