

# Formation HFSS

## Simulation d'une ligne microstrip

### Partie 1

Alexandre Boyer

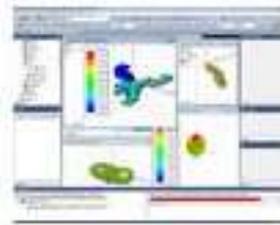
Mai 2020

- > Prise en main de l'environnement ANSYS Electronics Desktop (V16) – HFSS
- > Création d'un projet *from scratch*
- > Flot de modélisation et post-processing typique
- > Utilisation des différentes solutions (driven modal/terminal modal) et excitations (wave port/lumped port)
- > Calcul des paramètres S
- > Calcul tensions/courants à l'aide de la calculatrice de champ
- > Calcul du rayonnement en champ proche et champ lointain
- > Influence du maillage

# ANSYS Electronics Desktop



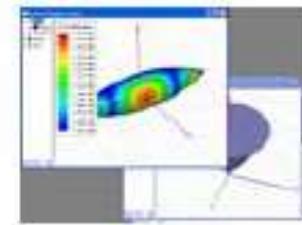
Integrated  
Desktop



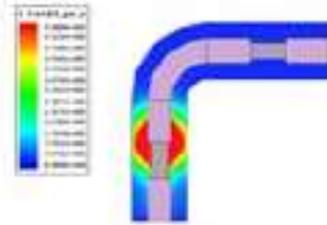
HFSS



HFSS 3D Layout



HFSS-IE



HFSS Transient



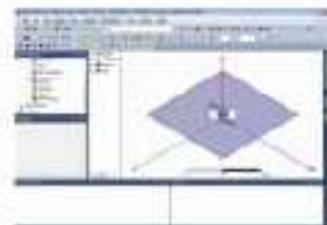
Circuit Design



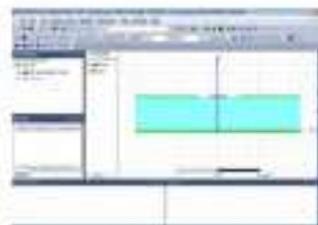
Circuit Netlist  
Design



Filter Design



Q3D Extractor



2D Extractor



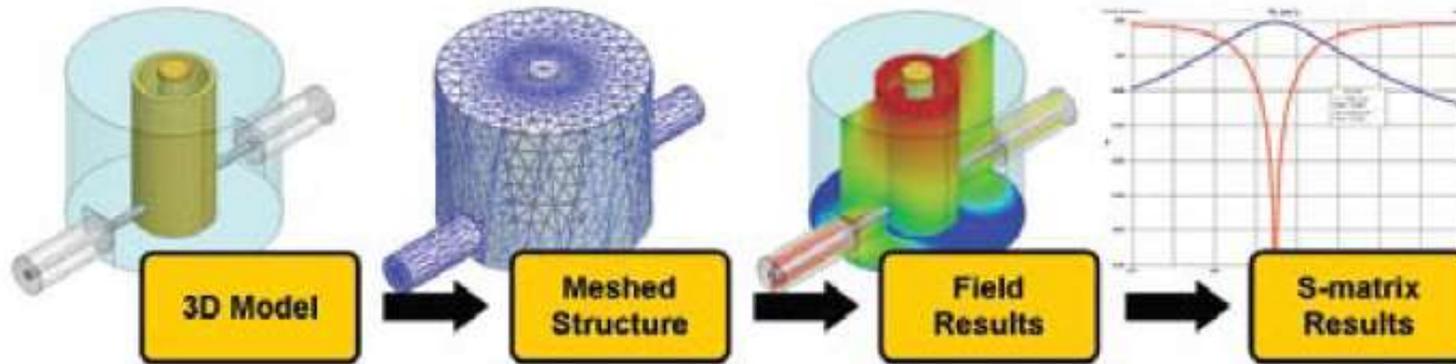
High Performance  
Computing



Workbench  
Integration

# HFSS – méthode FEM

- > Finite Element Method : résolution numérique des équations de Maxwell à l'intérieur d'un volume délimité (*solution space*) et maillé par des tétraèdres, aboutissant au calcul des champs E et H dans ce volume ainsi que la matrice de param. S généralisés.



Maillage +  
fonction de base

$$\begin{cases} \nabla \times \left( \frac{1}{\mu_r} \nabla \times E \right) - k_0^2 \epsilon_r E = 0 \\ H = \frac{J}{\omega \mu} \nabla \times E \end{cases} \xrightarrow{\text{Maillage + fonction de base}} \int_V \left[ (\nabla \times W_n) \cdot \frac{1}{\mu_r} \nabla \times E - k_0^2 \epsilon_r W_n \cdot E \right] dV = \int_S (\text{boundary terms}) dS,$$

$$E = \sum_m^N x_m W_m, \quad n = 1, 2, \dots, M$$

$$\sum x_m \int_V \left[ (\nabla \times W_n) \cdot \left( \frac{1}{\mu_r} \nabla \times W_m \right) - k_0^2 W_n \cdot W_m \right] dV = \int_S (\text{boundary terms}) dS$$

Résolution  
système linéaire

$$\sum x_m A_{n,m} = b_n, \quad n = 1, 2, \dots, N$$

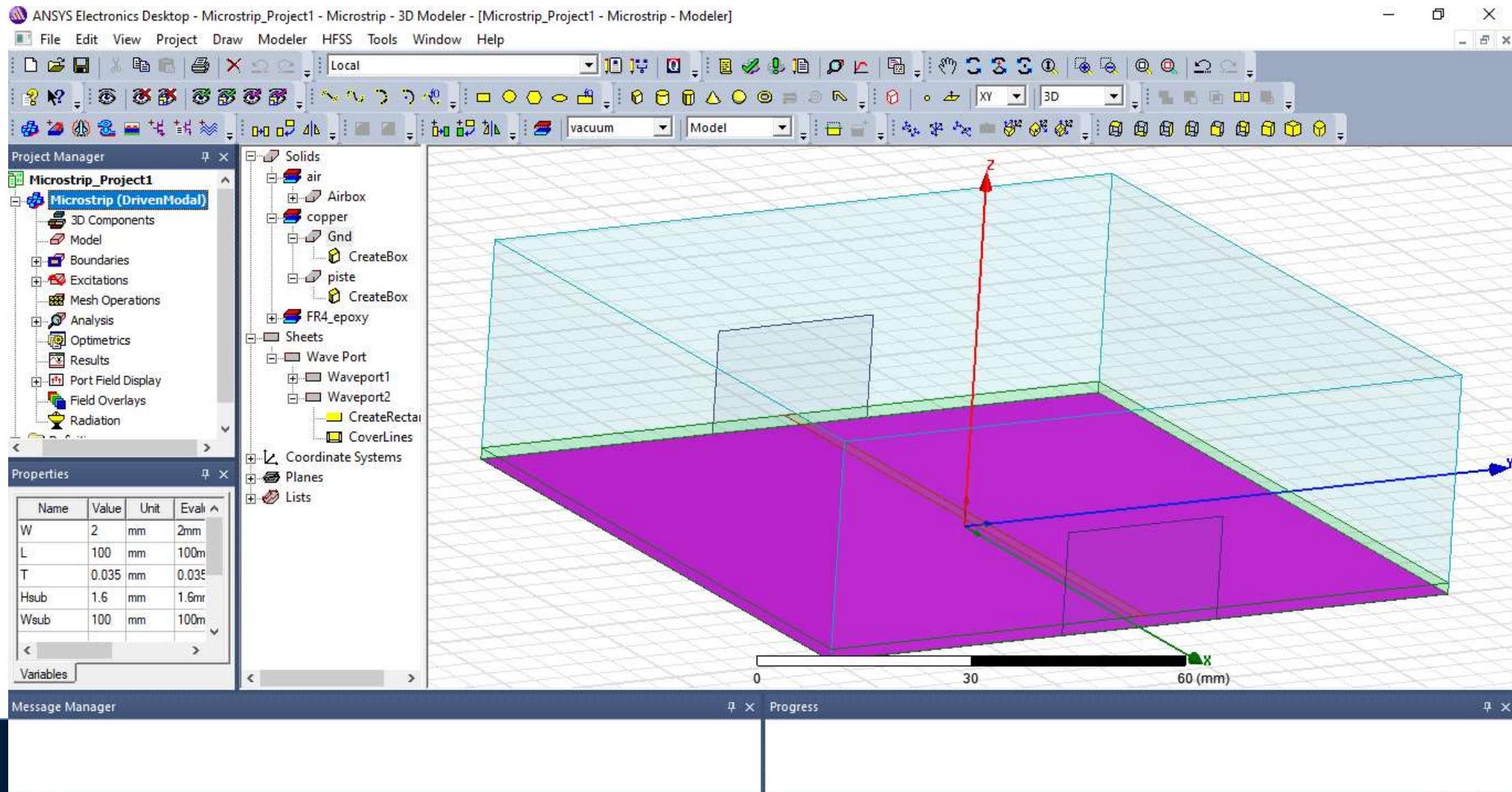
$$Ax = b$$

Dépend des  
conditions aux  
limites+matériaux

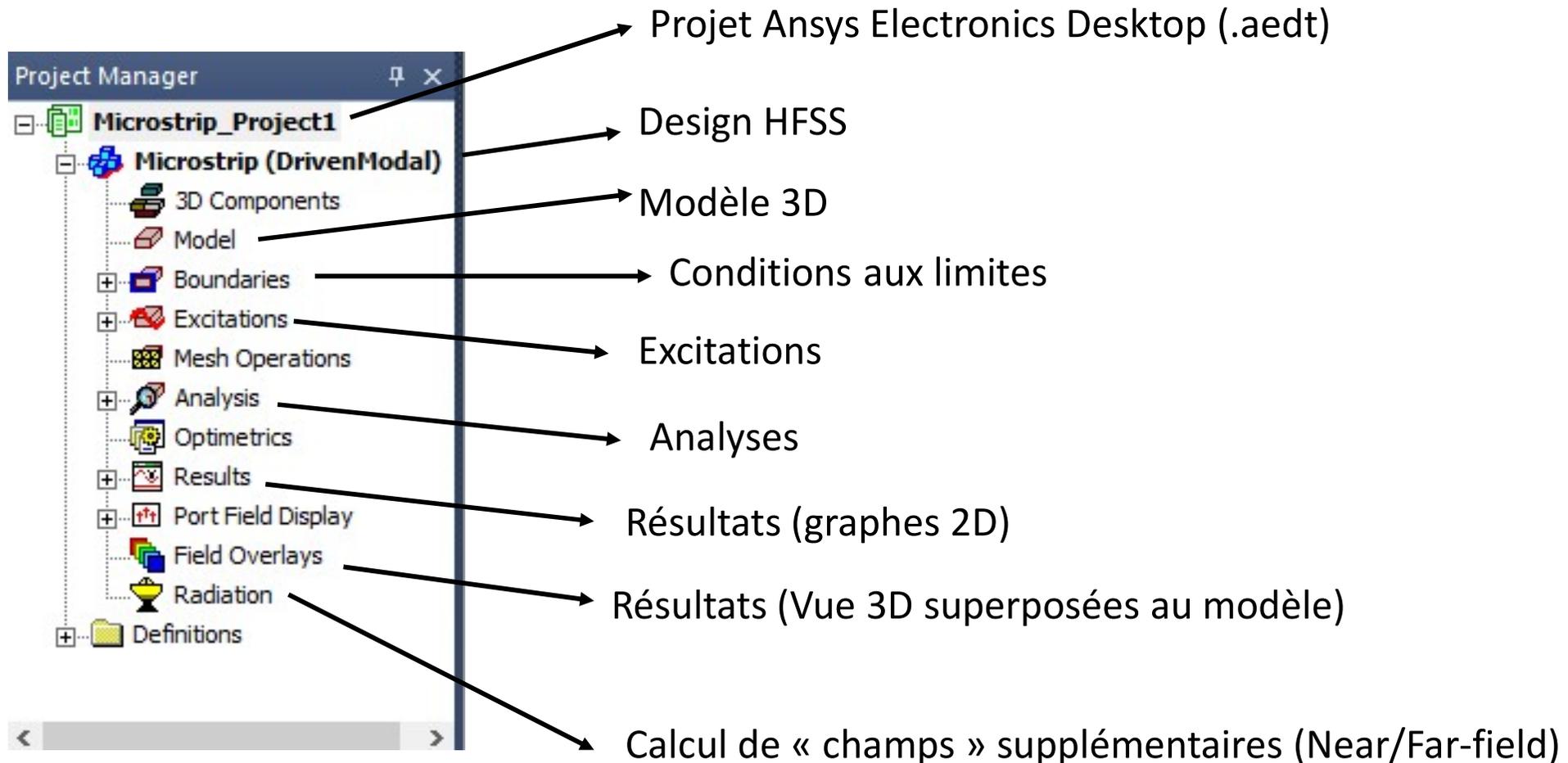
Dépend des  
excitations aux ports  
et ondes incidentes

