

INTRODUCTION

Dans la vie quotidienne, la lumière est indispensable à l'humanité. Bien sûr le soleil nous présente un éclairage impeccable pendant le jour, cependant à sa disparition, au crépuscule, la lumière fait place à l'obscurité. Or certains hommes toujours continuent le travail à la tombée de la nuit. Pour cela, on utilise le réseau électrique qui leur fournit la puissance nécessaire pour allumer les lampes. Ces lampes en général avec des interrupteurs classiques qu'il faut actionner manuellement pour interrompre la connexion à l'alimentation. Pour l'éviter c'est un travail répétitif, le thème concerne une automatisation de l'allumage. J'ai choisi comme sujet conception d'un interrupteur automatique.

Nous allons donc étudier tout d'abord la notion fondamentale de l'ensoleillement ; ensuite nous étudions les capteurs optiques ; après nous entamerons la conception du système ; en outre nous faisons des réalisations et essai ; et en fin nous terminerons par l'implication pédagogique.



SCHEMA BLOC

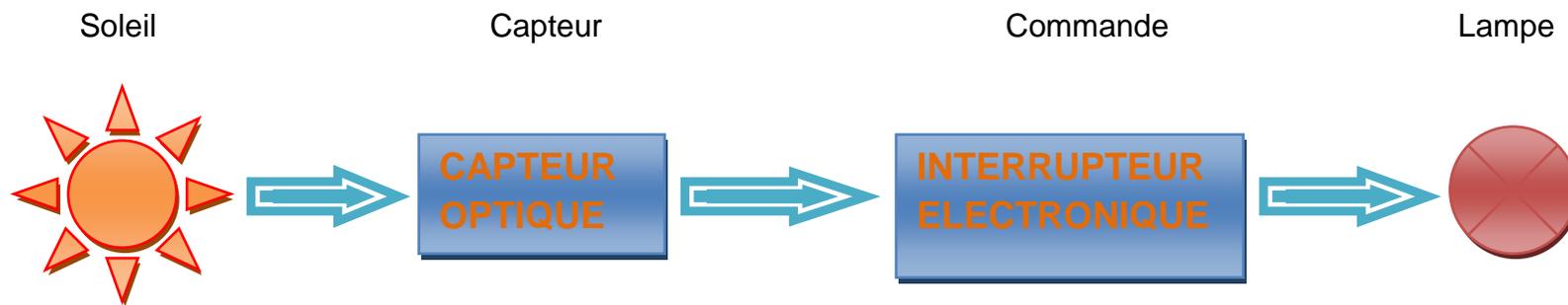


Figure 1 : Schéma bloc d'interrupteur automatique à allumage et extinction progressifs

I : NOTION FONDAMENTALE DE L'ENSOLEILLEMENT

1-1 Généralité :

Le rayonnement émis par le soleil comporte des ondes électromagnétiques dont une partie, appelée le rayonnement solaire, ne cesse de parvenir à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la valeur prise par la température superficielle du soleil environ 5780K, l'énergie de rayonnement électromagnétique transmise à la terre provient essentiellement de l'émission d'ondes lumineuses qui se situent dans le visible (entre 0,4 et 0,8 μm de longueur d'onde environ) et le proche infrarouge (inférieur 0,4 μm) ; cette énergie, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairement de quelque 340 W.m^{-2} . Mais sur cette quantité d'éclairement qu'apporte le soleil au système terre-atmosphère, environ 100 W.m^{-2} sont réfléchis vers l'espace : le reste est absorbé, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface terrestre.

1-2 Etude théorique de l'ensoleillement :

1-2-1 Définition d'ensoleillement :

On appelle ensoleillement l'éclairement lumineux solaire. C'est le flux de photon par unité de surface, de plus précisément la quantité de photon transmise à travers une unité de surface par unité de temps. L'héliographe (instrument permettant d'enregistrer le temps ;(durée) d'ensoleillement), ne détecte qu'un rayonnement solaire direct supérieur à cette valeur du seuil fixé à 120W/m^2 .

1-2-2 Description du soleil :

Le soleil est une énorme sphère incandescente de plasma formé par deux éléments principaux (hydrogène et l'hélium) à la température voisine de 5780K . Il est situé à une distance voisine de 150 de millions kilomètre de la terre.

1-3 Les paramètres du rayonnement solaire :

1-3-1 Rayonnement solaire :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autre. Il a un diamètre de 1390000 km ; soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composée à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium, et 1% d'un mélange de 100 éléments; soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant par la relation de la relativité d'Einstein ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, elle est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d' hélium ; la réaction faisant dans son noyau à la température d'environ 25millions de degrés Celsius. Ainsi ; à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.

Sa lumière ; à une vitesse de 300000 km /s , met environ 8 minutes pour parvenir à la terre sa distribution spectrale de l'atmosphère est représentée par un maximum pour une longueur d'onde $0.5\ \mu\text{m}$, la température de corps noir à la surface du soleil est environ 5780k :

- Diamètre du soleil $D_s = 1,39.10^9\text{ m}$
- Diamètre de la terre $D_t = 1,27.10^7\text{ m}$
- Distance moyenne soleil_terre $L_{ts} = 1,5.10^{11}\text{ m}$

1-3-2 L'énergie solaire reçue sur terre :

La Terre est située à 150 millions de km du Soleil, à la température voisine 5780K. Celui-ci émet en permanence 1026 Watt sous forme de rayonnement et la Terre reçoit 178 millions de milliard de Watt sur sa face éclairée soit 350 Watt par m² à l'équateur.

Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique composé essentiellement :

- de **lumière visible** de longueur d'onde comprise entre 400nm et 800 nm ;
- de **rayonnement infra rouge (IR)** de longueur d'onde supérieure à 400 nm ;
- de **rayonnement ultra violet (UV)** de longueur d'onde inférieure à 800nm.

Au niveau du sol, l'ensoleillement global reçu par une surface plane d'inclination quelconque est constitué de trois composantes principales.

1-3-2-1 Le rayonnement direct R_{dir} :

C'est le rayonnement reçu directement du soleil, sans diffusion dans l'atmosphère, il porte beaucoup d'énergie, comme le mouvement annuel et quotidien du soleil est parfaitement prévisible. Pour éliminer le rayonnement diffus, on prend un détecteur placé au fond d'un tube de contrôle muni de diaphragmes. Cet appareil est appelé pyréliomètre.

1-3-2-2- Rayonnement diffus R_{dif} :

C'est le rayonnement réfléchi par l'atmosphère, sa contribution est alors non uniforme par voute céleste. Elle est plus concentrée aux alentours du soleil et à proximité de l'horizon.

1-3-2-3- L'albédo :

C'est la fraction de rayonnement non adsorbée par le sol. Il varie en fonction du type du sol de son état de surface.

La somme de ces trois rayonnements est appelé l'insolation ou rayonnement solaire totale. L'instrument de mesure employé comprend deux pyranomètres identiques montés sur le même socle. L'un orienté vers la voute céleste mesure le rayonnement globale, l'autre ne voit que la partie provenant du sol.

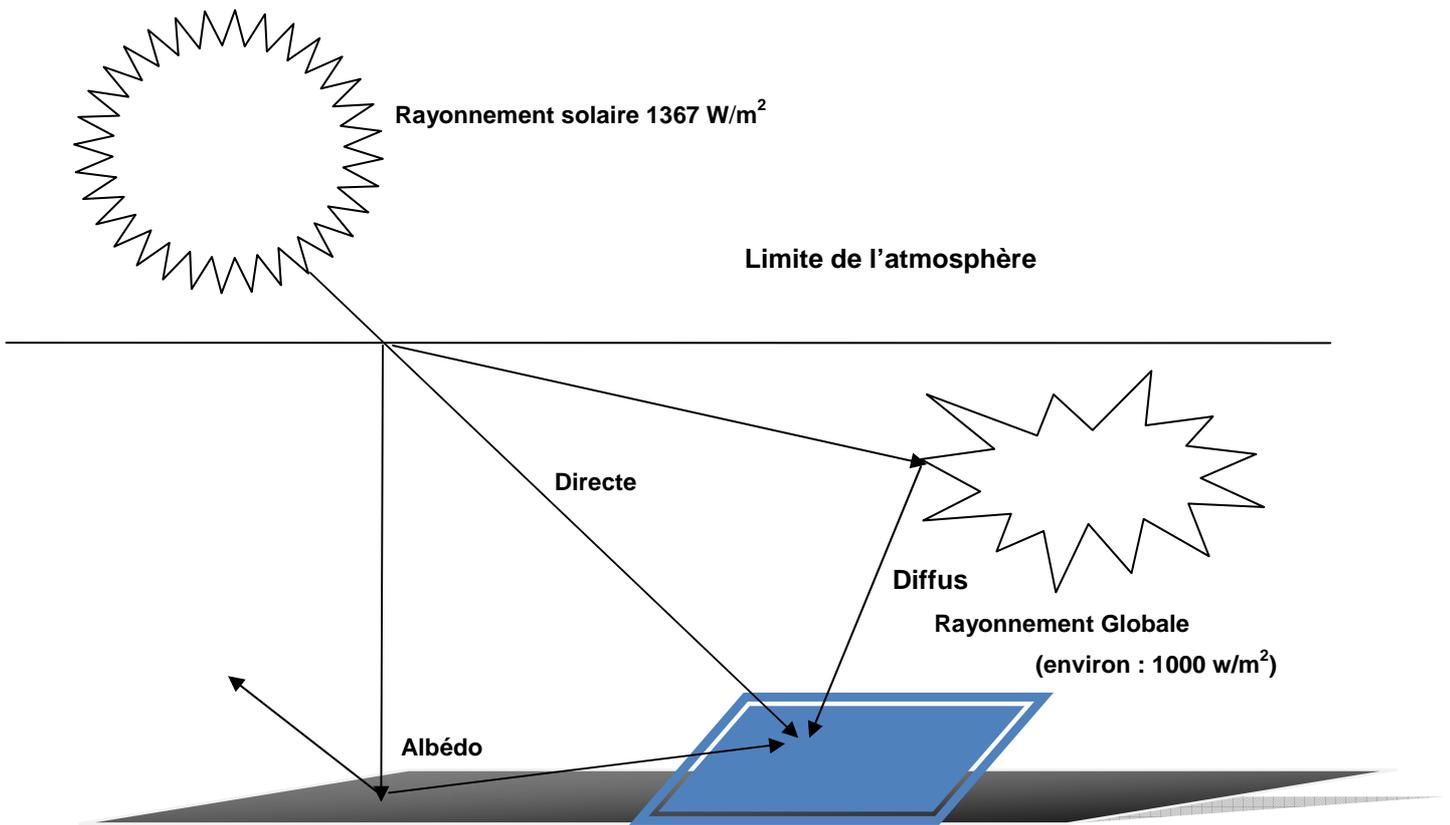


Figure 2 : Les paramètres du rayonnement solaire

II : LES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES

2-1 Généralité :

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir de quartz (dioxyde de silicium). Celui-ci est chauffé dans un four électrique à une température de 1700°C. Divers traitements du sable permettent de purifier le silicium. Le produit obtenu est un silicium de métallurgie, pur à 98% seulement. Le silicium est ensuite purifié chimiquement et aboutit au silicium de qualité électronique qui se présente sous forme de liquide, puis coulé sous forme de lingot suivant le processus pour la cristallisation du silicium, et découpé sous forme de fines plaquettes (wafers). Par la suite, ce silicium pur va être enrichi en élément dopants (P, As, Sb, B) lors de l'étape de dopage, afin de pouvoir le transformer en semi-conducteur de type P ou N. La diffusion d'élément dopants (bores, phosphore) modifie l'équilibre électronique de ces plaquettes (wafers), ce qui les transforme en cellule sensible à la lumière. La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque soit fonctionnée pendant plus de deux ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication.

2-2- Système photovoltaïque

2-2-1- L'effet photovoltaïque :

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont bombardés par les photons constituant la lumière. Sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons couches de valence) ont tendance à être « arrachés ou décrochés ». Si l'électron revient à l'état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement de matériau.

L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons « décrochés » créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

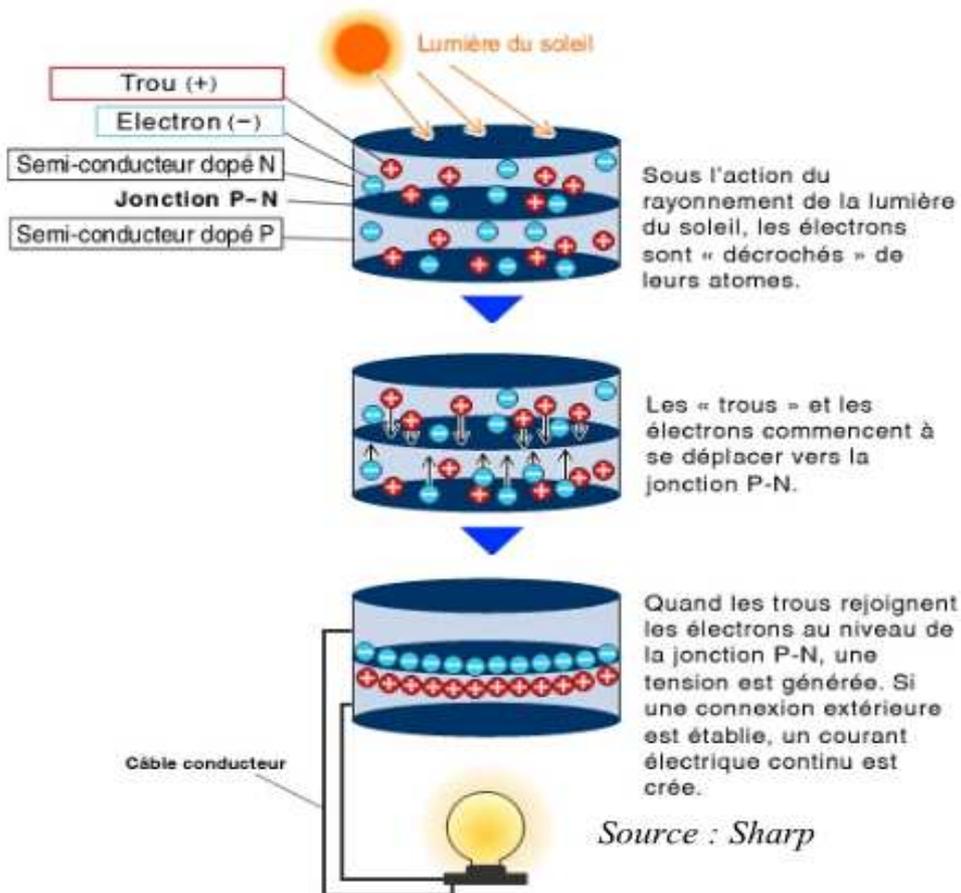


Figure 3 : L'effet photovoltaïque

2-2-2- Cellules photovoltaïques

2-2-2-1- Bande de valence :

Les semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Le silicium est un semi-conducteur.

Conduction intrinsèque : Lorsque la température s'élève, sous l'effet de l'agitation thermique, des électrons réussissent à s'échapper et participent à la conduction. Ce sont les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau qui s'impliquent dans les liaisons covalentes. Dans le cristal, ces électrons se situent sur des niveaux d'énergie appelée bande de valence. Les électrons qui peuvent participer à la conduction possèdent des niveaux d'énergie appartenant à la bande de conduction. Entre la bande de valence et la bande de conduction peut se situer une bande interdite. Pour franchir cette bande interdite l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon...). Pour les isolants la bande interdite est quasi infranchissable, pour les conducteurs elle est inexistante. Les semi-conducteurs ont une bande interdite assez étroite.

L'atome qui a perdu un électron devient un ion positif et le trou ainsi formé peut participer à la formation d'un courant électrique en se déplaçant. Si l'électron libre est capté par un atome, il y a recombinaison. Pour une température donnée, ionisation et recombinaison s'équilibrent ; la résistivité diminue quand la température augmente. Un semi-conducteur dont la conductivité ne doit rien à des impuretés est dit intrinsèque. En revanche, le fait de rajouter des impuretés (dopage), la conductivité du semi-conducteur est extrinsèque.

2-2-2-2 Principe photovoltaïque

a-Jonction N-P :

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dope N (donneurs d'électron) et d'un semi-conducteur dopé P (composé de trous). L'interface entre ces deux régions s'appelle une jonction.

Pour réaliser des cellules photovoltaïques, il existe trois configurations de jonctions :

- Une jonction PN (homo-jonction, c'est-à-dire: les deux régions sont constituées d'un même matériau semi-conducteur, du silicium dans la majorité des cas)
- Une hétérojonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents)
- Une jonction métal-semi-conducteur.

