Laboratoires de Physique générale

Laboratoires du cours PHYS-F101,
BA1 en Sciences Chimiques et BA1 Année Polyvalente en Sciences

Année académique 2011-2012

Titulaires : Laurent Favart et Pascal Vanlaer

Assistants : Malek Mansour, Jonathan Demaeyer, Yassin Chaffi et Mikaël Dhen.

L. Favart
I.I.H.E.
1G 015 (VUB)
lfavart@ulb.ac.be
02.629.32.07

P. Vanlaer
I.I.H.E.
0G 137 (VUB)
pvanlaer@ulb.ac.be
02.629.38.98

Les titulaires tiennent à remercier les membres du département de physique qui ont contribué à écrire les présentes notes de laboratoire et à les améliorer au cours des années, en particulier Pierre De Buyl, Laura Lopez et Malek Mansour.

I. Introduction aux laboratoires de Physique

1 Incertitudes expérimentales et leur estimation

Le résultat d'une mesure n'est jamais égal à la valeur réelle de la grandeur à mesurer à cause (principalement) de l'imperfection du dispositif de mesure et de l'expérimentateur. On cherche donc à connaître le "domaine raisonnable", $\pm\Delta x$, dans lequel la valeur exacte devrait se trouver. On écrira donc :

$$x = (x_m \pm \Delta x)U_x$$

où U_x représente les unités de x. La grandeur Δx s'appelle l'**incertitude**, (ou encore erreur) **absolue**. C'est une grandeur positive qui possède les même unités que x.

L'**incertitude relative**, $\frac{\Delta x}{|x|}$, est un nombre sans unité.

Exemple : Grâce au code couleur des résistances, vous obtenez : $R = 50\Omega$ avec une précision de 2%. Cela signifie : $\frac{\Delta R}{|R|} = 0,02 \quad \Rightarrow \quad \Delta R = 0,02 \,.\, 50\Omega = 1\Omega \quad \Rightarrow \quad R = (50 \pm 1)\Omega$.

Il existe 2 types d'incertitudes expérimentales :

1. **les incertitudes systématiques** : généralement dues à un appareillage de mesure mal calibré ou mal utilisé ; exemples : mauvais tarage d'une balance, thermomètre dont l'échelle graduée s'est déplacée par rapport au tube capillaire depuis le réglage initial. Les mesures répétées d'une grandeur seront donc biaisées systématiquement. Les incertitudes systématiques ne sont pas toujours faciles à détecter.

2. **les incertitudes accidentelles, fortuites, aléatoires** qui résultent de l'impossibilité pratique de reproduire très exactement une mesure. Contrairement aux incertitudes systématiques les incertitudes aléatoires varient d'une mesure à l'autre.

1 Estimation des incertitudes de mesure

Il arrive dans certains cas que l'incertitude absolue ne dépende que de la précision de l'instrument mais dans la majorité des cas d'autres facteurs contribuent à l'augmenter :

$$\text{incertitude de mesure} \geq \text{ précision de l'instrument}$$

$$\Delta(\text{mesure}) = \Delta \text{ (de l'instrument)} + \Delta(\text{due à d'autres facteurs})$$

Précision des instruments de mesure

- soit donnée par le fabricant,
- soit évaluée à la plus petite variation de mesure que l'on peut obtenir par l'instrument.
  Exemples :
  - l'affichage numérique indique 0,52 : on prend 1 unité sur le dernier chiffre comme estimation de l'incertitude sur la mesure. $\Delta(mesure) = 0,01$.

– échelles graduées : l'incertitude sur la lecture est d'une demi graduation. Cependant, on effectue deux incertitudes de lectures : une sur la position du zéro, l'autre sur la position de l'extrémité de l'objet à mesurer. Il est donc plus prudent de prendre comme incertitude de lecture une unité de graduation.

Incertitudes dues à d'autres facteurs D'autres effet nous amènerons à devoir considerer une incertitude plus grande que celle donnée par la précision de l'appareillage : effets de parallaxe sur la lecture d'une échelle graduée, temps de réflexe dans les mesures de durées à l'aide d'un chronomètre,... Ici, comme ailleurs, il faut observer le dispositif et faire appel à son bon sens.

2 Propagation de l'incertitude sur une grandeur calculée

Exemple : Considérons la détermination du volume V d'une sphère à partir de la mesure de son rayon R : $R_m = 10,0cm$ et l'incertitude sur R : $\Delta R = 0,1cm$, $V = \frac{4}{3}\pi R^3 = 4,19\,10^3 cm^3$ que vaut ΔV ?
L'incertitude sur R sera liée à l'incertitude sur l'estimation de V et V est une fonction de R.

On est ramené à regarder comment varie une grandeur y fonction f de la variable x : $y = f(x)$ comme sur la figure 1. où l'on a pour une valeur mesurée x_m représenté l'intervalle $2\Delta x$ (intervalle "raisonnable" dans lequel devrait se trouver la valeur exacte) et l'intervalle $2\Delta y$ qui en résulte. Comment estimer Δy ?

