

DOSSIER TECHNIQUE DU DETECTEUR DE CO2 SPELEO

Version décembre 2024



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

Licence Creative Common 4.0 international
Attribution non commerciale



Sommaire interactif

INTRODUCTION	2
DESCRIPTION	2
CHOIX TECHNOLOGIQUES.....	3
ETUDE FONCTIONNELLE DE LA CARTE.....	5
SCHEMA FONCTIONNEL.....	5
ANALYSE.....	6
SCHEMA STRUCTUREL DE LA CARTE.....	9
FABRICATION DE LA CARTE (PCB).....	10
REALISATION DE L'ENCEINTE DU CAPTEUR	13
REALISATION DU BOITIER	13
PARTIE COUVERCLE	13
PARTIE BOITIER	15
CHARGEUR DE BATTERIE	15
PROBLEMATIQUE ET CRITERES REQUIS.....	15
PRINCIPE DU RACCORDEMENT	16
SCHEMA STRUCTUREL DU CHARGEUR.....	16
PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	16
FABRICATION DU CHARGEUR	17
MESURES EFFECTUEES.....	19
CONSOMMATION.....	19
ECART DANS LES MESURES.....	20
FIRMWARE	21
TACHES A REALISER PAR LE FIRMWARE (PROGRAMME)	21
DESCRIPTION SUCCINCTE DU FIRMWARE	21
TELEVERSEMENT DU FIRMWARE	24
LISTES DU MATERIEL.....	25
SPECIFICATIONS	28

INTRODUCTION

Ce détecteur de CO2 (dioxyde de carbone) a été conçu pour les spéléologues et est donc adapté à l'environnement souterrain. C'est l'augmentation de la présence de CO2 dans de nombreuses cavités naturelles qui justifie l'intérêt d'un tel appareil.

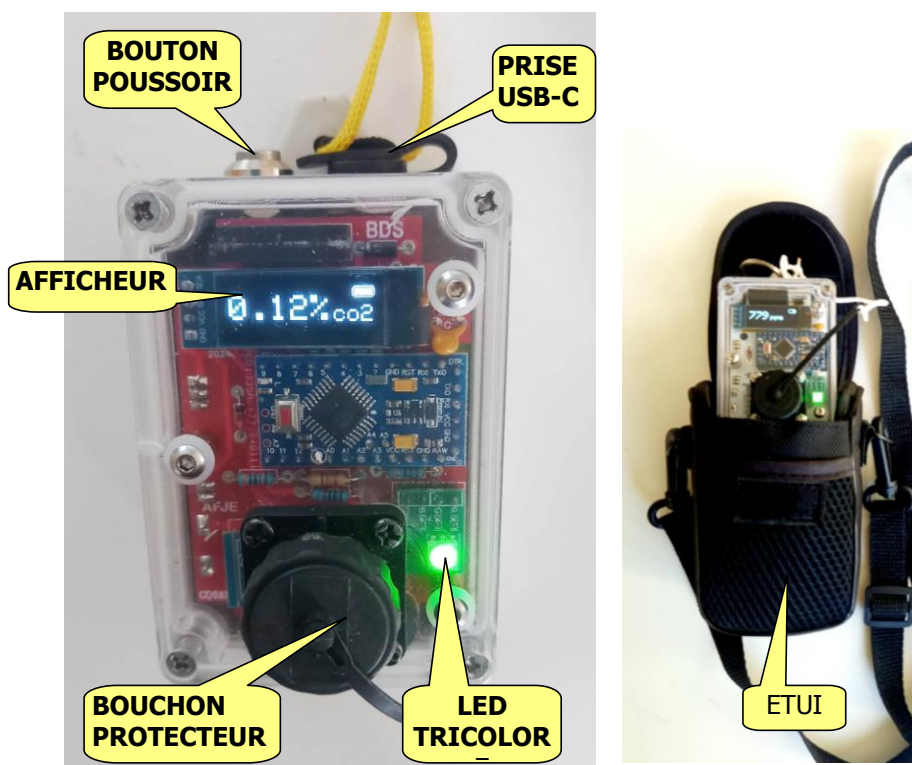
J'ai développé cet appareil à partir d'un prototype conçu par **Alain Franco** spéléologue varois.

Lorsqu'il est activé, le détecteur surveille en continu le dioxyde de carbone dans l'air ambiant. Par un signal lumineux et une alarme sonore, Il alerte l'utilisateur en cas de concentration potentiellement dangereuse ou dépassant les valeurs d'alarmes définies par le Spéléo Secours Français. L'appareil mesure jusqu'à 4% de taux de CO2, au-delà l'affichage est le suivant □ >4%□; Son autonomie est de 32h environ et il réalise 2 mesures par minutes. Le prix total des composants était en 2024 inférieur à 60€.

TABLEAU DE FONCTIONNEMENT

TAUX de CO2	ETAT de la LED TRICOLEURE	ETAT du BUZZER	MESSAGE AFFICHÉ	QUALITE DE L'AIR
0 à 0,18%	VERT	ETEINT	AUCUN	ACCEPTABLE
0,18% à 0,5%	ORANGE	ETEINT	AUCUN	MEDIOCRE
0,5% à 2%	ROUGE	ETEINT	AUCUN	MAUVAISE (limiter la durée d'exposition)
2% à 3%	ROUGE CLIGNOTEMENT LENT	BIP BIP LENT	« EVACUEZ »	TRES MAUVAISE DANGER
3% et plus	ROUGE CLIGNOTEMENT RAPIDE	BIP BIP RAPIDE	« EVACUEZ »	

DESCRIPTION



- Un bouchon vissé protégera le capteur de CO2 pendant le transport. En effet, mouillé ou sali par la boue ou les poussières, le capteur indiquera des valeurs erronées et pourra subir des dommages irréversibles.
- Le bouton poussoir permet la mise en marche, le choix du mode de marche et l'arrêt de l'appareil. Il permettra aussi l'étalonnage semi-automatique.
- L'afficheur indique les mesures et des informations
 - Mesures : taux de CO2 en ppm puis en % puis l'hygrométrie en %
 - Informations : jauge batterie, messages d'alertes, mode de fonctionnement Normal ou Continu
- Une LED tricolore qui change de couleur (Vert, Orange ou Rouge) suivant le taux de CO2.
- Un buzzer et un clignotement de la led en rouge alertent le spéléo du dépassement des seuils d'alarme.
- Une prise USB C pour le recharger la batterie .Un bouchon permet de protéger les contacts de la poussière.
- L'étui, indispensable sous terre, permet de protéger le détecteur sous terre.

Il est vivement conseillé de lire la notice utilisateur avant de poursuivre le dossier technique.

CHOIX TECHNOLOGIQUES

BOITIER

On a choisi un boîtier étanche de petite taille avec couvercle transparent pour voir l'affichage.

Dimensions : 83 x 58 x 33mm



CAPTEUR

- Il fallait un capteur de petite taille, faible consommation avec une large gamme de mesure et à un prix raisonnable.
- Toutes ces conditions sont réunies par le SCD41 de Sensirion qui est un capteur de type NDIR (No Dispersive InfraRouge) à détection photo-acoustique.



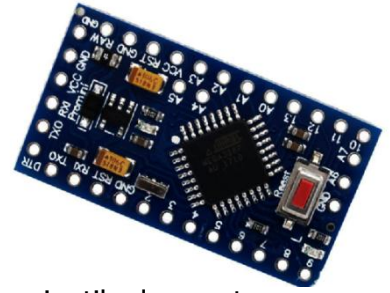
- Il est encapsulé dans une petite boîte métallique de 8,5mm de côté.
- Sa plage de mesure va de 0 à 4%. Certains capteurs montent à 5%, mais ils consomment davantage et sont plus encombrants et plus onéreux.
- Il dispose d'un mode low power, pour lequel il fait 2 mesures par minute pour une consommation moyenne de 3,2mA.
- La précision de ce capteur est de $\pm(40\text{ppm} + 5\%)$, mais n'est plus garantie au-delà de 0,5% de taux de CO2. Ce n'est pas gênant car le but principal de l'appareil n'est pas de mesurer très précisément le taux de CO2.

- Il contient un microcontrôleur, ce qui permet de configurer différents modes de fonctionnement et la communication s'effectue via une liaison I2C.
- Il peut être livré sur une petite carte, de façon à l'utiliser comme un composant traversant au pas de 2,54mm.

MICROCONTROLEUR

Les critères de choix ont été une petite carte intégrant le microcontrôleur en mini boîtier CMS, son quartz, un régulateur de tension et la connectique pour pouvoir téléverser le programme via l'IDE Arduino.

La carte arduino Pro-mini convient, on limite la consommation en choisissant le modèle cadencé à 8Mhz seulement et alimenté en 3,3V. En dessoudant la led « power » inutile dans notre application, on a mesuré une consommation moyenne de 3,1mA.



AFFICHEUR

Les critères de choix principaux sont la taille et la consommation et sa luminosité.

La petite taille nécessaire nous a conduit à choisir un petit afficheur OLED de 128x32 pixel (3cm x 1,1cm). Sa consommation moyenne est de 7mA.

Cet afficheur étant de type graphique permettra de représenter un icône de jauge de batterie.

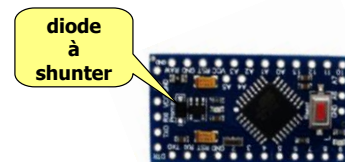


ALIMENTATION

2 versions possibles ;:

Alimentation par piles :

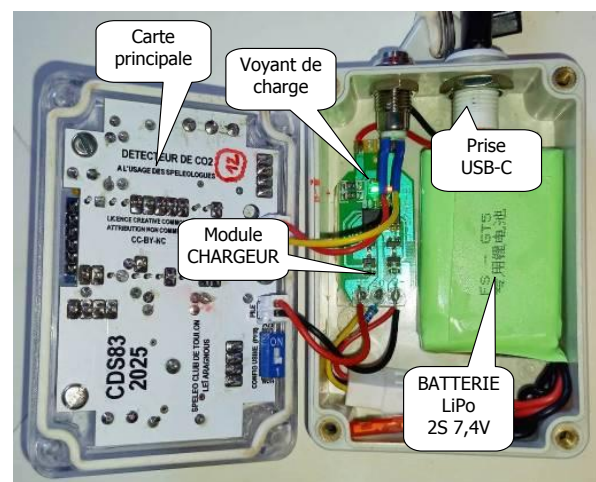
4 piles AAA en série sont logeables dans le boîtier. La tension nominale est alors de 6V, pour avoir un maximum d'autonomie (environ 50h), il faut remplacer ou shunter la diode de protection sur la carte Arduino pro mini, par un fil.



Alimentation par batterie .

C'est la version qui a été finalement adoptée et décrite dans ce dossier. On a choisi une batterie LiPo 600mAh de type 2S soit 7,4V nominal.

