



Proteus

Robot détecteur de mines.



Elèves participants :

Cano Manon

Garric Justine

Labat Bastien

Kopp Paul-Emile

Petitpas Guillaume

Avec LACLAVERIE Jean-Michel
Professeur encadrant
Lycée Bernard Palissy- AGEN

Académie de Bordeaux

Table des matières

Résumé

Partenaires

Mots clefs

Introduction

1- Détecteur de métaux à battements

1.1- Principe de la détection

1.2- Les détecteurs à battements

1.3- Montage et tests du détecteur à battements

1.3.1 L'oscillateur à réaction

1.3.2 La multiplication des signaux

1.3.3 Changements de perspectives

2- Le détecteur à filtre passe-bande de bande passante variable

2.1- Modification du montage précédent

2.2- Test d'un premier filtre

2.3- Performances et choix des composants

2.4- Les dispositifs d'alerte et d'arrêt

2.5- Le robot en fonctionnement

Conclusion

Résumé :

Nous avons fabriqué un détecteur de métaux, porté par une voiture télécommandée. Dans le cas de la recherche d'un modèle de mine anti-personnelle, seul le robot est en danger, pas l'opérateur. La détection d'un objet métallique par la bobine entraîne l'arrêt du véhicule et le signalement de l'objet par un son et l'allumage d'une lampe. La variation de fréquence est convertie en tension pour déclencher l'arrêt du robot, par l'intermédiaire d'un transistor de puissance et d'un montage comparateur. Nous avons essayé de réaliser un montage efficace et simple car nous n'avons aucun enseignement d'électronique au lycée. Notre système est suffisamment performant pour révéler la présence d'un objet métallique de 100 g enfoui à 10 cm. Toutes nos connaissances actuelles en électronique ont été acquises grâce à ce travail.

Partenaires : Radio-modèle 47

Mots clefs : Induction, bobine détectrice, filtre actif à bande passante variable, robot.

Introduction

Le cours de physique de Première S aborde l'électromagnétisme, les aimants et les bobines, les moteurs et les haut-parleurs. Notre professeur de physique nous a montré en cours la bobine d'un détecteur de métaux. Nous cherchions un sujet pour les Olympiades de physique et nous l'avons trouvé ce jour-là : fabriquer un robot détecteur de métaux.

Les premiers détecteurs de métaux sont apparus vers la fin de la 2nde guerre mondiale après les travaux de Józef Kosacki. Ils ont d'abord servi au déminage et à d'autres utilisations militaires avant d'être des outils pour l'archéologie et les chercheurs de trésors. Une caractéristique importante d'un détecteur de métaux est la sensibilité. Elle va déterminer le type d'objet qu'il est possible de trouver et leur profondeur.

Notre première piste de travail a été un montage utilisant les battements de deux fréquences proches, celle d'un oscillateur fixe et celle de l'oscillateur dont la fréquence varie à cause de la présence de métal près de la bobine détectrice. Le signal de sortie est un signal d'amplitude constante, mais de fréquence variable. Le traitement de ce signal pour commander l'arrêt d'un moteur demande de nombreuses étapes : filtre passe-bande, détecteur de crête pour la démodulation, conversion fréquence-tension, montage comparateur pour commander un transistor. Le nombre de composants et le nombre de pannes augmentant de manière inquiétante, nous nous sommes alors demandé s'il n'était pas possible de faire plus simple.

Nous avons alors modifié l'oscillateur variable, pour le transformer en simple filtre passe bande actif à bande passante variable. Pas de multiplieur, plus de démodulation et de circuit intégré pour la conversion fréquence-tension. Les performances de détection sont comparables à celles de notre premier détecteur à battements.

Sa sensibilité est cependant peu élevée car notre montage n'utilise pas de circuits électroniques complexes. Nous avons voulu nous limiter à ce qu'il nous semblait possible de comprendre.

Le signal de sortie du détecteur sert à bloquer l'avancement d'une voiture télécommandée, si un métal est présent à proximité de sa bobine de détection. La commande d'arrêt de la voiture est obtenue grâce à un montage comparateur et un transistor de puissance.

Nous vous présentons les différentes étapes de notre projet, dans l'ordre dans lequel nous

les avons réalisées. Dans une première partie, nous abordons notre travail sur le détecteur de métaux à battements. Puis la seconde partie présente la modification du montage à battements pour obtenir un détecteur à filtre passe bande à bande passante variable, moins sujet aux pannes. Nous avons fait varier les paramètres du circuit pour améliorer sa sensibilité. Dans la troisième partie nous abordons la commande du moteur et des dispositifs d'alerte. Pour finir, nous présentons les performances de notre robot.

1 Détecteur de métaux à battements

1.1- Principes de la détection

Pour détecter les métaux, plusieurs voies sont possibles. On peut utiliser un champ magnétique variant dans le temps car les métaux réagissent aux champs magnétiques. Le champ magnétique est alors produit par une bobine parcourue par un courant alternatif. C'est le cas de la plupart des détecteurs du commerce.

Un oscillateur électrique comportant une bobine permet de fabriquer le champ magnétique variable. Tout élément métallique présent dans ce champ, modifie la valeur de l'inductance L de la bobine et donc la fréquence de l'oscillateur auquel elle appartient.

En effet, le métal a la faculté de conduire l'électricité. Le champ créé par la bobine peut induire des courants de Foucault dans les métaux, qui à leur tour créent des champs magnétiques induits. C'est ce phénomène qui modifie la fréquence de l'oscillateur. On appelle courants de Foucault les courants électriques créés dans une masse conductrice, soit par la variation au cours du temps d'un champ magnétique extérieur traversant ce milieu, soit par un déplacement de cette masse dans un champ magnétique constant. C'est la variation de fréquence de l'oscillateur qui est la première étape de la détection.

Il existe aussi une autre voie expérimentale, que nous présenterons dans la seconde partie de ce mémoire. Au lieu d'utiliser un oscillateur à fréquence variable, il est possible d'utiliser un filtre passe-bande, centré sur une fréquence qui varie en présence d'un métal. Ce montage plus simple, moins sujet aux pannes, est celui que nous utiliserons dans le montage final.

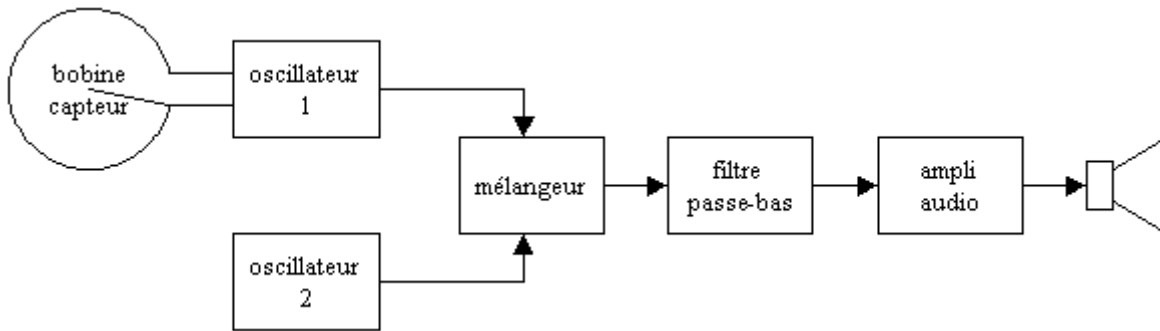
1.2- Les détecteurs à battements

Ces détecteurs utilisent la technique des battements de fréquences et des circuits résonants :

- La technique des battements de fréquences est enseignée en spécialité physique de Terminale S, pour la chaîne de transmission des signaux radios et en acoustique, pour l'accord de deux instruments de musique.
- Les oscillateurs sont des circuits résonants, dont l'un utilise la bobine du capteur comme inductance. Une variation de l'inductance L modifiera la fréquence des oscillations. Les oscillations d'un circuit LC sont enseignées en tronc commun.
- Les champs magnétiques sont abordés en première S

C'est pour cela que nous avons tout d'abord choisi de réaliser un détecteur à battements, pour avoir plus d'atouts pour comprendre le fonctionnement de notre système.

Cette technique est la moins compliquée à mettre en œuvre, même si elle a des défauts et des limites. On peut utiliser un oscillateur fixe et un oscillateur variable utilisant la bobine de la tête de détection. En mélangeant le signal de ces deux oscillateurs, on obtient un battement, soit la différence des deux fréquences. Il faut créer un battement audible de quelques centaines de Hz, pour que la détection soit possible.



Le montage précédent n'est pas suffisant si l'on veut commander l'arrêt d'un moteur. Il faut alors rajouter un convertisseur fréquence tension, un comparateur et un transistor de puissance.

La technique des battements présente deux inconvénients pour les démineurs ou les chercheurs de trésor. Les circuits résonnants ne sont pas stables en fréquence. Ils sont en particulier très sensibles à la température. Nous avons au cours de nos expériences observé des dérives en fréquences de nos oscillateurs et de nos générateurs de signaux. Mais nous avons la possibilité d'ajuster manuellement les fréquences sur nos prototypes, pendant les mesures.

