



UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE
LOUVAIN
ECOLE POLYTECHNIQUE DE LOUVAIN



-Groupe 57-

LFSAB1502 Yes You Canne !



Tuteurs :

Guillaume GILSON
Laurent FRANCIS
Sylvain RAMELOT

Professeurs :

Laurent FRANCIS
François GLINEUR
Jérôme LOUVEAUX
Bernard NYSTEN
Claude OESTGES

Auteurs :

Raphaël ANTOINE - 87301700
Valentin DE BEIL - 77471700
Ben DELCOIGNE - 38771700
Jérôme DELFORGE - 42441700
Sammy DE VISSCHER - 41081300
Miguel LETOR - 39411700

-15 Mai 2018-
-Année académique 2017-2018-

Table des matières

1	Introduction	3
2	Cahier des charges	4
2.1	Contexte	4
2.2	Objectif général-livrable principal	4
2.3	Critères d'évaluation / performances	4
2.4	Contraintes	5
2.5	Modifications appliquées au cahier des charges du pré-jury	5
3	Fiche technique	5
4	Description du prototype	7
4.1	Description globale du prototype	7
4.2	Partie technique	7
4.3	Dimensionnement de l'inductance	15
4.4	Discussion des résultats	19
5	Validation	20
5.1	Mesures de qualification	20
5.2	Tests paramétriques	20
6	Conclusion	24
A	Notations	26
B	Utilisation d'un transistor	27
C	Caractérisation d'un circuit LC parallèle	29
D	Calculs du sommateur	31

Dans le cadre de notre projet P2, il nous a été demandé de concevoir et de fabriquer un détecteur de métaux. Nous avions la liberté de choisir quelle direction nous allions donner à notre projet. Ainsi, après réflexion nous avons décidé d'intégrer le détecteur à une canne blanche pour aveugle. Cela permettrait de faciliter la vie des personnes aveugles ou malvoyantes vu le grand nombre d'objets métalliques plus ou moins imposants dans nos rues, tels que le mobilier urbain ou les véhicules.

Le détecteur en lui-même est composé de deux oscillateurs, l'un de référence et l'autre de détection, d'un sommateur et d'un comparateur. Le signal obtenu devait ensuite être envoyé dans un buzzer, mais nous avons modifié cette partie du circuit afin de l'adapter à notre canne. En effet, nous avons remplacé le buzzer par un vibreur, celui-ci reçoit un courant continu à la moindre petite détection. Ces modifications ont été apportées dans le but de faciliter l'utilisation et l'ergonomie de notre canne. Dans la même optique, notre canne sera rechargeable par induction.

Le produit final de notre projet est assez fidèle aux objectifs que nous nous étions fixés dans le cahier des charges, la différence majeure étant le rayon de détection que nous prévoyions de 15 à 20 cm, et que nous n'avons réussi à étendre qu'à 10 cm.

1 Introduction

La cécité et la malvoyance sont des problèmes qui touchent près d'une personne sur cent dans notre société. La plupart du temps ces personnes restent chez elles, seul moyen d'éviter les accidents graves. C'est sur base de ces constatations que nous, le groupe 11.57, avons décidé de fabriquer une version améliorée de la canne blanche classique, outil indispensable pour une personne malvoyante. Cette application fut développée dans le cadre de notre projet P2, dont l'objectif principal est d'identifier une application pertinente qui peut s'appuyer sur un détecteur de métal compact. L'amélioration apportée est donc l'ajout d'un détecteur au bout de la canne, le manche de celle-ci vibre lorsqu'un objet métallique est approché du détecteur. Outre la détection des voitures ou des poteaux, cela permet d'imaginer des infrastructures adaptées telles que des bandes métalliques devant les passages pour piétons ou d'autres qui suivent les trottoirs. Le but de notre produit est de permettre aux personnes malvoyantes de sortir de chez elles sans avoir la crainte permanente de rencontrer un obstacle, et ainsi améliorer leur autonomie au quotidien. Par facilité d'utilisation, notre canne est rechargeable par induction via un port de charge. Elle est également télescopique, cela permet de simplifier le rangement lorsque la canne n'est pas utilisée.

Il existe déjà des alternatives électroniques à la canne blanche, en France et en Belgique les deux modèles les plus connus sont le Tom Pouce [14] et le Minitact [13]. Le Tom Pouce est un petit boîtier à fixer à la canne, il fonctionne grâce à un capteur infrarouge et non un détecteur de métal, il peut donc détecter n'importe quel type d'obstacle. Le rayon de détection s'étend de 2 à 15 mètres, ce qui est beaucoup plus grand que celui de notre canne. Il dispose cependant d'une autonomie de 5 heures, ce qui est moins que notre modèle. Le Tom Pouce est optimisé pour une utilisation extérieure. Le Minitact quant à lui est un boîtier à prendre en main, il fonctionne également grâce à un rayon infrarouge et peut détecter jusqu'à 6 mètres. L'autonomie est environ de 30 heures, c'est moins que ce que nous proposons pour notre canne. Le Minitact est conçu pour être utilisé à l'intérieur. Ces deux outils requièrent une formation d'environ 30 heures avant de pouvoir être utilisés correctement. Pour notre modèle, nous ne prévoyons aucune formation préalable. Il n'existe cependant pas de modèle de canne pour aveugle munie d'un détecteur de métal.

Dans ce document, vous trouverez le cahier des charges de notre projet, ainsi qu'une fiche technique et une description de notre prototype reprenant notamment le fonctionnement de notre circuit et les modélisations mathématiques qui nous ont permis d'établir le produit final. Et enfin, les mesures et tests effectués afin de qualifier notre prototype, suivi d'une conclusion mettant en comparaison notre cahier des charges et nos résultats finaux. L'annexe A reprend la liste des notations utilisées dans ce document.

2 Cahier des charges



ANNÉE ACADEMIQUE 2017 - 2018
LFSAB1502 - PROJET P2

Yes You Canne !

CAHIER DES CHARGES



N de groupe : 11.57

Date : 14 mars 2018

Auteur responsable du document : Jérôme Delforge

Version (historique) : 3.0 - 2 mai 2018

2.1 Contexte

D'après une estimation de l'OMS, une personne sur mille serait aveugle dans les pays industrialisés, et une personne sur cent serait malvoyante (personnes dont l'acuité visuelle est inférieure à 3/10e d'une acuité visuelle normale, ou dont le champ visuel est inférieur à 20° [10]. Au vu de ces données, on ne peut que déplorer le manque d'infrastructures mises en place en Belgique afin d'aider cette tranche non négligeable de la population.

C'est sur base de ces observations que nous avons décidé, dans le cadre de notre projet pour nos études d'ingénieur civil, d'élaborer un prototype de canne blanche pour aveugle munie d'un détecteur de métaux. Les personnes munies de cette canne pourront plus aisément éviter les obstacles métalliques qui sont omniprésents dans la rue (voitures, lampadaires, barrières,...). Cela nous permet également d'imaginer toutes sortes d'infrastructures telles que des plaques métalliques devant les passages pour piétons, des bandes métalliques le long des trottoirs, etc.

Le prototype sera fourni aux professeurs du cours LFSAB1502 pour le 16 mai 2018.

2.2 Objectif général-livrable principal

La canne sera de taille et de poids similaire à une canne d'aveugle classique. Elle sera également résistante aux chocs et aura une autonomie d'au moins 15 heures. Télescopique, elle pourra également se rétracter pour un rangement et un transport plus facile lorsqu'elle n'est pas utilisée. Enfin, le produit sera prêt à l'emploi dès l'achat.

2.3 Critères d'évaluation / performances

2.3.1 Sensibilité

Le rayon de détection sera de 20 cm autour du détecteur qui se situera au bout de la canne.

2.3.2 Caractéristiques de la vibration

Le signal émis lors de la détection sera vibratoire. Il sera émis par un vibreur comme on peut en trouver dans les smartphones actuels.

2.3.3 Géométrie et ergonomie

La canne choisie sera une canne blanche classique munie d'un détecteur, probablement sphérique, en son bout. Le manche à la tête de la canne garantira une bonne prise en main et une bonne réception des vibrations. Le poids total de la canne sera inférieur à 300 grammes. Le diamètre de la canne est de 21mm.

La canne sera aussi équipée d'un circuit de lampes LED afin qu'elle soit visible de nuit. Les LED clignoteront à une fréquence de 7Hz.

2.3.4 Autonomie et recharge

La canne doit avoir une autonomie d'une journée (idéalement 15 heures) et un temps de recharge de 4 heures. Elle sera rechargée par induction sur un porte-canne.

2.3.5 Résistance et légèreté

En raison de son utilité, la canne devra être solide et résister aux chocs ainsi qu'aux conditions météorologiques quotidiennes, elle sera utilisable entre $-10^{\circ}C$ et $40^{\circ}C$. De plus, elle ne doit pas représenter une charge trop importante pour l'utilisateur. Pour répondre à ces attentes, la canne est conçue en fibre de carbone.

2.3.6 Bras télescopique

Le canne sera entièrement rétractable de manière à se ranger facilement. La longueur sera dès lors ajustable allant de 35 cm à 130 cm. Lorsque la canne sera repliée, il sera possible de la mettre en veille afin qu'elle ne détecte plus les métaux et d'allonger son autonomie.

2.3.7 Emplacement du circuit

L'entièreté du circuit permettant au produit de fonctionner résidera dans une boîte aux dimensions maximales de 20cmx10cmx5cm. Ce boîtier comportera le circuit ainsi que les batteries. L'inductance de détection se trouvera hors de ce boîtier.

2.4 Contraintes

Le manche de la canne est conçu pour vibrer à sa puissance maximale dès la détection d'un objet métallique potentiellement dangereux pour l'utilisateur.

