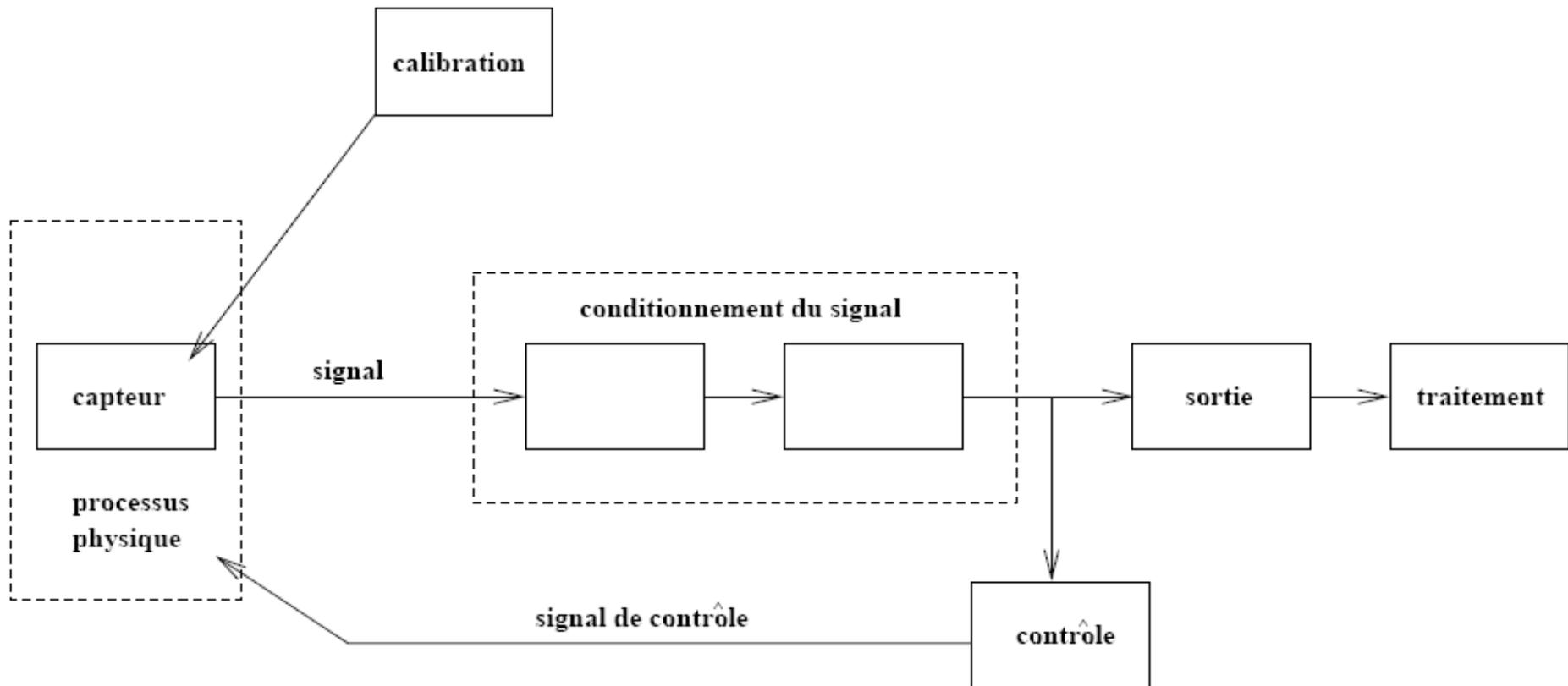


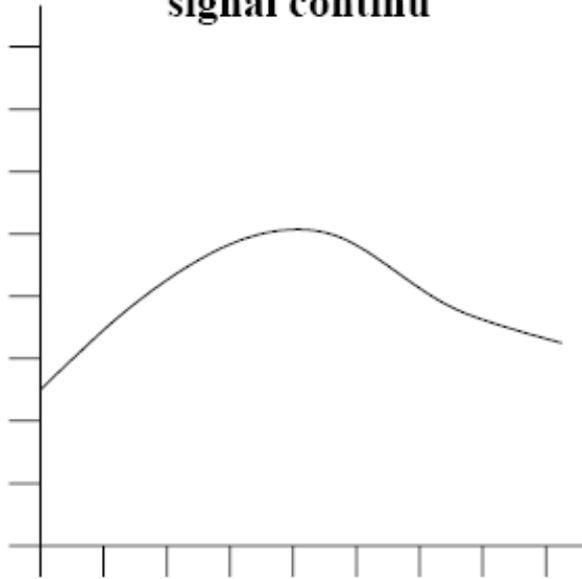
Systemes de mesure

Schéma général d'un système de mesure



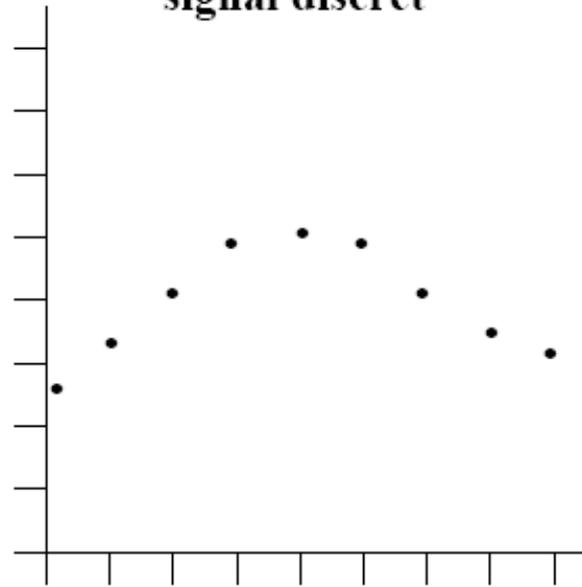