Ses dimensions (30x45x13mm) lui permette de tenir aisément dans le boîtier. Il est inutile de shunter la diode de protection de la carte arduino. On dispose alors d'une autonomie de 32h . Il reste même de la place pour intégrer un petit chargeur USB. Une prise extérieure permet alors de charger la batterie comme un smartphone.



Note : ces batteries mesurées à 600mAh, sont vendus pour 1500mAh !

AUTRES COMPOSANTS

Le bouton poussoir

C'est un modèle étanche sans led, diamètre 8mm de type à un seul état stable normalement ouvert (self-reset).Autrement dit quand on appui le contact se ferme et il s'ouvre quand on relâche.



Le buzzer

C'est un modèle piezo 3V, bas profil (hauteur inférieure à 8mm) pour pouvoir s'insérer dans le couvercle du boîtier. Le modèle TBM9042-3V convient.



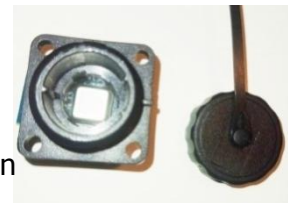
La led tricolore RVB

RVB=Rouge Vert Bleu, elle est livrée sur un petit PCB avec déjà des résistances de limitations de courant. Ce modèle a été choisi pour sa faible consommation, sa petite taille et son prix.



L'enceinte de protection du capteur

Pendant la mesure, le capteur doit être à l'air, mais protégé du vent et des poussières. Par ailleurs, il vaut mieux pouvoir le protéger complètement pendant son transport sous terre.



La solution choisie est une enceinte pouvant être rendue étanche par un bouchon vissable.

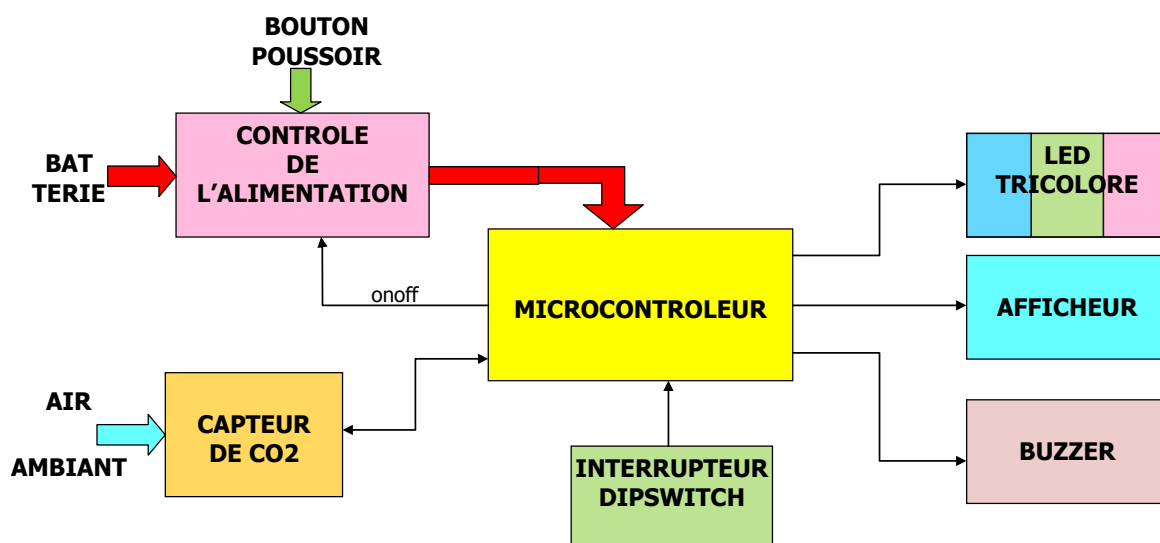
La prise USB C étanche

c'est un modèle économique qui a été choisi, pour le cache poussière le modèle sur la photo est le meilleur.



ETUDE FONCTIONNELLE DE LA CARTE

SCHEMA FONCTIONNEL



ANALYSE

LE CAPTEUR

A la demande du microcontrôleur, il envoie les grandeurs mesurées via la liaison I2C. Chaque grandeur est envoyée sous forme de 2 octets (variable de type « int »). Ces grandeurs sont

- le taux de CO₂ en ppm
- le taux d'humidité relative en %
- La température en °C

En fait, pour déterminer correctement le taux de CO₂, ce capteur photo-acoustique doit effectuer des corrections fonctions de la température et de l'humidité. Le fabricant a donc du aussi intégrer des transducteurs de température et d'humidité. Du coup, ces informations sont disponibles à l'affichage.

La température mesurée est la température à l'intérieur du capteur, les mesures que j'ai effectuées montrent une erreur parfois de plusieurs degrés par rapport à la température extérieure. Aussi seuls le taux de CO₂ et le pourcentage d'humidité seront affichés.

L'INTERRUPTEUR DIPSWITCH

Ce petit interrupteur est fixé sur le circuit imprimé et n'est pas accessible à l'utilisateur. Il n'est manœuvrable que boîtier démonté et sert à désactiver les alarmes sonores



LE MICROCONTROLEUR

- Il envoie les commandes au capteur pour le configurer en mode low power et lire les données et éventuellement restaurer la configuration usine ou l'étalonnage.
- Il commande le buzzer pour confirmer les appuis sur le bouton poussoir et pour les alarmes.
- Il commande la couleur de la led RVB suivant le taux de CO₂
- Il commande l'afficheur.
- Une des fonctions du microcontrôleur sera de surveiller la tension batterie et lorsqu'elle atteindra 5,8V, il donnera une commande d'arrêt, au « contrôle de l'alimentation » qui déconnectera alors la batterie de la carte. En effet, une batterie LiPo ne supporte pas les décharges profondes, aussi il convient de la débrancher lorsque la tension par élément atteint 2,9V, soit 5,8V pour une batterie 2S.

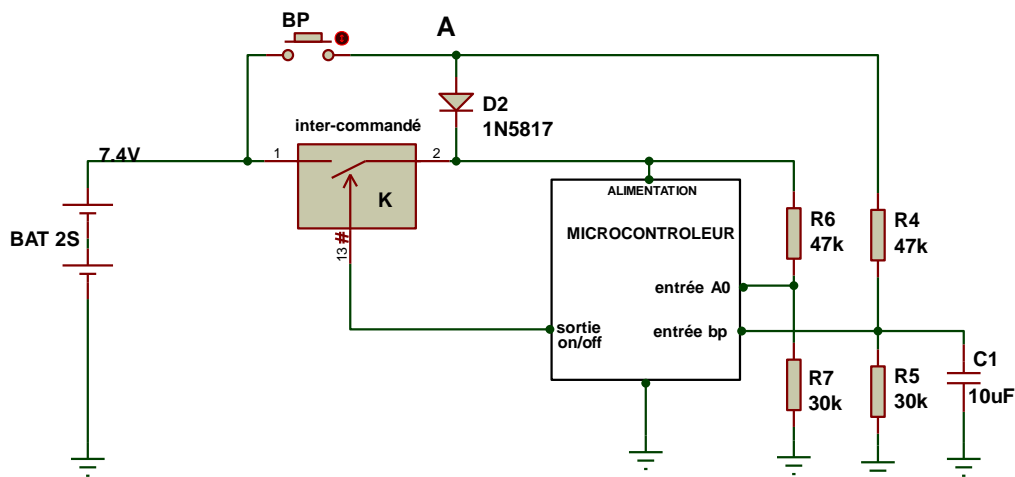
CONTROLE DE L'ALIMENTATION :

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

- ALLUMAGE :

Lorsqu'on appuie sur le bouton poussoir BP, on alimente le système via la diode D2. Le programme du microcontrôleur démarre et au bout de 2 secondes vient commander l'interrupteur commandé K qui prend le relais du bouton poussoir. On peut alors relâcher le poussoir et le système reste alimenté.

Pour la diode D2, on a choisi une diode Schottky de façon à avoir une chute de tension minimale à ses bornes.



- **EXTINCTION PAR LE POUSSOIR**

Une fois l'appareil allumé et le bouton poussoir relâché, la diode D2 est bloquée et la tension au point A est nulle, la tension à l'entrée « bp » du microcontrôleur est nulle aussi.

Dans cette configuration, si on appui sur le poussoir, le potentiel du point A passe à la tension batterie et est atténuée par le pont diviseur R4-R5 avant d'être envoyée sur l'entrée « bp » du microcontrôleur. Celui-ci étant alimenté en 3,3V, l'atténuateur permettra d'éviter de lui envoyer une tension supérieure à cette valeur. On retrouvera l'arrivée d'un niveau logique haut sur l'entrée « bp », qui déroutera le programme vers une routine d'interruption fera basculer la sortie « on/off » sur off au bout de 2s d'appui sur le poussoir. L'interrupteur commandé s'ouvrira alors et l'extinction du système aura lieu au relâchement du poussoir.

Le condensateur C10 associé aux résistances R4 et R5, permettra de ne pas prendre en compte les rebondissements des contacts.

- **EXTINCTION POUR EVITER LA DECHARGE PROFONDE DE LA BATTERIE**

Le microcontrôleur surveillera en permanence la tension aux bornes de la batterie et quand cette tension deviendra inférieure à 5,8V, celui-ci provoquera l'extinction de l'appareil en ouvrant l'interrupteur commandé grâce au signal on/off.

La surveillance s'effectuera en ramenant sur l'entrée analogique A0 une image de la tension batterie grâce au pont diviseur R6 R7.

- **EXTINCTION EN MODE NORMAL**

Le détecteur dispose de 2 modes de fonctionnement, le mode Normal pour lequel l'appareil s'éteint tout seul au bout de 15mn et le mode Continu pour lequel il faut que l'opérateur appui sur le bouton pour éteindre.

Pour le mode Normal, à l'allumage le microcontrôleur lance un timer interne, qui déclenchera une interruption au bout de 15mn provoquant l'extinction de l'appareil via signal « on/off ».

- **STRUCTURE DE L'INTERRUPTEUR COMMANDÉ**

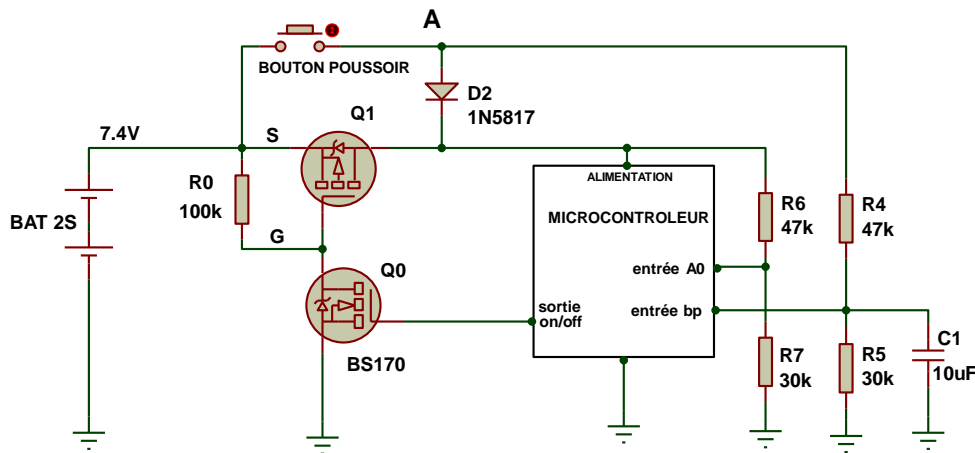
2 types sont envisageables soit un relais électromécanique soit un transistor.

