

TP ANTENNES ET CANAUX DE TRANSMISSION

I. Partie I Antennes

Une antenne sert à transformer une énergie électromagnétique guidée en une énergie électromagnétique rayonnée et réciproquement. L'antenne est aussi souvent définie comme une structure associée à la région de transition entre un circuit de guidage et une onde (l'espace libre), ou vice versa. Autrement dit, une antenne peut recevoir une puissance électrique fournie par un générateur et l'émettre dans l'espace environnant sous forme d'onde électromagnétique (émission). Mais elle peut également capter des ondes électromagnétiques et fournir une puissance électrique à une charge (réception). On dit également que le fonctionnement d'une antenne est, dans la plupart des cas, réciproque. C'est-à-dire qu'une antenne peut être utilisée en réception ou en émission, avec les mêmes propriétés rayonnantes. Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur, en une puissance rayonnée. L'antenne de réception joue le rôle inverse, en ce sens que la puissance rayonnée peut être captée par l'antenne et transformée en une puissance électromagnétique guidée.

Les principales caractéristiques des antennes sont généralement : la bande passante fréquentielle, le diagramme de rayonnement, l'efficacité, la directivité et le gain.

Largeur de bande

La largeur de bande de fonctionnement définit la bande de fréquence dans laquelle le rayonnement de l'antenne présente les caractéristiques requises. Pour connaître la bande passante d'une antenne on trace le coefficient de réflexion S_{11} ou bien le rapport d'ondes stationnaires (ROS) ou VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) en fonction de la fréquence. On admet, usuellement, que si S_{11} est inférieur à -10 dB (ou VSWR inférieur à 2), la puissance de rayonnement est suffisante. Pour une antenne, la bande passante est délimitée par les fréquences supérieure (f_H) et inférieure (f_L), lorsque $VSWR \leq 2.0$ (c-à-d $S_{11} \approx -10\text{dB}$). On considère que lorsque $S_{11} \leq -10$ dB, 90% de la puissance fournie à l'antenne est transmise. La bande passante d'une antenne peut être donnée comme une largeur de bande de fréquence absolue (ABW : Absolute Bandwidth) ou relative (FBW : Fractional Bandwidth).

$$ABW = f_H - f_L$$

$$FBW = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L}$$

Notons que la fréquence centrale d'une antenne à résonance est déterminée par les dimensions de l'antenne et les matériaux qui la composent. À la résonance, l'impédance d'entrée de l'antenne est réelle. Si la fréquence s'éloigne légèrement de cette fréquence centrale, la partie réelle de l'impédance varie et sa partie imaginaire n'est plus nulle. L'adaptation de l'antenne, en général conçue pour la fréquence centrale, n'est alors plus parfaite de part et d'autre de celle-ci.

Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est la représentation de ses propriétés de rayonnement dans les coordonnées spatiales. Habituellement, le diagramme de rayonnement est représenté, en fonction des coordonnées directionnelles, dans la zone lointaine. La représentation du champ électrique (ou magnétique), sur un rayon constant, est nommée diagramme de l'amplitude de champ. De même, la variation spatiale de la densité de puissance, le long d'un rayon constant, est nommée diagramme d'amplitude de puissance. Ce diagramme est généralement tracé dans une échelle logarithmique, en décibels. D'habitude, on trace le diagramme de rayonnement dans deux plans perpendiculaires : le plan E (contenant l'axe de l'antenne et le champ électrique) et le plan H (contenant l'axe de l'antenne et le champ magnétique).

Certaines représentations, en trois dimensions, ont l'avantage de dévoiler toutes les directions de rayonnement dans l'espace, mais elles donnent difficilement une appréciation quantitative. Le diagramme de rayonnement, souvent en coordonnées logarithmiques, est tracé soit en coordonnées rectangulaires, soit en coordonnées polaires, dans les deux plans perpendiculaires (E et H). Le lobe principal est déterminé entre les deux minima de chaque côté du maximum. Tandis que les lobes secondaires sont les maxima secondaires, apparaissant de chaque côté du lobe principal. Il existe trois modèles de rayonnement couramment employés pour décrire la propriété du rayonnement d'une antenne :

1. *L'antenne isotrope* : C'est une antenne imaginaire, sans pertes, qui a un rayonnement constant dans toutes les directions. Bien que cette antenne soit idéale et irréalisable, elle est souvent prise comme référence pour estimer les propriétés directives d'une antenne réelle.