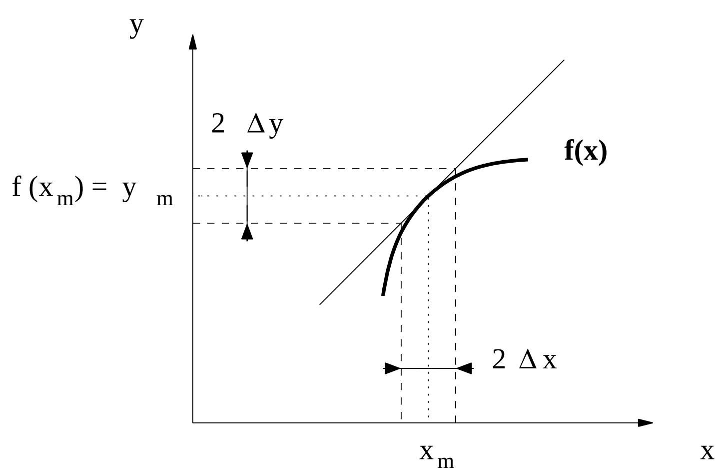


FIG. 1 – *graphique d'une fonction $y = f(x)$*

La valeur de Δy est évaluée à partir de la pente $\frac{df}{dx}(x_m)$ de la tangente en x_m. L'incertitude devant être positive, on prendra :

$$\Delta y^2 = [\frac{df}{dx}(x_m)\Delta x]^2. \quad (1)$$

Finalement on écrira notre resultat :

$$y = f(x_m) \pm \Delta y. \quad (2)$$

Reprenons l'exemple de la sphère ci-dessus ($R = 10,0cm$ et $\Delta R = 0,1cm$). L'incertitude sur le volume de la sphère est estimée à :

$$\begin{aligned} \Delta V^2 &= [\frac{dV}{dR}\Delta R]^2 = [4\pi R^2 \Delta R]^2 = [4\pi (10,0)^2\, 0,1]^2 = [0,12566\, 10^3 cm^3]^2 \\ &\Rightarrow\ V = (4,19 \pm 0,13) 10^3 cm^3, \end{aligned}$$

où l'on fera bien attention de ne noter que les chiffres **significatifs**.

2.1 Généralisation au cas de deux variables

Si la grandeur physique y dont on veut déterminer l'incertitude est une fonction f des grandeurs mesurées x et z, c'est-à-dire $y = f(x,z)$, son incertitude Δy sera donnée par :

$$\Delta y^2 = [\frac{\partial f}{\partial x}(x,z)\,\Delta x]^2 + [\frac{\partial f}{\partial z}(x,z)\,\Delta z]^2. \tag{3}$$

Attention : l'expression n'est valable que pour des grandeurs mesurées **indépendantes**.

2.2 Quelques règles simples et utiles

- incertitude **absolue** sur une somme ou une différence (A) est égale à la somme des incertitudes absolues sur chacun des termes de la somme ou de la différence (B, C).

  $$A = B \pm C.$$

  Par la dérivation partielle de la fonction somme ou différence, on obtient :

  $$[\Delta A]^2 = [\Delta B]^2 + [\Delta C]^2. \tag{4}$$

- incertitude **relative** sur un produit ou un quotient (A) est égale à la somme des incertitudes relatives sur chacun des facteurs du produit ou du quotient. Pour

  $$A = B.C \qquad \text{ou} \qquad A = B/C,$$

  on a :

  $$[\frac{\Delta A}{A}]^2 = [\frac{\Delta B}{B}]^2 + [\frac{\Delta C}{C}]^2. \tag{5}$$

  Pour $A = B.C$, on obtient par dérivation partielle de la fonction produit :

  $$[\Delta A]^2 = [C\Delta B]^2 + [B\Delta C]^2,$$

  en divisant par A, on retombe bien sur (5). Pour $A = B/C$, on obtient par dérivation partielle de la fonction quotient :

  $$[\Delta A]^2 = [\frac{\Delta B}{C}]^2 + [\frac{-B}{C^2}\Delta C]^2,$$

  en divisant par A, on retrouve une nouvelle fois (5).

3 Traitement statistique des incertitudes

Afin d'augmenter la précision sur une grandeur y recherchée, on peut effectuer d'une série de mesures $x_1, x_2, ..., x_n$ dans les mêmes conditions expérimentales. Comment les combiner ?

Les mesures présentées sous forme d'un **histogramme** se rapprochent souvent d'une distribution gaussienne (voir figure 2) donnée par l'expression :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma}}.$$

C'est la fonction densité de probabilité. L'ensemble des N mesures permet d'estimer m et σ :

$$m = \sum_{i=1}^{N} x_i^m / N, \qquad \sigma^2 = \sum_{i=1}^{N} (x_i^m - m)^2 / (N-1),$$

m est une estimation de la **moyenne**, σ^2 est la variance et σ est une estimation de **l'écart type**.

