

BALISE DE POSITIONNEMENT SOUTERRAIN

ARCAS

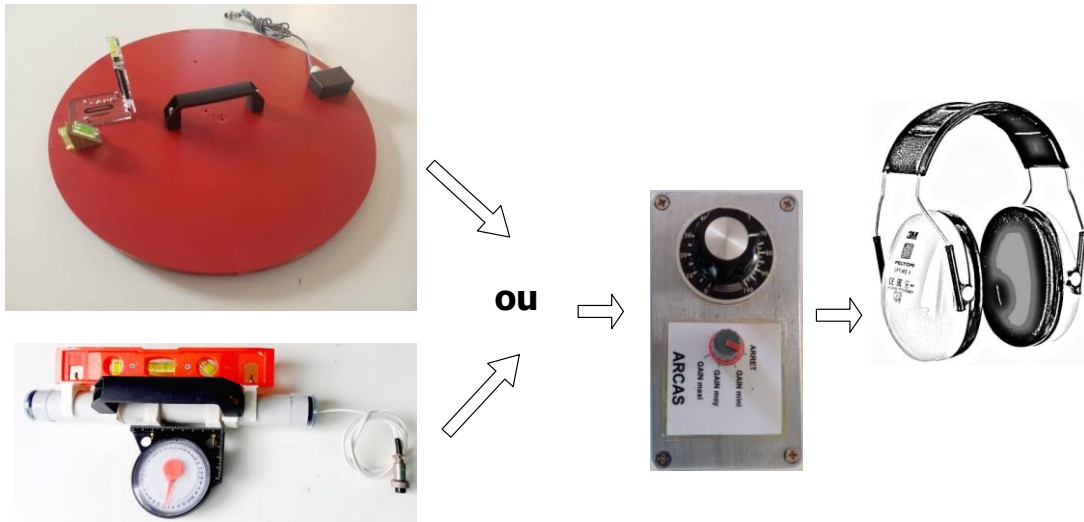
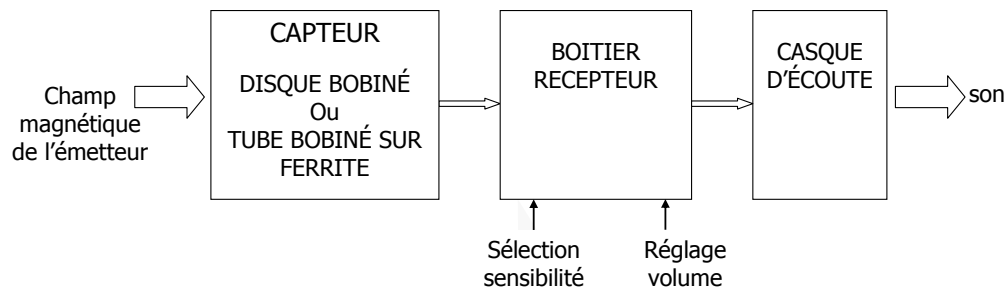
DOSSIER TECHNIQUE de la PARTIE RECEPTION

joan ERRA Spéléo Club de Toulon
Decembre 2021

Sommaire

PRESENTATION & CARACTERISTIQUES	1
CAPTEURS.....	2
ANALYSE DE FONCTIONNEMENT	2
principe	2
l'accord de la bobine réceptrice	2
influence du câble de liaison et du préampli	3
choix du nombre de spires et section du fil	4
DISQUE BOBINÉ	4
fabrication	4
Caracteristiques du disque bobiné	6
TUBE BOBINÉ A FERRITE	7
principe du bobinage :	7
fabrication	8
caracteristiques	12
BOITIER RECEPTEUR	13
ANALYSE FONCTIONNELLE ET STRUCTURELLE.....	13
Intérêt de la sélection du gain et du réglage de volume	13
circuit d'accord de la bobine réceptrice	13
préampli faible bruit	15
filtre actif	17
ampli de sortie	18
Détection usure pile et génération point milieu.....	19
autonomie de la pile	21
SCHEMA STRUCTUREL COMPLET DU RECEPTEUR ARCAS	22
SPECIFICATIONS	23
FABRICATION BOITIER RECEPTEUR.....	24
Vue d'ensemble.....	24
Schémas du circuit imprimé(PCB)	25
LE CASQUE D'ECOUTE	30
TECHNOLOGIE & TYPE DE CASQUE.....	30
Influence de la sensibilité.....	30
Influence de la bande passante.....	31
Modèle à choisir:	31

PRESENTATION & CARACTERISTIQUES



Le capteur convertit le champ magnétique de l'émetteur à 3200Hz en signal électrique. Deux capteurs à base de bobines ont été réalisés.

- Le premier capteur est constitué d'un disque isolant bobiné de 43cm de diamètre
- Le deuxième est constitué d'un tube de 30cm de long et de 3,2cm de diamètre, contenant une tige en ferrite autour de laquelle on a placé un bobinage.

La sortie du capteur est envoyée sur un boîtier récepteur dont le rôle est d'amplifier le signal et de le filtrer des signaux indésirables.

La sortie de ce boîtier récepteur est envoyée à un casque d'écoute qui permet de convertir le signal électrique en signal sonore.

CARACTERISTIQUES PRINCIPALES

Sensibilité de l'ensemble au champ magnétique de l'émetteur :

- Disque bobiné 0,1pT d'amplitude.
- Tube bobiné : 0,2pT d'amplitude.

Bande passante de l'ensemble : capteur disque 150Hz, capteur tube : 70Hz

Alimentation : 1 pile 9V alcaline.

Autonomie : 150heures

Pour les performances du système complet avec la partie émission consulter le guide de l'utilisateur.

CAPTEURS

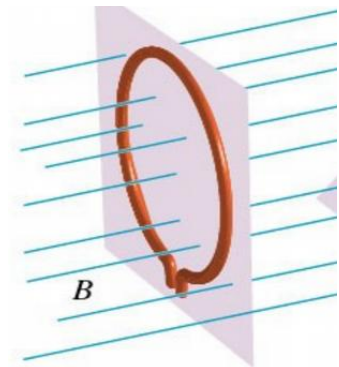
ANALYSE DE FONCTIONNEMENT

principe

Il est régi par la loi de Lenz.

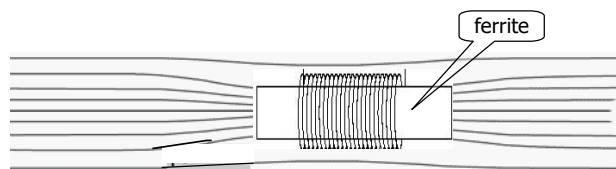
La bobine réceptrice traversée par le champ magnétique alternatif produit par l'émetteur va être le siège d'une tension induite alternative d'amplitude proportionnelle :

- A l'amplitude et à la fréquence du champ magnétique
- A la surface de la bobine traversée par le champ
- Au nombre de spires.



Sur le disque la bobine offre une grande surface avec beaucoup de spires, afin d'avoir une grande sensibilité.

Sur le tube la surface est beaucoup plus faible, mais elle est occupée par un bâton de ferrite qui canalise les lignes de champ, ce qui permet de ne pas trop perdre en sensibilité.



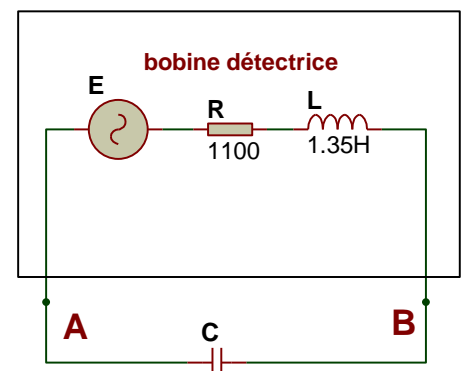
Pour les capteurs réalisés, le tube à ferrite est 1,8 fois moins sensible que le disque. Cependant la baisse de portée ne sera que d'environ 20%. L'avantage du capteur à tube est d'être beaucoup moins encombrant et bien plus léger que le disque.

l'accord de la bobine réceptrice

L'accord de la bobine consiste à placer un condensateur C en parallèle dont la valeur permet d'obtenir la résonance du circuit à la fréquence de travail.

Ci-contre entre A et B le schéma équivalent du capteur disque réalisé.

- E: tension induite par le champ magnétique.
- L : Inductance
- R : Résistance Equivalente Serie (ESR) à la fréquence considérée du bobinage.



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 en valeur absolue. La réactance totale devient nulle et l'impédance du circuit RLC se réduit à la résistance R. Le courant devient très grand, on parle de résonance.

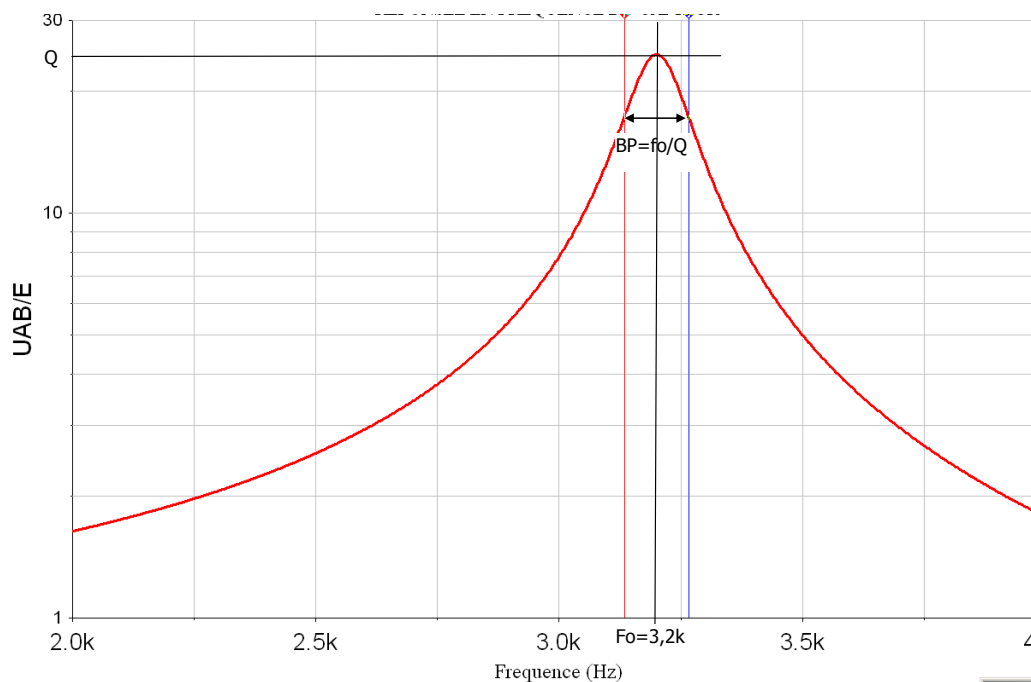
Ce courant qui vaut alors E/R génère une surtension de même amplitude sur C et sur L d'expression $L\omega I$ soit $U = E \cdot (L\omega/R) = U_{AB}$

On appelle $Q = L\omega/R$ le coefficient de surtension ou coefficient de qualité de la bobine. A 3200Hz pour notre disque bobiné $Q=21$ et $Q=56$ pour notre tube. Si la bobine est traversée par des champs magnétiques de même intensité à d'autres fréquences, il n'y aura plus de résonance et la tension aux bornes du capteur sera plus faible.

L'intérêt de l'accord de la bobine est donc double :

- Augmenter la tension : la surtension est de Q à f_0
- Filtrer les signaux en favorisant la fréquence recherchée. On montre que la bande passante B_p à $-3dB$ vaut $B_p = f_0/Q$ soit 150Hz

Ci-dessous, la courbe de réponse théorique du disque bobiné réalisé lorsqu'il est accordé avec un condensateur à $f_0=3200\text{Hz}$ (Q de 21).



