

# Capteur

## Intro:

| Physique des capteurs                                                                                                                                                                                                                                            | Application techno                                                                                | Instrumentation                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Capteur passif à variation R,L,C<br>Capteur passif à variation de flux<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>Capteur à effet Piézoélectrique<br>Capteur à effet Hall<br>Capteur Photoélectrique<br>Capteur Thermoélectrique<br>Capteur Pyroélectrique (optique) | Capteur de déplacement<br>Capteur de force<br>Accéléromètre<br>Capteur T°<br>...<br>Micro capteur | Electronique associé:<br>Conditionnement des signaux analogiques<br>CAN<br>Traitement associés, algo : (méthodes mathématique)<br>Expl: géo localisation, équipement doppler, |

| Capteur/appli | Déplacement, Position, Déformation | Force $\rightarrow a$ | Vitesse       | T°                     | Lumière                                | Gaz, Chimie, Humidité | $\rightarrow B$    |
|---------------|------------------------------------|-----------------------|---------------|------------------------|----------------------------------------|-----------------------|--------------------|
| R             | Potentiomètre (codeur)             | Jauge contrainte      |               | Sonde                  | Photorésistance                        | Résistivité $\rho$    | Magnéto-résistance |
| L             | Transfo $\Delta$ Courant de F      | Magnéto strictif      |               |                        |                                        | Permittivité $\mu$    |                    |
| C             | C variable                         | Electro stricitif     |               |                        |                                        | $\epsilon$            |                    |
| $\varphi$     |                                    |                       | Tachymétrique |                        |                                        |                       |                    |
| Piezoélec     |                                    | Transduction ultrason |               |                        |                                        |                       |                    |
| Hall          | Capteur de proximité               |                       |               |                        |                                        |                       | Direct             |
| Thermoélec    |                                    |                       |               | Thermocouple "Serbeck" |                                        |                       |                    |
| Pyroélec      |                                    |                       |               | ThermoIR               |                                        |                       |                    |
| Photoélec     |                                    |                       |               |                        | Photodiode<br>Cellule photo-électrique |                       |                    |
| Doppler       |                                    |                       | X             |                        |                                        |                       |                    |

## I. Capteur résistifs



$$R = \rho * \frac{L}{S}$$

$\rho$  varie en fonction de :

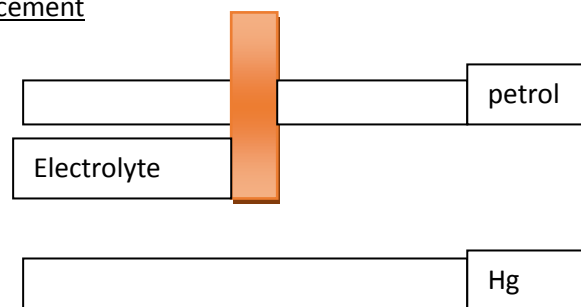
- Milieu chimique
- Température CTB, CTP: Thermistances
- Rayonnement: Photo Résistances
- Contrainte mécaniques (Jauges)

L varie en fonction de:

- Potentiomètre, codeur angulaire ou linéaire

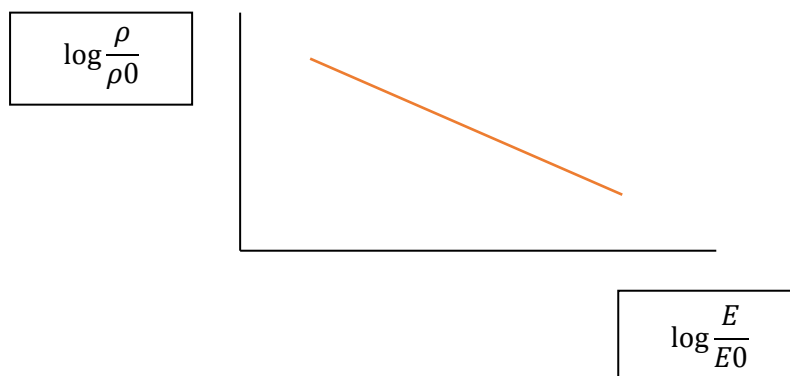
S varie en fonction de :

ex:  $\mu$  capteur de déplacement



Variation de la section efficace en fonction de la position de l'électrode mobile

### 1° Photo résistances (LDR) $\rho = f(E)$

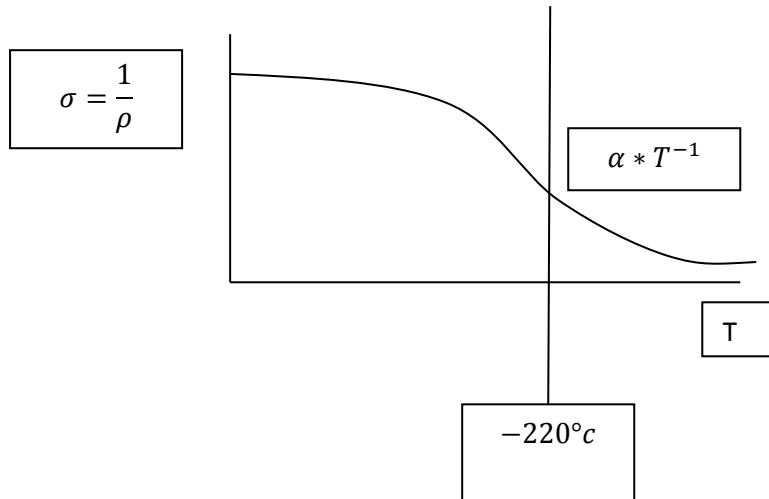


$$\rho(E) = \rho_0 \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-2/3}$$

autour d'un éclairement de référence  $E_0$

## 2° Thermistances $\rho = f(T)$

Chez les métaux:



ex: Pt-100 (  $-120^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}$  :  $R(T) = R_0(1 + AT + BT^2 + C(T-100)T^3)$

$0^\circ\text{C} < T < 660^\circ\text{C}$ :  $T(T) = R_0(1 + AT + bT^2)$

$R_0 = 100\Omega$  A,B,C: Techno cf TD1

Gammes:

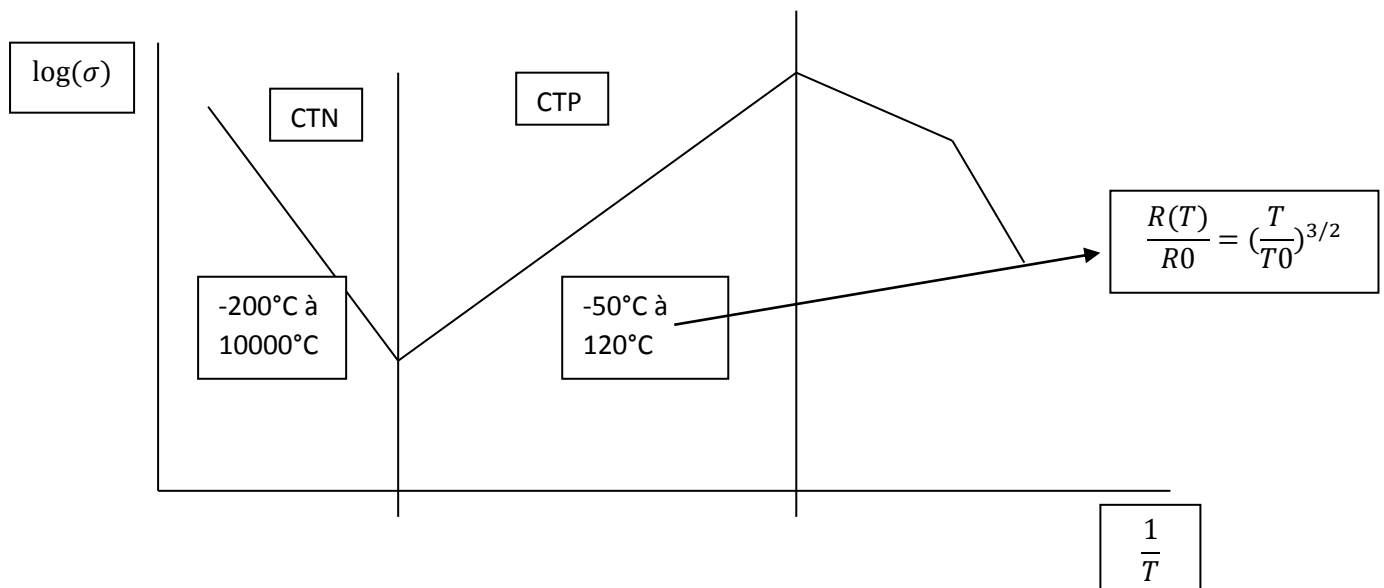
Cu:  $-190 < T < 150^\circ\text{C}$

N:  $-60 < T < 180^\circ\text{C}$

Pf:  $-230 < T < 1100^\circ\text{C}$

In :  $-270 < T < 30^\circ\text{C}$

Chez les Semi-conducteurs CTP/CtN



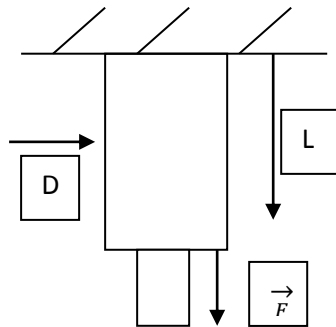
### Grande sensibilité CTN

d'une T0:

$$\frac{R(T)}{R0} = \left(\frac{T}{T0}\right)^{-b} e^{\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T0}\right)}$$

avec  $1 < b < 4$  et  $3000K < \beta = \frac{qEg}{2k} < 5000K$

### 3°f = f(contrainte méca): Piézo résistivité



$$S = \pi * \frac{D^2}{4}$$

a) Elasticité  $\frac{dD}{D} = -\gamma \frac{dL}{L}$  avec  $\gamma$  coef de Poisson

b) Déformation  $F = E * \frac{dL}{L}$  avec E coef de Young

c) Piezo  $F = \frac{1}{\pi} * \frac{d\rho}{\rho}$  avec  $\pi$  coef de Piezo

$$R = \rho * \frac{L}{S} \Rightarrow \frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S}$$

or

$$S = \pi * \frac{D^2}{4} \Rightarrow \frac{dS}{S} = 2 * \frac{dD}{D}$$

$$\text{donc } \frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - 2 \frac{dD}{D}$$

$$\frac{dR}{R} = (\pi * E + 1 + 2\gamma) * \frac{dL}{L}$$

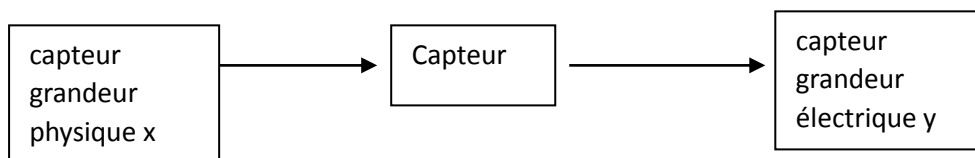
ou

$$\frac{dR}{R} = \left( \pi + \frac{1 + 2\gamma}{E} \right) * F$$

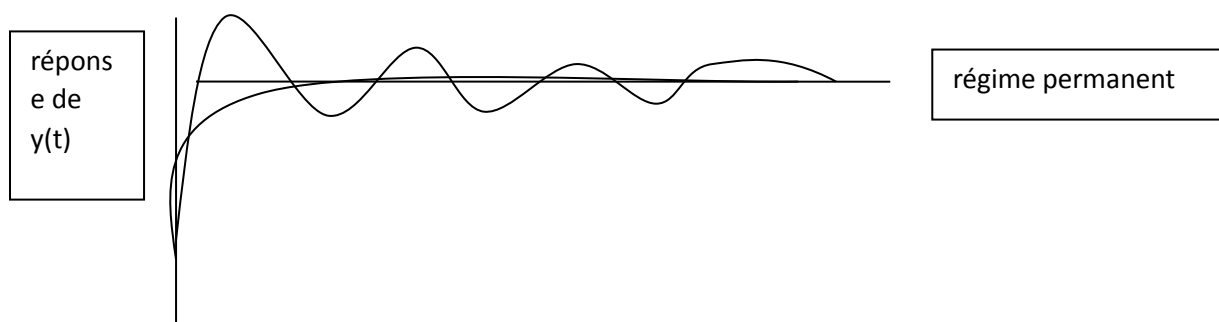
## TD1

---

### généralité capteurs : complément cours



- Idéal  $y = f(x)$  et  $f$ : linéaire instantanée
- Réel  $y = f(x)$  et n'est pas linéaire
- Réel (-)  $y = f(x, x_s)$  avec  $x_s$  grandeur secondaire
- Réel (-)  $y$  n'est pas une fonction instantanée de  $x$



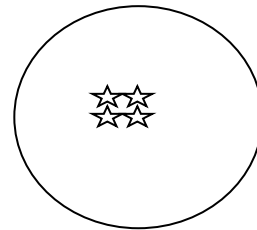
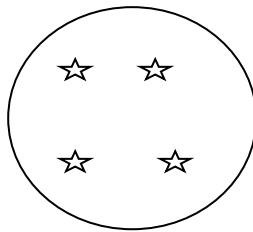
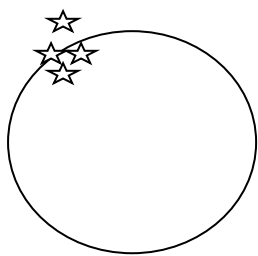
$$y(t) = r \text{ convolué } x(t)$$

$$Y(f) = R(f) * X(f) \Rightarrow \text{linéaire}$$

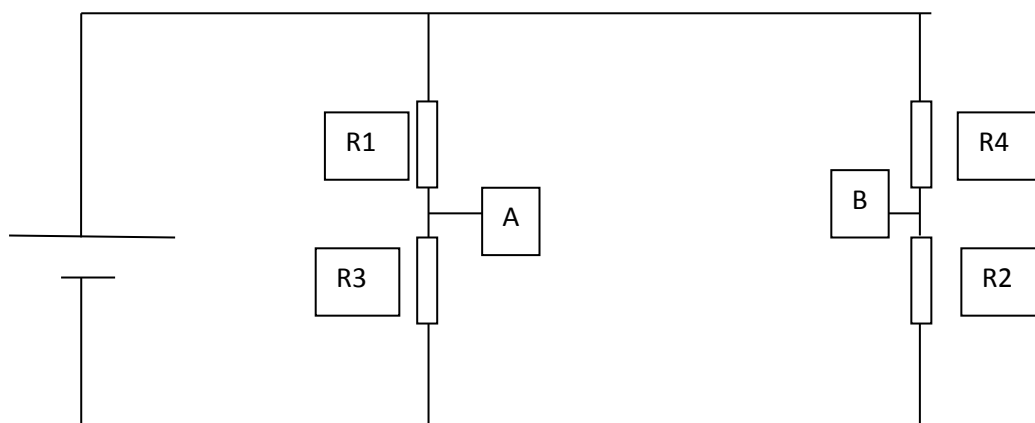
Dans le cas où le capteur a une BP  $\rightarrow \infty$  et qui n'induit qu'un retard :  $r(t) = k * \delta(t - \theta)$

DEFINITION STAT

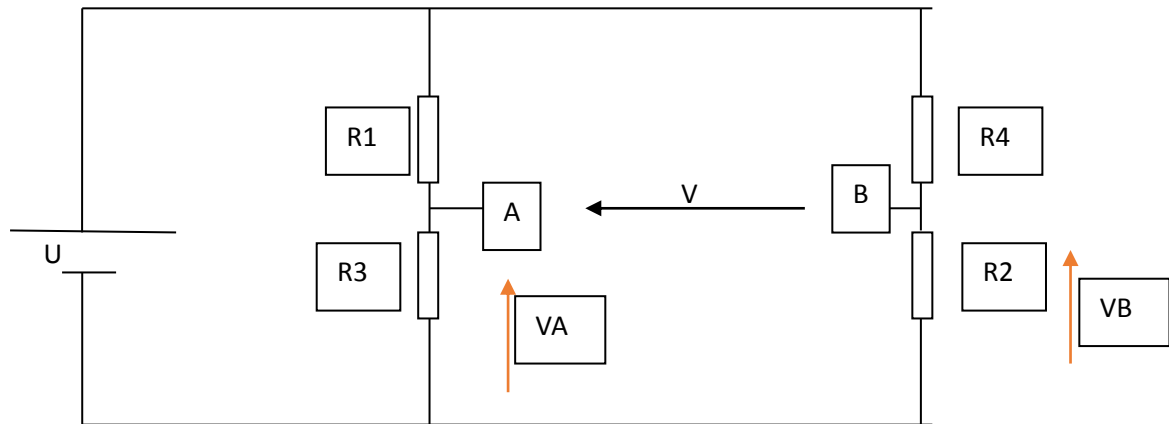
Précision, justesse, fidélité



|        |   |       |   |        |
|--------|---|-------|---|--------|
| FIDELE | + | JUSTE | = | PRECIS |
|--------|---|-------|---|--------|



question 1)



