

BALISE EMETTRICE DE POSITIONNEMENT SOUTERRAIN

BIPSE



DOSSIER TECHNIQUE

Joan ERRA
Spéléo Club de Toulon Leï Aragnous
Décembre 2024
Contact :Joantoulon@gmail.com

Attribution non commerciale



Sommaire interactif

PRESENTATION DU BIPSE	2
ANALYSE FONCTIONNELLE ET STRUCTURELLE	3
SCHEMA FONCTIONNEL	3
LA BATTERIE	3
LA BOBINE	4
COMMANDE DU MARCHE ARRET	7
TRAITEMENT NUMERIQUE	9
AMPLIFICATEUR DE SIGNAUX	11
CAPACITÉ D'ACCORD	13
SCHEMA STRUCTUREL	15
FIRMWARE (PROGRAMME).....	16
FABRICATION DE LA CARTE ELECTRONIQUE (PCB).....	16
SCHEMAS DU CIRCUIT IMPRIME(PCB)	17
LISTE DU MATERIEL DE LA CARTE IMPRIME (PCB).....	18
TESTS - REGLAGES - MESURES.....	19
TEST DU MARCHE-ARRET.....	19
REGLAGE DU SEUIL D'ARRET AUTOMATIQUE.....	19
MESURES EN ENTREE ET SORTIES DE L'AMPLIFICATEUR DE PIUSSANCE.....	19
MESURE DU COURANT ET DE LA TENSION DE LA BOBINE.....	21
ASSEMBLAGE DU BIPSE	22
LE BOITIER	22
CONTENU DU BOITIER.....	23
ECLATÉ DU BOITIER	26
FABRICATION DE LA BOBINE.....	28
FABRICATION DU TOURET;.....	28
BOBINAGE DU TOURET	31
CARACTERISTIQUES DE LA BOBINE REALISEE	32

PRESENTATION DU BIPSE

L'ARCAS permet des positionnements jusqu'à 350m de profondeur, la mise en place de sa bobine d'émission nécessite une surface au sol suffisante et peut prendre un peu de temps.

Comme beaucoup de radiolocalisations s'effectuent à moins de 80m de profondeur, on peut se contenter d'une bobine d'émission moins puissante mais plus compacte et de mise en place rapide et facile. Cela m'a conduit à la réalisation de la BIPSE (**B**alise à **I**mpulsions pour le **P**ositionnement **S**outerrain par **E**lectromagnétisme)

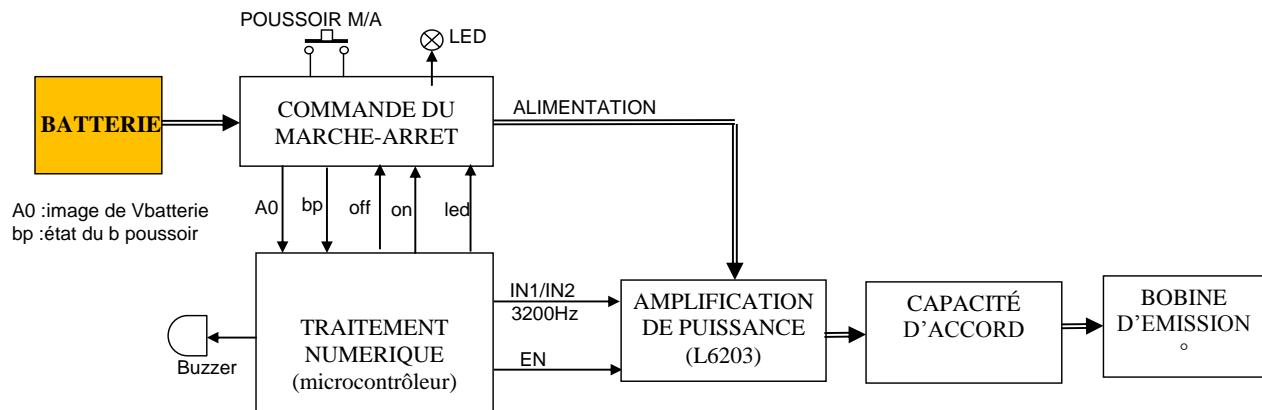


- Dimensions de la balise hors tout : 133mm x 235mm, ce qui permet de la transporter dans un bidon étanche de 6,5litres.
- La balise peut être installée posée sur le sol ou bien suspendue.
- Un niveau à bulle permet la mise en place de la BIPSE quand elle est posée au sol.
- Le boîtier contient l'ensemble du système, c'est-à-dire la bobine d'émission, son électronique de commande ainsi que la batterie d'alimentation.
- Un bouton poussoir à led permet d'assurer la mise sous tension et l'arrêt de la balise.
- Pendant le fonctionnement la led et le buzzer clignotent au rythme des salves d'impulsions émises.
- Une poignée facilite la manipulation et le transport de la balise. Elle protège le poussoir en évitant les mises en route intempestives, elle permet aussi la suspension du BIPSE.
- Le couvercle supérieur se dévisse pour permettre la recharge de la batterie.
- L'autonomie est de 5h30.
- La balise émet des bips de fréquence 3200Hz, ce qui permet d'utiliser le récepteur ARCAS pour la réception.. Les bips de 80ms sont émis toutes les secondes. Afin de différencier ce signal du signal émis par une éventuelle clôture électrique, un double bip est émis tous les 4 bits.
- Le poids total de la balise est de 1,9kg



ANALYSE FONCTIONNELLE ET STRUCTURELLE

SCHEMA FONCTIONNEL



Hormis la batterie, la bobine d'émission et le bouton poussoir à led, tout le reste est intégré sur une carte électronique.

LA BATTERIE

Pour un prix raisonnable, actuellement ce sont les batteries Lithium qui ont les meilleures performances, en particulier au niveau du rapport poids/puissance et volume/puissance. Ce sont des spécificités importantes pour la BIPSE, puisqu'on doit loger la batterie dans le boîtier.

La batterie est donc tout près de la bobine d'émission, il ne faut pas qu'elle dévie les lignes de champs et absorbe une partie de l'énergie électromagnétique délivrée par la bobine. Cela exclut les batteries Lithium-ion qui contiennent des métaux ferromagnétiques. Nous avons donc choisi une batterie Lithium-polymère (Li-po) qui ne contient pas de métal ferromagnétique.

Le choix s'est porté sur le modèle suivant

Marque : OVONIC

Type : LiPo

Nombre d'éléments : 6S1P

Tension nominal : 22,2V

Capacité affichée : 1300mAh

Dimensions : 74 x 34 x 44



Nous avons constaté expérimentalement qu'il fallait tout de même l'éloigner d'au moins 1,5cm de l'axe de la bobine pour qu'elle ne perturbe pas le champ magnétique émis.

Pour ce type de batterie, à la décharge, la tension ne doit jamais descendre en dessous de 3V par élément, soit 18V pour une batterie 6S1P, sinon la batterie devient hors d'usage. Par mesure de sécurité le seuil choisi sera de 18,5V

L'électronique embarquée devra donc veiller au grain, en coupant l'alimentation lorsque la tension atteint 18,5V.

LA BOBINE

Dans ce paragraphe on trouvera le cheminement qui permet de dimensionner la bobine d'émission.

On a choisi un **diamètre moyen du bobinage à 96mm**, afin qu'il reste logeable dans le boîtier cylindrique. Il reste à déterminer la section (ou le diamètre) du fil et le nombre de spires nécessaires.

Moment magnétique nécessaire pour la bobine d'émission

Il s'agit d'atteindre 80m de profondeur .Des essais avec l'ARCAS montrent qu'un moment magnétique d'amplitude 12Am^2 suffit. Cette valeur devra être obtenue pour la tension nominale de la batterie qui est de 22,2V.

Courant maximum de pointe admissible

Une amplitude de courant de 5A est la valeur maximum que peut fournir le circuit électronique qui commande la bobine . On veillera à ne pas dépasser 4,5A.

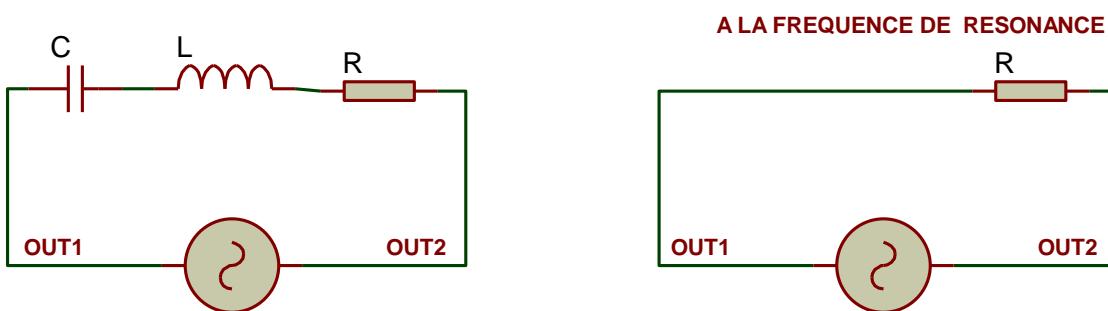
Spécificité du circuit d'alimentation de la bobine

Si on alimente directement la bobine d'inductance L par le générateur alternatif, le courant sera fortement limité par la réactance $L\omega$.

L : inductance de la bobine et ω pulsation du courant.

La pulsation ω est proportionnelle à la fréquence f : $\omega=2\pi f$

En plaçant un condensateur en série avec la bobine, on réalise alors un circuit résonant de type RLC. On parle de condensateur d'accord.



R est la Résistance Equivalente Série de la bobine (ESR).

Dans le circuit RLC série, on montre que la réactance du condensateur $1/C\omega$ se soustrait à celle de la bobine $L\omega$. Pour une fréquence f_0 correspondant à une pulsation ω_0 , telle que $L\omega_0=1/C\omega_0$, les réactances sont égales. La réactance totale devient nulle et l'impédance du circuit RLC se réduit à la résistance R (ESR). Le courant devient très grand, on parle de résonance. Le condensateur C sera donc calculé pour que le circuit soit à la résonance à 3200Hz.

Si le générateur délivre une tension alternative sinusoïdale d'amplitude U, à la résonance, le courant aura pour amplitude $I=U/ESR$

Dans cette application ESR sera légèrement supérieure à la résistance ohmique du bobinage à cause de l'effet de peau.

L'effet de peau est du au fait que lorsqu'on augmente la fréquence du courant, celui a tendance à abandonner le centre du câble pour se propager à sa périphérie. La section utile du cuivre pour le passage du courant s'amenuise quand la fréquence augmente, ce qui créee une augmentation de la résistance.

Exemple à 3200Hz un enroulement avec un diamètre de fil de 0,5mm verra sa section utile passer à 89% de la section totale et donc sa résistance augmenter de 12,5% par rapport à la valeur en continu (0Hz).

Ce pourcentage augmente avec le diamètre du fil, ainsi avec un fil de 1mm de diamètre l'augmentation sera de 25%

Détermination de la résistance que doit avoir la bobine.

Comme la batterie doit être logeable dans le cylindre, et compte-tenu de la place disponible, nous avons choisi une batterie Lipo de 22,2V-1300mAh. Dans la pratique comme on doit éviter la décharge complète de ce type batterie, on peut admettre une perte de 20% de la capacité restituée qui sera donc environ de 1000mAh.

La résistance de la bobine va déterminer l'intensité du courant qui la traverse. Dans l'absolu, plus elle sera petite, plus le courant et donc la portée de la balise seront grands, mais malheureusement moins la batterie aura d'autonomie. Il faut donc calculer le courant puis la résistance pour avoir l'autonomie désirée de 5,5h.

Cette autonomie de 5,5h donne un courant moyen total de 180mA. A ces 180mA il faut enlever les 40mA de consommation de la carte électronique, soit 140mA pour la consommation moyenne de la bobine, Compte-tenu du fait que la bobine n'est alimentée que 80ms toutes les secondes, pour avoir un courant moyen de 140mA, les calculs montrent que la valeur du courant crête dans la bobine sera alors d'environ 2,75A.

Ce courant est lié à la tension de la batterie (22V) et à la résistance de la bobine. Pour avoir une amplitude de courant à 2,75A, la résistance de la bobine doit être de $22/2,75=8\Omega$.

Ces 8Ω correspondent à la résistance équivalente Série (ESR) du bobinage. A 3200Hz elle sera légèrement supérieure à la résistance en courant continu.

Expression du moment magnétique

Il s'agit d'exprimer le moment magnétique en fonction de l'amplitude de la tension appliquée et qui est connue (22,2V).

On sait que $M=NIS$, avec N:nombre de spires , I : intensité du courant, S surface d'une spire de la bobine.

$$\text{Soit } D \text{ le diamètre de chaque spire, il vient } M = \frac{NI\pi D^2}{4} \text{ (a)}$$

Du fait de la résonance série, la résistance se retrouve alimenté en tension et de ce fait $I = \frac{U}{ESR}$. En première approximation on peut confondre R et ESR, donc $I = \frac{U}{R}$ (b).

Hors R est proportionnel à la longueur l du fil bobiné donc proportionnel au nombre de spires N

$R=\rho l/Sc$ avec ρ :résistivité du cuivre du câble $=1,810^{-8}\Omega m$, l: longueur totale du fil en m, Sc: section du fil de cuivre en m^2 .

