



ENSEA

Beyond Engineering

ANTENNES

DEE_3940

Sujets de TP

3^{ème} année ESC

Alexis MARTIN
2026

1 Analyseur de réseau et Antenne quart d'onde

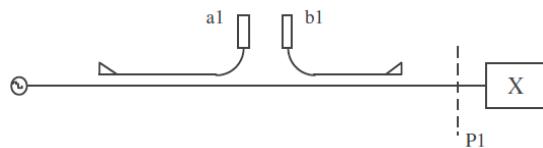
1.1 But de la manipulation

La première partie sert à comprendre, du point de vue de la mesure, le fonctionnement d'un analyseur de réseau vectoriel. Cette partie concerne le calibrage de l'appareil par la méthode dite du "full-two-port". Celle-ci ne peut s'effectuer que si l'on a bien saisi les causes d'erreurs systématiques de la mesure.

La seconde partie consiste à mesurer les caractéristiques d'une antenne type "dipôle quart d'onde". On s'intéressera plus précisément à son impédance d'entrée et à son gain. Au point de vue de l'utilisation de l'analyseur de réseau, cela se traduira par la mesure d'un dipôle en réflexion, et par la mesure d'un quadripôle en transmission.

1.2 Rappel sur les erreurs systématiques

Lorsqu'on mesure un dipôle, on utilise un montage à deux coupleurs:



Si aucune erreur n'intervient, le rapport $\frac{b_1}{a_1}$ est proportionnel au coefficient de réflexion:

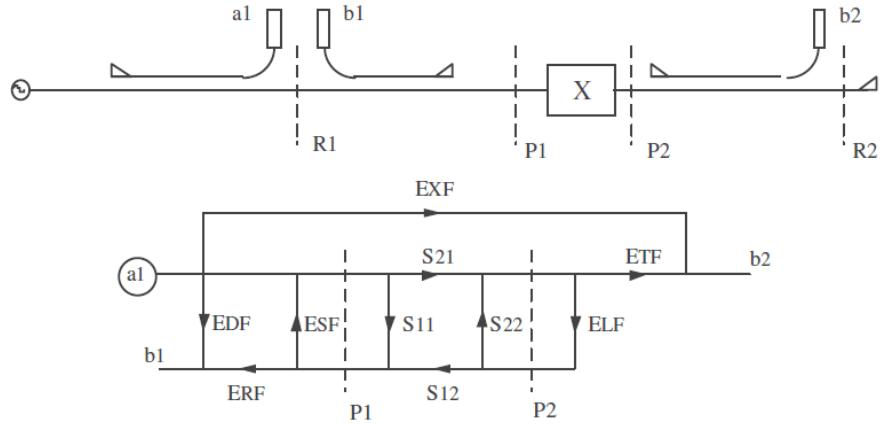
$$\frac{b_1}{a_1} = E_{RF}\Gamma \quad (1.1)$$

La mauvaise directivité du coupleur mesurant b_1 introduit un terme additif E_{DF} . L'impédance de Thévenin que voit le dispositif à mesurer n'est pas adaptée. Elle a un coefficient de réflexion égal à E_{SF} . On a un régime de réflexions multiples:

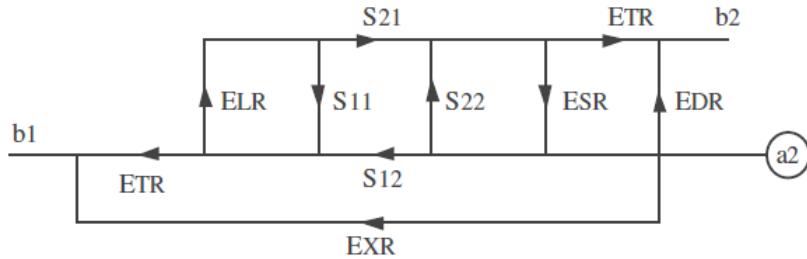
$$\frac{b_1}{a_1} = E_{DF} + \frac{E_{RF}\Gamma}{1 - E_{SF}\Gamma} \quad (1.2)$$

Il faut donc, en théorie, disposer de trois coefficients de réflexion étalons pour déterminer les trois termes E_{RF} , E_{DF} , E_{SF} .

