

Chapitre 14

Transmission d'information par les ondes électromagnétiques

RÉVISION ET RÉSUMÉ

Dans votre livre Le cours est couvert par les sections 1, 2 et le début de la section 3, pages 66 à 68. L'étude de ce cours est très fortement recommandée, car il contient beaucoup d'informations et d'exemples.

Seuls les exercices n°1 à 8 inclus, page 83, sont accessibles à ce stade.

Canaux La transmission simultanée de plusieurs informations nécessite un « canal » affecté à chacune d'elles.

Ondes Transporter de l'information par des ondes est d'un grand intérêt, car il est plus facile d'envoyer des ondes que de la matière sur une grande distance. Rappelez-vous qu'une onde correspond à un transport d'énergie, sans transport de matière.

Électromagnétiques Les ondes électromagnétiques se propagent dans le vide et dans de nombreux milieux matériels transparents. La lumière est une onde électromagnétique particulière, dont le domaine de fréquences est très restreint.

Antenne Une antenne émettrice a pour rôle d'émettre une onde électromagnétique, et une antenne ré-

ceptrice a pour rôle de capter cette onde afin d'obtenir un signal électrique. Les fréquences de l'onde électromagnétique et du signal électrique sont identiques.

Tension L'expression mathématique d'une tension sinusoïdale est :

$$u(t) = U_{\max} \cos(2\pi Ft + \phi_0)$$

où U_{\max} est l'amplitude, $F = \frac{1}{T}$ la fréquence, ϕ_0 la phase à l'origine.

Modulations Dans le but de transmettre une information, on peut *moduler* (= changer) l'une des caractéristiques d'une tension sinusoïdale. On distingue les modulations :

- d'amplitude (variations de U_{\max});
- de fréquence (variations de F);
- de phase (variations de ϕ_0).

Une tension ainsi modulée est appelée porteuse, de haute fréquence F . Le signal modulant l'une des caractéristiques de la porteuse est en général de basse fréquence f , par exemple entre 20 Hz et 20 kHz pour un enregistrement sonore.

MOTS CLÉS

Onde électromagnétique
Signal sinusoïdal

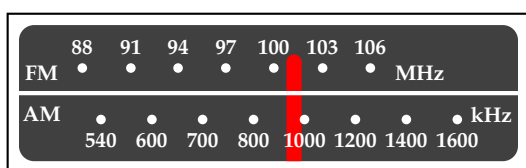
Tension sinusoïdale
Porteuse

Modulation
Antenne

QUESTIONS

- Q1** Définir les mots-clefs.
Q2 N°2 p. 83 : Gamme de fréquence
Q3 N°3 p. 83 : Longueur d'antenne
Q4 Poste radio

Le bandeau d'un poste de radio se présente de la manière suivante :



a. Rappeler la gamme des fréquences audibles par

- l'oreille humaine. La comparer avec les gammes de fréquences proposées par le poste de radio.
- b. Comment se fait-il que l'on puisse malgré tout entendre les émissions captées par le poste ?
- c. Que signifient les lettres AM et FM ? Comparer ces deux gammes.
- d. RMC peut encore être capté sur la fréquence 216 kHz en AM. Calculer la taille des antennes nécessaires à cette émission, sachant qu'elles doivent faire un quart de la longueur d'onde émise.

Q5 Quel est le nom de l'appareil qui permet la connexion à l'Internet bas débit à la maison ? Quelle est l'origine de ce nom ? Comparer le domaine de fréquences utilisé avec l'Internet haut débit.

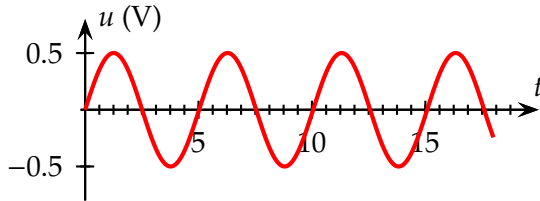
EXERCICES

14.1 N°7 p. 83 : Tension sinusoïdale

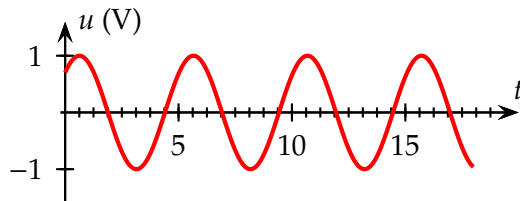
14.2 N°8 p. 83 : Étude graphique

14.3 Paramètre d'une tension

Soit un signal sinusoïdal, représenté ci-dessous :