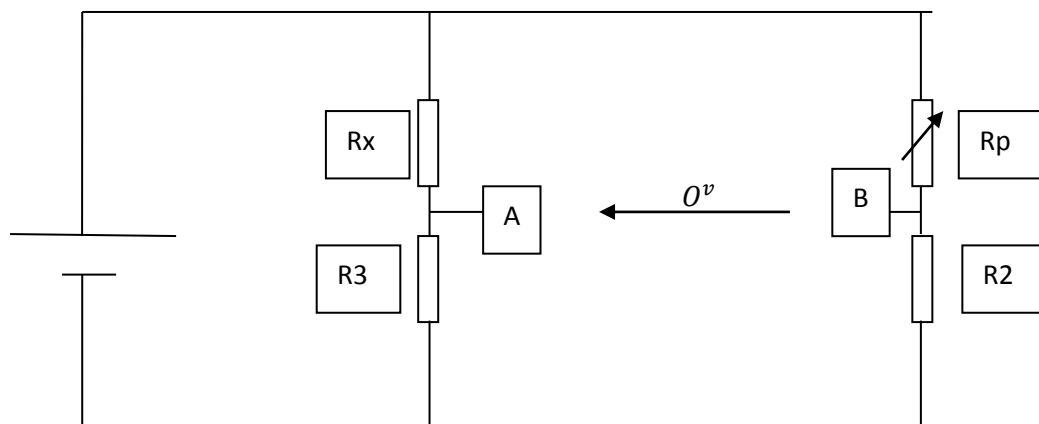
$$V = V_A - V_B$$

$$V = \frac{R_3}{R_1 + R_3} U - \frac{R_2}{R_2 + R_4} U$$

$$V = \frac{R_3 * R_4 - R_1 * R_2}{(R_1 + R_3) * (R_2 + R_4)} U$$

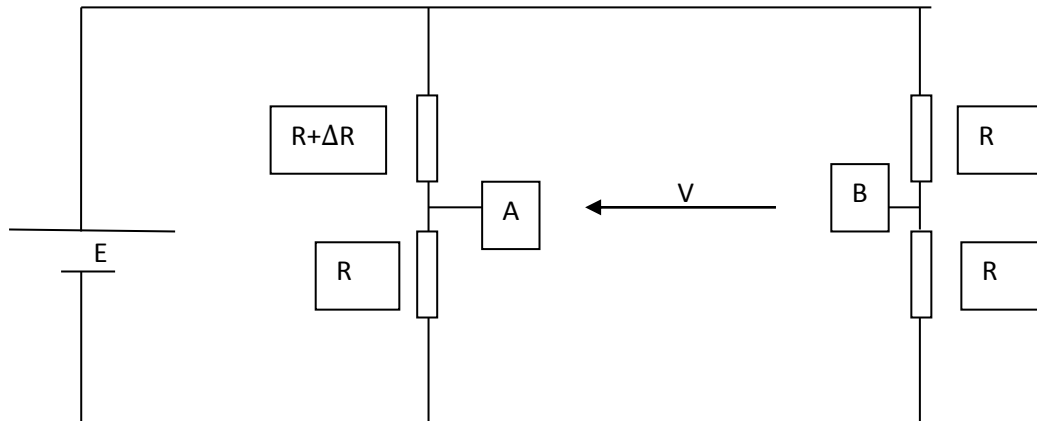
Si  $V=0$  alors  $R_1 R_2 = R_3 R_4$

Mesure de la résistance inconnue  $R_2$  et  $R_3$  connues et  $R_4 = 1$  potentiomètre graduée (Etalon  $R_p$ )



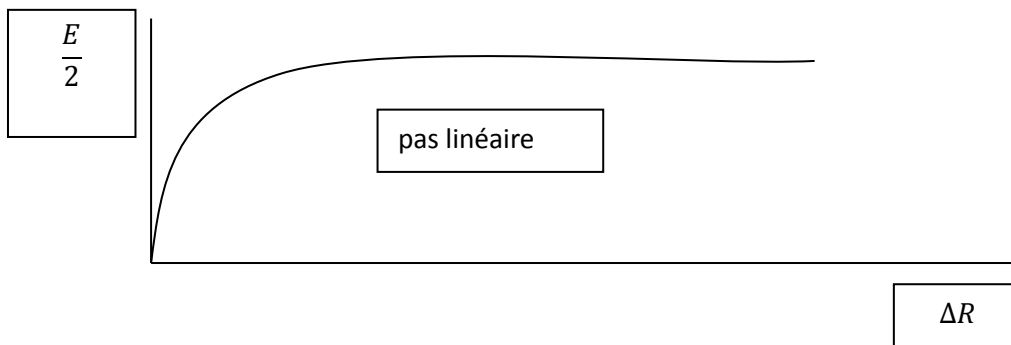
$$R_x = \frac{R_3}{R_2} R_p$$

question 2)



$$\Delta R = \alpha * \varphi \text{ avec } \varphi \text{ à mesurer}$$

$$V = \frac{-\Delta R}{2(2R + \Delta R)} E$$



$$\frac{1}{2R + \Delta R} = \frac{1}{2R} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{2R}} = \frac{1}{2R} \left( 1 - \frac{\Delta R}{2R} + \left( \frac{\Delta R}{2R} \right)^2 \right)$$

$$V = -\frac{E}{2} \left( \frac{1}{2R} \left( 1 - \frac{\Delta R}{2R} + \left( \frac{\Delta R}{2R} \right)^2 \right) \Delta R \right)$$

$$V = \frac{-E}{4R} \Delta R \left( 1 - \frac{\Delta R}{2R} + \dots \right)$$

avec  $\Delta R \ll 2R$

### III - Chaîne de mesure de température

$$R(T) = \sigma \cdot T + R(0)$$

$$R(0) = 1200 \, \Omega$$

Graph:  $\sigma = \frac{250-100}{400-0} = \frac{15}{40} = \frac{3}{8} = 0.375 \, \Omega/^{\circ}\text{C}$

Num:  $R(T) = R(0)(1 + AT + BT^2 - 100CT^3 + CT^4)$

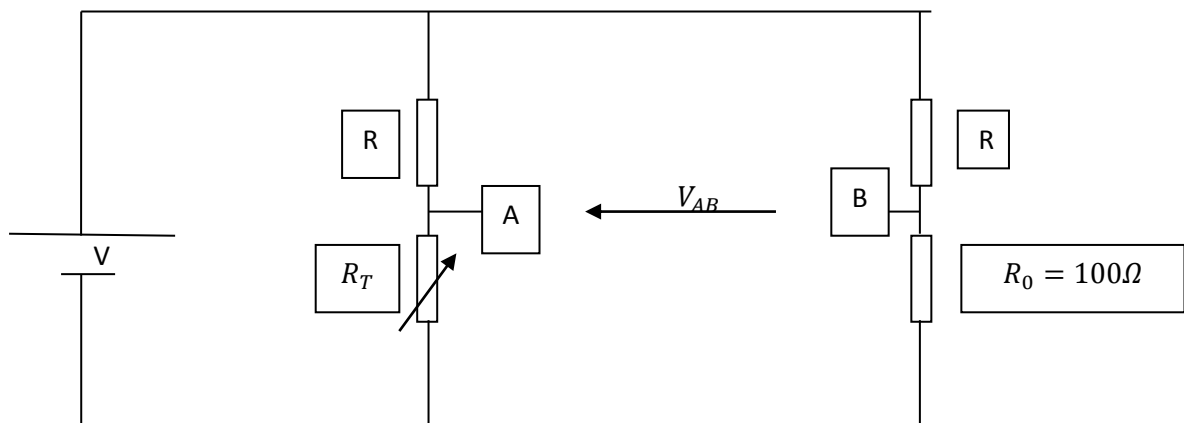
$$A = 3081.10^{-3} \, ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$B = -6.02 \cdot 10^{-7} \, ^{\circ}\text{C}^{-2}$$

$$C = -6.10^{-12} \, ^{\circ}\text{C}^{-4}$$

$$R(T) = R(0) + A \cdot R(0) \cdot T + B R(0) \cdot T^2 - 100 \cdot R(0) \cdot C T^3 + R(0) \cdot C \cdot T^4$$

$$\begin{array}{ccccccc} & \swarrow & \downarrow & \searrow & \swarrow & & \searrow \\ & 100\Omega & & & 6 \cdot 10^8 & & \\ & & \sigma = 0.381 \, \Omega/^{\circ}\text{C} & & & & \\ & & & \searrow & & & \\ & & & & -6.02 \cdot 10^{-5} & & 6 \cdot 10^{-10} \end{array}$$



