

## Objectifs du cours :

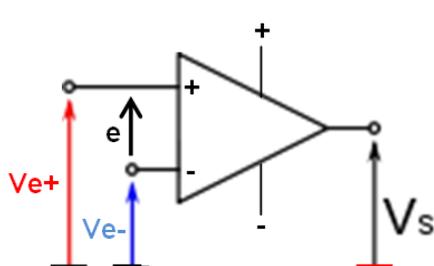
Ce cours traitera essentiellement les points suivants :

- symboles, rôle et caractéristiques des ALI
- exemple de brochage d'un ALI (LM 741CN)
- alimentation des ALI
- notions de boucle
- quelques montages
- exercices d'application

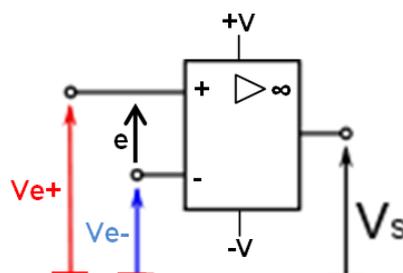
Un ALI (Amplificateur Linéaire Intégré) est un CI analogique. Les ALI étaient aussi appelés AOP ou Ampli OP (Amplificateur OPérationnel) parce qu'ils servaient à réaliser des opérations mathématiques (addition, soustraction, multiplication, division, intégration et dérivation) pour le calcul analogique. Il s'agit d'un des composants les plus importants de l'électronique analogique.

## SYMBOLES, RÔLE ET CARACTÉRISTIQUES

Norme américaine :



Norme européenne :



Le composant possède deux entrées : une entrée non inverseuse (+), une entrée inverseuse (-) et une sortie. Il se présente sous la forme d'un boîtier à huit broches (DIL 8). Les bornes d'alimentation ne sont en général pas représentées.

Un ALI permet d'amplifier la différence de potentiel « e » entre les 2 tensions d'entrées (Ve- et Ve+).

La tension d'entrée différentielle du montage « e » est :  $e = V_{e+} - V_{e-}$

**Remarque :**

La tension d'entrée différentielle est parfois repérée : Ved ou ε.

**CARACTÉRISTIQUES D'UN ALI IDÉAL**

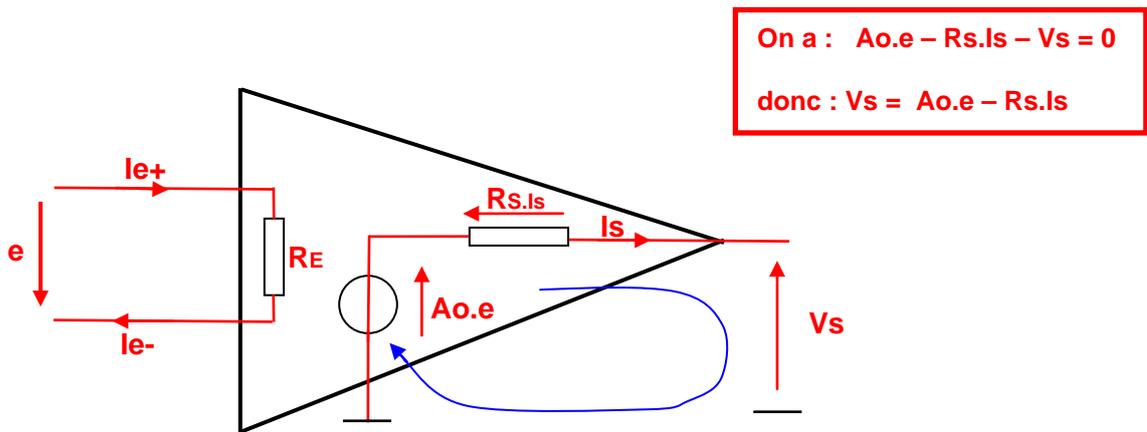


Schéma équivalent d'un ALI idéal

On adopte pour un ALI « idéal » les caractéristiques suivantes :

$R_E =$  Résistance d'entrée de l'ALI  $\approx \infty$  ;  $i_{e+} = i_{e-} \approx 0$

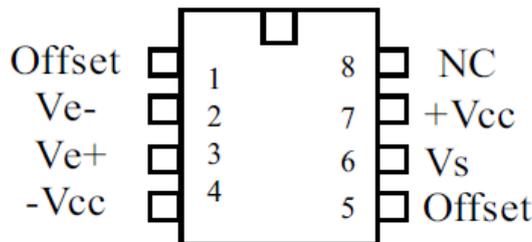
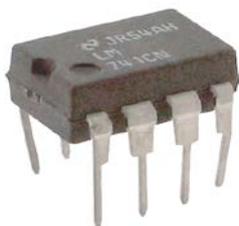
On admet alors la tension différentielle  $e = R_E \cdot i_e \approx 0$