Dans ces trois configurations, les phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires.

Les électrons de la jonction se déplacent vers la région P et les trous vers la région N. Il ne reste que des atomes ionisés fixes. Cette zone (dite de déplétion) de porteurs libres est appelée « zone de charge d'espace » créant un champ électrique. En dehors, le champ électrique est nul.

Dans une homo-jonction à l'équilibre thermodynamique, à la frontière des deux régions, il s'est formé pendant le processus de déplétion, une barrière de potentiel (V_D) (tension de diffusion).

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) \quad (2-1)$$

V_D [V]	Tension de diffusion sur une jonction,
$k=1,380662 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$	Constante de Boltzmann,
T [°K]	Température absolue du cristal,
$q = 1,602 \cdot 10^{-19} C$	Charge élémentaire,
$N_D [cm^{-3}]$	Concentration des donneurs,
$N_A [cm^{-3}]$	Concentration des trous,
$n_i [cm^{-3}]$	Concentration intrinsèque,

avec $V_T = kT/q = 26 \text{ mV}$ (2-2)

à la température ambiante.

Les cellules solaires photovoltaïques sont souvent des jonctions dissymétriques, c'est-à-dire qu'un dopage est plus fort que l'autre. Dans ce cas, la zone de charge d'espace se trouve pratiquement dans la région la plus faiblement dopée.

b-Production d'électricité :

La cellule solaire est le lieu où la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique se produit. La puissance électrique résultant de cette conversion dépend du flux et de la répartition spectrale de l'énergie spectrale.

Dans une cellule photovoltaïque basée sur une jonction PN une excitation lumineuse crée, aux alentours de la jonction, des paires électron-trou qui se déplacent sous l'influence du champ électrique de la jonction.

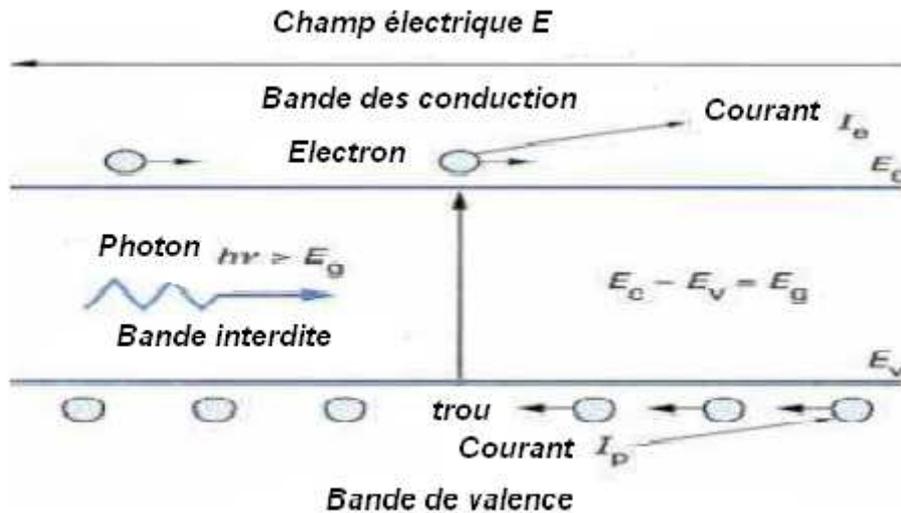


Figure 4: Principe de la conversion photon-électron dans un système à deux niveaux d'énergie

C- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Lorsque la cellule est éclairée, elle présente une différence de potentiel entre ses bornes. Si ces dernières sont réunies à un circuit, la cellule débute un courant. Dans ce cas, elle constitue un véritable générateur, qui transforme de l'énergie lumineuse en énergie électrique. C'est l'effet photovoltaïque: il est dû à la libération de porteur (électrons trous) par les photons du rayonnement. En effet, une jonction PN s'est formée. Les porteurs minoritaires sont engendrés dans leur voisinage et qui peuvent atteindre.

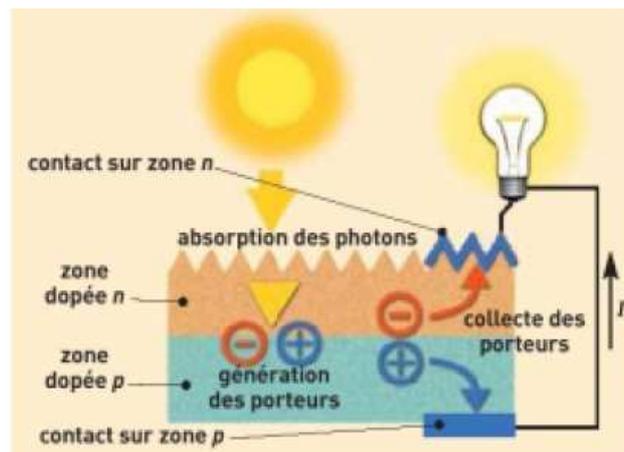


Figure 5 : Principe de fonctionnement d'une cellule du photovoltaïque

Une cellule assimilable à une diode photo- sensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi- conducteurs à base de silicium (Si), de sulfate de cadmium (CdS) ou de tellure de cadmium. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque.

En effet, une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi – conducteur. Ces deux couches sont dopées différemment :

- Pour la couche N, apport d'électrons périphériques.
- Pour la couche P, déficit d'électrons.

Ces deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur (figure 5). L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux.

Une couche anti reflat est en suit déposée sur cette électrode a fin d'accroître la quantité de lumière absorbée.

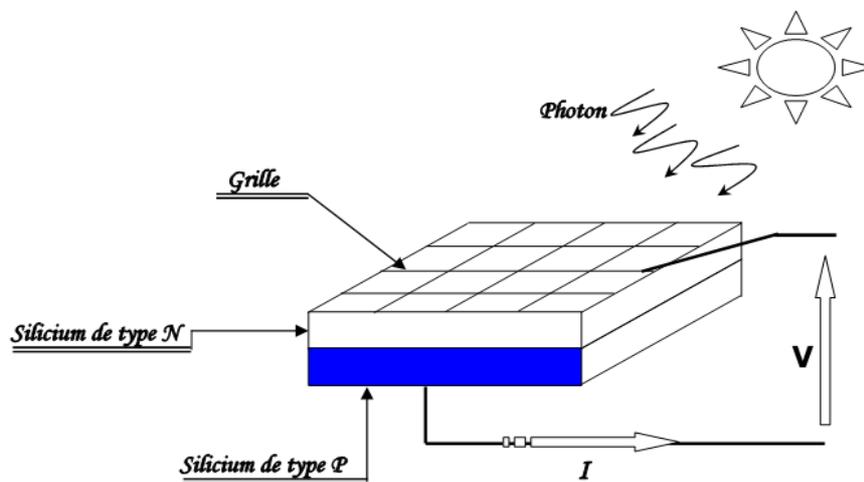


Figure 6 : Schéma d'une cellule élémentaire

2-2-2-3 Les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par :

- Une générateur de courant qui crée un photo courant I_{ph} dû au rayonnement solaire,
- Une diode parallèle au générateur et polarisée en direct,
- Une résistance shunt et une résistance série dues à la technologie de fabrication

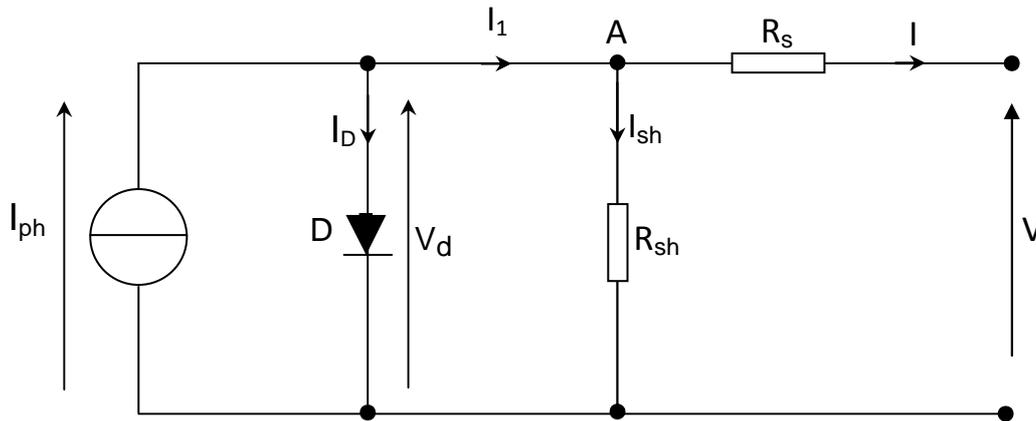


Figure 7 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction. La résistance série dépend principalement de la résistivité de ses grilles.

2-2-2-4 Module solaire photovoltaïque :

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopile assemblé pour générer une puissance électrique exploitation lors de son exposition à la lumière. En effet, une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension : 0.5 et 1.5V selon les technologies. Il faut donc toujours plusieurs photopiles en série pour générer une tension utilisable.

Un module photovoltaïque ne génère aucun déchet en fonctionnement, son coût de démantèlement est très faible et ses coûts d'exploitation sont quasi nuls. La durée de vie d'un tel module est supérieure à 20ans.

Les modules se distinguent en fonction des technologies de silicium qu'ils utilisent :

- **Silicium monocristallin** : les capteurs photovoltaïques sont à base de cristaux de silicium.
- **Silicium polycristallin** : les capteurs photovoltaïques sont à base de poly cristaux de silicium, notablement moins coûteux à fabriquer que le silicium monocristallin, mais qui ont aussi un rendement un peu plus faible. Ces poly

cristaux sont obtenus par fusion des rebuts du silicium de qualité électronique.

- **Silicium amorphe** : les panneaux « étalés » sont réalisés avec du silicium amorphe au fort pouvoir énergisant et présentés en bandes souples permettant une parfaite intégration architecture.

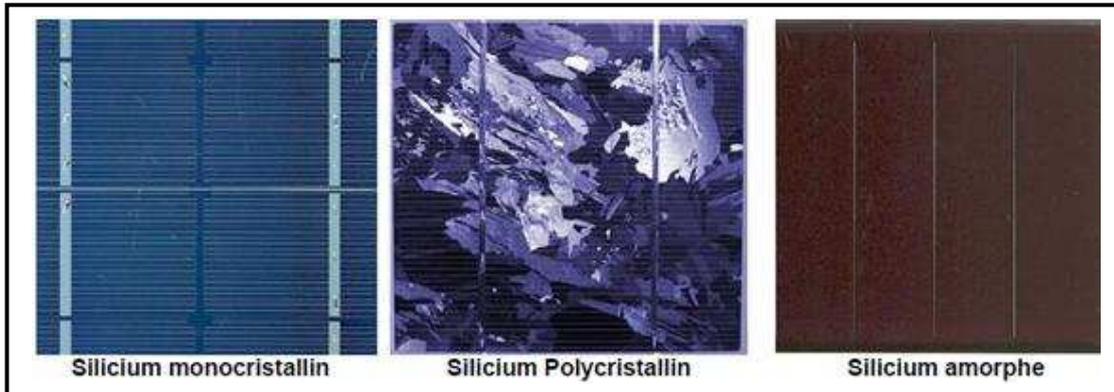


Figure 8 : Différente type module photovoltaïque.

Le tableau suivant présente les rendements typiques et théoriques que l'on peut obtenir avec ces différentes technologies.

Technologie	Rendement typique (%)	Rendement théorique (%)
Monocrystallin	14-16	27
Poly Cristallin	12-16	27
Amorphe	5-10	25

Tableau 1 : Rendements des différentes technologies.

2-2-2-6 Courant – tension :

La première loi de Kirchhoff appliquée au point A nous donne :

$$I = I_1 - I_{sh} \tag{2-3}$$

$$I_1 = I_{ph} - I_D \tag{2-4}$$

$$I_{sh} = \frac{V_D}{R_{sh}} \tag{2-5}$$

En portant les expressions de I_1 et de I_{sh} dans (1), on à donc :

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{V_D}{R_{sh}} \quad (2-6)$$

$$\text{Avec } V_D = V + R_S \cdot I \quad (2-7)$$

$$I_D = I_{sh} \left[\frac{q V_D}{e^{nKT} - 1} \right] \quad (2-8)$$

I : Courant disponible (A)

I_{ph} : Photo courant, ou courant généré par l'éclairement (30 à 35 mA/cm²)

I_D : Courant de saturation de la diode (A)

R_S : Résistance série (Ω)

q : Charge d'électron ($q=1,602 \cdot 10^{-19}C$)

T : Température de la cellule (300K)

K : Constante de Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$)

Ou $n = 1.5$

$$\text{Soit } I = I_{ph} - I_{sh} \left[\frac{q V_D}{e^{nKT} - 1} \right] - \frac{V_D}{R_{sh}} \quad (2-9)$$

2-2-3 Le rendement d'une cellule photovoltaïque η [%] :

Le rendement énergétique est le rapport entre cette l'énergie disponible aux bornes de la cellule photovoltaïque et L'énergie incidente (flux lumineux), dans les conditions STC (Standard Test Conditions), c'est-à-dire sous une température de 25°C et un éclairement de 1000W/m².

$$\eta = \frac{E_{\text{électrique}}}{E_{\text{Lumineux}}} \quad (2-10)$$

$E_{\text{électrique}}$ = L'énergie disponible aux bornes de la cellule photovoltaïque.

E_{Lumineux} = L'énergie incidente (flux lumineux).

2-2-4 Les facteurs de forme f [%] :

On appelle le facteur de forme f le rapport entre puissance max fourni par le cellule P_{max} dans la condition ambiante et produit du courant court-circuit I_{cc} par la tension circuit ouvert V_{co} .

$$f = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (2-11)$$

2-2-5 L'influence de l'éclairement solaire le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

L'énergie électrique produit par une cellule photovoltaïque dépend l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure suivante représente la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constant. On remarque également que le courant est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairement. Au courant I_{max} qui augmente fortement avec l'éclairement, et la tension n'est pas dégradée lorsque la lumière baisse.

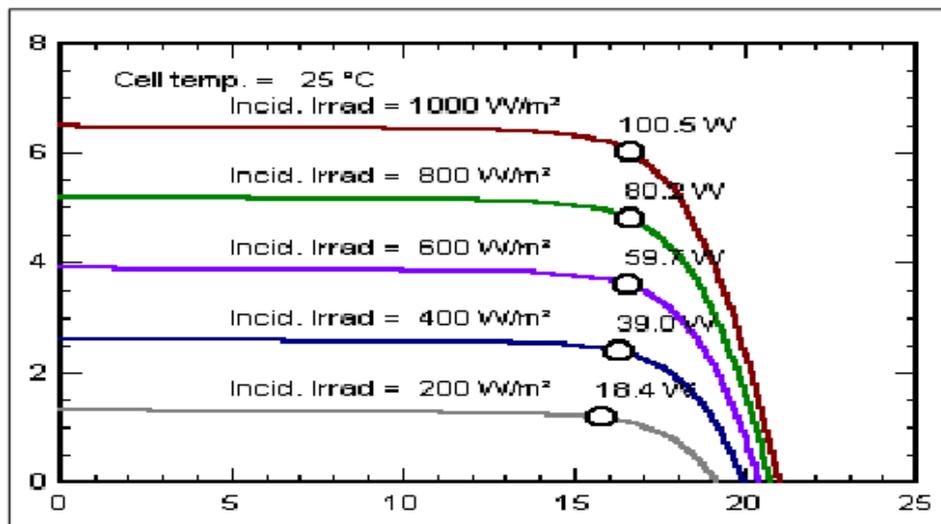


Figure 9 : Caractéristiques électriques courant -tension à température constante en fonction de l'éclairement

2-2-6 Puissance :

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixe (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant), la puissance électrique $P(W)$ disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque est égale au produit du courant continu fourni I par une tension continue donnée V .

$$P = U \cdot I \quad (2-12)$$

$U[V]$: Tension mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque.

$I[A]$: Intensité mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque.

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale $P_{\text{max idéale}}$ correspond donc à la tension de circuit ouvert V_{CO} multipliée par le courant de court-circuit I_{CC} (c'est-à-dire à la surface du rectangle) :

$$P_{\text{max idéale}} = V_{CO} \cdot I_{CC} \quad (2-13)$$

$P_{\text{max idéale}}[W]$: Puissance mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque.

$V_{CO}[V]$: Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque.

$I_{CC}[A]$: Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque.

