

Le thermomètre à diode : principe, expérimentation, performances

par Bruno MOMBELLI
Lycée Pape-Clément, Pessac
TA Bordeaux

RÉSUMÉ

Ce T.P. montre comment mesurer une température à l'aide d'une diode.

1. INTRODUCTION

Le sujet de l'article proposé est bien connu, nous y revenons pour donner quelques compléments d'informations. La mise en évidence du phénomène physique est très simple, et nécessite peu de moyens techniques. Après avoir indiqué le principe physique, et donné les conditions pour lesquelles il existe une relation linéaire entre la température et la tension aux bornes d'une diode à jonction polarisée en direct, nous envisagerons le dispositif expérimental.

Il sera intéressant, dans une troisième partie, de relever les performances du dispositif, notamment la sensibilité à la température, et l'influence de divers paramètres sur les incertitudes expérimentales.

Le TP proposé peut être mis en place en classe de première S, option sciences expérimentales, et servir de transition entre les unités «Rayonnement et couleur» et «Conceptions et réalisations en électronique». Ainsi, nous verrons comment, avec quelques améliorations qui peuvent être étudiées dans le cadre du dernier module, nous pouvons réaliser simplement un thermomètre réalisant une transformation température-tension telle que $\theta(^{\circ}\text{C}) = 10 U$.

2. PRINCIPE DE LA MESURE

Considérons une diode à jonction, au silicium, au germanium, voire une LED. La caractéristique courant-tension, $I(V)$, d'une diode parfaite est modélisée par la relation de SCHOCKLEY,

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

où k est la constante de BOLTZMANN, T la température, exprimée en KELVIN, U la tension aux bornes de la diode, et I_s le courant inverse de saturation.

Si E_g est l'énergie du gap du matériau semi-conducteur qui a servi à fabriquer la diode, I_s peut être décrit par la relation :

$$I_s(T) = KT^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (2)$$

Cette expression est valable dans le cas où $kT \ll E_g$, en particulier à température ambiante pour les diodes à jonction classiques, puisque $E_g(\text{Si}) = 1,14 \text{ eV}$, $E_g(\text{Ge}) = 0,67 \text{ eV}$, et $E_g(\text{led rouge}) \sim 1,9 \text{ eV}$, à 300 K . K est une constante qui dépend du matériau utilisé.

Quand la diode est polarisée en direct, $\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) \gg 1$, par conséquent, $I \approx KT^3 \exp\left(\frac{E_g}{kT}\right) \exp\left(\frac{qU}{kT}\right)$. En passant aux logarithmes,

$$U = \frac{E_g}{q} - \frac{kT}{q} (3 \ln T + \ln K - \ln I) \quad (3)$$

Dans cette expression, qui donne la tension directe aux bornes de la diode en fonction de la température, $\ln T$ est à peu près constant, si T varie entre 0°C et 100°C . Par conséquent, si I reste constant, la relation $U(T)$ est quasi linéaire :

$$U = -aT + b \quad a, b > 0 \quad (4)$$

La relation (4) montre que la tension aux bornes de la diode décroît lorsque la température augmente. *a* représente la sensibilité de ce capteur de température.

Ordres de grandeur de a et b : $b = E_g / q$, donc, b , exprimé en Volt, a la même valeur que E_g , exprimé en électron-Volt. Ainsi, pour le silicium, $b \sim 1,1 \text{ V}$. Si I est de l'ordre de $1\text{-}10 \text{ mA}$, le terme de (3) entre parenthèses vaut environ $20\text{-}30$, donc $a \sim 2 - 3 \cdot 10^{-3} \text{ V/K}$.

Remarque : Il semble possible de déterminer à partir des caractéristiques tension-température la valeur du gap du matériau (en extrapolant U à $T = 0 \text{ K}$). En fait, il n'en est rien, car en pratique, il existe dans les diodes des courants de recombinaisons et des courants de fuite qui modifient légèrement la relation de SCHOCKLEY, et la constante b . Celle-ci est en général comprise entre E_g/q et $2E_g/q$. Ainsi, $b(\text{Si}) \sim 1\text{-}2 \text{ V}$.

3. EXPÉRIMENTATION

3.1. Schéma expérimental

Le dispositif expérimental est présenté à la figure 1. Un récipient, disposé sur une plaque chauffante, contient de l'eau dans laquelle sont placés la diode et un thermomètre de référence. On pourra éventuellement protéger la diode et les fils de connexion en les encapsulant dans une résine, une colle, ou du scotch.

