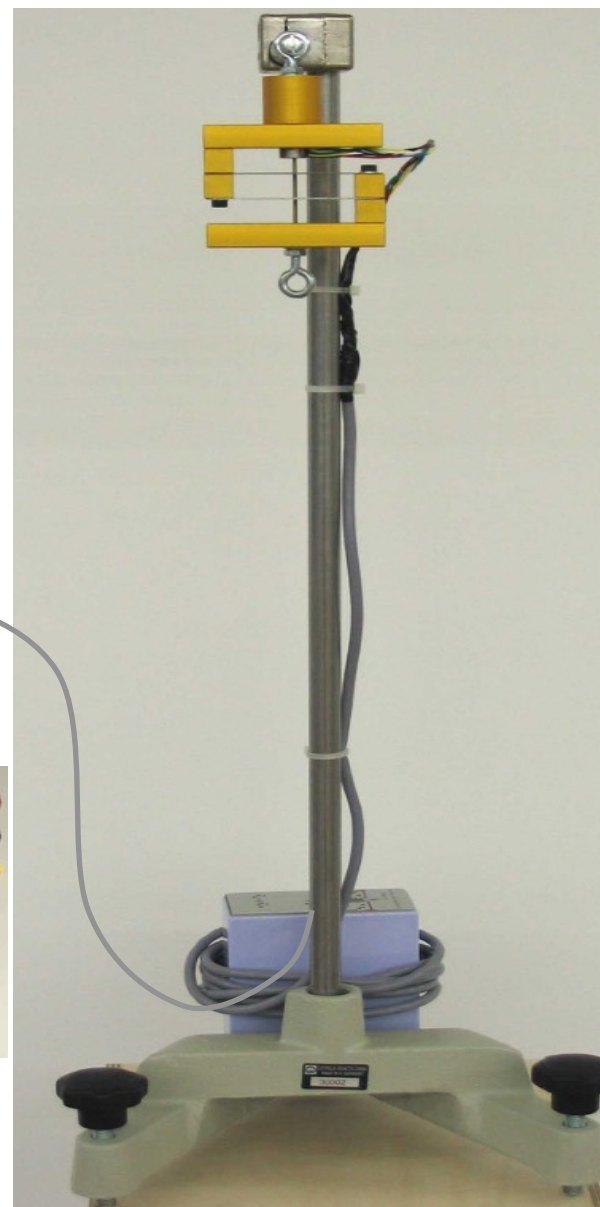
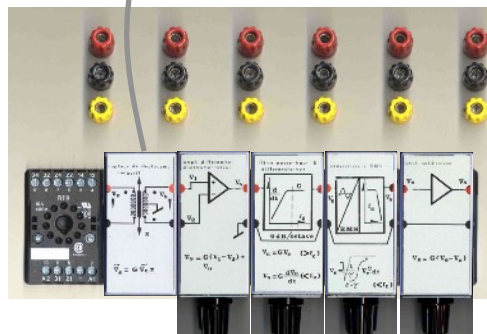
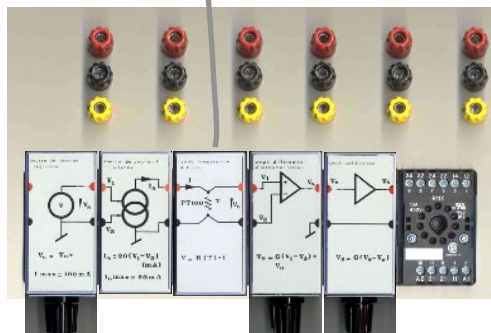


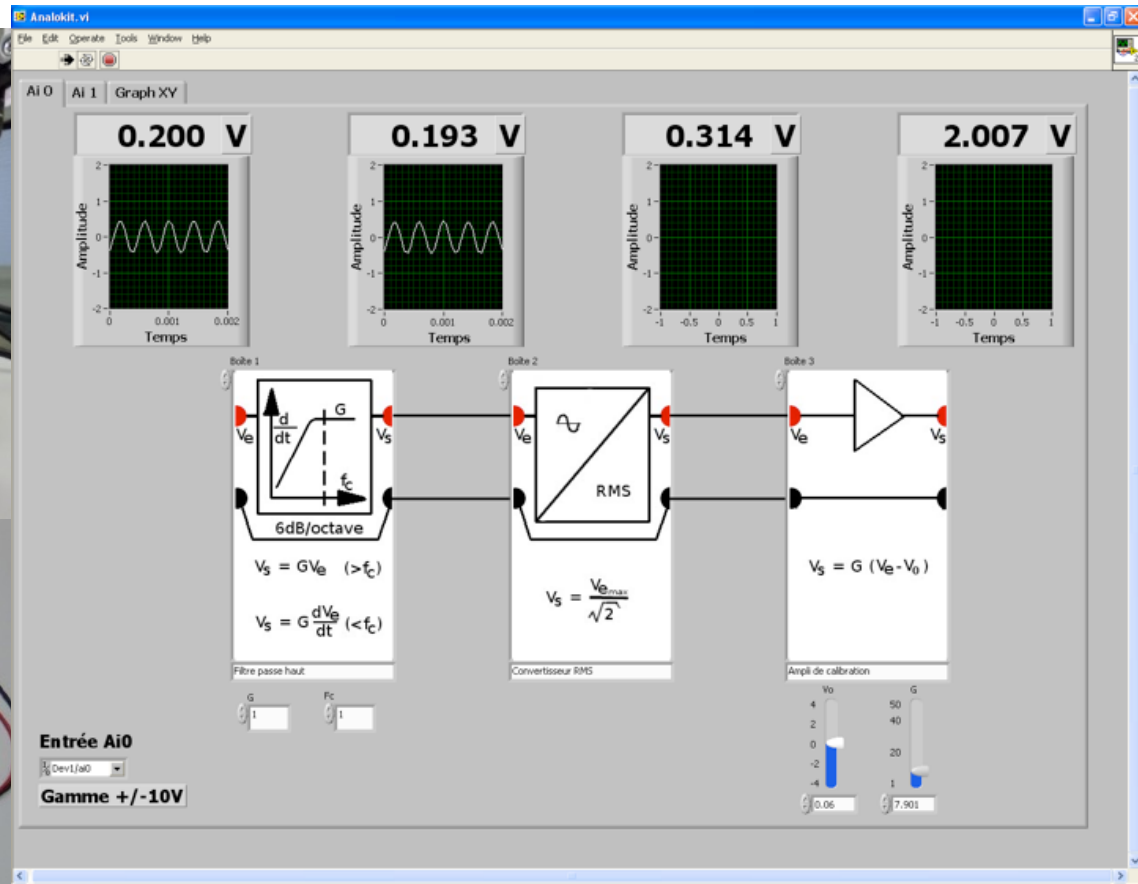
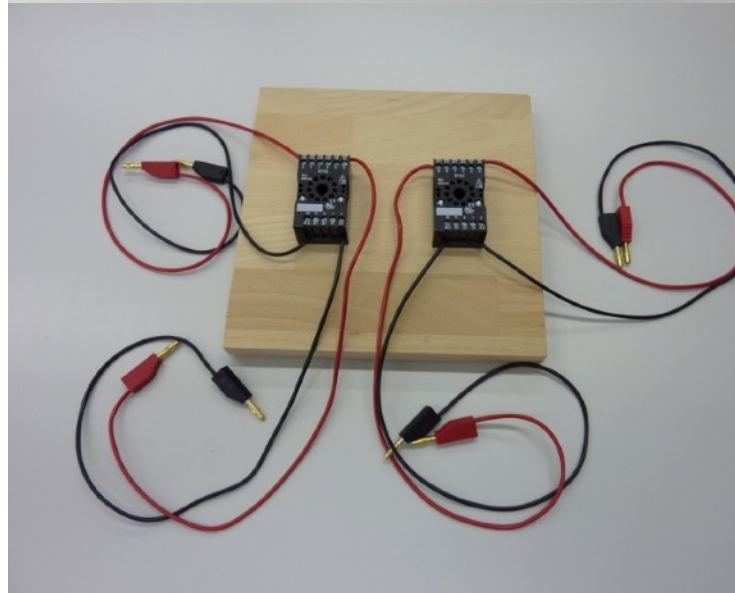
# Expérimentations sur les transducteurs Balance et thermomètres digitaux

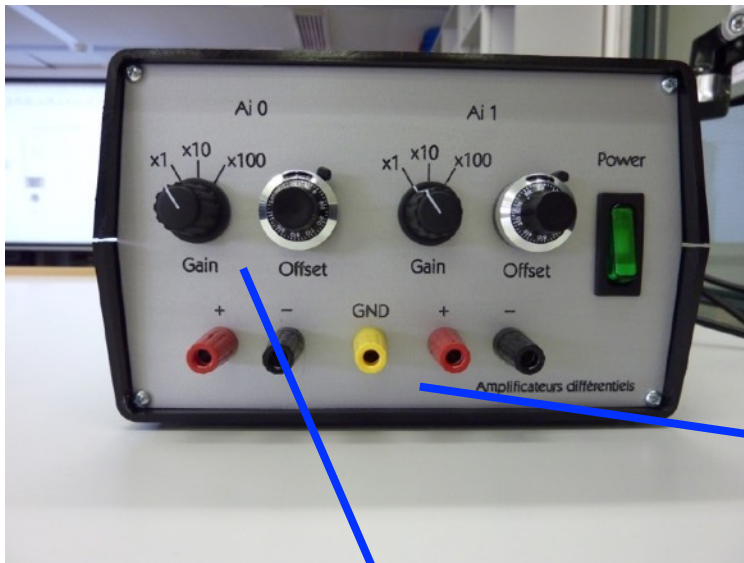
EPFL

D. Mari



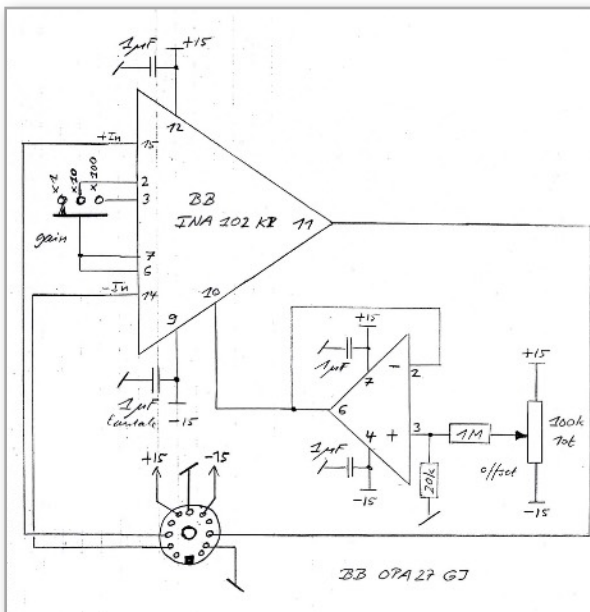
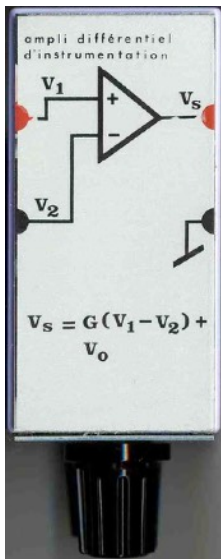
# Nouvelle configuration: LabView





Amplificateur différentiel d'instrumentation

Convertisseur A/D



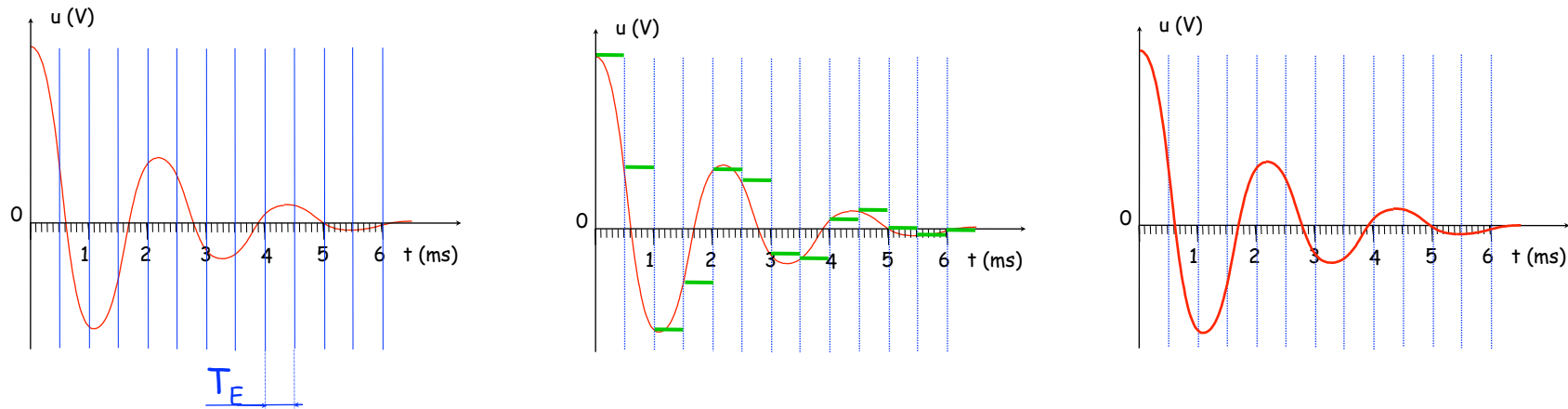
# Analogique-numérique

## Conversion analogique-numérique

On peut décomposer la conversion en deux étapes : l'échantillonnage et la numérisation. Dans la pratique, ces deux étapes se font simultanément.

### L'échantillonnage

L'échantillonnage consiste à découper la courbe en bandes verticales d'une certaine largeur appelée période d'échantillonnage  $T_E$ . Plus cette période est petite, plus la courbe est divisée en un grand nombre de bandes.



On transforme ainsi une courbe continue en une courbe en escalier. De nombreuses informations sont donc perdues.

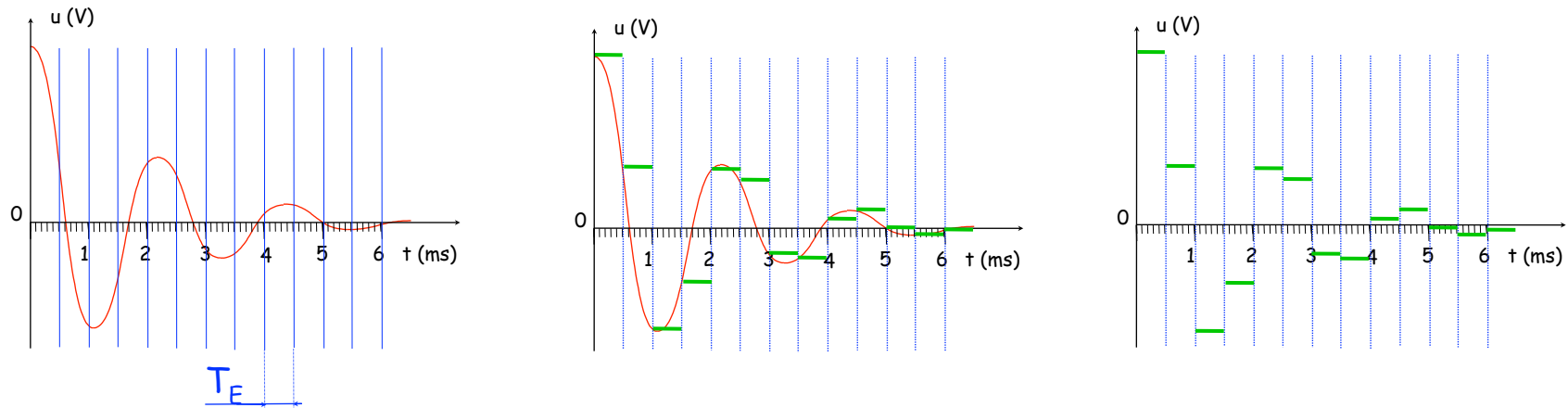
# Analogique-numérique

## Conversion analogique-numérique

On peut décomposer la conversion en deux étapes : l'échantillonnage et la numérisation. Dans la pratique, ces deux étapes se font simultanément.

### L'échantillonnage

L'échantillonnage consiste à découper la courbe en bandes verticales d'une certaine largeur appelée période d'échantillonnage  $T_E$ . Plus cette période est petite, plus la courbe est divisée en un grand nombre de bandes.