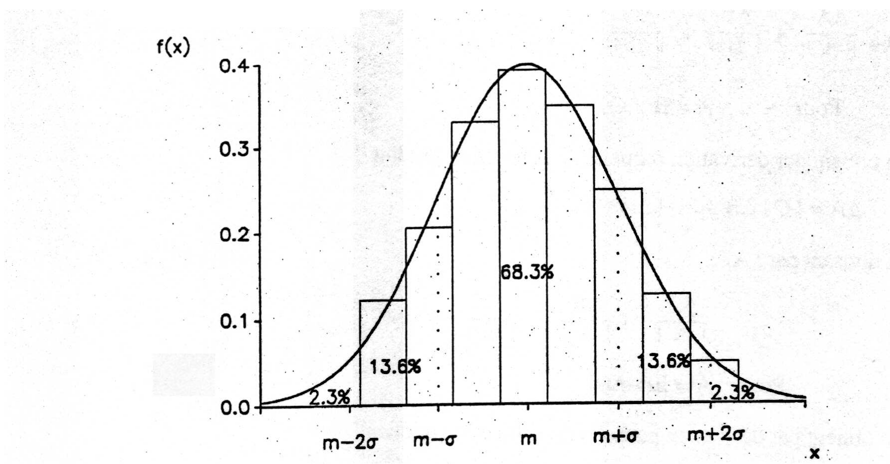


FIG. 2 – $f(x)$ *la fonction de densité de probabilité gaussienne*

On peut montrer que si une procédure expérimentale fournit des mesures se distribuant selon une gaussienne, la valeur d'une mesure a une probabilité de 68.3% de se situer à moins d'un σ de la valeur moyenne. Si on prend 2σ, on obtient 95.5% et pour 3σ on a 99.7%. C'est ce qu'on appelle des intervalles de confiance.

L'incertitude sur la mesure de x sera estimée par l'écart type de la distribution :

$$\Delta x^2 = \sigma_x^2 = \sum_{i=1}^{N} (x_i^m - m)^2 / (N-1)$$

En propageant, comme précédement cette incertitude, on aura :

$$\Delta y^2 = [\frac{df}{dx}(x_m)\, \sigma_x]^2.$$

Remarquons que l'écart type est défini même si la distribution n'est pas gaussienne, il donne de toute façon une idée de la précision de la mesure par la dispersion des mesures autour de leur moyenne. Notons enfin que un biais systématique déplace la moyenne mais n'affecte pas l'écart type.

2 Rapports de laboratoire

Voici quelques conseils et indications pour vous aider à rédiger vos rapports de laboratoire.

1 Tableau de mesures

Présenter les mesures de manière claire et structurée ainsi qu'en évitant toute répétition inutile. Il faut considérer les points suivants :

- inscription du titre qui décrit le contenu du tableau,
- identification des colonnes au moyen du nom des grandeurs de référence ou de leur symbole,
- indication des unités de mesure,
- indiquer toutes les mesures et leurs incertitudes,
- application des règles relatives aux chiffres significatifs
- une légende pour préciser, s'il y a lieu, les définitions des grandeurs mesurées ou calculées.

2 Représentation graphique

Le graphique (généralement sur papier millimétrique) permet de visualiser et d'analyser les variations d'une grandeur en fonction d'autres grandeurs. Les règles de présentation peuvent se grouper en 3 parties :

2.1 titre, tracé et identification des axes

- le tracé des axes orientés se fait à la limite extérieure du quadrillage sauf si on prévoit des valeurs négatives pour l'une ou l'autre variable,
- on identifie chaque axe en indiquant le symbole de la grandeur et son unité,

2.2 étalonnage et graduation des axes

- on doit pouvoir lire rapidement et facilement les coordonnées d'un point quelconque pris sur le graphique,
- chaque axe à son échelle appropriée ; on évalue l'étendue des valeurs pour chaque axe et on calcule le nombre d'unités qu'il faut attribuer à chaque carreau,
- utilisation maximale de l'espace disponible,
- l'origine des axes n'est pas indispensable,

2.3 tracé des valeurs expérimentales et de la courbe

- on représente chaque point et son incertitude (si cela est possible),
- si plusieurs courbes apparaissent sur un même graphique, il faut les distinguer par une légende. La légende peut également inclure des commentaires sur les mesures et les valeurs des grandeurs associées, comme la pente d'une droite, l'intersection de la droite avec un axe.

3 Analyse d'une droite sur papier millimétrique

Après avoir porté ses mesures (valeurs et incertitudes) sur un graphique, on trace une droite à la règle passant "au mieux" par l'ensemble des points (comme sur l'illustration à la figure 3).

1 Détermination de la pente d'une droite

Soit une fonction linéaire

$$y = ax + b,$$

où a est la pente et b est l'ordonnée à l'origine. En prenant deux points, (x_1, y_1) et (x_2, y_2) sur la droite, on trouve la pente :

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}.$$

On peut déterminer la pente et l'ordonnée à l'origine soit graphiquement soit par calcul.

Graphiquement : prenons un exemple - considérons le graphique de la vitesse v en fonction du temps t, où les points expérimentaux sont représentés avec leur incertitude sur la vitesse (figure 3).

