

## Deux applications de l'amplificateur opérationnel : Réalisation d'un pH-mètre et d'une sonde thermométrique

par Gérard DÉPREUX et Roger BON  
ADASTA - UFR Sciences, 63177 Aubière Cedex

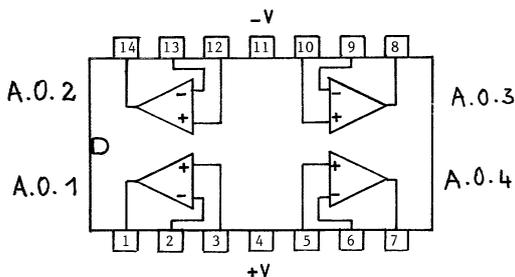
---

*Les deux réalisations que nous proposons sont des applications des connaissances apprises en classe de seconde en étudiant l'amplificateur opérationnel.*

*Ces montages nécessitent peu de composants électroniques ; par contre, nous devons utiliser une alimentation stabilisée symétrique + 15 V – 15 V et un voltmètre à affichage numérique.*

*Les amplificateurs opérationnels sont, soit le TL 081 (ou le LM 741) soit, mieux encore, un quadruple amplificateur opérationnel tel que TL 064, dont nous reproduisons le brochage en figure 1.*

*Notons que certains résistors doivent avoir des résistances égales, d'où la nécessité de les mesurer et de les apparier.*



**Figure 1**

**Note de la rédaction :** Ces projets pourraient servir de thème à des modules de physique pour les nouveaux programmes.

## 1. RÉALISATION D'UN pH-MÈTRE

### 1.1. Principe

Nous considérons la sonde de mesure comme une source de tension. Son rôle est de déterminer le potentiel des cations  $\text{H}_3\text{O}^+$ . Nous approcherons la différence de potentiel aux bornes de l'électrode par l'expression linéarisée :

$$V = a - b \times \text{pH}$$

où  $a$  et  $b$  sont des constantes qui dépendent de la nature et de la qualité de l'électrode utilisée, ainsi que de la température. Pour nos essais et réglages nous avons utilisé une électrode à iodure de potassium Schott Gerate n° 52.

Le synoptique du montage est le suivant (figure 2) :

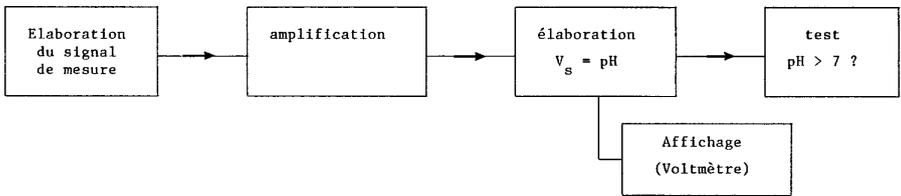


Figure 2

Le schéma fonctionnel nécessaire est donc le suivant (figure 3) :

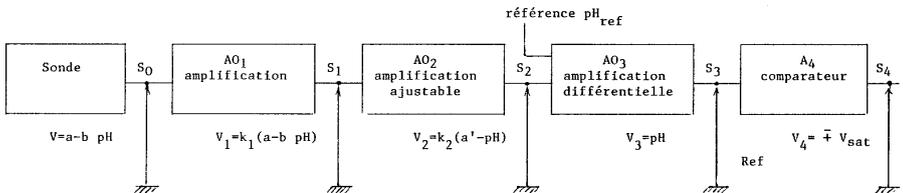


Figure 3

## 1.2. Réalisation

Nous utiliserons successivement les quatre amplificateurs opérationnels du TL 064, chaque étage aura un rôle que nous allons définir au cours de cette réalisation (figure 4).