Lorsqu'on effectue les mesures d'un quadripôle, on ajoute un terme de proportionnalité E_{TF} , un terme de désadaptation de charge E_{LF} , et un terme d'isolation E_{XF} . Les équations linéaires entre a_1 , b_1 et b_2 sont représentées par un graphe de fluence:



Lorsqu'on fait les mesures inverses, on intervertit, par des commutateurs internes, ce qui est avant R_1 , et ce qui est après R_2 . Le graphe de fluence est alors:



1.3 Préparation

1.3.1 Mesures en réflexion

- Interpréter physiquement l'équation (1.1)
- **Charge coulissante:** On place, en réflexion, une charge dont le $|\Gamma|$ est faible (de l'ordre de 0.1), et dont on peut faire varier mécaniquement $\text{Arg}(\Gamma)$. En appliquant l'équation (1.2), trouver, pour une fréquence fixe, le lieu de $\frac{b_1}{a_1}$ dans le plan complexe. Quel est le terme d'erreur que l'on peut déduire de cette mesure?

1.3.2 Mesures en transmission

Le calibrage en réflexion consiste à effectuer les mesures lorsqu'on charge chaque accès par une charge adaptée, puis lorsque l'on relie les deux accès. Expliquer comment, physiquement (sans équation), on peut déterminer E_{XF} , E_{LF} , E_{TF} .

1.4 Manipulations

1.4.1 Calibrage complet

- Mesurer un atténuateur court-circuité en réflexion et un atténuateur en transmission sans calibration du VNA.
- Effectuer le calibrage complet en réflexion et en transmission (full-two-port).
- Mesurer de nouveau l'atténuateur court-circuité en réflexion et l'atténuateur en transmission avec la calibration du VNA.
- Conclure et interpréter les défauts constatés sans correction.

1.4.2 Mesure de l'antenne quart d'onde

Mesure en réflexion

- Déterminer un ordre de grandeur de la fréquence de résonance du dipôle quart d'onde proposé.
- Effectuer un calibrage complet au niveau du plan de masse. (Effectuer d'abord un calibrage en réflexion sur connecteurs type SMA, puis faire un changement de plan de référence pour se ramener au niveau de l'antenne). On choisira une bande de $\pm 20\%$ de la fréquence de résonnance.
- Mesurer S_{11} pour une des antennes dont on notera la hauteur h par rapport au plan de masse.
- Observer la résonance. S'agit-il d'une résonance série ou bien d'une résonance parallèle? Noter la valeur de la fréquence de résonance f_0 .
- Relever les courbes $R(f)$ et $X(f)$ (parties réelle et imaginaire de l'impédance d'entrée de l'antenne). Donner la valeur du facteur de raccourcissement K :

$$K = \frac{\frac{\lambda_0}{4} - h}{\frac{\lambda_0}{4}}$$

- Déterminer le coefficient de qualité du doublet, celui-ci peut être obtenu à l'aide de:

$$Q = \frac{1}{2} \frac{\partial X}{\partial f} \frac{f_0}{R}$$

Mesure en transmission

On place deux antennes quart d'onde identiques à la résonance pour établir une transmission en espace libre. Mesurer l'affaiblissement de la transmission.

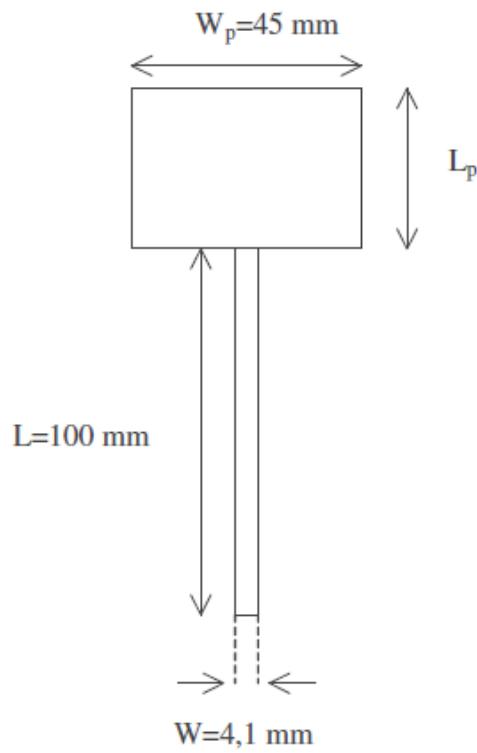
En déduire le gain d'un dipôle (tenir compte de la désadaptation). Comparer à la valeur théorique.