Signaux

signal continu



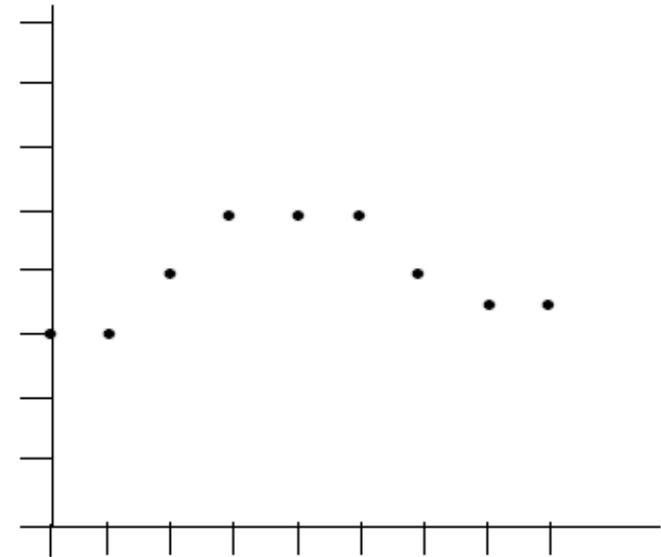
temps

signal discret

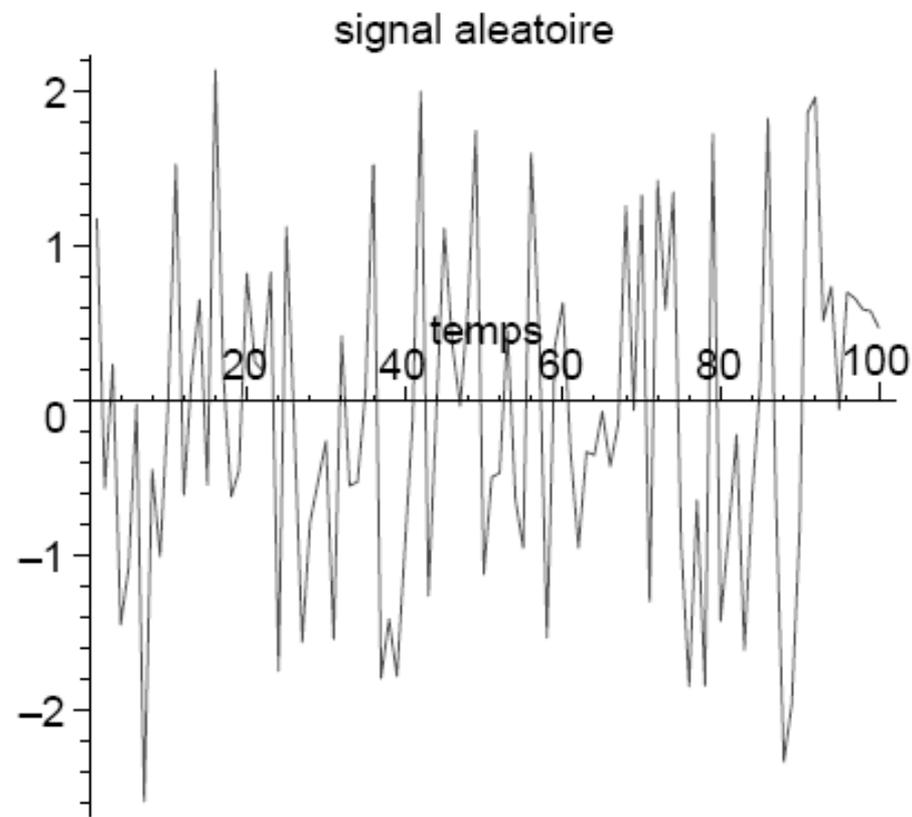
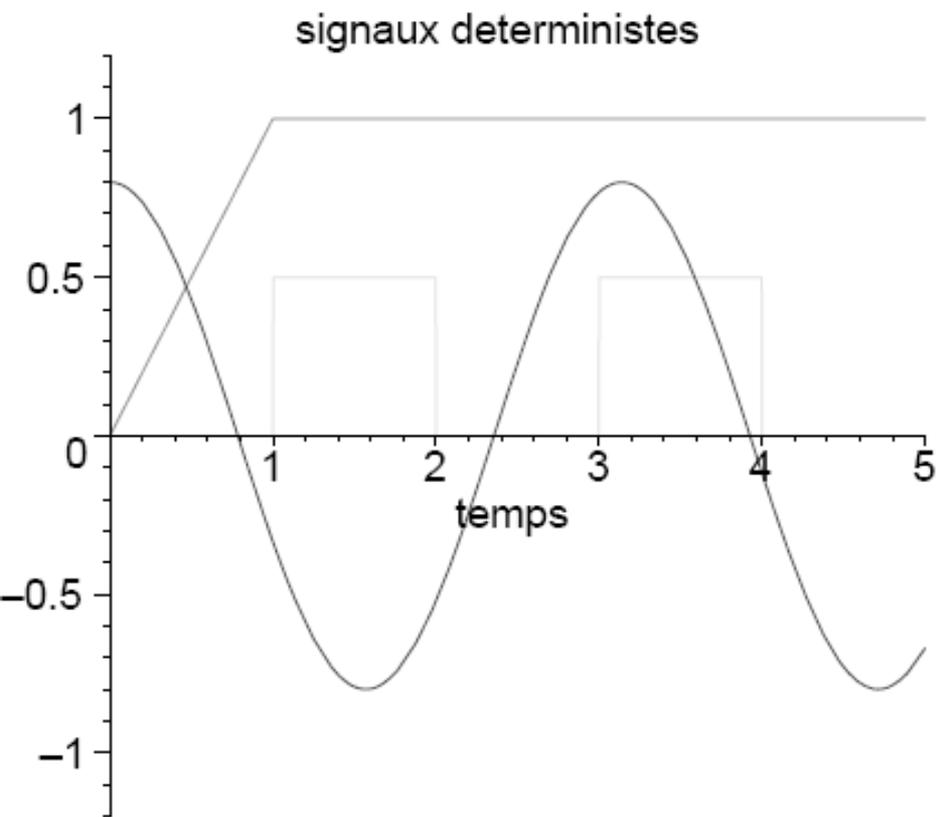