Celle-ci intégrera un circuit électronique à battement fréquentiel qui transformera les variations du champ électrique perçu par le capteur en un signal électrique à faible fréquence.

La canne devra fonctionner sous toutes conditions climatiques et résister à long terme aux chocs et au balancement qu'une personne malvoyante pourrait faire avec celle-ci.

La canne aura un coût compris entre 50 et 100 euros.

2.5 Modifications appliquées au cahier des charges du pré-jury

Quelques modifications ont été appliquées par rapport au cahier des charges remis le 22 mars 2018. Les voici : Dans la première version du cahier des charges, nous parlions d'un indicateur de basse charge. Confectionner un circuit ayant cet objectif n'entre pas dans le cadre de notre projet, nous avons donc préféré utiliser un circuit tiers qui s'occupe du chargement de la batterie.

La section "emplacement du circuit" a été ajoutée car nous ne stipulions rien à son sujet.

Nous avons aussi stipulé la présence d'un circuit de lampes LED, dont nous avons décidé l'implémentation plus tard.

Nous avions prévu de faire varier l'intensité de la vibration selon la proximité au métal détecté. Toutefois, nous jugions plus utile d'avoir un signal vibratoire maximal dès la détection.

3 Fiche technique

Fiche technique

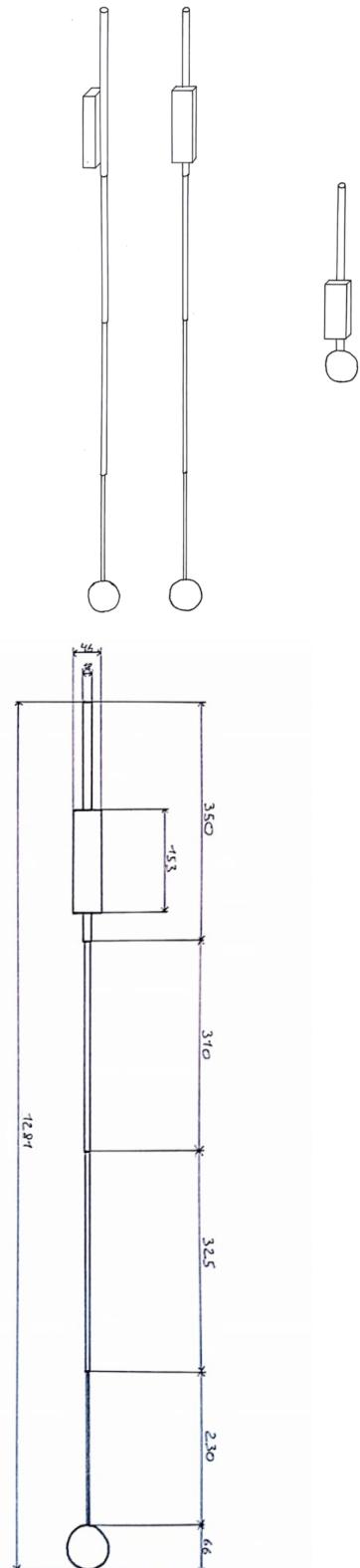
Description Générale

Notre prototype se présente sous la forme d'une canne blanche télescopique pour aveugle. Près du manche se situe un petit boîtier dans lequel se trouve le circuit électrique. La bobine de détection se situe à l'extrémité de la canne, dans une boule résistante aux chocs. Le manche vibre lorsqu'un métal est détecté à moins de 10 cm. La canne est équipée d'une batterie interne d'une autonomie de 50 heures, la recharge se fait par induction via le port de charge ou au moyen d'une prise USB 2.0. Une série de lumières LED clignotantes sur la canne permettent une meilleure visibilité de l'utilisateur lorsqu'il fait sombre.

Composants et caractéristiques principales

Le circuit électrique se compose de 8 parties dont 4 principales : deux oscillateurs, un sommateur et un comparateur. Annexe à ce circuit, et totalement indépendant de celui-ci il y a le circuit qui permet de faire clignoter les LED.

Composantes	Implémentation	
Batterie	Lithium-ion polymère	
Système LED	Circuit NE555	
Inductance plate	72 spires	
Système de protection batterie	Circuit intégré	
Système de chargement	Circuit intégré	
Port usb	Micro USB 2.0	
Caractéristiques	Valeurs	Unités
Sensibilité	0.1	mètres [m]
Cas de détection	métaux	
Consommation sans détection sans LED	7	milliampères [mA]
Consommation sans détection avec LED	11	milliampères [mA]
Consommation avec détection avec LED	70	milliampères [mA]
Consommation avec détection sans LED	80	milliampères [mA]
Autonomie avec 20% d'utilisation du vibrer	50	heures [h]
Dimensions de la boule de détection	0.066	mètres [m]
Longueur de la canne	0.35 - 1.30	mètres [m]
Diamètre de la canne	0,02	mètres [m]
Dimension de la batterie	0.05x0.03x0.01	mètres [m]
Poids de la batterie	0.033	kilogramme [kg]
Capacité volumique de la batterie	280	[W h / l]
Capacité massique de la batterie	130	[W h / kg]
Poids propre total	0.302	kilogramme [kg]
Temps de charge	1.5	heures [h]
Température d'utilisation	-10 - 40	[°C]
Dimensions du boitier	0.15x0.045x0.03	mètres [m]



Fonctionnement

La canne s'utilise comme une canne blanche pour aveugle classique. Pour commencer à détecter les obstacles, il faut néanmoins enclencher un des interrupteurs situé sur le boîtier. Le premier enclenche seulement la détection et le second enclenche la détection et la LED.

4 Description du prototype

4.1 Description globale du prototype

Notre prototype se présente sous la forme d'une canne blanche télescopique pour aveugle. Près du manche se situe un petit boîtier dans lequel se trouve le circuit électrique. La bobine de détection se situe à l'extrémité de la canne, dans une boule résistante aux chocs. Le manche vibre lorsqu'un métal est détecté à moins de 10 cm. La canne est équipée d'une batterie interne d'une autonomie de 50 heures, la recharge se fait par induction via le port de charge ou au moyen d'une prise USB 2.0. Une série de lumières LED clignotantes sur la canne permettent une meilleure visibilité de l'utilisateur lorsqu'il fait sombre.

4.2 Partie technique

Le circuit électrique se compose de 8 parties dont 4 principales : deux oscillateurs, un sommateur et un comparateur. Annexe à ce circuit, et totalement indépendant de celui-ci il y a le circuit qui permet de faire clignoter les LED.

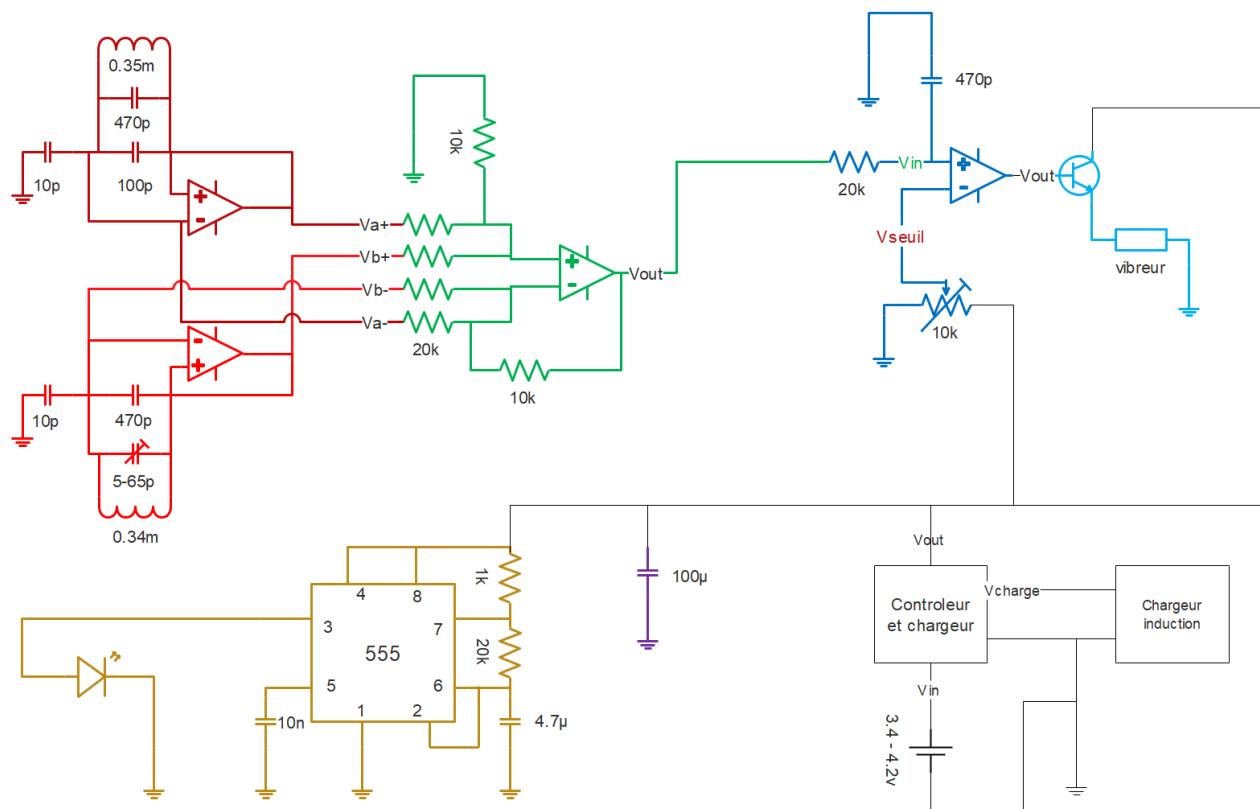


FIGURE 1 – Circuit électrique complet

4.2.1 Bloc 1 : L'oscillateur de référence

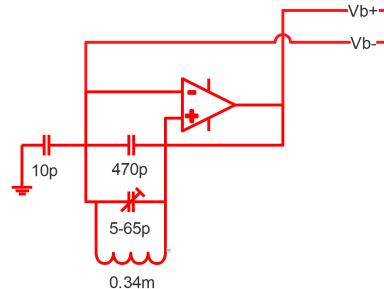


FIGURE 2 – Oscillateur de référence

Ce bloc consiste en un oscillateur LC en parallèle avec un amplificateur opérationnel. L'oscillateur est relié à la masse par une capacité, celle-ci permet de ne pas avoir une tension nulle à une des bornes de l'oscillateur, il faudra prendre cette capacité en compte dans nos calculs. Nous récupérons les deux signaux aux bornes plus (V_a^+) et moins (V_a^-) de l'ampli op, ce sont des signaux sinusoïdaux qui résultent du phénomène de résonance entre l'inductance et les capacités. En effet ces deux composants se transforment l'énergie, ce qui fait apparaître un signal alternatif à leurs bornes. Cette résonance est maintenue grâce à une amplitude maximale fournie par l'amplificateur opérationnel.