Pour augmenter la sensibilité du capteur et diminuer sa bande passante, on peut penser que l'on a intérêt à concevoir la bobine avec un Q le plus grand possible, En fait, pas vraiment, en particulier à cause de la dérive thermique. du condensateur d'accord. Dans le cas où on opte pour un condensateur à faible dérive thermique comme ceux de type polystyrène, on a en général un coefficient de température d'environ $\pm 200\text{ppm}/^\circ\text{C}$. La température de fonctionnement du récepteur peut aller de -10 à $+40^\circ\text{C}$. Cela donne pour cet écart de 50°C une dérive possible du condensateur de $\pm 1\%$, ce qui génère une dérive de la fréquence de résonance de $\pm 0,5\%$. Pour que la fréquence de travail reste dans la bande passante du filtre, celle-ci doit donc être au moins à 1% de la fréquence de résonance, ce qui limite le Q à 100 comme valeur maximale.

influence du câble de liaison et du préampli

Soit ESR la Résistance Equivalente Série de la bobine à la fréquence considérée. Au bornes du condensateur à la résonance, ce circuit présente une résistance équivalente parallèle $EPR = ESR.Q^2$ soit pour le disque bobiné environ $485k\Omega$, et environ $1,3M\Omega$ pour le tube bobiné. Ce sont des valeurs très élevées d'impédance de sortie.

Une liaison avec un câble blindé basse fréquence ordinaire amortit le circuit accordé, en particulier pour le tube bobiné. Son Q passait de 56 à moins de 40. Il faut qu'au RLCmètre, la valeur EPR du câble à 3kHz soit bien supérieure à celui du bobinage.

Après différents essais, un câble prévu pour la HF, tel qu'un coaxial RG316 d'un diamètre de 2,5mm ou bien un câble pour sonde d'oscilloscope conviennent. Ce dernier à l'avantage d'être plus souple que le coaxial. Naturellement ces câbles ont une capacité de 50 à 100pF au mètre qu'il faudra considérer.

L'impédance d'entrée du préampli doit être de préférence grande devant les 1,3MΩ du tube bobiné, pour ne pas amortir le circuit accordé. Une valeur de 10MΩ peut convenir

choix du nombre de spires et section du fil

Influence du nombre de spires

En augmentant le nombre de spires pour améliorer la sensibilité on augmente aussi malheureusement la capacité parasite entre les spires et entre les couches du bobinage. Cela peut ramener la fréquence d'accord à une fréquence inférieure à la fréquence de travail et donc diminuer la tension aux bornes de la bobine. Il y a donc une limite au nombre de spires.

Influence de la section du fil

La section du fil doit être suffisante pour que la résistance électrique de l'enroulement ne soit pas trop grande afin de ne pas trop dégrader la sélectivité du cadre.

Par ailleurs, il faut limiter le bruit électronique généré par la résistance de l'enroulement et qui augmente avec celle-ci.

Augmenter la section pour diminuer la résistance accroît les conséquences de l'effet de peau ce qui peut annihiler la diminution voulue de la résistance. Elle accroît la capacité parasite et pose des problèmes d'encombrement.

Les 2 capteurs exposés ici sont le fruit d'essais successifs pour tenter d'obtenir de bonnes performances.

DISQUE BOBINÉ

fabrication

Pour le fabriquer, on a réalisé 1 disque en ABS de 5mm d'épaisseur autour duquel on a collé 2 disques en PVC faisant office de flasques.

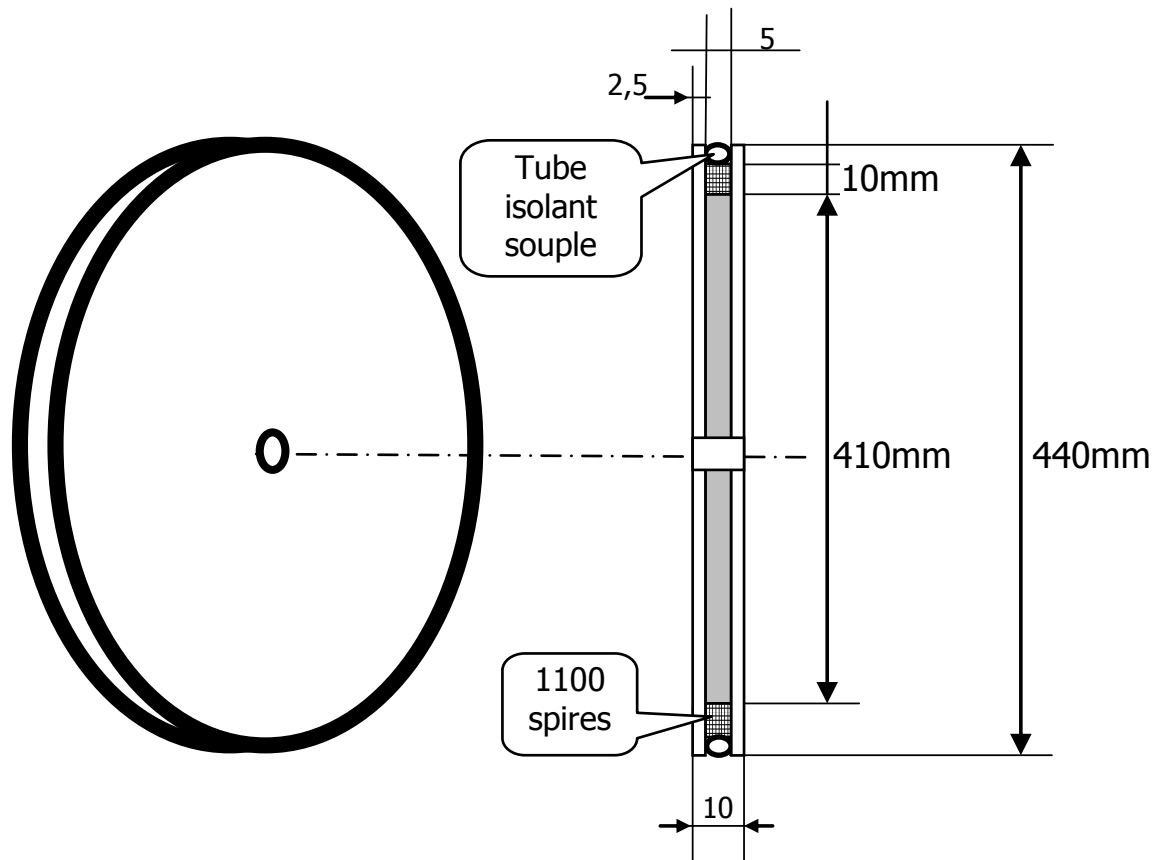
Dans l'épaisseur on a donc une gorge dans laquelle on a bobiné 1100 spires avec du fil de 0,2mm de diamètre.

On a ensuite équipé le disque des accessoires suivants

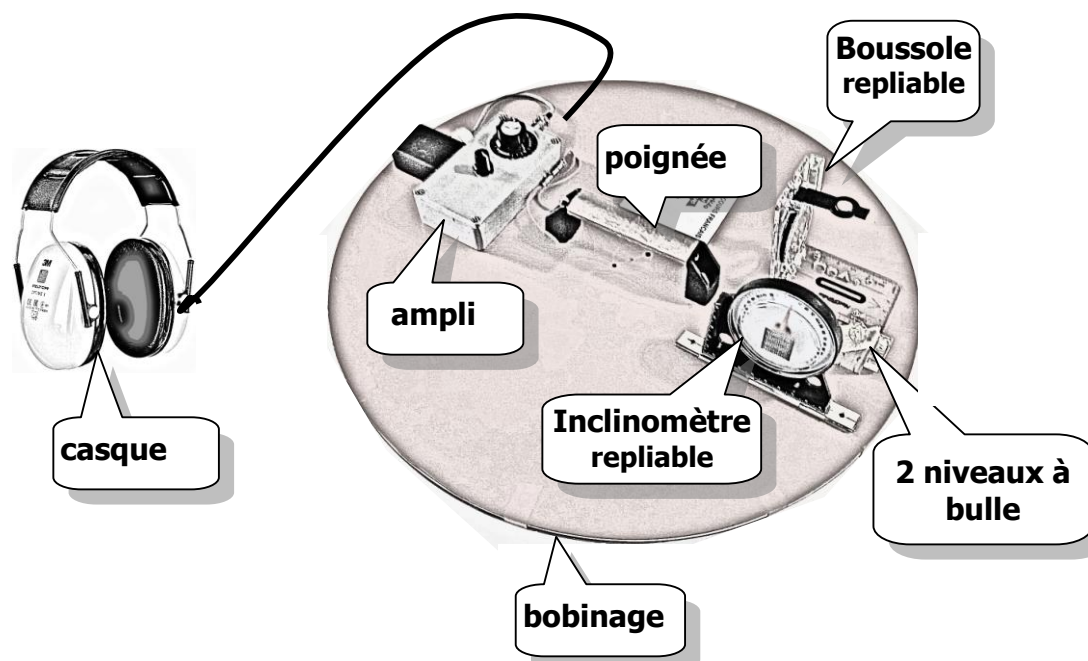
- 1 poignée en plastique indispensable.
- 2 niveaux à bulles indispensables pour positionner le disque verticalement et à 45°.
- 1 inclinomètre
- 1 boussole

Pour le rôle et l'intérêt des accessoires consulter le guide utilisateur.

La mise en place de la boussole interdit l'usage de matériel pouvant la fausser (vis acier, aimants etc)



Si on n'utilise que le disque comme bobine de détection, il est possible de fixer directement le boîtier récepteur sur le disque comme sur la figure ci-après.



Les courants du signal amplifié circulant dans le circuit imprimé du récepteur génèrent des champs magnétiques. Si ceux-ci sont captés par le disque bobiné, cela peut engendrer un Larsen. Pour éviter que les ondes ne sortent du récepteur, il faut relier son boîtier alu à la terre. Pour cela on peut tenir le récepteur à mains nues.

Si on fixe le boîtier récepteur sur disque, on conseille alors de métalliser la poignée avec d'un ruban adhésif en cuivre ou en alu et de la connecter par un fil au boîtier alu du récepteur.

Câblage

Pour protéger les extrémités des fils de 0,2mm du bobinage, on les fera déboucher dans un petit coffret fixé au disque. Le câble blindé ou câble coaxial RG316 viendra se connecter à ces fils via un presse étoupe. La connexion pourra s'effectuer par de simples soudures protégées d'une gaine thermo-rétractable

Au bout du câble blindé, on placera le connecteur GX12 femelle 3 broches.

Un connecteur 2 broches peut suffire surtout en cas d'utilisation d'un coaxial.



Remarque : l'utilisation d'un câble pour relier le disque bobiné au boîtier récepteur, introduit une capacité en parallèle d'autant plus importante que le câble est long. Cette capacité sera plus importante si le câble est blindé et que son blindage est à la masse.

Caracteristiques du disque bobiné

Elles sont susceptibles d'être légèrement différentes d'un modèle à l'autre.

Caractéristiques électriques du disque bobiné seul

GRANDEUR	DESIGNATION	METHODE	Valeur
L	Inductance	Mesuré à 1kHz au LCRmètre	1,35H
ESR :	résistance équivalente série en alternatif de l'enroulement		1100 Ω
R _{DC}	Résistance en courant continu	Ohmmètre	1000Ω
F _p :	Fréquence de résonance propre	GBF et oscilloscope	12kHz
C _{PAR}	Capacité parasite du bobinage	Calculée à partir de F _p et L	140pF

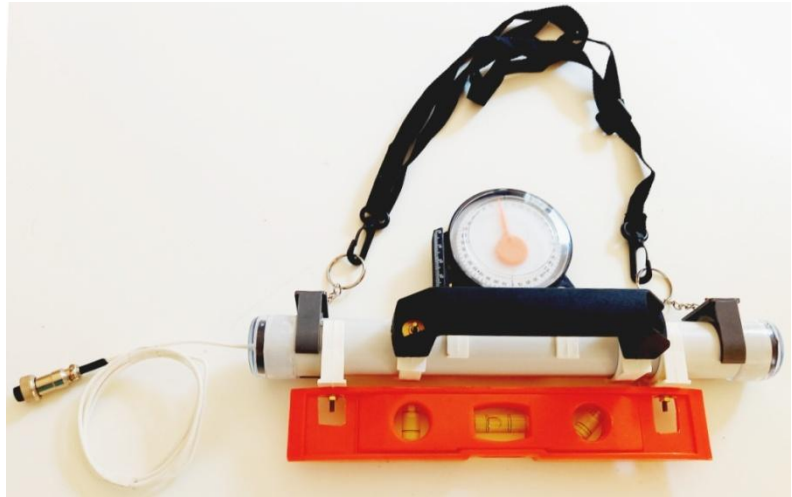
Caractéristiques de l'ensemble disque bobiné accordé à 3200Hz avec un condensateur.

