

Théorie des capteurs et applications

Pr ADOMOU Alain,

Maître de conférences des Universités

Octobre 2017

Plan

1. La classification des capteurs
2. Les chaînes de mesure
3. Caractéristiques métrologiques des capteurs
4. Les conditionneurs des capteurs passifs
5. Les conditionneurs du signal
6. Les microcontrôleurs (Arduino)
7. La conversion analogique/numérique
8. Introduction à LabVIEW



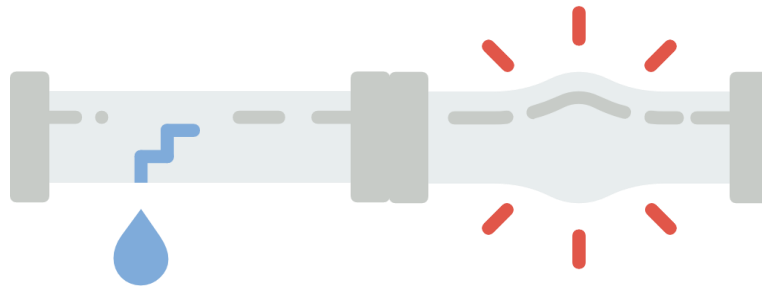


La classification des capteurs

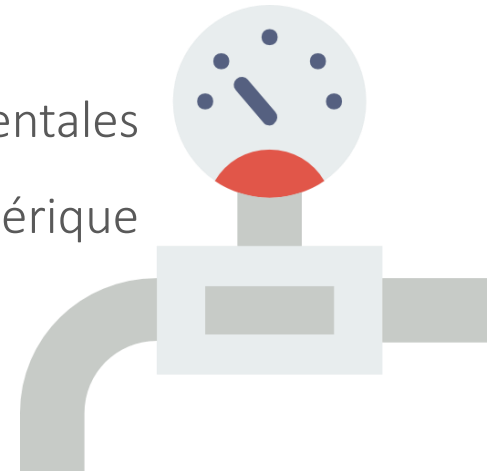
Les capteurs actifs et passifs

Définition (1/2)

- *Le mesurande* : La grandeur physique objet de la mesure : déplacement, température, pression, etc. il est représenté par m



- *Le mesurage* : l'ensemble des opérations expérimentales qui concourent à la connaissance de la valeur numérique du *mesurande*.

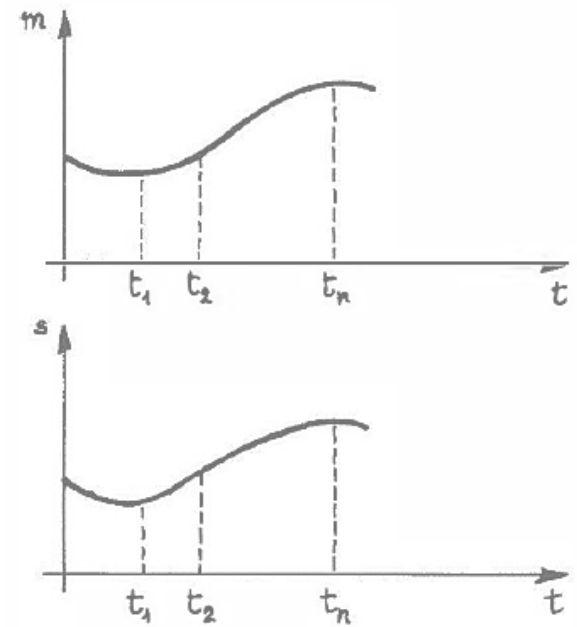


Définition (2/2)

- *Le capteur* : c'est le dispositif qui soumis à l'action d'un *mesurande* non électrique présente une caractéristique de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) désignée par s et qui est fonction du *mesurande* :

$$s = F(m)$$

s est la grandeur de sortie ou réponse du capteur, m est la grandeur d'entrée ou excitation. La mesure de s doit permettre de connaître la valeur de m



Mesurande

Capteur

Grandeur
électrique

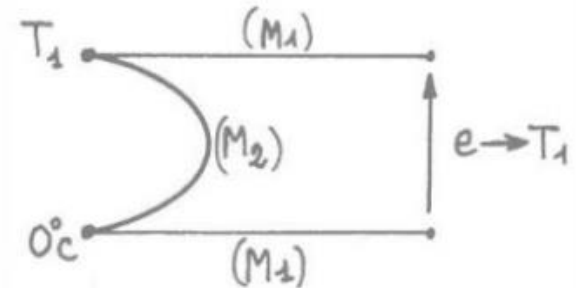
Les capteurs actifs (1/5)

<i>Mesurande</i>	<i>Effet utilisé</i>	<i>Grandeur de sortie</i>
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Pyroélectricité Photoémission Effet photovoltaïque Effet photoélectromagnétique	Charge Courant Tension Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

Les capteurs actifs (2/5)

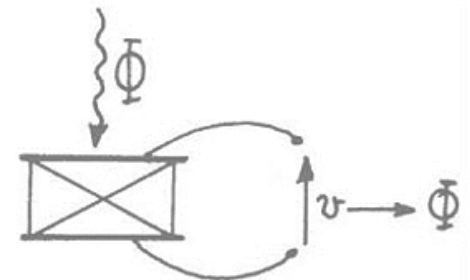
Effet thermoélectricité

Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 est le siège d'une force électromotrice $e(T_1, T_2)$.



Effet pyroélectrique

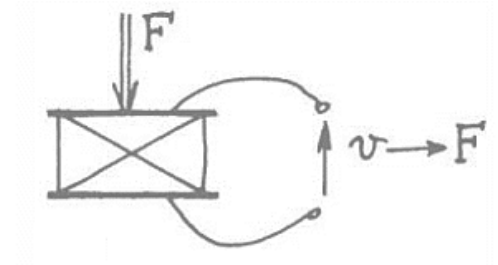
Certains cristaux dits pyroélectriques, ont une polarisation électrique spontanée qui dépend de leur température



Les capteurs actifs (3/5)

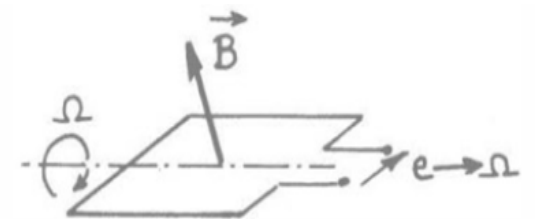
Effet piézoélectrique

L'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézoélectriques, entraîne une déformation qui suscite l'apparition de charges électriques égales et de signes contraires sur les faces opposées.



Effet d'induction électromagnétique

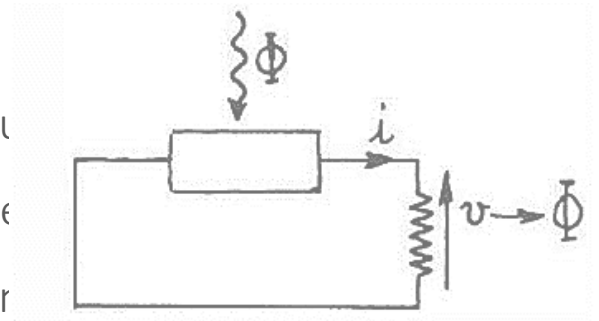
Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ d'induction fixe, il est le siège d'une f.é.m. proportionnelle au flux coupé par unité de temps.



Les capteurs actifs (4/5)

Effet photoélectromagnétique

L'application d'un champ magnétique perpendiculaire au rayonnement provoque dans le matériau éclairé l'apparition d'une tension électrique dans la direction normale au champ et au rayonnement.



Effet photovoltaïque

Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction de semi-conducteurs P et N illuminée ; leur déplacement dans le champ électrique de la jonction modifie la tension à ses bornes.

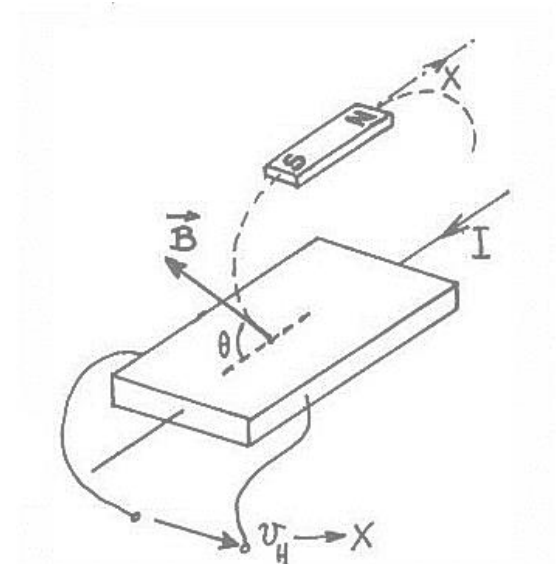
Les capteurs actifs (5/5)

Effet Hall

Un matériau, généralement semi-conducteur et sous forme de plaquette, est parcouru par un courant I et soumis à une induction B faisant un angle θ avec le courant. Il apparaît, dans une direction perpendiculaire à l'induction et au courant une tension v_H qui a pour expression :

$$v_H = K_H \times I \times B \times \sin(\theta)$$

Où K_H dépend du matériau et des dimensions de la plaquette.