4.2.2 Bloc 2 : L'oscillateur de détection

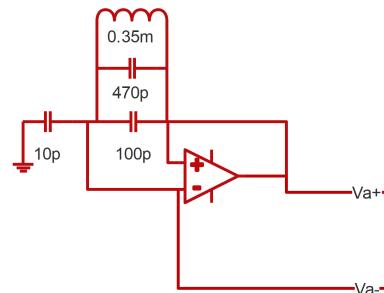


FIGURE 3 – Oscillateur de détection

Ce bloc est très similaire à l'oscillateur de référence, l'inductance est remplacée par une bobine qui servira à la détection. Celle-ci crée un champ électro-magnétique autour d'elle, ce champ sera modifié lorsqu'un métal est approché de la bobine. Cela créera des courants de Foucault dans la bobine, la fréquence de l'oscillateur sera alors modifiée. Une capacité variable est également ajoutée en parallèle de la capacité déjà présente, nous nous en sommes servi pour adapter la fréquence de cet oscillateur à celle de référence. Les signaux récupérés (V_b^+ et V_b^-) ont la même allure que ceux en sortie de l'autre oscillateur, la fréquence variera lorsqu'un métal est proche de la bobine.

Modélisations mathématiques.

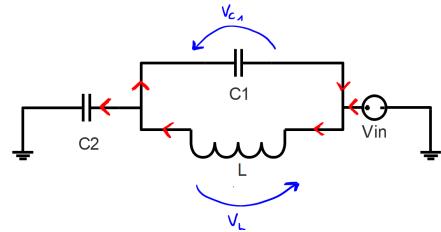


FIGURE 4 – Comparateur

Pour effectuer les calculs nous avons simplifié le schéma en remplaçant l'ampli op par une source de tension.

Les oscillateurs LC (blocs 1 et 2) sont caractérisés par les formules suivantes (Voir Annexe C) :

$$I_{C1}(t) = I_0 \cos(\omega t + \Phi) \quad (1)$$

et

$$V_{C1}(t) = A \sin(\omega t + \Phi) \quad (2)$$

Avec

- $A = (1 + \frac{1}{C_1 + C_2}) \omega L I_0$ l'amplitude. (C)
- Φ le déphasage.
- $\omega = \frac{1}{\sqrt{L(C_1 + C_2)}}$, la vitesse angulaire. (C.9)

En appliquant la formule de la vitesse angulaire, nous trouvons une fréquence de 353kHz .

Comparaison résultats théoriques et obtenus.

Voici le signal de l'oscillateur LC ($V_{a+} - V_{a-}$) que nous pouvons observer avec le PicoScope :

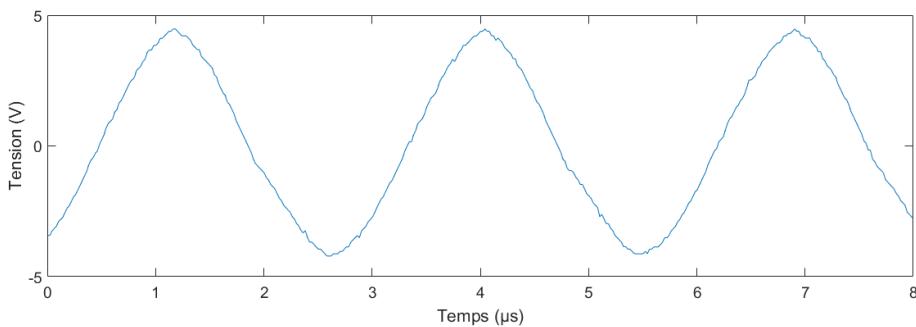


FIGURE 5 – Signal LC

Voici le signal théorique :

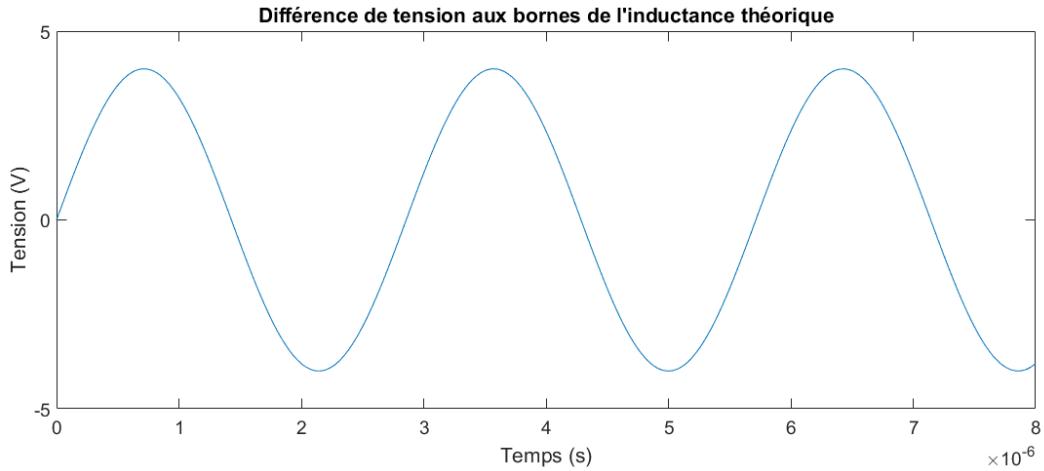


FIGURE 6 – Signal LC

4.2.3 Bloc 3 : Le sommateur

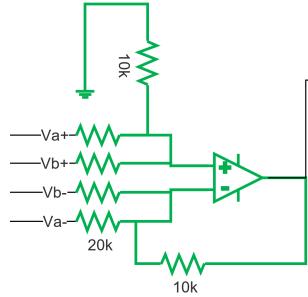


FIGURE 7 – Sommateur

Nous récupérons 4 signaux, 2 par oscillateurs. Nous voulons additionner les tensions aux bornes des deux oscillateurs, nous injectons donc V_a^+ et V_b^+ dans la borne + de l'ampli op, et V_a^- et V_b^- dans la borne -. Nous divisons les tensions en deux en amont de l'ampli op grâce aux résistances de 20 et 10 $k\Omega$, cela permet de garder une amplitude maximale de 5V à la sortie du sommateur. Au final, le calcul effectué est $(V_a^+ - V_a^-) + (V_b^+ - V_b^-)$. Étant donné que, au repos, les deux signaux sont les mêmes, mais avec un déphasage de π , ceux-ci s'annulent. Nous obtenons donc un signal quasi nul à la sortie du sommateur.

Modélisations mathématiques

Après quelques calculs (Voir Annexe C), voici l'équation du sommateur

$$V_{out} = \frac{V_{a+} - V_{a-}}{2} + \frac{V_{b+} - V_{b-}}{2} \quad (3)$$

En équation temporelle cela donne

- Lorsque les deux signaux d'entrée ont des fréquences différentes, le déphasage est négligeable. L'amplificateur opérationnel ne pouvant délivrer qu'une tension négative, il faut prendre la partie positive de l'expression suivante.

$$V_{out} = A \sin\left(\frac{1}{2}(\omega_r t + \omega_d t)\right) \cos\left(\frac{1}{2}(\omega_r t - \omega_d t)\right) \quad (4)$$

- Lorsqu'ils ont la même fréquence, il apparaît un déphasage de π , le cosinus devient nul.

$$V_{out} = 0 \quad (5)$$

Avec

- ω_r = La vitesse angulaire de l'oscillateur de référence
- ω_d = La vitesse angulaire de l'oscillateur de détection

Comparaison résultats théoriques et obtenus.

- Pour $V_{out} = 0$ (5)

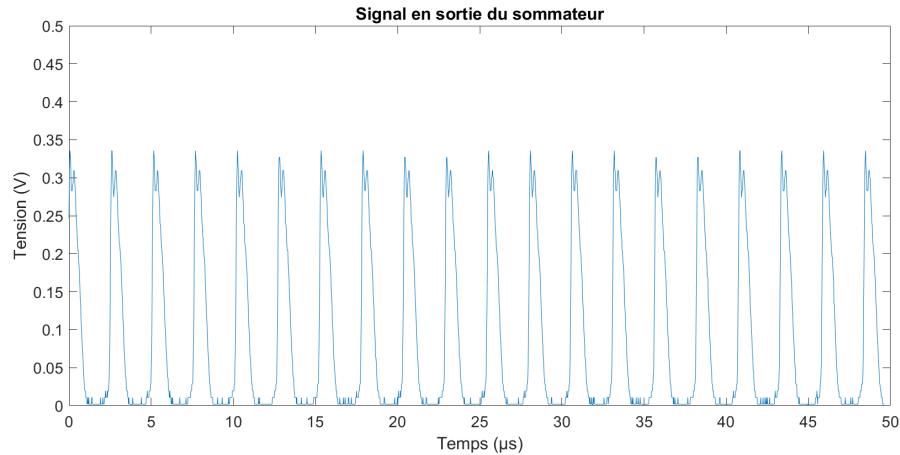


FIGURE 8 – Sortie Sommateur réelle

Comme on peut le constater, l'amplitude n'est pas nulle, ceci s'explique par le fait que le déphasage entre B1 et B2 n'est pas parfaitement de π . La composante basse fréquence est absente car B1 et B2 oscillent à la même fréquence.