De plus, la bobine est sensible aux corps ferreux des sols minéralisés et la réponse du détecteur varie aussi avec la distance détecteur-sol. Ces deux problèmes occasionnent des variations de tonalité sans rapport avec une détection. Pour nos expériences, la voiture se déplacera sur une table en plastique ou en céramique. Il est impossible de la faire se déplacer sur le sol de la classe à cause des ferrailles qui sont incluses dans le béton. La bobine est fixée à 1cm du sol et cette distance ne varie pas, ce qui évite de fausses détections.

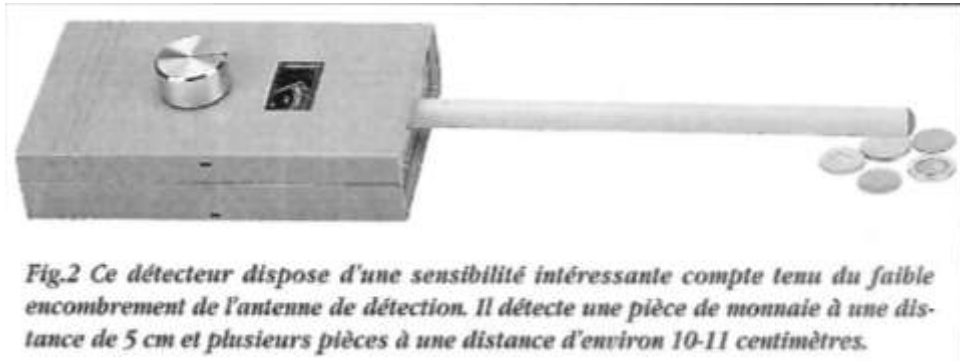


Photo 1

La bobine va déterminer la fréquence de l'oscillateur variable. Elle doit donc être choisie avec soin pour que des battements soient possibles avec l'oscillateur fixe. Voici sur la photo 1, quelques unes des bobines que nous avons testées.

Remarque : Il existe aussi des détecteurs à induction pulsée et balance d'induction, mais ils sont beaucoup plus complexes et coûteux.

Nous avons téléchargé plusieurs articles de revue d'électronique présentant la construction de détecteur de métaux. Dans un article de la revue *Nouvelle électronique* de janvier 1997, p 42-51, un mini-détecteur est décrit. Il fonctionne à 40 kHz et utilise une antenne détectrice de ferrox-cube (ferrite), comme celle contenu dans les récepteurs radios grande ondes et moyenne-ondes. La bobine d'un détecteur de métaux n'est donc pas toujours circulaire et plate. La fréquence correspond à celle des émetteurs ultrasons du laboratoire que nous avons déjà utilisés. Comme dans la chaîne de régulation thermique de l'inspecteur de Sciences Physiques M.Moreaux vue en MPI, un transistor sert à déclencher le fonctionnement d'un circuit électrique, ici le circuit du buzzer.



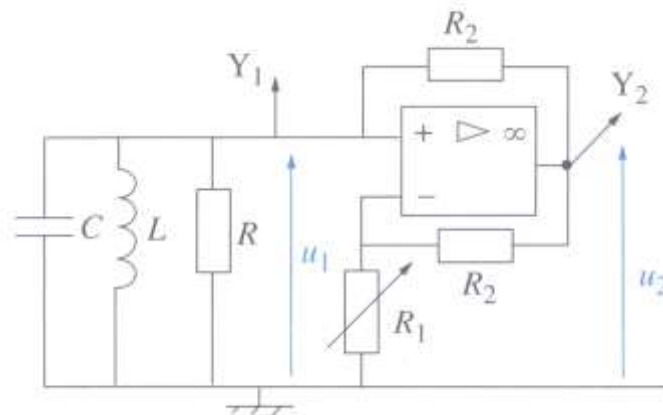
Un détecteur à battements à 445 kHz est présenté par Elektor, janvier 1979, page 111. Les fréquences de détecteurs à performances comparables, peuvent être très différentes les unes des autres, de 40 kHz à 445 kHz ou plus. Elles dépendent surtout des caractéristiques de la bobine. Après cette première documentation et en nous aidant de notre cours de spécialité physique, nous avons fabriqué notre premier détecteur à battements.

1.3 Montage et tests du détecteur à battements

1.3.1 L'oscillateur à réaction :

Le système bouclé constitué d'un filtre passe-bande passif (L , C , R , R_2) et d'un amplificateur non inverseur, peut fonctionner en oscillateur. Notre oscillateur n'est pas sinusoïdal, le signal étant écrêté. Il est capable de délivrer un signal de sortie alternatif en l'absence de signal d'entrée. Ceci est possible grâce à un couplage entre sortie et entrée de telle sorte que la fraction du signal de sortie qui est réinjectée à l'entrée soit responsable d'un signal de sortie d'amplitude au moins égale à celle qui lui a donné naissance. La puissance nécessaire à l'entretien des oscillations est fournie par l'alimentation continue de l'amplificateur opérationnel.

Les composants sont dans un premier temps choisis parmi ceux présents dans la classe d'MPI. Nous choisissons des condensateurs et des bobines pour obtenir des fréquences d'oscillation de quelques dizaines de kHz, car elles sont visualisables sur le logiciel Latispro et notre documentation nous a montré qu'un détecteur à battements peut fonctionner à ces fréquences-là.



La fréquence de résonance du circuit oscillant est aussi la fréquence centrale ou fréquence d'accord du filtre passe-bande. C'est également la fréquence propre des oscillations d'un circuit LC, que nous avons vu en cours d'électricité de Terminale S :

$$F_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$$

Les bobines que nous avons fabriquées, comme la plus part de celles présentes au laboratoire, ont une inductance inconnue. Nous les avons placées dans des oscillateurs pour déterminer cette inductance.

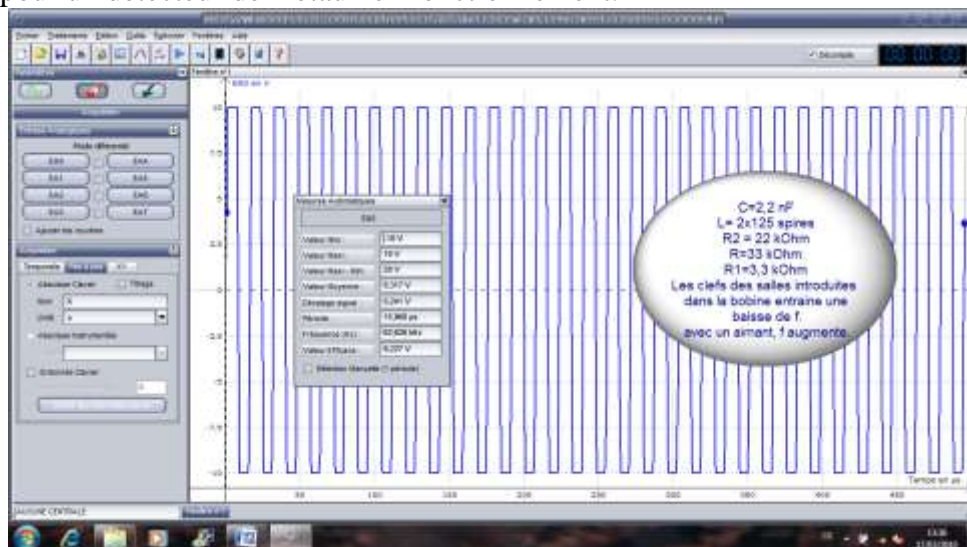
Nous avons trouvé ce montage dans un livre d'électronique de Terminale STI. Nous n'avons pas abordé son fonctionnement théorique, et les équations qui permettent de le décrire. Nous avons choisi nos composants par essais successifs. Notre compréhension du montage n'est qu'expérimentale.

Oscillateur à 62626 Hz

C'est le premier oscillateur que nous avons testé, avec une fréquence de vibration $F_0 = 62626$ Hz lorsque tout objet métallique est éloigné.

La bobine n'a pas la valeur de son inductance indiquée, seulement le nombre de spires. C'est une bobine à section carrée, haute de 12 cm et ayant servi pour des transformateurs. En supposant correcte l'indication de la capacité du condensateur (2,2 nF), la bobine de 2x125 spires a une inductance proche de 2,9 mH.

L'oscillateur fonctionne, mais il n'est pas sinusoïdal. Le signal est rectangulaire et permet la détection. Lorsque l'on approche de la bobine un objet métallique, la valeur de la fréquence d'oscillation indiquée par Latispro change. Pour un objet en plastique, il n'y a aucune variation de f_0 . Les variations sont d'autant plus importantes que l'objet métallique est près de la bobine. Elles sont très importantes si l'objet rentre dans la bobine, mais ce n'est pas possible pour un détecteur de métaux en fonctionnement.



Oscillateur à 41582 Hz (fichier 08047)

Avec la petite bobine jaune de la photo 1 et un condensateur de 4,7 nF, nous obtenons des oscillations à 41582 Hz, et une détection correcte. Le signal a la même forme que précédemment.