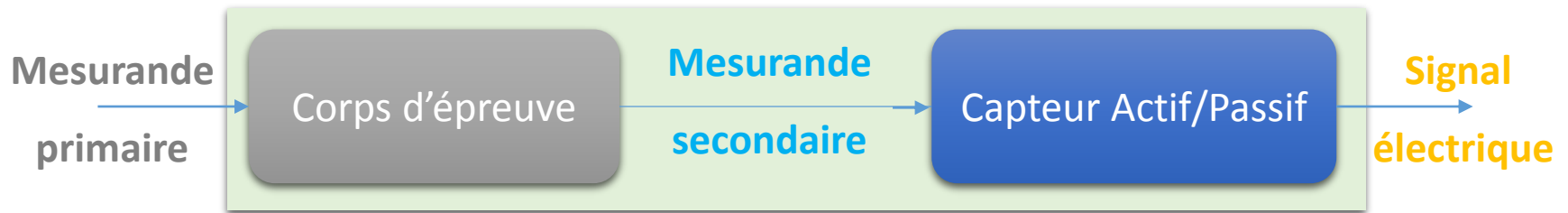


Les capteurs passifs

<i>Mesurande</i>	<i>Caractéristique électrique sensible</i>	<i>Types de matériaux utilisés</i>
Température	Résistivité	Métaux : platine, nickel, cuivre. Semi-conducteurs.
Très basse température	Constante diélectrique	Verres.
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité Perméabilité magnétique	Alliages de nickel, silicium dopé. Alliages ferromagnétiques.
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnétorésistants : bismuth, antimonure d'indium.
Humidité	Résistivité Constante diélectrique	Chlorure de lithium. Alumine ; polymères.
Niveau	Constante diélectrique	Liquides isolants.

Les capteurs composites

Le corps d'épreuve est le dispositif qui, soumis au mesurande étudié en assure une première traduction en une autre grandeur physique non-électrique, le mesurande secondaire, qu'un capteur adéquat traduit alors en grandeur électrique.



Un capteur composite, c'est l'ensemble formé par le corps d'épreuve et un capteur actif ou passif

Les capteurs intégrés

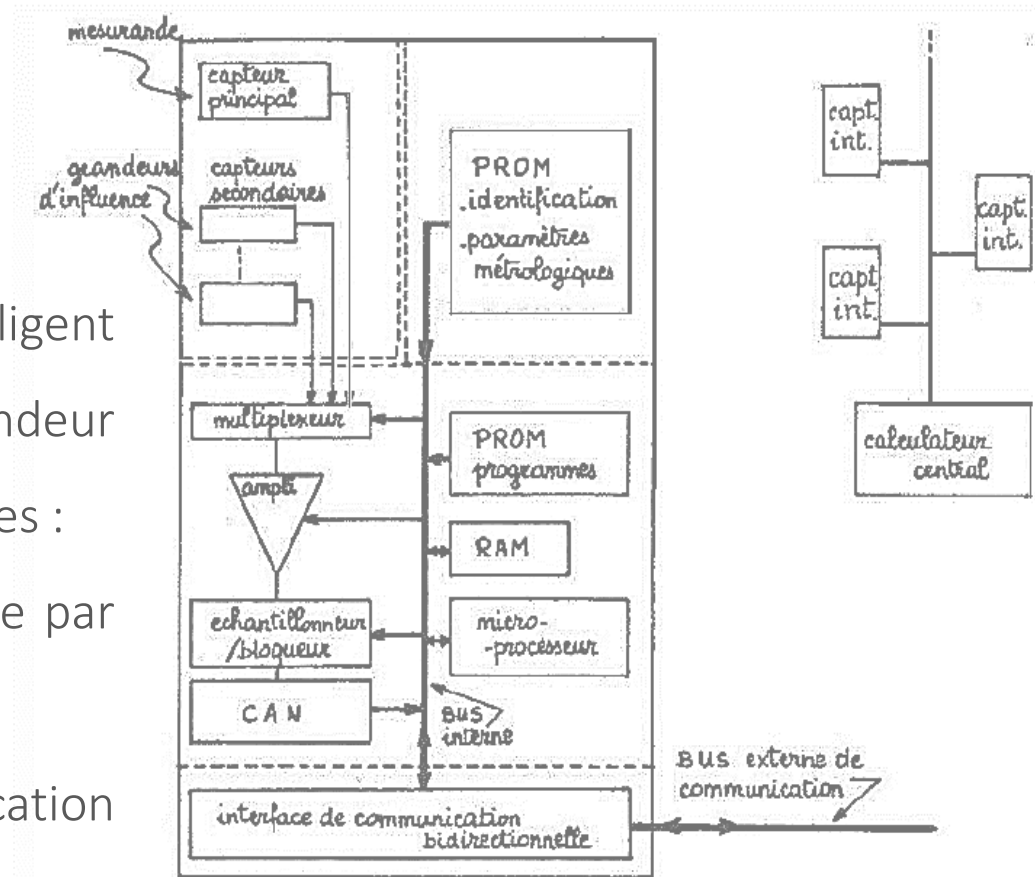
Un capteur intégré est un composant réalisé par les techniques de la Microélectronique et qui regroupe sur un substrat de silicium commun le capteur proprement dit, le corps d'épreuve éventuel, des circuits électroniques de conditionnement du signal

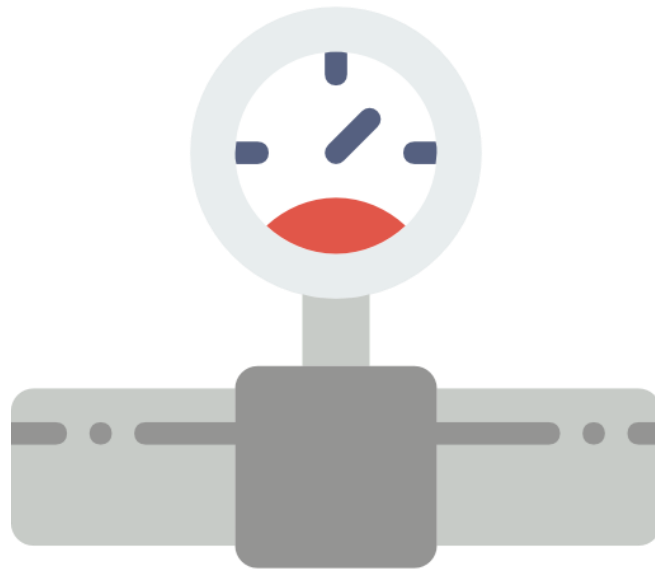


Les capteurs intelligents

On désigne par capteur intelligent l'ensemble de mesure d'une grandeur physique constitué de deux parties :

- ✓ une chaîne de mesure pilotée par microprocesseur ;
- ✓ une interface de communication bidirectionnelle.





La chaîne de mesure

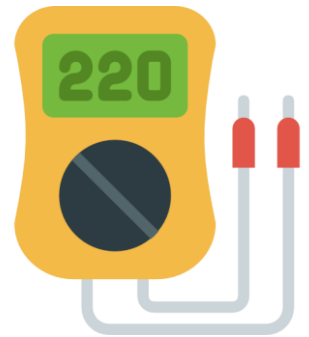
Définition, structure d'une chaîne de mesure

Définition

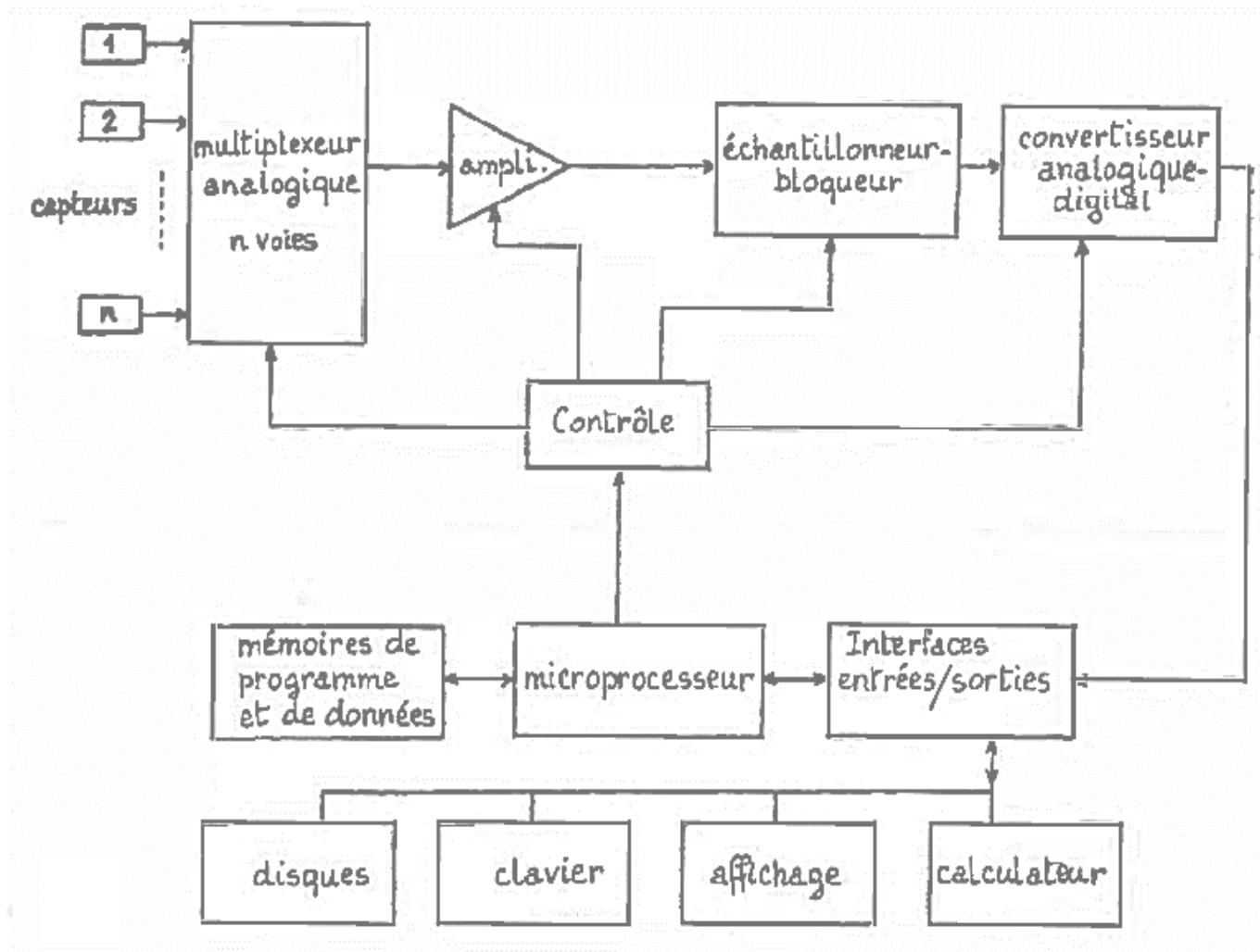
Une chaîne de mesure, c'est l'ensemble des dispositifs qui permettent la détermination précise de la valeur du mesurande dans les meilleures conditions.