# HFSS - Interface

- > Lancement via **Ansys Electronics Desktop**
- > Vue de l'interface :



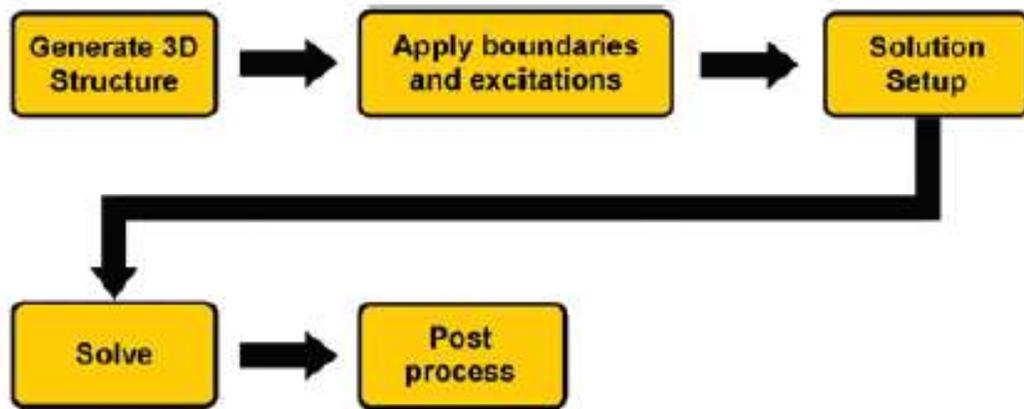
> Structure d'un projet



# HFSS - Processus de conception / simulation

- > Création du modèle 3D(variables, définition objets géométriques, matériaux)
- > Réglage ports/excitations et conditions aux limites
- > Réglage solutions (fréq. et param. de calcul)
- > Maillage adaptatif et analyse
- > Post-processing

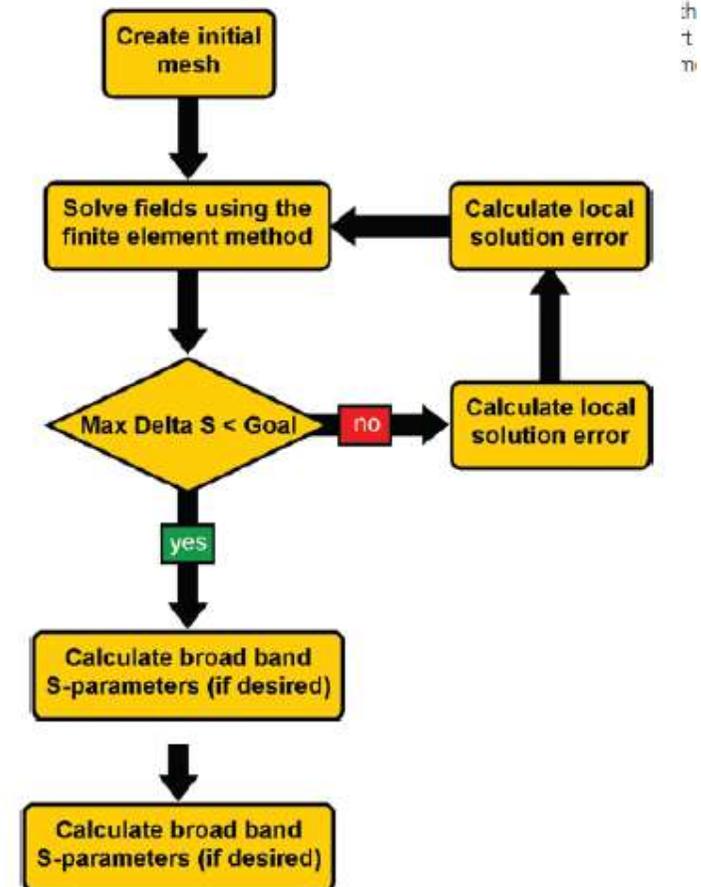
In Pictures



« An introduction to HFSS : Fundamental Principles, Concepts and Use »

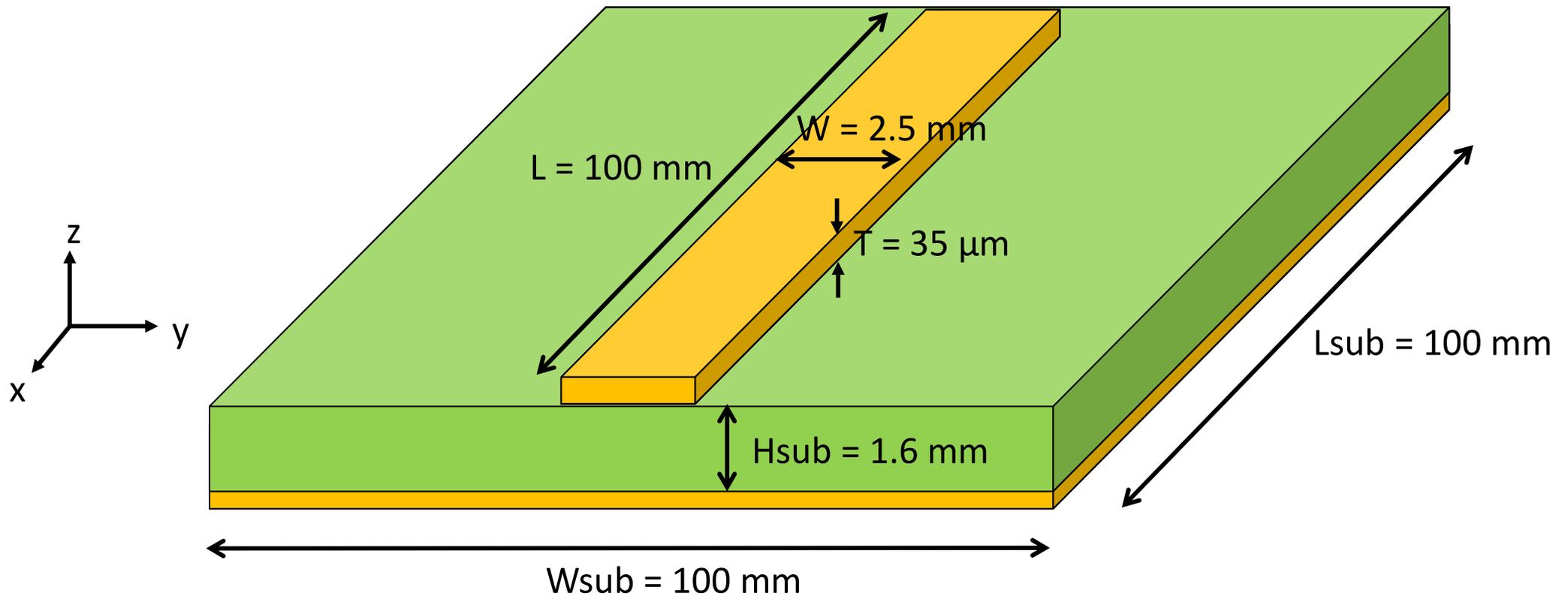
## The Adaptive Solution Process and Its Importance to HFSS

In Pictures



h  
t  
m

- > Ligne microruban de géométrie
  - > Simulation des paramètres S
- ✓ Piste et plan de masse en cuivre, sur substrat FR4 ( $\epsilon_r = 4.4$ )
  - ✓ Origine du repère placé au centre de la ligne, sur le plan de masse.



# Sélection Type of solution

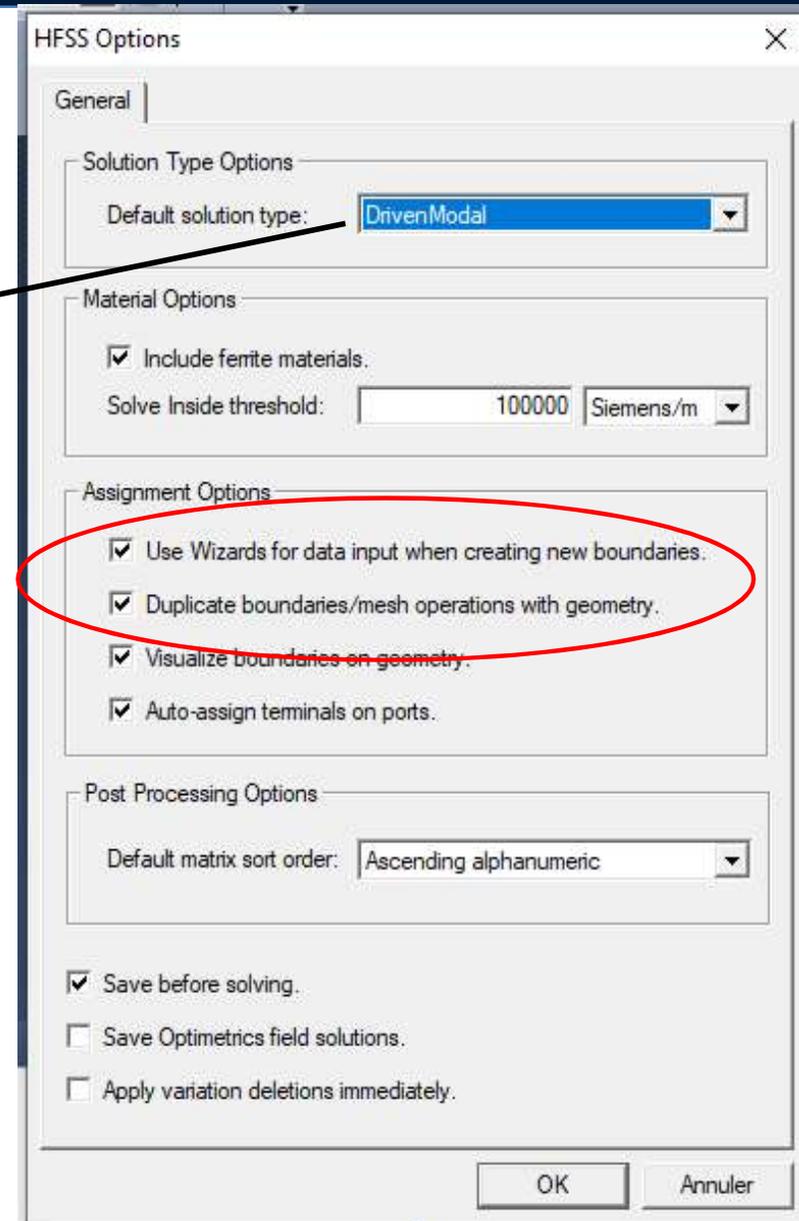
- > Driven modal ou Driven terminal (eigen mode omis ici, intéressant pour l'étude des modes de résonance des structures)
- > Driven modal → paramètres S et tout est exprimé en puissance incidente/réfléchie
- > Driven terminal → paramètres S et tout est exprimé en tension/courant