$R_S =$  Résistance de sortie de l'ALI  $\approx 0$  ;  $R_S \cdot i_s \approx 0$

et par suite :  $V_s = A_o \cdot e$

$A_o$  est le gain en boucle ouverte de l'ALI, on l'admet  $\approx \infty$

**BROCHAGE**



- 1 : Réglage Offset
- 2 : Entrée inverseuse
- 3 : Entrée non inverseuse
- 4 : Alimentation (-)
- 5 : Réglage Offset
- 6 : Sortie
- 7 : Alimentation (+)
- 8 : Non Connecté

**Exemple : LM 741CN**

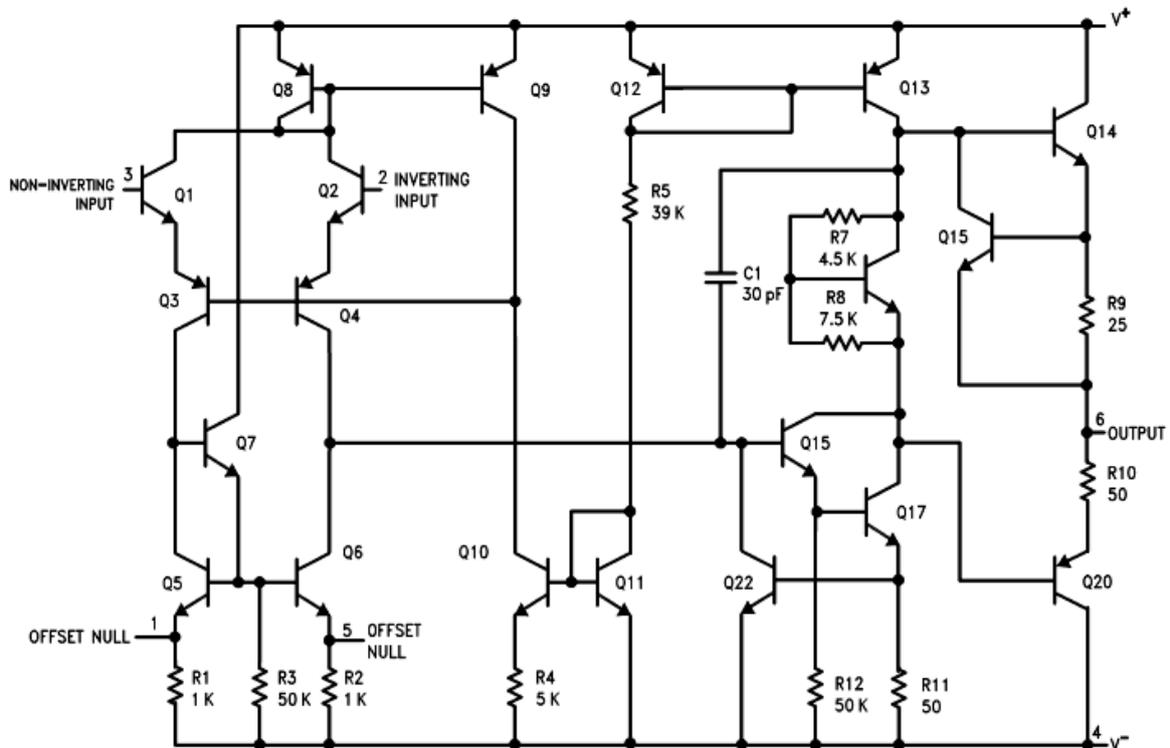


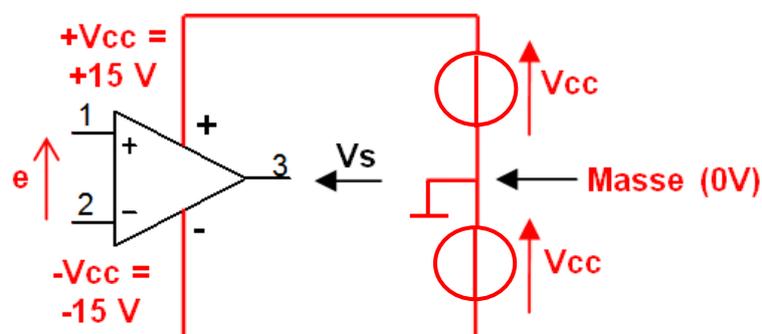
Schéma interne de l'ALI LM 741CN

## ALIMENTATION

Elle va dépendre de l'utilisation du montage. Elle peut-être de 2 types : symétrique ou asymétrique.

## ALIMENTATION SYMÉTRIQUE

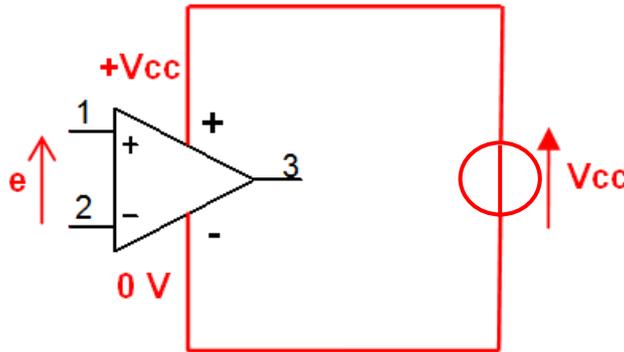
Les ALI fonctionnent en général avec une alimentation double symétrique (+Vcc ; -Vcc).



