

***DEPARTEMENT DE PHYSIQUE-CHIMIE***

**Master EFTIS Centre de Nice**



## **TRAVAUX PRATIQUES DE PHYSIQUE**

### **ETUDE DE CAPTEURS APPLICATIONS.**

**Responsable des travaux pratiques : Didier ORLANDI**

**Email : [Didier.orlandi@unice.fr](mailto:Didier.orlandi@unice.fr)**

**Plate-forme de formation à distance :**

**<http://leader.iufm.unice.fr/>**

# I. Etude de Capteurs.

## A. Introduction.

**L**es capteurs sont des composants qui permettent de détecter une grandeur physique (température, pression, flux lumineux, déplacement, champ magnétique....) et de la transformer en une grandeur électrique (tension, courant).

Les capteurs sont les premiers éléments d'une chaîne de mesures. Une chaîne de mesures est généralement constituée par :

- ❑ un capteur
- ❑ un module de traitement de l'information
- ❑ un module permettant la visualisation ou l'enregistrement du signal

La connaissance du signal de la grandeur électrique fournie par la chaîne de mesures apporte donc toute l'information nécessaire pour mesurer la grandeur physique ou détecter ses variations.

Afin de faciliter l'exploitation des résultats, la plupart des capteurs de mesures sont conçus pour qu'il existe une relation linéaire entre les variations de la grandeur physique  $\Delta F$  et les variations du signal électrique recueilli  $\Delta s$ . Le rapport de ces deux grandeurs définit la sensibilité du capteur  $S = \Delta s / \Delta F$ .

Lorsqu'il s'agit de détecter deux niveaux d'une grandeur physique (signal numérique) le capteur fournit simplement deux valeurs de la grandeur électrique associée. (ex : réception d'un signal d'une télécommande de TV à l'aide d'un phototransistor).

Les constructeurs de capteurs fournissent une documentation précisant leurs caractéristiques : sensibilité, temps de réponse, bande passante, détectivité, conditions d'utilisation....

## B. Rappels sur les composants optoélectroniques.

### 1. Bandes d'énergie dans les solides.

Dans un solide cristallin les électrons se répartissent sur des bandes d'énergie permises selon la statistique de Fermi-Dirac. Toutes les valeurs de l'énergie ne sont pas permises on dit qu'il y a quantification de l'énergie.

Les électrons les plus "liés" aux atomes du cristal sont dans des bandes qui correspondent aux plus faibles énergies.

Au zéro absolu (température  $T = 0 \text{ K} \approx -273 \text{ °C}$ ) seuls les niveaux inférieurs à une certaine valeur  $E_F$  (énergie de Fermi) sont occupés, la dernière bande pleine est appelée bande de valence et la première bande vide bande de conduction. La bande interdite est appelée le gap du matériau, sa largeur est notée  $E_g$ , elle s'exprime en électron volt (eV).

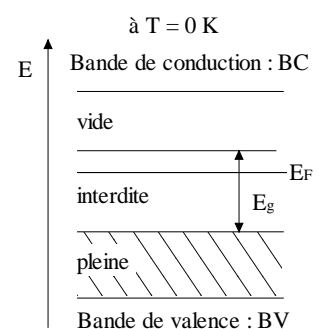


Figure 1 Bandes d'énergie dans un semi-conducteur à  $T = 0 \text{ K}$

Un cristal semi-conducteur de silicium est isolant à 0K car sa bande de conduction est vide et son énergie de gap est :  $E_g = 1 \text{ eV}$ .

Les semi-conducteurs ont, à  $T = 0 \text{ K}$ , une bande de valence pleine et une bande de conduction vide, ils peuvent être obtenus à partir d'éléments de la colonne IV de la classification périodique des éléments (Si, Ge), à partir de composés binaires de type III-IV (GaAs), de type II-VI (ZnSe) ou encore à partir d'alliages ternaires ou quaternaires.

### a) Effet de la température.

Si la température du semi-conducteur augmente celui-ci devient conducteur car des électrons acquièrent assez d'énergie pour "franchir" le gap et se retrouver dans la bande de conduction. L'électron qui peut se déplacer dans la bande de conduction (sous l'action d'un champ électrique) a "laissé" une place disponible (un trou) dans la bande de valence. On dit qu'il y a création d'une paire électron-trou; la conduction est assurée par l'électron qui se déplace dans la bande de conduction et le trou qui se déplace dans la bande de valence.

Pour un semi-conducteur intrinsèque (très pur) le nombre d'électrons dans la bande de conduction par unité de volume  $n$  est égal au nombre de trous par unité de volume dans la bande de valence.

Silicium à 300 K :  $n = p = 0,015 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3}$ .

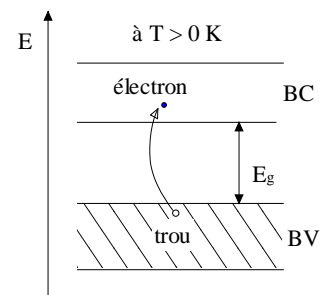


Figure 2 Création d'une paire électron trou sous l'effet de la température

### b) Effet d'un rayonnement.

Un rayonnement lumineux de fréquence  $\nu$  est formé de photons, chaque photon a une énergie  $E$ .

$$E = h \nu = h c / \lambda$$

$E$  en Joules

$h$  constante de Planck =  $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

$\nu$  fréquence du rayonnement en Hz.

$c$  : vitesse de la lumière dans le vide  $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$

$\lambda$  : longueur d'onde du rayonnement dans le vide.

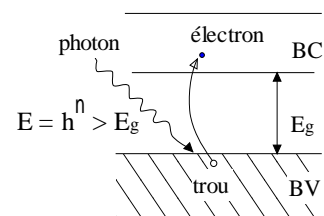


Figure 3 Absorption d'un photon par un électron

Si l'énergie d'un photon est supérieure ou égale à l'énergie du gap du semi-conducteur, un électron de la bande de valence peut "absorber" un photon et "passer" dans la bande de conduction.

$$E \geq E_g$$

ou

$$\lambda \leq h c / E_g = \lambda_s$$

$\lambda_s$  est appelée longueur d'onde de seuil . Si la longueur d'onde du rayonnement  $\lambda$  est inférieure à la longueur d'onde de seuil il peut y avoir création de paires électron trou dans le semi-conducteur.

## 2. La jonction PN.

La jonction PN permet d'utiliser des photons pour produire un courant électrique.

### a) Semi-Conducteur de type N.

On obtient un semi-conducteur de type N en ajoutant au semi conducteur intrinsèque des atomes donneurs d'électrons. On dit alors que le semi-conducteur est dopé. Pour doper un cristal semi-conducteur de silicium on introduit, à raison de 1 pour  $10^6$ , des atomes appartenant à la V<sup>ème</sup> colonne de la classification périodique (N azote, P phosphore). Chaque atome donneur apporte un électron supplémentaire qui augmente la concentration en électrons  $n$  dans la bande de conduction.

Pour un semi-conducteur de type N : la concentration en électrons est très supérieure à la concentration en trous  $p$  :

$$n \gg p \text{ pour SC de type N}$$

Les porteurs majoritaires sont de type N.

### b) Semi-Conducteur de type P.

Pour un semi-conducteur de type P le dopage s'effectue avec des atomes accepteurs d'électrons. Le dopage accroît la concentration en trous et l'on a :

$$p \gg n \text{ pour SC de type P}$$

Les porteurs majoritaires sont de type P.

exemple de semi-conducteur de type P : silicium dopé avec du Bore ou de l'Aluminium Al.