temps

signal numérique



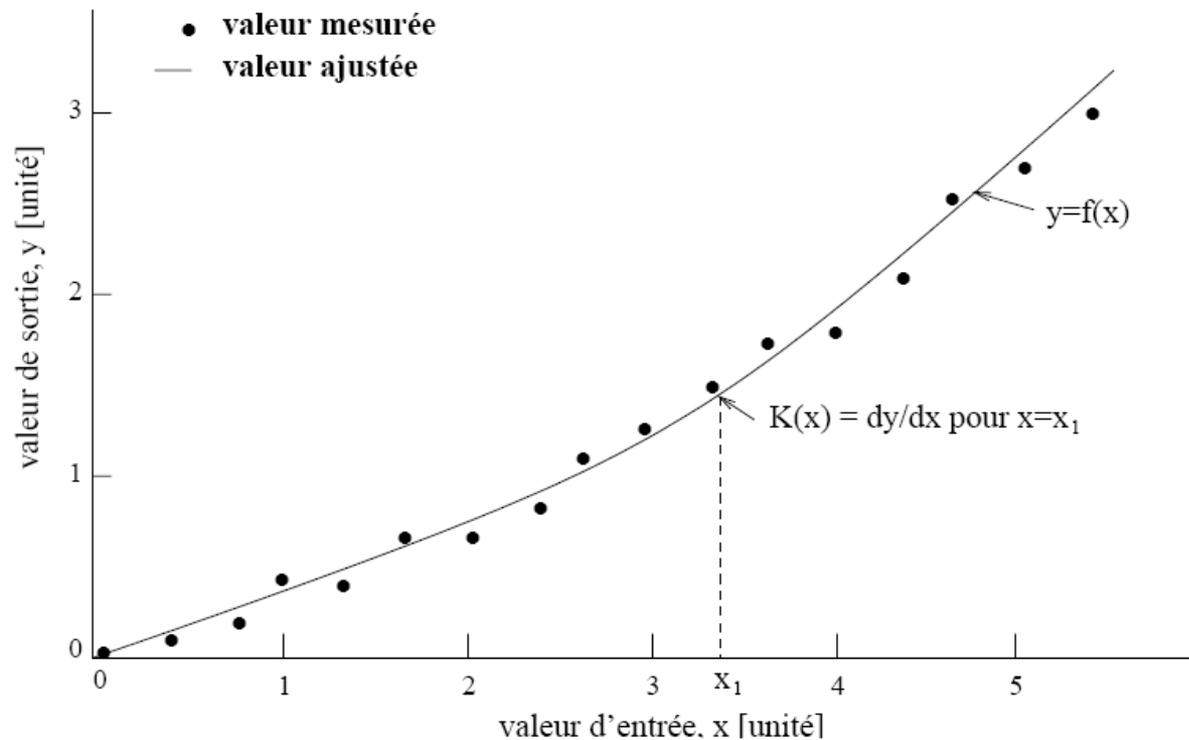
temps



On distinguera aussi les **signaux stationnaires** dont les propriétés n'évoluent pas en fonction du temps, des **signaux non-stationnaires** dont les propriétés sont variables en fonction du temps.

Étalonnage (calibration)

- Pour les capteurs instruments de mesure, l'étalonnage est un réglage ou une caractérisation de la réponse de l'appareil.
- Pour cela, généralement on utilise des grandeurs de référence ou étalons.
- L'étalonnage d'un instrument consiste à appliquer une valeur connue en entrée du système de mesure afin de vérifier que la sortie correspond bien à la valeur attendue.
- En entrant différentes valeurs connues on peut obtenir en sortie la courbe d'étalonnage.



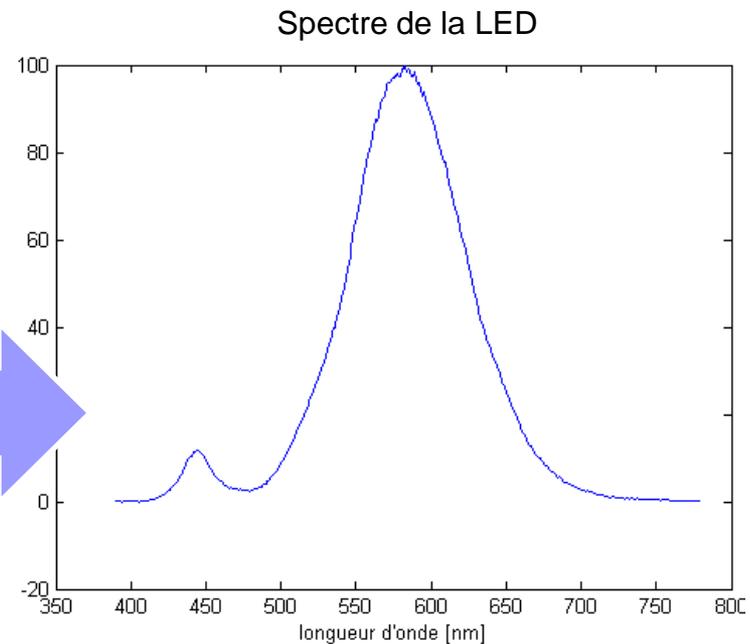
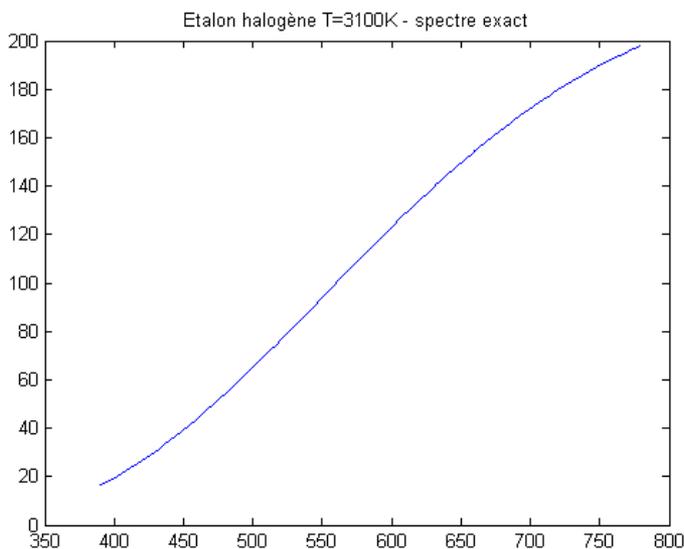
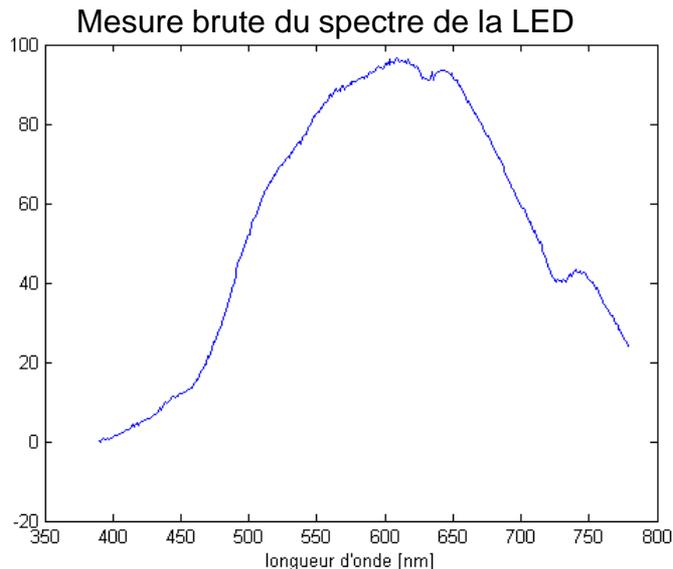
- La méthode générale consiste à utiliser l'appareil de mesure sur un étalon, et à vérifier que la mesure produite correspond bien à la valeur attendue ; si ce n'est pas le cas, on corrige le réglage de l'appareil. Par exemple, on pèse une masse étalon, et on corrige la position de l'aiguille pour que celle-ci indique la valeur correcte. C'est l'étalonnage dit à *un point*.
- Cependant, cela ne suffit pas toujours. L'appareil peut présenter :
 - Une dérive systématique: il indique systématiquement une valeur supérieure ou inférieure d'une quantité fixe ;
 - Une dérive de sensibilité: il indique systématiquement une valeur supérieure ou inférieure d'une proportion (d'un pourcentage) donné.
- Chaque mesure étant entachée d'erreur, y compris la mesure des étalons, on effectue en général plusieurs mesure du même étalon, ou bien on utilise plus d'étalons que nécessaire et l'on détermine la courbe d'étalonnage par régression (méthode des moindres carrés).