Caractéristiques à obtenir :

- Ouvert ; il doit présenter une résistance idéalement infinie. Si ce n'est pas le cas, appareil éteint, un petit courant va progressivement décharger la batterie.

- Fermé : il doit présenter idéalement une résistance nulle, afin d'éviter des pertes et une chute de tension lors des pointes de courant qui montent à 200mA pendant la phase de mesure du capteur.
- Une énergie de commande la plus faible possible par rapport au reste de l'appareil, pour ne pas altérer son autonomie.

STRUCTURE A SEMI-CONDUCTEUR (TRANSISTORS)



C'est le transistor Q1 qui fait office d'interrupteur, c'est un MOSFET canal P. Il est commandé par un MOSFET canal N.

Quand la sortie « on/off » est à 1 le transistor Q0 conduit et ramène la tension VSG de Q1 à +VBAT, ce qui entraine la conduction de Q1.

Quand la sortie « on/off » est à 0, Q0 est bloqué et VSG de Q1 passe à 0V, ce qui entraine le blocage de Q1.

1

En conduction, le transistor Q1 doit avoir une très faible résistance ($r_{ds(on)}$), les nouvelles technologies le permettent, soit en boîtier à pattes traversantes mais encombrant (TO220) soit en boîtier miniatures mais comme Composants à Montage de Surface (CMS). Comme, je manque de maîtrise en soudage de CMS, je n'ai donc pas opté pour la solution à transistors.

STRUCTURE ELECTROMECHANIQUE (RELAIS)

Du fait du contact sec ouvert ou fermé, l'avantage du relais c'est qu'à la fermeture, c'est un court-circuit et donc il présente une résistance extrêmement faible. A l'ouverture c'est un véritable circuit ouvert, donc une résistance quasi infinie qui ne déchargera pas la batterie à long terme.

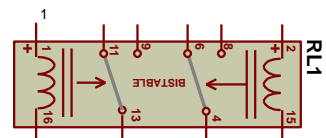
2 solutions possibles

1) Le relais bistable

C'est un relais à 2 bobines, une pour l'enclencher et l'autre pour le déclencher, voir ci-contre.

Chaque position étant stable, il suffit pour changer d'état d'envoyer une seule impulsion dans une des bobines. La plupart du temps les bobines ne sont donc pas alimentées.

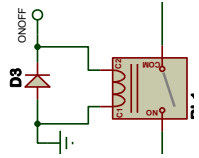
C'est une bonne solution, malheureusement les seuls relais bistables 3V que j'ai trouvé étaient trop encombrants.



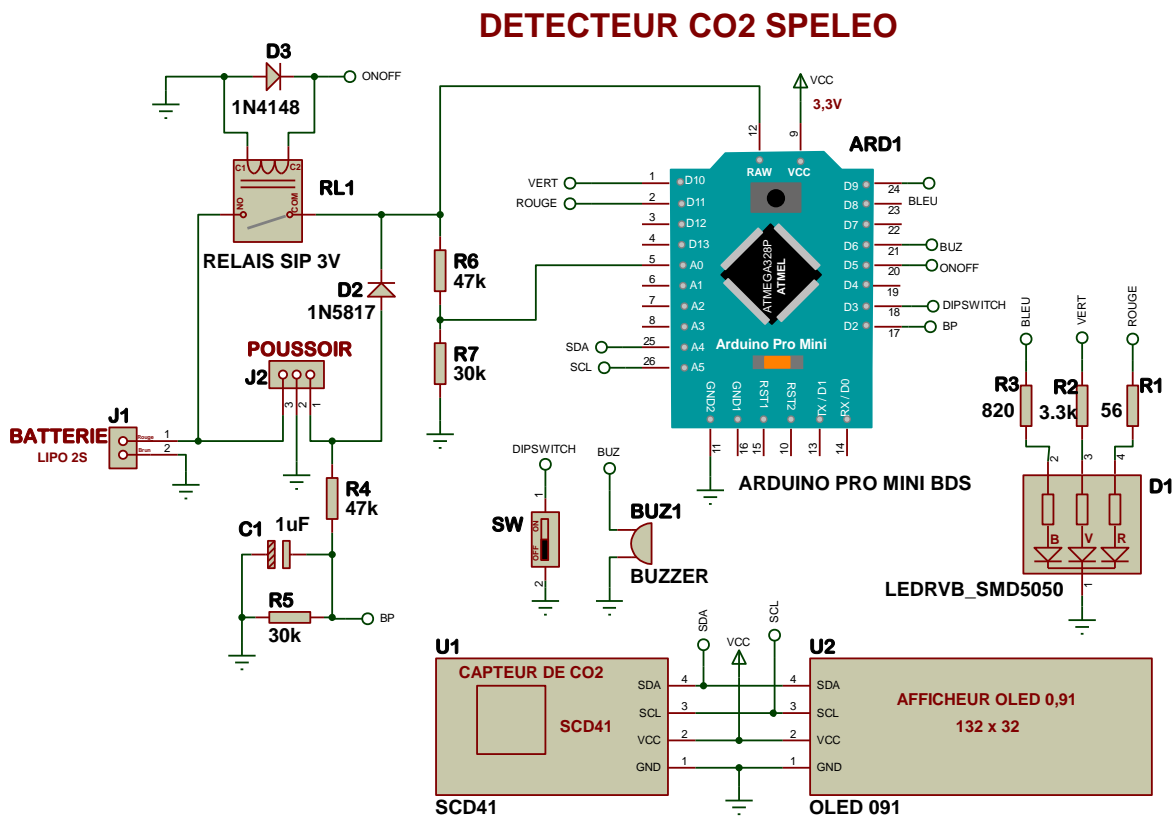
2) Le relais monostable

Il ne dispose que d'une seule bobine, il faudra alimenter la bobine en permanence pour maintenir le contact fermé.

Comme on trouve des relais monostable de petites tailles, c'est la solution que j'ai choisi malgré une surconsommation de 3mA due à la bobine. La diode D3 élimine les surtensions à la coupure du courant dans la bobine, ce qui protège la sortie « on/off » du microcontrôleur.



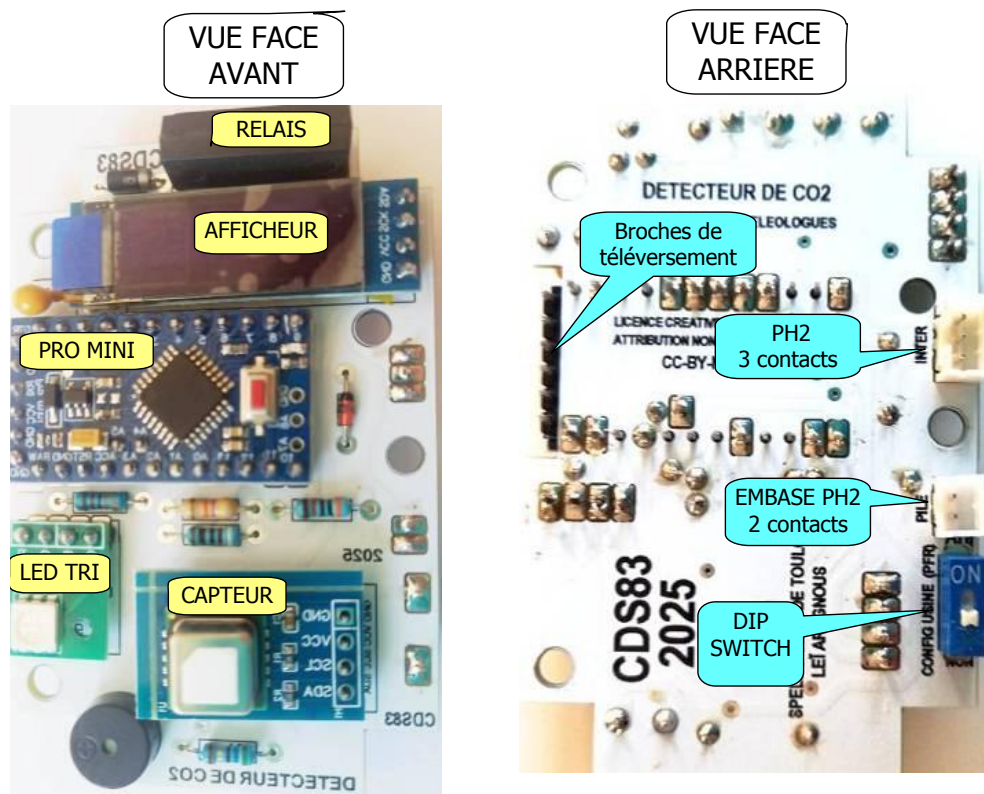
SCHEMA STRUCTUREL DE LA CARTE



Remarques :

- Le capteur et l'afficheur communiquent avec le microcontrôleur via une liaison I2C
- Le bouton poussoir est à brancher entre les broches 1 et 3 du connecteur J2. La broche 2 ne sera pas connectée.
- La batterie est à brancher sur le connecteur J1.
- Pour la led tricolore RVB, on a rajouté les résistances R1,R2 et R3 pour diminuer la consommation et pour équilibrer les intensités lumineuses perçues pour le Rouge, Vert et Bleu.