- Pour le signal de l'équation 4
Signal réel :

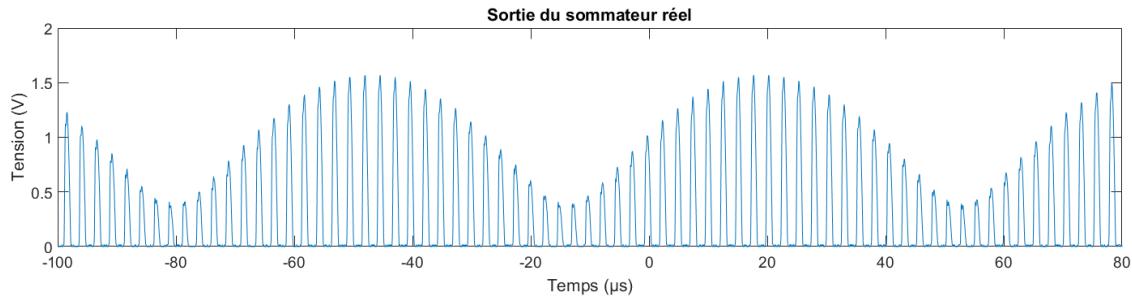


FIGURE 9 – Battement réel

Signal théorique :

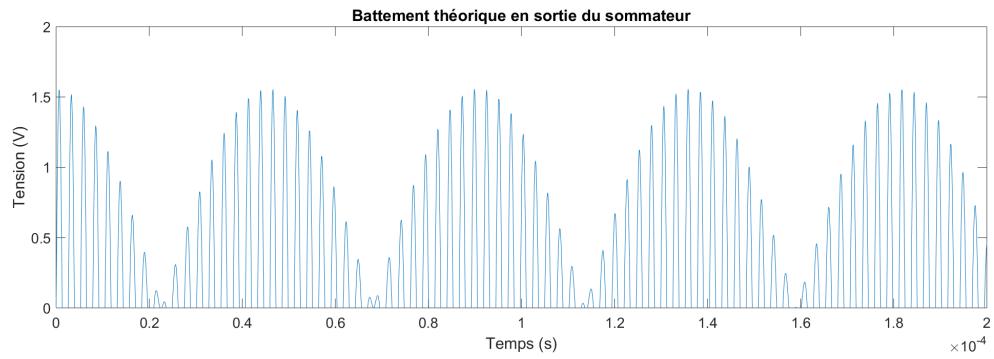


FIGURE 10 – Sortie Battement théorique

Comme on peut le constater les signaux sont assez proche mais la tension du battement réel (Fig.9) ne descend pas jusqu'à zéro.

4.2.4 Bloc 4 : Condensateur de lissage

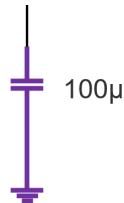


FIGURE 11 – Condensateur

Cette capacité de $100\mu F$ sert à lisser la demande de courant alternatif des amplis-op. Elle joue un rôle de réservoir d'énergie. Ce bloc n'est pas indispensable au fonctionnement du circuit.

4.2.5 Bloc 5 : Comparateur

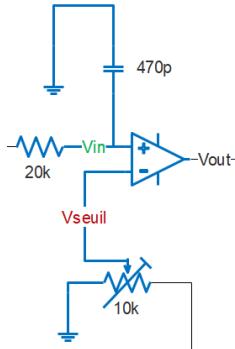


FIGURE 12 – Comparateur

Le comparateur, comme son nom l'indique, sert à comparer deux signaux (V_{in} et V_{out}).
 Si $V_{in} < V_{seuil}$ alors $V_{out} = 0$
 Si $V_{in} > V_{seuil}$ alors $V_{out} =$ tension de la batterie. L'ampli op fonctionne en saturation.

Dans le cas de notre circuit,

- V_{seuil} vaut 100mV
- V_{in} sans détection vaut 80mV

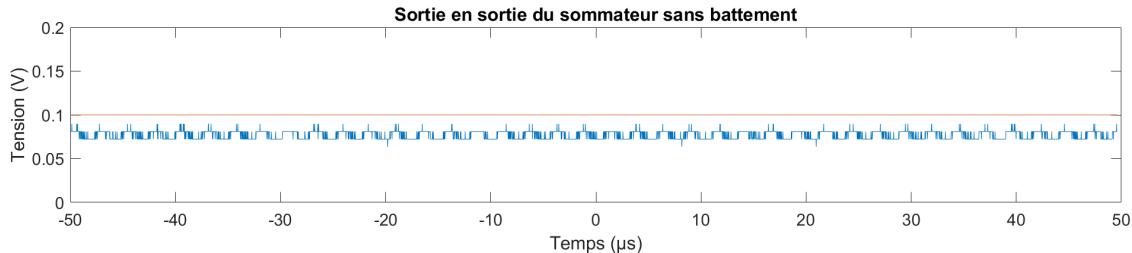


FIGURE 13 – Entrée comparateur sans détection

- V_{in} avec détection a une tension minimum de 160mV, ce qui est effectivement au-dessus du seuil.

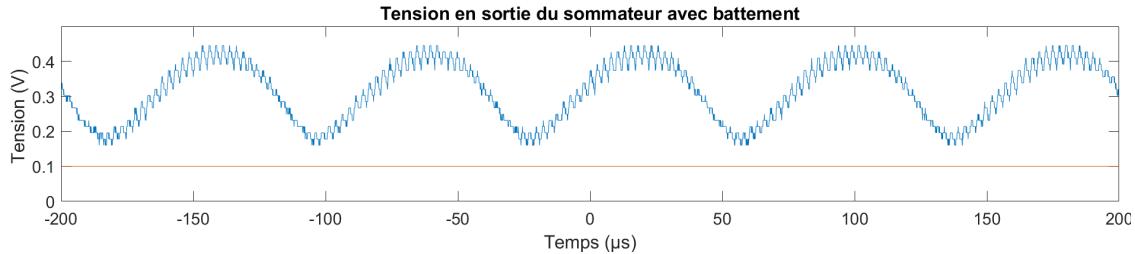


FIGURE 14 – Entrée comparateur avec détection

La capacité de $470pF$ permet de lisser le signal pour avoir un signal quasi continu. Cette capacité et la résistance de $20k\Omega$ forment un filtre passe bas. Étant donné que le signal en sortie du sommateur (9) n'a qu'une composante haute fréquence de 400kHz, le filtre RC rend le signal continu. Cette capacité a été choisie de manière expérimentale

car il est difficile d'estimer l'implication des blocs précédents sur le filtre RC. Nous avons donc essayé plusieurs valeurs : $100\mu F$, $10\mu F$, $4.7\mu F$, $100nF$, $10nF$, $1nF$, $470pF$, $100pF$. Les capacités de grande valeur nous faisaient perdre beaucoup de réactivité, le vibreur continuait de vibrer après la détection. La capacité de $470pF$ ne filtre pas complètement le signal mais elle s'est avérée être suffisante et nous assure une réactivité maximale. Quand à celle de $100pF$ elle ne diminue pas suffisamment l'amplitude du signal, le transistor s'active alors par intermittence ce qui diminue la puissance des vibrations.

4.2.6 Bloc 6 : Le circuit LED

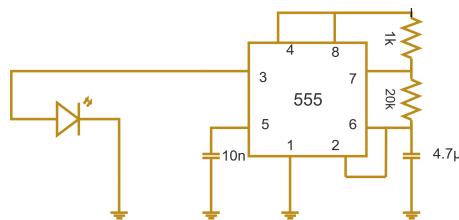


FIGURE 15 – NE555 LED

Ce circuit est totalement indépendant du reste du circuit. Il ne partage avec le reste que la borne ground et la tension de 5V. Ce dispositif permet de faire clignoter des LED à une fréquence choisie, tout simplement en utilisant les propriétés du circuit intégré NE555 [4].

Ce circuit (Fig.15) génère un signal carré dont nous pouvons varier la fréquence en modifiant la valeurs des résistances et capacités. Nous recherchions une fréquence de environ 7 Hz. Pour obtenir ce résultat nous avons pris comme valeurs :

$$C = 4.7\mu F$$

$$R_1 = 1k\Omega$$

$$R_2 = 20k\Omega$$

A l'aide du calculateur en ligne [4], nous pouvons estimer que nos composantes combinées avec le NE555 produiront un signal carré avec une fréquence de 7.5 Hz. En pratique cette fréquence est de 6.8 Hz, cette différence est due à l'écart entre la valeur théorique et réelle des composants utilisés.