Correction numérique

- L'étalonnage est généralement effectué par le fabricant de l'appareil de mesure.
- De manière générale, un appareil de mesure transforme un paramètre physique en une donnée analogique (lecture sur un cadran, tracé d'un feutre sur un papier) ou un signal électrique, qui peut ensuite être converti en données numériques.
- De plus en plus sur les appareils modernes la correction suite à l'étalonnage n'est pas réglée sur l'instrument mais est fournie dans un fichier numérique.
- Cette correction est de fait effectuée numériquement par un microcontrôleur ou par l'ordinateur relié à l'instrument.

Exercice: étalonnage d'un spectromètre

- Calculer le *vrai* spectre d'une LED, à partir de la mesure brute d'un spectromètre.

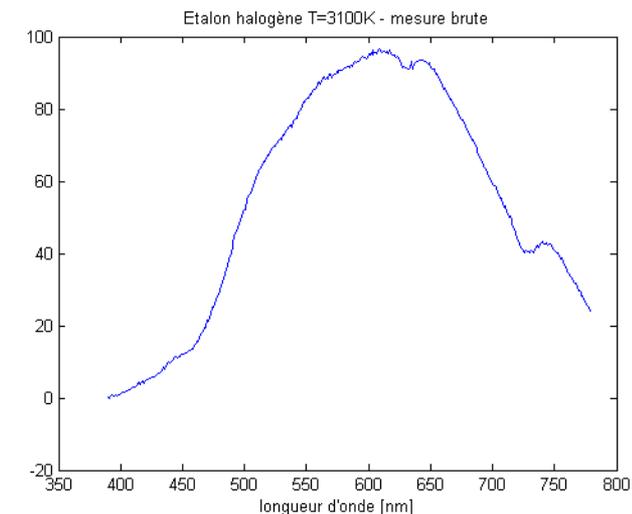
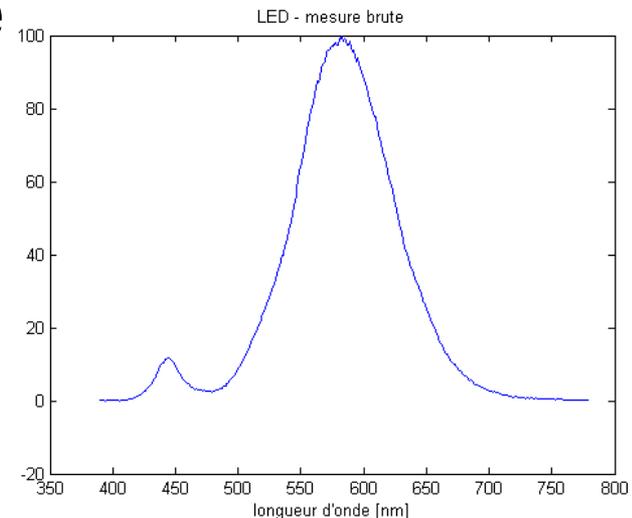


Télécharger une base Excel de cet exercice sur
http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/metrologie/exercices/spectrometre_base.xls

Etalonnage d'un spectromètre

Enoncé du problème

1. Un spectromètre mesure le spectre suivant d'une LED blanche:
2. En utilisant le même spectromètre pour mesurer la lumière d'une lampe à incandescence de température connue = 3100 K, assimilable à un corps noir (suivant la loi de Planck), on mesure le spectre suivant:
3. Calculer la fonction d'étalonnage du spectromètre et le *vrai* spectre de la LED.



Loi de Planck

(spectre d'émission d'un corps noir)

$$L = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

avec:

λ = longueur d'onde [m]

$c_1 = 3.74 \cdot 10^{-16}$ W m

$c_2 = 1.44 \cdot 10^{-2}$ m K

T = température du corps noir

Sensibilité

Connaissant la courbe d'étalonnage, on peut définir la sensibilité de l'instrument au voisinage d'une valeur d'entrée x_1 par la relation

$$K(x_i) = \frac{\partial y}{\partial x_i}$$

Cette grandeur permet de mesurer l'influence d'un changement de la valeur d'entrée sur la valeur de sortie.

Un bon instrument devra avoir une assez grande sensibilité.

Lorsque la sensibilité est constante la réponse de l'instrument est linéaire.