FABRICATION DE LA CARTE (PCB)



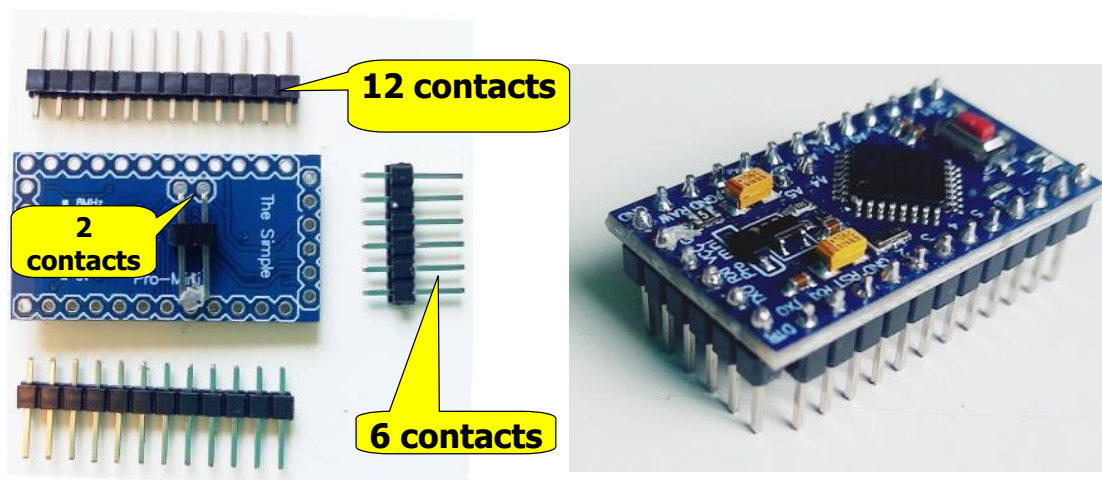
- Le circuit imprimé (PCB) est de type double face à trous métallisés.
- Les fichiers au format Gerber sont disponibles sur demande. Ce qui permettra de faire sous-traiter la fabrication par un industriel.
- Les dimensions du PCB sont 72,5mm x 47,5mm

CABLAGES PRELIMINAIRES

Assemblage carte Arduino pro mini

Il faut souder les connecteurs sur la carte. Ce sont des connecteurs droits au pas de 2,54 obtenus à partir d'une barrettes sécables. Attention ces cartes sont livrées avec un des connecteurs qui est coudé et qu'il faudra changer pour un droit.

Il faut 2 rangées de 12 contacts pour les entrées/sorties et l'alimentation, 1 rangée de 2 pour la liaison I2C et 1 rangée de 6 pour la programmation

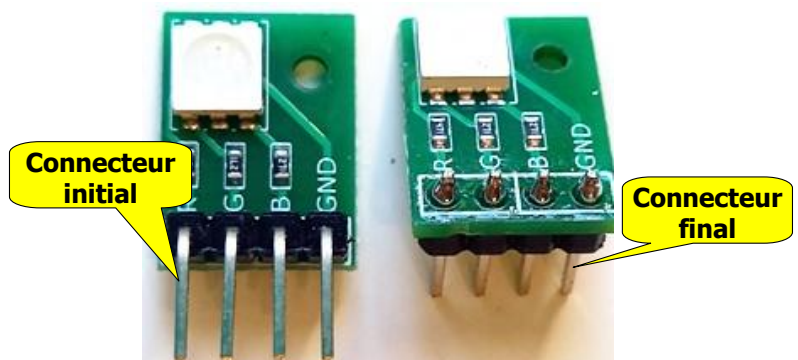


Pour souder correctement ces connecteurs, le mieux est de les positionner sur la carte principale, puis de souder la carte Pro mini dessus.

Changement de connecteur de la led tricolore

La led tricolore est vendue avec un connecteur coudé qu'il faudra remplacer par un connecteur droit ou des fils rigides.

L'opération de dessoudage du connecteur coudé, est plus délicate qu'il n'y paraît car soudé sur des pastilles très petites. Pour faciliter cette tâche, il est préférable de désolidariser les 4 contacts et de les dessouder un par un.



Câblage du Bouton poussoir

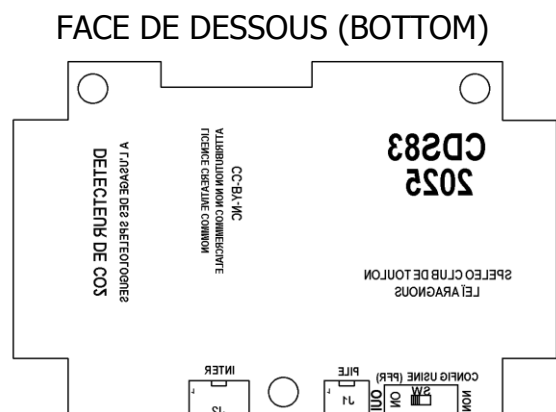
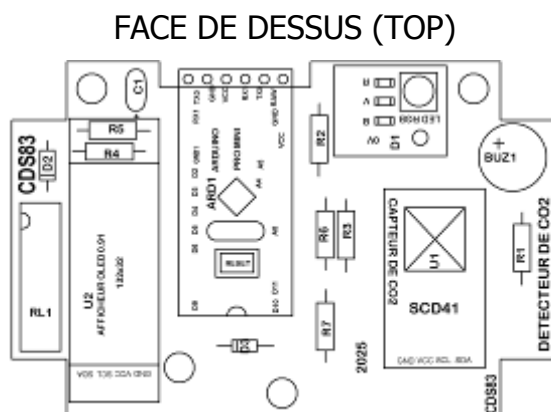
On soudera le connecteur à fil mâle PH2 à 3 contacts dont on aura supprimé le fil du milieu et réduit la longueur à 6cm. On prendra soin de protéger et renforcer la liaison avec de la gaine thermorétractable.



SCHEMAS du CIRCUIT IMPRIME (PCB)

Des fichiers au format Gerber, sont disponibles pour la sous-traitance de la fabrication du PCB par un industriel.

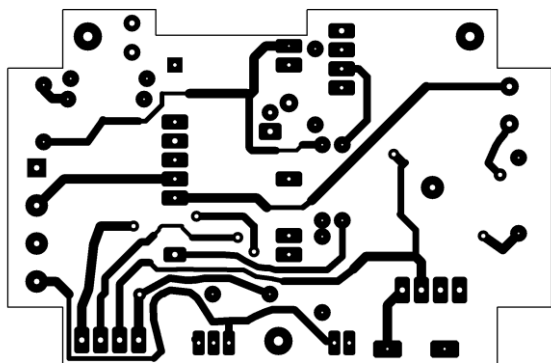
Vue composants sur chaque face, échelle 2 environ



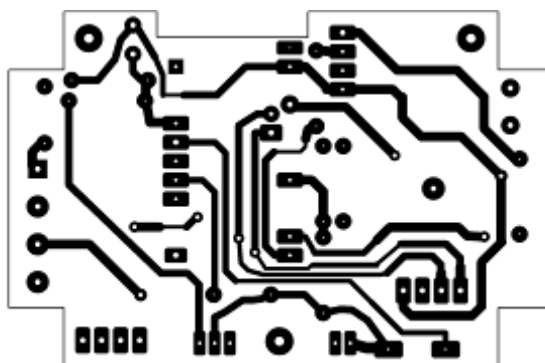
La face du dessous est représentée vue de dessus par transparence, les écritures apparaissent donc à l'envers.

Vue des pistes imprimées

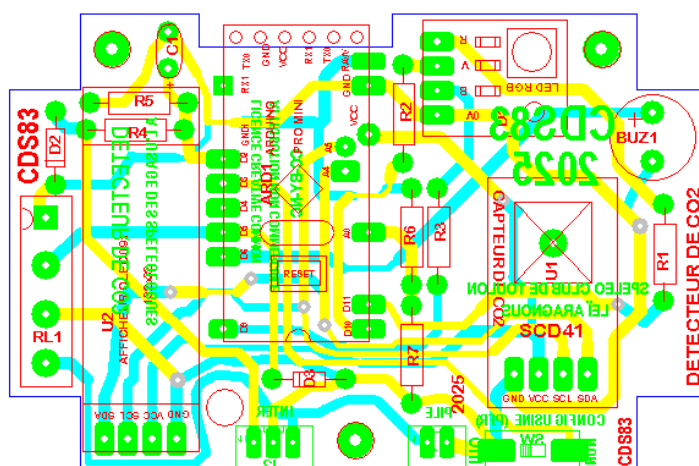
FACE DE DESSUS (TOP)



FACE DE DESSOUS (BOTTOM)



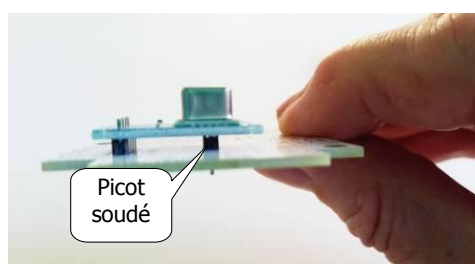
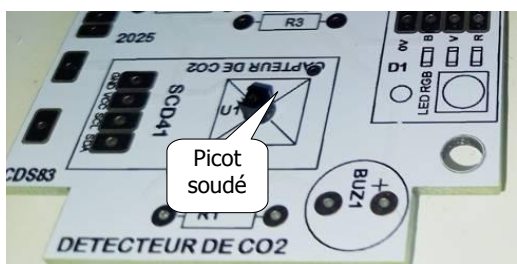
Toutes les faces vue par transparence



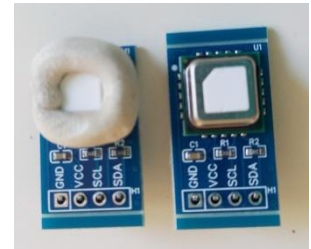
CONSEILS DE CÂBLAGE

- Souder les composants par ordre décroissant de hauteur.
- Le capteur sera donc soudé en dernier. Avant cela il faudra placer une petite cale sur le PCB à l'emplacement du capteur.
- Comme cale on pourra soit souder un picot extrait d'une barrette sécable soit coller un petit rectangle de mousse compacte.

Solution à picot



- Il faut entourer la capsule métallique du capteur d'un ruban de mastic que l'on pourra réaliser avec de la pattafix ou un équivalent. Ceci pour éviter que la capteur mesure l'air intérieur du boitier plutôt que l'air ambiant.

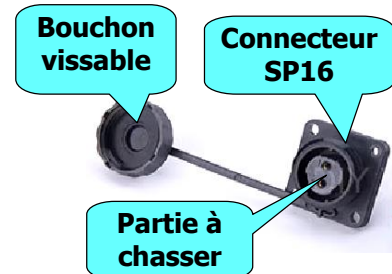


REALISATION DE L'ENCEINTE DU CAPTEUR

Constitué par un connecteur étanche de type SP16 à embase carré, dont on a détourné la fonction.

2 étapes

- 1) Evider le connecteur en chassant, avec une cymindre et un marteau, le cylindre interne contenant les contacts.



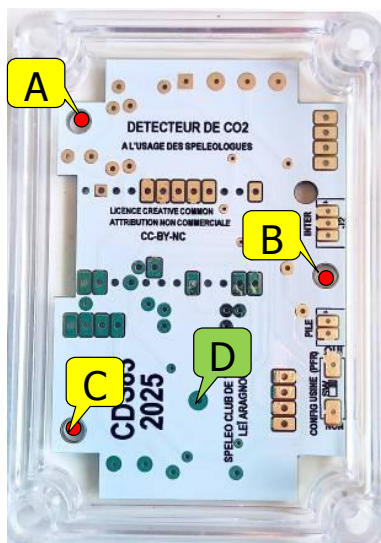
- 2) Raccourcir le connecteur
A la scie à métaux la hauteur par rapport à l'embase doit être ramené à 3mm.