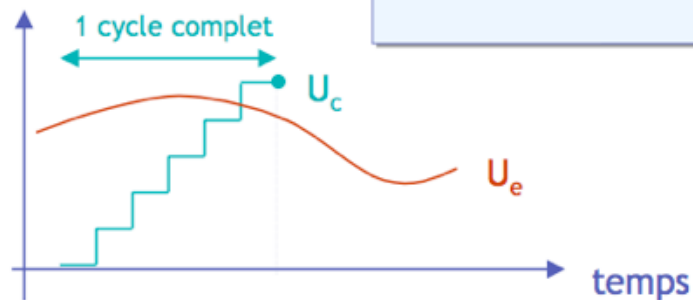
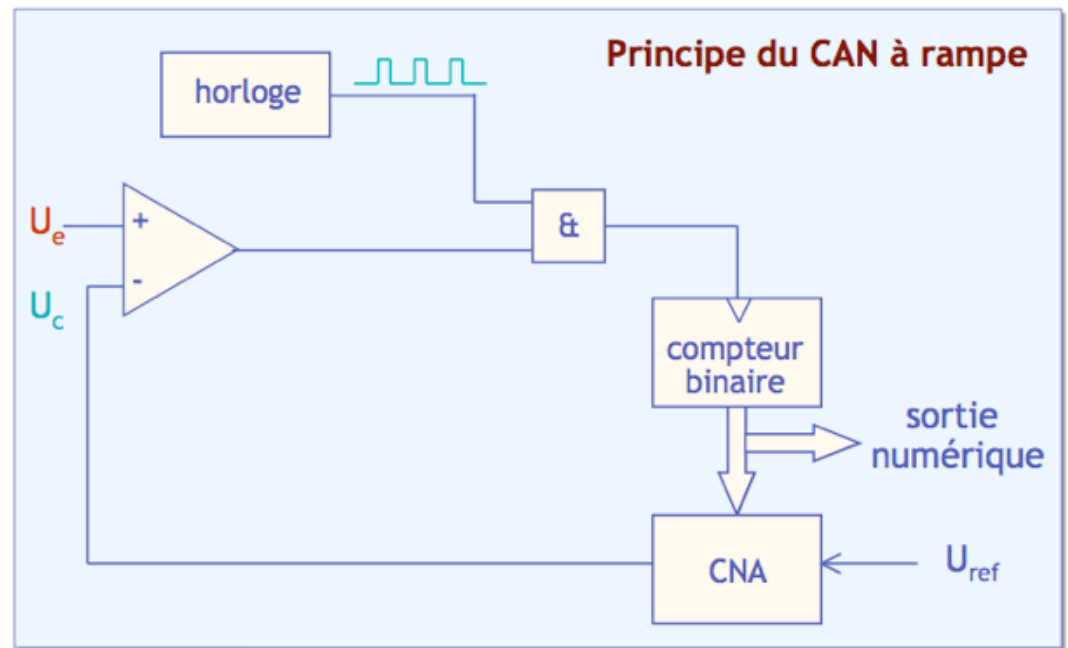
On transforme ainsi une courbe continue en une courbe en escalier. De nombreuses informations sont donc perdues.

# Conversion Analogique-Numérique (CAN)

Comparaison avec un signal de référence  $U_{ref}$

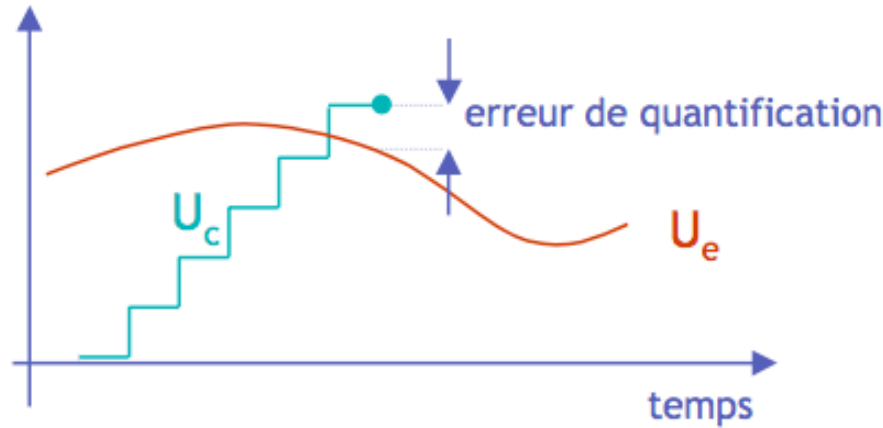
$$N(bin) = \frac{U_e}{U_{ref}} (2^n - 1)$$

Le CAN peut convertir des signaux allant de 0 à  $U_{ref}$



# Conversion Analogique-Numérique (CAN)

## Erreur de quantification



## Temps d'échantillonnage

Le temps nécessaire pour effectuer une conversion vaut au plus

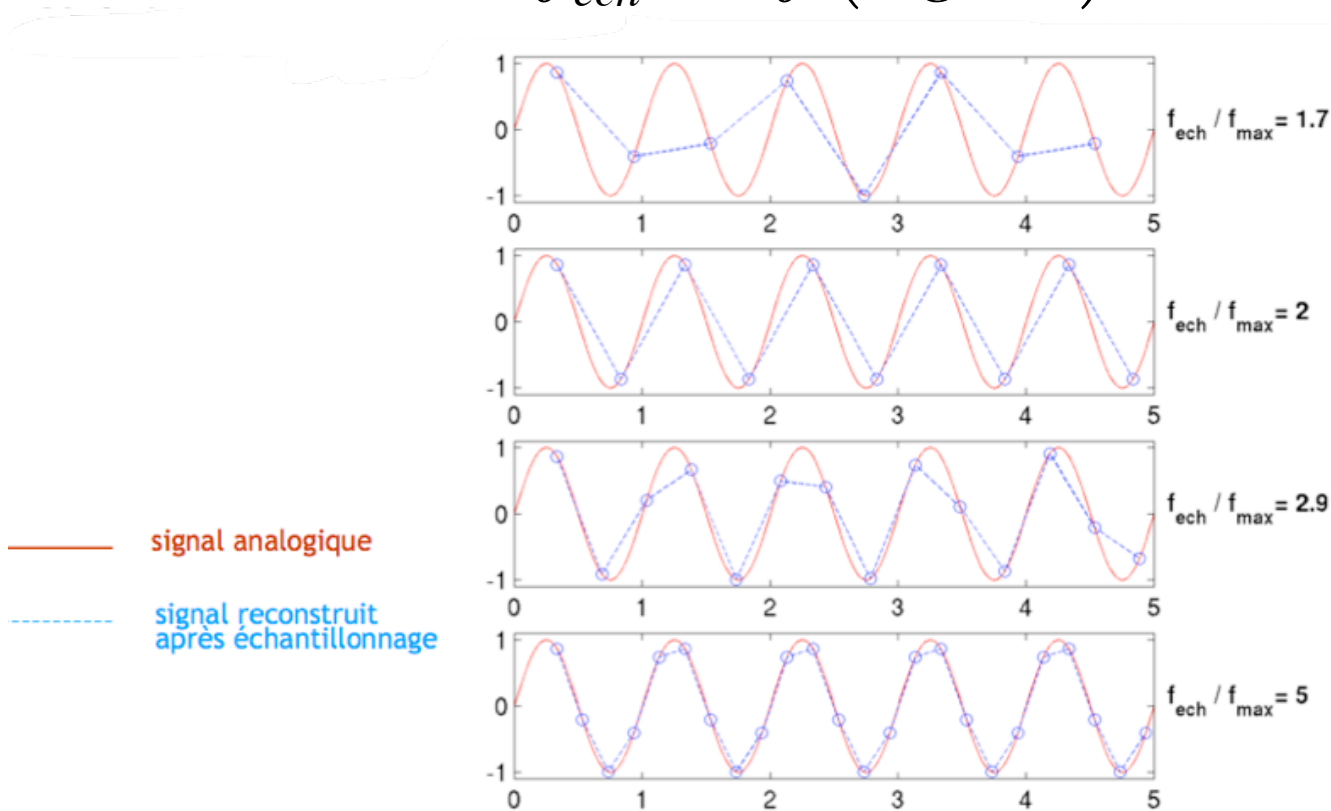
$$T_{\max} = (2^n - 1) \cdot T \quad T = \text{période d'horloge}$$

# Conversion Analogique-Numérique (CAN)

## Fréquence d'échantillonnage

Théorème de Shannon ou de Nyquist

$$f_{ech} > 2f(signal)$$

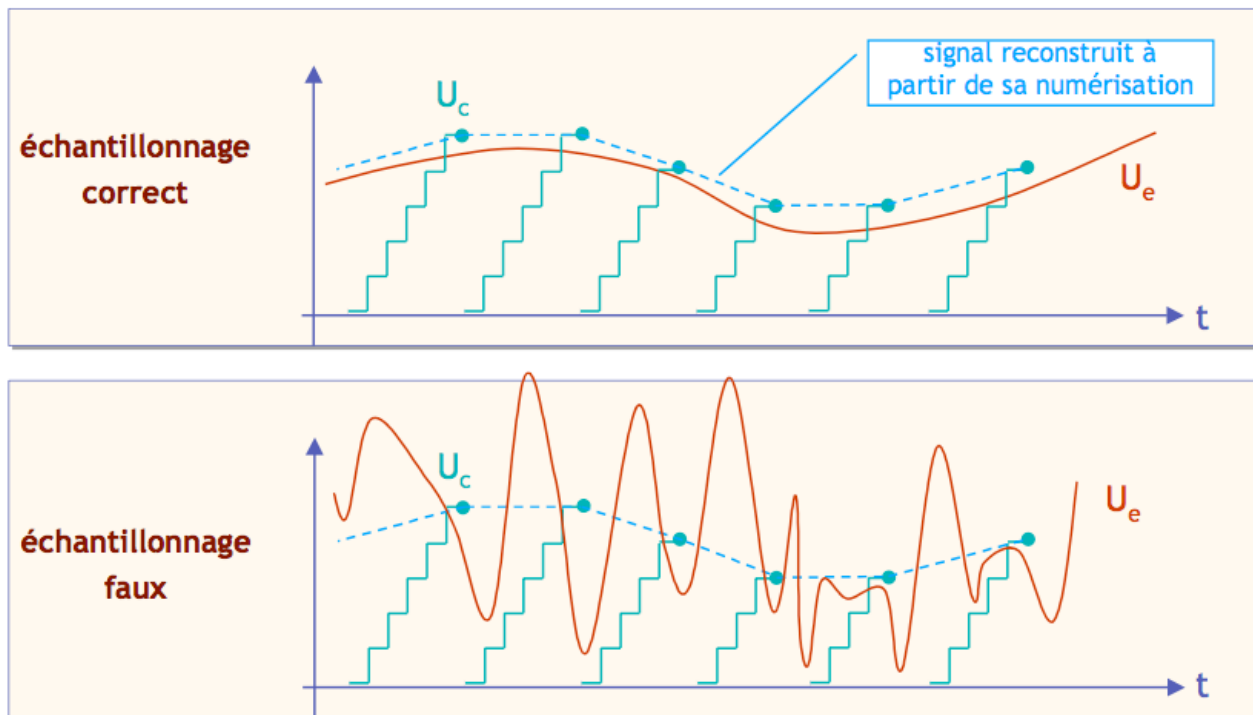


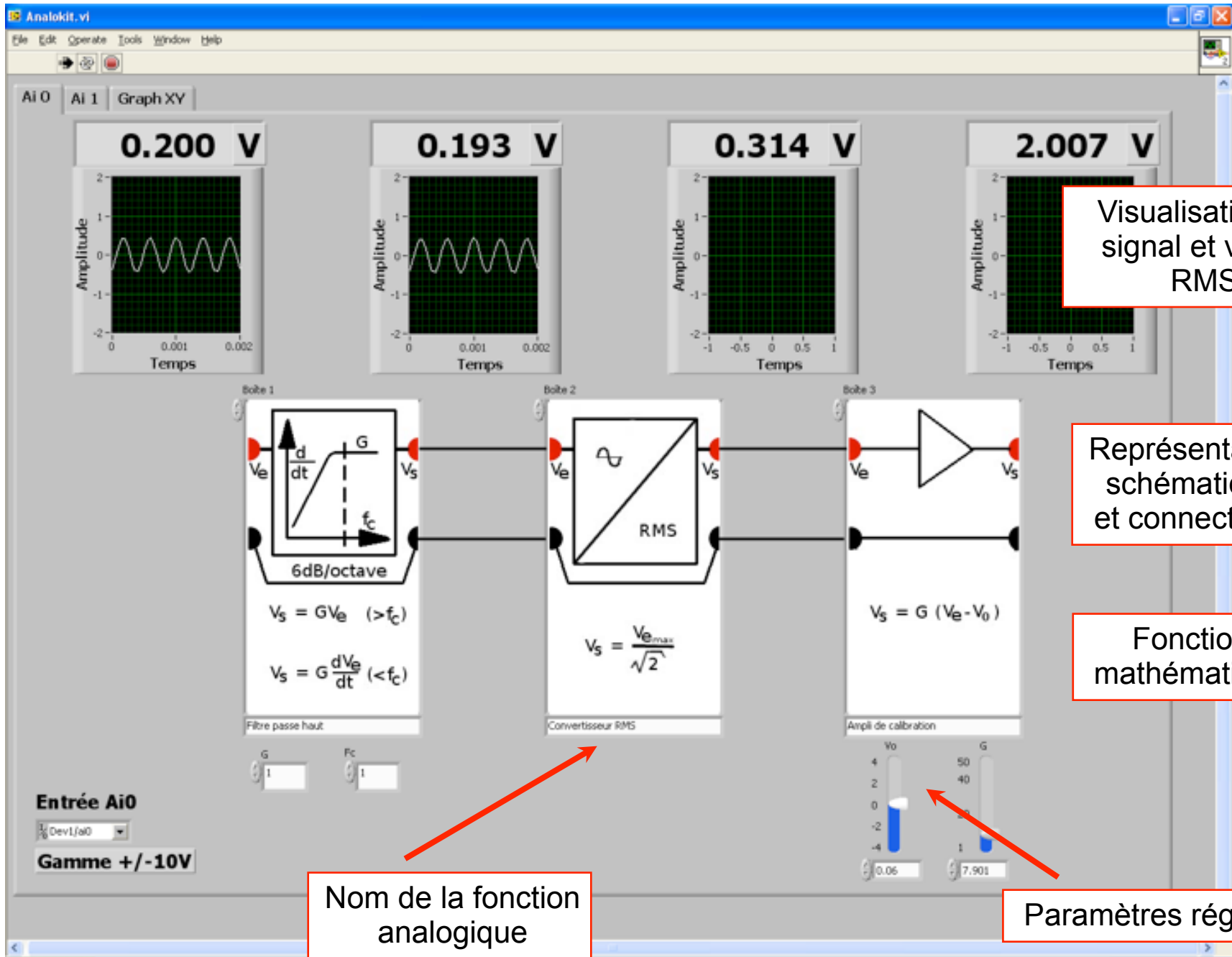
# Conversion Analogique-Numérique (CAN)

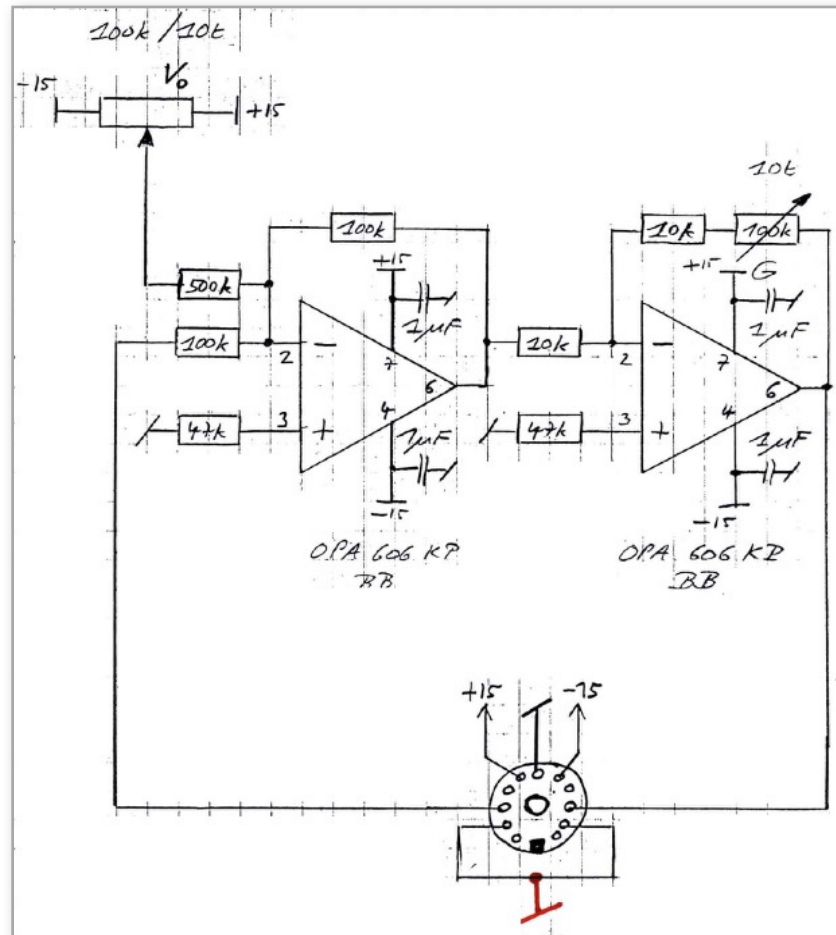
## Fréquence d'échantillonnage

Théorème de Shannon ou de Nyquist

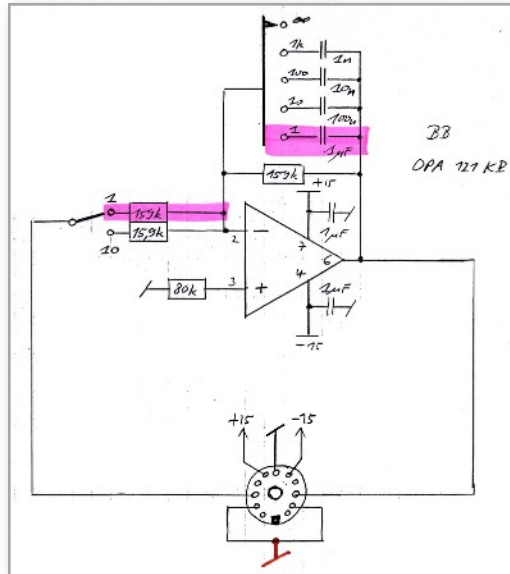
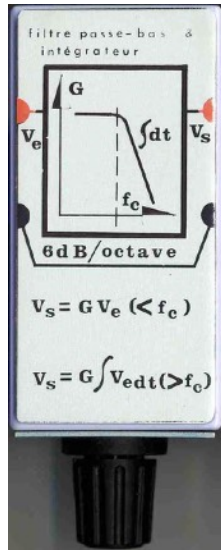
$$f_{ech} > 2f(signal)$$