### c) Jonction PN.

Une jonction PN (Figure 4) est fabriquée en juxtaposant deux régions de semi-conducteurs de types différents. Les diodes sont réalisées à partir d'une jonction PN.

A l'équilibre thermodynamique, les électrons et les trous se sont recombinés au voisinage de la jonction en créant une zone dite de déplétion comportant des sites (fixes) chargés positivement dans la zone N et des sites (fixes) chargés négativement dans la zone P. Dans cette zone règne un champ électrique qui s'oppose au passage des porteurs majoritaires et donc une barrière de potentiel s'établit entre la région P et la région N.

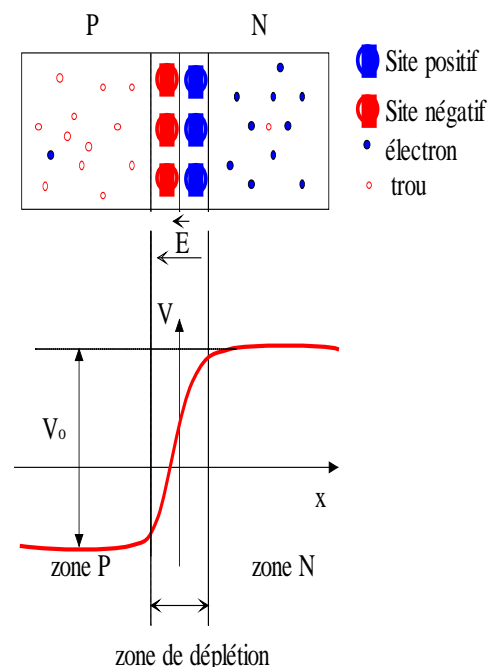


Figure 4 Jonction PN

## (1) Jonction polarisée en inverse.

Comme indiqué sur la Figure 5, on augmente le potentiel de la zone N par rapport à la zone P. Les porteurs majoritaires ne peuvent passer à travers la jonction, seuls les porteurs minoritaires (créés par l'agitation thermique) peuvent la traverser. Un très faible courant  $I_0$  traverse la jonction lorsqu'elle est polarisée en inverse,  $I_0 \approx 10^{-10}$  A.

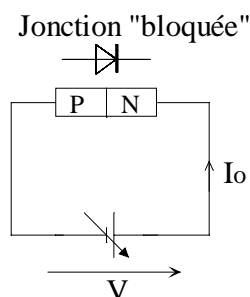


Figure 5 Jonction PN (ou diode) polarisée en inverse.  $I_0$  est très faible.  $I_0 \approx 10^{-10}$  A.

## (2) Jonction polarisée en direct.

En polarisant la jonction PN en direct (sens de P vers N) on diminue la barrière de potentiel  $V_b$ , les porteurs majoritaires peuvent traverser la jonction. Le courant  $I$  à travers la jonction est égal au courant des porteurs majoritaires  $I'$  moins le courant des porteurs minoritaires  $I_0$ . Il s'écrit :

$$I = I' - I_0 = I_0 \exp\left[\frac{eV}{kT}\right] - I_0 = I_0 \left( \exp\left[\frac{eV}{kT}\right] - 1 \right)$$

avec :

- $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C (charge élémentaire)
- $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K (constante de Boltzmann)
- $T$  température de la jonction en Kelvin
- $V$  tension aux bornes de la jonction en volt
- $I_0$  courant dû aux porteurs minoritaires

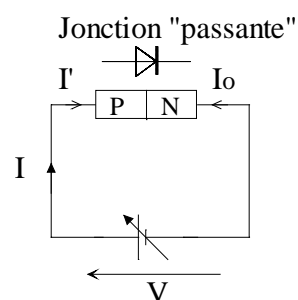


Figure 6 Jonction polarisée en direct :  $I = I' - I_0$ .

La relation  $I = f(V)$  représente l'équation de la caractéristique d'une diode.

A la température ambiante et pour une tension  $V > 0,1$  volt le terme exponentiel est très grand devant 1 et l'on peut écrire :

$$I = I_0 \exp\left[\frac{eV}{kT}\right] \quad (\text{si à } T = 300 \text{ K } V \geq 0,1 \text{ volt})$$

## d) La photodiode.

### (1) Principe de fonctionnement.

Une photodiode est formée par une jonction PN (Figure 7). Un photon de longueur d'onde  $\lambda$  inférieure à la longueur d'onde de seuil  $\lambda_s$  peut créer une paire électron-trou dans la zone de déplétion. L'électron et le trou sont alors séparés par le champ électrique, il y a création d'un photo courant proportionnel au flux lumineux reçu. Lorsqu'on polarise la jonction en inverse le courant  $I$  qui traverse la jonction est égal à la somme du courant des porteurs minoritaires  $I_0$  et du photo courant  $I_p$  créé par le flux lumineux :

$$I = I_0 + I_p$$

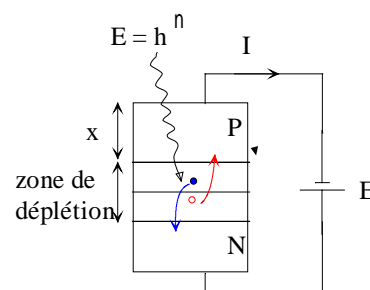


Figure 7 Photodiode polarisée en inverse

Si le flux lumineux est suffisamment important  $I_p \gg I_o$  et  $I = I_p$ , le courant inverse est proportionnel au flux lumineux reçu.

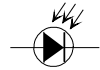


Figure 8  
symbole d'une  
photodiode

Remarques :

- La séparation des paires électron-trou est possible uniquement dans la zone de déplétion.
- Pour que le rayonnement incident atteigne la zone de déplétion, la zone éclairée doit être de faible épaisseur ( $x \sim \mu\text{m}$ ).
- On augmente le rendement en élargissant la zone de déplétion en introduisant une zone intrinsèque entre les zones P et N; on obtient alors une photodiode P.I.N..

## (2) Caractéristiques d'une photodiode.

Dans l'obscurité, la caractéristique de la photodiode (Figure 9) est identique à celle d'une diode classique ; le courant inverse est très faible à température ambiante ( $10^{-10}\text{A}$ ) et sa tension de seuil est voisine de 0,6 v.

Lorsqu'on éclaire la photodiode un photo courant proportionnel au flux reçu apparaît : en polarisation inverse la caractéristique de la diode est pratiquement horizontale. Le photo courant est pratiquement indépendant de la polarisation.

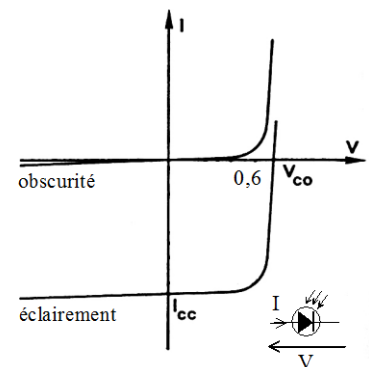


Figure 9 caractéristiques d'une photodiode

## (3) Polarisation en inverse d'une photodiode, point de fonctionnement.

Considérons le montage de la Figure 10 dans lequel la photodiode est polarisée en inverse. La loi des mailles nous permet d'écrire :

$$E = V_r - V_d = -RI - V_d$$

ou encore :

$$I = -(1/R)V_d - E/R$$

Dans le plan  $(V_d, I)$  l'équation obtenue représente une droite de pente  $-1/R$  coupant l'axe  $I$  en  $-E/R$ . C'est la caractéristique du dipôle constitué par le générateur  $E$  et la résistance  $R$ .