On veut  $V_{AB} = 0^v$  pour  $T = 0 \, ^{\circ}\text{C}$

$$V_{AB} = \left( \frac{R_T}{R + R_T} - \frac{R_0}{R + R_0} \right) \cdot V$$

$$V_{AB} = \left( \frac{R_T(R + R_0) - R_0(R + R_T)}{(R + R_T) \cdot R + R_0} \right) \cdot V$$

$$V_{AB} = \left( \frac{R \cdot R_T - R_0 \cdot R}{(R + R_T) \cdot R + R_0} \right) \cdot V$$

$$V_{AB} = \left( \frac{R}{R + R_0} \right) \cdot \left( \frac{R_T - R_0}{R_T + R} \right) \cdot V \text{ avec } R_T \ll R$$

$$V_{AB} = \frac{\sigma \cdot V}{R + R_0} \text{ } V/^{\circ}C$$

sensibilité

$$\alpha = \frac{\sigma \cdot V}{R + R_0} \text{ } V/^{\circ}C$$

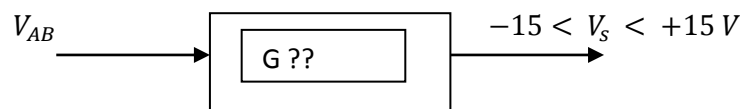
AN:

$$V = 15V$$

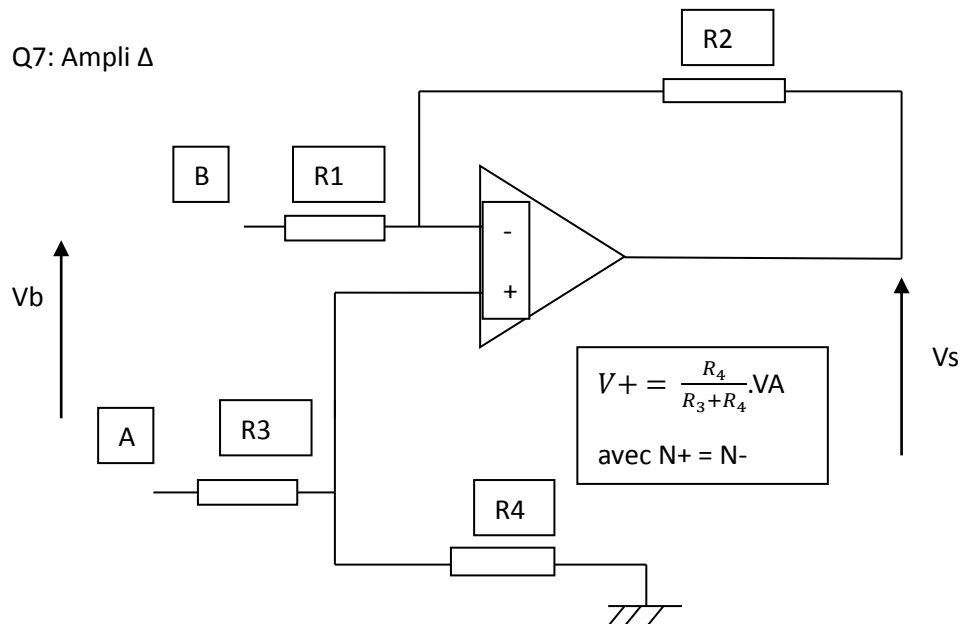
$$R = 1 \text{ K}\Omega \text{ } (10R_0)$$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{0,38 \cdot 15}{1000} = 0.0057 = 5.7 \text{ mV}/^{\circ}C$$

Etape d'amplification :



Q7: Ampli Δ



$$V_s = G \cdot V_{AB}$$

$$\frac{V_B - v^-}{R_1} = \frac{v^- - V_s}{R_2}$$

$$\frac{V_s}{R_2} = \frac{v_+}{R_2} + \frac{v_+}{R_1} - \frac{V_B}{R_1}$$

$$\frac{V_s}{R_2} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot V_A - \frac{V_B}{R_1}$$

$$V_s = \left[ \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_4}} \right] \cdot V_A - \frac{R_2}{R_1} \cdot V_B$$

Si:

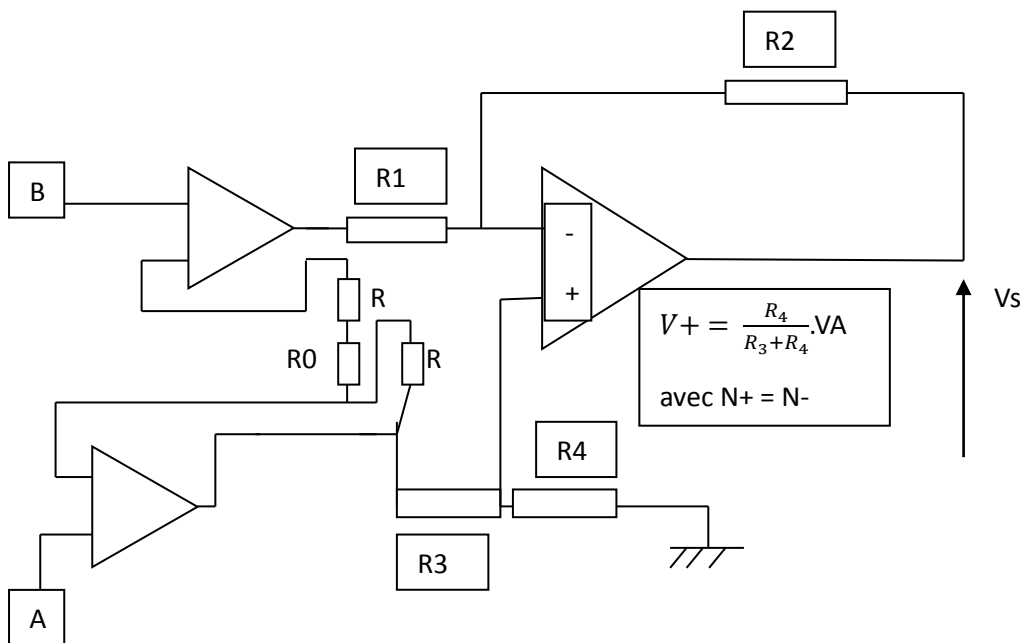
$$\frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_3}{R_4}} = \frac{R_2}{R_1}$$

$$1 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_4}$$

Si  $R_2 \cdot R_3 = R_1 \cdot R_4$  alors :

$$V_s = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_A - V_B) = \frac{R_2}{R_4} \cdot V_{AB}$$

pour l'appli avec Pt - 100  $\Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 100$