2 Simulation Electromagnétique d'un réseau d'antennes imprimées

Le but de ce TP est d'étudier par simulation le comportement d'une antenne patch seule puis en réseau et l'effet du déphasage des alimentations des antennes sur le diagramme de rayonnement. Pour cela on utilisera le logiciel "Momentum" disponible dans ADS. Ce logiciel permet d'effectuer des simulations électromagnétiques de structures planaires, d'obtenir les paramètres S, et de visualiser un diagramme de rayonnement ou des courants.

2.1 Préparation

Dans un premier temps, il s'agit d'étudier les caractéristiques d'une antenne patch dont les dimensions sont les suivantes:



Déterminer la valeur de L_p pour obtenir une fréquence de résonance de 2.5GHz. Le substrat utilisé est du téflon d'épaisseur $h = 1.524 \text{ mm}$ et de constante diélectrique $\epsilon_r = 2.55$.

On pourra pour cela déterminer ϵ_{eff} et Δl par:

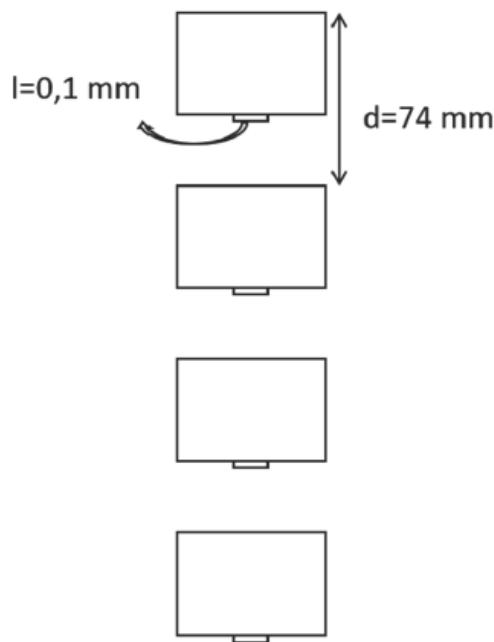
$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\Delta l = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.813\right)}$$

2.2 Simulation d'une antenne imprimée seule

- Dans ADS, ouvrir une page layout et dessiner l'antenne en utilisant dans le menu insert:
 - rectangle
 - coordinate entry
 - Dans la page layout ouvrir la boîte de dialogue de la simulation électromagnétique (*EM-simulation setup*).
 - Choisir le type de simulation désiré (ici *Momentum microwave*)
 - Préparer la simulation en utilisant une répartition de fréquence adaptative de 2.4GHz à 2.6GHz.
 - Définir le substrat
 - Définition de l'excitation: Define port, (utiliser une calibration "TLM" et définir le plan de référence au niveau de l'antenne)
 - La définition du maillage s'effectue dans "options". Prendre un maillage de bord. Calculer le maillage: *generate mesh, simulate*
 - Effectuer la simulation: *generate S-parameter, simulate*
1. Visualiser le paramètre S_{11} et déterminer l'impédance et la fréquence résonance de l'antenne. Les ordres de grandeurs vous paraissent-ils cohérents?
 2. Visualiser le diagramme de rayonnement (*EM / Post-processing / Radiation Pattern*). Comparer avec les résultats théoriques.
 3. Visualiser les courants (*EM / Post-processing / Visualization*) et retrouver les phénomènes d'ondes stationnaires:
 - Sur le patch
 - Sur la ligne d'alimentation

