



UCLouvain

PROJET 2 - LEPL1502

MARS 2023 - S8

ECOLE POLYTECHNIQUE DE LOUVAIN

Rapport Intermédiaire

Élèves :

Adrien WANGEN

Ismaël ZAOUDI

Ioannis CHRISSANTAKIS

Louis CAYPHAS

Tristan DESNEUX

Théo VAN DEN BOSSCHELLE

Enseignants :

Claude OESTGES

David BOL

Jérôme LOUVEAUX

Mars 2023

Table des matières

1	Introduction	2
1.1	Contexte de création du projet	2
1.2	Présentation de l'application	2
2	Fonctionnement des différents blocs du circuit	4
2.1	Bloc 1 (générateur de signaux)	4
2.1.1	analyse du bloc	4
2.1.2	graphique	6
2.2	Bloc 2 (Déecteur de métal)	7
2.2.1	Analyse du bloc	7
2.2.2	graphique	9
2.3	Bloc 3 (Déecteur de crêtes)	10
2.3.1	Analyse du bloc	10
2.3.2	graphique	11
2.4	Bloc 4 (soustracteur)	12
2.4.1	Analyse du bloc	12
2.4.2	graphique	13
2.5	Bloc 5 (Signaleur)	14
2.5.1	Analyse du bloc	14
2.5.2	graphique	15
2.6	Circuit entier	16
3	Conclusion	18
3.1	Problèmes à résoudre et pistes de solutions	18
3.2	Perspectives futures	20

1 Introduction

1.1 Contexte de création du projet

Dans le cadre du Projet 2, l'EPL nous a demandé de concevoir un détecteur de métaux. Celui-ci doit avoir une application utile dans la vie quotidienne. Cette application peut être intégrée dans plusieurs secteurs tant pour de simple tâche ménagères, que des outils utiles dans l'industrie ou encore de simples jeux. Cette dernière option est celle que nous avons choisie.

Durant les 8 premières semaines de ce quadrimestre, nous avons analysé grâce à des séances de laboratoire les différents blocs du détecteur de métaux. Nous avons d'abord analysé la fonctionnement de chacun de ces blocs indépendamment, avant de les associer pour former le détecteur de métaux. Nous avons entre autres regardé les différents types de signaux que l'on avait en sortie de chaque bloc et analysé l'influence de certains paramètres (résistance, capacité, inductance) sur les signaux.

1.2 Présentation de l'application

C'est dans un des jeux les plus connus, les plus joués et les plus compétitifs que nous avons décidé d'intégrer notre détecteur de métaux : le jeu d'échecs.



FIGURE 1 – Timer d'échecs

Avant d'expliquer précisément l'application de notre dispositif, nous allons rappeler certaines notions importantes des échecs.

Lors d'une partie d'échecs, un temps de réflexion limité est alloué à chacun des deux joueurs. On utilise donc une "pendule d'échecs" afin de décompter ce temps et si, à la fin de la partie, le temps d'un des deux joueurs s'est

totalelement écoulé sans qu'il y ait d'échecs et mat, ce joueur perd.

De plus, étant donné qu'il y a des règles concernant les déplacements des pièces, il y a des coups qui sont interdits, c'est ce qu'on appelle des coups illégaux.

Les joueurs perdent donc un précieux temps, à chaque coup, pour appuyer sur le timer. Cela peut occasionner une gêne lorsqu'ils commencent à manquer de temps parce qu'ils doivent à chaque fois appuyer le plus vite possible pour limiter le temps perdu.

Le but de notre application est donc de recréer une pendule d'échecs qui n'occasionnerait pas de perte de temps inutile dans le partie. Cette pendule serait donc automatique et ne nécessiterait donc pas d'action de la part du joueur pour entamer le décompte de l'adversaire. Le "switch" du pendule se ferait donc à chaque déplacement d'une pièce sur l'échiquier.

D'un point de vue plus pratique, il s'agira donc de détecter pour chaque case de l'échiquier si une pièce est présente dessus. Ensuite, nous itérons sur toutes les cases avec un arduino ou un micro-contrôleur pour obtenir un état général de l'échiquier.

Nous pouvons comparer cet état avec un état précédent stocké en mémoire. Ceci nous permettrait de détecter le mouvement d'une pièce sur l'échiquier. On pourrait aussi imaginer une application plus poussée qui détecterait les mouvements illégaux.

À partir de cette description du problème, nous avons identifié trois éléments critiques :

- **Distance de détection** : Notre système doit être suffisamment sensible pour détecter une pièce à travers l'échiquier mais pas trop sensible pour éviter de détecter les pièces présentes sur les cases adjacentes.
- **Vitesse de détection** : Puisque nous utilisons un processus itératif qui travaille une case à la fois, le signal de détection doit se stabiliser suffisamment vite pour nous permettre de parcourir tout l'échiquier rapidement et ne rater aucun mouvement de pièce.
- **Tolérance par rapport aux variations d'inductance** : Pour couvrir l'ensemble de l'échiquier, nous aurons besoin de plus d'une bobine. Même si ces bobines seront similaires, elles n'auront pas toutes exactement la même inductance. Il nous faut donc un système capable s'adapter à ces variations d'inductance sans perdre en précision de détection de métal.

2 Fonctionnement des différents blocs du circuit

2.1 Bloc 1 (générateur de signaux)

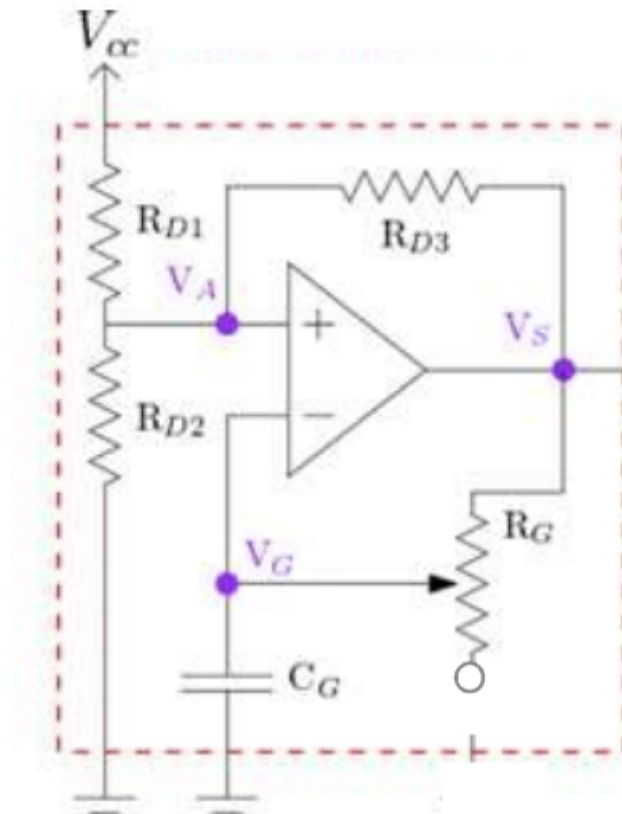


FIGURE 2 – oscillateur

Ce premier bloc a pour rôle de générer un signal carré de voltage égal, soit à V_{CC} , soit à 0 Volt ; et qui sera utilisé par les prochains blocs du circuit.