2. *L'antenne directionnelle* : C'est une antenne dont le rayonnement est plus fort dans certaines directions que d'autres. Ce terme est souvent employé pour une antenne ayant une directivité maximale supérieure à celle d'un dipôle demi-onde.
3. *L'antenne omnidirectionnelle* : C'est une antenne qui présente un diagramme de rayonnement non directionnel dans un plan donné et un diagramme directionnel dans tout autre plan orthogonal.

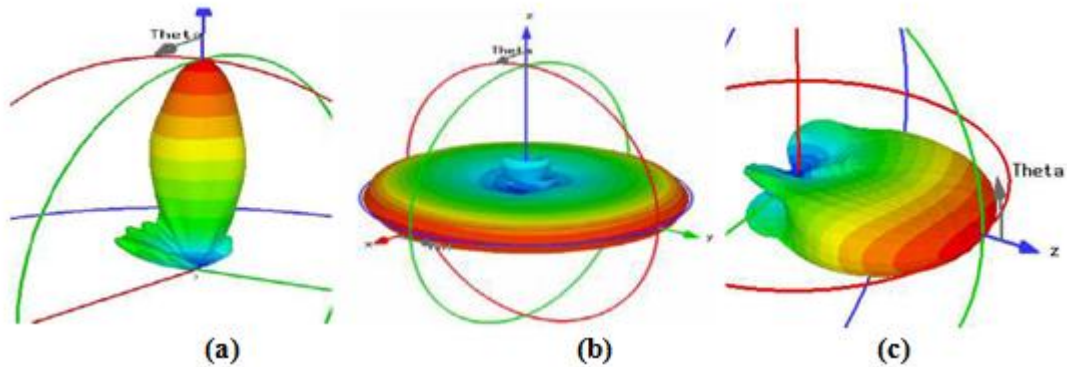


Figure: Diagramme de rayonnement des différentes antennes existantes, **(a)** directive, **(b)** omnidirectionnelle, **(c)** sectorielle.

Les performances de rayonnement se mesurent dans la chambre anéchoïque qui permet de reproduire la condition de champ lointain à une distance relativement faible. Une onde sphérique, provenant de la source, est transformée en ondes planes (après réflexion sur le réflecteur) et dirigée ensuite vers l'antenne sous test. Elle permet également de fournir une zone libre de toute réflexion. En effet, les parois de cette chambre étant recouvertes de mousses absorbantes micro-ondes (en polyuréthane) chargées de particules de carbone, elles permettent de minimiser les réflexions parasites et éviter les interférences électromagnétiques environnantes. Ces mousses sont caractérisées par leur réflectivité et leur forme pyramidale.

La chambre anéchoïque contient l'antenne source de référence (ex. antenne cornet modèle), l'antenne sous test, le support de l'antenne sous test, le positionneur et le rotateur (ou plateaux tournants) et un ordinateur de contrôle et de traitement des données. L'antenne sous test est judicieusement placée (bien en face de l'antenne de référence et à une distance précise) dans un espace où la mesure peut être effectuée sans perturbations et avec un minimum de réflexions. Les plateaux tournants ont une vitesse de rotation pas à pas qui permet les mesures en élévation et en azimut, pour faire tourner l'antenne de test de 0 à 180 degrés. Enfin,

l'ordinateur de contrôle sert à piloter l'analyseur et les moteurs permettant la rotation des positionneurs.

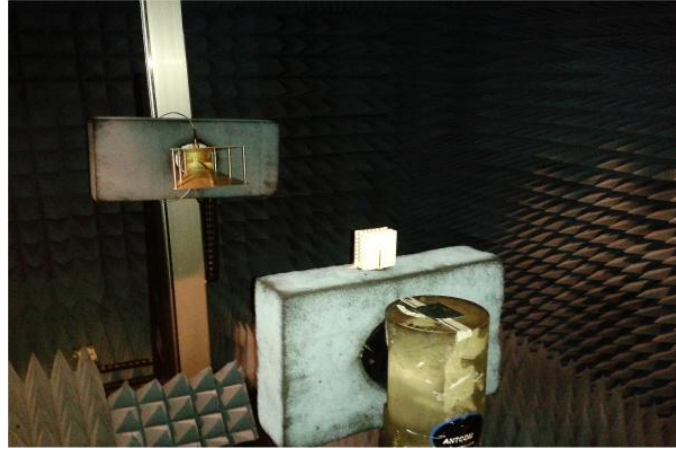


Figure : La chambre anéchoïque

Le principe utilisé est basé sur la mesure de l'atténuation entre les deux accès (signal émis et signal reçu), qui est reliée au gain par la formule de FRISS. Cette formule donne la puissance reçue lors de la transmission d'une onde, en espace libre, via deux antennes de gains différents.

$$P_r = \left(\frac{\lambda_0}{4\pi d} \right)^2 \cdot G_e \cdot G_r \cdot P_e$$

Où G_e est le gain de l'antenne d'émission, G_r est le gain de l'antenne de réception, P_e est la puissance d'émission, P_r est la puissance de réception, d est la distance qui sépare les deux antennes et λ_0 est la longueur d'onde en espace libre.