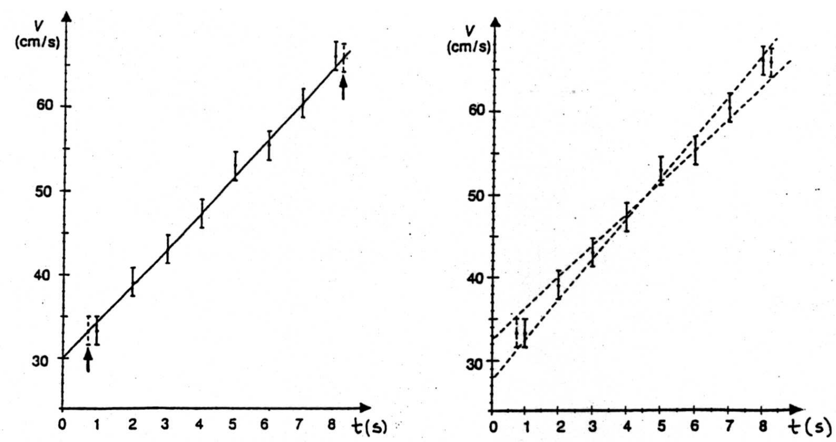


FIG. 3 – *Vitesse en fonction du temps. Représentation des points expérimentaux avec les barres d'erreur et représentation des deux pentes extrêmes, de coefficients angulaires a_{min} et a_{max}.*

On choisit 2 points situés sur la droite aux extrémités des mesures. A chacun des points, on associe l'incertitude du point expérimental le plus proche. A partir des zones d'incertitude reportées sur ces deux points, on trace les pentes extrêmes (figure 3 de droite). On calcule la valeur de chacune de ces pentes (a_{min} et a_{max}) de la manière habituelle en lisant les coordonnées de 2 points aux extrémités de chacune des droites tracées. On prendre comme incertitude sur la pente a :

$$\Delta a = \frac{a_{max} - a_{min}}{2}.$$

Par calcul : lorsque les incertitudes sont trop petites pour être représentées sur le graphique, il est impossible de tracer les deux pentes extrêmes, on effectue alors une démarche équivalente par calcul.

On choisit deux points aux extrémités de la droite, on leur associe l'incertitude du point expérimental le plus proche, on a alors :

$$(x_1 \pm \Delta x_1, y_1 \pm \Delta y_1),\ (x_2 \pm \Delta x_2, y_2 \pm \Delta y_2) \qquad \Rightarrow a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}.$$

Soient $Y = y_2 - y_1$ et $X = x_2 - x_1$, alors , $\Delta Y = \Delta y_2 + \Delta y_1$ et $\Delta X = \Delta x_2 + \Delta x_1$. L'incertitude relative sur la pente est donc donnée par :

$$[\frac{\Delta a}{|a|}]^2 = [\frac{\Delta X}{|X|}]^2 + [\frac{\Delta Y}{|Y|}]^2$$

et l'incertitude absolue est donnée par : $\Delta a = \frac{\Delta a}{|a|}.|a|$.

2 Ajustement d'une courbe par la méthode des moindres carrés

La méthode de détermination de la pente d'une droite présentée ci-dessus est intuitive mais quelque peu arbitraire (on est guidé par l'oeil). D'autre part, plus le nombre de points est important, plus elle aura tendance a augmenter l'incertitude car la probablilité qu'une mesure se trouve loin de la droite augmente, ce qui est bien sûr contre-intuitif. Nous proposons ci-dessous une méthode rigoureuse, pour ceux que cela intéresse, qui anticipe sur la matière de BA2.

Les mesures effectuées constituent un échantillon de n points $\{x_1, y_1\}$, $\{x_2, y_2\}$, ..., $\{x_n, y_n\}$ sur lequel on désire ajuster une loi du type $y = f(x, a, b)$, c'est-à-dire dépendant de la variable x et des paramètres a et b (par exemple $y = ax + b$). Pour déterminer les paramètres, on peut utiliser la méthode des moindres carrés qui consiste à ajuster les paramètres a et b de telle sorte que la somme des écarts quadratiques soit la plus petite possible :

$$\sum_{i=1}^{n} [\frac{y_i - f(x_i, a, b)}{\Delta y_i}]^2 = \text{Minimum},$$

c'est-à-dire que la somme des carrés des distances entre les valeurs mesurées y_i et les valeurs calculées de la courbe de régression f aux points x_i soit minimale tout en donnant un poids plus important aux mesures possédant une petite incertitude (on divise par l'incertitude Δy_i) .

Régression linéaire Dans le cas où l'on cherche à ajuster une droite, du type $y = f(x, a, b) = ax + b$, on peut appliquer une régression linéaire. En supposant de plus que les incertitudes Δy_i sont toutes égales, on obtient :

$$a = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}, \qquad b = \bar{y} - a\bar{x}. \tag{6}$$

où l'on a utilisé les quantités suivantes :

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2, \qquad S_{yy} = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2, \qquad S_{xy} = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \tag{7}$$

et où $\bar{x}$ et $\bar{y}$ sont les moyennes des échantillons $\{x_i\}$ et $\{y_i\}$.