On a aussi $l=\pi DN$ avec D diamètre de la bobine en m,N le nombre de spires

$$\text{Il vient } R = \frac{\rho \pi D N}{Sc} \text{ (c)}$$

On remplace I de (a) par son expression en (b), puis R par son expression (c), après simplification, il vient : $M = \frac{UDSc}{4\rho}$

On pourrait penser que plus N est grand plus le moment magnétique est grand. Et bien, non car si on augmente le nombre de spires on augmente la résistance ce qui diminue le courant !

Du fait de l'effet de peau Sc (Section du Cuivre) doit être remplacé par Su (Section utile du cuivre) il vient

$$M = \frac{UDSu}{4\rho} \text{ (c)}$$

Conclusion : alimenté avec un générateur de tension et en résonance série avec un condensateur d'accord, **le champ magnétique émis par la bobine est indépendant du nombre de spires. Pour rayonner un champ magnétique important, il faut jouer sur la tension, le diamètre des spires et la section utile du cuivre.**

Calcul du diamètre du fil de bobinage

On déterminera la section du conducteur Sc et on en déduire son diamètre d.

D'après la relation (c), sachant qu'on désire $M=12\text{Am}^2$ et qu'on a $U=22\text{V}$ on en déduit

$$Su : Su = \frac{4\rho M}{UD}$$

On souhaite $M=12\text{Am}^2$, on a $U=22,2\text{V}$, $D=96\text{mm}$; il vient $Su=0,4\text{mm}^2$ ce qui correspond à un fil de diamètre utile $0,7\text{mm}$ sans tenir compte de l'effet de peau

En prenant un fil de diamètre 0,8mm soit une section $Sc=0,5\text{mm}^2$, à $3,2\text{kHz}$ d'après les calculs d'effet de peau la surface utile Su sera ramenée à 85% de Sc soit $Su=0,42\text{mm}^2$ ce qui correspond à la section utile désirée.

Détermination du nombre de spires N

On va d'abord déterminer la longueur de fil nécessaire pour avoir $ESR=8\Omega$ et on en déduira le nombre de spires nécessaires.

A $3,2\text{kHz}$, avec un fil de $0,8\text{mm}$ de diamètre, la section utile sera ramenée à 85% de Sc et donc un ESR de 8Ω correspond à une résistance en continu de $8*0,85=6,8\Omega$

Pour obtenir cette résistance de $6,8\Omega$ avec du fil de cuivre de $0,8\text{mm}$ de diamètre, il faut **190m de fil**.

Bobinés sur un diamètre moyen de 96mm cela donne **631 spires**.

COMMANDE DU MARCHE ARRET

La commande marche-arret de la balise, ne peut pas se satisfaire d'un simple interrupteur. En effet, l'appareil doit s'arrêter lorsque la tension batterie descend à $18,5\text{V}$.

On a choisi un bouton poussoir (toujours ouvert au repos) plutôt qu'un interrupteur à 2 positions stables.

Pour mettre en route la balise l'opérateur doit appuyer plus de 3 secondes sur le bouton poussoir.

L'opérateur peut arrêter le fonctionnement en ré-appuyant sur le bouton.

La balise s'arrêtera aussi lorsque la tension de la batterie atteindra $18,5\text{V}$.

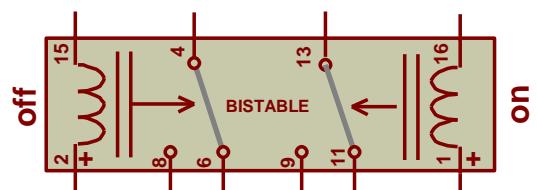
Pour relayer le bouton poussoir, on a utilisé un relais bistable. C'est un relais dont chaque état est lié à une bobine.

Pour fermer le contact relais il suffit d'envoyer une impulsion de quelques millisecondes sur la bobine

« on » et pour l'ouvrir il faut faire la même chose avec la bobine « off ».

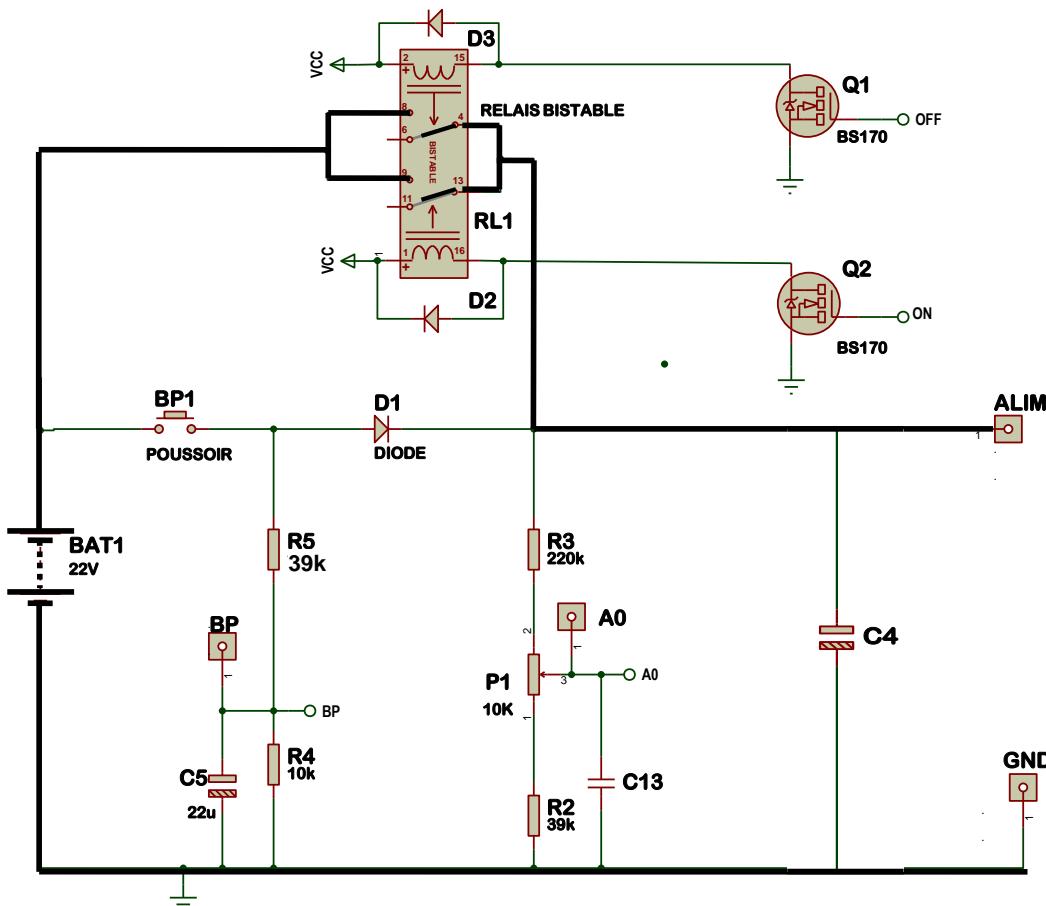
Ici l'avantage est qu'on n'a pas besoin d'alimenter les bobines en permanence, ce qui soulagera un peu le petit régulateur de la carte arduino qui délivre le 5V des bobines.

Ce relais dispose de 2 contacts, ils seront mis en parallèle pour supporter le courant près de 3A qui circulera.



Le schéma réduit ci-après permet d'expliquer le fonctionnement de la commande du Marche-arrêt. En traits gras, le courants forts.

Structure correspondante



On a placé les transistors Q1 et Q2 pour permettre au microcontrôleur de commander les bobines du relais. En effet, le courant que peut fournir une sortie du microcontrôleur est un peu juste pour cela.

Les diodes D2 et D3 dites de « roue-libre » protègent les transistors . En effet, sans elles, lors de la coupure du courant dans les bobines, du relais il apparaîtrait des pic de surtensions qui détruirait les transistors.

La led est intégrée au bouton poussoir étanche



Quand la batterie prend de l'âge et que sa résistance interne augmente, les pics de courants lors des bips peuvent engendrer des chutes de tensions de l'alimentation. Le condensateur C4 qui se recharge entre deux bips successifs, lisse le courant batterie et diminue l'amplitude de ces pics.

Mise en marche

Quand on appuie sur le bouton poussoir, l'alim s'effectue via D1. Le pont diviseur de tension R2,P1,R3 envoie sur l'entrée analogique A0 du microcontrôleur une image de la tension batterie .

Si la tension batterie est supérieure à 18,5V, le microcontrôleur commande la bobine « on » du relais bistable, qui vient au bout de 3 secondes relayer le poussoir.

L'opérateur peut alors relâcher le bouton, la mise en route à démarré. Le microcontrôleur fera clignoter la led au rythme des salves envoyées.

Récupération de l'état du poussoir : montage formé par R4,R5,C5,D1

Quand la balise fonctionne (relais sur « on »), la diode D1 est bloquée ainsi le potentiel en BP sera fonction de l'état du poussoir.

Le pont diviseur R4-R5, divise la tension par 5 de façon à ne pas envoyer sur l'entrée du microcontrôleur une tension supérieure à 5V.

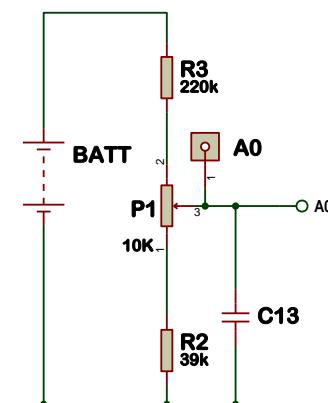
Le condensateur C5 associé aux résistances R4 et R5 forme un filtre passe bas, qui va éliminer des impulsions parasites dues aux rebondissements mécaniques du poussoir.

Si en cours de fonctionnement, l'opérateur ré-appuie brièvement sur le poussoir, une impulsion est envoyée via le signal « bp » au microcontrôleur. Celui-ci commandera alors la bobine « off » du relais, qui déconnectera le montage de la batterie.

Dimensionnement du pont diviseur R2,P1,R3

Il permet de ramener une tension proportionnelle à la batterie qui peut monter à 25,2V à pleine charge à des valeurs compatibles avec l'Arduino, c'est-à-dire inférieures à 5V.

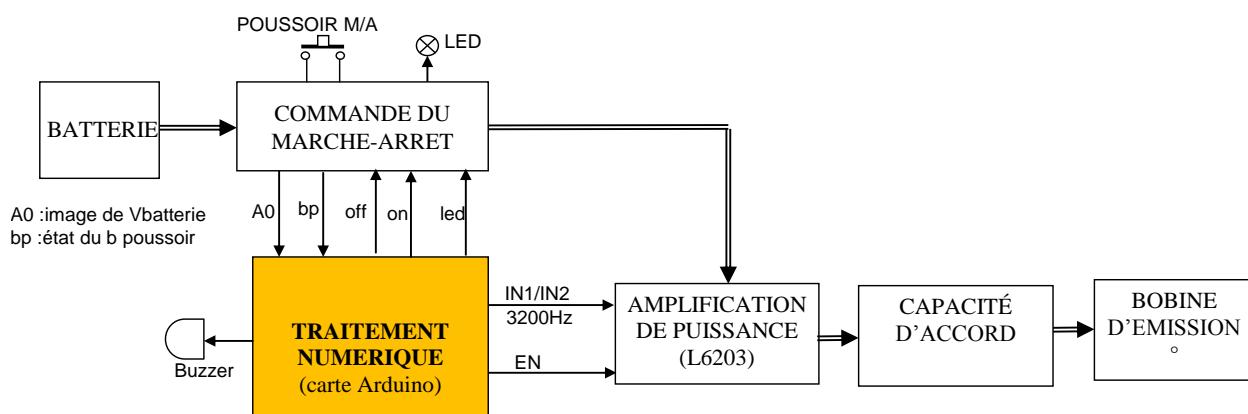
Compte-tenu de la tolérance des résistances , un ajustage s'impose qui sera réalisé par Le potentiomètre P1. Ceci afin d'ajuster précisément la valeur seuil pour la tension batterie à 18,5V à $\pm 10\%$, sans avoir à modifier le seuil dans le programme. La valeur nominale sur A0 sera de 3,02V.



TRAITEMENT NUMERIQUE

Le traitement numérique est assuré par une carte Arduino pro mini , contenant un microcontrôleur Atmega328P, un quartz de 16MHz qui cadence son fonctionnement et un régulateur qui fourni la tension d'alimentation Vcc=5V au microcontrôleur.

Malheureusement, ce régulateur ne supporte pas plus de 16V à son entrée. Comme la batterie a une tension supérieure à 16V, il a fallu intercaler un étage abaisseur de tension entre la batterie et la carte Arduino. Pour effectuer cette chute de tension, on a choisi d'utiliser un régulateur délivrant 8V en sortie.