Comme  $I$  et  $V_d$  sont aussi imposés par la caractéristique de la photodiode, les valeurs possibles pour  $I$  et  $V_d$  sont obtenues à l'intersection des deux caractéristiques.

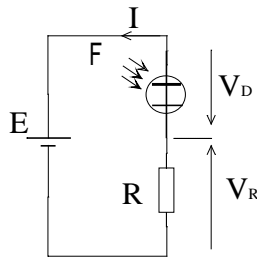


Figure 10 Photodiode polarisée en inverse.

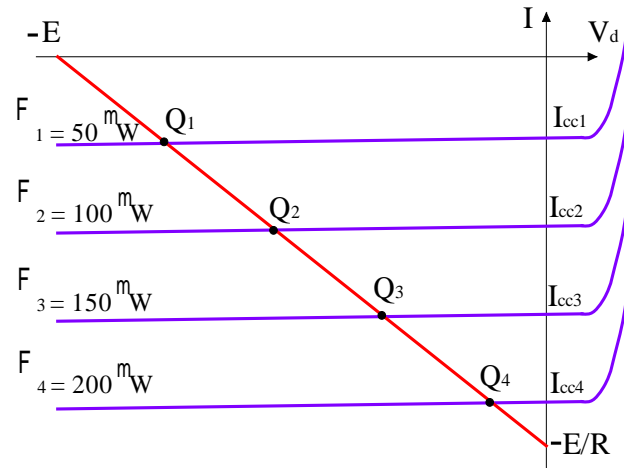


Figure 11 Exemple de points de fonctionnement pour une photodiode polarisée en inverse

Le point d'intersection  $Q$  des caractéristiques est appelé point de fonctionnement, ses coordonnées  $(I, V_d)$  donnent les valeurs de l'intensité  $I$  et de la tension  $V_d$  aux bornes de la photodiode. D'après la Figure 11 pour un flux lumineux  $\phi_1$  le point de fonctionnement est  $Q_1$ , si on double le flux lumineux  $\phi_2 = 2\phi_1$  le point de fonctionnement passe en  $Q_2$ .

Dans ce mode de fonctionnement l'intensité  $I$  est proportionnelle au flux reçu (en négligeant le courant dû aux porteurs minoritaires) :

$$I \propto \phi.$$

La tension aux bornes de la résistance  $V_R$  est aussi proportionnelle au flux lumineux.

#### (4) Sensibilité spectrale de la photodiode.

Si le flux lumineux est monochromatique de longueur d'onde dans le vide  $\lambda$  la sensibilité spectrale  $S(\lambda)$  de la photodiode est le rapport de la variation du photo courant  $\Delta I_p$  et de la variation de flux  $\Delta \Phi(\lambda)$  :

$$S(\lambda) = \frac{\Delta I_p}{\Delta \Phi(\lambda)}$$

La sensibilité d'une photodiode s'exprime en  $A.W^{-1}$ .

**Avantages de la photodiode** : rapidité, très bonne linéarité, fréquence de coupure élevée.

#### e) Le phototransistor.

Avant de décrire le principe de fonctionnement d'un phototransistor il faut avoir quelques notions sur le fonctionnement d'un transistor.

##### (1) Principe de fonctionnement d'un transistor.

## (a) Présentation d'un transistor de type NPN.

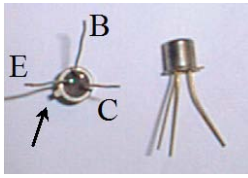


Figure 13 Brochage des transistors 2N1711.

Un transistor NPN est obtenu en dopant un monocristal de silicium de façon à obtenir deux zones N séparées par une zone P. Il y a donc deux jonctions PN dans un transistor. La zone centrale P est la **base (B)** du transistor, les deux autres zones

N sont l'**émetteur (E)** et le **collecteur (C)** du transistor.

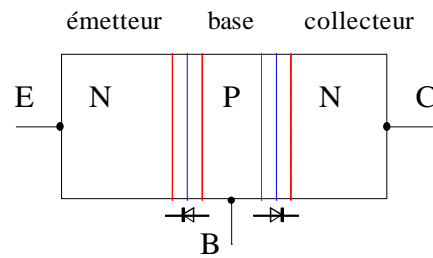


Figure 12 Schéma de principe d'un transistor NPN.

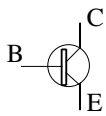


Figure 14  
Symbole du transistor NPN.

Le schéma de principe de la Figure 12 peut laisser croire que les zones E et C sont symétriques par rapport à la base, il n'en est pas ainsi en réalité : la jonction entre l'émetteur et la base est plus petite que la jonction entre le collecteur et la base.

On remarque que les deux jonctions du transistor sont opposées.

## (b) Fonctionnement du transistor NPN.

### (i) L'effet transistor.

Lorsqu'on polarise la jonction base émetteur dans le sens passant, un courant de base  $I_B$  circule de la base B vers l'émetteur E (Figure 15). Ce courant de base permet et commande le passage d'un courant collecteur  $I_C$  dirigé du collecteur C vers l'émetteur E. Grâce au courant de base  $I_B$  le courant collecteur  $I_C$  traverse la jonction CB qui est pourtant polarisée en inverse, ce courant est proportionnel au courant de base  $I_B$  : c'est l'effet transistor. On note  $\beta$  le rapport de  $I_C$  et de  $I_B$  :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

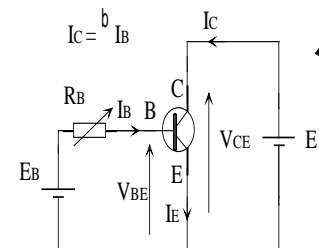


Figure 15 l'effet transistor.

$\beta$  est appelé "amplification ou gain" du transistor il est de l'ordre de 100 pour un transistor standard (2N1711 par exemple).

Remarques :

- La loi des nœuds permet d'écrire :  $I_E = I_C + I_B$  et donc  $I_E = (\beta + 1) I_B$ .
- Lorsque la jonction BE est passante sa tension reste voisine de 0,6 volt puisque c'est une diode. Si l'on impose une tension  $V_{BE}$  supérieure à la tension de seuil, le transistor est détruit.



- Afin d'éviter un échauffement excessif du transistor le courant  $I_C$  ne doit pas dépasser une valeur maximale donnée par le constructeur. Pour un transistor 2N1711  $I_{C_{max}} \approx 100 \text{ mA}$ .

### (ii) Transistor bloqué.

Regardons le schéma de la Figure 16 pour lequel la jonction entre la base et l'émetteur n'est pas polarisée dans le sens passant. Dans ces conditions le transistor ne permet pas le passage du courant entre les bornes C et E, la jonction collecteur base s'y oppose. On dit que le transistor est bloqué, son comportement entre le collecteur et l'émetteur est celui d'un interrupteur ouvert. La tension collecteur émetteur  $V_{CE}$  est égale à la tension  $E$ , le courant collecteur  $I_C$  est nul.

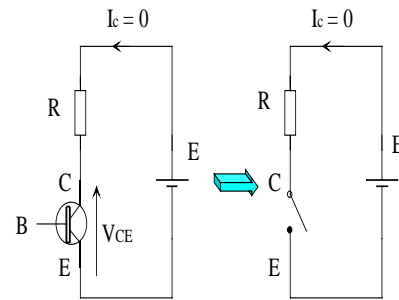


Figure 16 Transistor bloqué.