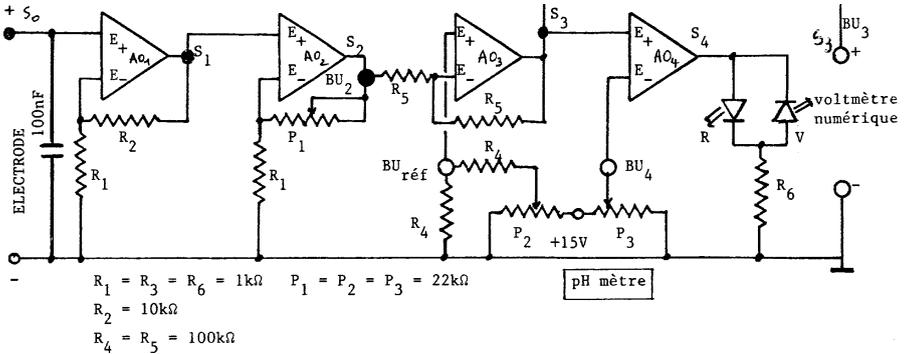


Figure 4'

### *Premier étage : Amplificateur opérationnel monté en amplificateur de tension non inverseur*

Nous appliquons la tension délivrée par l'électrode entre l'entrée  $E_+$  et la masse, l'autre entrée  $E_-$  de ce même amplificateur opérationnel est connectée à la masse au travers d'un résistor  $R_1$  de  $1\text{k}\Omega$  ; la contre réaction sortie entrée inverseuse est assurée par le résistor  $R_2$  de  $10\text{k}\Omega$ .

La tension de sortie délivrée par cet étage est de la forme :

$$V_{S_1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) [a - b \text{ (pH)}]$$

soit avec les valeurs choisies :

$$V_S = 11 [a - b \text{ (pH)}]$$

### *Second étage : Amplificateur opérationnel monté en amplificateur de tension non inverseur, avec réglage de l'amplification*

La tension  $V_{S_1}$  délivrée par l'étage précédent, est appliquée à l'entrée non inverseuse  $E_+$ , l'autre entrée inverseuse est à la masse au travers d'un résistor  $R_3 = 1\text{k}\Omega$  ; la contre réaction sortie-entrée inverseuse est assurée par le potentiomètre  $P_1$  de  $22\text{k}\Omega$  ; dont le réglage

permettra d'obtenir l'amplificateur en tension désirée afin d'avoir en sortie du pH-mètre une lecture directe du pH.

La tension de sortie de cet étage est :

$$V_{S_2} = \left(1 + \frac{P_1}{R_3}\right) V_{S_1}$$

$$V_{S_2} = \left(1 + \frac{P_1}{R_3}\right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) [a - b (\text{pH})]$$

que nous écrirons :

$$V_{S_2} = b \left(1 + \frac{P_1}{R_3}\right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left[\frac{a}{b} - \text{pH}\right]$$

Posons  $K = b \left(1 + \frac{P_1}{R_3}\right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$ ; en agissant sur  $P_1$ , nous réglerons plus tard la valeur totale de l'amplificateur en tension, afin d'avoir  $K = 1$ .

Mesurons entre la borne  $BU_2$ , placée en sortie de ce second étage, et la masse, la différence de potentiel pour un pH acide et un pH basique. (Prendre la précaution de placer  $P_1$  à mi-course afin de pouvoir faire les réglages ultérieurs).

Soit  $V_{\text{pH}_4}$  la valeur de la différence de potentiel pour une solution à  $\text{pH}_4$  et  $V_{\text{pH}_9}$ , celle pour une solution à  $\text{pH} = 9$ .

Nous pouvons écrire les équations suivantes :

$$V_{\text{pH}_9} = K \left(\frac{a}{b} - 9\right)$$

$$V_{\text{pH}_4} = K \left(\frac{a}{b} - 4\right) \quad K \text{ s'exprime en volt/pH}$$

Ce qui nous permet d'éliminer  $K$  et de calculer le rapport  $\frac{a}{b}$  :

$$\frac{a}{b} = \frac{4 V_{\text{pH}_9} - 9 V_{\text{pH}_4}}{V_{\text{pH}_9} - V_{\text{pH}_4}} = \text{pH réf. (exprimé en volt)}$$

que nous appellerons «potentiel de référence» (pH réf.).