Les sites consacrés à la détection indiquent les performances des bobines en fonction de leur taille et de leur forme : Plus le disque sera petit plus les champs électromagnétique

seront « concentrés » et il sera possible de détecter de très petits objets de manière précise, évidemment la profondeur sera plus faible. A contrario, plus le disque est grand plus le champ est large .On trouver des objets de plus grandes tailles, avec moins de précision, mais plus profondément. Les disques de 20 cm sont reconnus par les fabricants comme étant les disques "standard".

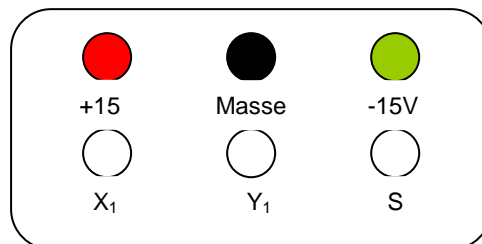
Nous avons comparé les performances de tous nos oscillateurs.(voir partie 2) Pour cela nous avons mesuré la variation de fréquence de l'oscillateur en fonction de la distance de l'objet métallique. Puis nous avons inséré une même bobine dans des oscillateurs de fréquences différentes pour choisir le plus sensible. Nous avons aussi testé des objets de tailles différentes.

Nous avons remarqué que plus la fréquence des oscillations est élevée, plus le système dérive au cours du temps. Nous pensions initialement que plus la fréquence des oscillations est grande, plus le système serait sensible. Ce n'est pas le cas pour nos montages.

1.3.2 La multiplication des signaux :

Après ces tests pour choisir l'oscillateur, nous avons poursuivi le montage en multipliant le signal de l'oscillateur variable avec celui de l'oscillateur fixe. Un générateur de signaux nous sert d'oscillateur fixe. Cependant nous avons remarqué que pour les fréquences élevées (145 kHz), le générateur dérive de manière importante, ce qui oblige à des réglages fréquents pour obtenir des battements.

Schéma du multiplieur:



Un multiplieur est un composant électronique qui fonctionne lorsqu'il est alimenté en +15Volt, 0Volt et -15 Volt, il permet de « mélanger » deux tensions afin d'en moduler une (en faire varier l'amplitude ou la fréquence). En effet, à la borne X₁ est appliquée une tension dite modulante (U₁) et à la borne Y₁ c'est une tension que l'on appelle porteuse (celle qui sera modulée, U₂). Enfin, la borne S (borne de sortie) permet de délivrer le signal modulé (U_s), qui correspond à :

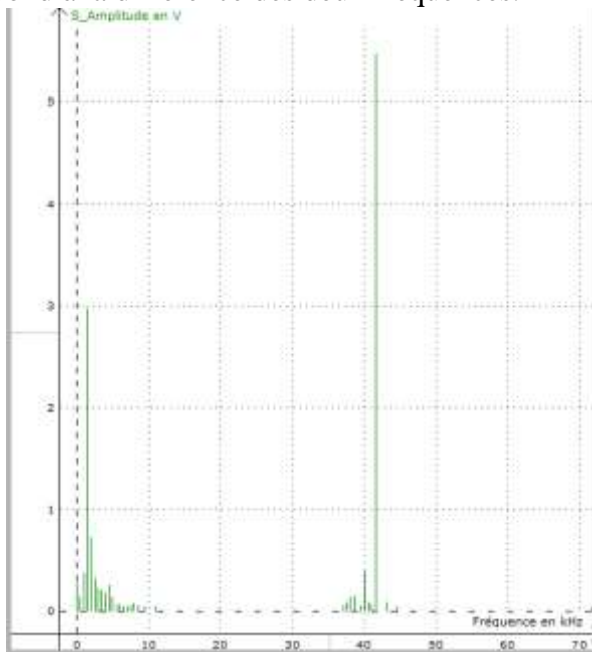
$$U_s = k * U_1 * U_2 \text{ (k est un coefficient multiplicateur qui varie selon le multiplieur).}$$

Pour que la modulation soit satisfaisante, il faut que l'enveloppe supérieure du signal modulé (U_s) suive les variations du signal modulant (U₁).

Le multiplieur, à sa borne de sortie, fournit un signal qui peut être audible grâce à un haut parleur qui convertit ce signal en onde sonore (entre 20Hz et 20kHz). Si U₁ et U₂ ont respectivement pour fréquence F₁ et F₂, le signal de sortie est la somme de trois tensions sinusoïdales de fréquence F₁-F₂, F₁+F₂ et F₂. Plus la fréquence du signal est basse plus le son sera grave et inversement. Sans filtre passe bas, nous obtenons un signal audible utilisable pour la détection, même si le bruit de fond est important.

Nous disposons au laboratoire d'oscillateurs ultrasonores pouvant fonctionner en émission continu, ou en salve. Leur fréquence est de 40kHz. Le détecteur présenté par la revue *La nouvelle électronique* fonctionne à cette fréquence. Nous avons tenté de multiplier le

signal d'un de nos oscillateurs (41582 Hz) avec celui du générateur d'ultrasons. Les battements sont exploitables. On observe un pic vers 1kHz dans l'analyse de Fourier, qui correspond à la différence des deux fréquences.



Nous avons ensuite réalisé un démodulateur à détection d'enveloppe pour obtenir un signal sans bruit de fond, c'est-à-dire ne contenant que la fréquence audible de détection.(voir partie 2).

1.3.3 Changements de perspectives

Après avoir obtenu ces premiers résultats encourageants, nous avons réfléchi à la commande du moteur. Nous avons un signal de fréquence variable qui doit être converti en tension continue pour piloter un transistor, par l'intermédiaire d'un montage comparateur. Une tension de référence est envoyée sur une des 2 entrées de l'amplificateur opérationnel fonctionnant en comparateur. Lorsque la tension de sortie du convertisseur fréquence tension passe par la valeur de référence, l'amplificateur opérationnel bascule de +15V à -15V, ou inversement, et le transistor se bloque ou devient passant.

La conversion fréquence-tension peut être obtenue par exemple par des bascules monostables (à construire ou par des circuits intégrés), ou encore par un filtre passe-bande. Et nous avons commencé à paniquer ! La table est pleine de composants, nous commençons à manquer de fils, les pannes se multiplient, les montages sont très longs à faire et à tester et il reste encore beaucoup d'étages à construire ! Nous ne comprenons nos montages que par l'expérience, et tout devient trop compliqué. Il faut changer de méthode.

Devant l'augmentation inquiétante du nombre de composants et de fils de nos montages, nous nous sommes alors demandé s'il n'était pas possible d'utiliser un seul filtre passe-bande dans notre détecteur, pouvant à la fois servir à détecter le métal et à convertir la fréquence en tension. Et tout s'est simplifié...

2- Le détecteur à filtre passe-bande de bande passante variable

2.1- Modification du montage précédent

Nous utilisons dans ce montage un oscillateur sinusoïdal de fréquence fixe égale à la fréquence centrale du filtre passe-bande auquel il est associé. Le signal est simplement fourni par un générateur de signaux. Le filtre à circuit résonant RLC est issu de l'oscillateur précédent utilisé pour le détecteur à battement¹ :

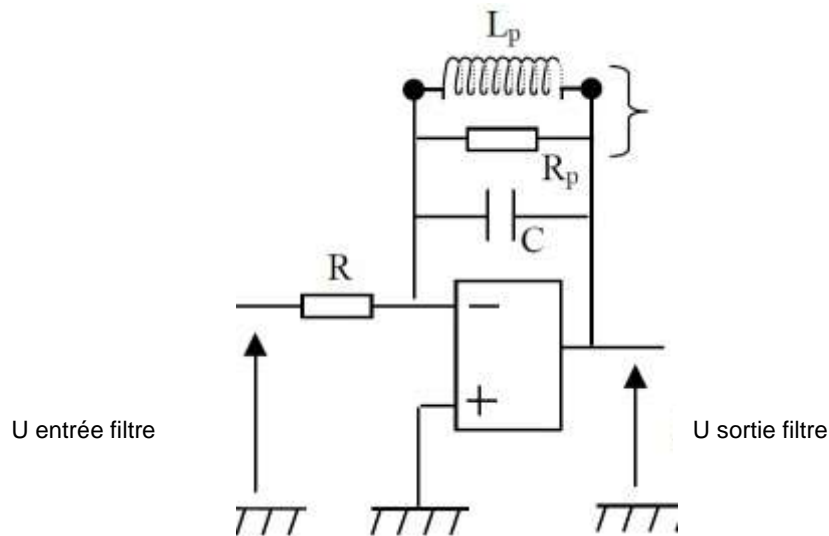


Schéma du filtre sélectif

Il est associé à un simple détecteur de crête dans toutes nos mesures :

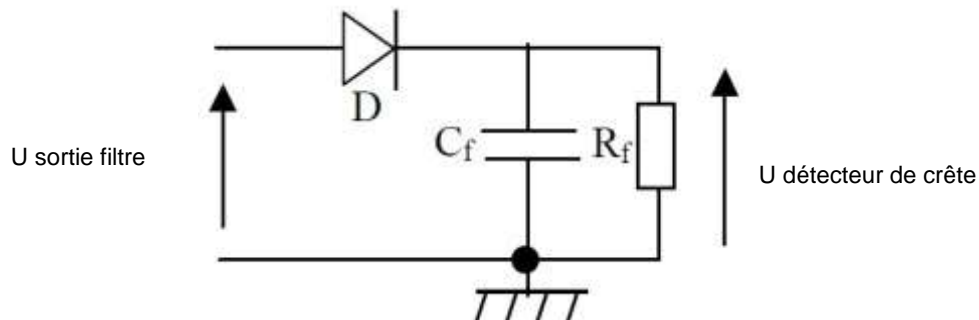


Schéma du détecteur de crête

2.2- Tests d'un premier filtre

Nous avons choisi comme premier montage, un circuit centré sur 42 kHz, c'est-à-dire sur une fréquence permettant une détection correcte avec l'oscillateur de notre première partie.

