

L'amplificateur opérationnel monté en sommateur-inverseur

SON INTEGRATION DANS UNE CHAINE ELECTRONIQUE DE MESURE

par Serge VAILLANT,

Les Meunières-Saint-Pancrasse,
38720 Saint-Hilaire-du-Touvet.

Il est commode, lors d'une première étude d'un montage comportant un amplificateur opérationnel (A.O.), de considérer que les deux entrées de l'A.O. sont au même potentiel et d'admettre qu'aucun courant ne circule dans ces entrées (modèle de l'A.O. idéal).

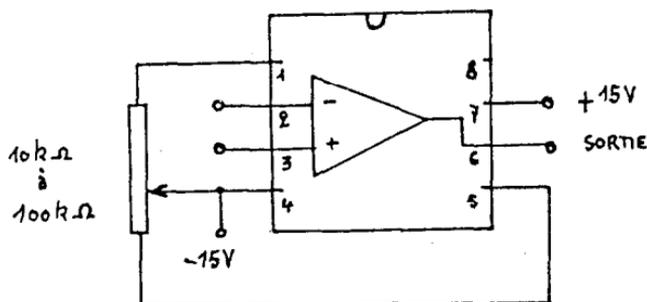


Fig. 1. — Brochage du TL081 et circuit d'équilibrage.

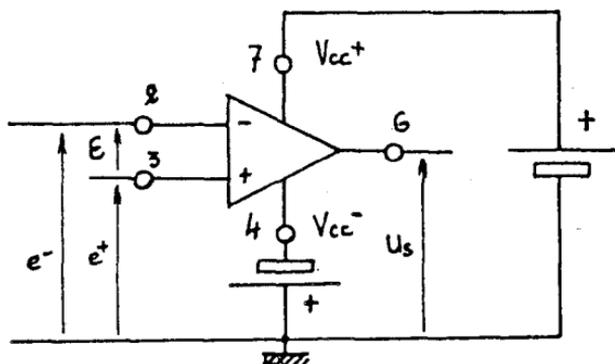


Fig. 2. — Alimentation du TL081 et notations.

Un A.O. comportant en entrée des transistors à effet de champ tel le bifet TL081 de Texas Instruments, courant et peu coûteux, n'est pas loin d'avoir le comportement de l'A.O. idéal. Ces différentes raisons nous ont amené à utiliser ce type d'A.O. dans les montages qui seront décrits par la suite.

Nous considérerons des A.O. alimentés sous 2×15 V (Alimentation du C.E.M.S.) et munis d'un potentiomètre d'équilibrage des entrées (offset) (cf. fig. 1 et 2).

LE MONTAGE SOMMATEUR/INVERSEUR.

ε étant négligeable devant u_1 , u_2 et u_3 , on peut poser $\varepsilon \approx 0$.

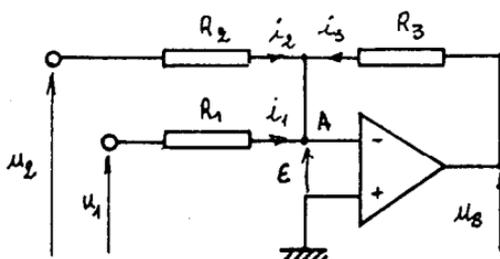


Fig. 3

L'amplificateur opérationnel étant considéré comme idéal, A est une masse virtuelle et l'on peut écrire :

$$u_1 = R_1 \cdot i_1, \quad u_2 = R_2 \cdot i_2 \quad \text{et} \quad u_3 = R_3 \cdot i_3.$$

Aucun courant ne circulant dans les entrées de l'ampli. op., $i_1 + i_2 + i_3 = 0$, on en déduit :

$$U_s = -R_3 \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} \right).$$

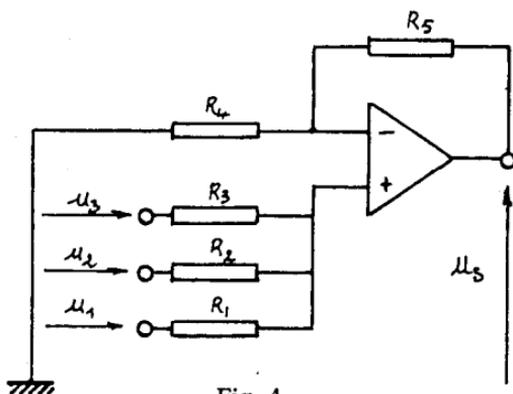


Fig. 4

Le potentiel du point A étant parfaitement défini, il n'y a aucune interaction entre les entrées, ce qui n'est pas le cas du sommateur non inverseur (fig. 4).

