

**Exercice n°2 : 2 et 4 fils (~7 points)**

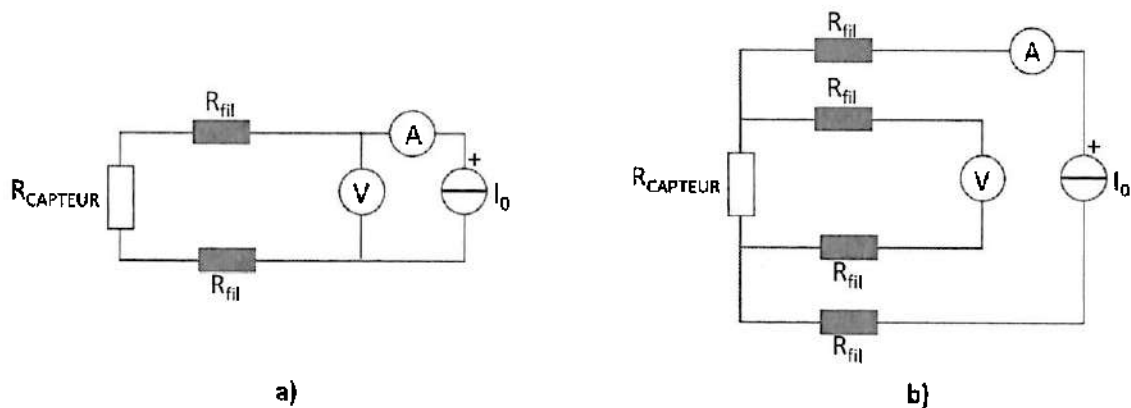
Soit une sonde Pt100 dont la résistance  $R_{\text{CAPTEUR}}$  varie ainsi :

$$R_{\text{CAPTEUR}} = 100(1 + \alpha T) [\Omega]$$

avec  $\alpha = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  et  $T$  en  $^\circ\text{C}$ .

Pour déterminer la température  $T$ , la résistance de la sonde Pt100 est mesurée grâce à une source de courant  $I_0$ , un ampèremètre A et un voltmètre V. Ces trois appareils seront supposés parfaits.

Deux montages sont proposés (figure 2a et b).



**Figure 2** – Montages pour mesurer  $R_{\text{CAPTEUR}}$ .  $R_{\text{fil}}$  est la résistance d'un fil de liaison. a) 2 fils, b) 4 fils.

Vous mesurez une même température  $T$  avec ces deux montages. Les fils de liaison ont chacun une résistance  $R_{\text{fil}}$  avec  $R_{\text{fil}} = 3,5\Omega$ . Déduisez à partir de vos mesures résumées dans le tableau 1 la température  $T$  (justifiez brièvement). (Bien sûr, vous devez trouver la même température  $T$  quel que soit le montage.)

Montage	Tension mesurée au voltmètre ( $V_{\text{mes}}$ )	Intensité mesurée à l'ampèremètre ( $I_{\text{mes}}$ )
a) (2 fils)	1,14V	10mA
b) (4 fils)	1,07V	10mA

**Tableau 1** – Mesures avec les montages 2 fils et 4 fils pour déterminer une même température  $T$ .

Avec le 4 fils:  $V_{\text{CAPTEUR}} = V_{\text{MES}}$  et  $I_{\text{CAPTEUR}} = I_{\text{MES}}$   
 car  $I_0$  passe dans  $R_{\text{CAPTEUR}}$  et pas du tout dans le voltmètre ( $R_{\text{VOLTMETRE}} \rightarrow \infty$ )  
 donc:  $R_{\text{CAPTEUR}} = V_{\text{MES}}(4 \text{ fils}) / I_{\text{MES}}(4 \text{ fils})$   
 $\Rightarrow R_{\text{CAPTEUR}} = 1,07 / 10\text{m} = 107\Omega$   
 $T = (R_{\text{CAPTEUR}} / 100 - 1) / \alpha = 0,07 / 3,5 \cdot 10^{-3} \Rightarrow T = 20^\circ\text{C}$

(Si vous avez choisi le 2 fils:  $R_{\text{CAPT.}} + 2R_{\text{fils}} = \frac{V_{\text{MES}}}{I_{\text{MES}}}$   
 $\Rightarrow R_{\text{CAPT.}} = \frac{1,14}{10\text{m}} - 2 \times 3,5 = 107\Omega$  : même résultat)

Quel montage préconisez-vous si la résistance des fils est mal connue (fil remplacé mais de longueur différente, variation de la résistance des fils avec la température, etc.) ? (Justifiez.)

