

Amplificateur opérationnel :

DETERMINATION DU POINT DE FONCTIONNEMENT

et

CONSTRUCTION D'UN THERMOMETRE ELECTRONIQUE

par Béatrice SANDRE

Lycée l'Essouriau, 91940 Les Ulis

1. DETERMINATION DU POINT DE FONCTIONNEMENT

La détermination du point de fonctionnement d'un amplificateur opérationnel (A.O.) à partir de sa caractéristique ne présente pas de difficulté particulière pour un élève de seconde. Cette méthode permet d'expliquer simplement le rôle de la rétroaction et il me semble dommage que bien peu de manuel ne la propose.

Dans toute la suite, on utilisera les notations habituelles suivantes : entrée non inverseuse E^+ , entrée inverseuse E^- , sortie S , masse M et $U^+ = U_{E^+M}$, $U^- = U_{E^-M}$, $U_s = U_{SM}$, $\epsilon = U^+ - U^-$

L'impédance d'entrée d'un A.O. est très grande et sera considérée comme infinie. Les intensités I^+ et I^- des courants entrant dans E^+ et E^- seront donc négligées devant les autres intensités.

Pour simplifier les schémas, l'alimentation ne sera pas représentée.

1.1. Caractéristique de l'A.O.

La caractéristique d'un A.O. est la courbe donnant U_s en fonction de ϵ . Pour l'obtenir sur un oscillographe, il suffit de réaliser le montage représenté Fig. 1. L'oscillogramme obtenu est représenté Fig. 2.

Si $\epsilon < -\epsilon_1$	alors	$U_s = -U_{sat}$
Si $\epsilon > +\epsilon_1$	alors	$U_s = +U_{sat}$
Si $-\epsilon_1 < \epsilon < +\epsilon_1$	alors	U_s est proportionnel à ϵ

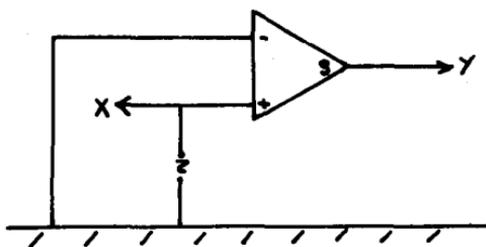


Fig. 1

La tension de saturation U_{sat} est voisine de la tension d'alimentation et légèrement inférieure.

La tension ϵ_1 est très faible, de l'ordre de 0,1 mV. Nous pourrions donc la considérer comme nulle.

La caractéristique est alors celle de l'A.O. idéal représentée sur la Fig. 3.

domaine 1 : $U_s = -U_{sat}$ si $\epsilon < 0$
 domaine 3 : $U_s = +U_{sat}$ si $\epsilon > 0$
 domaine 2 : si $-U_{sat} < U_s < +U_{sat}$
 alors $\epsilon = 0$

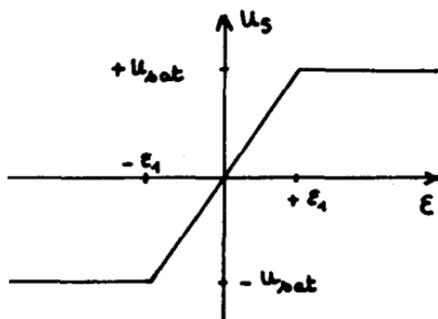


Fig. 2

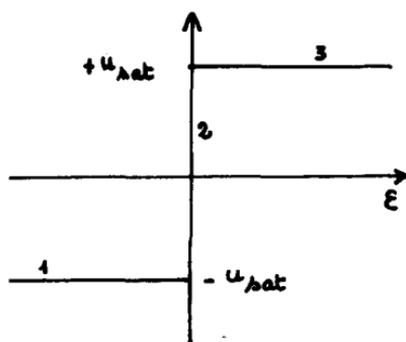


Fig. 3

Si le point de fonctionnement est dans les domaines 1 ou 3, l'A.O. fonctionne en saturation. S'il est dans le domaine 2, il fonctionne en amplification.