À la sortie de la chaîne, le signal électrique qu'elle a traité est converti sous une forme qui rend possible la lecture directe de la valeur cherchée du mesurande :

- ✓ déviation d'un appareil à cadre mobile ;
- ✓ enregistrement analogique graphique ou oscillographique ;
- ✓ affichage ou impression d'un nombre ;



Synoptique d'une chaîne de mesure





Caractéristiques métrologiques

Erreur de mesure, sensibilité, rapidité, discrétion

Les erreurs de mesure

Les seuls mesurandes dont la valeur est parfaitement connue sont les grandeurs étalons puisque leur valeur est fixée par convention.

La valeur de tout autre mesurande ne peut être connue qu'après traitement par une chaîne de mesure. C'est la valeur vraie du mesurande qui détermine l'excitation du capteur, mais l'expérimentateur n'a accès qu'à la réponse globale de la chaîne de mesure : cette réponse, exprimée en unités du mesurande, est la valeur mesurée.



L'écart entre valeur mesurée et valeur vraie est l'erreur de mesure

Les erreurs systématiques

Pour une valeur donnée du mesurande, une erreur systématique est soit constante, soit à variation lente par rapport à la durée de mesure : elle introduit donc un décalage constant entre valeur vraie et valeur mesurée.

Les erreurs systématiques ont généralement pour cause une connaissance erronée ou incomplète de l'installation de mesure ou sa mauvaise utilisation.

Les erreurs accidentelles

L'apparition de ces erreurs comme leur amplitude et leur signe sont considérés comme aléatoires. Certaines des causes peuvent être connues mais les valeurs des erreurs qu'elles entraînent au moment de l'expérience sont inconnues.

La sensibilité

La sensibilité S est définie, autour d'une valeur m_i constante du mesurande, par le rapport de la variation Δs de la grandeur de sortie à la variation Δm du mesurande qui lui a donné naissance :

$$S = \left(\frac{\Delta s}{\Delta m} \right)_{m=m_i}$$

L'unité en laquelle est exprimée S résulte du principe qui est à la base du capteur et des ordres de grandeur mis en jeu :

- $\Omega/^{\circ}\text{C}$ pour une résistance thermométrique ;
- $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ pour un couple thermoélectrique

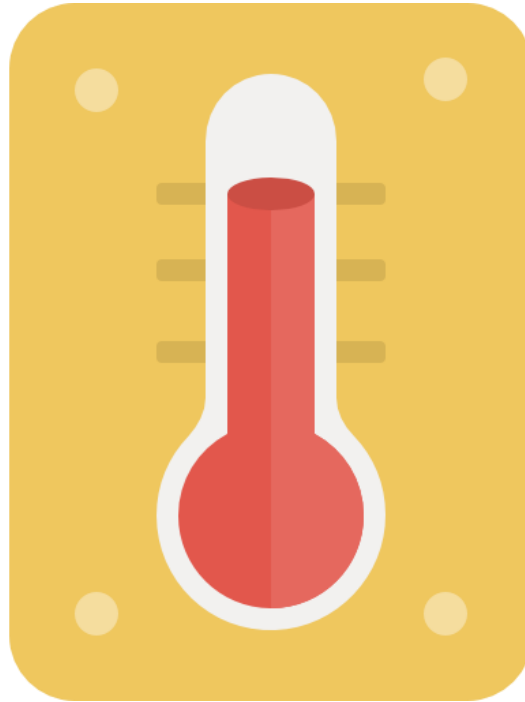
Rapidité & Temps de réponse

La rapidité est la spécification d'un capteur qui permet d'apprécier de quelle façon la grandeur de sortie suit dans le temps les variations du mesurande.

La grandeur utilisée pour définir quantitativement la rapidité est *le temps de réponse* : c'est l'intervalle de temps qui s'écoule après une variation brusque (échelon) du mesurande jusqu'à ce que la variation de la sortie du capteur ne diffère plus de sa valeur finale d'un écart supérieur à une limite ε conventionnellement fixée.

Discrétion ou finesse

C'est une spécification qui permet à l'utilisateur d'estimer l'influence que la présence du capteur et de ses liaisons peut avoir sur la valeur du mesurande. La discrétion est définie par la valeur d'une grandeur physique qui dépend de la nature du capteur et qui détermine sa réaction sur le mesurande.



Les conditionneurs des capteurs

Montage potentiométrique, ponts

Principaux types de conditionneurs

- ✓ Transfert l'information liée aux variations d'impédance du capteur, soit sur l'amplitude du signal de mesure

$$v_m = e_s \times F(Z_k, Z_c)$$

- ✓ Transfert l'information sur la fréquence du signal

$$f_m = G(Z_k, Z_c)$$

Qualité d'un conditionneur

(Sensibilité et linéarité)

À la variation Δm du mesurande correspond une variation ΔZ_c de l'impédance du capteur qui selon le type de conditionneur entraîne soit une variation de l'amplitude (1) de la tension de mesure soit de sa fréquence (2).

1

$$S_a = \frac{\Delta v_m}{\Delta m} \text{ soit } S_a = \frac{\Delta v_m}{\Delta Z_c} \times \frac{\Delta Z_c}{\Delta m}$$

2

$$S_a = \frac{\Delta f_m}{\Delta m} \text{ soit } S_a = \frac{\Delta f_m}{\Delta Z_c} \times \frac{\Delta Z_c}{\Delta m}$$



$$S = \frac{\Delta Z_c}{\Delta m} \quad \text{Sensibilité du capteur}$$

Qualité d'un conditionneur

(Sensibilité et linéarité)

Fonctionnement push pull

$$v_m = e_s \times F(R_c, R_k) \quad dv_m = \left(\sum_k \frac{\partial v_m}{\partial R_k} \times \frac{\partial R_k}{\partial m} + \frac{\partial v_m}{\partial R_c} \times \frac{\partial R_c}{\partial m} \right) \times dm$$

L'ensemble est linéaire à condition que :

$$\sum_k \frac{\partial v_m}{\partial R_k} \times \frac{\partial R_k}{\partial m} + \frac{\partial v_m}{\partial R_c} \times \frac{\partial R_c}{\partial m} = \text{constante}$$

Dans le cas simple d'un potentiomètre constitué d'une résistance R_1 et d'un

capteur résistif R_c on a : $v_m = e_s \times \frac{R_c}{R_c + R_1}$

$$\frac{\partial v_m}{\partial R_c} = e_s \times \frac{R_1}{(R_c + R_1)^2} \quad S_a = \frac{e_s}{(R_c + R_1)^2} \left(R_1 \frac{dR_c}{dm} - R_c \frac{dR_1}{dm} \right)$$

Qualité d'un conditionneur

(Sensibilité et linéarité)

Compensation des grandeurs d'influence

On considère à nouveau le cas d'un conditionneur et d'un capteur résistifs :

$$v_m = e_s \times F(R_c, R_k)$$

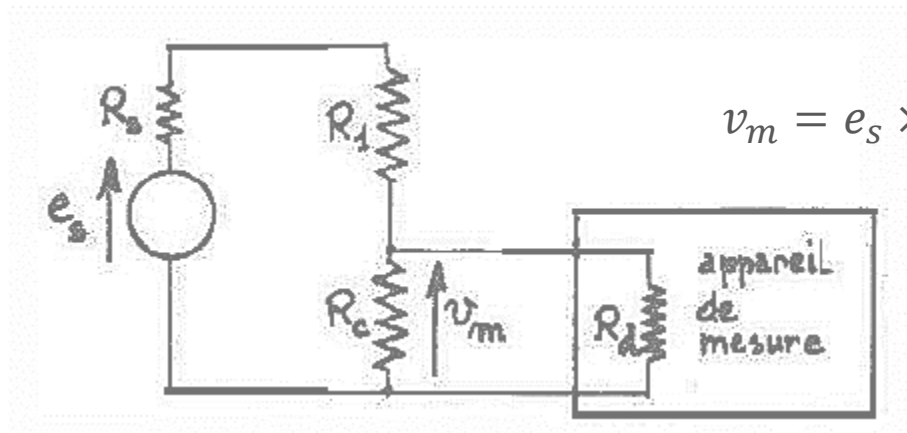
La grandeur d'influence, de valeur g , pouvant affecter aussi bien certains composants du conditionneur que le capteur lui-même, une variation dg entraîne une variation dv_m de la tension de mesure :

$$dv_m = \left(\sum_k \frac{\partial v_m}{\partial R_k} \times \frac{\partial R_k}{\partial g} + \frac{\partial v_m}{\partial R_c} \times \frac{\partial R_c}{\partial g} \right) \times dg$$

Les évolutions de la grandeur d'influence n'ont aucun effet sur la tension de mesure lorsqu'est satisfaite la condition :

$$\sum_k \frac{\partial v_m}{\partial R_k} \times \frac{\partial R_k}{\partial g} + \frac{\partial v_m}{\partial R_c} \times \frac{\partial R_c}{\partial g} = 0$$

Montage potentiométrique (1/2)



$$v_m = e_s \times \frac{R_c R_d}{R_c(R_s + R_1) + R_d(R_s + R_1 + R_c)}$$

$$R_d \gg R_c$$

$$v_m = e_s \times \frac{R_c}{R_s + R_1 + R_c}$$

La tension v_m n'est pas une fonction linéaire de R_c

Montage potentiométrique (2/2)