Fréquence centrale du filtre à 42148 Hz, bobine jaune :

Caractéristiques du montage complet :

$C = 4,7 \text{ nF}$, bobine jaune (2,2 cm sur 2,6 cm rectangulaire),

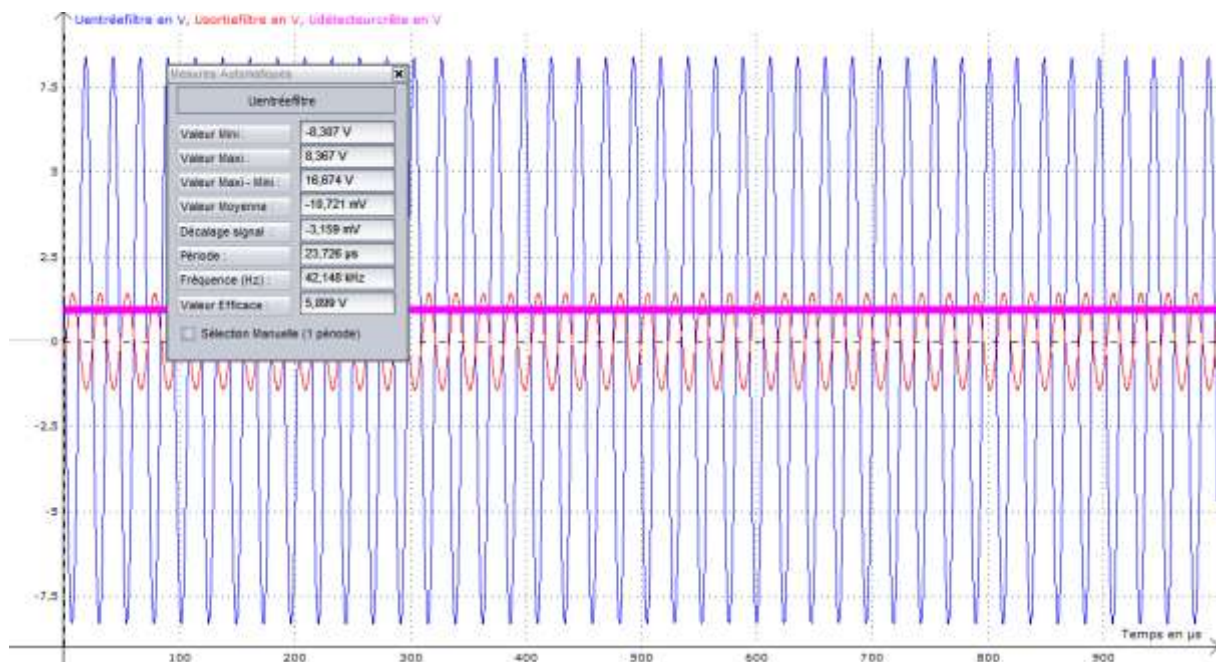
$R_p = 1 \text{ M}\Omega$, $R = 22 \text{ k}\Omega$ pour le filtre

$C_f = 1 \mu\text{F}$, $R_f = 1 \text{ M}\Omega$ pour le détecteur de crête.

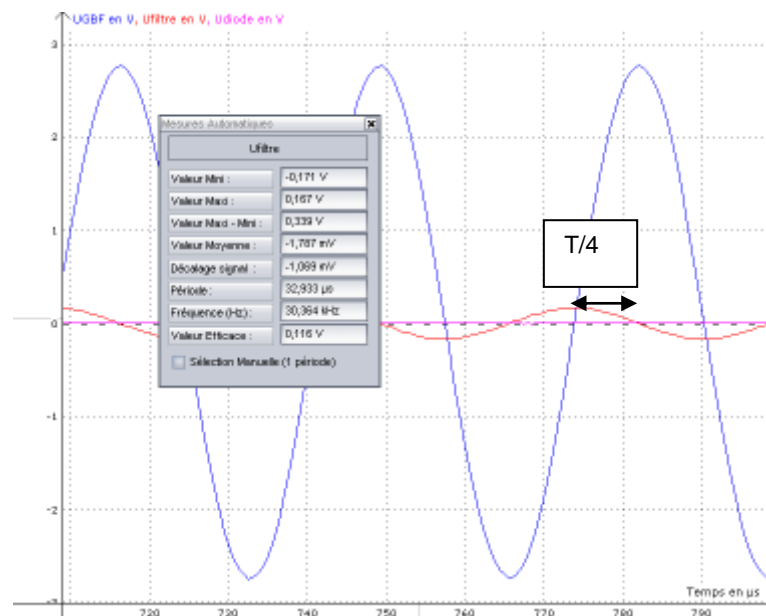
Niveau fort du GBF (13,8 sur son affichage)

¹ D'après V.Chollet, Université de Franche Comté, TP électronique 2^{ème} année S3 EA2-07.

Voici les tensions obtenues en entrée et sortie du filtre, et en sortie du détecteur de crête, lorsque la fréquence du générateur est égale à la fréquence centrale du filtre, ici 42148 Hz. Les signaux d'entrée et de sortie du filtre sont sinusoïdaux.



Nous remarquons que $U_{\text{sortiefiltre}}$ est en opposition de phase avec $U_{\text{entréefiltre}}$ si la fréquence d'entrée est égale à celle du centre de la bande passante, soit 42148 Hz. Si la tension $U_{\text{entréefiltre}}$ évolue jusqu'à 30 kHz, $U_{\text{sortiefiltre}}$ a une amplitude qui diminue et est déphasé de $T/4$. De même si f augmente au-delà de 42 kHz. La tension $U_{\text{détecteur de crête}}$ tend aussi à diminuer.

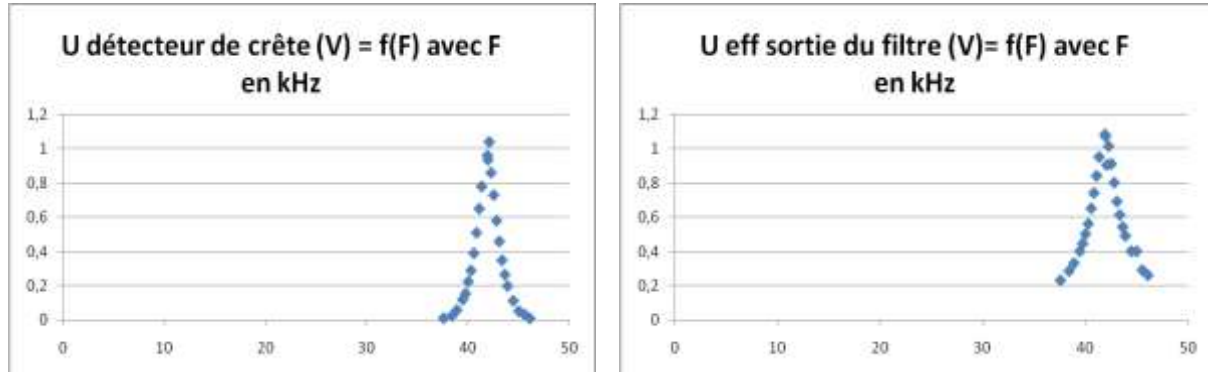


Nous avons constaté ces déphasages dans nos expériences, et leur évolution. Mais nous n'avons pas cherché à les étudier directement, car ils ne nous semblent être importants pour la qualité de la détection. L'évolution du déphasage est une conséquence de l'éloignement de la fréquence du signal d'entrée par rapport à la fréquence centrale du filtre.

L'amplitude du signal de sortie du filtre peut être modifiée en changeant la valeur de R . Si R diminue, l'amplitude augmente. Il suffit que le signal ne sature pas à cause des limites de l'amplificateur opérationnel, car dans ce cas la détection peut être impossible.