- Déterminer les paramètres suivants de la tension sinusoïdale :
 - son amplitude ;
 - sa phase à l'origine ;
 - sa période et sa fréquence.
- En déduire une expression mathématique de $u(t)$.
- Une antenne capable de capter une telle onde doit avoir des dimensions égales au quart de la longueur d'onde. Quelle devra être sa longueur ?
- Recommencer les questions avec la tension représentée ci-dessous :



14.4 Émission d'une onde hertziennes

Un circuit oscillant RLC , connecté à un dispositif d'entretien des oscillations, a les caractéristiques suivantes :

$$R = 5 \Omega, L = 110 \mu H \text{ et } C = 120 \text{ pF.}$$

On relie un fil à l'une des armatures du condensateur.

- Schématiser le montage sans détailler le dispositif d'entretien.
- Calculer la fréquence des oscillations électriques dans le circuit.
- Quel est le rôle du fil ?
- Quelle est la longueur d'onde de l'onde émise dans l'air où sa célérité est $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$?
- Cette onde est-elle audible ? Pourquoi ?

14.5 Communication transatlantique

Pour communiquer par téléphone entre Montréal et Clermont-Ferrand, on peut utiliser :

- soit un satellite de télécommunications, situé sur une orbite géostationnaire, placé dans le cas idéal sur la médiatrice du segment reliant les deux villes, donc au dessus de l'Océan Atlantique ;
- soit un câble en fibre optique, immergé au fond de l'Océan Atlantique, d'une longueur de 6 000 km environ, d'indice $n = 1,5$.

- Quelle est la nature du signal à transmettre ?
- Quelle est la nature de la porteuse ?
- Quelle est la nature du milieu de propagation dans chaque cas ?
- Rappeler les trois critères à respecter pour un satellite géostationnaire, et en déduire son altitude par rapport au sol.
- Clermont-Ferrand est à 3° de longitude, Montréal à 286° , les deux villes ont même latitude de 45° . Calculez la longueur du trajet par câble, en considérant ce dernier constamment à une altitude nulle.
- Calculez la longueur du trajet par le satellite (cette question peut nécessiter un chouia de géométrie dans l'espace, si vous êtes allergique, sachez que le satellite est à une distance de 38 998 km environ de chacune des villes).
Comparez alors la durée que met un message pour être transmis par chacun de ces moyens.
- Le décalage de temps risque-t-il d'être gênant pour :
 - une communication orale entre deux personnes ?
 - une transmission de données informatiques ?

Données :

Circonférence terrestre : 40 000 km

Rayon terrestre : 6 380 km

Masse de la Terre : $5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

Période sidérale : $T = 86 164 \text{ s}$

Constante gravitationnelle : $\mathcal{G} = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ unités S. I.}$

Célérité de la lumière dans le vide et dans l'air : $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

Corrigé 14

Transmission d'information par les ondes électromagnétiques

QUESTIONS

Q1 Mots-clefs

Porteuse : tension dont on modifie une des caractéristiques pour transmettre un signal à grande distance, sans perturbations.

Autres mots-clefs : voir résumé.

Q2 N°2 p. 83 : Gamme de fréquence

- $f = c/\lambda = 3,00 \cdot 10^8 / 1852 = 1,62 \cdot 10^5$ Hz.
- a. Ondes hertziennes (ondes dites "kilométriques").
b. Radiodiffusion.

Q3 N°3 p. 83 : Longueur d'antenne

$\lambda = c/f = 3,00 \cdot 10^8 / 433,92 \cdot 10^6 = 0,691$ m = 69,1 cm, valeur acceptable pour un particulier.