Pour le 4 fils,  $R_{gils}$  n'intervient pas dans le calcul de  $T$ .  
 Pour le 2 fils si  $(R_{AFT.} = \frac{V_{mes}}{I_{mes}} - 2R_{gils})$ ,  
 Le 4 fils est donc meilleur de ce point de vue.

Pour garder tel quel l'avantage du montage que vous venez de préconiser, quel(s) appareil(s) parmi l'ampèremètre, le voltmètre et le générateur de courant doit(en)t être parfait(s) ? (Justifiez.)

Le voltmètre doit être idéal sinon  $I_{mes} = I_{AFT.} + I_{voltmètre}$  et  $V_{mes} \neq V_{AFT.}$ , avec  $I_{mes}, V_{mes}$  dépendants de  $R_{gils}$  (courant dans le voltmètre).  
 (Par contre,  $I_0$  et l'ampèremètre peuvent être réels)

### Exercice n°3 : Pont complet (~24 points)

On souhaite mesurer la déformation d'une poutre soumise à une contrainte de type flexion (figure 3). On utilise des jauges de déformation de longueur  $\ell$  et de résistance  $R$  au repos. Sous contrainte, les jauges collées sur la face supérieure de la poutre s'allongent de  $+\delta\ell$  et celles collées sur la face inférieure de la poutre se compriment de  $-\delta\ell$ . Les résistances des jauges varient donc de  $R \pm \delta R = R \pm r$ .

D'après la loi de comportement d'une jauge,

$$\frac{\delta R}{R} = \frac{r}{R} = K \frac{\delta \ell}{\ell} = KM$$

où  $\delta\ell/\ell = M$  est l'allongement relatif de la jauge (le mesurande) et  $K$  le facteur de jauge.

Afin de mesurer les variations de résistance  $r = \delta R$ , on utilise quatre jauges : deux placées sur le dessus de la poutre, deux sur le dessous. Ces quatre jauges forment un pont de Wheatstone dit pont complet (figure 4).

NB : au point de repos,  $r = 0$ .

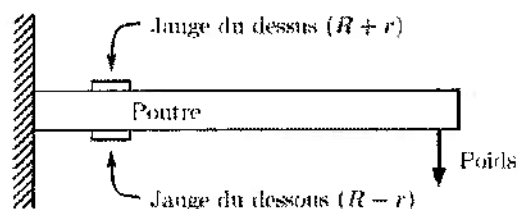


Figure 3 – Poutre et jauges de déformation.

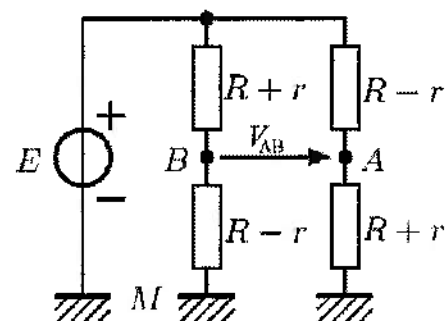


Figure 4 – Pont complet.

Exprimez le plus succinctement possible la tension  $V_{AB}$  en fonction (ou pas) de  $E$ ,  $R$  et  $r$ . (Justifiez.)

$$\left. \begin{array}{l} V_{AN} = E(R+r)/2R \\ V_{BN} = E(R-r)/2R \\ V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{V_{AB} = \frac{Er}{R}}$$

Exprimez la sensibilité  $S = dV_{AB} / dr$  et la sensibilité  $S' = dV_{AB} / dE$  en fonction (ou pas) de  $K$ ,  $E$ ,  $R$  et  $r$ . Concluez sur la linéarité de la chaîne de mesure. Au point de repos, exprimez  $P_C$  et  $P_{J1}$ , respectivement la puissance consommée par le circuit (c'est-à-dire fournie par le générateur  $E$ ) et la puissance dissipée dans une jauge, en fonction (ou pas) de  $E$  et de  $R$ . Exprimez enfin l'amplitude des fluctuations de la tension mesurée  $\Delta V_{AB}$  sous l'influence de  $\Delta E$ , les fluctuations de la source de tension  $E$ , en fonction (ou pas) de  $\Delta E$ ,  $R$  et  $r$ . (Complétez le tableau 2, pas de justification demandée. Si ça ne rentre pas dans les cases, c'est qu'il y a une erreur...)