Expérimentalement, nous avons relevé :

$$\text{à pH} = 9 \quad V_{S_2} = -1,20 \text{ V}$$

$$\text{à pH} = 4 \quad V_{S_2} = +1,50 \text{ V}$$

$$\text{d'où :} \quad \text{pH}_{\text{réf.}} = \frac{a}{b} = 6,78$$

**Troisième étage : Amplificateur opérationnel monté en amplificateur différentiel entre la tension délivrée par les deux étages précédents et celle définie ci-dessus à partir du  $\text{pH}_{\text{réf.}}$**

Cet étage nécessite deux couples de résistors identiques. Soit  $R_4$  les deux résistors égaux dans le circuit non inverseur. Un résistor  $R_4$  relie cette entrée à la masse, l'autre au point milieu d'un potentiomètre  $P_2$  de  $22 \text{ k}\Omega$ , connecté entre la borne + 15 V d'alimentation et la masse, afin d'appliquer à cette entrée le potentiel de référence  $V_{\text{réf.}}$ .

L'entrée inverseuse reçoit la tension  $V_{S_2}$  à travers le résistor  $R_5$  ; et la contre réaction est assurée par un autre résistor  $R_5$ .

Calculons la tension délivrée en sortie  $V_{S_3}$  par cet étage :

$$\frac{V_{\text{pH réf.}} - V_{E_+}}{R_4} = \frac{V_{E_+}}{R_4} \quad \text{soit} \quad V_{E_+} = \frac{V_{\text{pH réf.}}}{2}$$

D'autre part, l'amplificateur opérationnel étant idéal :

$$\frac{V_{S_2} - V_{E_-}}{R_5} = \frac{V_{E_-} - V_{S_3}}{R_5}$$

$$V_{S_3} = 2 V_{E_-} - V_{S_2}$$

$$\text{Or :} \quad V_{E_+} - V_{E_-} = 0 \quad \text{d'où} \quad V_{S_3} = 2 V_{E_+} - V_{S_2} = V_{\text{pH réf.}} - V_{S_2}$$

soit, en tenant compte de la définition de  $V_{\text{pH réf.}}$  :

$$V_{S_3} = \frac{a}{b} - V_{S_2} = \frac{a}{b} - K \left( \frac{a}{b} - \text{pH} \right).$$

Si dans l'étage précédent, nous pouvons faire  $K = 1$ , cela donne une tension de sortie  $V_{S_3}$  :

$$V_{S_3} = \text{pH}.$$

Un voltmètre connecté entre la sortie du troisième étage borne BU<sub>3</sub> et la masse devra, les réglages faits, indiquer directement la valeur du pH. Pour cela nous avons procédé aux réglages suivants :

- régler P<sub>2</sub> de manière à avoir entre la borne BU<sub>ref</sub> et la masse la tension V<sub>pH<sub>ref</sub></sub> calculée au paragraphe «Second étage» (ex. : 6,78 V),
- régler P<sub>1</sub> afin de rendre K = 1. Pour cela utilisons une solution tampon à pH = 7, nous voulons avoir :

$$V_{S_3} = V_{pH_7} = 7 \text{ V}, \text{ pour cela}$$

$$V_{S_3} = V_{\text{ref}} - \underline{K} (V_{\text{ref}} - 7)$$

En agissant sur P<sub>1</sub>, nous aurons K = 1 d'où :

$$V_{S_3} = 7 \text{ volts.}$$

Le pH-mètre est ainsi réglé et permet, outre son intérêt pédagogique, de mesurer avec une bonne précision le pH d'une solution. Ce montage peu coûteux n'a pas la prétention de rivaliser avec les pH-mètres de laboratoires ; il n'est autre qu'une application des montages utilisant les amplificateurs opérationnels pour réaliser une chaîne.

Notre pH-mètre atteint relativement lentement la valeur du pH de la solution, nous devons attendre, avant de lire, la stabilisation du voltmètre ; pour certaines valeurs du pH voisines de la valeur 7, il peut apparaître une instabilité, par suite de couplages parasites. Si nous voulons éviter les variations des indications, nous pouvons y parvenir en shuntant les bornes de sortie de l'électrode par un condensateur de 100 nF.

#### ***Quatrième étage : Amplificateur opérationnel, monté en comparateur de tension, pour indiquer la nature de la solution***

Nous connectons à l'entrée non inverseuse la tension V<sub>S<sub>9</sub></sub>, délivrée par l'étage précédent, et l'entrée inverseuse au point milieu d'un potentiomètre P<sub>3</sub>, branché entre + 15 V et la masse.