# Premières options à régler

> **Tools > Options > General Options :**

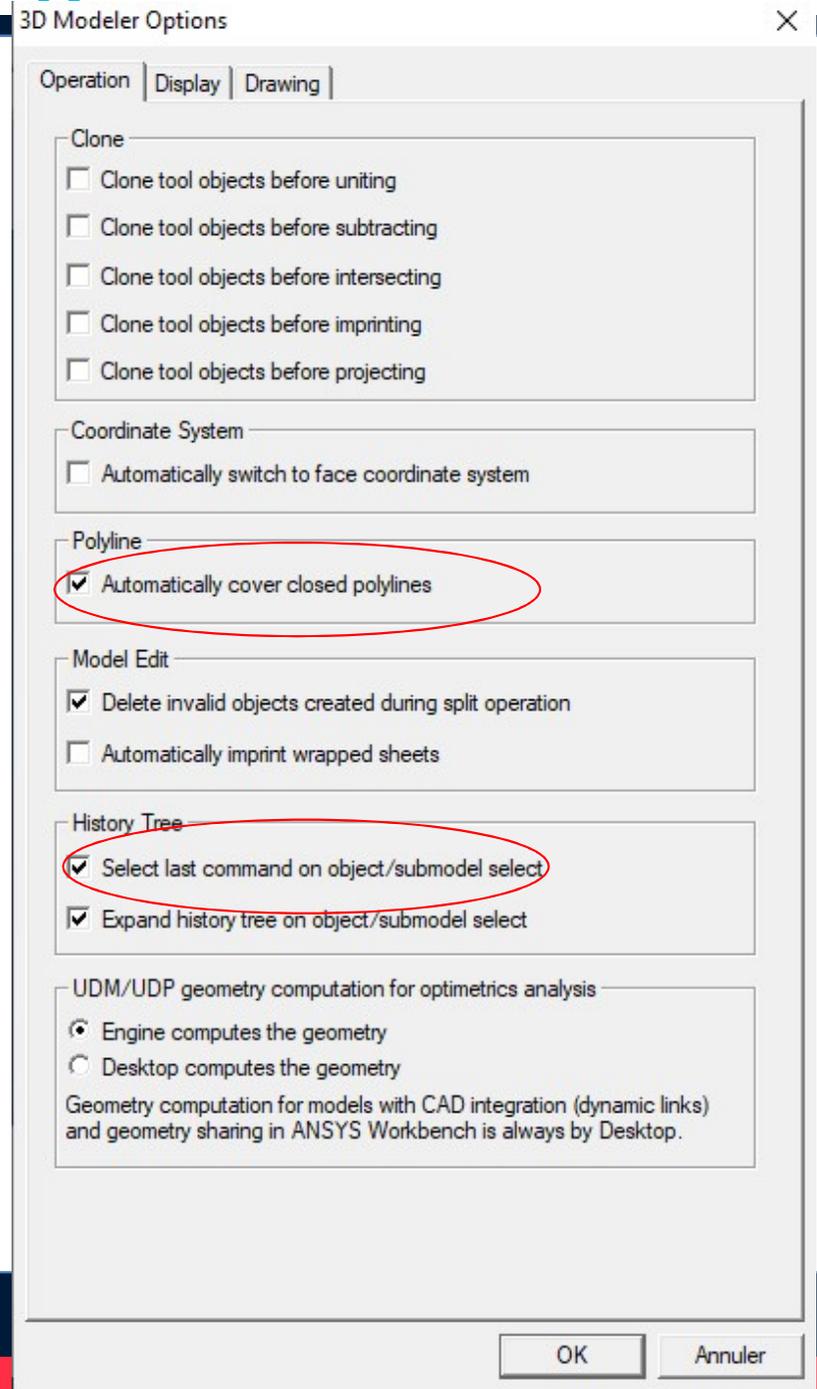
Important : permettra de changer le type de solution (faisable à tout moment)

On commence avec une solution de type **Driven modal**.



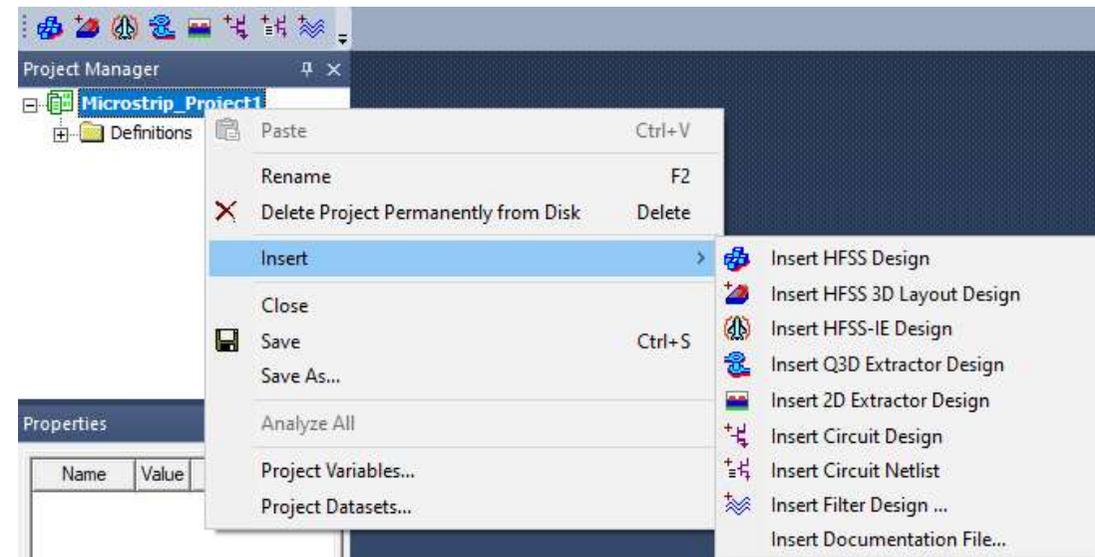
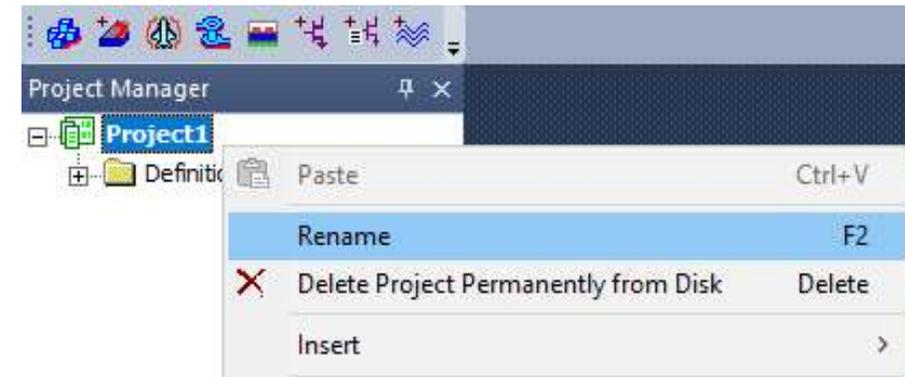
# Premières options à régler

- > **Tools > Options > 3D Modeler Options :**
- > Dans le volet Drawing, cochez « Edit Properties of New Primitives »



# Création du projet / design HFSS

- > **File > New** → création d'un nouveau projet
- > Renommer en Microstrip\_Project1
- > Insertion d'un design HFSS, qu'on nommera Microstrip. 
- > **File > Save as** → sauvegarde du projet
- > Réglage du type de solution (**Tools > Options > General Options**)
- > Réglage des unités (en mm) : **Modeler > Units**



# Création des variables

- > Avant de se lancer dans la saisie du modèle 3D, toujours le dessiner sur papier et identifier les variables contrôlant sa géométrie, ainsi que les éventuelles équations les reliant.
- > L'utilisation des variables va permettre de créer des objets paramétriques, facilement modifiables.
- > On va entrer toutes les variables définissant la géométrie de la ligne microruban.
- > **HFSS > Design properties > bouton Add** ou clic droit sur le nom du projet > **Design properties**

Properties: Microstrip\_Project1 - Microstrip

Local Variables

Value
  Optimization
  Tuning
  Sensitivity
  Statistics

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Type	Description	Read-only	Hidden
W	2	mm	2mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Add Property

Name:

Variable
  Separator
  PostProcessingVariable

ArrayIndexVariable

Unit Type:  Units:

Value:

Enter initial value into Value field. This should be a number, variable, or expression. Referenced project variables should be prefixed with a '\$'. Examples: 22.4pF, \$C1, 2\*cos(\$x).

OK Cancel

# Les objets géométriques

> Sous HFSS, on peut représenter :

- **Des volumes** → tous les objets physiques du modèle; un matériau doit leur être attribué (maillage volumique lié à la FEM)
- **Des surfaces** → soit pour définir une condition aux limites (excitation, PEC, lumped RLC ...), soit pour définir un objet non réel (surface de mesure). Non maillé.
- **Des lignes (edge)** → Un objet non réel, uniquement dédié à la mesure. Non maillé.
- **Des points** → Un objet non réel, uniquement dédié à la mesure. Peu utilisé.



