

## PHS1102 CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES : PROJET DE CONSTRUCTION D'UN RADIORÉCEPTEUR AM

Nom : ..... Prénom : ..... Matricule..... Section labo. :....

Nom : ..... Prénom : ..... Matricule..... Section labo. :....

**FRÉQUENCES CAPTÉES:** .....kHz .....kHz .....kHz .....kHz

.....kHz .....kHz .....kHz .....kHz

**ANTENNE :** rayon : ..... cm nombre de tours : .....

inductance calculée  $L$  : .....  $\mu\text{H}$

**CONDENSATEUR :** type : ..... capacité  $C$  : ..... - ..... pF

impédance  $Z_c$  à 540 kHz: ..... - .....  $\Omega$

**DIODE :** type : .....

**ÉCOUTEUR OU**

**AMPLIFICATEUR :** type : .....

### JOINDRE À CETTE PAGE:

- UN DESSIN DE VOTRE MONTAGE PHYSIQUE (SUFFISAMMENT CLAIR POUR PERMETTRE À UNE AUTRE PERSONNE DE REPRODUIRE VOTRE MONTAGE)
- TOUS VOS CALCULS
- UNE JUSTIFICATION DU CHOIX DU RAYON  $a$  ET DU NOMBRE DE TOURS  $N$  DE LA BOUCLE

### ESPACE RÉSERVÉ AU CHARGÉ DE LABORATOIRE

**CIRCUIT :** ☐ valide

**QUALITÉ DE CONSTRUCTION:** ☐ adéquate ☐ très bonne

**QUALITÉ DE RÉCEPTION:** ☐ audible nombre de postes reçus : .....

**ORIGINALITÉ DU CIRCUIT:** ☐ composantes inédites

Signature : ..... date : .....

# 1 Introduction

Les récepteurs radio AM tels que nous les connaissons sont constitués de centaines de pièces discrètes. On y retrouve en effet plusieurs résistances, condensateurs, diodes et transistors, entre autres, tous dans le simple but d'améliorer la qualité du son. Il est toutefois intéressant de constater que seulement une fraction de celles-ci est importante pour, à tout le moins, entendre et décerner l'émission audio d'une station distante. Naturellement, lorsque la qualité n'a pas à être optimale, on s'en sort avec seulement quatre composantes de base.

Dans ce laboratoire, nous construisons notre propre version d'un récepteur radio AM. Le but de ce travail n'est pas de réaliser un compétiteur d'un récepteur commercial, mais plutôt de démontrer qu'il est possible d'absorber facilement l'énergie émise sous forme électromagnétique par les stations de radio afin d'y décoder un signal audio avec une poignée de pièces électroniques.

## 2 Base théorique

### 2.1 Principe d'un récepteur radio AM

La figure 1 montre les blocs principaux d'un récepteur radio AM minimaliste. On y retrouve d'abord l'antenne qui, combinée avec un condensateur variable, forme le bloc de réglage, où il est possible de choisir la fréquence à écouter (choisir le « poste »). S'en suit le redressage qui annule les valeurs négative de l'onde porteuse. Enfin, l'écoute, qui est habituellement un hautparleur ou une autre forme de dispositif mécanique avec inertie, permet de conserver seulement l'enveloppe de la porteuse afin de décoder le signal audio transporté.

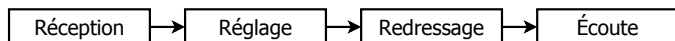


FIGURE 1 – Blocs principaux d'un récepteur radio AM minimaliste

La figure 2 montre pour sa part le circuit électronique permettant la mise en oeuvre de ces étapes. L'antenne, qui agit comme une inductance, combinée en parallèle au condensateur

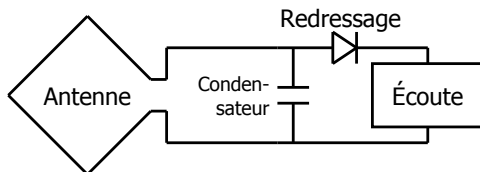


FIGURE 2 – Circuit de base d'un récepteur radio AM minimaliste

forme un filtre passe-bande. Un filtre passe-bande laisse passer seulement une mince bande de fréquences parmi toute la plage de signaux. Implémenté avec un condensateur et une inductance, la relation entre la fréquence centrale et ces deux composantes est