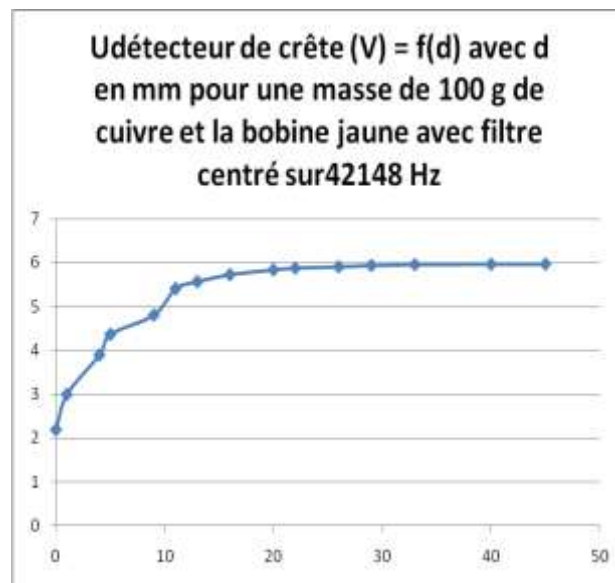
Nous avons calculé la valeur de l'inductance de la bobine : $F_o = 1/(2\pi\sqrt{LC})$, donc $L_{\text{jaune}} = (1/2\pi F_o)^2 \cdot 1/C = 3\text{mH}$

Avec ce filtre centré sur 42148 Hz, nous avons tracé l'évolution de la tension efficace de sortie du filtre U_{eff} et de la tension de sortie du détecteur de crête $U_{\text{détecteur de crête}}$ en fonction de la fréquence du signal d'entrée, lorsque tout métal est loin de la bobine.



La plus grande valeur de U_{eff} est 1,07V. $U_{\text{eff}}/\sqrt{2}$ est obtenue pour 41kHz et 43 kHz. On obtient donc une bande passante à 3dB de 2kHz.

Nous avons ensuite approché une masse de 100g de cuivre pour tester la sensibilité de notre montage.



La tension continue diminue de manière significative à partir d'une distance de 2 cm entre le centre de la bobine détectrice et la masse de 100g de cuivre. La bobine jaune a un trou central de section rectangulaire de 2,2 cm sur 2,6 cm.

Nous avons ensuite réalisé des essais avec le socle de potence de masse 1000g, notre modèle d'une mine anti-personnelle. Sa présence est décelée à 14 cm de la bobine, même à travers une planche 1,5 cm d'épaisseur. Si la masse métallique est cachée dans le sable, la détection est possible à partir de 10 cm.

Notre système n'est pas un détecteur de métaux destiné à découvrir des pièces ou des bijoux, mais un détecteur de mines, c'est-à-dire de gros objets métalliques. La distance maximale de détection obtenue lors de cet essai nous semble satisfaisante.

Le détecteur de métaux à battements du lycée a de meilleures performances que notre montage, puisqu'il détecte le socle à 22 cm, et qu'il est capable de détecter des pièces de monnaies à 5 cm. Il utilise une bobine circulaire de 20 cm de diamètre. Cependant notre

montage a l'avantage d'être beaucoup plus simple à construire et à comprendre, et ses performances sont plus limitées, mais restent acceptables à notre avis.

Les métaux ferreux (fer, fonte, acier), et les métaux non ferreux (zinc, aluminium, cuivre) ne sont pas différenciés par notre système. L'un entraîne l'augmentation de la fréquence centrale du filtre, l'autre sa diminution. Dans les deux cas, la tension $U_{\text{détecteur de crête}}$ diminue. Le détecteur du lycée est capable de faire la différence. Les chercheurs de trésor utilisent cette différenciation pour faire la différence entre les objets de valeur et les ferrailles enterrées. Mais ce n'est pas notre but.

2.3- Performances et choix des composants

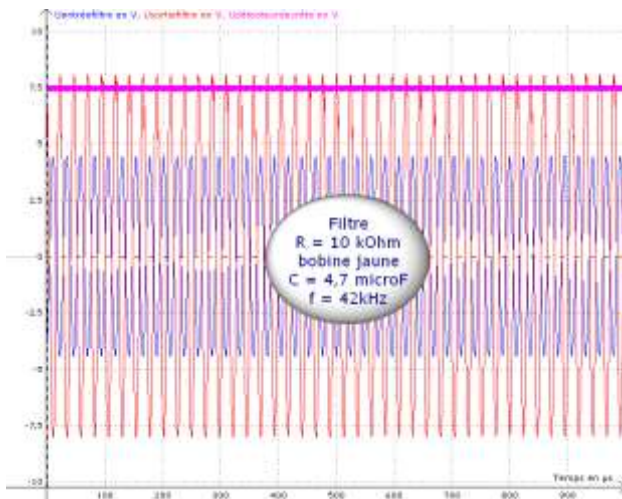
Nous avons envisagé de faire varier plusieurs paramètres de notre robot et d'étudier leur influence sur la distance de détection du modèle de mine. Nous avons modifié :

- La forme du signal du générateur de signaux.
- La valeur de l'inductance de la bobine et sa taille.
- La fréquence centrale du filtre en modifiant C ou L.
- La résistance R du filtre, pour modifier les valeurs de $U_{\text{détecteur de crête}}$.

Cependant les paramètres ne sont pas indépendants, et modifier la bobine modifie aussi la fréquence centrale du filtre. Nos bobines sont trouvées dans les tiroirs du laboratoire ou sont fabriquées à la main, avec du fil issu de vieilles bobines du lycée ou des fils électriques de l'atelier.

Avec le montage du paragraphe précédent centré à 42 kHz, nous utilisons un signal triangulaire, puis créneau et enfin par impulsion, obtenu en modifiant la forme d'un signal créneau en augmentant la durée pendant laquelle la tension est à sa valeur minimale. Aucune amélioration des performances n'est constatée. La distance maximale de détection reste à 14 cm pour le signal triangulaire, et diminue à 12 cm pour le signal créneau. Donc

La forme du signal a peu d'influence sur la qualité de la détection



Modifions la valeur de la résistance R du filtre à 42 kHz, pour un niveau constant du signal d'entrée, réglé sur la fréquence centrale du filtre : $U_{\text{entréefiltremax}} = 4,2 \text{ V}$

$$U_{\text{sortiefiltremax}} = 3,6 \text{ V si } R = 22 \text{ k}\Omega$$

$$U_{\text{sortiefiltremax}} = 7,9 \text{ V si } R = 10 \text{ k}\Omega$$

$U_{\text{sortiefiltre max}} > 10 \text{ V}$ (non mesurable sur Latispro) si $R < 8 \text{ k}\Omega$

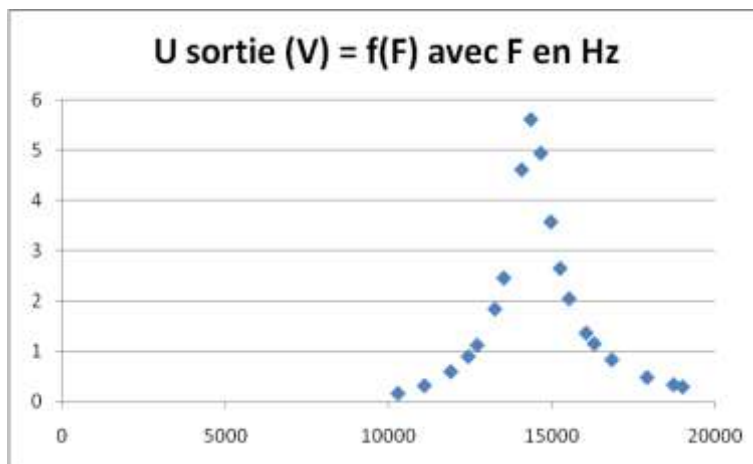
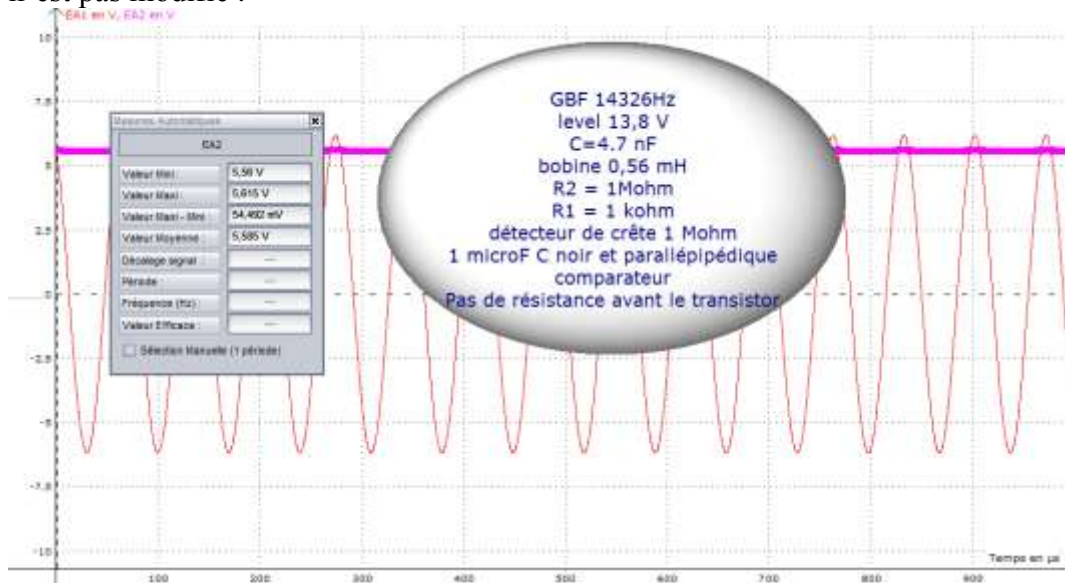
Dans certaines limites, si R diminue, $U_{\text{sortiefiltremax}}$ augmente, ce qui facilite les réglages pour la détection. Cependant la distance maximale de détection n'est pas

améliorée.