Cette méthode permet de plus de quantifier la corrélation entre les valeurs de y et de x. Le coefficient de corrélation R^2 est donné :

$$R^2 = \frac{S_{xy}^2}{S_{xx}S_{yy}}, \tag{8}$$

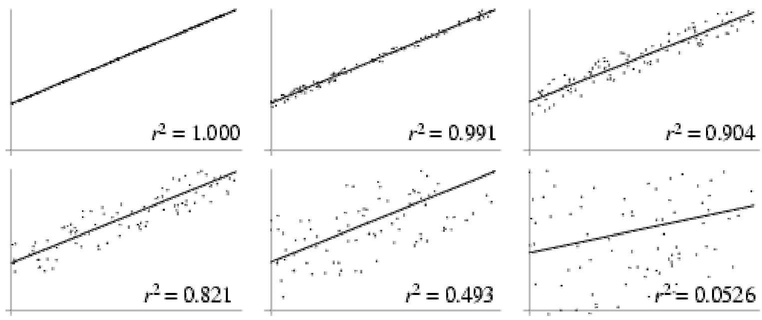


FIG. 4 – Cette figure illustre le coefficient de corrélation : de 1 - corrélation linéaire parfaite à 0 - pas de corrélation entre les valeurs de y et de x.

Manipulation M1. Deux mesures de l'accélération de la gravitation terrestre

1 But

Mesurer l'accélération induite par la gravité sur Terre par deux méthodes :

1. La chute libre d'un corps,
2. L'oscillation d'un pendule simple

2 Introduction

2.1 La gravitation terrestre

La force d'attraction réciproque entre deux corps massifs est ce qu'on appelle la gravitation. Cette force, toujours attractive, ne dépend que des masses et de la distance entre les corps. Elle est donnée par :

$$\overrightarrow{F_g} = -G_N \frac{m_1 m_2}{r^2} \overrightarrow{1_r},$$

où G_N est la constante de la gravitation ($\sim 6,672 \cdot 10^{-11} Nm^2/kg^2$), m_1 et m_2 respectivement la masse de chaque corps et r la distance entre eux. La direction de la force est toujours orientée suivant la droite reliant les deux corps.

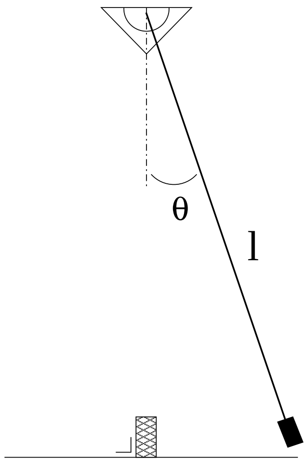
A la surface de la Terre, on considère que cette force ne dépend plus que de la masse m du corps, étant donné que l'on peut négliger la distance qui le sépare de la surface par rapport au rayon de la Terre. On obtient dans ce cas que l'attraction de la gravitation terrestre, soit le poids, est :

$$F_g = mg,$$

où $g = G_N M_T / R_T^2$, avec M_T et R_T respectivement la masse et le rayon de la Terre.
En l'absence d'autres forces, on observe donc que le corps subit une accélération égale à g. C'est cette quantité que nous allons mesurer.

3 Travail à effectuer

3.1 L'oscillation d'un pendule simple



Le dispositif est constitué d'un statif auquel est accroché un fil de longueur l relié à un petit cylindre. Une cellule photoélectrique, à la verticale du point d'attache, permet de déclencher un chronomètre lors du passage du cylindre. Le chronomètre, en position *pendule*, s'arrête après le troisième passage du cylindre devant la cellule photoélectrique (ce qui permet donc de mesurer **une** période d'oscillation).

Avant toutes choses, ajustez l'alignement tant vertical que latéral de tous les éléments.

La période d'oscillation d'un pendule simple, pour des petits angles, est donnée par :

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \tag{1}$$

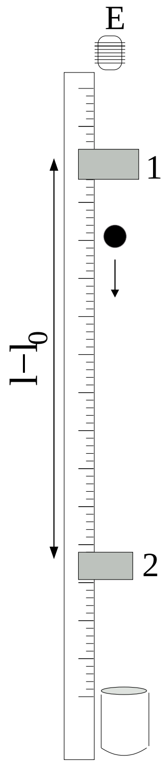
Cependant, pour des angles petits, la dimension du cylindre empêche un déclenchement photoélectrique très précis. Cela nous oblige à prendre des mesures pour des angles plus grands, introduisant dans la période d'oscillation des corrections dépendant de l'angle. La première correction (pour θ en radians) est :

$$T = T_0(1 + \frac{\theta^2}{16} + ...). \tag{2}$$

Une autre correction envisageable est due à l'inertie de rotation du petit cylindre (qui n'est pas une masse ponctuelle) autour du point d'attache du pendule. On utilise alors la longueur effective $l^2_{\text{eff}} = l^2 + d^2/12$, où d est la longueur du cylindre et l la distance du point de suspension au centre de gravité du pendule. Dans les conditions de l'expérience présente, vérifier que cette correction est négligeable.