1.2. L'A.O. fonctionnant en saturation

On réalise le montage représenté Fig. 4. Les générateurs G et G' ont des f.é.m. e et e'.

$$U^+ = e \quad U^- = e' \quad \text{et donc } \epsilon = e - e'$$

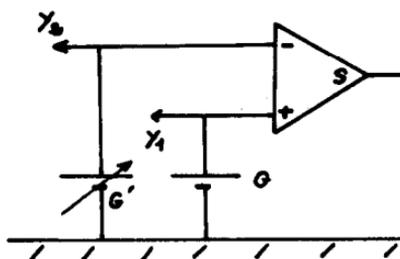


Fig. 4

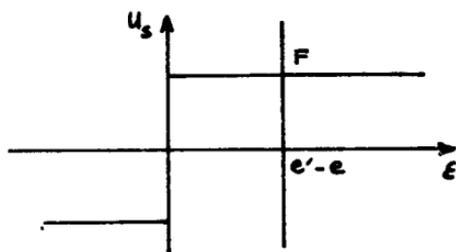


Fig. 5

La valeur de ϵ est imposée. Le point de fonctionnement F est à l'intersection de la caractéristique de l'A.O. et de la droite d'équation $\epsilon = e - e'$, parallèle à l'axe U_s . Il ne peut être que dans les domaines 1 ou 3 de saturation. ϵ et U_s ont le même signe :

$$\begin{array}{ll} \text{si } U_s > 0 & \text{alors } e > e' \\ \text{si } U_s < 0 & \text{alors } e < e' \end{array}$$

Ce circuit permet de comparer e et e'. C'est le *montage comparateur*.

Remarques :

- Le signe de U_s peut être détecté par deux L.E.D. montées comme l'indique la Fig. 6. R est une résistance de protection de l'ordre de 1 k Ω .

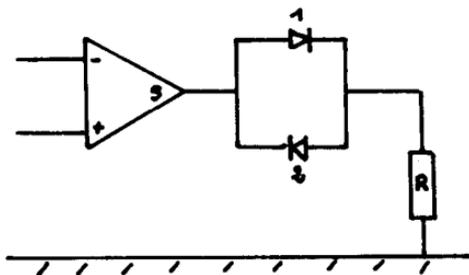


Fig. 6

— Exemple d'expérience possible : On réalise le montage représenté Fig. 7

G est une pile plate 4,5 V

G' est un générateur continu 6 V relié à un pont diviseur.

R_1 est formé de deux boîtes de résistances en série : $\times 100 \Omega$ et $\times 1000 \Omega$.

R_2 peut être une C.T.N. ou une L.D.R.

On cherche la plus grande valeur de R_1 telle que la diode n° 1 soit encore allumée. En chauffant la C.T.N. entre les doigts ou en éclairant davantage la L.D.R., la diode 1 s'éteint et la 2 s'allume. La tension de sortie passe de $+Usat$ à $-Usat$.

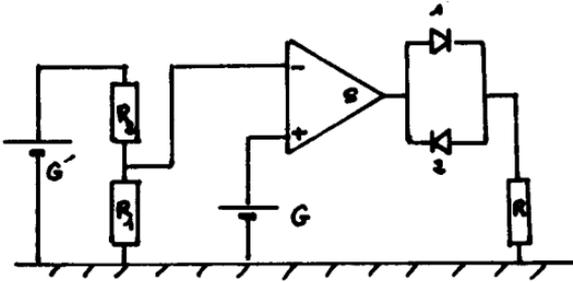


Fig. 7

1.3. L'A.O. fonctionnant en amplification

1.3.1. Le montage suiveur

On réalise le montage représenté Fig. 8. Le générateur G a une f.é.m. e .

$$U^- = U_s \quad U^+ = e \quad \text{et donc } \epsilon = e - U_s$$

Dans le repère ϵ, U_s , $\epsilon = e - U_s$ est l'équation d'une droite D qui passe par les points de coordonnées $(\epsilon = 0, U_s = e)$ et $(\epsilon = e, U_s = 0)$.