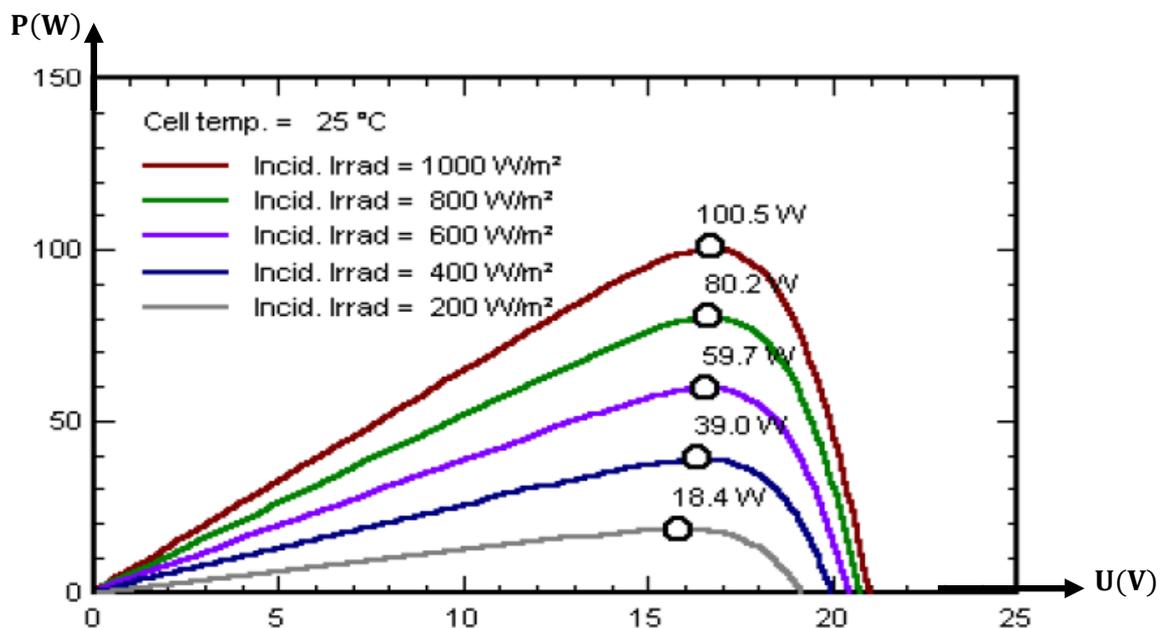


Figure 10 : Caractéristique de la puissance d'une cellule photovoltaïque.

III : LES PHOTORESISTANCES

3-1 Définition :

Une photorésistance est un composant électronique dont la résistivité varie en fonction de la quantité de lumière incidente qu'elle reçoit. On peut également la nommer résistance photo-dépendante (light-dependant resistor (LDR)) ou cellule photoconductrice.

3-2 Principe :

Une photorésistance est composée d'un semi-conducteur à haute résistivité. Si la lumière incidente est de fréquence suffisamment élevée c'est-à-dire d'une longueur d'onde inférieure à la longueur d'onde seuil, elle transporte une énergie importante. Au-delà d'un certain niveau propre au matériau, les photons absorbés par le semi-conducteur donneront aux électrons liés assez d'énergie pour passer de la bande de valence à la bande de conduction. Les électrons libres et les trous d'électron ainsi produits abaissent la résistance du matériau.

Lorsque le photon incident est suffisamment énergétique, la production des paires électron-trou est d'autant plus importante que le flux lumineux est intense. La résistance évolue donc comme l'inverse de l'éclairement et cette relation peut être considérée comme linéaire sur une plage d'utilisation limitée.

Les matériaux utilisés dans les photorésistances sont le plus souvent des composés des colonnes II-VI de la classification périodique des éléments. Pour une utilisation dans le domaine visible et à faible coût, on utilise le plus souvent la sulfure de cadmium (CdS) ou la séléniure de cadmium (CdSe). Pour des utilisations dans l'infrarouge on utilise la sulfure de plomb (PbS).

3-3 Géométrie :

Pour conserver la conduction, il faut limiter le nombre de recombinaisons des paires électron-trou. La surface réceptrice du flux lumineux est un ruban. Cette forme minimise la largeur qui sépare les électrodes et les laisse en contact avec le ruban sur une grande surface. C'est cette configuration qui donne la résistance la plus faible. Seules les photorésistances utilisées sous haute tension sont constituées d'un ruban large. En effet le courant traversant la photorésistance s'écrit:

$$I = q \mu n \frac{A}{L} V \quad (3-1)$$

Dans cette expression :

- q est la charge de l'électron
- μ est la mobilité de l'électron
- n est la densité d'électrons présents
- A est l'aire de la surface de contact entre les électrodes et la zone photosensible
- L est la largeur du ruban

On constate que pour augmenter cette intensité il faut maximiser A et minimiser L . C'est pourquoi le ruban est la forme la plus efficace.

3-4 Courbe de la caractéristique en fonction de la luminosité

La courbe suivante représente l'évolution de la résistance de la LDR en fonction de la luminosité qu'elle reçoit. On peut y constater que la résistance varie linéairement suivant l'éclairement perçu.

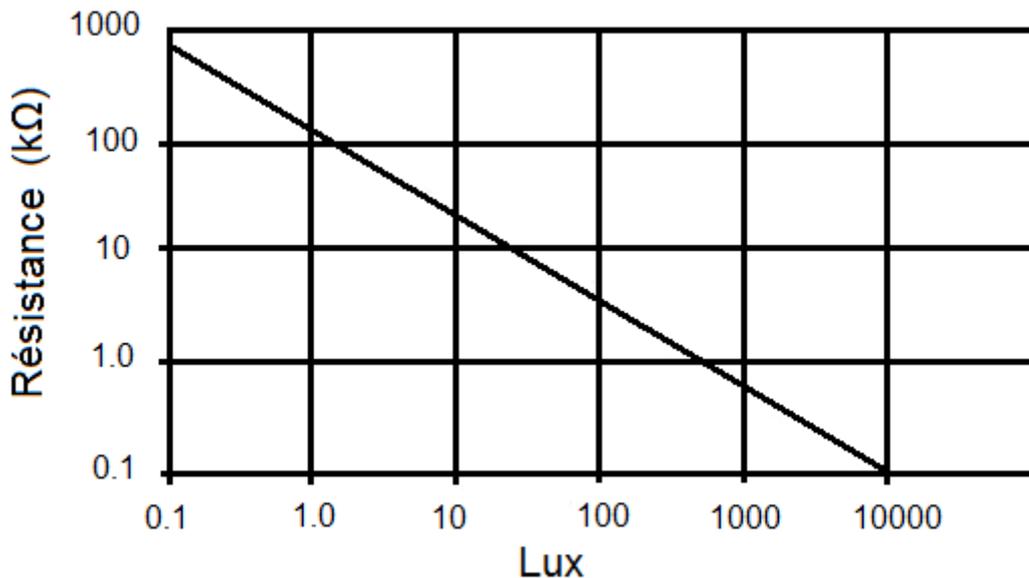


Figure 11 : Courbe de la caractéristique d'une photorésistance en fonction de la luminosité

L'équation de cette courbe est donnée par :

$$y = -0.49x + 5000 \quad (3-2)$$

Où y représente la résistance (en Ω)

x l'éclairement en (lux)

IV : CONCEVOIR UN SYSTEME DE COMMANDE AUTOMATIQUE DES ECLAIRAGES

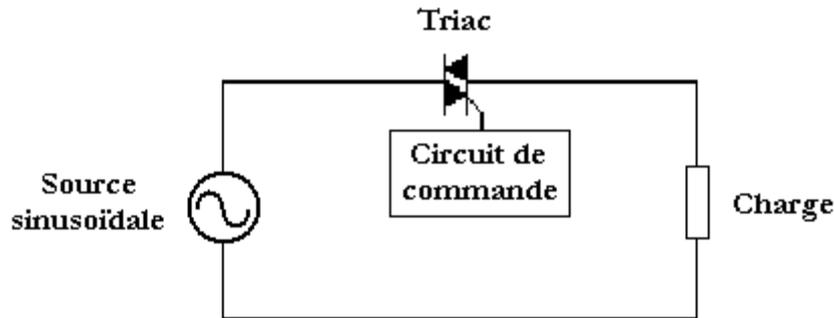


Figure 12 : Système de commande

Au cours de ce montage nous allons étudier deux nouveaux types de semi-conducteurs, spécialement utilisés dans le domaine de la commutation. Il s'agit du THYRISTOR et du TRIAC.

4-1 Le thyristor

4-1-1 Définition :

Le thyristor est un élément semi-conducteur, conducteur dans un seul sens (unidirectionnel), comme les diodes est une " porte électronique" contrôlable.

Comme tous les dispositifs semi-conducteurs travaillant en régime de commutation, il peut être couteux de l'état non-conducteur dit bloqué à l'état conducteur dit passant et inversement.

Semi-conducteur à quatre couches (P.N.P.N), le thyristor comporte trois électrodes dont l'Anode(A), la Cathode (K), et le troisième est dite Gâchette (G). Ses structures schématiques ainsi que son symbole sont représentées à les figures 13.

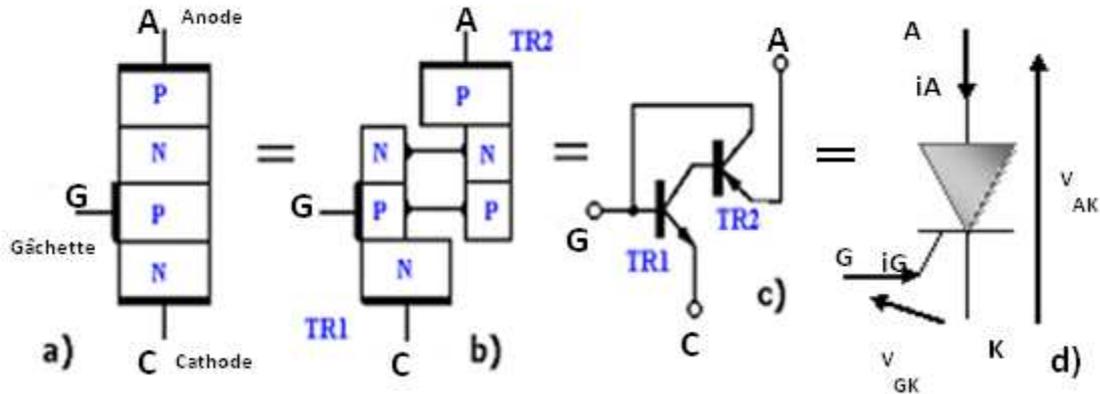


Figure 13 : Thyristor : a), b)-structures schématiques ; c) circuit équivalent ; d) symbole graphique.

4-1-2 Fonctionnement :

Le thyristor est polarisé en sens direct lorsque la tension $V_{AK} > 0$ et en sens inverse lorsque $V_{AK} < 0$. Il possède deux états stables de fonctionnement : l'état bloqué et l'état conducteur.

4-1-2-1 Etat bloqué : (ouvert ou non-conducteur)

Un thyristor est bloqué dans les deux situations suivantes :

- ❖ Il est polarisé en inverse ($V_{AK} < 0$), il peut alors supporter une tension inverse de valeur maximale de point V_{RRM} ou V_{RROM} en régime répétitif ou V_{RSM} en régime non répétitif.
- ❖ Il est polarisé en direct ($V_{AK} > 0$), mais l'intensité du courant de gâchette $i_G = 0$; il peut alors bloquer des points répétitives de tension directe inférieure à V_{DRM} (ou V_{DROM}), ou des pointes non répétitives d'amplitude extrême V_{DSM} . Dans les deux cas, le thyristor présente une très grande impédance entre anode et cathode ; et l'intensité i_A est négligeable devant l'intensité du courant à l'état conducteur (voir caractéristique de fonctionnement Figure 14). Le constructeur indique les valeurs absolues maximales de l'intensité du courant inverse I_R et du courant à l'état bloqué direct I_D .

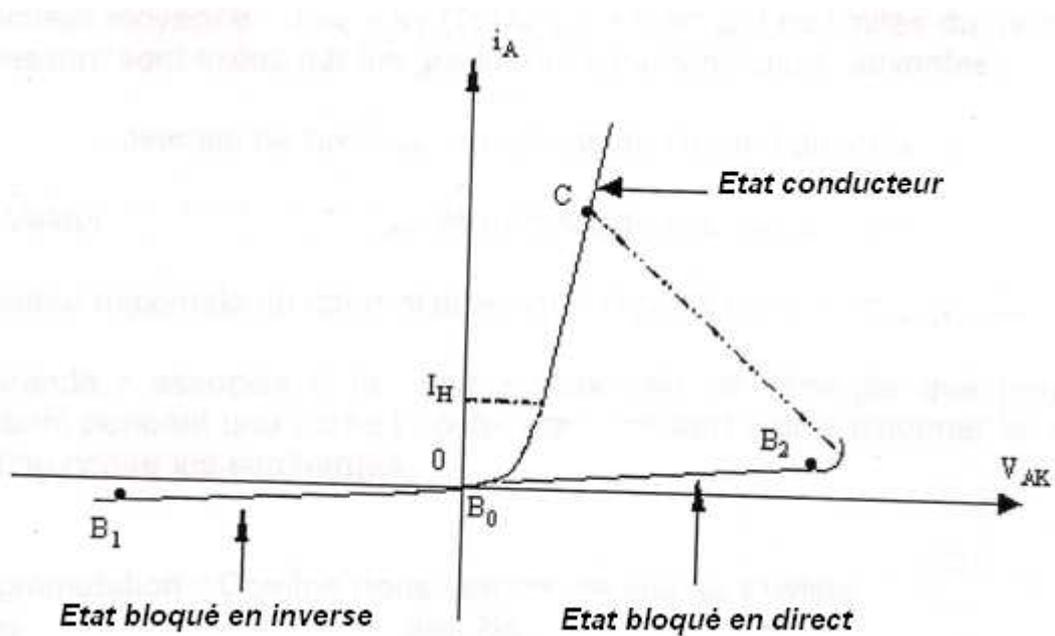


Figure 14 : caractéristique de fonctionnement d'un thyristor.

4-1-2-2 Etat passant : (fermé ou conducteur)

Il s'obtient lorsque le thyristor, initialement polarisé en direct, reçoit une "impulsion" de courant suffisant à sa gâchette. Le point figuratif de son état dans le plan (i_A , V_{AK}) de la figure 14 est le point C et l'intensité du courant i_A est fixée par les valeurs des autres éléments du montage (figure 15) ; ici : $i_A \approx U/R$. Le thyristor se comporte dès lors comme une diode, même après l'extinction du courant de gâchette, à condition que l'intensité de son courant d'anode reste supérieure à I_H : courant de maintien

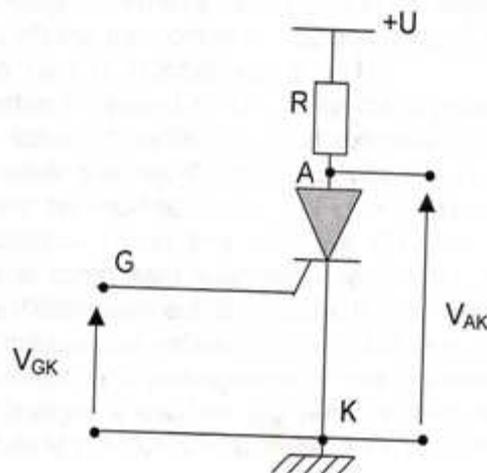


Figure 15 : Un exemple de circuit utilisant un thyristor.

La chute de tension directe à ses bornes est :

$$V_{AK} \approx V_T + r_t \cdot i_A \quad (4-1)$$

Où V_T est sa tension de seuil et r_t sa résistance dynamique. On peut en déduire la valeur instantanée de la puissance développée dans le composant :

$$P_{AK} = V_{AK} \cdot i_A = V_T \cdot i_A + r_t \cdot i_A^2, \quad (4-2)$$

Et sa valeur moyenne :

$$P_{AK} = V_T \cdot i_{A \text{ moy}} + r_t \cdot i_{A \text{ eff}}. \quad (4-3)$$

Les limites du fonctionnement à l'état passant sont fixées par les grandeurs caractéristiques suivants :

I_{TAV} : Valeur maximale de l'intensité moyenne du courant direct i_A ;

I_{TRMS} : Valeur maximale de l'intensité efficace du courant direct i_A ;

I_{TSM} : Valeur maximale du courant direct non répétitif de surcharge accidentelle ;

I^2t : Grandeur associée à la valeur maximale de l'énergie que peut dissiper le composant pendant une durée t ; cette grandeur sert à dimensionner les dispositifs de protection contre les surcharges.

4-1-3 Commutation :

Comme nous venons de voir, le thyristor à deux états stables de fonctionnement : bloqué et passant. Nous entendons par commutation le changement d'un état à un autre.