Ce type d'alimentation est constituée de deux générateurs de tension continue symétriques et sera utilisé si la sortie doit évoluer en valeur positive et négative (par exemple lors de l'amplification d'un signal alternatif).

ALIMENTATION ASYMÉTRIQUE

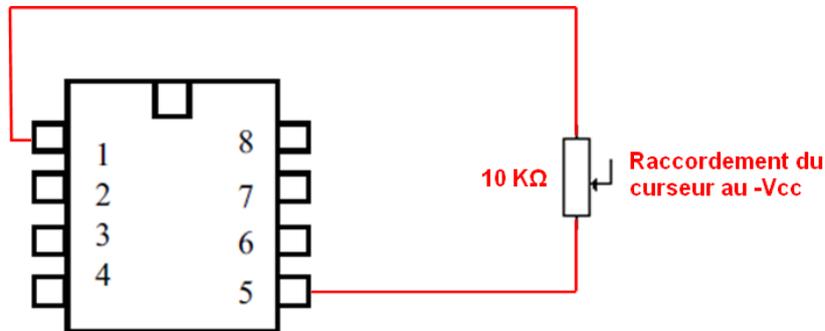
Les ALI peuvent aussi être alimentés en asymétrie (+Vcc ; 0 V).



Dans ce cas la sortie ne peut évoluer qu'entre 0 V et +Vcc.  
Ce type d'alimentation est en général réservé à la commande TOR ou à l'amplification de tension continue positive.

Remarques :

La tension d'offset est une tension de décalage de la sortie due à la constitution interne de l'ALI.  
Le réglage de la tension d'offset permet de régler  $V_s = 0$  si  $e = 0$  (ajustement du zéro en sortie).



NOTIONS DE BOUCLE

FONCTIONNEMENT EN BOUCLE OUVERTE

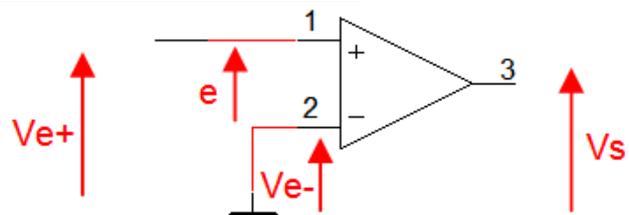
En pratique, les courants d'entrée peuvent être négligés ( $i_{e+} \approx 0$  ;  $i_{e-} \approx 0$ ).

$R_E$  = résistance d'entrée de l'ALI  $\approx \infty$ .

Alors la tension différentielle  $e = R_E \cdot i_e \approx 0$

$R_S$  = résistance de sortie de l'ALI  $\approx 0$  ;

$R_S \cdot I_s \approx 0$

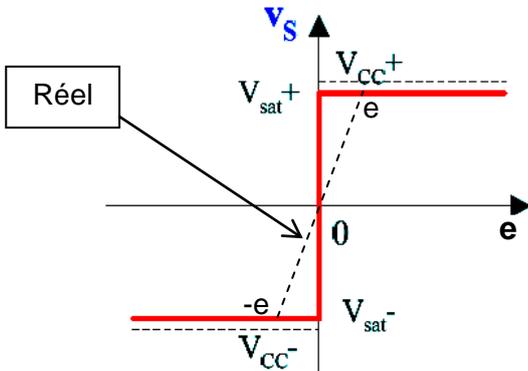


Caractéristique de transfert :  $V_s = f(e)$

$V_s = A_o \times e = A_o \times (V_{e+} - V_{e-})$

Ao est le gain en boucle ouverte.

Caractéristique de transfert d'un ALI « idéal ».



La tension de sortie Vs dépend directement de la tension différentielle d'entrée e.

On distingue trois zones :

- la zone de linéarité :  $e \approx 0 \text{ V}$  ;  $V_{sat-} < V_s < V_{sat+}$
- la zone de saturation haute :  $e > 0 \text{ V}$  ;  $V_s = V_{sat+}$
- la zone de saturation basse :  $e < 0 \text{ V}$  ;  $V_s = V_{sat-}$

**Remarque :**

Si  $V_{cc} = \pm 15 \text{ V}$  alors  $V_{sat} = \pm 14 \text{ V}$

Calculons la tension différentielle d'entrée « e » entraînant la saturation de la tension de sortie pour un LM 741CN en boucle ouverte avec  $A_o = 200\,000$  d'après le datasheet et alimenté en asymétrie avec  $V_{cc} = 15 \text{ V}$ .

$$V_s = A_o \times e ; e = \frac{V_s}{A_o} = \frac{15}{200000} = 0,000075 \text{ V} = 75 \mu\text{V}$$

**Conclusion :**

Un tel montage est souvent incontrôlable (car trop sensible =  $75 \mu\text{V}$ ). L'ALI sera toujours (ou presque) utilisé avec une contre réaction donc en boucle fermée (Exception : voir montage comparateur de tension).