Il est chargé des tâches suivantes :

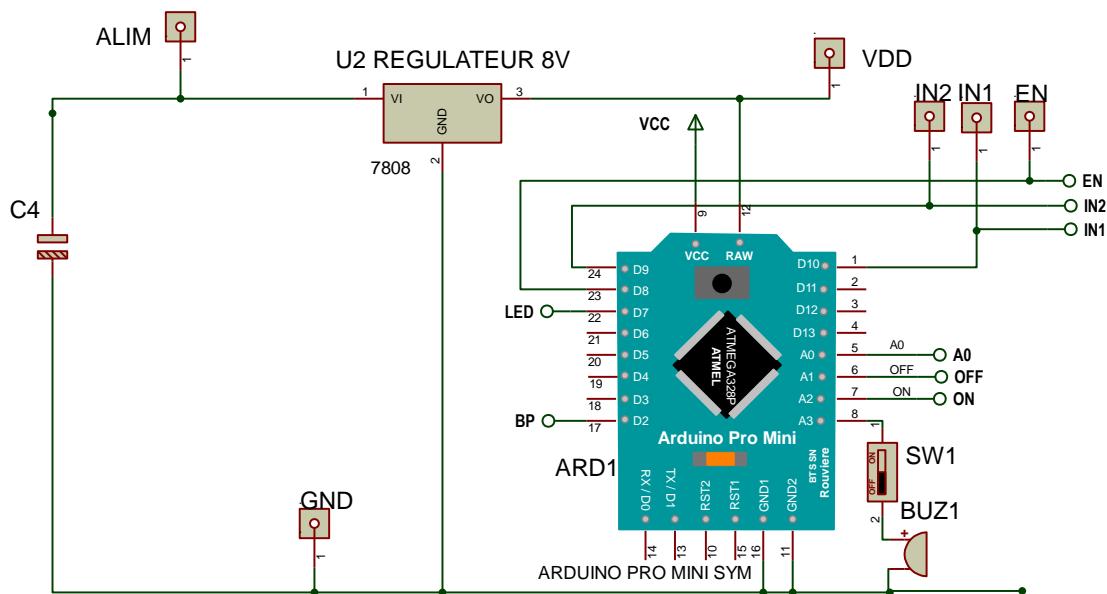
Gérer le Marche/Arrêt, conformément à la description ci-avant.

Concerne les signaux : A0,bp,off,on

- Générer les signaux à émettre, conformément à la description qui va suivre.
Concerne les signaux : in1,in2,en.

- Commander la led et le buzzer

Structure correspondante



Génération des signaux :

Le but est d'alimenter la bobine par un signal BF à 3200Hz de façon intermittente pour obtenir les bip-bip. A raison d'un bip de 80ms par seconde.

Pour cela la carte Arduino génère

- De façon continu, le signal BF de 3200Hz, de fréquence précise car obtenue à partir du quartz inclus dans la carte Arduino.
- un signal rectangulaire de période 1s. Celui-ci autorise ou pas le signal BF à être envoyé à la bobine. Au niveau logique 1 qui dure 80ms, le signal BF est transmis à la bobine : le reste de la période de 1s, la bobine n'est pas alimentée.

Le choix de ce temps mort de 1s est un compromis :

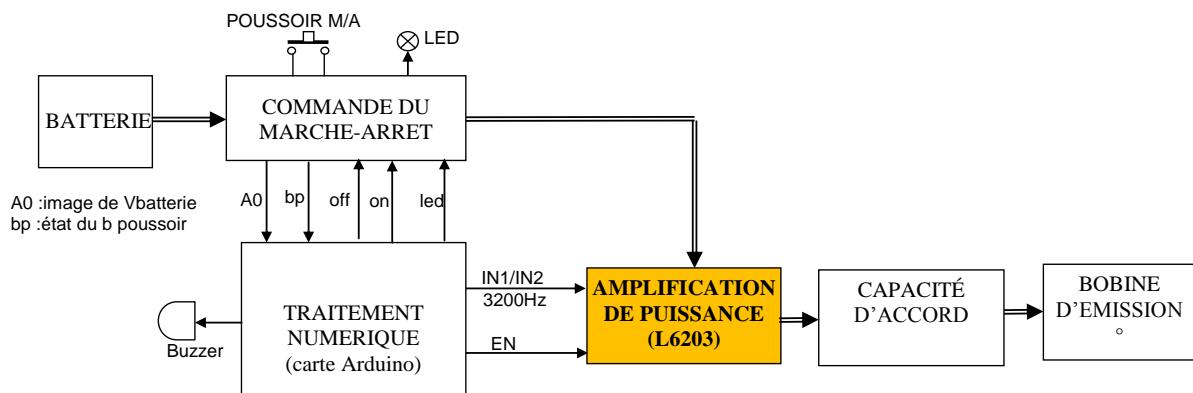
- En effet si par exemple on opte pour un temps mort de 3s, on s'aperçoit que le niveau sonore à partir duquel l'oreille détecte le bip-bip doit être bien plus élevé qu'en cas de temps mort de 1s. J'explique cela par un phénomène de rémanence de l'audition qui permet de reconnaître plus facilement un signal s'il réapparaît dans une limite de temps donné.

- On pourrait prendre un temps mort beaucoup plus court que la seconde, mais dans ce cas on aurait une augmentation de la consommation du système.

On aura aussi émission d'un double bip tous les 4 bips, cela permet de d'identifier plus facilement le signal au niveau de la réception, en cas de perturbations du à une clôture électrique.

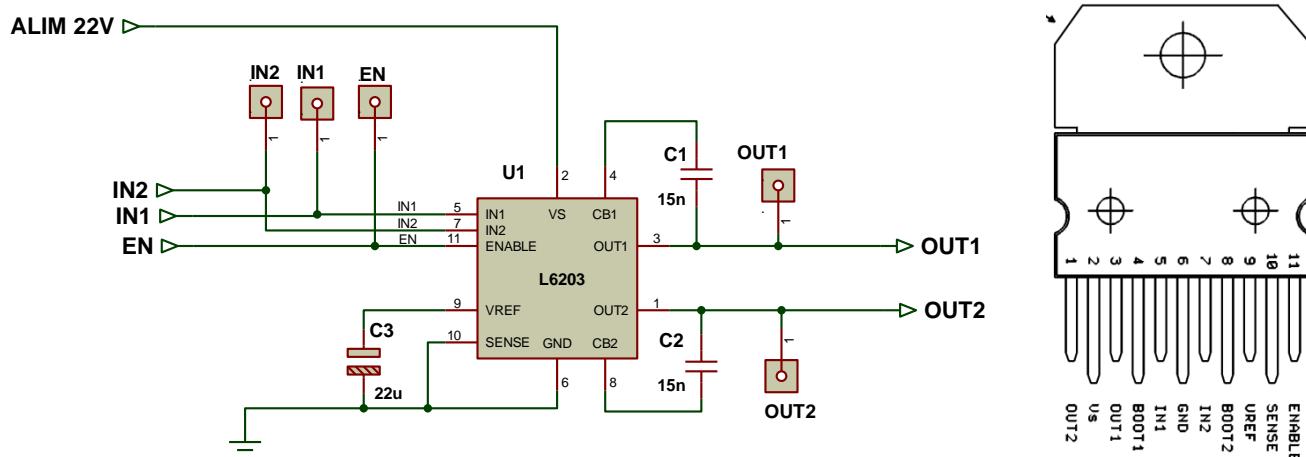
La led et le buzzer clignoteront au rythme des bips envoyés par la bobine. Le petit interrupteur SW1, installé sur la carte, permettra de désactiviter le buzzer.

AMPLIFICATEUR DE SIGNAUX



Structure correspondante

On a choisi le circuit intégré L6203, contenant un pont de transistor en H de 4 transistors MOSFET fonctionnant en commutation.

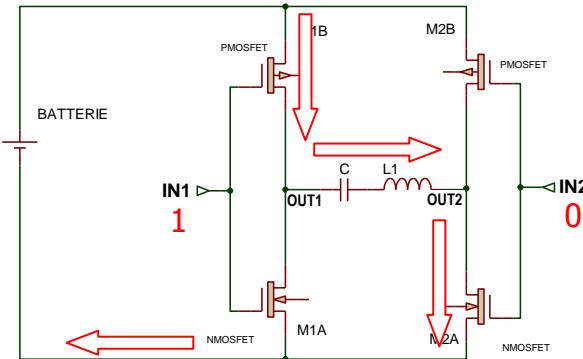


Celui-ci peut être alimenté jusqu'à 50V et délivrer un courant de valeur crête 5A.

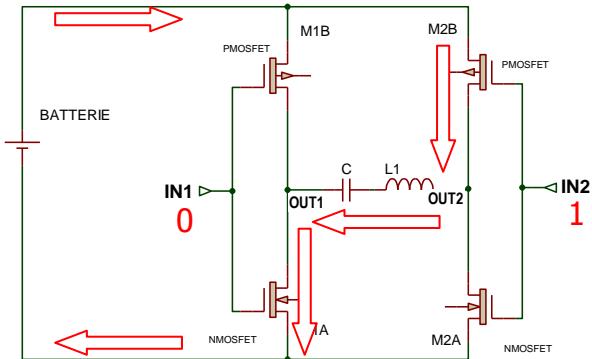
Il dispose d'un disjoncteur thermique qui arrête son fonctionnement en cas de surchauffe.

Principe de fonctionnement :

L1 représente la bobine d'émission et C son condensateur d'accord à 3200Hz.



IN1 à 1 et IN2 à 0
Le courant dans la bobine circule dans un sens



IN1 à 0 et IN2 à 1
Le courant circule dans la bobine l'autre sens.

Pour obtenir entre OUT1 et OUT2 un signal alternatif rectangulaire à 3200Hz en sortie du pont, on envoie donc un signal rectangulaire à 3200Hz sur le signal de commande IN1 et son complémentaire sur IN2.

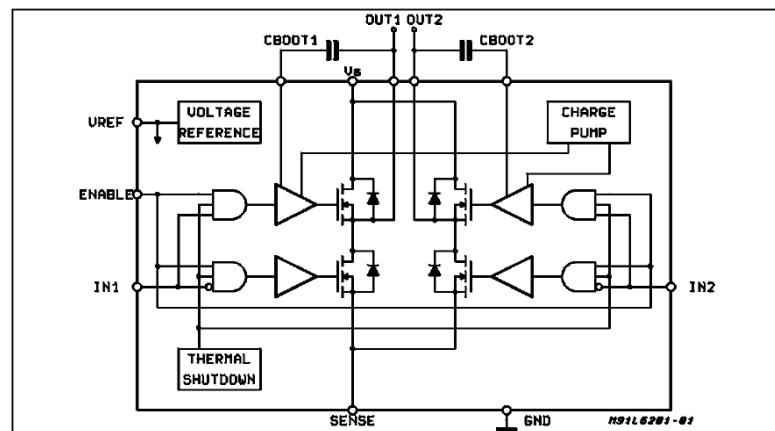
Si la tension batterie est de 22V, entre OUT1 et OUT2, le signal atteindra 44V crête à crête.

L'intérêt de fournir un signal rectangulaire est de faire travailler les transistors du pont en commutation, ce qui permet de diminuer fortement les pertes. On a alors un rendement maximum.

La bobine d'émission accordée sur la fréquence de 3200Hz à l'aide du condensateur C, aura un effet de filtre sélectif sur le courant, qui sera sinusoïdal à la fréquence de 3200Hz.

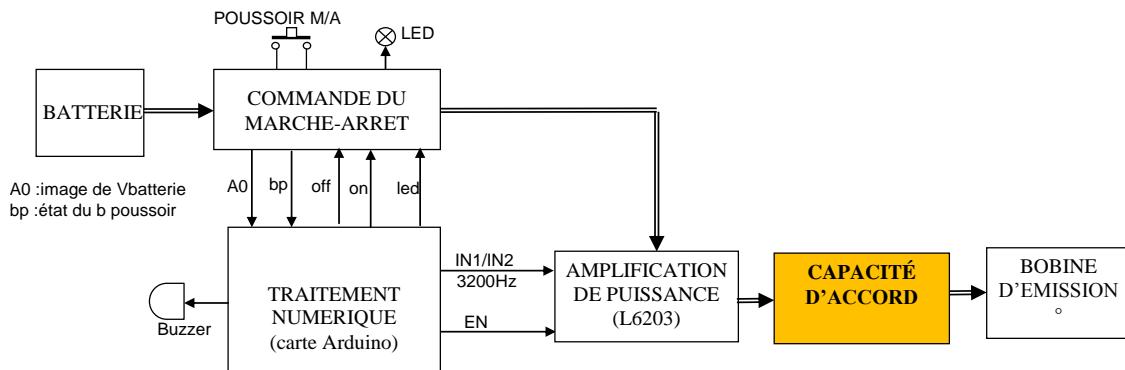
Ci-contre un schéma simplifié du L6203 qui contient également une électronique de commande.

On voit qu'en plus des entrées IN1 et IN2, il dispose d'une entrée Enable (Autorisation) qui à 0 bloque les commandes IN1 et IN2 ainsi que les 4 transistors du pont, ce qui a pour effet d'annuler le courant de sortie. C'est cette entrée Enable



(En) qui est utilisée pour fixer la durée (80ms) et la périodicité des bip (1s).

CAPACITÉ D'ACCORD



Le rôle de la capacité d'accord est expliqué dans le paragraphe « dimensionnement de la bobine d'émission ».

Détermination de la valeur de la capacité d'accord

Celle-ci sera donc calculée pour que le circuit soit à la résonance à $f_0=3200\text{Hz}$.

La résonnance sera obtenue quand les réactances de la bobine et du condensateur auront même réactance,

$$\text{soit } L\omega_0 = \frac{1}{C\omega_0} \text{ avec } \omega = 2\pi f_0 \text{ il vient } C = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L}$$

Pour déterminer C , il faut donc connaître la valeur de l'inductance L de la bobine. Une solution est de la mesurer précisément avec un bon RLCmètre.

Avec la bobine que j'ai réalisé, j'ai mesuré $L=29,25\text{mH}$, cela donne $C=84,57\text{nF}$.

La valeur théorique prévue doit être respectée très précisément, cela est du au facteur de qualité élevé de la bobine.

