

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE
TOULOUSE

4^{ème} Année IR

Techniques et systèmes de transmission - Antennes

Guide de prise en main du logiciel FEKO

Alexandre Boyer

alexandre.boyer@insa-toulouse.fr

<http://www.alexandre-boyer.fr>

Octobre 2011

Sommaire

I.	Présentation du logiciel FEKO.....	3
II.	Flot de conception/simulation de FEKO.....	4
1.	Flot général.....	4
2.	Définition de la géométrie	5
3.	Maillage des structures	5
4.	Lancement des calculs et affichage des résultats	6
III.	Exemple : une antenne patch rectangulaire	6
IV.	Création d'un modèle géométrique maillé avec CADFEKO.....	7
1.	Démarrage de FEKO	7
2.	Création du modèle géométrique – substrat infini	8
3.	Création du modèle géométrique maillé – substrat fini	12
4.	Ajout des excitations	14
5.	Configuration de la simulation	15
6.	Maillage des modèles géométriques	16
V.	Lancement de la simulation FEKO	17
VI.	Visualisation des résultats avec POSTFEKO	18
1.	Lancement de PostFEKO.....	18
2.	Affichage du courant	18
3.	Affichage 3D des résultats de calcul en champ lointain.....	19
4.	Affichage en 2D des résultats de calcul en champ lointain	19
5.	Calcul du champ électrique à une distance donnée de l'antenne	20
6.	Calcul du coefficient de réflexion en entrée de l'antenne.....	21
7.	Comparaison avec les résultats du modèle à substrat fini.....	22
VII.	Récapitulatif	24

I. Présentation du logiciel FEKO

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

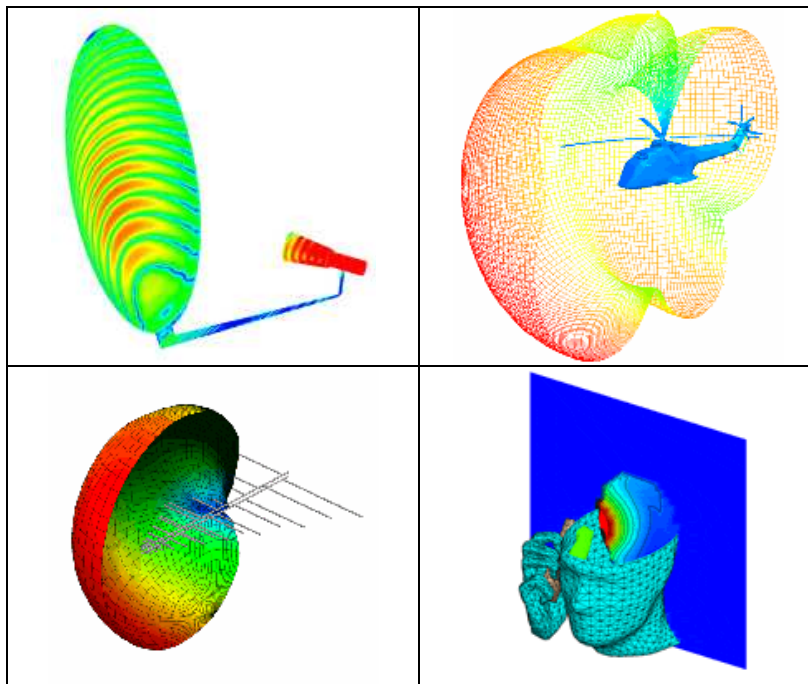


Fig. 1 – Quelques champs d'application du logiciel FEKO

Le logiciel calcule :

- les courants circulant sur les structures métalliques
- les champs électriques et magnétiques rayonnés, en champ proche comme en champ lointain
- les directivités et les gains d'antennes
- les paramètres d'entrée d'une antenne (impédance, admittance, taux d'onde stationnaire, puissance)
- les couplages entre différentes structures (analyse de paramètres S)
- l'absorption des champs électromagnétiques par un corps humain et le calcul de SAR

Le logiciel FEKO utilise différentes méthodes d'analyse numérique, comme le montre la figure ci-dessous. 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. Toutes ces méthodes sont des méthodes fréquentielles, c'est-à-dire résolues dans le domaine fréquentiel.

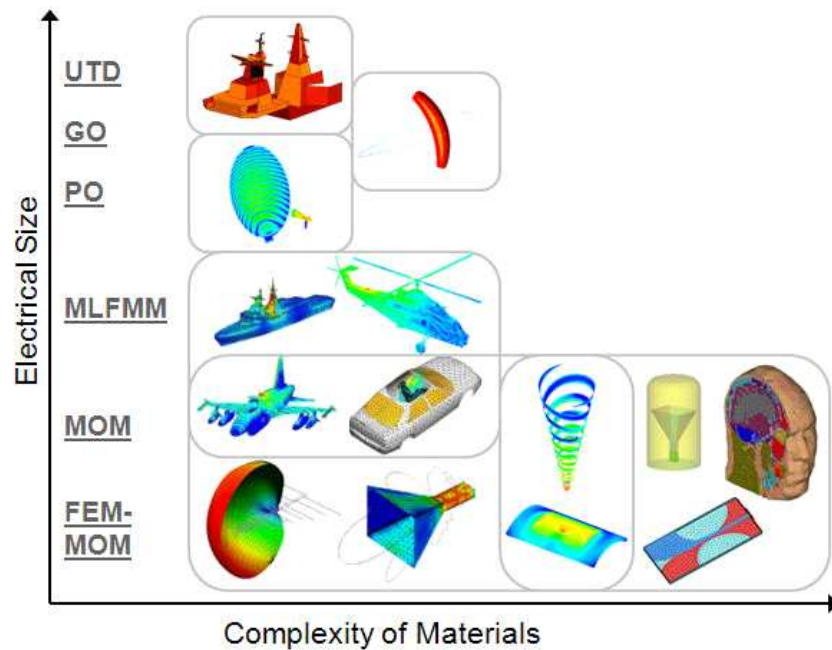


Fig. 2 – Les différentes méthodes de résolution numérique des équations de Maxwell utilisées par FEKO

Dans le cadre de ce TP, nous nous intéresserons uniquement à la conception d'antennes planaires. Nous utiliserons principalement la méthode des moments (MOM). Cette méthode est adaptée à la résolution des équations de Maxwell dans le cas de structures métalliques et diélectriques homogènes. Bien qu'elle traite des objets 3D, cette méthode présente l'avantage de considérer les métaux comme parfait (conductivité infinie) et de ne les mailler qu'en surface, ce qui réduit considérablement le nombre d'éléments du modèle.

Pour plus d'informations, visitez la page www.feko.info.

II. Flot de conception/simulation de FEKO

1. Flot général

La figure 3 décrit le flot de conception et de simulation utilisé par le logiciel FEKO. Ce flot fait intervenir 3 outils distincts :

- CADFEKO, destiné à la spécification des modèles géométriques et de leurs propriétés
- FEKO, le solveur numérique
- POSTFEKO, l'outil de postprocessing graphique, permettant l'affichage 2D et 3D des résultats

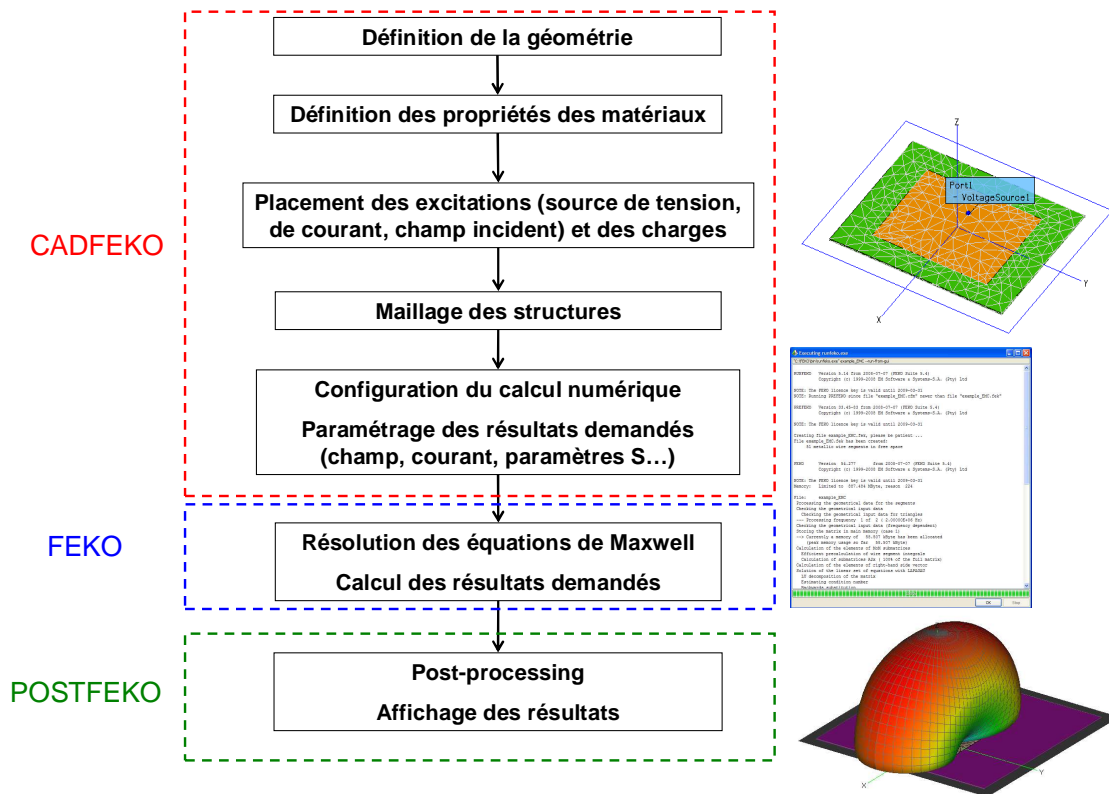


Fig. 3 - Flot de simulation sous FEKO

2. Définition de la géométrie

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.