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [\text{Hz}]. \quad (1)$$

Il s'en suit donc qu'il est possible de régler la radio en modifiant soit l'inductance avec une capacité fixée, soit la capacité avec l'inductance fixée ou soit les deux. Dans notre contexte, nous éliminons d'emblée la dernière possibilité puisqu'il serait embarrassant d'avoir à contrôler deux paramètres pour choisir un poste. Puis, modifier l'inductance correspond à modifier un des paramètres de l'antenne déterminant son inductance : le nombre de tours de fil, la surface interne dans le plan de l'antenne, le diamètre du fil utilisé ou encore la perméabilité relative du matériau du fil. Ce sont là tous des variables peu ergonomiques à varier physiquement.

Or, un condensateur variable est un dispositif très populaire muni d'une tige rotative pour modifier la capacité. C'est donc un item de choix dans le but de régler la radio. En réalité, les récepteurs radio AM commerciaux fonctionnent pour la plupart avec des condensateurs variables. Le standard est 9.6 pF à 365 pF, mais il existe aussi des modèles « plus récents » allant de 9.6 pF à 250 pF. Ces dispositifs se récupèrent de vieux récepteurs ou s'achètent à l'état neuf dans un magasin de pièces électroniques ouvert au public. Un des buts principaux de ce laboratoire est donc de choisir une forme d'antenne, trouver la formule associant ses propriétés physiques à son inductance et déterminer les propriétés physiques idéales pour qu'avec une capacité allant de quelques picofarads à quelques centaines de picofarads, on puisse créer un filtre passe-bande permettant l'extraction des fréquences de la plage AM, à savoir environ 540 kHz à 1600 kHz.

## 2.2 Formes d'antennes

Plusieurs structures d'antenne existent et donnent lieu à des propriétés différentes. Les formes d'antenne déterminent aussi la géométrie des lignes de transmission. Dans notre contexte, toutefois, nous ne nous préoccupons pas de cette géométrie. Il suffira la plupart du temps de modifier l'angle de l'antenne pour bien recevoir les ondes émises par les stations.

Parmi les formes disponibles, nous en mentionnons deux ici : circulaire et carrée, ces deux structures étant plutôt simples à concevoir réellement. À ce sujet, l'excellente ressource *Electromagnetic Compatibility Laboratory* (ECL) du Missouri University of Science and Technology (<http://emclab.mst.edu/inductance/>) nous indique tout ce dont nous avons besoin. Selon la page, la plupart des formules sont dérivées du livre *Inductance Calculations* de F. W. Grover.

La forme circulaire est celle qui est suggérée dans l'énoncé de ce laboratoire. Selon l'ECL, les caractéristiques importantes d'une telle antenne sont le nombre de tours  $N$ , le rayon du cercle  $R$ , la rayon du fil utilisé  $a$  ainsi que la perméabilité relative du matériau du fil  $\mu_r$ . L'inductance peut alors être approximée efficacement par

$$L \approx N^2 R \mu_0 \mu_r \left( \ln \left( \frac{8R}{a} \right) - 2 \right) \quad [\text{H}]. \quad (2)$$

L'autre forme étudiée est carrée. Le seul paramètre modifié par rapport au cercle est qu'il n'y a pas de rayon  $R$ , mais plutôt la taille d'un côté du carré  $w$ . L'inductance peut alors être approximée efficacement par

$$L \approx N^2 \frac{2\mu_0 \mu_r w}{\pi} \left( \ln \left( \frac{w}{a} \right) - 0.774 \right) \quad [\text{H}]. \quad (3)$$

### 3 Justification du design

#### 3.1 Condensateur variable

Notons d'abord que nous avons choisi de trouver un vieux condensateur variable, néanmoins en parfait état. Bien que la solution de créer son propre condensateur avec du papier d'aluminium et des rouleaux de carton était intéressante, nous avons préféré une solution sûre et beaucoup plus précise. La figure 3 montre une photo du condensateur variable trouvé. La figure 4 montre son circuit équivalent.