Ainsi dans le cas de la bobine que j'ai réalisé, avec $L=29,5\text{mH}$, $\text{ESR}=8\Omega$ à 3200Hz il faut $C=84,57\text{nF}$ et dans ce cas le courant vaudra sous 22V : $22/8=2,75\text{A}$.

J'ai relevé à l'aide d'un logiciel de simulation électronique que :

- Avec un condensateur 5% plus élevé ou plus faible, le courant chutera de plus de 70% !!
- Avec un condensateur 1% plus élevé le courant chutera de 13%
- Avec un condensateur 1% plus faible le courant chutera de 26%

En conclusion, il faut ne pas dépasser 1% d'écart entre la valeur du condensateur adopté par rapport à la valeur théorique.

Détermination de l'amplitude de la tension que doit supporter la capacité d'accord

$U=XcI$ avec $I=2,75A$ et Xc reactance du condensateur de $84,57nF$ à $3200Hz$

Sachant que $Xc = \frac{1}{2\pi foC} = 588\Omega$, il vient $U=588 \times 2,75=1617V$!!!

Le circuit RLC n'est pourtant alimenté que par 22V, c'est le phénomène de résonance qui provoque cette surtension à 1660V aux bornes du condensateur et aussi aux bornes de la bobine. Attention aux doigts, ça pique !

Choix des condensateurs à adopter

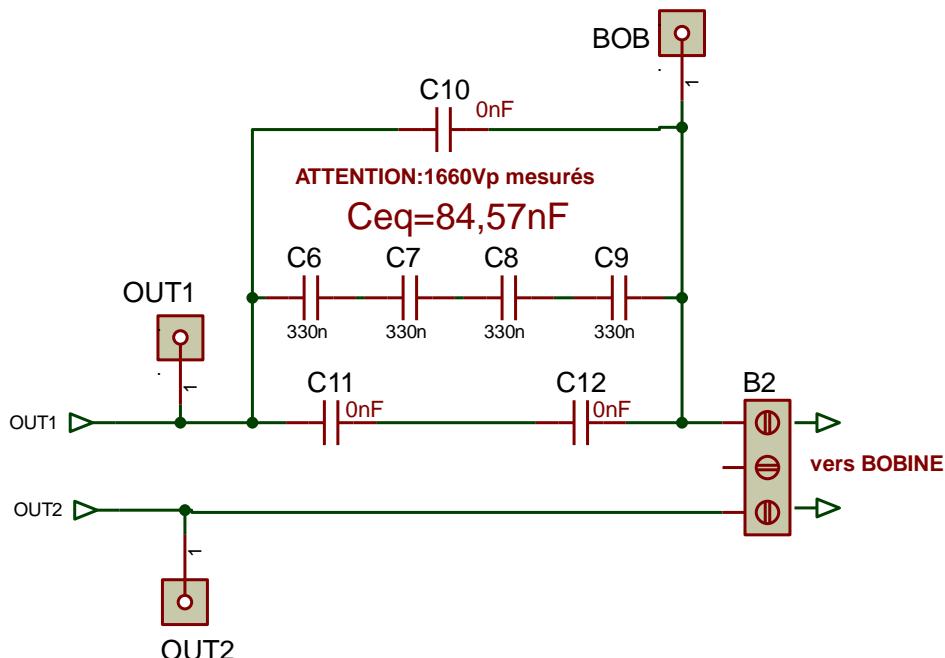
Evidemment on ne trouve pas de condensateur à la valeur de $84,57nF$.

J'ai pu obtenir cette valeur , j'ai acheté un lot de 15 condensateurs de $330nF/630V$ à 10% , j'en ai trouvé 4 qui mis en série donnent la valeur attendue de $84,57nF$.

Chaque condensateur peut supporter $630V$, l'ensemble peut supporter $4 \times 630=2520V$ ce qui convient car supérieur à $1617V$.

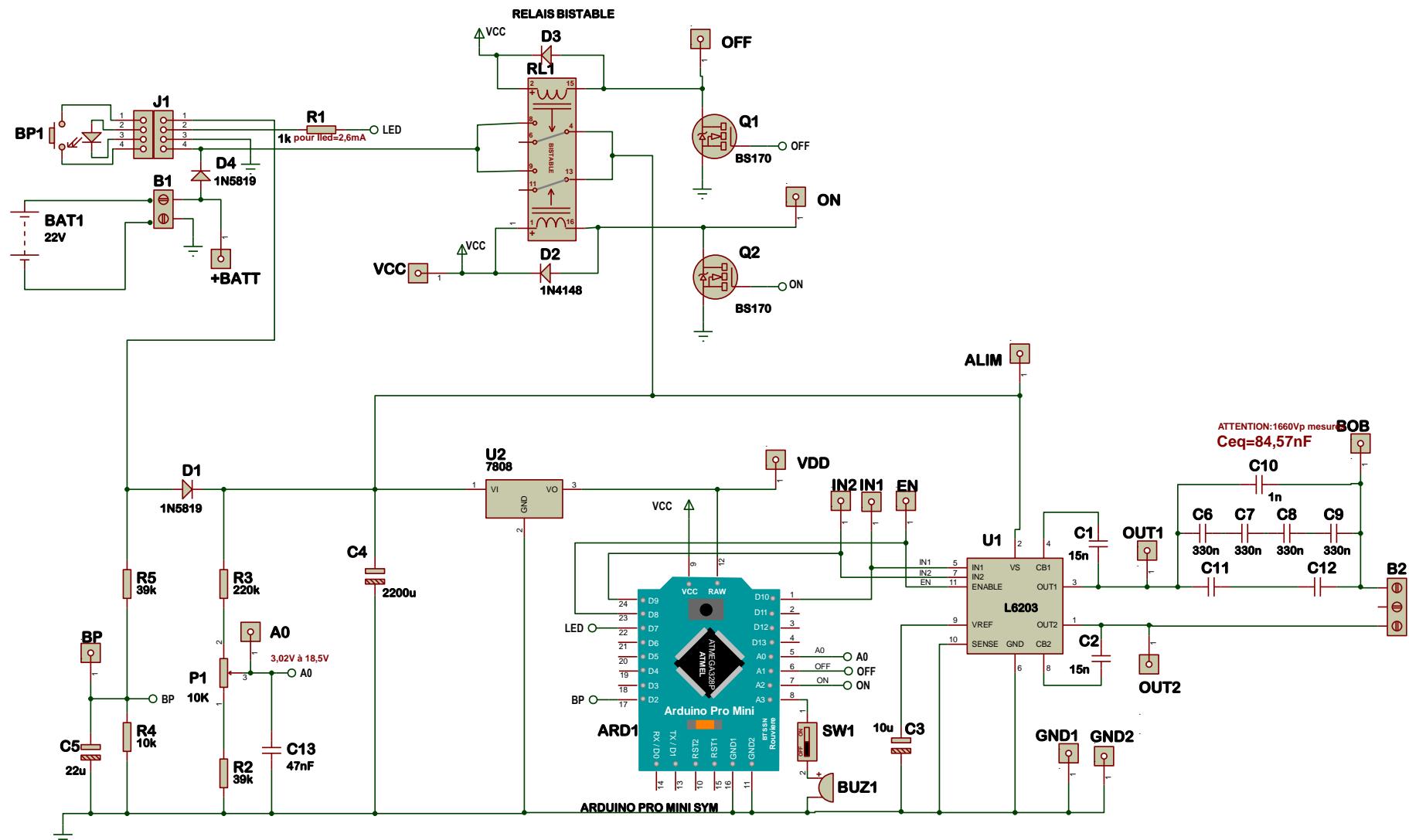
Mon choix s'est porté sur les condensateurs à film métallisé de polypropylène de type CBB.

Structure correspondante



Tous ces condensateurs ont été placés pour offrir des emplacements sur la carte. Ceci dans le but de pouvoir obtenir la valeur calculée de la capacité, par des combinaisons séries et/ou parallèles de condensateurs de valeurs normalisées.

SCHEMA STRUCTUREL

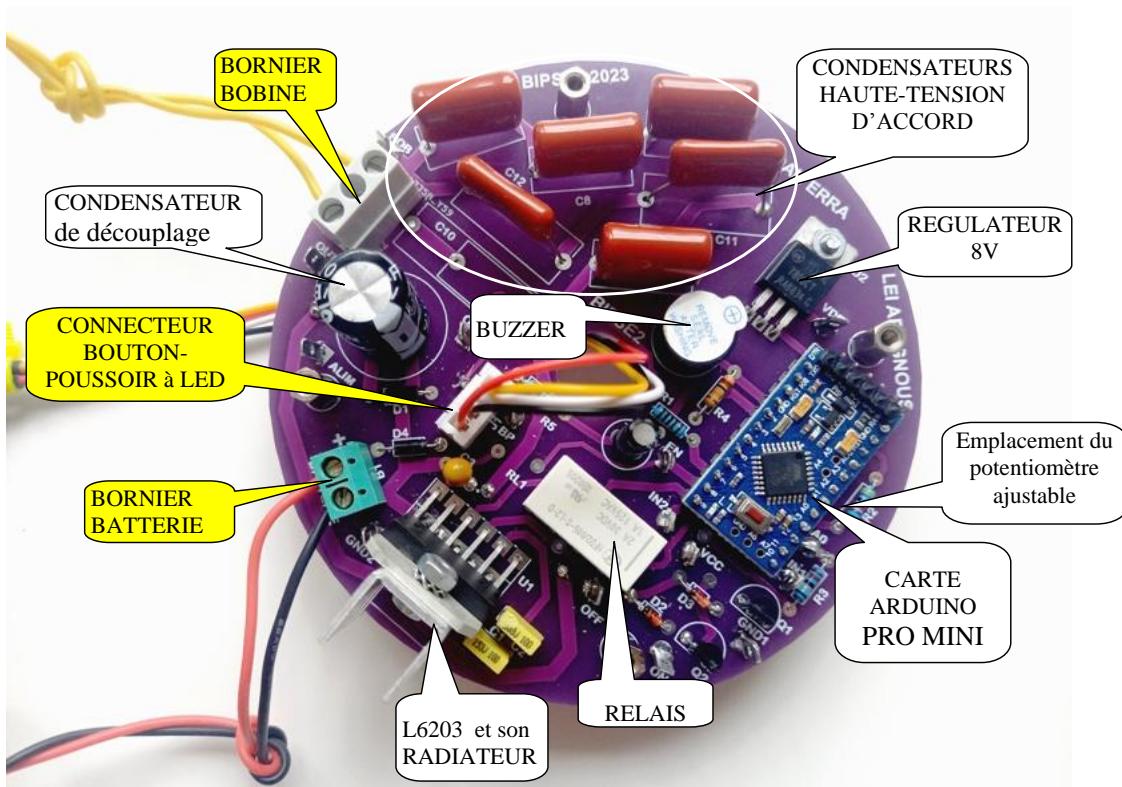


FIRMWARE (PROGRAMME)

Disponible en téléchargement sur le site.

FABRICATION DE LA CARTE ELECTRONIQUE (PCB)

Attention : Sur la photo, il s'agit du premier prototype, sans le potentiomètre de réglage de la tension d'arrêt de fonctionnement



- Le circuit imprimé est de type double face à trous métallisés..
- Des fichiers au format Gerber, sont disponibles pour la sous-traitance de la fabrication du PCB par un industriel.

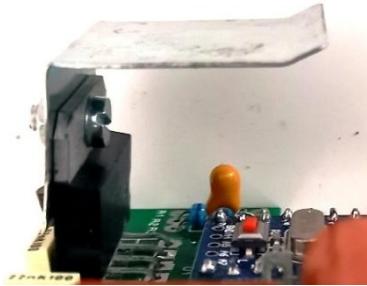
Il est possible de télécharger gratuitement un lecteur de fichiers Gerber qui vous permettra de visionner et d'imprimer les différentes couches du circuit imprimé.

- Dimensions de la carte imprimée : disque de diamètre 108mm.
- On pourra équiper le L6203 d'un petit dissipateur thermique pour TO220.

Si on n'en dispose pas on pourra utiliser une tôle d'aluminium repliée à 90°. Sous terre, c'est-à-dire pour des températures ambiantes maximales de 15°, le dissipateur n'est pas nécessaire. Par contre si l'émetteur est



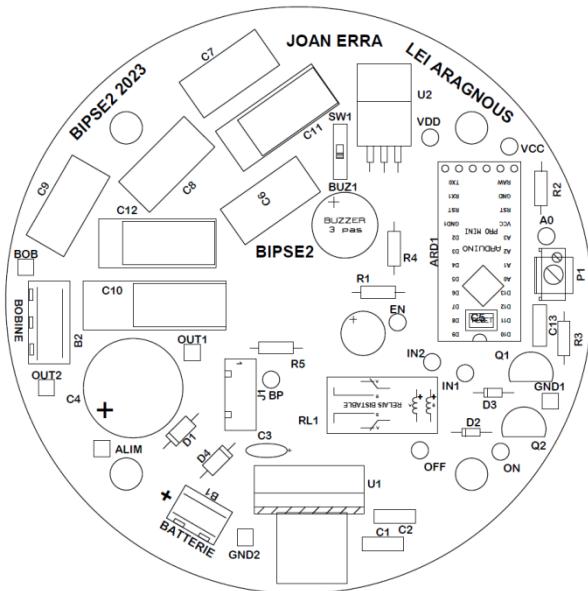
placé en plein soleil à une température ambiante sous abri de 30°C ou plus, la protection thermique interviendra. Sans le dissipateur cela provoquera des arrêts de fonctionnement non destructifs.