### (iii) Transistor fonctionnant en régime linéaire.

Dans ce régime de fonctionnement le courant  $I_C$  est proportionnel au courant  $I_B$ . Prenons le montage de la Figure 17, on constate que lorsqu'on augmente le courant  $I_B$ , le courant  $I_C$  augmente mais la tension  $V_{CE}$  diminue. Quand  $V_{CE}$  est voisine de zéro, l'intensité  $I_C$  est maximale et est imposée par la tension  $E$  du générateur et la résistance  $R$  :

$$I_{CM} = E/R$$

Le transistor fonctionnera en régime linéaire tant que :

$$0 < I_C < I_{CM}$$

ou

$$0 < I_B < I_{CM}/\beta$$

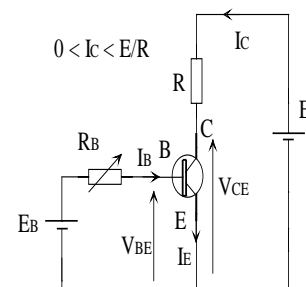


Figure 17 Transistor en fonctionnement linéaire.

Dans ce régime de fonctionnement  $V_{BE}$  reste voisine de 0,6 volt.

### (iv) Transistor saturé.

En imposant un courant de base supérieur à  $I_{CM}/\beta = E/(R\beta)$ , la tension  $V_{CE}$  est proche de zéro ( $\approx 0,2 \text{ V}$ ) le transistor est saturé (Figure 18). En supposant la tension  $V_{CE}$  nulle on peut assimiler le comportement du transistor entre les bornes C et E à un interrupteur fermé.

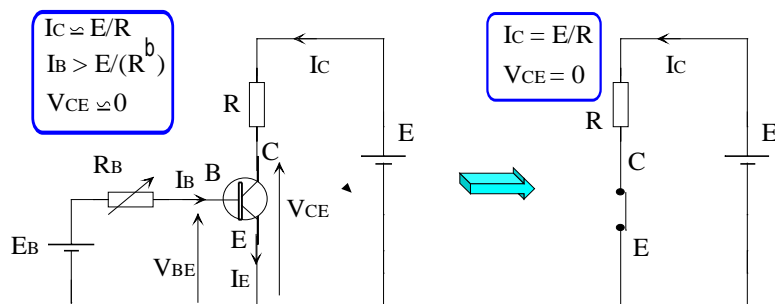


Figure 18 Transistor saturé.

### (c) Polarisation du transistor par un pont diviseur.

Pour les circuits précédents la jonction BE du transistor était polarisée avec un générateur de tension continue  $E_B$  et une résistance variable  $R_B$ . En pratique on utilise souvent le circuit de la Figure 19 pour polariser la jonction BE du transistor.

En supposant le courant de base  $I_B$  très inférieur au courant  $I_{pont}$  qui traverse le pont diviseur, la tension  $V_{BE}$  s'écrit :

$$V_{BE} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E$$

Lorsque  $V_{BE}$  est inférieure à 0,6 volt le transistor est bloqué.

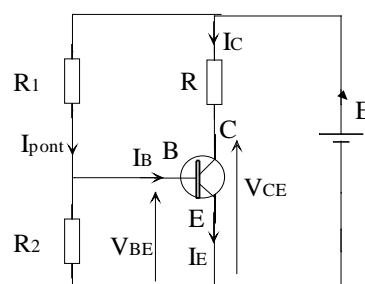


Figure 19 Polarisation du transistor à l'aide du pont diviseur.

### (2) Principe de fonctionnement d'un phototransistor.

On peut considérer un phototransistor comme un transistor de type NPN (par exemple) dans lequel le courant de base est remplacé par un photo courant. Des photons peuvent créer des paires électron trou dans la jonction base collecteur, cela induit une augmentation du potentiel de la base B par rapport à l'émetteur E. La jonction base émetteur devient passante et commande le passage d'un courant entre le collecteur et l'émetteur (comme pour un simple transistor).

Le phototransistor ne comporte que deux "pattes" qui sont le collecteur et l'émetteur; la base n'est pas connectée (Figure 20).

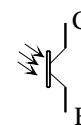


Figure 20  
Symbole du phototransistor.

Puisque la jonction base collecteur se comporte comme une photodiode polarisée en inverse, elle est traversée par le courant :

$$I_B = I_o + I_P$$

$I_o$  est le courant d'obscurité (dû aux porteurs minoritaires créés par l'agitation thermique).

$I_P$  est le photo courant créé par le flux lumineux arrivant sur le phototransistor.

Grâce à l'effet transistor et du fait que la base n'est pas connectée on a donc :

$$I_E = I_C = (\beta + 1) I_B = (\beta + 1) (I_o + I_P)$$

En négligeant le courant d'obscurité et en supposant  $\beta \gg 1$  on a :

$$I_C \approx \beta I_P$$

Un phototransistor est donc plus sensible puisque sa sensibilité spectrale  $S(\lambda)$  est multipliée par  $(\beta + 1) \approx \beta$  par rapport à une photodiode :

$$S(\lambda) = \frac{\Delta I_C}{\Delta \Phi(\lambda)} \approx \beta \frac{\Delta I_P}{\Delta \Phi(\lambda)}$$

Mais la relation entre  $I_p$  et le flux reçu  $\phi$  n'est pas parfaitement linéaire car  $\beta$  varie avec le flux et la température : la linéarité est nettement moins bonne qu'avec une photodiode.

D'autre part un phototransistor est beaucoup plus lent qu'une photodiode car ses deux jonctions introduisent des capacités parasites qui limitent son temps de réponse et donc sa fréquence de coupure  $f_c$  (en général :  $10 \text{ kHz} < f_c < 100 \text{ kHz}$ ).

Le montage de la Figure 21 donne un exemple d'utilisation d'un phototransistor. La tension  $V_s$  aux bornes de la résistance  $R$  varie (avec une mauvaise linéarité) avec le flux lumineux reçu par le phototransistor.

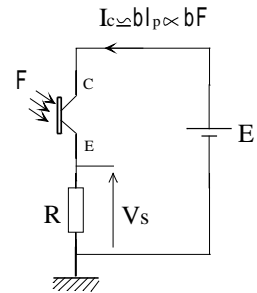


Figure 21 Utilisation d'un phototransistor.



## C. Quelques notions de photométrie.

Les unités lumineuses permettent de définir quatre quantités essentielles qui sont :

- ❑ le flux lumineux
- ❑ Eclairement
- ❑ Intensité lumineuse
- ❑ Luminance

Il existe deux types d'unités pour exprimer ces grandeurs :

- ❑ Unités énergétiques : ces unités tiennent compte de l'énergie reçue quelle que soit la nature du détecteur.
- ❑ Unités visuelles : pour ces unités l'œil est le détecteur, ces unités sont liées à la sensibilité spectrale de l'œil :  $400 \text{ nm} < \lambda_o < 750 \text{ nm}$ .

### 1. Définition de l'angle solide.

L'angle solide  $d\Omega$ , sous lequel on voit une surface simple  $dS$ , à partir d'un point origine  $O$ , est défini par :

$$d\Omega = \frac{\vec{dS} \cdot \vec{u}}{r^2}$$

avec :

- $r$  distance  $OM$
- $\vec{u}$  vecteur unitaire porté par la droite  $OM$
- $\vec{dS}$  vecteur normal à la surface et de norme  $dS$
- $\theta$  l'angle entre les vecteurs  $\vec{u}$  et  $\vec{dS}$

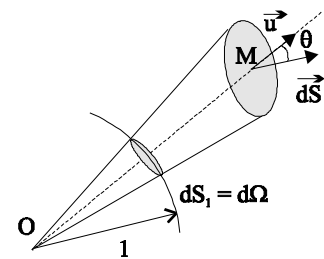


Figure 22 Angle solide

L'angle solide s'exprime en stéradians : Sr.

