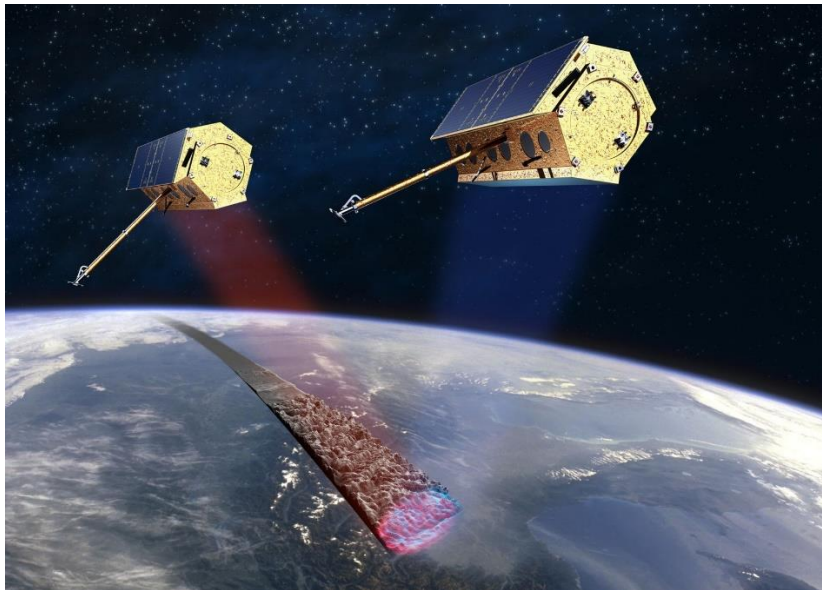


+



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

TAF OPE



**Etude d'une antenne d'imagerie radar intégrée sur le satellite
TerraSAR-X avec une démarche de Reverse Engineering**

Equipe pédagogique : François Gallée

Nom étudiant	Nom étudiant

Table des matières

1	Introduction :	3
2	Analyse de l'antenne	6
3	Simulation du guide d'onde	9
3.1	Simulation du guide d'onde 2 ports	9
3.2	Simulation guide d'onde avec court-circuit	9
4	Simulation du rayonnement des ouvertures rayonnantes	10
5	Modélisation du rayonnement de l'antenne complète	13
6	Analyse et interprétation des résultats.....	14
7	Annexes	15

1 Introduction :

L'imagerie radar par satellite est très utilisée dans de nombreux domaines comme l'observation des océans (houle, vagues, courant, ..), l'analyse et l'identification des cultures agricoles, l'impact de catastrophes naturelles, la détection et l'identification d'objets,....

Le principe du radar est d'émettre une onde électromagnétique dans le spectre radiofréquence et d'analyser la rétrodiffusion du signal. Le satellite en se déplaçant permet d'avoir l'équivalent d'une antenne avec une grande ouverture. Ceci permet d'atteindre de très bonnes résolutions spatiales. L'analyse des signaux radars reçus permet d'extraire par exemple le relief mais également la nature du sol. La figure présente une image radar, prise par le satellite TerraSAR-X de la ville de Munich recolorisé en fonction des caractéristiques du sol (arbres, route, métal/rail, béton/bâtiment, ...)

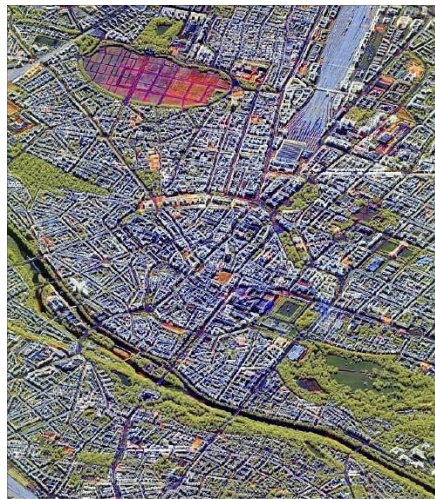


Figure 1: Image radar de la ville de Munich

C'est ce qu'on appelle le principe du radar à ouverture synthétique (SAR en anglais : Synthetic Aperture Radar). Selon la zone de couverture et la résolution souhaitées, il est possible de choisir différents modes qui modifient la forme de la zone éclairée par le radar.