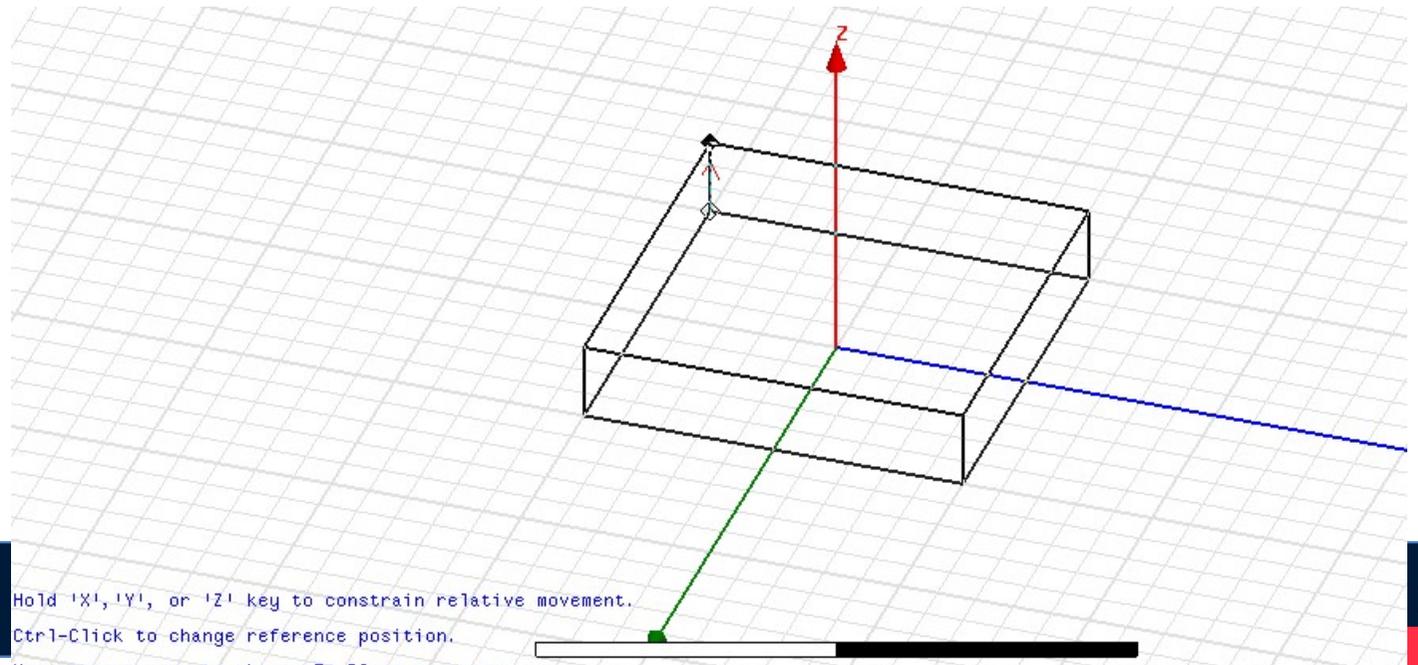
# Définition du modèle

- > La géométrie peut être créée à l'aide de 3 parallélépipèdes : piste, substrat, plan de masse.
- > Clic sur **Draw Box** (dispo aussi dans **Draw > Draw box**)



Drawing plane

- > Commençons par le plan de masse.
- > Cliquez n'importe où dans un plan XY pour placer le premier point, puis les 2 autres points pour définir la forme de dimensions arbitraires.



# Définition du modèle

- > La fenêtre pop-up ci-dessous s'ouvre pour modifier les dimensions géométriques :

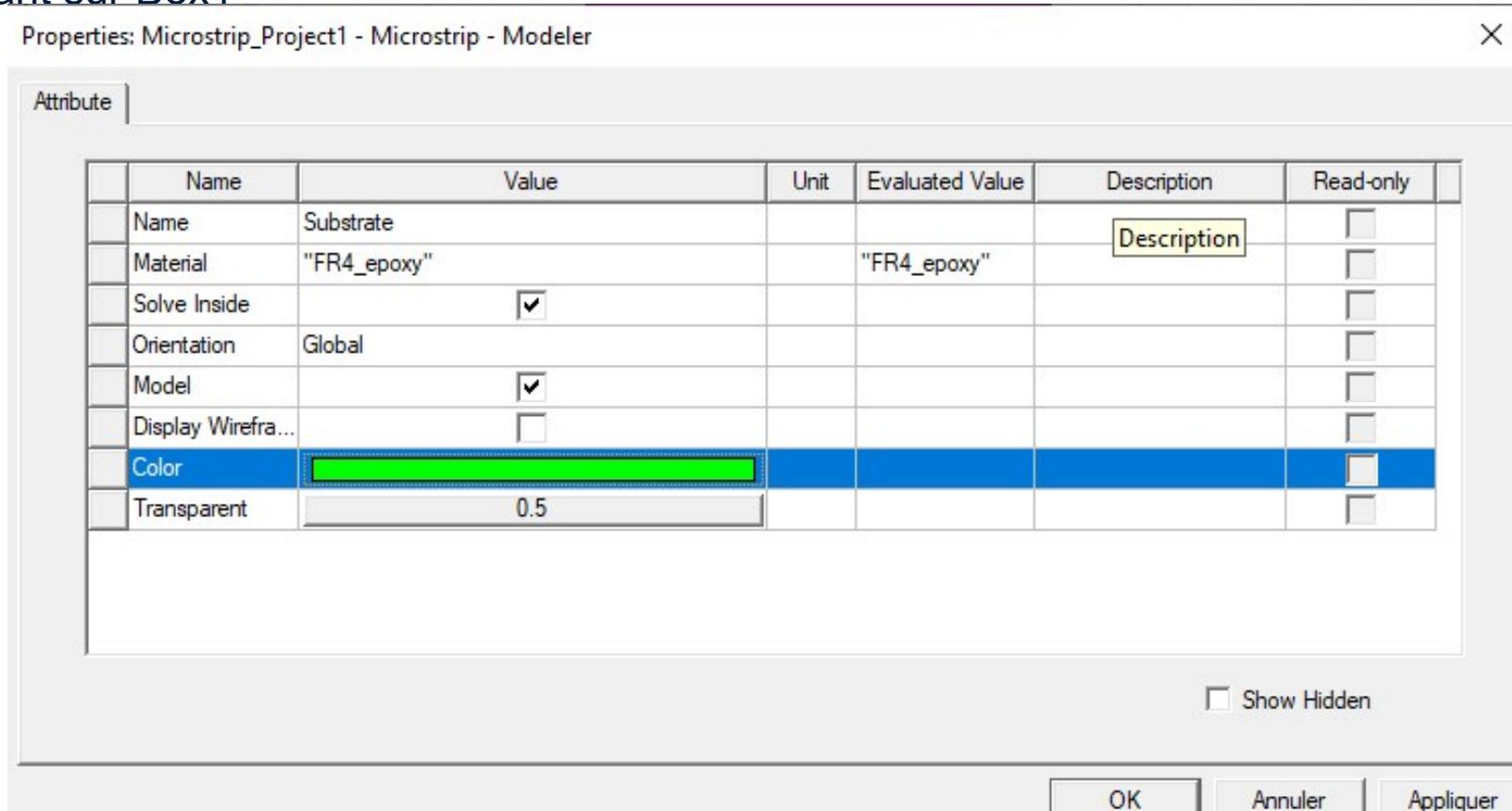
The screenshot shows a CAD software interface. On the left, a tree view displays a hierarchy of objects: Solids, vacuum, Box1, and CreateBox. A red arrow points to the 'CreateBox' object, with the text 'Nouvel objet géométrique créé' (New geometric object created) next to it. The main window shows a 3D model of a box on a grid. A red arrow points to the Z-axis of the coordinate system. A 'Properties: Microstrip\_Project1 - Microstrip - Modeler' dialog box is open, displaying the following table:

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Di
Command	CreateBox			
Coordinate Sys...	Global			
Position	-Lsub/2 , -Wsub/2 , 0mm		-50mm , -50mm , 0mm	
XSize	Lsub		100mm	
YSize	Wsub		100mm	
ZSize	Hsub		1.6mm	

At the bottom of the dialog box, there is a 'Show Hidden' checkbox and three buttons: 'OK', 'Annuler', and 'Appliquer'.

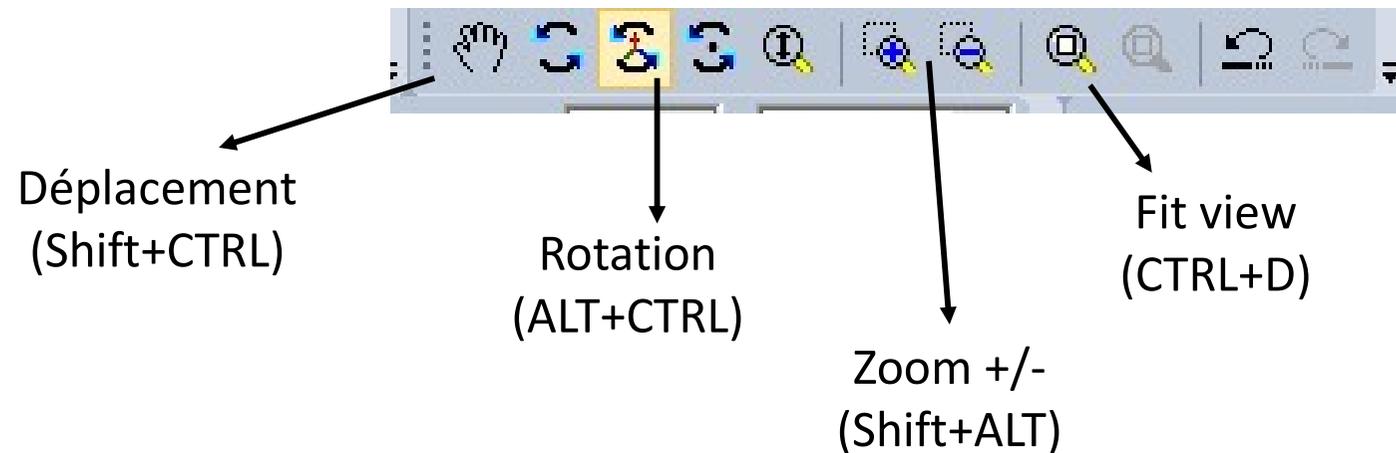
# Définition du modèle

- > Modifiez le nom, la couleur, la transparence de cet objet ainsi que les propriétés des matériaux en double-cliquant sur Box1



# Définition du modèle

- > Les contrôles 3D de la fenêtre graphique



# Définition du modèle

> Création du plan de masse

Properties: Microstrip\_Project1 - Microstrip - Modeler

Command

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateBox			
Coordinate Sys...	Global			
Position	-Lsub/2 , -Wsub/2 , -T		-50mm , -50mm , -0.035mm	
XSize	Lsub		100mm	
YSize	Wsub		100mm	
ZSize	T		0.035mm	

Properties: Microstrip\_Project1 - Microstrip - Modeler

Attribute

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Name	Gnd				<input type="checkbox"/>
Material	"copper"		"copper"		<input type="checkbox"/>
Solve Inside	<input checked="" type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>
Orientation	Global				<input type="checkbox"/>
Model	<input checked="" type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>
Display Wirefra...	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>
Color					<input type="checkbox"/>
Transparent	0.8				<input type="checkbox"/>

A cocher si on veut calculer les champs à l'intérieur de la piste

# Définition du modèle

> Création de la piste

Properties: Microstrip\_Project1 - Microstrip - Modeler



Command

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateBox			
Coordinate Sys...	Global			
Position	-L/2 , -W/2 , Hsub		-50mm , -1mm , 1.6mm	
XSize	L		100mm	
YSize	W		2mm	
ZSize	T		0.035mm	