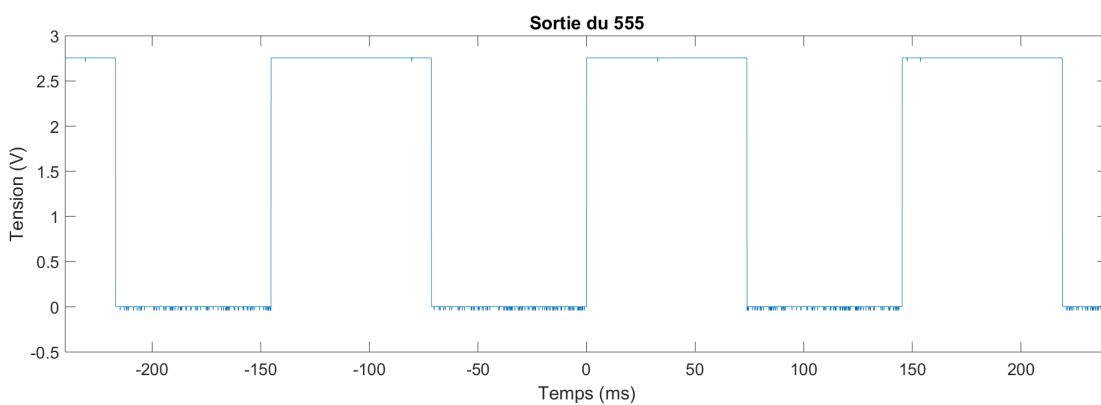


FIGURE 16 – Sortie 555

4.2.7 Bloc 7 : Transistor

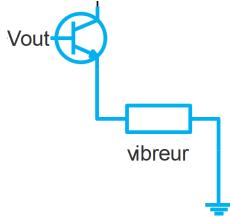


FIGURE 17 – Transistor

Ce bloc permet d'alimenter le vibreur en fonction du signal de sortie du comparateur. Dans notre cas ce signal est de type tout ou rien, le transistor s'active donc au maximum en cas de détection, laissant passer le courant pour le vibreur.

4.3 Dimensionnement de l'inductance

Notre oscillateur de détection comporte une inductance que nous devions réaliser nous-même. La distance de détection dépendra immédiatement de la valeur et de la forme de notre inductance.

4.3.1 Solénoïde

Nous avons commencé par une inductance sous forme de solénoïde, en effet, cette forme nous semblait la plus simple à réaliser. De plus, nous voulions avoir la possibilité d'avoir une inductance de détection capable d'être introduite dans notre canne.

Calcul de l'inductance solénoïdale

La formule pour connaître la valeur d'une inductance est la suivante :

$$L = \frac{N\Phi_B(I)}{I} = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 S}{l} [9] \quad (6)$$

Nous avions à notre disposition 14m de fil, que nous avons enroulé autour d'un tube en PVC. Nous avons donc construit un solénoïde avec les caractéristiques suivantes :

Diamètre intérieur	D_i	2 cm
Nombre de tours	N	450
Diamètre du fil	D_f	0.2 mm
Longueur du solénoïde	l	2 cm
Valeur de l'inductance (par 6)	L	4 mH

Cette bobine a été insérée dans notre circuit. Une détection se faisait uniquement lorsqu'un métal était approché à une distance de 2 à 4 mm. Une distance de détection bien trop petite par rapport à notre objectif de 20 cm.

Comme le champ d'un solénoïde est proportionnel au courant qui la traverse, nous avons fabriqué un solénoïde de taille similaire au précédent avec un fil plus épais. En réduisant la résistance du fil, celui-ci peut accepter un plus grand courant.

Nous avons donc enroulé un fil d'une longueur de 4 mètres, et de diamètre $D_f = 2mm$ (dix fois plus qu'avant) autour du même tube en PVC.

Malheureusement la détection se faisait toujours à une distance inférieure à 1 cm. Ce qui s'explique par le fait que le facteur limitant le courant dans notre circuit ne provient pas de la résistance de la bobine.

Les lignes de champ

La distance de détection d'une inductance sous forme de bobine solénoïdale est minime, et ceci s'explique par la répartition des lignes de champ autour du bobinage. En effet, dans la figure 18, nous notons qu'une grande proportion du champ magnétique se trouve à l'intérieur du solénoïde. Pour avoir une détection lointaine, il faut que le champ soit externe à l'inductance, afin qu'il soit perturbé par les métaux à proximité.

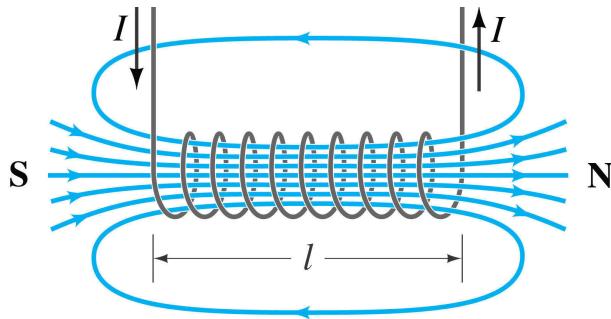


FIGURE 18 – Champ magnétique autour d'un solénoïde [11]

Légende de la figure 18 :

N	Pôle nord magnétique
S	Pôle sud magnétique
l	Longueur
I	courant

Une forme d'inductance qui répondait à cette demande était la bobine plate, dont les lignes de champ sont dessinées en figure 19.

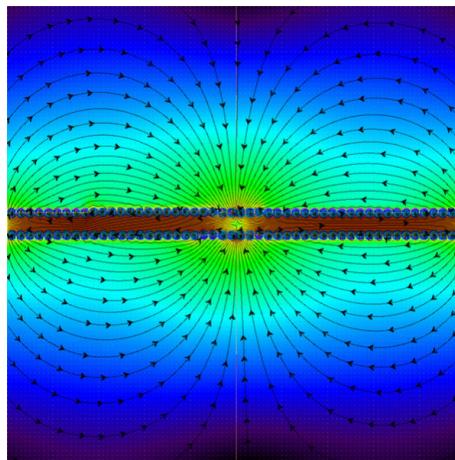


FIGURE 19 – Champ magnétique autour d'une bobine plate [5]

4.3.2 Bobine plate

Le solénoïde ne répondant pas à notre demande, nous nous sommes tournés vers une inductance plate (Fig. 20), aussi appelée "pancake coil" en anglais. Nous avons fabriqué une inductance plate avec les caractéristiques listées ci-dessous.

Au moyen des formules de Wheeler, calculons la valeur d'inductance.

$$L = 31.33\mu_0 N^2 \frac{R^2}{8R + 11w} [12][2] \quad (7)$$

Avec :

R = Rayon total

μ_0 = Perméabilité du vide

w = Largeur du bobinage

N = Nombre de tours

Nom de variable	Symbole	Valeur(cm)
Rayon total	R	2.9
Largeur du fil	l	0.02
Largeur de la bobine	w	1.9
Nombre de tours	N	72 tours
Valeur d'inductance (par form. 7)	L	$384 \cdot 10^{-6} H$

Par calcul, nous obtenons donc une valeur d'inductance de $384\mu H$.



FIGURE 20 – Photo de l'inductance plate que nous avons réalisée

Mesure de l'inductance plate

Maintenant que la valeur théorique de l'inductance est connue, mesurons sa valeur par expérience. Pour ce faire, nous allons l'insérer dans un circuit oscillateur LC. La fréquence d'oscillation, que nous pourrons observer au picoscope, sera liée à la valeur de l'inductance.

Circuit LC - Théorie

Dans un circuit LC, comportant une capacité et une inductance en parallèle, en série avec une capacité reliée à la masse, l'inductance et la capacité en parallèle entrent en résonance et engendrent un signal périodique. La tension a été mesurée entre la capacité et l'inductance au picoscope (Fig. 21). La fréquence de ce signal est donnée :

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} [8] \quad (8)$$

En isolant L dans cette équation nous obtenons la relation

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad (9)$$

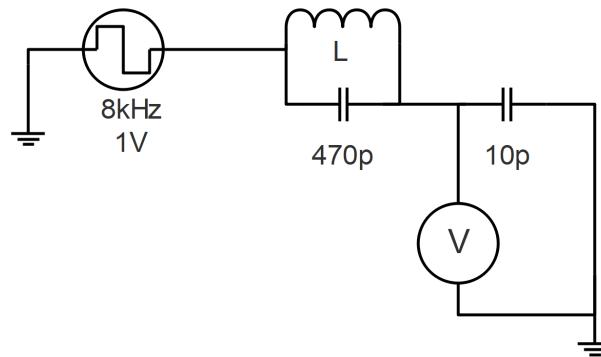


FIGURE 21 – Montage du circuit LC [6]

Circuit LC - Mesure

Pour la mesure, nous avons pris un circuit avec une capacité de 480pF. La fréquence du signal carré importe peu sur la mesure de la fréquence d'oscillation observable. Dans la figure 22, on observe le signal obtenu. Avec la fréquence d'oscillation, nous pouvons déduire la valeur de l'inductance.

Fréquence mesurée	Valeur d'inductance (par form. 9)
380 kHz	$365 \cdot 10^{-6}$ H

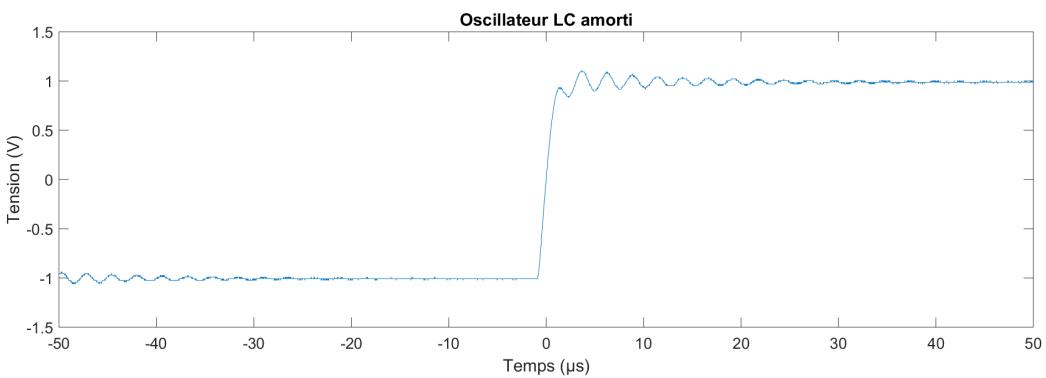


FIGURE 22 – Tension aux bornes de l’inductance dans un montage LC

4.4 Discussion des résultats

Valeur théorique	Valeur expérimentale
$384\mu H$	$365\mu H$

La différence entre la valeur d’inductance calculée mathématiquement selon les paramètres physiques de la bobine et la valeur expérimentale réelle de l’inductance est d’environ $20\mu H$. Nous expliquons cette différence principalement par deux facteurs. Le premier est qu’il était pour nous difficile de déterminer avec précision les dimensions de l’inductance. Les grandeurs étant de l’ordre du millimètre, il aurait fallu du matériel précis pour limiter la marge d’erreur. En seconde partie, la valeur calculée théoriquement est la valeur de l’inductance de la bobine en bout de canne. Toutefois, l’inductance utilisée dans l’oscillateur LC comportait la bobine en bout de canne ainsi que le fil torsadé qui relie la bobine et le boîtier de contrôle à travers toute la longueur de la canne. Nous pensons que cette portion de fil torsadé modifie la valeur de l’inductance et explique la différence entre les valeurs obtenues.