$S$	$S'$	Chaîne linéaire ?	$P_C$ pour $r=0$	$P_{J1}$ pour $r=0$	$\Delta V_{AB}$
$E/R$	$KE$	oui	$E^2/R$	$E^2/4R$	$\Delta E \cdot r/R$

Tableau 2

Pour  $K = 2$  et  $R = 100\Omega$ , déterminez une valeur de  $E$  de façon que  $S'$  soit meilleure que 12V et que  $P_{J1}$  soit inférieure à 90mW. (Justifiez.)

$$\left. \begin{array}{l} KE > 12V \Rightarrow E > 6V \\ E^2/4R < 90mW \Rightarrow E < 6V \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{E = 6V}$$

La tension  $V_{AB}$  pouvant être faible, vous souhaitez l'amplifier à l'aide d'un amplificateur différentiel dont les tensions de saturation sont  $\pm 10V$ . L'une de ses entrées est donc  $V_{AM}$ , l'autre  $V_{BM}$ . La tension de sortie de cet amplificateur est appelée  $V_{OUT}$  avec

$$V_{out} = Ad(V_{AM} - V_{BM}) + Amc(V_{AM} + V_{BM})/2 \text{ avec } 20\log_{10}(Ad/Amc) = TRMC \text{ en dB.}$$

Comment nomme-t-on  $Ad$ ,  $Amc$  et  $TRMC$  ? (Complétez le tableau 3.)

$Ad$	$Amc$	$TRMC$
Gain différentiel	gain de mode commun	Taux de Réjection du Mode Commun

Tableau 3

Que vaut  $V_{out}$  pour  $V_{AM} = 3,06V$ ,  $V_{BM} = 2,94V$ ,  $Ad = 20$  et  $Amc = 0$  (amplificateur différentiel idéal) (1<sup>er</sup> cas) ? Que vaut  $V_{out}$  pour  $V_{AM} = 3,06V$ ,  $V_{BM} = 2,94V$ ,  $Ad = 20$  et  $TRMC = 60dB$  (amplificateur différentiel réel) (2<sup>ème</sup> cas) ? (Justifiez brièvement.)

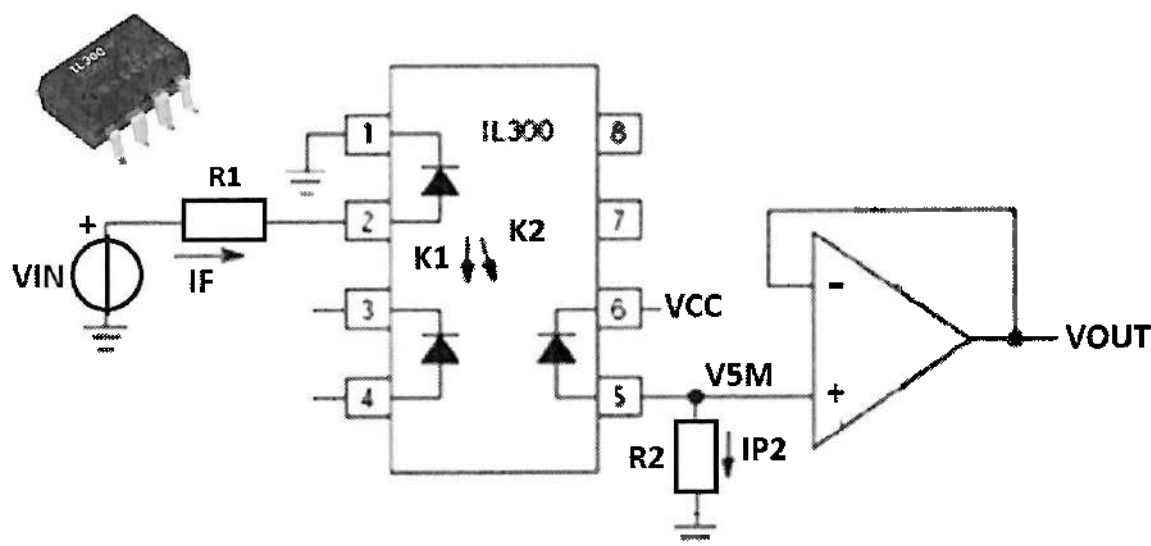
$$\begin{array}{l} 1^{er} \text{ cas : } V_{out} = 20(3,06 - 2,94) = 2,4V \\ 2^{ème} \text{ cas : } V_{out} = 2,4 + \frac{20}{1000} \times 3 = 2,46V \end{array}$$