Linéarisation (fonctionnement en « petit signaux »)

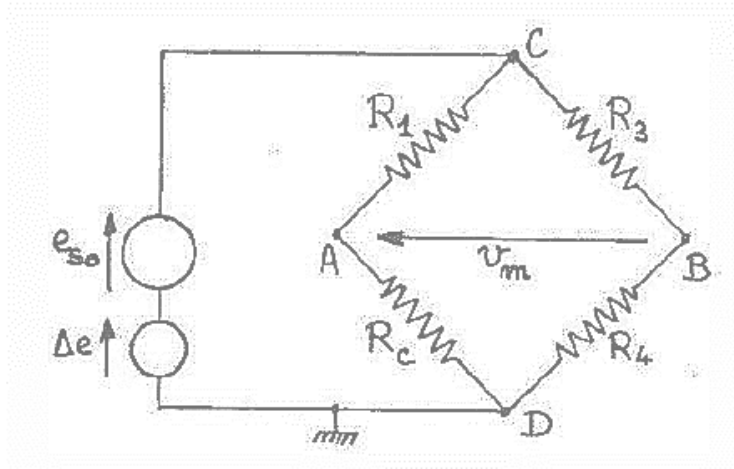
La résistance du capteur variant de R_{C0} à $R_{C0} + \Delta R_c$, la tension v_m passe de v_{m0} à $v_{m0} + \Delta v_m$:

$$v_{m0} + \Delta v_m = e_s \times \frac{R_{C0} + \Delta R_c}{R_s + R_1 + R_{C0}} \times \frac{1}{1 + \frac{R_c}{R_s + R_1 + R_{C0}}}$$

La sensibilité du conditionneur $\Delta v_m / \Delta R_c$ est maximale si l'on choisit $R_s + R_1 = R_{C0}$; dans ce cas :

$$\Delta v_m = \frac{e_s}{4} \times \frac{\Delta R_c}{R_{C0}}$$

Les ponts



$$v_A = e_{s0} \times \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{R_1 + R_{c0} + \Delta R_c} + \Delta e \times \frac{R_{c0} + \Delta R_c}{R_1 + R_{c0} + \Delta R_c}$$

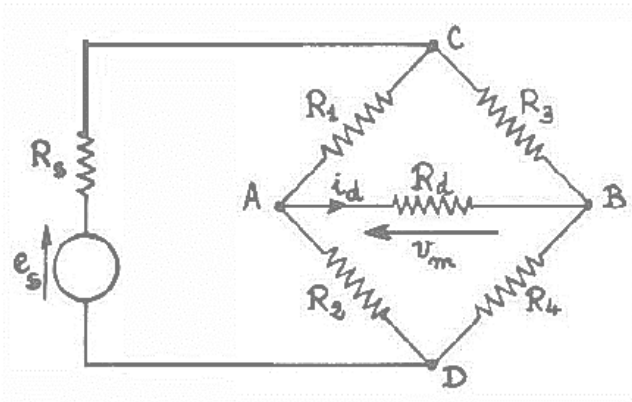
$$v_B = e_{s0} \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} + \Delta e \times \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$\frac{R_{c0}}{R_1 + R_{c0}} = \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

A l'équilibre du pont

$$v_m = e_{s0} \left(1 + \frac{\Delta e}{e_{s0}} \right) \times \frac{R_1 \times \Delta R_c}{(R_1 + R_{c0} + \Delta R_c)(R_1 + R_{c0})}$$

Pont de Wheatstone



$$i_d = e_s \times \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{[R_1 R_4 (R_2 + R_3) + R_2 R_3 (R_1 + R_4) + R_s (R_1 + R_3) (R_2 + R_4) + R_d (R_1 + R_2) (R_3 + R_4) + R_s R_d (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)]}$$

Tension de déséquilibre du pont

$$R_d \gg R_1, R_2, R_3, R_4$$

$$R_s \ll R_1, R_2, R_3, R_4$$

$$v_m = e_s \times \frac{R_0 (\Delta R_2 - \Delta R_1 + \Delta R_3 - \Delta R_4) + \Delta R_2 \Delta R_3 - \Delta R_1 \Delta R_4}{4R_0^2 + 2R_0 (\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 + \Delta R_4) + (\Delta R_1 + \Delta R_2) (\Delta R_3 + \Delta R_4)}$$



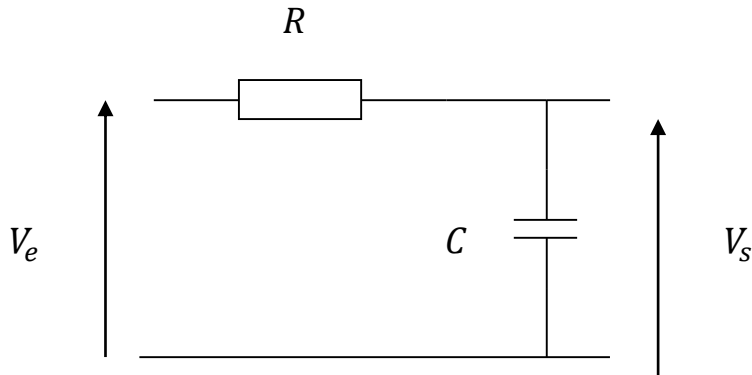
Les conditionneurs du signal

Filtres, amplificateurs

Les filtres analogiques

L'opération de filtrage consiste à tamiser un signal au niveau fréquentiel afin d'en extraire la composante utile ; en bloquant toutes les composantes fréquentielles qui ne sont pas porteuses d'intérêt dans l'application que l'on désire réaliser.

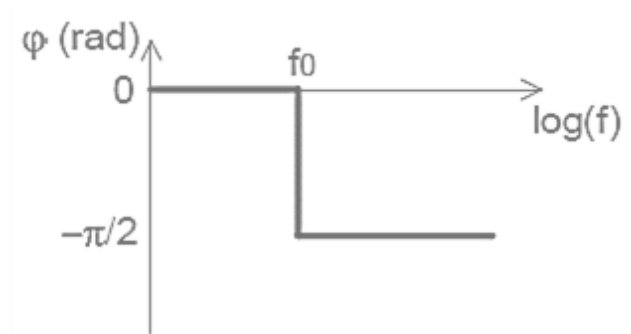
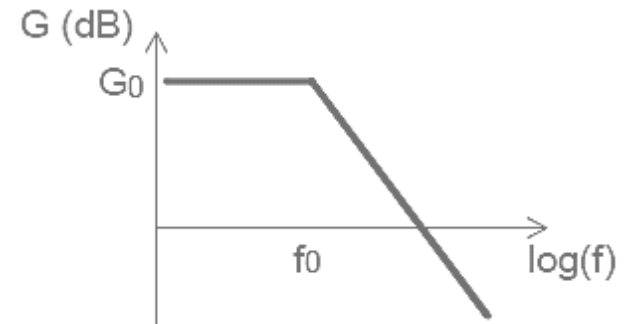
Filtre passif passe-bas (RC)



$$T(j\omega) = \frac{V_e}{V_s} = \frac{1}{1 + jRC\omega}$$

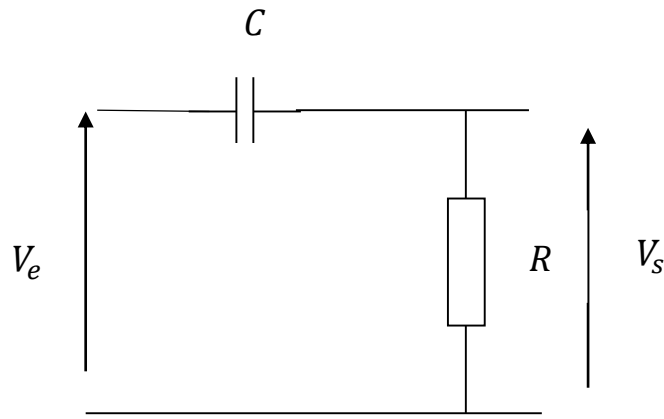
$$T = \frac{|T_0|}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}$$

$$\varphi = -\arctan\left(\frac{f}{f_0}\right)$$



$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} : \text{Fréquence de coupure}$$

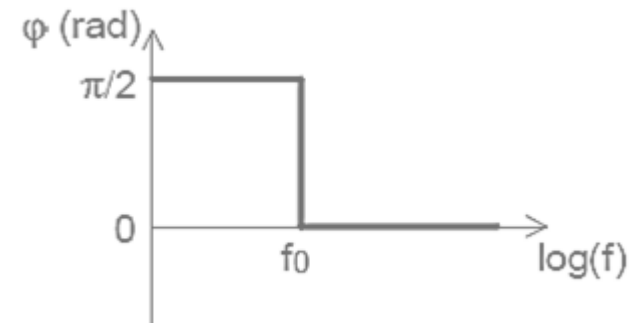
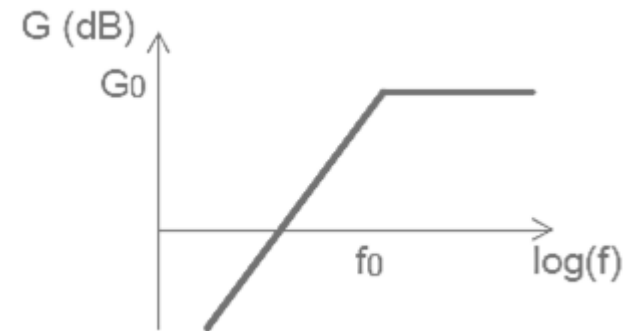
Filtre passif passe-haut (RC)



$$T(j\omega) = \frac{V_e}{V_s} = \frac{jRc\omega}{1 + jRc\omega}$$

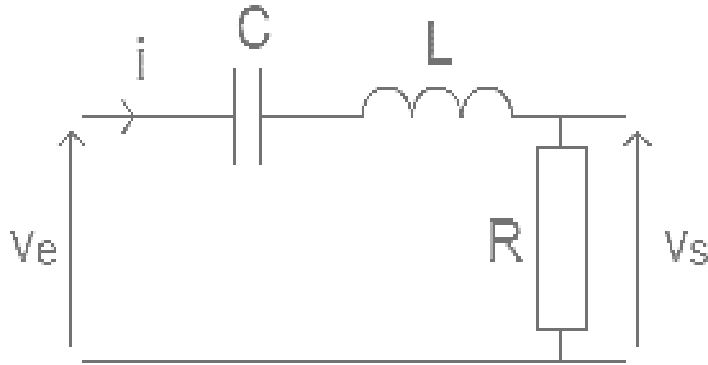
$$T = \frac{|T_0|}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{f}{f_0}\right)$$