Le sommateur inverseur peut être considéré comme un mélangeur idéal.

MANIPULATION.

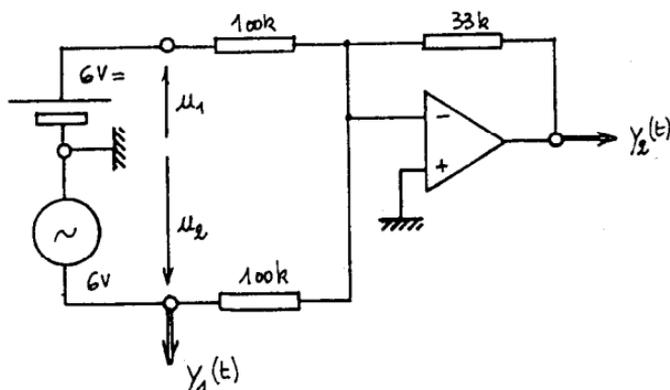


Fig. 5

Appliquer séparément puis simultanément les tensions U_1 et U_2 ; comparer les résultats. Il s'agit d'un circuit linéaire; il vérifie le principe de superposition.

Application en métrologie.

Soit x la mesure d'une grandeur physique. On veut déterminer la valeur de x en utilisant un capteur dont la réponse $E(x)$ est, dans un certain intervalle, fonction affine de x (f.é.m. d'une électrode combinée en fonction du pH; tension délivrée par un capteur à effet Hall en fonction du champ magnétique dans lequel est plongé le capteur...). Soit $E(x) = ax + b$. Il est commode d'incorporer ce capteur dans une chaîne électronique qui fournira, en sortie, une tension $U(x)$ fonction linéaire de x , soit $U(x) = A \cdot x$.

Par exemple : $A = 1 \text{ V/unité de pH}$ ou $A = 0,1 \text{ V/mT}$.

La chaîne électronique comportera donc un dispositif traitant l'information fournie par le capteur à l'entrée et délivrant, en sortie, une tension proportionnelle à la mesure de la grandeur étudiée (fig. 6).

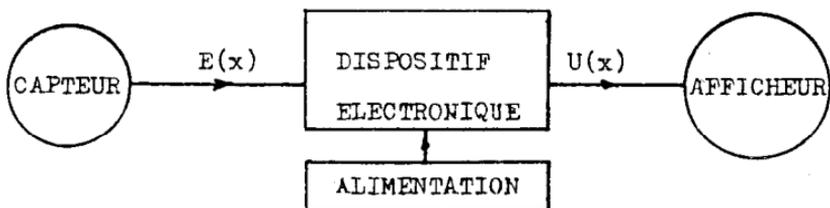


Fig. 6

Deux procédés simples de traitement de l'information découlent des relations $E(x)$ et $U(x)$:

$$U(x) = A \cdot x = A \left(\frac{E(x) - b}{a} \right) = \frac{A}{a} (E(x) - b) = \dots$$

$$\dots \frac{A}{a} E(x) - \frac{A}{a} \cdot b = \frac{A}{a} E(x) - B.$$

$\frac{A}{a} = K$ apparaît comme un coefficient d'amplification en tension.

Première méthode :

$U(x) = K [E(x) - b]$: une tension $-b$ est ajoutée à la tension délivrée par le capteur, avant amplification.

Deuxième méthode :

$$U(x) = K E(x) - B.$$

Cette fois, la tension $-B$ est ajoutée à la tension $K [E(x)]$ après amplification.