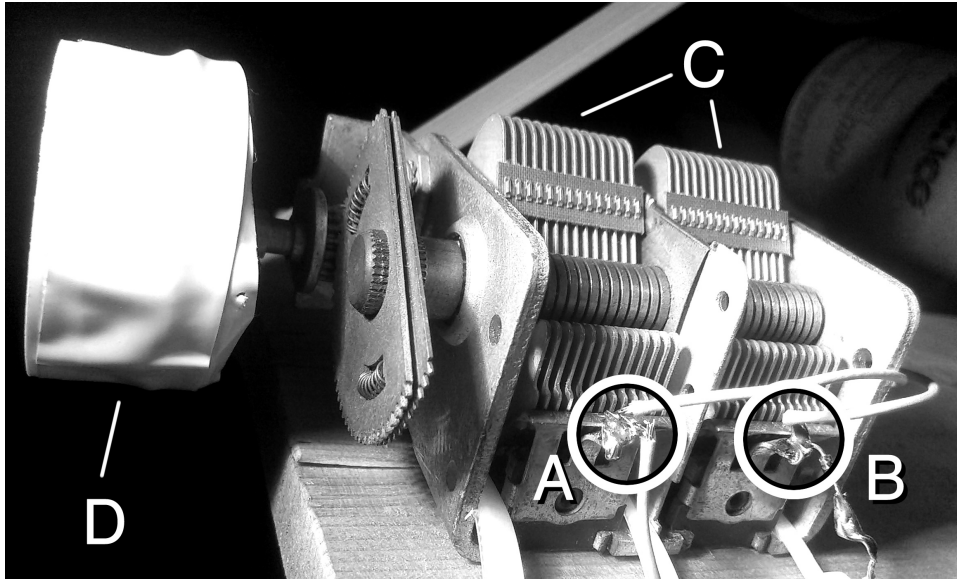


FIGURE 3 – Condensateur variable utilisé

Il nous a pris un certain temps avant de figurer cette construction, mais l'arrangement en question permet d'obtenir un condensateur d'une certaine valeur  $C$  en prenant les bornes A et B et  $2C$  en prenant les bornes A et C ou B et C. Ceci est dû au fait que toutes les petites surfaces du haut (borne C) sont connectées ensemble, alors qu'on a deux groupes déconnectés d'autres surfaces en A et en B. Ceci permet deux configurations facilement. Nous avons choisi d'utiliser la première. Le point D sur la figure 3 est la poignée permettant la variation de capacité.

Nos tests avec un multimètre nous ont indiqué environ 20 pF au minimum et environ 245 pF au maximum. C'est donc avec ces valeurs que nous avons déterminé l'inductance requise. Avec une capacité de 245 pF pour la fréquence 540 kHz, le module de l'impédance du condensateur est

$$|Z_C| = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{(2\pi \times 540000)(245 \times 10^{-12})} = 6.50 \times 10^{-8} \Omega. \quad (4)$$

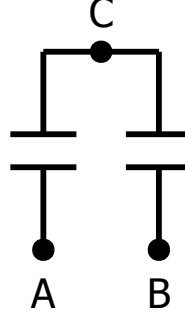


FIGURE 4 – Circuit équivalent du condensateur variable utilisé

### 3.2 Choix d'une inductance idéale

Nous rappelons que nous devons trouver une inductance permettant d'obtenir, dans la mesure du possible, la plage de fréquences centrales 540 kHz à 1600 kHz avec les capacités 20 pF à 245 pF.

Nous notons d'abord le rapport des fréquences recherchées :

$$\frac{540 \text{ kHz}}{1600 \text{ kHz}} = 0.3375 \text{ Hz/Hz.} \quad (5)$$

En vérifiant ce rapport en fixant la capacité maximale, pour une inductance quelconque fixée, nous trouvons

$$\frac{f_{01}}{f_{02}} = \frac{\sqrt{C_2 L}}{\sqrt{245 \text{ pF} \times L}} = 0.3375 \quad (6)$$

$$C_2 = 27.907 \text{ pF.} \quad (7)$$

Il n'est donc pas possible d'atteindre toute la plage de fréquences recherchée sans « gaspiller » un peu de capacité variable. Donc, en réalité, la plage dépassera 1600 kHz en fixant 540 kHz pour 245 pF :

$$\frac{540 \text{ kHz}}{f_{02}} = \frac{\sqrt{20L}}{\sqrt{245 \times L}} f_{02} = 1890 \text{ kHz.} \quad (8)$$

Nous retenons donc cette plage comme étant acceptable : 540 kHz à 1890 kHz occasionne un ratio qui peut être exactement atteint par la plage de capacités de notre condensateur variable, d'autant plus que Montréal possède une station qui dépasse 1600 kHz (1650 kHz).