Efficacité

Il est bien connu que l'antenne ne rayonne qu'une partie de la puissance qu'elle reçoit. L'autre partie est perdue à cause de différents phénomènes tels que la mauvaise adaptation entre la ligne d'alimentation et l'antenne ou les pertes entre le conducteur et le diélectrique. L'efficacité totale de l'antenne est donnée par l'équation:

$$e_0 = e_c \cdot e_d \cdot e_a$$

Où e_0 est l'efficacité totale, e_a est l'efficacité d'adaptation $= (1 - |\Gamma|^2)$, e_c est l'efficacité de conduction et e_d est l'efficacité diélectrique. Le paramètre Γ est le coefficient de réflexion en tension, à l'entrée de l'antenne, il est donné par l'équation:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z}{Z_{in} + Z}$$

Où Z_{in} est l'impédance d'entrée de l'antenne et Z est l'impédance caractéristique de la ligne de transmission.

Il est à souligner que ces équations ne peuvent être employées que pour le cas d'une fréquence unique. Elles sont donc utilisables pour les systèmes à bande étroite et non pour les systèmes ultra large bandes, où l'efficacité de rayonnement (e_r) dépend de la fréquence, comme dans la formule:

$$e_r(f) = e_c e_d(f)$$

Cette équation peut être réécrite sous la forme :

$$e_0 = e_r e_a = e_r (1 - |\Gamma|^2)$$

e_r étant l'efficacité de rayonnement de l'antenne. Ce paramètre peut être déterminé expérimentalement ou numériquement; il est utilisé pour relier le gain à la directivité.

Directivité et Gain

La directivité d'une antenne indique la manière de la concentration de son rayonnement dans certaines directions privilégiées de l'espace. Elle est exprimée par le rapport entre l'intensité de rayonnement dans une direction donnée et l'intensité de rayonnement moyenne à travers toutes autres directions. L'intensité de rayonnement moyenne est égale à la puissance totale rayonnée par l'antenne divisée par 4π . Elle est exprimée par la formule suivante :

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{ray}}$$

Où D est la directivité, U est l'intensité de rayonnement dans la direction privilégiée (W/unité d'angle solide), U_0 est l'intensité de rayonnement d'une source isotrope et P_{ray} est la puissance totale rayonnée par l'antenne.

Si la direction n'est pas spécifiée, la directivité de l'antenne est égale à sa valeur maximale, donnée par la formule:

$$D = D_{\max} = \frac{U_{\max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{ray}}$$

$D_{\max}$ étant la directivité maximale et $U_{\max}$ l'intensité de rayonnement maximale.

La directivité peut être inférieure ou supérieure à 1 sur une échelle linéaire, ou bien positive ou négative sur une échelle logarithmique. Le gain est une autre grandeur utile de la performance d'une antenne. Il est en fonction de la directivité et prend en compte les pertes en puissance et donc l'efficacité et les propriétés directionnelles de l'antenne. Le gain $G(\theta, \phi)$ est donné par la formule:

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{\text{intensité de rayonnement dans la direction } (\theta, \phi)}{\text{puissance totale d'entrée à l'antenne}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{en}}$$

Souvent, nous utilisons la notion de **gain relatif**, défini comme le rapport de gain de puissance dans une direction donnée, au gain de puissance d'une antenne de référence, dans sa direction de référence. La puissance d'entrée est la même pour les deux antennes. L'antenne de référence est souvent un dipôle, cornet, ou n'importe **quelle** antenne ayant un gain connu ou pouvant être calculé. Dans la plupart des cas, l'antenne de référence est une source isotrope sans **pertes**. D'où, cette formule peut donc s'écrire comme suit :

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{en}(\text{source isotrope sans pertes})}$$