2.1.1 analyse du bloc

Le circuit est divisé en 2 parties. En effet, nous constatons que ce bloc oscillateur comporte un amplificateur opérationnel avec une rétroaction positive. Cela signifie donc que la tension de sortie V_S sera soit de 5 Volts (tension de V_{CC}) , ou soit de 0 Volt (tension de V_{SS}).. D'abord, La première partie se déroule lorsque la capacité est en train de se charger. A ce moment là, V_S vaut 5 Volts. Cette partie se déroule lorsque V_G est inférieur à V_A . Nous pouvons la caractériser par les équations suivantes :

$$V_A = \frac{2V_{CC}}{3} \quad (1)$$

$$V_G = V_{CC} \left(1 - \frac{2e^{\frac{-t}{RC}}}{3}\right) \quad (2)$$

Ensuite vient donc la phase où V_S vaut 0 Volt. La capacité est donc en train de se décharger ; et cette partie se déroulera tant que V_G sera supérieur à V_A . Ces deux tensions sont caractérisées par les équations suivantes :

$$V_A = \frac{V_{CC}}{3} \quad (3)$$

$$V_G = \frac{2V_{CC}e^{\frac{-t}{RC}}}{3} \quad (4)$$

où, dans ces formules, C correspond à la valeur du condensateur, R correspond à la valeur de la résistance R_G et $R_{D1} = R_{D2} = R_{D3}$. Les graphes de V_s et V_g en fonction du temps sont illustrés ci-dessous grâce aux mesures prises au laboratoire.

Ensuite, nous avons remarqué qu'obtenir une fréquence plus grande nous aidera à améliorer la détection des métaux. Nous allons donc calculer cette fréquence à l'aide des formules notées ci-dessus. Comme nous connaissons la valeur de V_{CC} , qui vaut 5 Volts, nous pouvons calculer la valeur de la période qui vaut :

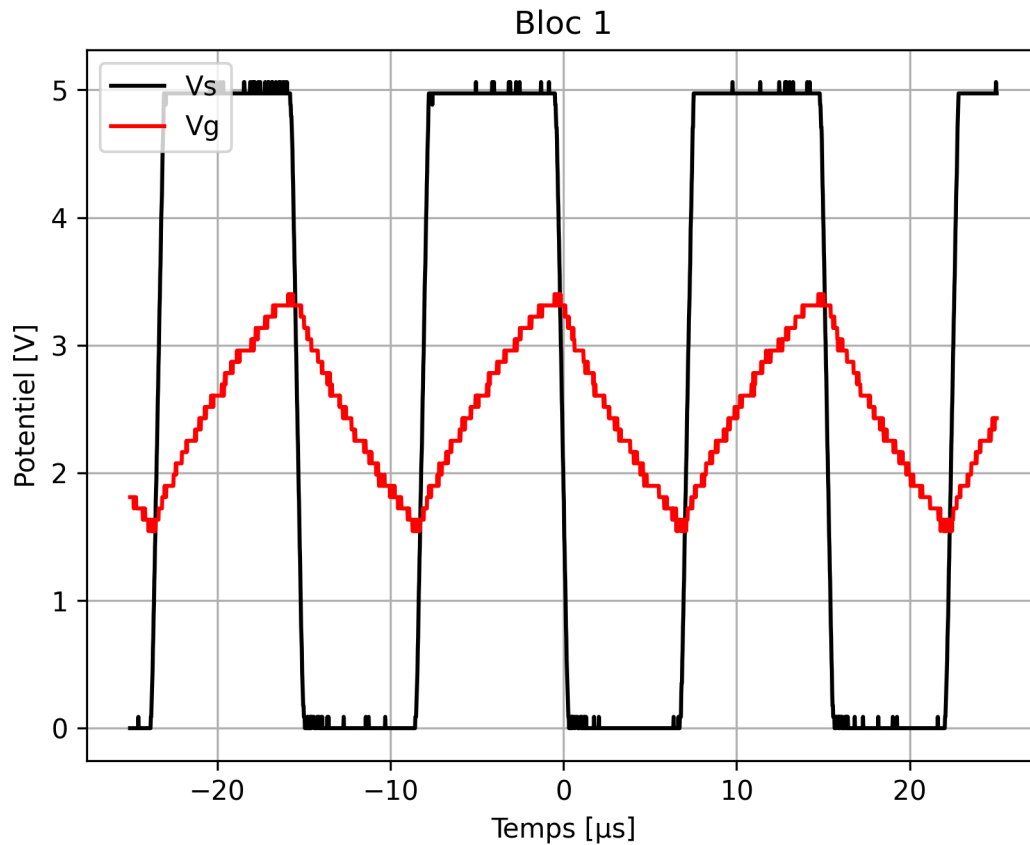
$$T = RC \ln 2 \quad (5)$$

D'où nous pouvons trouver la fréquence :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{RC \ln 2} \quad (6)$$

Nous pouvons donc varier les valeurs R du potentiomètre et C du condensateur pour pouvoir choisir notre fréquence.

2.1.2 graphique



Sur ce graphique, nous pouvons observer que nous obtenons bien un signal carré pour V_S , qui alterne entre 0 et 5 Volts. Nous pouvons également observer que V_G varie en fonction de la charge et de la décharge du condensateur. Lorsque V_S vaut 5 Volts, la capacité se charge et le signal de V_G croît progressivement et inversement lorsque V_S vaut 0 Volt.

