

séance de TP n° 1

Conception d'une carte électronique

Le circuit imprimé ou PCB (pour *Printed Circuit Board*) est un support, en général une plaque, permettant à la fois de maintenir et de relier électriquement des composants électroniques. Il s'agit donc de la réalisation physique à proprement parler d'un circuit électrique et cette dernière ne peut se faire qu'après une étude fonctionnelle munie de simulations pour vérifier le bon fonctionnement de chaque fonction (bas du cycle en V d'un projet), voir Figure 1.1.

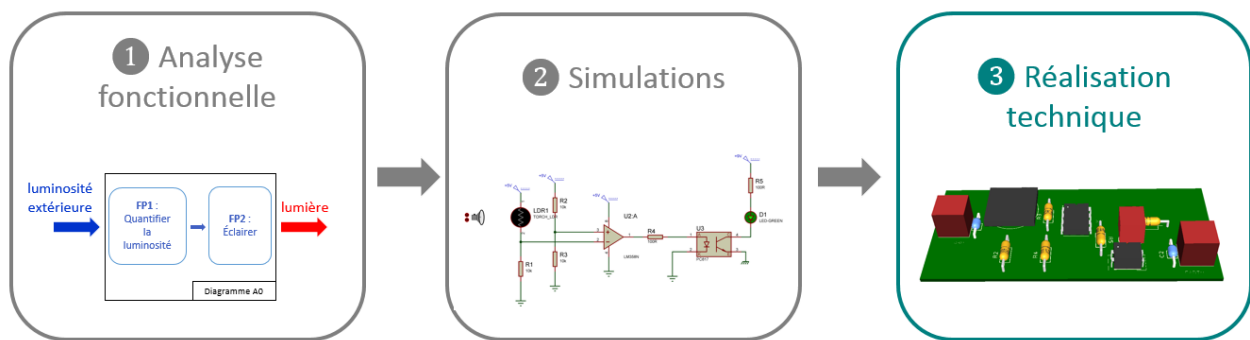


Figure 1.1: Trois étapes de conception et de la fabrication d'un système d'éclairage automatique.

Le PCB est constitué d'un assemblage d'une ou plusieurs fines couches de cuivre (jusqu'à une trentaine dans certaines applications industrielles) séparées par un matériau isolant (la plupart du temps une résine époxy, de couleur blanc-verdâtre translucide, qui a peu à peu remplacé le bakélite, de couleur marron, qui était cassant).

Afin de dessiner les pistes de cuivre sur les différentes couches, on part d'une plaque en cuivre que l'on vient **photo-lithographier** afin de retirer l'excès de cuivre et de ne garder que des pistes en endroits voulus. L'élaboration des **masques** de photo-lithographie se font à l'aide de logiciels de CAO (Conception assistée par Ordinateur) tels que DesignSpark PCB, Eagle, Kicad, etc. et il s'agit d'une part de générer une netlist (associer un potentiel ou nom de signal à chaque patte de chaque composant), d'associer les bonnes empreintes aux composants (largeurs et distances entre les trous corrects pour chaque composant) et de dessiner les pistes (bonne largeur et orientation pour notamment éviter des effets de diaphonie / bruitage entre les pistes).

Ce TP a pour objectifs la prise en main du logiciel de CAO DesignSpark PCB afin de savoir router une carte électronique simple et de mener une étude de tests unitaires sur une carte simple.

I. Partie théorique

(a) Étude d'un circuit permettant la détection de luminosité

Nous allons étudier le circuit présenté sur la Figure 1.2 et qui permet l'allumage automatique d'une diode (D1).