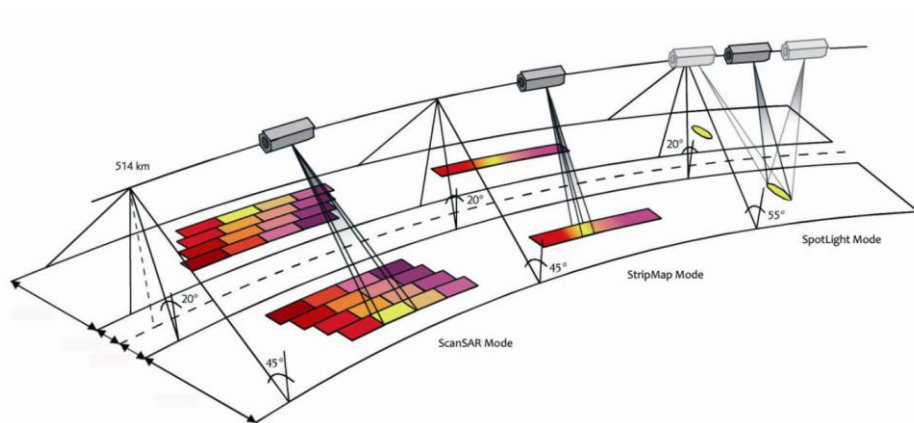


Figure 2 : Le principe du radar à synthèse d'ouverture

L'antenne est située sur une face du satellite.

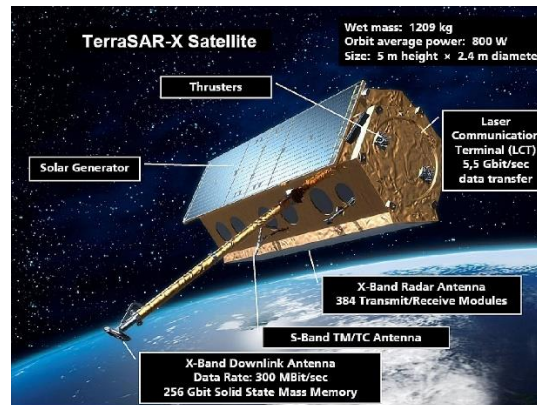


Figure : le satellite TerraSAR-X

Elle est constituée de 12 modules antennaires. Chaque module est constitué de 32 réseaux d'antennes linéaires. Chaque réseau linéaire est constitué de 16 fentes rayonnantes.