2.2 Bloc 2 (Déecteur de métal)

2.2.1 Analyse du bloc

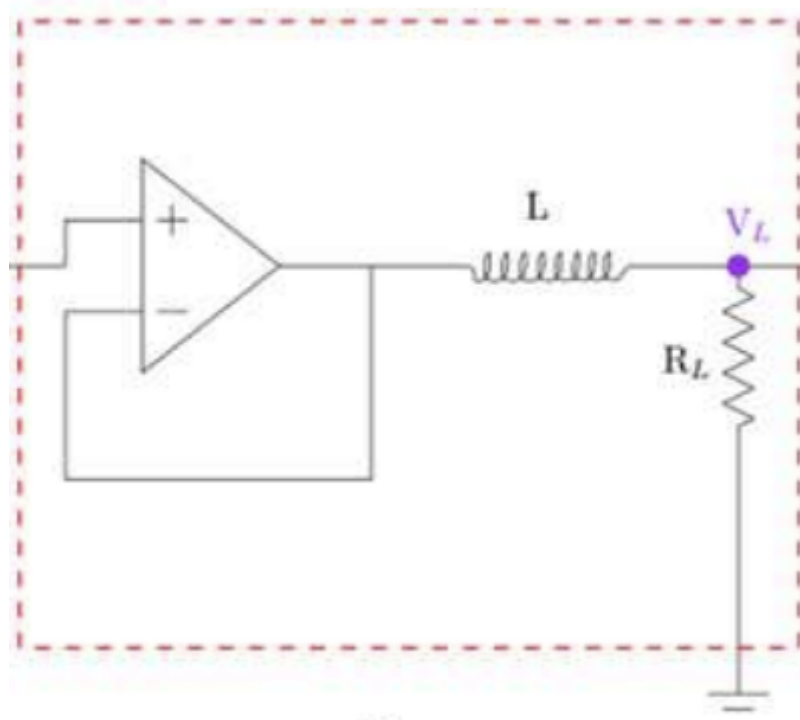


FIGURE 3

Ce bloc est le centre de notre projet, car c'est grâce à lui qu'il nous est possible de détecter un métal. Afin de mieux comprendre ce bloc, nous allons le diviser en deux, le circuit suiveur et le circuit R-L. En premier lieu, le circuit suiveur est utilisé pour copier la tension en sortie du bloc précédent et donc d'empêcher le signal de la suite du bloc de remonter dans le circuit.

La deuxième partie du circuit est le circuit R-L. Sachant que le bloc précédent crée un signal carré, on trouve deux évolutions de notre signal pour une même période. Lorsque le signal d'entrée vaut son maximum, le courant passant dans la bobine augmente, augmentant le champ magnétique formé par la bobine, et donc le flux également. Or, sachant que pour tout évolution du flux une réaction opposée à ce changement est créée, un champ opposé à celui de la bobine est formée. Ce phénomène crée une équation différentielle qui, résolue, donne la solution :

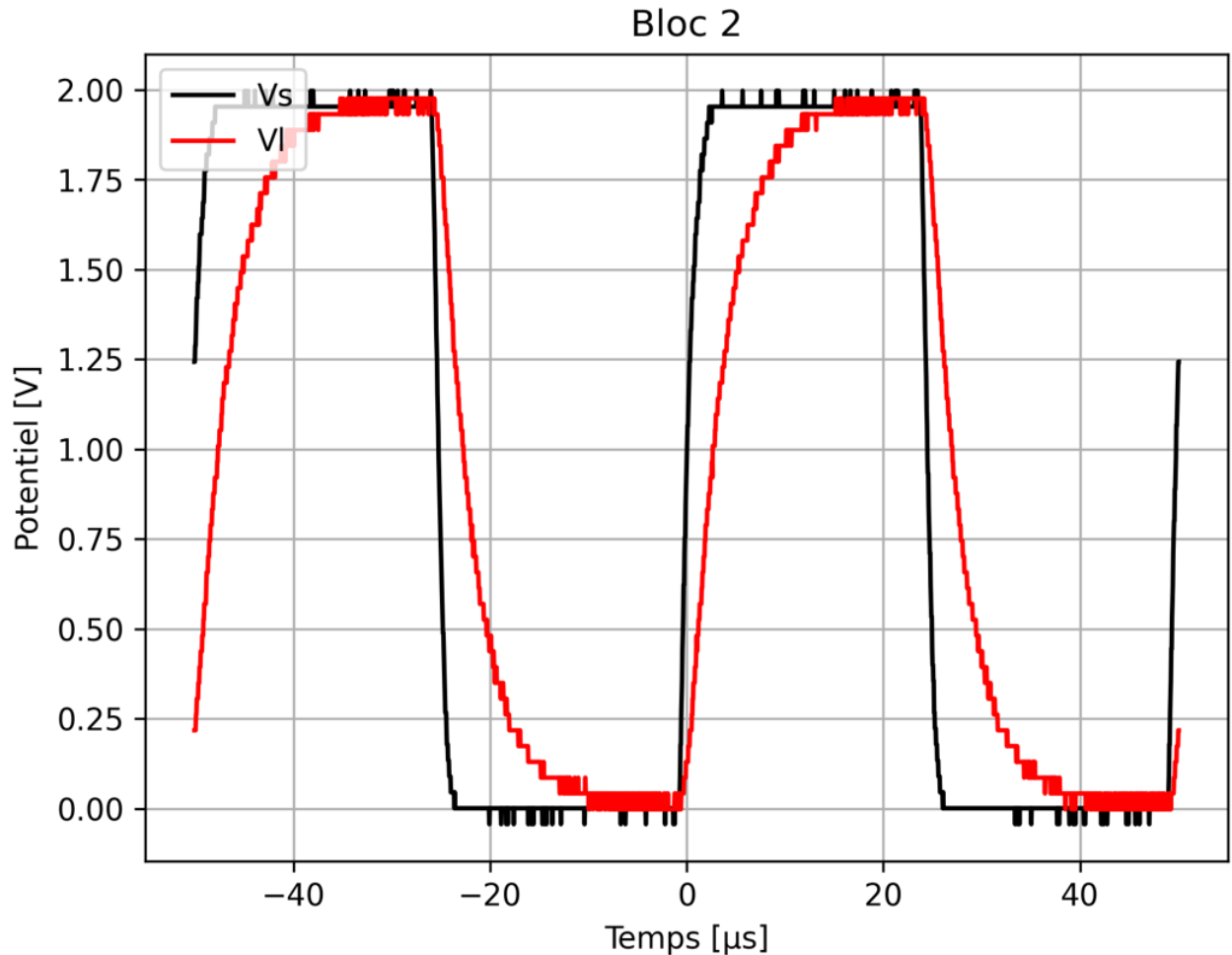
$$V_L(t) = V_S(1 - e^{\frac{(t-t_0)L}{R_L}}) \quad (7)$$