Les géométries peuvent être complexes, elles vont du simple fil et des polygones jusqu'à des objets volumiques complexes. Une fois la géométrie définie, il est nécessaire de définir les propriétés des matériaux des différents objets : métalliques ou diélectriques. Leur nature va modifier les champs électromagnétiques et les courants circulant sur les structures. Puis, CADFEKO permet de placer des conditions sur les structures géométriques. Ces conditions peuvent être :

- des sources de tension ou de courant
- des champs électromagnétiques incidents
- des charges (résistance, capacité, inductance)

3. Maillage des structures

Afin d'appliquer une méthode de résolution numérique, la structure géométrique doit être discrétisée en un nombre fini d'éléments. On appelle cette étape le maillage, les différents éléments géométriques résultant du maillage les mailles. Il existe différents types de mailles :

- des segments (les fils sont maillés par des segments élémentaires)
- des triangles (les surfaces métalliques sont maillées par des triangles)
- des tétraèdres (les volumes diélectriques sont maillés par des tétraèdres)

La qualité du maillage est cruciale pour garantir une bonne précision des résultats. Pour garantir l'exactitude des résultats, il est nécessaire de s'assurer que la dimension maximale des mailles respecte la condition suivante.

$$L_{\text{maille max}} < \frac{\lambda}{10}$$

Cette condition permet de s'assurer que l'approximation quasi statique peut s'appliquer sur chacune des mailles. Cette approximation permet de considérer des courants, des tensions ou des champs électromagnétiques constants sur toute la maille. Plus la taille des mailles est petite, meilleure est la précision des résultats.

Néanmoins, il convient de ne pas réduire inutilement la taille de maillage, sous peine d'augmenter le nombre de mailles et le temps de calcul. Un bon compromis est d'avoir une taille de maillage environ égale à $\lambda/20$.

Remarque 1 : le maillage est souvent homogène. Néanmoins, à l'interface entre 2 milieux différents ou lors d'une transition géométrique brutale, des effets de bords existent et il convient d'affiner le maillage pour les faire apparaître. Même en respectant la règle de la taille maximale du maillage, celui-ci ne sera peut être pas suffisant pour modéliser ces effets correctement.

Remarque 2 : il convient d'assurer certains rapports entre les différentes dimensions d'une maille (par exemple : le rapport longueur d'une maille filaire/rayon, le rapport entre 2 côtés d'un triangle). Ces rapports ne doivent ni être trop grand, ni trop petits. Si ce n'est pas le cas, FEKO indiquera des warnings, voire des erreurs.

4. Lancement des calculs et affichage des résultats

Dès que le maillage est réalisé, la résolution des équations de Maxwell peut être configurée. La résolution de ces équations va permettre d'extraire différentes données : champs électromagnétiques, courants surfaciques, impédances d'entrée ... CADFEKO permet aussi de configurer les résultats demandés.

Enfin, il est possible de lancer la simulation proprement dite. L'utilisateur se contente de lancer le simulateur FEKO depuis CADFEKO. 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.

III. Exemple : une antenne patch rectangulaire

Dans les parties qui vont suivre, nous allons détailler les différentes étapes du flot de conception, en prenant l'exemple d'une antenne patch rectangulaire, réalisé à la surface d'un circuit imprimé. En suivant les différentes étapes, cet exemple vous permettra de prendre en main l'outil.

La figure 4 décrit la structure de cette antenne. L'élément rayonnant est constitué par un rectangle métallique de longueur $L = 94$ mm et une largeur de $W = 120$ mm. L'antenne est réalisée sur un circuit imprimé, constitué d'un substrat diélectrique d'épaisseur $h = 1.6$ mm et de constante diélectrique $\epsilon_r = 4.5$. Sous le diélectrique, on trouve un plan de masse très fin, le métal est considéré comme parfaitement conducteur. Dans un premier temps, on considère le substrat comme infiniment large. Dans un deuxième temps, le substrat est considéré comme un carré de largeur $W_{\text{sub}} = 2\lambda$. Cette antenne sera testé autour de la fréquence centrale $\text{freq0} = 750$ MHz.

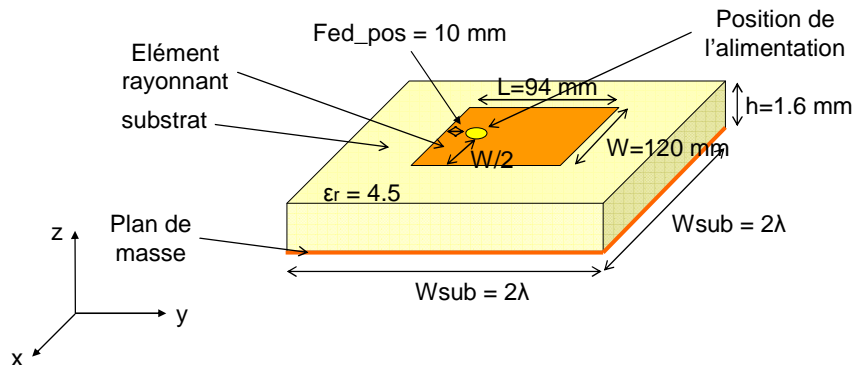


Fig. 4 - Exemple : une antenne patch rectangulaire

La figure 5 décrit la connexion de l'antenne à une source de tension externe. La connexion se fait par l'intermédiaire d'un connecteur coaxial (alimentation dite *pin feed*), dont l'âme est connectée à l'élément rayonnant, et le blindage externe au plan de masse du circuit imprimé. Physiquement, la source d'alimentation est connectée entre l'âme du coaxial et son blindage externe. On crée ainsi une source d'excitation entre l'élément rayonnant et le plan de masse de la carte. Le point d'alimentation est situé à une distance $Fed_Pos = 10\text{ mm}$ du bord de largeur W et à $W/2$ du bord de longueur L (fig. 4 et 5). On considérera cette broche d'alimentation comme un fil de longueur $h = 1.6\text{ mm}$ et de section circulaire (de rayon = 1 mm) entre le plan de masse et l'élément rayonnant.

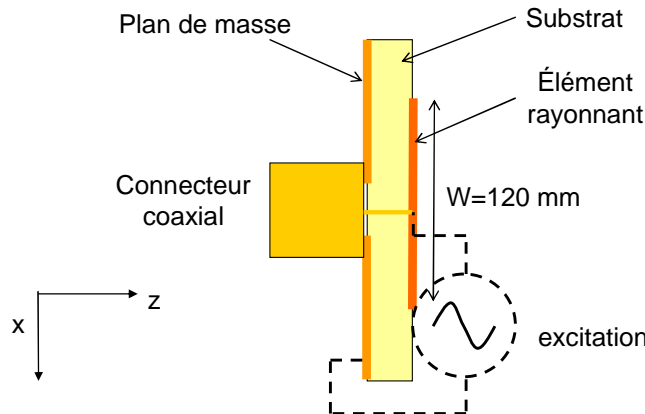


Fig. 5 – Vue de côté – excitation de l'antenne

IV. Création d'un modèle géométrique maillé avec CADFEKO

1. Démarrage de FEKO

Lancez le logiciel CADFEKO à partir **Démarrer/FEKO/CADFEKO** (fig. 6). La fenêtre présentée sur la figure 7 s'ouvre, avec un modèle géométrique vide.

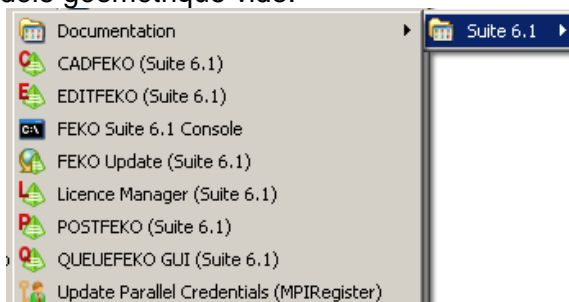


Fig. 6 – Lancement de CADFEKO

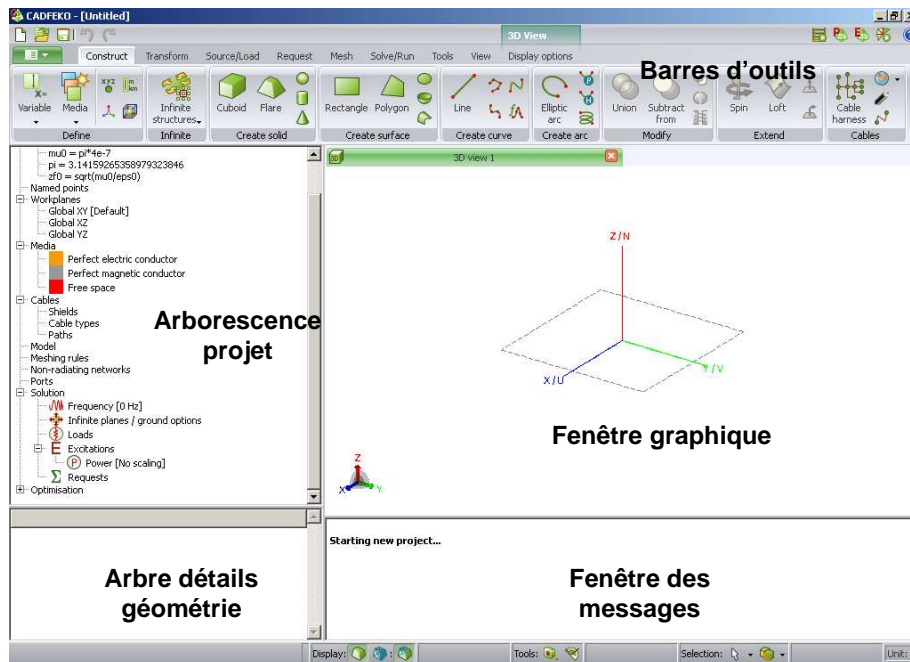


Fig. 7 –Ouverture de CADFEKO

Plusieurs barres d'outils sont présentes sur la fenêtre graphique de CADFEKO. Sur le côté à gauche, la première barre est associée à la création d'objets géométriques. La seconde barre est dédiée à la modification des objets géométriques. La troisième barre permet de configurer les paramètres électriques (sources, fréquence, puissance, ...) et les résultats de sortie. Au dessus de la fenêtre graphique, un ensemble d'icône permet de configurer la vue 3D. L'ensemble de ces icônes sont accessibles depuis la barre de menu.

A gauche de la fenêtre graphique, on trouve l'arborescence du contenu du projet. Cet arbre contient l'ensemble des paramètres géométriques et électriques du modèle. Il est possible d'accéder à chacun de ces paramètres par double clic et d'ajouter de nouveaux paramètres par clic droit. Sous l'arborescence projet, on trouve l'arbre des détails géométriques, donnant des informations sur les éléments géométriques de base. Enfin, sous la fenêtre graphique, on trouve la fenêtre des messages.