Adaptation impédances ok

Repartir l'ampli sur les 2 étapes

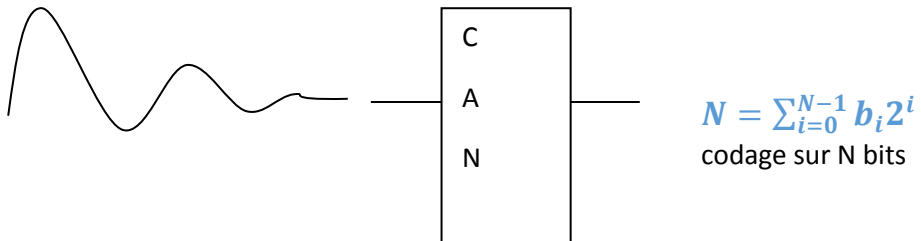
$$I = \frac{V_A - V_B}{R_0} = \frac{V_{A'} - V_{B'}}{2R + R_0}$$

$$V_{A'} - V_{B'} = \left( \frac{2R + R_0}{R_0} \right) \cdot (V_B - V_A)$$

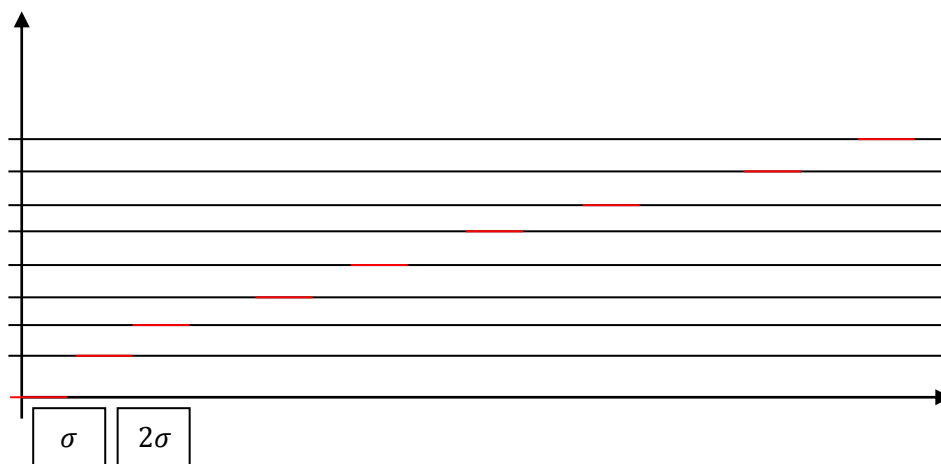
$$V_{AB} = \left( 1 + \frac{2R}{R_0} \right) \cdot V_{AB}$$

$$V_S = \frac{R_2}{R_1} \cdot \left( 1 + \frac{2R}{R_0} \right) \cdot V_{AB}$$

## CAN



## Quantification

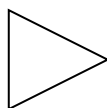
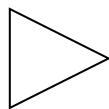


$$\frac{V_{max}}{\sigma} = N + 1$$

$\sigma$  : pas de quantif

$N + 1$  : nombre de niveau

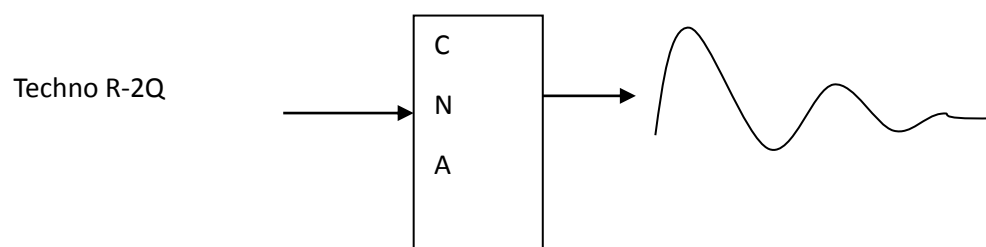
$$\text{Résolution} = \frac{\text{pas}}{\text{plein echelle}} = \frac{\sigma}{V_{max}}$$



|                          | S3 | S2 | S1 | Niveau | <i>b1b0</i> |
|--------------------------|----|----|----|--------|-------------|
| $vA < \sigma$            | -1 | -1 | -1 | 0      | 00          |
| $\sigma < vA < 2\sigma$  | -1 | -1 | +1 | 1      | 01          |
| $2\sigma < vA < 3\sigma$ | -1 | +1 | +1 | 2      | 10          |
| $3\sigma < vA < 4\sigma$ | +1 | +1 | +1 | 3      | 11          |

Codage sur n bits  $N = 2^n$  niveaux  $\Rightarrow 2^n - 1$  niveaux Q  $\Rightarrow 2^n - 1$  comparateur d'ou coût & encombrement important

## CAN



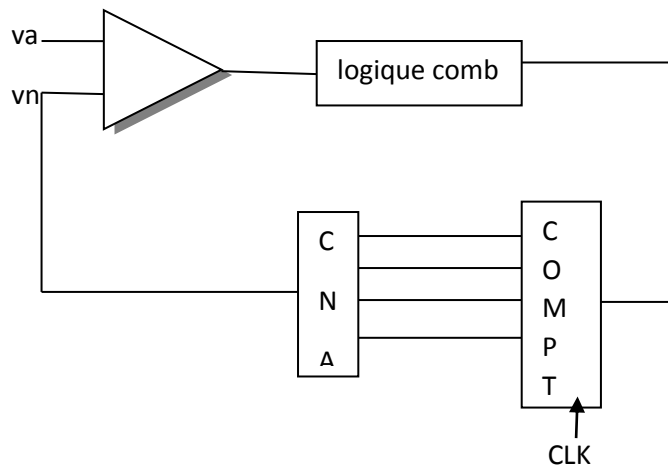
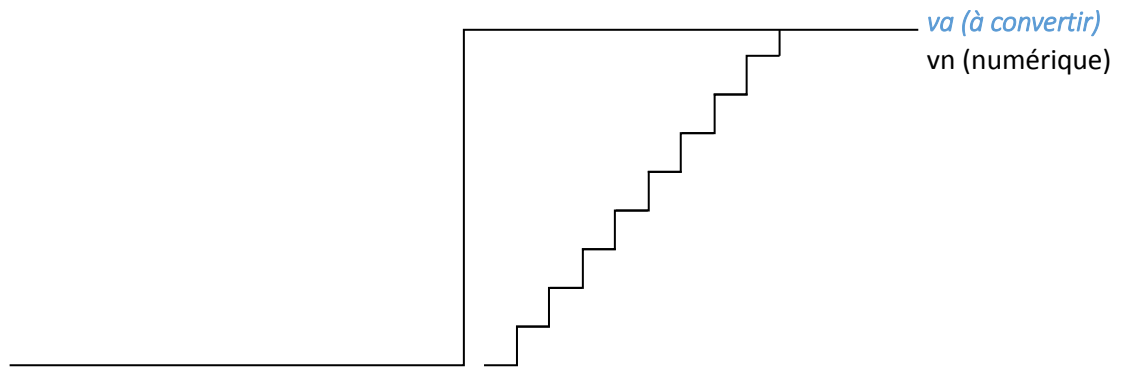
<ex: Calculer la tension de la PE d'1 CNA 10 bit avec 1 pas de Q de 10 mV. resolution:

Niveaux  $2^{10}$

$$V_{max} = (2^{10} - 1) \cdot \sigma = 1023 \cdot 10 \cdot 10^{-3} V$$

### 3°CAN à rampe numérique

*idée*



problème: durée de conversion dépend de  $va$

$$\frac{1}{f_{clk}} < \text{durée} < \frac{2^n - 1}{f_{clk}}$$

pour 1 CAN de nbits

$$N = 2^n - 1$$

## TD2: CAN

Q1:

$$\text{pas de conversion: } \sigma = \frac{V_{\max}}{2^{10} - 1} = \frac{10,23}{1023} = 10 \text{ mV}$$

$$\text{resolution: } \rho = \frac{\sigma}{V_{\max}} = 0,1\%$$

$$N = \frac{V_A}{\sigma} = \frac{3,728}{10 \cdot 10^{-3}} = 372,8$$

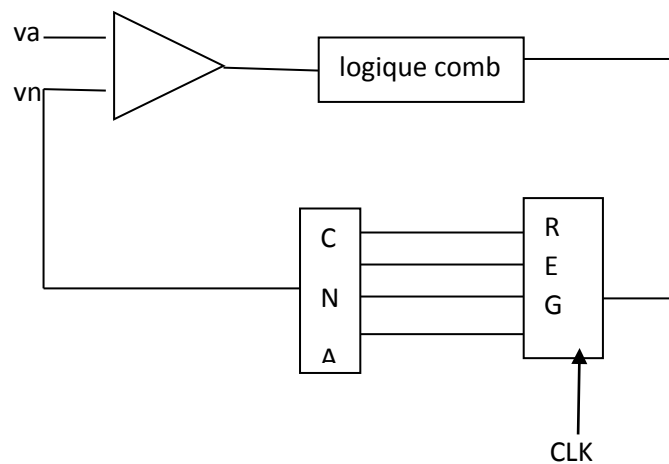
$$\dots\dots\dots (0101110101)_2$$

$$\text{durée} = N \cdot \frac{1}{f_{\text{clk}}} = 373 \mu\text{s}$$

problème:  $1 \mu\text{s} < \text{durée} < 1023 \mu\text{s} = 1\text{ms}$

### 3°CAN à pesés successives

principes: Dichotomie + comparaison



$$\text{espoir: } \text{Durée} = \frac{n}{f_{\text{clk}}}$$

exemple: conversion de 10,4 V sur n= 4bits avec  $\sigma = 1V$

|     | <i>b3 b2 b1 b0</i> |                  |
|-----|--------------------|------------------|
|     | 0 0 0 0            |                  |
|     | 0 0 0 1            |                  |
|     | 0 0 1 0            |                  |
|     | 0 0 1 1            |                  |
|     | 0 1 0 0            |                  |
|     | 0 1 0 1            |                  |
|     | 0 1 1 0            |                  |
|     | 0 1 1 1            |                  |
| 1 3 | 1 0 0 0            | MSB <- 1         |
|     | 1 0 0 1            |                  |
|     | 1 0 1 0            |                  |
|     | 1 0 1 1            |                  |
|     | 1 1 0 0            | MSB suivant <- 1 |
| 2   | 1 1 0 1            |                  |
|     | 1 1 1 0            |                  |
|     | 1 1 1 1            |                  |

