

Conception et réalisation d'un récepteur de barrière infra-rouge

Date : 23 mars 2025

Équipe : SOUFI Soufiane (Groupe 1B)

Encadrant : Mme. MAILLARD Aurore

Durée du projet : 21 heures (7 séances)



SOMMAIRE

I.	Introduction :	4
II.	Etude des émetteurs et récepteurs infra rouges :	4
	a. Introduction :	4
	b. Etude Théorique :	5
	1. Fonctionnement de la barrière infra-rouge :	5
	2. La LED émettrice infra-rouge TIL 32 :	5
	3. Le Photo transistor TIL 78 :	7
	c. Manipulation de la maquette émetteur / récepteur :	8
III.	Conception de la carte réceptrice :	9
	a. Introduction :	Erreur ! Signet non défini.
	b. Schéma structurel de la carte :	9
	c. Conception du typon et schéma d'implantation :	11
IV.	Réalisation du circuit imprimé de la carte réceptrice :	12
	b. Introduction :	12
	c. Gravure de la carte :	13
	d. Perçage de la carte :	13
	e. Soudage des composants :	13
	f. Soudage de la self :	Erreur ! Signet non défini.
V.	Test de la carte réceptrice :	14
	a. Introduction :	Erreur ! Signet non défini.
	b. Première mise sous tension sans circuits intégrés :	14
	c. Mise sous tension avec les circuits intégrés :	16
	d. Etude détaillée de la barrière infra rouge :	16
	1. Etude de l'émetteur :	16
	2. Etude du récepteur :	18
	3. Etude de l'amplificateur sélectif :	19
	4. Etude du comparateur et de monostable :	21
	5. Etude du fonctionnement global du récepteur infra rouge :	22

6.	Schéma fonctionnel de la barrière capteur infra-rouge :	23
VI.	Réalisation de l'émetteur infra rouge avec des CMS :	23
a.	Introduction :	23
b.	Conception du schéma structurelle sur Multisim :	24
c.	Conception du typon sur Ultiboard :	25
d.	Montage du circuit avec les CMS :	25
1.	Brasage :	Erreur ! Signet non défini.
VII.	Mesures des performances :	26
e.	Introduction :	26
f.	Mesure de la consommation :	26
g.	Chronogrammes de fonctionnement :	26
h.	Diagrammes de Bode :	28
1.	Mesures de la fonction de transferts $\frac{VC}{VB}$:	28
2.	Mesures de la fonction de transferts $\frac{VD}{VB}$:	29
VIII.	Devis de fabrication de 500 cartes réceptrices :	30
IX.	Etude de comportement harmonique du montage avec Multisim simulateur :	31
i.	Simulation de $\left \frac{VC}{VB} \right $:	31
j.	Simulation de $\left \frac{VD}{VB} \right $:	31
k.	Etude de l'influence de la variation de r et détermination de la valeur réelle de r :	31
l.	Etude de l'influence de la variation de R4 :	31

I. Introduction :

Ce projet a pour objectif la conception et la réalisation d'une barrière infrarouge composée d'un émetteur et d'un récepteur, permettant de détecter l'interruption d'un faisceau infrarouge. Un tel dispositif est largement utilisé dans des domaines comme la sécurité et l'automatisation industrielle. L'objectif est de développer une carte électronique fonctionnelle pour le récepteur, tout en respectant un cahier des charges strict, qui impose notamment des dimensions précises de 100 mm par 50 mm pour la carte, avec une zone de typon de 95 mm par 45 mm. Les circuits intégrés doivent être montés sur supports doubles lyres afin de faciliter leur remplacement et la maintenance. Le circuit comprend également une bobine réalisée à partir d'un tore de ferrite (3E25), avec un diamètre extérieur de 15 mm et un diamètre intérieur de 9 mm. De plus, l'émetteur doit être conçu en utilisant des composants CMS, une technologie qui requiert une grande précision lors de l'assemblage. L'ensemble du projet est mené sur une durée totale de 21 heures, réparties sur 7 séances. Ce rapport technique retrace chaque étape du travail réalisé, de l'étude du fonctionnement du système jusqu'à sa fabrication et sa validation expérimentale, afin d'assurer une documentation complète et de faciliter la compréhension et maintenance du dispositif.

II. Etude des émetteurs et récepteurs infra rouges :

a. Introduction :

Les systèmes de détection à infrarouge sont largement utilisés en sécurité et en automatisation, car ils émettent un faisceau infrarouge que le récepteur capte et convertit en un signal électrique. Lorsqu'un obstacle interrompt le faisceau, la diminution du signal reçu permet de repérer cette présence. Dans ce projet, l'émetteur est modulé à une fréquence précise, et le récepteur, grâce au phototransistor TIL 78, transforme le rayonnement infrarouge en un courant électrique proportionnel à l'intensité lumineuse. Ce courant est ensuite amplifié par un circuit sélectif conçu pour ne réagir qu'à la fréquence de l'émetteur. En cas de coupure du faisceau, la tension à la sortie de l'amplificateur chute et active un monostable (réalisé avec un LM555), qui fournit une impulsion témoin de l'interruption. Cette partie détaille la mise en œuvre de la maquette émetteur/récepteur ainsi que l'étude des caractéristiques du phototransistor TIL 78.

b. Etude Théorique :

1. Fonctionnement de la barrière infra-rouge :

L'émetteur est configuré pour produire en permanence un faisceau infrarouge modulé à une fréquence comprise entre 6 kHz et 11,5 kHz. Lorsque ce faisceau infrarouge n'est pas interrompu par un obstacle, il atteint directement le récepteur, constitué principalement du phototransistor TIL 78. Ce dernier capte le rayonnement infrarouge et génère un courant proportionnel à son intensité lumineuse, noté I_l . Ce courant est ensuite transformé en une tension notée V_B , qui inclut un léger décalage (offset) dû à la lumière ambiante présente dans l'environnement. Cette tension V_B est ensuite appliquée à l'entrée d'un amplificateur sélectif basé sur le circuit intégré TL082, conçu pour amplifier uniquement les signaux proches de la fréquence d'émission de l'émetteur et éliminer ainsi les signaux parasites.

Lorsque la tension amplifiée atteint un niveau suffisant indiquant clairement que le faisceau infrarouge est intact, le circuit monostable (U_1) est activé. Ce dernier bascule alors sa sortie S à l'état haut, signalant ainsi que le faisceau n'est pas coupé. À l'inverse, si le faisceau infrarouge est interrompu par un objet, la tension V_B chute fortement, réduisant ainsi le niveau du signal amplifié en dessous du seuil nécessaire à l'activation du monostable. En conséquence, la sortie S repasse à l'état bas, indiquant la détection d'un obstacle, comme expliqué visuellement sur la figure 1.

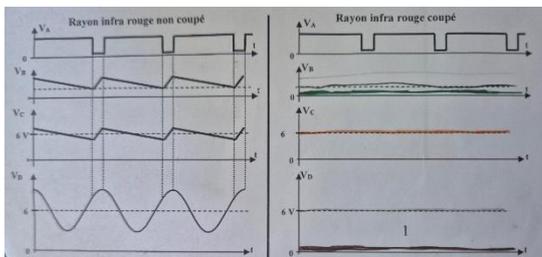


Figure 1- Chronogrammes théoriques illustrant les tensions V_A , V_B , V_C et V_D lorsque le rayon infrarouge est non coupé (à gauche) et coupé (à droite)

2. La LED émettrice infra-rouge TIL 32 :

Avant d'aborder les aspects fonctionnels, une préparation théorique a été menée pour situer la LED TIL 32 dans le spectre électromagnétique et identifier les caractéristiques électriques maximales à respecter. Le tableau ci-dessous résume les différentes plages de longueurs d'ondes et les domaines associés, ce qui permet de situer le rayonnement infrarouge émis par la LED parmi les rayonnements non visibles à l'œil nu :

Tableau 1 - Paramètres théorique de longueurs d'ondes

Longueurs d'ondes	Gamme de longueurs d'ondes en nm	Couleurs correspondantes
-------------------	----------------------------------	--------------------------

Perçues par l'œil humain	400 à 700 nm	bleu, vert, rouge
Émises par une source de tungstène à 2870 K	300 à 3000 nm	Ultra-violet, visible, infrarouge lointain
Émises par la LED infra-rouge TIL 32	880 nm	Infrarouge (invisible à l'œil nu)
Reçues par les phototransistors infra-rouges large bande	700 à 1100 nm	Infrarouge large spectre
Reçues par les phototransistors infra-rouges bande étroite	850 à 950 nm	Infrarouge centré sur 880 nm

Ensuite, pour garantir un fonctionnement sûr et efficace, il est essentiel de respecter les limites électriques recommandées par le constructeur. Le tableau suivant présente les caractéristiques maximales typiques de la LED TIL 32 :

Tableau 2 - Caractéristiques typiques de la LED TIL 32

Paramètre	Valeur
Courant continu moyen max $I_{D \max}$	200 mA
Tension directe V_D (typique)	1,5 V
Tension inverse max	5 V

Pour comprendre le comportement dynamique de la LED, un montage est utilisé dans lequel un timer 555 pilote la diode comme un interrupteur commandé, s'ouvrant et se fermant alternativement (rapport cyclique de 50 %). Lorsque l'interrupteur K est ouvert, aucun courant ne circule dans la LED, donc :

$$I_D = 0 \text{ mA}$$

Quand K est fermé, le courant traverse la LED et une résistance de 100 Ω . En considérant la tension directe de 1,5 V, le courant se calcule comme suit :

$$I_D = \frac{12 \text{ V} - 1,5 \text{ V}}{100 \Omega} = 105 \text{ mA}$$

Enfin, la valeur moyenne du courant, en tenant compte du fait que la LED est alimentée la moitié du temps, est :

$$I_{D \text{ moy}} = \frac{105}{2} = 52,5 \text{ mA}$$

Cette valeur respecte les limites définies précédemment et garantit un fonctionnement sûr tout en assurant une émission infrarouge efficace.