Nous allons présenter 2 manières de définir le modèle géométrique de cette antenne :


- dans le premier cas, nous allons supposer un substrat et un plan de masse infini. Dans ce cas, le substrat et le plan de masse sont modélisés par une fonction de Green et ne sont pas maillés. Seule l'antenne sera maillée, ce qui réduira fortement le temps de calcul. Néanmoins, le substrat n'est pas infini et ses bords peuvent modifier le diagramme de rayonnement de l'antenne.
- dans le deuxième cas, on considère un substrat et un plan de masse fini. La fonction de Green ne peut plus s'appliquer et ils seront maillés. Au prix d'un temps de calcul plus long, la précision sera meilleure.

On comparera ensuite les résultats fournis par les 2 approches.

2. Création du modèle géométrique – substrat infini


a. Choix des unités

On commence d'abord par enregistrer le modèle sous le nom patch_infini.cfx 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.

b. Définition des variables

La deuxième étape consiste à définir l'ensemble des variables du modèle. Même si il n'est pas indispensable de définir des dimensions géométriques ou des paramètres de simulation à l'aide de variables, leur utilisation simplifie la conception géométrique. Dans l'arborescence projet, faites un clic droit au dessus de **Variables** et sélectionnez **Add Variable** ou dans l'onglet **Construct**, cliquez

sur le bouton **Add Variable** . 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.

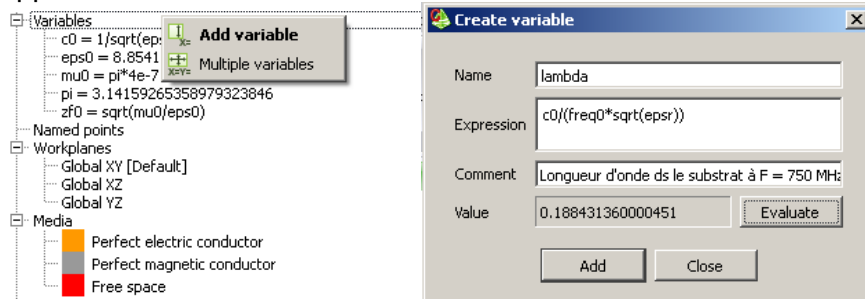


Fig. 8 - Création d'une variable

On a besoin des variables suivantes :

Variables	Expressions
freq0	750 MHz
freq_min	650 MHz
freq_max	850 MHz
epsr	4.5
lambda	$c0/(freq0*\sqrt{epsr})$
L	94 mm
W	120 mm
h	0.0016
Wsub	$1.5 * \lambda$
rayon	0.001 m
Fed_pos	10 mm

c. 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 crée 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.

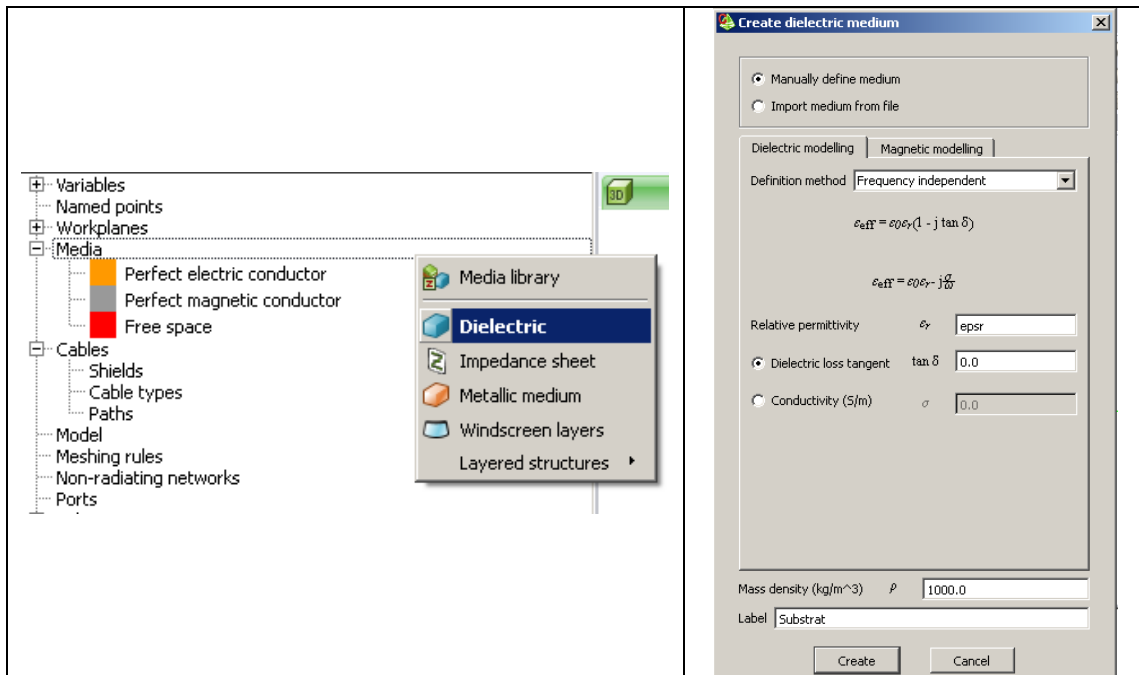


Fig. 9 - Création d'un nouveau médium de propagation

d. 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**.

La méthode proposée par FEKO pour construire des éléments géométriques est particulière : on définit d'abord un repère de travail (Workplane), c'est-à-dire on définit l'orientation d'un repère cartésien (u,v,n) par rapport au repère cartésien absolu (x,y,z). On va définir l'élément géométrique dans ce repère (u,v,n), le rectangle sera inscrit dans le plan (u,v). Dans la fenêtre **Create Rectangle** qui s'est ouverte (fig. 10), l'orientation du repère (u,v,w) est configurable dans l'onglet **Workplane**. Ici, le rectangle étant inscrit dans le plan (x,y), le repère (u,v,n) coïncide avec le repère (x,y,z).

Ensuite, on définit les coordonnées coin du rectangle et ses dimensions dans le repère (u,v,n).

On donne enfin un nom ou label à cet élément géométrique : Patch. Une fois créé, cet élément géométrique apparaît dans l'arborescence projet sous **Model**.

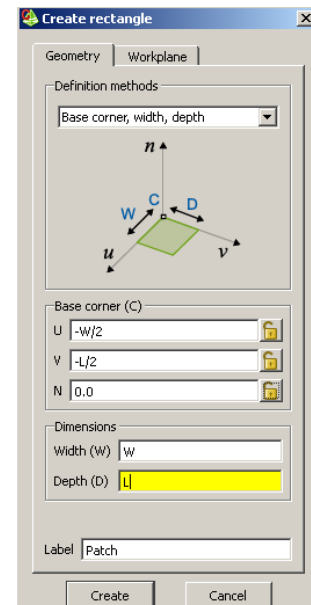



Fig. 10 - Création de l'élément rayonnant

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,w) des points de départ et d'arrivée du fil : respectivement (0 ; -L/2+Fed_pos ; -h) et (0 ; -L/2+Fed_pos ; 0). On lui donne comme nom FeedLine. Pour l'instant, ce fil n'a pas de rayon. On le définira au moment du maillage.

e. Création d'un substrat infini

On crée ensuite le substrat et le plan de masse. Ceux-ci sont considérés comme infiniment large.

Pour les définir, on clique sur l'icône  **Infinite Structure/Infinite Plane** dans l'onglet Construct. La fenêtre présentée à la figure 11 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 layer 1). Le substrat est forcément dans le plan XY, on définit aussi la coordonnée Z du haut du substrat. On la fixe à z= 0.

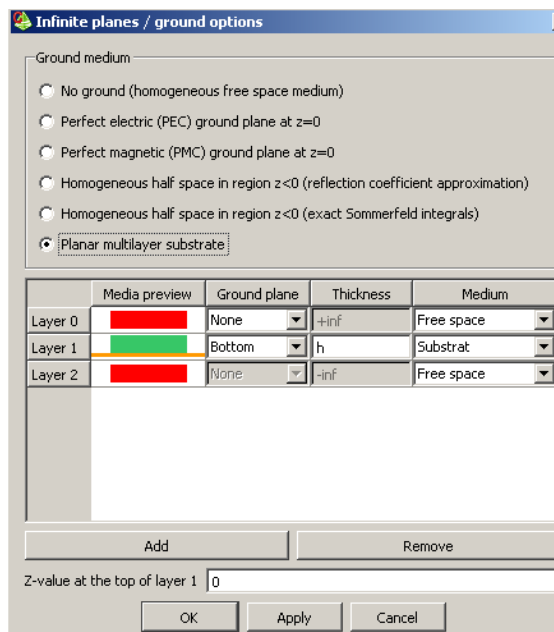


Fig. 11 - Création d'un substrat planaire multicouche infini

f. Ajout d'un port

Un port permet de définir un accès ou un terminal à un objet, afin de placer une excitation ou une charge. Dans notre exemple, le port correspond au connecteur coaxial. Plutôt que de modéliser complètement le connecteur, on le remplace par un simple fil reliant le patch et le plan de masse. Si on laisse le fil tel quel, on court-circuite le patch au plan de masse. Ce n'est pas le but. L'idée est d'ouvrir le fil en y plaçant un port. Sur ce port, on connectera une source de tension.

On ajoute un port sur la ligne FeedLine. Pour cela, on sélectionne dans l'arborescence sur l'objet FeedLine. Dans l'arbre des détails, l'ensemble des géométries élémentaires composant l'objet géométrique apparaît. L'objet Feedline est uniquement composé de segments (**Wires**). Dans la liste Edge, on trouve l'ensemble des fils composant l'objet. Dans notre cas, on ne trouve qu'un fil appelé Wire5 (le rectangle orange devant Wire5 indique le matériau de Wire5, un conducteur électrique

parfait). 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.