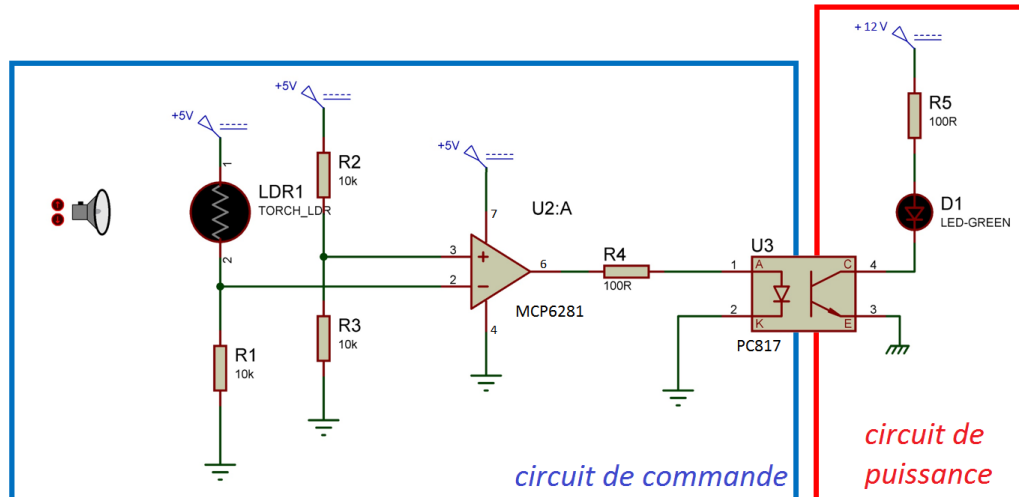


Figure 1.2: Système d'éclairage automatique

Q1. Quel montage à base d'AOP reconnaissez-vous ? Quel est le seuil de ce montage ? Quelles sont les tensions de sortie possibles en sortie de l'AOP ? Quelle est l'expression de la tension lue sur l'entrée inverseuse de l'AOP ?

Q2. Rappeler le circuit équivalent idéal de l'AOP et reproduire le schéma électrique de la Figure 1.2 en remplaçant l'AOP par son circuit équivalent et en négligeant le circuit de puissance.

Pour simplifier les calculs, on considèrera la source de tension en sortie de l'AOP comme étant une source indépendante délivrant un potentiel V_{AOP} .

Q3. Appliquer la loi des mailles dans la partie droite de votre circuit (comprenant uniquement le générateur de tension continue de potentiel V_{AOP} , la résistance R_4 et la diode de l'opto-coupleur) afin d'en déduire une expression du courant parcourant la diode (cette équation est affine et vous sera présentée en cours sous le nom de "droite de charge"). En utilisant un modèle de diode parfaite de tension de seuil 0,7 V, déterminer le point de fonctionnement de la diode de l'opto-coupleur.

Q4. Faire une recherche sur internet et expliquer de façon succincte et pertinente ce qu'est un opto-coupleur, comment cela fonctionne et à quoi cela peut servir.

(b) Modélisation de la résistance de la photorésistance

Des mesures de la résistance d'une photorésistance en fonction de la luminosité donnent les valeurs suivantes :

$\ell[Lumen]$	1	3	14	37	102	194	315	455	838	1140
$R[k\Omega]$	740	170	40	17	7,7	6,8	3,4	2,8	2,1	1,6

Q5. tracer le nuage de points en échelle logarithmique sur un tableur (Excel préfère travailler avec des colonnes que des lignes...) et proposer un modèle simple (loi de puissance par exemple) permettant de relier la résistance à la luminosité : $R = f(\ell)$. Discuter l'erreur induite par la modélisation. Comment peut-on obtenir un modèle plus fidèle ?

Q6. En considérant que la résistance R_1 est idéale, pour quelle valeur de luminosité la diode D1 s'allume-t-elle ?

II. Partie pratique

Cette partie dite "pratique" vous permettra de saisir le schéma électrique sur DesignSpark PCB puis de router votre propre circuit électronique.

A. Saisie du schéma

(a) Création d'un projet

Commencer par ouvrir DesignSpark puis créer un nouveau projet (File > New > Project > OK) puis lui donner un nom et un emplacement. Cela permet de créer un projet d'extension **.prj**.

Ajouter ensuite un circuit électrique à votre projet (File > New > Schematic Design). Cela créera automatiquement un schéma électrique d'extension **.sch**.

(b) Insertion des composants

Nous allons commencer par activer les bibliothèques par défaut. Pour cela, cliquer sur le gestionnaire de librairies (5ème symbole qui a la forme d'un livre dans la barre d'outils) et aller dans l'onglet "Folders" puis en sélectionnant "C:\Users\Public\Documents\DesignSpark PCB\Library" dans "Folders and Search Order". Cocher "Folder Enabled", cliquer sur "Appliquer" et fermer la fenêtre.