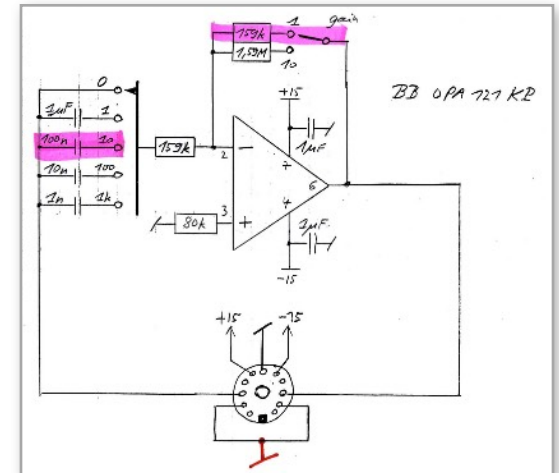
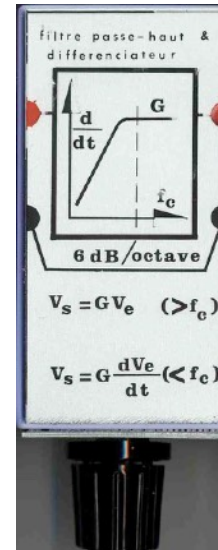


$$V_S = G(V_e - V_0)$$


# Filtre passe-bas

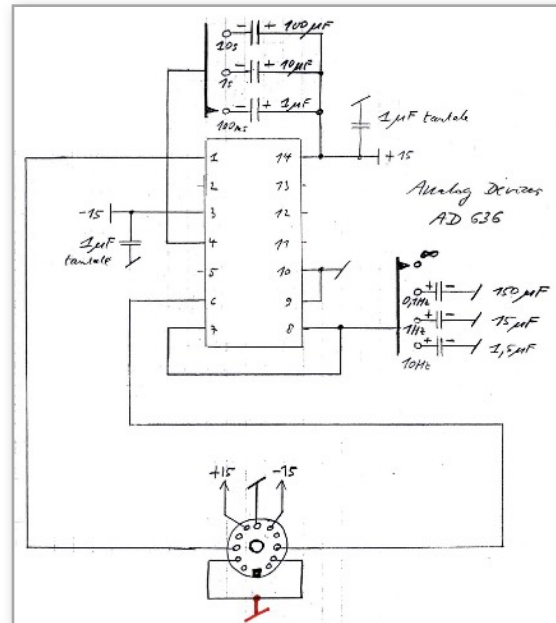
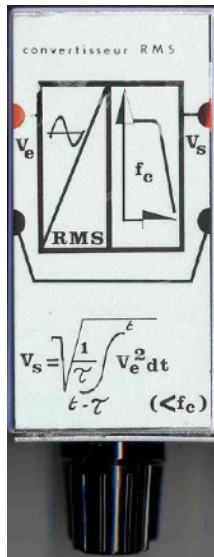


# Filtre passe-haut



# Convertisseur RMS

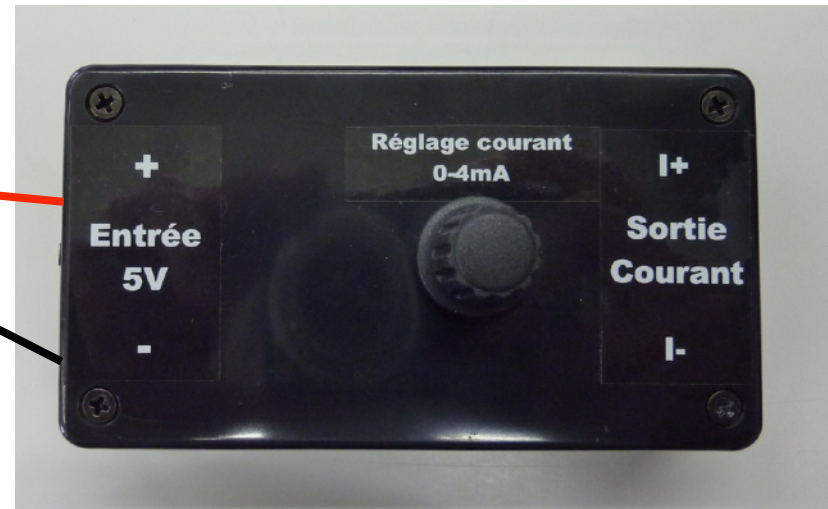
$$V_s = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t V_e^2 dt}$$



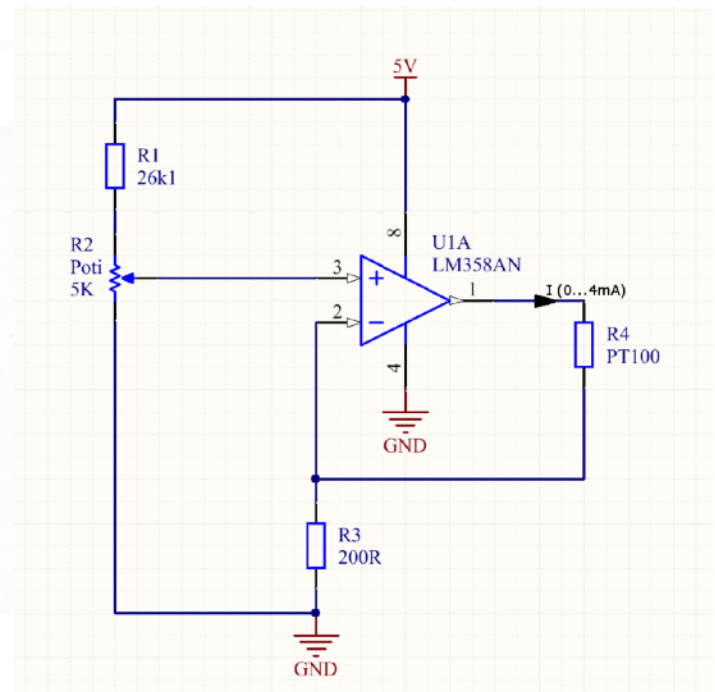
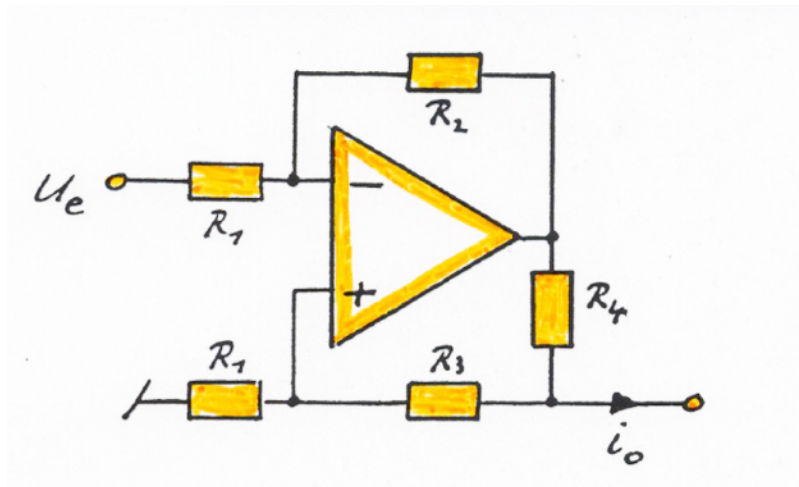
## Source de tension réglable



## Source de courant pilotée

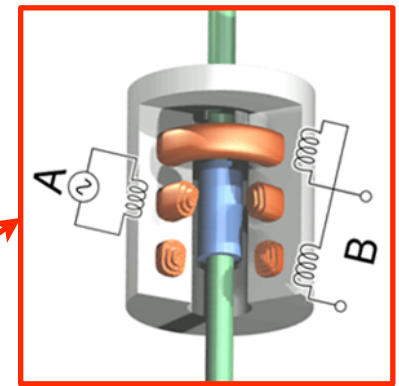
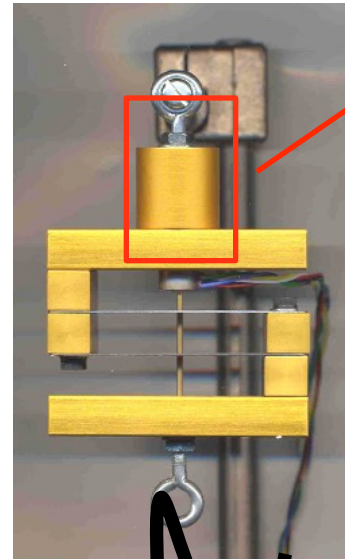


## Source de courant pilotée en tension

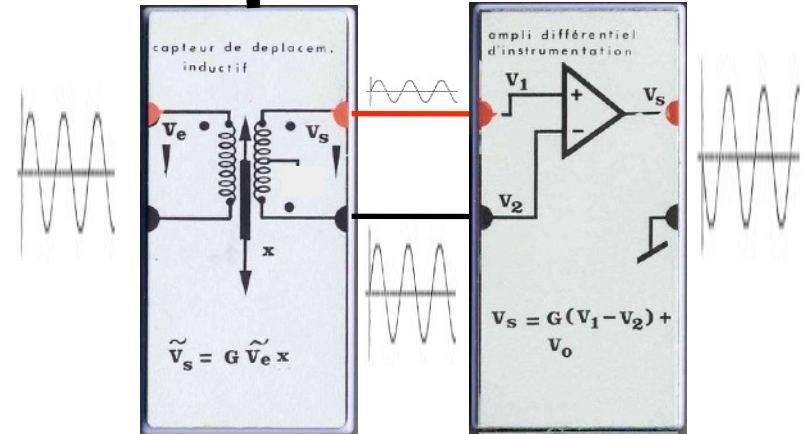
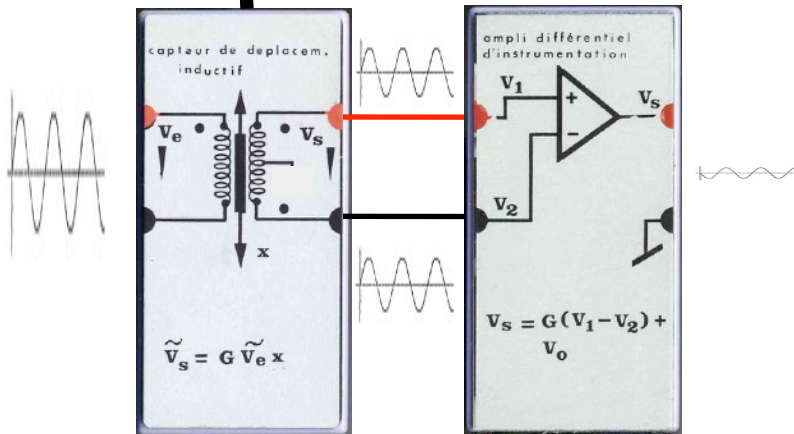


# 1) Balance digitale

On construit une balance digitale sur la base d'un **capteur inductif différentiel de déplacement** mesurant **la déformation d'un élément élastique** soumis au poids à mesurer

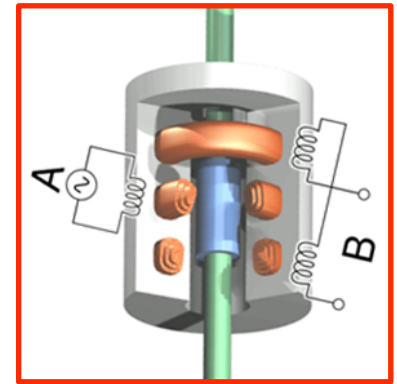
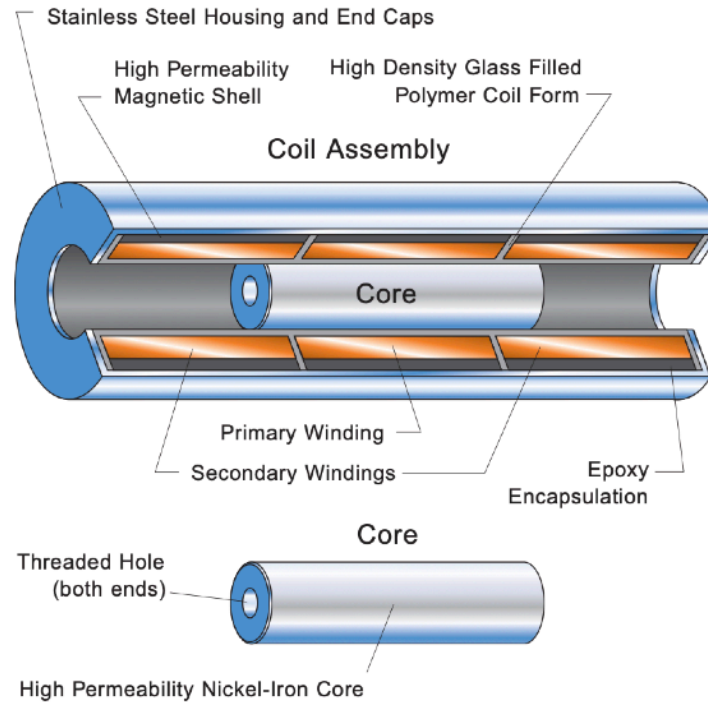


**Capteur inductif différentiel de déplacement LVDT (Linear Variable Differential Transformer)**



# 1) Balance digitale

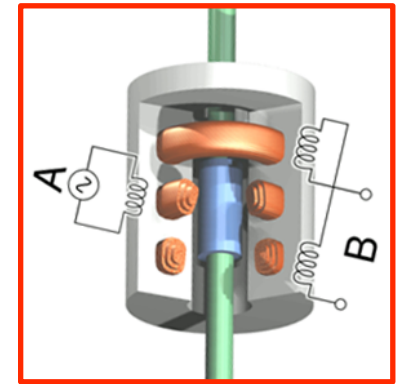
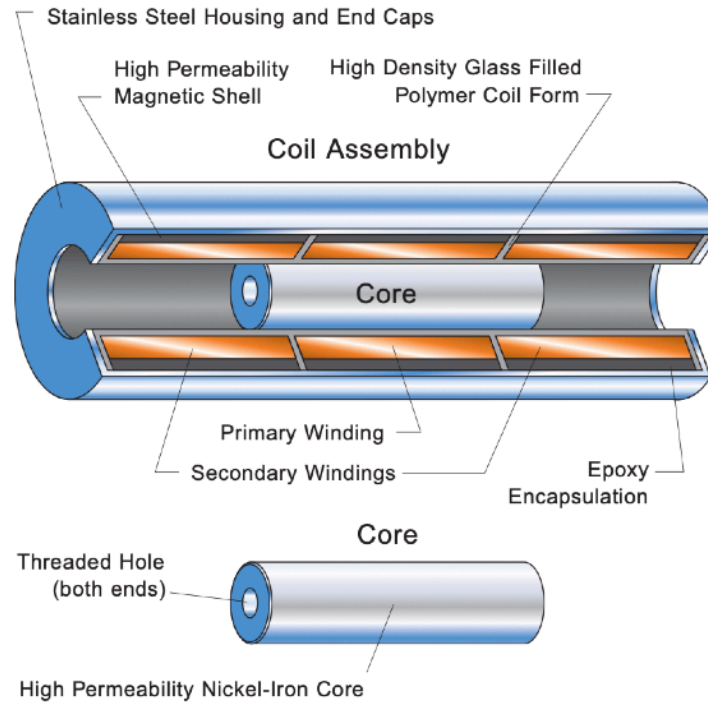
Schéma de construction d'un LVDT montrant le coeur ferromagnétique qui glisse entre les bobines primaire et secondaires