Diagram annotations: A vertical line on the left has arrows pointing to rows 1, 2, 3, 4, and 5. An upward arrow is between rows 1 and 3. A downward arrow labeled '4 fin' is between rows 4 and 5. A curved arrow labeled '5' points from row 5 to row 4.

## TD2: CAN

Q1':

$\sigma = 1V$  et  $V_N =$  la sortie du CNA (image numérique de  $V_A$ )

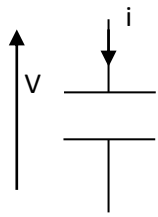
| M    | N    | I | $V_n(volt)$ | $V_N > V_A$ |
|------|------|---|-------------|-------------|
| 1100 | 1000 | 0 | 8           | F           |
| 0110 | 1100 | 1 | 12          | V           |
| 0011 | 1010 | 2 | 10          | F           |
| 0001 | 1011 | 3 | 11          | V           |
| 0000 | 1010 | 4 | 10          | F           |

Pour une conversion sur 8 bits ?

M = 1100 0000

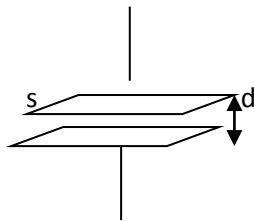
N = 1000 0000

# Capteurs capacitifs



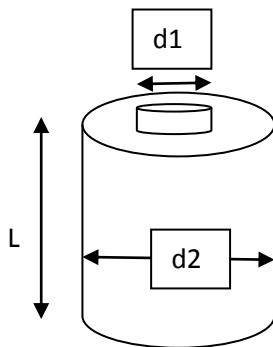
$$C = \frac{Q}{V} \text{ avec } i = \frac{dQ}{dt} \text{ et } i = C \cdot \frac{dV}{dt}$$

condensateur plan:



$$C = \epsilon \frac{S}{d}$$

condensateur cylindrique:



$$C = \frac{2\pi\epsilon L}{\ln d2/d1}$$

$\epsilon$ : permittivité diélectrique de l'isolant

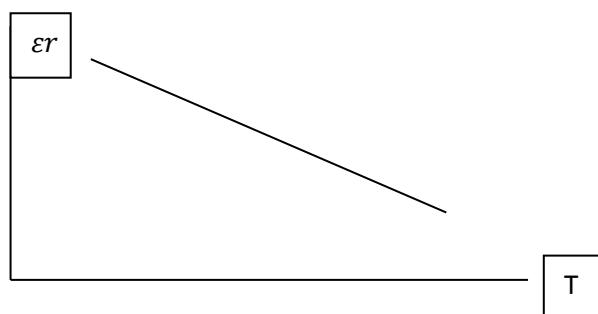
$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$  ou ( $\epsilon_r$  = relative et  $\epsilon_0$  = le vide)

Application:

variation de géométrie -> déplacement, force, niveau

variation de  $\epsilon$  -> température, milieu chimique ...

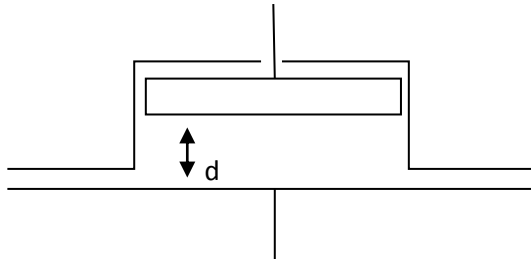
## 1°) mesure de la température



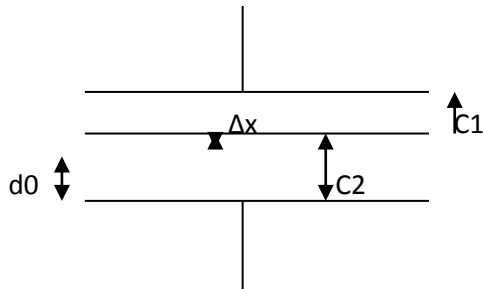
$$\varepsilon_r(T) = \varepsilon_r(T_0)(1 - A(T - T_0))$$

T° environ égal à 1000°C: céramique

## 1°) mesure de déplacement



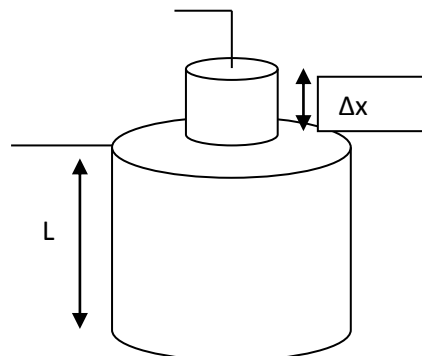
$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \text{ très non linéaire}$$



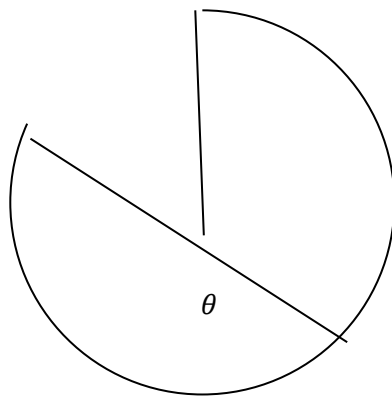
2 capa différentielle

$$C1 = \varepsilon \frac{S}{d + \Delta x}$$

$$C2 = \varepsilon \frac{S}{d - \Delta x}$$



$$C = \frac{2\pi\varepsilon(L - \Delta x)}{\ln \frac{de}{d1}}$$



$$S = \frac{1}{2} \cdot R^2$$

## TD3:

---

Avec  $C1=C2=C0$

C3 et C4 1 jeu de condensateur différentiel tel que:

$$C3 = \varepsilon \frac{S}{d0 + \Delta x} \text{ et } C4 = \varepsilon \frac{S}{d0 - \Delta x}$$

- 1) a quelle Cd sur C0 le port est il équilibré pour  $\Delta x=0$ ?
- 2) exprimer la sortie du port quelque soit  $\Delta x$
- 3) terminer le circuit de cmdt

1-

$$C3 = \varepsilon \frac{S}{d0(1 + \frac{\Delta x}{d0})}$$

$$C3 = \varepsilon \frac{S}{d0(1 + \frac{\Delta x}{d0})}$$

pour  $\Delta x=0$   $C3=C4=\varepsilon \frac{S}{d0} \Rightarrow$ équilibre assuré

2-

$$V_{AB} = \frac{1}{2}V - \frac{\frac{1}{jC4\omega}}{\frac{1}{jC3\omega} + \frac{1}{jC4\omega}}V$$

$$V_{AB} = \frac{1}{2} - \frac{\frac{1}{C4}}{\frac{1}{C3} + \frac{1}{C4}}V$$

$$V_{AB} = \frac{1}{2} - \frac{1 - \frac{\Delta x}{d0}}{1 - \frac{\Delta x}{d0} + 1 + \frac{\Delta x}{d0}}V$$

$$V_{AB} = \frac{1}{2} \left( 1 - \left( 1 - \frac{\Delta x}{d0} \right) \right) V$$

$$V_{AB} = \frac{1}{2} \frac{\Delta x}{d0} V$$

$$V = Vm \sin(\omega t)$$

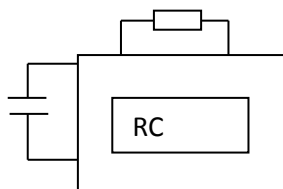
$$V_{AB} = \frac{\Delta x}{2d0} \cdot Vm \cdot \sin(\omega t)$$

$$\frac{\Delta x}{2d0} \cdot Vm \rightarrow \text{amplitude}$$

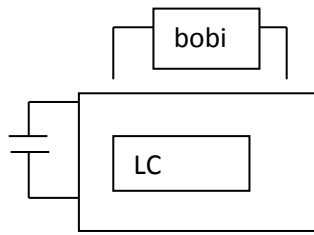
terminer le circuit de <cd -> démodulateur AM