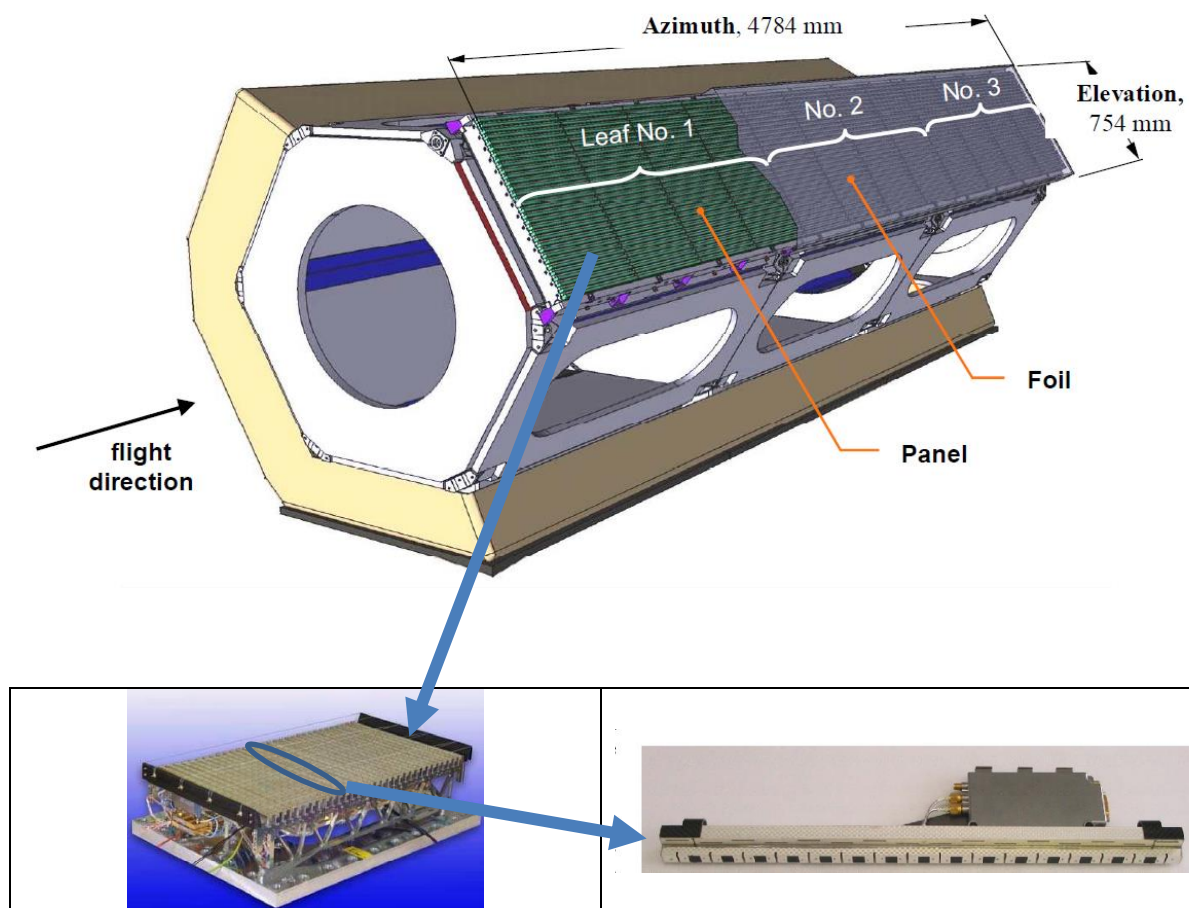


Figure : L'antenne d'imagerie radar du satellite TerraSAR-X

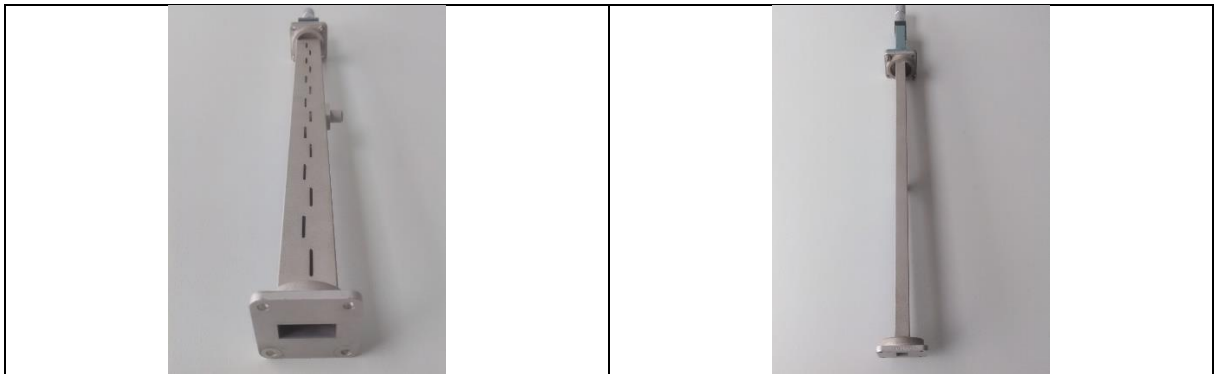
En suivant une démarche type reverse engineering et en exploitant vos connaissances, l'objectif est de pouvoir déterminer les spécifications d'une antenne à partir d'une analyse et en s'appuyant sur de la modélisation.

Le travail sera mené en plusieurs étapes :

- Etape 1 : Analyse de l'antenne
 - Analyse de l'antenne et définition de sa topologie (ex : type de guide pour la propagation de l'onde guidée, type d'éléments rayonnants, positionnement des éléments rayonnants,)
 - Relever des différentes dimensions de l'antenne
 - Estimation de la plage fréquentielle de fonctionnement de l'antenne
- Etape 2 : Modélisation de la structure assurant la propagation guidée de l'onde.
 - Simulation de la structure avec le logiciel FEKO
 - Validation des résultats et de la plage fréquentielle de fonctionnement
- Etape 3 : Modélisation de l'élément unitaire rayonnant
 - Simulation de l'élément rayonnant avec le logiciel FEKO
 - Compréhension du principe de fonctionnement de l'antenne
- Etape 4 : Modélisation de l'antenne complète
 - Simulation du rayonnement de l'antenne dans les plans E et H
- Etape 5 : Analyse et interprétation des résultats

2 Analyse de l'antenne

La figure suivante présente les photos d'un réseau guide à fentes similaire au réseau linéaire, élément de base de l'antenne du satellite.