4-1-3-1 Fermeture :

Nous appelons fermeture (ou amorçage ou mise en conduction ou enclenchement) le passage d'un état bloqué direct à un état passant. Il nécessite un courant de gâchette ou courant de commande $i_G(t)$ ayant une certaine intensité pendant une certaine durée ; on nommera désormais improprement "impulsion" l'onde $i_G(t)$ appliquée pour fermer le thyristor.

La fermeture est caractérisée par la durée :

$$t_{GT} = t_d + t_r \quad (4-4)$$

S'écoulant entre l'instant où i_G vaut 10 % de sa valeur maximale et celui où V_{AK} est tombée à 10 % de sa valeur initiale.

Le retard à l'amorçage t_d diminue, d'une part si on augmente l'intensité I_G du courant de gâchette et sa vitesse de montée $\frac{di_G}{dt}$, d'autre part si on augmente la valeur de la tension appliquée à l'état initial bloqué (ici U).

Le temps de montée t_r dépend de la vitesse d'accroissement $\frac{di_A}{dt}$ de l'intensité du courant d'anode, donc en circuit extérieur (tension appliquée, charge). Le courant direct de l'anode s'établit d'autant plus vite que la maille fermée par le thyristor est moins inductive on représente sur la Figure 16-c l'allure de $i_A(t)$ pour deux cas de charge : très inductive (1) et peu inductive (2) ; on remarque que la puissance développée dans le composant augmente rapidement, ainsi que l'énergie à dissiper, lorsque la vitesse d'établissement du courant, $\frac{di_A}{dt}$ croît.

Le constructeur indique une valeur critique maximale ($\frac{di}{dt}$)_{CR} au-delà de laquelle la sécurité du composant n'est plus assurée en commutation ; ce n'est pas seulement la valeur de cette énergie à dissiper qui rend la fermeture dangereuse, mais aussi l'épaisseur réduite de la jonction conductrice qui ne peut dissiper cette énergie.

Le courant de gâchette n'est indispensable que pendant la durée de la mise en conduction ; la fermeture est irréversible dès que l'intensité i_A devient supérieure à celle de I_L courant d'accrochage.

Les fiches techniques indiquent les valeurs minimales I_{GT} (de i_G) et V_{GT} (de V_{GK}) qui provoquent l'amorçage de tous les thyristors de la série et les valeurs maximales au-delà de laquelle aucun enclenchement n'est possible. Elles portent aussi l'indication des valeurs P_G (V_A) et de point P_{GM} de la puissance supportable par la jonction gâchette-cathode.

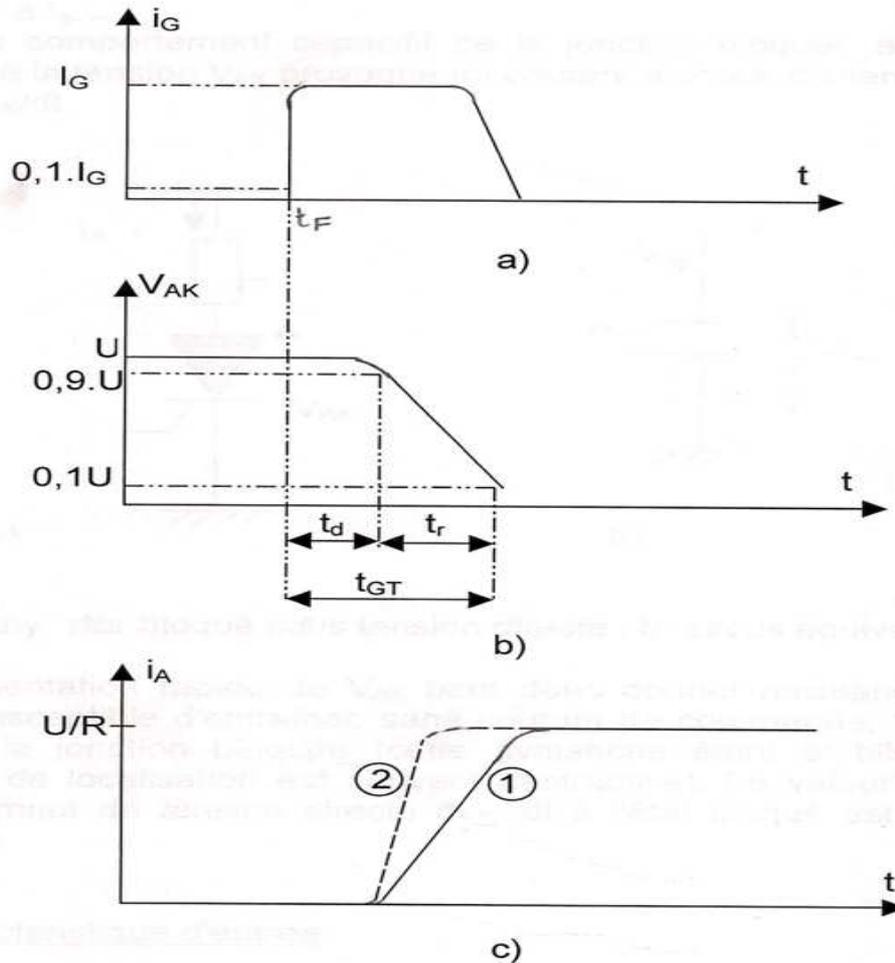


Figure 16 : Courbes des signaux traduisant les phénomènes à la fermeture

4-1-3-2 Ouverture :

Nous appelons ouverture (ou blocage ou déclenchement) le passage d'un état passant à un état bloqué. On ne peut ouvrir un thyristor de même qu'une diode, qu'en annulant le courant d'anode (trajet CBo du plan $V_{AK} - I_A$, voir figure 14) ou, mieux, le mettant sous tension inverse (trajet CB1, Figure 14). Mais éteindre le courant direct ne suffit pas pour le rendre apte à bloquer une tension directe appliquée entre anode et cathode ; il faut pour cela que la barrière de potentiel de blocage direct se reconstitue. Le constructeur indique la valeur minimale t_q (temps de recouvrement) de la durée de l'ouverture sous tension nulle ou inverse , au-delà de laquelle le blocage d'une tension directe est possible.

Si on applique une tension directe ($V_{AK} > 0$) au bout d'une durée t_{B1} inférieure à t_q , un réamorçage spontané (sans impulsion de gâchette) est à craindre alors que le thyristor pourra bloquer une tension directe appliquée au bout d'une durée t_{B2} supérieure à t_q .

Du fait du comportement capacitif de la jonction bloquée en direct (Figure 17), toute variation de la tension V_{AK} provoque un courant d'anode d'intensité :

$$I_A = C_{AK} \cdot dV_{AK}/dt \quad (4-5)$$

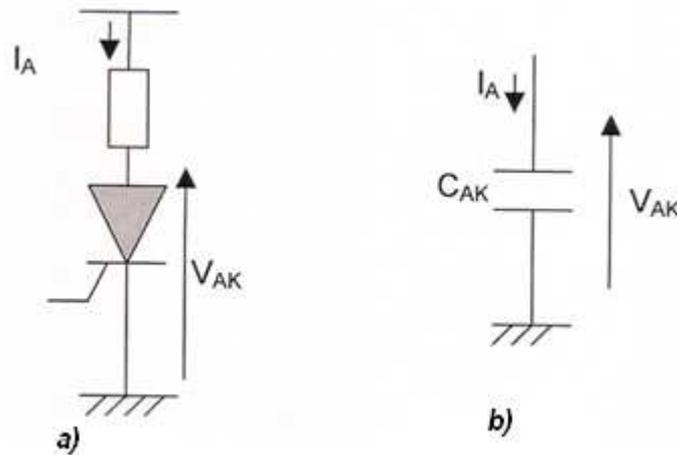


Figure 17 : a- thyristor bloqué sous tension directe ; b- circuit équivalent.

Une augmentation rapide de V_{AK} peut donc donner naissance à un courant direct intense, susceptible d'entraîner, sans courant de commande, l'avalanche conductrice à travers la jonction bloquée (cette avalanche étant établie dans de mauvaises condition de localisation est souvent destructive). La valeur maximale $(dv / dt)_{cr}$ de l'accroissement de tension directe dV_{AK}/dt à l'état bloqué est indiqué sur les fiches techniques.

4-2- Le triac :

4-2-1 Définition :

Le triac est élément semi-conducteur à conduction bidirectionnelle commandé, symbolisé par la figure 18-a, il correspond en principe à une paire de thyristor monté en antiparallèle mais commandés par une seule électrode (gâchette).

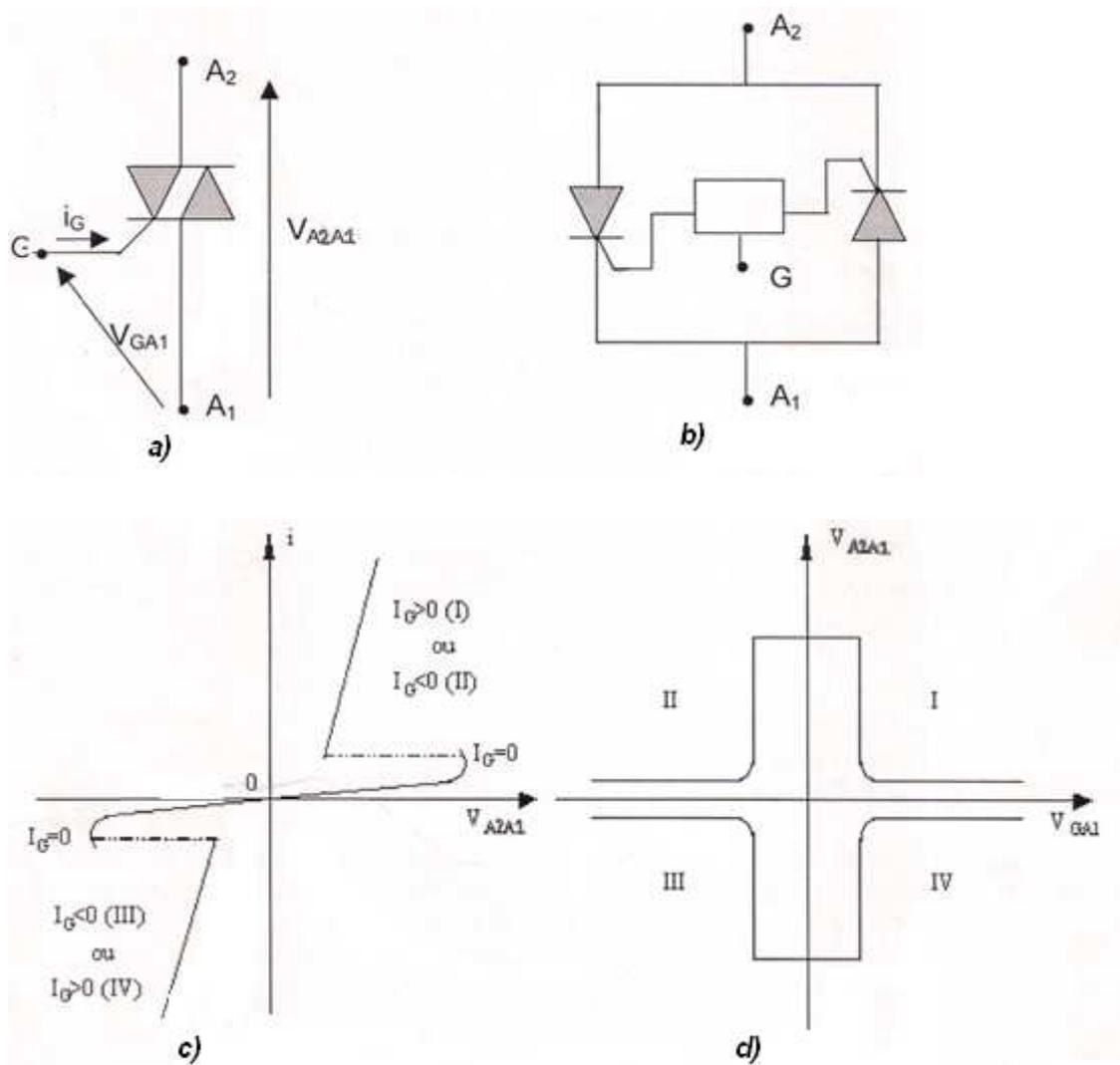


Figure 18 : a-symbole d'un triac ; b- circuit équivalent d'un triac ; c- caractéristique de fonctionnement ; d- type de fermeture commandée

4-2-2 Fonctionnement :

Les caractéristiques statiques (figure 18-c) du triac dévient de celles du thyristor : en direct et en inverse ($V_{A2A1} > 0$ et $V_{A2A1} < 0$) ; il peut supporter à l'état ouvert des tensions élevées (avec un courant de fuite d'intensité négligeable devant celle des courants nominaux) ; il devient conducteur lorsqu'on envoie dans la gâchette un courant d'amorçage (et il présente alors une chute de tension négligeable devant la tension maximale bloquée) ; l'ouverture ne peut être que spontanée (retour de la valeur absolue de l'intensité i à une valeur inférieure à celle de I_H , intensité du courant de maintien, pendant une durée supérieure au temps de recouvrement t_q).

On retrouve bien sûr les mêmes grandeurs caractéristiques générales d'emploi que pour les thyristors.

L'originalité du triac, par rapport à deux thyristors tête-bêche apparaît en différents points :

- Une seule électrode de commande, comme on l'a déjà signalé ;
- Un fort couplage entre les deux fonctions " thyristors " montés en tête-bêche, ce qui conduit à une durée t_q de recouvrement de valeur importante et limite la fréquence maximale de travail (d'autant plus que ce composant se bloque deux fois par période de la tension alternative d'alimentation) ;
- Faible puissance commande avec les dispositifs disponibles ;
- Composant très sensible à la vitesse d'établissement de la tension à l'état bloqué.

Le triac peut être mis en conducteur par un courant de gâchette positif ou négatif quelle que soit la tension appliquée (Figure 18-c) ; on prévoit donc quatre types de fermeture commandée : sous tension V_{A2A1} positif, on peut provoquer l'amorçage grâce à un courant de commande direct ($i_G > 0$, quadrant I de la Figure 18-d) ; ou grâce à un courant inverse ($i_G < 0$, quadrant II) ; de même, sous tension V_{A2A1} négatif, la fermeture peut être obtenue au moyen d'un courant de gâchette inverse (quadrant III) ou direct (quadrant IV). L'amorçage est irréversible lorsque la valeur absolue de l'intensité i du courant dans le triac dépasse la valeur spécifiée I_L de l'intensité du courant d'accrochage.

La valeur de I_L dépend des conceptions d'amorçage ; le constructeur indique une valeur maximale permettant de prévoir un enclenchement sûr. A performances maximales égales un thyristor et un triac ont des courants d'accrochage différents, celui du triac ayant une intensité supérieure.

4-3 Circuit de commande :

L'interrupteur automatique étant composé de deux parties bien distinctes : la partie puissance et la partie commande, nous allons voir plus en détail chacune de ces parties.

4-3-1 La partie puissance :

Elle est composée du triac, de la lampe et de la tension secteur. Son principe de fonctionnement a été expliqué comme suit :

La lampe est une charge résistive, selon l'angle de retard α et réglé par le circuit de commande du triac ; la tension a ses bornes à la forme suivante :

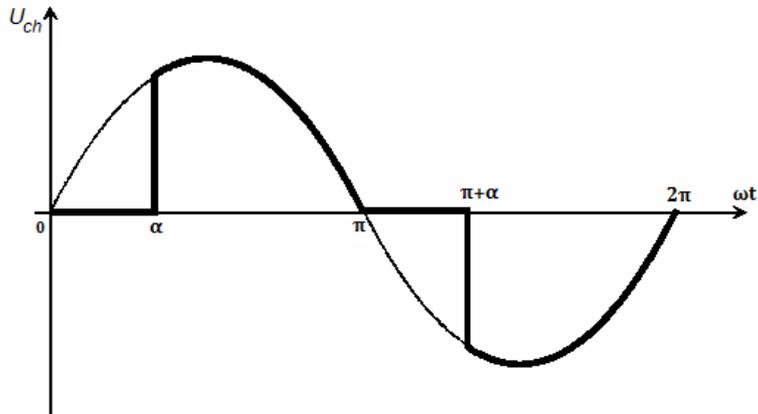


Figure 19 : L'angle de retard à l'amorçage d'un triac aux bornes d'une charge résistive

Voici la relation entre la tension aux bornes de la charge et la tension secteur :

$$U_{\text{charge}} = U_{\text{source}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} \quad (4-6)$$

Et la puissance moyenne dissipée dans la charge est donnée, pour une charge de résistance R.