5 Validation

5.1 Mesures de qualification

Afin de situer notre prototype par rapport à notre cahier des charges, nous avons effectué diverses mesures de ses performances. De plus, nous avons déterminé si notre prototype était capable de pallier aux différentes contraintes que nous lui avions imposé.

Critère	Objectif prévu dans le CdC	Résultat atteint
Distance de détection	20 cm	10 cm
Caractéristiques de la vibration	Vibratoire	Vibratoire
Autonomie	15 h	50 h
Temps de recharge	4 h	1 h 30 min
Format de canne	Télescopique	Télescopique
Solidité	Résistante aux chocs	Non-résistante aux chocs
Indice de protection	IP44 [3]	IP44
Matériaux détectés	Objets métalliques	Objets métalliques
Taille du boîtier	20cmx10cmx5cm max	15cmx4,5cmx3cm
Masse totale	300 g	302 g
Température d'utilisation	-10°C à 40°C	-10°C à 40°C

5.2 Tests paramétriques

5.2.1 Variation de la batterie

Comme l'ergonomie et le poids de la canne sont des facteurs importants à prendre en compte, le choix d'une batterie n'était pas anodin. Il faut savoir que selon les composants de la batterie, l'autonomie de celle-ci varie grandement. C'est pourquoi nous avons doté notre circuit d'une batterie Lithium-Ion d'une capacité de 1130mAh qui grâce à sa petite taille et son importante densité d'énergie répondait exactement à nos demandes. En effet, ce type de batteries est utilisé dans la quasi-totalité des appareils électroniques portables et a une densité de charge et une capacité volumique très importante, jusqu'à 3 fois supérieure à celles du plomb.[1] De plus, elles supportent un nombre très important de cycles de recharge leurs donnant une grande longévité. Néanmoins, nous avons essayé une batterie au plomb et au nickel, mais pour une même capacité de charge, la batterie au plomb était bien trop lourde et celle au nickel plus volumineuse. Nous n'utilisons pas de pile classique alcaline car nous voulons que notre canne soit rechargeable.

L'utilisation d'une batterie de plus grosse capacité permettrait de rallonger l'autonomie de la canne. Cependant, l'autonomie d'utilisation satisfait totalement l'objectif fixé (15 heures).

Nous avons mesuré la consommation de notre circuit dans différentes conditions au moyen d'un multimètre.

$$\frac{\text{Capacité de la batterie (1130mAh)}}{\text{Consommation du circuit}} = \text{Autonomie (h)} \quad (10)$$

Par la formule 10, nous obtenons l'autonomie du prototype.

ETAT DU CIRCUIT	CONSOMMATION (MA)	AUTONOMIE (H)
Sans détection, sans LED	7	160
Sans détection avec LED	11	100
Avec détection sans LED	80	14
Avec détection avec LED	70	16
Autonomie avec 20% d'utilisation du vibreur et LED	24	50

La consommation moins importante du circuit lorsqu'il est en détection avec la LED que lorsqu'il ne fonctionne qu'en détection peut paraître surprenante. Cette différence s'explique par la haute consommation du vibreur. En effet, lorsque la LED n'est pas fonctionnelle, toute la tension se retrouve aux bornes du vibreur et celui-ci fonctionne à sa pleine puissance. Lorsque la LED est allumée, la tension est divisée entre les deux circuits ce qui diminue la puissance du vibreur.

5.2.2 Rechargement de la batterie

Pour calculer la durée de charge, nous avons divisé ce courant par la capacité de la batterie pour obtenir la durée de chargement en heures. Le courant du chargeur est de 1A.

$$\text{Durée (h)} = \frac{1130}{100} = 1h08$$

Nous arrondissons à 1h30 pour prévoir la période de charge durant laquelle la tension est constante et le courant diminue petit à petit.

5.2.3 Variation de la tension

La tension maximale admissible par les composants de notre circuit est de 5,5V. La tension minimale en dessous de laquelle le circuit ne fonctionne plus est de 3V. Dès lors, la batterie choisie au point précédent doit fonctionner dans cette plage de tension ce qui est le cas notamment des batteries lithium polymère utilisées.

5.2.4 Variation du potentiomètre

Le potentiomètre a un rôle de diviseur de tension. En réglant sa résistance on peut varier le seuil de détection et ainsi optimiser la détection. Néanmoins, nous avons pu constater durant nos tests que lorsque la tension du seuil de détection était très proche de celle d'entrée du comparateur, les moindres variations parasites d'inductance se faisaient détectées.

5.2.5 Bobine de détection

La fréquence d'oscillation dans l'oscillateur LC est inversement proportionnelle à la valeur de l'inductance (form. 8). Cette dernière est directement proportionnelle à la perméabilité magnétique du matériau entourant la bobine (form. 7). En augmentant la perméabilité du milieu, on augmente donc la valeur de l'inductance et diminue la fréquence de l'oscillateur. Les matériaux ferromagnétiques diminuent donc la fréquence d'oscillation. Les matériaux diamagnétiques augmentent quant à eux la fréquence d'oscillation.

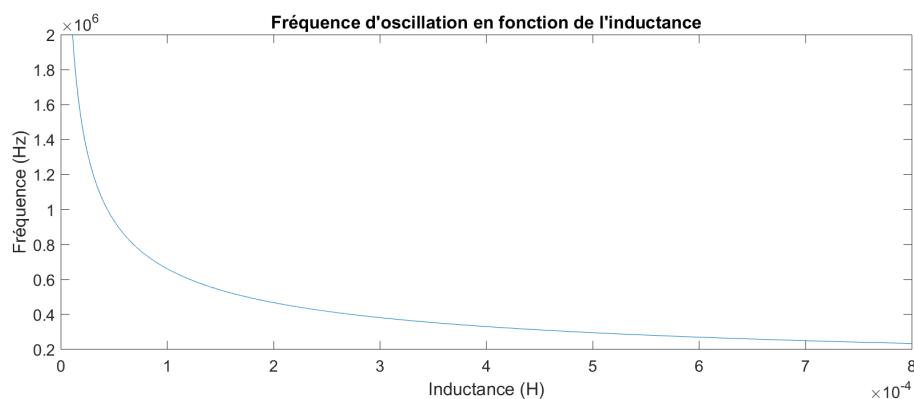


FIGURE 23 – Fréquence d'oscillation selon l'inductance

Notre inductance a une valeur de $3.6 \cdot 10^{-4} H$. En mettant un matériau dia-magnétique dans le milieu proche, nous parcourons le graphe (figure 23) vers la gauche, la fréquence augmente donc rapidement. Quant aux para- et ferro-magnétiques nous parcourons le graphe vers la droite, la fréquence y varie moins rapidement.

En ce qui concerne l'orientation, nous remarquons une plus petite distance de détection lorsque les métaux ne sont pas dans l'axe de la bobine plate.

5.2.6 Effet du dimensionnement de la bobine

La détection des métaux dépend en grande partie de l'inductance de détection choisie. Ce choix a été fait par expériences. Nous avons essayé diverses formes de bobines et pris celle pour laquelle la détection se faisait à la plus grande distance.

Nous avons commencé par un solénoïde, dont la valeur théorique est détaillée dans la section précédente. Cette forme d'inductance n'étant pas optimale dans le cas de notre application car champ de troue principalement dans le solénoïde, nous avons opté pour une inductance plate qui nous donnait une distance de détection de 10 cm. Les calculs et expériences sont détaillés aussi dans la partie précédente (4.3.2).

Comme détaillé dans la formule de l'inductance de la bobine plate (form. 7), la valeur de l'inductance est proportionnelle au nombre de tours au carré. Toutefois, nous ne pouvions pas librement prendre un grand nombre de tours car nous sommes contraints par la taille de la balle.

Néanmoins, même si notre distance de détection ne correspond pas à celle imposée dans notre cahier des charges, elle suffisante pour notre application.

5.2.7 Autres paramètres

Il reste quelques paramètres à valider, bien que ceux-ci sont plus subjectifs, nous avons essayé de les mesurer de la manière la plus objective possible.

Nous avons évalué la résistance à l'eau grâce au système d'indice de protection, l'IP de notre canne est IP44 [3].

Quant à la résistance aux chocs, nous nous rendons compte de la fragilité de notre canne et jugeons que celle-ci ne résistera pas à la plupart des chutes.

En ce qui concerne la température d'utilisation, nous avons comparé les températures maximums et minimums que peuvent supporté nos composantes électroniques. Celles-ci varient entre -10 et 40 °C et sont principalement limitées par notre batterie.