Quand la direction n'est pas spécifiée, le gain en puissance est souvent pris dans la direction du rayonnement maximal. La puissance totale rayonnée (P_{ray}) est reliée à la puissance totale d'entrée (P_{en}) par la formule:

$$P_{ray} = e_r \cdot P_{en}$$

Où e_r est l'efficacité de rayonnement de l'antenne. En utilisant les deux équations précédentes on peut déduire que :

$$G(\theta, \phi) = e_r \left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{ray}} \right]$$

Et aussi:

$$G(\theta, \phi) = e_r D(\theta, \phi)$$

Et le gain maximal est relié à la directivité maximale par la formule :

$$G_{\max} = e_r D_{\max}$$

Partie II Canaux de transmission

Un câble coaxial est un support de transmission électrique constitué d'une âme de transmission de signal d'information qui est longé par une couche diélectrique. Pour surmonter le problème d'interférence le conducteur interne est longé par une tresse ou ruban et d'une gaine isolante externe qui sert aussi à protéger le câble. Ce type de câble est caractérisé par une large bande passante importante. Pour cela, les applications courantes de ce type de câble est la réception TV et la transmission de la vidéo.

D'une façon générale, un tronçon de ligne électrique peut être représentée par les paramètres (R,L,G,C), le modèle équivalent est représenté dans la figure ci-dessous.

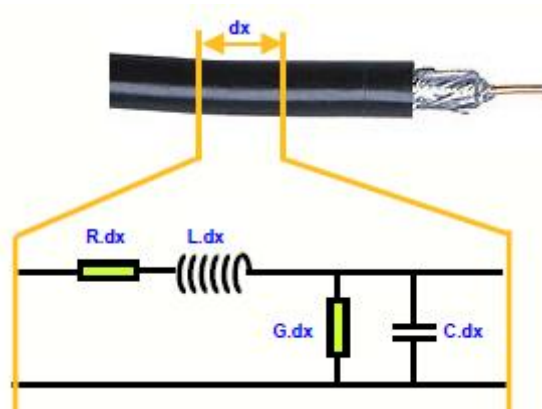


Figure: Modèle électrique d'une section du câble coaxial.

Dans le cas d'une paires coaxiales ces différents paramètres sont donnés par:

Capacité par unité de longueur :
$$C = \frac{2\pi \epsilon}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad \text{en [F/m]}$$

Inductance par unité de longueur :
$$L = \left(\frac{\mu}{2\pi}\right) \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad \text{en [H/m]}$$

La résistance linéique
$$R = e \sqrt{\frac{f\mu}{\pi\sigma}} \left[\frac{1}{D} + \frac{1}{d} \right] \quad \text{en [ohms/m]}$$

Conductance par unité de longueur
$$G = 4\pi^2 \frac{\epsilon \cdot f \cdot \text{tg} \delta}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad \text{en [1/ohms.m]}$$

Avec D et d et sont, respectivement, les diamètres interne et externes du cables.

L'impédance caractéristique de la ligne est donnée par:

$$Z = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}} \quad [\text{ohms/m}]$$

Dans le cas des lignes sans pertes :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Donc l'impédance Caractéristique se résume à : $Z_C = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log_{10}\left(\frac{D}{d}\right) = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{D}{d}\right)$ où $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$.

Coefficient de propagation $Z = \sqrt{(R + jL\omega)(G + jC\omega)}$

Dans ce qui suit, on considère les deux tensions $U(0,t)$ et $U(x,t)$ le long de la ligne ci-dessous:

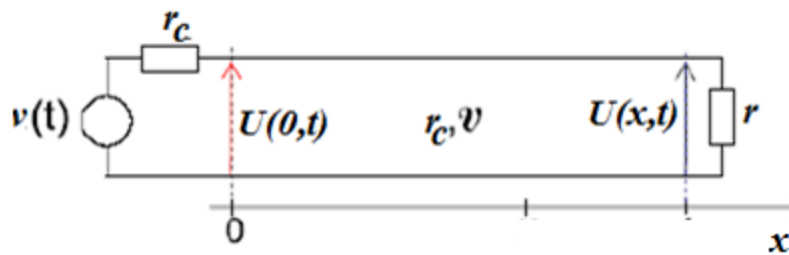


Figure : Tensions $U(0,t)$ et $U(x,t)$

L'expression de ces deux tensions est :

$$U(0,t) = \frac{1}{2} [v(t) + \Gamma \cdot v(t - 2\tau)]$$

$$U(x,t) = \frac{1 + \Gamma}{2} v(t - \tau)$$

Si le générateur produit une tension sinusoïdale impulsionnelle d'amplitude e à t égal à 0