Q4 Poste radio

- Le domaine des fréquences audibles s'étend de 20 Hz à 16 kHz. Les ondes AM ont des porteuses de 540 kHz à 1600 kHz, et de 88 MHz à 106 MHz en FM, c'est-à-dire de deux à cinq facteurs dix au dessus des fréquences audibles.
- On peut entendre les émissions de radio car un poste de radio *démodule* la porteuse de haute fréquence, restituant l'information de basse fréquence qu'elle recèle.
- AM signifie *Amplitude Modulation*, pour modulation d'amplitude (variation de l'amplitude de la porteuse, $U_m = u_{\text{signal}}(t)$ avec u_{signal} le signal basse fréquence à transmettre).
FM signifie *Frequency Modulation*, pour modulation de fréquence (variation de la fréquence de la porteuse, $f = u_{\text{signal}}(t)$).

Q5 L'appareil permettant une connexion à l'internet à bas débit est le Modem, contraction du terme « modulateur démodulateur ». En effet, cet appareil *module* (= transforme) les signaux informatiques de l'ordinateur en signaux sonores, véhiculés comme la voix par le téléphone, et *démodule* les signaux sonores reçus du fournisseur d'accès internet en données informatiques.

Le domaine de fréquence de ces signaux est celui des ondes sonores. Pour le téléphone le domaine de fréquences se limite de quelques dizaines de hertz à 4 kHz, suffisant pour une conversation audible. On ne peut pas utiliser la ligne pour téléphoner en même temps, et la bande de fréquence, assez réduite, ne permet pas un débit d'informations très élevé (bas débit).

En revanche pour l'internet haut débit, ou ADSL, le domaine de fréquence s'étend de 10 kHz à 1104 kHz (source : Wikipédia). On peut alors toujours utiliser la ligne pour téléphoner. L'emploi de filtres ADSL peut améliorer la qualité des conversations. La bande de fréquence étant bien plus large, le débit d'informations que l'on peut faire transiter est plus important (haut débit).

EXERCICES

14.1 N°7 p. 83 : Tension sinusoïdale

14.2 N°8 p. 83 : Étude graphique

14.3 Paramètre d'une tension

- Les données demandées sont celles qui interviennent dans l'expression suivante de la tension :

$$u(t) = U_m \cos(2\pi ft + \phi_0)$$

Lecture graphique de l'amplitude : $U_m = 0,5$ V.

À $t = 0$, $u(0) = U_m \cos \phi_0 = 0$ donc $\phi_0 = \pm \frac{\pi}{2}$. Pour déterminer le signe de la phase, il suffit de comparer le signe de la dérivée de la tension $u(t)$ pour $t = 0$ avec la pente de la courbe à l'origine :

$$\frac{du}{dt} = -2\pi f U_m \sin(2\pi ft + \phi_0)$$

$$\Rightarrow \left. \frac{du}{dt} \right|_{t=0} = -2\pi f U_m \sin \phi_0$$

La pente de la courbe à l'origine est positive, donc $\sin \phi_0 < 0$ et par suite $\phi_0 = -\frac{\pi}{2}$.

La période vaut $T = 5$ s et la fréquence $f = \frac{1}{T} = 0,2$ Hz.

- Expression mathématique de la tension :

$$u(t) = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{5}t - \frac{\pi}{2}\right)$$

- Longueur d'onde : $\lambda = cT$ avec c vitesse de la lumière dans le vide. Donc $\lambda = 1,5 \cdot 10^9$ m. Émettre une telle onde efficacement risque d'être compliqué ! On peut néanmoins rencontrer de telles ondes, émises par des quasars.

- d. La période et la fréquence de cette onde sont identiques. L'amplitude vaut $U_m = 1$ V.

À $t = 0$, $u(0) = 1 \cos \phi_0 = 0,8$ donc $\phi_0 = \pm 0,64$ rad.
Pente de la courbe à l'origine :

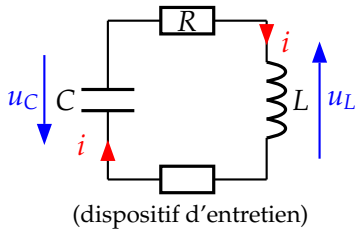
$$\left. \frac{du}{dt} \right|_{t=0} = -2\pi f U_m \sin \phi_0$$

La pente de la courbe à l'origine est positive, donc $\sin \phi_0 < 0$ et par suite $\phi_0 = -0,64$ rad. D'où l'expression mathématique :

$$u(t) = \cos(1,25t - 0,64)$$

14.4 Émission d'une onde hertzienne

a.



b. Fréquence propre du circuit :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

Application numérique :

$$f_0 = 1,39 \cdot 10^6 \text{ Hz}$$

c. Le fil joue le rôle d'antenne émettrice.

d. Longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,39 \cdot 10^6} = 216 \text{ m}$$

Domaine des ondes *décamétriques*.

e. Cette onde correspond à la porteuse.