Les méthodes générales de mesure

- Placé devant une grandeur qu'il veut mesurer, l'expérimentateur a le choix entre plusieurs **méthodes et moyens** pour aboutir à l'expression précise de l'intensité de cette grandeur.
- Une chaîne de mesure est constituée du capteur (prélèvement du mesurande), d'un conditionneur (modification de la structure du signal délivré par le capteur), de filtres (réjection de certains signaux), d'un codeur (AN ou NA), mémoires, processeurs,....
- Les différentes méthodes de mesure peuvent être classées de plusieurs points de vue, parmi lesquels:
 1. la forme d'expression de la mesure: mesures analogiques et mesures numériques.
 2. la technique de mesure : mesures **par déviation**, mesures **par comparaison**, comptages)
 3. la référence origine de la mesure: mesures absolues et mesures différentielles)

Forme d'expression de la mesure

Mesures analogiques

- Dans les mesures analogiques, le signal qui circule dans la chaîne de mesure et porte l'information est lié au mesurande par une loi continue. Le récepteur placé en bout de chaîne provoquera par exemple le déplacement d'une aiguille. C'est seulement l'opération de lecture qui transformera cette indication analogique en un nombre. Le "codage" analogique peut porter sur de nombreux phénomènes.
- **Modulation d'amplitude** (l'amplitude du signal varie en fonction du mesurande)
- **Modulation de fréquence** (la fréquence varie en fonction du mesurande)
- **Modulation d'impulsions** (la durée de l'impulsion varie en fonction du mesurande)

Mesures numériques

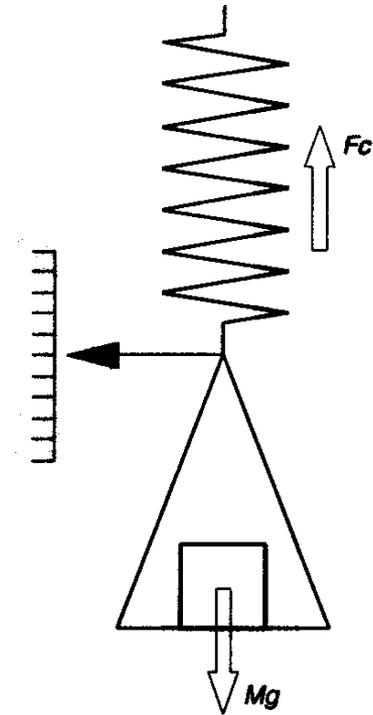
- L'opération de mesure se termine en général par l'obtention d'un nombre qu'il est plus facile à transmettre sans erreur et sans perte d'information qu'une grandeur analogique.
- Les moyens d'exprimer un nombre sont nombreux: code binaire, code de Gray (code réfléchi), etc.
- On utilise des codeurs pour transformer une donnée analogique en nombre codé. On peut utiliser par exemple un disque portant des pistes alternativement opaques et transparentes disposées suivant un codage binaire réfléchi, et comportant un couple émetteur-récepteur par piste. Les récepteurs éclairés varient suivant la position angulaire du disque. On trouve également des codeurs magnétiques.

Méthode de mesure par déviation

- C'est la méthode qui consiste à obtenir la **déviatiion** d'un système, d'une position d'équilibre qu'il occupait en l'absence de mesurande, à une nouvelle position d'équilibre qu'il occupe en présence du mesurande.
L'écart entre les deux positions fournit plus ou moins directement la mesure.
- Dans la méthode de **déviatiion ou d'élongation simple**, les deux positions sont des positions au sens géométrique du mot; elles ne mettent pas en jeu un équilibre particulier de force. Ainsi en est-il de la mesure d'une longueur au pied à coulisse, où l'opérateur déplace les palpeurs pour venir en contact entre eux (zéro), ou sur la pièce (mesure).
- Dans la méthode **d'élongation et d'équilibre spontané**, les positions d'équilibre sont le résultat d'une opposition entre deux forces égales.

Exemples

- Peson (balance) à ressorts
- Galvanomètre
- Baromètre à mercure
- Thermomètre à dilatation



Méthode de mesure par déviation - précautions

- Mentionnons quelques précautions exigées par l'emploi de la méthode par déviation:
 - **Précision du zéro.** La mesure est fournie par l'écart à partir d'une position d'origine prise comme zéro. Il est donc important de vérifier que l'instrument indique effectivement zéro en l'absence de mesurande. Sinon il faudra noter la position de départ qui est un "faux zéro". Les instruments électroniques, les thermomètres, les manomètres présentent souvent des décalages de zéro dont il faut tenir compte.
 - Lorsque la mesure met en jeu une grandeur d'activation, il est nécessaire de s'assurer de sa constance.
 - Il faut vérifier que l'instrument de mesure ne modifie pas trop le mesurande.
 - **Temps de réponse.** Il faut attendre que l'équilibre soit atteint.

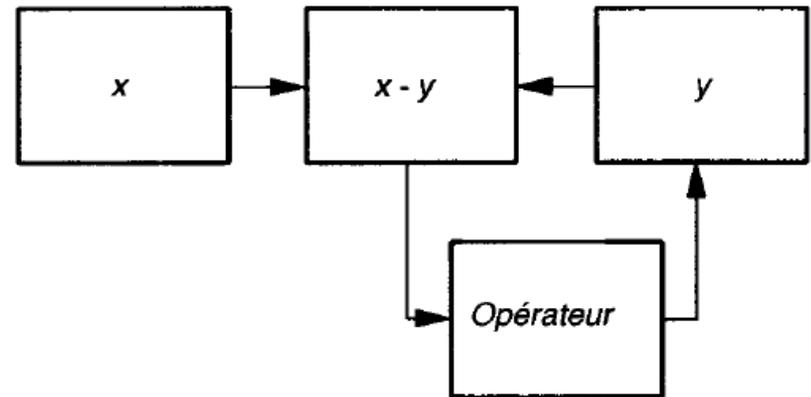
Méthode de mesure par déviation - **linéarité**

- La loi la plus avantageuse qui puisse relier le mesurande et la mesure, tant pour son interprétation immédiate que pour son traitement ultérieur, est la **linéarité**.
- C'est elle que l'on cherche généralement à obtenir. Un bon moyen d'y parvenir est de n'utiliser que des transducteurs linéaires dans la chaîne.
- Les transducteurs possèdent en général la qualité de linéarité dans un domaine plus ou moins étroit, généralement au voisinage du zéro, domaine appelé **plage de linéarité**, dont il ne faut pas déborder.
- Cependant, si le système de mesure comporte un microprocesseur, il est possible d'introduire dans le programme traitant les mesures la **courbe d'étalonnage** du capteur, ce qui élimine – en principe - les problèmes de linéarisation.