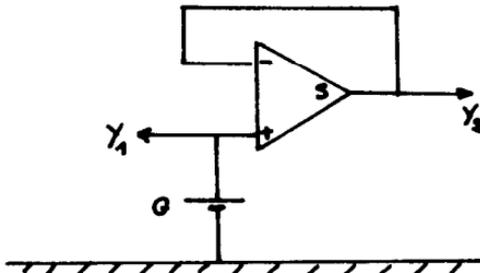


Fig. 8

Si $e < -U_{sat}$, la droite D_1 coupe la caractéristique de l'A.O. en F_1 dans le domaine 1 et $U_s = -U_{sat}$. Si $e > +U_{sat}$, D_3 coupe la caractéristique de l'A.O. en F_3 dans le domaine 3 et $U_s = +U_{sat}$. Mais si $-U_{sat} < e < +U_{sat}$, D_2 coupe la caractéristique de l'A.O. en F_2 dans le domaine 2 et

$$U_s = e$$

La tension de sortie est identique à la tension d'entrée. C'est le montage suiveur.

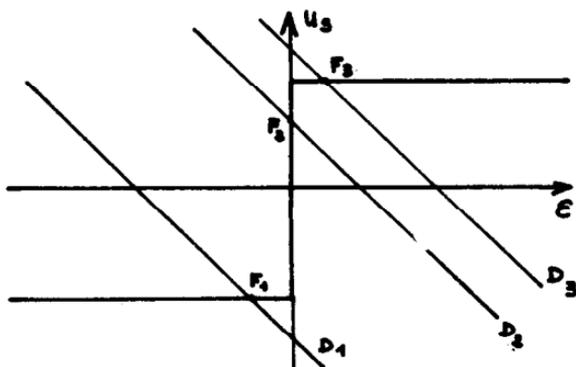


Fig. 9

Remarque :

L'identité de ces deux tensions peut être mise en évidence grâce à un oscillographe en réalisant le montage représenté sur la Fig. 8. G est un générateur alternatif de tension maximale U_{max} .

Si $U_{max} < U_{sat}$ les signaux obtenus sur les voies 1 et 2 sont identiques. Si $U_{max} > U_{sat}$ le signal de sortie (voie 2) est «écrêté».

Lorsque le signal de sortie est renvoyé sur l'entrée, on dit qu'il y a rétroaction. Dans le cas où S est relié à E^- , le tracé des caractéristiques a montré que le point de fonctionnement peut se trouver dans le domaine d'amplification. Nous allons montrer qu'en ne renvoyant qu'une partie du signal de sortie sur l'entrée inverseuse, il est possible de régler l'amplification.

1.3.2. Le montage amplificateur non inverseur

On réalise le montage représenté Fig. 10. L'intensité du courant I étant nulle, R et R' sont traversées par la même intensité I . On peut donc écrire :

$$U^- = R'I \text{ et}$$

$$U_s = (R + R') I \text{ d'où}$$

$$U^- = U_s \frac{R'}{R + R'}$$

Le générateur G délivre une tension e :

$$U^+ = e$$

Le circuit extérieur à l'A.O. impose donc entre e et U_s la relation

$$e = U_s \frac{R'}{R + R'}$$

Dans le repère e, U_s , elle est représentée par une droite passant par les deux points ($e = e, U_s = 0$) et [$e = 0, U_s = e \cdot (R + R')/R'$].