La sortie de cet amplificateur opérationnel est constituée par deux LED (une verte, une rouge) montées en sens inverse et en série avec un résistor de 1 kΩ (R<sub>6</sub>).

Réglons  $P_3$  de manière à avoir sur l'entrée  $E_-$  une tension de 7 V entre la borne  $BU_4$  et la masse.

Si  $V_{S_3} < 7$  V (solution acide)  $V_{E_+} < V_{E_-}$  : la tension de sortie de cet étage est  $V_{S_4} = -V_{\text{saturation}}$  ; la LED rouge s'allume et témoigne d'une solution acide.

Si  $V_{S_3} > 7$  V (solution basique)  $V_{E_+} > V_{E_-}$  : la tension de sortie de cet étage est  $V_{S_4} = +V_{\text{saturation}}$  ; la LED verte s'allume et témoigne d'une solution basique.

Cet étage permet sans aucun appareil de mesure, d'identifier le caractère basique ou acide d'une solution, il complète notre pH-mètre en utilisant l'amplificateur opérationnel en commutation.

**Remarque** : L'utilisation de ce pH-mètre pour la détermination du point d'équivalence lors du dosage d'une solution d'acide chlorhydrique à  $0,1 \text{ mol.l}^{-1}$  par une solution de soude à  $0,1 \text{ mol.l}^{-1}$ , a donné :

pour un prélèvement de solution acide en  $10 \text{ cm}^3$

$$V_{\text{eq}} = 10 \text{ cm}^3 \quad \text{pH}_{\text{eq}} = 6,9$$

## 2. RÉALISATION D'UN THERMOMÈTRE ÉLECTRONIQUE, AVEC LECTURE DIRECTE DES TEMPÉRATURES SUR UN VOLTMÈTRE NUMÉRIQUE DE LABORATOIRE

### 2.1. Principe

Nous utilisons comme élément sensible à la température une C.T.N. (Résistance à Coefficient de Température Négatif) dont la résistance est une fonction exponentielle de la température, selon la relation :

$$R^* = B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right)$$

La C.T.N. utilisée a une résistance  $R^* = 47 \text{ k}\Omega$  pour une température de  $25^\circ\text{C}$  soit  $298^\circ$  Kelvin ( $T_1$ ) ; son coefficient d'indice de sensibilité thermique vaut  $4\,400^\circ \text{ K}^{-1}$ .

Utilisons la variation de la résistance de la C.T.N. pour repérer les températures ambiantes. Pour une plage de température peu étendue, en

première approximation, nous pouvons adopter une variation linéaire de la résistance, donc assimiler à une droite la portion de la courbe exponentielle, sur un intervalle de température allant de 16°C à 25°C.

Nous prendrons comme équation de variation de la résistance  $R = -at + b$  puisque celle-ci est une fonction décroissante de la température : les mesures de  $R$  conduisent à :

$$R = 47 \text{ k}\Omega \text{ à } 25^\circ$$

et

$$R = 60 \text{ k}\Omega \text{ à } 19,5^\circ\text{C}$$

ce qui permet de calculer les constantes  $a$  et  $b$ , et d'obtenir la relation, où la résistance de la C.T.N. est exprimée en  $\text{k}\Omega$  :

$$R_{\text{k}\Omega} = -2,36 t + 106 .$$

Un autre problème se pose : nous alimentons l'amplificateur opérationnel sous les tensions + 15 V, or un tel composant délivre en sortie une tension de saturation toujours inférieure à sa tension d'alimentation.

Nous voulons lire sur le voltmètre des tensions supérieures à 15 V, puisque nous imposons que cet appareil donne directement sans calcul, par son affichage, la température ambiante dans la plage choisie.

Cela va nous conduire à faire un changement d'origine et à brancher le voltmètre de sortie non plus entre une sortie d'amplificateur opérationnel et la masse, mais entre cette sortie et une tension négative que nous choisirons égale à - 14 V.