3. Le Photo transistor TIL 78

Le phototransistor TIL 78 est un capteur sensible au rayonnement infrarouge. Il est utilisé comme récepteur dans notre barrière infra-rouge. Lorsqu'il reçoit un faisceau IR, sa jonction base-collecteur est excitée par les photons, ce qui génère un courant de collecteur proportionnel à l'intensité lumineuse reçue. Ce courant est ensuite exploité par le circuit d'amplification pour produire une tension détectable.

Les caractéristiques électriques essentielles du TIL 78 sont les suivantes :

- Tension collecteur-émetteur maximale $V_{CE\ max} : 50\ V$
- Tension inverse base-émetteur $V_{EC(BR)\ max} : 7\ V$

Pour évaluer la réactivité du capteur, on prend en compte les paramètres dynamiques fournis par le constructeur, en particulier les temps de réponse :

Tableau 3 - Paramètres dynamiques des composants TIL 32 et TIL 78

	TIL 32 (LED émettrice)	TIL 78 (phototransistor)
Conditions de test	$I_{FM}=20\ mA, f=45\ kHz$	$V_{CC}=30\ V, I_L=800\ \mu A, R_L=1\ k\Omega$
Temps de montée (rise time)	600ns	15 μs
Temps de descente (fall time)	300ns	15 μs

Les temps de montée et de descente du phototransistor étant tous deux de 15 μs , on peut estimer la fréquence maximale à laquelle le système peut fonctionner sans perte de signal.

$$T_{min} = tr + tf = 15\ \mu s + 15\ \mu s = 30\ \mu s$$

$$f_{min} = \frac{1}{T_{min}} = \frac{1}{(30 \times 10^{-6})} = 33\ 333\ Hz \approx 33,3\ kHz$$

Ainsi, la fréquence maximale que peut supporter la barrière infra-rouge en conditions optimales est d'environ 33 kHz, ce qui est largement au-dessus de la fréquence réelle d'utilisation dans notre projet (environ 20 kHz), garantissant une réponse rapide et fiable du système.

c. Manipulation de la maquette émetteur / récepteur :

Dans cette phase expérimentale, nous avons observé les signaux réels issus du générateur d'horloge (555) et mesuré les tensions et courants associés à la LED TIL 32. Les courbes suivantes représentent les chronogrammes de la tension de commande V_A , du courant I_D traversant la LED, ainsi que de la tension directe V_D à ses bornes.

Les chronogrammes (figure) montrent que la tension V_A , générée par le 555, passe de 0 à 12,5 V pendant une impulsion de 5 μs , sur une période totale de 50 μs . Cette impulsion correspond à la fermeture de l'interrupteur K, durant laquelle un courant de 8,5 A traverse la LED. Ce courant élevé, très bref, est caractéristique d'un fonctionnement impulsionnel. La tension V_D aux bornes de la LED suit ce comportement : elle atteint 1,2 V pendant la conduction, puis chute à 0 V lorsque le signal V_A est bas, indiquant que la LED est bien éteinte hors impulsion.

Calcul de la valeur moyenne réelle du courant I_D :

Rapport cyclique :

$$5 \mu\text{s} \text{ --- } 50 \mu\text{s} = 0,1 \text{ (soit 10 \%)}$$

Valeur moyenne du courant :

$$I_{D\text{moy}} = 8,5 \text{ A} \times 0,1 = 0,85 \text{ A}$$

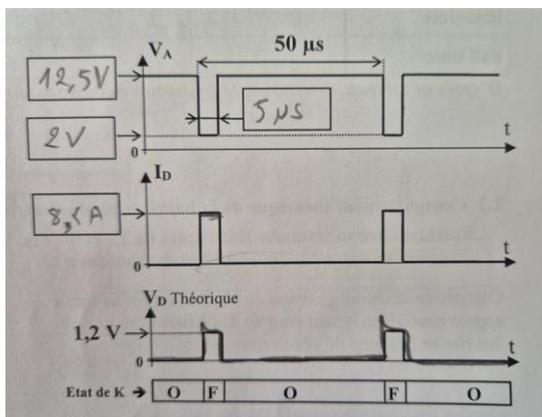


Figure 2 - Chronogrammes expérimentaux de V_A , I_D et V_D relevés sur la maquette de l'émetteur

III. Conception de la carte réceptrice :

a. Schéma structurel de la carte :

La carte réceptrice a pour rôle de détecter l'interruption du faisceau infrarouge émis par la LED TIL 32 et de générer un signal de sortie exploitable. Le cœur de cette carte repose sur l'utilisation du phototransistor TIL 78 (T1), un amplificateur opérationnel TL082 et d'un circuit intégré LM555 monté en monostable.

Le schéma structurel de cette carte a été réalisé à l'aide du logiciel Multisim. Grâce aux nombreuses utilisations précédentes de cet outil dans les projets passés, la prise en main a été rapide et la réalisation du schéma s'est faite de manière fluide et efficace.

Le phototransistor T1 capte le faisceau infrarouge modulé, et le courant qu'il génère est converti en tension et filtré par un réseau RC. Cette tension est ensuite amplifiée sélectivement par U2B, une AOP du TL082, dont la fréquence de résonance est ajustée par le circuit L-C (L : tore de ferrite, C : capacité C₂). Le second amplificateur (U2A) est utilisé en comparateur, avec une tension de seuil réglable via le potentiomètre RA1. Ce comparateur détecte les variations de niveau de la tension amplifiée et génère un front montant en sortie lorsque la lumière infrarouge est interrompue, c'est-à-dire lorsque le signal en entrée chute sous le seuil.

Ce front montant déclenche le circuit LM555 configuré en monostable, ce qui signifie qu'il génère une impulsion unique en réponse à chaque front montant détecté en entrée. Cette impulsion est ensuite utilisée pour activer une LED rouge (indicateur visuel de détection).

- Calcul de la résistance R₆ du monostable et R₇ :

Dans un montage monostable basé sur le LM555, la durée de l'impulsion en sortie est définie par :

$$t = 1,1 \times R_6 \times C_3$$

$$R_6 = \frac{t}{1,1 \times C_3} = \frac{1}{1,1 \times 10 \times 10^{-6}} \approx 90 \text{ k}\Omega$$

Ainsi, la valeur de R₆ doit être d'environ 91 kΩ pour obtenir une impulsion d'une seconde. Une résistance de 100 kΩ peut être utilisée comme approximation ou bien un ajustable pour régler précisément la durée.

$$R7 = \frac{(V_S - V_{LED})}{I_{LED}} = 680 \Omega$$

La résistance R7 doit donc avoir une valeur d'environ 680 Ω (valeur normalisée la plus proche).

Cela permet de limiter correctement le courant à environ 15 mA, ce qui garantit une bonne luminosité sans risque de détérioration de la LED.

La self utilisée dans le circuit a été réalisée à l'aide d'un tore de ferrite de type 3E25, autour duquel a été enroulé un fil émaillé de 0,4 mm de diamètre. La valeur de l'inductance visée dépendait du numéro de poste attribué. Pour déterminer le nombre de spires à enrouler, on utilise la formule classique :

$$L = A_L \times N^2$$

Où L est l'inductance souhaitée (en μH), A_L est la constante du matériau magnétique du tore (en nH/spire²), et N est le nombre de spires. Le tore 3E25 utilisé présente une constante

$$A_L \approx 160 \text{ nH/spire}^2$$

En appliquant cette formule, on obtient :

$$\text{Pour } 500 \mu\text{H} : N = \sqrt{\frac{500000}{160}} \approx 56 \text{ spires}$$

Ces valeurs ont été utilisées pour guider le bobinage de la self. Les extrémités du fil ont été soigneusement dénudées avant soudage afin d'assurer un bon contact électrique.