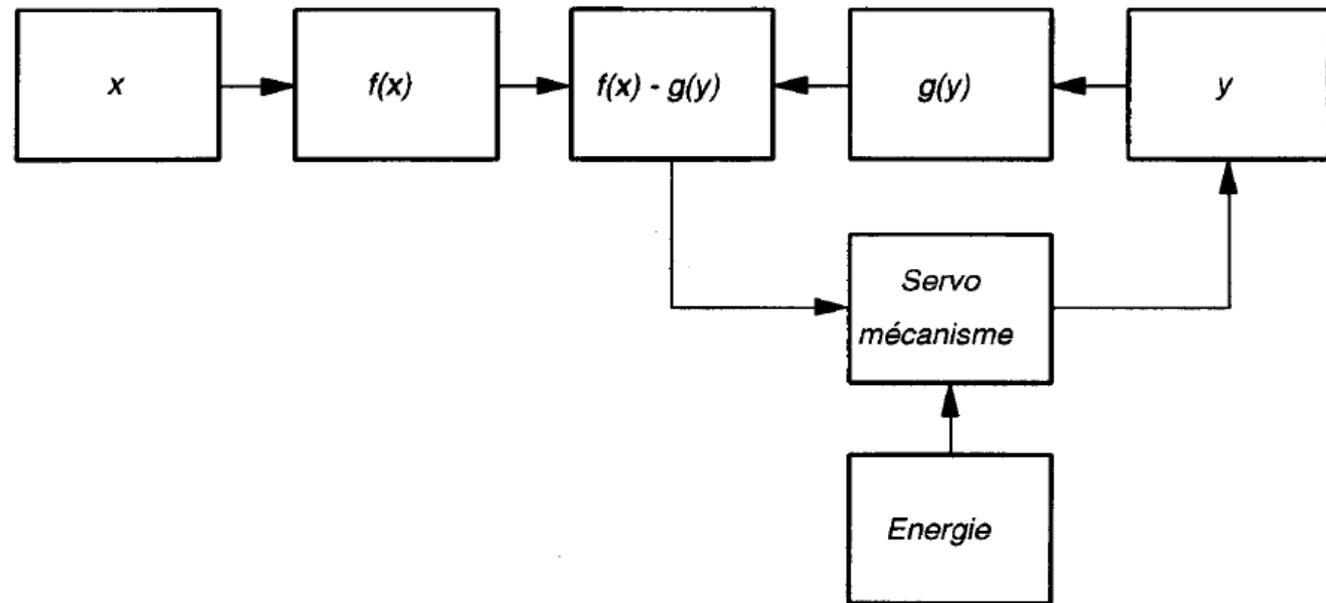
Méthode de mesure par comparaison

La comparaison peut porter sur le mesurande x lui-même que l'on compare à une grandeur connue de même nature y pour obtenir $x = y$ ou $x - y = 0$.

L'opérateur agit sur y pour obtenir que la valeur de $(x-y)$ formée par le *détecteur d'écart* soit nulle.



Dans l'exemple précédent, l'intervention sur y , qui porte la mesure, est effectuée par un opérateur qui observe le détecteur d'écart. Il est bien évident que son rôle est celui d'un *asservissement* et peut être tenu par un dispositif automatique. C'est ce que schématise la figure ci-contre.

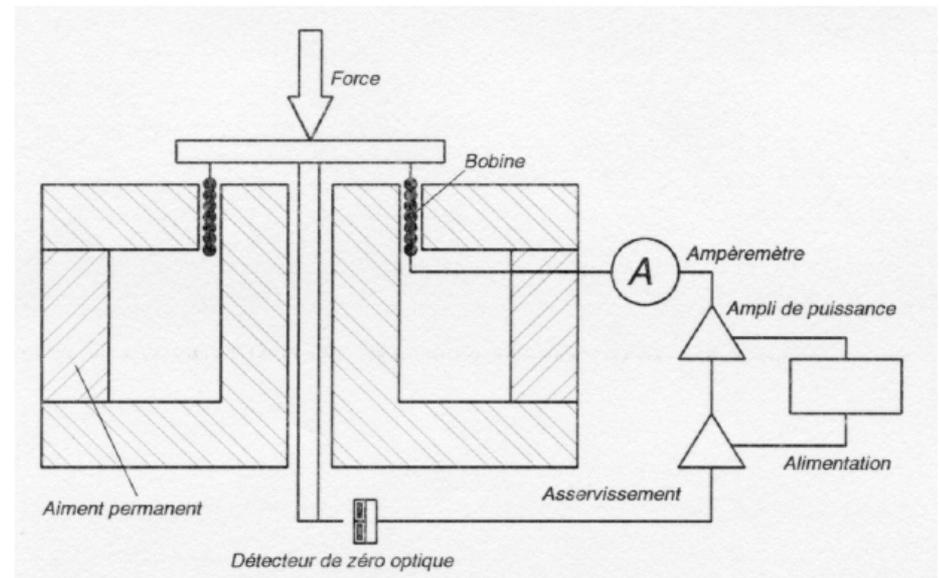


Méthode d'opposition ou méthode de zéro

Une balance de Roberval possède tous les organes d'un appareil de zéro: le soustracteur (fléau), le détecteur d'écart (l'aiguille), la grandeur d'opposition (boîte de poids). C'est l'opérateur qui apprécie l'écart puis dépose ou retire les poids pour obtenir l'équilibre.