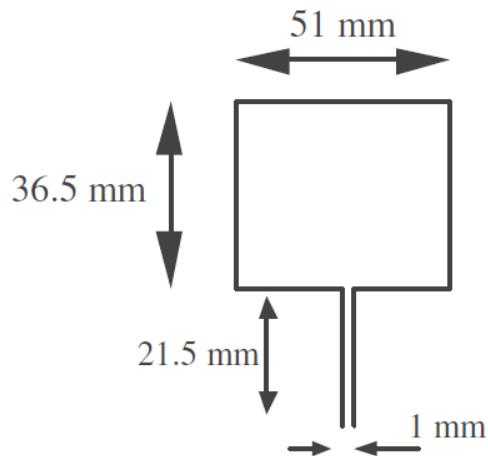
2.3 Simulation d'un réseau de quatre antennes



1. Donner l'expression du décalage angulaire de la direction d'émission en fonction du déphasage entre les antennes dans le cas d'un déphasage linéaire.
- Dans une autre page layout dessiner un réseau de quatre antennes identiques à la précédente et superposées verticalement (utiliser la fonction *Edit / Advanced copy / copy relative*). On définira les accès en ports directs.
 - Effectuer la simulation pour la fréquence de résonance déterminée précédemment
2. Visualiser le diagramme de rayonnement pour des alimentations en phase et avec la même amplitude. Comparer avec les résultats théoriques.
3. Visualiser le diagramme de rayonnement pour un déphasage linéaire des alimentations (Φ , 2Φ , 3Φ et 4Φ), en faisant varier Φ . Comparer la valeur du dépointage et les positions des zéros du plan E avec les résultats théoriques.
4. Visualiser le diagramme de rayonnement pour des alimentations en phase et pour des amplitudes d'alimentation suivant la loi binômiale (1, 2, 2, 1). Comparer avec les résultats avec l'alimentation du réseau avec la même amplitude.

3 Mesure d'antennes en chambre anechoïque

On étudie des réseaux d'antennes imprimées réalisées sur un substrat de verre Téflon de caractéristiques: $\epsilon_r = 2.55$, $h = 1.524\text{mm}$. L'élément de base est un "patch" (pavé) rectangulaire:



3.1 Préparation

1. Estimer la valeur de la première fréquence de résonance, la ligne d'alimentation ayant une impédance caractéristique égale à 50Ω . On pourra pour cela utiliser un simulateur, ou bien, plus simplement, déterminer la valeur de la constante diélectrique effective, ainsi que l'allongement équivalent à l'effet de bord sur les deux extrémités du résonateur de largeur w .

On pourra déterminer ϵ_{eff} et Δl par:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\Delta l = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3)(\frac{w}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{eff} - 0.258)(\frac{w}{h} + 0.813)}$$

2. Indiquer la position des plans E et H.

3.2 Dispositif Expérimental

La mesure du diagramme de rayonnement dans les deux plans E et H, est effectuée dans la chambre anéchoïque.

Le positionneur est commandé à partir d'un logiciel sous LabVIEW.

La reflectivité des parois est égale à $-35dB$ à 1 GHz, en incidence normale. Elle est encore inférieure à 2.5 GHz.

Quel est l'ordre de grandeur de la distance entre les deux antennes? L'antenne à mesurer est-elle dans le champ lointain de l'autre?

3.3 Manipulations

La manipulation est en cours d'évolution. On cherchera donc à obtenir le maximum de mesures avec les moyens disponibles.

3.3.1 Etude du rayonnement des réseaux disponibles

1. Déterminer expérimentalement la fréquence d'accord.
2. Relever les diagrammes de rayonnement dans les plans E et H. Relève-t-on un diagramme en tension ou en puissance?
3. Déterminer la largeur du lobe principal à -3 dB dans les deux plans.
4. Comparer les diagrammes mesurés à ce que l'on prévoit à l'aide d'une théorie simple.
5. Comparer avec la forme théorique des diagrammes du facteur de réseau.