Où V_S est la tension maximale du circuit, R_L est la valeur de la résistance et L celle de l'inductance. Maintenant, si l'entrée dans le circuit est nulle, c'est une réaction opposée qui se produit, le champ magnétique passe brusquement à 0 comme le flux donc. La dérivée du flux étant donc négative, c'est dans le sens du champ magnétique de la bobine que le champ résultant est formé. On retrouve alors une autre équation différentielle dont la solution se représente sous la forme :

$$V_L(t) = V_S e^{\frac{(t-t_0)L}{R_L}} (8)$$

Où comme pour la première équation, V_S est la tension maximale du circuit, R_L est la valeur de la résistance et L celle de l'inductance. Nous avons donc une alternance entre les deux équations avec la première pour $0 \leq t < \frac{T}{2}$ et la deuxième pour $\frac{T}{2} \leq t < T$ où T est la période de l'oscillateur

2.2.2 graphique



Sur ce graphique, on peut observer que le signal de V_S est bien un signal carré oscillant entre 0 et 2 Volts. On observe également que la tension à la sortie de l'inductance (V_L) est en exponentielle croissante lorsque V_S vaut 2 et que lorsque V_L atteint la valeur de V_S , le tension V_S s'inverse et, en réaction, le signal de V_L passe en exponentielle décroissante.

2.3 Bloc 3 (Déecteur de crêtes)

2.3.1 Analyse du bloc

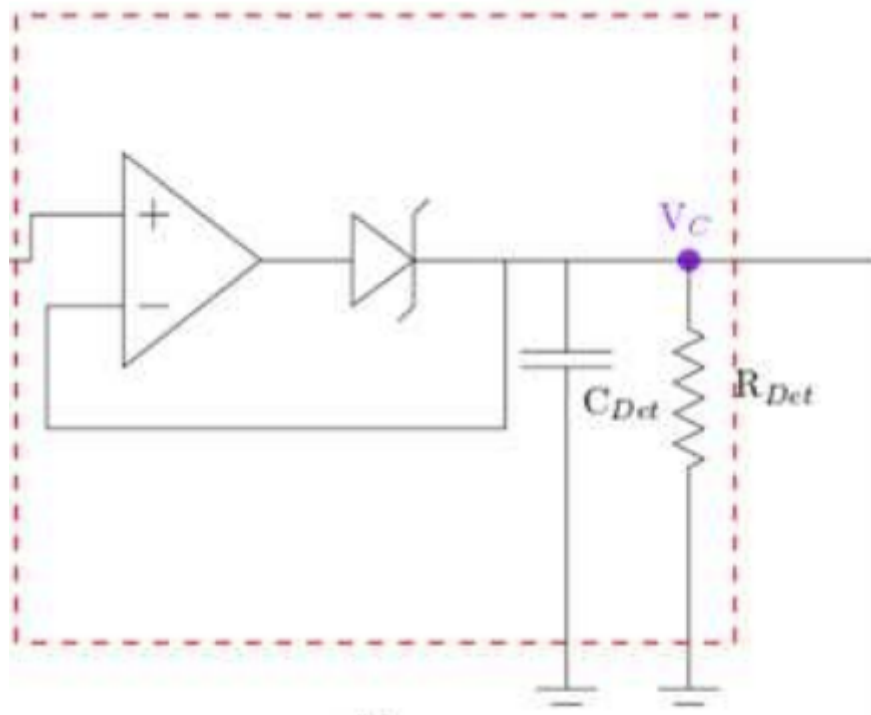


FIGURE 4

Le troisième bloc du circuit est un détecteur de crêtes. Son but est de créer une courbe exponentielle décroissante en départ de la tension maximale afin de ralentir la décroissance du signal.

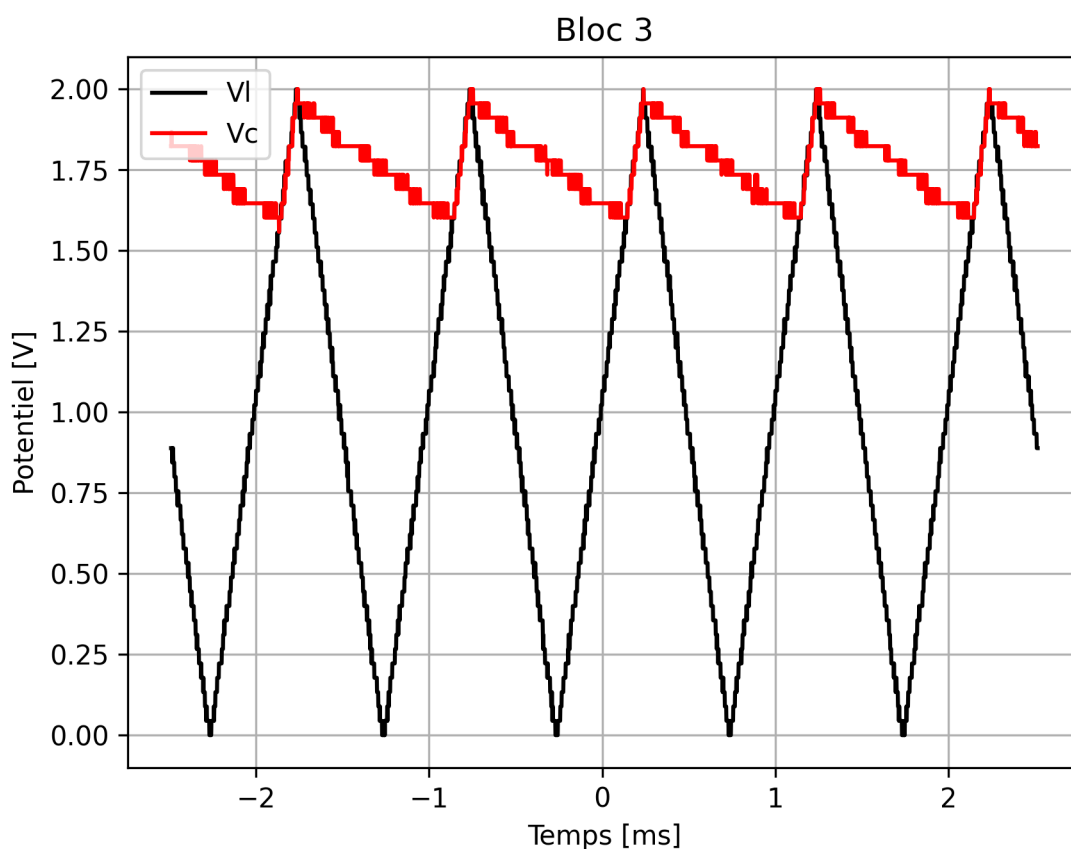
Il est en premier composé d'un circuit suiveur, qui empêche que le signal remonte le circuit. C'est également le rôle de la diode, se trouvant en sortie de l'ampli op, d'empêcher que le signal ne remonte dans l'ampli op.