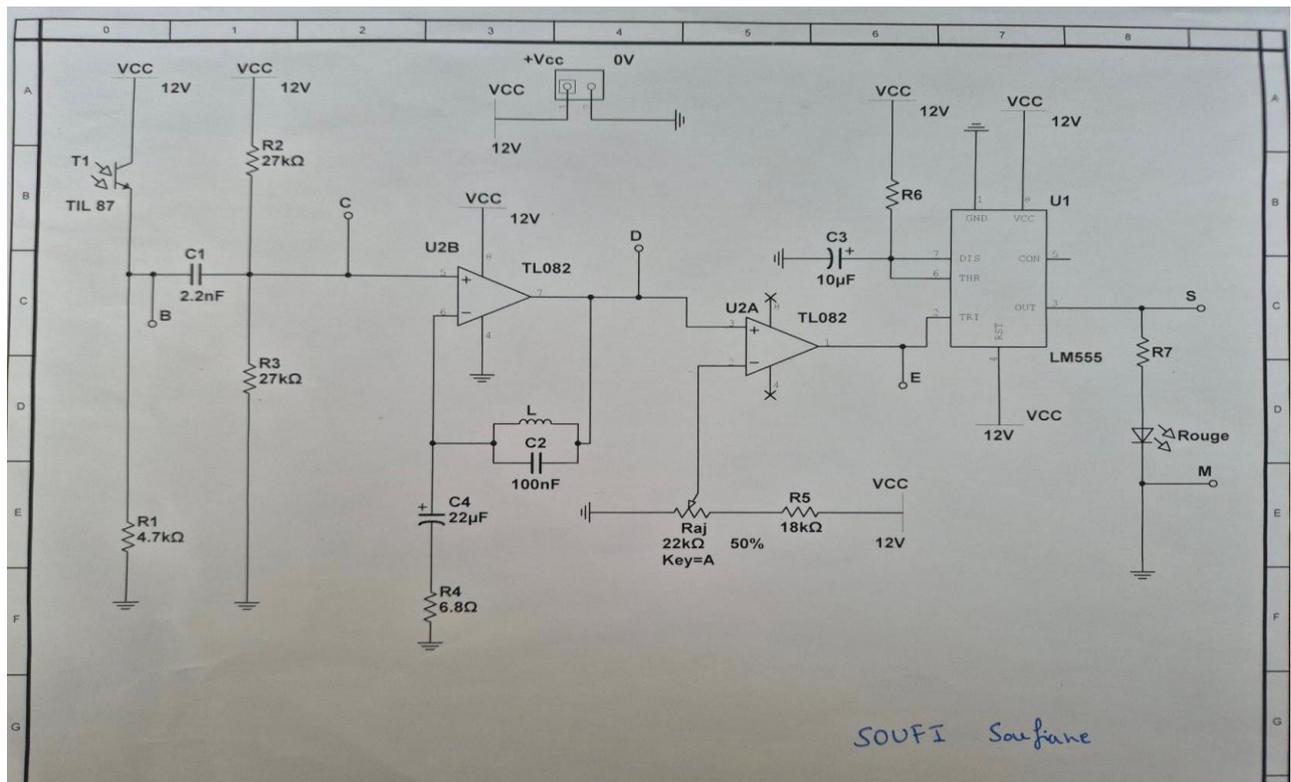


Figure 3 - schéma structurelle de la carte réceptrice

b. Conception du typon et schéma d'implantation :

Une fois le schéma structurel finalisé sous Multisim, la conception du typon et du schéma d'implantation a été réalisée à l'aide du logiciel Ultiboard, qui est directement lié à Multisim. L'exportation des composants et des connexions vers Ultiboard s'est faite sans difficulté grâce à la compatibilité entre les deux plateformes.

Le typon est conçu pour une carte simple face, afin de faciliter la gravure manuelle. L'objectif principal était de respecter les dimensions imposées par le cahier des charges, soit 100 mm × 50 mm, avec une zone utile de typon de 95 mm × 45 mm. Un soin particulier a été apporté au positionnement logique des composants : le phototransistor est placé à l'entrée du circuit, suivi des blocs de filtrage et d'amplification, puis du comparateur et enfin du monostable LM555 en fin de chaîne. La LED de signalisation est positionnée en bord de carte pour rester visible lors des tests.

Les pistes ont été optimisées afin de minimiser leur longueur tout en évitant les croisements. Les composants sensibles tels que la bobine et les condensateurs de filtrage ont été positionnés de manière à limiter les interférences. Une attention particulière a également été

portée à la cohérence entre le typon et le schéma d'implantation, afin d'éviter toute erreur lors de la phase de soudage.

L'utilisation d'Ultiboard, déjà expérimenté dans les projets précédents, a permis une conception rapide et efficace du circuit imprimé, en s'appuyant sur les habitudes prises avec l'environnement Multisim/Ultiboard.

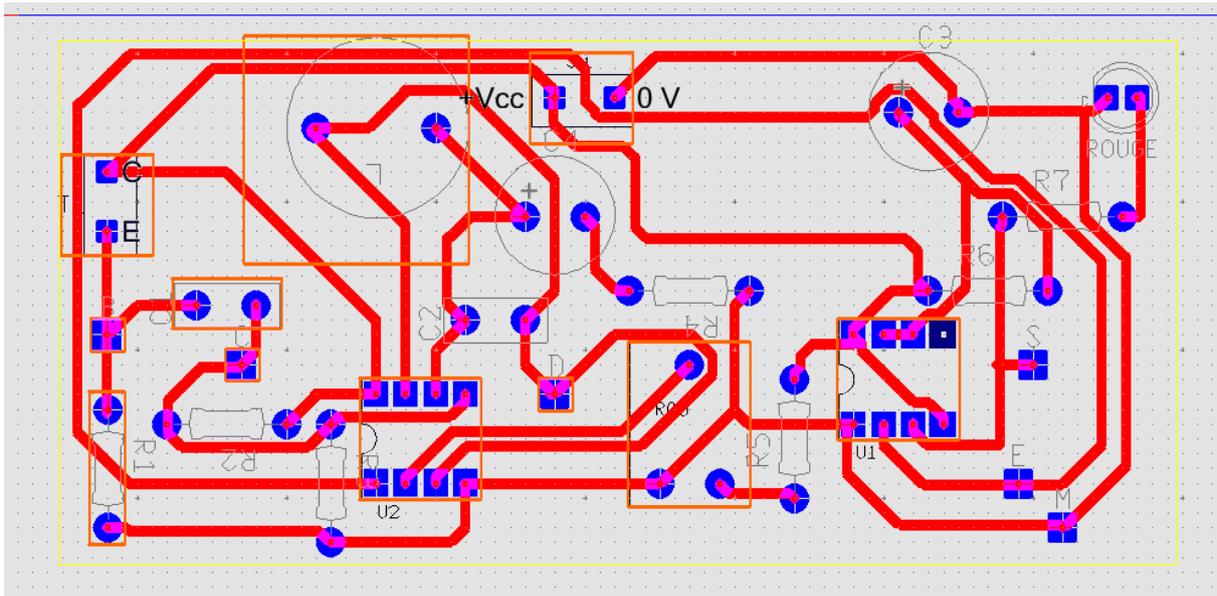


Figure 4 - Typons du circuit de la barrière infra-rouge

IV. Réalisation du circuit imprimé de la carte réceptrice :

a. Introduction :

La réalisation du circuit imprimé de la carte réceptrice est une étape essentielle permettant de passer de la conception théorique à un support matériel fonctionnel. Cette phase comprend plusieurs étapes successives : la gravure du typon sur la plaque cuivrée, le perçage des emplacements des composants, le soudage de l'ensemble des composants traversants, puis enfin la soudure spécifique de la self, en raison de sa nature particulière (réalisée avec un tore de ferrite).

Chaque opération nécessite précision et rigueur pour assurer le bon fonctionnement du circuit, ainsi qu'une correspondance fidèle avec le typon généré numériquement.

b. Gravure de la carte :

La gravure du circuit imprimé a été réalisée par méthode chimique, une technique classique consistant à éliminer les parties non désirées du cuivre sur une plaque pré-sensibilisée. Le typon, imprimé à l'échelle 1 sur un transparent, a d'abord été positionné sur la face cuivrée de la plaque. Après exposition aux UV dans une insolateuse, la plaque a été plongée dans un révélateur pour faire apparaître les parties à graver.

Une fois la plaque révélée, elle a été immergée dans un bain de perchlorure de fer (FeCl_3), utilisé comme agent chimique pour attaquer le cuivre non protégé. La durée d'immersion a été surveillée pour éviter une surgravure, et la carte a ensuite été rincée abondamment à l'eau. Cette étape a permis d'obtenir les pistes en cuivre visibles, correspondant au circuit conçu sur Ultiboard.