On remarque que l'angle solide  $d\Omega$  sous lequel on voit la surface  $dS$  s'identifie à la surface découpée par le cône de centre  $O$  porté par la surface  $dS$  sur la sphère de centre  $O$  et de rayon unité. L'angle solide sous lequel on voit, à partir de son centre, une surface sphérique est :  $4\pi$  stéradian.

## 2. Flux lumineux émis par une source élémentaire.

Soit une surface élémentaire  $dS$  placée en un point  $O$ . On définit le flux lumineux émis par cette source, dans un angle solide  $d\Omega$  autour de la direction  $OM$  qui fait un angle  $\theta$  avec la normale à  $dS$  par :

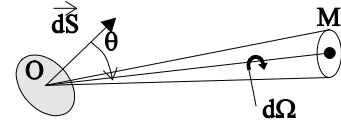


Figure 23 Flux lumineux émis par une source

$$d^2\phi = L \cos\theta dS d\Omega$$

Le facteur multiplicatif  $L$  est appelé la luminance de la source. Dans le cas où  $L$  est indépendant de  $\theta$ , on dit que la source satisfait à la loi de Lambert (Source Lambertienne).

$\phi$  s'exprime en **watt** et  $L$  en **W/m<sup>2</sup>/Sr**. (le <sup>2</sup> de  $d^2\phi$  est là pour rappeler qu'il faut faire deux intégrations pour obtenir  $\phi$ , l'une sur la surface, l'autre sur l'angle solide).

Si on utilise des unités visuelles le flux lumineux s'exprime en **lumen** : **lm**.

Notons  $\phi_w$  et  $\phi_{lm}$  les flux lumineux exprimés respectivement en watt et en lumen. Pour une source monochromatique de longueur d'onde dans le vide  $\lambda_o$  on définit l'efficacité lumineuse de la radiation par :

$$K(\lambda_o) = \frac{\phi_{lm}}{\phi_w}$$

$K(\lambda_o)$  s'exprime en **lm.W<sup>-1</sup>**.

Pour  $\lambda_o = \lambda_m = 555$  nm (jaune verdâtre) l'œil est le plus sensible,  $K(\lambda_o)$  passe par un maximum. Arbitrairement on fixe  $K(\lambda_m) = 683$  lm.W<sup>-1</sup>.

Pour tenir compte de la sensibilité de l'œil on utilise la courbe de la Figure 24 qui permet d'avoir une correspondance entre les watts et les lumens pour une longueur d'onde  $\lambda$  donnée du rayonnement. Cette courbe donne l'efficacité relative de la source  $V(\lambda_o) = K(\lambda_o)/K(\lambda_m) = K(\lambda_o)/683$  en fonction de  $\lambda_o$ .

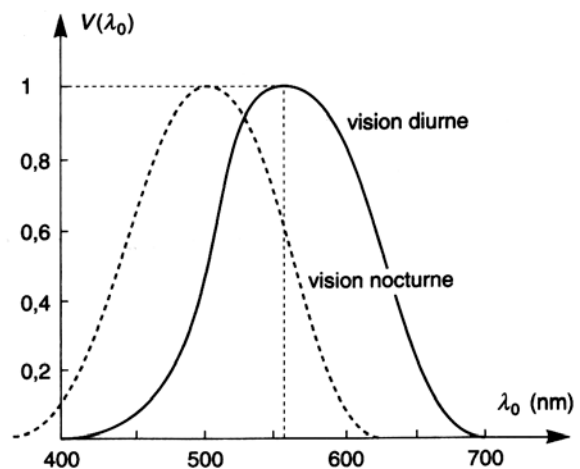


Figure 24 Sensibilité spectrale de l'œil

On a par exemple les correspondances suivantes :

pour  $\lambda_o = 555$  nm : 1 W = 683 lm

pour  $\lambda_o = 600$  nm : 1 W  $\approx$  430 lm

pour  $\lambda_o = 2000$  nm : 1 W  $\approx$  0 lm (on ne voit pas dans l'infrarouge)

Pour une source polychromatique donnée on tient compte de la contribution de chaque composante spectrale  $\lambda_o$  pour calculer le flux en lumens. On définit de la même manière l'efficacité de la source polychromatique :

$$K = \frac{\phi_{lm}}{\phi_w}$$

$K$  tient compte à la fois des différentes composantes spectrales de la source et de la sensibilité de l'œil. Pour passer des watts au lumen il faut connaître l'efficacité de la source lumineuse utilisée.

### 3. Intensité lumineuse d'une source.

L'intensité lumineuse d'une source est le flux rayonné par unité d'angle solide :

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} = \iint L \cos\theta dS$$

$I$  s'exprime en watt par stéradian : W/Sr.

Si la source satisfait à la loi de Lambert, l'intensité dépend de  $\theta$  suivant une loi en cosinus :

$$I(\theta) = \cos\theta \iint L dS = \cos\theta I_0$$

En unités visuelles l'intensité lumineuse d'une source s'exprime en  $\text{lm.Sr}^{-1}$  ou encore en candela : cd.

### 4. Diagramme de radiation.

La courbe  $I(\theta)/I_0$  en fonction de l'angle  $\theta$  est appelée indicatrice de la source ou diagramme de radiation.  $I_0$  représente  $I(0)$ . Ce diagramme est généralement représenté sous forme polaire en portant dans la direction  $\theta$  un vecteur représentatif de  $I(\theta)$ .

### 5. Éclairement d'une source.

L'éclairement de l'élément de surface  $dS'$  par la source  $dS$  (Figure 25), est le rapport :

$$\frac{d^2\phi}{dS'} = L \frac{\cos\theta \cos\theta' dS}{r^2}$$

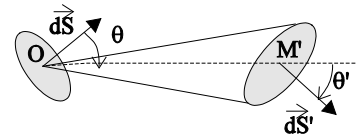


Figure 25 Éclairement d'une source

$r$  représente la distance  $OM'$ .

On en déduit l'éclairement total :

$$E = \iint \frac{d^2\phi}{dS'} = \iint L \frac{\cos\theta \cos\theta'}{r^2} dS$$

L'éclairement s'exprime en  $\text{W/m}^2$ .

Si la source  $dS$  est de petites dimensions, la distance  $r = OM'$  et  $\theta'$  varient peu lorsqu'on intègre sur la surface de la source. On a donc :

$$E = \frac{\cos\theta'}{r^2} \iint L \cos\theta dS = \frac{\cos\theta'}{r^2} I$$

L'éclairement produit sur une surface par une source de faible dimension varie en  $\cos\theta'$  et décroît en  $r^2$ . En unités visuelles l'éclairement s'exprime en  $\text{lm.m}^2$  ou en lux : lx.

Ordre de grandeur de l'éclairement : clair de lune : 0,01 lx, éclairage confortable 300 lx, laser HeNe 2mW : 3000 lx.

## Expérimentations.

### 6. Capteurs optiques.

#### Resistor a) La photorésistance (L.D.R. Light Dépendance



Figure 26 Photorésistance

(1) Mesurer avec un ohmètre la résistance de la photorésistance lorsqu'elle est placée dans l'obscurité puis à proximité d'une source lumineuse. La variation de résistance est-elle importante, la sensibilité de la photorésistance est-elle élevée ? Comment fonctionne une L.D.R ? Quels matériaux sont utilisés pour réaliser les photorésistances ?

