

Couplage Electromagnétique

Exercices d'application

Exercice 1 – Modèle de capacité de découplage

Une capacité céramique de 4.7 nF est connectée sur une carte de circuit imprimé par 2 fils de cuivre ($\sigma = 5.8e7$ S/m) de 0.5 cm de longueur chacun et de 0.6 mm de diamètre.

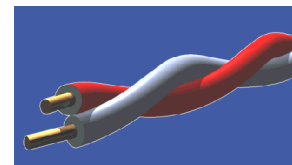


1. Proposer un modèle électrique de cette capacité et tracer son impédance en fonction de la fréquence (entre 10 KHz et 1 GHz).

2. Cette capacité est utilisée pour découpler un circuit. Celui-ci est alimenté sous 2. V et consomme un courant moyen de 1 A. On souhaite conserver une fluctuation de tension d'alimentation inférieure à 10 % de la tension d'alimentation nominale. Déterminer la bande de fréquence sur laquelle cette capacité joue efficacement son rôle de condensateur de découplage.

Exercice 2 – Transmission d'un signal sur une paire bifilaire

On considère une ligne bifilaire de longueur $L = 1$ mètre composée de 2 fils de rayon $a = 100$ μm et séparés d'une distance $d = 500$ μm . On suppose que les conducteurs sont idéaux. On applique en entrée de la ligne un signal de type échelon d'amplitude 1 V. Le générateur présente une impédance de sortie de 10 Ω . La ligne est chargée à l'autre extrémité par une résistance de 300 Ω .



On note $V(0,t)$ et $V(L,t)$ les tensions aux 2 extrémités de la ligne, et $I(0,t)$ et $I(L,t)$ les courants traversant les charges connectées à chaque extrémité de la ligne.

1. Tracer l'évolution dans le temps des tensions $V(0,t)$, $V(L,t)$ et des courants $I(0,t)$ et $I(L,t)$.

2. Vers quelles valeurs convergent le courant et la tension mesurés à chaque extrémité de la ligne ?

Exercice 3 – Réflectométrie

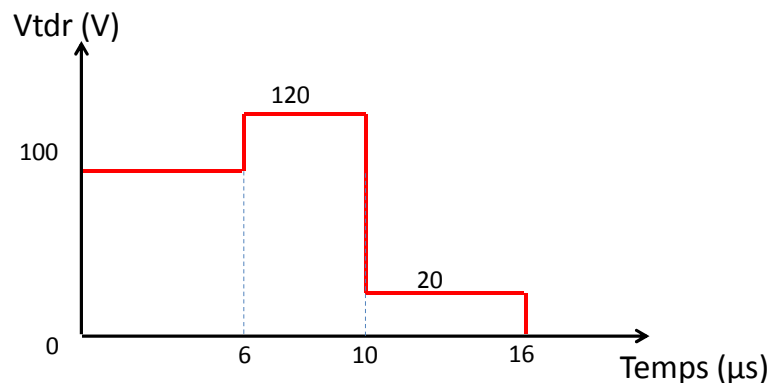
Un réflectomètre dans le domaine temporel (Time Domain reflectometry TDR) est un instrument de mesure utilisé pour analyser les propriétés des lignes de transmission et

localiser des défauts tels que des cassures. Le principe de fonctionnement repose sur l'envoi d'une impulsion brève par le réflectomètre dans la ligne à analyser et l'enregistrement simultané de la tension en sortie du réflectomètre. Celle-ci dépend de l'onde incidente produite par le réflectomètre, mais aussi de la réflexion produite par les ruptures d'impédance de la ligne à analyser.

La tension de circuit ouvert du réflectomètre est une impulsion d'amplitude $V_{co} = 200 \text{ V}$ et de $10 \mu\text{s}$ de largeur. L'impédance de sortie du réflectomètre est $Z_{TDR} = 50 \Omega$.

On souhaite analyser un câble coaxial de longueur inconnue et connectée sur une charge résistive terminale Z_L , elle aussi inconnue. On sait seulement que le câble est adapté $Z_c = 50 \Omega$ et qu'il est constitué d'un isolant de type teflon ($\epsilon_r = 2.1$). On suppose que le câble ne présente pas de défauts.