Les résultats sont décevants avec notre bobine enroulée sur une boîte de Camembert, ronde de diamètre 10,7 cm. Le filtre est centré sur 85800 Hz et la variation de $U_{\text{détecteur de crête}}$ n'est que de 0,5V lorsque d varie de 100 mm à 0. Le système n'a plus aucune sensibilité lorsque la fréquence du filtre est à 106300 Hz. Nous concluons donc que :

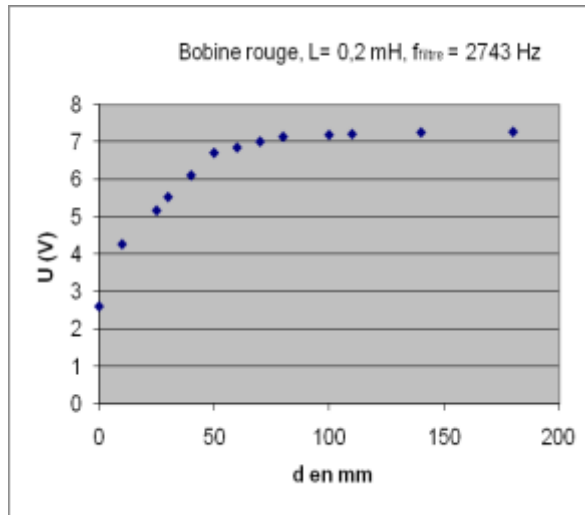
Une fréquence centrale du filtre élevée n'est pas favorable à une bonne détection.

Nous faisons un nouvel essai, avec une bobine ronde de 0,56 mH et 3 cm de diamètre et $R = 1\text{k}\Omega$. Les dimensions de la bobine sont comparables à celle de la bobine jaune de 3 mH de l'oscillateur à 42 kHz. Le filtre est centré sur 14326 Hz. Le reste du montage précédent n'est pas modifié :



L'amplitude des variations de $U_{\text{détecteur de crête}}$ est importante, mais la distance maximale de détection ne dépasse pas 10 cm.

Avec un filtre centré sur une fréquence encore plus basse, 2743 Hz, la distance maximale de détection n'est que de 4 cm.



Une fréquence centrale du filtre basse n'est pas favorable à une bonne détection.

Une fréquence centrale du filtre proche de 40 kHz semble être un bon choix.

Forme de la bobine

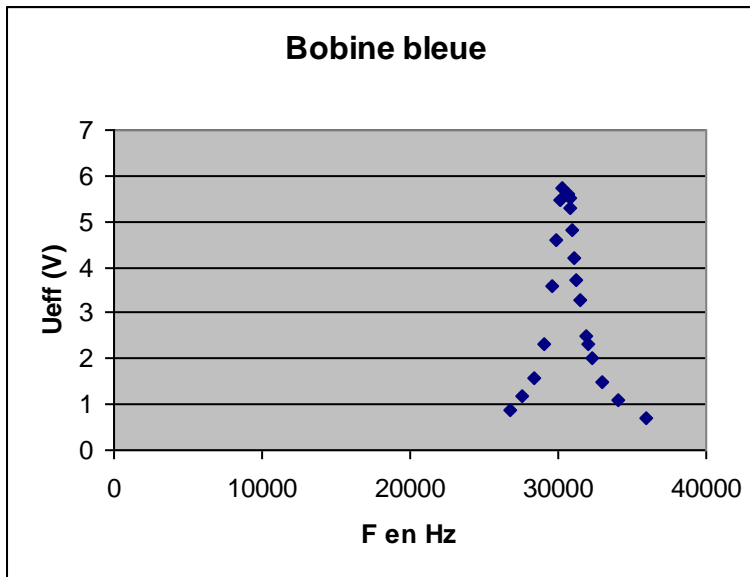
Nous avons testé d'autres bobines :

- Longue bobine sur support bois, 22 cm de long et 3 cm de diamètre. Ne détecte que le métal placé à l'intérieur de la bobine, mais pas à l'extérieur. Fréquence du filtre 84600 Hz avec $C = 4,7 \text{ nF}$ et $R = 22 \text{ k}\Omega$. Amplitude des signaux importante. Ils sont utilisables, mais la bobine ne détecte rien. Si on change $C = 220 \text{ nF}$, aucun résultat, résonance vers 11000 Hz, avec signal de sortie du détecteur de crête nul. Ces résultats sont cohérents car seul le champ magnétique créé à l'extérieur de la bobine sert pour la détection.



- Enroulement de fil électrique vert jaune. Détecte correctement la grosse masse métallique d'un support de potence, à 23600 Hz (10 cm). $R = 470 \text{ }\Omega$ et $c = 220 \text{ nF}$.
- Bobine bleu de plus petit diamètre, pas de meilleures performances. Détecte correctement le métal à travers une table de 3 cm (bois + carrelage). $F = 30766 \text{ Hz}$. Distance maximale de détection dans l'air 7 cm.





Bande passante à - 3dB de la bobine bleue = 1,5 kHz. La bande passante est plus faible que pour le filtre centré à 42 kHz, mais la distance maximale de détection est moins grande.

Bobine	géométrie	dimensions	L (mH)	C (nF)	F(Hz)	bande passante - 3dB (kHz)	R (kΩ)	Distance maximale de détection en cm
jaune	rectangulaire	2,2 cm sur 2,6 cm	3	4,7	42148	2	22	14
bleue	ronde	110 mm (0,4 kg)	0,125	220	30304	1,5	0,47	7
rouge	ronde	230 mm	0,15	220	27473	/	0,47	11
verte et jaune	ronde	230 mm	0,2	220	23648	/	0,47	10
support bois	cylindrique	250 mm 30 mm	0,75	4,7	84600	/	22	0
boîte de camembert	ronde	107 mm	0,02	220	85800	/		4
bobineTACA	ronde	130mm	1	4,7	71760	/	10	14
bobineTACA	ronde	130 mm	1	220	10600	/	10	2
Bobine TACA	ronde	130 mm	1	47	23000	/	10	7

Les enroulements de couleur bleu, rouge ou verte et jaune sont inutilisables pour notre détecteur car le tracto-pelle ne peut les porter. Ce fil électrique est trop lourd. La pelle ne peut soulever plus de 150 g.

La bobine « boîte de camembert » est obtenue grâce à un enroulement de 20 tours de fils fin d'une vieille bobine de 16000 spires enroulées sur un support bois.

La bobine TACA est obtenue grâce à un support circulaire de mobile à coussin d'air. Nous avons utilisé les derniers mètres de fils que nous possédions pour la fabriquer. Les résultats sont satisfaisants, surtout lorsqu'elle est en mouvement dans le tracto-pelle, où elle donne des résultats parfois meilleur que la bobine jaune. Dans son cas les meilleurs résultats sont avec un filtre centré sur 71, 760 kHz.

Un fil trop fin donne une inductance trop faible et un fil trop gros est trop lourd pour notre modèle réduit. La bobine jaune nous semble donc un bon compromis pour notre détecteur. Une bobine de même masse, même inductance, mais de plus grand diamètre donnerait peut-être de meilleurs résultats. Sur les sites d'utilisateurs de détecteurs de métaux, nous avons trouvé que plus la bobine a de petites dimensions, moins la profondeur de détection est grande.

Signalons pour finir que nous avons aussi testé des associations de bobines, une seule servant à la détection. Lorsque nous avons deux bobines d'inductance L_1 et L_2 mises en série, elles sont équivalentes à une bobine d'inductance équivalente $Leq=L_1 + L_2$. Lorsque nous

avons deux bobines d'inductance L_1 et L_2 mises en parallèle, elles sont équivalentes à un bobine d'inductance équivalente Leq telle que $1/Leq=1/L_1+1/L_2$. Ces expériences supplémentaires n'ont pas apportées d'amélioration des performances.

