

# ELE3500 ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Département de génie électrique

Été 2022

3 crédits

cours magistral: 3h/sem.;

travail personnel: 4h/sem.; travaux pratiques: 2h/sem.

Professeur: Sébastien Loranger ([sebastien.loranger@polymtl.ca](mailto:sebastien.loranger@polymtl.ca))

Bureau: M-6019 (éventuellement M-6025)

Disponibilités pour consultation : sur rendez-vous par courriel ou le lundi matin (9h30-12h).

Chargé de travaux pratiques : Mario Le Blanc, ing. ([mario.le-blanc@polymtl.ca](mailto:mario.le-blanc@polymtl.ca))

Pré-requis obligatoire: *PHS1102 Champs Électromagnétiques* ou l'équivalent

## I. Objectifs d'apprentissage

### 1. Lignes de transmission (KRD chap. 11, PRR chap. 4)

- a. Analyse des lignes de transmission: équations du télégraphiste, solutions temporelles et fréquentielles;
- b. Paramètres des lignes de transmission: capacité, inductance, résistance, conductance, coefficient de propagation, coefficient d'atténuation, vitesse de phase, vitesse de groupe, impédance caractéristique;
- c. Étude des lignes terminées par une charge: coefficient de réflexion, taux d'ondes stationnaires, puissance réfléchie, transformation d'impédance le long de la ligne;
- d. Transitoires sur les lignes de transmission avec charges linéaires et non linéaires;
- e. Abaque de Smith: adaptation et transformation d'impédance.

### 2. Ondes électromagnétiques planes (KRD<sup>1</sup> sect. 12-1 à 12-6, PRR, chap. 2)

- a. Équation de propagation obtenue des équations de Maxwell;
- b. Solution de l'équation de propagation simplifiée et interprétation des résultats;

---

<sup>1</sup>KRD et PRR indiquent respectivement les ouvrages de K.D. Demarest et de P.R. Renaud et al. de la section Bibliographie

- c. Champs électromagnétiques en régime permanent et équation de Helmholtz;
- d. Ondes planes dans un milieu sans pertes, sans frontières et sans sources;
- e. Impédance caractéristique du milieu, vecteur de Poynting;
- f. Polarisation linéaire, circulaire et elliptique;
- g. Propagation des ondes dans un milieu conducteur;
- h. Propagation des ondes dans une direction arbitraire: vitesse de phase et vitesse de groupe.

### **3. Ondes électromagnétiques planes en présence de surfaces de discontinuité (KRD sect. 12-7 et 12-8, PRR chap. 2)**

- a. Lois de Snell;
- b. Réflexion sur les milieux diélectriques: incidence normale, incidence oblique, réfraction;
- c. Réflexion sur les milieux conducteurs;
- d. Transmission à travers une superposition de plusieurs couches diélectriques (OBJECTIF SUPPRIMÉ);
- e. Transmission des ondes à la surface du sol et réflexion sur l'ionosphère (OBJECTIF SUPPRIMÉ);
- f. Effet Doppler.

### **4. Guides d'ondes (KRD sect. 13-1 à 13-4, FG sect. 8.6.8 à 8.6.13, PRR chap. 3)**

- a. Expression mathématique du champ électromagnétique à l'intérieur d'un guide à partir des équations de Maxwell et de l'équation de propagation, pour guides métalliques à section rectangulaire et à section circulaire (OBJECTIF SUPPRIMÉ et guides diélectriques plans);
- b. Fréquence de coupure, vitesse de phase, longueur d'onde, impédance caractéristique dans un guide pour les modes TE et TM;
- c. Représentation graphique des champs électrique et magnétique dans un guide;
- d. Transport d'énergie dans un guide;
- e. Pertes d'énergie dans un guide;
- f. Mode TEM: guide coaxial et plaques parallèles.

### **5. Antennes (KRD sect. 14-1 à 14-4, 14-6-1, 14-7-3)**

- a. Solution des champs électromagnétiques pour une source de type dipôle élémentaire,

- champs lointains et champs réactifs;
- b. Puissance rayonnée, diagramme de rayonnement, résistance de rayonnement;
  - c. Application à l'antenne de type dipôle court;
  - d. Notions de gain, de directivité et d'efficacité d'une antenne;
  - e. Réseaux d'antennes simples.
  - f. Formule de transmission de Friis.