La deuxième partie du bloc est un circuit R-C qui lorsqu'il reçoit une tension, la conserve afin de la rendre sous la forme d'une exponentielle lorsque la tension du signal passe en dessous de la tension aux bornes de la capacité. Grâce aux équations d'un circuit R-C, on retrouve la formule suivante pour la tension de sortie :

$$V_C = -\frac{A}{R}e^{-\frac{(t-t_0)}{RC}} \quad (9)$$

Où R est la valeur de la résistance, C celle de la capacité, t_0 et A sont respectivement le temps et la tension du dernier maximum le dernier et V_C le signal de sortie du bloc. Or, étant donné que le signal des blocs précédents est oscillant, le circuit R-C va permettre "d'aplatir" le signal, le rapprochant d'un signal constant, plus facile à mesurer pour les blocs suivants.

2.3.2 graphique



Sur ce graphe, on observe que V_C a bien été "aplatie" car on observe aisément que sa courbe de tension suit une exponentielle plus douce que dans le bloc précédant. On observe également que sa tension ne redescend plus jusqu'à zéro.

2.4 Bloc 4 (soustracteur)

2.4.1 Analyse du bloc

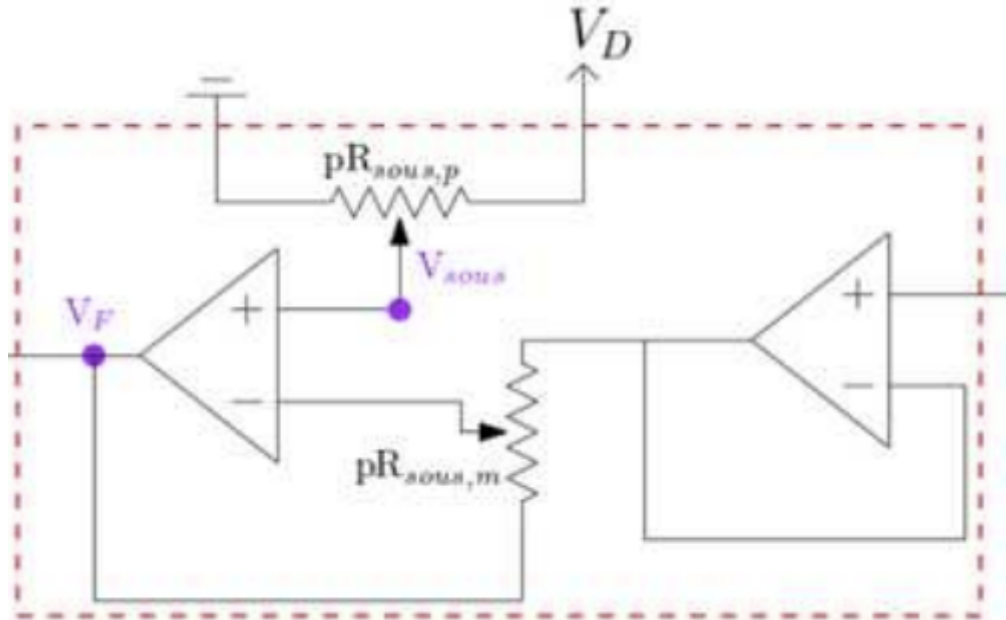


FIGURE 5 – soustracteur

Comme son nom l'indique, ce bloc a pour fonction de diminuer le signal V_{sous} et de renvoyer un signal plus faible. On peut régler l'amplitude du signal qu'il renvoie en modifiant les valeurs des résistances.

Le signal d'entrée reçu par le soustracteur est un signal rendu plat par le bloc précédent. Ce bloc va donc soustraire à V_{sous} la valeur de cette tension V_C . La valeur de V_{sous} varie en fonction de V_D et de la valeur des résistances du potentiomètre liée à V_D . Comme le premier amplificateur opérationnel de ce bloc est utilisé comme suiveur de tension, nous savons que sa tension de sortie est équivalente à sa tension d'entrée (V_C). Nous pouvons donc déterminer V_F avec les équations suivantes :

$$V_F = V_C - pRI = V_C - \frac{(V_C - V_{sous})}{\alpha} \quad (10)$$

$$V_{in-} = V_C - \alpha pRI \quad (11)$$

$$V_{sous} = V_D(1 - \beta) = V_D\left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) \quad (12)$$

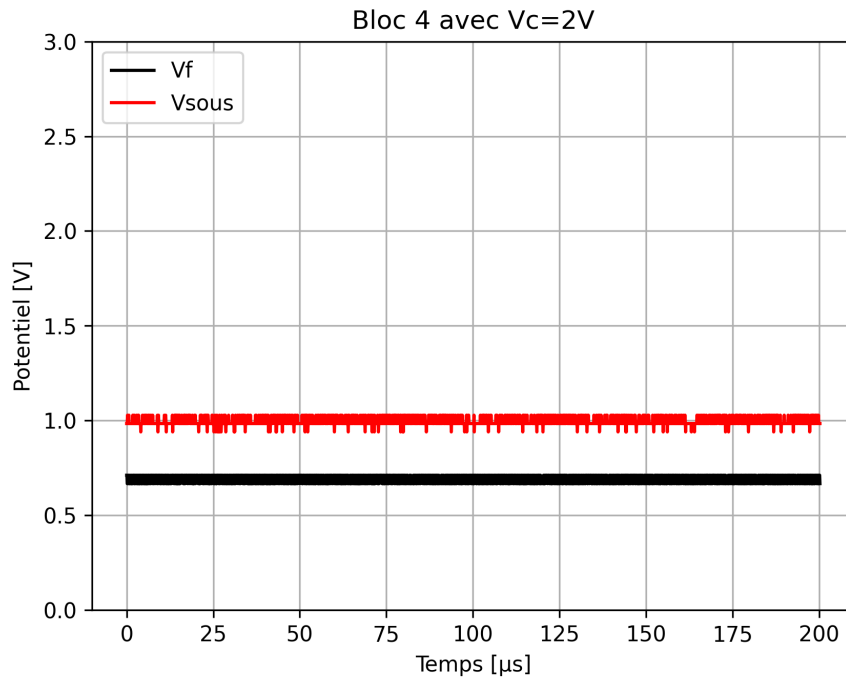
En remplaçant dans la première équation (10) nous obtenons :

$$V_F = \frac{(R_1 + R_2)V_{sous}}{R_1} - \frac{R_2V_C}{R_1} \quad (13)$$

Où α et β sont des constantes comprises entre 0 et 1, pR est la résistance totale du potentiomètre (constituée de R_1 et R_2), du côté de la borne V_{in-} , les résistances R_3 et R_4 sont les deux résistances constituant la résistance totale du potentiomètre du côté de la borne V_{in+} et les tensions évoquées sont celles représentées sur le schéma du bloc.