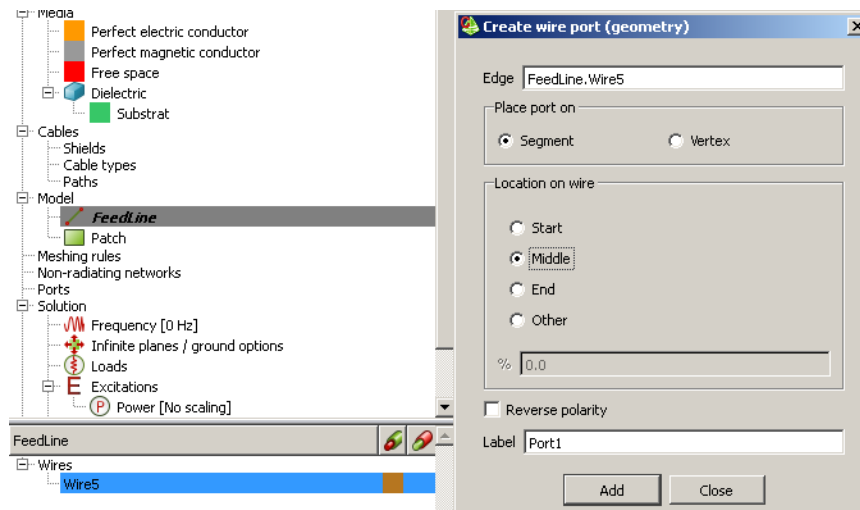


Fig. 12 - Création d'un port

g. 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 13.

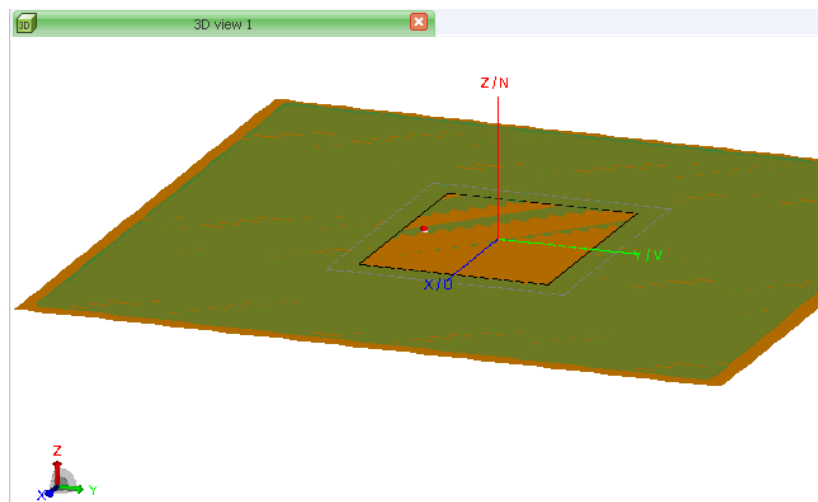


Fig. 13 – Modèle géométrique du monopole avec substrat infini

3. Création du modèle géométrique maillé – substrat fini

Pour créer le modèle du patch avec substrat fini, on repart du modèle précédent. En cliquant sur **File/Save as**, on crée un nouveau modèle appelé patch_fini.cfx.

a. Création du substrat fini

On commence par supprimer le substrat planaire infini en cliquant sur l'icône **Infinite Structures/Infinite Plane**. On sélectionne **No Ground/Homogenous free space medium** pour indiquer que l'antenne baigne dans un milieu de type espace libre. On clique sur OK, le substrat disparaît du modèle 3D. On peut maintenant créer le nouveau substrat.

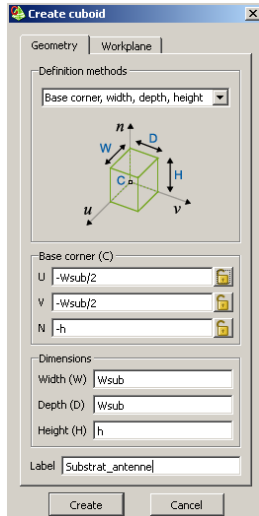



Fig. 14 – Création d'un substrat fini

On va créer un objet géométrique de type parallélépipède ou cuboïde. Pour cela, on clique sur **Cuboid**  dans l'onglet **Construct**. La fenêtre de la figure 14 s'ouvre. On rentre les coordonnées d'un des coins et les dimensions du cuboïde. On donne le nom Substrat_Antenne à ce nouvel objet géométrique. Une fois créé, celui-ci apparaît dans l'arborescence projet, sous **Model**.

On doit maintenant définir le matériau ou le milieu de propagation composant l'objet géométrique Substrat_Antenne. Pour cela, on sélectionne l'objet Substrat_Antenne. Dans l'arbre des détails, on clique sur **Regions**, qui définit le milieu de propagation de l'objet. Pour l'instant, cet objet est de type conducteur parfait. Pour modifier le matériau, faites un clic droit sur la région et sélectionnez **Properties** ou double-cliquez. La fenêtre ci-dessous s'ouvre. On fixe le type de medium à **dielectric** et on choisit le matériau substrat.

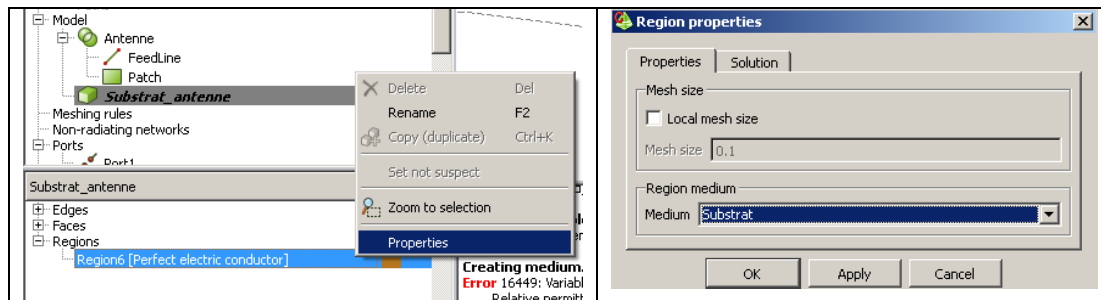



Fig. 15 – Création d'un substrat fini

Comme tout à l'heure, il est nécessaire d'unir les différents objets géométriques du modèle pour s'assurer de la validité du maillage. On clique sur **Union** .

b. Création du plan de masse fini

La prochaine étape consiste à définir le plan de masse fini, placé sous le substrat. Pour cela, on va modifier le type de la face inférieure de Substrat_Antenne. Pour cela, on clique sur l'icône **Select ion**



Type / **Faces** dans l'onglet **Tools**. On pourra ainsi sélectionner des faces et modifier leurs propriétés. On sélectionne la face inférieure du substrat. Dans l'arborescence détails, le nom de la face sélectionnée apparaît (Face 10). On fait un clic droit dessus puis on sélectionne **Properties**. La fenêtre suivante s'ouvre. On sélectionne comme type de matériau pour cette face **Perfect Electric Conductor**, représentant un plan de masse parfait. On refait la même chose pour la face correspondant au patch (Face 15). Comme il a été fusionné avec le substrat, la nature du matériau est passée en substrat. On la passe en **Perfect Electric Conductor**.

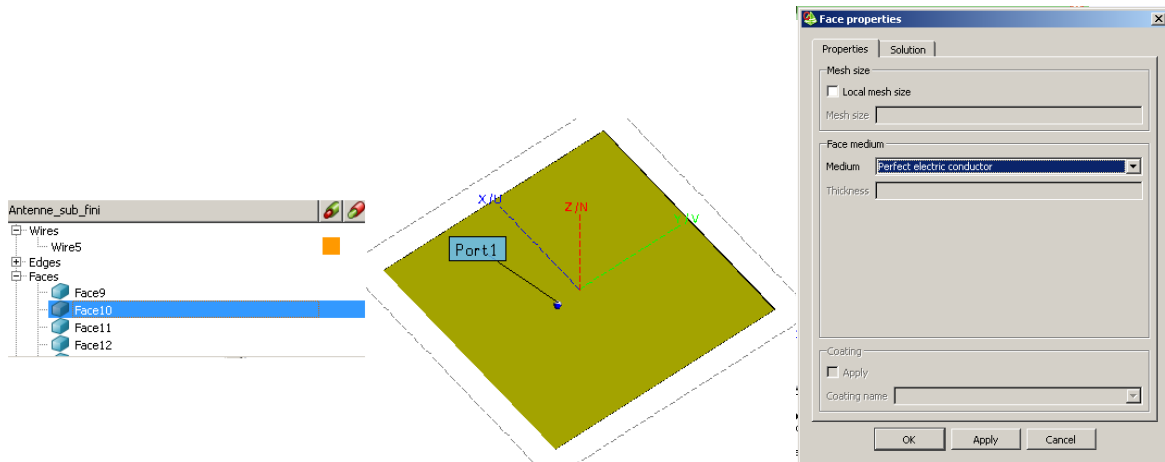


Fig. 16 – Sélection d'une face et modification du type de matériau d'une face

A la fin, le modèle doit être proche de celui de la figure 17.

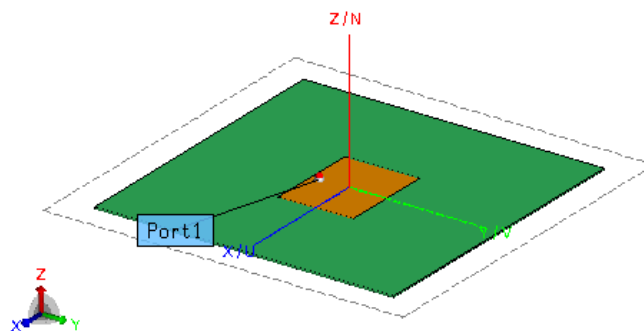
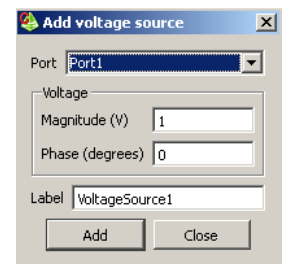


Fig. 17 – Modèle géométrique du monopole avec substrat fini

4. Ajout des excitations

Dans les 2 cas précédents, les excitations doivent être placées sur des ports. Pour ajouter une source, on clique sur l'icône **Voltage Source** dans l'onglet **Source/Load**. La fenêtre ci-contre s'ouvre. On indique le nom du port sur lequel on connecte la source, l'amplitude, la phase et le nom de la source. Celle-ci s'ajoute dans l'arborescence projet dans la catégorie **Solutions/Excitations**.



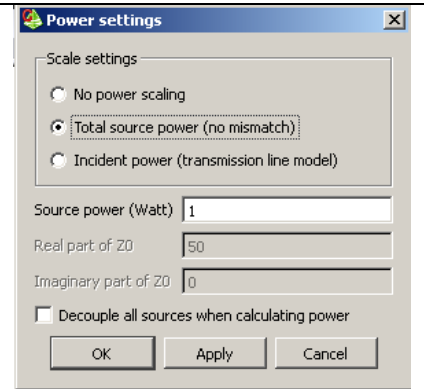
Comme les méthodes de résolution employées sont fréquentielles, les excitations sont de types sinusoïdaux.

