

PHS1102 – CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

PROJET INTÉGRATEUR – CONCEPTION D'UN RADIORÉCEPTEUR AM

Automne 2020 (à distance)

1 Introduction

Le travail de l'ingénieur consiste à réaliser de nouveaux dispositifs à partir de notions théoriques en physique et en mathématiques. L'ingénieur est responsable de la conception, de l'analyse des contraintes, du choix des composantes, de la construction et de l'évaluation du dispositif ainsi que de la gestion du budget. **La conception et la construction d'un radiorécepteur AM est donc un véritable travail d'ingénieur que vous devrez mener à terme.**

Ce projet a aussi pour but d'intégrer l'ensemble des connaissances en électromagnétisme acquises dans les différents chapitres du cours, ainsi que de développer l'initiative et la créativité de l'étudiant(e). Le texte suivant fournit la *théorie de base* requise pour comprendre la conception d'un radiorécepteur AM élémentaire en faisant référence aux notes du cours. Les notions de base présentées ici seront approfondies dans les différents cours de deuxième et troisième années de circuits électriques et de télécommunications dont ce projet constitue une introduction.

Chaque étudiant(e) devra concevoir et construire son propre prototype à la maison. Le livrable du projet sera une capsule vidéo, d'une durée maximale de 10 minutes, dans laquelle les choix de conception seront expliqués et une démonstration du fonctionnement du radiorécepteur sera effectuée. Même s'il s'agit d'un travail individuel, vous êtes invités à réfléchir et à collaborer avec vos collègues tout au long de votre démarche de conception.

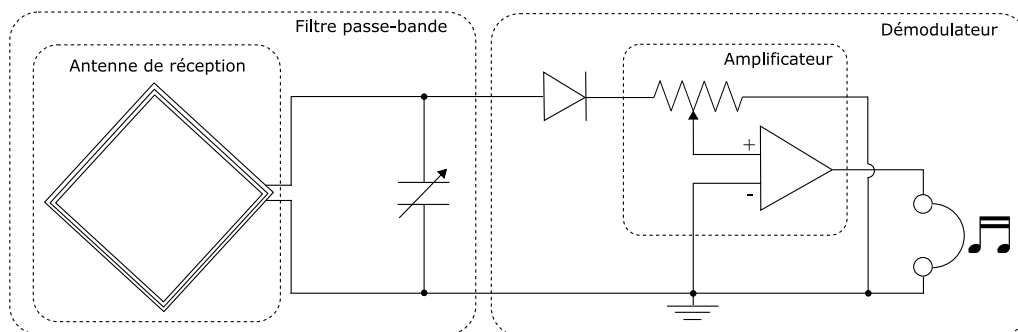


FIGURE 1 : Principales composantes d'un radiorécepteur AM.

Le radiorécepteur devra fonctionner dans la bande de radiodiffusion AM, de 540 à 1600 kHz. Comme illustré à la figure 1, le radiorécepteur AM comporte quatre systèmes en cascade :

- une antenne en boucle carrée comportant quelques tours de fil et qui transforme les fluctuations du champ magnétique de l'onde en différence de potentiel électrique ;
- un filtre passe-bande qui permet de sélectionner la fréquence de l'onde de la station de radio que l'on veut capter et d'atténuer toutes les autres ;
- un démodulateur qui extrait le signal audio de l'onde modulée et qui le transforme en signal sonore grâce aux écouteurs/haut-parleurs ;
- un amplificateur qui permet d'utiliser des écouteurs/haut-parleurs à *faible impédance* qu'on retrouve majoritairement sur le marché aujourd'hui.

Chacun de ces quatre systèmes sera analysé à la section 2.

2 Fonctionnement du radiorécepteur AM

2.1 L'antenne de réception

La conception de l'antenne de réception est une étape cruciale : l'objectif est de capter le signal avec la plus grande amplitude possible avant de le transmettre à l'étape d'amplification. (Dans une radio plus rudimentaire, sans étage d'amplification, c'est uniquement l'énergie captée par l'antenne qui alimente le radiorécepteur et qui détermine l'intensité du son produit.) Les ondes pour la radiodiffusion AM sont généralement émises par des antennes alimentées par une source de tension sinusoïdale de fréquence f . Le courant $I(t)$ circulant dans l'antenne produit un champ magnétique $\vec{H}(t)$ dont les fluctuations se propagent sous forme d'une onde électromagnétique qui s'éloigne de l'antenne à la vitesse de la lumière (figures 11.1 et 11.2 du chapitre 11). Pour un observateur situé loin de l'antenne, l'onde perçue est plane, uniforme, harmonique (sinusoïdale) et polarisée verticalement (chapitres 11 et 12).