La mesure au réflectomètre de ce câble donne le résultat suivant :



Déterminer la longueur du câble l et l'impédance de la charge terminale Z_L .

Exercice 4 – Lignes en $\lambda/4$ – transformateur d'impédance - stub

Une ligne en $\lambda/4$ est une ligne dont la longueur est égale au quart de la longueur d'onde à une fréquence donnée. Le but de cet exercice est de comprendre les propriétés intéressantes de toute ligne de transmission en condition $\lambda/4$.

1. Soit une ligne de transmission de longueur l d'impédance caractéristique Z_c , chargée par une impédance terminale Z_L . On appelle β la constante de propagation. Déterminer l'expression théorique de l'impédance Z_{in} vue depuis l'entrée de la ligne.

2. Que devient l'expression précédente si la longueur de la ligne $l = \lambda/4$? Quel est l'effet de la ligne sur l'impédance vue depuis l'entrée de la ligne ?

3. En condition $\lambda/4$, quelle impédance voit-on en entrée de la ligne si on charge la sortie de la ligne par une capacité C ? Par une inductance L ?

4. On connecte une antenne à un générateur de tension à l'aide d'une ligne microruban d'impédance caractéristique $Z_c = 50 \Omega$. L'impédance de sortie du générateur est aussi $= 50 \Omega$. L'antenne doit émettre à 2 GHz. Celle-ci est équivalente à une impédance complexe formée par une résistance de 50Ω en parallèle d'une capacité de 10 pF . Que pensez-vous de l'efficacité de transfert de puissance entre le générateur et l'antenne ? En vous basant sur les questions précédentes, quelle solution simple proposez-vous pour optimiser le transfert de puissance à l'antenne ?

Exercice 5 – Filtre à ligne micro ruban

Une ligne de transmission peut être modélisée à l'aide d'un réseau distribué d'inductances et de capacités. Judicieusement dimensionnée, une ligne peut donc servir de filtre passe-bas, passe-haut ou passe-bande. Le but de cet exercice est de comprendre le principe de base d'un filtre à ligne micro ruban.

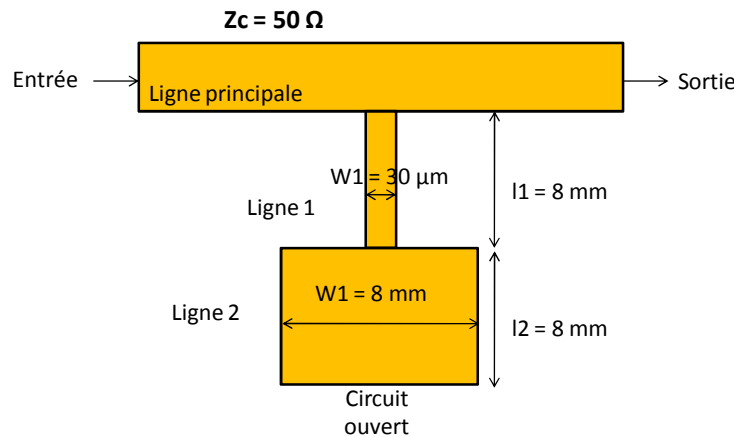
1. Soit une ligne micro ruban d'impédance caractéristique Z_c et de longueur l , chargé par une impédance Z_L . Montrer que l'impédance d'entrée de la ligne peut s'écrire :

$$Z_{in} = Z_c \frac{Z_L + jZ_c \tan \beta l}{Z_c + jZ_L \tan \beta l}$$

2. Simplifier l'expression précédente dans le cas d'une ligne électriquement courte.

3. Dans le cas d'une ligne électriquement courte, calculer l'impédance d'entrée de la ligne en fonction de la fréquence lorsque la ligne est chargée par une faible impédance Z_L tel que : $Z_L \ll Z_c \beta l$? Si $Z_c \ll Z_L \beta l$? Dans les 2 cas, comment se comporte la ligne ?