On peut aussi définir la puissance délivrée par la source. Pour cela, on clique sur l'icône **Power**. On fixe la puissance à 1 W. La modification de la puissance ne fait que modifier l'amplitude du champ électrique par un facteur constant. Dans un premier temps, on sélectionnera l'option **Total Source Power (no mismatch)** dans la fenêtre de configuration de la puissance.

Remarque : on définit la puissance que peut délivrer la source, si celle-ci est connectée sur une charge adaptée. Par exemple, si l'impédance de source est égale à 50 ohms et que la puissance de la source est fixée à 1 W, alors la puissance fournie à une charge de 50 ohms. Par contre, si la charge n'est pas égale à 50 ohms, toute la puissance ne sera pas délivrée à la charge, une partie de la puissance sera perdue (mismatch losses = $1 - \Gamma^2$, où Γ est le coefficient de réflexion en entrée de la charge). L'adaptation est donc un paramètre clé pour déterminer le transfert de puissance électrique à l'antenne.

FEKO propose cependant 2 modes de configuration de la puissance source :

- **Total Source Power (no mismatch)** : on considère que l'adaptation est parfaite (même si ce n'est pas le cas en réalité). Dans ce cas, l'ensemble des paramètres de champ lointain (gain, directivité, puissance totale rayonné...) seront calculés sans prendre en compte la perte liée à la désadaptation. Si on sélectionne cette option, il faudra tenir compte de la perte éventuelle par désadaptation dans l'interprétation des résultats.
- **Incident power (transmission line model)** : on définit l'impédance entre la source et l'antenne et les pertes liées à la désadaptation seront prises en compte. L'ensemble des paramètres de champ lointain (gain, directivité, puissance totale rayonné...) seront calculés en prenant en compte la perte liée à la désadaptation.



5. Configuration de la simulation

a. Définition des fréquences de calcul

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**. La fenêtre ci-dessous s'ouvre. On sélectionne des points de fréquence continuellement espacés entre `freq_min` et `freq_max`. On place 11 points de fréquence. Les fréquences apparaissent dans l'arborescence projet dans la partie **Solution**. En double cliquant dessus, il est possible de les modifier.

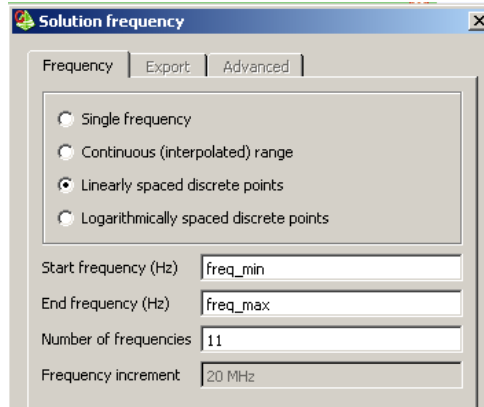


Fig. 18 – Définition des fréquences de simulation

b. Configuration du calcul

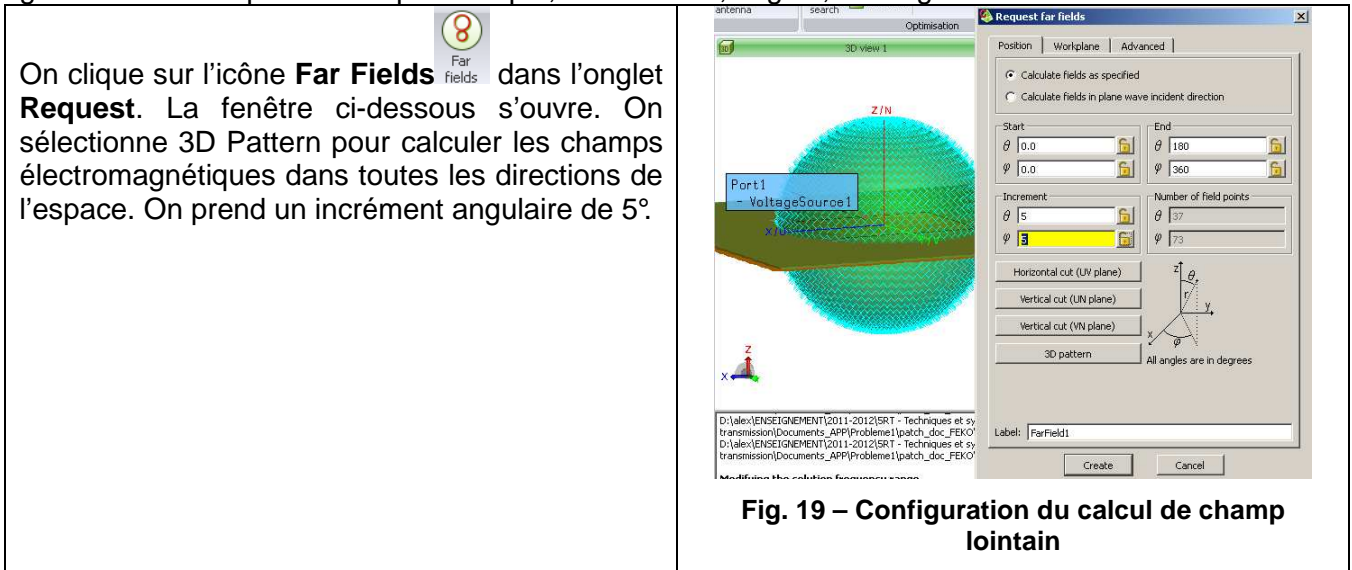
On définit ensuite les résultats que l'on souhaite obtenir. D'abord, on souhaite calculer les courants circulant sur toutes les structures métalliques de l'antenne. Dans l'onglet **Request**, cliquez sur l'icône



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 plan

(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 ...



6. Maillage des modèles géométriques

Une fois le modèle géométrique défini et les différentes parties adjacentes unies, on peut lancer le maillage. Celui-ci est indispensable avant de lancer le calcul.

a. Maillage du modèle à substrat infini – maillage uniforme

On commence par mailler le modèle à substrat infini. Le maillage est simple car il consiste à mailler l'élément rayonnant rectangulaire et le

fil d'alimentation. On clique sur l'icône **Create Mesh** dans l'onglet **Mesh**. La fenêtre de la figure 20 s'ouvre.

Le maillage s'applique de manière globale à tous les objets géométriques. On peut choisir 2 modes de maillage (mesh size) : d'abord, un maillage standard, fine ou coarse, l'outil sélectionne seul les paramètres de maillage en fonction des fréquences de calcul. On peut sélectionner dans un premier temps ce mode. Pour améliorer la précision des calculs ou évaluer la pertinence du maillage, on peut sélectionner ses propres paramètres de maillage en sélectionnant dans Mesh size : Custom. Plusieurs paramètres de maillage sont disponibles :

- Triangle edge length : dimensions des arêtes, qui concernent les dimensions des mailles triangulaires des surfaces
- Wire segment Length : longueur des mailles des fils

Il est nécessaire de donner un rayon global pour tous les éléments géométrique de type fil, à l'aide du champ **Wire Segment radius**, qu'on fixe à l'aide de la variable rayon = 1 mm. A noter qu'il est possible de modifier localement le rayons des fils.

Cliquez sur **Mesh** pour terminer, CADFEKO maille alors l'objet. Dans la fenêtre des messages, CADFEKO indique le nombre de mailles qu'il vient de générer. Dans cet exemple, 42 triangles et 1

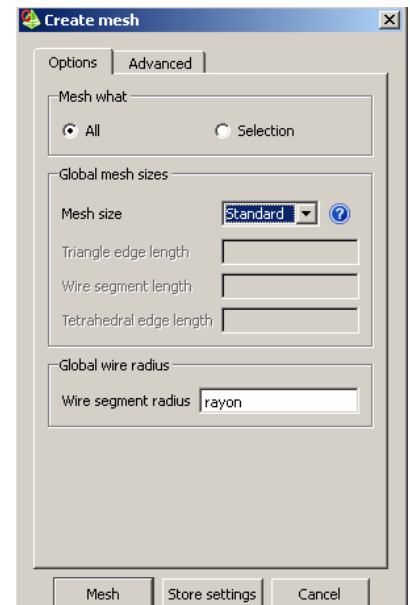


Fig. 20 – Paramétrage du maillage

segment ont été créé. Dans l'arborescence projet, l'objet Union1 apparaît dans la catégorie **Meshes**, indiquant l'ensemble des maillages appliqués sur l'objet géométrique.

b. Maillage du modèle à substrat fini – maillage non uniforme

On passe ensuite au maillage du monopole sur substrat fini. On décide d'utiliser un maillage non uniforme, c'est à dire qu'on va réduire la taille du maillage aux endroits où des discontinuités sont présentes (par exemple, les bords du plan de masse ou du patch, l'interconnexion du fil d'alimentation au patch ...).

Avant de lancer le maillage, on indique sur quelle face ou quelle arête on souhaite affiner le maillage. On décide d'affiner le maillage sur les bords du plan de masse et du patch. En effet, les champs électromagnétiques ont tendance à augmenter à proximité des bords d'un conducteur.

Pour cela, on clique sur l'icône **Selection type/Edges Wires** dans l'onglet **Tools**. Sur le modèle 3D, à partir d'un clic droit et de la touche contrôle, sélectionnez les 4 arêtes du plan de masse.

Dans l'arbre des détails, les 4 arêtes (edges) sélectionnées sont surlignées (edge 23 à 26). Faites un clic droit, sélectionnez **Properties**. La fenêtre ci-contre s'ouvre. On applique un maillage local sur ces arêtes en cochant Local Mesh Size, en donnant un paramètre de maillage de $\lambda/40$. Faites de même pour les 4 arêtes du patch.

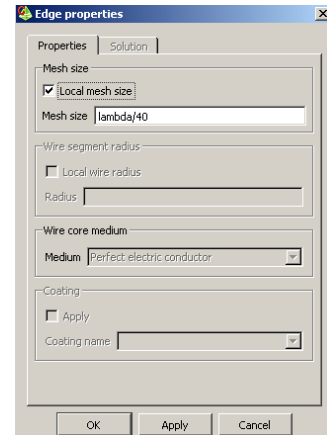


Fig. 21 – Paramétrage du maillage

Comme dans le cas du substrat infini, on lance l'opération de maillage en cliquant sur **Mesh/Create Mesh**. On conserve les mêmes paramètres de maillage global que dans le cas précédent.