## **II. Objectifs de performance**

L'étudiant(e) qui réussit ce cours devra être capable de solutionner les problèmes suivants:

### **1. Lignes de transmission**

- a. Solutionner les équations différentielles des lignes de transmission;
- b. Calculer le coefficient de réflexion, le taux d'ondes stationnaires et la vitesse de propagation pour une ligne de transmission;
- c. Calculer l'impédance le long d'une ligne de transmission en fonction de l'impédance de la charge et des caractéristiques de la ligne;
- d. Calculer la puissance perdue sur une ligne de transmission;
- e. Calculer la tension et le courant en un point sur une ligne de transmission soumise à une excitation transitoire;
- f. Utiliser l'abaque de Smith pour synthétiser des circuits d'adaptation d'impédance.

### **2. Ondes électromagnétiques planes**

- a. Écrire les équations de Maxwell en notation vectorielle complexe pour des champs à variation sinusoïdale par rapport au temps, et en déduire les équations de propagation pour les champs  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{H}$ ;
- b. Solutionner les équations de propagation pour une onde électromagnétique plane;
- c. Déduire les propriétés élémentaires (polarisation, direction de propagation, longueur d'onde, fréquence) d'une onde plane uniforme à partir des expressions des champs  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{H}$ ;
- d. Calculer l'impédance d'onde d'un milieu et la densité de puissance transportée par une onde plane;
- e. Solutionner l'équation de propagation des ondes planes sinusoïdales dans un milieu conducteur et en déduire les propriétés de  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{H}$ ;
- f. Calculer la profondeur de pénétration d'une onde plane sinusoïdale dans un

conducteur;

- g. Calculer l'impédance de surface d'un milieu conducteur;
- h. Écrire l'expression du champ électrique correspondant à une onde à polarisation linéaire, circulaire et elliptique.

### 3. Propagation des ondes électromagnétiques planes en présence de surfaces de discontinuité

- a. Dédire les lois de Snell;
- b. Définir l'indice de réfraction et en écrire l'expression en fonction des propriétés électriques et magnétiques du milieu;
- c. Dédire les expressions des champs  $E$  et  $H$  des ondes réfléchi et transmise, dans le cas d'une incidence sur une surface de séparation plane entre deux milieux;
- d. Dédire l'expression des puissances réfléchies et transmises, de même que le coefficient de réflexion;
- e. Obtenir l'expression des champs transmis dans une structure plane comprenant plusieurs couches diélectriques superposées, illuminée par une onde plane (OBJECTIF SUPPRIMÉ);
- f. Dédire les conditions de réflexion totale et de transmission totale (angle de Brewster) pour une interface entre deux milieux diélectriques;
- g. Calculer la fréquence de l'onde réfléchi par un conducteur en mouvement.

### 4. Guides d'ondes

- a. Obtenir les expressions mathématiques des champs  $E$  et  $H$  pour les modes TE et TM dans les guides métalliques à sections rectangulaire et circulaire, ( OBJECTIF SUPPRIMÉ puis dans les guides diélectriques plans);
- b. Obtenir les expressions mathématiques des champs  $E$  et  $H$  pour le mode TEM dans les guides coaxial et à plaques parallèles;
- c. Obtenir les caractéristiques (longueur d'onde, fréquence de coupure, vitesse de phase, vitesse de groupe, coefficient de propagation, coefficient d'atténuation, impédance, puissance) des modes TEM, TE et TM;
- d. Faire la représentation graphique du champ  $E$  et du champ  $H$  à l'intérieur d'un guide d'ondes pour un mode de propagation donné;
- e. Calculer les dimensions d'une guide métallique rectangulaire ou circulaire pour un mode donné et une largeur de bande choisie;

- f. Calculer la puissance maximale qui peut être transmise dans un guide;
- g. Calculer les pertes du mode fondamental dans un guide métallique.

**5. Antennes**

- a. Dédurre de la solution des champs pour une source de type dipôle élémentaire les contributions au champ rayonné et au champ réactif;
- b. Pouvoir tracer le diagramme de rayonnement d'antennes dipôles courtes d'orientation arbitraires;
- c. Pouvoir tracer le diagramme de rayonnement de réseaux d'antennes simples;
- d. Calculer le taux de transfert de puissance entre deux antennes à l'aide de la formule de transmission de Friis.

**III. Contrôles**

Type de contrôle	Sujet	Documentation	Date	%
Examen de mi-session (2.5 h)	Lignes de transmission et ondes planes (début)	Toute documentation (support papier seulement)	6 juillet	35
Examen final (2.5 h)	Ondes planes, guides d'ondes et antennes	Toute documentation (support papier seulement)	à déterminer	35
Devoirs (2)	Matière de l'examen suivant		à déterminer	20
Laboratoire (1)	Transitoires sur lignes de transmission			10
			Total	100

NB: Lors des examens, toute calculatrice qui ne risque pas d'être confondue avec un ordinateur ou

un téléphone portable peut être utilisée.