4. Soit une ligne micro-ruban adaptée 50 ohms. Celle-ci est réalisée sur un substrat de permittivité électrique relative $\epsilon_r = 2.2$ et d'épaisseur $h = 0.15$ mm. Un générateur VG avec une résistance série de 50 ohms est connecté en entrée de la ligne, alors qu'une charge 50 ohms est connectée sur la sortie. Au milieu de cette ligne principale, deux autres lignes micro ruban appelées ligne 1 et ligne 2 sont connectées en série. La ligne 2 se termine en circuit ouvert. Construire le modèle électrique équivalent de cette ligne jusqu'à $f = 2.5$ GHz.

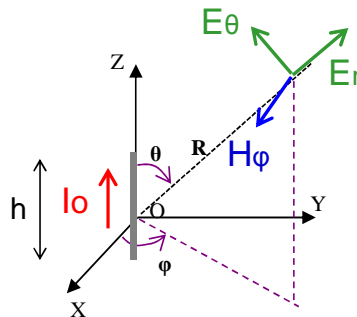


5. Déterminer l'expression théorique de la tension de charge V_L en fonction de la fréquence. Conclure sur le rôle des deux lignes micro-ruban ajoutées au milieu de la ligne principale.

6. Proposer une solution pour construire un filtre passe-bande sur la ligne principale, centrée sur $f = 2$ GHz.

Exercice 6 – Réseau d’antennes dipôles élémentaires

On considère l’antenne dipôle électriquement courte suivante placée dans l’air :



On suppose qu’elle est parcourue par un courant sinusoïdal de fréquence $f = 200$ MHz d’amplitude $I_0 = 20$ mA constante en tout point de l’antenne. La longueur de l’antenne $h = 10$ cm.

1. Calculer le champ électrique dans le plan horizontal (plan x, y) en fonction de la distance r , lorsque $r \gg h$. Quelle est l’amplitude du champ électrique à 1 mètre de l’antenne ? Celle du champ magnétique ?

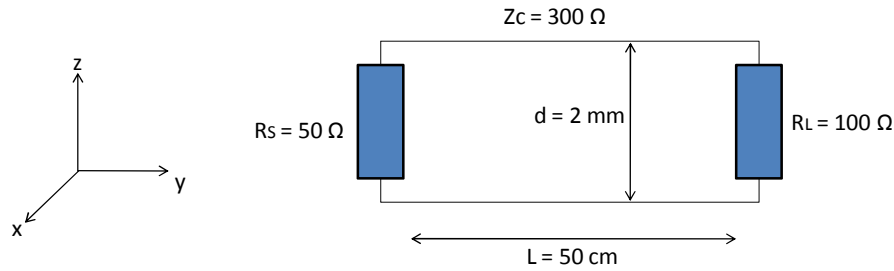
2. On place 2 antennes dipôles identiques le long de l’axe Y , toujours orientés selon l’axe Z . Celles-ci sont séparées d’une distance d . Elles sont alimentées en phase. Montrer que le champ en tout point du plan horizontal peut s’écrire sous la forme $E_0(r)\cos(\beta\Delta)$, où vous préciserez Δ .

3. Tracer de manière qualitative l’évolution du champ électrique dans le plan horizontal en fonction de l’angle φ lorsque $d = \lambda/2$. Conclure quant à l’effet de cette deuxième antenne.

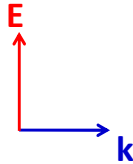
Exercice 7 – Couplage d’une onde électromagnétique sur un câble

Soit la ligne bifilaire, composée de 2 fils de longueur $l = 50$ cm et séparés par de l’air par une distance $d = 2$ mm. La ligne est orientée le long de l’axe y . On néglige les pertes des conducteurs. L’impédance caractéristique de la ligne est de 300Ω , elle est chargée à une extrémité par une charge de 50Ω et à l’autre par une charge de 100Ω .

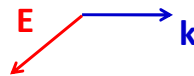
La ligne est excitée par une onde électromagnétique plane sinusoïdale, de fréquence $f = 100$ MHz. L’amplitude du champ électrique est de 10 V/m. Trois polarisations, notées P1, P2 et P3 sont successivement utilisées. La direction de l’onde k et du champ électrique E sont données sur la figure ci-dessous.