L'inductance est désormais facile à trouver :

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{245 \text{ pF} \times L}} = 540000 \quad (9)$$

$$L = 345.6 \text{ } \mu\text{H.} \quad (10)$$

Afin de réaliser l'antenne, nous avons choisi une structure carrée puisque nous jugeons que c'est une forme plus simple à réaliser en réduisant l'erreur que la conception d'un cercle parfait

peut amener. Afin d'obtenir une bonne surface incluse par la structure de l'antenne, nous choisissons arbitrairement un côté de 50 cm. C'est une taille que nous jugeons assez grande pour une bonne réception, et assez petite pour une bonne maniabilité (rappelons qu'avec une radio AM, l'orientation de l'antenne est importante; il doit donc être possible de facilement manipuler celle-ci).

Le choix d'une structure carrée engendre l'utilisation de la formule 3. Puisque nous avons choisi du fil de cuivre 22 AWG (0.644 mm), nous avons  $\mu_r = 0.999994$ ,  $a = 0.644 \times 10^{-3}$  m et  $w = 0.5$  m. En isolant  $N$  dans la formule 3, nous trouvons 12.3 tours.

Afin de simplifier la construction, nous avons effectué 12 tours. Ceci entraîne plutôt une inductance de  $338.7 \mu\text{H}$ , qui à son tour permet la plage de fréquence 552 kHz à 1934 kHz. C'est encore une plage acceptable, considérant que Montréal n'a pas de poste sous 620 kHz.

### 3.3 Analyse fréquentielle

Nommons  $Z_L$  l'impédance de l'antenne,  $Z_C$  celle du condensateur variable et  $Z_A$  celle de l'entrée de l'amplificateur. En regardant le circuit et en ignorant la diode,  $Z_C$  et  $Z_A$  sont des dipôles en parallèle, le tout en série avec  $Z_L$ . Le tout peut être vu comme un « diviseur de tension » et, si  $V_i$  est la tension à l'entrée et  $V_o$  la tension de sortie, alors

$$V_o = \frac{\frac{Z_A Z_C}{Z_A + Z_C}}{\frac{Z_A Z_C}{Z_A + Z_C} + Z_L} V_i = \frac{Z_A Z_C}{Z_C Z_L + Z_A (Z_C + Z_L)} V_i. \quad (11)$$

Comme  $Z_C = \frac{1}{sC}$ ,  $Z_L = sL$  et, selon la documentation technique de l'amplificateur utilisé,  $Z_A = 50000 \Omega$ , alors

$$V_o(s) = \frac{50000}{50000 + Ls(1 + 50000Cs)} V_i(s) \quad (12)$$

ou

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{50000}{50000 + Ls(1 + 50000Cs)}. \quad (13)$$

Ici, l'impédance  $Z_A$  est tellement grande par rapport aux autres qu'elle est négligeable.

En traçant le diagramme de Bode (courbe de magnitude seulement, figure 5) avec le logiciel MATLAB pour cette fonction de transfert, lorsque  $L = 338.7 \mu\text{H}$  et  $C = 140 \text{ pF}$  pour obtenir environ la station CKAC (730 kHz), nous voyons bien la sélection de fréquence effectuée par le système.