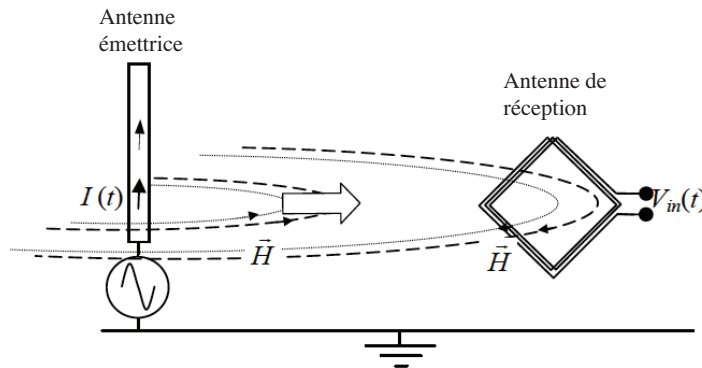


FIGURE 2 : Le courant $I(t)$ circulant dans l'antenne émettrice produit une onde plane sinusoïdale se propageant à la vitesse de la lumière. La fluctuation de flux magnétique qui traverse la surface d'une boucle conductrice (antenne de réception) induit une tension $V_{in}(t)$ aux bornes de celle-ci.

Une antenne de réception simple, pour capter cette onde, peut être constituée d'une boucle conductrice carrée située dans le même plan que celui de l'antenne d'émission (voir figure 2). La fluctuation du flux magnétique traversant la surface de la boucle induit à ses bornes une tension $V_{in}(t)$ (loi de Faraday, chapitre 10). Comme cette tension sert à alimenter l'étage d'amplification (et éventuellement les écouteurs/haut-parleurs) il faut concevoir l'antenne pour la maximiser en choisissant bien la longueur de ses côtés ainsi que le nombre de tours de fils (voir section 3.3).

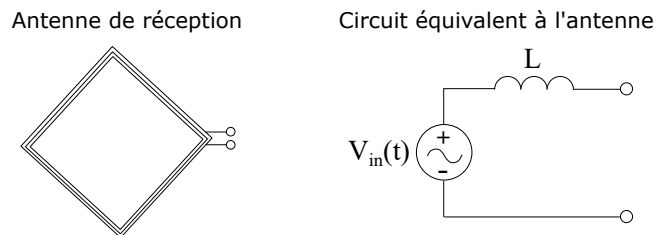


FIGURE 3 : Circuit équivalent qui modélise l'antenne de réception.

Dans le circuit du radiorécepteur AM, l'antenne agit à la fois comme source de tension et comme inductance. L'antenne est équivalente à une source de tension $V_{in}(t)$ en série avec une inductance L (voir chapitre 10) associée aux boucles de fil (voir figure 3).

2.2 Le filtre passe-bande

Le courant circulant dans l'antenne de réception est dû à une multitude de signaux de fréquences différentes provenant de diverses antennes de télécommunications (radio, télévision, téléphones cellulaires, aviation, satellites, etc). Pour isoler le signal provenant d'une station radio unique, nous utiliserons un filtre passe-bande qui atténuera les signaux ayant des fréquences différentes de celle que l'on désire capter. Un tel filtre peut être réalisé par un circuit LC constitué d'une inductance L en série avec un condensateur de capacité C (voir chapitre 3). Ici, l'inductance L est directement celle de l'antenne. Ce circuit est illustré à la figure 4, où $V_{in}(t)$ représente la tension induite aux bornes de l'antenne.

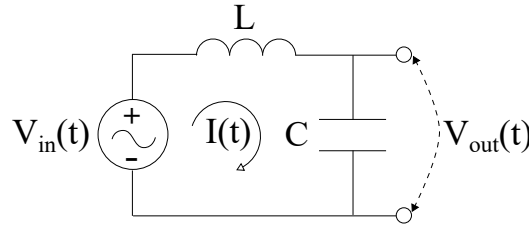


FIGURE 4 : Circuit du filtre passe-bande

Pour comprendre le fonctionnement du filtre passe-bande, on s'intéresse d'abord à l'antenne. Puisque l'antenne est soumise à un champ magnétique sous forme d'onde plane qui oscille à une fréquence f , alors la différence de potentiel induite aux bornes de l'antenne oscille aussi à la même fréquence. On a donc :

$$V_{in}(t) = V_0 \sin(\omega t), \quad (1)$$

où $\omega = 2\pi f$ est la fréquence angulaire de l'onde. Parce que l'inductance et le condensateur sont connectés en série, la somme de leur différence de potentiel est égale à la différence de potentiel générée par l'antenne.

$$V_{in}(t) = V_L(t) + V_C(t) \quad (2)$$

On peut ensuite exprimer $V_L(t)$ (chapitre 10) et $V_C(t)$ (chapitre 3) en fonction du courant $I(t)$ qui circule dans le circuit.

$$V_L(t) = L \frac{dI(t)}{dt} \quad (3)$$

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{d}{dt} [C V_C(t)] = C \frac{dV_C(t)}{dt} \quad (4)$$

En substituant (4) dans (3), on réussit à exprimer $V_L(t)$ en fonction de $V_C(t)$.

$$V_L(t) = L \frac{d}{dt} \left(C \frac{dV_C(t)}{dt} \right) = LC \frac{d^2 V_C(t)}{dt^2} \quad (5)$$