Afin d'afficher la barre d'outils "Schematic design", appuyer sur F9, ce qui laisse apparaître une fenêtre sur la droite de l'écran. Cliquer sur l'onglet "Add component" en bas à droite de la dite fenêtre et sélectionner la bibliothèque "Discrete". Avant de placer des composants, faisons le point sur les composants que nous souhaitons placer :

Nom	Composant	description
LDR1	photo-résistance	NSL-19M51
R1	résistance	10 k Ω
R2	résistance	10 k Ω
R3	résistance	10 k Ω
R4	résistance	100 Ω
R5	résistance	100 Ω
D1	Diode électro-luminescente (DEL)	verte
U1	AOP	LM358N
U2	Opto-coupleur	K1010

Dans la barre d'outils "Schematic design", faire défiler les composants de la bibliothèque "discrete" et sélectionner le composant "R" afin d'insérer 4 résistances sur la feuille de travail. Les composants peuvent pivoter (clic droit > Rotate > Angle 90) et leurs textes modifiés (double clic > Values > Value = 1k > Edit).

Afin de placer l'AOP LM358N, vous pouvez cliquer sur l'icône "Add component" (premier icône de la barre verticale) ou appuyer sur F3 puis cliquer sur "Find" afin de lancer une recherche dans les bibliothèques. Dans le champs "Name", sélectionner "contains" puis entrer "LM358N" et lancer la recherche. En double-cliquant sur le premier item proposé, vous pourrez alors le placer sur la feuille de travail.

Il se peut que certains composants ne fassent pas partie des bibliothèques de base, tel est le cas de l'opto-coupleur MOC3021. Une solution est d'ouvrir le logiciel "Library Loader" puis de cliquer sur "Search for Parts", ce qui a pour effet d'ouvrir une page web de [recherche de composants](#). Entrer ensuite le nom du composant cherché ("MOC3021") dans la barre de recherche, valider et cliquer sur "MOC3021". Une page s'ouvre. Cliquer alors sur le bouton "Download ECAD model" du premier lien RS. Le composant devrait apparaître sur la feuille de travail dans la fenêtre de DesignSpark PCB. Faire de même en entrant "NSL-19M51" afin d'insérer la photo-résistance sur la feuille de travail.

(c) Ajout d'un cadre autour du schéma

Afin d'ajouter un cadre autour du schéma, ouvrir la fenêtre d'ajout de composants (F9), aller dans la bibliothèque "schéma" et sélectionner "A4".

(d) Connexion des composants

La connexion des composants permet d'enregistrer en mémoire une **netlist** qui correspond à une matrice de connexité entre les composants. Afin de pouvoir tracer les premières connexion, aller dans "Design technology" (symbole en forme d'engrenages dans la barre d'outils) puis aller dans l'onglet "Net classes". Cliquer sur "Add" puis entrer "Signal", de type "Signal". Vous pouvez alors revenir sur la feuille de travail et tracer des fils en cliquant sur le crayon situé sur la barre verticale ("Add schematic connexion"). Les fils peuvent également être tirés en maintenant appuyé un clic en partant d'une patte de composant. Afin de passer à un autre composant, il est recommandé d'appuyer sur la touche "échap" du clavier.

(e) Ajout des alimentations et des masses

Nous allons à présent fournir des alimentations et des masses au circuit. Pour ce faire, on retourne dans la bibliothèque "schéma" (F9) puis l'on place des 0V pour la masse, des +5V, +15V et -15V. On associera une masse "EARTH" au circuit de l'ampoule afin d'assurer une **isolation galvanique** : non-bruitage du circuit de commande par le circuit de puissance.

(f) Ajout de références aux fils

Afin de ne pas surcharger le schéma, nous allons donner des noms à certains fils, notamment aux différentes pins des connecteurs. Pour se faire, on ajoute des références "TO" (bibliothèque "schéma") que l'on connecte aux différentes pins des connecteurs. On sélectionne la pin que l'on veut renommer et l'on appuie simultanément sur 'MAJ' et 'N' puis l'on entre le nom dans le champ "Net name".

On peut également donner des noms aux flèches "TO" en double-cliquant sur ces dernières et en cochant "Name" puis entrant un nom dans le champs associé. Le circuit devrait finalement ressembler à celui donné sur la Figure 1.3.