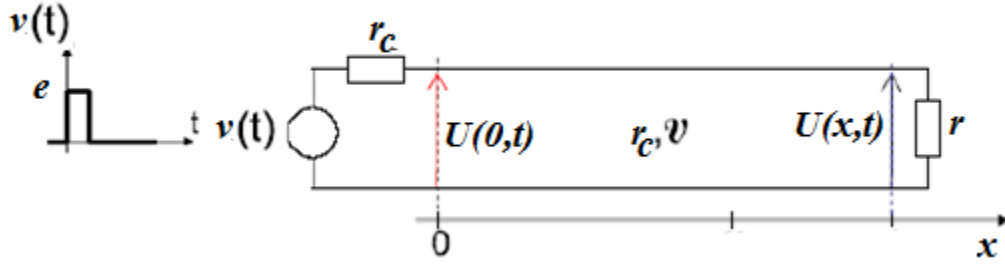


Figure : Cas d'une ligne en régime impulsionnel.

Les diagramme des différents tensions $e(t)$ sont donnés dans la figure ci-dessous:

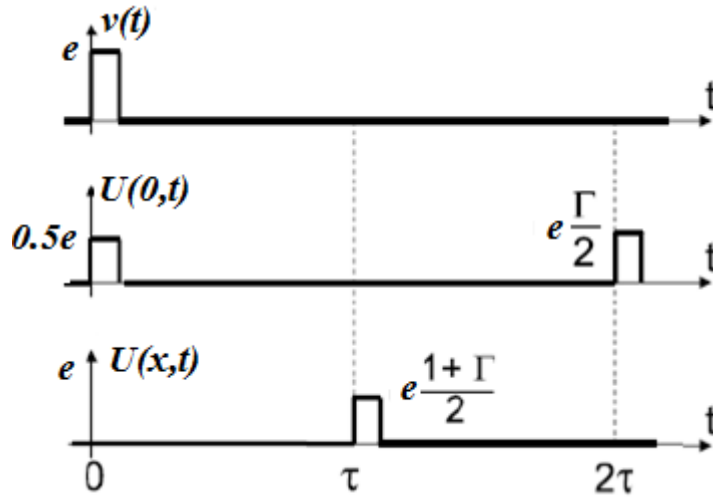


Figure: Diagramme en régime impulsionnelle.

Chaque milieu de propagation est caractérisé par les paramètres:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r} f} = \frac{2\pi c}{\omega \sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

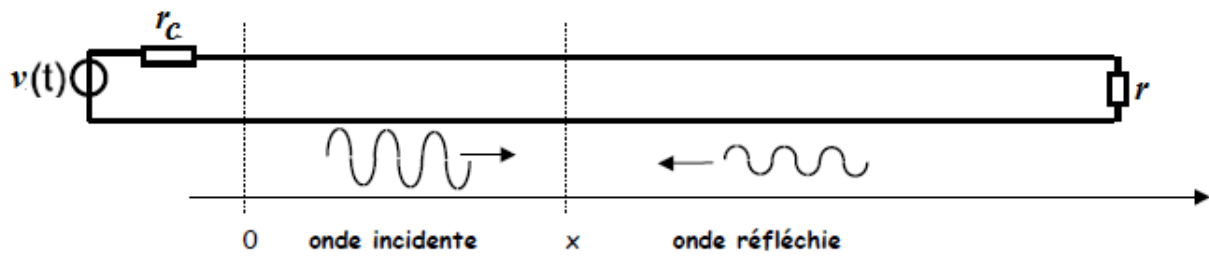
$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} = c \mu_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} = \frac{1}{c \epsilon_0} \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}$$

On définit le facteur de réflexion d'un guide par:

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_{\text{ligne}} - Z_{\text{charge}}}{Z_{\text{ligne}} + Z_{\text{charge}}}$$

Où V_0^- , V_0^+ , Z_{ligne} et Z_{charge} sont, respectivement, l'onde réfléchie, l'onde incidente, l'impédance de la ligne d'alimentation et l'impédance de la charge.

Comme le montre la figure ci-dessous, ce rapport exprime aussi les pertes de retour dans une ligne de transmission chargée par une impédance Z_{charge} .