- ♣ A l'aide du rapporteur et du chronomètre prenez plusieurs mesures de la période en fonction de l'angle d'oscillation.
- ♣ Faites un graphique de T en fonction de θ^2 à l'aide de vos mesures en y reportant les barres d'erreurs (incertitudes) correspondantes.
- ♣ Déterminez et justifiez l'incertitude sur θ^2
- ♣ Déterminez graphiquement les coefficients T_0 et "1/16" de la loi (2) et leurs incertitudes.
- ♣ - optionnel - Déterminez T_0 et "1/16" par régression linéaire en θ^2 (soit par calcul personnel, soit en utilisant le tableur).
- ♣ Déduisez en votre mesure (valeur et incertitude) de l'accélération de la gravité sur Terre.

3.2 La chute libre d'un corps



Le matériel proposé est constitué d'une rampe verticale graduée, munie de deux cellules photoélectriques (1 & 2) qui respectivement démarre et arrête un chronomètre. Le chronomètre doit être en position *chariot* avec la précision de $0,1ms$. La mise à zéro se fait en appuyant sur le bouton *reset*. Un électro-aimant (E), situé au dessus de la rampe, retient une bille en métal grâce à son champ magnétique. La bille est libérée en coupant le courant de l'électro-aimant via un interrupteur.

Le mouvement étudié ici est donc celui d'un corps en chute libre avec une vitesse initiale (le chrono n'étant déclenché qu'après une certaine distance) et répond à l'équation :

$$l - l_0 = v_0 t + g\frac{t^2}{2}, \tag{3}$$

où $l - l_0$ est la distance parcourue entre les deux cellules photoélectriques et t le temps nécessaire. Une des cellules ne peut pas bouger, laquelle et pourquoi ?

♣ Effectuez plusieurs mesures pour différentes longueurs de chute $(l - l_0)$ comprises dans l'intervalle de la rampe (par exemple $50cm$, $70cm$, $90cm$ et $110cm$).

♣ Réalisez sur papier millimètrique un graphique de vos mesures en portant $(l - l_0)/t$ en fonction de t. Après ajustement (à l'oeil) d'une droite, déterminez g et v_0 ainsi que leurs incertitudes. N'oubliez pas de déterminer et de justifier l'incertitude sur $(l - l_0)/t$

♣ - optionnel - régression linéaire en θ^2 (soit par calcul personnel, soit en utilisant le tableur).

♣ Déterminez g et v_0 par regression (linéaire si par calcul personnel, polynômial si sur ordinateur).

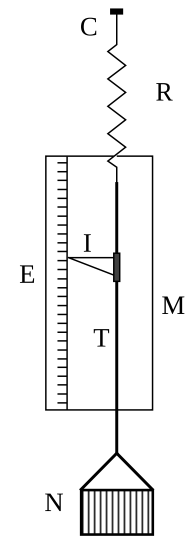
Comparez et discutez les valeurs de g obtenues par l'oscillation du pendule et par la mesure de la chute d'un corps.

Manipulation M2. Etude d'un ressort

1 But

1. Détermination de la constante de rappel d'un ressort.
2. Vérification de la relation donnant la période d'oscillation d'une masse suspendue à un ressort.

2 Appareillage



Un pied rigide, portant un miroir M et une échelle millimétrée E, est surmonté d'un crochet C qui supporte le ressort R. A l'extrémité inférieure du ressort est accroché un équipage mobile formé d'une tige T, portant un index I et une nacelle N, dans laquelle on placera des masses variables.
Quatre masses (50 g, 100 g (2x) et 200 g (incertitude $\pm$ 0,02 g)), et un objet de masse inconnue sont mise à votre disposition.
Le ressort, la tige et la nacelle portent des marques d'identification : leurs masses sont affichées dans le laboratoire (à 0,01 g près).
L'index I (muni d'une vis de serrage pour régler sa hauteur et l'orienter convenablement) permet de mesurer l'allongement du ressort, en se référant à l'échelle graduée E. Pour éviter les erreurs de parallaxe, l'image de l'index vue dans le miroir doit apparaître à la même hauteur que l'index lui-même. Il est ainsi possible de faire des lectures à 0,5 mm près. Éviter tout frottement de I contre l'échelle graduée !

3 Préparation

- Une masse m est suspendue à un ressort de constante de rappel k. On étire le ressort en abaissant la masse d'une distance A par rapport à la position d'équilibre. On relâche la masse, qui se met à osciller. En quel(s) point(s) de la trajectoire la vitesse de la masse est-elle maximale ? Quelle est l'expression de la vitesse en ce(s) point(s) ?