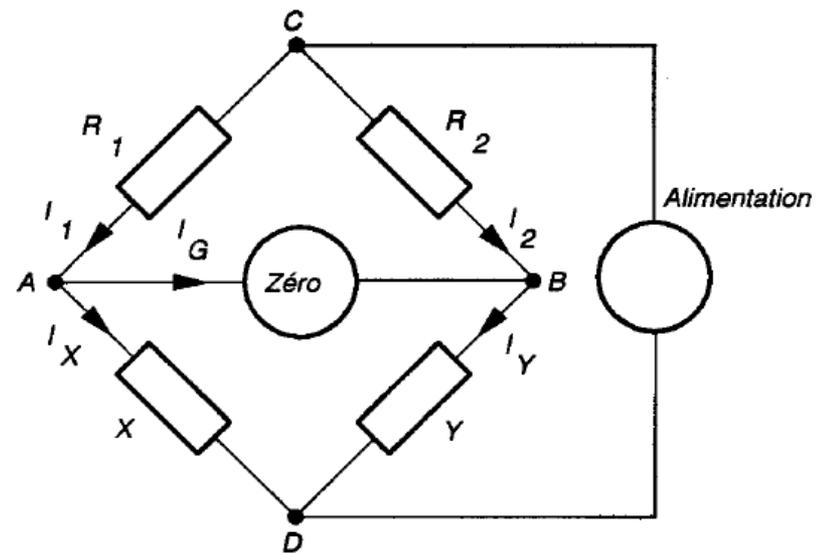
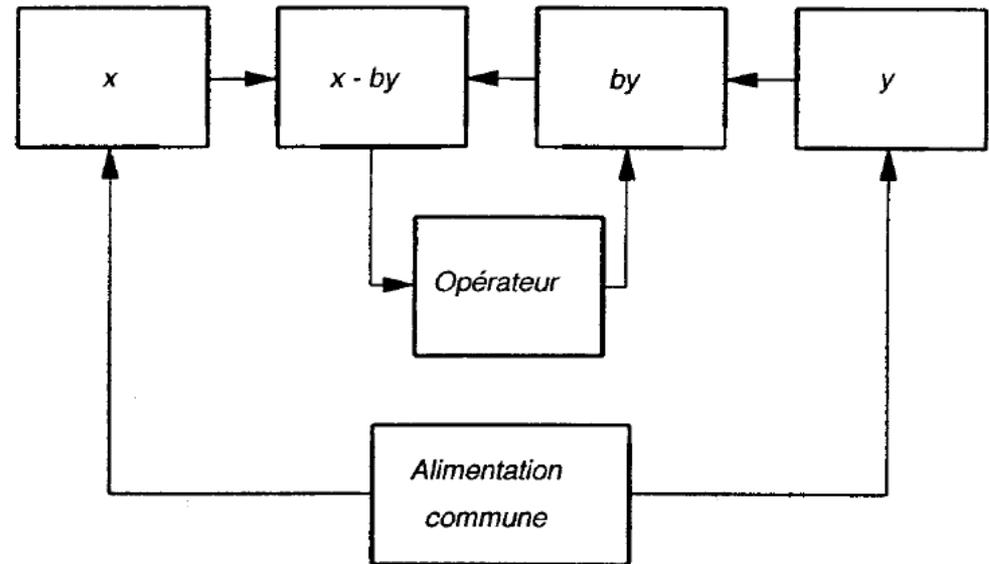


Un exemple de méthode de zéro par asservissement est présenté dans la figure ci-contre: il s'agit d'un dynamomètre électromagnétique. L'équilibre de la force présente sur le plateau est réalisé par une force électromagnétique grâce à un dispositif analogue à celui d'une bobine de haut-parleur. On imaginera aisément le circuit comprenant le détecteur d'écart, la source d'énergie, l'amplificateur de puissance réglant l'intensité du courant, l'ampèremètre fournissant la valeur du poids.



Les montages en pont

Dans le cas où le mesurande est une grandeur passive, il est logique d'utiliser une source commune pour activer deux chaînes droites parallèles, l'une fournissant une grandeur proportionnelle au mesurande x , l'autre une grandeur proportionnelle à la grandeur d'opposition y . La méthode de zéro consiste alors à constater que les états des deux points de la chaîne judicieusement choisis sont identiques.



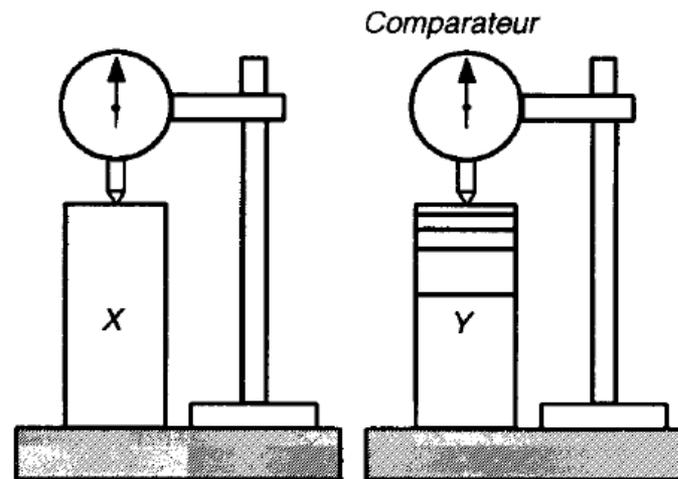
Méthode de déviation constante

C'est encore une variante de la méthode de comparaison, mais ici la grandeur de comparaison conserve une valeur constante. On ajoute au besoin au mesurande la quantité nécessaire pour atteindre la valeur fixée: $x + y = \text{constante}$.

Méthode de substitution

Au mesurande on substitue une grandeur connue qui doit provoquer un effet identique. Puisqu'il s'agit de comparer deux effets successifs, il faut qu'un organe garde la trace du premier effet; il peut prendre dans certains appareils une place très importante, sous le nom de mémoire.

Dans le cas du peson, par exemple, on décroche le poids inconnu et on le remplace par des poids marqués pour retrouver l'indication précédemment notée.



Empilement de cales étalons

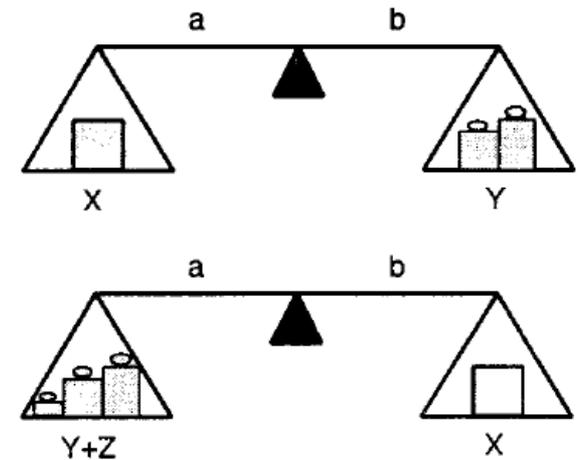
Méthode de permutation

Lorsqu'on utilise un appareil qui réalise l'égalité $ax = by$, il faut en principe connaître a/b pour avoir la mesure. Cependant, il est possible d'éliminer le facteur a/b en effectuant deux mesures. L'équilibre des moments donne:

$$axg = byg \rightarrow a(y+z)g = bxg$$

$$\rightarrow \text{en divisant membre à membre} \quad \frac{x}{y+z} = \frac{y}{x}$$

$$\text{Soit finalement: } \boxed{x = \sqrt{y(y+z)}}$$



Appliquée aux balances à bras légèrement inégaux, cette méthode porte le nom célèbre de Gauss.

Mesures par comparaisons successives – convertisseurs analogue-numériques (*DAC*)

Dans les mesures par balayage, la comparaison est effectuée entre le mesurande x , supposé constant, et une grandeur connue variable y . Les convertisseurs analogue-numériques font usage de la méthode de mesure par balayage. Offrant des possibilités extrêmement vastes, ils sont mis en œuvre dans des appareils dont la mesure s'effectue en une seconde, ou plus, et des appareils qui effectuent 10^9 conversions par seconde.