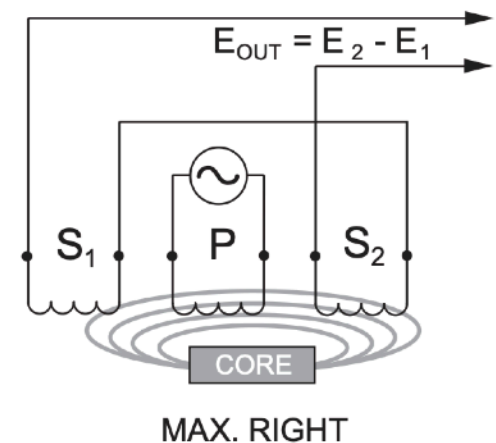
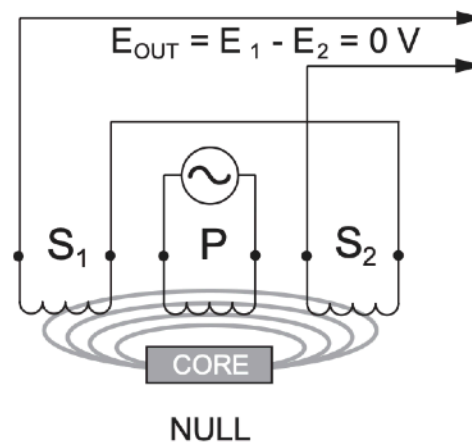
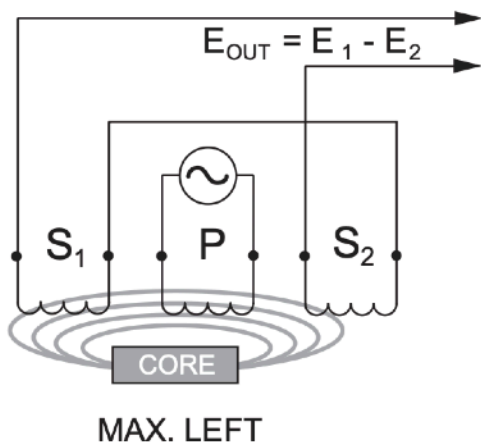
**Capteur inductif différentiel de déplacement LVDT (Linear Variable Differential Transformer)**

# 1) Balance digitale

Schéma de construction d'un LVDT montrant le coeur ferromagnétique qui glisse entre les bobines primaire et secondaires

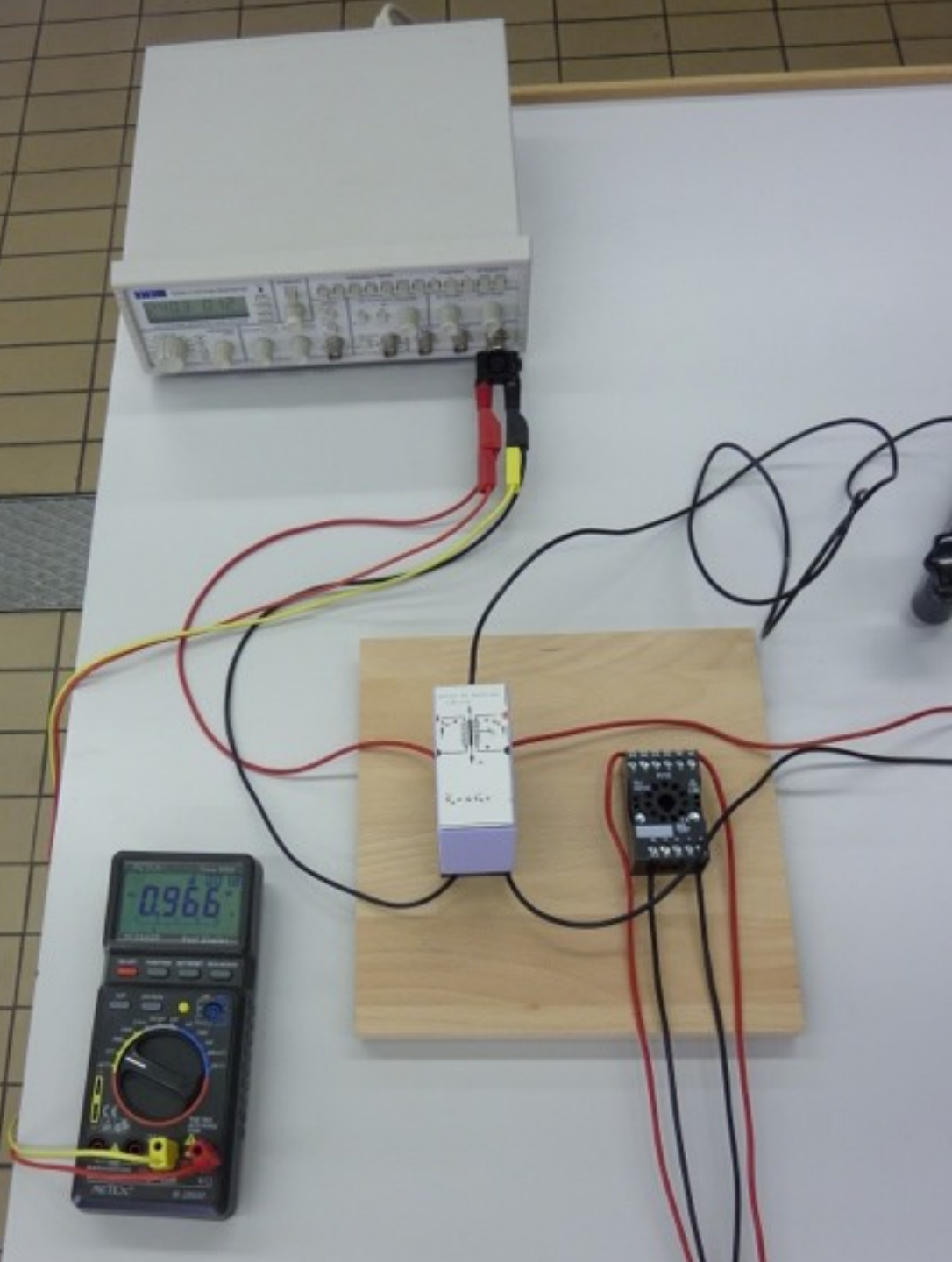
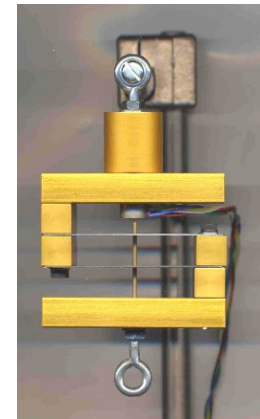


**Capteur inductif différentiel de déplacement LVDT**  
**(Linear Variable Differential Transformer)**



## Réalisation d'une balance digitale

a) alimenter le capteur de déplacement inductif par le générateur de fonction, avec **un signal sinusoïdal** d'entrée  $V_e$  de fréquence **2 kHz** et de tension RMS de **1 V**.



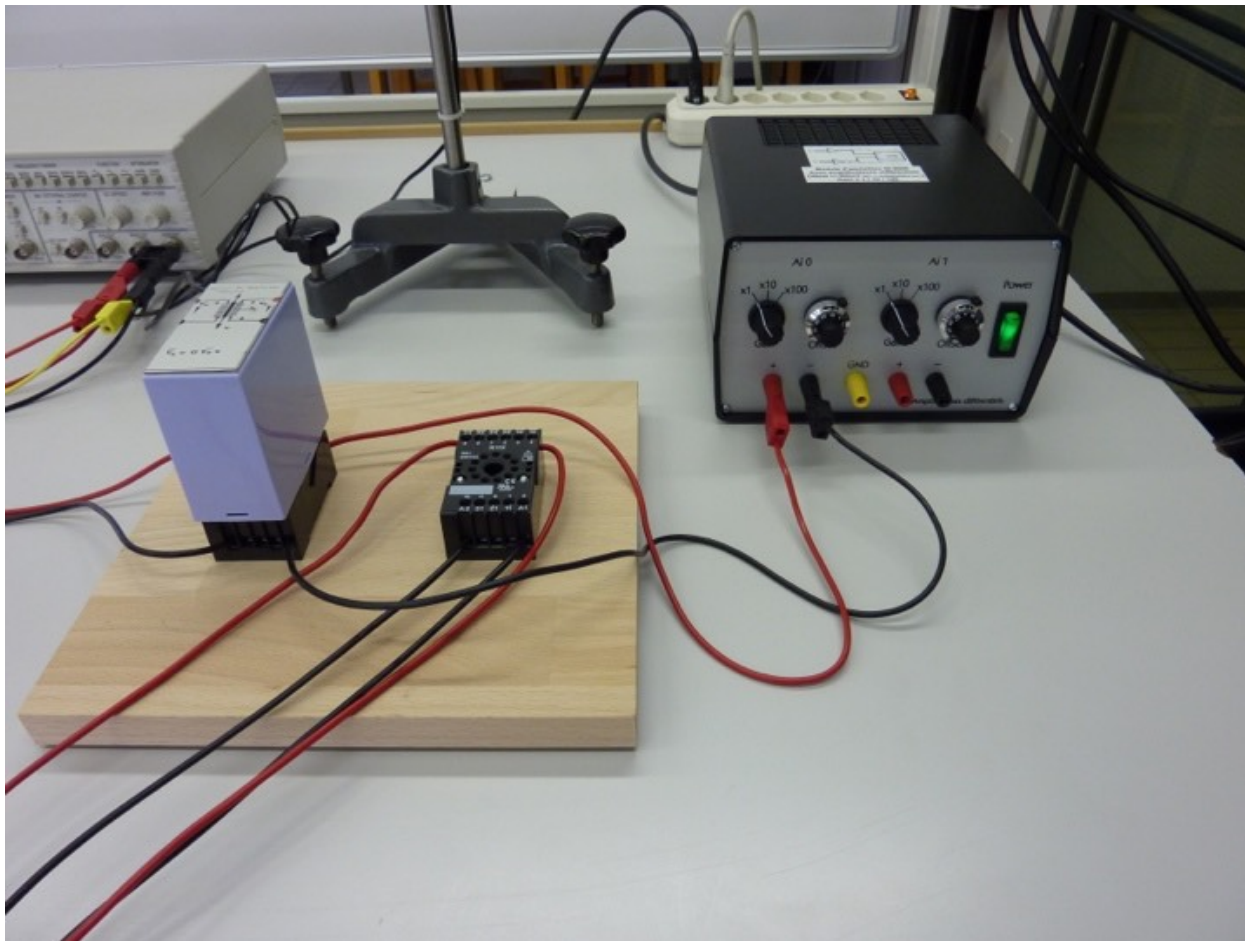


## Réalisation d'une balance digitale

b) effectuez le montage du circuit électronique de mesure, qui se compose d'abord d'un **ampli différentiel d'instrumentation** de **gain 1**, utilisé pour sa grande impédance d'entrée (offset sans importance!).

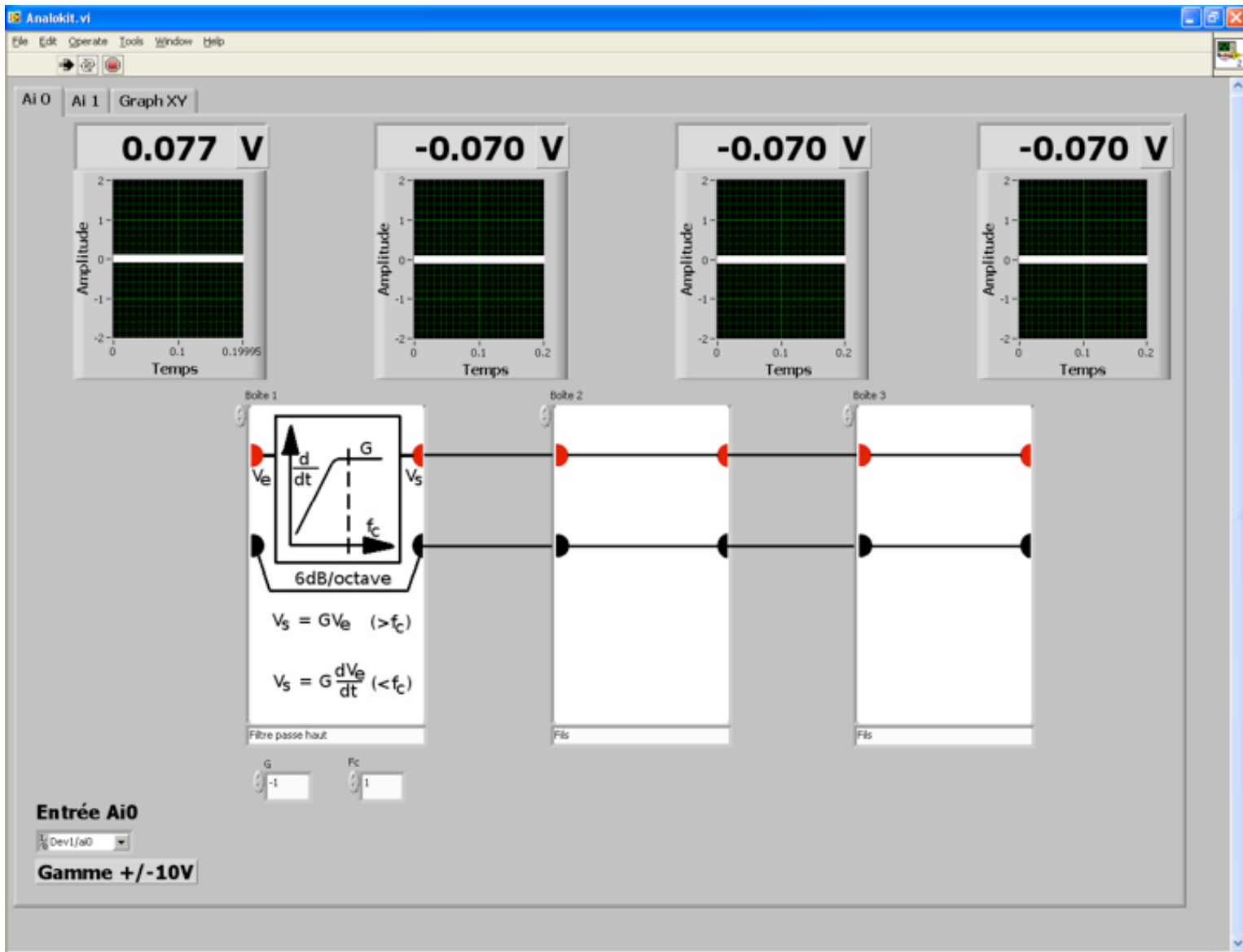
La sortie de l'amplificateur (signal analogique) est connectée à une carte de digitalisation Labview NI-6009. La sortie digitalisée est connecté à l'ordinateur via le port USB.

Ouvrir sur le desktop le logiciel Labview **analokit** et visualiser le panneau de contrôle.



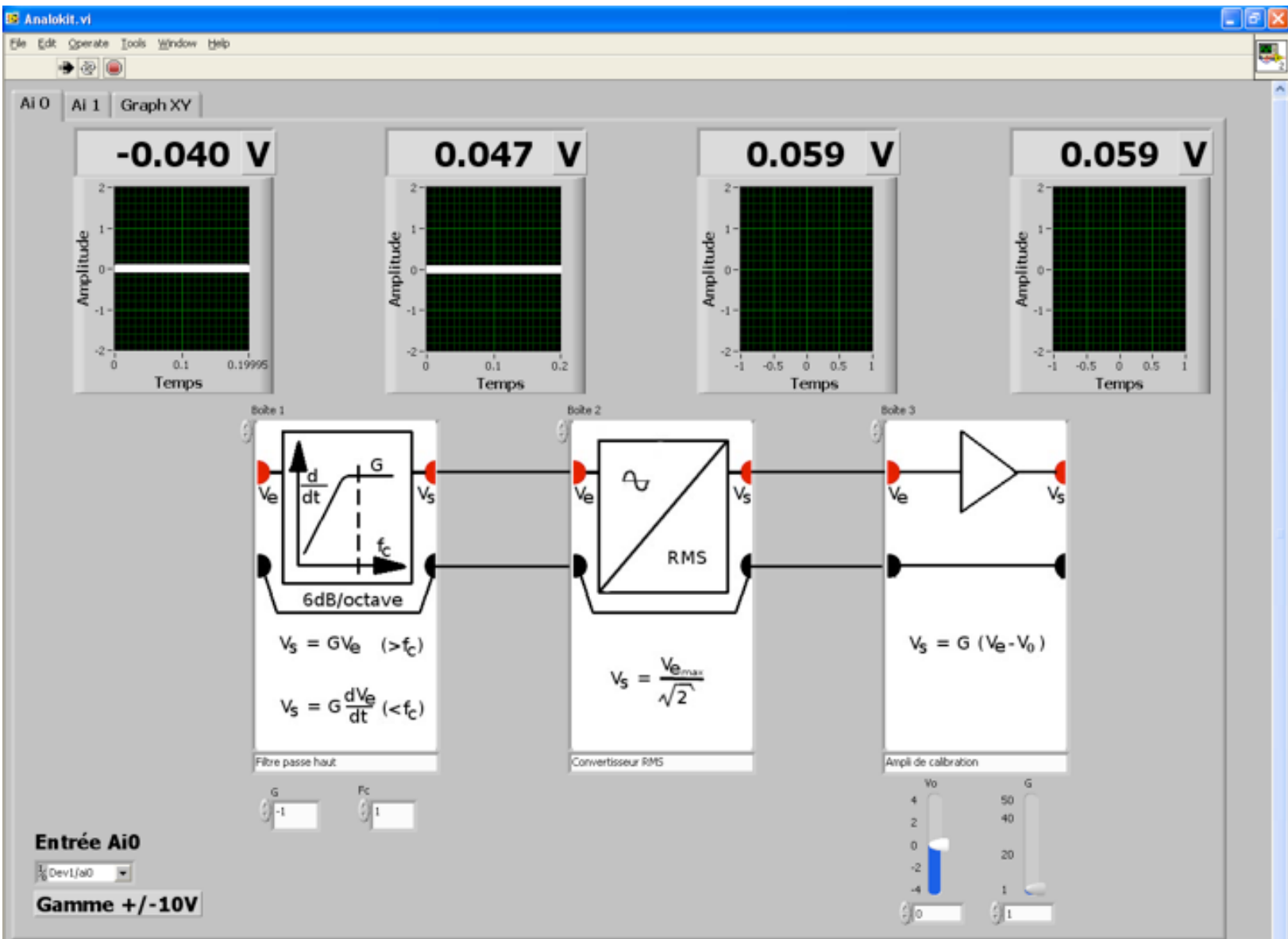
# Réalisation d'une balance digitale

c1) Insérez **un filtre passe-haut** de **gain 1** et de **fréquence de coupure 1 Hz**, servant à éliminer la composante continue, inutile, du signal.