Enfin, un contrôle visuel minutieux a été effectué pour vérifier la netteté des pistes, l'absence de ponts de cuivre involontaires, ainsi que la conformité générale avec le schéma d'implantation.

c. Perçage de la carte :

Après la gravure, la carte a été percée manuellement à l'aide d'une perceuse de précision. Cette opération s'est faite en suivant avec attention le schéma d'implantation, afin de garantir un bon positionnement des composants. Le diamètre des trous a été choisi en fonction de la nature des composants à insérer. La majorité des composants traversants, tels que les résistances, les condensateurs ou encore les broches des circuits intégrés, ont été percés avec un foret de 0,8 mm. Les éléments plus volumineux, comme les bornes à vis ou la résistance ajustable, ont nécessité des perçages de 1,2 mm. Les cosses poignards ont quant à elles été insérées dans des trous légèrement ovalisés afin de faciliter leur montage mécanique. Une fois le perçage terminé, un nettoyage de la carte a été effectué pour retirer les résidus de perçage pouvant nuire à la soudure ou entraîner des défauts de contact.

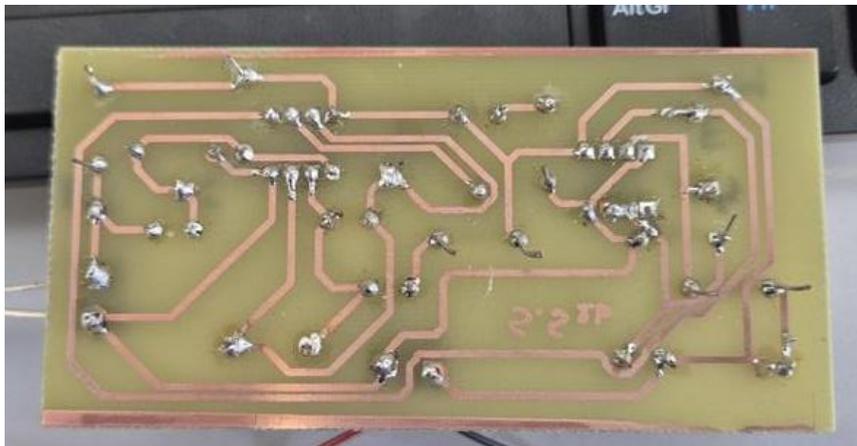
d. Soudage des composants :

Le soudage a été réalisé en respectant un ordre logique afin de faciliter le montage et garantir la fiabilité du circuit. Les résistances et supports de circuits intégrés ont été soudés en premier, à l'aide d'un gabarit plieur, pour assurer un positionnement précis et un bon contact avec la

carte. Ils ont été plaqués contre le circuit avant soudure. Les condensateurs plastiques C1 et C2, ainsi que la résistance ajustable RAJ, ont ensuite été placés, suivis des composants les plus volumineux comme les connecteurs à vis et les cosses poignards, montés dans des trous adaptés à leur gabarit.

La self a été réalisée en enroulant un fil émaillé de 0,4 mm autour d'un tore de ferrite (3E25), selon la valeur d'inductance souhaitée. Après avoir soigneusement dénudé les extrémités, elle a été soudée sur la carte en position verticale ou horizontale selon l'espace disponible.

Toutes les soudures ont été faites manuellement avec soin, puis contrôlées visuellement afin de garantir l'absence de défauts avant la mise sous tension.



V. Test de la carte réceptrice :

a. Première mise sous tension sans circuits intégrés :

Avant d'insérer les circuits intégrés sur leurs supports, une première mise sous tension a été effectuée afin de vérifier la continuité du circuit, l'absence de court-circuit, et la présence des bonnes tensions sur les différentes broches des supports. Pour cela, une alimentation stabilisée de laboratoire a été réglée à +12 V avec une limitation de courant à 100 mA, ce qui permet de sécuriser le montage durant cette première vérification.

Une fois la carte alimentée, les potentiels ont été mesurés à l'aide de l'oscilloscope sur chaque broche des supports de circuits intégrés (LM555 et TL082), par rapport à la masse. Ces valeurs ont été comparées aux valeurs théoriques attendues. Un tableau de première mise sous

tension a été complété, regroupant à la fois les tensions théoriques et les tensions mesurées sur chaque broche (Tableau 4).

Tableau 4 - Tableau de première mise sous tension

		Broche 1	Broche 2	Broche 3	Broche 4	Broche 5	Broche 6	Broche 7	Broche 8
U2 (TL082)	Potentiel théorique	En l'air	0 à 6 V	En l'air	En l'air	6V	0V	En l'air	12V
	Potentiel mesuré	0,01V	0V ou 6,2V	0V	0V	6V	0V	0V	12V
U1 (LM555)	Potentiel théorique	0 V	0V	0 V	12 V	0V	12V	12V	12 V
	Potentiel mesuré	0V	0,03V	0,05V	12V	0,01V	12V	12V	12V

Les tensions relevées sur les différentes broches ont permis de vérifier la bonne distribution de l'alimentation (+12 V et 0 V) ainsi que la cohérence du câblage. Les broches correspondant aux alimentations (Vcc et GND) affichaient des valeurs correctes, tandis que les broches non reliées ou en l'air présentaient des tensions nulles ou très faibles, comme attendu. Les points reliés à des ponts diviseurs ou à des condensateurs chargés montraient quant à eux des tensions stables et cohérentes avec les calculs théoriques. Aucun défaut de câblage n'a été constaté, ce qui confirme que la carte est prête à recevoir les circuits intégrés pour les essais fonctionnels.

b. Mise sous tension avec les circuits intégrés :

Une fois les vérifications sans circuits intégrés effectuées, les composants LM555 et TL082 ont été insérés sur la carte en respectant leur orientation. L'alimentation a ensuite été réactivée sous +12 V, toujours limitée à 100 mA. Deux alimentations séparées ont été utilisées pour l'émetteur et le récepteur afin d'éviter les interférences.

La mise en route s'est accompagnée du réglage de la fréquence du signal émis à l'aide de la résistance ajustable RAJ1 sur la carte émettrice, de manière à la faire coïncider avec la fréquence centrale de l'amplificateur sélectif du récepteur. Ensuite, la sensibilité de détection a été ajustée via RAJ sur le récepteur, permettant de définir le seuil à partir duquel le comparateur déclenche le monostable.

Lorsque le système est correctement aligné et réglé à environ 30 cm de distance, la LED rouge de la carte réceptrice s'allume lors de la coupure du faisceau, confirmant le bon fonctionnement global du montage.

c. Etude détaillée de la barrière infra rouge :

1. Etude de l'émetteur :

L'émetteur de la barrière infra-rouge repose sur une LED TIL 32 pilotée par un circuit LM555 en astable (c'est-à-dire un montage sans état stable, produisant un signal périodique qui alterne continuellement entre un état haut et un état bas). Ce signal est un signal carré utilisé pour allumer et éteindre la LED à fréquence fixe, ce qui permet de moduler le faisceau infrarouge. Cette modulation facilite la détection par le récepteur en éliminant les perturbations lumineuses ambiantes.

Ce fonctionnement est souvent représenté dans les schémas par le symbole , qui indique une sortie non continue, et le mode astable. Dans notre cas, la sortie est carrée et non sinusoïdale.

Équations littérales (mode astable du LM555) :

$$RA = R1 + Raj1$$

$$RB = R2$$

$$TON = 0,7 \times (RA + RB) \times C1 = 0,7 \times (R1 + Raj1 + R2) \times C1$$

$$T_{OFF} = 0,7 \times R_B \times C_1 = 0,7 \times R_2 \times C_1$$

$$T = T_{ON} + T_{OFF} \qquad f = 1/T$$

Où :

$$R_1 = 6\,800 \, \Omega$$

$$R_{aj1 \min} = 0 \, \Omega$$

$$C_1 = 1 \, nF$$

$$R_{aj1 \max} = 220\,000 \, \Omega$$

$$R_2 = 4\,700 \, \Omega$$

Applications numérique:

$$T_{ONmin} = 0,7 \times (6\,800 + 0 + 4\,700) \times 10^{-9} = 0,7 \times 11\,500 \times 10^{-9} = 8,05 \, \mu s$$

$$T_{ONmax} = 0,7 \times (6\,800 + 220\,000 + 4\,700) \times 10^{-9} = 0,7 \times 231\,500 \times 10^{-9} \\ = 162,05 \, \mu s$$

$$T_{OFF} = 0,7 \times 4\,700 \times 10^{-9} = 3,29 \, \mu s$$

$$T_{min} = T_{ONmin} + T_{OFF} = 8,05 + 3,29 = 11,34 \, \mu s$$

$$T_{max} = T_{ONmax} + T_{OFF} = 162,05 + 3,29 = 165,34 \, \mu s$$

$$F_{max} = 1/T_{min} = 1/11,34 \times 10^{-6} \approx 88,2 \, kHz$$

$$F_{min} = 1/T_{max} = 1/165,34 \times 10^{-6} \approx 6,05 \, kHz$$

Le courant I_3 traverse la LED infrarouge TIL32 ainsi que la résistance de limitation R_3 pendant les phases où le signal V_A est à l'état haut, c'est-à-dire pendant T_{ON} . On suppose que la LED est polarisée directement et que sa tension directe est d'environ 2 V. La tension d'alimentation est de 12 V.

$$I_3 = \frac{V_A - V_{LED}}{R_3} = \frac{12 - 2}{100} = \frac{10}{100} = 0,1 \, A$$

2. Etude du récepteur :

Le récepteur de la barrière infra-rouge utilise un phototransistor TIL 78 pour capter le faisceau émis par la LED infrarouge. Le courant généré est converti en une tension notée V_B , puis injecté dans un filtre passe-haut actif basé sur un amplificateur opérationnel TL082 monté en configuration inverseuse.