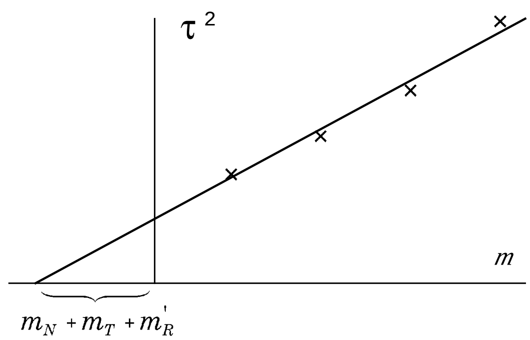
4 Travail à effectuer

4.1 Détermination de la constante de rappel du ressort

– Noter la position d'équilibre x_{eq} de l'index I pour des masses dans la nacelle allant de 0 à 450 g, par pas de 50 g. Vérifier la réversibilité de la déformation du ressort en déchargeant ensuite progressivement la nacelle.
– Faire un graphique de la position x_{eq} en fonction de la masse m. Dans la mesure où l'on se trouve dans le domaine élastique linéaire, ces points devraient se placer sur une droite de coefficient angulaire égal à g/k, où k est la constante de rappel du ressort (cf. éq. (3) du rappel théorique).
– Estimer ce coefficient angulaire et en déduire la valeur de k (en N/m) en prenant $g = 9,81$ m/s^2. Estimer l'incertitude sur k.
– Placer l'objet de masse inconnue dans la nacelle. Mesurer l'allongement du ressort, et déterminer la masse de l'objet à l'aide du graphique obtenu ci-dessus.

4.2 Période d'oscillation d'une masse suspendue à un ressort

- Pour une masse de 150 g, mesurez la durée de 5 oscillations complètes. **Demandez un chronomètre.** Estimez la précision sur la mesure de la durée. Justifiez-la et verifiez-la expérimentalement. Estimez ensuite la période d'oscillation et l'incertitude sur cette période.
- Pour 4 valeurs différentes de la masse m (de 150 g à 450 g, par pas de 100 g) installée dans la nacelle, déterminer au chronomètre la durée d'un nombre d'oscillations complètes bien choisi afin que l'incertitude relative sur la période soit inférieure à 2%. NB : évitez les amplitudes trop importantes et les balancements qui amèneraient l'équipage à frotter contre le pied rigide. **Attention !** Il se peut que, pour l'une des masses, le système se mette à osciller latéralement de façon gênante (sous l'effet d'une résonance accidentelle) et que cette période soit difficile à mesurer. Dans ce cas, augmenter ou diminuer la masse de 50g.
- En tirer pour chaque mesure la période τ correspondante. Évaluer l'incertitude sur τ.
- Faire le graphique de τ^2 en fonction de m. Les points obtenus devraient se situer alors sur une droite de coefficient angulaire égal à $4\pi^2/k$ (cf. éq. (6) du rappel théorique).
- Trouver, à partir du graphique, la valeur de k et comparer-la à celle mesurée en (4.1).
  Il faut noter que la droite ne passe pas par l'origine. En effet, il faudrait tenir compte de la masse de la nacelle m_N, de la tige m_T, et d'une contribution m'_R de la masse du ressort m_R ($m'_R \sim m_R/3$, la masse du ressort n'étant pas concentrée à la partie inférieure, mais uniformément répartie sur sa longueur).



- Placer l'objet de masse inconnue dans la nacelle. Mesurer la période d'oscillation, et déterminer la masse de l'objet à l'aide du graphique obtenu ci-dessus. Cette estimation de la masse concorde-t-elle avec votre estimation précédente ?

4.3 Ressorts en série

Deux ressorts de rigidités respectives k_1 et k_2, montés en série, sont équivalents à un ressort unique de rigidité k telle que

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}.$$

Discutez le comportement attendu. A l'aide d'un second ressort, étalonné préalablement (celui du groupe voisin par exemple), vérifiez cette loi expérimentalement.

5 Rappel théorique

• Un ressort idéal, de longueur "au repos" x_o, étiré (ou comprimé) jusqu'à la position x développe une force de rappel :

$$F = -k(x - x_o), \tag{1}$$

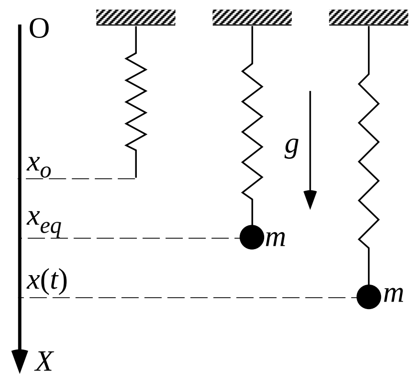
où k est la constante de rappel, caractéristique du ressort (noter que l'axe des x est orienté vers le bas).