Lorsqu'il y aura présence d'un métal, la tension d'entrée sera donc supérieure à la valeur de cette tension sans présence de métal. En d'autres mots, S'il y a la présence d'un métal, V_F aura une faible valeur car V_{sous} aura été soustraite par une plus grande tension. Et donc, si il n'y a pas de présence d'un métal, V_F aura une plus grande valeur car V_{sous} aura été soustraite par une plus petite tension.

2.4.2 graphique



Sur ce graphe, on observe bien que la tension de sortie (V_F) est bien inférieure à celle de V_{sous}

2.5 Bloc 5 (Signaleur)

2.5.1 Analyse du bloc

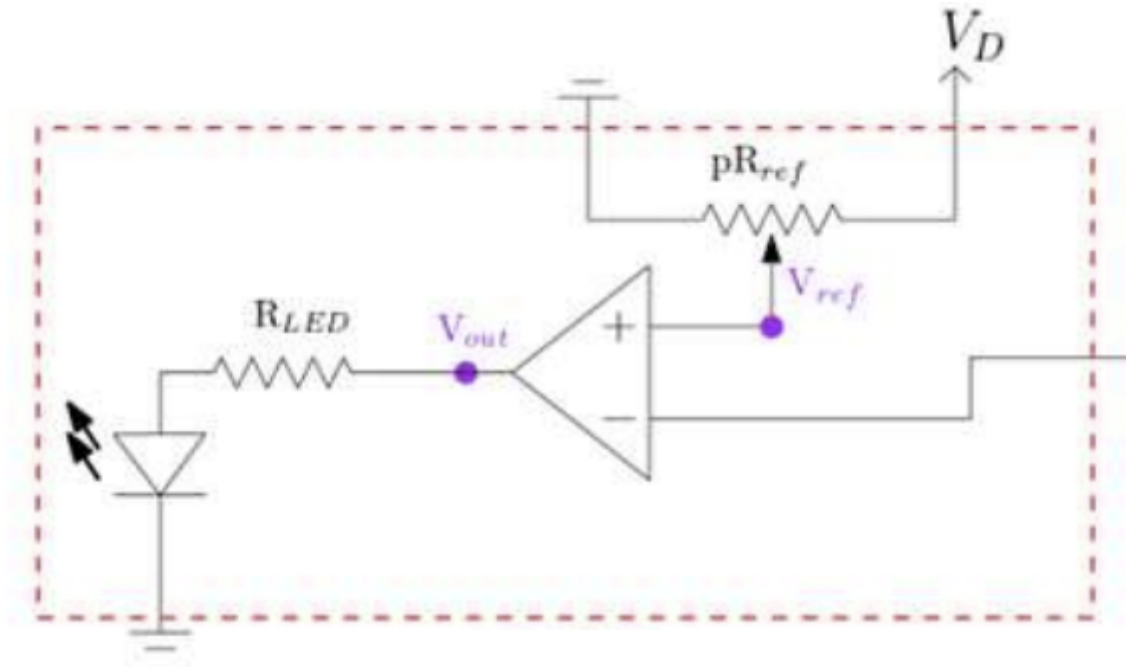


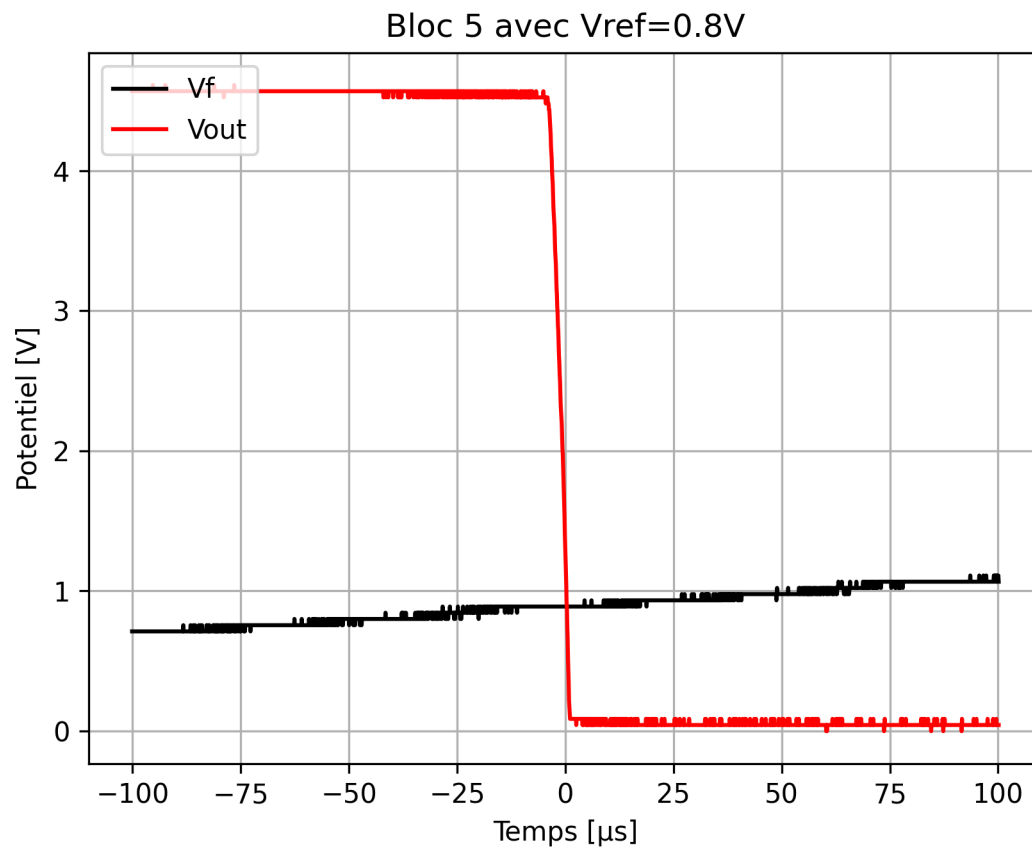
FIGURE 6 – signaleur

Ce bloc du circuit a pour fonction de comparer la tension qu'il reçoit en entrée V_F (tension de sortie du bloc 4) et de la comparer avec une tension de référence qui est prédéfinie. Si la tension reçue en entrée est plus grande que la tension de référence, un signal est envoyée en direction de l'output du circuit (qui peut être une diode ou un mécanisme quelconque) afin d'indiquer par un moyen visuel que la bobine ,présentée dans un bloc précédent, a bien été en présence d'un matériau ferromagnétique ou parramagnétique en fonction de la tension de référence imposée.