GRANDEUR	DESIGNATION	METHODE	Valeur
B _p	Bande passante à -3dB	GBF et oscilloscope Calculé Q=f _o /B _p	150Hz
Q à 3200Hz	coef de qualité ou de surtension du bobinage		21
Sensibilité	Tension aux bornes du disque accordé en fonction du champ magnétique.	Calculée A 3200Hz	50μV/pT
Bruit	valeur efficace du bruit dans la bande passante (150Hz) aux bornes du disque accordé	Calculé à partir de R _{DC} et Q	0,9 μV
EPR	Résistance équivalente parallèle ou impédance de sortie disque accordé à 3200Hz.	Calculée à partir de ESR et Q. EPR=ESR.Q ²	485kΩ

TUBE BOBINÉ A FERRITE

Des essais ont montré environ 20% de perte de portée par rapport au capteur a disque. Ce qui est peu en regard de ses avantages qui sont le poids et un encombrement plus faible et surtout sa facilité de fabrication.

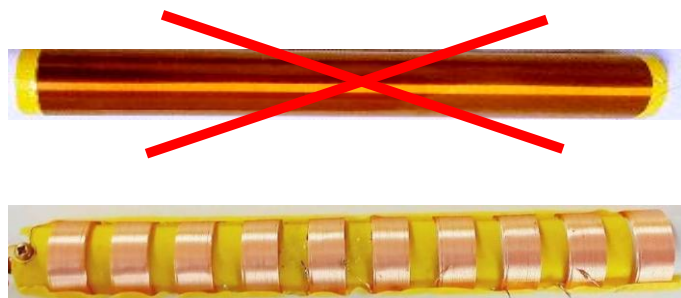
Ci-contre le tube équipé de ces accessoires, niveau, inclinomètre, poignée, sangle d'épaule.



principe du bobinage :

Plutôt que de réaliser le bobinage en un seul tenant de plusieurs couches sur toute la longueur, on a préféré fractionner le bobinage en 10 petites bobines câblées en série. Les avantages sont les suivants :

- Réduction des capacités parasites du bobinage, car sur les bobines longues, la capacité entre les couches d'enroulement devient vite importante et peut faire en sorte que la résonance ne puisse pas s'effectuer à la fréquence de travail, mais à des fréquences inférieures.
- On peut modifier l'inductance en jouant sur l'espacement entre les bobines. Cela permet d'avoir la maîtrise sur le coefficient de qualité $Q = L\omega/ESR$ du bobinage. En effet, comme on a vu au paragraphe sur « l'accord de la bobine réceptrice », le Q ne doit pas être trop élevé ($Q < 100$).
- On peut utiliser des petites bobines toutes faites. Nous avons opté pour les « bobines d'induction creuses pour électrovannes » d'un diamètre de 20mm et vendues sur le site « AliExpress »



fabrication

Ci-dessous le matériel nécessaire pour fabriquer la bobine réceptrice.



Ce capteur ayant une inductance plus petite que le disque bobiné, sa capacité d'accord sera plus élevée.

On a décidé de câbler le condensateur d'accord du disque bobiné directement dans le récepteur. Pour que le récepteur puisse être compatible avec le capteur tube bobiné à ferrite, il faudra une valeur plus élevée, obtenue en installant dans le tube une capacité pour faire l'appoint. Un condensateur ajustable permettra un réglage précis de la fréquence de résonance.

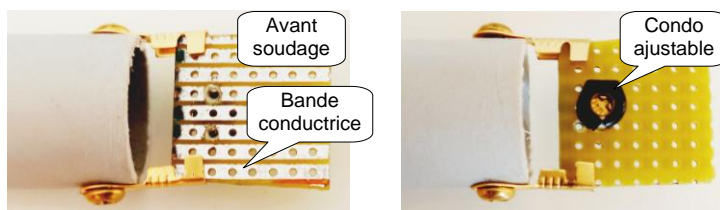
LISTE DU MATERIEL

Valeurs données en mm

- 1 feuille de mousse fine de 2 x200x37
- 1 ferrite de 200x12
- 1 tube IRL $\Phi_{\text{ext}} 20$ ($\Phi_{\text{int}} 17$) L :210
- 10 bobines d'induction creuses pour électrovannes : $\Phi_{\text{int}} 20$ $\Phi_{\text{ext}} 24$ 480 spires, fil $\Phi 0,2$, inductance 4,1mH, résistance 16,8 Ω .
- 1 tube $\Phi_{\text{ext}} 27, \Phi_{\text{int}} 25$ L :206mm ou 4 manchons IRL $\Phi 25$ qu'on solidisera entre eux avec du ruban adhésif large.
- 1 carte de circuit imprimé à trous et bandes de cuivre de 20x20
- 1 condensateur ajustable céramique de 120pF
- 1 ou 2 Condensateurs faibles pertes et faibles dérives thermiques polystyrènes ou équivalents à déterminer suivant la valeur exacte de l'inductance.
- Gaine fendue protectrice de longueur 20
- 1 tube IRL de $\Phi_{\text{ext}} 32$ ($\Phi_{\text{int}} 29$), L :275
- 2 bouchons pour tube de 32
- 2 cylindres de mousse qui se logent dans le bouchon
- 1m de câble coaxial RG316 ou bien câble pour sonde d'oscilloscope.
- 1 connecteur aviation femelle sur fil GX12

ASSEMBLAGE :

1. Percer à 4mm d'une extrémité du tube IRL de 20, 2 trous de 3 diamétralement opposés.
2. Avec du papier de verre poncer l'extérieur du tube IRL de 20 pour que les bobines coulisent sans forcer. Ne pas les monter de suite.
3. Fixer les cosses avec les 2 vis de 3, leurs écrous et rondelles éventails. Utiliser des vis laiton de préférence les serrer modérément.
4. Agrandir les trous pour loger le condensateur ajustable. Souder le condensateur ajustable sur la carte et souder la carte sur les cosses. Le condensateur n'est alors pas encore relié à la bobine.



5. Placer dans le tube IRL de 20, la ferrite entourée de la feuille en mousse fine de 2mm, l'ajustement doit être un peu serré.
6. Placer les bobines qui font 10mm d'épaisseur régulièrement espacées le long de la ferrite, tous les 9mm environ. Cet espacement permettra d'avoir un Q d'environ 56 ce qui n'est pas excessif mais suffisant. L'inductance sera d'environ 1,2H. Le blocage en translation des bobines s'effectuera avec du ruban adhésif sur 2 à 3 tours placé dans les intervalles. **Attention**, à placer les bobines dans le même sens, sinon les tensions induites aux bornes des bobines vont se soustraire au lieu de s'ajouter.
7. Relier les bobines en série par soudage. Souder un fil fin sur la dernière bobine pour le ramener au début du tube.
8. Au cutter, gratter l'émail des fils terminaux du bobinage sur 1cm. Devisser un peu les vis et entourer le fil autour de la vis entre la tête de la vis et la cosses Serrer les 2 vis.
9. Mesurer l'inductance en branchant un RLCmètre ou un bon inductancemètre entre les 2 vis. Sa valeur doit être voisine autour de 1,2H. En déduire la capacité d'accord théorique en appliquant la relation _____

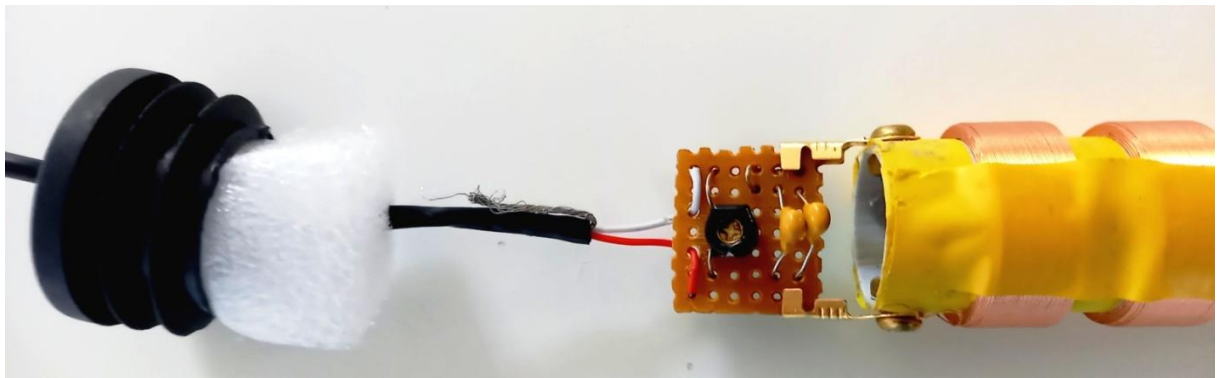
Exemple Avec $L=1,19H$ et $f=3200Hz$ cela donne $C_0=1850pF$

Pour avoir la valeur de la capacité C à installer dans le tube, il faut retrancher à la valeur de C_{acc} :

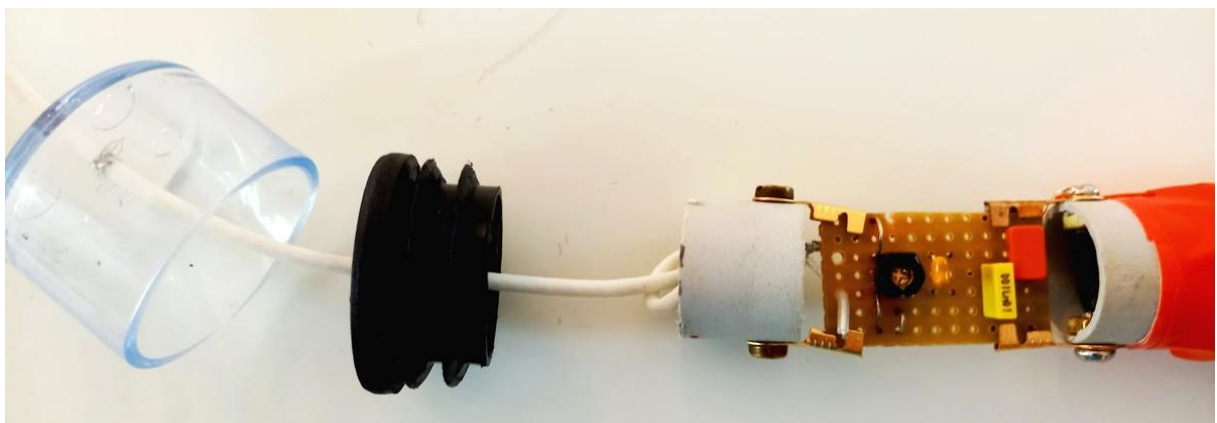
- La valeur de la capacité C_{disc} installée dans le récepteur pour le disque bobiné.
- La valeur de la capacité du câble C_{cable} compter 100pFpar mètre pour un RG316.
- La valeur de la capacité parasite de l'ensemble de la bobine C_{par} , qui est environ de 66pF.
- La valeur à mi course du condensateur ajustable, soit 70pF.

Exemple : $C_0=1850pF$ il vient $C=1850-925-100-66-70=689pF$.

- 10 On ne trouvera très probablement pas de valeur normalisée de condensateur ayant la valeur pile poil calculée précédemment. Du fait du Q voisin de 70, l'accord sera pointu et il nous faut une valeur à 1% près si on veut rester la bande passante. L'amplitude du réglage du condensateur ajustable étant faible (100pF), il nous faudra trier des condensateurs au capacimètre et faire éventuellement des associations série ou parallèle pour avoir la bonne valeur.
- 11 Souder le ou les condensateurs sur la carte, les raccorder au condensateur ajustable et aux cosses. Souder le coaxial ou le câble blindé, faire un nœud avec le coax, puis faire passer le coax par un petit trou effectué dans le bouchon. Le câble sera ainsi bloqué par le nœud.
- 12 Faire passer les fils fins du bobinage dans les vis qu'on serrera.



- 13 Il faut ensuite refermer l'ensemble. On peut entourer la carte par un petit bout de gaine électrique fendu sur laquelle viendra s'appuyer la mousse du bouchon.
- On peut aussi faire le montage suivant en rajoutant un une collerette en tube de 20 sur laquelle viendra s'appuyer le bouchon. La collerette sera maintenu sur la carte par 2 cosses maintenues sur la collerette par 2 vis.