Properties: Microstrip\_Project1 - Microstrip - Modeler



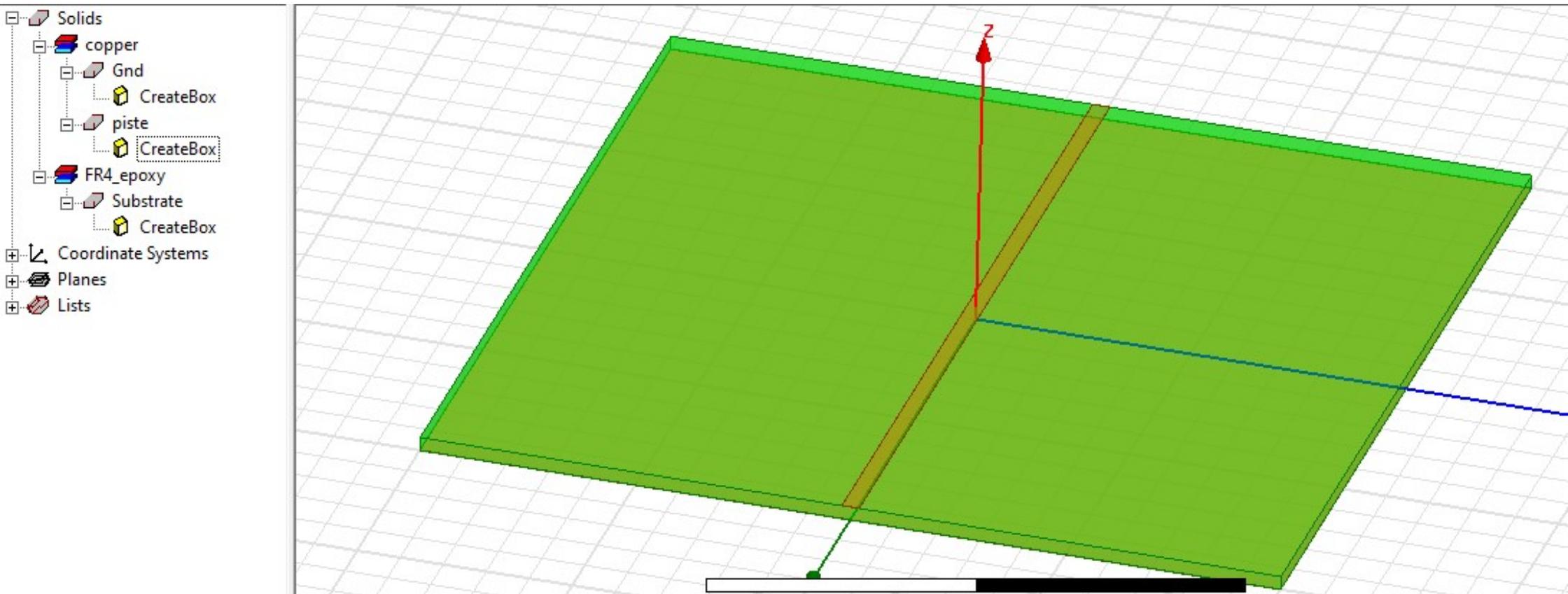
Attribute

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Name	piste				<input type="checkbox"/>
Material	"copper"		"copper"		<input type="checkbox"/>
Solve Inside	<input checked="" type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>
Orientation	Global				<input type="checkbox"/>
Model	<input checked="" type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>
Display Wirefra...	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>
Color					<input type="checkbox"/>
Transparent	0.8				<input type="checkbox"/>

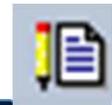
A cocher si on veut calculer les champs à l'intérieur de la piste

# Définition du modèle

- > Le modèle géométrique est terminé et doit ressembler à ça :



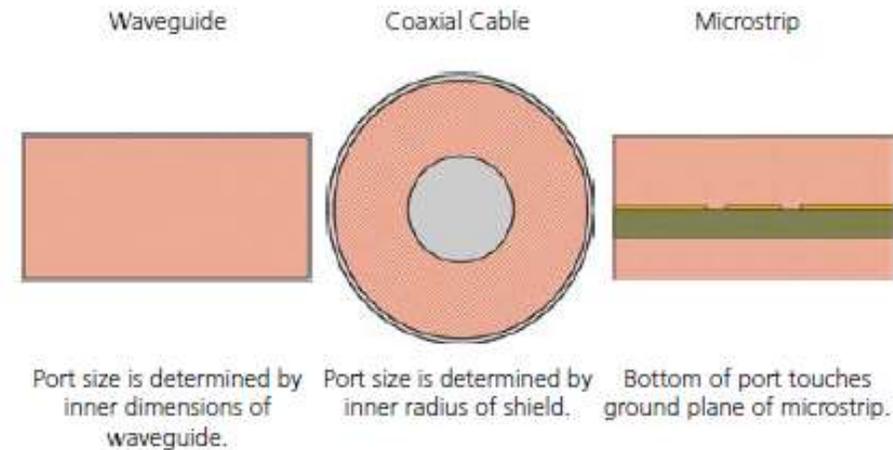
- > Conseil : il peut être intéressant d'ajouter des notes perso à un modèle (**HFSS > Edit design notes**)



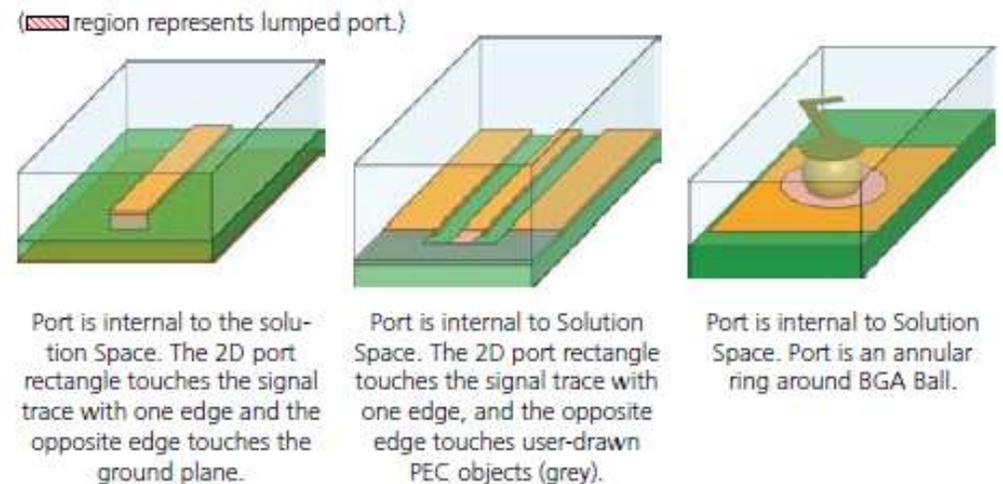
# Création des excitations

Les 2 excitations les plus courantes :

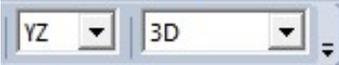
- > **Wave port** : adapté au cas d'une ligne de transmission de section bien définie. Doit être appliqué sur une **face externe** du modèle



- > **Lumped port** : pour représenter une excitation en tension dans un « gap ». Est appliqué à **l'intérieur du modèle**.



# Création des excitations

- > Changer le drawing plane → YZ 
- > Ajoutez les 2 variables suivantes : Wwave = 25 mm et Hwave = 15 mm.
- > Dessiner deux rectangles (**Draw Rectangle**) aux deux extrémités de la ligne, pour définir la position du port (de type Wave port). L'outil va calculer les propriétés de ce port (impédance carac.) à partir de la section de la ligne identifiée à l'intérieur de ce rectangle.

Properties: Microstrip\_Project1 - Microstrip - Modeler

Command

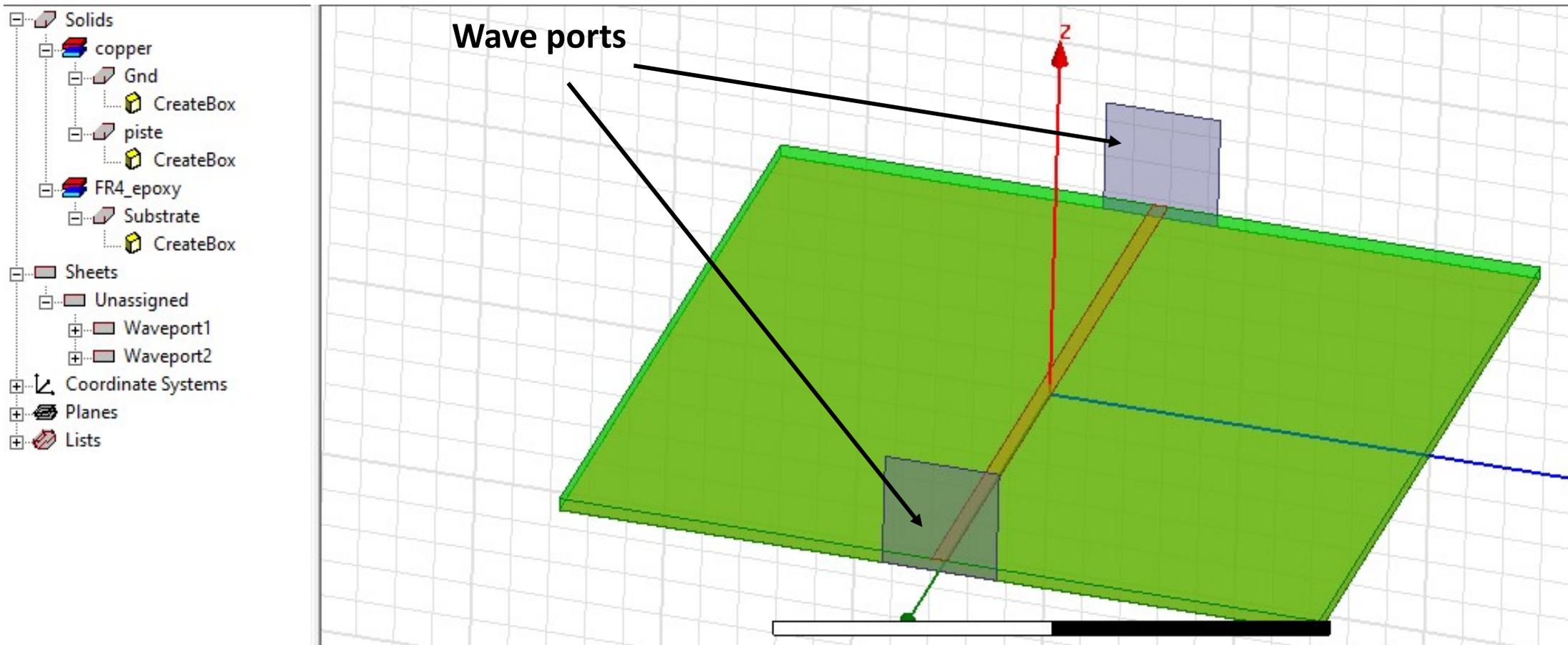
Name	Value	Unit	Evaluated Value	D
Command	CreateRectangle			
Coordinate Sys...	Global			
Position	-L/2 , -Wwave/2 , 0		-50mm , -7.5mm , 1.6mm	
Axis	X			
YSize	Wwave	15mm		
ZSize	Hwave	15mm		

Properties: Microstrip\_Project1 - Microstrip - Modeler

Command | Attribute

Name	Value	Unit	Evaluated Value	D
Command	CreateRectangle			
Coordinate Sys...	Global			
Position	L/2 , -Wwave/2 , 0mm		50mm , -7.5mm , 0mm	
Axis	X			
YSize	Wwave	15mm		
ZSize	Hwave	15mm		

# Création des excitations



- > Taille du waveport suggéré pour une ligne microstrip :  $10w \times 6h$

# Création des excitations

- > Sélectionnez le premier rectangle (**Edit > Select > Faces**), clic droit : **Assign Excitation > Waveport**
- > Attribuez numéro 1
- > Modes : laissez par défaut
- > Post-processing :
- > Terminez → on a créé le waveport1
  
- > Même chose pour le second rectangle → waveport2

Wave Port : Post Processing

Port Renormalization

Do Not Renormalize

Renormalize All Modes

Full Port Impedance:

Renormalize Specific Modes

Deembed Settings

Deembed Distance:

Positive distance will deembed the port into the model.