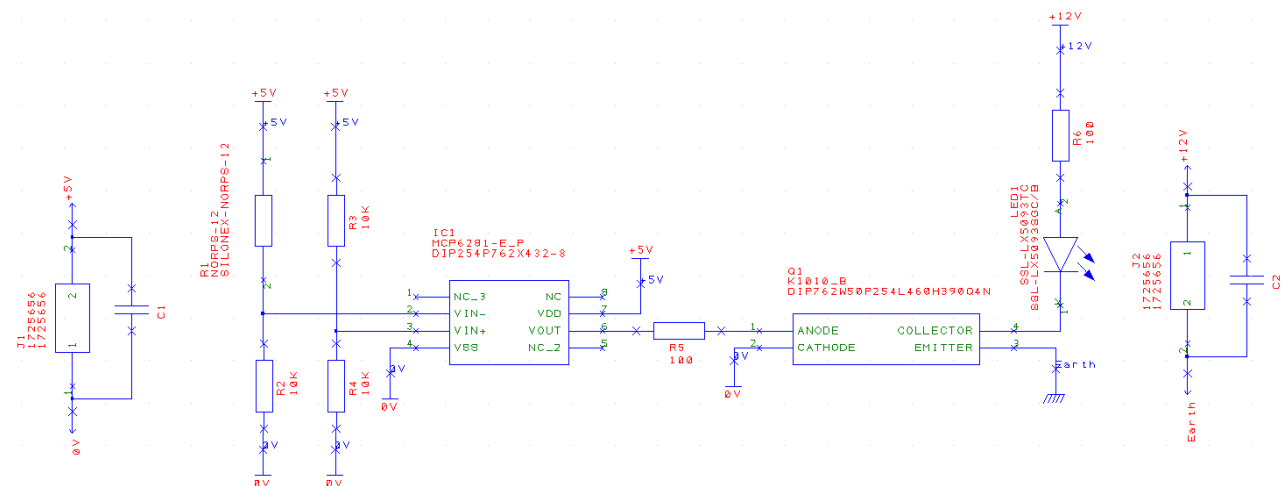


Figure 1.3: Circuit électrique permettant un allumage automatique d'une lampe dans la pénombre.

L'export au format **.pdf** se fait en appuyant simultanément sur 'CTRL' et 'P' (Nous ne nous préoccupons pas du fichier Gerber ici).

B. Routage de la carte

(a) Conversion du schéma en PCB

Une fois le schéma terminé, la première étape avant de débiter le routage du circuit imprimé consiste à convertir le schéma vers l'éditeur de PCB. Pour ce faire, on se rend dans le menu "Tools" et l'on sélectionne "Translate to PCB". La page "Technology" permet de définir un fichier Technology (dimensions et règles d'espacement) ainsi que l'unité de travail. Pour cet exemple, sélectionner le fichier "2sig2plane.ptf". Dans les unités, sélectionner "mm" et '3' afin de travailler en système métrique avec 3 chiffres après la virgule.

N'ayant pas un circuit compliqué avec beaucoup de composants, nous allons travailler sur une couche unique. Pour ce faire, sélectionner "Define layers" puis "Single sided-board". La page suivante permet de définir les dimensions de la carte, par exemple 70.000 mm de large par 40.000 mm de haut. On clique ensuite sur "Arrange inside the board" afin de placer les composants en vrac en dehors de la carte. Cela permet de devoir tous les placer un à un sans en oublier un. Après avoir donné un nom au PCB, on clique sur "Terminer".

Attention ! Si vous avez ce type de message d'erreur, il est inutile de commencer le routage. Cela signifie que les librairies ne sont pas correctement installées et que des composants manquent sur le PCB. Si tel est le cas, supprimez le PCB (.pcb) et vérifiez vos librairies.

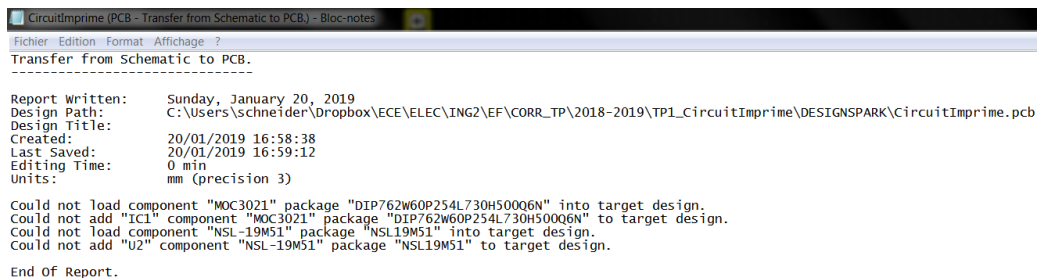


Figure 1.4: Rapport de transfert du circuit vers le PCB.