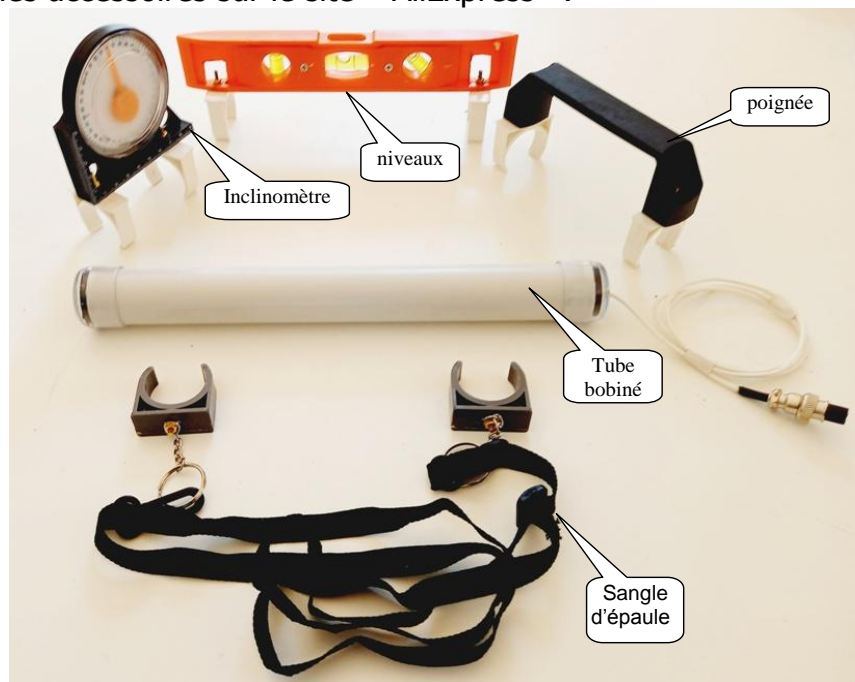
Assembler l'ensemble, le bobinage étant maintenu par les bouchons terminaux et leurs mousse. Pour bloquer les bouchons qui sont entrés à force dans le tube de 32, on peut utiliser des vis laiton placés en bout de tube, ou bien utiliser des bouchons couvrants en silicone prévus pour les pieds de chaise. Souder le connecteur GX12 en bout de câble.



Pour le câblage se reporter au câblage du disque.

ACCESOIRES :

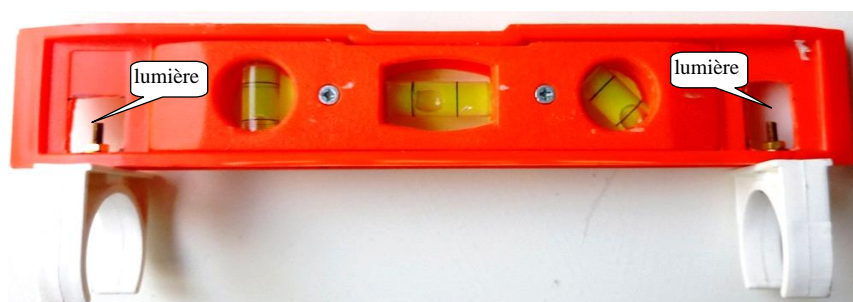
On trouvera les accessoires sur le site « AliExpress ».



Ils sont fixés sur des colliers clipsables, fixés par de la visserie laiton pour ne pas perturber la réception.

- Niveau à bulle : il doit disposer d'au moins 2 bulles, une pour l'horizontalité et l'autre inclinée à 45°. Comme pour l'inclinomètre il faut enlever les bases magnétiques.

Pour fixer les colliers, il faudra aménager 2 lumières pour que les vis puissent passer.



- Inclinomètre : il faut ôter les bases magnétiques dont il est pourvu et percer 2 trous pour le vis



On n'a pas prévu de boussole, car elle est faussée par la ferrite. Cette absence n'est pas très grave, car la boussole ne sert que dans le cas où le point à localiser est dans une zone complètement inaccessible.

Pour le rôle et l'intérêt du niveau et de l'inclinomètre, consulter le guide utilisateur.

caracteristiques

Elles sont susceptibles d'être légèrement différentes d'un modèle à l'autre.

Caractéristiques électriques du tube bobiné à ferrite seul

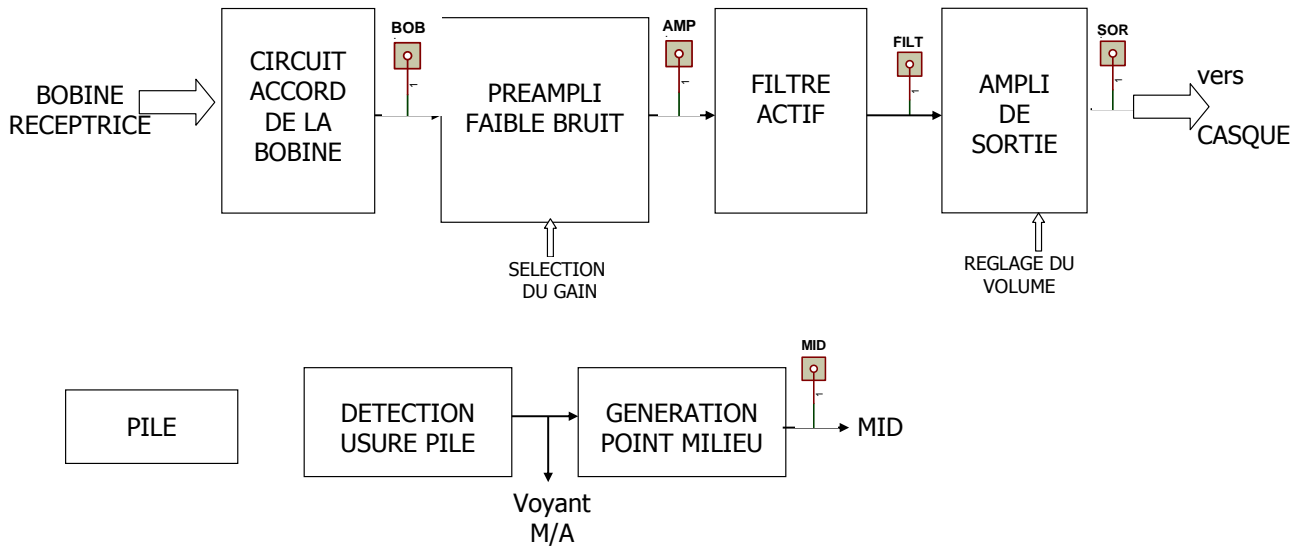
GRANDEUR	DESIGNATION	METHODE	Valeur
L	Inductance	Mesuré à 1kHz au LCRmètre	1,19H
ESR :	résistance équivalente série en alternatif de l'enroulement		215Ω
R _{DC}	Résistance en courant continu	Ohmmètre	188Ω
Fp :	Fréquence de résonance propre	GBF et oscilloscope	17860Hz
C _{PAR}	Capacité parasite du bobinage	Calculée à partir de Fp et L	66pF

Caractéristiques du tube bobiné à ferrite accordée avec un condensateur

GRANDEUR	DESIGNATION	METHODE	Valeur
Bp	Bande passante à -3dB	GBF et oscilloscope Calculé $Q=f_0/B_p$	57Hz
Q à 3200Hz	coef de qualité ou de surtension du bobinage		56
Sensibilité	Tension aux bornes du disque accordé en fonction du champ magnétique.	Calculée à 3200Hz	28μV/pT
Bruit	valeur efficace du bruit dans la bande passante (57Hz) aux bornes du tube bobiné accordé	Calculé à partir de R _{DC} et Q	0,75μV
EPR	Résistance équivalente parallèle ou impédance de sortie du tube bobiné accordé à 3200Hz	Calculée à partir de ESR et Q. $EPR=ESR.Q^2$	1300kΩ

BOITIER RECEPTEUR

ANALYSE FONCTIONNELLE ET STRUCTURELLE



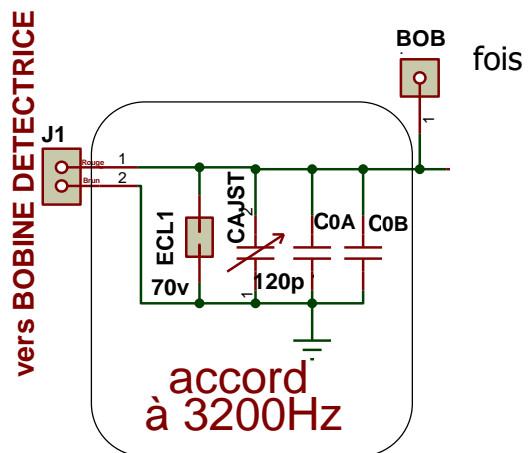
Intérêt de la sélection du gain et du réglage de volume

Lorsqu'on est très loin de la source dans les retombées verticales des lignes du champ magnétique de l'émetteur, l'approche n'est alors possible que par une constatation de l'augmentation de l'amplitude signal.

L'amplitude du signal peut varier d'environ $1\mu\text{V}$ à plusieurs volts, donc dans une plage de plus de 120dB. Pour une écoute confortable la plage disponible pour une oreille est d'environ 80dB. Il convient donc de permettre à l'opérateur d'adapter à son écoute la sensibilité et donc le gain du récepteur. Ce réglage a été introduit en commutant plusieurs gains associés à un réglage de volume.

circuit d'accord de la bobine réceptrice

L'accord sera effectué par une capacité. Une fois sa valeur déterminée, elle ne sera pas nécessairement normalisée. On pourra obtenir sa valeur exacte par un ou plusieurs condensateurs mesurés précisément au RLCmètre mis en parallèle sur un condensateur ajustable de 120pF.



CALCUL DE LA CAPACITE D'ACCORD

Mesurer l'inductance du disque bobiné en branchant un RLCmètre ou un bon inductancemètre aux bornes de la bobine de réception. En déduire la capacité d'accord théorique en appliquant la relation _____

Exemple pour le disque bobiné réalisé $L=1,35H$ et $f=3200Hz$ cela donne $C_{acc}=1,832nF$
Pour avoir la valeur de la capacité C à installer sur la carte imprimée, il faut retrancher à la valeur de C_{acc} :

- La valeur de la capacité du câble C_{cable} compter 100pFpar mètre pour un RG316.
- La valeur de la capacité parasite de l'ensemble du disque bobiné C_{par} , qui est environ de 140pF pour le disque bobiné décrit.
- La valeur à mi course du condensateur ajustable, soit 70pF.

Exemple : $C_{acc}=1850pF$ il vient $C=1832-100-140-70=1522pF$. Obtenue par $C0A=1,5nF$ en parallèle avec $C0B=20pF$.

Ensuite avec C_{ajust} on ajustera la valeur expérimentalement, via l'émetteur ARCAS ou bien un GBF précis, en sortie duquel on place un fil en court circuit formant une boucle d'au moins 50cm de diamètre. Dans celle-ci on place le disque détecteur relié au récepteur. On ajustera la capacité pour avoir, en sortie du capteur, la tension la plus grande possible à 3200Hz.

Sur la carte imprimée, 3 emplacements sont prévus, dont un pour un mini condensateur ajustable très pratique pour affiner le réglage.

Pour les condensateurs, il faut veiller à choisir une technologie à faible pertes. Surtout, éviter les condensateurs céramiques bas de gamme.

Lors des essais en surface, il peut arriver par inadvertance de placer le capteur très près de la bobine émettrice. La tension induite dans le capteur peut atteindre des valeurs très élevées, jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de volts quand le disque est placé horizontalement à moins d'un mètre au-dessus de la bobine émettrice. Dans ce cas inexorablement, on aura au minimum destruction de la capacité d'accord et du premier ampli Op.

Pour les protéger, on a placé un éclateur à gaz en entrée du récepteur. Idéalement, il aurait fallu un éclateur à gaz de 40V, malheureusement cette valeur est introuvable, on s'est contenté d'un éclateur de 70V, qui assure une protection suffisante confirmée par des essais. Il est tout de même déconseillé d'approcher le capteur à moins de 2 à 3m de la bobine d'émission.