CADFEKO a généré 1 segment pour le fil d'alimentation, 2366 triangles pour les éléments métalliques et le substrat et 0 tétraèdre (comme nous n'avons pas autorisé le maillage volumique, le diélectrique n'est maillé qu'en surface). Une fois le maillage terminé, le résultat doit être similaire à celui présenté sur la figure 22.

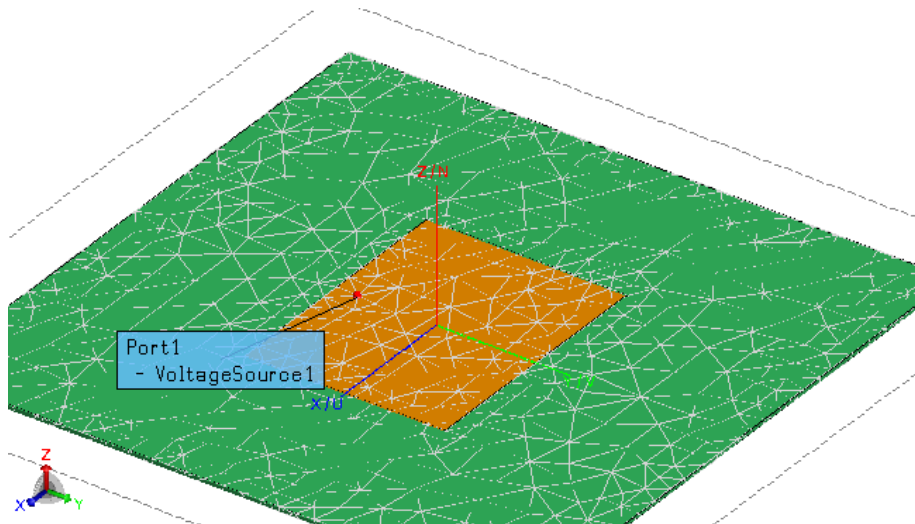


Fig. 22 – Modèle géométrique maillé du monopole avec substrat fini

V. Lancement de la simulation FEKO

Une fois les modèles maillés et la simulation configurée, on peut lancer le solveur FEKO.

Néanmoins, il convient de valider le modèle électrique et de détecter d'éventuelles erreurs ou sources



d'imprécisions de calcul. 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.



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.

S'il y a une erreur, un message rouge s'affichera sur cette fenêtre. La simulation peut être interrompue à tout moment en cliquant sur **Stop**. Elle indique aussi la fin de la simulation.

Alors que la simulation du modèle avec substrat infini prend moins d'une minute, celle avec le substrat fini dure environ 4 minutes. En théorie, si on double le nombre de mailles, on multiplie par 4 le temps de simulation. Il est donc nécessaire d'affiner le maillage pour améliorer la précision du maillage tout en veillant à ne pas allonger inutilement le temps de simulation.

VI. Visualisation des résultats avec POSTFEKO

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 patch_infini. 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 (exemples : répartition du courant, champ électrique ou magnétique à proximité de l'antenne, diagramme de rayonnement...), ou bien sous la forme de graphe en 2D.

2. Affichage du courant

On commence d'abord par afficher la répartition du courant à la surface du patch à 750 MHz. Pour cela, on clique

d'abord, on affiche sur le modèle 3D les courants de surface, en cliquant sur l'icône **Currents** dans l'onglet **Home**. On sélectionne Currents1, qui correspond à la densité surfacique de courant sur le patch. Les amplitudes des courants apparaissent sur le modèle sous forme de couleurs.

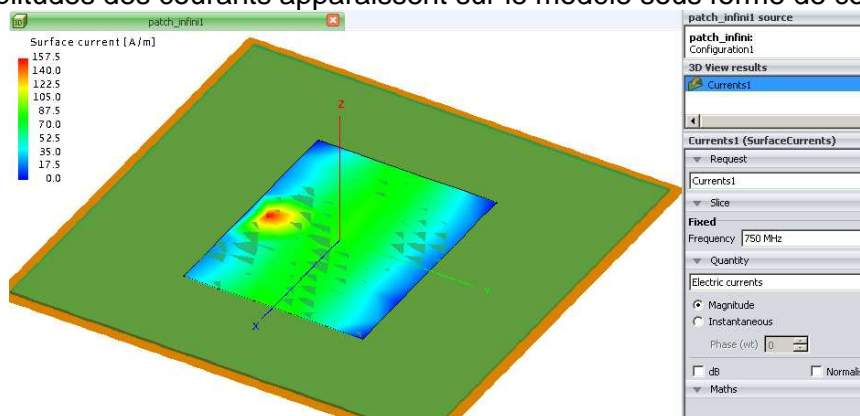


Fig. 23 – Affichage de la densité surfacique en courant à 750 MHz (patch_infini)

La figure 23 présente le résultat obtenu. Les courants s'affichent uniquement sur les structures métalliques. On sélectionne la fréquence depuis la liste des fréquences. On peut modifier l'affichage et les propriétés de la légende dans l'onglet **Display**. Sur le modèle, on peut voir que la densité de courant est très importante près du point d'alimentation. En effet, le courant arrive sur le patch par la ligne d'alimentation. Le courant est alors réparti sur la surface du fil. Une fois arrivé sur le patch, le courant « s'étale » sur tout le patch, d'où une diminution de la densité. Cependant, la densité n'est pas uniforme sur le patch. La densité est plus forte au centre que sur les bords. Cette répartition est particulièrement notable autour de 750 MHz. Cela indique que l'antenne est proche de sa résonance demi-onde, à l'image d'un dipôle demi-onde.

3. Affichage 3D des résultats de calcul en champ lointain

On affiche ensuite le diagramme de rayonnement 3D de l'antenne patch_infini. On clique sur l'icône



Far Field dans l'onglet **Home**. La figure 24 présente le diagramme de rayonnement obtenu. On choisit la fréquence (750 MHz). On peut aussi modifier le type de grandeurs visualisées. On peut afficher des grandeurs telles que le gain ou la directivité. On voit que le champ électrique est maximal à la verticale du patch ($\theta=0^\circ$), mais qu'il s'annule à mesure que θ tend vers 90° . Le champ électrique s'annule sous le plan de masse infini. La vue 3D confirme le caractère directionnel de l'antenne.

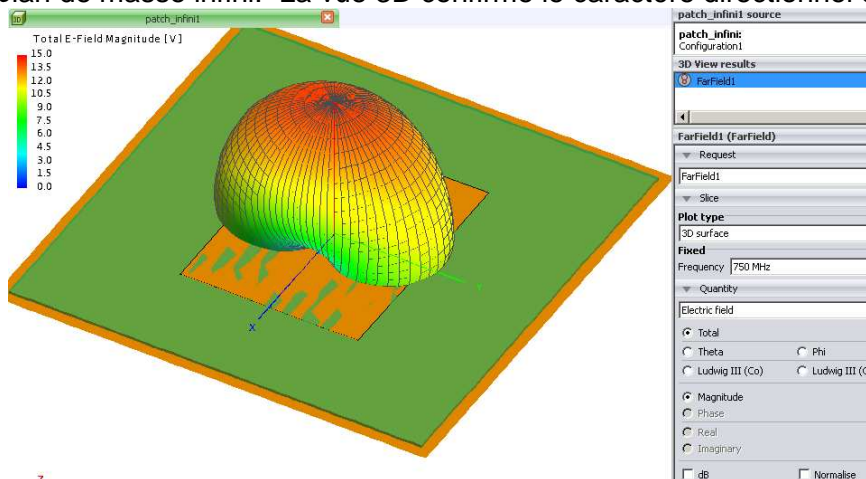


Fig. 24 – Affichage du diagramme de rayonnement (en champ électrique) à 750 MHz sur le modèle 3D patch_infini

4. Affichage en 2D des résultats de calcul en champ lointain

La vue 3D du diagramme de rayonnement ne permet pas facilement d'extraire des données comme les angles d'ouverture dans un plan donné. Il est préférable d'afficher les données dans un plan 2D.

Pour créer un graphe 2D type repère cartésien, cliquez sur l'icône **Cartesian** dans l'onglet **Home**. Une nouvelle fenêtre s'ouvre avec un repère cartésien prêt à afficher tout type de résultats. Pour afficher une grandeur type champ lointain, cliquez sur l'icône **Far Field**. Par défaut, l'évolution du gain avec la fréquence s'affiche pour $\theta = 0^\circ$ et $\varphi = 0^\circ$ (Fig. 25). Il est possible d'afficher la valeur

maximale en plaçant un curseur (onglet **Measure**, icône **Cursors**) ou en utilisant l'icône



Point/Global Maximum dans l'onglet **Measure**. Le gain est maximal à 810 MHz et a une valeur d'environ 7 dB. Attention, puisque nous avons sélectionné une configuration de la puissance qui ignore les pertes par désadaptation, cette valeur ne les prend pas en compte alors qu'elles sont loin d'être négligeables (cf calcul du coefficient de réflexion).