REALISATION DU BOITIER

PARTIE COUVERCLE

Perçage du couvercle transparent



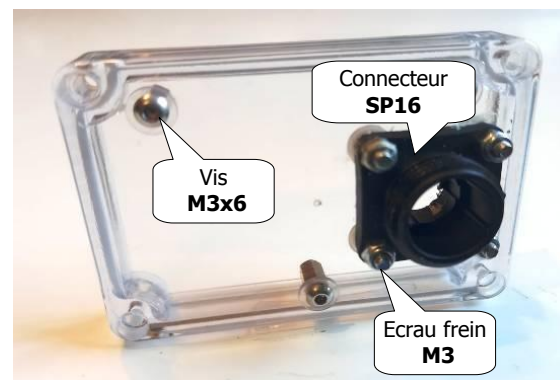
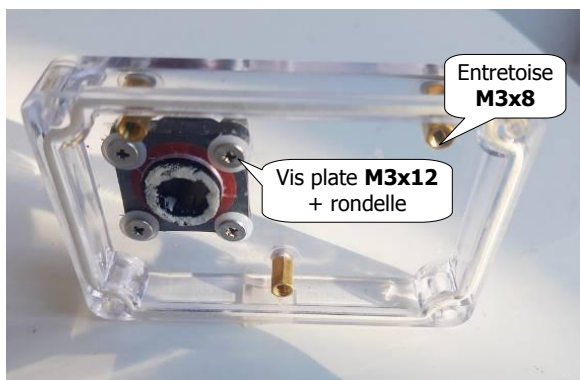
Une solution consiste à effectuer un contre-perçage en plaquant le PCB vierge sur la face

On place le PCB au fond du couvercle comme indiqué sur la photo.

- 1) On re-perce les trous A,B,C,D avec un forêt de 1,5mm.
- 2) On enlève le PCB
- 3) On perce tous les trous avec un forêt de 2,4mm. Ce plexiglass étant assez dur, attention à la vitesse de perçage, trop lentement on risque de faire des fissures et trop vite le plastique fond sur le forêt. Il faut au préalable faire des essais sur un couvercle sacrifié.
- 4) On agrandit à 16mm le diamètre du trou D qui servira de passage au connecteur SP16 évidé.

Mise en place des vis et du SP16 évidé

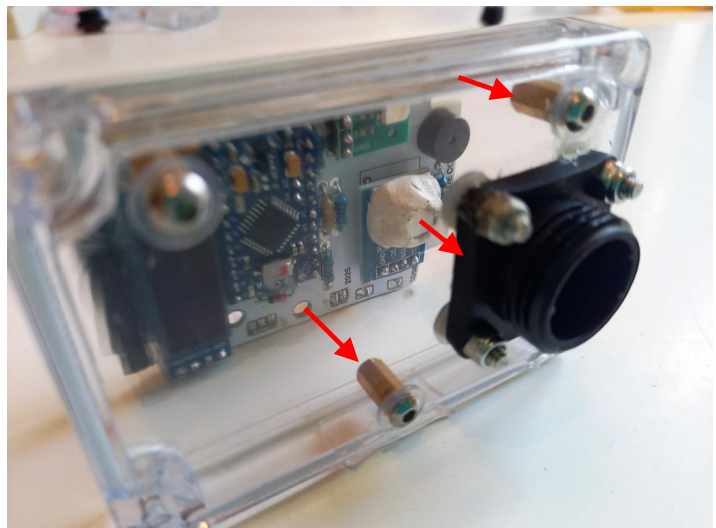
- 1) Pour obtenir l'étanchéité, on vissera des vis M3x8, en ayant pris soin d'intercaler une rondelle rigide en plastique. La vis va agrandir le trou de diamètre 2,4mm en taraudant le trou. La vis sera donc intimement liée au couvercle et associée à la rondelle, on obtiendra une étanchéité minimum.
 - i. **Attention**, si on visse lentement, on risque de fissurer le plexi. Si, à la main, on visse un peu rapidement, on aura une fusion superficielle du plastique évitant ainsi au plexiglass de s'éclater.
- 2) On vissera des entretoises femelle/femelle M3 de hauteur 8mm sur les vis A,B et C .
- 3) Pour percer les 4 trous permettant de fixer SP16, on procèdera aussi par contre-perçage avec des forets de 2,4mm. Attention à ce que le connecteur ne tourne pas entre les perçages. On utilisera ensuite des vis tête plate M3x12 associées à des écrous freins M3 pour maintenir le SP16. L'étanchéité sera obtenue grâce au joint orange et au bouchon vissable du SP16.



Mise en place du PCB dans le couvercle

Le capteur va venir s'insérer dans le SP16, en compressant le mastic.

Il ne restera plus qu'à visser les 3 vis M3x8 dans les entretoises



IMPORTANT :

Placer une mousse aérée dans le SP16 pour protéger le capteur en particulier de la boue et des poussières.

PARTIE BOITIER

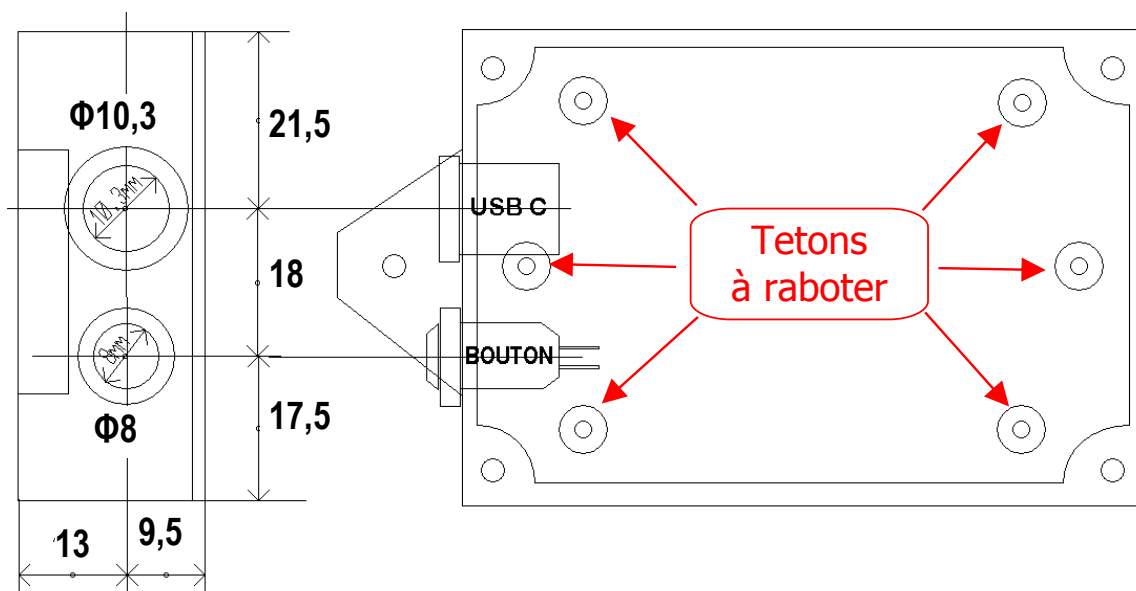
1. Fraisage des têtes

A l'aide d'une petite fraise on rabotera tous les têtes qui sont au fond du boîtier.

2. Perçage

Il s'agit de percer les trous pour le bouton poussoir et la prise USB C femelle.

On respectera le plan de perçage ci-dessous.



3. Mise en place des éléments

- Pour l'interrupteur ne pas oublier le joint torique.
- Pour la prise USB C, j'ai intercalé une rondelle plastique souple de 10x15x1.

Attention : Cette prise a un défaut, comme elle est en plastique, si on serre trop fort on rompt le filetage et adieu l'étanchéité.

CHARGEUR DE BATTERIE

PROBLEMATIQUE ET CRITERES REQUIS

PROBLEMATIQUE : on a 2 possibilités

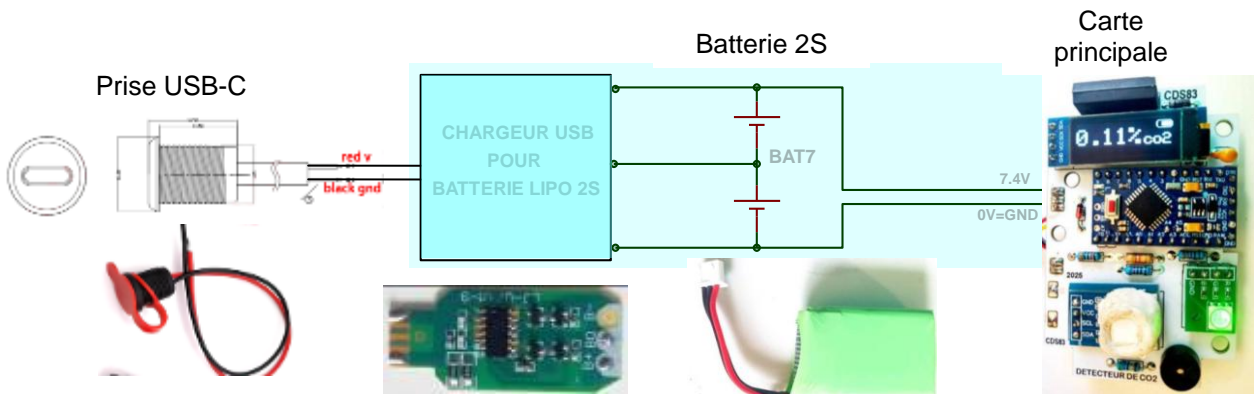
- la première consiste à utiliser un chargeur externe, comme ci-contre. Il suffit alors de sortir les 3 bornes de la batterie LiPo 2S, sur un connecteur étanche vers le chargeur.
- La seconde possibilité est de placer le chargeur à l'intérieur du boîtier, la recharge s'effectuant, comme un smartphone via une prise USB C fixée sur le boîtier. C'est le choix qui a été fait, car il restait de la place dans le boîtier.