SCHEMAS DU CIRCUIT IMPRIME(PCB)

Attention, les schémas ne sont pas à l'échelle 1(disque de 108mm de diamètre)

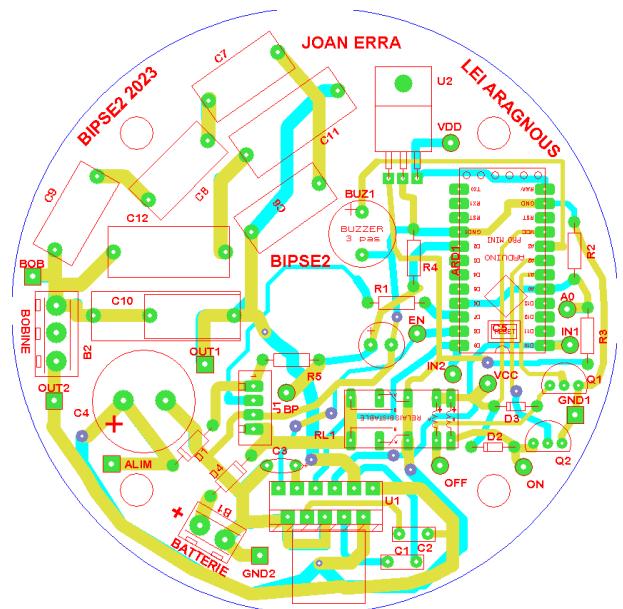
- Vue composants



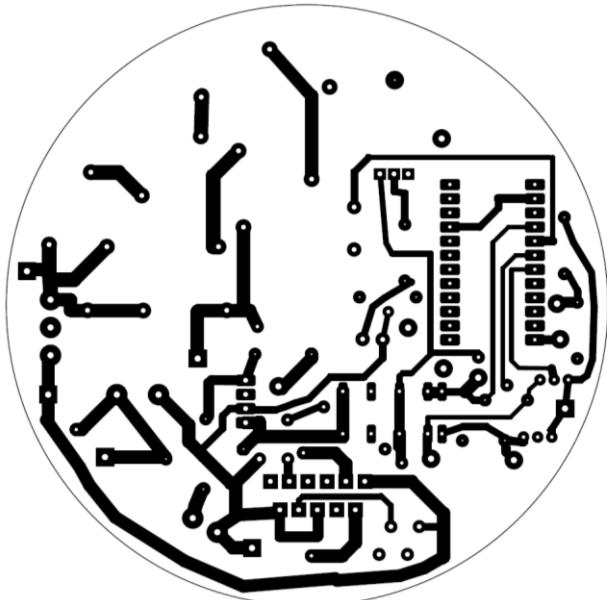
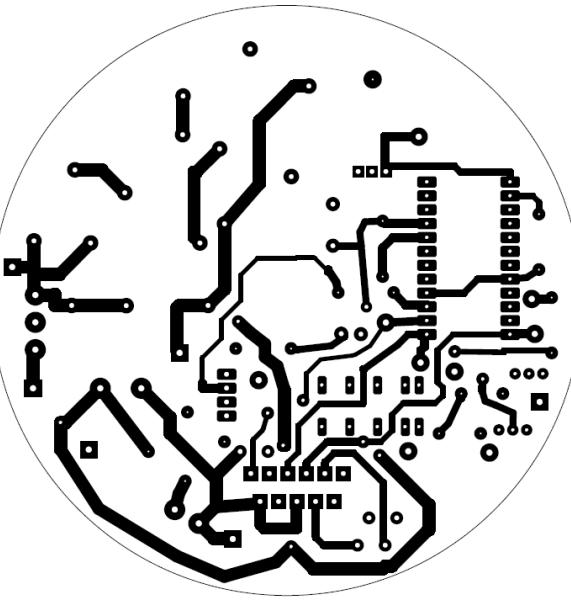
- vue des pistes

face « top » (là où sont les composants)

Vue couches superposées



Face « bottom » (vue par transparence)



LISTE DU MATERIEL DE LA CARTE IMPRIME (PCB)

On peut trouver tous les composants sur le site « AliExpress »

DESIGNATION	REPERE	QTE	VALEUR	REMARQUES	EMPREINTE PCB
BUZZER	BUZ1	1	BUZZER ROUV		BUZZER 3PAS
CARTE	ARD1	1	ARDUINO PRO MINI SYM	modèle 5V avec ATmega328	ARDUINO PRO MINI
CIRCUIT INTEGRÉ	U1	1	L6203	Pont à MOSFET	MULTIWATT11V
CIRCUIT INTEGRÉ	U2	1	7808	régulateur de tension 8V	TO220 A PLAT
CONDENSATEUR	C1,C2	2	15nF		CAPA 2PAS
CONDENSATEUR	C3	1	10uF	chimique 50V	CAPA TANT 2PAS
CONDENSATEUR	C4	1	2200uF	chimique 50V	CAPA POL RADIAL 18 X 35
CONDENSATEUR	C5	3	22µF	Tantale	
CONDENSATEUR	C6 à,C9	3	330nF/ U>500V	Valeurs à adapter à la valeur de l'inductance de la bobine.	
CONDENSATEUR	C11,C12	1	2,2nF U>900V		
CONDENSATEUR	C10	1	0nF		
CONDENSATEUR	C13	1	47nF	Plastique	CAPA 2 PAS
CONNECTEUR	B1	1	connecteurs mâle et femelle	2 broches au pas de 5,08	BORNIER2
CONNECTEUR	B2	1	connecteurs mâle et femelle	3 broches au pas de 5,08	BORNIER3
CONNECTEUR	J1	1	XH 4 contacts	Embase femelle our PCB	
DIODE	D1,D4	2	1N5819	diode schottky	DIODE 4 PAS
DIODE	D2,D3	2	1N4148	Diode signal	
POINT TEST		16		cosse poignard	POINT TEST
POTENTIOMETRE	P1	1	10k	Ajustable horizontal	
RELAI	RL1	1	HFD2/D005-S-L2-D	DPDT Bistable bobines 5V	
RESISTANCE	R1	1	1kΩ		RESIST 4PAS
RESISTANCE	R2,R5	2	39kΩ		RESIST 4PAS
RESISTANCE	R3		220kΩ		RESIST 4PAS
RESISTANCE	R4		1kΩ		RESIST 4PAS
TRANSISTORS	Q1,Q2	2	BS170	MOSFET de signal canal N	
ENTRETOISES		4	M3x 25,	Femelle taraudée aux 2 bouts	
PCB		1	Ø 108mm	double face	
VIS		8	M3x8		

TESTS - REGLAGES - MESURES

TEST DU MARCHE-ARRET

Une fois la carte terminée, câbler le poussoir à led, téléverser le programme dans le microcontrôleur de la carte Arduino.

Alimenter la carte en 25V

Vérifier que la mise en marche n'est effective que si on maintient le poussoir au moins 2s. On sait que l'appareil est en marche quand on entend les bips du buzzer et les clignotements de la led.

Vérifier qu'une impulsion sur le poussoir éteint l'appareil.

REGLAGE DU SEUIL D'ARRET AUTOMATIQUE

La batterie ne disposant pas de circuit BMS, lors de la décharge, il est impératif de ne pas descendre en dessous de 3V par élément, sans quoi, l'élément peut devenir hors d'usage. Notre batterie dispose de 6 éléments en série (6S1P) , il ne faut pas que sa tension descende en dessous de 18V. Par mesure de sécurité on réglera ce seuil à 18,5V.

Pour cela, inutile de brancher la bobine, connecter uniquement le poussoir et t alimenter la carte part une alimentation réglable réglée sur 25V Bien entendu le programme a été préalablement téléchargé dans le microcontrôleur.

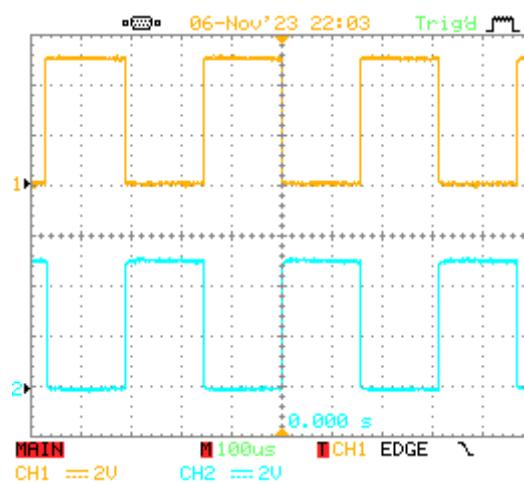
Mettre en route à l'aide du poussoir, puis baisser lentement la tension d'alimentation et relever la valeur de la tension d'alimentation en dessous de la quelle l'émetteur s'arrête. Si cette valeur n'est pas de 18,5V, régler le potentiomètre ajustable en conséquence.

MESURES EN ENTREE ET SORTIES DE L'AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE

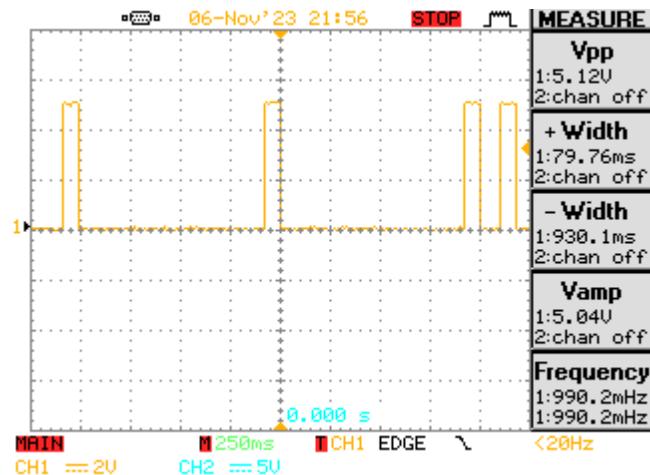
Sans brancher la bobine, on doit observer les signaux suivants :

SIGNAUX EN ENTREE DE L'AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE

en IN1 et IN2 deux signaux en opposition de phase rectangulaires de rapport cyclique ½, de fréquence 3200Hz et d'amplitude 5V



en EN, une impulsion à 5V de 80ms toutes les secondes avec dédoublement de la quatrième impulsion.

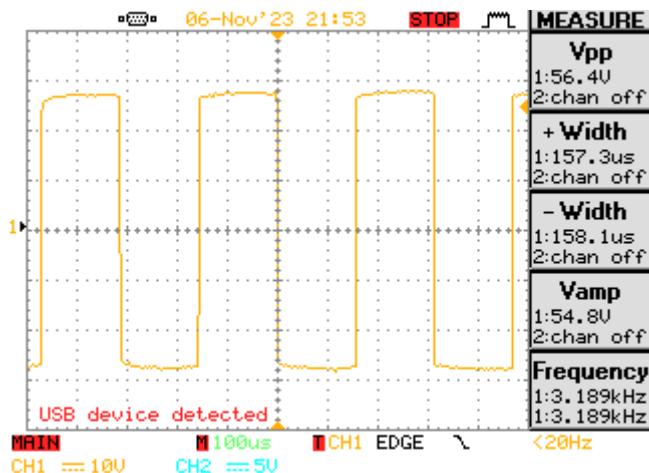


SIGNAL EN SORTIE DE L'AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE

Il apparaît entre les bornes OU1 et OUT2 de l'ampli.

Si la masse de l'oscilloscope n'est pas reliée à la borne « - » de l'alimentation, on pourra relever entre OUT1 et OUT2 des salves d'impulsions alternatives d'amplitude 25V et de fréquence 3200Hz. Les salves d'une durée de 80ms se reproduisent toutes les secondes avec dédoublement de la quatrième salve.

Si la masse de l'oscilloscope est reliée à la borne « - » de l'alimentation, ne surtout pas brancher la sonde entre OUT1 et OUT2 cela ferait un court-circuit et détruirait l'ampli. Dans ce cas, utiliser 2 sondes, l'une sur OUT1 à la voie 1 et l'autre sur OUT2 à la voie 2 puis utiliser la fonction mathématique « différence » de l'oscilloscope.



MESURE DU COURANT ET DE LA TENSION DE LA BOBINE

Ces mesures permettent de s'assurer du bon fonctionnement de la bobine.

Elles ne sont pas indispensables, car on peut s'assurer du rayonnement de la bobine avec le récepteur.

Il faut maintenant brancher la bobine.

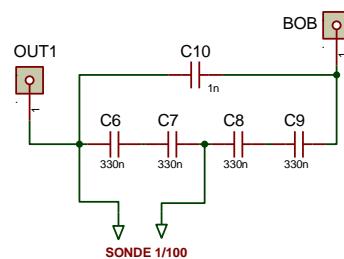
Il ne faut pas faire ces mesures, si on ne dispose pas de sondes de courant et de tensions adaptées, car on risque alors la destruction du composant de puissance L6203.

En effet, l'amplitude des tensions aux bornes de la bobine et de la capacité d'accord peuvent atteindre 2000V suivant les caractéristiques de la bobine.