On peut alors insérer (1) et (5) dans (2) pour obtenir l'équation différentielle linéaire d'ordre 2 suivante

$$V_0 \sin(\omega t) = LC \frac{d^2 V_C(t)}{dt^2} + V_C(t), \quad (6)$$

dont la solution qui nous intéresse est ¹

$$V_C(t) = \frac{1}{1 - \omega^2 LC} V_0 \sin(\omega t). \quad (7)$$

Puisque qu'on veut maximiser la tension $V_{\text{out}}(t)$ qui alimentera éventuellement les écouteurs/haut-parleurs, on s'intéresse au ratio entre $V_{\text{out}}(t)$ et $V_{\text{in}}(t)$, appelé *fonction de transfert* du filtre que l'on note $H(\omega)$. Puisque $V_{\text{out}}(t) = V_C(t)$ selon la figure 4, on peut calculer la fonction de transfert directement en utilisant les équations (1) et (7) :

$$H(\omega) = \frac{V_{\text{out}}(t)}{V_{\text{in}}(t)} = \frac{V_C(t)}{V_{\text{in}}(t)} = \frac{\frac{1}{1 - \omega^2 LC} V_0 \sin(\omega t)}{V_0 \sin(\omega t)} = \frac{1}{1 - \omega^2 LC} \quad (8)$$

On constate que si la fréquence angulaire ω tend vers $1/\sqrt{LC}$, alors la fonction de transfert tend vers l'infini : c'est la résonance. Nous définissons donc la *fréquence de résonance* f_0 par

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (9)$$

À la fréquence de résonance, une faible différence de potentiel à l'entrée du filtre passe-bande produit une grande différence de potentiel à sa sortie. Bien que $H(\omega)$ tende vers l'infini à la résonance, la tension en sortie n'est jamais infinie en pratique puisque chaque élément du filtre contient des composants parasites (résistances, capacités et inductances) non considérées ici.

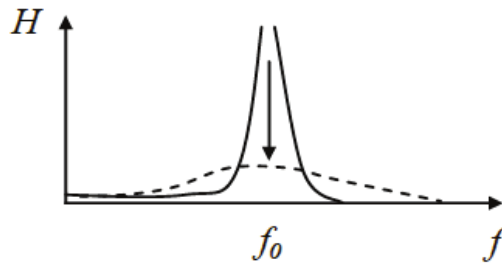


FIGURE 5 : Fonction de transfert du filtre passe-bande sans résistance connectée en parallèle au condensateur (en trait plein) et avec une résistance connectée à ses bornes (en pointillé). Plus la résistance ajoutée est faible, plus la fonction de transfert s'aplatit et s'élargit, ce qui diminue la sélectivité du filtre.

Le comportement de la fonction de transfert $H(\omega)$ en fonction de la fréquence f est illustré à la figure 5. Seules les fréquences proches de la fréquence de résonance sont transmises par le filtre, alors que les fréquences loin de f_0 sont atténuées. Un récepteur conçu pour syntoniser différentes stations radio **devra pouvoir changer de fréquence de résonance**, cette fréquence correspondant à celle que l'on désire capter. Pour ce faire, on peut changer la capacité C du circuit en utilisant un condensateur variable (que l'on peut fabriquer avec du carton et du papier d'aluminium ou que l'on peut récupérer d'une vieille radio). On peut aussi changer l'inductance L en court-circuitant des tours de fil à l'aide d'un contact à glissière ou en changeant la surface de la boucle. Lorsque l'on tient compte des pertes ohmiques (dans l'inductance, le condensateur et surtout les écouteurs/haut-parleurs), la courbe en pointillé montre que l'amplitude à la résonance diminue de même que la sélectivité du filtre.

1. Vous pouvez vous référer aux techniques de résolution apprises dans votre cours d'équations différentielles. Vous pouvez tout de même vérifier que la solution donnée respecte l'équation différentielle en substituant (7) dans (6).

2.3 Le démodulateur

Le signal RF² sinusoïdal de fréquence f produit par l'antenne de la station radio a été modulé en amplitude³ avant d'être émis. Ainsi, le signal sinusoïdal a été multiplié par le signal audio que l'on cherche à transmettre (100-5000 Hz). Le signal reçu par l'antenne de réception ayant la même forme que le signal émis, il s'agit donc d'un signal sinusoïdal dont l'amplitude varie dans le temps pour représenter le signal audio (voir figure 6a). Le rôle du démodulateur est alors d'extraire le signal audio du signal modulé afin que les écouteurs/haut-parleurs ne reçoivent que le signal audio encodant l'information transmise.