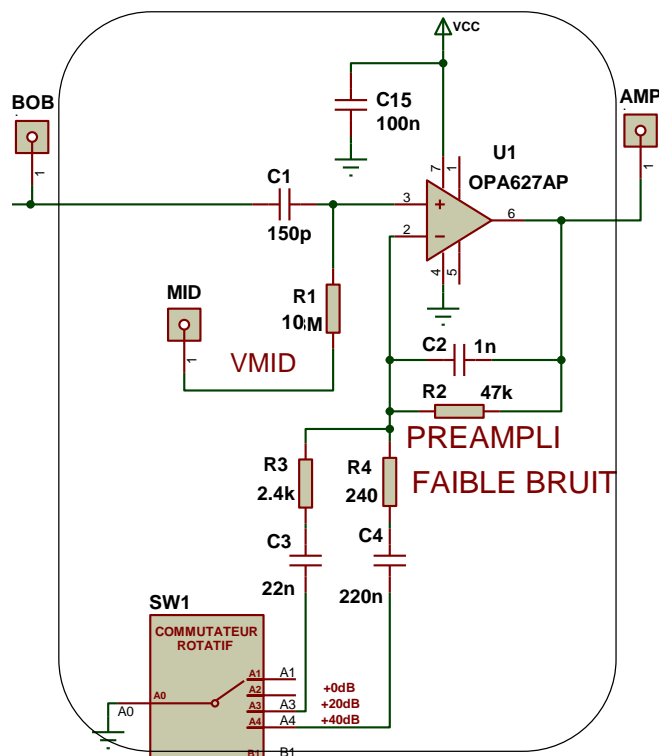
préampli faible bruit

Il permet la sélection de 3 gains et donc 3 sensibilités différentes. En effet, si on n'avait qu'une seule sensibilité cela mettrait la sortie en saturation quand la bobine d'émission serait à faible profondeur. En effet on ne distinguerait pas à l'oreille des augmentations du signal quand on se rapprocherait de la zone de convergence (voir guide utilisateur le paragraphe intitulé « comment trouver la zone de convergence »).

De plus, il doit générer peu de bruit électronique, car celui-ci se retrouvera amplifié par toute la chaîne d'amplification

On a mis en œuvre un ampli Op faible bruit OPA627 câblé en montage non inverseur. De plus, les condensateurs C2, C3 et C4 donnent à cette structure pour les gains moyen et fort un filtrage d'ordre 2 ($Q=0,5$) centré autour de 3,2kHz.

Le commutateur SW1 soudé directement sur la carte imprimée, permet de sélectionner le gain de cet étage



Le récepteur étant alimenté par une mono-tension Vcc de 9V, il a fallu générer un point de repos Vmid au voisinage de Vcc/2, afin de pouvoir amplifier le signal alternatif du capteur. La résistance R1 sert à polariser l'entrée et la sortie de l'Ampli Op à Vmid. Grâce aux condensateurs C3 et C4, la composante continue Vmid en entrée de l'Ampli Op n'est pas amplifiée et se retrouve reportée en sortie.

Pour ne pas atténuer ce signal, le préampli devra présenter une impédance d'entrée beaucoup plus grande que l'impédance de sortie du capteur soit 485kΩ pour le disque bobiné accordé, et 1,3MΩ pour le tube bobiné d'où le choix d'un montage de type non inverseur et une valeur très grande de 10MΩ pour R1.

Comme on a choisi de placer un des fils du capteur à la masse, pour avoir un signal centré sur V_{mid} , il a fallu intercaler le condensateur de liaison C1 pour séparer les composantes continues. Le condensateur C1 associé à R1 forme un filtre passe-haut, on a choisi C1 pour que la fréquence de coupure soit très inférieure à 3200Hz.

En entrée il faut limiter les sources de bruit électronique généré dans les composants de façon à pouvoir détecter des signaux les plus faibles possibles et avoir une portée maximum pour l'appareil.

Les résistances électriques et les semi-conducteurs sont le siège de bruit électronique. Du bruit est donc d'abord généré par la résistance de l'enroulement de la bobine de détection. Les calculs montrent qu'on mesurera aux bornes du capteur accordé une tension de bruit d'environ $1\mu V$ de valeur efficace.

L'étage d'entrée constitué de résistances de l'Ampli Op va lui aussi apporter sa contribution au bruit. La résistance R1 de très forte valeur va être le siège d'un bruit important mais fort heureusement largement atténué par l'impédance beaucoup plus faible de sortie du capteur.

Ce montage a été calculé pour que sa contribution au bruit soit beaucoup plus faible que le bruit engendré par la résistance de l'enroulement du capteur.

Pour un ampli Op, on a modélisé son bruit ramené à l'entrée par une source de tension « en » en nV/\sqrt{Hz} (racine de Hz) et une source de courant « in » en nanoAmpère/ \sqrt{Hz} .

Le courant « in » provoquera une tension de bruit lorsqu'elle traversera l'impédance de sortie du capteur. Les capteurs ont souvent une impédance de sortie faible et dans ce cas la contribution de « in » au bruit total sera faible par rapport à « en ». Et on choisit l'ampli Op en fonction de « en ».

Dans notre montage à la résonance notre bobine accordé présente une résistance élevée. Pour nos capteurs disque et tube cette résistance est respectivement de $0,485M\Omega$ et $1,3M\Omega$. Il faut choisir un AmpliOp avec un « in » particulièrement bas. C'est le cas de OPA627AP avec $e_n=4,5nV/\sqrt{Hz}$ et $i_n=2,5fA/\sqrt{Hz}$ ($1fA=10^{-15}A$!!). On calcule que sa contribution au bruit dans la bande passante de 150Hz n'est que $56nV$ pour le disque et $151nV$ pour le tube, donc négligeable.

Le populaire TL081 qui n'est pas considéré comme un ampli op faible bruit car $e_n=30nV/\sqrt{Hz}$ mais par ailleurs un « in » est assez faible à $80fA/\sqrt{Hz}$. Les calculs montrent que sa contribution au bruit dans la bande passante de 150Hz n'est que de $0,9\mu V$ pour le disque ce qui peut être acceptable.

filtre actif

La bobine détecte aussi des champs magnétiques indésirables. Certains sont d'origine naturelle mais les plus importants sont dus à l'activité humaine. Elles sont produites par les courants des installations électriques domestiques ou industrielles.

En ville le signal sera particulièrement parasité, ce qui conduit à une réduction très importante de la portée.

En campagne, les lignes électriques sont des sources importantes de parasites. On citera en particulier les lignes Très Haute Tension, qui peuvent perturber la réception du signal, même si elles sont à plusieurs centaines de mètres.

Sur les lignes hautes et très hautes tension, il n'y a pas que les courants 50Hz et leurs harmoniques qui génèrent des champs parasites mais il y a surtout l'effet Corona. Celui-ci est dû au fort champ électrique des lignes qui crée des micro-claquages de l'air ambiant autour des lignes. Cela génère un bruit électromagnétique au spectre étendu et dans lequel on retrouve la fréquence d'émission de l'ARCAS.

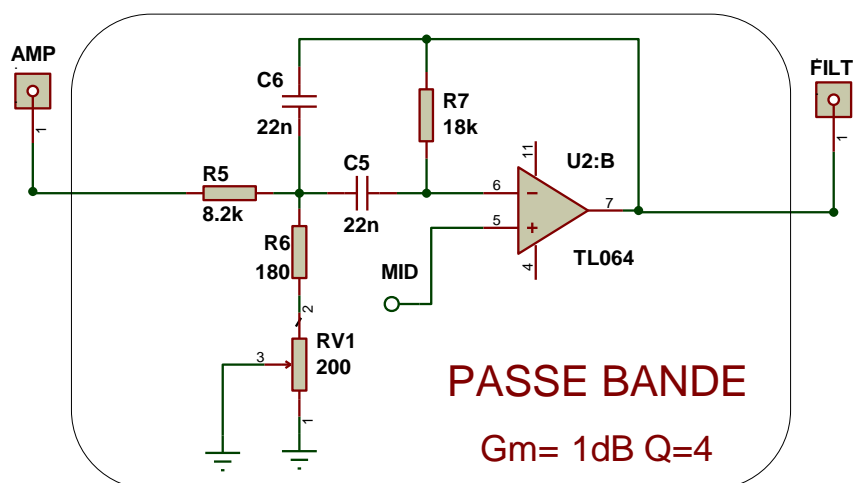
Un premier filtrage est effectué par le capteur en lui-même.

L'idée initiale était de renforcer ce filtrage en rajoutant un filtrage très sélectif autour de la fréquence d'émission (3200Hz) pour éliminer toutes les composantes autre que la fréquence d'émission.

Des essais comparatifs avec des filtres plus ou moins sélectifs ont montré qu'à l'oreille l'usage d'un filtrage très sélectif n'était pas une bonne solution pour 2 raisons :

- On avait plus facilement des accrochages, qui sont des mises en oscillations du récepteur à la fréquence du filtre. Ils se traduisent par des sifflements continus dans le casque très désagréables.
- Et surtout, la détection des bip-bip à l'oreille s'effectuait plus facilement avec un bruit au spectre étendu, plutôt qu'avec un bruit exclusivement à la fréquence attendu du fait du filtre très sélectif.

On a choisi une structure de Rauch bâti autour d'un des 4 ampli Op du TL064, C5 ,C6 et R5 à R7 et RV1 pour obtenir un filtre passe-bande d'ordre 2 avec un Q de 4 , ce qui correspond à une bande passante de 800Hz environ. Ainsi ce filtre n'est pas trop sélectif.



Vmid appliqué à la patte + de l'ampli OP, permet de polariser sa sortie à cette même valeur.

Le potentiomètre RV1 permet l'ajustage de la fréquence centrale du filtre. Il se règle de façon à avoir son signal de sortie maximal à la fréquence d'émission (3200Hz).

ampli de sortie

Son but est de compléter l'amplification pour arriver à une amplification suffisante pour détecter à l'oreille le signal le plus faible possible.

Que vaut le signal le plus faible possible ?

Il est lié au rapport signal sur bruit minimum possible pour l'oreille. J'ai admis comme hypothèse que l'oreille puisse détecter un bip-bip dans un bruit de même valeur efficace, soit un rapport signal sur bruit de 1. On a vu précédemment que le bruit à l'entrée du récepteur était d'environ $1\mu\text{V}$, on peut donc admettre un signal minimal détectable de $1\mu\text{V}$.

A partir de quelle tension appliquée sur le casque, le signal est-il audible ?

Tout dépend du casque et de la personne !! Le casque utilisé est un modèle maison piézo-électrique particulièrement sensible et que j'ai testé sur ma personne. Je précise que mon âge ne me permet plus d'avoir une très bonne audition. J'ai envoyé à l'aide d'un GBF le bip-bip directement sur le casque et j'ai constaté que je pouvais détecter la présence du signal jusqu'à une valeur efficace de $300\mu\text{V}$!

Le signal minimum de $1\mu\text{V}$ en sortie du capteur doit donc être amplifié de 300, soit environ 50dB .

Pour parvenir à 50dB, comme le préampli a un gain de 40dB, le filtre 1dB, l'ampli de sortie doit donc avoir un gain de 11dB c'est-à-dire une amplification de 3,6.

Pourquoi ne pas avoir décidé d'amplifier beaucoup plus (par exemple 1000 ou 10000 ?)

En pratique, pour des amplifications très importantes, des instabilités apparaissent.

Celles-ci sont liées à des couplages et mettent le récepteur en oscillations.

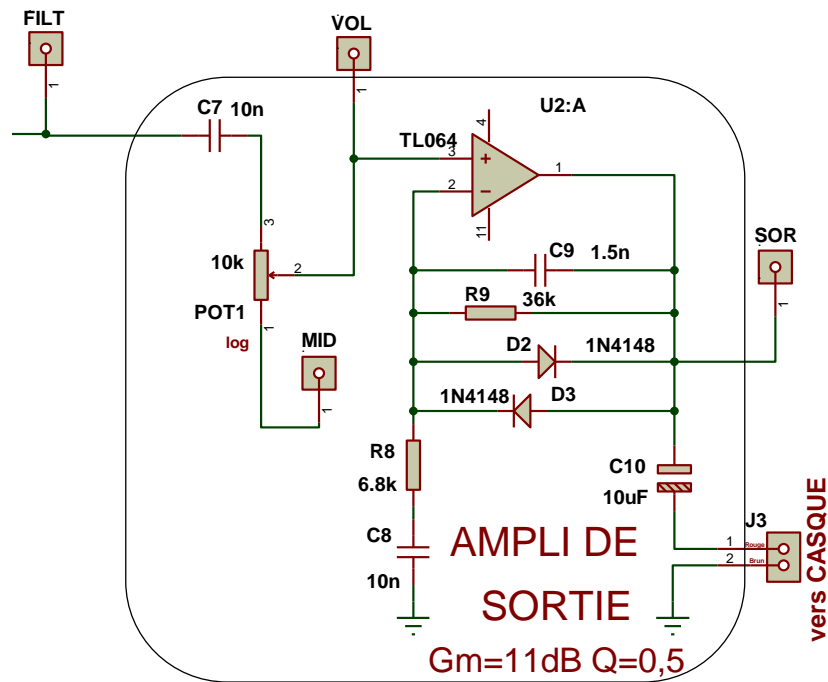
Dans le cas présent, malgré le blindage du boîtier récepteur et des câbles, le signal génère des courants dans les pistes de la carte imprimée et dans les fils du casque.