Le dispositif électronique devra donc comporter un amplificateur et un circuit de décalage, chacun de ces étages comportant une possibilité de réglage.

Observons que la tension de décalage à l'entrée b , ne dépend que du capteur, alors que la tension de décalage à la sortie varie également avec le coefficient d'amplification : $B = K \cdot b$.

C'est donc la première méthode qui nous paraît la plus simple à appliquer puisqu'elle fait appel à deux réglages *indépendants* de l'amplification et du décalage.

Le capteur étant suivi d'un étage adaptateur, l'ensemble capteur/adaptateur, sera considéré comme une source de résistance nulle (générateur de tension) (fig. 7).

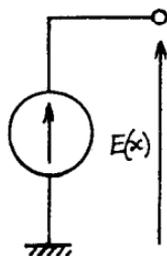


Fig. 7. — Modèle de Thévenin de l'association capteur-étage adaptateur.

Un étage sommateur inverseur est capable d'assumer simultanément les fonctions de décalage à l'entrée et d'amplification.

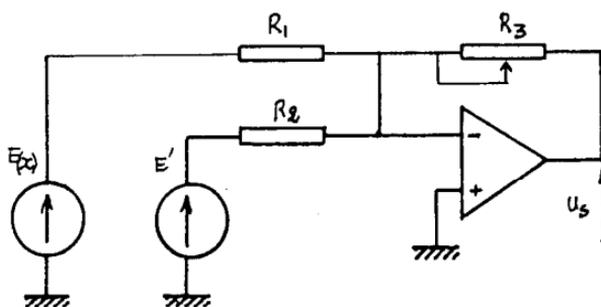


Fig. 8

La tension de sortie s'écrit, pour ce type de montage :

$$U_s = -R_3 \left[\frac{E(x)}{R_1} + \frac{E'}{R_2} \right] \text{ soit : } U_s = -\frac{R_3}{R_1} \left[E(x) + \frac{R_1}{R_2} E' \right].$$

Cette relation est de la forme :

$$U_s = K(E - b) \text{ si l'on pose : } K = \frac{-R_3}{R_1} \text{ et } b = -\frac{R_1}{R_2} E'.$$

Le décalage ramené à l'entrée $-E' \cdot \frac{R_1}{R_2}$ et le coefficient

d'amplification $-\frac{R_3}{R_1}$ auront des réglages indépendants si l'on

ajuste l'amplification en agissant sur R_3 , R_1 étant maintenue constante.

Soulignons la nécessité de compenser les imperfections de l'amplificateur opérationnel.

Si $E = E' = 0$, on doit observer $U_s = 0$. On interprète l'existence d'une tension résiduelle en admettant qu'un générateur délivrant une tension ε_0 se trouve branché en série dans l'une des entrées de l'amplificateur opérationnel (fig. 9).

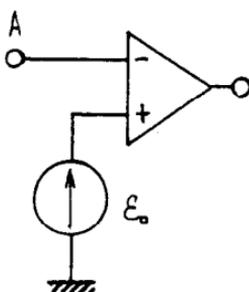


Fig. 9

ε_0 est la tension de décalage d'offset ou tension de faux zéro d'entrée ; c'est une caractéristique de l'ampli. op. non compensé. Elle est fonction de la température et de la tension d'alimentation.

Le montage peut donc être représenté par le schéma suivant (fig. 10) :

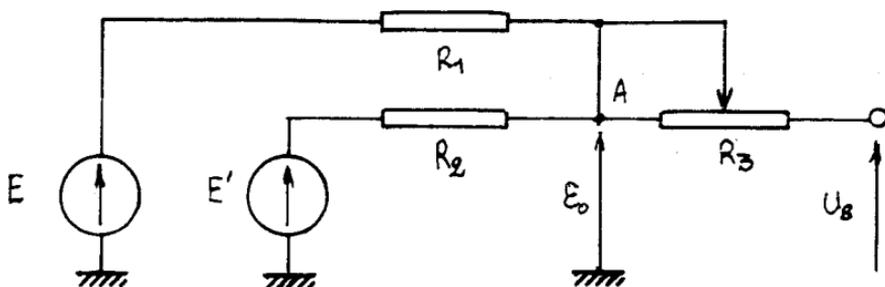


Fig. 10

De la loi des nœuds appliquée en A, on déduit :

$$U_s = -\frac{R_3}{R_1} \left[E + E' \cdot \frac{R_1}{R_2} - \varepsilon_0 \left(\frac{R_1}{R_3} + \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \right].$$

Le terme $\varepsilon_0 \left(\frac{R_1}{R_3} + \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$ représente un décalage supplémentaire en entrée.