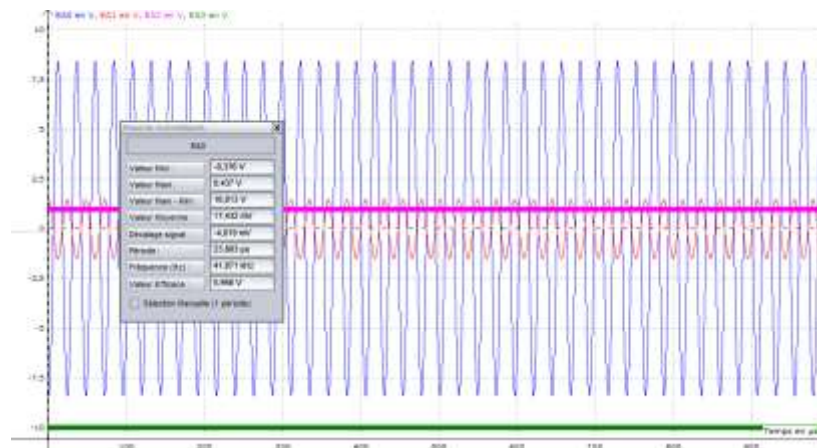
2.4- Les dispositifs d'alerte et d'arrêt

Nous nous sommes inspirés de la chaîne de régulation thermique de l'inspecteur de sciences physiques, M.Moreaux², qui a été longtemps utilisée dans notre lycée, et dont la maquette a été fabriquée dans un autre lycée agenais, le lycée J.B de Baudre. Dans cette chaîne électronique, un transistor de puissance permet de déclencher ou d'arrêter le chauffage dans une enceinte fermée. Il est commandé par le signal de sortie d'un amplificateur opérationnel fonctionnant en comparateur. Nous avons essayé le même système pour arrêter ou lancer le moteur de notre robot.

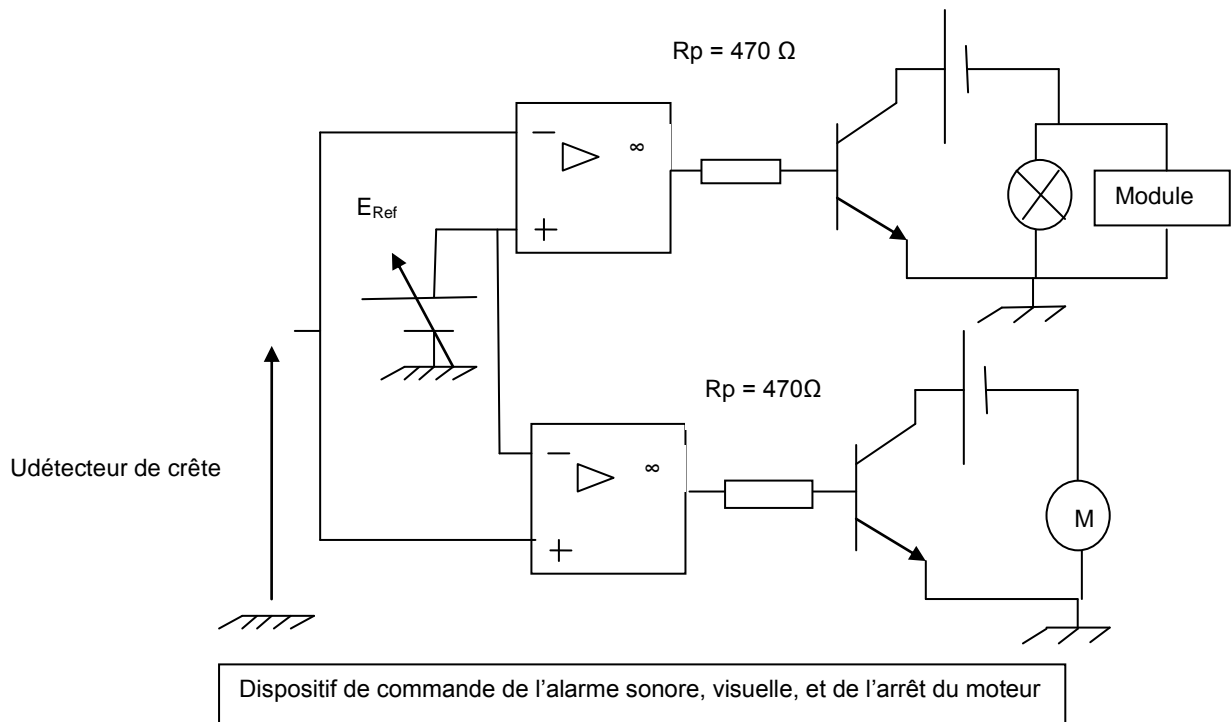
A la sortie du détecteur de crête, nous disposons d'une tension continue, qui diminue en présence d'un métal. Cette tension est envoyée sur l'une des entrées d'un amplificateur opérationnel, monté en comparateur. Sur l'autre entrée de l'amplificateur opérationnel est envoyée une tension continue de référence E_{ref} . Sa valeur est légèrement inférieure à $U_{détecteur}$ de crête en l'absence de métal.

Avec un montage comparateur à amplificateur opérationnel, si sur l'entrée – la tension est plus faible que sur l'entrée +, alors la tension de sortie vaut $+V_{sat}$, sinon $-V_{sat}$. Nous pouvons donc avec deux comparateurs piloter l'arrêt du moteur, et le déclenchement du buzzer ou de la lampe.

La carte d'acquisition étant limitée à $\pm 10V$, la tension n'est pas mesurable sur le logiciel Latispro. On observe sur le logiciel le basculement d'une tension de $+10V$ à $-10V$. Elle est en fait de $\pm 12V$, si on la mesure au voltmètre. Mais cette limite n'est pas importante dans notre cas. Le logiciel suffit pour voir basculer la tension du comparateur, même si la valeur indiquée est fautive.



² Cours de D. Gauthier, Lycée B.Palissy Agen, Seconde MPI / Association de quadripôles, chaîne électronique

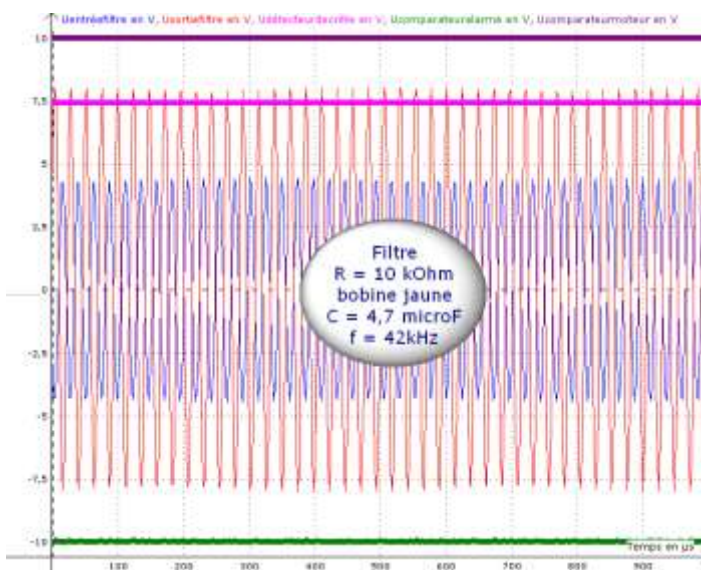


Pour notre maquette, le moteur et son alimentation sont ceux de la voiture télécommandée, et sont donc embarqués. La bobine est également portée par le robot. Nous n'avons que 4 longs fils entre robot et montage électronique. La voiture est télécommandée et s'arrête automatiquement quand un métal est détecté. Le buzzer se déclenche ou la lumière s'allume.

Les dispositifs d'alerte que nous avons testés, avec un transistor BD 139 ou 2N 3055 S7638, et une résistance de protection R_p de 470Ω sont :

- Un module musical alimenté en 5 V
- Une lampe 6V 100 mA
- Un buzzer

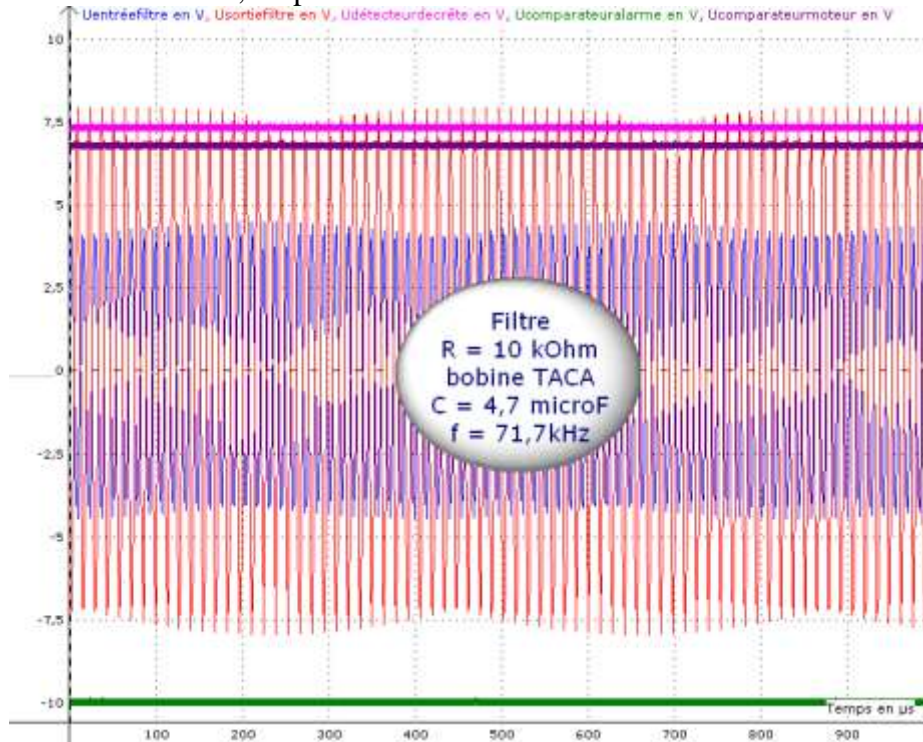
Le module musical produit un son faible s'il est seul et un amplificateur est nécessaire. Nos essais avec des buzzers n'ont pas été concluants. La lampe et le module musical peuvent fonctionner en même temps.