$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} : \text{Fréquence de coupure}$$

Filtre passif passe bande (RLC) 1/3

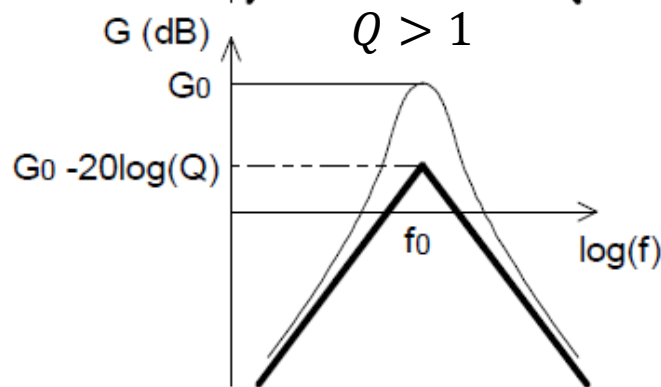
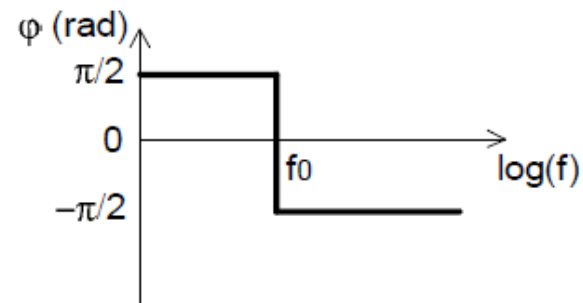
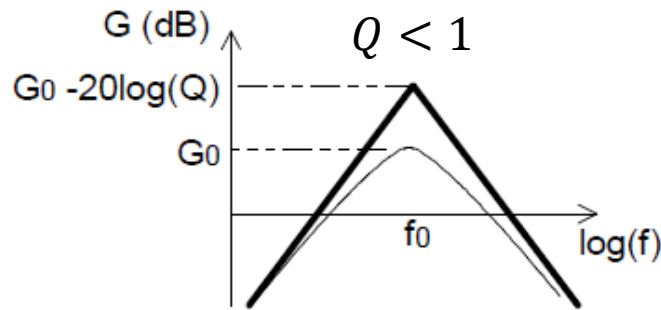


$$T(j\omega) = \frac{T_0 \times 2jm \frac{f}{f_0}}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + 2jm \frac{f}{f_0}} \text{ avec : } m = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}; f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$T(j\omega) = \frac{T_0}{1 + jQ \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)} \text{ avec } Q = \frac{1}{2m}$$

Filtre passif passe bande (RLC) ^{2/3}

$$T = \frac{|T_0|}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^2}} \quad ; \quad \varphi = -\arctan \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)$$



Filtre passif passe bande (RLC) 3/3

Fréquence de coupure

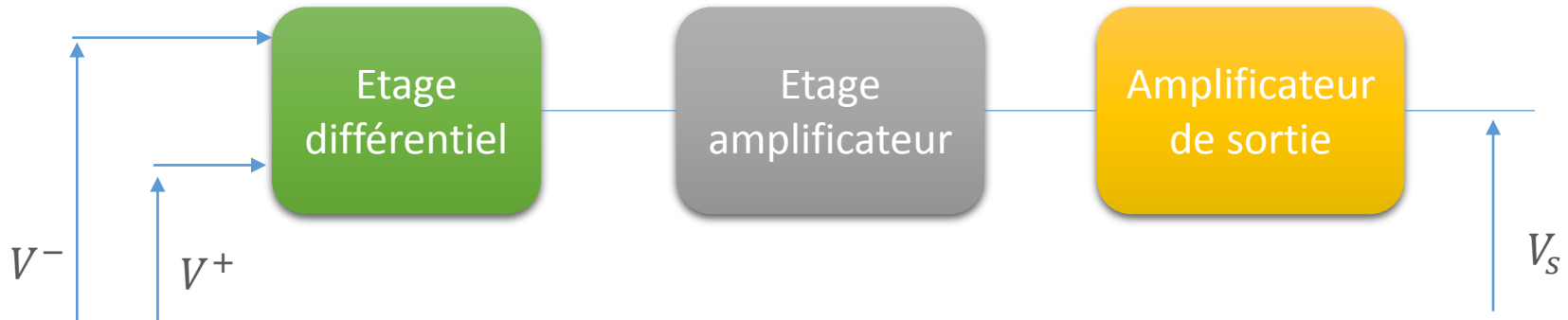
$$T = \frac{T_0}{\sqrt{2}} \text{ donc : } Q^2 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^2 = 1 \qquad Q \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) = \pm 1$$

$$f_{cb} = \frac{f_0}{2Q} \left(-1 + \sqrt{1 + 4Q^2} \right)$$

$$f_{ch} = \frac{f_0}{2Q} \left(1 + \sqrt{1 + 4Q^2} \right)$$

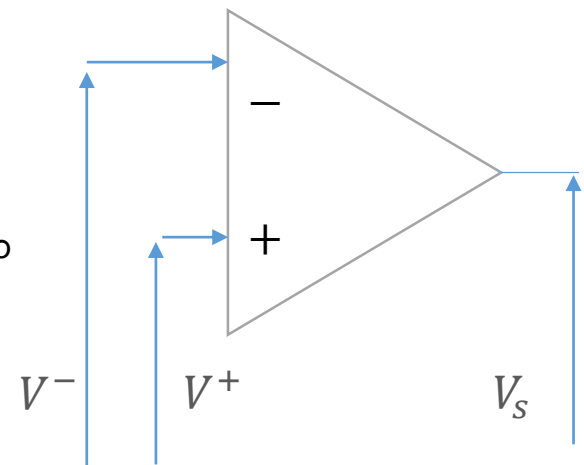
$$BP = f_{ch} - f_{cb} = \frac{f_0}{Q} \quad (\text{Bande passante})$$

Les amplificateurs



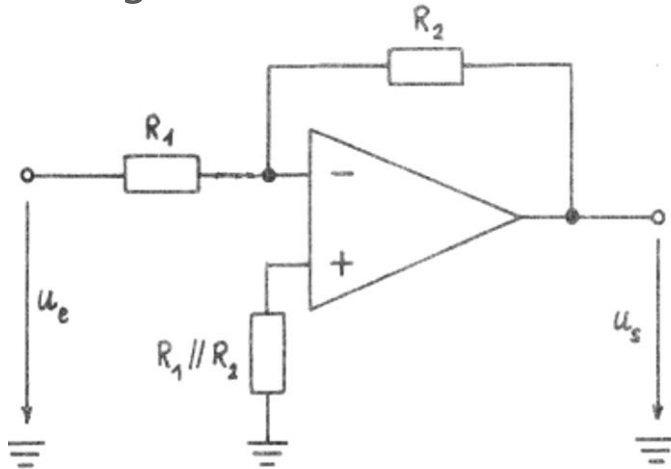
L'amplificateur opérationnel considéré comme idéal se caractérise par :

- un gain en tension différentiel infini $A_D = \infty$
- une très grande impédance d'entrée infinie $Z_E = \infty$
- une impédance de sortie nulle $Z_S = 0$
- une bande passante infinie.



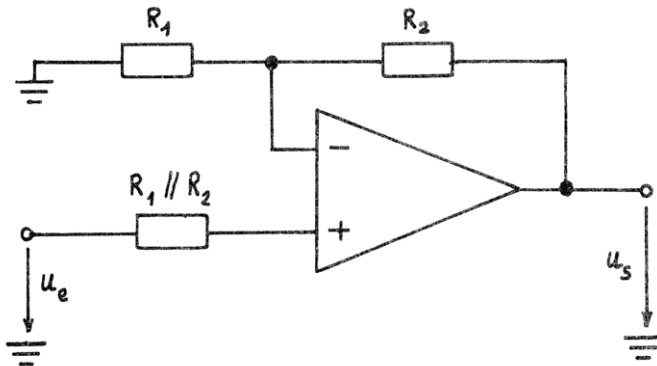
Montage à AOP (1/2)