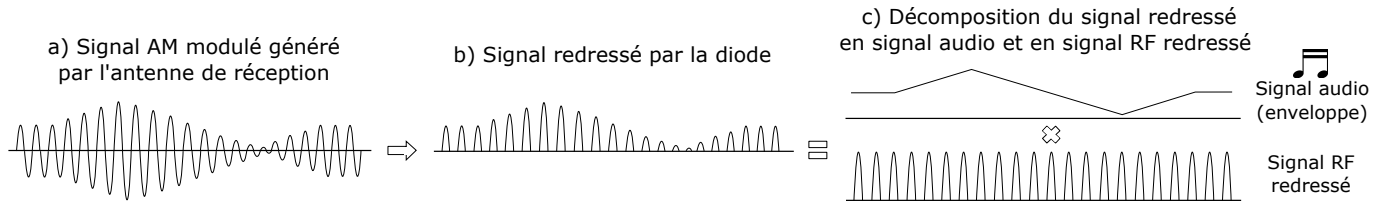


FIGURE 6 : Démodulation : a) signal AM modulé émis par l'antenne ; b) signal redressé à la sortie de la diode ; c) le signal redressé est constitué du signal audio (haut) et du signal RF redressé (bas).

La composante principale du démodulateur est une diode. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur non linéaire qui laisse passer le courant dans un seul sens (indiqué par la pointe du triangle sur le schéma de la figure 1) lorsque la différence de potentiel à ses bornes est suffisamment positive. Dans le cas de la diode 1N34A au germanium utilisée, il faut que la différence de potentiel dépasse environ 0,3 V pour que le courant circule (figure 7a). Ainsi, le signal de la fréquence sélectionnée par le filtre passe-bande sera suffisamment grand pour activer la diode qui le transmettra aux écouteurs/haut-parleurs (figure 7b), tandis que les signaux des fréquences atténuées par le filtre seront trop faibles pour activer la diode (figure 7c).

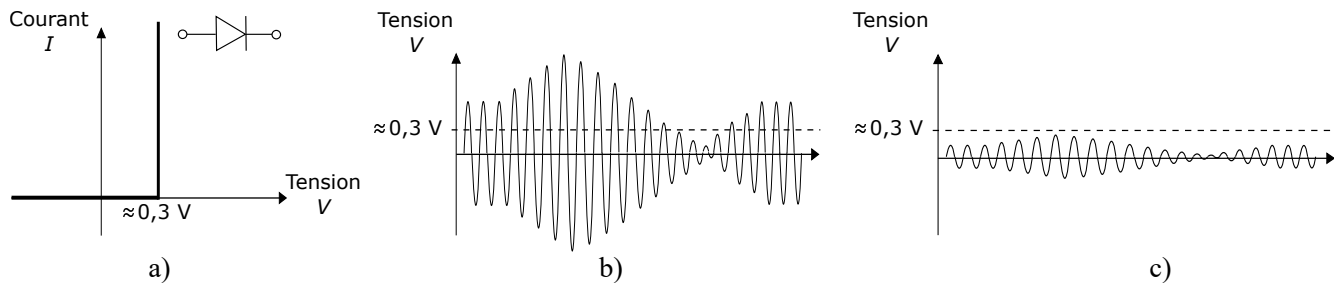


FIGURE 7 : a) courbe $I - V$ d'une diode idéale : la diode laisse passer le courant dès que la tension à ses bornes atteint 0,3 V ; b) signal assez fort pour activer la diode : le signal sera redressé ; c) signal trop faible pour activer la diode : il sera complètement bloqué par la diode.

Le signal redressé à la sortie de la diode correspond à la courbe de la figure 6b qui ne contient que la composante positive de la tension $V_{\text{out}}(t)$ issue du filtre. La figure 6c montre que le signal redressé est composé d'un signal de base fréquence (signal audio) qui multiplie un signal de haute fréquence (signal RF).

2. RF est l'abréviation de radiofréquence.

3. AM signifie *amplitude modulation*.

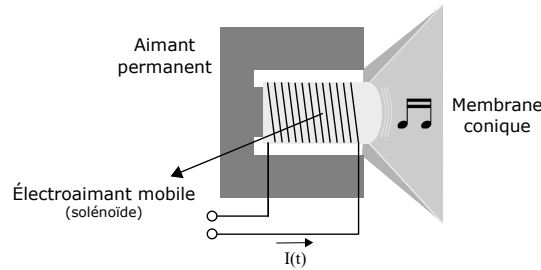


FIGURE 8 : L'électroaimant mobile fixé à la membrane conique oscille en suivant le courant alternatif qui le traverse, car le champ magnétique généré par l'électroaimant produit une force qui l'attire et le repousse en alternance de l'aimant permanent.

Le signal redressé est transmis aux écouteurs/haut-parleurs dont la membrane oscillante est la deuxième composante du démodulateur. Les écouteurs/haut-parleurs sont généralement constitués d'un aimant permanent ainsi que d'un électroaimant mobile (formé par un solénoïde à l'intérieur duquel se trouve une partie de l'aimant permanent) fixé à une membrane en forme de cône. Lorsque le courant qui circule dans le solénoïde varie, le champ magnétique produit par l'électroaimant varie aussi, ce qui modifie la force que l'électroaimant ressent due à la présence de l'aimant permanent. L'électroaimant oscille alors en suivant le courant alternatif et, en se déplaçant, permet à la membrane de vibrer et de produire des ondes sonores que l'on peut entendre.