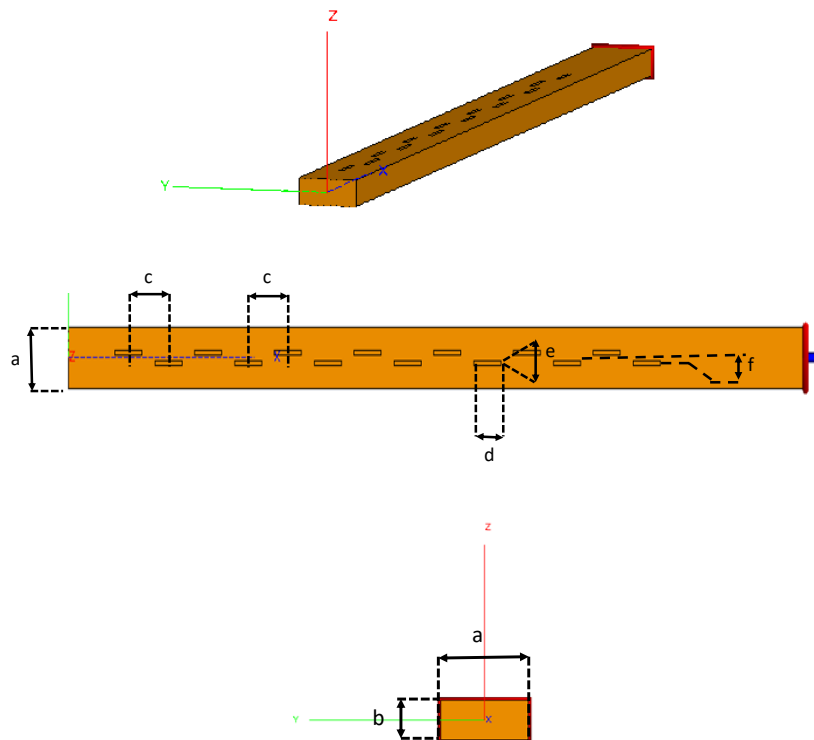
Décrire la topologie de la partie alimentation de l'antenne.

Il s'agit d'un guide d'onde rectangulaire

Décrire la topologie de la partie rayonnement de l'antenne

Il s'agit d'un réseau de fentes rayonnantes

Les dimensions sont données dans le tableau suivant



	Désignation	Dimensions
a	Largeur interne du guide	22.89mm
b	Hauteur interne du guide	10.15mm
c	Distance entre ouverture rayonnante	22mm
d	Longueur ouverture rayonnante	15mm
e	Largeur ouverture rayonnante	1.5mm
f	Décalage selon l'axe Y de l'ouverture rayonnante	2mm

Pour vous aider à comprendre de principe de propagation de modes dans une structure, voici une animation.

<http://pa3fwm.nl/tools/waveguide.html>

A partir des mesures de la section du guide (dimensions intérieures), identifier la référence du guide d'onde (band désignation) dans le tableau des standards des guides d'onde (annexe 1). **Quelle est sa bande de fréquence de fonctionnement ?**

Bande X
8.20GHz-12.5GHz

Calculer les fréquences de coupure des modes TE₁₀, TE₂₀, TE₀₁ à partir des dimensions du guide. Quel est le mode fondamental ? Vérifier votre résultat avec la fréquence donnée dans le tableau des standards des guides d'onde.

Pour un mode TE_{mn}, la fréquence de coupure du mode est donnée par la relation

$$f_{c_{TEmn}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

$$f_{c_{TE10}} = c/2a = 6,557\text{GHz}$$

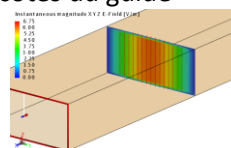
$$f_{c_{TE20}} = c/a = 13,11\text{GHz}$$

$$f_{c_{TE01}} = c/2b = 14,76\text{GHz}$$

Quel est le mode fondamental ?

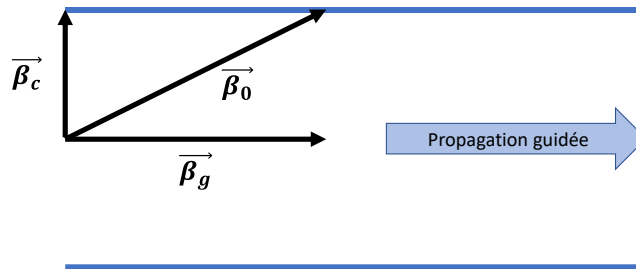
Quel est la distribution du champ électrique dans la section du guide.

Le mode fondamentale est le TE₁₀. Le champ électrique est // au petit côté du guide, maximum au centre et du nulle au niveau des petits côtés du guide



Calculer la longueur d'onde guidée λ_g théorique du mode fondamental pour les fréquences suivantes : 8.5GHz, 9GHz, 9.5GHz, 10GHz et 10.5GHz.