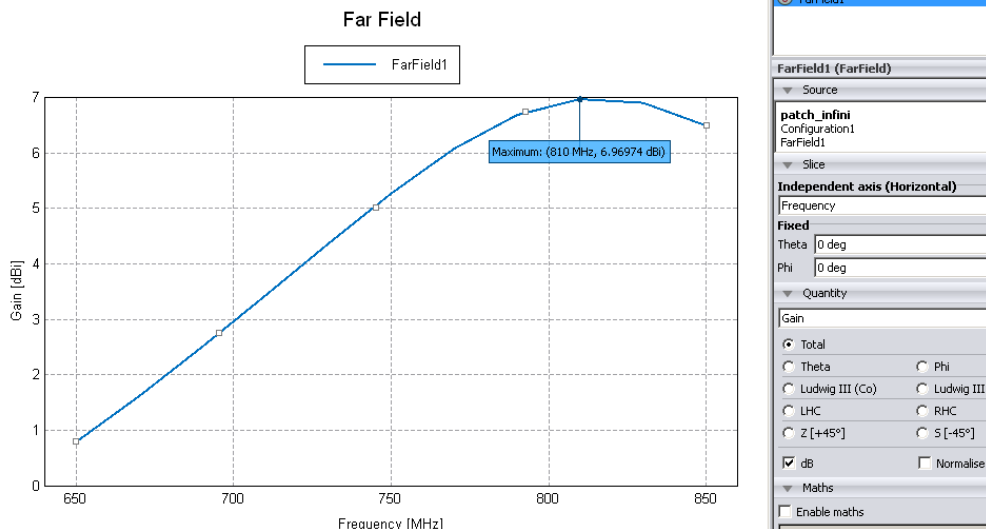


Fig. 25 – Affichage du gain à $\theta = 0^\circ$ et $\varphi = 0^\circ$ en fonction de la fréquence (patch_infini)

Pour extraire l'angle d'ouverture de l'antenne, on doit afficher un paramètre champ lointain tel que le gain en fonction de l'angle θ (à partir du diagramme de rayonnement 3D présenté figure 24, on voit que celui-ci présente une quasi omnidirectionnalité en fonction de φ . Inutile donc de mesurer l'angle d'ouverture en fonction de φ . A partir de la courbe précédente, dans la liste sur la droite **Independent Axis**, sélectionnez « Theta (Wrapped) ». Le gain en fonction de l'angle θ pour $\varphi = 0^\circ$ et $f = 650$ MHz s'affiche. Modifiez la fréquence dans la liste **Fixed**, passez-la à 750 MHz. La figure ci-dessous s'affiche. Il est possible de modifier les axes dans l'onglet **Display**. On voit que le gain est maximal à $\theta = 0^\circ$ et décroît à mesure que l'angle s'éloigne de cette position. Pour mesurer l'angle d'ouverture à 3

dB, cliquez dans l'onglet **Measure** sur l'icône **Beamwidth** /Half Power (-3 dB). Le résultat indique un angle d'ouverture de 82°.

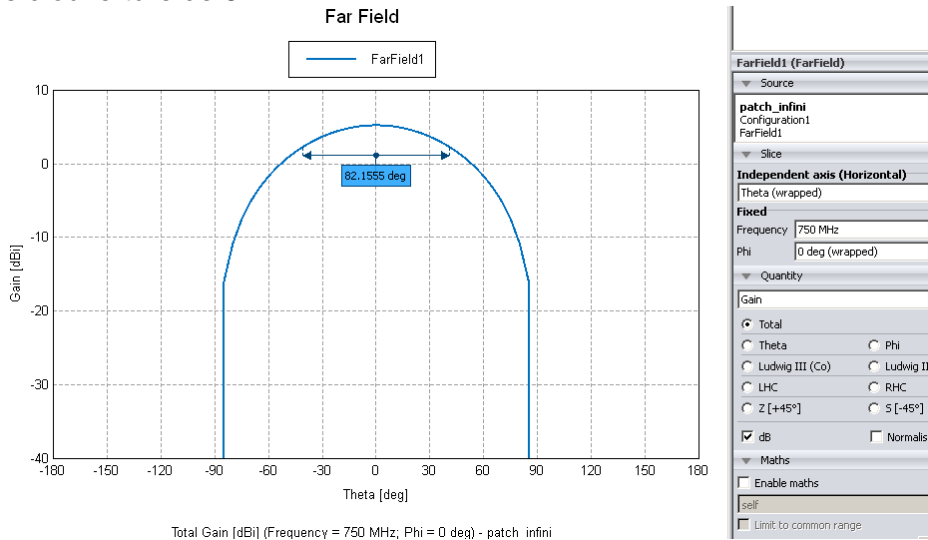


Fig. 26 – Affichage du gain à $\varphi = 0^\circ$ et $f = 750$ MHz en fonction de θ (patch_infini)

5. Calcul du champ électrique à une distance donnée de l'antenne

Le calcul en champ lointain fournit une information sur le champ électrique. Celle-ci correspond à une valeur normalisée du champ électrique notée E_{far} et donnée en V. Il s'agit d'une valeur normalisée

car elle ne tient pas compte de la distance séparant l'antenne du point d'observation où on souhaite calculer le champ électrique.


Soit un point d'observation M séparé du centre de l'antenne par une distance R. Le champ électrique en M est relié au champ normalisé E_{far} par :

$$\vec{E}(M) (V/m) = \frac{\exp(-j\beta R)}{R} \vec{E}_{far}, \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

6. Calcul du coefficient de réflexion en entrée de l'antenne

Par défaut, dès qu'une source est placée sur le modèle géométrique, FEKO calcule plusieurs paramètres de sources, tels que :

- Puissance dissipée
- Courant fournie
- Impédance d'entrée de l'antenne, c'est-à-dire l'impédance vue depuis la source
- Coefficient de réflexion S11 en entrée de l'antenne
- ...

En cliquant sur l'icône **Source Data**  dans l'onglet **Home**, on peut afficher dans un graph 2D les paramètres de source. On trace l'évolution en fonction de la fréquence du coefficient de réflexion en entrée de l'antenne (avec comme impédance caractéristique 50 Ω). Le coefficient de réflexion est minimal à 770 MHz. On voit que l'antenne est très sélective en fréquence, puisque le minimum de coefficient de réflexion apparaît sur une bande très étroite

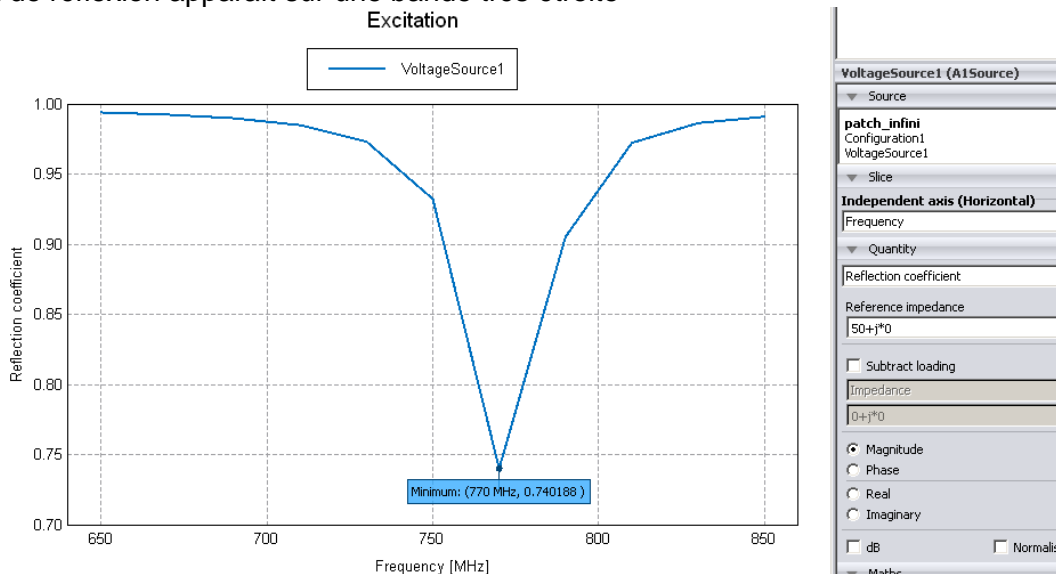


Fig. 27 – Affichage du coefficient de réflexion en entrée en fonction de la fréquence (patch_infini)

Cependant, même à 770 MHz, l'adaptation sur 50 Ω reste à améliorer. En effet, le coefficient de réflexion est de $\Gamma = 0.74$. La puissance transmise à l'antenne n'est que de : $P_{ant} = P_{source} (1 - |\Gamma|^2) = 1 \times (1 - 0.74^2) = 452 mW$, donc une puissance de 548 mW est perdue en raison de la mauvaise adaptation à 770 MHz.

Dans la configuration de la puissance de source, nous avons sélectionné une option qui ignore la perte par désadaptation dans le calcul du rayonnement de l'antenne. Le gain, la directivité, la puissance rayonnée totale est calculée comme si toute la puissance électrique source était fournie à l'antenne, ce qui n'est pas vraie vu le résultat précédent. Pour prendre en compte cet effet dans le calcul du gain, on peut soit retourner sur CADFEKO et modifier la configuration de la puissance de la

source, soit afficher le gain effectif (Realised Gain). Pour cela, on crée une nouvelle fenêtre 2D avec un repère cartésien, on affiche les résultats **Far Field** et on sélectionne dans la liste **Quantity** la variable **Realised Gain**. Il s'agit du gain multiplié par la perte par désadaptation (mismatch loss = $1 - |\Gamma|^2$). La figure ci-dessous compare le gain (simulé sans prise en compte de la désadaptation) et le gain effectif (Realised gain, simulé en prenant en compte la désadaptation). On voit très nettement que la mauvaise adaptation conduit à une très nette dégradation du gain. Le gain effectif est optimal à 770 MHz (alors que le gain était optimal à 820 MHz lorsqu'on négligeait les pertes liées à la désadaptation) et n'est que de 2.59 dB (à peine plus qu'un dipôle demi-onde correctement adapté).

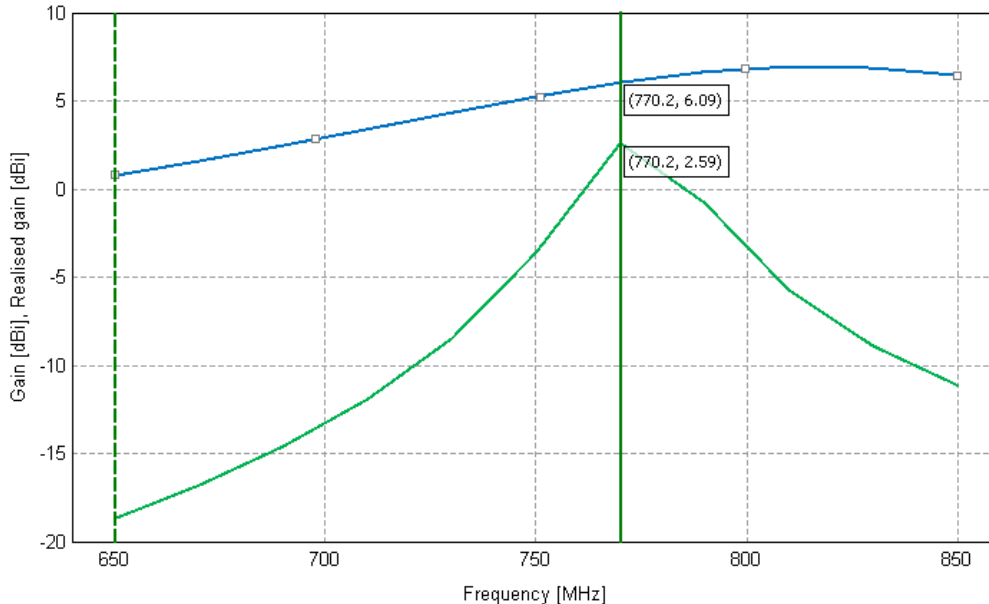


Fig. 28 – Comparaison entre gain et gain effectif (patch_infini)

Pour résumer, si on néglige les pertes par désadaptation dans le calcul, la variable gain donné par FEKO représente le gain de l'antenne correctement adaptée, même si ce n'est pas le cas. La variable Realised Gain compense cette valeur de gain par les pertes par désadaptation.