**FUNCTIONNEMENT EN BOUCLE FERMÉE**

Schéma équivalent du montage avec réaction positive.

Symbole d'un comparateur dans une boucle d'asservissement

**Remarques :**

On dit qu'il y a réaction positive quand la sortie est reliée à l'entrée non inverseuse. On dit qu'il y a contre-réaction (ou réaction négative) quand la sortie est reliée à l'entrée inverseuse.

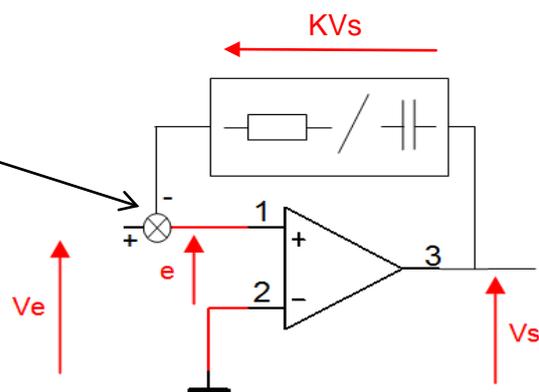


Schéma équivalent du montage avec réaction positive

Une contre-réaction assure un fonctionnement linéaire de l'ALI ( $e \approx 0 \text{ V}$ ).

Une réaction positive provoque la saturation de l'ALI.

$$e = V_e - KV_s ; V_s = A_o \cdot e$$

$$V_s = A_o \cdot (V_e - KV_s) \text{ ou encore } V_s = A_o \cdot V_e - A_o \cdot KV_s \text{ soit } A_o \cdot V_e = V_s + A_o \cdot KV_s$$

donc  $A_o.V_e = V_s (1 + A_o.K)$  et  $\frac{V_s}{V_e} = \frac{A_o}{1 + A_o.K}$

Si  $A_o.K \gg 1$  on peut écrire  $\frac{V_s}{V_e} \approx \frac{1}{K}$

### Conclusion :

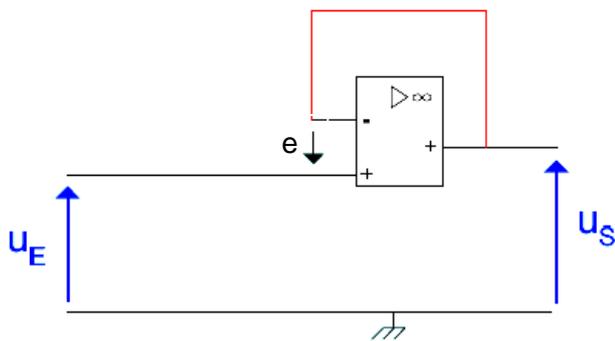
On pose  $\frac{V_s}{V_e} = A_v$  (le gain en tension du montage).

Si  $A_o.K \gg 1$ , le gain  $A_v$  ne dépend plus de  $A_o$  mais uniquement du facteur  $K$  qui est souvent un rapport de résistance donc parfaitement contrôlable.

## LES PRINCIPAUX MONTAGES

### MONTAGE SUIVEUR DE TENSION

L'ALI doit avoir une contre-réaction, on sait qu'en régime linéaire :  $e \approx 0$  V.



$$u_S = u_E - e$$

L'ALI possède une contre-réaction.

$e \approx 0$  V

Finalement :  $u_S = u_E$

### Remarques :

Le suiveur de tension permet de prélever une tension sans la perturber, car il possède un courant d'entrée nul. On le rencontre donc régulièrement lors de la présence de sonde.

### MONTAGE AMPLIFICATEUR DE TENSION

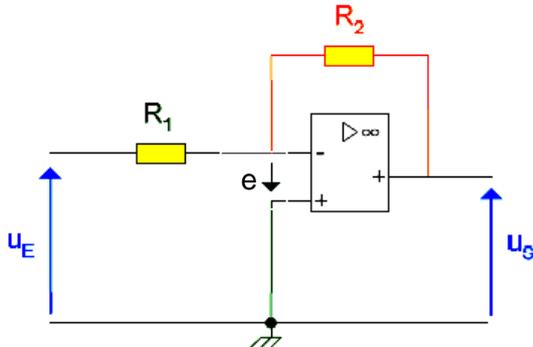
L'amplification en tension est :

$$A_v = \frac{u_S}{u_E}$$

Le gain en dB (décibels) est :

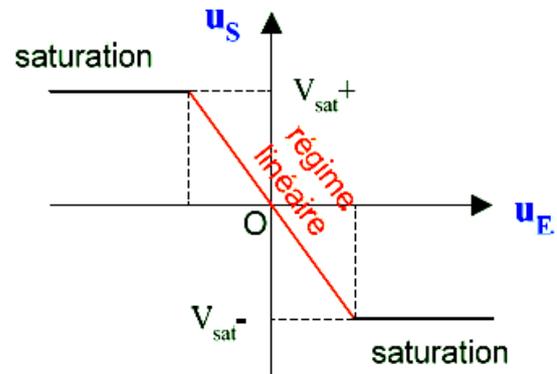
$$G_v = 20 \log_{10} |A_v|$$

MONTAGE AMPLIFICATEUR INVERSEUR



$$\frac{u_S}{u_E} = - \frac{R_2}{R_1}$$

Caractéristique de transfert de  $u_S = f(u_E)$  :