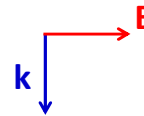
Polarisation P1



Polarisation P2



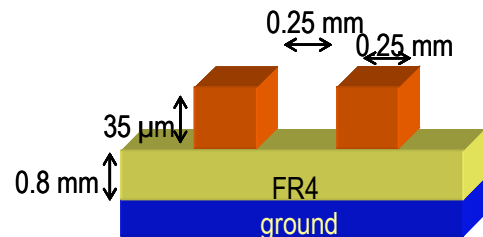
Polarisation P3



Dans les 3 cas de polarisation, déterminer les amplitudes des tensions induites à chaque extrémité de la ligne.

Exercice 8 – Insertion de la propagation dans un modèle de diaphonie

Soit 2 lignes microruban couplées de longueur $L_0 = 10$ cm. La ligne 1 est la ligne émettrice, la ligne 2 est la ligne victime. On suppose que les lignes sont sans pertes et correctement adaptées. On appelle Z_{c1} l'impédance caractéristique de la ligne 1 et Z_{c2} celle de la seconde.



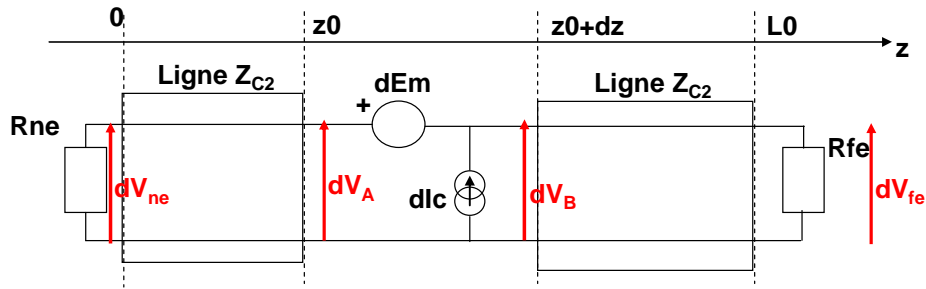
On cherche à déterminer les expressions analytiques des tensions induites par diaphonie à chaque extrémité de la ligne victime, en tenant compte de l'effet de la propagation le long des lignes. Le modèle sera construit dans le domaine fréquentiel, en considérant une excitation sinusoïdale.

On ne considérera que le couplage de la ligne 1 sur la ligne 2. On négligera l'effet de rétrocouplage de la ligne 2 sur la ligne 1.

1. Déterminer les inductances et capacités propres et mutuelles linéiques des lignes. En déduire une valeur approchée des impédances de charge connectées aux extrémités des 2 lignes.

2. Etablir les équations des 2 lignes. Qu'implique l'hypothèse d'absence de rétrocouplage ?

3. Soit un tronçon de ligne élémentaire de longueur dz sur la ligne victime, situé à une abscisse z_0 de la ligne. On appelle dVA et dVB les tensions à chaque extrémité de ce tronçon induite par la diaphonie. Déterminer les expressions de dVA et dVB en fonction de $V_1(z_0)$ et $I_1(z_0)$, les tensions et courants sur la ligne émettrice à l'abscisse z_0 .



4. En déduire les expressions de dV_{ne} et dV_{fe} , les tensions induites aux extrémités de ligne victime lorsqu'on ne considère le couplage diaphonique que sur le tronçon élémentaire située en z_0 .

5. Déterminer les expressions théoriques en fonction de la fréquence de V_{ne} et V_{fe} , les tensions induites aux extrémités de ligne victime lorsqu'on considère le couplage diaphonique sur toute la ligne victime.

6. Tracer en fonction de la fréquence l'évolution des tensions V_{ne} et V_{fe} .

7. Comparer les résultats obtenus avec ce modèle et ceux donnés par le modèle quasi-statique établi en cours.

8. A 1 GHz, quelles sont les valeurs de V_{ne} et V_{fe} si on connecte un générateur sinusoïdale de 1 V d'amplitude en entrée de la ligne émettrice ?