7. Comparaison avec les résultats du modèle à substrat fini

On ouvre le fichier patch_fini depuis CadFEKO, et on lance PostFEKO pour l'affichage des résultats. On ne comparera ici que l'évolution du gain en fonction de la fréquence, l'angle d'ouverture et le coefficient de réflexion. Rappelons que dans le modèle substrat_fini, on tient compte des dimensions finis du substrat et du plan de masse et des effets des bords des structures. De plus, le maillage est plus important. Tout cela devrait nous donner un résultat de simulation plus réaliste.

La figure ci-dessous présente l'évolution du gain en fonction de la fréquence à la verticale de l'antenne ($\theta = 0^\circ$). Le modèle à substrat fini montre aussi un maximum de gain à 910 MHz de 7 dB. Cependant, il est plus optimiste sur la valeur du gain autour de 650 MHz.

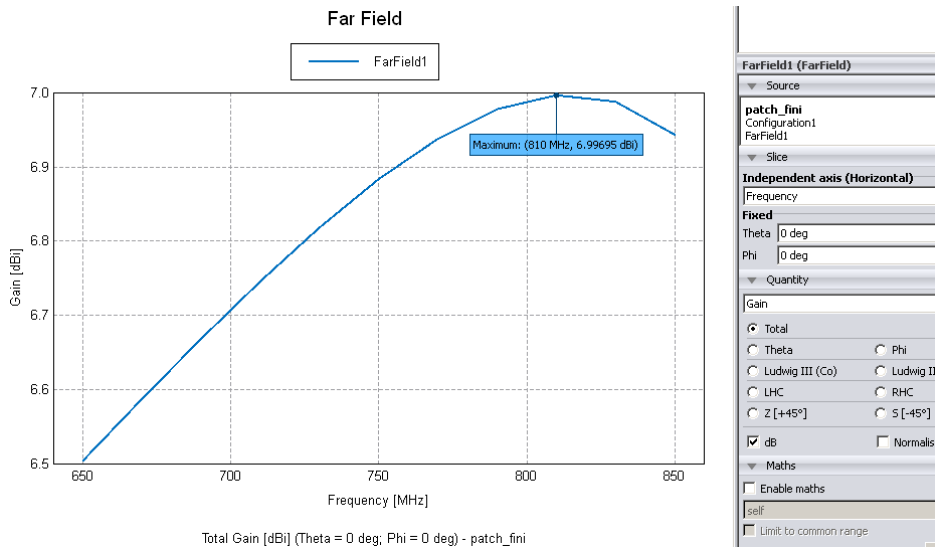


Fig. 29 – Affichage du gain à $\theta = 0^\circ$ et $\phi = 0^\circ$ en fonction de la fréquence (patch_fini)

La figure ci-dessous présente l'évolution du gain en fonction de θ , pour $f = 750$ MHz et $\phi = 0^\circ$. Comme avec le modèle à substrat infini, l'angle d'ouverture à 3 dB est environ de $75 - 80^\circ$. Cependant, avec le modèle à substrat fini, on voit qu'un rayonnement existe en face arrière de l'antenne (pour $|\theta| > 90^\circ$). Dans le cas d'un plan de masse infini, ce rayonnement ne pouvait pas exister. Dans le cas d'un plan de masse fini, les bords du plan de masse rayonne et crée le rayonnement en face arrière. Celui-ci n'est pas forcément négligeable, puisqu'il est à l'origine d'un lobe secondaire de gain 17 dB plus faible que celui du lobe principal.

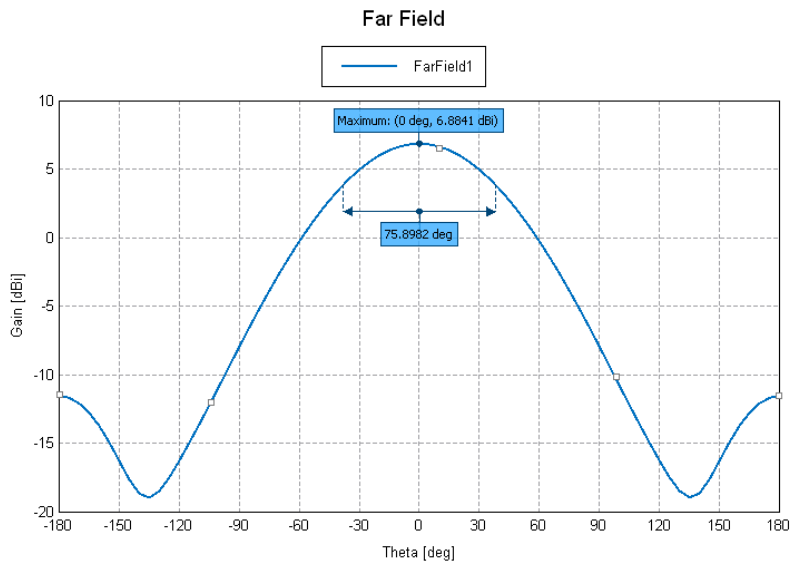


Fig. 30 – Affichage du gain à $\phi = 0^\circ$ et $f = 750$ MHz en fonction de θ (patch_fini)

Enfin, le résultat suivant présente l'évolution du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence. Avec le modèle à substrat fini, le coefficient de réflexion est minimal à une fréquence légèrement plus faible (750 MHz).

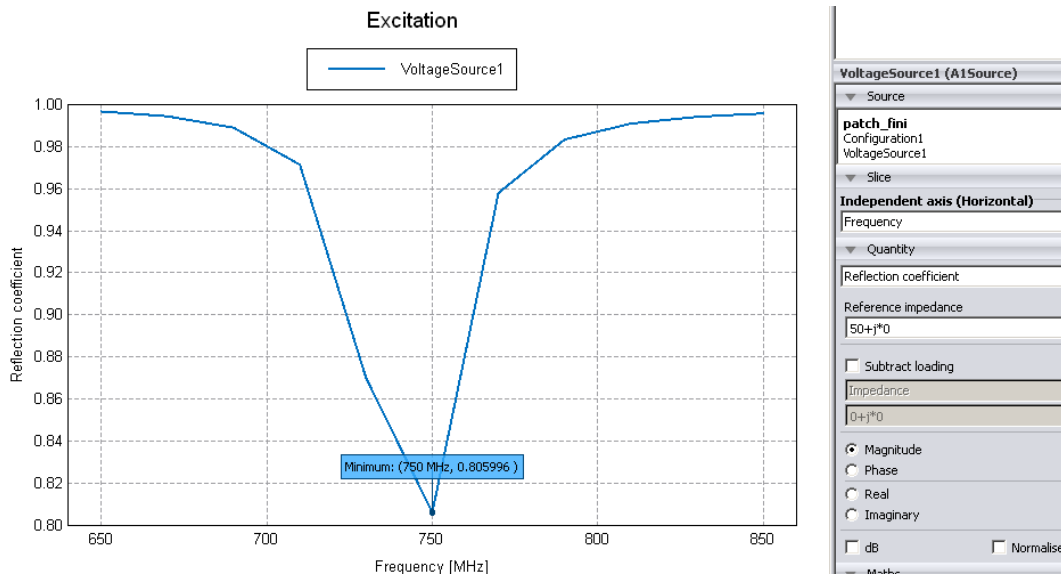


Fig. 31 – Affichage du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence (patch_fini)

Ces résultats montrent que le modèle à substrat infini donne une bonne estimation des performances de l'antenne, mais en ignorant un certain nombre d'effets secondaires, qui ne peuvent être pris en compte uniquement si on modélise un plan de masse fini.

VII. Récapitulatif

Pour toute question supplémentaire sur le logiciel, n'hésitez pas à consulter l'aide du logiciel, en cliquant sur **Help/FEKO user manual**.

Les tableaux ci-dessous récapitulent les icônes principales sous CADFEKO et PostFEKO.





















	Créer un cube		Calcul des courants sur les éléments métalliques
	Créer un rectangle		Calcul en champ lointain
	Créer un fil		Sélectionner une face d'un élément géométrique
	Unir différentes parties d'un modèle géométrique (mise à plat)		Sélectionner les arêtes d'un élément métallique
	Paramétrer les fréquences de calcul		Undo
	Définir un plan de masse ou un substrat infini		Vue 3D par défaut
	Ajout d'une excitation en tension		Zoom (utilisation de la molette de la souris)
	Ajout d'une onde plane incidente		Validation du modèle maillé avant simulation
	Ajout d'une charge		Lancement de FEKO
	Paramétrage de la puissance fournie à l'antenne par la source		Lancement de PostFEKO

Fig. 32 – Principales icônes sous CADFEKO



















	Affichage d'un nouveau modèle 3D		Affichage des résultats de calcul en champ lointain
	Affichage d'une fenêtre graphique 2 D – repère cartésien		Affichage des résultats de calcul en courant
	Affichage d'une fenêtre graphique 2 D – repère polaire		Ajout d'une courbe ou d'une série dans un graphe 2D
	Affichage des résultats de calcul – paramètres de source		Suppression d'une courbe ou d'une série d'un graph 2D
	Affichage des sources		Caractéristiques des courbes dans un graph 2D
	Sélection d'un élément géométrique		Paramètres d'un graph 2D
	Affichage des calculs en champ lointain sur le modèle 3D		Paramètres de l'axe Y d'un graph 2D
	Affichage des courants dans un graph 2D		Paramètres de l'axe X d'un graph 2D
	Affichage dans un graph 2D des paramètres de sources		Zoom sur un graph 2D

Fig. 33 – Principales icônes sous POSTFEKO