D'autre part, dans notre cahier des charges, nous voulons lire directement les températures, qui seront transcrites sur le voltmètre. Anticipons : nous désirons en tension de sortie de l'étage 3 :

$$V_{S_3} = Kt \quad \text{avec} \quad K = 1 \text{ V}(\text{°C})^{-1}.$$

L'amplificateur opérationnel, délivre des tensions de sortie inférieures à celles d'alimentation, ce qui nous condamne à ne pas dépasser la température  $t$  égale à 14°C. Pour repérer des températures supérieures nous ferons le changement d'origine suivant :

$$t = \theta + 14 \quad \text{d'où} \quad V'_{S_3} = K(\theta + 14)$$

donc lorsque le voltmètre indiquera 20 volts, nous aurons une température de 20°C et la tension de sortie du 3<sup>ème</sup> étage sera :

$$V_{S_3} = V'_{S_3} - K \ 14 = K\theta$$

ce qui donne  $R_{CTN} = -2,36 (t + \theta) + 106 = -2,36 \theta + 73$ .

L'objectif de notre montage est d'obtenir une tension  $V_{S_3}$  dépendant de  $\theta$  donc de faire disparaître le terme constant.

Le synoptique du montage est donc le suivant (figure 5) :

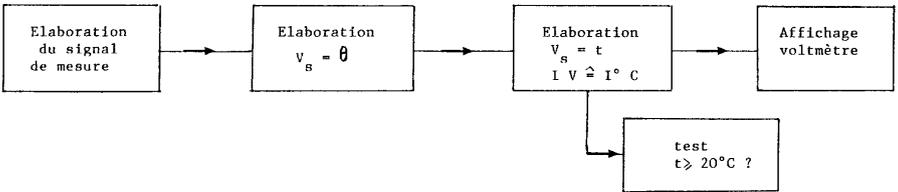


Figure 5

Le schéma fonctionnel nécessaire est donc le suivant (figure 6) :

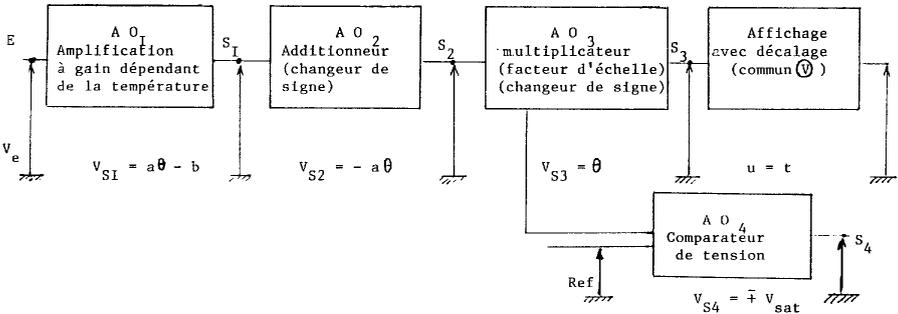


Figure 6

## 2.2. Réalisation pratique

Nous utilisons successivement les quatre AO du TL 064, chaque étage assurant la fonction qui lui a été attribuée (figure 7) :

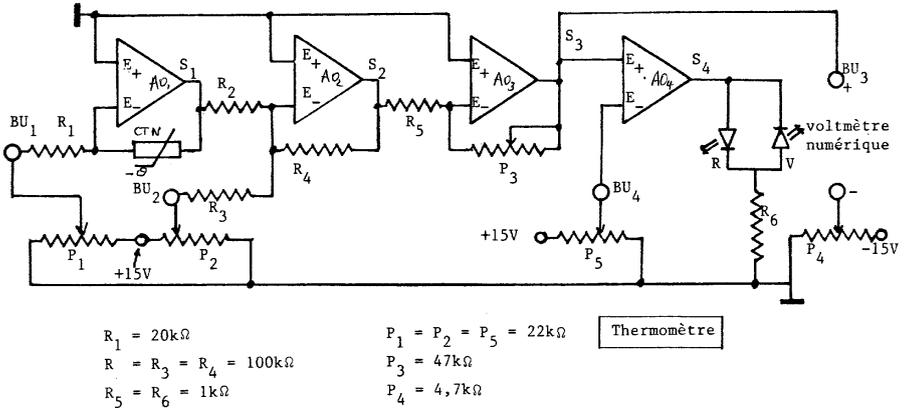


Figure 7

### Premier étage : Amplificateur opérationnel monté en amplificateur de tension inverseuse

L'entrée non inverseuse étant à la masse, nous appliquons à l'entrée inverseuse une tension de 1 V, au travers du résistor  $R_1 = 20\text{ k}\Omega$ . Cette tension de 1 V est obtenue (sur la borne BU<sub>1</sub>) au point milieu d'un potentiomètre P<sub>1</sub> (4,7 k $\Omega$ ) connecté entre le + 15 V de l'alimentation et la masse.