(b) Routage

Dans le cas présent, tous les composants du circuit électronique ont une empreinte (*footprint*) correctement définie dans la librairie. Dans certains cas, il se peut que ces dernières soient à dessiner en accords avec les dimensions données dans les documentations constructeur... Il est temps de vérifier que les liens entre les composants à router (lignes jaunes) sont cohérents sinon, supprimer le PCB et vérifier les connexions entre les composants.

Maintenant, le routage peut donc commencer. Il convient de placer d'abord les deux borniers de 4 pins de part et d'autre de la carte afin de séparer les signaux de commande des signaux de puissance. S'en suit le placement des composants principaux : l'AOP et l'opto-coupleur. Les résistances doivent être placées de façon analogue au schéma électrique afin que le routage soit lisible.

Voici quelques règles à respecter :

- jamais d'angle droit : préférer des angles à 45 degrés pour ne pas avoir de fuites en hautes fréquences ;
- pas de croisement de pistes ! Vérifiez constamment que le routage que vous proposez reste lisible, ajuster l'**orientation**, le **positionnement** et l'**organisation** des composants ;
- les lignes de haute tension doivent être plus larges (sélection d'une piste > clic droit > "Properties" > Width) ;
- toutes les connexions doivent être assurées par des pistes.

(c) Ajout de texte

Toutes les cartes ne fonctionnent pas du premier coup... Afin de faciliter le débogage, il est d'usage de nommer les principaux pins du circuit. Pour ce faire, on ouvre l'outil d'écriture (grand 'A' majuscule sur la gauche de l'écran) et l'on nomme les différents signaux. Cela est également l'occasion d'ajouter un nom à la carte, une version et une date. Après toutes ces étapes, un routage possible est le suivant :

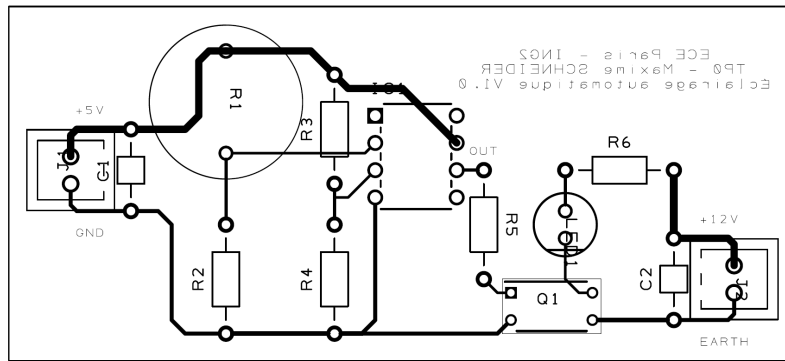


Figure 1.5: PCB du circuit, sans plan de masse.

(d) Ajout du plan de masse

Par souci d'isolation galvanique, les masses des deux circuits sont séparées. Nous allons ajouter un **plan de masse** au circuit de commande. Cela permet de :

- d'atténuer le bruit pour les différents signaux ;
- une meilleure diffusion de la chaleur ;
- avoir de petites capacités permettant d'endiguer les micro-fluctuations de courant.

Le plan de masse s'ajoute en sélectionnant l'outil de remplissage de cuivre ("Copper pour") disponible dans Add > Copper Pour Area > Rectangle. Une fois le contour du plan de masse défini, appuyer sur la touche "échap" puis sélectionner un côté du contour puis cliquer droit. Dans le menu proposé, cliquer sur "Pour Copper" puis sélectionner le potentiel du plan, par exemple ici '0V'.

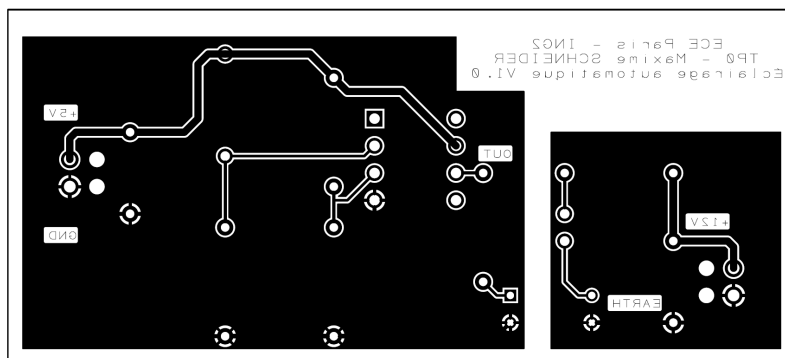


Figure 1.6: PCB du circuit avec plan de masse.

