

Polytechnique Montréal
Département de Génie Électrique
ELE3500 Ondes électromagnétiques
Hiver 2022, Devoir #2

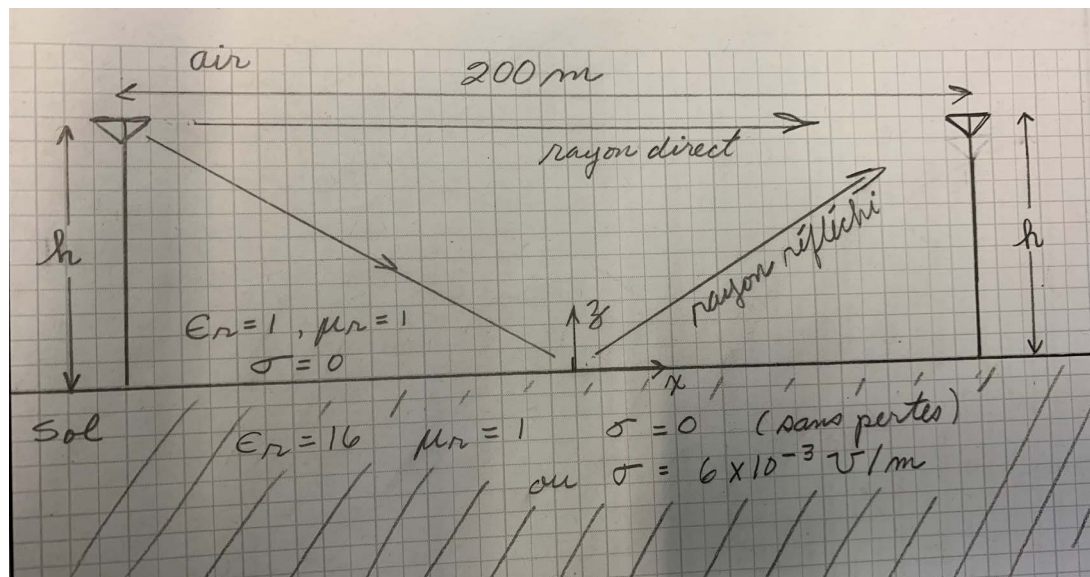
À remettre sur Moodle.

Question 1. À remettre avant 21h le 22 mars 2022

Deux antennes sont situées à une hauteur de 17.5 mètres au-dessus du sol, et séparées d'une distance de 200 mètres. Une des antennes transmet et l'autre reçoit. La fréquence utilisée est de 100 MHz. Partant de l'antenne qui transmet, on suppose que deux ondes peuvent se rendre à l'antenne réceptrice:

- un rayon direct;
- un rayon qui se réfléchit sur le sol.

On supposera que les deux ondes émises ont une même amplitude, soit un champ électrique de 1 volt/mètre. Elles ont également la même phase au point de départ.

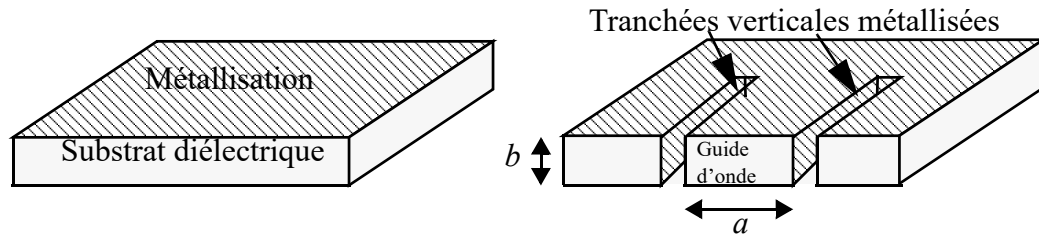


- On suppose d'abord que le sol est non conducteur, i.e. $\sigma = 0$. Calculez l'amplitude de la composante y du champ E total à l'antenne réceptrice lorsque l'antenne de transmission émet en polarisation horizontale.
- Refaire la question (a) mais dans le cas où l'antenne transmet des ondes polarisées verticalement. Au lieu de calculer la composante y du champ reçu, calculez cette fois la composante z .
- Comparez les réponses de (a) et (b), et donnez une explication sur la différence de niveau observée.