5.2.8 Améliorations éventuelles

Premièrement, nous avons dû créer un signal continu pour alimenter le vibreur. Pour ce faire nous utilisons un ampli op en montage comparateur. Lorsque l'inductance varie, l'amplitude du battement augmente, passe au-dessus du seuil et l'ampli op envoie un signal égal à la tension de la batterie vers le transistor. Pour que ce signal soit continu, nous lissons préalablement le signal de battement avec une capacité choisie de manière expérimentale.

Il a fallu ajouter un potentiomètre afin de pouvoir modifier facilement la tension seuil de détection. En effet, en dessous du seuil d'activation aucune vibration ne sera ressentie.

La capacité variable permet, lorsqu'on la fait varier, de modifier le déphasage entre les deux oscillateurs et donc l'amplitude du signal de battement. Lorsque la modification est plus importante, c'est alors la fréquence du battement qui est modifiée et il y a apparition de la composante basse fréquence du battement. Dans le cas de notre application nous désirons un signal de tension nulle à la sortie du sommateur, chose dont on peut se rapprocher au moyen de cette capacité.

Ensuite, que les personnes malvoyantes détectent des objets c'est une chose mais il faut également qu'elles soient elles-mêmes visibles par les autres usagers de la voie publique. Cela est d'autant plus important durant la nuit. C'est pourquoi nous avons décidé d'ajouter un circuit muni d'un NE555 afin que nous puissions avoir des LED (Diode ElectroLuminescente) qui clignotent à la fréquence de notre choix.

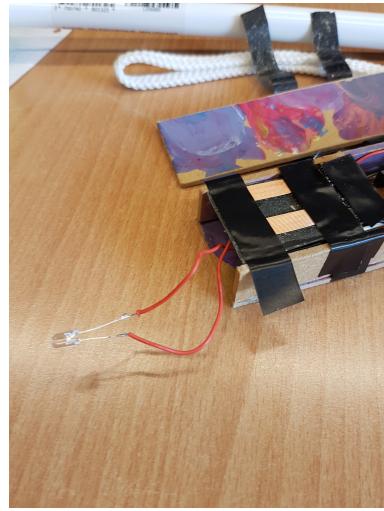


FIGURE 24 – Diode LED

En ce qui concerne la recharge, nous avons pensé à un circuit de charge par induction. Celui-ci s'ajoute à ce qui était prévu initialement dans le cahier des charges (le socle de rechargement) tout simplement dans une optique de facilité pour l'utilisateur. De plus, nous avons intégré un port de chargement par USB afin que l'utilisateur puisse recharger sa canne peu importe l'endroit où il se trouve.

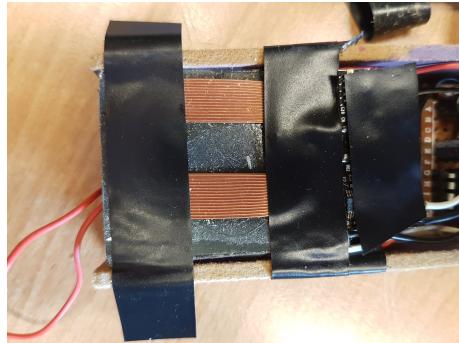


FIGURE 25 – Chargeur à induction

Pour continuer sur la batterie, celle ci sera protégée grâce au circuit intégré ajouté. Ce dernier permet de limiter la tension de charge à 4,2V et coupe le courant lorsque la tension descend sous 3,2V pour éviter la sous-charge. Ce circuit possède également une protection contre les courts-circuits. C'est un composant très important compte tenu du risque d'explosion en cas d'endommagement de la batterie lié à une mauvaise charge/décharge ou un court-circuit.

En raison de notre application, le signal sonore initial a été remplacé par un vibreur qui se situe dans le manche de la canne.

Pour terminer, afin d'assurer la détection d'objet métallique, il a fallu remplacer l'inductance fournie par une bobine plate de détection (figure 20).

6 Conclusion

Globalement, nous sommes satisfaits de notre produit final, et trouvons qu'il respecte en grande partie les objectifs fixés dans le cahier des charges initial. Toutefois, certains points ont dû être modifiés, notamment la sensibilité de détection de 20 cm a dû être réduite à 10 cm car notre dimensionnement ne le permettait pas. La résistance de la canne dépend grandement de la qualité de la canne achetée. Dans le cas de notre prototype, celle-ci laisse à désirer.

Mis à part ces deux points, notre prototype répond amplement aux demandes. L'autonomie prévue était de 15 heures, celle-ci a été triplée : notre autonomie est estimée à 50h. De même pour le temps de recharge qui était prévu à 4h et ne demande qu'une heure et demi.

Les plus gros défis ont été atteints. Nous avons réussi à dimensionner l'ensemble du circuit électronique afin qu'il soit fixable sur une canne blanche, sans entraver l'utilisation classique de celle-ci. Nous sommes aussi parvenus à convertir le signal sonore qui sortait du circuit fourni par l'Ecole Polytechnique de Louvain en un signal vibratoire.

Dans le cas où nous avions eu plus de temps, nous aurions cherché comment augmenter la distance de détection, notamment en modifiant le courant passant par l'inductance et le dimensionnement de celle-ci. Nous aurions aussi travaillé sur l'esthétique du prototype.

Bibliographie

- [1] Accumulateur lithium-ion. https://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_lithium-ion. Consulté le 10 mai 2018.
- [2] Formulas for the calculation of common inductances. <http://www.pulsedpower.eu/toolbox/toolbox-inductances.html>. Consulté le 12 mai 2018.
- [3] Indice de protection. https://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_de_protection. Consulté le 12 mai 2018.
- [4] NE555 timer astable circuit. <https://www.allaboutcircuits.com/tools/555-timer-astable-circuit/>. Consulté le 9 mai 2018.
- [5] Village of the banned. <http://www.moletrap.co.uk/forum/comments.php?DiscussionID=3636&page=11>. Consulté le 12 mai 2018.
- [6] 11.57. Montage réalisé avec edraw. <https://fr.edrawsoft.com/>. Logiciel de création de schémas électriques.
- [7] Literature Distribution Center for ON Semiconductor. Datasheet du BC547. <https://www.arduino.cc/documents/datasheets/BC547.pdf>.
- [8] J.D. Legat. Lfsab 1201 physique 1 - electricité. Ecole Polytechnique de Louvain.
- [9] L. Francis ; C. Oestegs. Lfsab 1202 physique 2 - electricité et magnétisme dans la matière. Ecole Polytechnique de Louvain, 2017-2018.
- [10] ONA. Cécité et malvoyance. <https://ona.be/que-faisons-nous/sensibilisations-et-formations/cecite-et-malvoyance/>. Consulté le 15 mars 2018.
- [11] Mini Physics. Magnetic field of a solenoid. <https://www.miniphysics.com/ss-magnetic-field-due-to-current-in-a-solenoid.html>. Consulté le 12 mai 2018.
- [12] Marc C. Thompson and Ph. D. Inductance calculation techniques - part ii : Approximations and handbook methods, 1999.
- [13] Fondation Visio. Fiche technique Minitact. http://www.visiotronic.fr/sites/default/files/bd_fiches_techniques_minitact.pdf.
- [14] Fondation Visio. Fiche technique Tom Pouce. http://www.visiotronic.fr/sites/default/files/bd_fiches_techniques_tom_pouce.pdf.

Annexe A

Notations

Voici les notations que nous avons utilisées dans ce document :

- Heure : h
- Tension d'indice i , i étant défini dans la figure 1 : V_i [V]
- Courant d'indice i : I_i [A]
- Capacité i : C_i [F]
- La vitesse angulaire : ω [rad/s]
- Angle de déphasage : ϕ [rad]
- La fréquence : f [Hz]
- Amplitude du signal : A [V]
- L'inductance : L [H]
- Temps : t [s]
- Bloc d'indice : B_i
- Résistance d'indice i : R_i [Ω]
- Nombre de tours : N
- Perméabilité du vide : μ_0 [Tm/A]
- Longueur : l [m]
- Diamètre intérieur : D_i [m]
- Diamètre du fil : D_f [m]
- Surface : S [m^2]
- Le flux magnétique : ϕ_B [Wb]
- Largeur de la bobine plate : w [m]

Annexe B

Utilisation d'un transistor

Pour amplifier un signal dans notre circuit, nous utilisons un transistor NPN BC547¹. Par définition du Larousse, un transistor est un "Dispositif à semi-conducteur, qui, comme un tube électronique, peut amplifier des courants électriques, engendrer des oscillations électriques et assumer les fonctions de modulation et de détection."

Il se présente comme un composant électronique à 3 pattes conductrices. Une base, un émetteur et un collecteur. Au lieu d'utiliser un switch mécanique, nous pouvons nous tourner vers un transistor. En effet, les deux éléments accomplissent la même tâche : laisser passer un courant lorsqu'une condition est remplie. Dans le cas du transistor NPN, lorsque le voltage à la base a atteint un seuil, le courant pourra circuler entre le collecteur et l'émetteur. 2 choses sont à noter dans l'utilisation d'un transistor NPN. La première est que la charge de travail doit se trouver sur l'émetteur. La seconde est que la base ne peut pas admettre un courant trop grand, il doit donc être limité par une résistance. Nous allons voir comment calculer cette résistance.

0.0.1 Calcul de la résistance

Pour calculer la résistance de la base, nous devons trouver son β , défini comme le courant dans le collecteur divisé par le courant dans la base. $I_c = I_B \times \beta$. La valeur de β se trouve dans les caractéristiques techniques du transistor (figure B.1). Nous observons que le voltage nécessaire pour activer le transistor est de 0.7 volts (en vert sur fig B.1). Nous observons aussi un $\beta = 110$ lorsque notre I_c est de 2mA, et dans le cas où il est de 100mA, $\beta = 120$. Par sécurité il vaut mieux utiliser le β le plus bas possible, donc 110.