On annulera ce terme, qui varie avec le coefficient d'amplification, en munissant le montage d'un potentiomètre de compensation (offset) de manière à pouvoir annuler ε_0 .

MANIPULATION.

Dans le montage représenté fig. 11, le générateur branché à l'entrée A du sommateur simule un capteur délivrant une tension $E(x) = E_0 + x$. Cette tension est donc fonction affine de la grandeur d'entrée x , tension alternative fournie par une alimentation de T.P. Il est alors possible d'étudier directement la réponse de la chaîne de mesure, $U_s(x)$, à l'aide d'un oscillographe électronique.

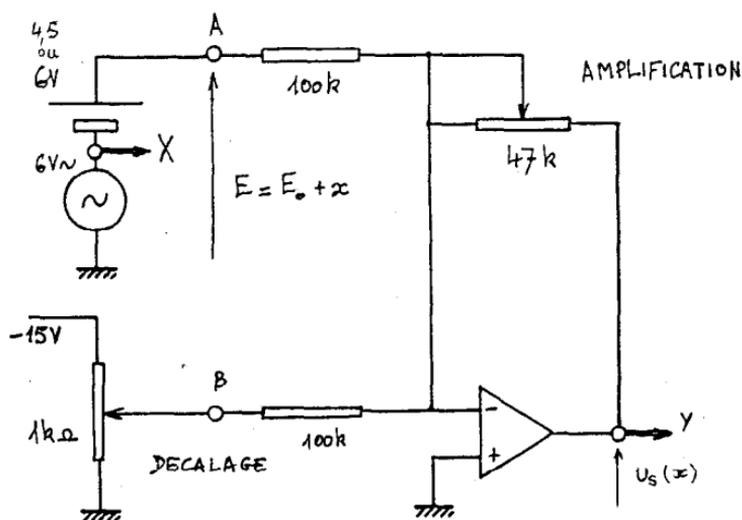


Fig. 11

La manipulation a donc pour but d'illustrer le fonctionnement du montage décrit précédemment. Elle permet notamment de montrer qu'il est possible d'obtenir une réponse $U_s(x)$ fonction linéaire de x , par action sur le potentiomètre de décalage, et

ceci sans changer le coefficient directeur de la droite $U_s(x)$ (cf. fig. 12).

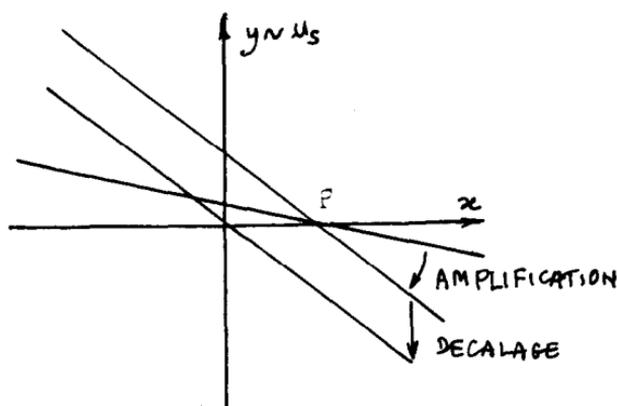


Fig. 12

Par ailleurs, il est possible de changer ce coefficient directeur en agissant sur le réglage d'amplification.

On vérifie bien que les deux réglages de décalage et d'amplification sont indépendants.