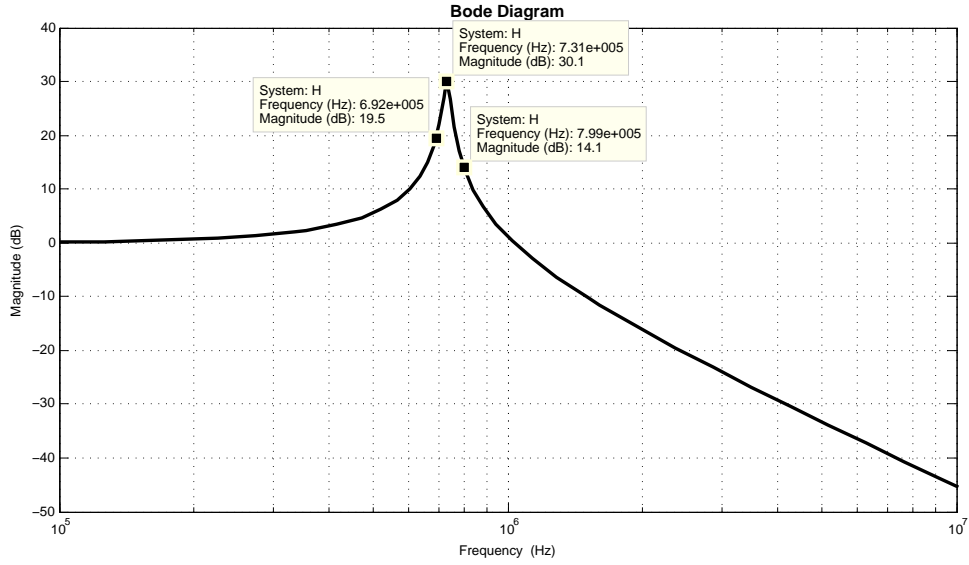


FIGURE 5 – Diagramme de Bode (magnitude) de notre circuit à  $C = 140$  pF et  $L = 338.7$   $\mu$ H

Pour cette fréquence, le circuit résonne à environ 30 dB. En épinglant les points correspondant aux fréquences des stations les plus rapprochées, c'est-à-dire 690 kHz et 800 kHz, nous voyons que celles-ci sont respectivement à environ -11 dB et -16 dB d'amplitude, ce qui correspond à respectivement 28 % et 16 % de pression sonore par rapport à celle de CKAC puisque le changement de niveau  $\Delta L$  correspond à une quantité de champ (tension) et donc  $\Delta L = 20 \log V$ .

## 4 Construction

Cette section explique comment construire le récepteur radio que nous avons bâti. Les explications sont appuyées par des schémas simples à comprendre. Voici d'abord une photo du produit final :

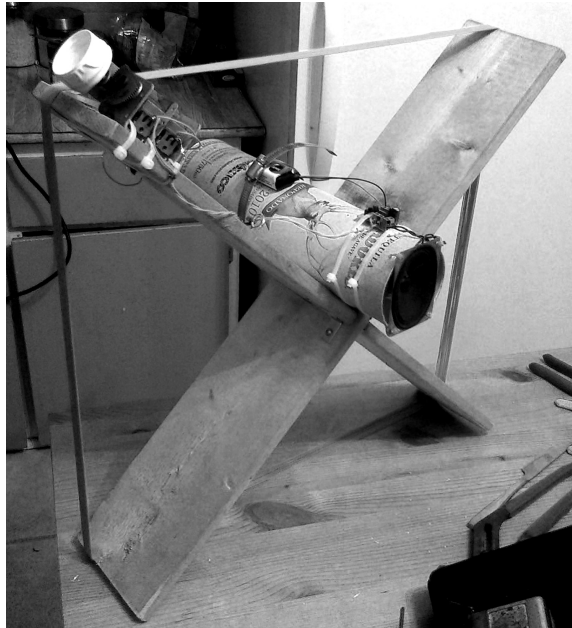


FIGURE 6 – Récepteur radio AM fini

Nous séparons la construction en trois étapes : structure et antenne, circuit et assemblage final.

#### 4.1 Structure et antenne

La structure principale est faite de deux planches de bois de 12 cm par 70.7 cm par 1 cm. La dimension 70.7 cm se trouve par le théorème de Pythagore étant donné que nous désirons un carré de côté 50 cm et que ces planches sont les diagonales de l'éventuel carré. Le bois est très rigide et permet de rester intact malgré la tension du fil à antenne, tension qui est nécessaire pour assurer une forme très carrée. Les planches ont une fente de 1 cm de large et de 6 cm de long à leur centre tel que montré à la figure 7. Le but de ces fentes est de pouvoir assembler les

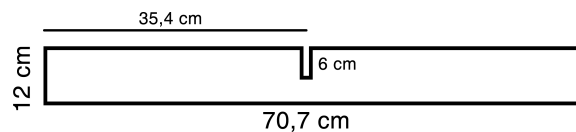


FIGURE 7 – Dimensions des planches de la structure

planches l'une contre l'autre au centre pour former une croix. Chaque planche entre à moitié dans l'autre. Des charnières rigides en métal, montrées à la figure 8, permettent ensuite d'assurer des angles de 90° entre les planches. Une charnière par coin est installée.