D'après Loi d'Ohm : $I = \frac{U}{R}$ Or $P = U.I$

D'où :

$$P_{\text{moy}} = \frac{U_{\text{ch}}^2}{R} = \frac{U_{\text{source}}^2}{R} \times \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right) \quad (4-7)$$

4-3-2 Partie commande :

4-3-2-1- Alimentation continue :

Le gradateur fait appel à différents composants actifs tels les transistors et les circuits intégrés (LM358) qui demande une tension d'alimentation 12 V. Pour cela, nous allons utiliser une alimentation classique avec transformateur 220 V/12 V. Nous allons adopter le montage suivant :

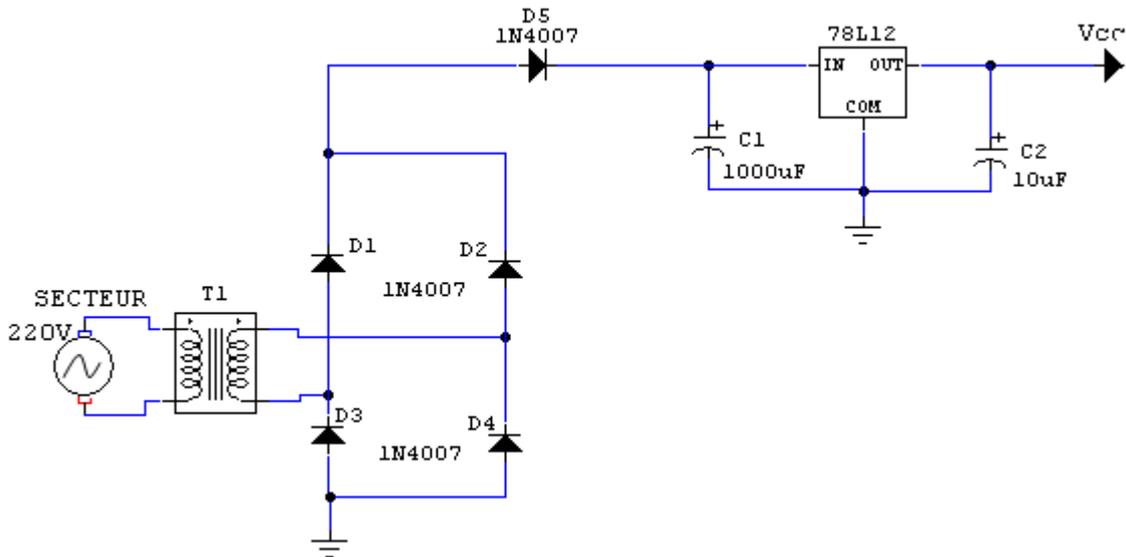


Figure 20 : Circuit d'alimentation

La tension redressée est envoyée vers un condensateur de filtrage C1 au travers de la diode D5 qui assurera l'isolation entre la tension redressée à la sortie du pont de diodes et la tension continue qu'on veut avoir.

La tension continue est stabilisée par un régulateur de tension 78L12, ce qui donne une tension en sortie Vcc parfaitement stable de 12 V, qui servira à l'alimentation de toute la partie commande.

Notons que les régulateurs de tension du type 78Lxx débitent un courant maximal de 0.1 A et que la tension à appliquer sur leur entrée doit être au moins 1.4 fois supérieure à la tension à stabiliser.

La capacité minimale du condensateur d'entrée du régulateur de tension se calcule suivant l'expression suivante :

$$C[\mu F] = \frac{20000}{\left(\frac{U[V]}{I[A]} \right)} \quad (4-8)$$

C : Capacité du condensateur (en μF)

U : Tension qu'on veut obtenir après stabilisation

I : Courant à la sortie du régulateur de tension

Pour notre cas, on obtiendra :

$$C_{min} = \frac{20000}{\left(\frac{12}{0.1} \right)} = 166.66 [\mu F]$$

On prendra une valeur $C_1 = 1000 [\mu F]$ pour réduire au maximum les ondulations.

Pour ce qui est du condensateur à relier en sortie du régulateur de tension, sa capacité doit être au moins 10 fois inférieure à celle de l'entrée.

Nous prendrons donc $C_2 = 10 [\mu F]$.

L'allure de la tension redressée et de la tension d'alimentation continue est donnée sur le graphe suivant :

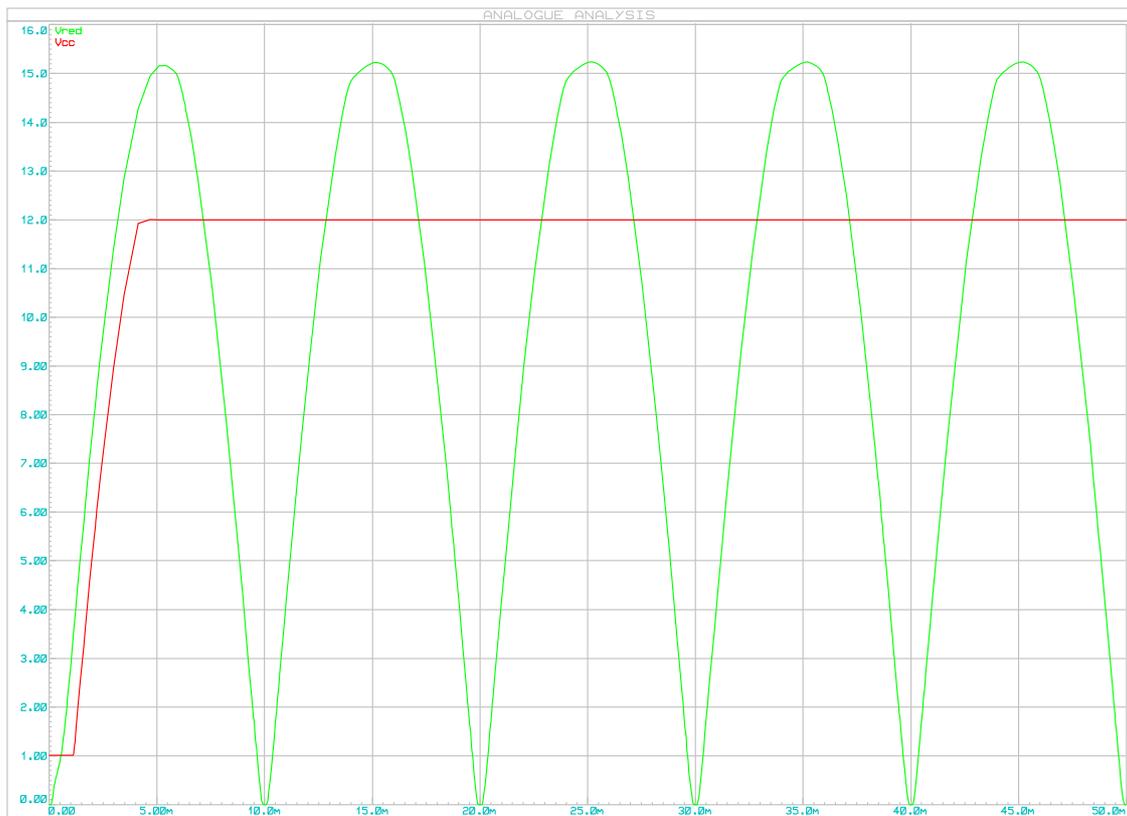


Figure 21 : Allure de la tension redressée et de la tension d'alimentation continue

La courbe en verte représente la tension à la sortie du redresseur à pont de diodes, tandis que celle en rouge représente la tension continue à la sortie du régulateur de tension.

Le résultat de la simulation montre bien qu'on a une tension continue de 12 V à la sortie du régulateur de tension.

4-3-2-2- Tension de commande :

Elle est délivrée à travers la photorésistance qui est montée suivant un montage potentiométrique comme nous avons utilisé sur le schéma ci-dessous :

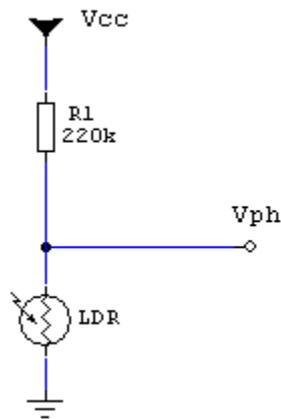


Figure 22 : Montage potentiométrique générant le signal de commande

La tension aux bornes de la photorésistance est donnée par l'expression suivante :

$$V_{ph} = \frac{R}{R+R_6} V_{cc} \quad (4-9)$$

V_{ph} : Tension aux bornes de la photorésistance

V_{cc} : Tension d'alimentation continue

R : Résistance de la LDR

Conformément à la luminosité captée par la photorésistance, une résistance variable en fonction de la lumière. Cette résistance peut aller jusqu'à un (1) Méga-Ohms la nuit et seulement un (1) à deux (2) K-Ohms en pleine lumière. Donc la tension délivrée à travers la photorésistance V_{ph} varie de 0 à 12 V. Cette tension sera comparée à la tension de référence pour pouvoir obtenir le signal d'attaque du triac.

Pour cela, nous allons utiliser l'amplificateur opérationnel pour comparée la tension.

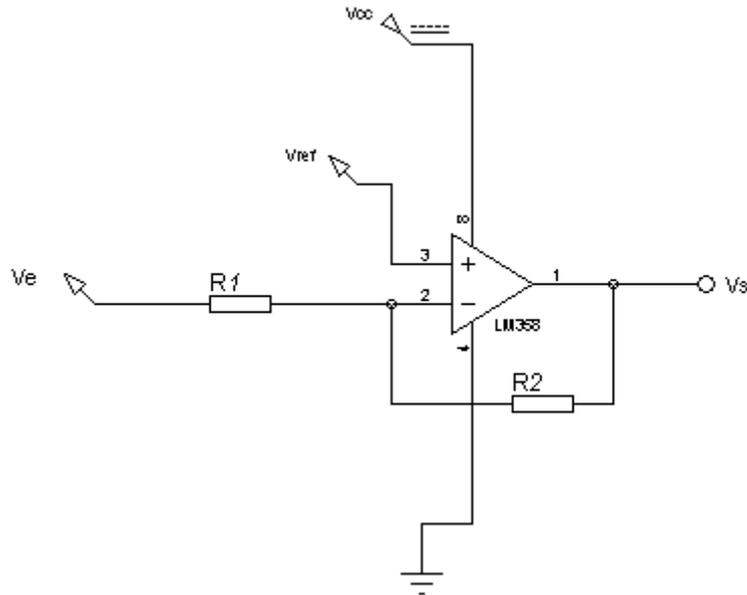


Figure 23: Comparateur de tension

En appliquant le théorème de Millman, on a la relation suivante :

$$\frac{\frac{V_e}{R_1} + \frac{V_s}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = V_{ref} \quad (4-10)$$

Soit

$$V_{ref} = \frac{R_2 V_e + R_1 V_s}{R_1 + R_2} \quad (4-11)$$

Le dimensionnement des résistances R1 et R2 est obtenu en fixant tout d'abord V_{ref} à 0 et en prenant $V_e = 5V$ et $V_s = 12V$.

On obtient

$$\left| \frac{V_s}{V_e} \right| = \frac{R_2}{R_1} \quad (4-12)$$

Donc si on prend $R_1=24 \text{ k}\Omega$ alors $R_2=10 \text{ k}\Omega$.

Les conditions sur la tension qu'on doit obtenir à la sortie du montage sont les suivantes :

Lorsqu'il fait jour, la tension délivrée à travers la photorésistance est proche de 0 V.

Et afin allumer de faire briller la lampe faiblement, le triac doit être amorcé le plus tard possible, donc on doit avoir une tension de commande proche de 5 V.

De même que lorsqu'il fait nuit, la tension délivrée à travers la photorésistance est proche de 12 V. Pour que la lampe fonctionne à sa puissance nominale, il faut que la tension de commande soit proche de 0 V.

On tire V_{ref} de cette correspondance :

A.N :

$$V_{ref} = \frac{10 \times 0 + 24 \times 5}{10 + 24} = 3.5$$

$$V_{ref} = 3.5 [V]$$

Finalement on obtient le montage suivant :

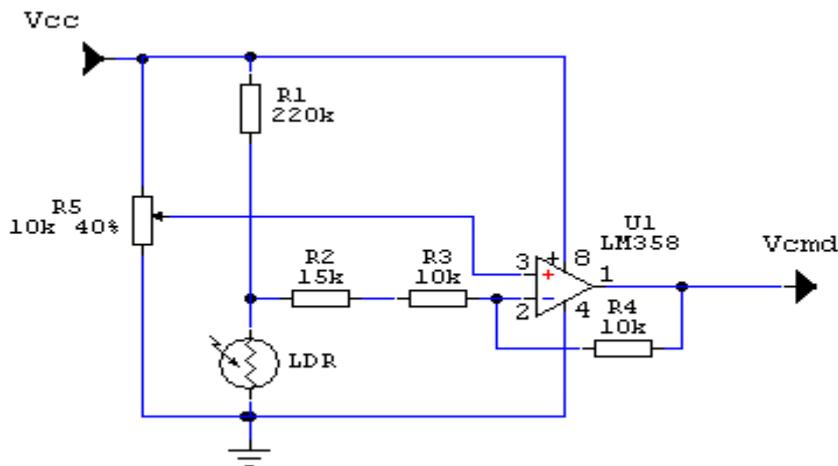


Figure 24 : Montage comparateur générant le signal d'attaque du triac

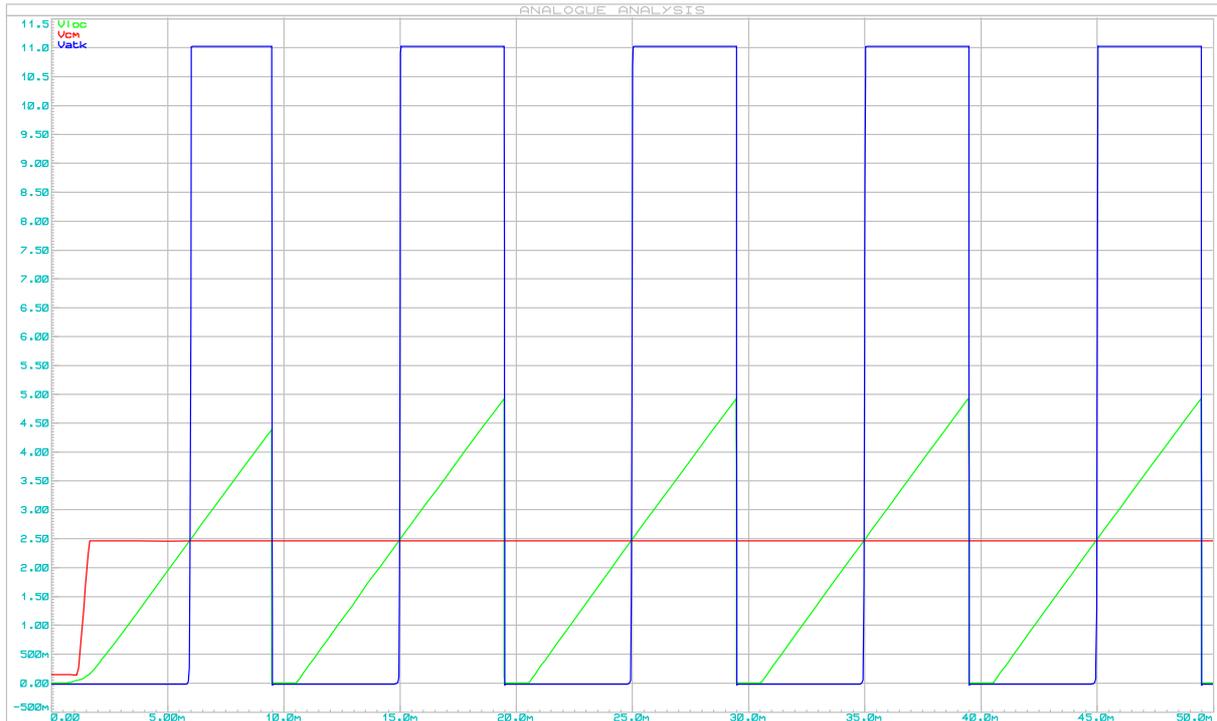


Figure 25: Courbe à la sortie du comparateur pour une tension de commande de 2.5V

Sur cette figure, la courbe verte représente la tension de référence locale, la courbe en rouge la tension de commande et la bleue le signal d'attaque du triac.

Comme nous pouvons le voir sur le graphe, la tension à la sortie du comparateur est une tension logique, donc nous allons interfacé cette sortie logique avec le secteur pour assurer une isolation galvanique entre la partie commande et la partie puissance ainsi que la sécurité de l'utilisateur.