3.3.2 Mesure du gain des antennes

(Une calibration est nécessaire, ne déplacer les absorbants au sol, qu'en cas de nécessité impérieuse)

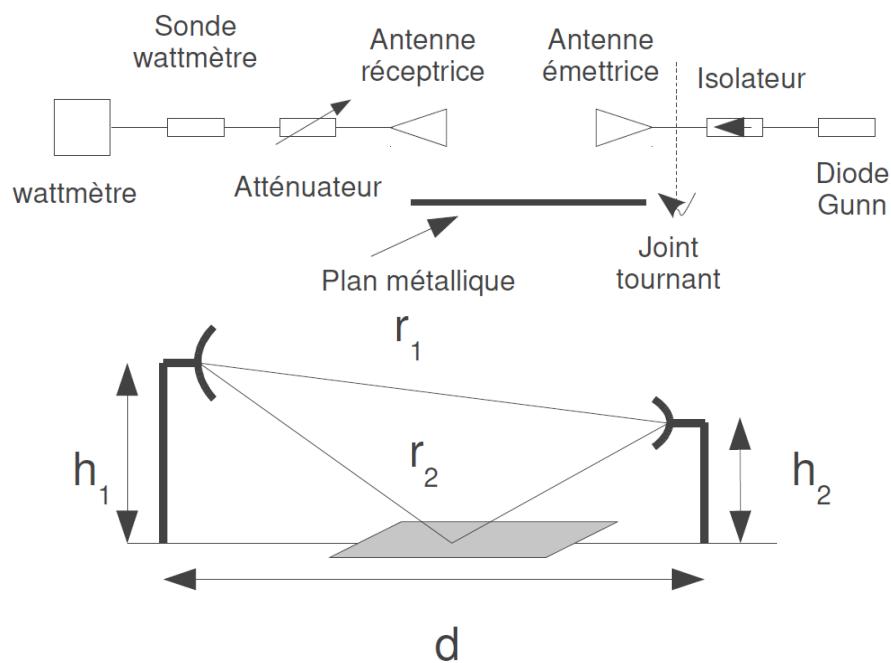
Comparer à la valeur estimée à partir des largeurs des lobes à $-3dB$.

4 Caractérisation d'une liaison hertzienne

Objectif du TP et présentation du banc de mesure

Le but de ce TP est de mettre en évidence l'effet des réflexions par le sol.

Le banc de mesure est constituée par une antenne émettrice alimentée par une diode Gunn et une antenne réceptrice connectée à un wattmètre



4.1 Préparation

- Expliquer le phénomène physique que l'on doit observer sur la mesure de la puissance reçue sur l'antenne de réception. Comment varie cette puissance en fonction de la distance entre les antennes.
- En faisant l'hypothèse que la distance entre antennes est grande devant les hauteurs h_1 et h_2 des antennes, montrer que le déphasage entre les deux trajets r_1 et r_2 est donné approximativement par:

$$\Delta\phi \approx \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d}$$

3. En déduire que la distance qui sépare deux maxima ou deux minima successifs pour h_1 et h_2 constants est donnée par:

$$\Delta d \approx \frac{\lambda d^2}{2h_1 h_2}$$

4.2 Réglage du banc de mesure

1. Déterminer expérimentalement une valeur optimale de la fréquence de travail à l'aide de la cavité située en amont de la diode Gunn.
2. Déterminer la polarisation du champ.
3. Mesurer le gain des antennes

4.3 Réflexion sur le sol

Insérer une plaque métallique horizontale sur le banc de mesure.

1. Tracer le niveau de sortie en fonction de la distance d entre les cornets
2. Comparer la valeur de Δd obtenue expérimentalement à celle obtenue théoriquement.

4.4 Simulation de la liaison hertzienne

Ouvrir le logiciel ADS. Créer un nouveau workspace, et un nouveau schematic. Créer la liaison caractérisée par le schéma suivant:



Le modèle de simulation comprend les éléments suivants
(sous la forme: nom_librairie ... nom_composant):

- “*Timed Sources ... ConstTimed*”: porteuse RF non modulée de niveau constant
 - TStep = 10 secondes (période d'échantillonnage)
 - FCarrier = mesurée en début de séance
 - Value = 1.0