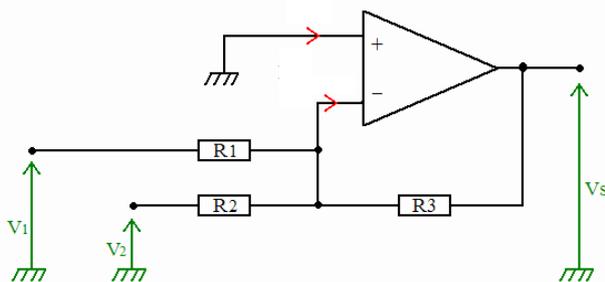


Calculons  $A_v$  et  $G_v$  si  $R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega$ ,  
et  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ .

$$A_v = - \frac{R_2}{R_1} = - \frac{100}{4,7} = -21,3$$

$$G_v = 20 \log_{10} |A_v| = 26,6 \text{ dB}$$

MONTAGE AMPLIFICATEUR ADDITIONNEUR



$$V_s = -R_3 \times \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right)$$

**Remarques :**

Ce montage est aussi appelé « amplificateur sommateur de tension ».

Si  $R_1 = R_2 = R_3$  alors  $V_s = - (V_1 + V_2)$

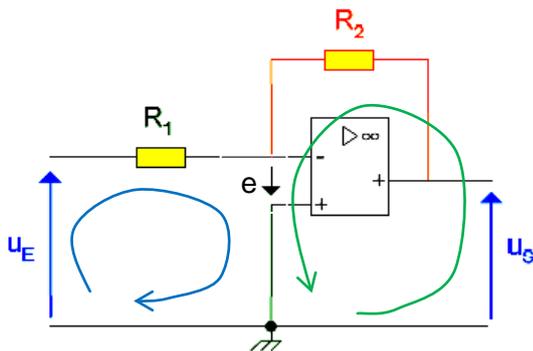
Ils existent d'autres montages : amplificateur non inverseur, comparateur de tension, oscillateur, amplificateur de différence, ...

## EXERCICES D'APPLICATION

## EXERCICE N° 1

Question :

Démontrez l'équation du montage « amplificateur inverseur » ci-dessous.



$$\frac{u_S}{u_E} = - \frac{R_2}{R_1}$$

**Hypothèses de départ :** on admet l'ALI idéal  $R_E \approx \infty$  donc  $i_{e+} = i_{e-} \approx 0$  et  $e \approx 0$ .

**Maille d'entrée en bleu :**  $u_E - R_1 \cdot I_1 + e = 0$  (mais  $e \approx 0$ )  
donc  $u_E = R_1 \cdot I_1$

**Maille de sortie en vert :**  $u_S + R_2 \cdot I_2 + e = 0$  (mais  $e \approx 0$ )  
donc  $u_S = - R_2 \cdot I_2$

$$A_v = \frac{u_S}{u_E} \text{ donc } A_v = \frac{-R_2 \cdot I_2}{R_1 \cdot I_1} \text{ (mais } I_1 = I_2 \text{ car } i_{e-} \approx 0)$$

$$\text{donc } A_v = \frac{-R_2}{R_1}$$

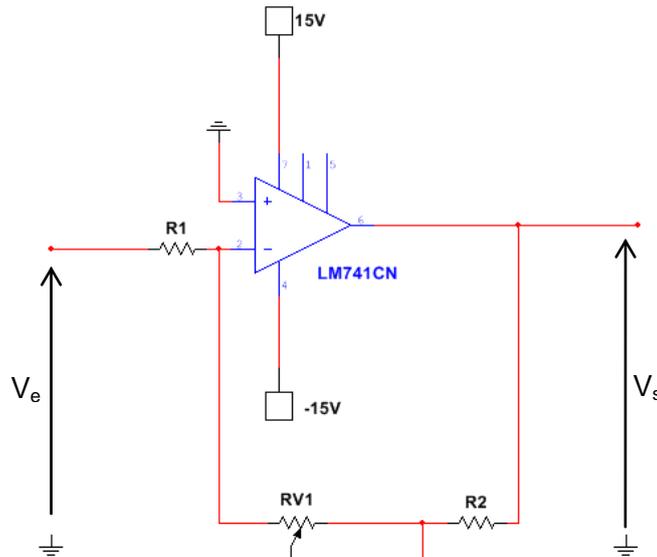
**Conclusion :**

On peut encore écrire :  $u_S = \frac{-R_2}{R_1} \times u_E$  ou  $u_S = A_v \times u_E$

Le signal de sortie est donc au gain près l'inverse du signal d'entrée.

## EXERCICE N° 2

On souhaite pouvoir régler le gain d'un montage (voir page suivante) de manière fine.  
On donne  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$  ;  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$  et  $R_{V1} = 330 \text{ k}\Omega$ .