La propagation d'un mode dans un guide peut être modélisée par la superposition d'ondes planes avec différents angles d'incidence variants avec la fréquence (voir animation). On peut ainsi établir une relation entre les constantes de propagation : dans l'air β_0 , guidée β_g et celle liée à fréquence de coupure β_c .



$$\beta_g = \frac{2\pi}{\lambda_g} = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2}$$

Fréquence	λ_g (m)
8,5 GHz	0.055
9 GHz	0.0487
9,5 GHz	0.0437
10 GHz	0.0398
10,5 GHz	0.0366

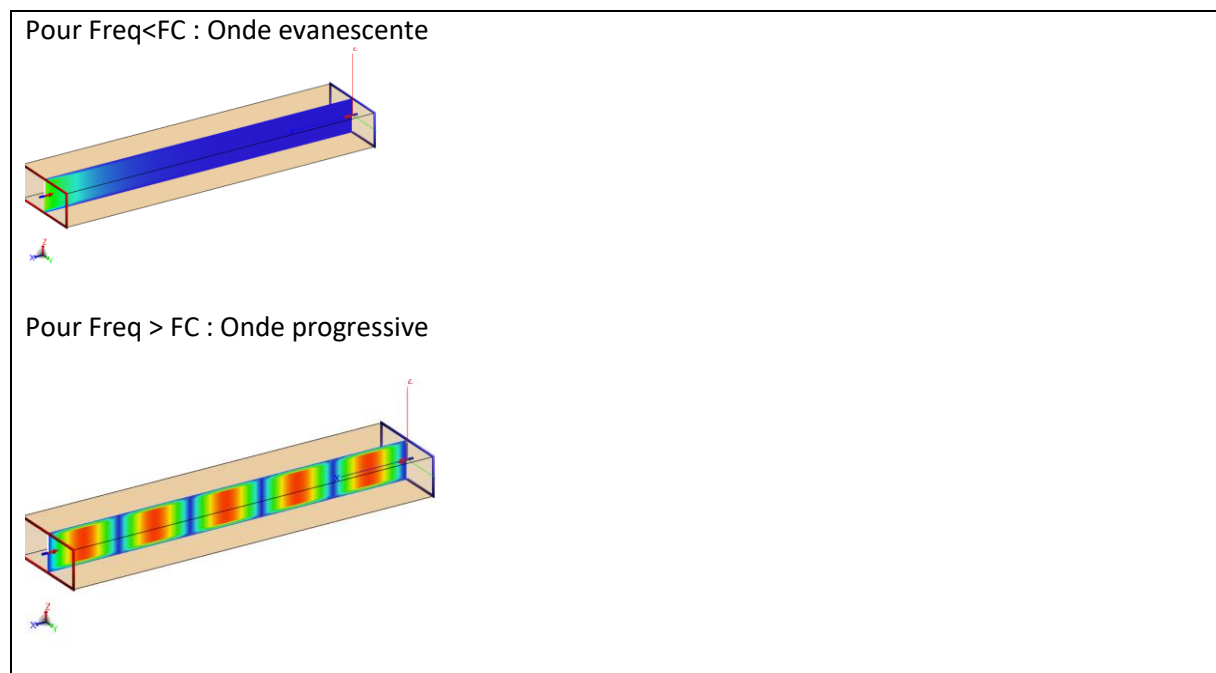
3 Simulation du guide d'onde

3.1 Simulation du guide d'onde 2 ports

La procédure à suivre est la suivante :

- Ouvrir le fichier `guide_rectangulaire_2ports.cfx` (CADFEKO MODEL)
- Indiquer dans les variables les bonnes dimensions de la section du guide et définir 2 fréquences qui seront simulées, une inférieure à la fréquence de coupure et une dans la bande de fonctionnement du guide d'onde dans le cas d'un fonctionnement monomode.
- Lancer la simulation via le menu SOLVE/RUN FEKO SOLVER
- Pour visualiser les résultats lancer POSTFEKO
- Afin de visualiser les champs électromagnétiques à l'intérieur du guide, diminuer l'opacité du maillage à partir du menu **Mesh/Mesh opacity**.
- Pour visualiser la distribution du champ électromagnétique dans le guide cliquez sur **Near Field** dans la barre horizontale en sélectionnant *Nearfield 1 et nearfield 2*. Activez la visualisation des vecteurs en cochant **Instantaneous magnitude** dans la *fenêtre à droite*, puis dans le menu RESULTS, cliquez sur **show arrows** dans la barre horizontale. Pour lancer l'animation dans le domaine temporel, allez dans le menu **Animate**, sélectionnez dans la barre de menu **Type** la phase. Puis lancez l'animation en cliquant sur play. Pour modifier la fréquence, sélectionnez la dans la fenêtre de droite.