Ceux-ci provoquent un faible rayonnement capté par le disque détecteur qui est très sensible qui les renvoie cela dans l'ampli. Ce qui engendre une oscillation, qui s'apparente à l'effet Larsen. Ce phénomène peut apparaître sur la position gain max du commutateur le volume étant réglé aux environs de 70% .

Structure choisie

Il est bâti autour d'un ampli op basse consommation monté en non inverseur, avec l'aide de R8 et R9. Il est polarisé à V_{mid} par l'intermédiaire potentiomètre.

Les condensateurs C8 et C9 le rendent de type passe bande d'ordre 2 ($Q=0,5$) centré autour de 3,2kHz.



Le condensateur C10 permet d'éliminer la composante continue V_{mid} , pour le cas où on utiliserait un casque classique électromagnétique.

Pour les grandes amplitudes de signal à son entrée, le signal sera inutilement fortement écrêté. Pour diminuer ce phénomène, les diodes D2 et D3 de type 1N4148 ont pour but de diminuer le gain de cet étage aux grandes amplitudes pour lesquelles on aura qui passe ainsi de 11dB à 0dB. La baisse du gain commence à agir à partir d'une amplitude d'environ 300mV à son entrée.

Le potentiomètre de réglage de volume associé au condensateur C6 forme un filtre passe haut du premier ordre de fréquence de coupure 1kHz. Ce potentiomètre doit être à loi de variation logarithmique pour qu'il soit conforme à la sensibilité de l'oreille.

Le condensateur C10 permet d'éliminer la composante continue V_{mid} , pour le cas où on utilise un casque électromagnétique.

Si on souhaite réduire le gain total, pour se prémunir davantage du Larsen, on diminuera le gain de cet étage.

Détection usure pile et génération point milieu

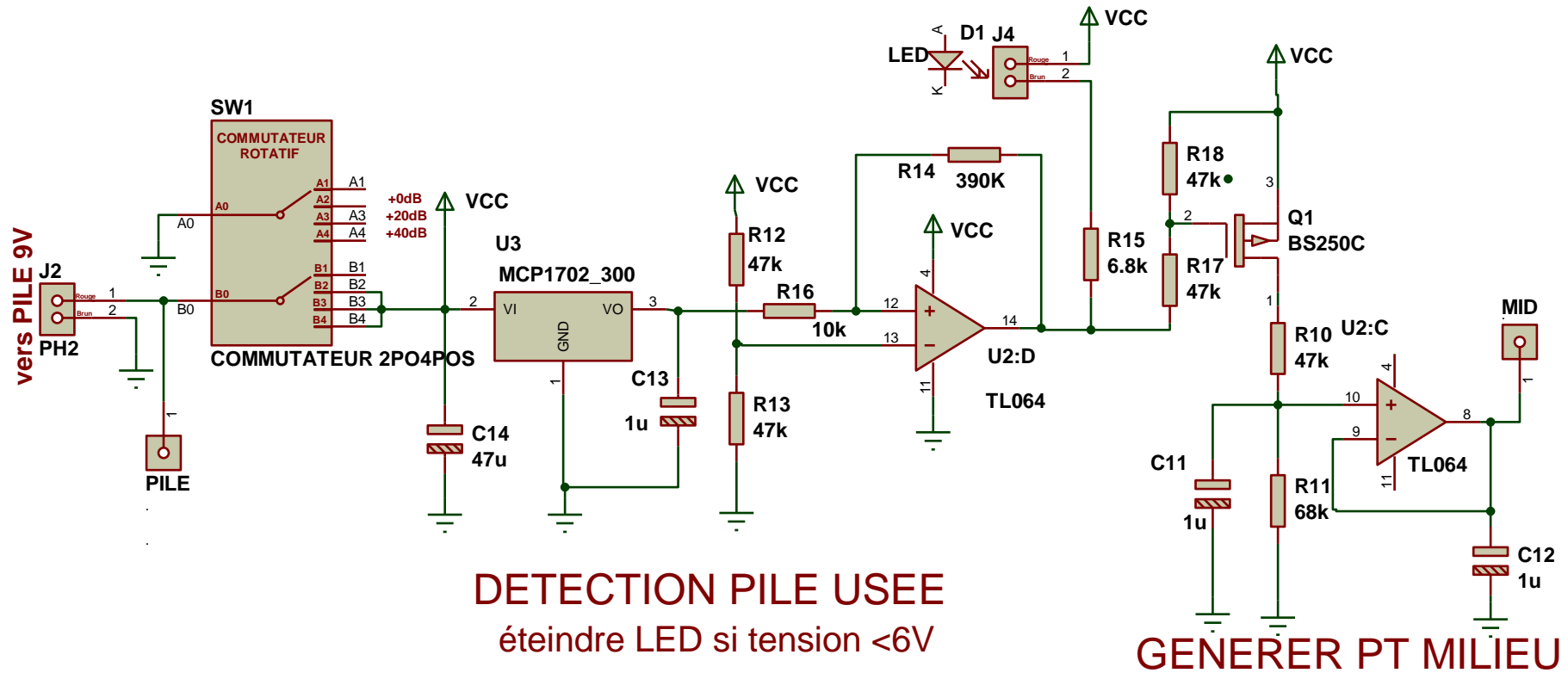
La pile de 9V s'use progressivement et en dessous d'une certaine valeur, la tension n'est plus suffisante pour un bon fonctionnement du montage.

Le circuit de détection usure pile, envoie un signal logique haut à sa sortie quand la tension descend en dessous de 6V.

Ce niveau logique sera mis à profit pour éteindre la led marche/arrêt et pour couper le son en mettant V_{mid} à 0.

L'opérateur n'entendant plus rien et constatant que la led est éteinte comprendra qu'il faut changer la pile.

Schéma de la partie Détection usure pile et génération point milieu



La mise sous tension s'effectue par le commutateur 2 pôles 4 positions qui permet ensuite de sélectionner la sensibilité.

Le principe de la détection de l'usure de la pile est de comparer à l'aide de l'ampli Op U2D une fraction de la tension de la pile avec une tension de référence fixe obtenue par le régulateur U3 de 3V. Le pont diviseur R12 et R13 permet d'obtenir 3V sur la patte moins de U2 D quand la tension de la pile Vcc vaut 6V.

Lorsque la pile est au dessus de 6V, l'entrée - de U2D est supérieur à son entrée + et sa sortie vaut 0V, ce qui alimente la led verte M/A D1.

A contrario quand la pile passe en dessous de 6V, la sortie de U2 vaut Vcc ce qui éteint la led D1.

Les résistances R14 et R16 introduisent une petite hystérésis évitant ainsi une instabilité de l'état de la sortie de U2D quand la pile vaut est exactement 6V.

Quand la pile est à plus de 6V, la sortie de U2D à 0 met en conduction le transistor MOS Q1 qui relie alors R10 à Vcc. Le pont diviseur formé par R10 et R11 permet d'obtenir le point milieu Vmid. A noter que ce point milieu n'est en fait pas à Vcc/2, mais légèrement supérieur, car la saturation du premier Ampli Op n'est pas symétrique par rapport à VCC/2.

L'ampli OP U2C monté en suiveur, permet de générer Vmid comme une source de tension c'est-à-dire avec une impédance de sortie nulle.

Quand la pile descend en dessous de 6V, la sortie de U2D passe à Vcc, ce qui bloque le transistor Q1 et met à 0V la tension Vmid, ce qui sature l'ampli op de l'ampli de sortie et coupe le son.

autonomie de la pile

La pile est de type 9V alcaline.

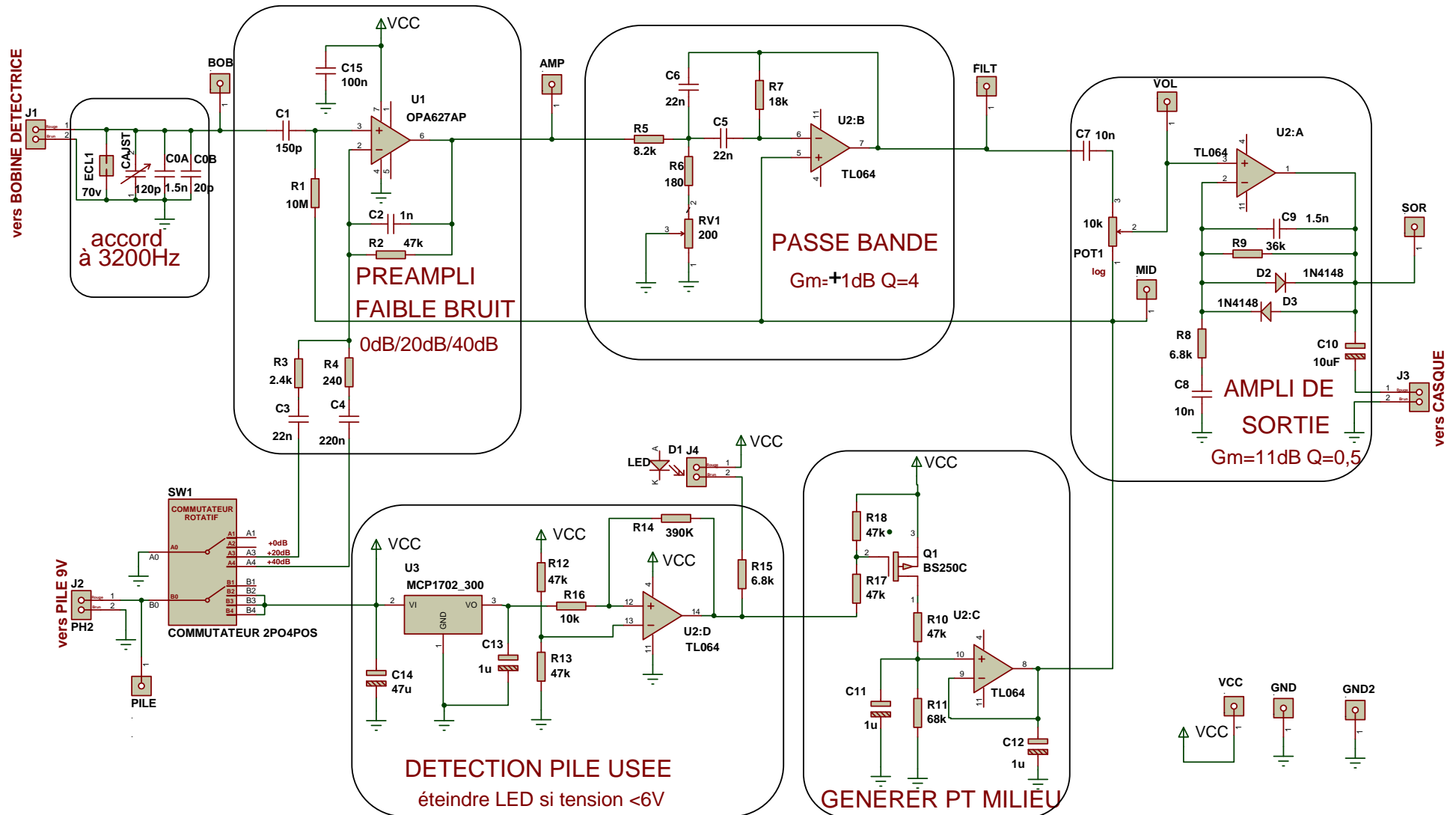
Pour connaître son autonomie on a mesuré la consommation du récepteur

TENSION PILE	Capteur débranché	Capteur branché Avec signal faible	Capteur branché avec signal max en continu (bip de durée infinie)	Etat de la pile
= 6V	2,2mA	2,2mA	3,25mA	Pile limite arret
=9V	2,75mA	3,35mA	5,25mA	Pile neuve

On peut estimer que la consommation moyenne est de 4mA.

Avec pile 9V alcaline 6LR61 de capacité 620mAh (sous 25mA) on aura une autonomie d'environ $620/4=150h$!!!