Le diviseur de tension qui se compose de R1, LDR et le LDR photorésistance à la particularité de présenter une résistance très faible lorsqu'il est soumis à forte intensité lumineuse, et une résistance très élevée dans l'obscurité. Ce montage utilise un amplificateur opérationnel bien connu, le LM358. Il est monté en comparateur.

Les valeurs de R2 et R3 ont été de sorte que la tension aux bornes de LDR peut varier d'un minimum d'environ 1V (la nuit) et juste en dessous de la tension d'alimentation en pleine lumière (le jour), cette variation est presque linéaire. Cette tension est appliquée à l'entrée inverseur (-) contenu dans l'amplificateur opérationnel. L'entrée non inverseur (+) est une tension contrôlée en résistance variable R5.

La sortie de l'ampli-op devient logique 1 lorsque la tension aux bornes de R1 est inférieure au niveau fixé par le potentiomètre.

A un moment donné, le taux d'éclairage sur la résistance commence à diminuer progressivement. Dans cette condition, la valeur de la cellule photoélectrique ohmique commence à augmenter, et par conséquent la tension aux bornes de R1 à diminuer.

La tension appliquée sur la broche positif (+) ampli-op est comparé par chaque comparateur avec la tension réglée par le potentiomètre. Par conséquent, la sortie de l'amplificateur opérationnel passe au niveau haut, provoquant l'émission de la lumière et la fermeture du triac.

La tension à la sortie du comparateur est une tension logique, donc nous allons interfacer cette sortie logique avec le secteur pour assurer une isolation galvanique entre la partie commande et la partie puissance ainsi que la sécurité de l'utilisateur.

Et pour cela nous allons adopter le montage de la figure ci-après :

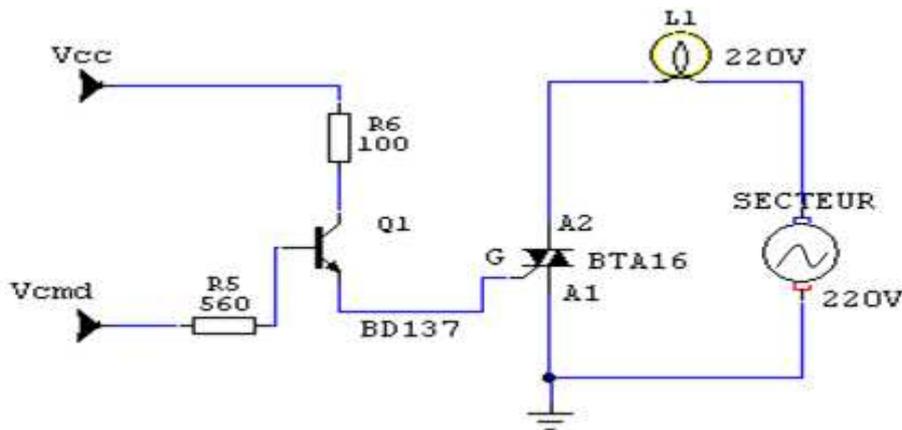


Figure 26 : Montage fournissant le signal d'attaque du triac

Le fonctionnement de ce montage :

- ❖ Lorsque la tension de commande v_{cmd} à la sortie du comparateur est au niveau haut, le transistor est saturé, équivalent à un interrupteur fermé ; donc le triac en conduction.
- ❖ Lorsque la tension de commande est au niveau bas, le transistor est bloqué, équivalent à un interrupteur ouvert ; donc le triac n'entrera pas en conduction.

Rappelons que le triac n'a pas besoin de tension de commande permanente pour rester en conduction. Une impulsion sur sa gâchette suffit pour la mettre en conduction, et une fois amorcé, le triac reste dans cet état jusqu'à ce que le courant qui circule entre l'anode A1 et l'anode A2 descende en dessous d'une certaine valeur (courant de maintien).

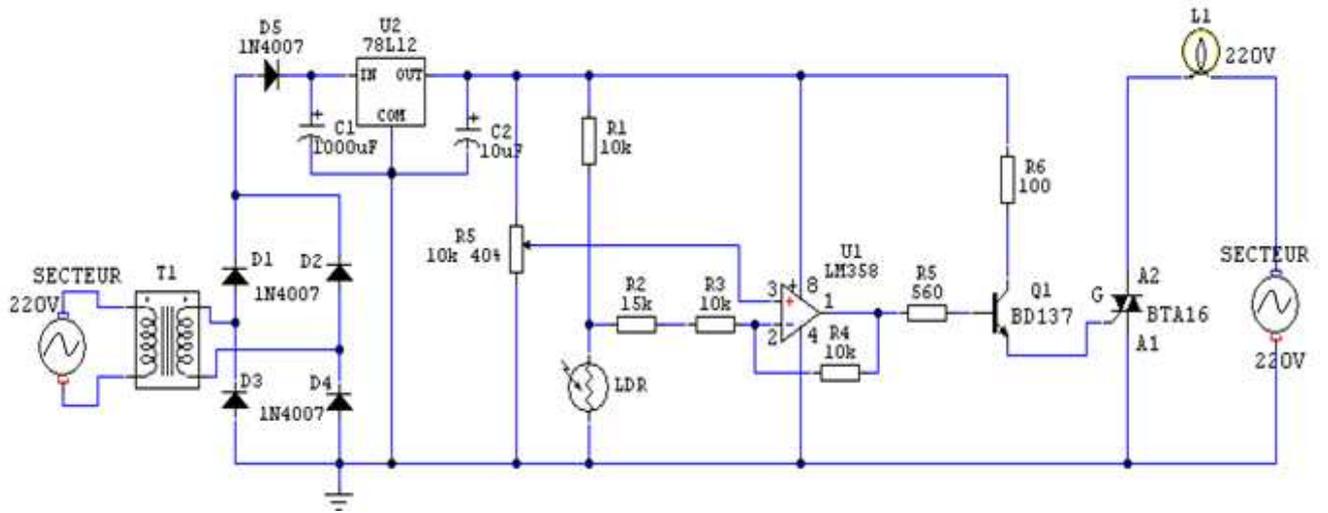


Figure 27: Conception d'un interrupteur automatique

V- Essai et Réalisation :

5-1 Essai sur plaquette d'essai :

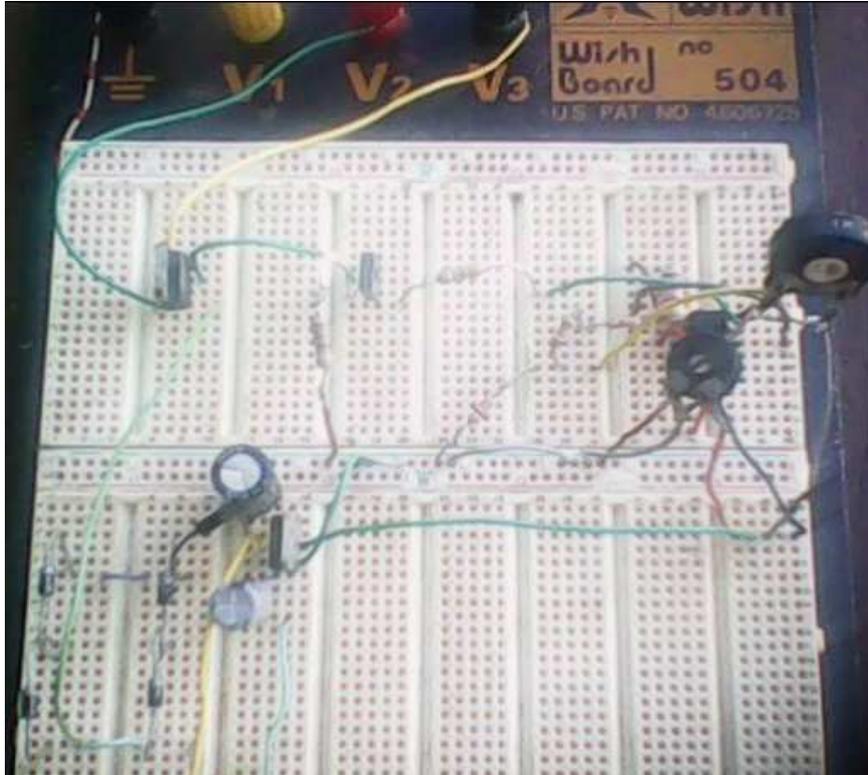


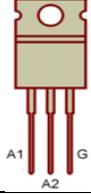
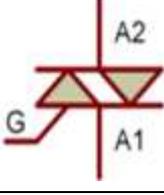
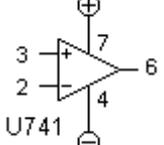
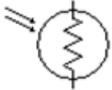
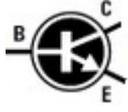
Figure 28: Réalisation sur plaquette d'essai

La photographie ci-dessus montre la réalisation du système sur plaquette d'essai. Afin de pouvoir tester son fonctionnement. Durant les essais, le montage potentiométrique utilisant la photorésistance a été temporairement remplacé par un potentiomètre ; cela nous a permis de voir le comportement du système pour une variation de la tension aux bornes de la photorésistance.

5-2 Identification des composants :

Le tableau ci-dessous nous montre l'Aspect, le symbole et l'utilisation de tous les composants existant sur le schéma de structurel.

TABLEAU I

Aspect	Symbole	Nom	Fonction
		Triac	Variation de l'intensité lumineuse
		Circuit intégré	Comparateur de tension
		Condensateur chimique	Filtrage
		Diode	Redressement
		Photorésistance	Capteur
		Potentiomètre	Fixer la tension de référence
		Resistance	Réduire l'intensité du courant
		Transistor	Amplificateur de courant.
		Régulateur	Stabilisée une tension de sortie Vcc

5-3 Tableau des différents composants :

Ce tableau nous permet de connaître facilement le Repère, le Nombre et la Référence de chaque composant du schéma de montage.

TABLEAU 2

<i>BTA16</i>	<i>1</i>	<i>Triac</i>	<i>BTA16-600</i>
<i>U1</i>	<i>1</i>	<i>Circuit intégré</i>	<i>LM 358</i>
<i>C1</i>	<i>1</i>	<i>Condensateur</i>	<i>1000 μF 25V</i>
<i>C2</i>	<i>2</i>	<i>Condensateur</i>	<i>100μF 16V</i>
<i>D</i>	<i>5</i>	<i>Diode</i>	<i>1N4007</i>
<i>LDR</i>	<i>1</i>	<i>Photorésistance</i>	<i>LDR03</i>
<i>R5</i>	<i>1</i>	<i>Résistance ajustable</i>	<i>100 KΩ</i>
<i>R1</i>	<i>1</i>	<i>Résistance 1/4W</i>	<i>220 KΩ</i>
<i>R2</i>	<i>1</i>	<i>Résistance 1/4W</i>	<i>15 KΩ</i>
<i>R3R4</i>	<i>2</i>	<i>Résistance 1/4W</i>	<i>10 KΩ</i>
<i>R5</i>	<i>1</i>	<i>Résistance 1/4W</i>	<i>560 Ω</i>
<i>R6</i>	<i>1</i>	<i>Résistance 1/4W</i>	<i>10Ω</i>
<i>Q1</i>	<i>1</i>	<i>Transistor</i>	<i>BD137</i>
<i>U2</i>	<i>1</i>	<i>Régulateur</i>	<i>78L12</i>
Repère	Nombres	Désignation	Caractéristique

Le bon fonctionnement du montage dépend de la conception, et du dimensionnement des composants actifs et passifs.

5-4 Réalisation du circuit imprimé

Le routage du circuit imprimé a été réalisé sous EAGLE. L'emplacement des composants sur le PCB ainsi que les routes sont présentés aux figures suivantes.