Décrire ce que vous observez l'évolution de la distribution du champ électrique dans le plan NearField1 et NearField2 et interprétez. (Intégrer des copies d'écran en sélection, dans le menu Reporting, Copy image)



3.2 Simulation guide d'onde avec court-circuit

Sur le dispositif étudié, une des extrémités du guide est fermé avec un court-circuit.

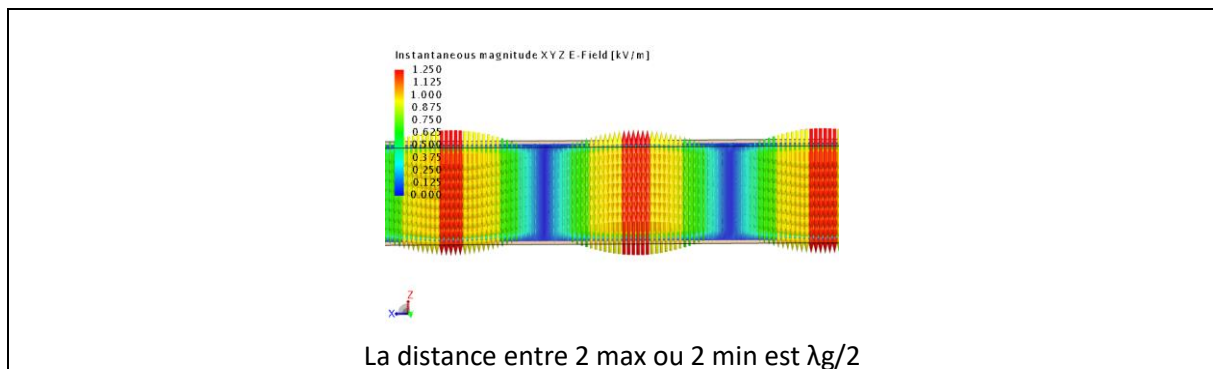
Afin de garder les résultats précédents, sauvegarder le fichier CADFEKO avec un nouveau nom (ex : guide_CC.cfx). Supprimer le port 2 dans la fenêtre de gauche dans l'onglet **Construction**. Ainsi le guide est terminé par un court-circuit.

Décrire ce que vous observez et interpréter. (Intégrer des copies d'écran)

Vérifier la valeur de la longueur d'onde guidée correspondant à votre fréquence de simulation.

Pour mesurer une distance, faites un clic droit et sélectionnez TOOLS/measure distance. Comme la propagation est selon l'axe X, verrouillez les axes Y et Z à 0. Sélectionnez les points en faisant Ctrl/Shift et cliquer sur l'endroit voulu.

On aura une onde stationnaire dans le guide issu de la sommation de l'onde incidente et de l'onde réfléchie



Afin de maximiser le rayonnement, quel est l'emplacement optimal des ouvertures rayonnantes selon l'axe X ? En analysant les dimensions de l'antennes et en se référant au tableau ci-dessus, quelle est la fréquence optimale de fonctionnement de cette antenne. Justifier.

Afin d'avoir le maximum de couplage, les fentes doivent être centrées sur les maximum. Comme la distance entre fentes est de 22mm. La fréquence de fonctionnement de l'antenne est 9.5GHz

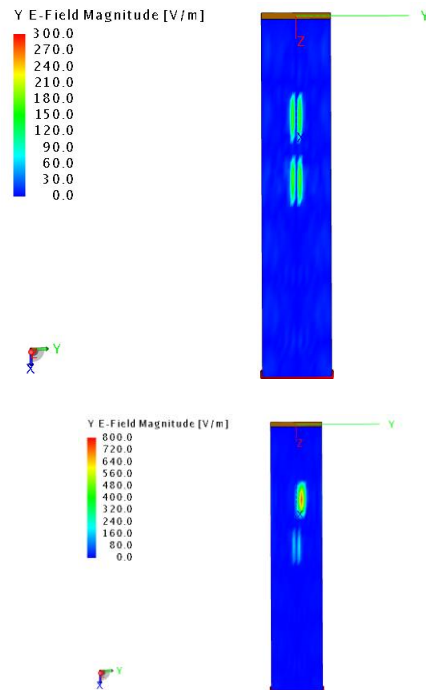
4 Simulation du rayonnement des ouvertures rayonnantes

Afin de pouvoir analyser le rayonnement de l'antenne, ouvrez le fichier guide_2fentes.cfx. Vous visualiserez la distribution du champ juste au-dessus des fentes rayonnantes.