Le **typon** s'exporte en appuyant simultanément sur 'CTRL' et 'P' puis en décochant "Top silkscreen" et "Documentation".

(e) Vérification des règles de conception

Bien que les erreurs lors de la connexion des composants ne peuvent pas être détectées, DesignSpark dispose de différents outils de contrôle d'intégrité, disponibles dans le menu "Tools". Commencer par aller dans "Schematic / PCB check". Cela permet de vérifier que des connexions n'ont pas été ajoutées ou oubliées lors du routage. Si le routage est conforme au circuit électrique, une fenêtre affichant "Design are the same." apparaît. Sinon, une liste d'erreur au format **.txt** est générée.

La **vérification des règles de conception** permet de détecter une éventuelle erreur de conception (espacement entre les pistes notamment). Cette vérification s'effectue en cliquant sur l'avant dernier icône de la barre d'outil verticale ("Design Rule Check"). Un bloc-note s'ouvre et affiche "No errors found" en cas de règles respectées.

(f) Génération de la vue 3D

Le menu "3D" puis "3D view" permet d'obtenir un aperçu de la carte une fois soudée. La Figure 1.7 présente l'aperçu 3D de notre carte.

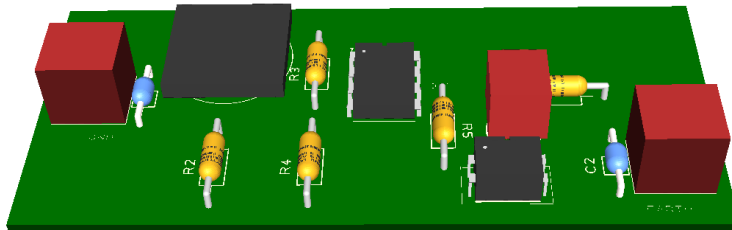


Figure 1.7: Visualisation 3D de la carte

C. Comparaison numérique

On souhaite à présent remplacer l'AOP monté en comparateur (qui réalise une comparaison analogique) par un microcontrôleur ATMEGA328P dans lequel la comparaison se fera à l'aide d'une simple ligne de code.

(a) Simulation

Q7. Proposer un nouveau schéma et le simuler sur Proteus. Les résultats de simulation ainsi que le code (en C) seront commentés. Vous expliquerez comment vous avez pensé votre code et comment vous simulez le circuit sur Proteus. Vous garderez l'opto-coupleur et la tension d'entrée analogique lue par le microcontrôleur sera la tension en sortie du pont diviseur de tension LDR // R1 (plus besoin de la référence analogique R2 // R3).

(b) Routage

Q8. Reproduire la schématique de votre circuit simulé sur Proteus sur DesignSpark PCB. Vous importerez l'opto-coupleur K1010 à l'aide de Library Loader.

Q9. Proposer un routage avec deux plans de masse séparés (un pour l'étage de contrôle et un pour l'étage de puissance) et votre nom sur la carte à l'aide de DesignSpark PCB. Le fichier Gerber n'est pas demandé, une simple capture d'écran du routage est suffisante. Cependant, la qualité du routage sera évaluée.

Q10. Générer une vue 3D de votre carte. Moins il y aura de composants non représentés (ex: pavés de la Figure 1.7), plus vous serez susceptibles de gagner des points bonus.

D. Prototypage et test d'une carte électronique

Au cours de cette quatrième et dernière partie, nous allons nous intéresser à nouveau au circuit de la partie théorique (Figure 1.2) où la comparaison se fait analogiquement à l'aide d'un AOP monté en comparateur simple.

(a) Prototypage sur platine d'essai

Q11. Assmbler les composants sur une platine d'essai. Prendre une photo du montage.

(b) Tests unitaires

Q12. Alimenter le circuit à l'aide de tensions continues et vérifier le bon fonctionnement de la carte. Expliquer comment modifier le seuil de déclenchement et la tension de sortie. Confirmer cela à l'aide de mesures commentées.

Q13. À l'aide d'un oscilloscope, mesurer le temps de réponse du circuit (ce temps de propagation correspond à la latence entre le moment où le la commande bascule et le moment où le circuit de puissance réagit). L'estimer dans le cas du microcontrôleur et faire une comparaison.