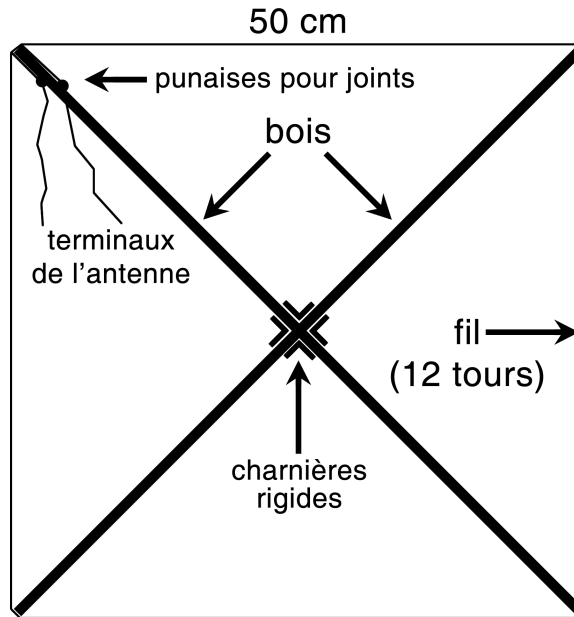


FIGURE 8 – Structure avec antenne

La figure 8 montre également le fil qui est enroulé autour des extrémités des planches afin de créer l'antenne. Comme nos calculs le suggèrent, il faut prévoir 12 tours, donc environ 30 m de fil (un surplus est nécessaire pour le raccordement au reste du circuit). Le fil que nous avons utilisé est de calibre 22 AWG, en cuivre et multibrins.

L'enroulement de l'antenne commence par enrouler un bout de fil autour d'une punaise qu'on plante dans une planche, près d'une extrémité. Ensuite, on taille quatre très petites fentes à chacune des extrémités pour bien aligner le premier tour. L'enroulement peut ensuite se faire, en s'assurant de mettre beaucoup de tension dans le fil pour ne pas perdre la forme carrée. Après 12 tours très serrés, on assure l'antenne avec une deuxième punaise.

## 4.2 Circuit

La figure 9 montre le circuit complet pour ce récepteur radio. La diode utilisée est la très populaire 1N4148, une diode pour petit signal. Le condensateur variable est un RC Ltd. E8969. Un bouchon de plastique et quelques couches de ruban adhésif en caoutchouc ont dû être ajoutés à la poignée du condensateur variable puisque celle-ci est en contact avec une des bornes et la capacité ajoutée par le contact avec la peau modifiait beaucoup le signal audio entendu.

La partie amplification est tirée de la documentation technique de la puce LM386 que nous possédions déjà. Cette puce est idéale pour l'audio de basse qualité parce qu'elle a un grand gain (200 maximum) et une sortie autour de sa masse d'alimentation, ce qui évite d'avoir à séparer l'alimentation en deux pour obtenir une masse virtuelle.

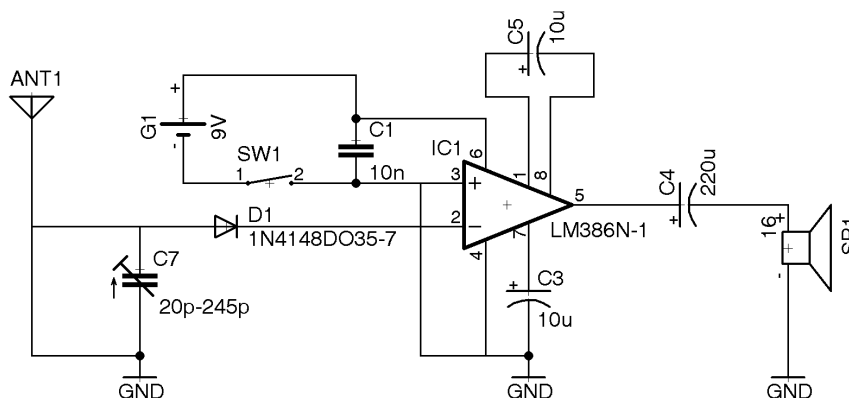


FIGURE 9 – Circuit complet du récepteur radio

Quelques pièces ont été retirées du circuit original présenté dans la documentation du LM386. D’abord, il y avait un potentiomètre de 10 k $\Omega$  (après la diode) pour contrôler le volume. Ceci n’est pas nécessaire dans notre cas parce que nous voulons simplement un volume maximal. Il est toujours possible de contrôler le volume en syntonisant une fréquence qui est près, mais pas exactement égale à celle du poste voulu. Le filtre passe-bande sélectionnera un signal plus faible et le volume sera réduit. Avec les tests que nous avons effectués, même une telle amplification sans volume nous donne toujours un son raisonnable, sans trop de distortion. Un condensateur de couplage (après la diode) a également été retiré puisque, bien que la théorie explique qu’il annule la composante DC du signal, il ne changeait rien en pratique et son absence simplifie la matérialisation du circuit.