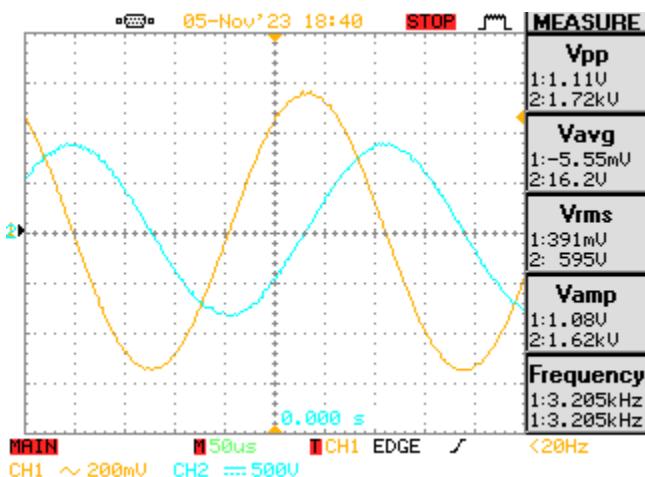
L'usage d'une sonde classique qui atténue par 10 et à proscrire.

Il faut une sonde qui atténue par 100 et qui supporte **2000V**.

Personnellement je dispose d'une sonde qui atténue de 100, mais qui ne supporte que 1500V. Comme la capacité d'accord est obtenue par 4 condensateurs en série de même valeur, j'ai placé la sonde aux bornes de 2 des 4 condensateurs, ainsi la tension mesurée par la sonde sera la moitié de la tension totale et donc inférieure à 1500V



Pour mesurer le courant, j'ai fait l'acquisition d'une sonde bon marché à transformateur de courant qui donne 1V pour 5A.



Sur la voie 1(en orange) on a le courant à raison de 5A/V. Comme on a $V_{pp}=1,08V$ cela donne un courant d'amplitude **2,7A**

Sur la voie 2 (en bleu) on a la moitié de la tension à mesurer, ce qui donne une tension d'amplitude **1720V** !

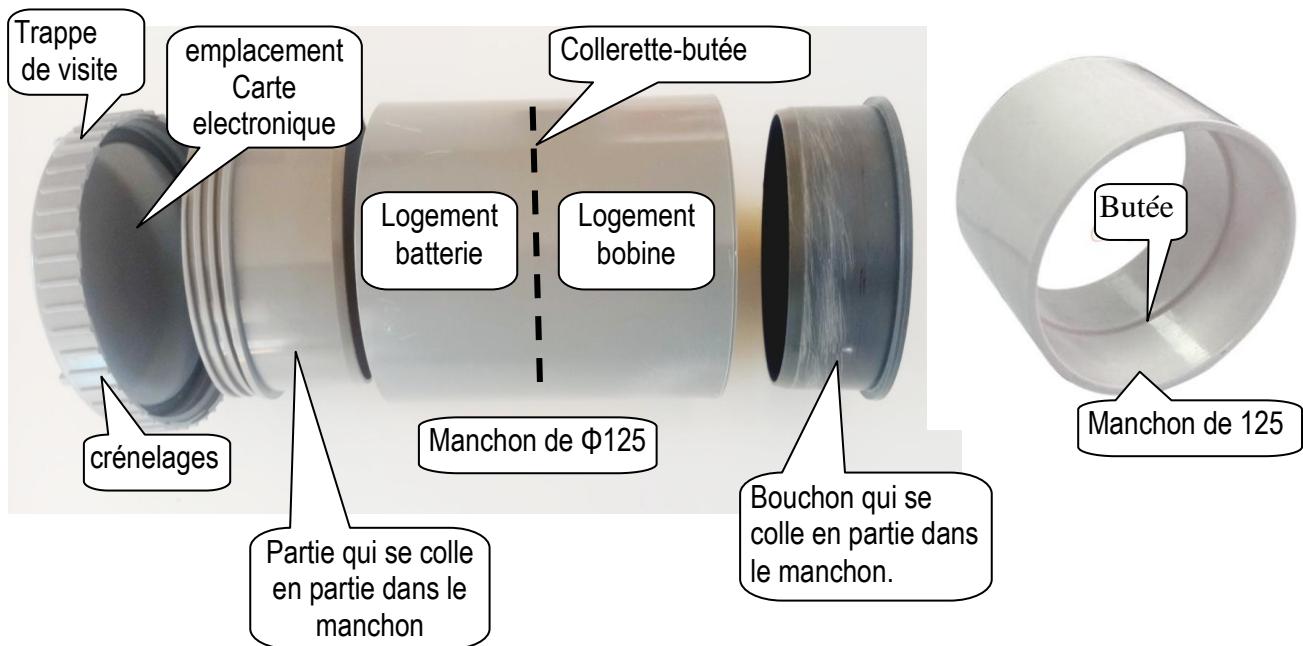
ASSEMBLAGE DU BIPSE

LE BOITIER

On a choisi la forme cylindrique afin d'avoir une symétrie de révolution lui permettant de s'auto-niveler quand elle est suspendue.

Il est construit à partir d'un manchon PVC pour tuyau de descente de gouttière de 125mm de diamètre, que l'on trouve dans les magasins de bricolage.

Le manchon PVC de diamètre 125mm et de 140 de long sera fermé au dessus par un tampon de visite et au dessous par un bouchon. On a opté pour le bouchon, pour gagner en poids (100g de moins). Sinon, on aurait pu tout aussi bien opter pour un second tampon de visite.



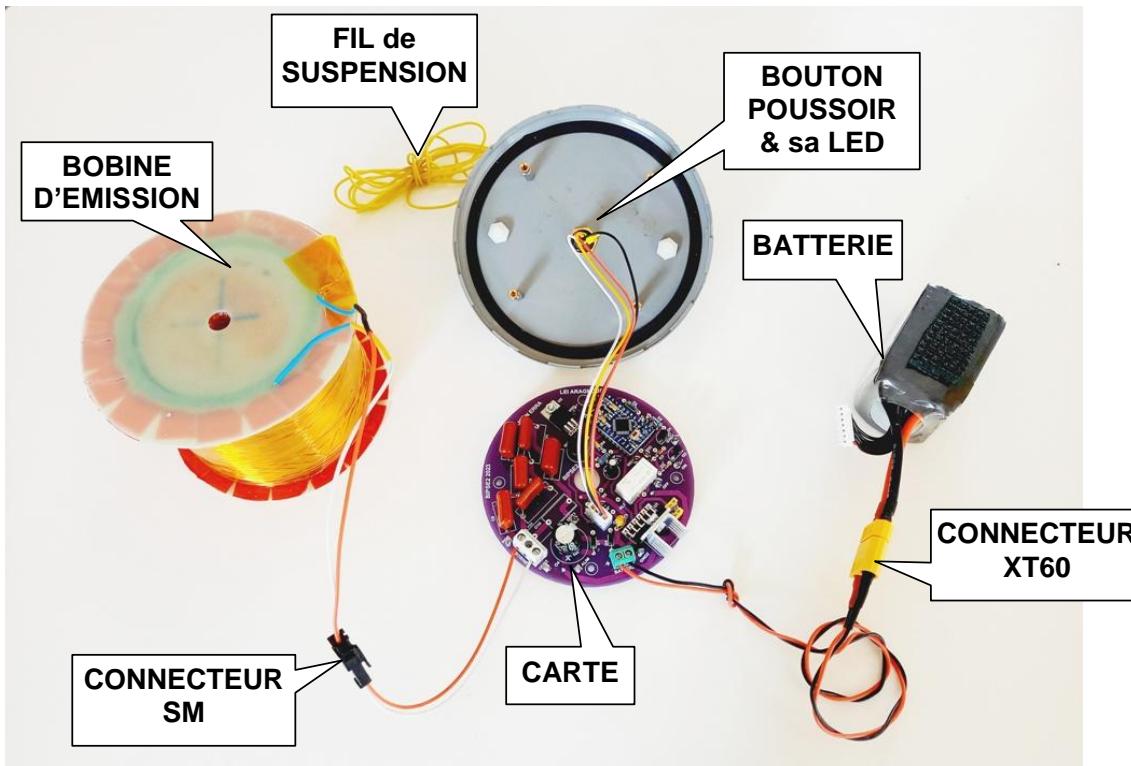
La plupart des manchons contiennent à équidistances des extrémités, une collerette qui servira de butée pour la bobine.

La trappe de visite qui nous servira de couvercle a des crénelages sur sa tranche. Elles ont pour but de faciliter la prise en main pour vissage et dévissage du couvercle. Malheureusement, elles augmentent un peu le diamètre de la balise et l'empêche d'être introduite dans un bidon étanche. Il faut donc les meuler, personnellement, comme je ne dispose pas de meule, j'ai supprimé les crénelages une par une, avec un coup de ciseaux à bois, puis fait la finition au papier de verre.

Les collages seront à effectuer en tout dernier lieu, une fois que le boitier sera entièrement équipé et qu'il fonctionne.

CONTENU DU BOITIER

ELEMENTS ELECTRIQUES

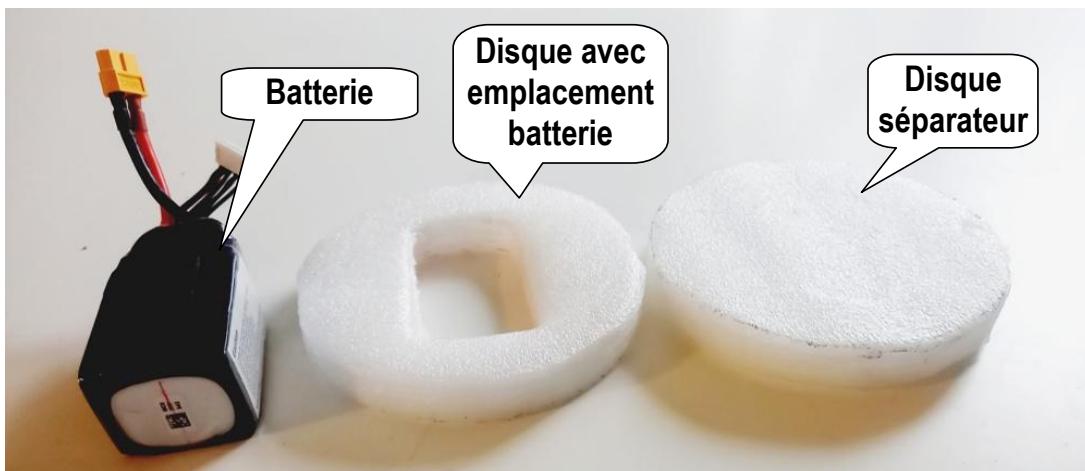


Le câblage est simple, le connecteur sur fil XT60 est indispensable, pour débrancher la batterie et la rebrancher sur le chargeur. Le connecteur SM sur les fils de la bobine, facilite le montage.

Attention à la polarité de la led de l'interrupteur.

MOUSSES

On va intercaler entre la boîne d'émission et la carte électronique, 2 disques de mousse de 2cm d'épaisseur.



Le premier disque de mousse servira à éloigner suffisamment la batterie de la bobine (il faut au moins 1,5cm d'épaisseur) de façon à ce qu'elle ne perturbe pas son rayonnement.

Le second sera évidé pour y loger la batterie. On veillera à ce que la batterie se retrouve bien centrée afin d'éviter un balourd, si on utilise le BIPSE suspendu.

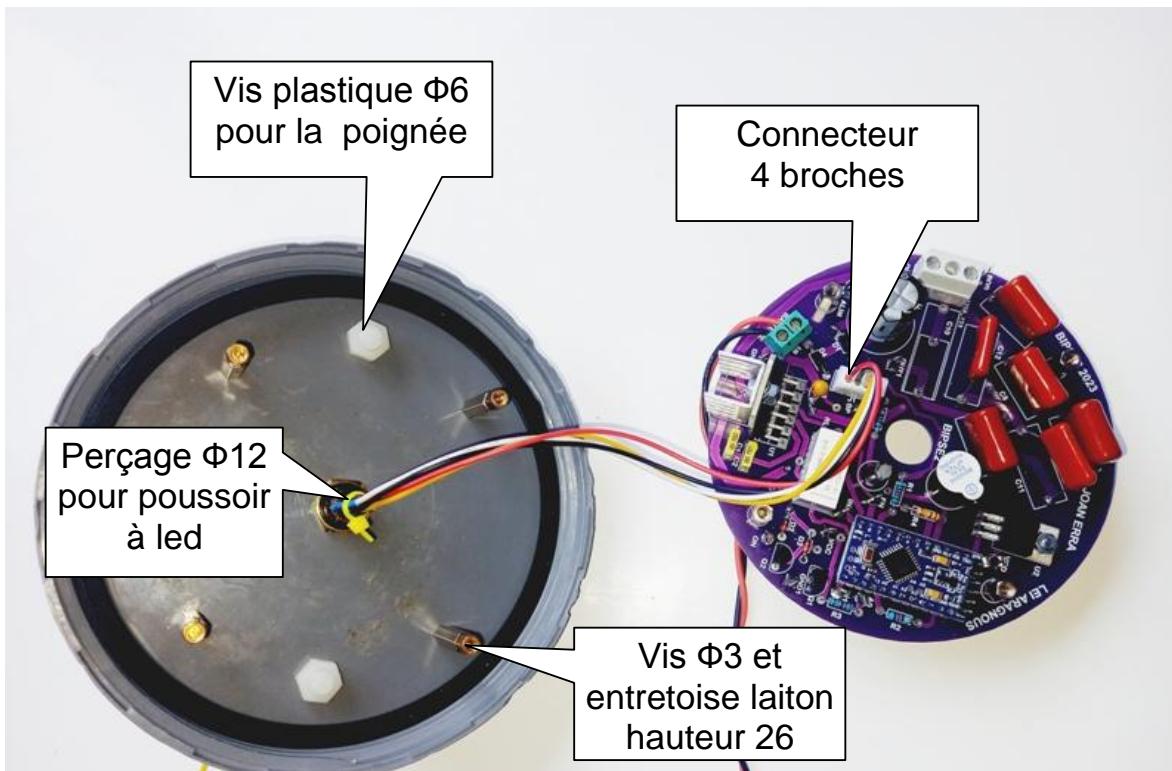
La mousse ne sera pas trop molle, de façon à ce que la batterie soit bien calée