# Réalisation d'une balance digitale

c3) Insérez **un amplificateur de calibration** servant à étalonner la balance



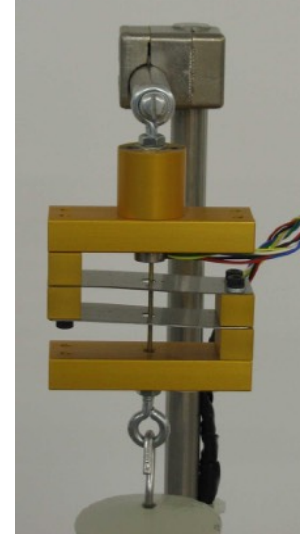
# Etalonnage d'une balance digitale



**d1)** étalonnez la balance en réglant **l'offset**  $V_0$  de l'ampli de calibration qui alimente le voltmètre de mesure de sorte que  $U_s = 0 \text{ V}$  pour  $P = 0 \text{ Kgf}$

$P = 0 \text{ Kgf}$

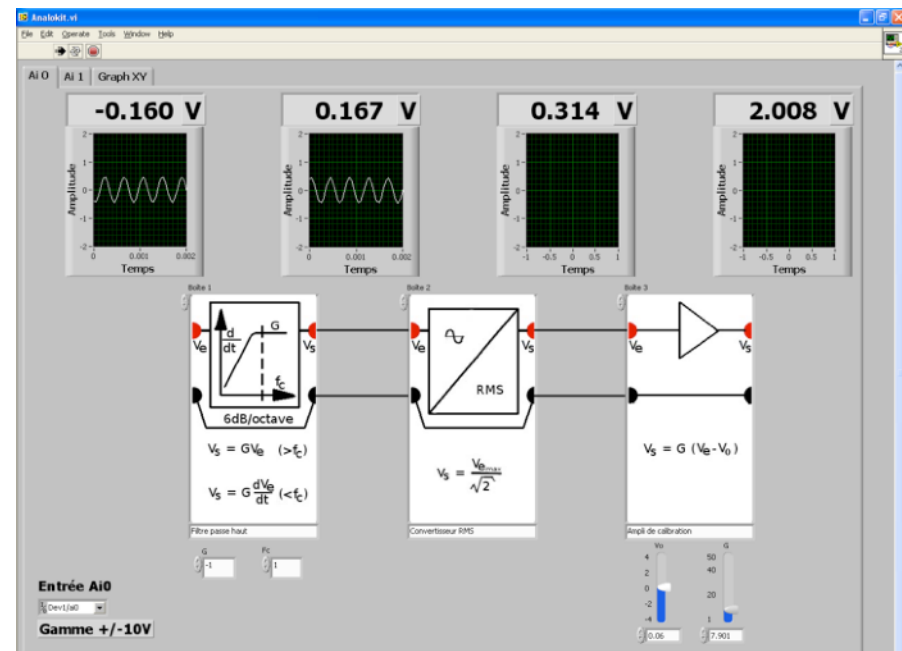
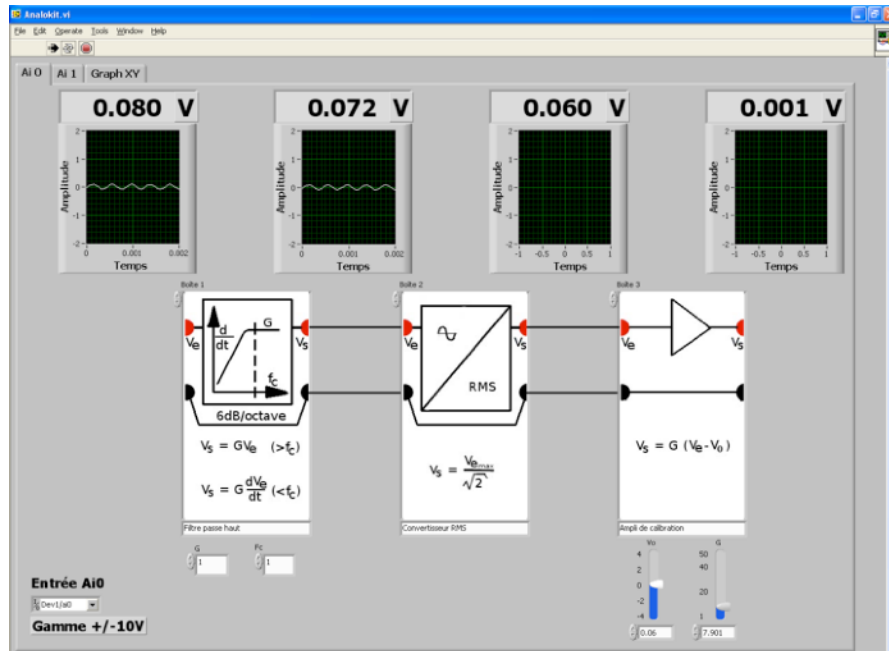
$U_s = 0 \text{ V}$



**d2)** étalonnez la balance en réglant **le gain**  $G$  de l'ampli de calibration de sorte que  $U_s = 2 \text{ V}$  pour  $P = 2 \text{ Kgf}$ .

$P = 2 \text{ Kgf}$

$U_s = 2 \text{ V}$

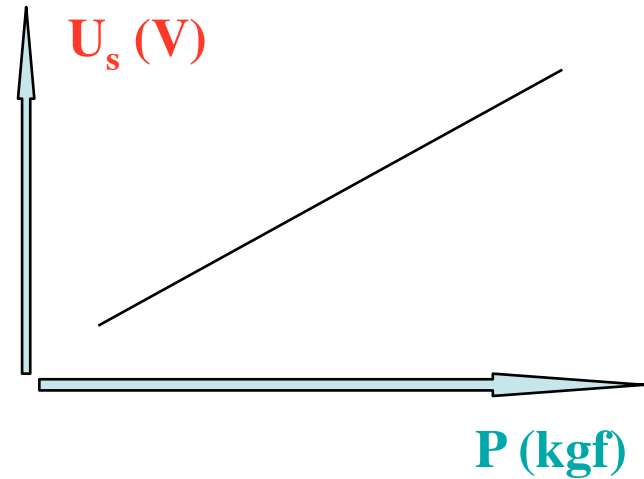


## Etalonnage d'une balance digitale

e) tracez sur Excel la courbe de calibration de 0 à 2 kgf, puis de 2 kgf à 0 kgf, à l'aide des poids à disposition. Discutez *la linéarité et l'hystérèse* de la balance.

$P$  (kgf)

$U_s$  (V)

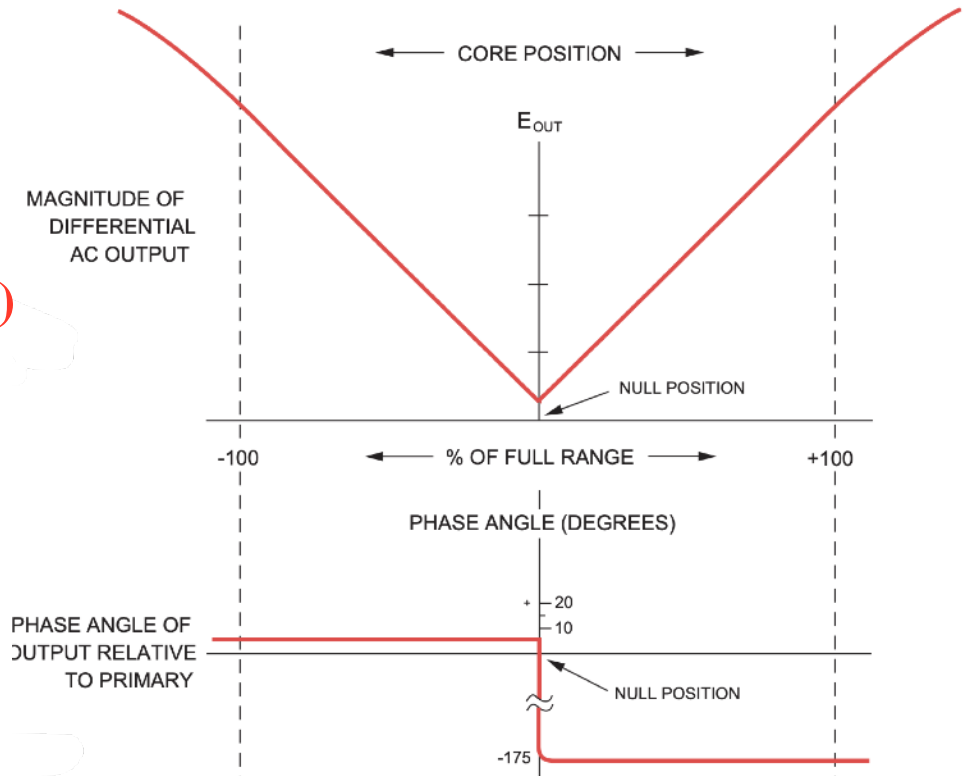


# Etalonnage d'une balance digitale

e) tracez sur Excel la courbe de calibration de 0 à 2 kgf, puis de 2 kgf à 0 kgf, à l'aide des poids à disposition. Discutez *la linéarité et l'hystérèse* de la balance.

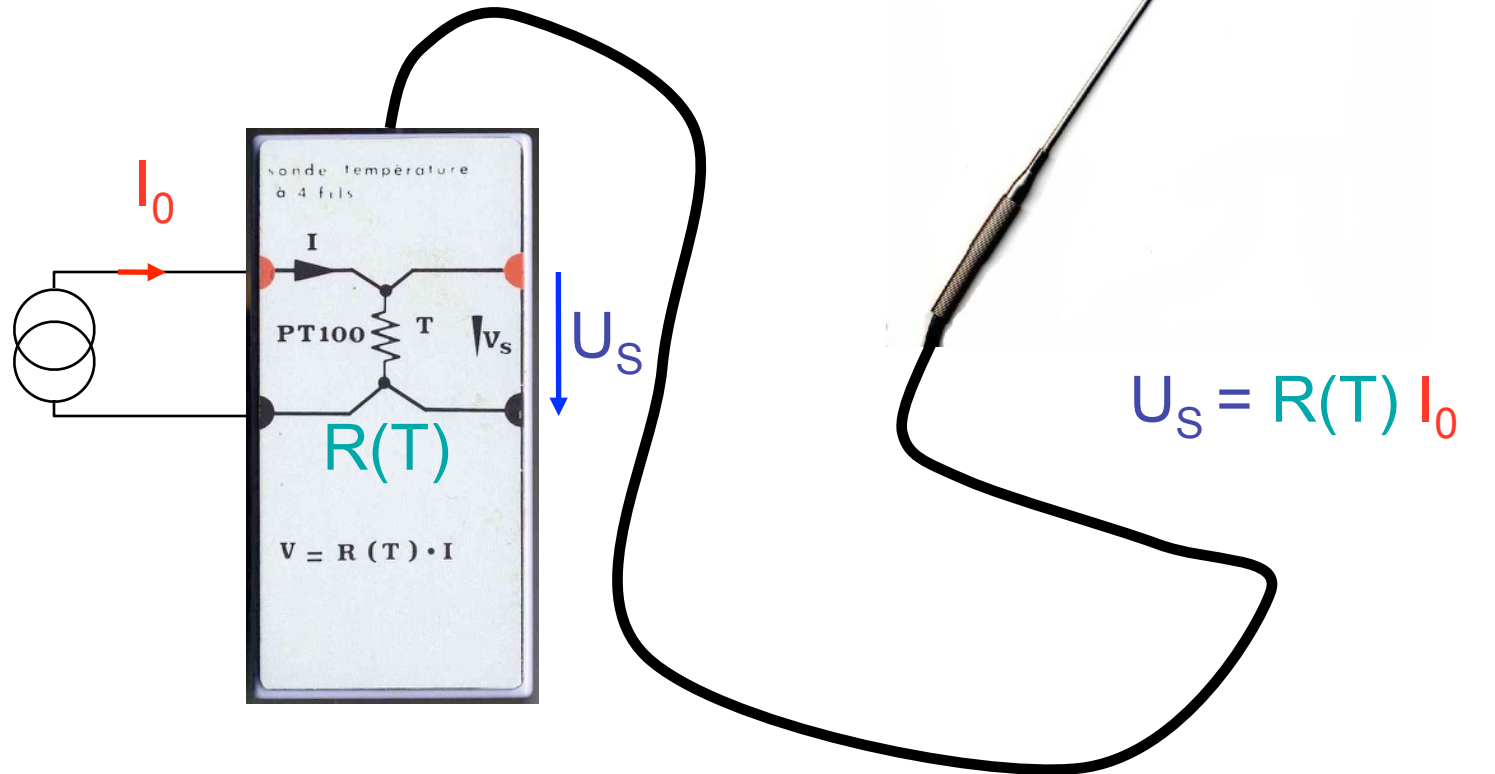
$P$  (kgf)

$U_s$  (V)

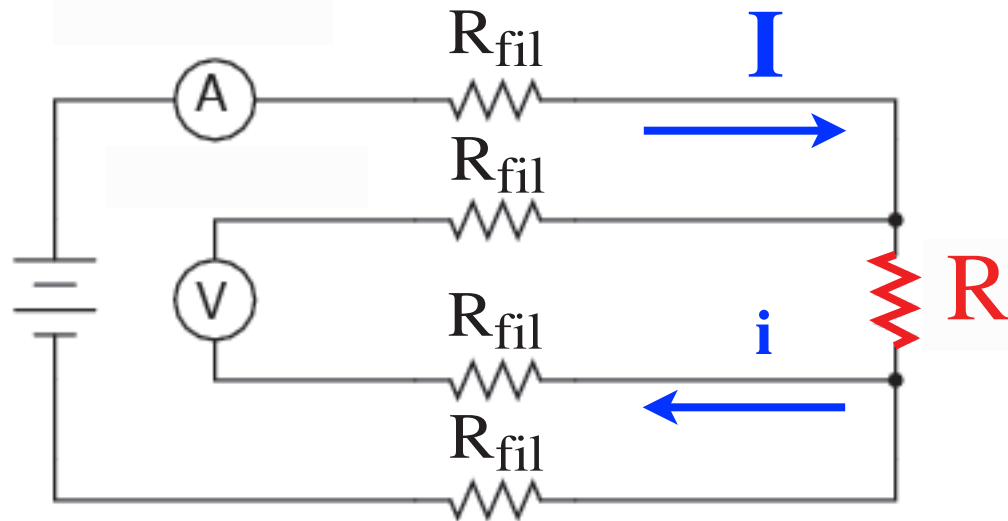


## 2) Thermomètre digital

On construit un thermomètre digital sur la base d'une **sonde résistive au platine Pt 100** avec un montage dit « à quatre fils »