Le hautparleur de 16  $\Omega$  est bien suffisant pour cette application. La caisse de résonance utilisée permet d’obtenir un son encore plus fort (prochaine sous-section). Sa faible impédance est évidemment possible ici étant donné que l’amplificateur possède une assez haute impédance d’entrée (50 k $\Omega$ ) et n’affecte pas beaucoup la qualité du signal d’origine, provenant de l’antenne.

### 4.3 Assemblage final

La figure 10 montre un plan pour obtenir le montage final. On remarque d’abord que nous plaçons le condensateur variable à une des extrémités des planches de bois. Celui-ci peut être gardé en place grâce à des attaches en plastique. Une des bornes de la diode de signal est soudée directement à une des bornes du condensateur variable. Le reste du circuit est réalisé en respectant la figure 9. Le circuit amplificateur est la partie amplification de la figure 9 soudée sur une plaque de prototypage. Ce genre de plaque possède encore une certaine capacité parasite à cause des petites pastilles métalliques qui permettent aux pièces d’y adhérer grâce à la soudure, mais celle-ci est bien moins importante qu’en utilisant un *breadboard*. Lorsque nous sommes passé d’un *breadboard* à cette plaque terminée, la qualité fut instantanément accrue.

La caisse de résonance est facultative. Elle permet d’amplifier le son perçu en face du hautparleur en renvoyant vers l’avant le son qui rebondit dans celle-ci. Comme nous ne souhaitons

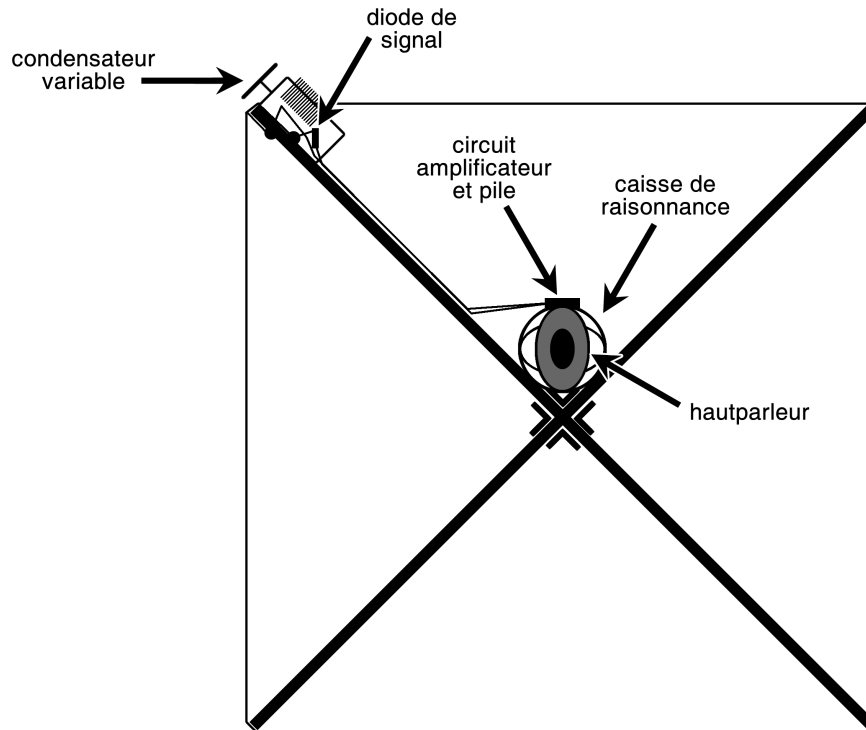


FIGURE 10 – Montage final du récepteur

pas une qualité exceptionnelle et que le but est de pouvoir simplement écouter la radio, la forme a peu d'importance. La forme que nous avons choisie (une vieille boîte qui contenait une bouteille de téquila mexicaine) fait d'ailleurs résonner une fréquence de façon beaucoup plus importante que les autres, mais le son demeure tolérable. Pour un son optimal, on voudrait choisir un volume permettant la distribution de fréquences la plus uniforme possible pour ne pas altérer le signal original. Notre caisse de résonance est fixée aux planches de bois avec des vis.