Il est important de savoir que la membrane ne peut pas osciller arbitrairement vite : elle possède une certaine inertie qui l'empêche de vibrer à des fréquences trop élevées. Cette propriété de la membrane sert alors à éliminer le signal RF du signal redressé pour ne conserver que le signal radio. En effet, la membrane oscille en suivant le signal audio de basse fréquence, mais elle ne parvient pas à vibrer en accordance avec le signal RF de haute fréquence, ce qui élimine ce dernier (voir figure 6c).

2.4 L'amplificateur

Si on voulait fabriquer un radiorécepteur AM sans le circuit amplificateur de la figure 1, il faudrait utiliser des écouteurs à *haute impédance* de 1 k Ω et plus⁴. Or, ce type d'écouteurs est de plus en plus difficile à trouver, puisque la très grande majorité des écouteurs utilisés avec les appareils électroniques modernes (ordinateurs, téléphones cellulaires, tablettes, etc.) sont à *faible impédance* (8 à 32 Ω). Si on utilisait des écouteurs à faible impédance sans circuit amplificateur, le filtre perdrait sa sélectivité (voir figure 5) et on ne serait plus en mesure de choisir la fréquence que l'on veut capter, ce qui enlèverait toute utilité au radiorécepteur. Pour que vous puissiez utiliser votre radio AM avec vos écouteurs de tous les jours, il faut donc ajouter un élément au circuit : un *amplificateur opérationnel*, aussi appelé *ampli-op*. Puisque l'ampli-op a une impédance d'entrée élevée (50 k Ω), il permet de conserver la sélectivité du filtre passe-bande tout en alimentant les écouteurs à faible impédance.

Un ampli-op est un circuit intégré qui utilise plusieurs transistors. Ainsi, contrairement aux résistances, aux condensateurs, aux inductances et aux diodes qui sont tous des *composants passifs*, l'ampli-op est un *composant actif* qui a besoin d'être alimenté par une source de courant continu (une pile 9 V dans notre cas). Pour l'utiliser, il faut réaliser un circuit sur une *platine d'expérimentation* (*breadboard* en anglais) qui fait intervenir un interrupteur (pour allumer et éteindre la radio), un potentiomètre (résistance variable qui permet de contrôler le volume) et quelques résistances et condensateurs. La section 3 vous guidera pour l'assemblage de ce circuit.

4. Des écouteurs de 1 k Ω se comportent, en première approximation, comme une résistance de 1 k Ω .

3 Consignes et astuces pour la conception et la construction

Cette section contient des consignes et astuces pratiques qui vous guideront dans votre travail de conception et de construction d'un radiorécepteur AM.

3.1 Ensemble de pièces à vous procurer à Coopoly

La première étape consiste à vous procurer l'ensemble de pièces qui vous permettra de réaliser le circuit de démodulation et d'amplification (voir figure 1). Cet ensemble est en vente pour environ 30 \$ chez Coopoly. Il contient :

- 1 × platine d'expérimentation 4,5 × 3,5 cm ;
- 1 × diode « signal » **1N34A** en germanium ;
(La ligne noire sur la diode correspond à la ligne du symbole de la diode de la figure 1.)
- 1 × potentiomètre rotatif (résistance variable) de 10 k Ω ;
- 1 × amplificateur opérationnel **LM386** ;
- 1 × prise audio stéréo 3,5 mm ;
- 1 × interrupteur à glissière à deux positions ;
- 1 × connecteur pour batterie 9 V ;
- 1 × résistance de 10 Ω ;
- 1 × résistance de 10 k Ω ;
- 1 × condensateur électrolytique de 220 μ F ;
- 2 × condensateur électrolytique de 10 μ F ;
- 2 × condensateur en céramique de 0,047 μ F ;
- 1 × condensateur en céramique de 2200 pF ;
- 1 × perle en ferrite (*ferrite bead*) 998 Ω @ 100 MHz ;
- 1 × ensemble de 15 câbles de connexion (*jump wires*) ;
- 1 × fil verni pour l'antenne (diamètre AWG 26).

N.B. La batterie 9 V et les écouteurs/haut-parleurs ne sont pas inclus dans cet ensemble. Vous devez donc vous procurer ces éléments vous-mêmes.

3.2 Choix des valeurs de L et de C

Il existe une infinité de combinaisons de valeurs de capacité C et d'inductance L donnant le même produit LC , et donc la même fréquence de résonance selon l'équation (9). Alors, si on désire optimiser les performances du radiorécepteur, faut-il choisir une capacité faible et une inductance élevée, ou l'inverse ? Pour répondre à cette question, il faut considérer la notion d'*impédance*. L'impédance, notée Z , généralise le concept de résistance aux circuits alternatifs (AC). Puisque l'impédance, comme la résistance, est définie par le rapport entre la tension et le courant circulant dans un composant, elle possède les mêmes unités (le ohm, Ω) et elle respecte la loi d'Ohm dans laquelle elle remplace la résistance.

$$V = ZI \quad (10)$$

Dans l'équation (10), la tension V et le courant I dépendent du temps et s'expriment sous leur notation complexe en termes de *phaseurs* : ainsi, contrairement à la résistance qui est un nombre réel, l'impédance est un nombre complexe (voir l'annexe A pour plus de détails). Tout comme la résistance, l'impédance décrit la propension d'un composant électrique à laisser passer le courant. Un composant à haute impédance s'oppose fortement au passage du courant et vice versa.