Montage inverseur



$$A = -\frac{R_2}{R_1}$$

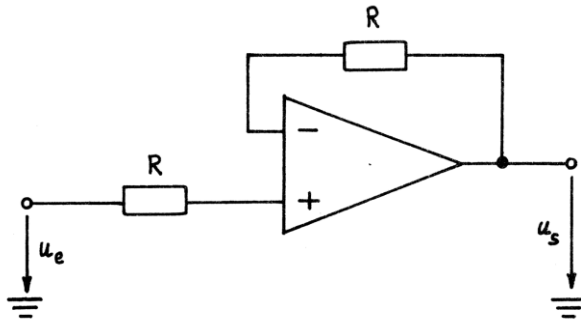
Montage non inverseur



$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

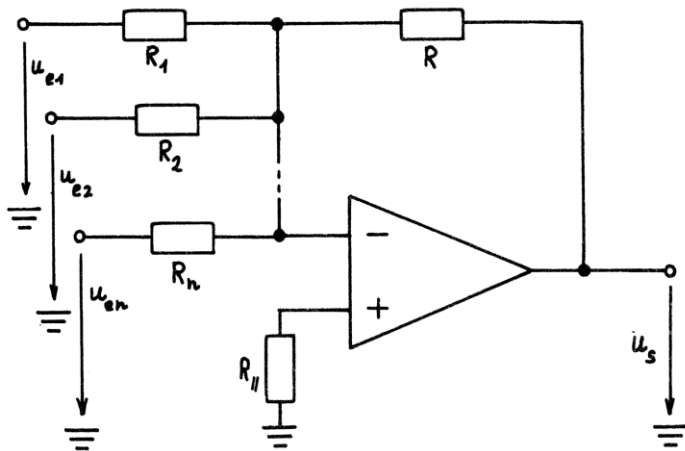
Montage à AOP (2/2)

Montage suiveur



$$A = 1$$

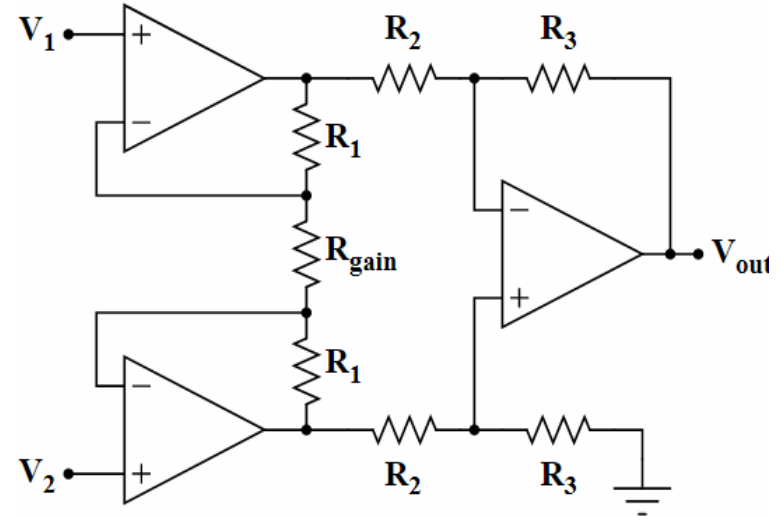
Montage sommateur inverseur



$$u_s = -R \sum_{i=1}^n \frac{u_{ei}}{R_i}$$

Amplificateur d'instrumentation

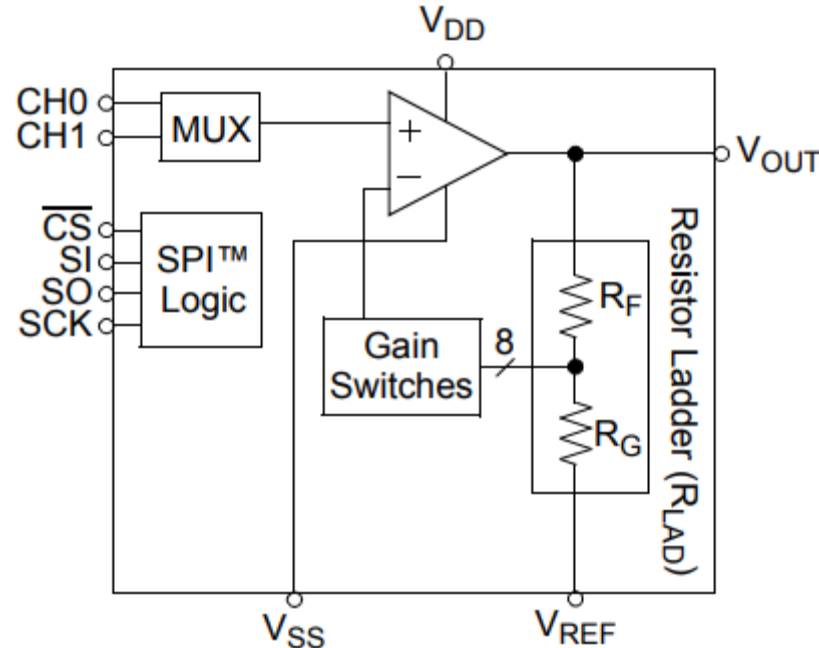
Les amplificateurs d'instrumentations sont des amplificateurs différentiels qui présentent l'avantage d'avoir une impédance d'entrée très grande. Ils sont conçus à partir de trois amplificateurs opérationnels



Compte tenu de la haute précision requise par les résistances utilisées dans ce montage, il est recommandé de ne pas en réaliser soi-même ; mais plutôt d'acheter directement un circuit intégré monolithique d'instrumentation

Amplificateur à gain programmable

Le gain des amplificateurs opérationnels est normalement fixé par 2 résistances externes. Pour obtenir une amplification variable, on a recours à des multiplexeurs ajustables numériquement qui commutent les résistances déterminant le gain.



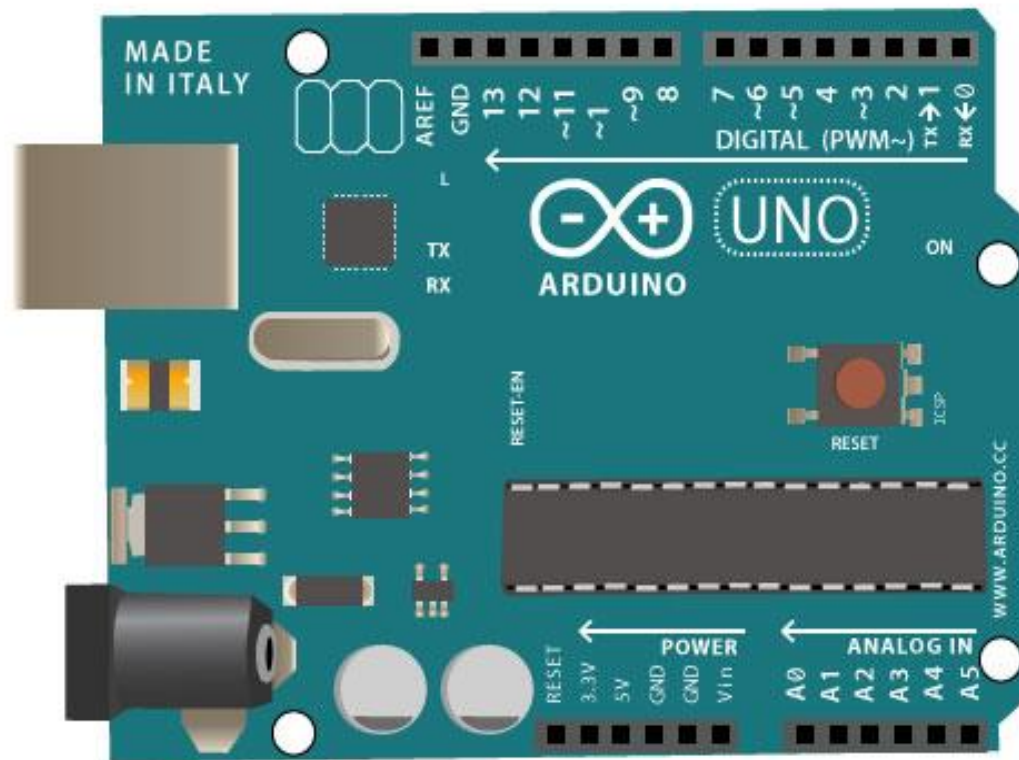


Arduino

Présentation du microcontrôleur

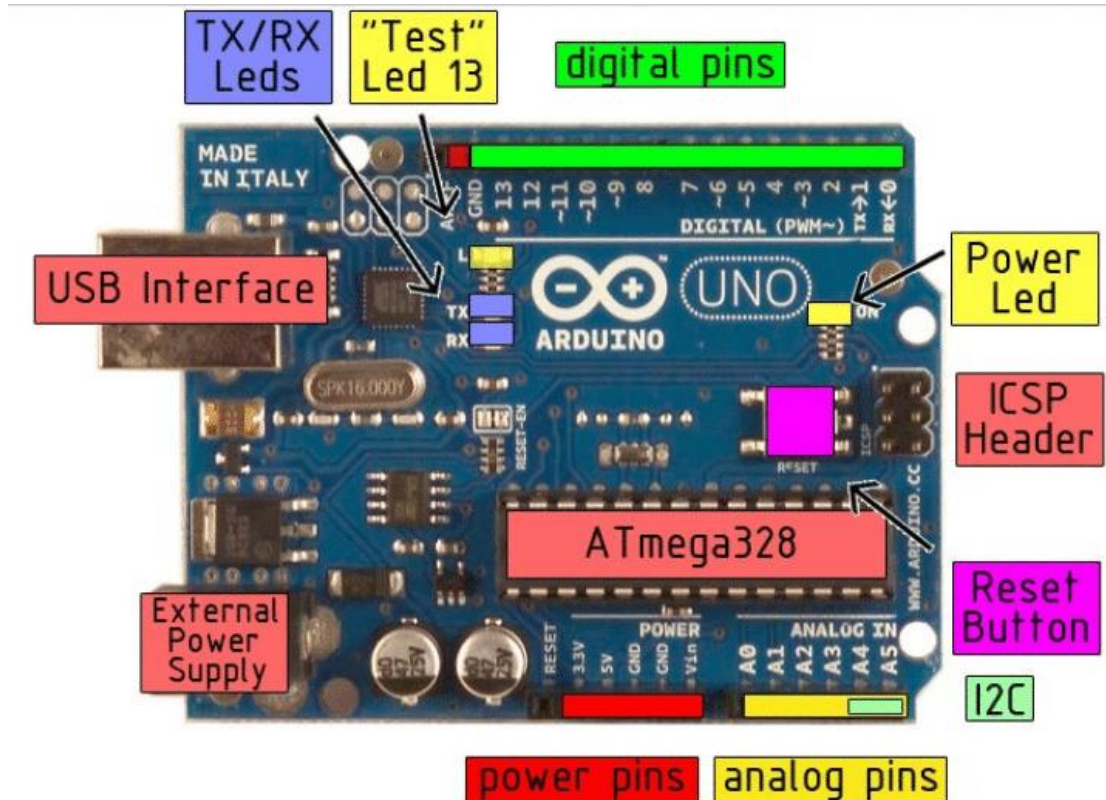
Arduino UNO R3 (1/2)