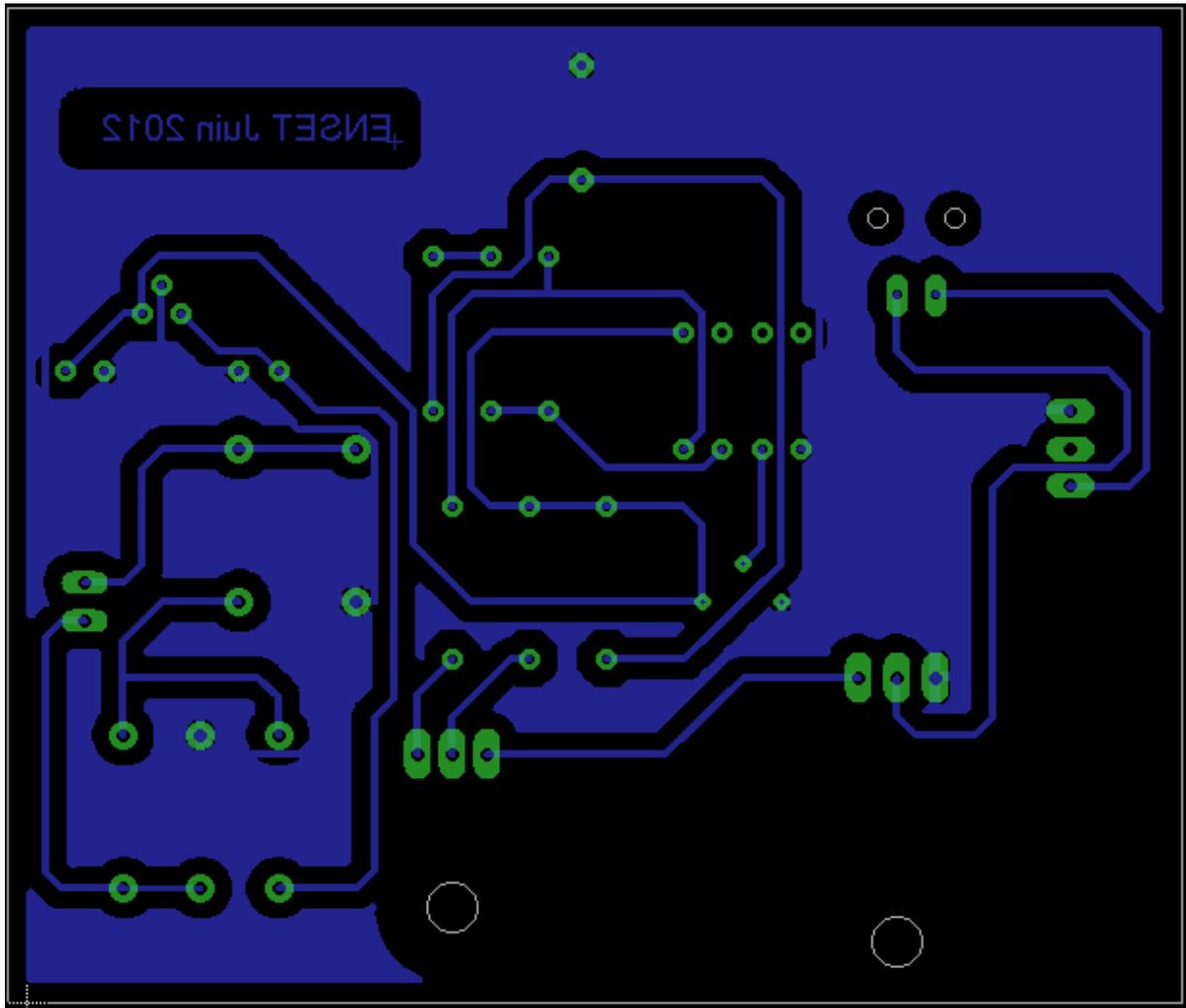


Figure 29 : Typon du circuit côté cuivre

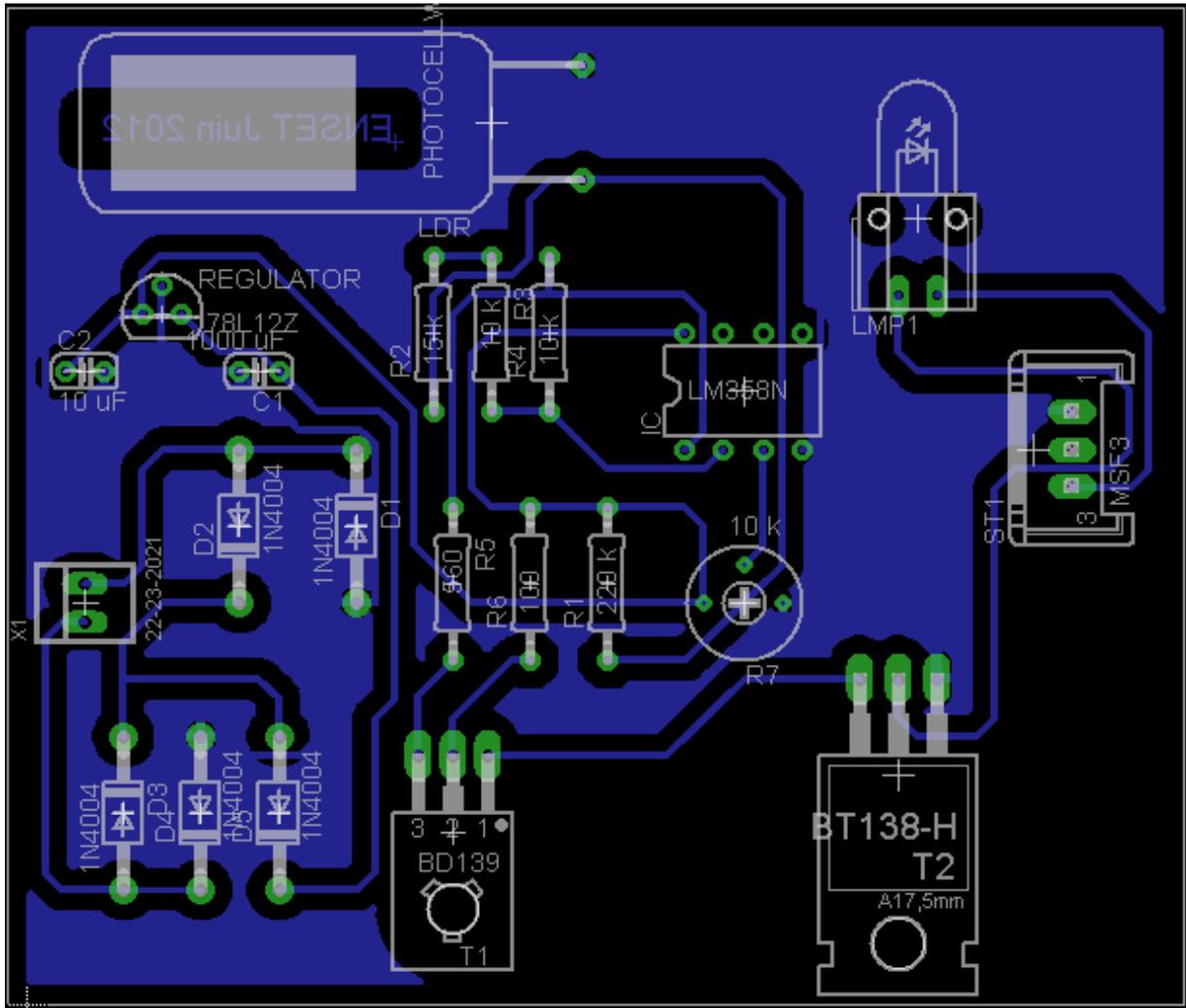


Figure 30 : Aperçu du montage vue de haut

VI- IMPLICATION PEDAGOGIQUE

6-1 - Introduction :

Dans toute formation, surtout celle des techniciens, l'évaluation, l'expérimentation et la vérification des connaissances théoriques acquises servent de supports particulièrement enrichissants. Ainsi, dans cette séquence, nous retiendrons deux thèmes qui répondront à ces requêtes

6-2 Thème 01 : Etude d'un thyristor

Objectif :

A la fin de cette séquence les élèves devront être capables de :

- identifier un thyristor, reconnaître les différentes électrodes, lire une notice de caractéristique (data-book ou catalogue) correspondante ;
- expliquer le fonctionnement d'un thyristor ;
- retrouver expérimentalement ses différentes caractéristiques.

6-2-1-En salle :

- a- Niveau :
3^{ème} Année
- b- Matière :
ELECTRONIQUE
- c- Spécialité :
EN
- d- Pré requis :
Etude d'une diode
- e- Plan :
 - constitution et terminologie ;
 - fonctionnement ;
 - application.
- f- Moyens :
 - Tableau, règle, craie, . . .
 - Rétroprojecteur ;
 - Polycopies ou documents d'appui.

Evaluation théorique :

Durée : 1h

Sujet :

- 1- Comparer une diode avec un thyristor.
- 2- Expliquer le fonctionnement d'un thyristor.
- 3- Comment repérer les électrodes d'un thyristor ?
- 4- Commenter les informations données sur la notice suivante :

(Polycopie)

- 5- Parler d'un exemple d'application d'un thyristor ; expliquer.

6-2-2- Au Laboratoire:

Evaluation pratique :

Durée : 3h

Matériels à utiliser : un thyristor TIC 126M disponible au labo ; un ohmmètre ; un ampèremètre continu ; un voltmètre continu ; deux alimentations 0 – 30 V continu ; une charge résistive ; une boîte à résistance à décade.

Sujet :

- 1- Repérer à l'aide d'un ohmmètre les trois électrodes du thyristor TIC 126M.
- 2- Relever la caractéristique de gâchette $I_G = f(V_G)$ et tracer.
- 3- Relever le couple $(V_G ; I_G)$ minimal d'amorçage.
- 4- Mesurer le courant d'accrochage I_L .
- 5- Mesurer le courant de maintien I_H .
- 6- Relever la caractéristique de fonctionnement du TIC 126M, $I_A = f(V_{AK})$, et tracer en plaçant les différents points I_H, I_L .

6-3 Thème 02 : Etude d'un triac et d'un diac

Objectif :

A l'issue de cette séquence les élèves devront être capables de :

- identifier un triac d'un thyristor ; reconnaître les différentes électrodes, lire une notice de caractéristique (data-book ou catalogue) ;
- expliquer le fonctionnement d'un triac ;
- Commander un triac à l'exemple d'un dispositif de commande à diac et RC déphaseur.

6-3-1 En salle :

a- Pré requis :

Étude d'un thyristor.

b- Plan :

- Définition ;
- Fonctionnement d'un triac ;
- Analyse théorique de fonctionnement d'un diac ;
- Application.

c- Moyens :

- Tableau, règle, craie, . . .
- Rétroprojecteur ;
- Polycopies ou documents d'appui.

1- Définition

Un triac est un composant bidirectionnel, qui peut laisser passer le courant dans les deux sens. Ce composant possède trois électrodes : deux électrodes principales appelées A1 et A2 (pour Anode 1 et Anode 2) ou MT1 et MT2 (pour Main Terminal 1 et Main Terminal 2, Main Terminal signifiant ici Terminaison principale), et une électrode de commande G (pour Gâchette) qui permet d'amorcer plus facilement la conduction du courant entre les deux électrodes principales A1 (MT1) et A2 (MT2).

Le triac peut conduire dans les deux sens, ce qui fait que son utilisation en alternatif est évidente, puisqu'elle permet d'exploiter les deux alternances. Il permet de disposer d'une interface de puissance à moindre frais du fait que d'un côté on le commande avec quelques mA en basse tension, et que de l'autre il est capable de commuter des courants de plusieurs ampères sous 220V.

Le déclenchement du triac s'effectue à travers la Gâchette (G). Il existe différentes possibilités pour amorcer un triac par un courant de gâchette. On définit ainsi 4 quadrants, le constructeur donnant la valeur du courant I_{GT} nécessaire à l'amorçage pour chaque quadrant. Ces quadrants correspondent aux différentes polarités des courants et tensions auxquels peut être soumis le triac à travers de ses trois électrodes.

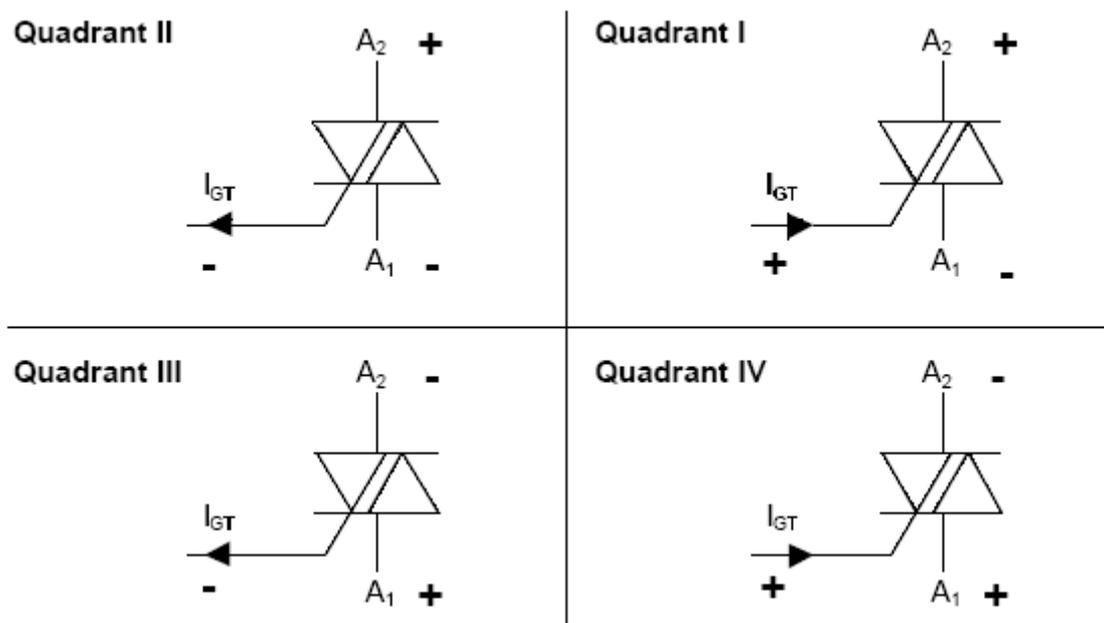


Figure 31 : Quadrant de fonctionnement des triacs

2- Principe de fonctionnement d'un triac:

Le triac s'amorce (devient passant) quand la tension entre les anodes A1 et A2 dépasse une certaine valeur appelée tension d'amorçage. La valeur de cette tension d'amorçage est fortement réduite quand une tension est appliquée sur la gâchette ; et cela quel que soit la polarité de la tension appliquée entre A1 et A2, et quel que soit la polarité de la tension appliquée sur la gâchette. C'est précisément grâce à cette caractéristique que le triac peut être utilisé en alternatif.

L'état passant du triac persiste tant que le courant circulant entre les anodes A1 et A2 ne descend pas en dessous d'une certaine limite appelée courant de maintien (ou courant hypostatique). Une fois le triac amorcé, le courant qui le traverse ne dépend plus du signal appliqué sur la gâchette. En d'autres termes, si la tension de commande disparaît (de façon volontaire pour économiser sur la consommation, par exemple), le triac reste amorcé c'est-à-dire conducteur jusqu'à ce que le courant de passage entre les anodes A1 et A2 redescende en dessous de la valeur du courant de maintien.

Ce qui, en utilisation sous tension alternative de notre réseau, ne manque pas de se produire quelque cent fois par seconde, à chaque passage par zéro de la tension secteur.

La sensibilité du triac dépend parfois du quadrant dans lequel on le fait fonctionner. Le quadrant 4 n'est quasiment jamais utilisé du fait qu'il nécessite souvent un courant de gâchette plus important, à moins de compenser la faible sensibilité par l'emploi d'un transformateur d'impulsion. La plus grande sensibilité de déclenchement est obtenue avec les quadrants 1 et 3. L'application d'un courant continu pour la commande est bien souvent préféré en vue de la simplification du montage mais ne produit pas toujours les meilleurs résultats, et une commande impulsionnelle est parfois préférée. La commande par une tension alternative est également possible, le triac est alors inclus dans un système dit d'auto déclenchement.

3- Principe de fonctionnement d'un diac

Le diac est un élément semi-conducteur, en principe, il est équivalent à deux diodes zéner montées en opposition (série ou parallèle). A la différence d'une diode simple, il peut conduire le courant électrique dans les deux sens, il est donc bidirectionnel. Les Figure 29 montrent le symbole graphique d'un diac (a) ; les circuits équivalent (b) et la caractéristique de fonctionnement (c).

La Figure 29-c nous montre comme un triac fonctionne ; en effet, le diac ne conduit pas jusqu'à ce que la tension entre ses bornes n'essaie pas de dépasser la tension de retournement ou tension de seuil V_S dans chaque sens. Ainsi, pour des valeurs de la tension V_d inférieures à la tension V_S , le courant i_d est très faible (proche de zéro) dès que la tension V_d dépasse la tension V_S (en valeur absolue) le courant augmente très rapidement. La caractéristique est symétrique pour des tensions positives et négatives. La tension de seuil V_S est beaucoup plus élevée que la tension zéner V_Z . La conduction du diac est spontanée, ce qui est montrée par le coude de zéner très franc (forme presque un angle droit). Dans la zone de conduction, la résistance dynamique, dV_d / di_d , du diac est faible et négative et que la tension est presque constante et est égale environ à la tension zéner V_Z dans presque toute la région de claquage. Le diac était prévu pour des courants de retournement faibles, donc médiocre en dV/dt et en température.

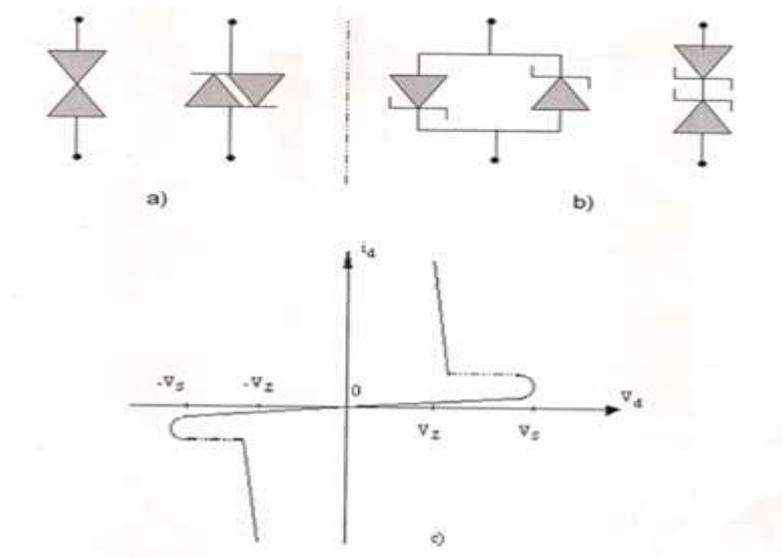


Figure 32 : a- symbole d'un diac ; b- circuit équivalent ; c- caractéristique de fonctionnement.

4- Application :

- Variateur de lumière, gradateur ;
- Contacteur statique ;
- Clignoteur ;
- Programmeur

Evaluation théorique :

Durée : 1h 30mn

Sujet :

- 1- Comparer un triac avec un thyristor.
- 2- Comment repérer les différentes électrodes d'un triac ?
- 3- Explique le fonctionnement d'un triac.
- 4- Commenter les informations données par notice suivante :

(Polycopie)

- 5- Parler d'un exemple d'utilisation d'un triac ; expliquer.
- 6- Déterminer ou choisir les éléments R, C et D_i correspondants au dispositif de la Figure 30, pour obtenir $\varphi \in [0; \pi / 2]$ (φ étant le déphasage de V_C , la tension aux bornes de C par rapport à la tension d'alimentation 220V)

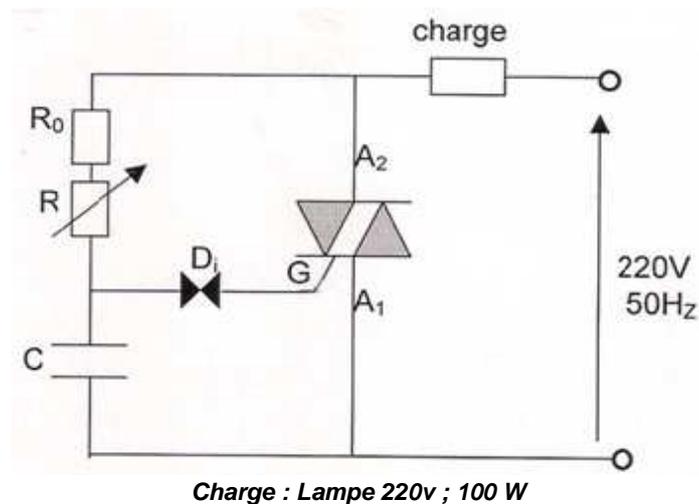


Figure 33 : Triac TIC 225D commandé par diac et RC déphaseur.

6-3-2 Au Laboratoire :

Evaluation pratique :

Durée : 4h

Matérielle à utilisé : résistance, condensateur et diac disponible au labo ; triac disponible au labo plus une notice de ses caractéristique ; une lampe de charge 220V, 100W ; un ampèremètre ; un voltmètre ; un oscilloscope.

Sujet :

LE TRIAC

- 1- A l'aide d'un ohmmètre repérer les différentes électrodes d'un triac.
- 2- Lire la notice de ses caractéristiques.