#### 4°)électrique associé

- pont AC + demod AM
- oscillateur RC, LC

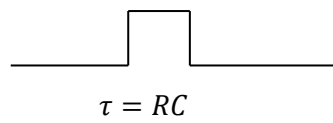
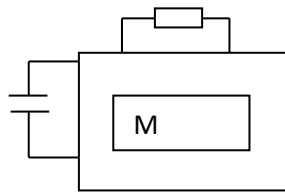


$$f_{rc} = \frac{1}{RC}$$



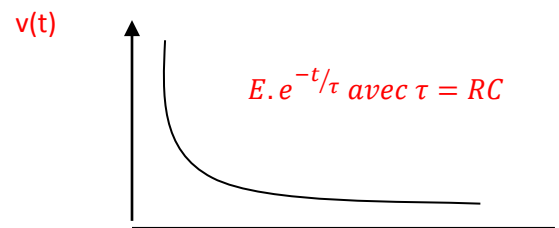
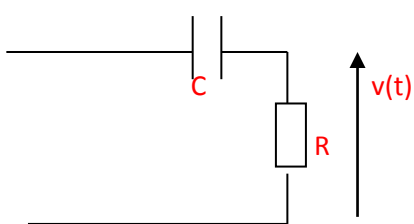
$$frc = \frac{1}{LC}$$

- multivibrateurs: astable/monostable

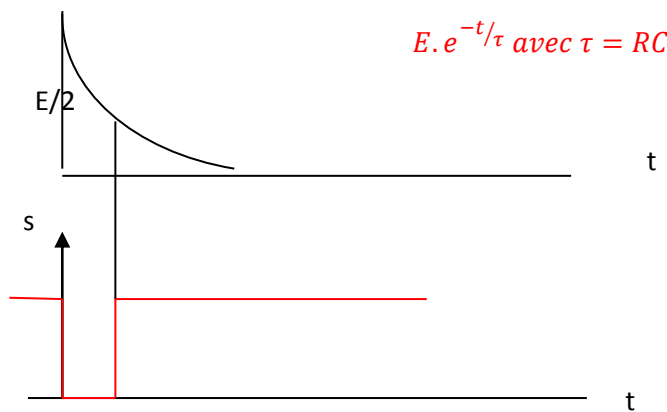
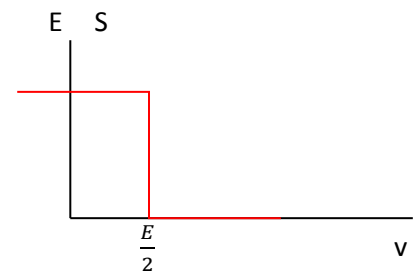
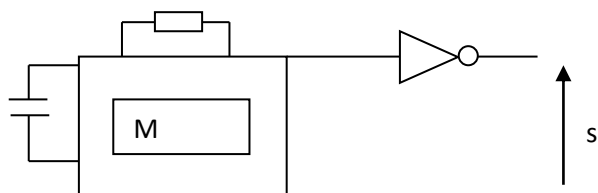


demod PWM

exemple: basique monostable



t



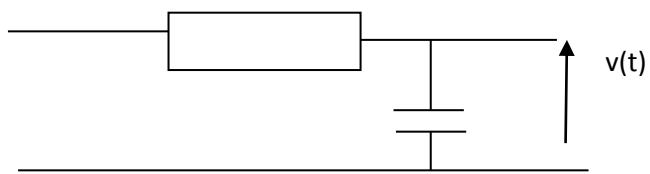
$$v(\theta) = E \cdot e^{-\theta/\tau} = \frac{E}{2}$$

$$e^{-\theta/\tau} = 2$$

$$\theta = \tau \cdot \ln 2 = RC \cdot \ln 2$$

exemple basique astable:

- 1 circuit NL à hystérésis
- charge/décharge C



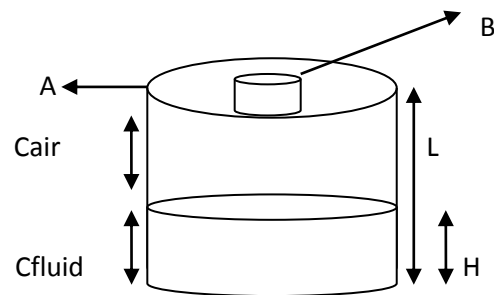
$$v(t) = E \left( 1 - e^{-t/\tau} \right) + v_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

(voir brouillon)



# TD3

## 2) Mesure de niveau



$$C = \frac{2\pi\epsilon_r}{\ln \frac{d2}{d1}} \cdot L$$

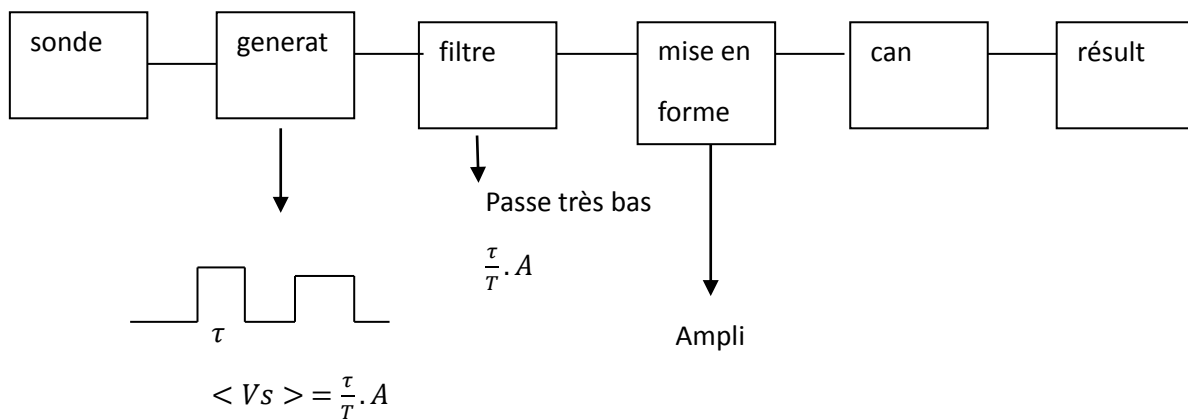
$$C_{AB} = C_{Air} \text{ sont en parallèle } C_{Fluid} = C_{Air} + C_{Fluid}$$

$$= \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{d2}{d1}} (\epsilon_{Air}(L - H) + \epsilon_{Fluid} \cdot H)$$

$$= \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{d2}{d1}} (1 \cdot (L - H) + \epsilon_{Fluid}^{-1})$$