Présentation



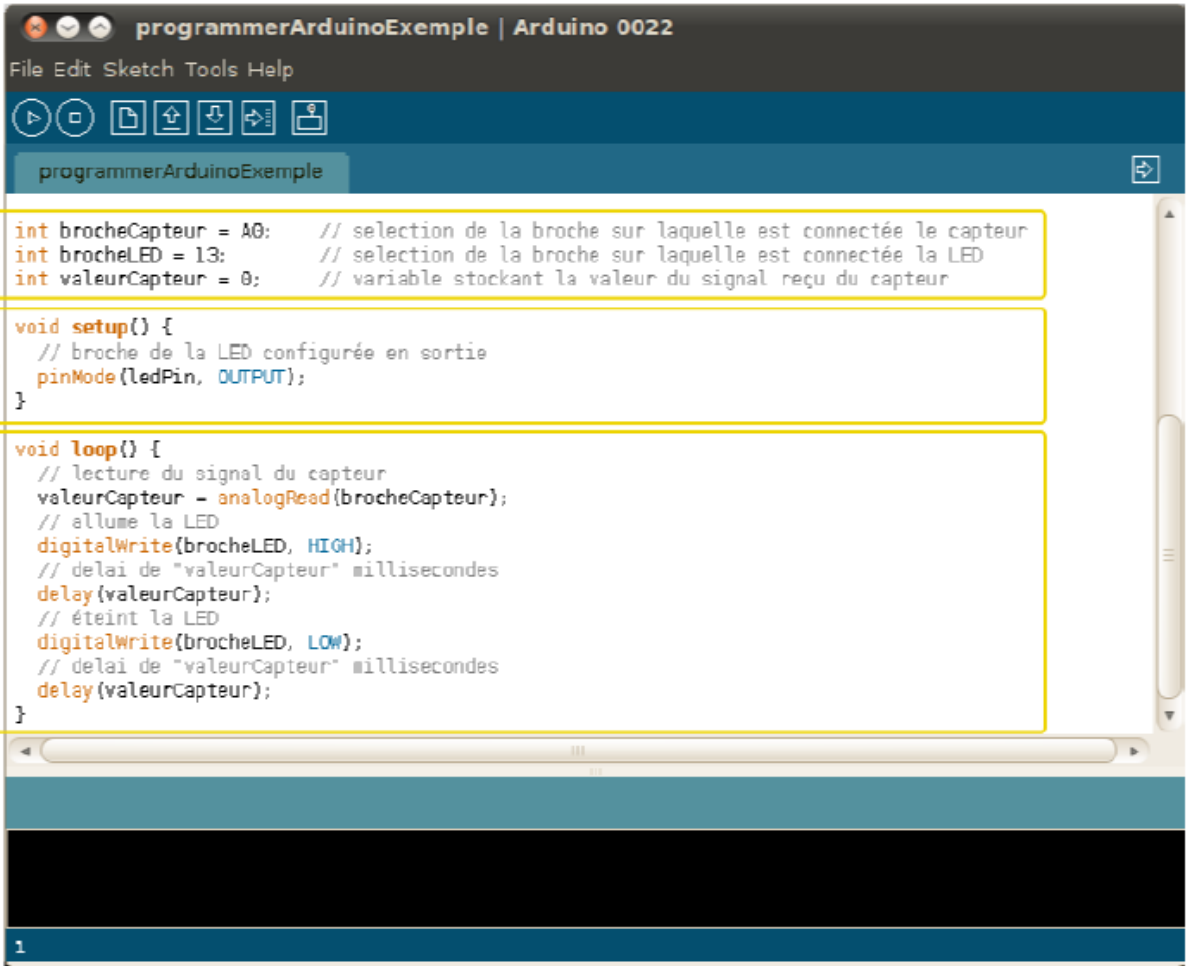
Arduino UNO R3 (2/2)

Description



Langage Arduino

Structure d'un sketch



The screenshot shows the Arduino IDE interface with a sketch named "programmerArduinoExemple" open. The code is as follows:

```
int brocheCapteur = A0; // selection de la broche sur laquelle est connectée le capteur
int brocheLED = 13; // selection de la broche sur laquelle est connectée la LED
int valeurCapteur = 0; // variable stockant la valeur du signal reçu du capteur

void setup() {
  // broche de la LED configurée en sortie
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
}

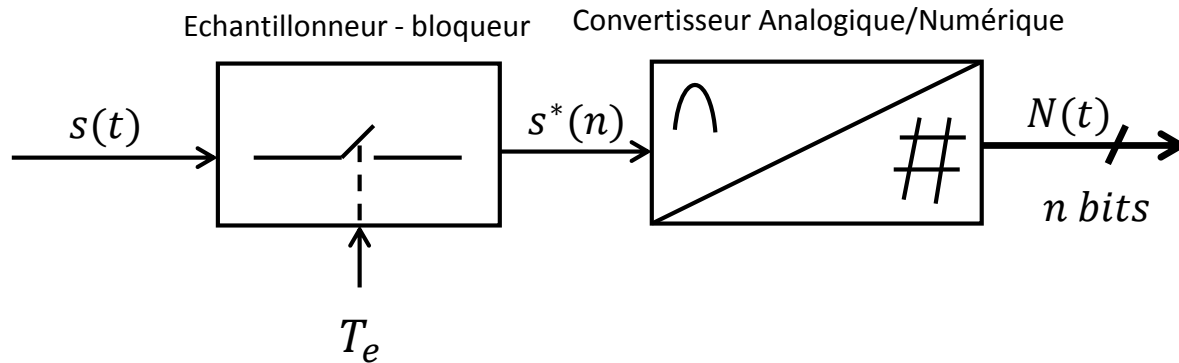
void loop() {
  // lecture du signal du capteur
  valeurCapteur = analogRead(brocheCapteur);
  // allume la LED
  digitalWrite(brocheLED, HIGH);
  // delai de "valeurCapteur" millisecondes
  delay(valeurCapteur);
  // éteint la LED
  digitalWrite(brocheLED, LOW);
  // delai de "valeurCapteur" millisecondes
  delay(valeurCapteur);
}
```

Three yellow boxes with numbers 1, 2, and 3 highlight the structure of the sketch:

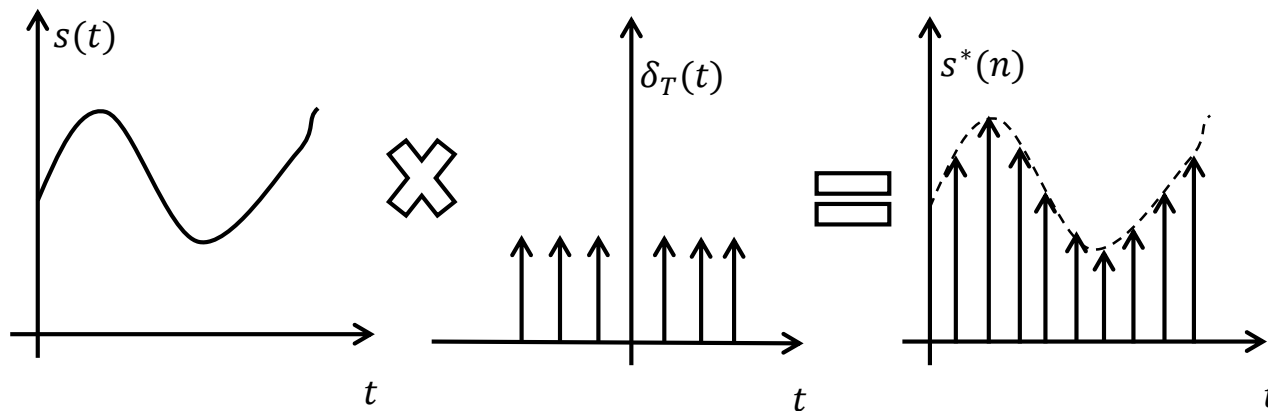
- 1. Variable declarations: `int brocheCapteur = A0;`, `int brocheLED = 13;`, and `int valeurCapteur = 0;` with their respective comments.
- 2. The `void setup()` function, including the comment `// broche de la LED configurée en sortie` and the `pinMode(ledPin, OUTPUT);` call.
- 3. The `void loop()` function, including comments for reading the sensor, turning the LED on, delaying, turning the LED off, and delaying again.

The IDE interface includes a menu bar (File, Edit, Sketch, Tools, Help), a toolbar with icons for running, stopping, saving, and other functions, and a status bar at the bottom showing the line number 1.