**Question 1 :**

Donnez les deux limites extrêmes d'amplification ( $A_v$  maxi et  $A_v$  mini) de ce montage.

Il s'agit d'un montage amplificateur inverseur donc :

On a une amplification maximale lorsque RV1 est réglé au maximum soit 330 k $\Omega$ .

$$\frac{V_s}{V_e} = - \frac{RV1+R2}{R1} = - \frac{330+100}{10} = -43 \quad \boxed{A_v \text{ maxi} = -43}$$

On a une amplification minimale lorsque RV1 est réglé au minimum soit 0 k $\Omega$ .

$$\frac{V_s}{V_e} = - \frac{RV1+R2}{R1} = - \frac{0+100}{10} = -10 \quad \boxed{A_v \text{ mini} = -10}$$

**Question 2 :**

Quelle est la valeur maximum admissible en  $V_e$ , sans atteindre la saturation (c'est-à-dire pour rester dans la zone linéaire), quand l'amplification est maximale ?

L'amplification est maximale lorsque que RV1 est réglé au maximum ( $A_v$  maxi = -43).

$$A_v = \frac{V_s}{V_e} \text{ donc } V_e = \frac{V_s}{A_v} ; V_e \text{ maxi admissible} = - \frac{15}{43} = -0,348 \text{ V soit } \boxed{-348 \text{ mV}}$$

$V_e$  doit être compris entre -348 mV et 348 mV.

**Question 3 :**

D'après le montage il est possible d'augmenter la valeur de  $V_e$  trouvée précédemment tout en restant dans la zone linéaire. Comment ? Quelle est cette valeur de  $V_e$  ?

Pour un réglage minimum de  $R_{v1}$  on a  $A_v$  mini = -10.

$$A_v = \frac{V_s}{V_e} \text{ donc } V_e = \frac{V_s}{A_v} ; V_e \text{ maxi admissible} = -\frac{15}{10} = -1,5 \text{ V soit } \boxed{-1500 \text{ mV}}$$

$A_v$  peut augmenter jusqu'à 1500 mV avant que l'ALI n'atteigne la saturation.

**EXERCICE N° 3**

**Étude d'une carte de température avec sonde PT100**

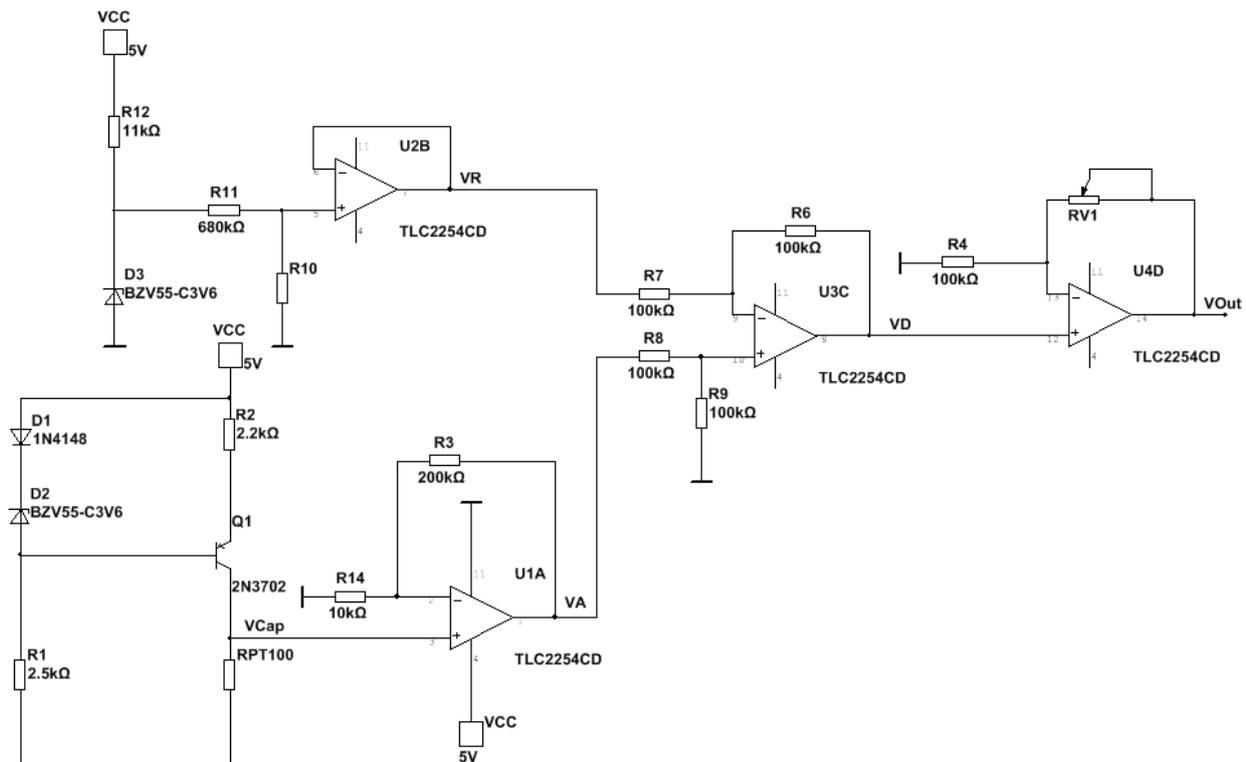
Un robot est équipé d'un capteur de température industriel (PT100) qui est approprié pour travailler dans des conditions extrêmes (-200 °C à +900 °C).