Une fois le β connu, nous pouvons modifier notre équation :

$$I_b = \frac{I_c}{\beta}$$

Le courant envoyé dans la base est connu, le voltage est de 0.7 volts. Tout est connu pour calculer la résistance :

$$R = \frac{V}{I_c}$$

1. <https://www.arduino.cc/documents/datasheets/BC547.pdf>

ON CHARACTERISTICS					
DC Current Gain ($I_C = 10 \mu A, V_{CE} = 5.0 V$)					
BC549B/547B/548B BC549C	BC547A Beta	β_{FE}	-	90	-
		-	270	-	
($I_C = 2.0 mA, V_{CE} = 5.0 V$)	BC546 BC547 BC548 BC547A BC549B/547B/548B BC547C/BC548C	BC547A/548A BC549B/547B/548B BC549C	110 110 110 110 420	- - - 180 520	450 800 800 220 800
($I_C = 100 mA, V_{CE} = 5.0 V$)			-	120 160 300	- -
Collector - Emitter Saturation Voltage ($I_C = 10 mA, I_B = 0.5 mA$) ($I_C = 100 mA, I_B = 10 mA$) ($I_C = 10 mA, I_B = \text{See Note 1}$)	$V_{CE(sat)}$	-	0.09 0.2 0.3	0.26 0.4 0.6	V
Base - Emitter Saturation Voltage ($I_C = 10 mA, V_{CE} = 5.0 V$)	$V_{BE(sat)}$	-	0.7	-	V
Base - Emitter On Voltage ($I_C = 2.0 mA, V_{CE} = 5.0 V$) ($I_C = 10 mA, V_{CE} = 5.0 V$)	$V_{BE(on)}$	0.55	-	0.7 0.77	V

FIGURE B.1 – Specsheat BC547 [7]

Annexe C

Caractérisation d'un circuit LC parallèle

Cette annexe reprend les calculs effectués lors de la modélisation mathématique des blocs 1 et 2.
Le circuit nous donne les informations suivantes :

$$V_L = -V_{C_1} \quad (\text{C.1})$$

$$I_{C_2} + I_{C_1} = I_L \quad (\text{C.2})$$

Les équations temporelles de la charge d'une capacité et d'une inductance :

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} \quad (\text{C.3})$$

$$I_C(t) = C_1 \frac{dV_C(t)}{dt} \quad (\text{C.4})$$

En utilisant (C.4), (C.1) et (C.3)

$$I_{C_1} = -C_1 \frac{dV_L}{dt} = -C_1 L \frac{d^2 I_L}{dt^2} \quad (\text{C.5})$$

Cherchons I_L en fonction de I_{C_1} .

Par (C.3),

$$\begin{aligned} I_L &= C_2 \frac{d(V_i + V_{C_1})}{dt} + C_1 \frac{dV_C}{dt} \\ I_L &= C_2 \frac{dV_{C_1}}{dt} + C_1 \frac{dV_{C_1}}{dt} \\ I_L &= (1 + \frac{C_2}{C_1}) I_{C_1} \end{aligned} \quad (\text{C.6})$$

En remplaçant (C.6) dans (C.5),

$$\begin{aligned} I_{C_1} &= -C_1 L \frac{d^2((\frac{C_2}{C_1} + 1) I_{C_1})}{dt^2} = -L(C_2 + C_1) \frac{d^2 I_{C_1}}{dt^2} \\ I_{C_1} \frac{1}{L(C_2 + C_1)} + \frac{d^2 I_{C_1}}{dt^2} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{C.7})$$

Résolvons maintenant cette équation différentielle.

Le polynôme caractéristique est $r^2 + \frac{1}{L(C_2+C_1)}$ et ses racines sont $\frac{i}{\sqrt{L(C_2+C_1)}}$ et $\frac{-i}{\sqrt{L(C_2+C_1)}}$. La solution générale est

$$\begin{aligned} I_{C_1}(t) &= A \exp \frac{it}{\sqrt{L(C_2+C_1)}} + B \exp \frac{-it}{\sqrt{L(C_2+C_1)}} \\ I_{C_1}(t) &= A \left[\cos \frac{t}{\sqrt{L(C_2+C_1)}} + i \sin \frac{t}{\sqrt{L(C_2+C_1)}} \right] + B \left[\cos \frac{t}{\sqrt{L(C_2+C_1)}} - i \sin \frac{t}{\sqrt{L(C_2+C_1)}} \right] \\ I_{C_1}(t) &= \cos \frac{t}{\sqrt{L(C_2+C_1)}} (A + B) + i \sin \frac{t}{\sqrt{L(C_2+C_1)}} (A - B) \end{aligned}$$

Pour que cette expression soit réelle, il faut $A = B*$. Nous arrivons donc à l'expression :

$$I_{C_1}(t) = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t)$$

Avec a et b deux réels. Posons : $a = \frac{I_0}{2} e^{i\Phi}$ et $b = \frac{I_0}{2} e^{-i\Phi}$. Par la formule d'Euler, nous obtenons l'expression sinusoïdale pour I :

$$I_{C_1}(t) = I_0 \cos(\omega_0 t + \Phi) \quad (\text{C.8})$$

Avec

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L(C_1+C_2)}} \quad (\text{C.9})$$

Par la relation C.6,

$$I_L(t) = \left(1 + \frac{1}{C_1+C_2}\right) I_0 \cos(\omega_0 t + \Phi) \quad (\text{C.10})$$

donc, grâce à la formule $V(t) = L \frac{dI}{dt}$ (C.3) :

$$V_L(t) = -\left(1 + \frac{1}{C_1+C_2}\right) \omega L I_0 \sin(\omega t + \Phi) \quad (\text{C.11})$$

En posant $A = \left(1 + \frac{1}{C_1+C_2}\right) \omega L I_0$ et par la relation C.1, nous arrivons à l'équation

$$V_{C_1}(t) = A \sin(\omega t + \Phi) \quad (\text{C.12})$$

Annexe D

Calculs du sommateur

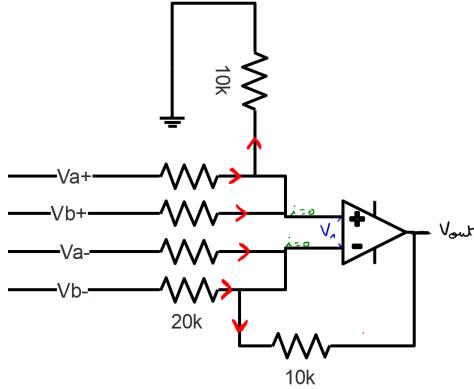


FIGURE D.1 – Sommateur

Les propriétés d'un amplificateur opérationnel idéal nous disent :

- La différence de tension entre la borne + et - est nulle
- Le courant vers la borne + et vers la borne - est nul

En utilisant la méthode des noeuds,

$$\frac{V_{a-} - V_1}{20} + \frac{V_{b-} - V_1}{20} = \frac{V_1 - V_{out}}{10}$$

et

$$\frac{V_{a+} - V_1}{20} + \frac{V_{b+} - V_1}{20} = \frac{V_1}{10}$$

On a donc le système suivant

$$V_{a+} + V_{b+} - 4V_1 = -2V_{out} \quad (\text{D.1})$$

$$V_{a+} + V_{b+} = 4V_1 \quad (\text{D.2})$$

En remplaçant D.2 dans D.1, on obtient

$$V_{a-} + V_{b-} - V_{a+} + V_{b+} = -2V_{out}$$

$$V_{out} = \frac{V_{a+} - V_{a-}}{2} + \frac{V_{b+} - V_{b-}}{2} \quad (\text{D.3})$$

Le résultant obtenu correspondant à l'intuition que l'on peut avoir, en effet il s'agit simplement de la somme des deux sinus sortant des oscillateurs LC avec un rapport 1/2 venant des résistances.

Appliquons maintenant D.3 au signaux des oscillateurs.

Posons :

- $A\sin(\omega_r t + \phi_r)$ le signal de l'oscillateur de référence
- $A\sin(\omega_d t + \phi_d)$ le signal de l'oscillateur de détection

$$V_{out} = \frac{A\sin(\omega_r t + \phi_r)}{2} + \frac{A\sin(\omega_d t + \phi_d)}{2} = \frac{A}{2}(\sin(\omega_r t + \phi_r) + \sin(\omega_d t + \phi_d))$$

Par la formule de Simpson pour la somme de sinus,

$$\begin{aligned} V_{out} &= A\sin\left(\frac{1}{2}(\omega_r t + \omega_d t + \phi_r + \phi_d)\right)\cos\left(\frac{1}{2}(\omega_r t - \omega_d t + \phi_r - \phi_d)\right) \\ V_{out} &= A\sin\left(\frac{1}{2}(\omega_r t + \omega_d t + \phi_r + \phi_d)\right)\cos\left(\frac{1}{2}(\omega_r t - \omega_d t + \phi_r - \phi_d)\right) \end{aligned}$$

Lorsque les signaux ont des fréquences différentes, leur déphasage est quasi nul. On a alors l'équation

$$V_{out} = A\sin\left(\frac{1}{2}(\omega_r t + \omega_d t)\right)\cos\left(\frac{1}{2}(\omega_r t - \omega_d t)\right) \quad (\text{D.4})$$

Par contre lorsque les signaux sont parfaitement à la même fréquence, le déphasage n'est plus si insignifiant, en jouant avec la capacité variable, on parvient même à obtenir un déphasage de π . On a alors

$$\cos\left(\frac{1}{2}(\omega_r t - \omega_d t + \pi)\right) = 0$$

Donc

$$V_{out} = 0 \quad (\text{D.5})$$