Le circuit de contre réaction est assuré par la résistance  $R_{CTN}$ . La tension de sortie de cet étage vaut :

$$V_{S_1} = -V_e \frac{R_{CTN}}{R_1} = -1 \times \frac{-2,36\theta + 73}{20}$$

$$V_{S_1} = +0,118\theta - 3,65$$

(volt)

### Deuxième étage : Amplificateur opérationnel monté en additionneur de tension sur l'entrée inverseuse

Dans cet étage l'entrée non inverseuse de l'amplificateur opérationnel est la masse ; son entrée inverseuse reçoit au travers de deux résistors identiques  $R_2$  et  $R_3$  de 100 k $\Omega$ , la tension  $V_{S_1}$  provenant du

premier étage et une tension de référence de + 3,65 V obtenue au point milieu (borne BU<sub>2</sub>) d'un potentiomètre P<sub>2</sub> (4,7 kΩ ) branché entre + 15 V et la masse.

De plus, la contre réaction sortie-entrée est assurée par le résistor R<sub>4</sub> de valeur égale à R<sub>2</sub> et R<sub>3</sub>, soit 100 kΩ. (Ces trois résistors devant être égaux seront choisis par mesure à l'ohmmètre).

Les résistors R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>, R<sub>2</sub>, étant égaux, la tension de sortie de cet étage est égale à la somme des tensions d'entrée.

$$V_{S_2} = - (V_{S_1} + 3,65)$$

$$V_{S_2} = - (0,118 \theta - 3,65 + 3,65)$$

$$V_{S_2} = - 0,118 \theta \quad (\theta \text{ en degrés C})$$

(volt)

La tension de sortie V<sub>S<sub>2</sub></sub> dépend directement de la variable θ, nous amplifions cette tension par un troisième étage.

### ***Troisième étage : Amplificateur opérationnel monté en amplificateur inverseur de tension***

L'entrée non inverseuse de l'amplificateur opérationnel est à la masse, l'entrée inverse reçoit la tension V<sub>S<sub>2</sub></sub>, à travers la résistance R<sub>5</sub> de 1 kΩ. La contre réaction sortie-entrée est réalisée avec le potentiomètre P<sub>3</sub> de 47 kΩ, ce qui permet d'ajuster l'amplification de cet étage, dont la tension de sortie vaut :

$$V_{S_3} = - V_{S_2} \frac{P_3}{R_5}$$

$$V_{S_3} = 0,118 \frac{P_3}{R_5} \theta$$

Nous réglerons P<sub>3</sub> de manière que V<sub>S<sub>3</sub></sub> = θ soit :

$$0,118 \frac{P_3}{R_5} = 1$$

$$P_3 = \frac{R_5}{0,118} = \frac{1 \text{ k}\Omega}{0,118} = 8,5 \text{ k}\Omega$$

(réglage par comparaison avec un thermomètre de référence). Dans ce cas le voltmètre branché à la sortie (borne BU<sub>3</sub>) donne par simple lecture la valeur de  $\theta^{\circ}\text{C}$ .

Or, dans ce cas, la valeur lue  $\theta = V_{S_3}$ , ne correspond pas à la température repérée. En effet, pour des raisons invoquées au début, nous avons fait un changement d'origine, la valeur lue doit être augmentée de 14° :

$$t = \theta + 14$$

ou :

$$V'_{S_3} = V_{S_3} + 14$$

ce que nous obtenons directement en connectant le voltmètre entre la sortie de cet étage (BU<sub>3</sub>) et la borne - 14 V et en prélevant cette tension au point milieu du potentiomètre P<sub>4</sub> connecté entre la borne - 15 V et la masse.