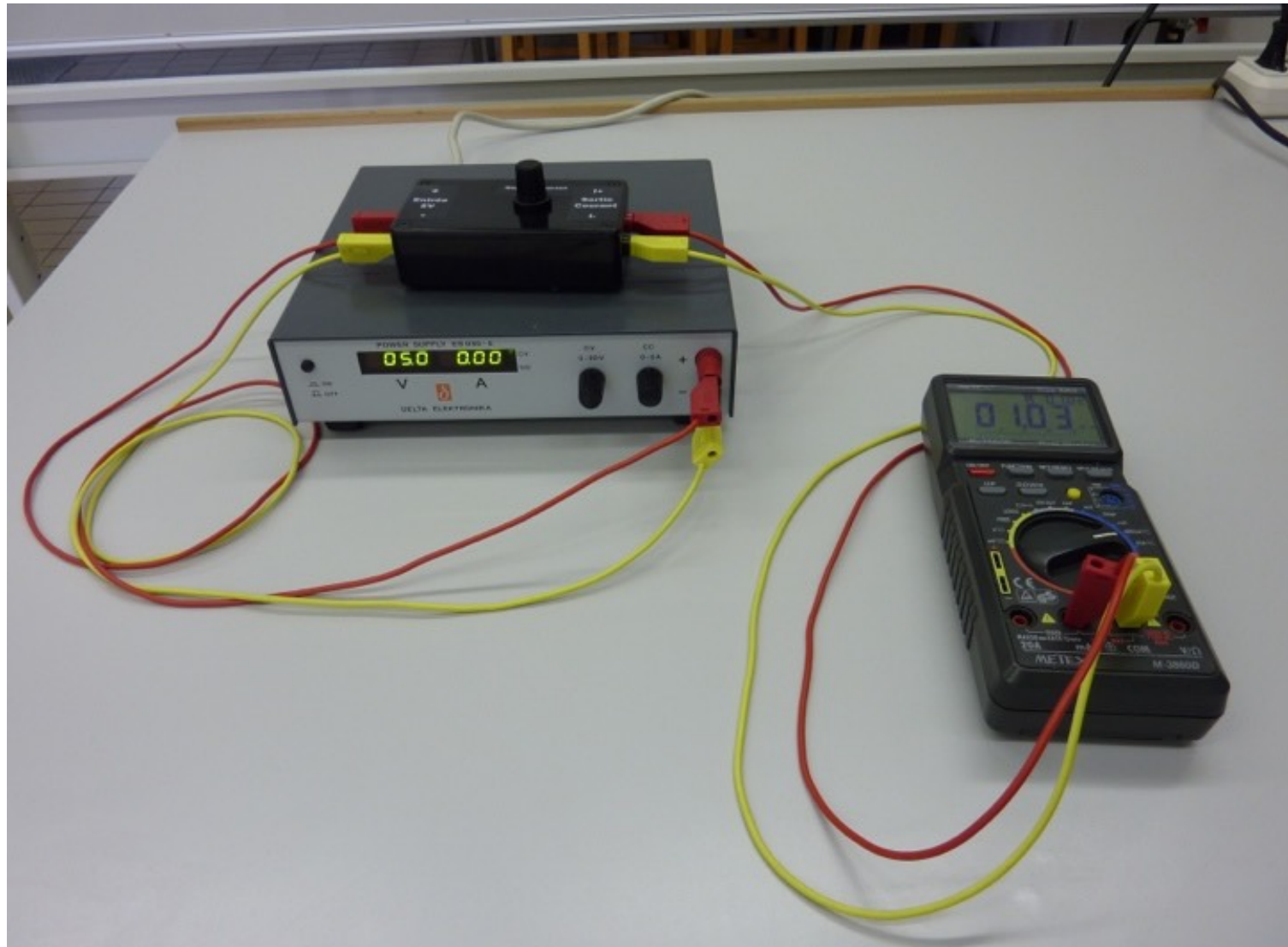


# Mesure de la résistance montage 4-points



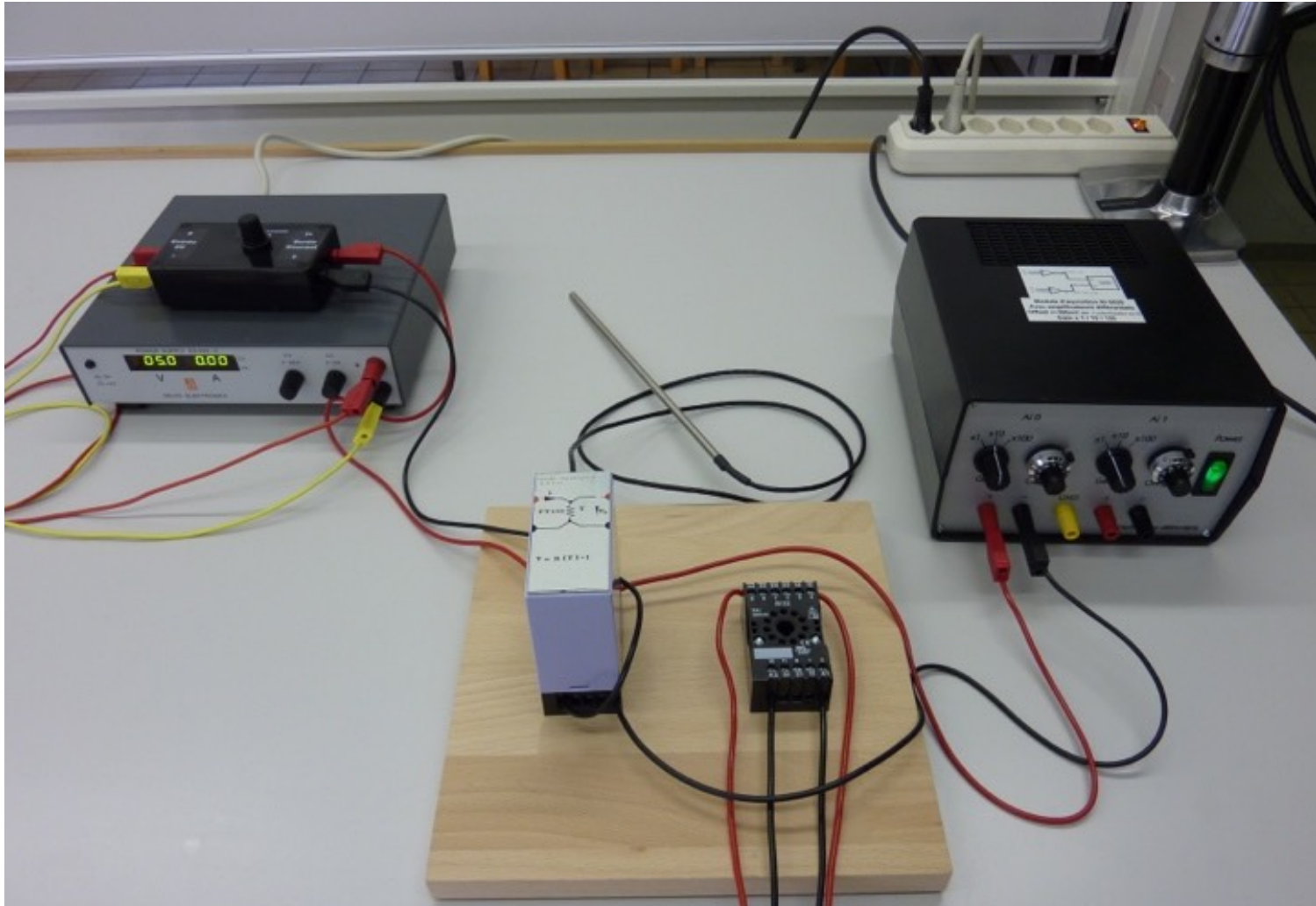
## Réalisation d'un thermomètre digital

a) alimentez la sonde platine Pt 100 par un courant constant  $I_s$  de **1 mA** généré par **une source de courant réglable  $I_s = 0-4\text{mA}$** , elle-même alimentée par **une source de tension ( $V_0 = 5\text{ V}$ )**. Vérifiez la valeur de ce courant  $I_s$  constant à l'aide d'un ampèremètre.



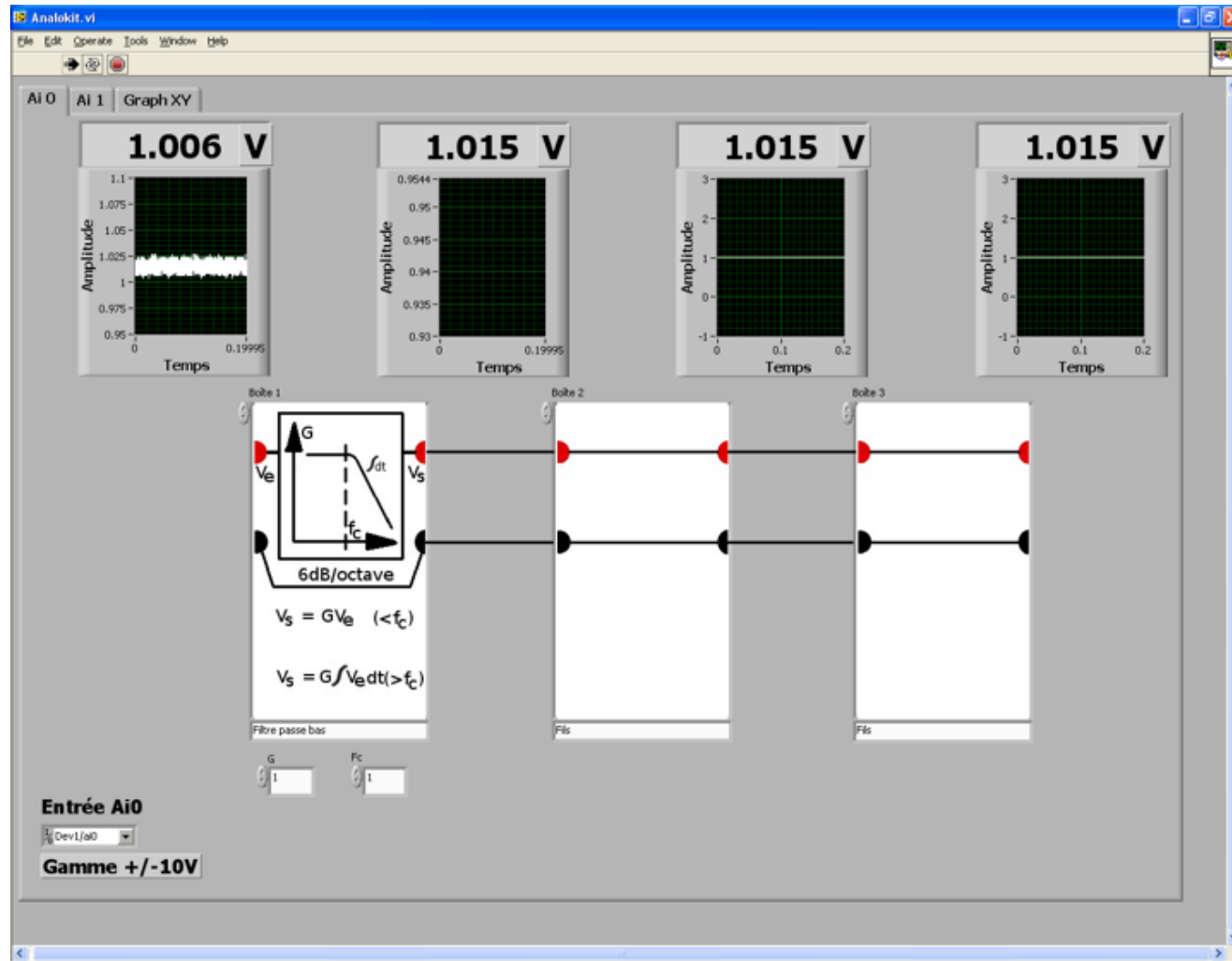
## Réalisation d'un thermomètre digital

b) Branchez la sonde platine sur l'embase et effectuez le montage du circuit électronique de mesure en connectant *l'amplificateur différentiel* avec un **gain 10**, **et un offset  $V_0$  égal à 0 V** (position 5 sur le potentiomètre du gain) et **de grande impédance d'entrée**.



# Réalisation d'un thermomètre digital

c) effectuez le montage du circuit électronique de mesure qui se compose de *l'ampli différentiel* de **gain 10**, d'offset  $V_0$  égal à **0 V** et de grande impédance d'entrée, suivi d'*un filtre passe bas* (gain 1, fréquence de coupure **1 Hz**) servant éliminer le bruit à haute fréquence.



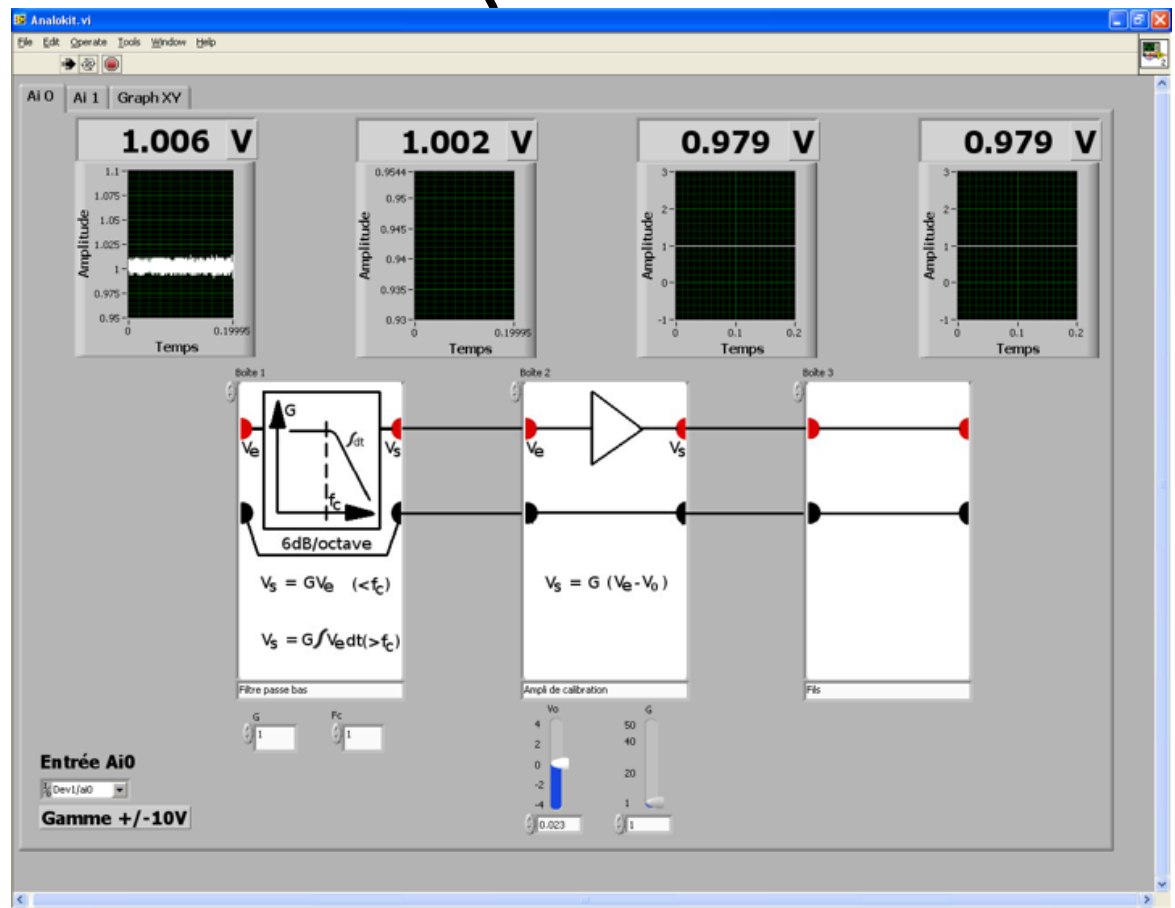
# Etalonnage d'un thermomètre digital

e1) étalonnez le zéro du thermomètre en plongeant la sonde dans **la glace fondante** et en réglant **l'offset**  $V_0$  de l'ampli de calibration de sorte que  $U_s = 0 \text{ V}$  ( $T = 0^\circ\text{C}$ ).