Comme le montre la Fig. 11, si

$$-U_{sat} < e \cdot (R + R')/R' < +U_{sat}$$

cette droite coupe la caractéristique de l'A.O. dans le domaine 2. Le point de fonctionnement F a pour coordonnées :

$$e = 0 \text{ et } U_s = e \cdot (R + R')/R'$$

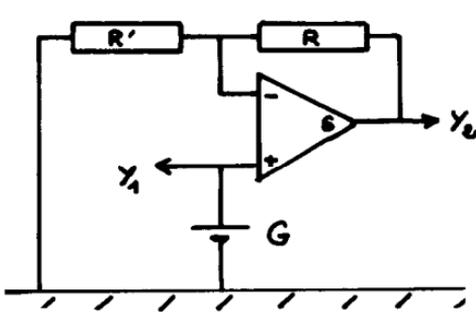


Fig. 10

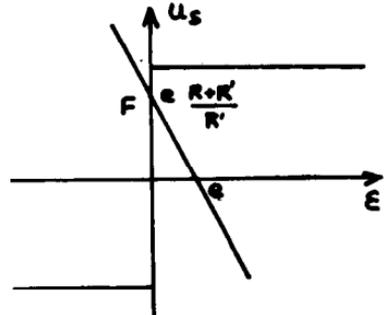


Fig. 11

Le signal d'entrée e est envoyé sur l'entrée E^+ *non inverseuse* ; la tension de sortie a *le même signe* que e ; Le coefficient d'amplification est $(R + R') / R'$. C'est le montage amplificateur *non inverseur*.

Remarque :

G est générateur de tension continue. Les tensions e et U_s sont mesurées à l'oscillographe. En faisant varier R et R' , on peut vérifier que si le point de fonctionnement reste dans le domaine 2, $U_s/e = (R + R')/R$.

Si G est un générateur de tension alternative, on vérifie de plus que les tensions d'entrée et de sortie sont en phase.

1.3.3. Le montage amplificateur inverseur

On réalise le montage représenté Fig. 12. Le générateur G délivre une tension e . L'intensité du courant I^- étant nulle, R et R' sont traversées par la même intensité I . On peut donc écrire :

$$\begin{aligned} U^- &= e - R' I \\ U_s &= e - (R + R') I \end{aligned}$$

E^+ étant reliée à la masse

$$U^+ = 0 \text{ et } e = - U^-$$

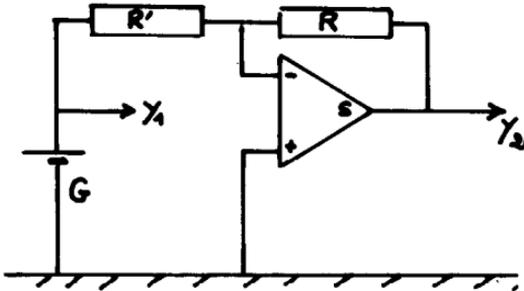


Fig. 12

En éliminant I entre les deux équations ci-dessus, on obtient une relation entre U_s et e :

$$R (e + U_s) + R' (e + U_s) = 0$$

Dans le repère e, U_s elle est représentée par une droite passant par les deux points $(e = 0, U_s = - e.R / R')$ et $[e = -e. R / (R + R'), U_s = 0]$.

Si $-Usat < -e.R/R' < + Usat$, elle coupe la caractéristique de l'A.O. dans le domaine d'amplification. La Fig. 13 montre que les coordonnées du point de fonctionnement F sont alors :

$$\epsilon = 0 \quad Us = - e.R/R'$$

Le signal d'entrée e est envoyé sur l'entrée E^- *inverseuse* ; la tension de sortie est de *signe opposé* à e ; Le coefficient d'amplification est $- R/R'$. C'est le montage amplificateur *inverseur*.