- “Antennas & Propagation … AntBase”: antenne d'émission (station de base)
 - Gain = gain mesuré en début de séance
 - X = Y = 0 (position de l'antenne dans le plan: à l'origine)
 - Height = à mesurer
- “Antennas & Propagation … PropFlatEarth”: canal de propagation hertzien (modèle terrestre “plat” théorique)
 - Polarization = à mesurer
 - Permittivity, Conductivity: valeurs définies dans la suite
- “Antennas & Propagation … AntMobile”: antenne de réception mobile (ce modèle permet de faire varier la distance entre les deux antennes)
 - Gain = gain mesuré en début de séance
 - X = X0 (position initiale de l'antenne de réception, définie dans le bloc “Variables”)
 - Y = 0
 - Height = à mesurer
 - SpeedType = km/h
 - Vx = Vx (vitesse en km/h de l'antenne mobile, définie dans le bloc “Variables”)
 - Vy = 0 (déplacement suivant l'axes des x)
- “Sinks … TimedSink”: prélèvement du signal de sortie
 - Les paramètres par défaut sont corrects.

Ajouter sur le schéma les blocs suivants:

- “Controllers … DF”: bloc de définition des paramètres de simulation, avec:
 - Dans Controls: DefaultTimeStop = 1000 s
 - Dans Options: OutVar = X0 Vx (réécriture des variables à tracer; attention, séparateur = espace)
- “Controllers … VAR eqn”: bloc de définition d'équations et de variables, avec:
 - X0
 - Vx

Remarque

Le logiciel utilise le concept d'enveloppe complexe pour effectuer les simulations. Soit un signal $x(t)$ de type passe-bande — encore appelé signal bande étroite — typiquement constitué par une porteuse modulée, d'expression générale:

$$x(t) = i_x(t) \cos(2\pi f_{ct}) - q_x(t) \sin(2\pi f_{ct})$$

ou

$$x(t) = \Re\{(i_x(t) + jq_x(t))e^{j2\pi f_{ct}t}\}$$

On appelle *enveloppe complexe* du signal $x(t)$ la grandeur $x_E(t)$ définie par: $i_x(t) + jq_x(t)$

L'enveloppe complexe $x_E(t)$ constitue un signal bande de base complexe associé au signal passe-bande $x(t)$; il s'agit d'un processus beaucoup plus lent que la porteuse elle-même et transportant la partie informationnelle du signal. On peut montrer que la simulation peut s'effectuer en calculant uniquement l'enveloppe complexe, sans avoir à simuler la porteuse HF elle-même (un filtre passe-bande est par exemple remplacé par un filtre passe-bas équivalent). Ceci permet de réduire les durées de simulation dans des proportions considérables.

Simulations

L'objectif est de relever, d'analyser et d'interpréter, la courbe du gain de liaison en fonction de la distance dans les différentes situations. On tracera le gain en fonction de la distance.

4.4.1 Banc de mesure

Comparer les résultats de simulation aux résultats expérimentaux.

4.4.2 Cas réaliste

Utiliser les paramètres suivants:

- FCarrier = 6 GHz (fréquence porteuse)
 - Gain = 40 dB (gain des antennes)
 - Height = 20 m (antenne fixe) et 2 m (antenne mobile)
 - vitesse véhicule = 100 km/h
 - X0=1000
1. Sol absent (permittivité relative: $\epsilon_r = 1$, conductivité: $\sigma = 0$)
Comparer à la courbe théorique attendue (propagation en espace libre).
 2. Sol très bon conducteur (permittivité relative: $\epsilon_r = 1$, conductivité: $\sigma = 10^{10}$)
Avec ces valeurs, le coefficient de réflexion sur le sol est très proche de 1.
 - Déterminer les distances où un *fading* apparaît. Comparer aux valeurs théoriques et expérimentales.

- Superposer, sur le relevé, les dessins de la courbe théorique avec le sol absent et celui de cette même courbe théorique translatée de +6 dB. Interpréter.
 - Interpréter le comportement asymptotique de la courbe relevée.
3. Sol conducteur réel (permittivité relative: $\epsilon_r = 5$, conductivité: $\sigma = 100$)
- Avec ces valeurs, le coefficient de réflexion sur le sol est relativement proche de -1.
- Déterminer les distances où un *fading* apparaît et comparer au cas précédent.
Comparer aux valeurs théoriques attendues.
 - Interpréter le comportement asymptotique de la courbe relevée.

5 Simulation 3D sous COMSOL Multiphysique