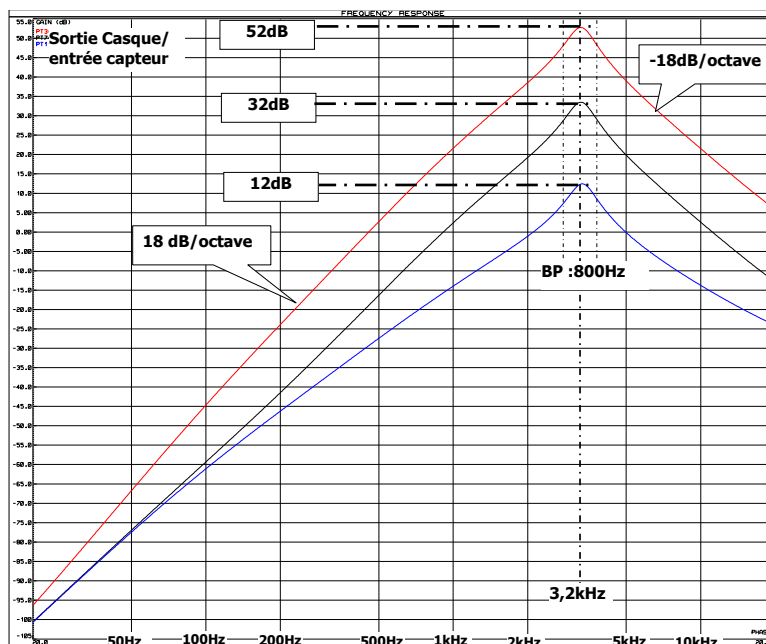
SCHEMA STRUCTUREL COMPLET DU RECEPTEUR ARCAS



SPECIFICATIONS

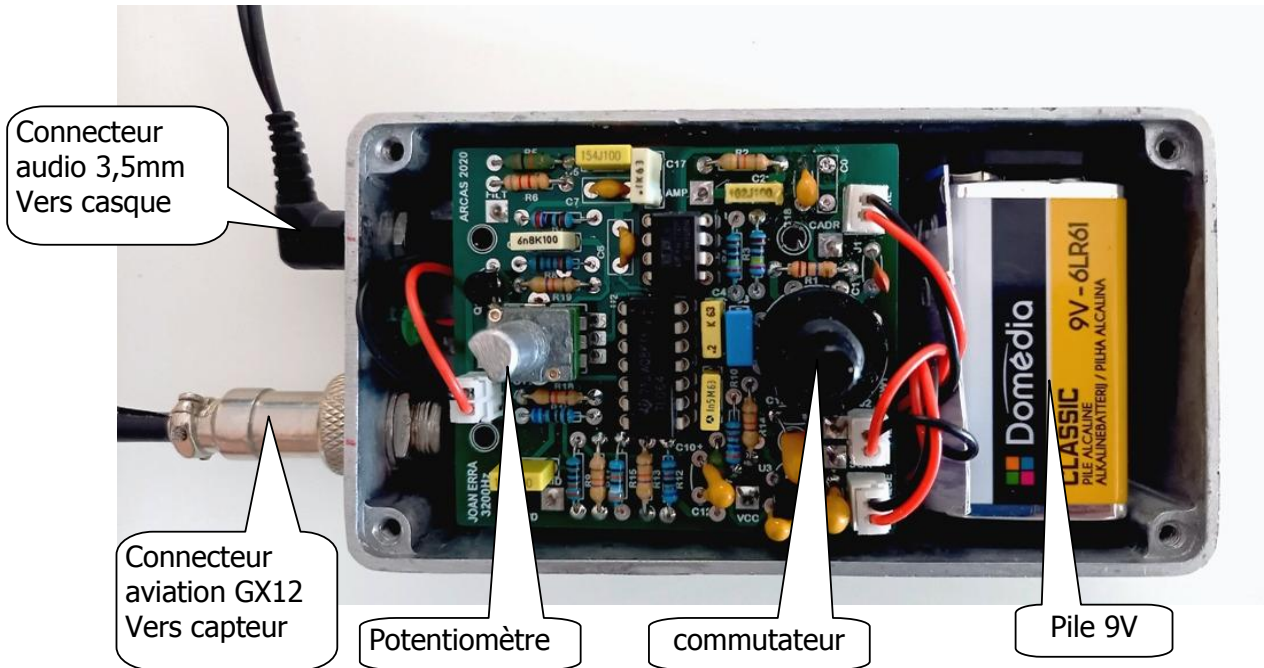
	GRANDEURS	VALEURS	METHODE
BOITIER RECEPTEUR SEUL	GAINS à 3200Hz Amplitude de sortie inférieure à 1V.	10dB/30dB/52dB Suivant commutateur	Simulation. Les valeurs mesurées restent à ± 3 dB près.
	Bande passante A -3dB	800Hz	Simulation et mesures
	Dimensions hors tout	L:120 l:60,5 H:53	
	poids	220g	
	alimentation	Pile alcaline 9V 6LR61	
	Indice de protection	IP65	
BOITIER RECEPTEUR ASSOCIE AU DISQUE BOBINE	Consommation moyenne	4mA	Mesurée
	autonomie	150 heures	calculée
	sensibilité	0,1pT (picoTesla) ou 1nG (nanoGauss)	Emetteur (bobine 2m) récepteur ARCAS, Champ magnétique déduit de la portée de 1km au casque d'écoute
	Bruit électrique	1 μ V efficace	Calculé dans la bande passante de 150Hz autour de 3,2kHz

Courbe de réponse du boîtier récepteur seul (sans le disque bobiné)



FABRICATION BOITIER RECEPTEUR

Vue d'ensemble

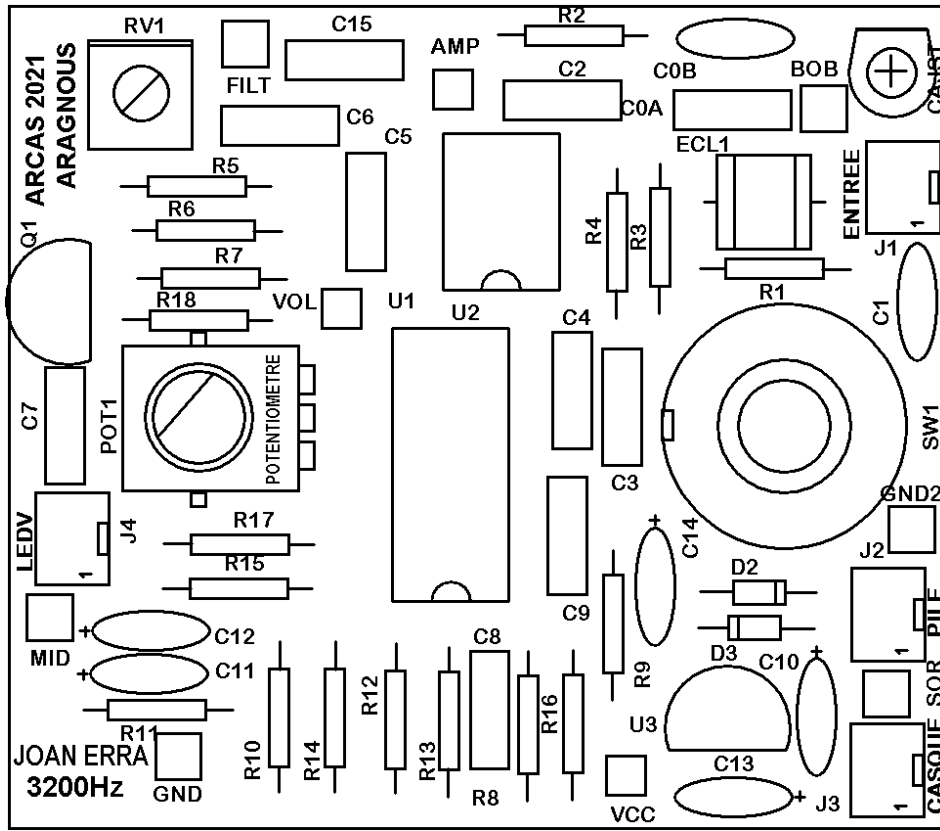


La photo ci-dessus correspond à une version légèrement différente et antérieure du circuit imprimé (PCB).

- Le boîtier en aluminium de dimensions 112 x 60,5 x 31 est un modèle 1590B IP55 .
- Le circuit imprimé (PCB) 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 visualisateur de fichiers Gerber qui vous permettra de visionner et d'imprimer les différentes couches du circuit imprimé.
- Dimensions de la carte imprimée : 61 x 53,5

Schémas du circuit imprimé(PCB)

- Vue composants (Top silk) échelle 2 environ

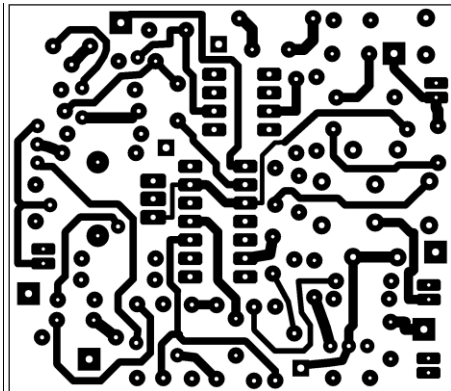


Une fois la carte fixée sous le couvercle du boîtier, les composants seront inaccessibles. Il est donc conseillé d'implanter le condensateur ajustable sur la face de dessous, de façon à pouvoir effectuer le réglage avec la carte installée et fixée.

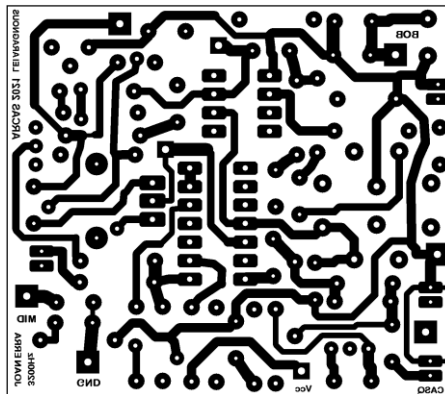
- Vue des pistes imprimées

Attention, les schémas qui suivent ne sont pas précisément à l'échelle 1

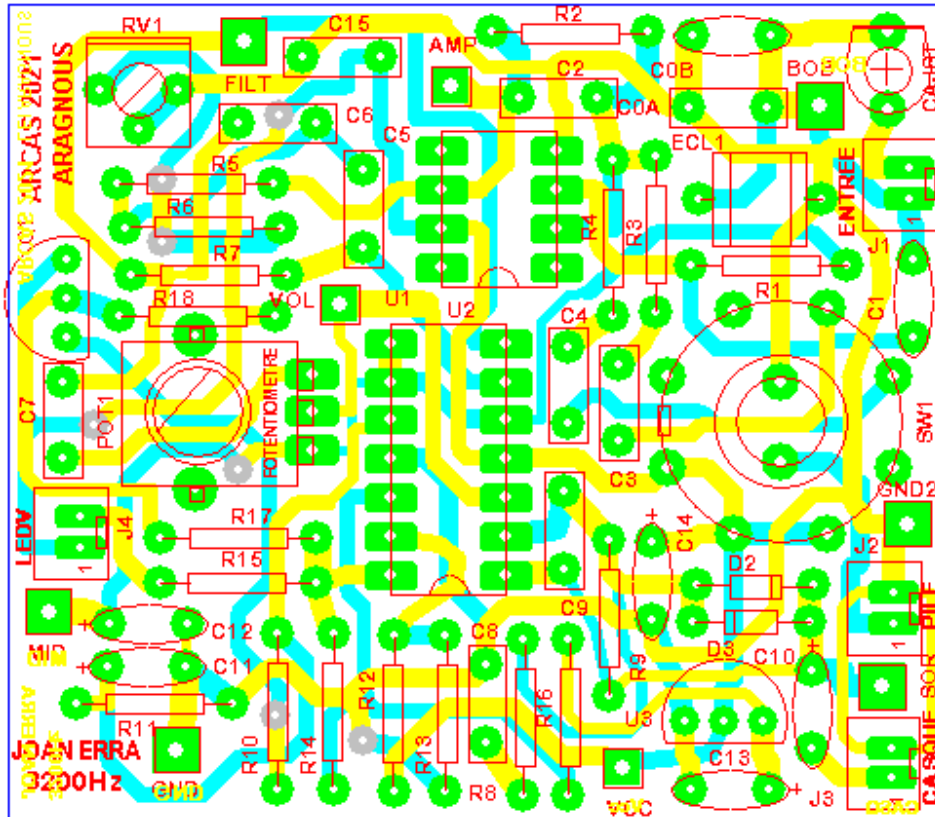
Face Top Copper



Face Bottom copper
(vue par transparence)