La conversion Analogique/Numérique (1/3)



Echantillonnage



La conversion Analogique/Numérique (2/3)

Théorème de l'échantillonnage

Soit f_e la fréquence d'échantillonnage et f la plus grande fréquence contenue dans le signal. Pour que l'échantillonnage du signal soit correct, il faut que la fréquence d'échantillonnage f_e soit au moins le double de la plus grande fréquence f contenue dans le signal.

$$f_e > 2 * f \text{ avec } f_e = \frac{1}{T_e}$$

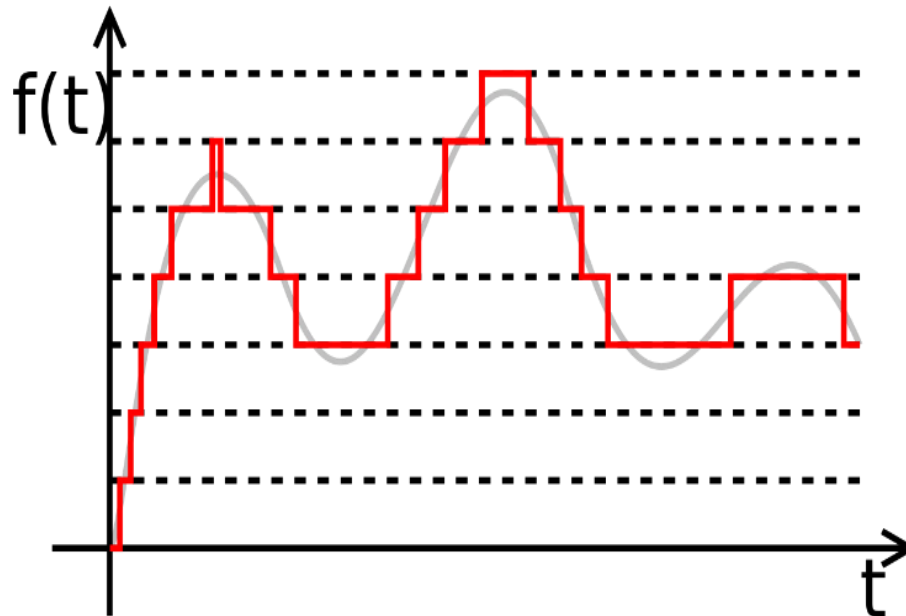
Le blocage

Le temps de la conversion d'un signal étant non nul, la valeur du signal est lue à un instant et maintenue pendant tout le temps de la conversion : c'est le blocage

La conversion Analogique/Numérique (3/3)

La quantification

La quantification est la conversion des valeurs analogiques en valeurs numériques sur n bits. Au cours de la quantification, il est possible qu'il y ait introduction de distorsions (Erreur de quantification ou erreur de gain)



Caractéristique d'un convertisseur A/N (1/2)

La résolution et le quantum

$$q = \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{2^n}; n = \text{Nombre de bits du convertisseur}$$

La résolution est le nombre de valeurs positives discrètes que le convertisseur est susceptible de fournir en sortie. Pour un convertisseur n bits, la résolution est de 2^n

Temps de conversion

Le temps de conversion est le temps nécessaire pour que le convertisseur effectue une conversion avec une précision donnée.

Caractéristique d'un convertisseur A/N (2/2)

La pleine échelle

La pleine échelle est la tension maximale qui est acceptable par le convertisseur (Full Scale Range : FSR). Pour les convertisseurs linéaires, on a :

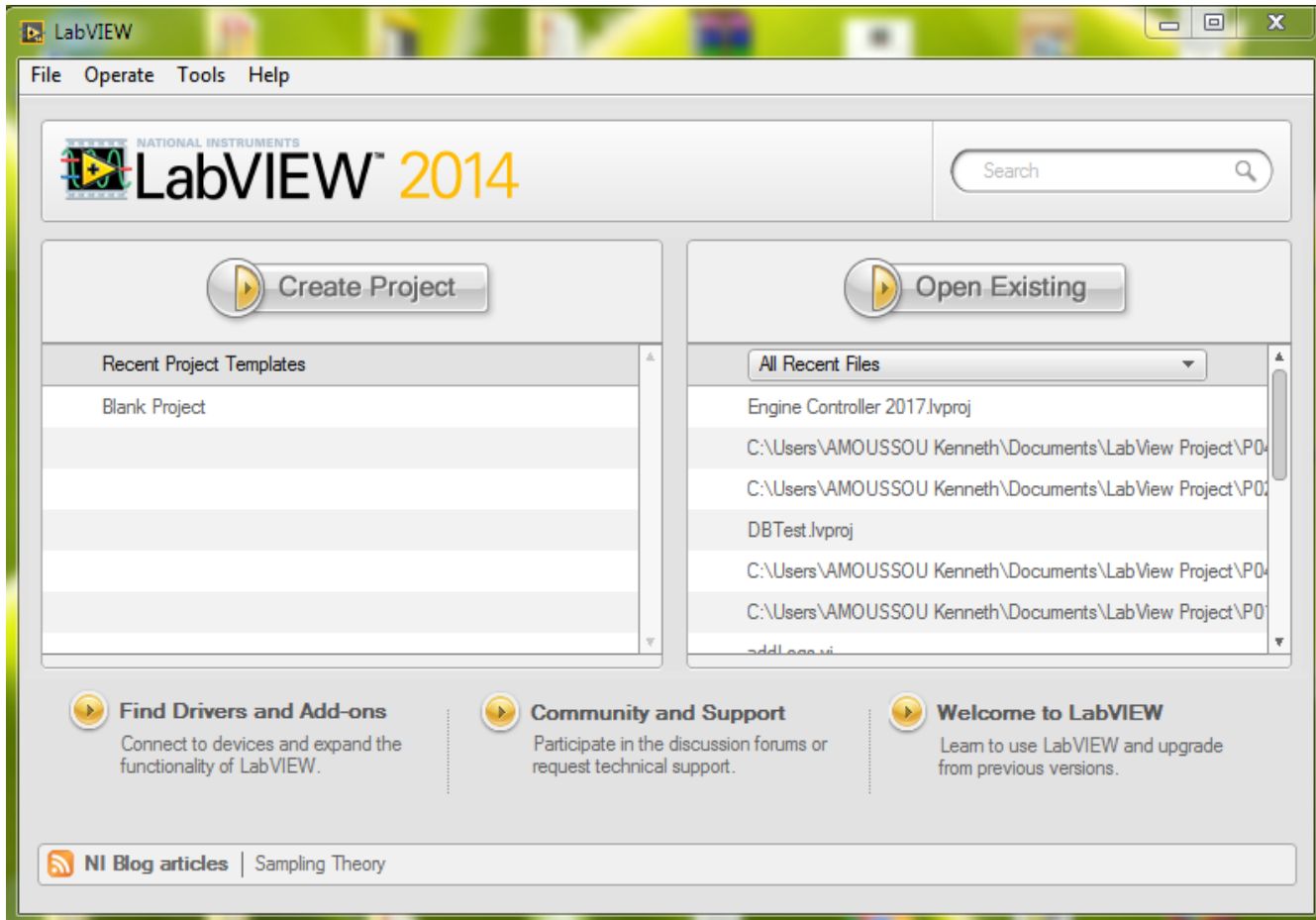
$$FSR = 2 * q * n$$



LabVIEW

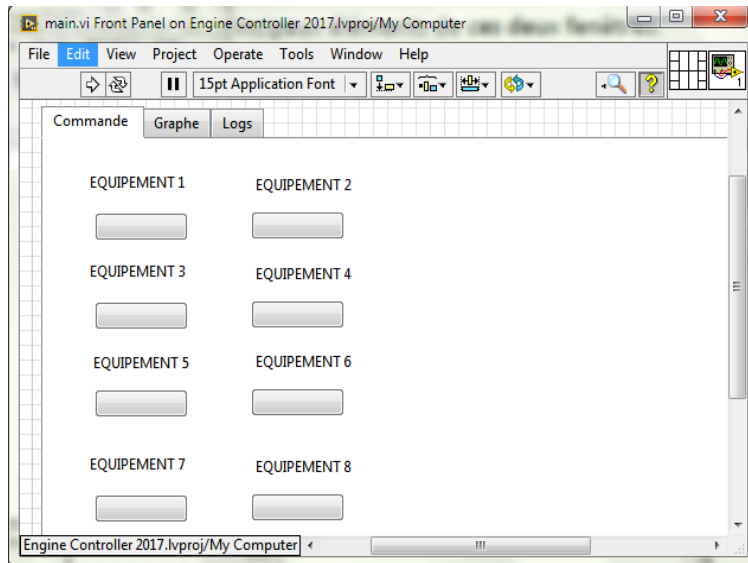
Initiation à la programmation graphique

Interface d'accueil

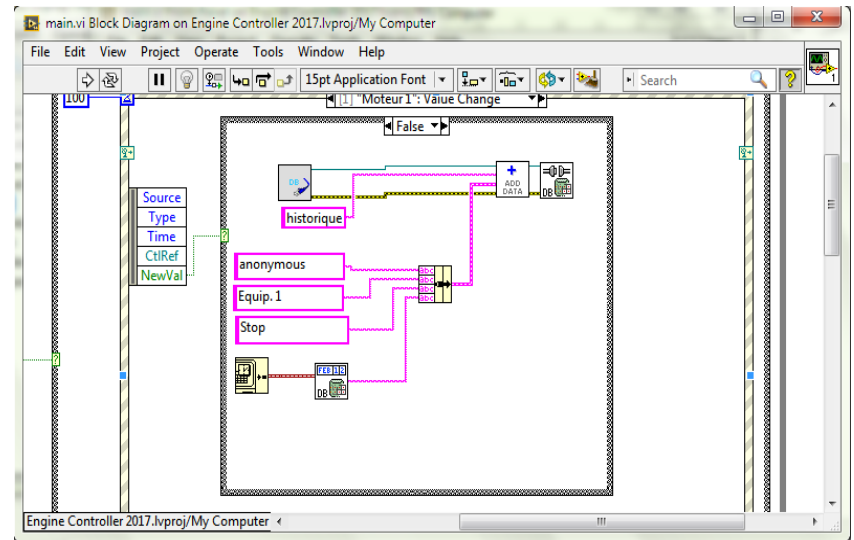


Les instruments virtuels

Face avant



Diagramme



La théorie des capteurs et applications

Quelques lien utiles

- <https://github.com/iut-lokossa/Arduino>
- <https://github.com/iut-lokossa/LabVIEW>
- <https://github.com/iut-lokossa/Electronics>