#### Exercice n°4 : Optocoupleur (~19 points)

Un optocoupleur (ou encore opto-isolateur ou photocoupleur) est un composant permettant de transmettre un signal entre deux circuits électroniques (appelés par la suite circuit « entrée » et circuit « sortie ») sans qu'il y ait de liaison conductrice (des fils électriques par exemple) entre les deux circuits. Son utilisation, largement répandue, permet entre autres d'atténuer des parasites se transmettant dans les fils électriques ou de séparer les parties « haute tension » des parties « basse tension » (par exemple potentiellement détériorées par un pic de tension).

L'optocoupleur proposé est le IL300 (Vishay), se présentant sous la forme d'un circuit intégré (figure 5). Il contient une LED (broches 1 et 2) et deux photodiodes dont une seule sera utilisée dans la suite de l'exercice\*, celle entre les broches 5 et 6.

Le signal à transmettre via l'optocoupleur est appelé  $V_{IN}$ , le signal reçu  $V_{OUT}$ ,  $V_{OUT}$  devant bien sûr dépendre de  $V_{IN}$  suivant une loi connue. Le schéma proposé est présenté sur la figure 5.



**Figure 5** – Circuits « entrée » (à gauche) et « sortie » (à droite). Entre les deux, l'optocoupleur IL300 où la diode du haut est une LED (broches 1 et 2) et les deux diodes du bas des photodiodes (broches 3 et 4 et broches 5 et 6). La broche 6 est reliée à  $V_{CC} = 10V$  (tension imposée par un générateur non représenté sur le schéma).  $V_{5M}$  est la tension entre la broche 5 et la masse. L'AOP a des tensions de saturation de  $\pm 11V$ . D'après la documentation Vishay.

Le flux lumineux émis par la LED est proportionnel à  $I_F$ , l'intensité électrique dans la LED. Quant à la photodiode, si elle est polarisée dans le 3<sup>ème</sup> quadrant, c'est-à-dire avec  $V_{56} = V_{5M} - V_{CC} < 0$  et  $I_{P2} > 0$ , l'intensité électrique  $I_{P2}$  est proportionnelle au flux lumineux qu'elle reçoit et est donc proportionnelle à  $I_F$  :

$$I_{P2} = K_2 \times I_F$$

où  $K_2$  est une constante donnée par le constructeur.

Dans toute la suite, vous supposerez

- que la photodiode est bien polarisée dans le 3<sup>ème</sup> quadrant (et donc  $I_{P2} = K_2 \times I_F$ ),
- que  $0 < V_{IN} < 10V$  et que, sauf indication contraire,  $V_{IN}$  est une tension continue constante.

\* NB : des montages permettant de s'affranchir de la non linéarité de la LED utilisent la LED et les deux photodiodes du composant IL300...

Exprimez  $I_F$  en fonction de  $V_{IN}$  et  $R_1$  en supposant la caractéristique de la LED idéale avec une tension de seuil de 2V (LED passante : tension à ses bornes de 2V et  $I_F > 0$  ; LED bloquée :  $I_F = 0$  et tension à ses bornes  $< 2V$ ).

$$V_{IN} = V_{21} + R_1 I_F \Rightarrow I_F = (V_{IN} - V_{21}) / R_1 = \max\left(\frac{V_{IN} - 2}{R_1}; 0\right)$$

( si  $I_F > 0$   $V_{IN} > V_{21}$  et  $V_{21} = 2V$  : LED passante ; sinon LED bloquée )