### IV. Règlements particuliers

#### 1. Absence à un examen périodique, un laboratoire ou à l'examen final

En cas d'absence à un examen (final ou de mi-session) dont le motif est accepté par la direction des études de l'École, il reviendra au professeur de décider si un examen différé aura lieu sous forme écrite ou orale, ou si le contrôle en question est annulé. (TEXTE SUPPRIMÉ En cas d'absence à un laboratoire pour un motif accepté par la direction des études, le laboratoire sera annulé. En cas d'annulation, la cote globale du cours sera calculée sans tenir compte des examen(s) ou laboratoire(s) annulés.)

#### 2. Retard à un cours, une séance de travaux dirigés ou un laboratoire.

(TEXTE SUPPRIMÉ Par respect pour les autres, tout étudiant arrivant en retard à un cours, une séance de travaux dirigés ou un laboratoire sera invité à sortir immédiatement de la salle. Dans le cas d'un laboratoire la note accordée sera zéro.)

### V. Bibliographie

#### 1. Fortement Recommandés

La matière du cours suivra de très près le livre suivant disponible à Coopoly:

K.R. Demarest, "Engineering electromagnetics," 1<sup>e</sup> éd., Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1997.

Un cahier d'exercices résolus est mis à votre disposition (pour la durée de la session seulement) sur le site Moodle :

P.R. Renaud, J. Spooner et M. Nachman, "Électromagnétisme II – Problèmes résolus," École Polytechnique, 1991.

#### 2. Recommandé comme référence en français

F. Gardiol, "Traité d'électricité Volume III – Électromagnétisme," Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 1996.

#### 3. Références supplémentaires

S.V. Marshall et G.G. Skitek, "Electromagnetic concepts and applications," 3e édition,

Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1990.

J. D. Kraus, “ Electromagnetics,” New York: McGraw-Hill, 1992.

---

## VI. Qualités du BCAPG

1 Connaissance en génie	2 Analyse de problèmes	3 Investigation	4 Conception	5 Utilisation d'outils d'ing.	6 Travail ind. et équipe	7 Communication	8 Professionalisme	9 Impacts environ.	10 Déontologie	11 Économie et gestion de projets	12 Apprentissage continu
A	A										

### **VII. Mention relative à la protection des renseignements personnels -- *Enregistrement des activités d'enseignement en ligne en mode synchrone***

Les activités d'enseignement en ligne en mode synchrone pourront être enregistrées afin de permettre aux personnes étudiantes ne pouvant pas assister en temps réel au cours, notamment les étudiantes et les étudiants étrangers résidant dans un fuseau horaire différent de celui de Polytechnique Montréal, d'avoir accès à l'activité d'enseignement. L'enregistrement sera ensuite rendu disponible sur Moodle aux seules personnes étudiantes inscrites au cours ELE3500 au trimestre d'hiver 2021.

Si l'étudiante ou l'étudiant active son micro et sa caméra lors de cette activité d'enseignement, il est possible que son nom, son image et sa voix apparaissent sur l'enregistrement. Ces renseignements personnels seront accessibles à la personne enseignante, aux personnes étudiantes inscrites au cours ELE3500 au trimestre d'hiver 2021 et aux employés de Polytechnique affectés à la gestion de Moodle. L'enregistrement sera conservé de façon confidentielle conformément à la *Loi sur l'accès aux documents des organismes publics et sur la protection des renseignements personnels*, RLRQ c A-2.1.

L'enregistrement sera retiré de Moodle 30 jours après la séance de cours et sera détruit dans les 30 jours après la fin de la session.

Si l'étudiante ou l'étudiant ne souhaite pas être enregistré, il est de sa responsabilité de désactiver son microphone et sa caméra.

À défaut de désactiver son microphone et sa caméra, l'étudiante ou l'étudiant consent à l'enregistrement audio ou audiovisuel, à la conservation, à l'utilisation et à la rediffusion de l'enregistrement de son nom, de sa voix et de son image dans le cadre de l'activité d'enseignement en ligne.

#### Rappel : droit d'auteur

Les activités d'enseignement en ligne sont protégées par les droits d'auteur et le droit à la vie privée dont le droit à l'image. En conséquence, la personne étudiante ne peut pas :

- partager les vidéos ou des extraits de celles-ci avec une autre personne;
- enregistrer localement les vidéos;
- diffuser ou vendre les vidéos.