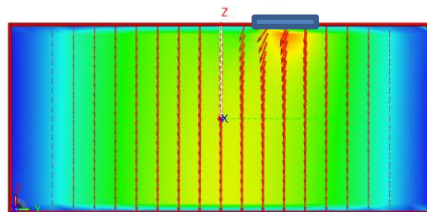
Les fentes rayonnantes sont correctement positionnées selon l'axe X. Vous analyserez seulement l'impact du positionnement selon l'axe Y. Vous pouvez contrôler le positionnement par rapport à $y=0$ avec les variables position_fente1_y et position_fente2_y.

Faites une première simulation avec les fentes centrées ($\text{position_fente1_y} = \text{position_fente1_y} = 0$) puis une simulation en décalant une fente de 2mm.

Analyser et interpréter les résultats obtenus. Quelle position selon l'axe Y faut-il privilégier pour avoir le maximum de champ dans l'ouverture rayonnante. Justifier.

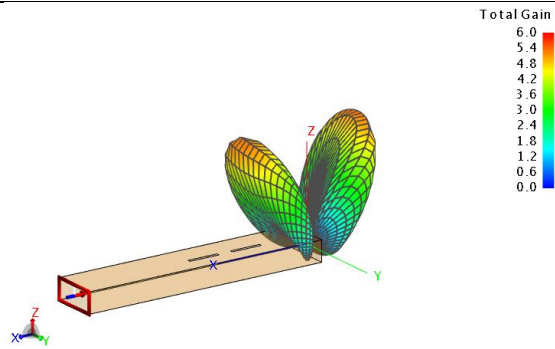


Pour maximiser le couplage de champ entre le guide et les fentes, elles doivent être décaler dans l'axe Y afin d'avoir un delta d'amplitude du champ électrique sur les bords de la fente.

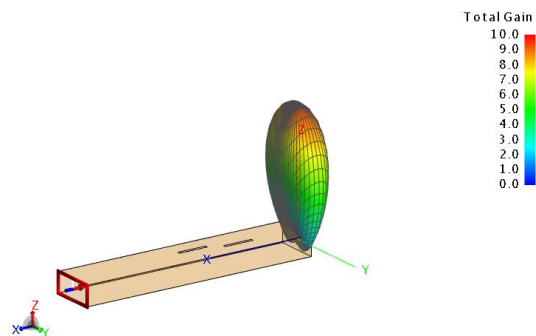


Dans le cas de 2 fentes, quelles doivent être leurs positions afin d'avoir un rayonnement maximum dans la direction z ? Justifier

Si les 2 fentes sont placées du même côté, elles sont excitées en opposition de phase.



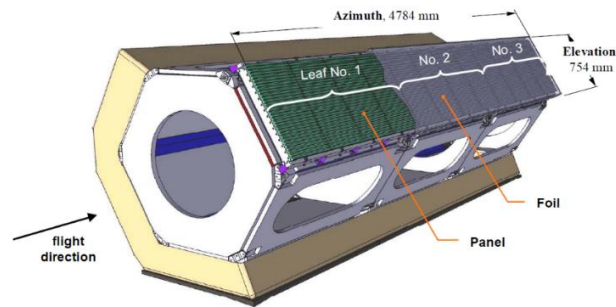
Afin d'avoir un rayonnement en phase, il faut les placer de part et d'autres du centre



Quelle est l'orientation du champ électrique dans la fente ? Quelle spécification de l'antenne est liée à cette orientation ?

Il est parallèle au petit côté de la fente. La polarisation de l'antenne est donc linéaire.

5 Modélisation du rayonnement de l'antenne complète



A partir de l'analyse de la topologie de l'antenne, proposer une méthode simple pour modéliser le rayonnement de l'antenne complète ?

Appliquer la théorie des réseaux. Le diagramme de rayonnement de l'antenne est le diagramme de l'antenne unitaire multipliée par le facteur de réseau. Etant donné que le diagramme de rayonnement de l'antenne unitaire est peu directive. Le diagramme au niveau du lobe principal et des premiers lobes secondaires seront ceux du facteur de réseau.

Tracer les diagrammes de rayonnement dans les 2 plans : plan perpendiculaire au déplacement et plan contenant l'axe de déplacement de tout le réseau d'antennes comprenant les 12 panneaux. Pour cela, vous pouvez utiliser Excel en programmant les équations données dans l'annexe.

Extraire les angles d'ouverture du faisceau dans les 2 plans.

Dans le plan E avec 32 antennes, l'ouverture à -3dB est de l'ordre de 2°
Dans le plan H on suppose qu'il y a la moitié des éléments pour le TX et l'autre pour le RX. IL y a donc 96 antennes. L'ouverture à -3dB est de l'ordre de $0,5^\circ$.