CRITERES REQUIS

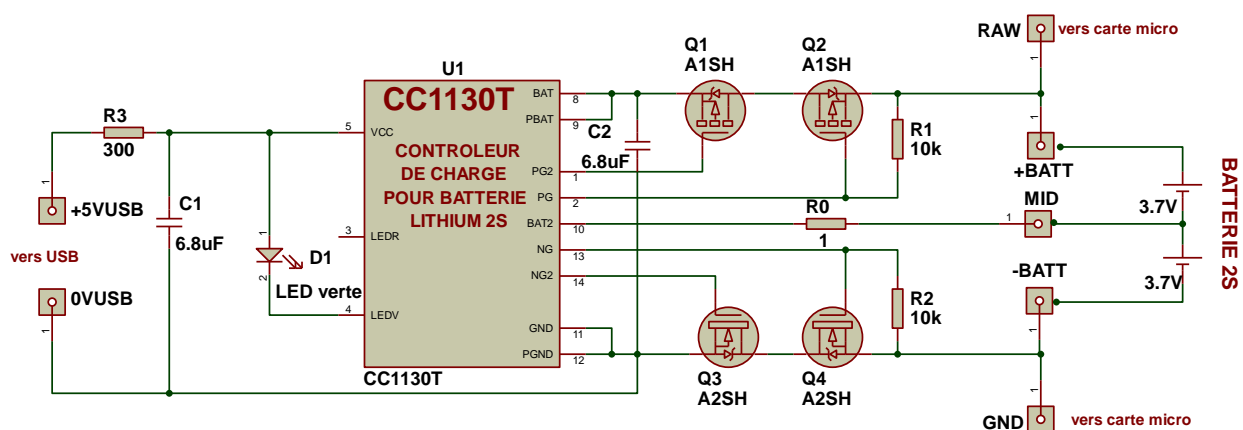
1. Il est impératif que la charge s'effectue de façon équilibrée sur les 2 cellules qui composent la batterie.
2. Le courant de charge doit être adapté à la capacité de la batterie et limiter l'échauffement du boîtier du détecteur ;
3. Le chargeur étant connecté en permanence sur la batterie, il ne doit consommer aucun courant à celle-ci, pour éviter une décharge fatale.

PRINCIPE DU RACCORDEMENT



SCHEMA STRUCTUREL DU CHARGEUR

Le chargeur bâti autour du circuit intégré contrôleur de charge CC1130T réuni ces conditions.



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les 2 éléments de la batterie sont alimentés à courant constant alternativement toutes les 4s.

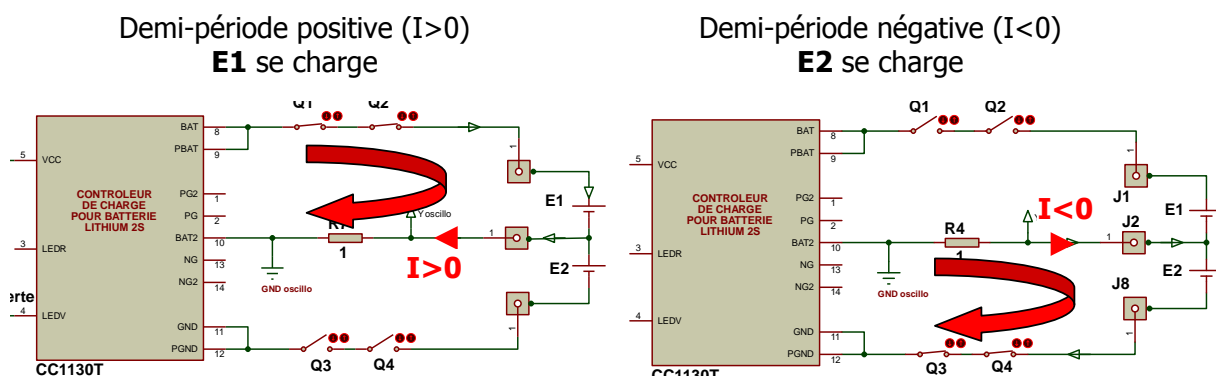
Pour interrompre ou établir le courant dans chaque élément de la batterie un interrupteur à transistors est utilisé. Chacun des 2 interrupteurs est formé par 2

transistors en série. Si on utilisait un seul transistor, la batterie pourrait débiter dans le chargeur du fait de la diode de protection interne de l'autre transistor.

Par ailleurs, lorsque le chargeur n'est pas alimenté, il ne faut pas que la batterie débite dans les transistors. Dans cette situation ceux-ci sont bloqués et d'après leur constructeur leur courant de fuite est inférieur à $1\mu\text{A}$. Cette valeur est suffisamment faible, en effet mes calculs montrent que ce courant déchargera la batterie en 25ans sans recharge!!

Placé dans le petit boîtier étanche du détecteur, le chargeur chauffait beaucoup et élevait beaucoup la température interne du boîtier. J'ai donc placé la résistance R0 de 1Ω . Cela ramène le courant moyen de charge 200mA , et recharge la batterie en 4 à 5h environ.

La charge de chaque élément s'effectue alternativement sur un cycle de 8s. Pendant 4s c'est un élément E1 qui est chargé et les 4s suivantes c'est l'élément E2. Ainsi le courant dans la résistance R0, est traversé alternativement par le courant de chaque cellule.



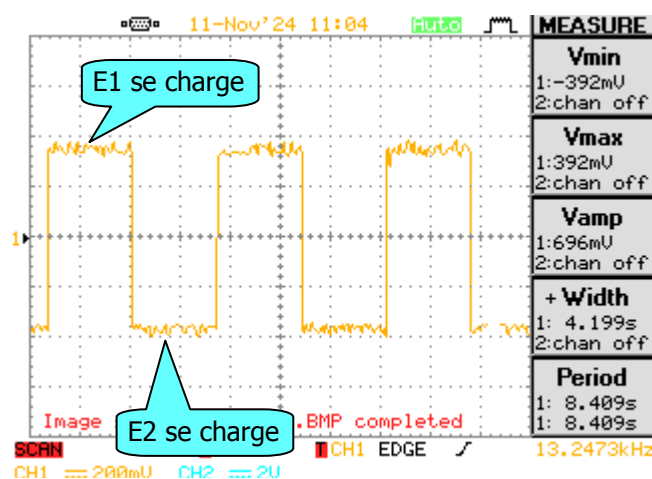
Sur l'oscillogramme suivant on a relevé la tension aux bornes de la résistance R0 de 1Ω pendant la charge qui est une image du courant.

On mesure des créneaux de courant d'amplitude 400mA . Soit un courant moyen par élément de 200mA .

FABRICATION DU CHARGEUR

On adoptera les composants à montage de surface pour plusieurs raisons :

- Le circuit chargeur CC1130T n'existe qu'en boîtier à montage de surface.
- Cela permet la miniaturisation du PCB nécessaire vu l'espace restant dans le boîtier
- Cela permet une fixation du PCB par collage en fond de boîtier, vu que l'autre face du PCB est lisse.

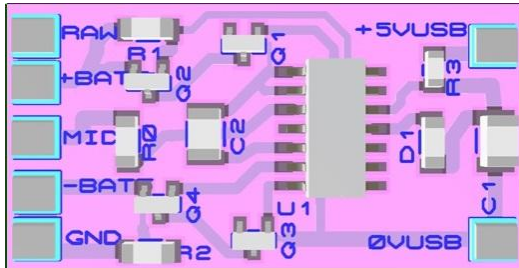


- Des fichiers au format Gerber, sont disponibles pour la sous-traitance de la fabrication du PCB par un industriel.
- Il est possible de télécharger gratuitement un visualisateur de fichiers Gerber qui vous permettra de visionner et d'imprimer les différentes couches du circuit imprimé.

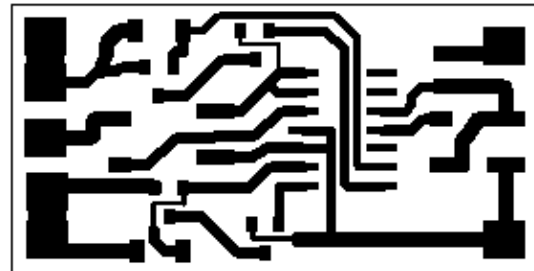
Schémas du circuit imprimé(PCB)

Taille réelle 3,5cm x 1,8cm

Vue composants



Vue des pistes échelle 2 environ

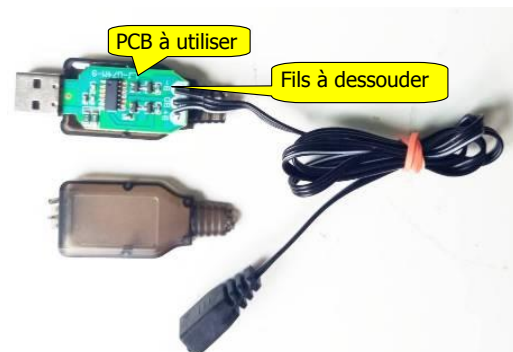


RAW= +BATT vers carte principale
GBN=-BATT vers carte principale
+BATT,MID,-BATT vers batterie 2S

Solution avec un chargeur du commerce

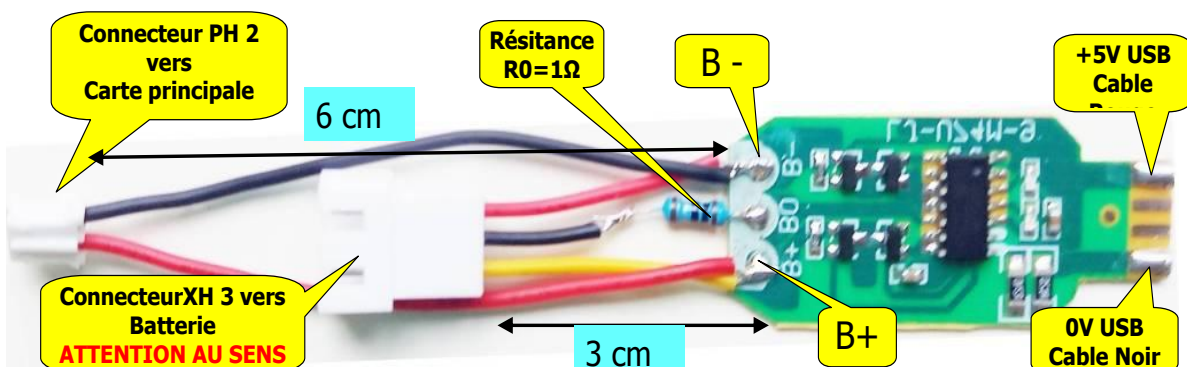
On peut s'affranchir de réaliser le PCB (carte imprimée) , en utilisant un chargeur du commerce dont on extrait le PCB

On s'assurera que le chargeur contient bien le circuit intégré CC1130T et les 4 transistors.