Sur l'acquisition ci-contre, nous voyons l'état différent des deux comparateurs : lorsque l'un est à $+V_{sat}$, l'autre est à $-V_{sat}$. Ainsi le moteur peut s'arrêter quand l'alerte se déclenche.

Nous avons eu des problèmes de masse pour le circuit d'arrêt du moteur. En effet si le circuit l'alimentation du moteur n'est pas relié à la masse, le tractopelle ne s'arrête jamais. Par contre, quand la masse est connectée, le moteur tourne un peu moins vite, mais s'arrête en présence de métal. La résistance de protection vaut 470Ω . Si elle est plus grande le

moteur tourne moins vite, ou pas du tout.



Avec la bobine de 13 cm de diamètre TACA (matériel de Table à Coussin d'Air), le filtre est à 71,7 kHz, et le signal de sortie du comparateur pilotant le moteur diminue lorsque le moteur fonctionne jusqu'à 7V. Nous sommes aux limites de l'utilisation de cet amplificateur opérationnel.

Nous avons connu un échec en essayant d'alimenter la voiture avec un générateur indépendant, pour éviter d'avoir à recharger fréquemment les accumulateurs pendant nos essais. Le système que nous avons installé ne fonctionne pas. En effet, le générateur n'est pas assez puissant pour alimenter convenablement la voiture électrique qui doit servir de support au détecteur de métaux. Même deux générateurs en parallèle pouvant fournir chacun 2 A ne permettent que de la faire avancer au ralenti. L'intensité demandée par le moteur est très importante, supérieure à 4 A pour avancer à vitesse normale, sous une tension de 18V. Nous pensons à utiliser une batterie de voiture, mais cela n'est pas pratique. Nous devons donc envisager une autre solution pour régler le problème de l'alimentation, et utiliser les accumulateurs, que nous devons souvent recharger.

Il n'est pas courant, au laboratoire du lycée Palissy, d'avoir à commander un moteur nécessitant plus de 4A pour fonctionner. Notre professeur ne l'avait jamais fait. Nous avons alors rencontré des difficultés pour réaliser cette commande. Plusieurs transistors ne fonctionnaient pas correctement et ne permettaient pas de lancer le moteur. En effet, le courant devant traverser le moteur doit être important (plusieurs ampères) et il est proportionnel au courant de base. Le transistor 2N 3055 S7638, provenant de la chaîne de régulation thermique de M. Moreaux convient pour arrêter le moteur. Une résistance de protection de 470 Ω est placée entre l'AO et le transistor. Par contre, pour le déclenchement du buzzer, n'importe lequel des transistors trouvés au laboratoire fonctionne. L'intensité mise en jeu est beaucoup plus faible.

Signalons qu'avant de trouver le bon transistor pour arrêter le moteur, nous avons aussi essayé avec un relais d'automobile. Ces relais permettent de faire la transition entre un courant faible et un courant fort. L'intensité nécessaire pour obtenir la fermeture du relais est plus faible (0.1 A), mais que la tension soit positive ou négative, le relais se ferme si l'intensité du courant est suffisante. Un relais "standard" est constitué d'une bobine ou

solénoïde qui lorsqu'elle est sous tension attire par un phénomène électromagnétique une armature ferromagnétique qui déplace des contacts. Mais après avoir trouvé un transistor satisfaisant, nous avons abandonné la piste du relais, parce que ses connections n'étaient pas adaptées à nos plaquettes, et que les fils que nous y avons soudés tenaient mal.

2.5- Le robot en fonctionnement

Voici une photo de notre montage complet et opérationnel ! Vous pouvez y voir :

- Le générateur de signaux en entrée du filtre.
- Le générateur continue alimentant les amplificateurs opérationnels et fournissant la tension de référence pour la comparaison.
- Les quatre plaques de câblage, une pour le filtre, une pour le détecteur de crête, une pour chaque montage comparateur, transistor et circuit d'alerte ou de coupure du moteur.
- Le tractopelle télécommandé portant la bobine de détection, et relié au montage électronique par 4 longs fils.
- Les mains de Bastien portant la télécommande
- Le socle d'une potence modélisant la mine à détecter.
- L'écran de l'ordinateur et le boîtier d'acquisition SYSAM-SP5, permettant de suivre l'évolution de toutes les tensions du système en fonctionnement, grâce à Latispro.



Le montage fonctionne, mais avec le mouvement du véhicule, la distance maximale de détection d'une mine est faible, moins de 5cm.

Notre professeur vient de commander de nouveaux composants et une plaquette d'essais de montage électronique, pour que nous puissions essayer de faire un circuit avec moins de fils, qui préparera la réalisation d'un circuit imprimé. Nous espérons que tout cela sera prêt pour les épreuves régionales. Nos premiers tests avec la plaquette d'essai, le 21 septembre 2010, ne sont pas concluants. Les AO ne marchent pas. Nous n'avons pas acheté

de supports pour les AO, c'est peut-être ce qui nous manque pour assurer de bonnes connexions. Nous pensons souder les AO TL 81 pour améliorer les contacts.

Les AO

Nous avons aussi pensé rendre notre détecteur autonome, c'est-à-dire supprimer le générateur de signaux et l'alimentation continue, et n'utiliser que la batterie du tractopelle. Cela n'a d'intérêt que si nous réalisons un circuit imprimé. Cependant réaliser une alimentation symétrique et un oscillateur est difficile et nous ne pourrons pas le faire avant le concours régional. Il faut également un montage diviseur de tension pour créer la tension de référence des comparateurs E_{ref} , grâce à une résistance réglable. Nous travaillons pour l'instant à préparer notre présentation orale.

Conclusion

Notre robot fonctionne enfin. Il détecte, il signale et il s'arrête seul. Puis nous nous demandons, peut-être un peu tard, si notre système est bien un robot. Selon le dictionnaire encyclopédique illustré Larousse, un robot est « *un appareil automatique capable d'effectuer des opérations selon un programme fixe ou modifiable : Utiliser un robot pour des opérations de déminage* ». Notre véhicule s'arrête sans intervention humaine, et signale la présence du métal : c'est bien un robot !

Notre travail a beaucoup de limites car nous avons très peu de connaissances en électronique, puisque jamais elle ne nous a été enseignée ! Malgré cela, nous avons réussi à fabriquer, entre les mois de mars et de novembre 2010, un détecteur opérationnel. Résumons son fonctionnement :

- Le filtre passe bande, dont la fréquence centrale varie en présence de métal sert de capteur.
- Le détecteur de crête converti le signal sinusoïdal du filtre en tension continue.
- Cette tension continue a une valeur qui baisse en présence de métal, qu'il soit ferreux ou non-ferreux.
- Un comparateur à amplificateur opérationnel bascule de + V_{sat} à - V_{sat} lorsque la tension de sortie du détecteur de crête diminue, et un second comparateur bascule de - V_{sat} à + V_{sat} .
- Un transistor, utilisé comme interrupteur, se bloque pour arrêter le moteur du tractopelle, et un second transistor devient passant pour déclencher le signal sonore ou l'éclairage d'alerte.

Si nous pouvons continuer notre travail, nous essayerons de fabriquer un circuit imprimé pour rendre notre système plus facile à utiliser.

Cette aventure a été passionnante pour nous, car elle est notre seul et unique contact avec l'électronique au lycée. Nous avons beaucoup expérimenté, surtout pendant la fin de l'année de 1^{ère} S. Nous avons détruit quelques composants et fait chauffer des alimentations continues en les branchant sur notre moteur. Nous n'avons pas abordé la théorie de nos montages électriques, mais nous avons compris leur fonctionnement et leur réglage en faisant des essais. Modifier la valeur d'un composant et observer son effet sur une tension étudiée, après accord de notre professeur : voilà notre méthode de travail.

Nous avons eu un peu l'impression d'être des chercheurs dans un labo, qui essayent, qui se trompent, puis qui trouvent la bonne solution, même si nous n'avons rien découvert de nouveau !

Bibliographie et Netographie :

[1] Détection & Détecteur de métaux

<http://www.la-detection.com/detecteur.htm>

[2] **Détecteur.net : guide de la prospection au détecteur de métaux.**

<http://www.detecteur.net/montages/montages.php>

[3] **Site réalisé par 3 étudiants de l'IUT GEI13 de l'Isle d'Abeau**

<http://detecteurdemetaux.free.fr/>

[4] **Electronique-Pratique** (juillet août 1994) : Schéma d'un détecteur de métaux ainsi que différentes explications sur le principe des détecteurs de métaux.

[5] **les détecteurs de métaux** (Lionel MERLAT)

http://www.artid.org/Fr/documentation_deminage/detecteursmetal.html

[6]

<http://d.nardi.free.fr/metaux.htm>