## 5 Résultats

Des tests ont été effectués dans l'appartement où la radio a été initialement conçue (près du métro Jarry) ainsi qu'à l'École Polytechnique de Montréal, au sixième étage du pavillon principal.

Dans Villeray, une fois le montage final de la radio effectuée, les stations suivantes peuvent être bien entendues : CINF (690 kHz), CKAC (730 kHz), CJAD (800 kHz), CKGM (990 kHz), CJMS (1040 kHz), CFMB (1280 kHz), CHOU (1450 kHz), CFAV (1570 kHz), CPAM (1610 kHz), CJRS (1650 kHz) et CJLO (1690 kHz). En tout, seulement deux ou trois stations semblent hors

de notre portée.

À l'École, la réception varie beaucoup selon la position sur l'étage. Vers la face nord, la réception n'est pas très bonne. Seules les stations de basse fréquence, comme 690 kHz et 730 kHz, peuvent être écoutées. Si on se déplace vers la face sud, par contre, la réception est excellente. Elle se compare d'ailleurs à la réception dans Villeray, sauf que certains postes ne semblent pas se rendre, c'est-à-dire deux ou trois dans les 1000 kHz. Les tests ont été effectués près du local A683.4.

Chose intéressante : l'orientation de l'antenne est très importante dans Villeray, mais peu importante à l'École. Nous croyons toutefois qu'il s'agit là d'un hasard : les antennes ne sont pas toutes au même endroit dans la ville ; on ne peut pas attribuer ce constat au fait que l'École soit plus proche du mont Royal, où se trouvent quelques antennes. L'École est peut-être située à un point de la ville où les ondes sont davantage parallèles que dans Villeray. Évidemment, nous avons fait le test de mettre le plan de l'antenne parallèle au sol : aucune réception n'est audible, comme la théorie le prévoit.

Il est important de ne pas toucher le métal du circuit. La capacité parasite inhérente au corps humain est ajoutée au circuit et la fréquence centrale du filtre passe-bande est déplacée. L'effet est habituellement une amplitude sonore très réduite.

## 6 Conclusion

Au terme de ce projet, nous sommes satisfaits du résultat. Nous sommes en mesure d'écouter facilement la majorité des stations de radio AM de Montréal, ce que nous croyions initialement impossible. L'ajout d'amplification avec une source active externe (pile de 9 V) apporte beaucoup à la convivialité de l'appareil ; sans le circuit amplificateur, nous devrions nous fier à un écouteur haute impédance et le récepteur radio serait plus difficile à manoeuvrer. Par-dessus tout, nous n'avons pas éprouvé de difficultés importantes lors de la mise en oeuvre de ce projet : nos calculs étaient très précis, nous avons travaillé avec beaucoup de minutie et utilisé des pièces de qualité, autant pour la structure que pour l'électronique. Le récepteur qui en est ressorti dépasse nos attentes.

Pour améliorer ce radiorécepteur, nous pourrions ajouter un filtre passe-bas. La radio produit une haute fréquence constante dont la nature est difficile à évaluer, mais qui agace l'oreille à long terme. Évidemment, un filtre passe-bas pour l'audio (fréquence de coupure à environ 5-6 kHz) imposé au signal original couperait complètement le son puisque la porteuse ne serait pas filtrée. Il faudrait donc démodulariser autrement qu'avec un hautparleur. Un condensateur bien choisi peut agir en tant que détecteur d'enveloppe. Une fois le signal audio isolée, le filtre passe-bas peut être ajouté. La caisse de résonance pourrait aussi être mieux choisie pour éviter une résonance très prononcée d'une fréquence spécifique.

Il serait maintenant intéressant de créer une radio FM minimaliste, où la modulation est la variation de fréquence autour de la fréquence centrale de la porteuse, tandis que l'amplitude de l'onde reste plus ou moins constante. La bande FM permet également un signal stéréo, ce qui représente certainement un nouveau défi.