Ce filtre est constitué d'un réseau RC série formé de C_1 et R_3 , une contre-réaction active par l'AOP via les composants C_2 , C_4 et R_4 , et une alimentation symétrique de +12 V.

Sur les schémas équivalents (figure 5), on identifie la partie haute du filtre comme un montage passe-haut classique, où le condensateur laisse passer les hautes fréquences et bloque les basses fréquences. Son équivalent en régime alternatif est un simple montage en série d'un condensateur et d'une résistance.

Ce filtre est conçu pour laisser passer uniquement les signaux de fréquence voisine de celle du signal émis, en atténuant le bruit continu et les variations lentes. Cela permet de nettoyer le signal V_B en sortie du phototransistor et d'obtenir un signal V_C plus exploitable par le comparateur.

Ce montage constitue la première étape du traitement du signal côté récepteur. Il est donc essentiel pour éliminer les interférences lumineuses parasites, telles que celles causées par l'éclairage ambiant, tout en conservant la modulation utile.

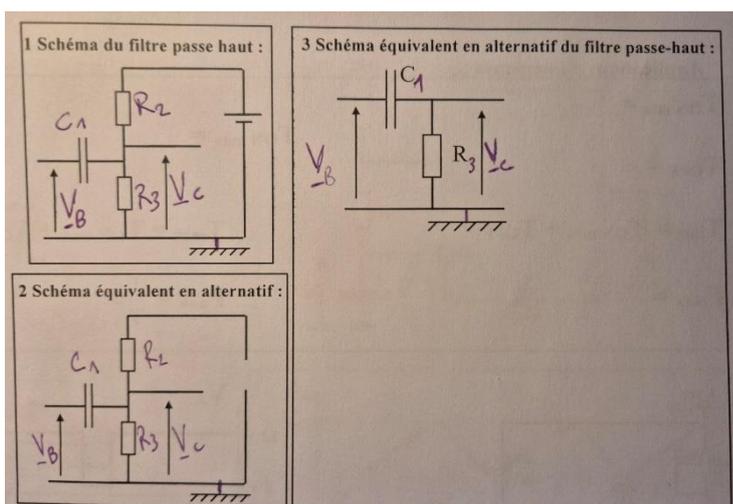


Figure 5 - Schémas équivalents du filtre passe haut

3. Etude de l'amplificateur sélectif :

i. Self L parfaite :

Dans le cas d'une self idéale (sans pertes), le gain en tension maximal du montage s'exprime par le rapport des modules d'impédance :

Formules littérales :

$$Av = \frac{|VD|}{|VC|} = \frac{|Z_2|}{|Z_1|}$$

Où :

$$Z_1 = \frac{R_4 + 1}{j \times \omega_0 \times C_4}$$

$$Z_2 = \frac{j \times \omega_0 \times L}{1 - \omega_0^2 \times L \times C_2}$$

On prend les modules :

$$|Z_1| = \sqrt{R_4 + \left(\frac{1}{\omega_0 \times C_4}\right)^2}$$

$$|Z_2| = \frac{\omega_0 \times L}{\sqrt{1 - (\omega_0^2 \times L \times C_2)^2}}$$

Données numériques :

$$R_4 = 6,8 \Omega$$

$$C_4 = 22 \mu F = 22e - 6 F$$

$$C_2 = 100 nF = 100e - 9 F$$

$$L = 500 \mu H = 500e - 6 H$$

$$f_0 = 9500 Hz \rightarrow \omega_0 = 2 \times \pi \times f_0 \approx 59690 rad/s$$

Application numérique :

$$|Z_1| = \sqrt{6,8^2 + \left(\frac{1}{59690 \times 22 \times 10^{-6}}\right)^2}$$

$$|Z_1| \approx \sqrt{46,24 + (0,764)^2} \approx \sqrt{46,82} \approx 6,84 \Omega$$

$$|Z_2| = \frac{(59690 \times 500 \times 10^{-6})}{\sqrt{1 - (59690^2 \times 500 \times 10^{-6} \times 100 \times 10^{-9})^2}}$$

$$|Z_2| = \frac{29,85}{\sqrt{1 - 0,16^2}} = \frac{29,85}{0,98} \approx 30,27 \Omega$$

$$Av = \frac{30,27}{6,84} \approx 4,42$$

ii. *Resistance r en série de la self L :*

Lorsque l'on tient compte de la résistance série r de la self L , le montage ne peut plus fournir une amplification infinie. Cette résistance modélise les pertes du fil de cuivre et les pertes magnétiques internes au noyau. L'amplification maximale en tension, autour de la fréquence de résonance, devient :

$$Av = \frac{L}{C2 \cdot R4 \cdot r}$$

Dans notre montage, la self a une valeur de $L = 500 \mu\text{H}$, et la résistance série est mesurée à $r = 1 \Omega$, ce qui est typique pour une bobine faite main avec du fil émaillé. Les autres composants du circuit sont $C2 = 100 \text{ nF}$ et $R4 = 6,8 \Omega$.

Application numérique :

$$Av = \frac{500 \times 10^{-6}}{100 \times 10^{-9} \times 6,8 \times 1,0}$$

$$Av = \frac{500 \times 10^{-6}}{6,8 \times 10^{-5}}$$

$$Av \approx 7,35$$

L'amplification maximale réelle obtenue avec la self et ses pertes est donc d'environ 7,35, ce qui reste satisfaisant pour le traitement du signal, tout en montrant l'influence directe de la résistance interne de la self sur les performances globales du circuit.

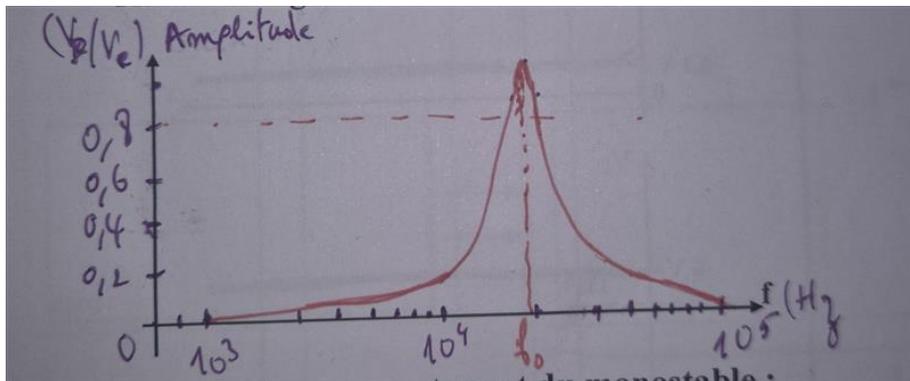


Figure 6 - Diagramme de Bode en amplitude de l'amplificateur sélectif

4. Etude du comparateur et de monostable :

Le signal issu de l'amplificateur sélectif est appliqué à l'entrée non-inverseuse d'un comparateur basé sur un amplificateur opérationnel TL082. L'entrée inverseuse reçoit une tension de référence V_2 , réglable à l'aide d'un pont diviseur formé de $R_5 = 18 \text{ k}\Omega$ et d'un potentiomètre $R_{aj} = 22 \text{ k}\Omega$. Cette tension V_2 détermine le seuil de détection.

Lorsque le signal reçu est suffisamment fort, la tension sur l'entrée non-inverseuse dépasse V_2 , ce qui fait basculer la sortie V_D du comparateur à l'état haut. Inversement, si le signal est trop faible ou absent, V_D reste à l'état bas.

Les tensions limites $V_{2\min}$ et $V_{2\max}$ peuvent être calculées à partir du pont diviseur alimenté par +12 V :

$$V_{2min} = 12 \times \frac{18}{18 + 22} = 12 \times \frac{18}{40} = 5,4 V$$

$$V_{2max} = 12 \times \frac{40}{40} = 12 V$$

En ajustant R_{aj} , on règle donc la sensibilité du système de détection. Une valeur de V_2 proche de 6,4 V permet par exemple de déclencher uniquement lorsque le signal reçu est suffisamment net (figure 7).

Ce signal V_D est ensuite appliqué à l'entrée Trigger (broche 2) d'un monostable LM555.

Celui-ci est déclenché lorsque $V_E < \frac{V_{CC}}{3}$, soit 4 V dans notre montage alimenté sous 12 V. À chaque front descendant de V_E en dessous de ce seuil, une impulsion est générée en sortie V_S .

Cela permet de générer une impulsion claire et stable chaque fois que le signal reçu dépasse le seuil V_2 , ce qui est exploité pour allumer une LED témoin.