Les équations pour calculer les tensions aux bornes de l'ampli op sont similaires à celles utilisées pour le soustracteur :

$$V_{ref} = V_D(1 - \beta) = V_D\left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) \quad (14)$$

2.5.2 graphique



2.6 Circuit entier

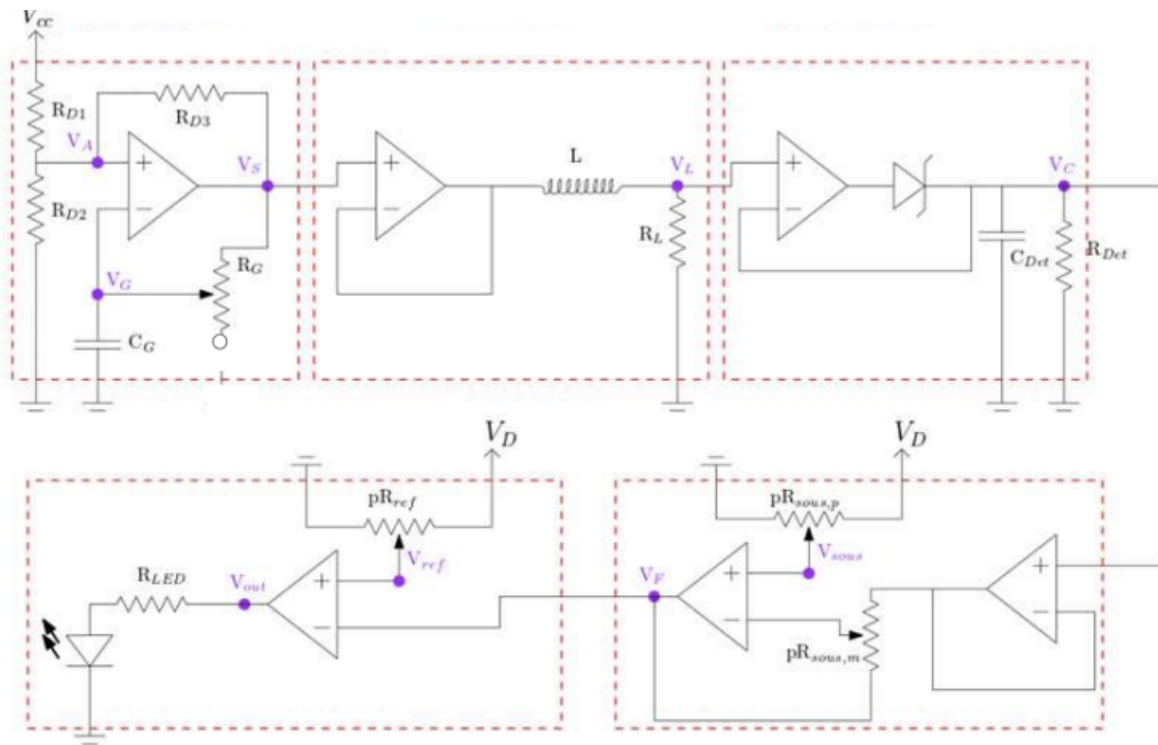


FIGURE 7 – Circuit complet

Le circuit entier correspond donc à l'ensemble de chacun de ces blocs mis ensembles.

Le premier bloc possède donc une tension de sortie V_S qui représente un signal carré de fréquence déterminée. Ensuite, en sortie du bloc 2, la tension de sortie V_L est une exponentielle soit croissante (de la forme $1 - e^{-x}$) lorsque V_S vaut 5 Volts, soit décroissante (de la forme e^{-x}) lorsque V_S vaut 0 Volt. Ensuite, vu que le rôle du bloc 3 est de rendre un signal le moins oscillant possible, la tension de sortie V_C sera donc de la même forme que la tension d'entrée V_L , mais avec une amplitude d'oscillation beaucoup moins élevée. Cependant, lorsqu'il y aura la présence d'un métal, V_L va augmenter et donc V_C aussi. Cela veut donc dire que, lorsqu'il n'y a pas de métal, V_C aura une certaine valeur qui sera inférieure à sa valeur lorsqu'il y aura un métal.

Le bloc 4, quant à lui, aura pour but de diminuer la tension V_{sous} par la tension d'entrée V_C . Cela signifie donc que, lorsque qu'il y aura un métal, la tension de référence V_{sous} sera plus diminuée vu que V_C sera plus élevé que lors de l'absence de métal. V_F sera donc plus faible lorsque il y a détection d'un métal. Enfin vient le bloc 5, qui compare la tension d'entrée V_F avec une tension de référence V_{ref} . C'est en jouant sur cette tension de référence que l'on peut décider si on veut détecter des métaux ferromagnétiques ou non-ferromagnétiques.

Si on veut faire la différence entre les deux métaux, il faudra dédoubler ce dernier bloc et mettre deux seuils, un en dessous de V_f si il n'y a pas de métaux et un aux dessus.

3 Conclusion

En conclusion, comme explicité dans la partie 2.6 *Circuit entier*, ce circuit nous permet de détecter la présence d'un métal à proximité de la bobine. Cette présence se traduit par une variation de V_f : augmentation pour un métal non-ferromagnétique, diminution pour un métal ferromagnétique. Il nous reste donc à adapter ce circuit à notre application : la détection de pièces d'échecs.

3.1 Problèmes à résoudre et pistes de solutions

Pour rappel, nos 3 défis principaux sont : la distance de détection, la vitesse de détection et la tolérance par rapport aux variations d'inductance (1.2 *Présentation de l'application*).

Une autre question s'est posée à nous par rapport au nombre de bobines nécessaires pour couvrir l'ensemble de l'échiquier : Combien de bobines sont nécessaires ? comment adapter le circuit pour travailler avec plusieurs bobines ?

En ce qui concerne le nombre de bobines, nous avons envisagé deux solutions : une bobine par case (64 bobines) ou une bobine par colonne/ligne (16 bobines, voir Figure 8). La deuxième solution paraissait plus attractive du point de vue du nombre de bobines nécessaires et du prix associé à ceci.