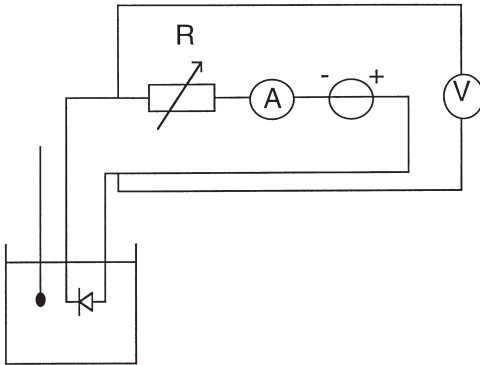


Figure 1

Remarque : Le dispositif de chauffage de la diode peut être remplacé par deux résistances bobinées de puissance que l'on placera à proximité de la diode. Un capot métallique entourant la diode et les résistances pourra limiter les pertes énergétiques.

3.2. Résultats expérimentaux

Nous noterons θ la température en degré Celcius, et T la température en Kelvin, $T = \theta + 273$. En ajoutant quelques glaçons dans le ballon, nous pouvons varier la température entre 0°C et 70°C .

On se limitera à 70°C pour éviter de fausses manipulations qui pourraient entraîner des brûlures.

Au cours de la manipulation, on veillera à garder I constant, en modifiant R .

Le voltmètre utilisé devra indiquer le chiffre correspondant au millivolt, pour une précision suffisante. Les résultats sont présentés dans les tableaux 1et 2.

θ	10	16	24	30	37	41	44	50	57	62	66	70
T	283	289	297	303	310	314	317	323	330	335	339	343
U_d	0,651	0,636	0,620	0,607	0,592	0,583	0,577	0,565	0,549	0,540	0,530	0,519

Tableau 1 : Diode au silicium , $I = 4 \text{ mA}$.

θ	10	16	23	27	36	40	47	50	55	60	65	68
T	283	289	296	300	309	313	320	323	328	333	338	341
U_d	1,936	1,917	1,895	1,880	1,858	1,846	1,828	1,819	1,804	1,789	1,773	1,762

Tableau 2 : Led rouge, $I = 4 \text{ mA}$.

L'élève pourra utiliser un tableur-grapheur (ou du papier millimétré) pour tracer les caractéristiques $U(T)$ qui sont représentées à la figure 2. Comme le prévoit le modèle proposé, les points expérimentaux peuvent être «fittés» par des droites.

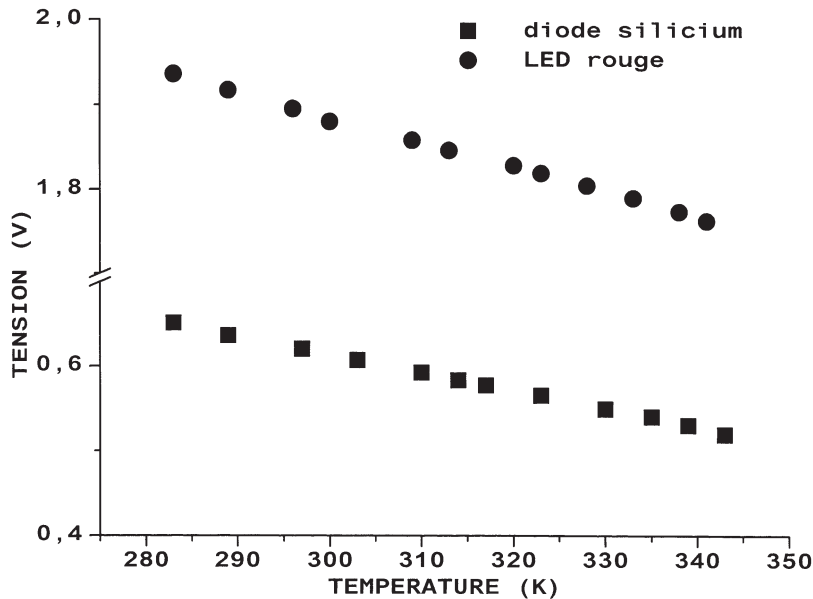


Figure 2

Une analyse en régression linéaire fournit les coefficients a et b , et le coefficient de corrélation r :

$$U = - 2,15 \cdot 10^{-3} T + 1,259, r = 0,999 \text{ pour la diode au silicium.}$$

$$U = - 2,96 \cdot 10^{-3} T + 2,77, r = 0,998 \text{ pour la led rouge.}$$

Ces valeurs expérimentales concordent avec celles du modèle. Comme on peut le remarquer $U(T = 0)$ est légèrement supérieur à Eg/q , comme on s'y attendait.

4. PERFORMANCES DU DISPOSITIF

4.1. Sensibilité à la température

La sensibilité du dispositif, dU/dT , varie faiblement avec la température (elle augmente très légèrement si T augmente). Cela se traduit sur la courbe expérimentale par le fait que les points sont pratiquement alignés sur une droite. Cette sensibilité (quelques mV par Kelvin) est très élevée.

En effet, dans le cas des thermomètres à dilatation, les coefficients de dilatation thermique des liquides usuels sont inférieurs à $10^{-4} / K$.