Câblage de la carte chargeur

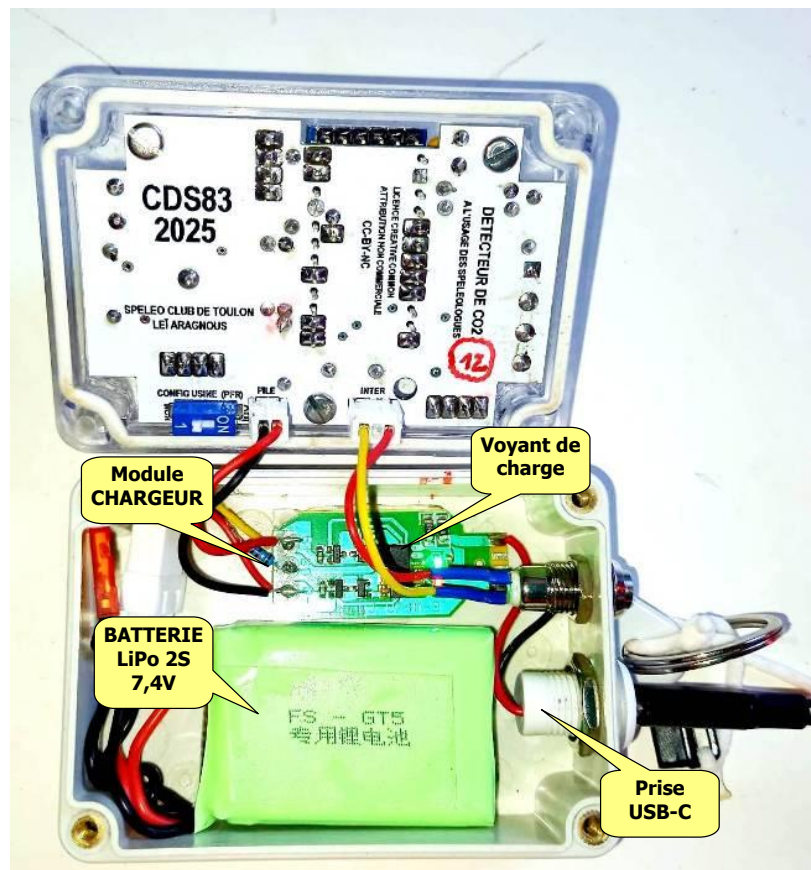
La batterie dispose de 2 connecteurs de sortie. Un blanc mâle de type XH qui sort les 3 broches de la batterie (B+,0,B-) et un rouge qui ne sort que les points extrêmes de la batterie (B+ et B-). On n'utilisera que le connecteur à 3 broches.



- On connectera la carte chargeur à un connecteur à fil XH à 3 bornes, en intercalant la résistance R0=1Ω sur la broche du milieu.
- Sur B+ et B- on connectera un connecteur mâle à fil de type PH , qui permettra d'alimenter la carte principale. On veillera donc à respecter la polarité.
- Les 2 fils vers vers la prise USB C seront soudés une fois la prise USB fixée dans le boîtier, attention à respecter la polarité.

Installation du chargeur dans le boîtier

Tout comme la batterie, le chargeur est fixé en fond de boîtier par un bon adhésif double-face.

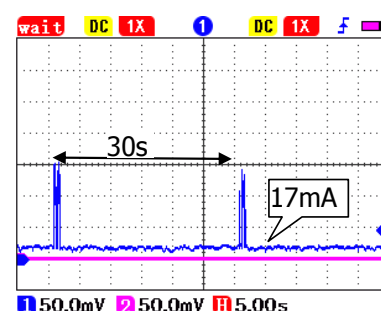


MESURES EFFECTUEES

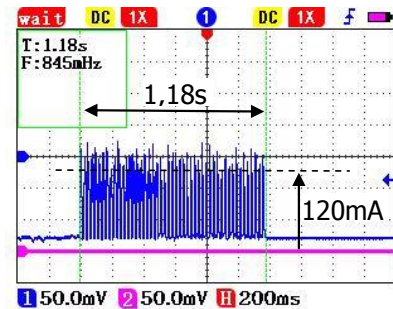
CONSOMMATION

en plaçant une résistance de 1Ω en série avec la batterie, on a relevé sur les oscillogrammes la consommation de l'ensemble du détecteur avec différentes échelles de temps.

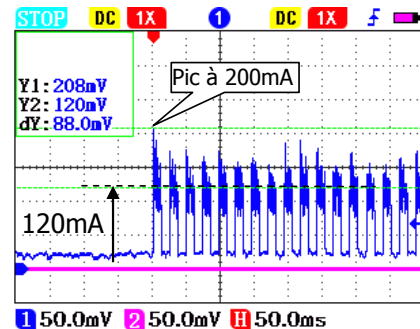
Avec une échelle de 5s /carreau, on constate un pic de consommation toutes les 30s, cela correspond au moment où le capteur fait sa mesure. Le reste du temps la consommation est mesurée à 17mA



Avec une échelle de 200ms /carreau, on la durée de sa mesure qui est de 1,18s.



Si on dilate encore l'échelle des temps à 10ms/carreau. On s'aperçoit que le courant est en créneau d'amplitude moyenne environ 120mA, ce qui correspond à une amplitude moyenne pendant la mesure de CO2 de 60mA. On relève aussi des pointes de courants qui dépassent 200mA.



Sur une période 30s, aux 17mA permanent s'ajoute l'apport de 60mA pendant 1,18s, réparti sur 30s cet apport est de $(60-17) \times 1,18 / 30 = 1,7\text{mA}$.

La consommation moyenne du détecteur est donc de $17 + 1,7 = 18,7\text{mA}$

Ce qui donne bien une autonomie de **32h** pour une batterie de **600mAh**.

ECART DANS LES MESURES

Le constructeur indique une précision de $\pm(40\text{ppm} + 5\%)$ pour un taux $< 0,5\%$. Dans l'air ambiant extérieur à 420ppm cela donne $\pm 61\text{ppm}$

Ne disposant de solutions de référence (étalon), la précision de la mesure donnée à $\pm 40\text{ppm}$ n'a pas pu être validée sur un seul appareil. Par contre, sur 20 capteurs mesurant le même air, j'ai pu constaté des écarts extrêmes entre 2 capteurs de 100ppm pour une moyenne calculée à 420ppm. Cela donne une erreur de $\pm 50\text{ppm}$, ce qui est conforme aux données constructeur.



FIRMWARE

Disponible sur le site « radiolocalisationssouterraines.fr » en téléchargement

TACHES A REALISER PAR LE FIRMWARE (PROGRAMME)

Tache principale

Scruter puis afficher plusieurs fois par minute le capteur et afficher le taux de CO2 et le taux d'humidité.

Taches secondaires

- Gérer les modes de marche (normal ou continu) et d'arrêt (par le bouton poussoir ou automatiquement dans le mode normal ou pour éviter une décharge profonde de la batterie).
- Surveiller la tension de la batterie, afficher la jauge, les messages d'alertes « recharger batterie ou « batterie vide » et commander l'arrêt automatique.
- Gérer les alarmes (clignotement de la ledRVB et bip-bip du buzzer plus ou moins rapide suivant le niveau d'alarme, afficher le message d'alerte « EVACUEZ »)
- Gérer les modes étalonnage et restauration de la configuration usine.
- Permettre, via le dipswitch, la désactivation des alarmes sonores.

DESCRIPTION SUCCINCTE DU FIRMWARE

On décrira le programme principal (setup()-loop()) , les fonctions d'interruptions déclenchées par le poussoir et le Timer2 ainsi que les fonction d'étalonnage et de restauration de la configuration usine.

Fonction d'initialisation (set-up)

Cette fonction n'est réalisée qu'une seule fois

Début setup()

- Charge, à la première exécution, le numéro de la version du firmware dans l'EEPROM du microcontrôleur.
- Initialise les entrées sorties.
- Initialise les périphériques I2C : L'afficheur Oled et le capteur de CO2 SCD41
- Initialise les fonctions d'interruptions du Timer2 et de l'entrée bouton poussoir
- Teste la batterie et éteint le détecteur si elle est insuffisamment chargée
- Alimente le relais pour maintenir l'alimentation, même après relâchement du bouton poussoir.
- configure le capteur en mode lowpower
- affiche le message d'accueil pendant 8s
- Si le bouton est encore actionné, l'alimentation ne sera interrompu (mode continu), dans le cas contraire elle sera coupée au bout de 15mn (mode normal).
- Si 2 impulsions sur le poussoir exécuter le mode étalonnage ou restaurer la configuration usine.

Fonction principale (loop)

Celle-ci sera répétée indéfiniment toutes les 7 à 11 secondes.

Début `loop()` //répétée indéfiniment

- La batterie va être testée. Si son niveau est presque vide, on affichera le message d'alerte « recharger batterie ». Si la batterie est déchargée on affichera « batterie vide » avant de couper l'alimentation en commandant l'ouverture du contact du relais.
- Si on est en mode normal, la durée de fonctionnement va être testée :
 - quand elle atteint 13mn, un bip va sonner et un message « arrêt dans 2mn » apparaît durant 10s.
 - quand elle atteint 15mn l'alimentation sera coupée par l'ouverture du contact du relais.
- Acquisition et affichage du taux d'humidité et de CO2. Affichage aussi de la jauge batterie et du symbole du mode de fonctionnement (N ou C).
- Détermination du niveau de l'alarme (0, 1 ou 2) suivant la valeur du taux de CO2 mesuré.

Fonction d'interruption du bouton poussoir : arreter()

Celle-ci sera exécutée à chaque appui sur le bouton poussoir. En effet, l'entrée du microcontrôleur reliée au bouton poussoir a été configuré pour générer une interruption .

Début `arreter()`

- si au bout de 2s le bouton est encore actionné, alors la sortie qui commande le relais basculera à 0V, ce qui mettra hors tension le détecteur.
- Sinon : Si l'alarme est au niveau 1 changer l'état actif du buzzer.

retour

Fonction d'interruption du Timer2 : alarme_cligno()

Le Timer2 qui est interne au microcontrôleur a été configuré pour générer périodiquement une interruption du programme toutes les 100ms .

Début `alarme_cligno()`

- Si le niveau d'alarme est 2 on change l'état de la led RVB, on aura donc un rythme rapide de 5 bips et 5 clignotements par seconde. La même chose pour le buzzer si l'alarme sonore est activée.
- Si le niveau d'alarme est 1, on changera l'état de la led tous les 10 passages dans la routine d'interruption, on aura donc 5 clignotements toutes les 10s. La même chose pour le buzzer si l'alarme sonore est activé.
- Si le niveau d'alarme est 0, on éteint le buzzer.

retour

Fonction mode étalonnage

La lecture préalable de la description du mode étalonnage dans la notice utilisateur est indispensable pour comprendre le principe de cet étalonnage.

Début mode_etalonnage()

- Arrêter le mode mesure du capteur
- Attendre 20mn pour assurer renouvellement de l'air dans l'enceinte du capteur ou quitter ce mode par extinction du détecteur.
- Lancer le mode étalonnage étalonnage forcé à 420ppm (taux de concentration de l'air extérieur).

Attendre extinction du détecteur

Fonction config_usine

Celle-ci permet la restauration des paramètres de sortie d'usine, ce qui est peut être utile dans le cas d'un étalonnage défectueux. L'étalonnage est alors réinitialisé aux paramètres d'usine initiaux.