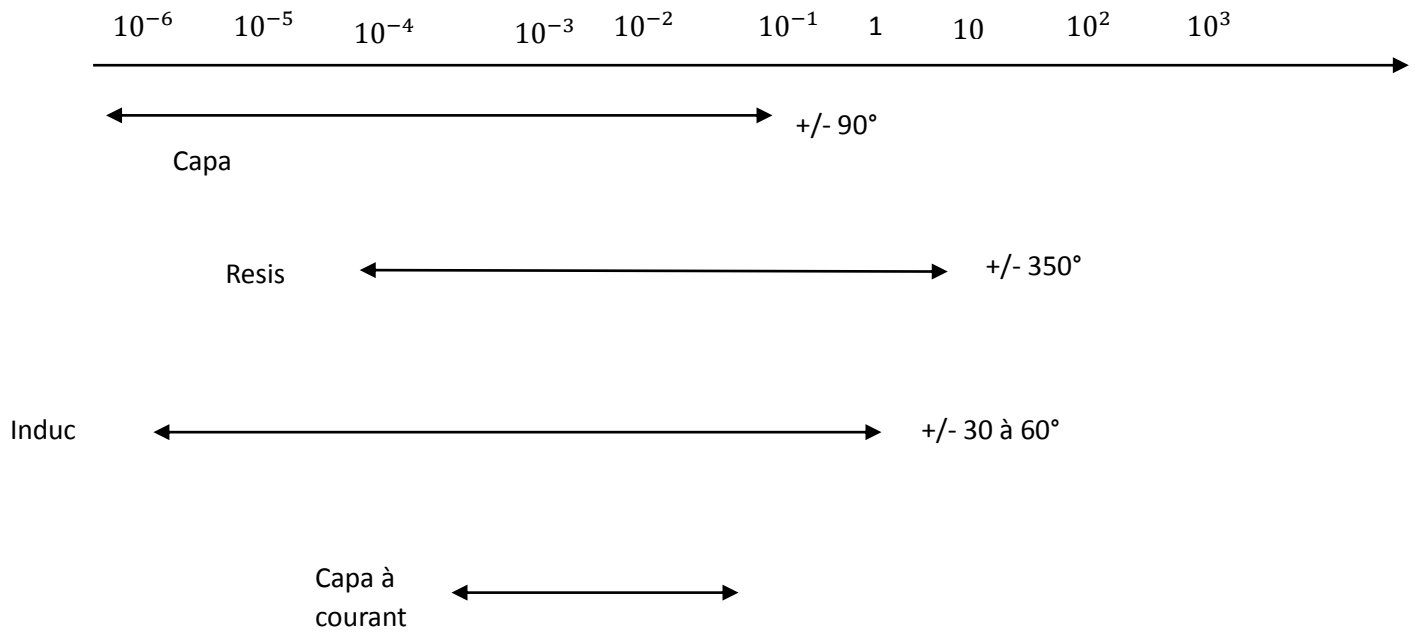
$$= 6,28 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (1 + H)$$

$$= 50(HN)pF$$

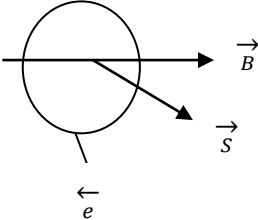
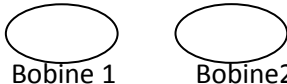


# Capteur inductifs

mesure cinétique (déplacement et vitesse)

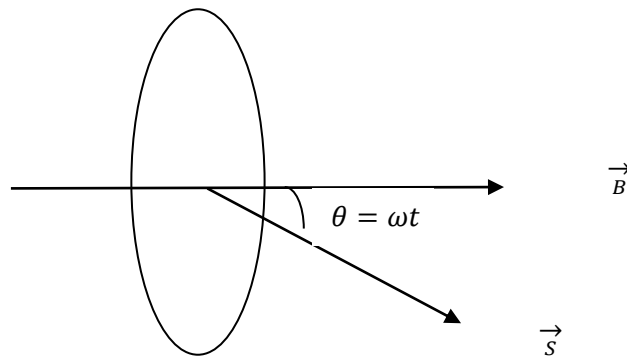


## 1) Ppe d'induction, auto induction, mutuelle induction

| Induction:                                                                                                                                                                                                     | Auto induction:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Mutuelle induction:                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  $e = \frac{d\Phi}{dt}$ $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$ <p>Cas bobine ac n spires</p> $\Phi = n \cdot \vec{B} \cdot \vec{S}$ | <p>Auto induction:</p> $\Phi = L \cdot i$ $L = \mu \cdot S \cdot \frac{n^2}{l}$ <p><math>I \Rightarrow B \Rightarrow \Phi \Rightarrow e</math></p> $e = \frac{d\Phi}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt}$ <p>S: section, n: spires,<br/>l: longueur, <math>\mu = \mu_0</math> avec<br/><math>\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-2}</math></p> | <p>Mutuelle induction:</p>  <p>Bobine 1      Bobine 2</p> <p><math>v_1</math>      <math>v_2 = M \cdot \frac{di_1}{dt}</math></p> |

Capteur à variation de L:  $\mu$  varie  $\rightarrow$  L varie avec d

Capteur à variation de  $\Phi$ : exemple Tachymètre



$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos(\omega t)$$

$$e = B \cdot S \cdot \sin(\omega t) \text{ ex: } \mu D \text{ électrodyn}$$

Capteur à variation de mutuelle induction M

- LVDT
- Capteur Foucault (Eddy current)

2) exemple de réalisation

- Techno:

(voir brouillon2)

3) Mesure petit déplacements

(schéma voir feuille)

$$v = L \frac{di}{dt}$$

$$L(x) = \frac{1}{2} \cdot N^2 \cdot \mu_0 \cdot S \cdot \frac{1}{x}$$

$$x = x_0 + \Delta x$$

$$x_0: \text{ref}$$

$$L(x) = L_0 \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta x}{x_0}}$$

$$L_0 = L(x_0) = \frac{1}{2} \cdot N^2 \cdot \mu_0 \cdot S \cdot \frac{1}{x_0}$$

$$L(x) = L_0 \cdot \left( 1 - \frac{\Delta x}{x_0} + \left( \frac{\Delta x}{x_0} \right)^2 - \left( \frac{\Delta x}{x_0} \right)^3 \dots \right)$$

(schéma 2)

$$L_1(x) = L_0 \cdot \left( 1 - \frac{\Delta x}{x_0} + \left( \frac{\Delta x}{x_0} \right)^2 - \left( \frac{\Delta x}{x_0} \right)^3 \dots \right)$$

$$L_2(x) = L_0 \cdot \left( 1 + \frac{\Delta x}{x_0} + \left( \frac{\Delta x}{x_0} \right)^2 - \left( \frac{\Delta x}{x_0} \right)^3 \dots \right)$$

$$L_2(x) - L_1(x) = 2L_0 \cdot \left( 1 - \frac{\Delta x}{x_0} + \left( \frac{\Delta x}{x_0} \right)^2 - \left( \frac{\Delta x}{x_0} \right)^3 \dots \right)$$

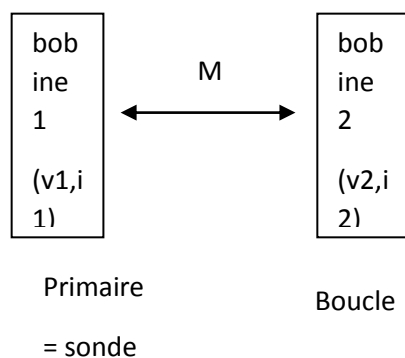
Améliore la linéarité et augmente la sensibilité

4) Mesure de déplacement avec LVDT (Ppe de variation de Mutuelle)

(shéma3)

5) Capteur à courant de Foucault "capteur" sans contact

(shéma4)



$$v_1 = R_1 \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M(x) \cdot \frac{di_2}{dt}$$

$$0 = R_2 \cdot i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M(x) \cdot \frac{di_1}{dt}$$

Régime sinusoïdale:  $d/dt \leftrightarrow j\omega$

$$v_1 = (R_1 + j \cdot L_1 \cdot \omega) I_1 + j \cdot M \cdot \omega \cdot I_2$$

$$0 = (R_2 + j \cdot L_2 \cdot \omega) \cdot I_2 + j \cdot M \cdot \omega \cdot I_1 \rightarrow I_2 = \frac{-j \cdot M \cdot \omega \cdot I_1}{R_2 + j \cdot L_2 \cdot \omega}$$

$$\Rightarrow V_1 = \left[ (R_1 + j \cdot L_1 \cdot \omega) - \frac{(M \cdot \omega)^2}{R_2 + j \cdot L_2 \cdot \omega} \right] \cdot I_1 \text{ représente l'impédance de la sonde } Z_c$$

$$\Rightarrow Z_c = R_1 + j \cdot L_1 \cdot \omega + \frac{(M \cdot \omega)^2 \cdot (R_2 - j \cdot L_2 \cdot \omega)}{R_2^2 + (j \cdot L_2 \cdot \omega)^2}$$

$$Z_c = R_1 + \frac{R_2 \cdot (M \cdot \omega)^2}{R_2 + (L_2 \cdot \omega)^2} + j \cdot \omega \cdot (L_1 - \frac{L_2 \cdot (M \cdot \omega)^2}{R_2 + (L_2 \cdot \omega)^2})$$

merci ilan