LE DISPOSITIF DE COMMANDE DIAC ET RC DEPHASEUR

Montage 1 : Relever simultanément à l'aide d'un oscilloscope les tensions V et V_R puis V et V_C pour les positions extrêmes du potentiomètre R . Constatation. Le montage est celui de la Figure 31.

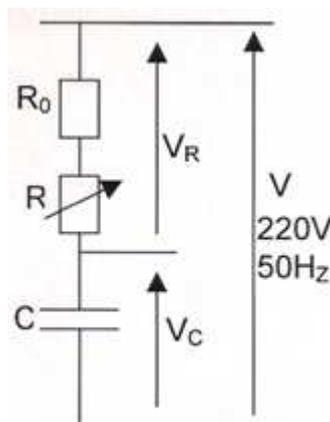


Figure 34 : RC déphaseur

Montage 2 : Relever simultanément à l'oscilloscope les oscillogrammes de V_{di} et de i_{di} . En déduire la tension d'amorçage du diac. Le montage est celui de la Figure 32.

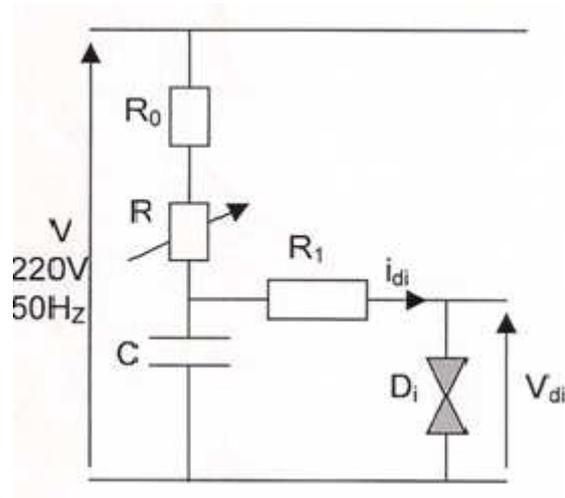


Figure 35 : Circuit RC déphaseur plus diac.

Montage 3 : Régler R pour avoir un angle de retard à l'amorçage de $\theta_a = \pi/2$. Visualiser et relever la tension V_{Ch} aux bornes de la charge et du triac V_T . Le schéma de montage est celui de la Figure 30.

Attention : pour des raisons de sécurité, le montage sera alimenté à travers un transformateur d'isolement 220/220V, tout autotransformateur à exclure (non isole du réseau).

Déterminer à l'oscilloscope les angles d'amorçage θ_a et de conduction α du triac pour les positions extrêmes du potentiomètre R.

Interprétation de fonctionnement : faire une analyse de fonctionnement du réseau déphaseur RC plus diac à l'aide d'un diagramme vectoriel des tensions. Interpréter le dispositif à l'aide des oscillogrammes de V , V_C , V_{Ch} disposés sur le même repère $V = f(t)$ ou $V = g(\theta)$

Comment peut-on mesurer la valeur de V_{cheff} ?

Quelle est la valeur de V_{chmoy} ? Expliquer.

INDICATIONS : On peut mesurer V_{cheff} à l'aide d'un voltmètre ferromagnétique ou d'un voltmètre numérique étalonné efficace vraie mais pas avec un voltmètre magnétoélectrique avec redresseur car V_S n'est pas sinusoïdale. Un voltmètre pour tension continue donnerait une valeur moyenne nulle. Le montage n'est pas redresseur. C'est un rhéostat électronique "à faible dissipation".

6-4 Caractéristique des thyristors et triacs

SYMBOLES	DEFINITIONS
di/dt	Vitesse critique de croissance de courant à l'état passant (thyristor et triac)
dv/dt	Vitesse critique de croissance de la tension à l'état bloqué (thyristor ou triac)
I_{DM}	Courant de crête à l'état bloqué d'un thyristor
I_{DRM}	Courant de crête à l'état bloqué d'un triac
I_{GT}	Courant d'amorçage par la gâchette d'un thyristor ou d'un triac
I_H	Courant continu hypostatique d'un thyristor ou d'un triac
I_O	Courant moyen à l'état passant d'un thyristor
I_L	Courant d'accrochage d'un thyristor ou d'un triac
I_R	Courant inverse continu d'un thyristor
I_{TM}	Courant de crête à l'état passant d'un thyristor ou d'un triac
$I_T (RMS)$	Courant efficace à l'état passant d'un thyristor ou d'un triac
I_{TSM}	Courant de surcharge de pointe accidentelle à l'état passant d'un thyristor ou d'un triac
T_j	Température de jonction
R_{thj-a}	Résistance thermique jonction-ambiance
R_{thj-h}	Résistance thermique jonction-radiateur
R_{thj-C}	Résistance thermique jonction-boîtier
V_{DRM}	Tension de pointe répétitive à l'état bloqué d'un thyristor ou d'un triac
V_{GT}	Tension de gâchette à l'amorçage
V_{RM}	Tension inverse de crête d'un thyristor
V_{RRM}	Tension inverse de pointe répétitive d'un thyristor
V_{TM}	Tension de crête à l'état passant d'un thyristor ou d'un triac
t_q	Temps de désamorçage par commutation d'un circuit d'un thyristor

Tableau 2 : Caractéristique des thyristors et triacs

CONCLUSION

Ce travail de mémoire a permis de concevoir un système qui assure l'éclairage automatique d'une enceinte ou d'un endroit lorsque la nuit tombe.

Notre système sera composé d'un module qui établira la liaison entre le secteur et la lampe tout en graduant la luminosité, proportionnellement à la luminosité naturelle captée.

L'allumage et l'extinction des lampes se fait sans aucune intervention humaine, un capteur sera donc utilisé afin de détecter les différents seuils de tension pour l'allumage et l'extinction.

Selon la luminosité captée par la photorésistance, sa résistance varie linéairement de quelques dizaines d'ohms pendant le jour à un mégohm lorsqu'il fait nuit. Donc la tension délivrée à travers la photorésistance V_{ph} varie de 0 à 12 V. Cette tension sera comparée à la tension de référence pour pouvoir obtenir le signal d'attaque d'un interrupteur.

L'établissement de la liaison entre la source et la charge se fait par l'intermédiaire d'un interrupteur commandé. Il existe plusieurs interrupteurs électroniques commandés tels que les transistors, les thyristors, les GTO, les triacs, etc. Mais nous allons utiliser le triac puisqu'il présente l'avantage de pouvoir travailler sur les deux alternances d'une tension sinusoïdale.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Giuseppe MONTUSCHI, « Apprendre l'électronique en partant de zéro »
Edition Technique et Scientifique Françaises
- [2] HANSRUEDI.BÜHLER, Traité d'électricité, « Electronique de puissance » ; volume XV.
Année 1995
- [3] J.L. DALMASO, « Electronique de puissance – commutation », Collection DIA.
- [4] H.CATELAIN, P.JUOBERT, Mesures d'électronique Tome 2 « Composants
électroniques ».
- [5] A. P. MARLVINO, Ediscience international, « Principe d'électronique » Année 1996
- [6] J. C. Chauveau, G. Chevalier, B. Chevalier, « Memotech électronique – Composants »
Colletions.a.capilez.
- [7] SAID M'ze, cours production d'énergie, Ecole Normale Supérieur pour l'Enseignement
Technique (E.N.S.E.T).2010
- [8] www.datelec.fr/secteur
- [9] www.epsic.ch/cours/electronique
- [10] www.greyc.ensicaen.fr
- [11] www.bedwani.ch/electro
- [12] f.dichamp.pagesperso-orange.fr
- [13] daniel.robert9.pagesperso-orange.fr
- [14] michel.hubin.pagesperso-orange.fr

ANNEXES 01

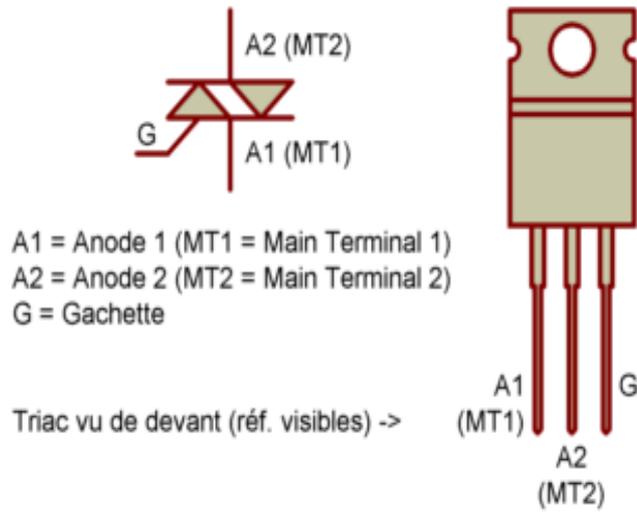


Figure 36 : Un triac et son symbole

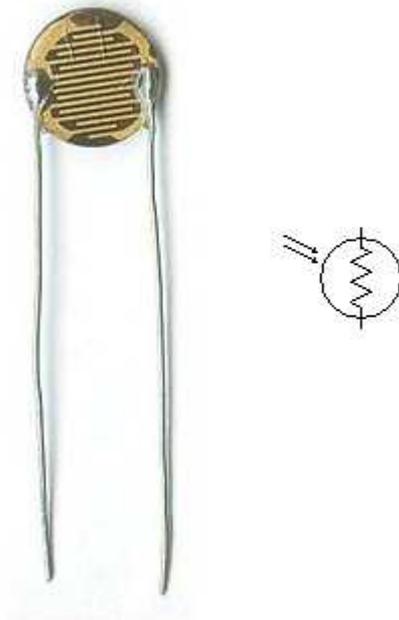


Figure 37 : une photorésistance et son symbole

ANNEXES 02

Autre montage fournissant le signal d'attaque du triac

Et si vous n'avez qu'un transistor PNP sous la main, il suffit de le câbler comme suit.

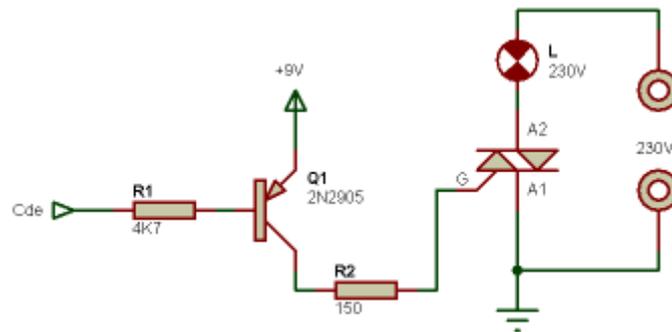


Figure38 : Montage fournissant le signal d'attaque du triac par un transistor PNP

Listes des figures

Figure 1 : Schéma bloc d'interrupteur automatique à allumage et extinction progressifs.....2

Figure 2 : Les paramètres du rayonnement solaire 6

Figure 3 : L'effet photovoltaïque..... 8

Figure 4: Principe de la conversion photon-électron dans un système a deux niveaux d'énergie..... 11

Figure 5 : Principe de fonctionnement d'une cellule du photovoltaïque 11

Figure 6 : Schéma d'une cellule élémentaire 12

Figure 7 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque 13

Figure 8 : Différente type module photovoltaïque 14

Figure 9 : Caractéristiques électriques courant -tension a température constant en fonction de l'éclairement..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 10 : Caractéristique de la puissance d'une cellule photovoltaïque. 17

Figure 11 : Courbe de la caractéristique d'une photorésistance en fonction de la luminosité 19

Figure 12 : Système de commende 20

Figure 13 : Thyristor : a), b)-structures schématiques ; c) circuit équivalent ; d) symbole graphique.. 21

Figure 14 : caractéristique de fonctionnement d'un thyristor..... 22

Figure 15 : Un exemple de circuit utilisant un thyristor..... 22

Figure 16 : Courbes des signaux traduisant les phénomènes à la fermeture 25

Figure 17 : a- thyristor bloqué sous tension directe ; b- circuit équivalent. 26

Figure 18 : a-symbole d'un triac ; b- circuit équivalent d'un triac ; c- caractéristique de fonctionnement ; d- type de fermeture commandée..... 27

Figure 19 : L'angle de retard à l'amorçage d'un triac aux bornes d'une charge résistive..... 29

Figure 20 : Circuit d'alimentation..... 30

Figure 21 : Allure de la tension redressée et de la tension d'alimentation continue 31

Figure 22 : Montage potentiométrique générant le signal de commande..... 32

Figure 23: Comparateur de tension 33

Figure 24 : Montage comparateur générant le signal d'attaque du triac..... 34

Figure 25: Courbe à la sortie du comparateur pour une tension de commande de 2.5V 35

Figure 26 : Montage fournissant le signal d'attaque du triac 36

Figure 27: Conception d'un interrupteur automatique 37

Figure 28: Réalisation sur plaquette d'essai..... 38

Figure 29 : Typon du circuit côté cuivre 41

Figure 30 : Aperçu du montage vue de haut..... 42

Figure 31 : Quadrant de fonctionnement des triacs 46

Figure 32 : a- symbole d'un diac ; b- circuit équivalent ; c- caractéristique de fonctionnement..... 48

Figure 34 : RC déphaseur..... 50

Figure 35 : Circuit RC déphaseur plus diac. 51

Figure 37 : une photorésistance et son symbole 55

Figure38 : Montage fournissant le signal d'attaque du triac par un transistor PNP 56

Table des matières

INTRODUCTION	1
SCHEMA BLOC	2
I : NOTION FONDAMENTALE DE L'ENSOLEILLEMENT	3
1-1 Généralité :	3
1-2 Etude théorique de l'ensoleillement :	4
1-2-1 Définition d'ensoleillement :	4
1-2-2 Description du soleil :	4
1-3 Les paramètres du rayonnement solaire :	4
1-3-1 Rayonnement solaire :	4
1-3-2 L'énergie solaire reçue sur terre :	5
1-3-2-1 Le rayonnement direct Rdir :	5
1-3-2-2- Rayonnement diffus Rdif :	5
1-3-2-3- L'albédo :	5
II : LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUE	7
2-1 Généralité :	7
2-2- Système photovoltaïque	8
2-2-1- L'effet photovoltaïque :	8
2-2-2- Cellules photovoltaïques	9
2-2-2-1- Bande de valence :	9
2-2-2-2 Principe photovoltaïque	9
a- Jonction N-P :	9
b- Production d'électricité :	10
c- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :	11
2-2-2-3 Les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :	13
2-2-2-4 Module solaire photovoltaïque :	13
2-2-2-6 Courant – tension :	14
2-2-3 Le rendement d'une cellule photovoltaïque η [%] :	15
2-2-4 Les facteurs de forme f [%] :	16
2-2-5 L'influence de l'éclairement solaire le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :	16
2-2-6 Puissance :	17
III : LES PHOTORESISTANCES	18
3-1 Définition :	18

3-2 Principe :	18
3-3 Géométrie :	18
3-4 Courbe de la caractéristique en fonction de la luminosité :	19
<i>IV : CONCEVOIR UN SYSTEME DE COMMANDE AUTOMATIQUE DES ECLAIRAGES</i>	20
4-1 Le thyristor	20
4-1-1 Définition :	20
4-1-2 Fonctionnement :	21
4-1-2-1 Etat bloqué : (ouvert ou non-conducteur).....	21
4-1-2-2 Etat passant : (fermé ou conducteur).....	22
4-1-3 Commutation :	23
4-1-3-1 Fermeture :	23
4-1-3-2 Ouverture :	25
4-2- Le triac :	27
4-2-1 Définition :	27
4-2-2 Fonctionnement :	28
4-3 Circuit de commande :	29
4-3-1 La partie puissance :	29
4-3-2 Partie commandent :	30
4-3-2-1- Alimentation continue :	30
4-3-2-2- Tension de commande :	32
<i>V- Essai et Réalisation :</i>	38
5-1 Essai sur plaquette d'essai :	38
5-2 Identification des composants :	39
5-3 Tableau des différents composants :	40
5-4 Réalisation du circuit imprimé	40
<i>VI- IMPLICATION PEDAGOGIQUE</i>	43
6-1 - Introduction :	43
6-2 Thème 01 : Etude d'un thyristor	43
6-2-1-En salle :	43
6-2-2- Au Laboratoire:	44
6-3 Thème 02 : Etude d'un triac et d'un diac	45
6-3-1 En salle :	45
1- Définition.....	46
6-3-2 Au Laboratoire :	50

6-4 Caractéristique des thyristors et triacs	52
CONCLUSION	53
BIBLIOGRAPHIE.....	54
ANNEXES 01.....	55
ANNEXES 02.....	56