De même, le pouvoir thermoélectrique d'un thermocouple est d'environ $0,01-0,1 mV/K$.

En revanche, la sensibilité des capteurs de température à variation de résistance (sonde à résistance de platine, ou capteurs à semi-conducteur de type CTN) est souvent du même ordre de grandeur, voire supérieure, à celle du capteur à diode.

4.2. Influence de la variation de l'intensité du courant

Si la diode est polarisée en direct, une faible variation de l'intensité du courant n'a pratiquement aucune influence sur la tension mesurée, car la caractéristique $I(U)$ est presque verticale.

Pour s'en convaincre, considérons la résistance dynamique de la diode r_d . Si $r_d \approx 20 \Omega$, $\Delta U \approx 20 \Delta I$. Si $\Delta I = 0,1 mA$, $\Delta U = 2 mV$, soit une incertitude en température inférieure à $1 K$. Or, il n'est pas difficile de maintenir un courant de quelques mA , à $0,1 mA$ près.

Pour garder une intensité stable dans le circuit, et pratiquement indépendante de U_d , il est souhaitable d'avoir un générateur qui délivre une tension d'une dizaine de Volt, et une résistance série de quelques $k\Omega$.

5. AMÉLIORATIONS ÉVENTUELLES :

CIRCUIT ÉLECTRONIQUE PERMETTANT D'AVOIR $U = 10 \theta$

Aux bornes de la diode, la tension est de la forme $U_d = -aT + b = -a\theta + U_{ref} \cdot U_{ref}$, la tension dite de référence, est égale à la tension aux bornes de la diode quand $\theta = 0$. On veut concevoir un montage réalisant la transformation $U = 0,1 \theta$. Dans un premier temps, à la suite du capteur (diode), il faut placer un module soustracteur pour effectuer l'opération $U_d - U_{ref} = -a\theta$.

Puis, à la suite du soustracteur, un montage amplificateur inverseur fournira une tension proportionnelle à θ , avec un rapport de proportionnalité égal à 0,1.

Le schéma général est présenté à la figure 3.

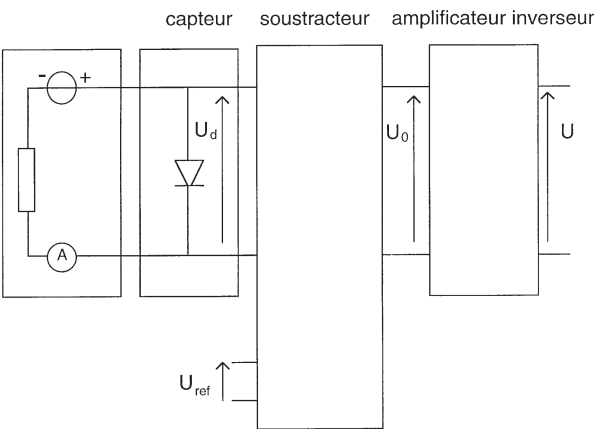


Figure 3

5.1. MODULE SOUSTRACTEUR

Considérons le montage représenté à la figure 4.

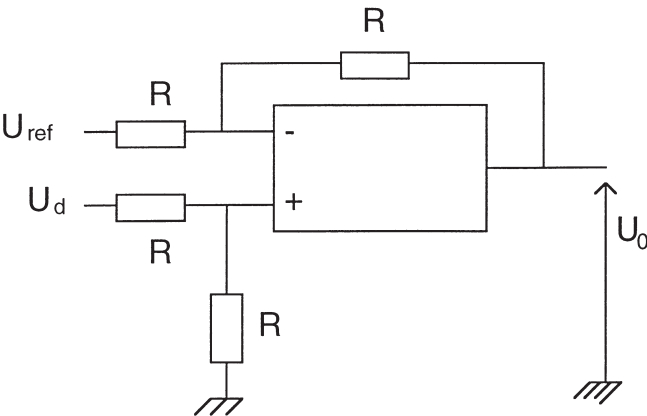


Figure 4

Ce montage fournit la tension $-\alpha\theta$. Toutefois, il est possible qu'il y ait des interactions parasites entre le module soustracteur et le capteur, ou le montage fournissant la tension de référence U_{ref} . Il est donc souhaitable d'ajouter, en amont du soustracteur, deux montages suiveurs.

La tension de référence doit pouvoir être réglable pour adapter le système au capteur. Par exemple, $U_{ref} \approx 0,6 - 0,7 \text{ V}$ pour une diode au silicium, et $U_{ref} \approx 2 - 2,5 \text{ V}$ pour une led. Un montage potentiométrique (figure 5) effectue très simplement cette opération.