*la glace fondante*

$T = 0^\circ\text{C}$



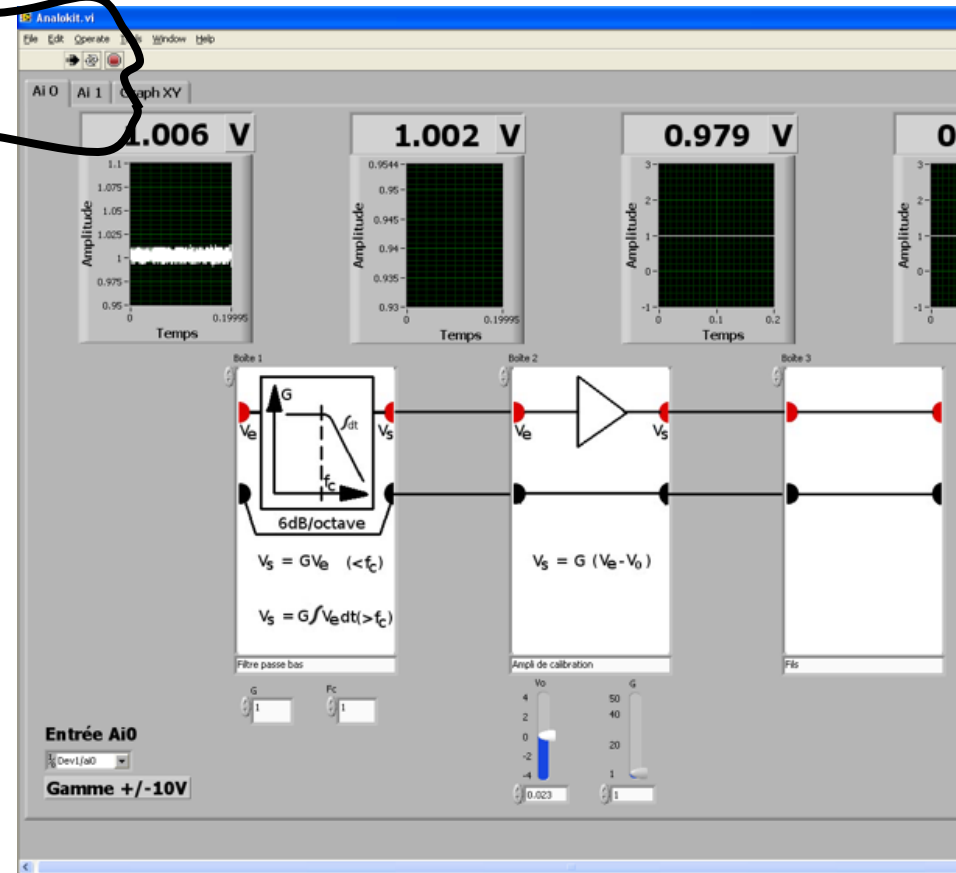
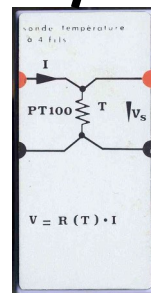
## Etalonnage d'un thermomètre digital

**e2)** étalonnez le gain du thermomètre en plongeant la sonde dans *l'eau bouillante* et en réglant *le gain G* de l'ampli de calibration de sorte que  $U_s = 980 \text{ mV}$  ( $T = 98^\circ\text{C}$  à la pression atmosphérique de Lausanne).



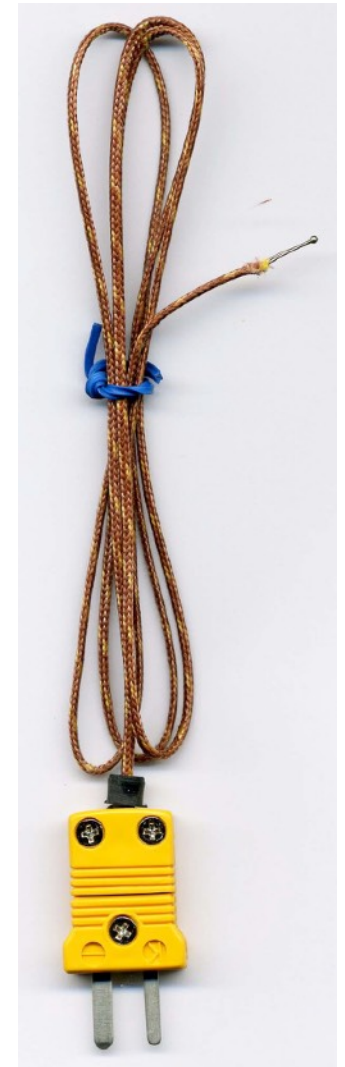
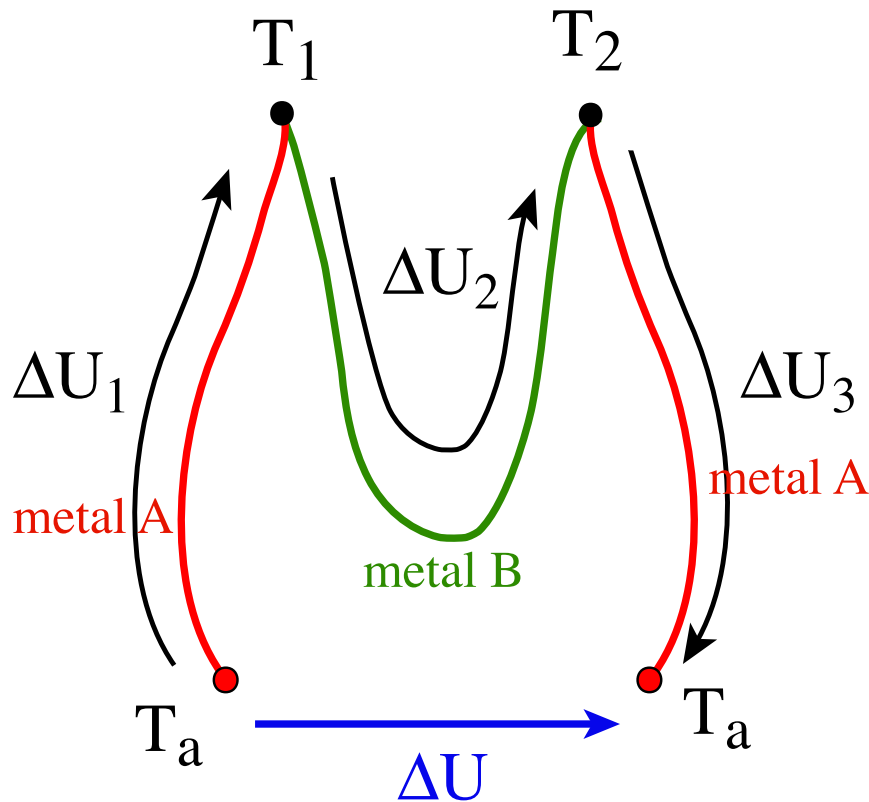
**T = 98°C**

## *l'eau bouillante*



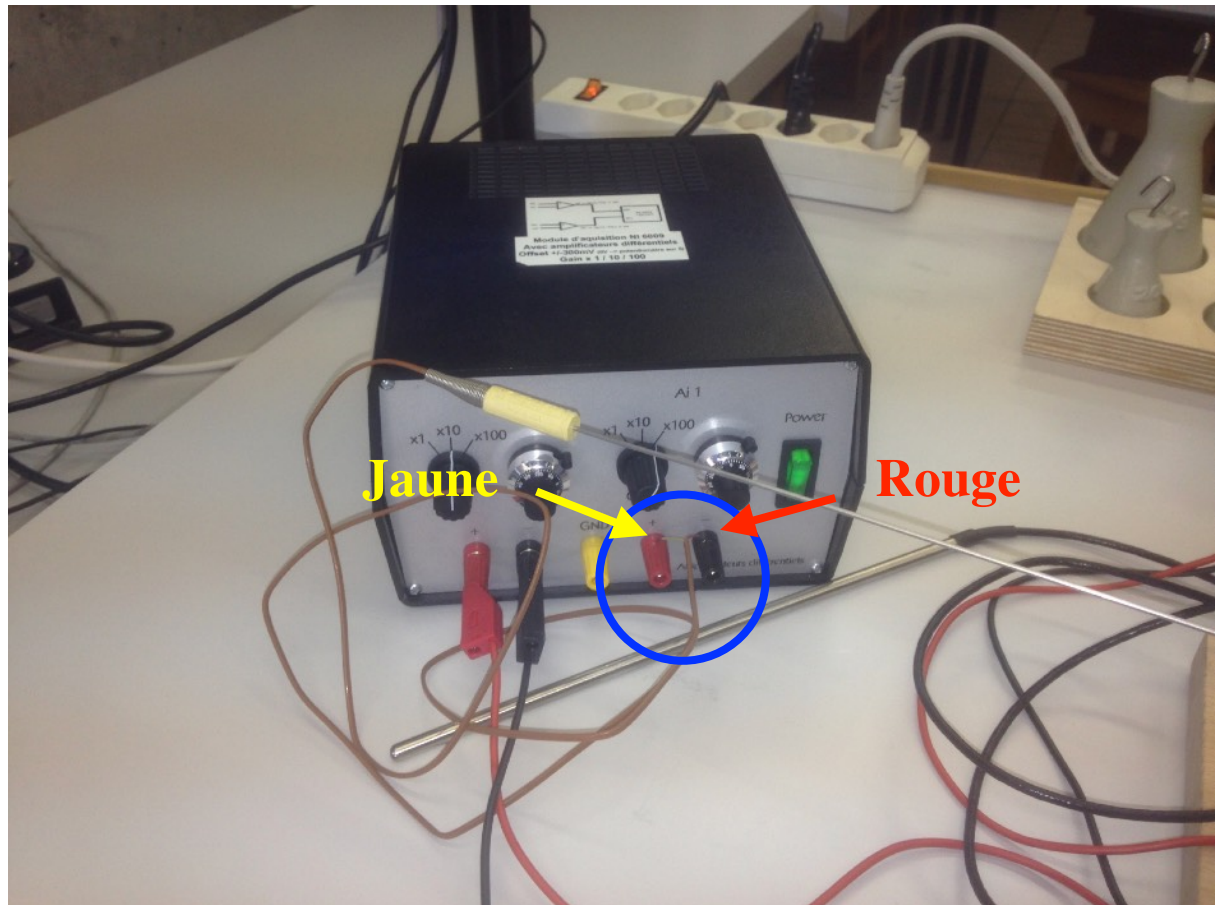
### 3) Thermomètre digital avec un thermocouple

On va comparer la mesure avec la sonde Pt100 à celle d'un thermocouple



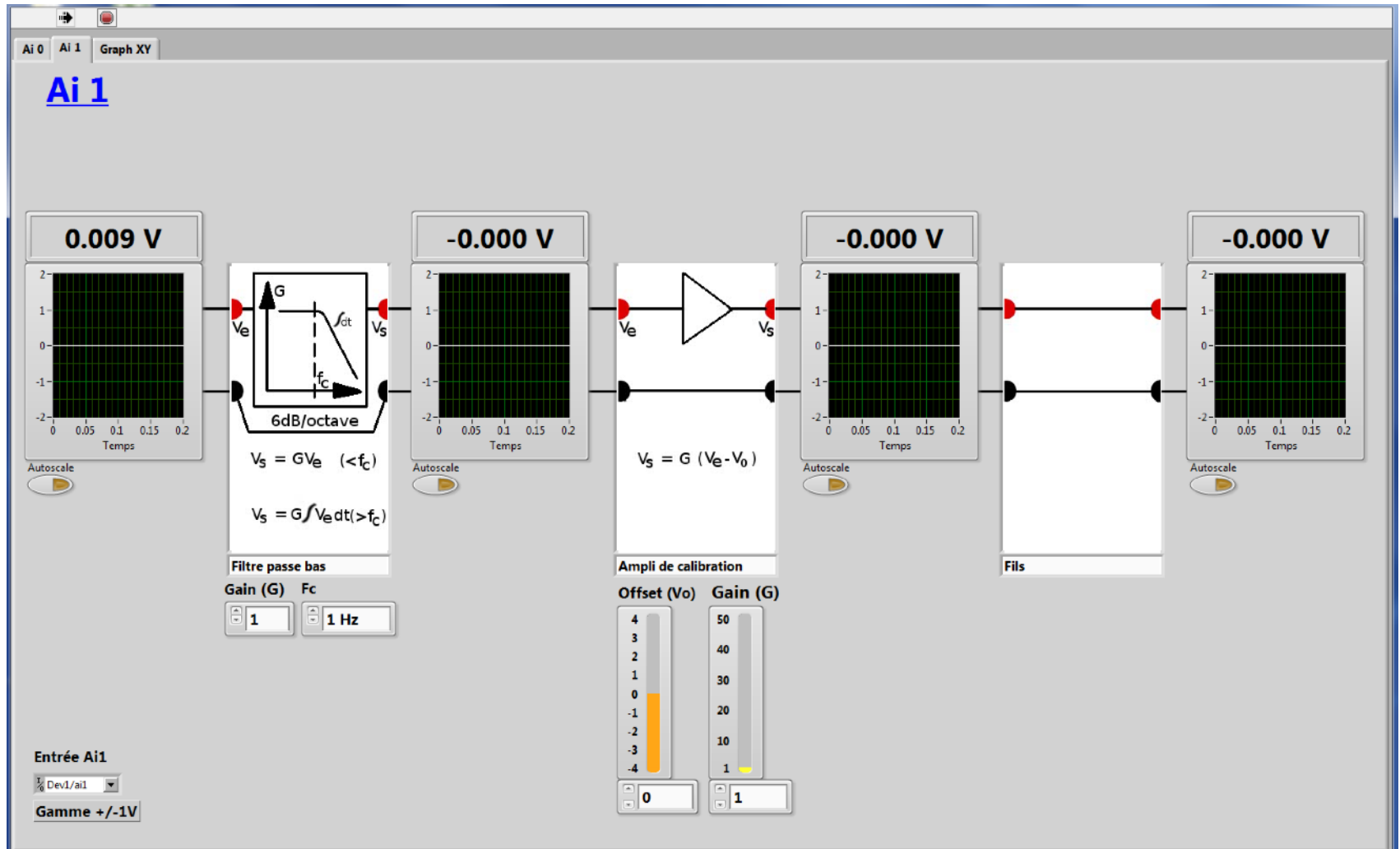
## Thermomètre digital avec thermocouple

a) Avant tout garder la sonde Pt100 en fonctionnement (canal A0) car on va l'utiliser comme calibration. Connecter le fils du thermocouple au canal A1 : le fil rouge est le pôle négatif et doit être connecté à la borne noire, le fil jaune est le pôle positif (borne rouge). **L'amplificateur différentiel** doit avoir un **gain 100**. **Maintenir le thermocouple à température ambiante.**



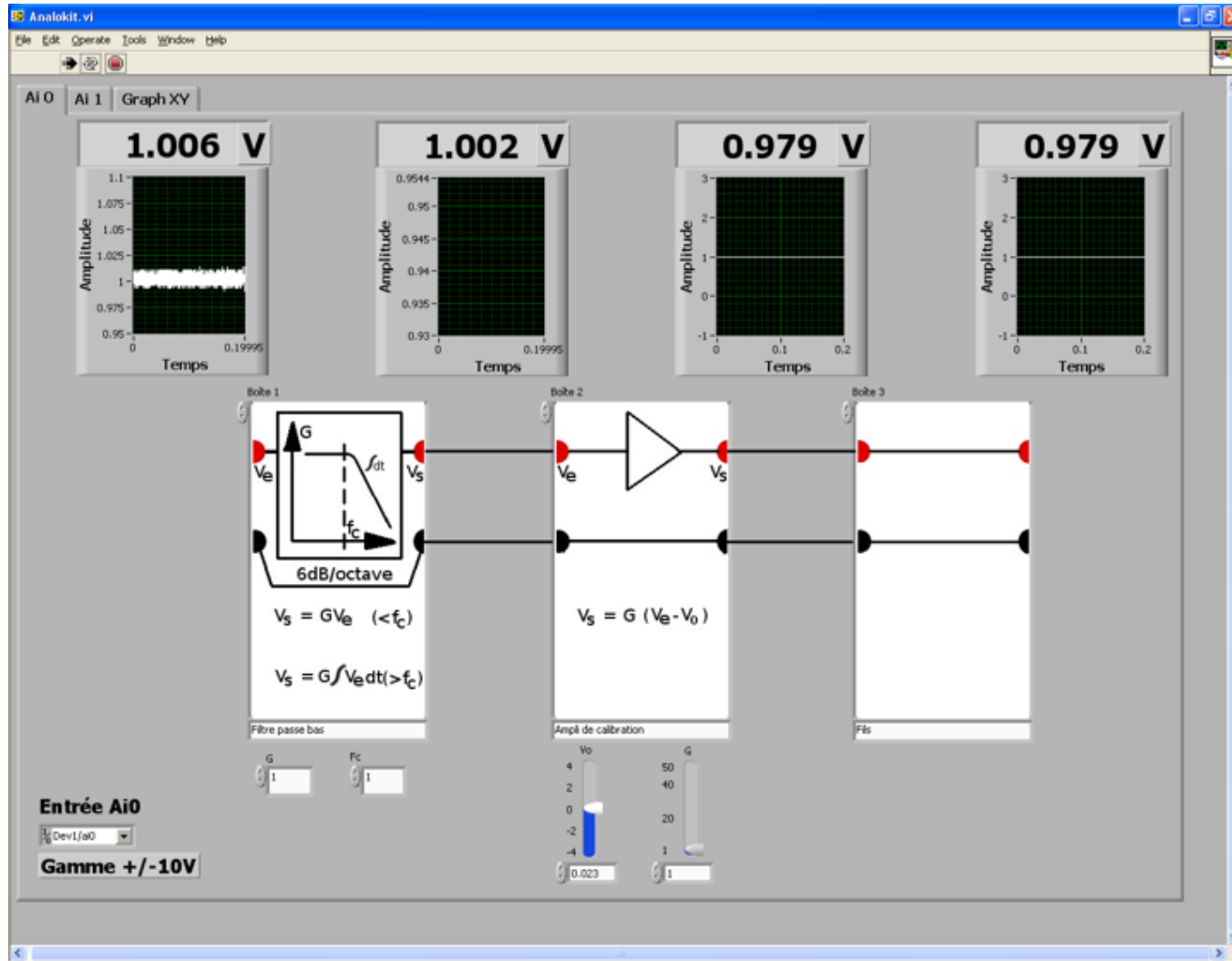
# Thermomètre digital avec thermocouple

**b)** commencer la chaine de mesure avec un **filtre passe-bas** (gain 1, fréquence de coupure 1 Hz) pour éliminer le bruit. Si le thermocouple est à température ambiante, le **offset  $V_0$  du pré-amplificateur doit être ajusté de manière à avoir 0 V** à l'entrée de la chaine de mesure (après le filtre). Pourquoi ?