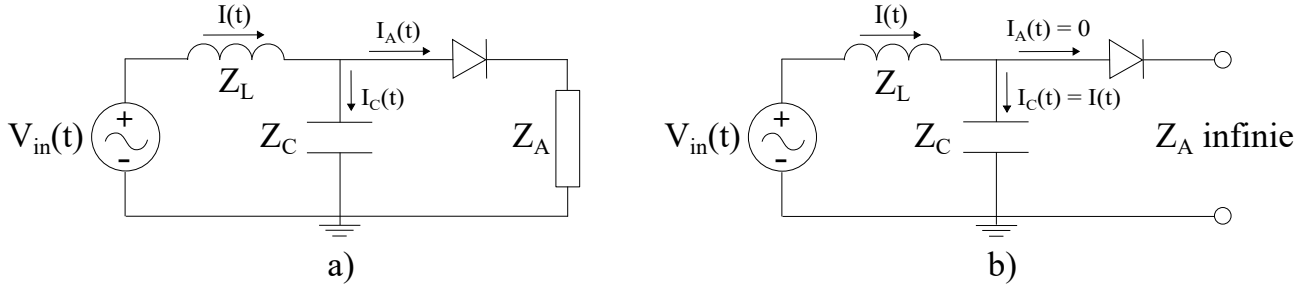


FIGURE 9 : a) Circuit du radiorécepteur AM tel que vu par l'antenne, le filtre passe-bande et la diode. Le circuit amplificateur et les écouteurs/haut-parleurs sont remplacés par l'impédance d'entrée Z_A de l'ampli-op; b) Plus Z_A est élevée, plus grande est la fraction du courant qui traverse le condensateur. À la limite $|Z_A| \rightarrow \infty$, $I_C(t) = I(t)$ et la sélectivité du filtre est optimale.

La figure 9a illustre le circuit du radiorécepteur AM tel que vu par l'antenne, le filtre et la diode. De ce point de vue, on peut substituer le circuit amplificateur et les écouteurs/haut-parleurs par l'impédance d'entrée Z_A de l'ampli-op qui est de l'ordre de $50 \text{ k}\Omega$ ⁵ (voir section 2.4). Pour maximiser les performances du radiorécepteur, il faut que le circuit d'amplification et de démodulation (voir figure 1) affecte le moins possible la sélectivité du filtre passe-bande qui permet de syntoniser une station spécifique. Dans l'analyse du filtre de la section 2.2, rien n'était branché aux bornes du filtre (voir figure 4). Ceci est équivalent à brancher un composant d'impédance infinie à ses bornes. Par conséquent, si l'on veut reproduire cette condition, il faut que l'impédance d'entrée Z_A de l'ampli-op soit la plus élevée possible (en norme) par rapport à l'impédance Z_C du condensateur qui est connecté en parallèle. En effet, si l'impédance Z_A est trop faible, une grande partie du courant total $I(t)$ circulera à travers Z_A au lieu de circuler à travers le condensateur, ce qui aura pour effet de réduire la sélectivité du filtre.

En conclusion, il faut choisir C pour minimiser $|Z_C|$. Or, on peut montrer que la norme de l'impédance d'un condensateur (voir l'annexe A) soumis à un signal de fréquence angulaire ω est :

$$|Z_C| = \frac{1}{\omega C} \quad (11)$$

Ainsi, pour optimiser les performances du radiorécepteur AM, il faut **s'assurer que la capacité du condensateur soit suffisamment grande afin que $|Z_C|$ soit beaucoup plus faible que $|Z_A|$.**

3.3 Construction de l'antenne de réception et du condensateur variable

L'inductance L de votre antenne carrée se calcule avec l'expression :

$$L = \frac{2\mu_0 b N^2}{\pi} \times \left[\ln \left(\frac{b}{a} \right) - 0,774 \right], \quad (12)$$

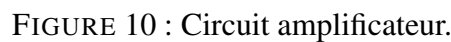
où N est le nombre de tours de fil, b est la longueur du côté (m) et a est le rayon du fil (m).

Pour la conception de l'antenne, le côté de la boucle b et le nombre de tours N sont les paramètres qui ont le plus d'influence sur L (le rayon du fil a peu d'impact). Puisque l'inductance est proportionnelle au flux magnétique qui traverse l'antenne, vous devez **maximiser l'inductance de l'antenne afin de maximiser la signal reçu.**

5. On néglige ici l'impédance du potentiomètre qui vaut $10 \text{ k}\Omega$ au maximum.

Il est possible de fabriquer un condensateur variable avec des feuilles de carton et de papier d'aluminium ou de récupérer un condensateur variable d'une vieille radio (voir le site Moodle du cours, répertoire des documents, fichier «condensateurvariable.pdf»). Le condensateur ne doit pas être de type électrolytique (comme dans les blocs d'alimentation), car ce type ne peut supporter que des signaux continus (DC) et non des signaux alternatifs (AC).