14.5 Communication transatlantique

a. Le signal à transmettre est le signal capté par le micro du téléphone, donc signal électrique de basse fréquence.

b. Dans le premier cas, satellite de télécommunication, la porteuse est une onde de haute fréquence, apte à traverser l'atmosphère.

Dans le second cas, fibre optique, la porteuse est un signal lumineux, donc aussi une onde électromagnétique de haute fréquence, de l'ordre de 10^{14} Hz.

c. Dans le premier cas, le milieu de propagation est l'air de l'atmosphère et le vide dans l'espace. Dans le second cas, le milieu de propagation est le plastique transparent de la fibre optique.

d. Pour qu'un satellite soit géostationnaire, c'est-à-dire fixe par rapport à un point du sol, il faut qu'il soit placé dans le plan de l'équateur, qu'il tourne dans le même sens que la Terre, avec la même période.

Troisième loi de Képler (à redémontrer afin d'avoir accès à la constante) :

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM_T}$$

Rayon de l'orbite du satellite géostationnaire :

$$r = \left(\frac{T^2 GM_T}{4\pi^2} \right)^{\frac{1}{3}} \approx 42\,150 \text{ km}$$

c'est-à-dire une altitude : $35\,770 \text{ km} \approx 36\,000 \text{ km}$.

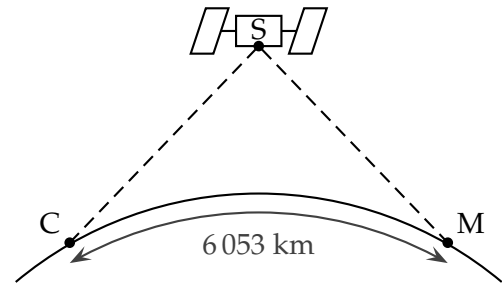
e. Entre 3° de longitude et 286° de longitude, un angle de 77° sous-tend l'arc de cercle séparant ces deux longitudes :

$$\frac{77}{360} \times 40\,000 \approx 8\,560 \text{ km}$$

Les villes étant à 45° de latitude, les distances les séparant sont plus faibles, car le rayon du parallèle est réduit d'un facteur $\cos(45^\circ)$ par rapport à celui de l'équateur :

$$8\,560 \times \cos(45^\circ) \approx 6\,053 \text{ km}$$

f. Représentation du trajet du signal entre les deux villes (échelle non respectée sur le schéma) :



D'après l'indication du texte, l'onde électromagnétique parcourt $2 \times 38\,998 = 77\,996 \text{ km}$ à la vitesse de la lumière (l'indice de l'air vaut quasiment 1, indice du vide). Donc le retard imputable au signal passant par le satellite vaut :

$$\tau_s = \frac{d_s}{c} = \frac{77\,996 \text{ km}}{3 \cdot 10^5 \text{ km.s}^{-1}} = 0,26 \text{ s}$$

Par la fibre optique, l'indice valant $n = 1,5$, le signal se déplace plus lentement mais parcourt une distance plus faible :

$$v = \frac{c}{n} \Rightarrow \tau_f = \frac{d_f}{v} = \frac{nd_f}{c} = 0,021 \text{ s}$$

La durée de la transmission est plus de dix fois plus faible par la fibre optique.

g. Le décalage de temps ne sera gênant dans une conversation que pour une communication par satellite. Il faut aussi remarquer ici que le débit permis par le satellite est bien plus faible. En revanche le satellite a comme avantage de pouvoir véhiculer des appels depuis n'importe quel point, il suffit pour cela de disposer d'un téléphone portable adapté.