# Thermomètre digital avec thermocouple

c) après le **filtre passe-bas** insérer un **amplificateur différentiel de calibration** pour calibrer le thermomètre.



# Calibration du thermomètre à thermocouple

d) calibrer le zero du thermomètre en insérant la sonde dans la **glace fondante** et en ajustant le **offset**  $V_0$  de manière à avoir  $U_s = 0 \text{ V}$  ( $T = 0^\circ\text{C}$ ).

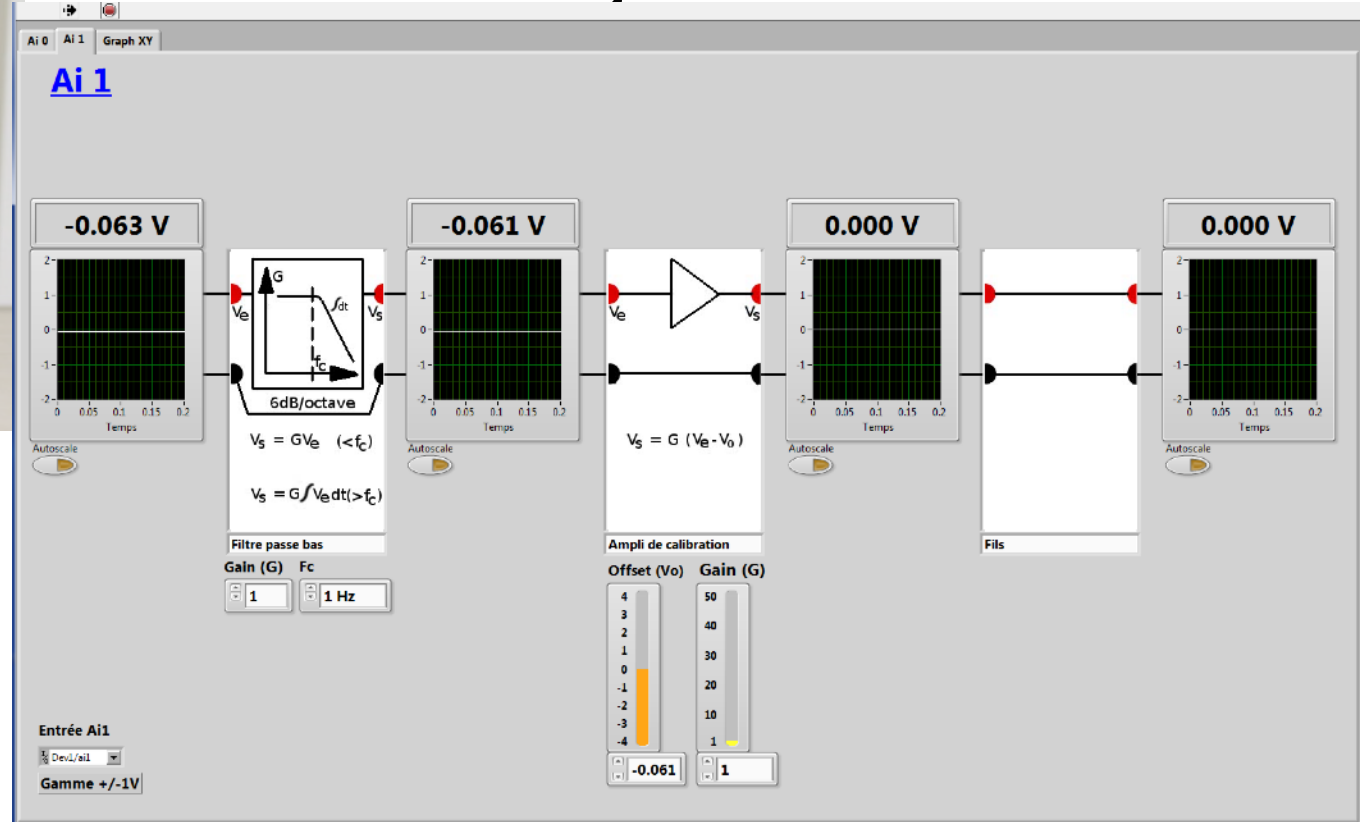
Comme  $U_s$  doit être zero le offset déterminé de manière univoque:

$$0 = U_{out} = G(V_{in} - V_0)$$



$T = 0^\circ\text{C}$

**glace fondante**



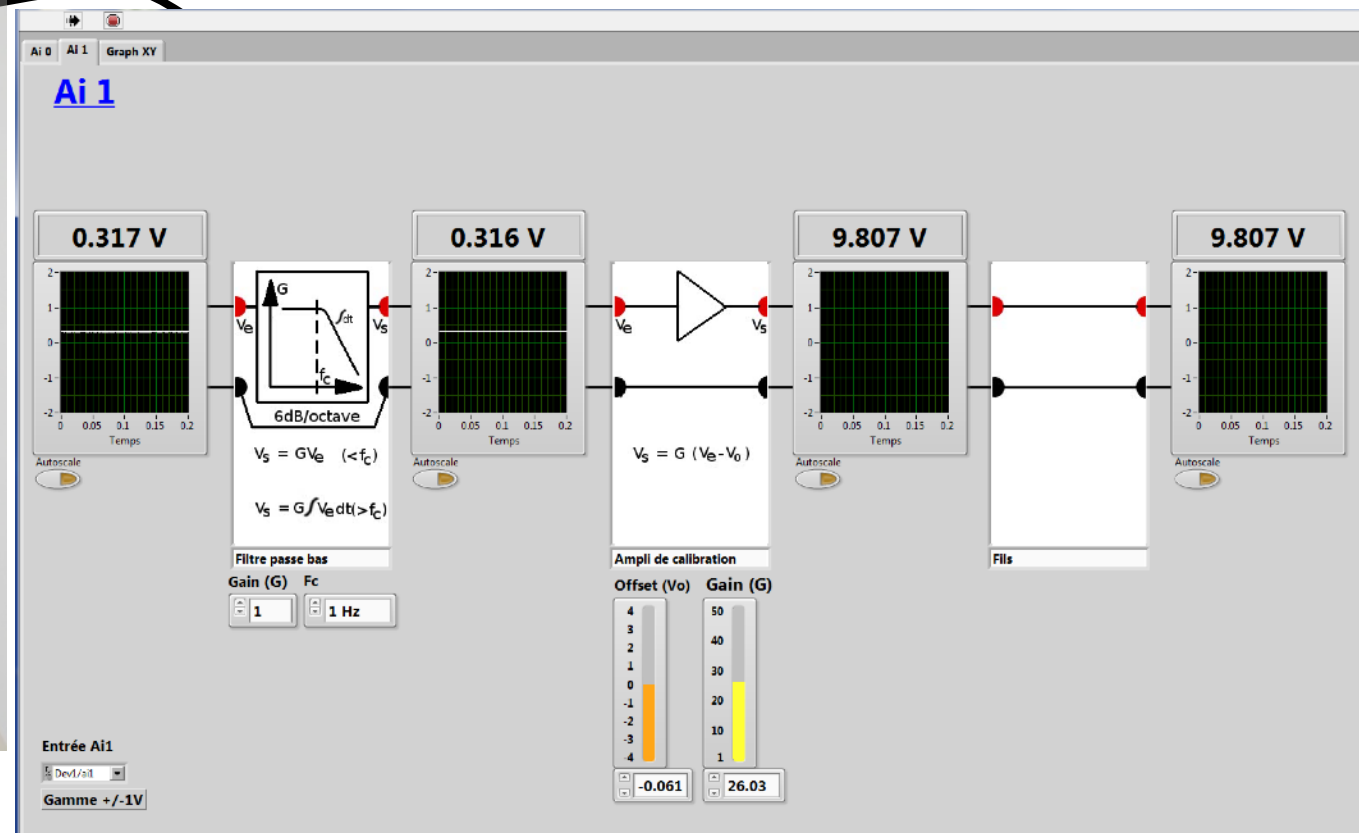
# Calibration du thermomètre à thermocouple

e) calibrer le gain du thermomètre en le mettant dans l'eau bouillante et ajustant le **gain G** de l'amplificateur de calibration de manière à obtenir  **$U_s = 9.8V$**  ( $T = 98^\circ C$  à la pression atmosphérique de Lausanne).



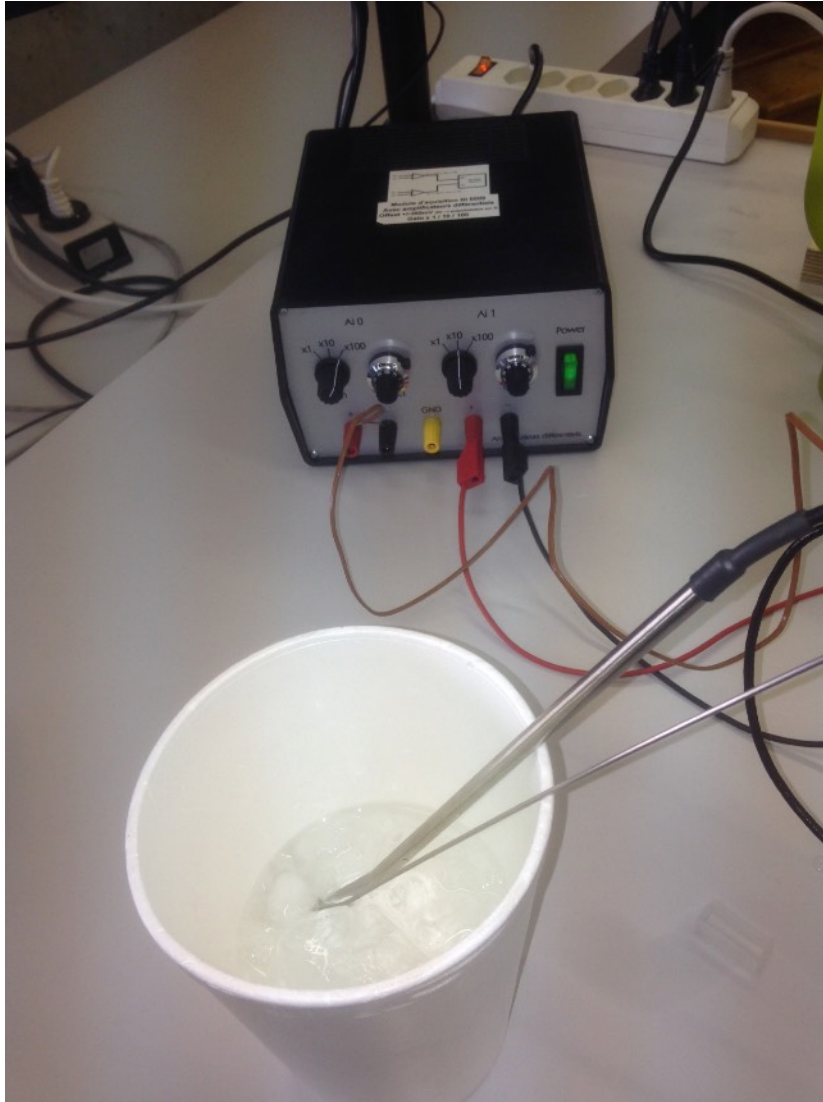
**$T = 98^\circ C$**

*eau bouillante*



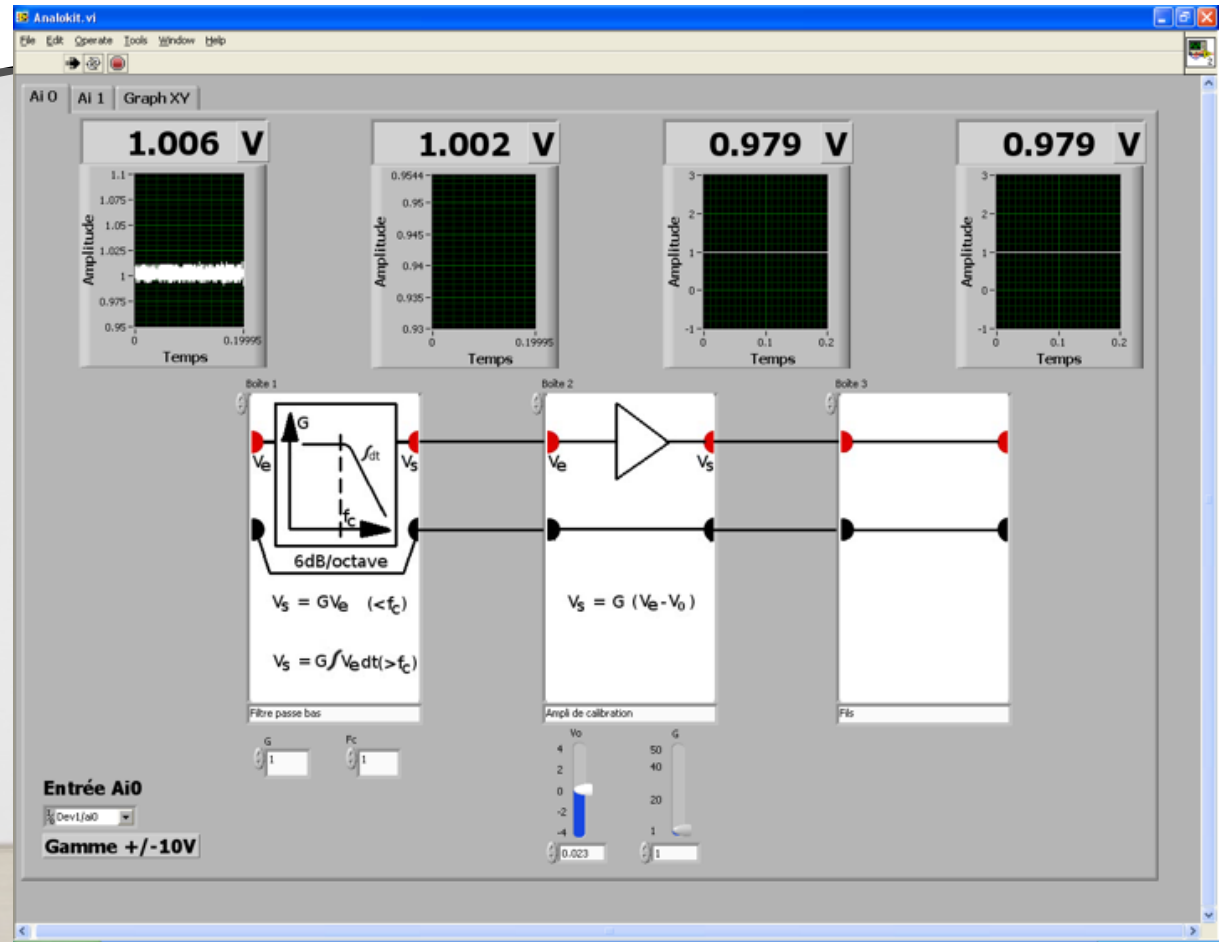
## Fonctionnement des thermomètres

f) Essayer de mesurer une température intermédiaire en mélangeant eau chaude et froide . Vous pouvez tester la température avec la sonde Pt100.



# Fonctionnement des thermomètres

g) mesurer  $U_s$  avec les deux sondes (maintenant calibrées) dans *l'azote liquide* ( $T = -196^\circ\text{C}$ ). Quelle est la différence entre le thermocouple et la sonde Pt100 ?



$T = -196^\circ\text{C}$

## Polynômes d'extrapolation

g) à l'aide des trois points mesurés, calculez les trois paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  du **polynôme d'extrapolation du deuxième degré** permettant de mesurer la température dans la plage  $-200^{\circ}\text{C}$  à  $+100^{\circ}\text{C}$ :

$$T \left[ ^{\circ}\text{C} \right] = \alpha U_s + \beta U_s^2 + \gamma \quad \text{avec} \quad U_s \left[ \text{mV} \right]$$

h) à l'aide des deux points mesurés à  $0^{\circ}\text{C}$  et  $98^{\circ}\text{C}$ , calculez les deux paramètres  $\alpha'$  et  $\gamma'$  du **polynôme d'extrapolation du premier degré** permettant de mesurer la température dans la plage  $0^{\circ}\text{C}$  à  $+100^{\circ}\text{C}$ :

$$T \left[ ^{\circ}\text{C} \right] = \alpha' U_s + \gamma' \quad \text{avec} \quad U_s \left[ \text{mV} \right]$$

i) quel est **l'écart maximum**, en  $^{\circ}\text{C}$ , entre les extrapolations linéaire et quadratique, entre  $-200^{\circ}\text{C}$  et  $+100^{\circ}\text{C}$  ?