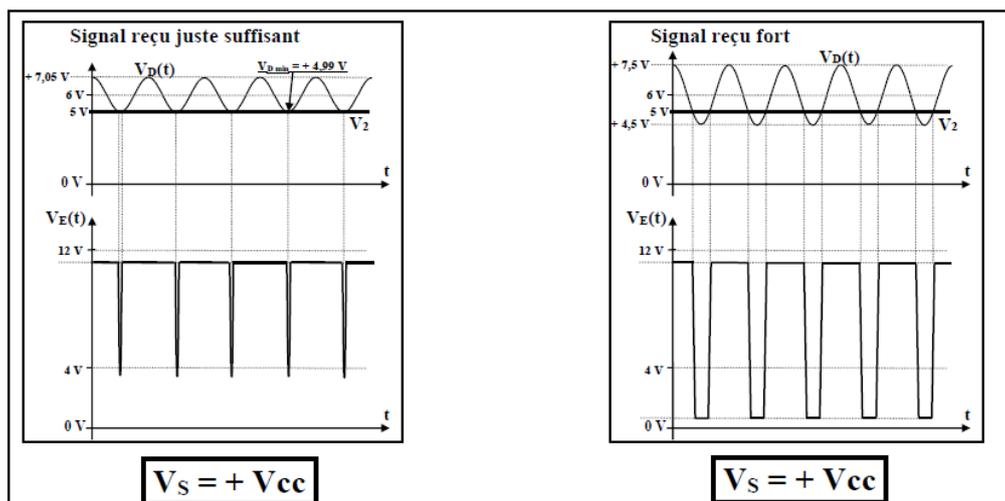


Figure 7 - Comparaison des chronogrammes pour un signal reçu juste suffisant et un signal reçu fort

5. Etude du fonctionnement global du récepteur infra rouge :

Le récepteur infra-rouge détecte les interruptions d'un faisceau modulé en traitant le signal à travers plusieurs étages. Le phototransistor transforme le signal lumineux en courant, qui est ensuite filtré pour supprimer les interférences continues. Le signal est amplifié sélectivement autour de la fréquence de modulation, puis comparé à un seuil ajustable. Si le signal est suffisamment fort, un monostable est déclenché, produisant une impulsion logique stable. Ce fonctionnement assure une détection fiable et insensible à la lumière ambiante.

Lorsque le rayon infra-rouge est coupé, le phototransistor ne reçoit presque aucun signal. La tension V_B reste donc très faible ($\approx 0,1$ V), ce qui donne une sortie amplifiée V_C constante autour de 6 V. Cette tension n'étant pas suffisante pour dépasser le seuil V_2 , la sortie du comparateur V_D reste bloquée à 4 V, et le monostable n'étant jamais déclenché, V_E reste constamment à 12 V.

6. Schéma fonctionnel de la barrière capteur infra-rouge :

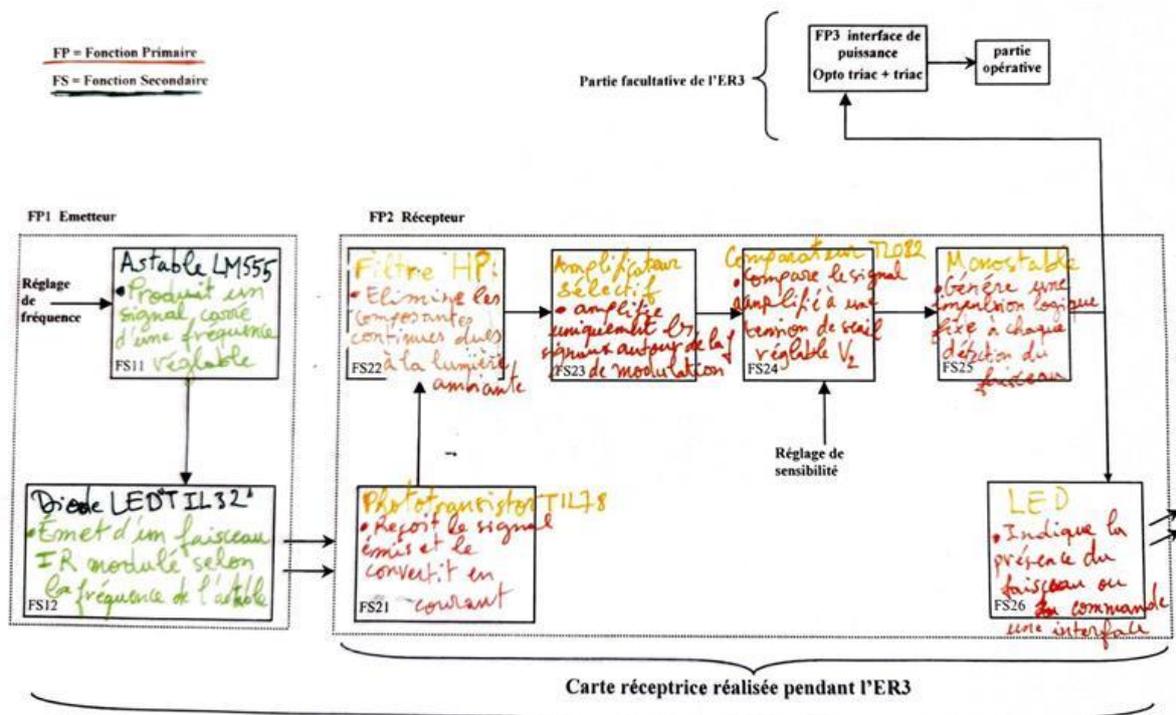


Figure 8 - Schéma fonctionnel de la barrière infra-rouge

VI. Réalisation de l'émetteur infra rouge avec des CMS :

a. Introduction :

La technologie CMS (Composants Montés en Surface) est largement utilisée dans l'électronique moderne pour ses nombreux avantages, notamment la compacité, la légèreté, et la possibilité d'automatiser la fabrication des circuits. Contrairement aux composants

traversants, les CMS sont soudés directement à la surface du circuit imprimé, ce qui permet de réduire les dimensions et d'optimiser la disposition des pistes.

Dans ce projet, l'émetteur infra-rouge a été réalisé à l'aide de composants CMS, afin de reproduire un montage plus proche des standards industriels. Cette partie du projet nous a permis de nous familiariser avec les techniques de brasage adaptées aux composants miniatures.

b. Conception du schéma structurelle sur Multisim :

Le schéma structurel de l'émetteur infra-rouge a été conçu à l'aide du logiciel Multisim, en utilisant les versions CMS (montage en surface) des composants imposés. Le circuit repose sur un oscillateur astable à LM555, configuré pour produire un signal de fréquence voisine de 9,5 kHz.

Les composants utilisés respectent les contraintes imposées pour la réalisation en technologie CMS. Le circuit LM555CM est utilisé dans un boîtier SOCI8 adapté au montage en surface. Les résistances R1, R2 et R3, ainsi que le condensateur C1 de 1 nF, sont tous en boîtier 1206. L'émission du signal infra-rouge se fait via une LED connectée à travers un bornier HDR1X2, également utilisé pour l'alimentation du circuit.

La structure du schéma (figure 9) respecte les recommandations pédagogiques : les valeurs des composants sont cohérentes avec la version traversante étudiée en amont, et la disposition facilite le passage vers Ultiboard. Une alimentation unique de +12 V est utilisée, et le signal carré est généré en sortie du 555 pour commander la LED IR.

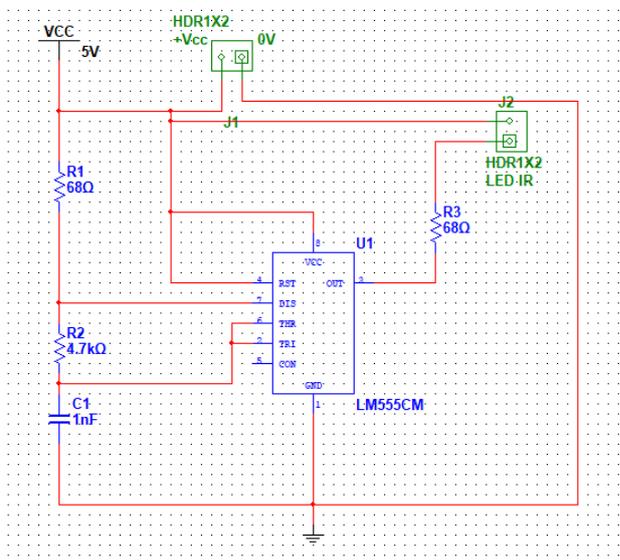


Figure 9 - Schéma structurelle de la carte émettrice en CMS

c. Conception du typon sur Ultiboard :

Après la validation du schéma structurel sur Multisim, le projet a été exporté vers Ultiboard pour la réalisation du typon CMS (figure 10). L'objectif était d'obtenir un circuit imprimé simple face compact, respectant les contraintes pédagogiques, notamment en matière de dimensions et de placement des composants.