Le circuit amplificateur de la figure 1 est détaillé à la figure 10.



1. Les trous d'un même bloc horizontal forment un noeud, c'est-à-dire qu'ils sont connectés entre eux et ont le même potentiel ;
2. Les trous d'un même bloc vertical longé par une ligne verticale rouge ou bleue forment aussi un noeud. On se sert des blocs verticaux pour connecter l'alimentation du circuit (ici la pile 9 V) et pour mettre le circuit à la terre ;
3. Il ne faut pas brancher deux broches d'un même composant dans un même bloc horizontal ou vertical, sauf si l'on veut court-circuiter les deux broches (les mettre au même potentiel).

9

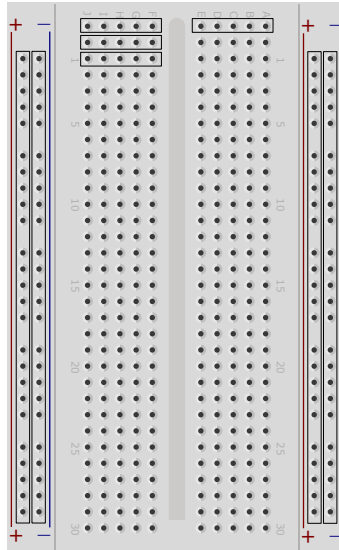


FIGURE 11 : Certains noeuds de la platine d'expérimentation sont représentés par des boîtes noires.

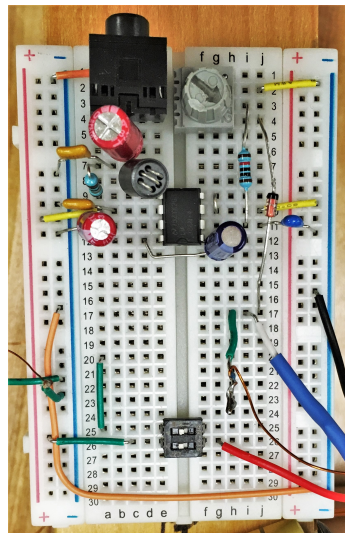


FIGURE 12 : Photo du circuit d'amplification (Yves Leblanc).

de l'ampli-op est identifiée à la figure 10. Également, faites attention à **bien connecter les condensateurs électrolytiques** ($10\ \mu\text{F}$ et $220\ \mu\text{F}$) qui ne laissent passer le courant que dans un sens. La branche négative de ces condensateurs, symbolisée par la plaque courbe sur la figure 10, est plus courte que la branche positive. Une bande inscrite directement sur le condensateur indique également la branche négative.

3.5 Expérimentation et déverminage du circuit

La qualité de ce radiorécepteur AM ne sera pas nécessairement aussi bonne que celle d'une radio commerciale et il faut s'attendre à procéder à de multiples essais et expérimentations avant de percevoir un signal. Certaines stations pourront être captées en un endroit et non à un autre. Par exemple, la station 690 kHz est très bien captée dans le corridor du B-620 à Polytechnique.

Le déverminage (ou débogage) d'un circuit qui ne fonctionne pas ne demande pas d'outils compliqués, mais requiert toutefois un peu de logique. Voici quelques pistes pour vous aider :

- Assurez-vous qu'une station radio est détectable là où vous êtes localisés. Vous pouvez modifier l'orientation de l'antenne afin d'optimiser la réception du signal (figure 2);
- Vérifiez vos calculs de capacité et d'inductance. Une erreur de calcul pour la fréquence de résonance pourrait rendre la radio inopérante;
- Vérifiez que le fil utilisé pour construire la boucle de l'antenne est bien isolé (recouvert de vernis) afin d'éviter les courts-circuits entre les tours de fils qui se touchent;
- Assurez-vous que les contacts entre les composants sont bons. Les fils doivent être dénudés aux points de contact seulement. (Pour des fils recouverts de vernis, il faut gratter le vernis des contacts.) Il n'est pas nécessaire de souder les fils aux contacts : vous pouvez simplement les torsader;
- Utilisez toujours les câbles de connexion les plus courts possibles sur la platine d'expérimentation pour éviter d'engendrer des phénomènes parasites nuisant au fonctionnement du circuit;
- Assurez-vous d'avoir le bon modèle de diode et qu'elle fonctionne. Un multimètre en mode résistance permet de mesurer sa résistance dans les deux directions. Vous devriez obtenir une très grande valeur dans une direction (courant bloqué) et une valeur très faible dans l'autre (courant redressé).
- Vos écouteurs/haut-parleurs fonctionnent-ils ? Testez-les sur un appareil fonctionnel;
- Une bonne stratégie est de vérifier que chaque composant fonctionne correctement jusqu'à ce que vous puissiez isoler la source du problème. Malgré tout, si vous n'arrivez pas à identifier la source du problème de votre circuit, vous pouvez **contacter Yves Leblanc (technicien) par courriel ou poser vos questions sur le forum Moodle dédié au projet radio**;