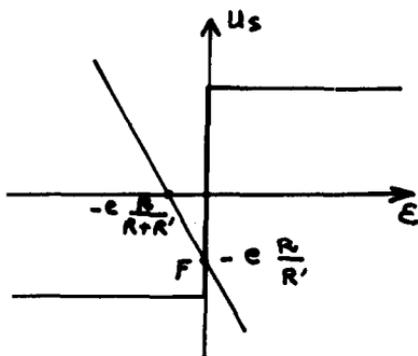


Fig. 13

Remarques :

G est un générateur de tension continu. Les tensions e et U_s sont mesurées à l'oscillographe. En faisant varier R et R' , on peut vérifier que si le point de fonctionnement reste dans le domaine 2, $U_s/e = - R/R'$.

Si G est un générateur de tension alternative, les tensions d'entrée et de sortie sont en opposition de phase.

L'intensité I_s du courant de sortie étant limitée par l'A.O., les résistances R et R' des montages représentés Fig. 10 et 12 doivent être suffisamment grandes ($I_s < 0,01$ A pour le 741).

La rétroaction permet de faire fonctionner l'A.O. dans le domaine d'amplification. Les tensions U^+ et U^- sont alors égales.

2. CONSTRUCTION D'UN THERMOMETRE ELECTRONIQUE

2.1. Le circuit «soustracteur»

On considère le circuit représenté sur la Fig. 14. Les générateurs G_1 et G_2 délivrent les tensions e_1 et e_2 .

$$U^+ = 0$$

$$U^- = -e_1 + R_1 I_1 = e_2 - R_2 I_2$$

$$U^- - U_s = R I$$

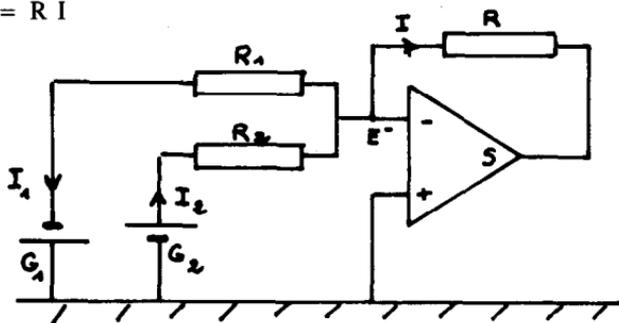


Fig. 14

La rétroaction permet à l'A.O. de fonctionner en amplificateur donc

$$U^+ = U^- = 0$$

D'où

$$I_1 = \frac{e_1}{R_1} \quad I_2 = \frac{e_2}{R_2} \quad I = -\frac{U_s}{R}$$

D'après la loi des nœuds écrite en E^- ,

$$I_2 + I^- = I + I_1$$

$$\text{mais } I^- = 0$$

d'où

$$\frac{e_2}{R_2} = -\frac{U_s}{R} + \frac{e_1}{R_1}$$

et

$$U_s = R \left(\frac{e_1}{R_1} - \frac{e_2}{R_2} \right)$$

2.2. Le montage du thermomètre

R_1 est une CIN de 4,7 k Ω . C'est le *détecteur* des variations de température.

G_1 est un générateur de tension continue ($e_1 = 3$ V par exemple).

R_2 est une résistance de 10 k Ω .

G_2 est une alimentation continue réglable (de 0 à 12 V par exemple)

R est composée de deux boîtes à décades : $\times 100 \Omega$ et $\times 1000 \Omega$.

Un voltmètre (numérique) branché entre la masse et la sortie mesure U_s .

Remarque :

Si on ne dispose pas d'alimentation réglable, on peut prendre pour G_2 un générateur de tension constante ($e_2 = 3$ V par exemple). R_2 doit alors être réglable (potentiomètre de 10 k Ω).

2.3. Réalisation du support de la CTN

Lors de l'étalonnage du thermomètre, il sera nécessaire de plonger la CTN dans l'eau. Ses deux «pattes» n'étant pas isolées, un pont conducteur s'établit entre ses bornes. Il n'est pas possible de laisser la CTN «à nu».

On peut prolonger les «pattes» de la CTN (Fig. 15). Elle est ensuite enfilée dans un petit tuyau de matière plastique transparente de diamètre 5 à 6 mm et de longueur 18 cm (Fig. 16). Ce tuyau est vendu au mètre dans les boutiques d'aquarium.