(2) Comment varie la conductivité d'une L.D.R. lorsque la puissance lumineuse augmente ? La variation de  $R$  est-elle une fonction linéaire de la puissance lumineuse reçue ? Quelle serait l'allure de la caractéristique  $R = f(P)$  d'une LDR ? Proposer une méthode expérimentale permettant de tracer le graphe  $R = f(P)$ .

Le montage de la Figure 27 représente le schéma de principe de l'allumeur de réverbères.

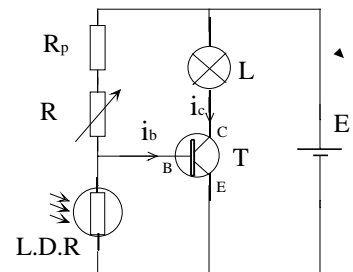


Figure 27 Le très connu allumeur de réverbères!

(3) Réaliser ce montage avec : T transistor NPN 2N1711,  $R_p = 6,8 \text{ k}\Omega$ , R boîte à décades  $\times 1000$ , L lampe 6V 100 mA, et  $E = 6\text{V}$ .

(4) Régler la valeur de la résistance R pour que la lampe L s'éteigne alors que la photorésistance est éclairée (éclairage ambiant). Vérifier que la lampe s'allume lorsque la L.D.R. est placée dans l'obscurité (utiliser un cache de lumière ou la main).

(5) Expliquer le fonctionnement du montage. Quel est le rôle de la résistance  $R_p$  ? En négligeant le courant de base  $i_b$  par rapport au courant  $i$  qui traverse la résistance R, calculer la valeur théorique de la résistance  $R_{ph}$  de la L.D.R. à partir de laquelle la lampe L s'allume.



(6) En supposant que le "gain" en courant du transistor est  $\beta = 100$ , calculer l'ordre de grandeur de la valeur minimale du courant de base  $i_b$  à partir de laquelle le transistor T est saturé. Quel est l'ordre de grandeur de la tension  $V_{BE}$  lorsque le transistor est saturé ?



(7) Comment peut-on modifier le montage pour que la lampe L s'allume lorsque la L.D.R. est éclairée ?



(8) Réaliser un montage équivalent à celui de la Figure 27 mais on n'utilisera pas de transistor, on emploiera un amplificateur opérationnel et un pont de Wheastone.

**Utilisation** : les photorésistances sont surtout utilisées pour détecter des variations de luminosité (obscurité éclairement), mais on peut noter que les L.D.R. au sulfure de cadmium sont utilisées en photographie pour régler les diaphragmes d'ouverture.

**Avantage** : sensibilité élevée ( grande variation de résistance avec le flux reçu)

**Inconvénients** : non linéarité de la réponse en fonction du flux, temps de réponse en général élevé, bande passante limitée, fréquence de coupure de l'ordre de 1 kHz (photorésistance standard).

## b) La photodiode.



### (1) Les caractéristiques de la photodiode.

(a) Visualiser à l'oscilloscope (fonction testeur de Figure 28 Photodiode

composants) la caractéristique de la photodiode lorsqu'elle est placée dans l'obscurité. Vérifier que sa caractéristique est alors celle d'une diode classique. Commenter l'évolution de la caractéristique lorsque la photodiode est éclairée.

(b) La photodiode est maintenant polarisée en inverse (Figure 29). Le générateur fournit une tension  $E$  continue réglable de 0 à 10 volt (ou 0 à 5 volt), la résistance  $R = 100 \text{ k}\Omega$  permet de mesurer, par l'intermédiaire du voltmètre  $V_1$ , l'intensité du courant qui traverse la photodiode. Le voltmètre  $V_2$  donne la tension aux bornes de la photodiode.

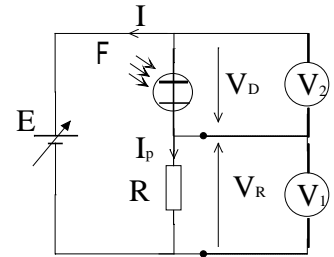


Figure 29 Photodiode polarisée en inverse

Le montage de la Figure 29 permet éventuellement de relever les caractéristiques de la photodiode  $I = f(V_D)$ .

Mesurer l'intensité du courant inverse  $I_p$  lorsque la photodiode est dans l'obscurité ( $\Phi = 0 \text{ W}$ ) puis lorsqu'elle est éclairée ( $\Phi = \text{cte}$  : éclairage constant produit par une lampe de bureau par ex). Que se passe-t-il si on fait varier l'éclairement de la photodiode ?

(c) Comment varie le courant inverse avec la tension inverse appliquée à la diode ?

(d) Donner l'allure des caractéristiques d'une photodiode  $I = f(V_D)$  avec la convention récepteur pour différents éclairagements. Expliquer simplement le principe de fonctionnement de la photodiode. Quelle est la grandeur proportionnelle au flux lumineux reçu ? Qu'appelle-t-on sensibilité de la photodiode ?

(e) Comment pourrait-on mesurer le flux reçu par la photodiode ? Que mesure un luxmètre ?



### (2) Utilisation de la photodiode en inverse.

Avec le montage de la Figure 29, choisir  $E = 10 \text{ V}$ . Placer la photodiode devant un écran de télévision ou l'éclairer avec à l'aide d'un stroboscope et observer l'allure de la tension  $V_R$  à l'oscilloscope. Commenter l'oscillogramme obtenu.



### (3) Utilisation de la photodiode en court-circuit.

La photodiode est court-circuitée, (la charge est nulle) lorsqu'on la connecte sur un ampèremètre (Figure 30) que l'on considère comme parfait (résistance interne nulle).

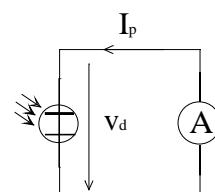


Figure 30 Photodiode avec une charge nulle

(a) Mesurer la valeur du photo courant  $I_p$  lorsqu'on place la lame d'éclairage le plus près possible de la photodiode. Ce



*courant est-il important ?*

**(b)** *Quel est le modèle de fonctionnement de la photodiode ?*

**(c)** *Lorsque l'éclairement varie comment se déplace le point de fonctionnement du montage ? Faire un graphique avec le réseau de caractéristiques de la photodiode.*



**(d)** *Amélioration du montage avec un amplificateur opérationnel.*

**(i)** *Réaliser le montage de la Figure 31 avec  $R = 100 \text{ k}\Omega$ .*

**(ii)** *Noter la valeur de la tension  $V_s$  lorsque la photodiode est placée dans l'éclairement ambiant. On notera  $V_{so}$  cette valeur.*

*Placer une lampe (12 V 40W par ex) à une distance  $d$  de la photodiode et noter la valeur de  $V_s$  correspondante. Recommencer pour quatre autres valeurs de  $d$  puis tracer le graphe :  $(V_s - V_{so}) = f(1/d^2)$ .*

*Quelle est l'allure du graphe obtenu ? Que peut-on en déduire en ce qui concerne la relation entre  $V_s$  et  $\Phi$  ?*

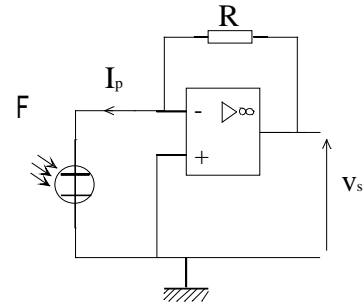


Figure 31 Utilisation d'une photodiode et d'un AO

**(iii)** *En considérant que la lampe est une source ponctuelle d'intensité  $I$  (Watts / stéradians) et que la surface utile de la photodiode est  $dS$ , établir l'expression du flux reçu par la photodiode en fonction de  $I$ ,  $dS$  et  $d$ .*



### **c) Utilisation d'une cellule solaire.**

Les photopiles sont des photodiodes qui fonctionnent sans polarisation extérieure, elles sont conçues plus particulièrement pour être utilisées en tant que générateurs dans un montage, c'est pour cela que leur surface active (jonction PN) est la plus grande possible ( pour mieux capter les photons).