EQUIPEMENTS SOLIDAIRES DU COUVERCLE

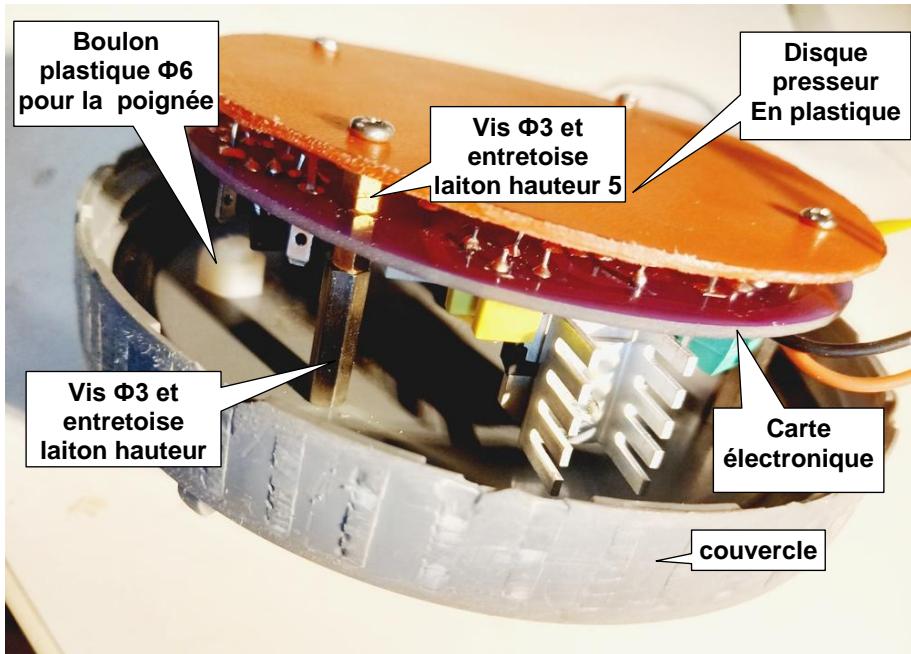
DESIGNATION	QTE	VALEUR	REMARQUES
BOUTON POUSSOIR	1	Etanche à LED	M12
POIGNEE		Longueur 108mm	En plastique
ENTRETOISES	4	M3x 26 ou (M3x20+ M3x6)	En Laiton.Femelle taraudée aux 2 bouts
PCB	1	Φ 108mm	double face
VIS	8	M3x8	
VIS & ECROUS	2	M6x20	Plastique
DISQUE PRESSEUR		Φ108mm x 1mm	Feuille pastique découpée

Equipement face intérieure du couvercle

Avant montage



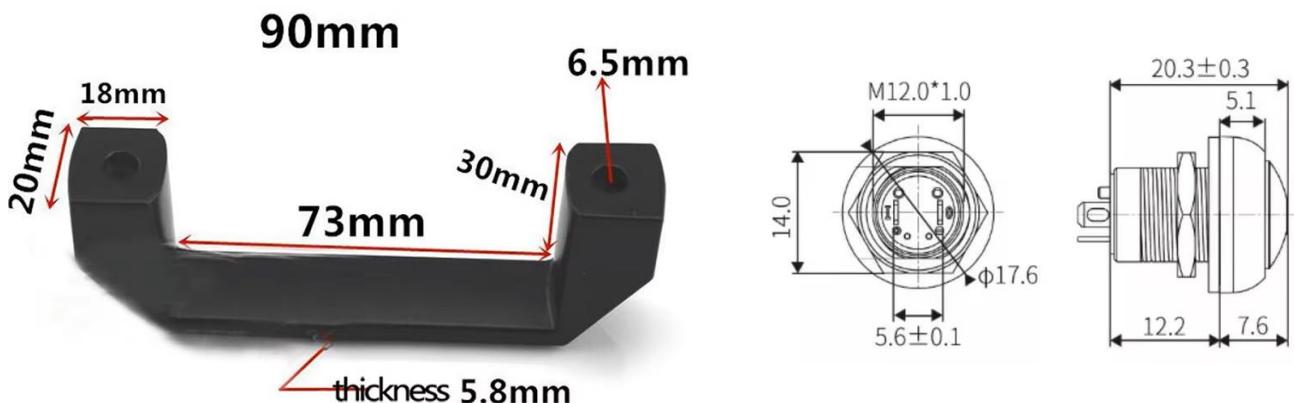
Après montage



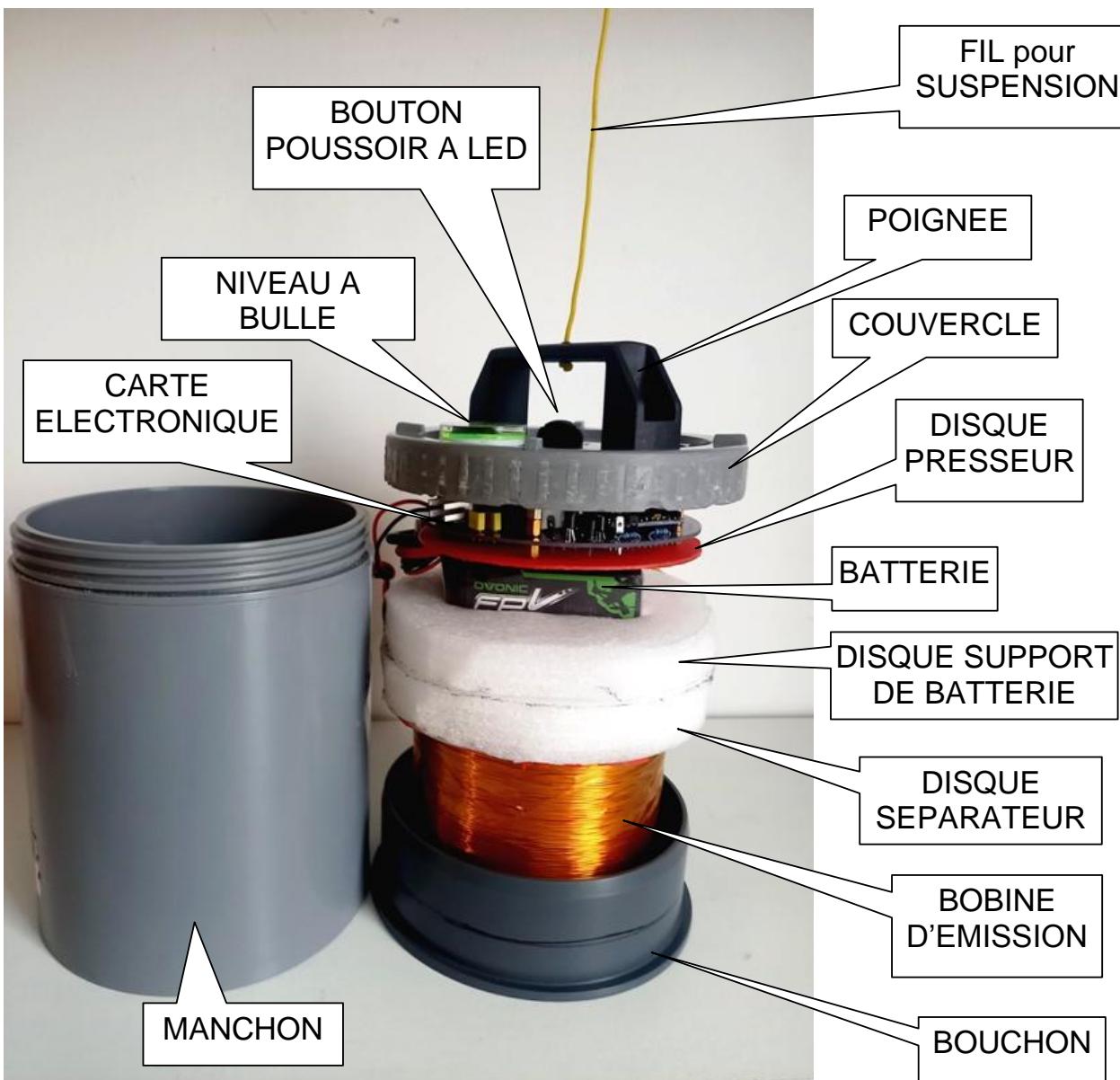
équipement face extérieure du couvercle



- Le niveau à bulle sera collé
- Le crénelage du couvercle doit être meulé si on veut pouvoir introduire le BIPSE dans un bidon étanche.
- Le trou pour le fil de suspension doit être parfaitement centré pour que le BIPSE se mette automatiquement de niveau.
- Pour le pointage des trous de fixation sur le couvercle ,on pourra utiliser le PCB comme gabarit.



ECLATÉ DU BOITIER



CONSEILS DE MONTAGE

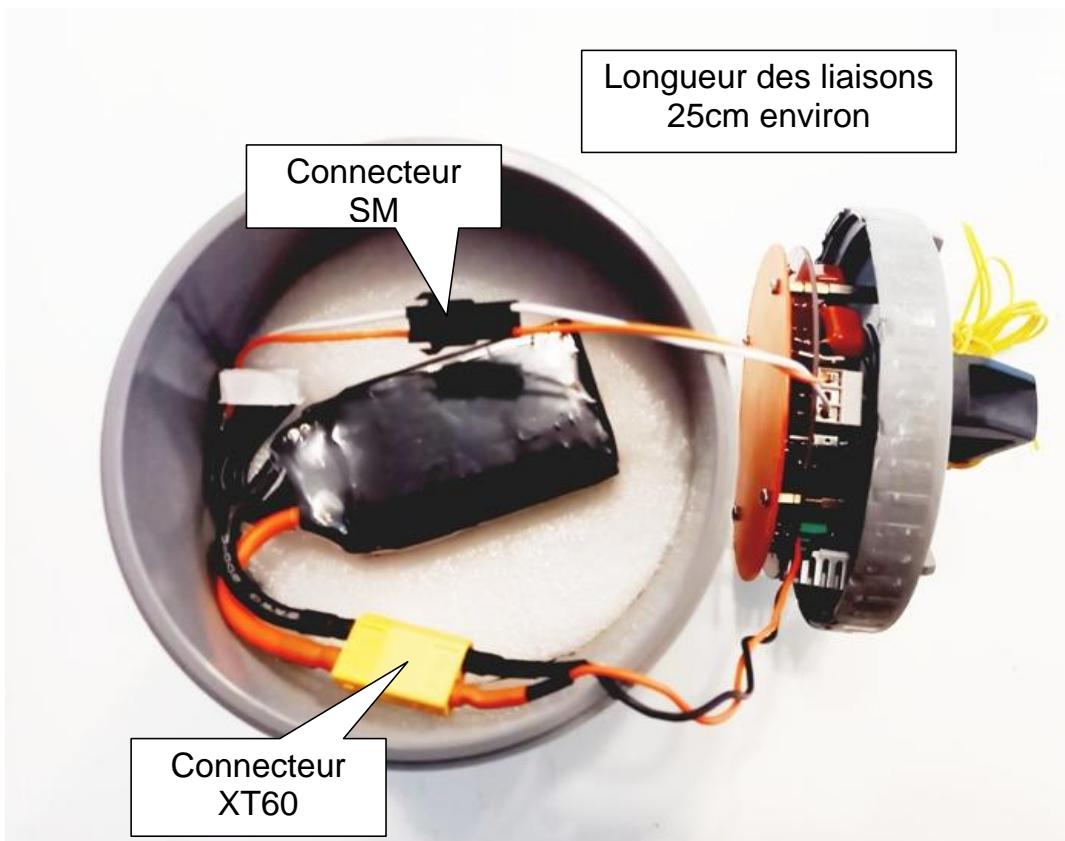
En haut la trappe de visite et en bas le bouchon seront collés. Coté trappe de visite, on pourra dévisser le couvercle, pour venir charger la batterie et éventuellement faire la maintenance de l'électronique. En bas, côté bouchon, le collage condamnera l'accès à la bobine. En effet, elle sera en butée d'un côté par la collerette interne du manchon et de l'autre par le bouchon collé.

Je conseille de respecter la méthode suivante.

1. Placer la bobine dans le manchon et fermer par le bouchon sans le coller. Du fait de la longueur de la bobine, il est normal que le bouchon ne rentre pas totalement dans le manchon.
2. Poser les mousses par l'orifice supérieur, y placer la batterie. Placer la cylindre fileté de la trappe de visite, dans le manchon. Elle doit pouvoir y être introduite à fond sur sa butée et venir bloquer la mousse. Si c'est le cas, on peut coller la trappe de visite, sinon avant de collage, on peut diminuer l'épaisseur de la

mousse séparatrice qui ne doit pas être inférieure à 1,5cm, ou bien raccourcir le cylindre de la trappe de visite à la scie à métaux.