# Création des conditions aux limites

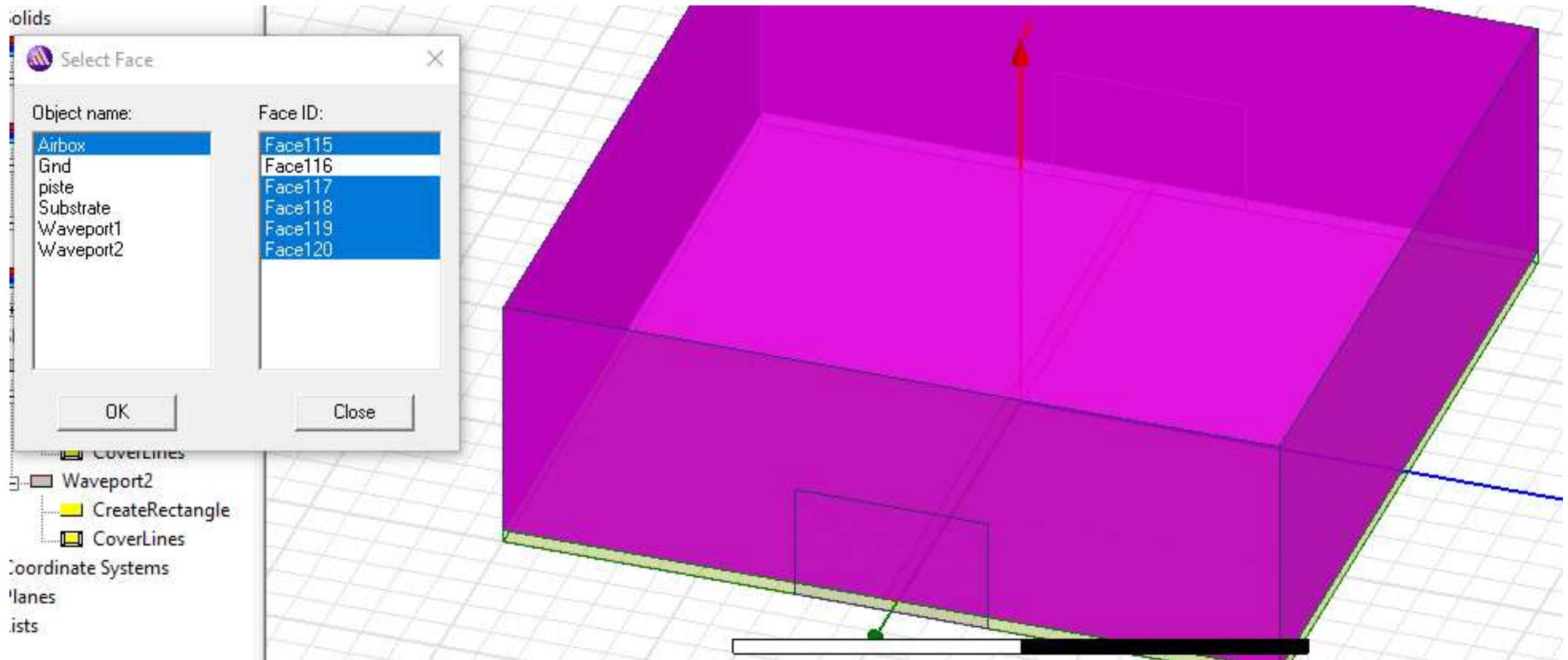
- > Tout l'espace autour du modèle est considéré par défaut comme du Perfect Electric Conductor (PEC) → il faut le changer si on veut créer un volume ouvert.
- > Définition de l'**Air Box**.
- > Dimensions recommandées : compromis entre précision et temps de calcul. Une distance d'au moins  $\lambda/4$  entre le modèle et le bord rayonnant.
- > Dessin d'une boîte autour du design (**Drawing Plane** → **XY** et **Draw Box**)

	Name	Value	Unit	Evaluated Value	D
	Command	CreateBox			
	Coordinate Sys...	Global			
	Position	-Lsub/2 , -Wsub/2 , 0		-50mm , -50mm , 0	
	XSize	Lsub		100mm	
	YSize	Wsub		100mm	
	ZSize	Hairbox		32mm	

	Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
	Name	Airbox				<input type="checkbox"/>
	Material	"air"		"air"		<input type="checkbox"/>
	Solve Inside	<input checked="" type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>
	Orientation	Global				<input type="checkbox"/>
	Model	<input checked="" type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>
	Display Wirefra...	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>
	Color					<input type="checkbox"/>
	Transparent	0.4				<input type="checkbox"/>

# Création des conditions aux limites

- > Création de limites de type « Radiation boundary » au-dessus du substrat → espace ouvert.
- > Sélection des faces par : **Edit > Select > By name** 



# Création des conditions aux limites

> Clic droit > **Assign Boundary** > **Radiation**

Radiation Boundary ×

Name:

Radiating Only  
 Incident Field  
 Enforced E Field  
 Enforced H Field

Model exterior as HFSS-IE domain  
 Reference for FSS  
 Include for near/far field calculation  
(Not appropriate when source is on an internal surface)

---

# Réglage des solutions

- > **HFSS > Analysis setup > Add solution setup** : on définit la fréquence à laquelle la structure sera maillée et le processus de calcul adaptatif sera effectué (nom Setup1)

Driven Solution Setup

General | Options | Advanced | Expression Cache | Derivatives | Defaults

Setup Name:

Enabled  Solve Ports Only

Solution Frequency:  GHz

Adaptive Solutions

Maximum Number of Passes:

Maximum Delta S

Use Matrix Convergence

OK Annuler

Driven Solution Setup

General | Options | Advanced | Expression Cache | Derivatives | Defaults

Initial Mesh Options

Do Lambda Refinement  
Lambda Target:   Use Default Value

Use Free Space Lambda

Adaptive Options

Maximum Refinement Per Pass:  %

Maximum Refinement:

Minimum Number of Passes:

Minimum Converged Passes:

Solution Options

Order of Basis Functions:

Direct Solver

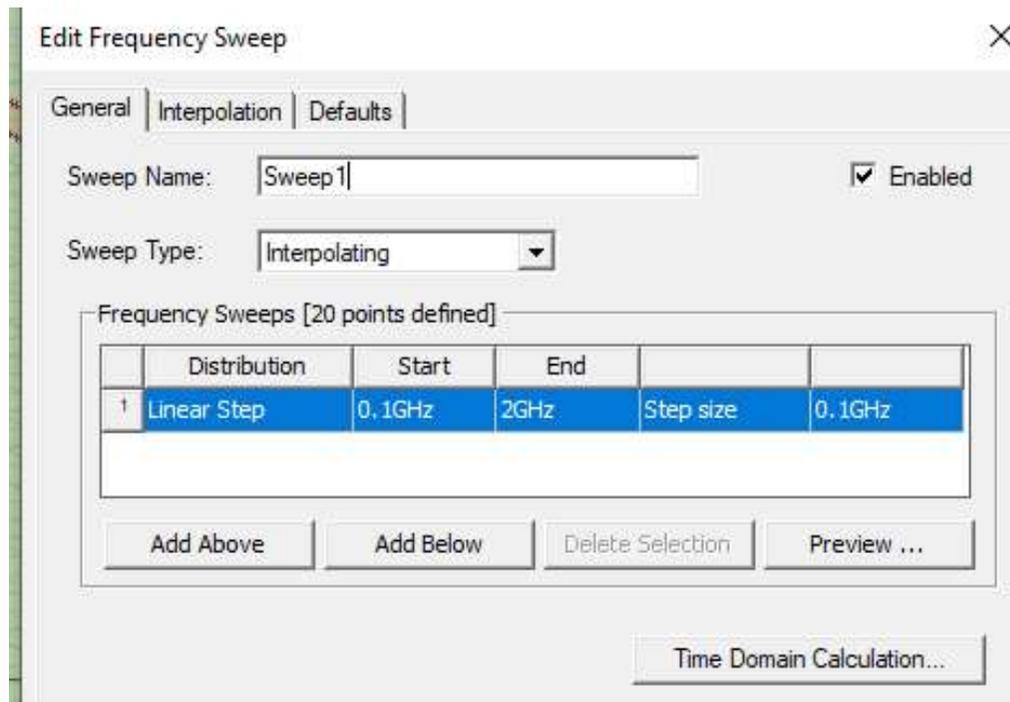
Iterative Solver  
Relative Residual:

Domain Decomposition  
Relative Residual:

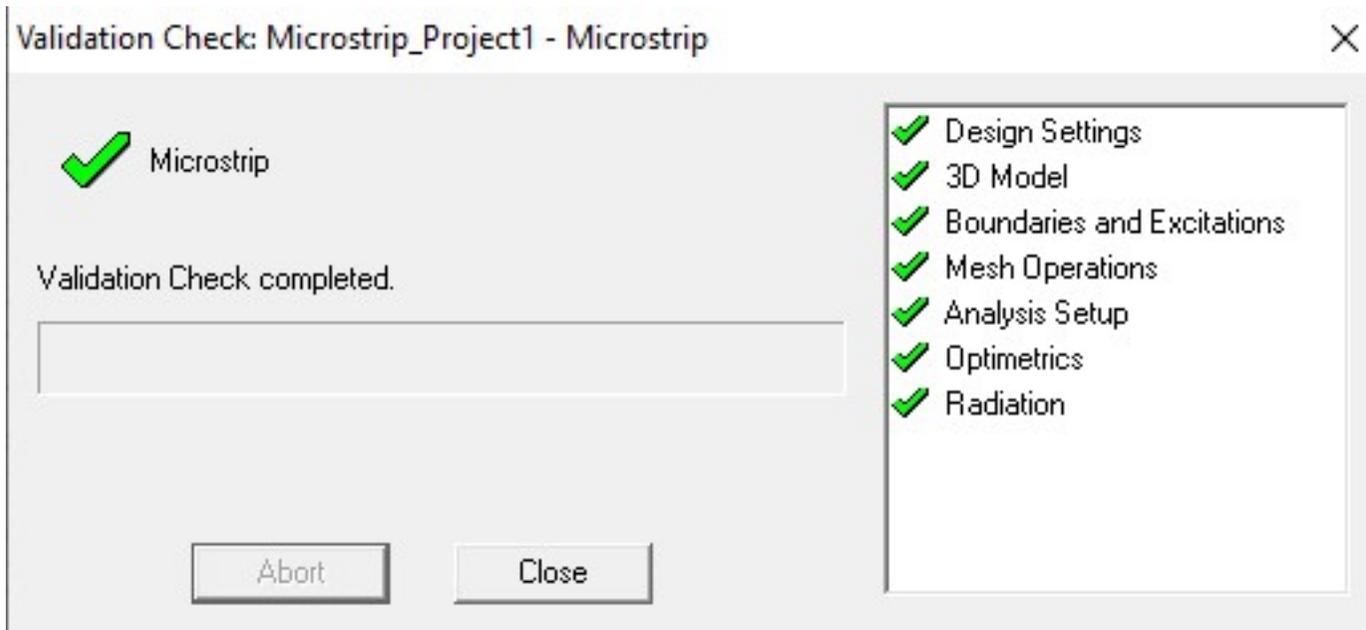
OK Annuler

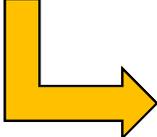
# Réglage des solutions

- > **HFSS > Analysis setup > Add Frequency sweep**: on définit la plage de fréquence sur laquelle on calcule les solutions (le maillage n'est pas raffiné à ces fréquences)
- > On sélectionne Setup1.