Début config_usine()

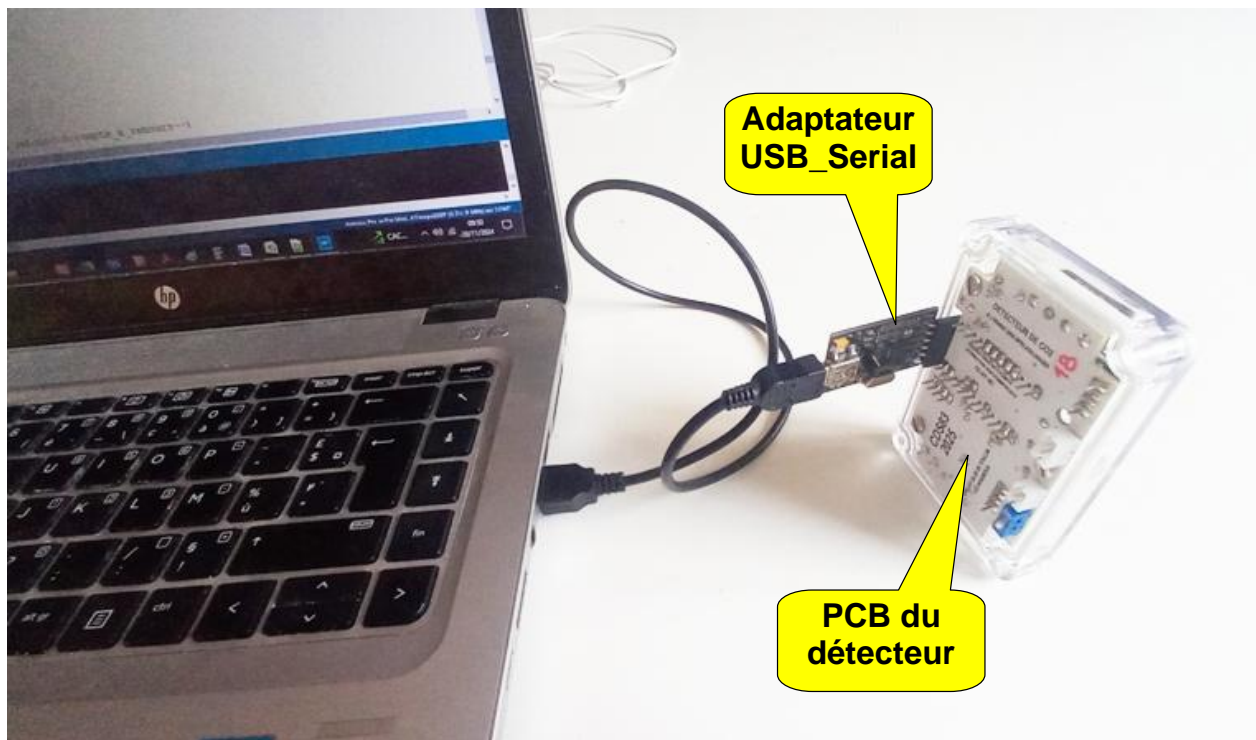
- Arrêter le mode mesure du capteur
- Attendre 30s pour laisser la possibilité de quitter ce mode par extinction du détecteur.
- Lancer au capteur la commande de restauration des paramètres de sortie d'usine.

Attendre extinction du détecteur

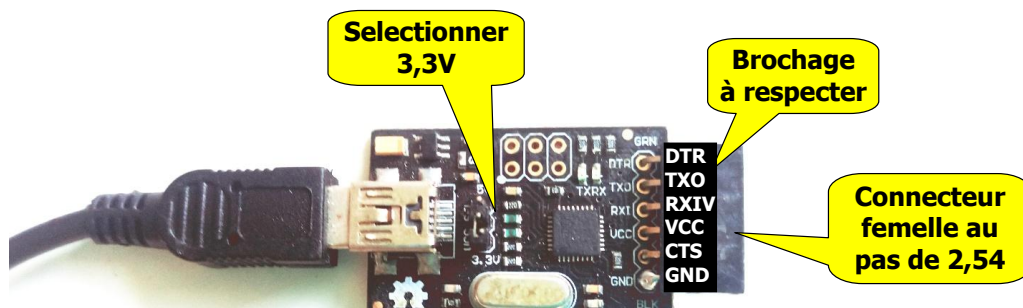


TELEVERSEMENT DU FIRMWARE

Pour le téléversement du programme, il faudra intercaler un adaptateur USB-Serial , directement connecté à la carte (PCB) du détecteur.



Pour l'adaptateur, choisir un modèle commutable en 3,3V par cavalier et dont le brochage du connecteur est identique à celui de la photo ci-dessous. Le modèle DFR0065 convient.



Coté PC, on pourra utiliser l'IDE Arduino où on téléchargera les bibliothèques nécessaires au firmware.

Dans l'IDE Arduino on effectuera ensuite les configurations d'usage

1. menu Outils→ Type de carte→ Sélectionner Arduino pro ou pro mini
2. menu Outils→ Processeur → Sélectionner A Atmega328P (3.3V,8Mhz)
3. menu Outils→ Port→ Sélectionner le Port correspondant

Après avoir chargé et compilé le fichier source , on le téléversera dans le détecteur.

Puis avoir connecté l'interrupteur et une alimentation réglée à 8V (ou à défaut la batterie), on vérifiera le bon fonctionnement du détecteur.

LISTES DU MATERIEL

Tout le matériel est disponible sur le site Ali-express, sauf la fabrication des PCB réalisable par JLCPCB.

LISTE DES COMPOSANTS DE LA CARTE PRINCIPALE

DESIGNATION	REPERE	Qté	VALEUR	REMARQUE	EMPREINTE
Carte microcontrôleur	ARD	1	8MHz / 3,3V	Carte Arduino Pro mini	DIL24 Large
Capteur CO2	U1	1	SCD41	Sensirion.	SCD411
Led rgb	D1	1			LEDRVB_SMD5050
Afficheur	U2	1		OLED 128x32 I2C	OLED091
Buzzer	BUZ1	1			BUZZER2PAS
Relais	RL1	1	3V/550Ω	RELAIS SIP 3V 1RT	RELAISSIP1RT
Dipswitch	SW	1			
Connecteur	J1	1	Pas de 2mm	PH 2 contacts pcb	
Connecteur	J2	1	Pas de 2mm	PH 3 contacts pcb	
Diode	D2	1	1N5817	Diodes Schottky	DIODE 3 PAS
Diode	D3	1	1N4148	Diode signal	DIODE Signal 3PAS
Condensateur	C1	1	1uF	polarisé ou non	CAPA TANT 2PAS
Résistance	R1	1	56	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Résistance	R2	1	3.3k	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Résistance	R3	1	820	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Résistance	R4,R6	2	47k	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Résistance	R5,R6	2	30k	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Résistance	R7	1	18k	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Résistance	R8,R11	1	43k	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
Résistance	R9	1	1k	à film métallique 1%	RESISTANCE 4PAS
PCB			72,4 x 47,5	Double face , trous métallisés	

LISTE DES COMPOSANTS ET ACCESSOIRES DU BOITIER

DESIGNATION	Qté	VALEUR	Autres SPECIFS	REMARQUE
BOITIER	1		étanche	Couvercle transparent
Connecteur	1	SP16	Femelle, étanche embase carrée	Servira d'enceinte pour le capteur
entretoises	3	M3 x 8	Femelle femelle	
vis	3	M3 x 8	Tete 6 pans	Fixation carte coté couvercle
vis	3	M3 x 8	Tete cruciforme	Fixation carte coté entretoises
vis	4	M3 x 12	Tete plate	Fixation du SP16
Ecrous freins	4	M3		Fixation du SP16
Rondelles	6	M3 x 3 x 1	Plastique rigide	Pour vis M3x8 6 pans et M3x12
Rondelle	1	M10 x 15	Plastique souple	Pour connecteur à fils USB-C
Gaine thermo	1	Diamètr 2mm	10cm	
Bouton poussoir	1	M8	Etanche ; Self-reset	
Connecteur à fils	1	PH2	Mâle , 3 contacts	Pour l'interrupteur
Batterie	1	7,4V ;600mAh	LiPo 2S 30x45x13	Vendue pour 1500mAh
Connecteur USB-C à fils	1	femelle	Etanche	
1 PCB chargeur	1			Voir liste composants chargeur
1 PCB carte principale	1			Voir lise composants carte principale
PATTAFIX				A placer entre le capteur et son enceinte SP16

LISTE DES CMPOSANTS ET ACCESSOIRES DU CHARGEUR

En cas d'utilisation d'un PCB monté extrait d'une chargeur u commerce, la Résistance R0 sera de type traversnt à souder extérieurement au PCB.

Tous les composants soudés sur le PCB sont de type CMS					
DESIGNATION	Qté	Repère	VALEUR	REMARQUE	EMPR EINTE
Circuit intégré	1	U1	CC1130T		SO14
Transistor	2	Q1,Q2	A1SH ou Si2301	FETMOS canal P	SOT-23
Transistor	2	Q3,Q4	A2SH ou Si2302	FETMOS canal N	SOT-23
Led	1	D1		verte	1206
Condensateur	2	C1,C2	6,8µF	ceramique	1210
Résistance	1	R0	1Ω		1206
Résistances	2	R1,R2	10kΩ		1206
Connecteur PH à fils	1		Mâle 2 broches		
Connecteur PH à fils	1		Femelle 3 broches		
PCB	1	34,8x17,8	Simple face		

SPECIFICATIONS

PARAMETRES		VALEURS
Gamme d'indication	Taux de CO2	de 0 à 40000ppm (4%)
Précision	jusqu'à 5000ppm (0,5%)	±(50ppm+5% de la valeur lue)
	au delà de 5000ppm (0,5%)	non spécifiée
Rythme des mesures		2 mesures par minute
Seuils d'alarmes sonore et visuelle	Niveau 0 Led tricolore au rouge fixe	0,05%<Taux<2% (0,05%=5000ppm/ 2%=20000ppm)
	Niveau 1 Led tricolore au rouge et buzzer clignotent lentement	2%≤Taux<3% Niveau 1 du Spéléo Secours Français (2%=20000ppm)
	Niveau 2 Led tricolore au rouge et buzzer clignotent rapidement	Taux ≥ 3% Niveau 2 du Spéléo Secours Français
Autonomie	Modèle à batterie LiPo	32 heures
Indice de protection	IP55	Protection contre les poussières et la pluie
Mode de charge	Par prise USB-C	Idem chargeur de smartphone
Modes de marche	Normal	arrêt auto au bout de 15mn
	Continu	Pas d'arrêt automatique
Ré_étalonnage	Possible par l'utilisateur en Mode continu	Auto étalonnage automatique
Dimensions	Hors Oreille	83x58x33
	Hors tout	98x58x50
Poids	Modèle à batterie LiPo	160g sans la housse