4 Livrable du projet

Vous remettrez **une capsule vidéo (avec son) d'une durée maximale de 10 minutes**, dans laquelle :

- vous **résumerez les principes physiques** derrière le fonctionnement de votre radiorécepteur;
- vous **expliquerez vos choix de conception**, c'est-à-dire vos choix pour les paramètres b (dimension de l'antenne) et N (nombre de tours de fil de l'antenne);
- vous **ferez la démonstration du fonctionnement** de votre récepteur. Pour ce faire, vous syntoniserez différentes stations de radio AM. Pour chaque station, vous donnerez sa fréquence et nous ferez entendre le son produit par le radiorécepteur (soit en approchant vos écouteurs de votre micro, soit en branchant votre radiorécepteur sur un haut-parleur). **Cette partie de la capsule vidéo doit être enregistrée en une seule séquence (pas de montage)**. Nous voulons voir les manipulations que vous effectuez pour passer d'une station à une autre.

Le livrable sera à remettre sur Moodle. Deux options s'offrent à vous :

1. Remettre votre vidéo directement en format MP4 si votre fichier fait moins de 100 Mo. Nommez votre fichier selon le format **gX_Matricule_Nom.mp4**, où **X** est votre groupe de TP;
2. Remettre un fichier PDF dans lequel vous indiquerez le lien vers une plateforme qui héberge votre vidéo (ex. YouTube). Vous devrez utiliser cette approche si votre fichier fait plus de 100 Mo. Nommez alors votre fichier selon le format **gX_Matricule_Nom.pdf**, où **X** est votre groupe de TP.

Note : sachez tout de même qu'il existe des logiciels gratuits qui permettent de réduire la taille (compresser) des fichiers vidéo. Si votre fichier fait plus de 100 Mo, mais que vous voulez le remettre directement sur Moodle en MP4, vous pourriez envisager de le compresser.

A Impédance d'un condensateur et d'une inductance

Lorsque l'on analyse un circuit AC, on exprime la tension et le courant sinusoïdaux de fréquence angulaire ω en utilisant la notation complexe (*phaseurs*) :

$$V(t) = |V|e^{i(\omega t + \phi_V)} \quad (13)$$

$$I(t) = |I|e^{i(\omega t + \phi_I)}, \quad (14)$$

où $e^{i\theta} = \cos(\theta) + i \sin(\theta)$ et i est le nombre imaginaire défini tel que $i^2 = -1$.

Si l'on prend la partie réelle de $V(t)$ et de $I(t)$, on retrouve les expressions sinusoïdales habituelles :

$$\text{Re}[V(t)] = |V| \cos(\omega t + \phi_V) \quad (15)$$

$$\text{Re}[I(t)] = |I| \cos(\omega t + \phi_I). \quad (16)$$

On remarque donc que $|V|$ et de $|I|$ sont les amplitudes des signaux tandis que ϕ_V et ϕ_I sont la phase des signaux qui permet de décrire le décalage dans le temps de l'un par rapport à l'autre.

Pour calculer l'impédance d'un condensateur soumis à une tension AC décrite par l'équation 13 (où l'on pose $\phi_V = 0$ sans perte de généralité), il faut d'abord calculer le courant qui le traverse. On y parvient en utilisant l'équation 4 :

$$I(t) = C \frac{dV(t)}{dt} = i\omega C |V| e^{i\omega t} = \omega C |V| e^{i(\omega t + \pi/2)}. \quad (17)$$

On observe que le courant qui circule dans le condensateur est déphasé de 90° ($\pi/2$ radians) en avance sur la tension.

L'impédance s'obtient en prenant le rapport de $V(t)$ et de $I(t)$:

$$Z_C = \frac{V(t)}{I(t)} = \frac{|V|e^{i\omega t}}{i\omega C |V|e^{i\omega t}} = \frac{1}{i\omega C} = -\frac{1}{\omega C}i. \quad (18)$$

On constate que Z_C est inversement proportionnelle à la fréquence, ce qui veut dire qu'un condensateur s'oppose fortement au passage du courant à basse fréquence.

Par un raisonnement similaire utilisant l'équation (3), on montre que l'impédance d'une inductance est :

$$Z_L = i\omega L. \quad (19)$$

Puisque Z_L est proportionnelle à la fréquence, une inductance s'oppose au passage du courant à haute fréquence. Contrairement au condensateur, le courant est en retard de 90° par rapport à la tension.

Contrairement à la résistance qui est un nombre réel, l'impédance est en général un nombre complexe (Z_C et Z_L sont ici des nombres complexes purement imaginaires) que l'on note

$$Z = R + iX, \quad (20)$$

où R est la résistance habituelle et X est la *réactance*. On peut aussi exprimer l'impédance sous la forme

$$Z = |Z|e^{i\theta_Z} = \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}}e^{i \arctan(X/R)}. \quad (21)$$

On constate que la réactance contribue avec la résistance à la norme $|Z|$ de l'impédance tandis que le rapport X/R détermine l'angle θ_Z de déphasage entre la tension et le courant.