En déduire la valeur de  $R_1$  pour avoir  $I_F = 20\text{mA}$  quand  $V_{IN} = 10V$ .

$$V_{IN} = 10V \Rightarrow \text{LED passante et } I_F = (V_{IN} - 2) / R_1$$

$$\Rightarrow R_1 = (V_{IN} - 2) / I_F \Rightarrow R_1 = 400\Omega$$

Exprimez  $V_{5N}$  en fonction de  $R_2$ ,  $K_2$  et  $I_F$ .

$$V_{5N} = R_2 \times I_{P2} \Rightarrow V_{5N} = R_2 K_2 I_F$$

Exprimez  $V_{OUT}$  en fonction de  $V_{5N}$  (justifiez brièvement).

$$\left. \begin{array}{l} V_+ = V_{5N} \\ V_- = V_{OUT} \\ V_+ = V_- \text{ car réaction négative} \end{array} \right\} \Rightarrow V_{OUT} = V_{5N} \text{ pour } |V_{5N}| < 11V \text{ (} V_{SAT} \text{)}$$

En déduire l'expression de  $V_{OUT}$  en fonction de  $V_{IN}$ ,  $K_2$ ,  $R_1$  et  $R_2$ .  $K_2 = 0,02$ . On souhaite  $V_{OUT} = 4V$  quand  $V_{IN} = 10V$ . En déduire la valeur de  $R_2$ .

$$\left. \begin{array}{l} V_{OUT} = V_{5N} \\ V_{5N} = R_2 K_2 I_F \\ I_F = \max\left(\frac{V_{IN} - 2}{R_1}; 0\right) \end{array} \right\} \Rightarrow V_{OUT} = \frac{R_2 K_2 \max(V_{IN} - 2; 0)}{R_1}$$

$$R_2 = \frac{4 \times 0,4k}{0,02 \times 8} \Rightarrow R_2 = 10k\Omega$$

Quel est l'intérêt du montage à AOP ayant comme entrée  $V_{5N}$  et comme sortie  $V_{OUT}$  ?

On peut ajouter une impédance sur  $V_{OUT}$  sans modifier l'expression précédente de  $V_{OUT}$ .

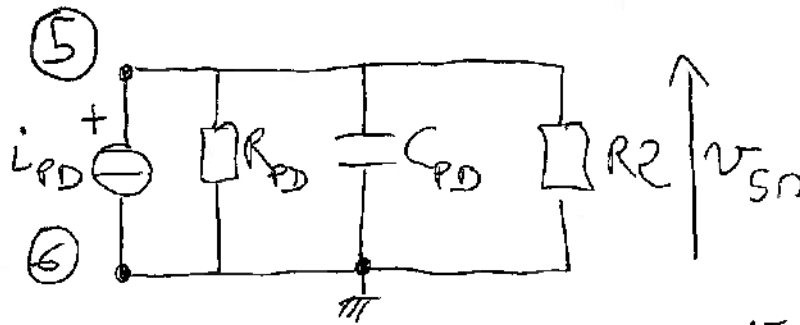
Roscilloscope,  $Z_e$  de l'étage suivant, ...

Quelle est la condition sur  $V_{IN}$  pour que  $V_{IN}$  soit effectivement transmis via ce montage ?

$$V_{OUT} = \frac{R_2 R_2}{R_1} \max(V_{IN} - 2; 0) \Rightarrow \text{Si } V_{IN} < 2V, \\ V_{OUT} \text{ est indépendant de } V_{IN} \text{ donc } V_{IN} \text{ n'est pas transmis.}$$

Si à la tension DC de  $V_{IN}$  s'ajoute une « petite » tension AC (l'ensemble vérifiant la condition de la précédente question), on remarque qu'à partir d'une certaine fréquence la composante AC est très mal transmise. Expliquez précisément pourquoi.

En AC et en remplaçant la photodiode par son schéma équivalent: (source DC éteinte):



C'est un filtre passe-bas de fréquence de coupure  $f_c$ .

$$v_{OUT} \rightarrow 0 \text{ quand } f \gg f_c$$

photodiode

$$\left( \text{avec } f_c = \frac{1}{2\pi (R_{PD} // R_c) C_{PD}} \right)$$