Les résultats expérimentaux donnent les résultats suivants :

Valeurs lues sur un thermomètre à mercure	Valeurs affichées sur le voltmètre
17°C	16,7°C
19°C	19,1°C
20°C	20,2°C
22°C	22,2°C
25°C	25,0°C

et montrent que les valeurs indiquées sont acceptables, compte tenu de la précision du thermomètre à mercure.

### EXEMPLE D'APPLICATION

Si nous recouvrons la résistance C.T.N. avec un coton que nous imbibons d'éther, l'abaissement de température lue sur le voltmètre permet de mettre en évidence l'absorption de chaleur par évaporation, l'indication du voltmètre descend et peut se bloquer sur la valeur 1, correspondant à une température de 1°C, qui n'est qu'un ordre de grandeur, car dans ce cas l'hypothèse faite sur la variation linéaire de la résistance CTN n'est plus valable.

### *Quatrième étage : Amplificateur opérationnel monté en comparateur*

Nous le montons en comparateur de tension, afin de détecter toutes températures inférieures ou supérieures à 20°C (par exemple).

L'entrée non inverseuse est reliée à la sortie de l'étage précédent, l'entrée inverseuse au point milieu du potentiomètre  $P_5$  branché entre +15 V et la masse. Nous réglons celui-ci afin d'avoir une tension de 6 V sur l'entrée inverseuse (Borne BU<sub>4</sub>).

La sortie de cet amplificateur opérationnel est connecté à deux LED (rouge et verte) montées en sens inverse et en série avec un résistor  $R_6$  de 1 k $\Omega$ .

Si  $t = 20^\circ\text{C}$ , cela entraîne  $\theta = 6^\circ\text{C}$  car  $\theta = t - 14$  et d'après notre montage, nous lisons une tension de sortie  $V_{S_3} = 6 \text{ V}$ .

Si  $t > 20^\circ\text{C}$ , nous avons  $V_{S_3} > 6 \text{ V}$ , donc  $V_{E_+} > V_{E_-}$ , donc la tension de sortie de cet étage  $V_{S_4} = +V_{\text{saturation}}$ , la LED rouge s'allume et témoigne d'une température supérieure à  $20^\circ\text{C}$ .

Si  $t < 20^\circ\text{C}$ , nous avons  $V_{S_3} < 6 \text{ V}$ , donc  $V_{E_+} < V_{E_-}$ , la tension de sortie de cet étage  $V_{S_4} = -V_{\text{saturation}}$ , la LED verte s'allume, indiquant une température inférieure à  $20^\circ\text{C}$ .

**N.D.L.R.** : Autres articles sur le même thème :

- B.U.P. n° 711 - p. 189 - Thermomètre électronique commenté et critiqué.
- B.U.P. n° 687 - p. 1340 - Capteur « linéaire » de température à diode.

## **Schéma d'électronique assisté par ordinateur**

### ***appel à participation***

La Rédaction

---

Nombreux sont ceux parmi nous qui emploient leur ordinateur pour réaliser leurs schémas d'électricité ou d'électronique et les importer dans leurs documents.

Chacun a ses «recettes», utilise des logiciels plus ou moins performants, récents, chers, rares, faciles d'emploi... certains utilisent un scanner.

Nous nous proposons de regrouper dans un dossier à paraître différentes manières de procéder afin d'y voir plus clair et de profiter de l'expérience collective.

Nous souhaitons donc votre participation : faites parvenir à la rédaction, avec la mention SEAO, un dossier indiquant la solution que vous employez ainsi que des exemples de réalisation.

Précisez aussi les noms, les éditeurs, les distributeurs, les prix des logiciels et/ou matériels que vous employez. Commentez la facilité d'emploi et l'efficacité de votre solution. Indiquez la configuration matérielle minimale. Indiquez la compatibilité avec Mac, Dos, Windows... Expliquez clairement la procédure d'import dans un document composite, réalisé par exemple avec Word, Ami... éventuellement sous Windows. Nous n'excluons pas l'emploi de scanner.

Nous souhaitons aussi pouvoir vous rencontrer à des fins de tests ultérieurs.