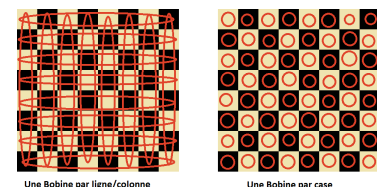


FIGURE 8 – Placement des bobines

Cependant nous avons finalement décidé d'utiliser 64 bobines (une bobine par case) car il serait compliqué de déterminer la présence d'une pièce sur une case avec seulement une bobine sur la colonne/ligne concernée. En effet, les autres pièces présentes sur la colonne/ligne et les autres bobines influenceraient l'inductance de la bobine. Ce choix a cependant ajouté un nouveau problème au système : comment diminuer le prix dû à une utilisation si intensive de bobines ?

Intuitivement, nous avons dès lors compris qu'il fallait diminuer le nombre de tours dans chaque bobine pour ne pas avoir à acheter des mètres de fil de cuivre. Ceci revient donc à diminuer l'inductance des bobines sans perdre en efficacité de détection.

Dès lors nous avons deux solutions qui s'offraient à nous :

1. Utiliser le circuit RL présenté dans la partie 2 en augmentant la fréquence du signal V_s pour compenser les plus petites inductances et détecter la différence entre les pièces blanches et noires en utilisant des métaux différents
2. Utiliser un circuit RLC plus sensible en raison du phénomène de résonance

Après plusieurs expériences au laboratoire, nous avons décidé de faire un circuit RLC pour les raisons suivantes :

1. Le système détecte le métal à une plus grande distance. Sans pour autant détecter en diagonale, ce qui est parfaitement ce que l'on recherche pour notre application.
2. On observe une plus grande variation de potentiel en V_L (de l'ordre de 20% alors que le RL était plutôt autour des 5%). Cette variation de potentiel plus grande permet un système plus permissif au niveau de la variation d'inductance entre nos différentes bobines, ce qui était pour rappel un de nos défis principaux. De plus cette variation peut être rendue encore plus 'agressive' en diminuant la résistance de la bobine (en utilisant par exemple du fil plus large).
3. La fréquence d'oscillation du signal V_s optimale pour notre système (fréquence de résonance) est en général plus basse que la fréquence d'oscillation optimale pour le circuit RL pour une même inductance. Et, même si comme pour le RL cette fréquence augmente lorsque L diminue, ceci nous permet tout de même d'utiliser des inductances plus faibles pour une même fréquence (le générateur de signaux ne peut en pratique pas fournir une très grande), et donc moins de tours dans nos bobines.

Il y a tout de même un inconvénient à utiliser un circuit RLC. En effet, nous perdons la possibilité de détecter la différence entre des métaux ferromagnétiques et des métaux non-ferromagnétiques. Pour pallier à ce problème, nous comptons 'suivre en direct' la partie dans la mémoire de l'arduino car nous connaissons l'état de départ d'une partie d'échecs qui est toujours le même.

Pour itérer sur toutes les cases successivement, nous comptons mettre toutes les bobines en série et ne faire passer le courant que dans une seule à la fois

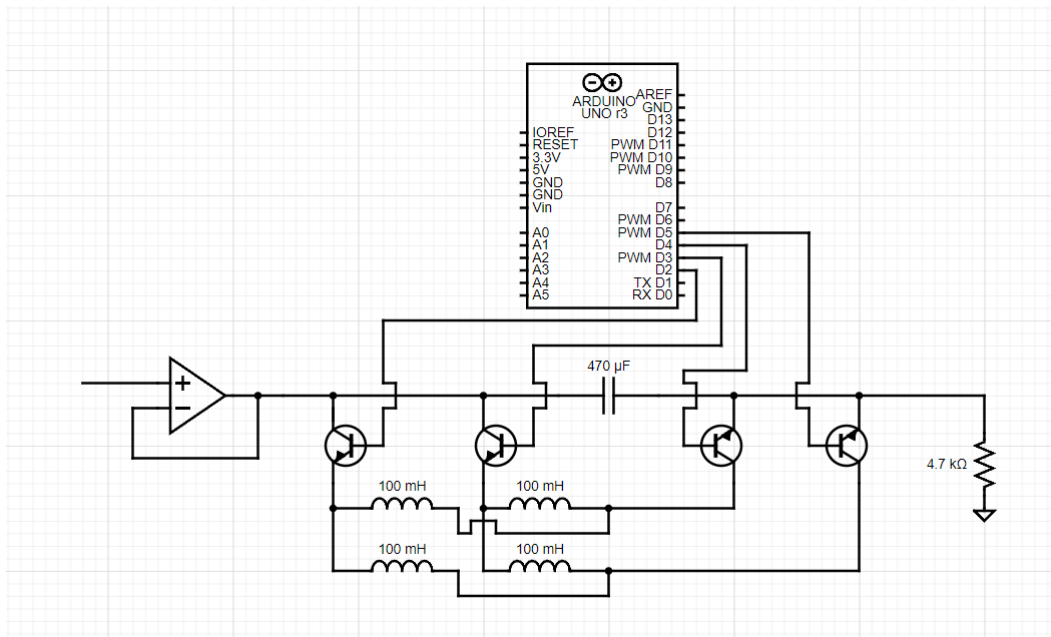


FIGURE 9 – Démo sur quatre cases

grâce à des transistors contrôlés par l'arduino (Voir Figure 9). Le signal passe ensuite dans le reste du circuit comme si il n'y avait qu'une seule bobine

3.2 Perspectives futures

Dans un premier temps nous allons réaliser le circuit sur un nombre limité de cases (4 ou 16) pour s'assurer du bon fonctionnement du système. Une première perspective serait donc d'étendre le circuit pour 64 cases. Le but premier serait de pouvoir simplement changer le timer mais dans un second temps, on pourrait également détecter si un coup est légal ou non en enregistrant le déplacement des pièces en software.

Étant donné que nous allons utiliser un circuit RLC au lieu d'un circuit RL et que nous allons utiliser un grand nombre de bobines, au niveau du deuxième bloc, nous devons donc réduire au maximum le temps nécessaire pour parcourir l'intégralité des inductances. Réduire ce temps est primordial pour pouvoir détecter les coups spéciaux (le Rock) et les prises possibles. La solution que nous avons trouvé à ce problème est de doubler, voire de quadrupler, certains blocs du circuit. Cette solution permettrait de parcourir simultanément 2 ou 4 cases de l'échiquier et de donc de parcourir l'ensemble des cases 2 ou 4 fois plus vite.