3. Equiper le couvercle sans omettre le disque presseur ainsi que les liaisons des borniers batterie et bobine avec des câbles équipés des connecteurs XT60 mâle pour la batterie et SM femelle pour la bobine .
4. Les liaisons vers la bobine et la batterie doivent être à la bonne longueur , environ 25cm.. Trop courtes elles empêcheront le vissage du couvercle, trop longues elles vont s'entremêler.
5. Effectuer les connexions à la batterie et à la bobine et visser le couvercle, en prenant soin que les câbles ne gênent pas.
6. Vérifier le fonctionnement de la balise à l'aide du bouton poussoir.
7. Il reste à coller le bouchon. On utilisera la colle standard pour raccords de PVC avec le décapant adapté. Attention, c'est une étape cruciale car il faut que le manchon soit rigoureusement perpendiculaire au plan du bouchon, sinon l'indication du niveau à bulle installé sur le couvercle sera faussée, et le champ magnétique émis dans l'axe de la bobine ne sera pas vertical.



FABRICATION DE LA BOBINE

Pour la bobine que j'ai fabriqué, les calculs précédents ont donné pour le fil un diamètre de 0,8mm.

L'enroulement sera bobiné sur un touret, que j'ai du fabriquer sur mesure aux côtes internes du manchon.

La bobine décrite ici fut celle réalisée qui fonctionne très bien, mais une fois terminée, j'ai constaté qu'on peut modifier certaines cotes pour l'améliorer.

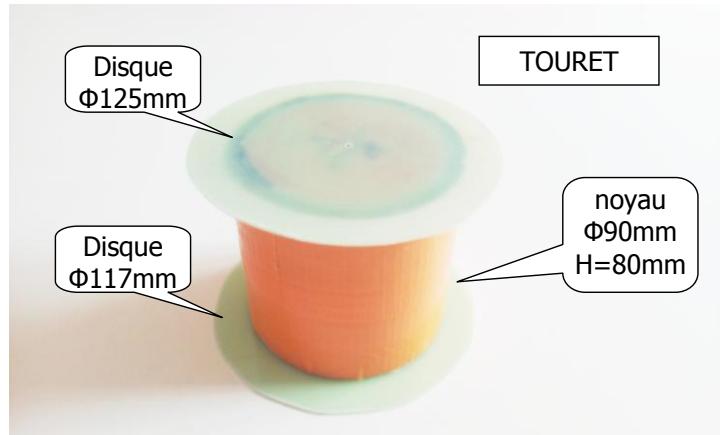
FABRICATION DU TOURET;

PRESENTATION DU TOURET

Il est constitué de 2 disques légers en époxy G10 entre les lesquels on a collé un noyau cylindrique en mousse polyéthylène rigide et légère.

Les 2 disques ont des diamètres différents. Celui du haut de $\Phi 125\text{mm}$ ira en butée sur la collarette.

Le disque du bas $\Phi 117\text{mm}$ rentrera dans le bouchon

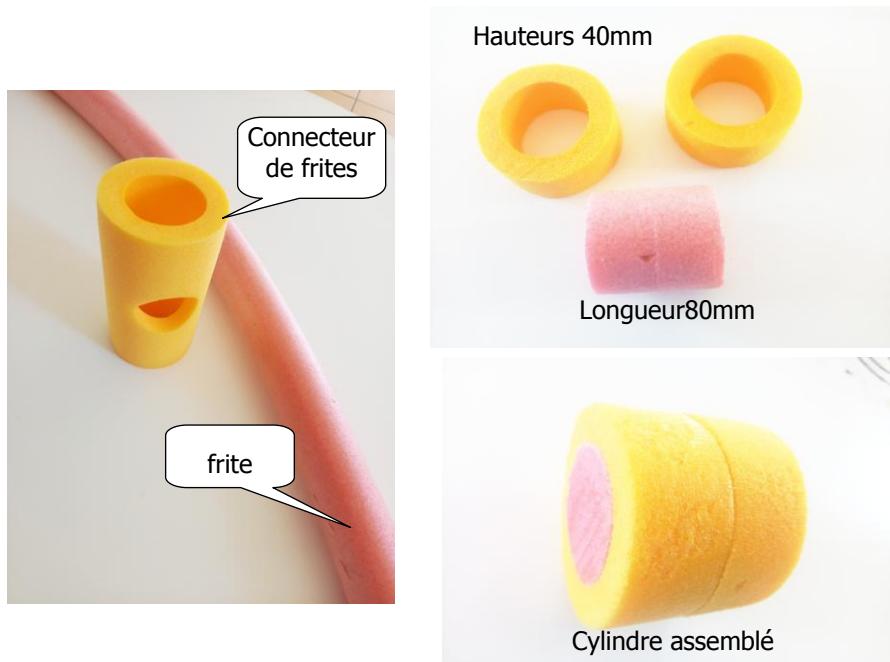


Dans une plaque d'époxy translucide G10 de 1mm d'épaisseur on tracera avec un compas pour chaque disque 2 cercles concentriques. L'un correspondant au diamètre du disque et l'autre de 90mm de diamètre correspondant au diamètre du noyau à placer entre les 2 disques.

REALISATION DU TOURET

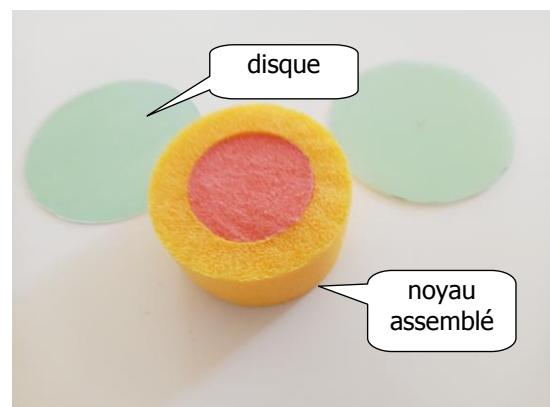
- Découper les disques aux ciseaux de cuisine. Attention à ne pas prendre des plaques plus épaisses, car le découpage avec de simples ciseaux devient impossible. De même qu'il faudra veiller à bien choisir une plaque translucide de façon à permettre un centrage facile du disque sur le cylindre.

- Une fois découpés et limés, on percera sur le grand disque un trou de $\Phi 1\text{mm}$ sur le cercle de $\Phi 100\text{mm}$. Ceci pour permettre la sortie du fil de début de bobinage. Pour la fin du bobinage on pourra prévoir sur chaque disque un trou de $\Phi 1\text{mm}$ à 2mm du bord, de façon à pouvoir terminer le bobinage d'un côté ou bien de l'autre.
- Pour le noyau, j'ai choisi de le découper dans une frite de natation coupé à 80mm , et comme le diamètre était insuffisant je l'ai agrandit en utilisant un connecteur de frite qui est mousse polyéthylène rigide. Du fait du trou central du connecteur on ne dispose pas de 80mm en un seul tenant. J'ai donc du découper 2 longueur de 40mm qui seront mis bout à bout et collés avec de la colle néopène.



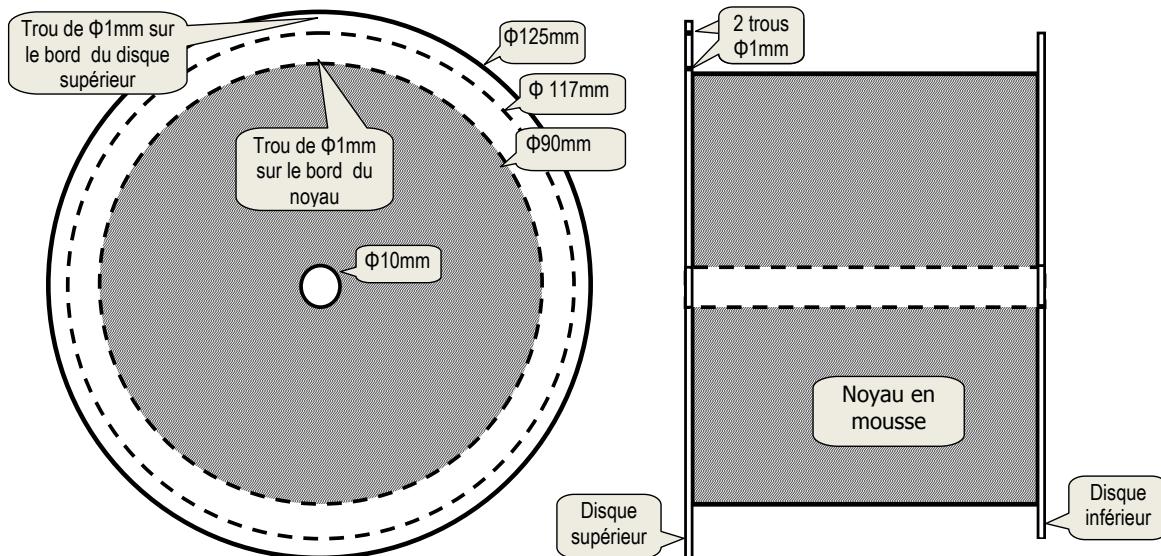
A l'aide d'un niveau, on vérifiera la perpendicularité de la surface de base avec la hauteur du cylindre. Les corrections s'effectueront au papier de verre.

Quand on loge la frite dans le connecteur jaune, cela agrandit le diamètre à 105mm . En l'enroulant avec un ruban adhésif très serré, le diamètre s'est réduit à $90\text{mm}..$



- Le cylindre étant plein, on pourra facilement y coller à les disques à la colle néoprène.
- Le centrage s'effectuera par transparence grâce au cercle de 100mm précédemment tracé sur chaque disque.
- Une fois les disques collés, on vérifiera au niveau la perpendicularité des disques par rapport au cylindre. Cette vérification est très importante et garantie l'émission d'un champ magnétique vertical lorsque le BIPSE sera mis à niveau par l'opérateur.
- Pour que le fil du bobinage ne s'enfonce pas au niveau des jonctions disques-noyau il est nécessaire d'avoir une surface continue. Cette fonction sera assuré par du ruban adhésif.
- Le touret sera ensuite percé de part en part, pour pouvoir le placer sur un axe en vue du bobinage.

DESSIN DU TOURET TERMINÉ



Il ne reste plus qu'à le bobiner.

BOBINAGE DU TOURET

On a précédemment calculé 630 spires.

Il s'agit donc de bobiner 630 spires ce qui nécessite une longueur de 190-m de fil rigide émaillé de diamètre 0,8mm.

Sur une longueur de bobinage de 80mm, en théorie on pourrait bobiner $80/0,8=100$ spires jointes. Dans la pratique il faut appliquer un coefficient réducteur de 0,84. Ce qui fait que une couche de bobinage contiendra 84 spires, il faudra donc $630/84=7,5$ donc 8 couches.

Dans la pratique on a terminé la dernière couche et bobiné **670spires**

Pour quelques dizaines d'euros, j'ai fait l'acquisition d'une petite bobineuse, mais je n'ai pas réussi à tourner la manivelle d'une main et à guider le fil avec l'autre main, car la vitesse était trop élevée. J'ai donc tourné la bobine directement d'une main et guidé le fil de l'autre de façon à avoir les spires jointives. Au final, la bobineuse m'a surtout servi de support de la bobine et de compte-tours.

Je mettais environ 30mn par couche, au total il m'a fallu 3,5h, ce qui est acceptable, car on peut le faire en plusieurs fois.

Entre chaque couche, j'ai placé 2 épaisseurs ruban adhésif de type kapton pour éviter l'effet de proximité entre les couches et pour faciliter le bobinage de la couche suivante.



Une fois terminé, il est nécessaire de mesurer son inductance. Plusieurs solutions sont envisageables, la plus facile est d'utiliser un RLC-mètre.

CARACTERISTIQUES DE LA BOBINE REALISEE

Critères	Méthode	Valeur	Unité
Section du conducteur		0,5	mm ²
Diamètre noyau		90	mm
Diamètre moyen enroulement		96	mm
Longueur de l'enroulement		80	mm
Moment magnétique efficace	Calculé à U _{CRÈTE} =25V	10	A _{eff} m ²
Portée : hypothèse: Meff=282Am ² permet une localisation à travers 270m de calcaire		90	m
Nombre de spires		670	
Longueur de fil		200	m
Poids du cuivre	calculé	0,9kg	kg
Poids total bobine	mesuré	1kg	kg
Résistance	à 1kHz au LCRmètre	7	Ω
Inductance		29,3	mH
Coefficient de surtension Q=Lw/R à 3,2kHz	D'après mesures	70	

Améliorations possibles :

Tout d'abord, le bobinage a pris moins de place que prévu, il est préférable de prévoir un noyau de 103mm de diamètre plutôt que 90mm, ce qui permettra de réduire la longueur du bobinage.

En effet, lors de l'installation de la bobine dans le manchon PVC, celle-ci dépasse un peu. Le bouchon terminal collé ne va pas en butée sur le manchon. En soi, ce n'est pas un problème au niveau de la solidité, mais au niveau de la perpendicularité entre le niveau à bulle du couvercle et l'axe de la bobine. Il faut alors être précis et minutieux lors du collage.

L'amélioration consiste à raccourcir la bobine (la cote 80mm du touret sera ramenée à 66mm) . On augmentera le diamètre du noyau du touret (passer de 90mm à 103mm). On diminuera le nombre de spires à 500.

Ce qui aura pour avantages :

- d'assurer sans réglage la perpendicularité du niveau à bulle par rapport à l'axe de la bobine.
- De raccourcir la balise de 1,4 cm et de l'alléger de 130g.
- D'augmenter son moment magnétique de 14%

Ce qui aura pour seul petit inconvénient :

- d'augmenter le courant de 9% environ et donc de perdre environ 30mn d'autonomie.