- d. Considérez le rayon réfléchi sur le sol et la polarisation verticale (cas de la partie (b)). Obtenir l'amplitude du champ E au niveau du sol, juste sous l'interface ($z=0^-$) et à une profondeur de 10 mètres dans le sol. On suppose pour le sol une valeur typique de conductivité dans la vallée du Saint-Laurent, soit 6×10^{-3} Siemens/m.

Question 2. À remettre avant le 30 mars à 21h.

On désire concevoir l'équipement radiofréquence pour le segment ondes millimétriques du système de communications mobiles 5G. Au Canada on prévoit utiliser une fréquence de 28 GHz. Une des technologies de lignes de transmission très utilisée à ces fréquences est le guide d'onde intégré à un substrat diélectrique. Essentiellement, il s'agit d'utiliser un substrat diélectrique de circuit imprimé métallisé sur ses deux faces (supérieure et inférieure), de creuser des tranchées verticales dans le substrat avec un laser, et de métalliser les faces de celles-ci par dépôt de couche de cuivre afin d'obtenir l'équivalent d'un guide d'onde rectangulaire rempli de diélectrique.



La largeur a du guide obtenu est égale à la distance entre les tranchées, alors que l'épaisseur b du guide est égale à l'épaisseur du substrat. Toutes les surfaces métallisées sont faites de cuivre. Pour le substrat, on considère utiliser le [RO3003](#) de Rogers, avec une épaisseur de 1.52 mm. Pour minimiser les pertes dans les parois de cuivre, on travaille à une fréquence 20% supérieure à la fréquence de coupure du mode fondamental.

- Obtenir la largeur a du guide, et calculez la largeur de bande utilisable avec un seul mode de propagation.
- Si on suppose des parois métalliques parfaitement conductrices, quelle serait la constante d'atténuation α_d due uniquement aux pertes dans le substrat diélectrique? Donnez la réponse en neper par mètre.
- Le guide d'onde se termine par une charge dont l'amplitude du coefficient de réflexion est $|\Gamma| = 0.25$. Quelle est la distance entre les minimums de champ électrique le long du guide?
- On excite l'entrée du guide avec le mode TE_{10} , et avec une puissance de 1 watt. Trouvez la valeur crête maximale du champ électrique dans le guide, et indiquez à quel endroit dans le guide ce champ maximal est créé. Supposez que le guide est sans pertes.
- Afin de propager le signal 5G de 28 GHz à tous les étages du pavillon Lassonde de Polytechnique, un ingénieur propose de se servir des conduits de ventilation du bâtiment comme guide d'onde. Ceux-ci sont à section carrée de 15 cm x 15 cm. Obtenir les vitesses de groupe du mode le plus lent et du mode le plus rapide pouvant se propager dans ces conduits. Commentez sur la pertinence de cette proposition.

Question 3. À remettre avant 21h le mercredi 6 avril

Répondre aux questions suivantes:

- a. Reprendre la partie b) de la question 2, mais calculez plutôt la constante d'atténuation α_{Cu} due à la conductivité finie du cuivre ($\sigma = 5,8 \times 10^7 \text{ S/m}$). Cette fois supposez que le diélectrique est sans pertes. Quelle est la longueur de guide maximale si on veut garder les pertes inférieures à 3 dB?
- b. Une ligne coaxiale semi-rigide dont l'impédance caractéristique Z_0 est de 50 ohms est remplie de Teflon ayant une permittivité relative de 2.1. Le diamètre externe du Teflon est de 0.1175 pouce. Obtenir le diamètre du conducteur intérieur.
- c. Obtenir la constante d'atténuation α_{Cu} de cette ligne coaxiale due aux pertes dans le cuivre, en supposant une fréquence d'opération de 20 GHz. On supposera que le diélectrique est sans pertes. Le fabricant indique dans la fiche technique que l'atténuation serait de 70 dB/100pied à cette fréquence. Est-ce une donnée fiable selon vous?
- d. On s'intéresse à déterminer la fréquence maximale d'utilisation de cette ligne. Si la fréquence est assez élevée il est possible qu'un mode TM se propage à partir d'une certaine fréquence. Supposons que ce mode ait une symétrie azimutale (i.e. $\frac{\partial}{\partial \phi} = 0$).
Obtenir l'expression générale de toutes les composantes du champ électrique dans la région du diélectrique, i.e. $a \leq \rho \leq b$, où a et b sont respectivement les rayons interne et externe de la ligne coaxiale. Appliquez les conditions frontières appropriées sur les deux surfaces métalliques et déduisez-en une équation qui permettrait d'obtenir la constante de séparation k_t . Mettez l'équation sous la forme $f(k_t) = 0$. (NB: ne pas essayer de résoudre cette équation numériquement!) Reliez ensuite k_t la fréquence de coupure de ce mode TM.
- e. S'il n'y avait pas de conducteur interne et que la structure était entièrement remplie de Teflon, quelle serait la fréquence de coupure des deux premiers modes à pouvoir se propager dans la ligne?

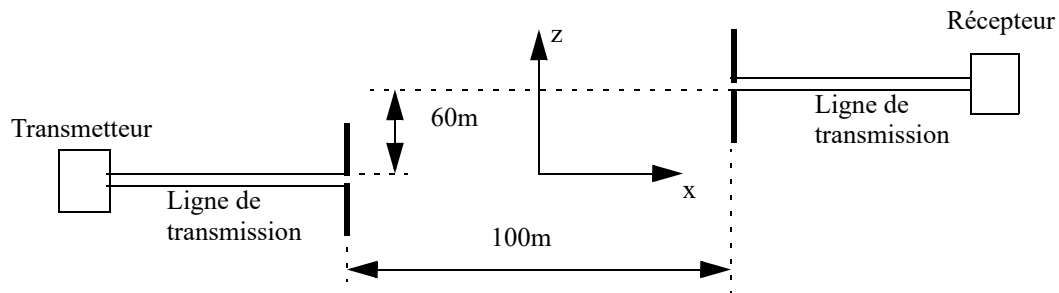
Question 4. À remettre le 19 avril avant 21h.

Le courant en direction +z sur une antenne dipôle demi-onde est donné par l'expression suivante:

$$I(z) = \begin{cases} I_0 \cos(\beta z) & |z| \leq \lambda/4 \\ 0 & |z| > \lambda/4 \end{cases}$$

où λ est la longueur d'onde dans l'air à la fréquence d'opération des réseaux WiFi à 2.45 GHz.

- Faites un croquis de la distribution de courant sur l'antenne.
- Obtenir l'expression du champ électrique lointain de cette antenne en coordonnées sphériques.
- Tracez le diagramme de rayonnement de cette antenne dans le plan E et dans le plan H.
- Il est connu que la directivité d'une telle antenne est de 1.64. On fabrique l'antenne avec un matériau conducteur qui a des pertes, de sorte que l'efficacité de rayonnement est de seulement 90%. L'impédance de l'antenne est de 75Ω . Deux antennes dipôle demi-onde identiques sont utilisées pour établir un lien de communication. Les antennes sont séparées de 100m le long de l'axe x et de 60m le long de l'axe z , mais elles demeurent parallèles à l'axe z . On utilise des lignes de transmission, supposées sans pertes, entre le générateur et l'antenne de transmission d'une part, et entre le récepteur et l'antenne de réception d'autre part. Ces lignes ont une impédance caractéristique de 50Ω . Le générateur et le récepteur ont des impédances internes de 50Ω , et le générateur peut fournir 100 mW au maximum. Calculez la puissance au récepteur.



- Deux dipôles demi-onde, se trouvent sur l'axe z . La distance centre-à-centre entre les deux antennes est de une longueur d'onde, et les deux antennes sont alimentées avec des courants d'égales amplitudes et de phases égales. Obtenir les angles θ où on observera:
 - le rayonnement d'intensité maximum;
 - des nuls de rayonnement.

Jean-Jacques Laurin, professeur