Comme la tension aux bornes d'une photopile est faible, on associe souvent plusieurs photopiles en série et en parallèle pour réaliser un capteur solaire.

#### **(1) Utilisation en luxmètre.**

En remplaçant la photodiode du montage de la Figure 31, par une photopile (ou une association de photopiles on obtient le schéma de principe d'un luxmètre.

Réaliser le montage de la Figure 31 avec l'association de photopiles et en prenant  $R = 10 \text{ k}\Omega$ .

Un luxmètre disponible en TP permet de mesurer l'éclairement  $E$  reçu par l'association de photopiles.

Tracer sur papier millimétré le graphe donnant  $V_s$  en fonction de l'éclairement  $E$  reçu par le capteur solaire.

Conclusion ? Le capteur est-il linéaire ?



## (2) Rendement énergétique d'un capteur solaire.

(a) Utiliser le capteur solaire pour faire fonctionner une diode électroluminescente. Calculer l'ordre de grandeur du rendement énergétique de votre montage sachant que l'efficacité lumineuse de la source (lampe de bureau 40 W) est de l'ordre de  $600 \text{ lm.W}^{-1}$ .

(b) Pour un éclairement donné, déterminer expérimentalement la valeur de la résistance de charge  $R_c$  qui permet d'obtenir un rendement énergétique maximum. A éclairement constant on pourra tracer le graphe donnant la puissance  $P_{elec}$  fournie à la charge par le capteur en fonction de la valeur de la résistance  $R_c$ .

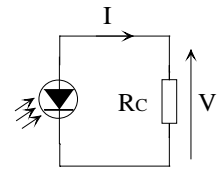


Figure 32 Photopile alimentant une charge  $R_c$ .

(c) Le capteur solaire peut être formé à partir d'une association parallèle de plusieurs branches comprenant des photopiles montées en série (Figure 33). A partir de la mesure de la tension à vide du capteur en déduire le nombre de photopiles montées en série dans une branche.

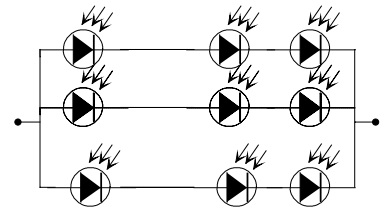


Figure 33 Association de photopiles

**Utilisation :** panneau solaire servant d'alimentation ou pour recharger des batteries, satellite, refuges en montagne, calculatrices...



## d) Le phototransistor.

Le phototransistor est un transistor dont le courant de base est créé par un flux lumineux.

(1) Réaliser le montage de la (Figure 34) avec  $R = 1 \text{ k}\Omega$  et  $E = 6 \text{ V}$ .

(2) Approcher une télécommande TV (ou utiliser le stroboscope) du phototransistor et observer la tension  $V_s$  à l'oscilloscope. Commenter et expliquer le fonctionnement du montage.

(3) Quel est le principe du phototransistor ? Quels sont les avantages et inconvénients par rapport à une photodiode ?

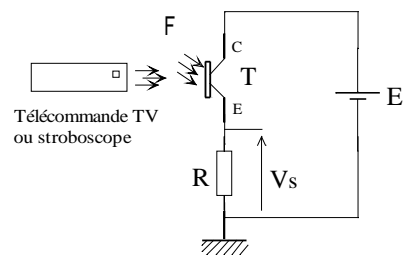


Figure 34 Utilisation d'un phototransistor



## e) Les barrettes à transfert de charge.

IL faut connaître leur principe de fonctionnement, Elles seront utilisées en TP d'optique pour réaliser des mesures d'interfranges. Une autre application possible : lecture d'un code barre.



## 7. Capteur de température : la thermistance.

Les thermistances sont formées à partir de mélanges de semi conducteurs polycristallins (oxydes métalliques  $\text{MgO}$ ,  $\text{MgAlO}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,...). En général leur résistance diminue quand la température augmente (coefficient de température négatif : CTN). L'expression de la résistance en fonction de la température est de la forme :

$$R(T) = R_0 \exp(B/T)$$

T est la température exprimée en Kelvin, le coefficient B est en général compris entre 3000 et 5000 K.

Les thermistances ont une sensibilité (de l'ordre de 10 fois) très supérieure à celle des capteurs à résistance métallique.

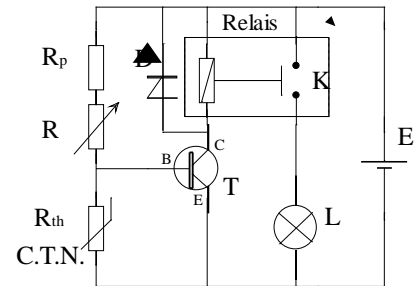


Figure 35 Simulation d'un régulateur de température avec une CTN.

a) Réaliser le montage de la Figure 35 avec :

$R_{th}$  thermistance 2 k $\Omega$ ,  $R_p = 10$  k $\Omega$ , R boîte de résistances x1000, Transistor NPN 2N1711, D diode 1N4007, Relais 12 V, L lampe 12 V et tension continue de 12 V.

b) Régler la résistance R à la valeur maximale qui permet de maintenir la lampe L allumée à la température ambiante. Placer la lampe à proximité de la thermistance de manière à ce que sa température augmente. Qu'observe-t-on ? Expliquer le fonctionnement du montage. Préciser le fonctionnement du relais et le rôle de la diode D.

c) Pourquoi ce montage simule-t-il un régulateur de température ? Quel est le composant qui joue le rôle du thermostat ?

d) Mesurer la valeur de la résistance de la C.T.N. lorsqu'elle est serrée entre vos doigts. Quel est l'ordre de grandeur de la variation de résistance par rapport à la température ambiante ?

e) Quelques questions sur la thermistance.

(1) Pour une température fixée la thermistance est-elle un dipôle linéaire ? Comment le vérifier expérimentalement ?

(2) Quelle est l'allure du graphe  $R = f(T)$  ? et celle du graphe  $R = f(1/T)$  ? Comment peut-on mesurer le coefficient B de la thermistance ?

(3) Comment peut-on expliquer physiquement que la résistance de la thermistance (CTN) diminue avec la température ? Si on utilise comme capteur thermique une résistance métallique (un métal : cuivre ,platine par ex) la résistance augmente avec la température, pourquoi ?



## 8. Capteur de force, utilisation de jauges de contrainte.

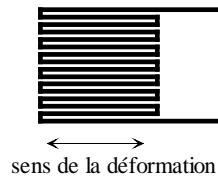


Figure 36 Jauge de contrainte résistive

Les jauges de contrainte utilisées sont des fils résistifs disposés de manière à former une trame de lignes parallèles. Ces jauges sont collées sur le support qui va être contraint de façon à ce que leur déformation soit de même direction que leurs lignes parallèles.

Sous l'effet d'une force, une des dimensions des jauges varie en entraînant une variation de leur résistance.

Sur le capteur de force disponible en TP (Figure 37) quatre jauges de contrainte sont montées en pont de Wheatstone et collées de part et d'autre d'un barreau métallique afin d'améliorer sa sensibilité et sa linéarité. Ce capteur de force est conçu pour être déformé en flexion. Sur le capteur sont indiquées : sa sensibilité  $s$  (pour 100 N,  $s = 2.36\text{mV/V}$ ) et son domaine d'utilisation.