- > **HFSS > Validation check**  : vérification du modèle (géométrie, excitation, conditions aux limites) et de l'analyse.



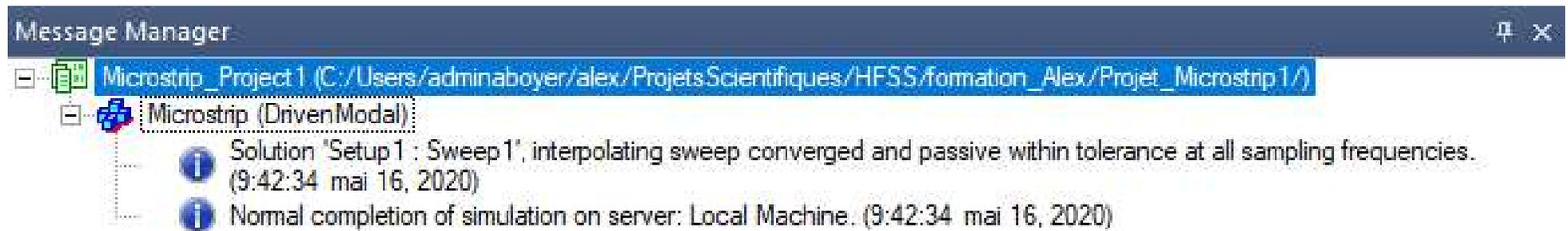
 **Quand tout va bien !**

# Lancement de la simulation

> HFSS > Analyze All



- > Temps de calcul dépendant du nombre de mailles, du nombre de fréquence, du nombre de passes pour converger ....
- > Toujours commencer par un nombre réduit de fréquences et de passes pour évaluer le temps de calcul requis pour le modèle et la simulation finale
- > Avancement visible dans la fenêtre **Progress**.
- > Si la simulation se termine correctement :



# Analyse des résultats

> HFSS > Results > Solution data



> Visualisation du temps de simulation, de la convergence, du maillage ...

Solutions: Microstrip\_Project1 - Microstrip

Simulation: Setup1

Design Variation: Hwave='15mm' L='100mm' Lsub='100mm' T='0.035mm' W='2mm' Wsub='100mm' Wwave='25mm'

Profile | Convergence | Matrix Data | Mesh Statistics

Task	Real Time	CPU Time	Memory	Information
Field Recovery	00:00:00	00:00:00	144 M	Disk = 0 KBytes, 2 excitations
				Interpolation Error: S Matrix error 0.634239 %
Frequency: 0.325 GHz				Full Solution # 7
Simulation Setup	00:00:00	00:00:00	27.9 M	Disk = 0 KBytes
Matrix Assembly	00:00:00	00:00:00	44.9 M	Disk = 0 KBytes, 4212 tetrahedra , 1: 90 triangles , 2: 96
Solver DCS1	00:00:01	00:00:01	143 M	Disk = 0 KBytes, matrix size 28046 , matrix bandwidth 20
Field Recovery	00:00:00	00:00:00	143 M	Disk = 0 KBytes, 2 excitations
				Maximum Passivity Error for S Matrix : 0
				Interpolating sweep converged and passive within tolerar
Solution Process				Elapsed time : 00:00:17 , Hfss ComEngine Memory : 42.8
Total	00:00:06	00:00:06		Time: 05/16/2020 09:42:34, Status: Normal Completion

Solutions: Microstrip\_Project1 - Microstrip

Simulation: Setup1

Design Variation: Hwave='15mm' L='100mm' Lsub='100mm' T='0.035mm' W='2mm' Wsub='100mm' Wwave='25mm'

Profile | Convergence | Matrix Data | Mesh Statistics

Number of Passes  
Completed 10  
Maximum 10  
Minimum 2

Max Mag. Delta S  
Target 0.02  
Current 0.0099511

View: Table Plot

X: Pass Number

Y: Max Mag. Delta S

CONVERGED

Consecutive Passes  
Target 2  
Current 2

Default Settings  
Save Defaults Clear Defaults

Solutions: Microstrip\_Project1 - Microstrip

Simulation: Setup1

Design Variation: Hwave='15mm' L='100mm' Lsub='100mm' T='0.035mm' W='2mm' Wsub='100mm' Wwave='25mm'

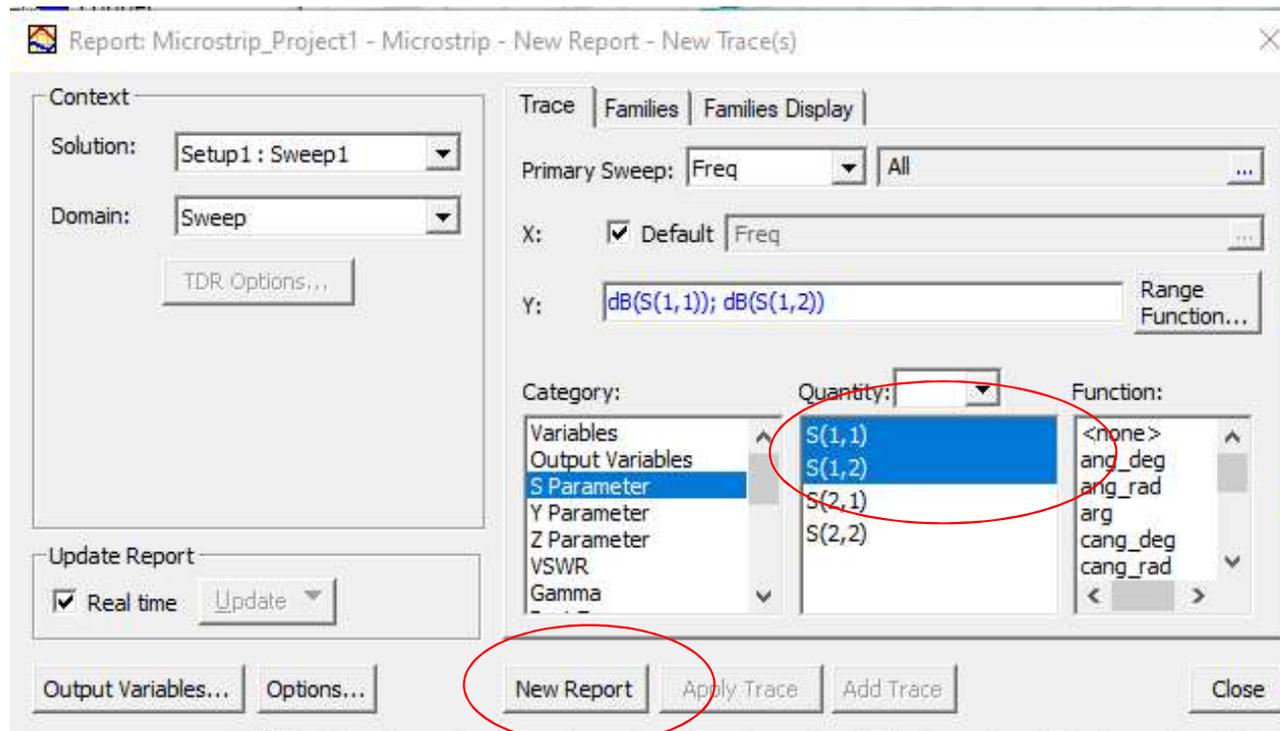
Profile | Convergence | Matrix Data | Mesh Statistics

Total number of elements: 5099

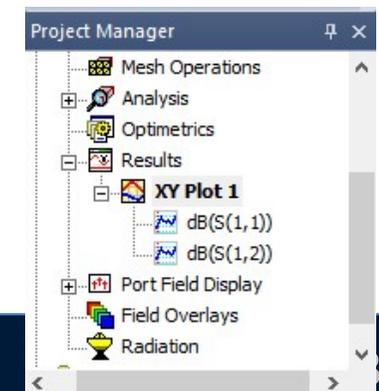
	Num Tets	Min edge len...	Max edge len...	RMS edge len...	Min tet vo...	Max tet vo...	Mean tet v...	Std Devn
Airbox	2285	1.4804	70.7107	12.6108	0.0002257...	10207.4...	133.039...	719.497...
Gnd	658	2.43154	100	15.8692	0.0027904...	22.0651...	0.531915...	1.40808...
piste	229	1.70174	26.2482	8.43901	0.0002000...	0.081254...	0.0305677...	0.019507...
Substrate	1927	1.22951	39.9553	8.20595	0.0769203...	227.561...	8.30306...	25.9939...

# Analyse des résultats

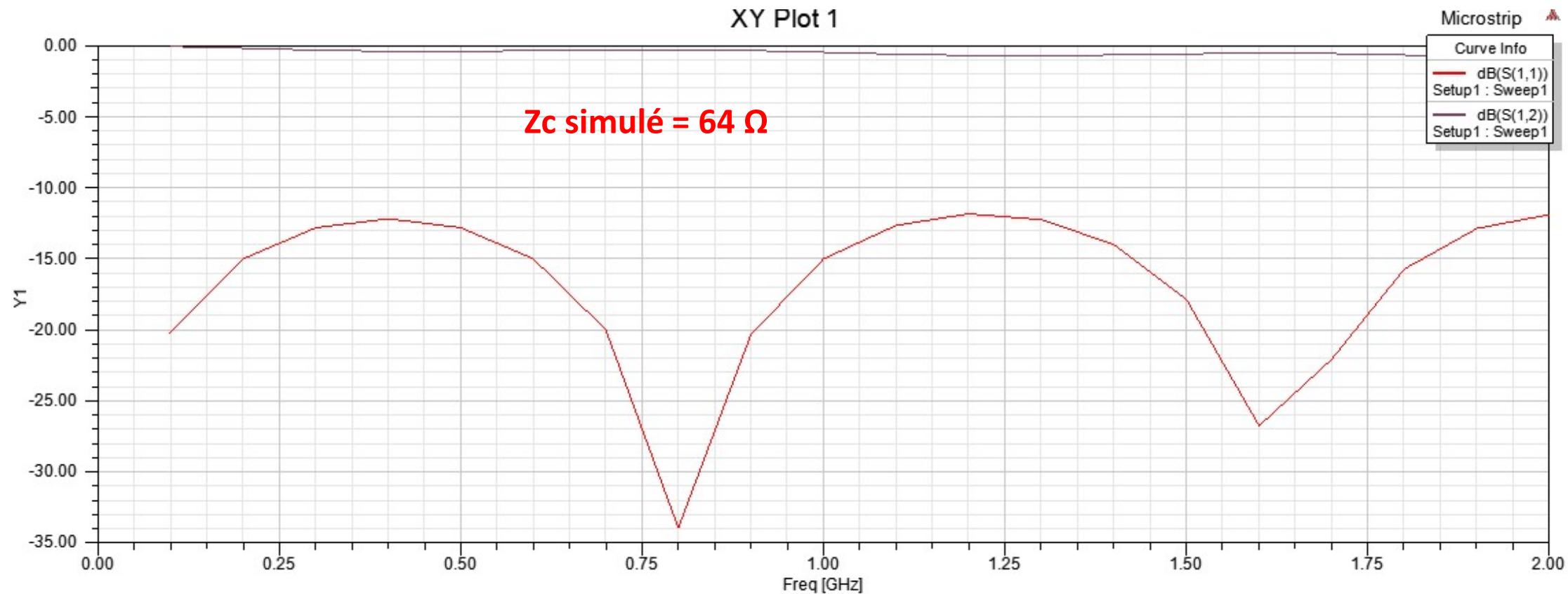
- > Affichage des résultats de simulation de paramètres S : **HFSS > Results > Create Modal Solution Data Report > Rectangular Plot**
- > Pour un affichage rapide : **HFSS > Results > Create Quick Report ...**