L'implantation a été optimisée pour faciliter le routage et le brasage manuel. Tous les composants CMS, y compris le LM555CM en boîtier SOIC8 et les résistances et condensateurs en format 1206, ont été placés sur la face supérieure du circuit. Le routage a été effectué manuellement en veillant à respecter les règles de largeur de piste, d'espacement, et de clarté du tracé. Une attention particulière a été portée à la position des connecteurs, notamment le bornier HDR1X2, afin de faciliter l'alimentation et la connexion de la LED infra-rouge.

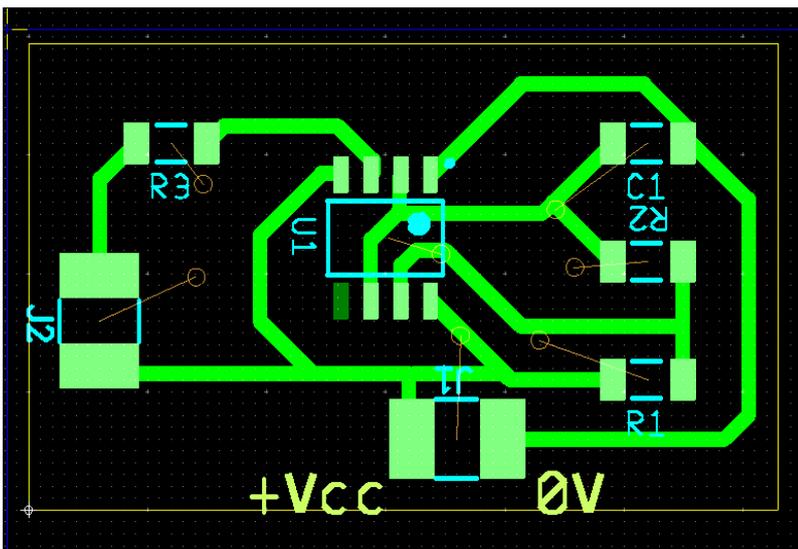


Figure 10 - Typons de la carte émettrice CMS

d. Montage du circuit avec les CMS :

Après la conception et l'impression du typon, le montage des composants CMS a été réalisé en salle dédiée. La première étape a consisté à déposer manuellement la pâte à braser sur les pastilles à l'aide d'un doseur, en mode semi-automatique, puis à préparer les composants sur un support. Ensuite, les composants CMS (résistances, condensateur, LM555) ont été posés avec précision à l'aide d'une aiguille pneumatique, selon les indications fournies pour l'orientation, notamment pour le repérage du LM555.

Les composants ont été simplement déposés sur la pâte à braser, sans être soudés manuellement. La carte ainsi préparée a ensuite été introduite dans un four de refusion à 220 °C, où la chauffe a permis à la pâte de fondre et de fixer les composants par capillarité.

Après refroidissement, une inspection visuelle a été effectuée pour s'assurer de la qualité des soudures. Le montage s'est terminé par le branchement de la LED émettrice et des fils d'alimentation, soudés manuellement sur les pastilles prévues à cet effet.

VII. Mesures des performances :

e. Introduction :

Cette partie vise à analyser les performances de la barrière infrarouge réalisée, en mesurant la consommation électrique, en relevant les chronogrammes caractéristiques de son fonctionnement, et en traçant les diagrammes de Bode associés aux fonctions de transfert du récepteur.

f. Mesure de la consommation :

La consommation électrique de la carte réceptrice a été mesurée dans deux situations : lorsque le faisceau infra-rouge est reçu correctement (rayon non coupé), et lorsqu'il est interrompu (rayon coupé). Ces mesures ont été effectuées à l'aide d'un ampèremètre analogique placé en série avec l'alimentation 12 V.

Dans le cas où le rayon est reçu, la carte est entièrement active : le phototransistor détecte le signal, les étages de filtrage, d'amplification, de comparaison et le monostable sont sollicités. Dans cette situation, la consommation mesurée est d'environ 20 à 22 mA.

Lorsque le rayon est coupé, le phototransistor n'est plus excité, ce qui entraîne une inactivité partielle du circuit. Le monostable n'est pas déclenché et certaines parties du traitement ne s'activent pas. La consommation descend alors à environ 12 à 14 mA.

Ces résultats confirment que le système est économe en énergie en l'absence de détection, ce qui peut être particulièrement utile dans des applications sur batterie ou pour limiter la

dissipation thermique. L'écart de consommation entre les deux états constitue aussi un indicateur fiable du bon fonctionnement de la chaîne de détection.

g. Chronogrammes de fonctionnement :

Les chronogrammes ont été relevés avec une distance d'environ 30 cm entre l'émetteur et le récepteur. Ils permettent d'observer les tensions caractéristiques V_A , V_B , V_C , V_D , V_E et V_S en fonction du temps. Ces relevés (figure 11) ont été utilisés pour valider le bon enchaînement des fonctions électroniques de la carte et interpréter les réactions du système en temps réel selon l'état du faisceau infrarouge.

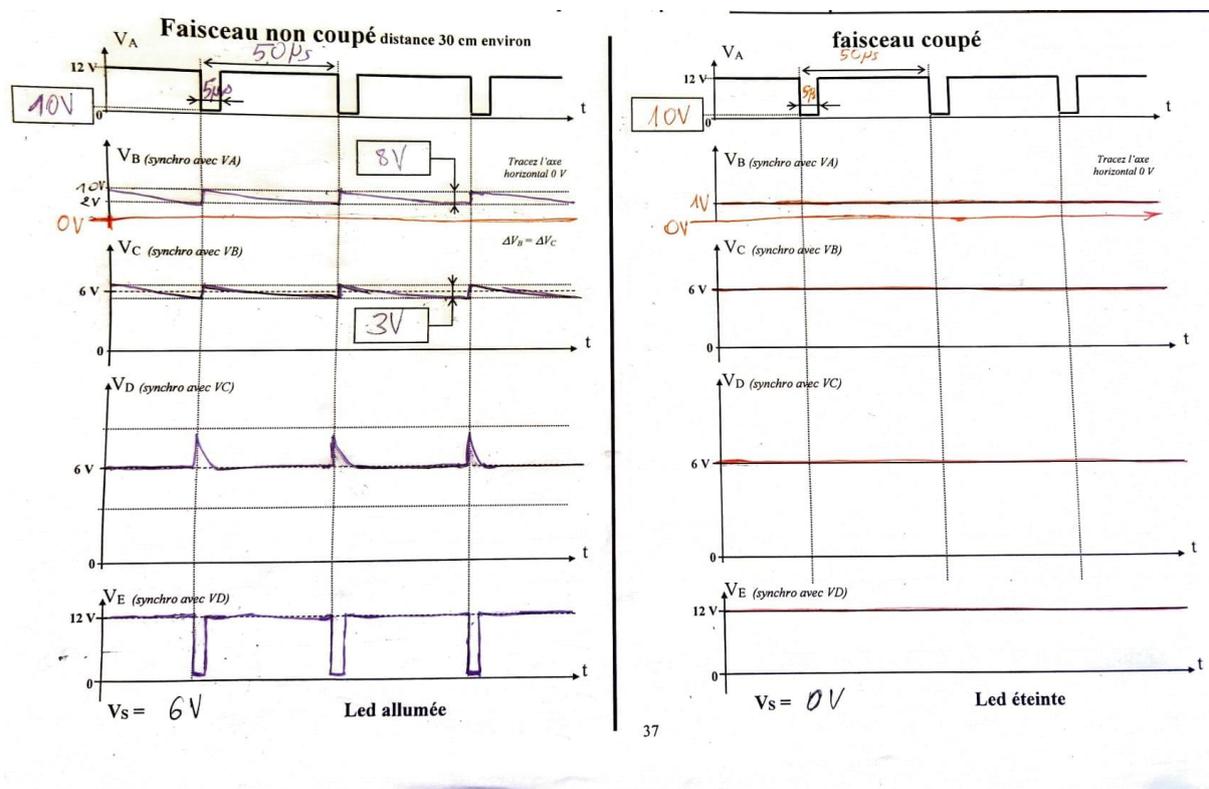


Figure 11 - Chronogrammes de fonctionnement de la barrière infra-rouge pour faisceau non coupé (en violet) et faisceau coupé (en rouge)

h. Diagrammes de Bode :

1. Mesures de la fonction de transferts V_C/V_B :

Afin d'évaluer expérimentalement la réponse fréquentielle du filtre passe-haut, nous avons mesuré les amplitudes crête-à-crête des signaux V_B et V_C à différentes fréquences comprises entre 100 Hz et 200 kHz. Le rapport $|V_C/V_B|$ a été calculé pour chaque fréquence, puis exprimé en décibels afin de tracer le diagramme de Bode du montage.