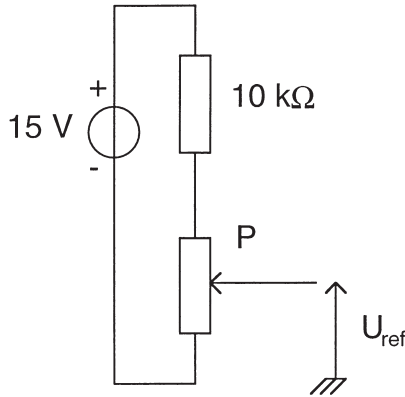


Figure 5

Comme $U_{ref} = 15 \frac{P}{P + 10}$, où P est la résistance (exprimée en $k\Omega$) d'un potentiomètre de $2k\Omega$, U_{ref} varie entre 0 et 2,5 V.

5.2. Le module amplificateur

Le module est un amplificateur inverseur (à AOP), de gain $\frac{U}{U_0} = \frac{R_2}{R_1}$.

Or, nous voulons $U = 0,1\theta$. Comme $U_0 = -\alpha\theta$,

$$\frac{R_1}{R_2} = 10\alpha \quad (5)$$

Nous avons vu que $a \approx 2-3 \text{ mV/K}$, par conséquent $R_1 \approx 0,02 - 0,03 R_2$. Si $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, R_1 est une résistance variable de $200-300 \Omega$ environ (R_1 peut être remplacée par un potentiomètre de 470Ω).

5.3. Schéma général

Le schéma général du montage est représenté à la figure 6. Notons que les générateurs de tensions continues ne délivrent que $\pm 15 \text{ V}$, pour limiter le matériel nécessaire à l'expérience.

Notons également qu'il existe des circuits intégrés qui contiennent 4 amplificateurs opérationnels, comme le LM348N de Texas Instrument, qui coûte 3,5 F environ. Un tel circuit simplifie énormément la réalisation pratique, qui peut ainsi tenir sur une plaquette de montage classique de lycée.

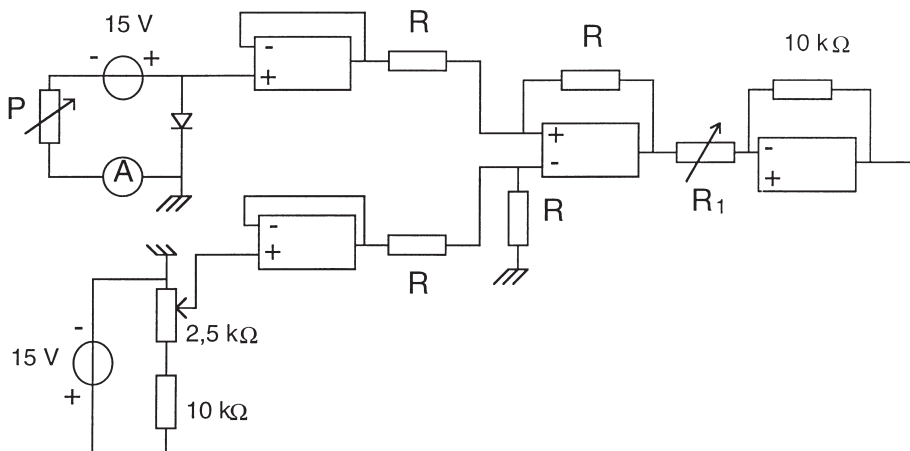


Figure 6

5.4. Les réglages

5.4.1. Réglage de P

Plonger la diode dans une eau à 0°C . Diminuer R_1 pour avoir un gain élevé. Quel que soit le gain du montage amplificateur inverseur, il faut avoir $U = 0$. On réglera P pour obtenir $U = 0$.

Remarque : Si on ne dispose pas d'une eau à 0°C , on réglera P à température ambiante, par exemple à 20°C . Sachant que $a \approx 2,5 \text{ mV/K}$, il faudra régler le potentiomètre de telle sorte que $U_0 = 50 \text{ mV}$ environ. Cette opération est évidemment moins précise que la précédente, mais donne des résultats de bonne qualité toutefois.

5.4.2. Réglage de R1

Plonger la diode dans une eau chaude, $\theta = 70^{\circ}\text{C}$. Régler R_1 pour avoir $U = 7 \text{ V}$.

Remarque : On pourra alors vérifier que la sensibilité de la diode est $a = \frac{R_1}{10 R_2}$.

Exemple : Dans le cas d'une diode au silicium, si $I = 4 \text{ mA}$, $U_d \approx 0,65 \text{ V}$ à $\theta = 20^{\circ}\text{C}$. Alors $U_{ref} = 0,71 \text{ V}$ si $a = 3 \text{ mV/K}$, $P = 500 \Omega$, et, si $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 300 \Omega$.

BIBLIOGRAPHIE

J. BERT : «*Physique des capteurs*», éd. Belin, 1989.

MATTHIEU : «*Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques*», éd. Masson, 1996.