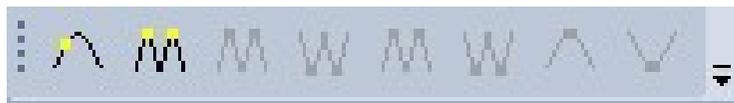
- > Courbes de résultats accessibles dans le **Project Manager (Results)**.
- > Double clic sur les courbes pour modifier le résultat à afficher, ajouter des courbes ...



# Analyse des résultats



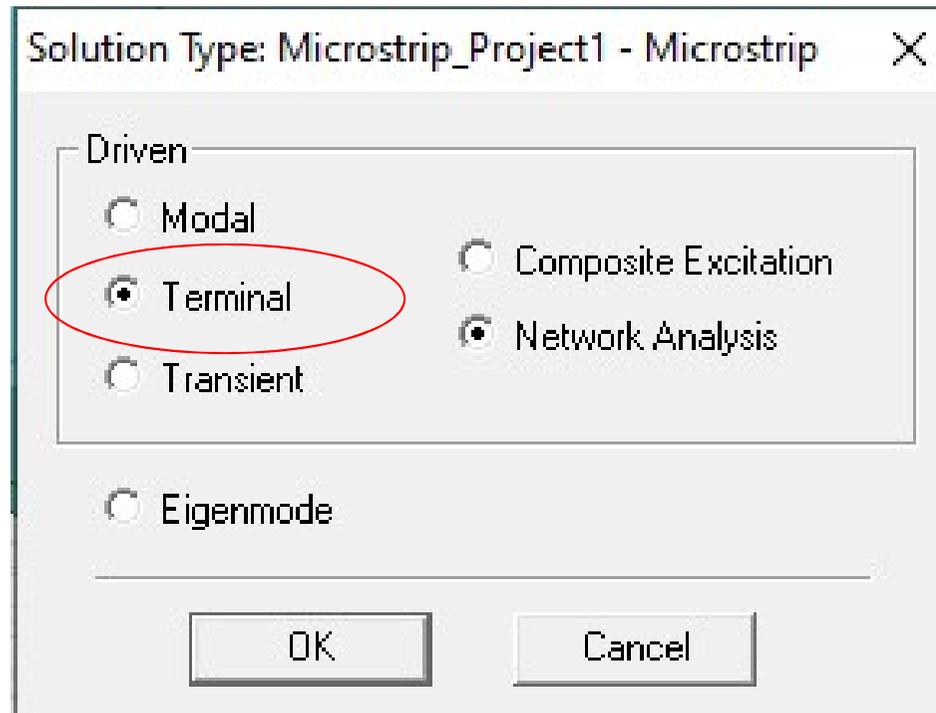
- > Double clic sur la zone graphique ou sur les courbes pour modifier leurs propriétés.
- > Double clic sur la zone graphique et Export... ou Report2D > Export → export dans un fichier .csv, .dat, .txt, .jpg ....



Ajout de marqueurs

# Changement de type de solution

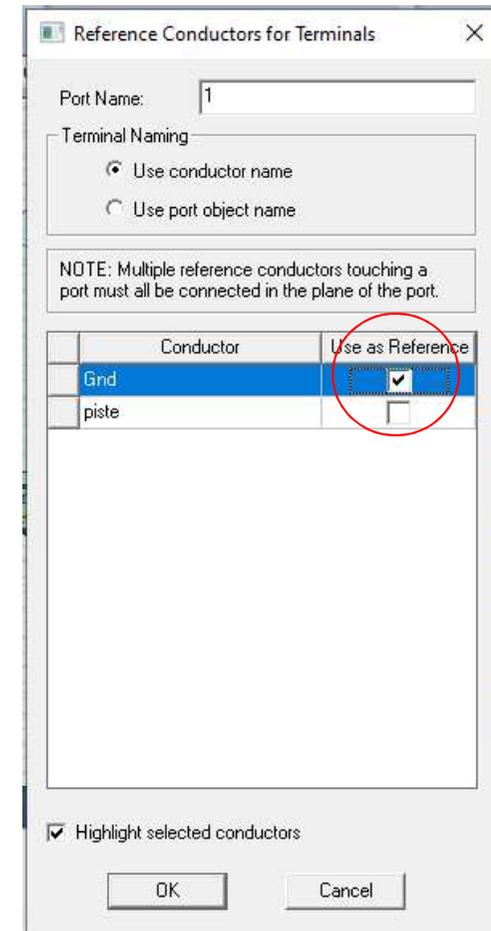
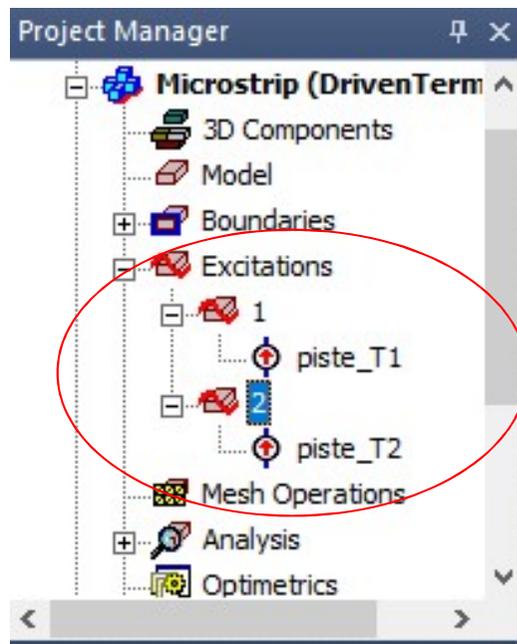
- > Sauvegarde du projet sous un autre nom : **File > Save as** : Microstrip\_Project2
- > Changement de type de solution : **HFSS > Solution Type**



- > On supprimera les graphiques du précédent modèle, qui risque de mal se mettre à jour lors de la prochaine simulation.

# Modification de l'excitation

- > Supprimez les excitations Waveport précédentes (dans le **project manager**, catégorie **Excitation**)
- > Sélectionnez le rectangle correspondant à l'ancien waveport1, puis **HFSS > Excitation > Assign > Wave ports**.
- > Même chose pour l'autre waveport.
- > Dans le project manager, les excitations doivent apparaître comme des sources de tensions



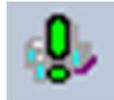
# Lancement de la simulation

> On conserve le même setup de solution

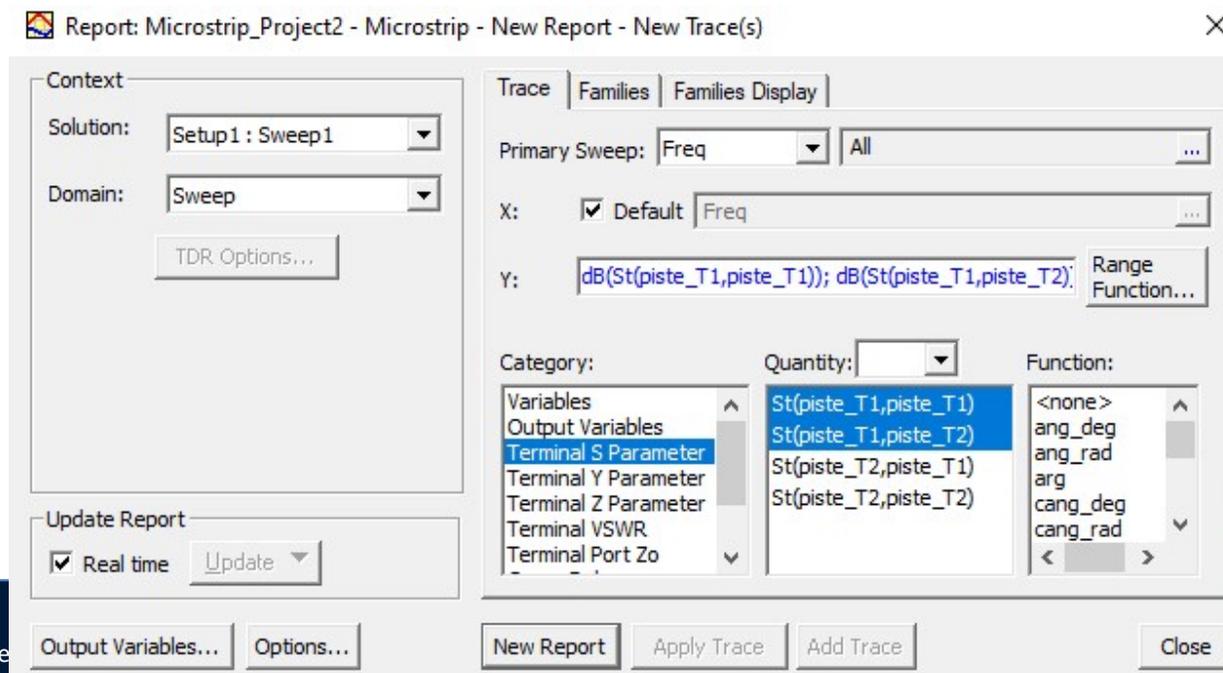
> Vérification du modèle



> Lancement de la simulation



> On trace les paramètres S11 et S12 : **HFSS > Results > Create TerminalSolution Data Report > Rectangular Plot**



# Analyse des résultats

- > De prime abord, on voit une différence sur les paramètres S (notamment S11) calculés avec la solution de type Modal (400 MHz: S11 = -12.26 dB (modal) vs. -18.85 dB (terminal), S12= -0.42 dB (modal) vs. -0.19 dB (terminal)).
- > A considérer :
  - Piste quasi adaptée 50  $\Omega$  (S11 sensible au moindre changement)
  - Changement de type d'excitation  $\rightarrow$  l'étape Port solution donne un résultat différent
  - Maillage différent (5100 mailles en modal, 4076 en terminal)
- > Le comportement simulé est cependant identique avec les 2 types de solution.