Pour la mission en cours, les scientifiques estiment que les valeurs de températures extrêmes seront comprises entre -30 °C et 200 °C.

En sachant que ces valeurs doivent être traitées ensuite par un convertisseur analogique numérique (CAN) dont la gamme de tension sera comprise entre 0 et 5 V, il faut, pour avoir une précision maximale, que nous soyons proches de 0 en sortie  $V_{Out}$  pour une température de -30 °C et proche de 5 V pour une température de 200 °C. On se propose donc de voir si la structure proposée (en différents modules) répond bien au cahier des charges et s'il y a bien adaptation de la chaîne d'acquisition aux caractéristiques des grandeurs à acquérir.

Le capteur mis en œuvre est une sonde PT100 dont l'expression analytique est la suivante :

Avec :  $R_t$  (résistance en Ohms à une température  $T$  en °C).



**Question 1 :**

Quelle valeur renvoie la sonde PT100 si la température est de 0 °C ?

$$R_t = 100 \times (1 + 3,9083 \times 10^{-3} \times 0 - 5,775 \times 10^{-7} \times 0^2) = \boxed{100 \Omega}$$

Question 2 :

Étude du générateur à courant constant (module 1)

$UD2 = 3,6 V ; UD1 = 0,6 V ; V_{eb} = 0,6 V$ .  
 Cette structure est équivalente à un générateur de courant constant.

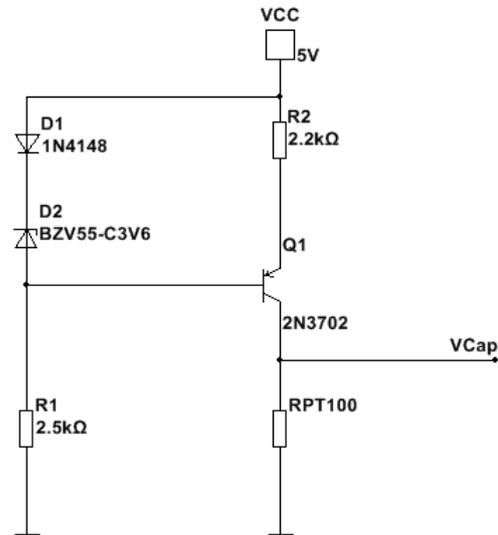
En utilisant la loi des mailles, démontrer que le courant circulant dans R2 est constant et égal à 1,64 mA.

On considère que le courant circulant dans la PT100 est égal à celui circulant dans R2.

En faisant la loi des mailles, on obtient :  
 $UD1 + UD2 = R2 \times i + V_{eb}$

or  $V_{eb} = 0,6 V$  et  $UD1$  aussi, d'où  $i = \frac{UD2}{R2} =$

$$\frac{3,6}{2,2 \times 10^3} = \boxed{1,64 \text{ mA}}$$



Question 3 :

Déterminez l'expression de VCap.

$$\boxed{V_{Cap} = R_{PT100} \times i}$$

Question 4 :

Déterminez la valeur de la résistance PT100 à -30 °C et +200 °C.

$$\text{à } -30^{\circ}\text{C} : R_{PT100} = 100 \times (1 + 3,9083 \times 10^{-3} \times (-30) - 5,775 \times 10^{-7} \times (-30)^2) = \boxed{88,2 \Omega}$$

$$\text{à } +200^{\circ}\text{C} : R_{PT100} = 100 \times (1 + 3,9083 \times 10^{-3} \times 200 - 5,775 \times 10^{-7} \times 200^2) = \boxed{175,8 \Omega}$$

En déduire les valeurs mini et maxi de VCap.

$$V_{Cap \text{ min}} (\text{à } -30^{\circ}\text{C}) = 88,2 \times 1,64 \times 10^{-3} = \boxed{145 \text{ mV}}$$

$$V_{Cap \text{ max}} (\text{à } 200^{\circ}\text{C}) = 175,8 \times 1,64 \times 10^{-3} = \boxed{288 \text{ mV}}$$

**Amplification VCap (module 2)**

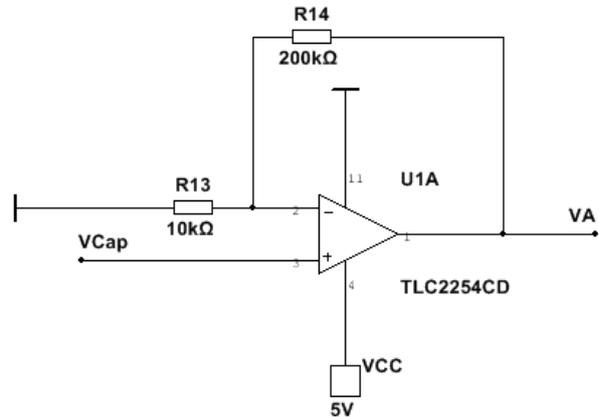
Il s'agit ici d'un montage amplificateur non inverseur.