Le rapport d'ondes stationnaires, en fonction du coefficient de réflexion Γ , est donné par l'équation ci-dessous:

$$ROS = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Travail demandé

La première partie de ce module est la suite du module TP antenne étudié en 3^{ème} année. Les étudiants ont étudié les caractéristiques et les performances de quelques antennes disponibles dans notre laboratoire. monopole, dipôle, microrubans, hélice, Yagi-Uda ont été caractérisées.



Figure: Quelques antennes disponible au laboratoire-1

L'objectif de cette partie est de concevoir et de réaliser différents types d'antennes pour but de faire apprendre aux étudiants les différentes phases de conception d'antennes. Dans ce TP, le choix du type d'antenne à concevoir revient aux étudiants (à savoir: microruban, dipôle, monopole, hélice, Yagi-Uda, cornet,...). De même, le choix du simulateur électromagnétique à utiliser pour optimiser les paramètres et les dimensions des antennes à concevoir revient aussi aux étudiants (CST, HFSS, Zeland,...). La seule exigence de l'enseignant est l'application visée qui est la bande X, exactement pour un fonctionnement autour de la fréquence de résonance de 8.5 GHz. Donc:

- 1. Chaque binôme doit faire une profonde recherche bibliographique sur les propriétés et les caractéristiques de l'antenne choisie ainsi que les techniques utilisées pour améliorer ses performances, en matière de largeur de bande et de gain. Cela nécessite une bonne compréhension du principe de fonctionnement de l'antenne visée et des principaux paramètres qui la valorisent (dimensions, bande passante, diagramme de rayonnement, polarisation etc.).*
- 2. La deuxième étape de la conception consistera à définir les paramètres de l'antenne à concevoir en fonction de l'application visée. Un simulateur électromagnétique (ex. logiciel CST) va permettre aux étudiants de fixer et d'optimiser ses différents paramètres. Donc, le simulateur va permettre aux étudiants d'effectuer une étude paramétrique pour optimiser les différents paramètres de l'antenne de façon à maximiser ses performances, surtout en matière de rayonnement et d'adaptation. Les étudiants doivent tracer les principaux paramètres et performances des antennes conçues (coefficient de réflexion, diagrammes de rayonnement,*

gain,...). Pour ce faire les étudiants peuvent utiliser le logiciel "Origin" pour tracer les résultats trouvés.

3. Si après vérification des performances des antennes conçues s'avèrent bonnes, les étudiants peuvent passer à la phase de la réalisation.

4. Et enfin, les étudiants peuvent passer à la phase des mesures qui est la dernière étape qui permet de valider les résultats de simulation. Ainsi, les étudiants qui vont réaliser leurs antennes peuvent utiliser l'analyseur de réseau vectoriel R&S®ZNB à deux port, disponible au sein de notre département, pour mesurer le coefficient de réflexion de leurs antennes en fonction de la fréquence, afin de déduire la largeur de bande de fonctionnement. Le principe consiste à comparer l'onde incidente à l'onde réfléchiée par l'antenne dans un plan de référence, imposé au cours de la calibration du dispositif.



Figure: Analyseur de réseaux

4. En premier temps, pour la deuxième partie de ce module -canaux de transmission-, il est demandé à chaque binôme d'effectuer une recherche bibliographique profonde (partie théorique) sur les lignes de transmission d'une manière générale, les guides d'ondes et principalement sur les différents paramètres électriques qui les caractérisent. De plus, il est demandé aux étudiants de simuler une section de ligne de transmission à l'aide du logiciel LTspice.

Références

1. Abdelhalim CHAABANE, Conception d'une antenne BIP large bande à fort gain, thèse de doctorat présentée à l'université Sétif-1, 2017.
2. Djamel ABED, Ahcene BOUALLEG, Polycopié de travaux pratiques d'antennes, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2015-2016.
3. Samy LABANDJI. Cours de télécommunications fondamentales. Université des sciences et de la technologie Houari Boumédiène. 2018. (<https://www.samylab.com/>)
4. Yves LESCOP. Supports de transmission. Post BTS R2i. 2002.
5. Frédéric PEPIN. Lignes de propagation. Ecole nationale supérieure de l'électronique et de ses applications.
6. B. AMANA, J.-L. LEMAIRE. Propagation d'ondes électromagnétiques dans un guide d'onde à section rectangulaire, Univ. de Cergy-Pontoise, Licence de Physique.
7. JEAN-PHILIPPE Muller. Propagation sur les lignes. BS2EL - Physique appliquée, 2008.
8. JEAN-PHILIPPE Muller. Propagation guidée sur les lignes.