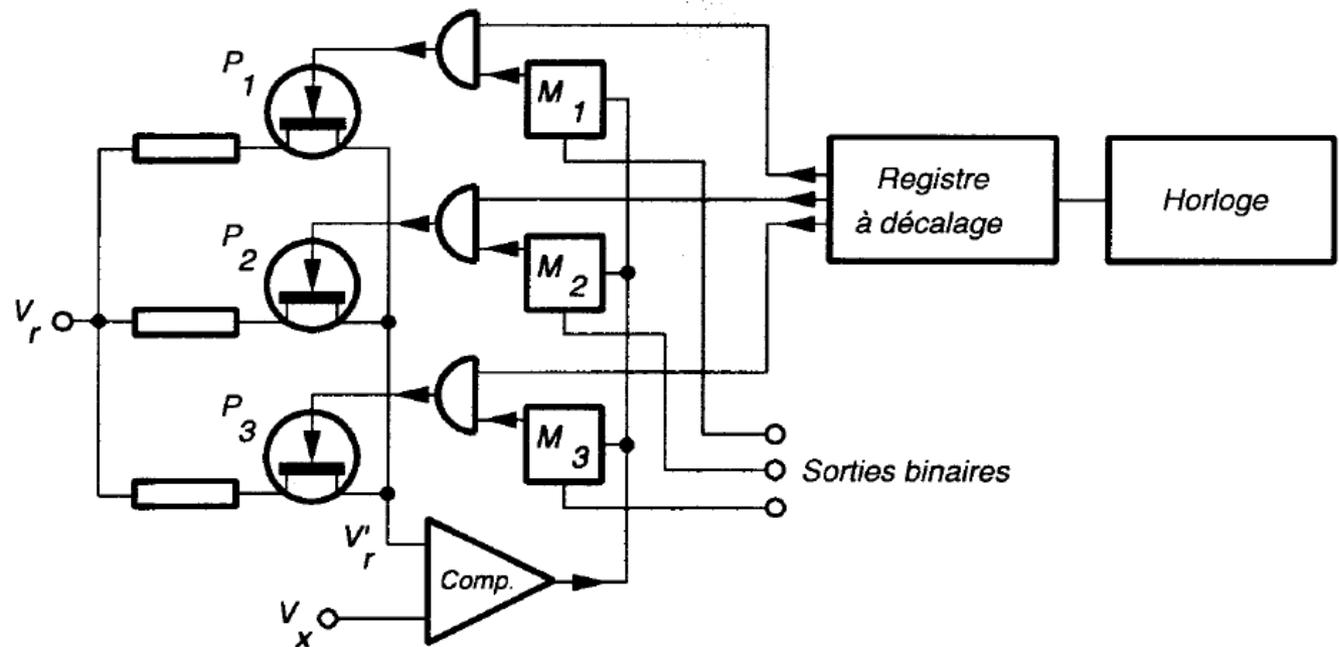
La quantification d'une tension analogique implique la résolution de deux opérations distinctes:

- appréhension à un instant précis, de l'amplitude de la tension analogique
- affectation d'une valeur numérique à cette amplitude

La détermination d'une tension analogique impose une comparaison avec une autre tension analogique rigoureusement connue. De ce fait, tous les convertisseurs comportent une tension de référence (dont l'exactitude régit largement celle du convertisseur).

Convertisseur à pesées successives

Le principe des pesées successives convient seul à la réalisation des convertisseurs pouvant effectuer plusieurs milliers de conversions par seconde.



Défini sur la base du calcul binaire, il prévoit des comparaisons successives de la tension d'entrée avec des tensions de référence dont les amplitudes varient par valeurs entières, et qui sont dans un rapport avec la valeur minimale qui correspond à la résolution du convertisseur: 2, 4, 8, 16, etc.

Avantages et inconvénients des mesures par **dévi**ation et par **comparaison**

- Les caractères de mesures **par dévi**ation et ceux des mesures **par comparaison** sont très différents. Le bilan sera dans l'ensemble favorable aux dernières, qui n'ont guère contre elles que leur relative complication et leur prix.
- C'est le **détecteur d'écart**, qui assure le repérage de la position zéro et qui fournit le **signal d'erreur**, qui donne aux mesures par comparaison l'essentiel de leur caractère. Et c'est la basse sévérité des exigences métrologiques à son égard, par opposition aux exigences formées pour les instruments de mesure par dévi
- Ce fait permet de simplifier à l'extrême le détecteur sans exiger de lui des qualités métrologiques poussées. Il suffit que sa position d'équilibre soit stable, qu'il soit **fidèle au zéro**.

- Dans tout instrument de mesure, la **justesse** est limitée par les défauts intrinsèques de l'instrument. Ces défauts se retrouvent évidemment aussi bien dans les mesures par déviation que dans les mesures par comparaison.
- Mais dans la **mesure par déviation**, l'erreur de lecture représente une fraction donnée de **l'étendue de mesure**, généralement de l'ordre de 1 à 0.1%.
- Par contre dans **mesure par comparaison**, par exemple dans la méthode de zéro, la partie principale de la mesure porte sur des grandeurs quantifiées connues avec exactitude et leur somme ne peut être entachée d'aucune erreur. L'erreur de lecture ne porte que sur l'évaluation du zéro, obtenue d'une manière précise par coïncidence. Pratiquement on la trouve au moins **100 à 1000 fois plus petite** que l'erreur de la mesure par déviation.

Précision et complexité des mesures par **dévi**ation et par **compar**aison

- Donc en général une **méthode par comparaison sera beaucoup plus précise d'une par déviation**.
- Par contre, l'usage de la méthode de **dévi**ation sera généralement **plus simple**, donc plus prompte. Par exemple, le corps à peser est posé sur le plateau et il suffit d'attendre un temps suffisant que l'élongation ait le temps de se stabiliser et que les oscillations soient amorties.
- La méthode par **compar**aison suppose une série d'opérations qui comprennent la constatation d'un écart, l'application de la contre-réaction puis l'attente d'un nouvel équilibre. Elle sera en générale **assez complexe** à mettre en œuvre.

Travail personnel

- Tout le chapitre 3 du polycopié.
- Lire et assimiler (et noter toutes questions)

Annex A du polycopié:

Terminologie des incertitudes de mesure