À partir de la courbe, la fréquence de coupure du filtre a été déterminée à 5 kHz, correspondant à une atténuation de -3 dB (point où $|V_B/V_C| = 0.786$). La pente de la courbe dans la zone avant la coupure atteint environ +25 dB/décade, ce qui confirme le comportement attendu d'un filtre passe-haut du premier ordre. Au-delà de cette fréquence, le gain sature et reste constant autour de 0 dB, illustrant une bande passante stable.

Tableau 5 - Tableau de mesure de la fonction de transfert $|V_C/V_B|$ et détermination de la fréquence de coupure à -3 dB

Fréq (kHz)	0.1	0.5	1.5	2.5	4	4.7 f ₀	5	6	8	9	10	50	100	200
V_B p-p (mV)	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700
V_C p-p (mV)	10	50	200	300	400	500	550	550	550	600	650	700	700	700
$ V_C/V_B $	0.014	0.071	0.286	0.429	0.571	0.714	0.786	0.786	0.786	0.857	0.929	1.0	1.0	1.0
$ V_C/V_B $ (en dB)	-37.1	-23.0	-10.9	-7.4	-4.9	-2.9	-2.1	-2.1	-2.1	-1.3	-0.6	0.0	0.0	0.0

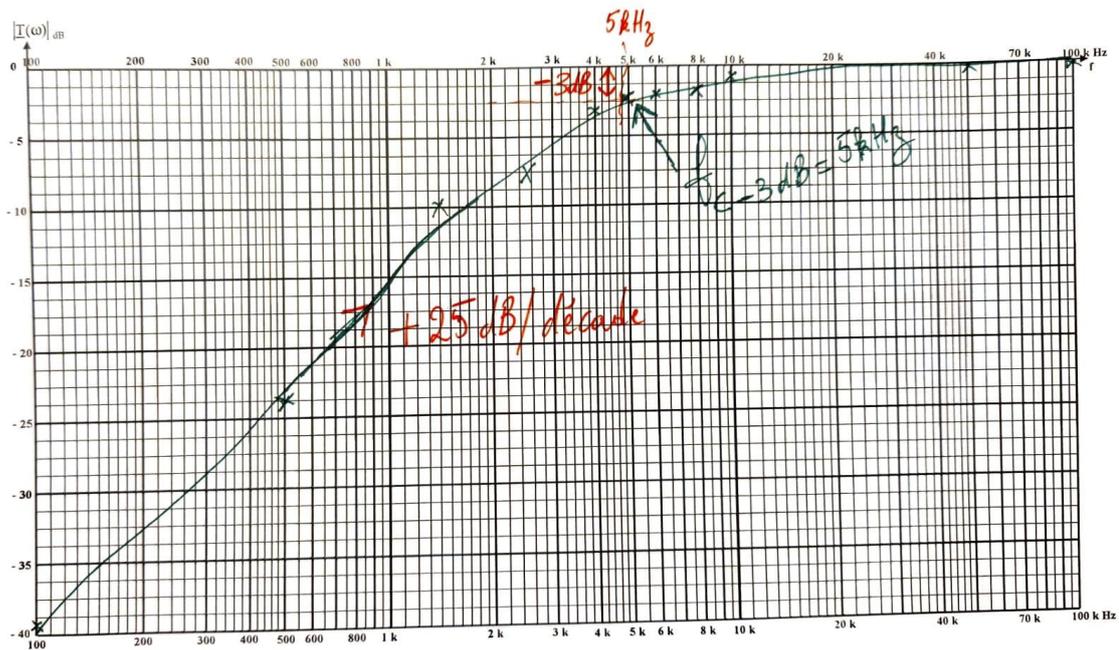


Figure 12 - Diagramme de Bode expérimental de la fonction de transfert $|T(\omega)| = |V_C/V_B|$

2. Mesures de la fonction de transferts V_D/V_B :

Le diagramme de Bode obtenu expérimentalement pour le module de transfert $|V_D/V_B|$ met en évidence le comportement typique d'un filtre passe-bande. En observant la pente de montée avant la fréquence de résonance, on constate une augmentation d'environ +15 dB par décade, ce qui traduit un filtrage progressif des basses fréquences. La fréquence de résonance est atteinte autour de 22,5 kHz, où le gain en dB atteint sa valeur maximale. Après cette fréquence, la pente devient négative et chute fortement avec une valeur de -55 dB par décade, ce qui traduit un rejet efficace des hautes fréquences.

Ce comportement asymétrique entre la montée et la descente est caractéristique d'un filtre passe-bande sélectif, et il confirme la sélectivité du montage réalisé autour de l'amplificateur TL082 et du circuit LC formé par la bobine (self) et le condensateur C2. Le point de résonance est conforme aux attentes théoriques et valide la conception du filtre dans ce projet.

Tableau 6 - Tableau de mesure de la fonction de transfert $|VD/VB|$ et mise en évidence de la fréquence de résonance

Fréquence (kHz)	1	5	10	15	19	22,5	27	30	40	50	100
$V_{B\ p-p}$ (mV)	10										
$V_{D\ p-p}$ (mV)	0,51	0,75	1,38	3,08	8	10	8	3,08	0,75	0,32	0,2
$ VD/VB $	0,051	0,075	0,138	0,308	0,8	1	0,8	0,308	0,075	0,032	0,02
$ VD/VB $ en dB	-25	-22,4	-17	-10	-3	0	-3	-10	-22	-30	-35

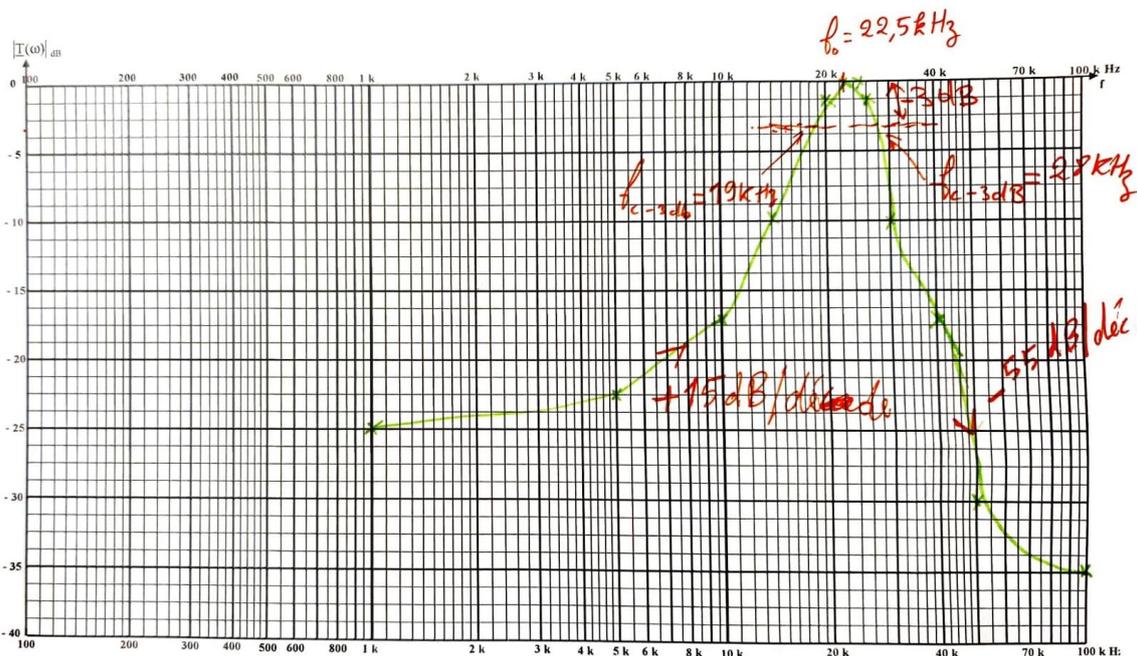


Figure 13 - Diagramme de Bode expérimental du module de la fonction de transfert $|V_D / V_B|$ pour le filtre passe-bande

VIII. Devis de fabrication de 500 cartes réceptrices :

Afin d'estimer le coût de production des 500 cartes réceptrices réalisées dans le cadre du projet ER3, un devis a été établi sur le site professionnel RS Components (Radiospares), reconnu pour la vente de composants électroniques de qualité. La sélection des composants s'est faite dans l'objectif de minimiser les coûts tout en respectant les contraintes techniques du projet, notamment en choisissant des composants traversants. Le panier contient l'ensemble des composants nécessaires : résistances, condensateurs, amplificateurs opérationnels, phototransistors, LED, circuits intégrés, supports et selfs. Chaque référence a

été choisie pour correspondre aux spécifications des cartes réalisées, avec une quantité adaptée pour la production de 500 exemplaires. Une capture d'écran du panier complet est jointe à ce rapport pour garantir la traçabilité et la transparence des prix estimés au moment de la consultation.

IX. Etude de comportement harmonique du montage avec Multisim simulateur :

- i. Simulation de $|V_C/V_B|$:
- j. Simulation de $|V_D/V_B|$:
- k. Etude de l'influence de la variation de r et détermination de la valeur réelle de r :
- l. Etude de l'influence de la variation de R_4 :