6 Analyse et interprétation des résultats

En se référant au site <https://fr.wikipedia.org/wiki/TerraSAR-X>, vérifier la cohérence des données fournies sur la couverture de la scène en mode spot light.

Comment est-il possible de contrôler la surface au sol et l'emplacement des zones à observer ? (voir figure 2)

Dans le plan perpendiculaire à la direction du satellite, quel doit être le dépointage maximum du faisceau pour couvrir la zone souhaitée.

Pour atteindre le dépointage max, quel déphasage doit être appliqué entre les antennes du réseau.

En prenant les angles d'ouverture minimum possible (2° dans le plan E et d'environ 0.7° dans le plan H), la couverture au sol à -3dB est d'environ 18km x 7km. En prenant une surface avec une distribution de la densité de puissance au sol plus uniforme, les caractéristiques données sont réalistes.

Pour modifier les ouvertures du faisceau, il suffit alimenter ou non les antennes. Pour contrôler le dépointage du faisceau, il faut modifier la pondération de phase.

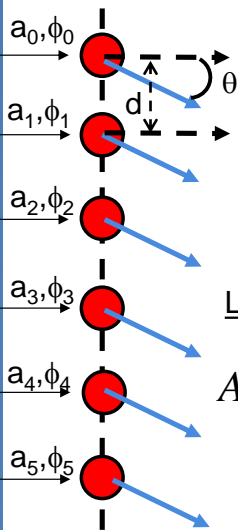
Pour couvrir la zone indiquée sur la figure 2, l'antenne pointera avec une distribution équiphasée à $32,5^\circ$. Pour couvrir la zone, il devra être capable de balayer électroniquement le faisceau entre $-12,5^\circ$ et $+12,5^\circ$. Le déphasage maximum à appliquer entre les antennes est donné par la relation $\alpha = -\beta d \sin \theta$.

Pour illustrer cela, vous allez simuler avec FEKO la mise en réseau d'antennes seulement dans le plan perpendiculaire à la direction du satellite.

Avec le logiciel FEKO, il est possible de calculer le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes en appliquant le principe de mise en réseau à partir du facteur de réseau. Cela permet d'avoir des premiers résultats rapidement au lieu de lancer des simulations électromagnétiques complètes de l'antenne. Mais il y a cependant des hypothèses qui sont faites qu'il ne faut pas oublier dans l'analyse des résultats. Lesquels ?

Le couplage entre les antennes n'est pas pris en compte. Cela peut modifier l'allure du diagramme de rayonnement principalement au niveau des lobes secondaires

7 Annexes



Cas classique de mise en réseau d'antennes:

- Antennes élémentaires identiques :
 $A_n(\theta, \varphi) = A_{\text{élé}}(\theta, \varphi)$
- Distance inter-élément constante : d
- Déphasage progressif et linéaire : $\phi_n = n\alpha$

$$E_{\text{array}}(r, \theta, \varphi) \propto \sum_{n=0}^{N-1} A_{\text{élé}}(\theta, \varphi) a_n e^{jn\alpha} e^{jn\beta d \sin \theta} \frac{e^{-j\beta r}}{r}$$

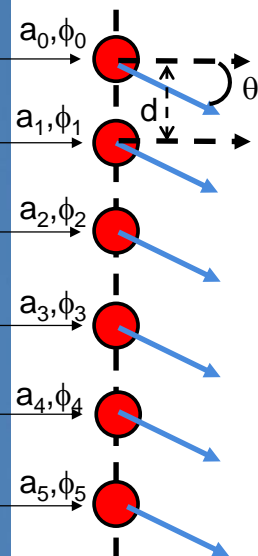
Le diagramme de rayonnement du réseau d'antennes :

$$A(\theta, \varphi) = A_{\text{élé}}(\theta, \varphi) \underbrace{\frac{1}{B} \left\| \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{jn(\beta \cdot d \cdot (\sin \theta) + \alpha)} \right\|}_{\text{Facteur ou fonction de réseau}}$$

Diagramme de rayonnement
de l'antenne élémentaire

Facteur ou fonction de réseau
Valeur max normalisée à 1

$$A(\theta, \varphi) = A_{\text{élé}}(\theta, \varphi) \cdot FR$$



□ Pondération uniforme en amplitude $a_n = 1$

□ Déphasage progressif $\phi_n = n\alpha$

$$FR \propto \left\| \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn(\beta \cdot d \cdot (\sin \theta) + \alpha)} \right\|$$

$$FR = \left| \frac{\sin\left(\frac{N\psi}{2}\right)}{N \sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \right| \quad \text{avec} \quad \psi = \beta \cdot d \cdot (\sin \theta) + \alpha$$