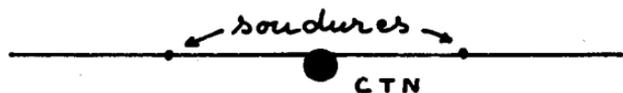


Fig. 15



Fig. 16

L'ensemble est recourbé et connecté aux deux bornes d'une prise femelle 250 V, 6 A (Fig. 17).

La CTN est ainsi isolée mais les équilibres thermiques seront lents à s'établir.

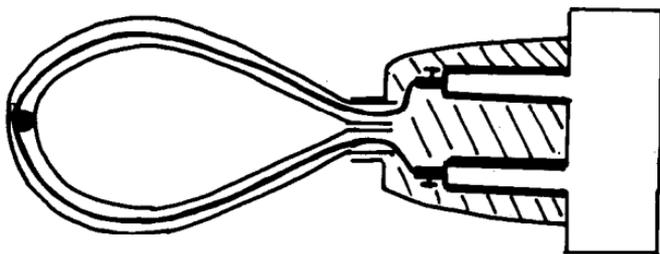


Fig. 17

2.4. Réglages et mesures

★ On donne à R la valeur de 2 000 Ω .

★ La CTN est plongée dans la glace fondante. On règle e_2 (ou R_2) pour que le voltmètre indique 0. La valeur de e_2 (ou de R_2) ne sera plus modifiée.

★ La CTN est plongée dans un verre d'eau chaude dont la température θ est mesurée avec un thermomètre traditionnel. Si $\theta = 42^\circ\text{C}$ par exemple, on règle R pour que le voltmètre indique 4,2 V. La valeur de R ne sera plus modifiée.

★ La CTN est ensuite placée sur la table pour mesurer la température de la pièce. Si le voltmètre indique 1,5 V, on en déduit qu'il fait 15°C . Et pourtant le «vrai» thermomètre indique 20°C .

2.5. Interprétation

Soit $R_1(0)$ la résistance de la CTN à 0°C . e_2 (ou R_2) est réglé de telle sorte que $U_s = 0$ donc

$$\frac{e_1}{R_1(0)} - \frac{e_2}{R_2} = 0$$

A une température θ la résistance de la CTN est notée $R_1(\theta)$ et la tension de sortie $U_s \theta$. On pose :

$$\frac{1}{R_1(\theta)} = \frac{1 + \alpha \theta}{R_1(0)}$$

d'où

$$U_s(\theta) = R \left(\frac{e_1}{R_1(\theta)} - \frac{e_2}{R_2} \right) = R \left(\frac{e_1(1 + \alpha \theta)}{R_1(0)} - \frac{e_2}{R_2} \right)$$

et

$$U_s(\theta) = \frac{R e_1 \alpha \theta}{R_1(0)}$$

Puisque U_s/θ n'est pas constant, α n'est pas une constante. Ce calcul n'est sans doute pas au niveau des élèves de seconde, mais l'expérience suffit à montrer que U_s n'est pas proportionnel à la température. Le graphique représentant θ en fonction de U_s n'est pas une droite. Deux points ne suffisent pas pour le construire. Il faut étalonner le thermomètre point par point.

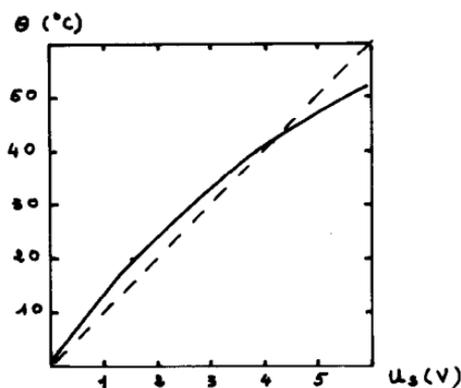


Fig. 18