Mode opératoire :

a) Mettre A et B à la masse et annuler la tension de sortie en réglant l' « offset » de l'amplificateur opérationnel.

b) Appliquer les tensions en A et B ; agir sur le potentiomètre de décalage pour obtenir $y = ax$; remarquer que le coefficient a est constant.

c) Modifier a en réglant l'amplification ; observer la conservation du zéro.

d) De manière générale, une modification du coefficient d'amplification entraîne une rotation de la droite $U_s(x)$ autour du point P, intersection de cette droite avec l'axe des abscisses (cf. fig. 12) ; une action sur le potentiomètre de décalage se manifeste par une translation de cette droite.

e) Modifions le réglage d'offset ; nous pouvons observer que les réglages de l'amplification et du décalage ne sont plus indépendants.

EXEMPLES D'APPLICATION

1. TESLAMETRE (fig. 13).

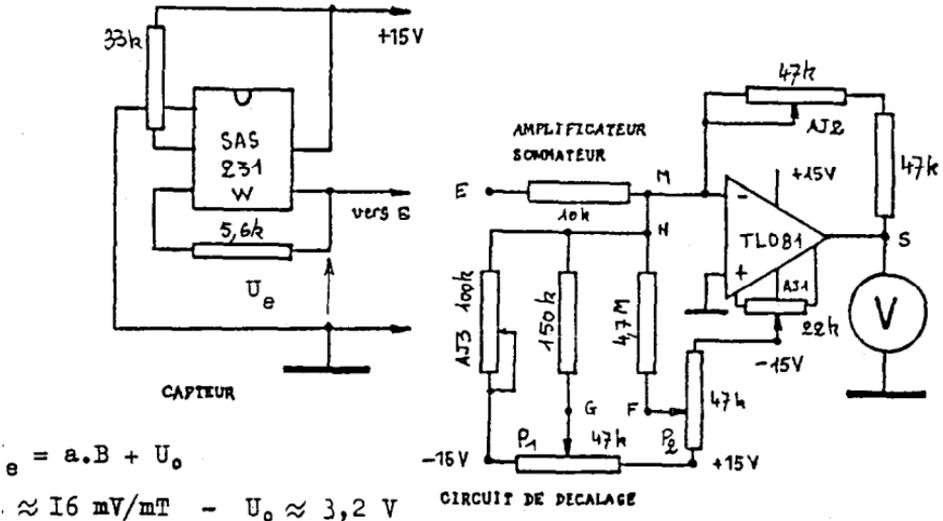


Fig. 13

Réglages :

a) La liaison MN étant coupée, on met l'entrée E à la masse et règle l'ajustable AJ1 (« offset ») pour obtenir $U_s = 0$.

b) On établit la liaison MN et branche le capteur à l'entrée de la chaîne électronique de mesure. Le capteur n'étant pas soumis à l'action du champ magnétique à mesurer, on règle le circuit de décalage pour que $U_s = 0$.

c) On étalonne alors le teslamètre en plaçant le capteur dans un champ magnétique connu. On règle l'amplification à l'aide de AJ2 pour que $U_s = A \cdot B$, avec $A = 0,1 \text{ V/mT}$.

Mesure :

Le teslamètre étant sous tension, on règle d'abord le zéro (décalage). On établit alors le champ magnétique et déduit $B = U_s/A$.

Remarque :

Le circuit de décalage utilise pleinement les possibilités du sommateur puisque le courant de décalage est lui-même la somme de trois courants. L'ajustable AJ3 se justifie par la dispersion des caractéristiques du capteur. Le potentiomètre P1 permet un réglage grossier du zéro, P2, un réglage fin.

2. pHMETRE.

La fig. 14 représente le schéma de principe d'un pHmètre universel acceptant pratiquement tout type de capteur. Les résistances ont été choisies de telle sorte qu'après étalonnage, la tension de sortie varie de un volt par unité de pH. Un voltmètre numérique affiche alors directement la valeur du pH mesuré.