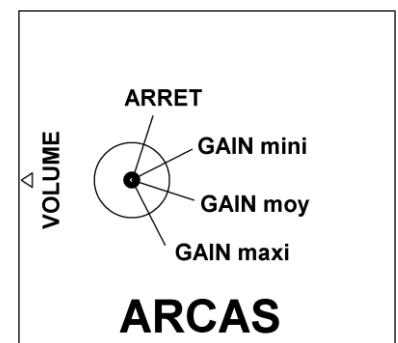
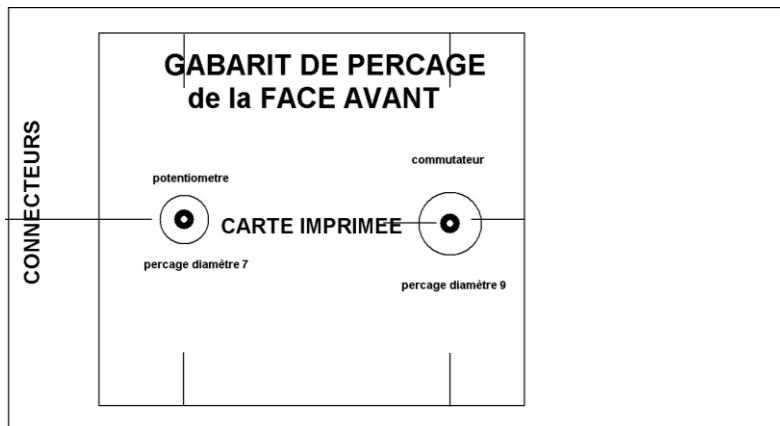


- Toutes les faces vue par transparence échelle 1,8 environ

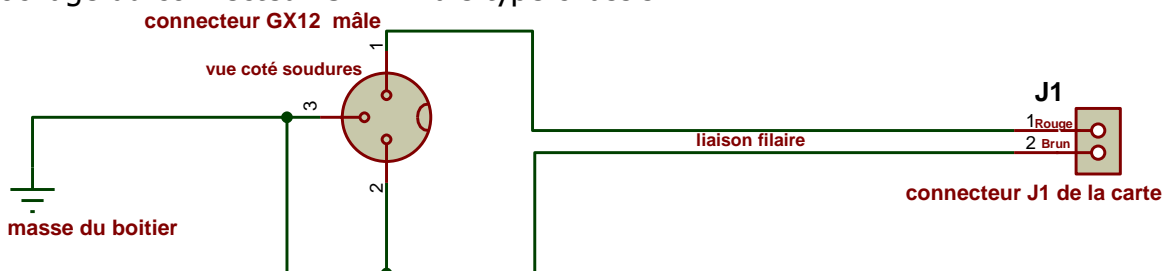


- Gabarit de perçage de la face avant et câblage
Utiliser ce gabarit (disponible aussi en fichier gerber) car le commutateur n'est pas centré exactement sur la largeur.
Pour les perçages, découper le gabarit suivant le grand rectangle à coller sur la face avant avant découpage.

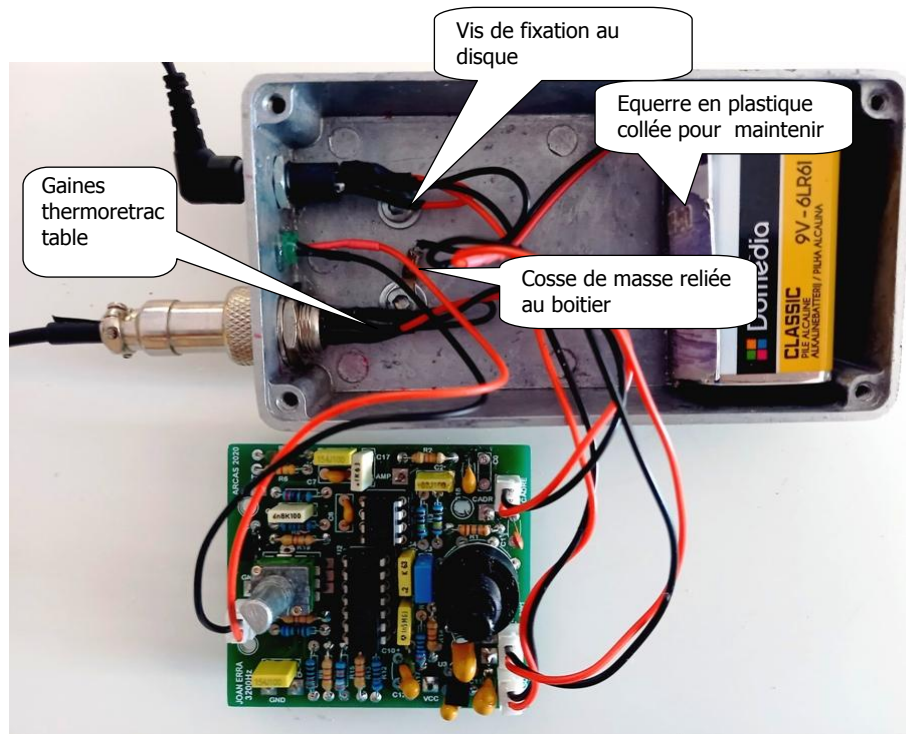
Habillage face avant à découper



Brochage du connecteur GX12 mâle type chassis



La connexion de la masse du montage au boîtier est importante. En effet en prenant le boîtier à main nue, elle permettra d'éviter le Larsen sur la position Gain maxi. Si on fixe le récepteur sur le disque, on recouvrera la poignée d'une feuille aluminium autocollante qu'on reliera via un fil et une cosse au boîtier.



La photo ci-dessus correspond à une version légèrement différente et antérieure du circuit imprimé (PCB).

L'usage de la gaine thermo-rétractable sur les pattes de la led et sur les cosses des connecteurs est indispensable pour assurer la bonne tenue des liaisons qui risquent d'être sollicités lors des changements de la pile. La led est rentrée forcée dans le trou et collée.

La carte imprimée est fixée sans vis sur la face avant à l'aide des écrous du potentiomètre et du commutateur.



Liste du matériel du boîtier

On pourra trouver tous les composants sur « AliExpress »

DESIGNATION	REPERE	Qté	VALEUR	REMARQUE	EMPREINTE
Boîtier		1	1590B	en Alu	112mm x 31mm x 60,5mm
Bouton		1	MF-A103	bouton cadranA03	
Bouton		1		axe canelé	13/17mm
Circuit intégré	U1	1	OPA627AP	ampli op faible bruit	DIL08
Circuit intégré	U2	1	TL064	ampli op quadruple faible conso	DIL14
Circuit intégré	U3	1	MCP1702-300	régulateur 3V	TO92-100
Commutateur	SW1	1	SR16	4 Positions - 2 Pôles	COMM 2POL 4POS
Condensateur	Cajust	1	120pF	Type céramique 6mm	CAPA AJUST
Condensateur	COA	1	à déterminer	à faible dérive thermique polystyrène ou autre	CAPA 2PAS
Condensateur	COB	1	à déterminer	à faible dérive thermique polystyrène ou autre	CAPA CER 2PAS
Condensateur	C1	1	150pF	céramique	CAPA CER 2PAS
Condensateur	C2	1	1nF	plastique	CAPA 2PAS
Condensateur	C3,C5, C6	3	22nF	plastique	CAPA 2PAS
Condensateur	C4	1	220nF	plastique	CAPA 2PAS
Condensateur	C7, C8	2	10nF	plastique	CAPA 2PAS
Condensateur	C9	1	1,5 nF	plastique	CAPA 2PAS
Condensateur	C10	1	10uF	polarisé Tantale	CAPA TANT 2PAS
Condensateur	C11,C12, C13	3	1uF	polarisé Tantale	CAPA TANT 2PAS
Condensateur	C14	1	47µF	polarisé Tantale	CAPA TANT 2PAS
Condensateur	C15	1	100nF	plastique	CAPA 2PAS
Connecteurs		1	GX12	Connecteur aviation 3 broches mâle sur châssis	
Connecteurs	J1à J4	4	PH2	mâle et femelle JST PH2	PH2
Connecteurs		1		Prise audio femelle sur châssis 3 pôles-3,5mm	
Diode LED	D1	1	LED	verte basse consommation	
Diode	D2, D3	2	1N4148	Diodes de signal	
Eclateur à gaz	ECL1	1	70V		
Gaine thermo		1		pour contacts connecteurs et led	
PCB		1		double face trous métallisés	61mm x 54mm
Pile		1	9V	alcaline 6LR61	
Points tests	PT	9	PT	cosses poignards	POINT TEST
Potentiomètre	POT1	1	50k ou 25k ou 10k	logarithmique type A vertical sur pcb ALPHA RD601F	POT ALI JLC
Résistance	R1	1	10M	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Résistance	R3	1	2.4k	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Résistance	R4	1	240	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS

Résistance	R5,	1	8,2K	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Résistance	R6	1	180	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Résistance	R7	1	18k	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Résistance	R9	1	36k	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Résistance	R14	1	390k	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Résistance	R15, R8	2	6.8k	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Résistance	R16	1	10k	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Résistance	R2,R10 , R12,R13 R17,R18,	6	47k	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Résistance	R11	1	68k	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Support de pile		1		Pour pile 9V	
Transistor	Q1	1	BS250C	PMOS	TO92-100 JLC



L'ensemble de réception avec le tube bobiné est peu encombrant.

LE CASQUE D'ECOUTE

Le casque est un maillon important de la chaîne de réception.

TECHNOLOGIE & TYPE DE CASQUE

L'immense majorité des casques sont de type électrodynamique, ils utilisent un transducteur électromagnétique.



J'ai testé 3 types de casques :

- 1 casque électrodynamique de type professionnel le Koss_pro_4AA, ce modèle d'impédance moyenne et de sensibilité élevée (300Ω , 100dB SPL) n'est pas très onéreux pour un modèle professionnel, compter environ 120€ tout de même.
- Plusieurs casques électrodynamiques grand public d'impédance faible (18Ω) d'environ 20€ et de sensibilité non communiqué qui ont donnés des résultats sensiblement identiques
- Un casque piézo électrique de ma fabrication. Réalisé à partir d'un casque anti-bruit dans lequel j'ai logé des transducteurs piézoélectrique, le tout pour moins de 30€. Il présente une impédance élevée (2000Ω).

Les voies droite et gauche ont été mises en parallèle.

Influence de la sensibilité

Il est clair que plus le casque est sensible plus il permettra d'entendre des signaux faibles et donc d'augmenter la portée de la transmission.

J'ai fait les essais sur moi-même, en relevant l'amplitude du signal correspondant mon seuil d'audibilité avec un signal bip-bip identique à celui de l'ARCAS généré avec 2 GBF.

Un GBF pour fournir un signal sinusoïdal de 3200Hz commandé par un autre qui génère un signal rectangulaire de période 1s et de rapport cyclique 80ms.

	Méthode	Casque grand public	Casque Pro Koss4AA	Casque piezo
Seuil de d'audibilité (détection) sur un signal à 3200Hz bip-bip de l'ARCAS	Valeur efficace	1,5 à 2mV	0,3mV	0,3mV

On voit que les modèles grand public apparaissent au moins 5 fois moins sensibles que les autres.

J'ai fait faire des essais d'écoute sur ma fille âgée de 24 ans, son seuil d'audibilité du signal s'est révélé 8 fois plus sensible que le bien !! Ainsi avec le casque piezo, son seuil était à 40µV !!

Influence de la bande passante

Idéalement les casques audio doivent transmettre tout le spectre audio (20Hz à 20kHz). Ils ont donc une large bande passante en particulier le modèle professionnel. Ce n'est pas le cas du modèle piézo que j'ai réalisé qui favorise les fréquences médium en gros entre 500Hz et 5000Hz, ce qui serait plutôt un avantage.

Modèle à choisir:

On pourra opter pour le modèle pro Koss4AA mais vu son prix , mais pour un cout moindre on pourra fabriquer un modèle piezo fait maison. Les modèles grand public seront plutôt à utiliser en dépannage.

Quoiqu'il en soit, je conseille tout de même de choisir un casque avec isolation circum-aural, c'est à dire muni d'un coussinet qui enveloppe l'oreille. Cela permet de s'isoler des bruits ambiants et de mieux se concentrer sur le signal à détecter.