$$\frac{VA}{V_{Cap}} = 1 + \frac{R14}{R13}$$

**Question 5 :**

Déterminez l'expression de VA en fonction de VCap.

$$VA = V_{Cap} \times \left( 1 + \frac{R14}{R13} \right)$$



**Question 6 :**

Déterminez la valeur de l'amplification Av du montage.

$$Av = \frac{Vs}{Ve} = \frac{VA}{V_{Cap}} = 1 + \frac{200}{10} = \boxed{21}$$

En déduire la variation de la plage de VA.

$$VA_{\text{mini}} = V_{Cap_{\text{mini}}} \times 21 = 145 \times 21 = 3045 \text{ mV soit } \boxed{3,05 \text{ V}}$$

$$VA_{\text{maxi}} = V_{Cap_{\text{maxi}}} \times 21 = 288 \times 21 = 6048 \text{ mV soit } \boxed{6,05 \text{ V}}$$

**Référence VR (module 3)**

**Question 7 :**

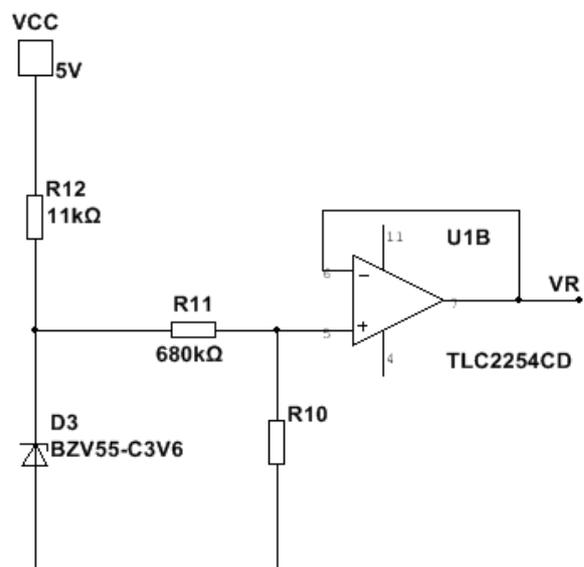
Quel est le nom du montage réalisé par U1B ?

C'est un montage suiveur ou adaptateur d'impédance.

**Question 8 :**

Que peut-on dire de VR ?

La tension VR = Ve et ne variera pas en fonction des éléments placés à la suite.



**Décalage (module 4)**

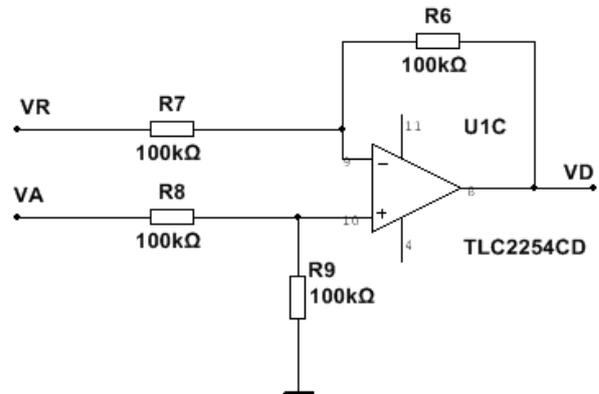
Il s'agit ici d'un montage amplificateur de différence.

$$VD = \frac{R9}{R8 + R9} \times \frac{R7 + R6}{R7} \times VA - \frac{R6}{R7} \times VR$$

**Question 9 :**

Calculez VD en fonction de VA et VR.

**VD = VA - VR**

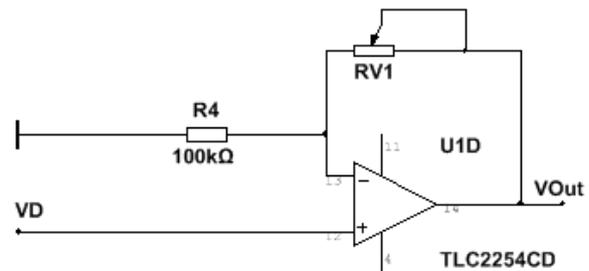


**Correction de gain (module 5)**

**Question 10 :**

Quel est le nom du montage réalisé par U1D ?

C'est un amplificateur non inverseur.



**Question 11 :**

Déterminez l'expression de VOut en fonction de VD et des éléments du montage.

**VOut = VD x (1 +  $\frac{RV1}{R4}$ )**

**Question 12 :**

Déterminer l'expression et la valeur du réglage de RV1 pour obtenir un gain de 1,5.

$$Av = \frac{u_s}{u_E} = \frac{VOut}{VD} = (1 + \frac{RV1}{R4}) = 1,5$$

$$\alpha RV1 = 1,5 - 1 \times R4 = 0,5 \times 100^3 = 50\ 000\ \Omega$$

**RV1 doit être réglé à 50 KΩ.**