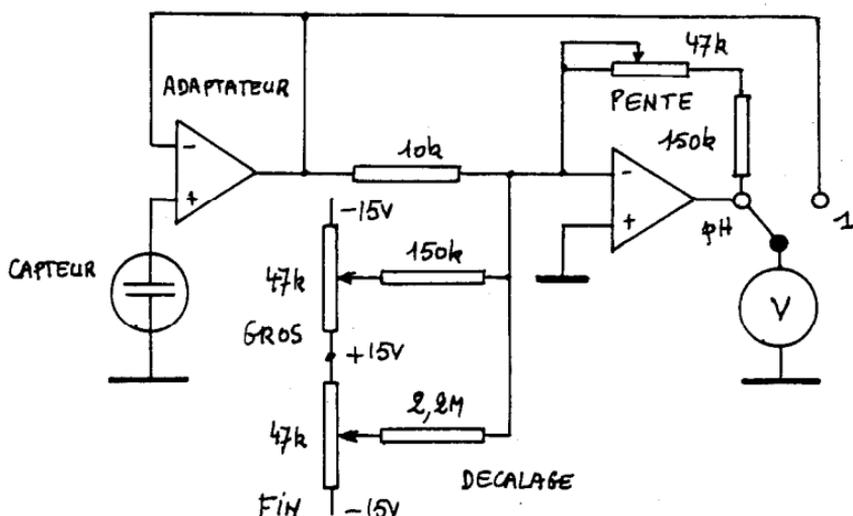


Fig. 14

L'appareil peut également être utilisé en adaptateur d'impédance (suiveur de tension).

Etalonnage :

Les opérations d'étalonnage sont résumées dans le tableau ci-après :

	pH	Commande	U_s
I	x_1	TARAGE (décalage)	0
II	x_2	PENTE	$A(x_2 - x_1)$
III	x_2	TARAGE (décalage)	$A x_2$

Exemple de diagramme que l'on peut présenter aux élèves dans le but de faire comprendre la méthode d'étalonnage.

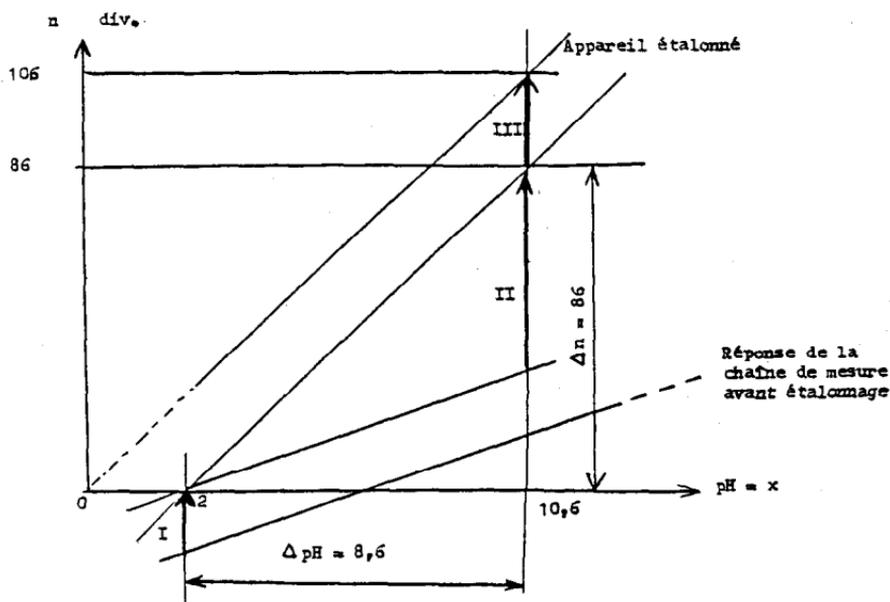


Fig. 15

Le coefficient de réponse A est choisi de telle sorte qu'une déviation de l'aiguille du voltmètre de 10 divisions corresponde à une unité de pH.

Pour étalonner l'appareil, on utilise deux solutions de pH :

$$x_1 = 2 \quad \text{et} \quad x_2 = 10,6.$$

n est la déviation de l'aiguille du voltmètre branché à la sortie de la chaîne de mesure, exprimée en divisions du cadran.

Des indications détaillées sur la construction de ces deux appareils sont fournies dans deux brochures diffusées par le C.A.S.F.A. et l'Inspection Pédagogique Régionale de Sciences physiques de l'Académie de Lille.