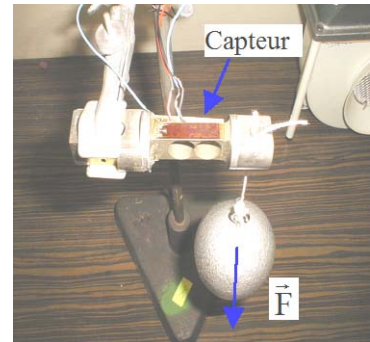


Figure 37 Capteur de force travaillant à la flexion

**a)** Observer le capteur de force et la forme des quatre jauges de contrainte. Alimenter le pont de Wheatstone avec une tension continue  $E = 10\text{ V}$  (fils rouge et noir) et placer un voltmètre (fils blanc et bleu) afin de mesurer la tension d'équilibre du pont  $V_d$ . (Utiliser un voltmètre permettant de mesurer des tensions inférieures au mV).

**b)** Appliquer une force  $F$  d'intensité connue sur le capteur en suspendant des masses marquées et tracer le graphe donnant les variations de  $V_d$  en fonction de  $F$ . Pour augmenter la sensibilité du montage on peut utiliser le montage de la Figure 38. avec  $R_1 = 100\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10\text{ k}\Omega$  et  $R_3$  (résistance réglable)  $= 200\text{ k}\Omega$ . La valeur de  $R_1$  est élevée car les résistances d'entrée de l'amplificateur différentiel doivent être suffisamment élevées afin de ne pas perturber le pont de Wheatstone formé par les quatre jauges.

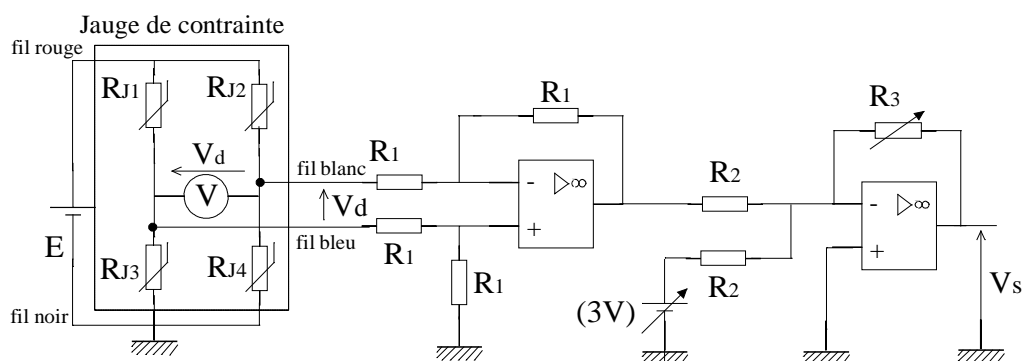


Figure 38 Jauge de contrainte avec amplificateur différentiel

**c)** Les indications portées sur le capteur de force sont-elles en accord avec vos mesures expérimentales ?



## 9. Capteur de pression.

Le capteur de pression MPX 2200 est formé à partir d'un élément piézorésistif réalisé à partir d'un cristal de silicium dopé. La Figure 39 donne le schéma interne du capteur de pression, l'élément piézorésistif est collé sur une enveloppe, un trou permet l'arrivée de l'air sur l'une de ses faces. Lorsqu'un élément piézorésistif est soumis à une variation de pression  $\Delta P$  sa conductivité et donc sa résistance varie.

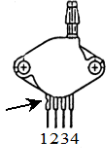


Figure 40 Boîtier du capteur du pression

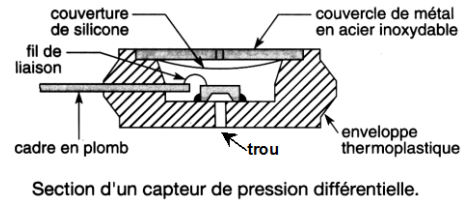


Figure 39 Capteur de pression piézorésistif

L'élément piézorésistif du capteur peut être assimilé à un pont de Wheatstone dont les résistances varient de façon différente avec la pression appliquée sur l'une de ses faces. Les variations de tension  $\Delta V_d$  recueillies sur le pont sont proportionnelles à la variation de pression  $\Delta P$ . La sensibilité du capteur utilisé est 0,2 mV/kPa (millivolts par kiloPascal) et la pression maximale que l'on peut mesurer est de 200 kPa (kilo Pascal) = 2 atm (atmosphère)

**a)** Réaliser le montage de Figure 41, en alimentant le pont de Wheatstone avec une tension continue  $E = +15V$ . On prendra :  $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 470\text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 100\text{ k}\Omega$  ( ou 1 M $\Omega$ ) et  $P$  potentiomètre de 10 k $\Omega$ .

Ajuster le potentiomètre  $P$  pour que la tension de sortie  $V_s$  soit voisine de 0 volt lorsque le capteur est soumis à la pression atmosphérique  $P_o$ .

**b)** Connecter un tube de verre à l'embout du capteur de pression par l'intermédiaire d'un tuyau en plastique. Introduire le tube de verre dans un éprouvette remplie d'eau et tracer le graphe donnant les variations de pression  $\Delta P = P - P_o$  appliquées sur le capteur, en fonction des variations de tension à la sortie du capteur. Ce graphe est-il linéaire?

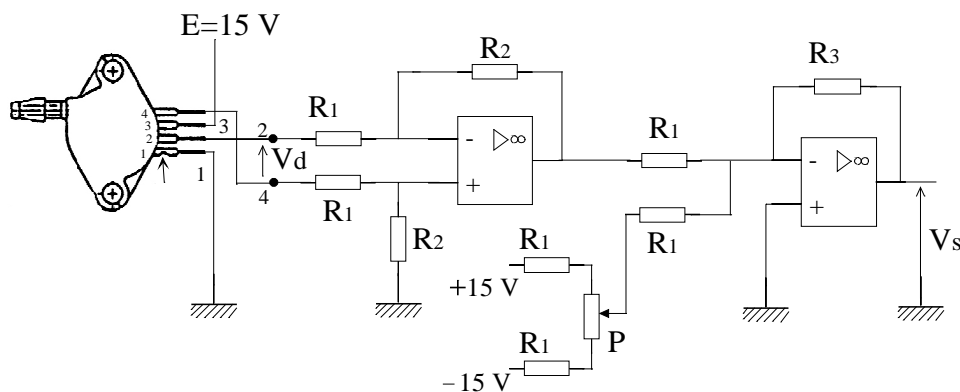


Figure 41 Capteur de pression avec amplificateurs

c) *Expliquer le rôle de chacun des étages amplificateurs. Quelle est la relation entre  $\Delta V_s$  et  $\Delta V_d$  ?*

d) *La masse volumique de l'air intervient-elle pour le calcul de  $\Delta P$  ?*



#### **10. Quelques autres capteurs utilisés en tp....**

**a) Capteur de Champ magnétique.**

*C'est un capteur réalisé avec une sonde de Hall. Il faut connaître le principe de l'effet Hall. Ces capteurs seront utilisés (Teslamètre) au cours du tp sur le champ magnétique.*

**b) Capteur sonore**

*Utilisé dans le tp son , il y a deux types de capteurs : le microphone électrostatique et le microphone électrodynamique.....*

**c) Le thermocouple**

*c'est un capteur de température, il sera utilisé dans le tp calorimétrie....*