• On suspend à l'extrémité de ce ressort une masse m, dans le champ de la pesanteur. $x(t)$ est la position de l'extrémité du ressort à un instant donné.
La force totale exercée sur m est égale à

$$F = mg - k(x - x_o). \tag{2}$$

A l'équilibre ($x = x_{eq}$), cette expression s'annule et l'allongement du ressort est donné par

$$x_{eq} - x_o = \frac{mg}{k}. \tag{3}$$



• Pour une position quelconque, la force totale (2) exercée sur m n'est pas nulle. L'application de la deuxième loi de Newton, donne :

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = mg - k(x - x_o) = -k(x - x_{eq}) \tag{4}$$

où la relation (3) a été utilisée. Cette équation différentielle admet pour solution

$$x(t) = x_{eq} + A\cos(\omega t + \phi) \tag{5}$$

Ainsi, la masse m oscille périodiquement de part et d'autre de la position d'équilibre x_{eq} avec une amplitude A et une fréquence angulaire $\omega = \sqrt{k/m}$ (ϕ est une phase qui dépend de la position et de la vitesse de la masse au temps $t = 0$). La période d'oscillation τ est donnée par :

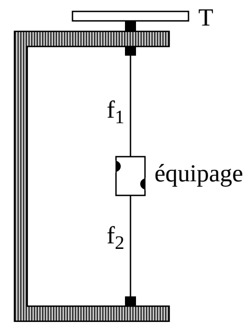
$$\tau = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{6}$$

Manipulation M3. Torsion d'un fil

1 But

1. Mesure de la constante de torsion d'un fil.
2. Mesure d'un moment de forces.
3. Mesure de moments d'inertie de rotation.

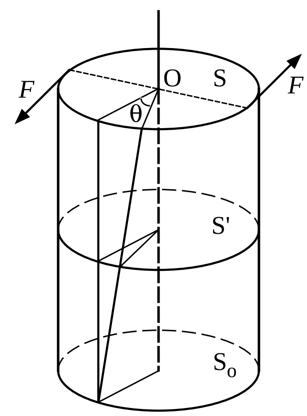
2 Appareillage



La balance de torsion utilisée se compose de deux fils f_1 et f_2 identiques tendus entre deux supports et reliés entre eux par un cylindre (équipage), percé de deux trous, aux travers desquels on fixera des tiges à divers stades de la manipulation. Un tambour T, gradué en degrés, permet d'imposer au système une torsion angulaire déterminée. Divers accessoires sont installés sur une planchette : petite tige, barreaux, 3 petits poids ("cavaliers") de 1, 1,5 et 2 g (incertitude relative de 1%), objet X et latte métallique fixée sur un support.

3 Introduction théorique

3.1 Balance de torsion



La torsion d'un fil constitue un exemple de déformation d'un solide sous l'action de forces extérieures. Supposons qu'une section droite S, d'un fil cylindrique de rayon R, soit soumise à un moment de forces tangentielles F (de résultante nulle), perpendiculaires à l'axe du fil.
Ce moment de forces a pour effet de faire tourner les éléments de la section S d'un angle θ autour de l'axe O. La section S_0 étant maintenue fixe, les éléments des sections intermédiaires tournent de moins en moins fort lorsqu'on va de S vers S_0. La torsion du fil résulte donc d'un glissement de plans de matière les uns sur les autres. Dans le **domaine de déformation élastique linéaire**, l'angle de torsion θ est proportionnel au moment de forces Γ exercé ($\Gamma = 2FR$ = moment des forces), c-à-d

$$\Gamma = C\,\theta. \tag{1}$$

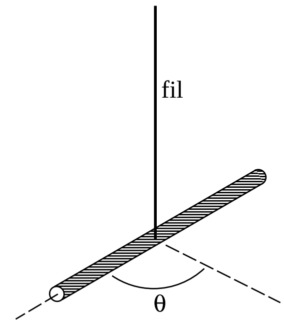
La constante de torsion C ainsi définie est le moment de forces nécessaire pour tordre le fil d'une unité angulaire (radian), elle s'exprime donc en newton mètre/radian ($N\,m\,/\,rad$). On remarquera la similitude entre cette relation et celle liant la force et l'élongation d'un ressort.

Un fil de constante de torsion C est capable d'équilibrer statiquement un moment de forces extérieur Γ : le fil se tord jusqu'à un angle tel que

$$\theta = \Gamma/C$$

c-à-d que la torsion du fil engendre un moment de forces $-C\theta$, contrebalaçant exactement Γ. C'est le principe de la **balance de torsion**, qui permet de mesurer des moments de forces éventuellement très faibles (un galvanomètre est une balance de torsion adaptée à la mesure de moment de forces d'origine électromagnétique).

3.2 Pendule de torsion



On accroche un solide à l'extrémité d'un fil vertical, on tord ce fil d'un angle θ_o, et, ensuite, on libère le solide sans vitesse initiale. Ce dernier se met à effectuer une oscillation angulaire autour de l'axe du fil. L'équation déterminant θ en fonction du temps, est

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} = -C\theta \tag{2}$$

où I est le moment d'inertie du solide relatif à l'axe du fil :

$$I = \sum_i m_i r_i^2 \tag{3}$$

où r_i est la distance d'un élément du solide à l'axe de rotation et m_i est la masse de cet élément.

L'équation (2) admet pour solution :

$$\theta(t) = \theta_o \cos(\omega t + \phi) \qquad ; \qquad \omega = \sqrt{\frac{C}{I}} \tag{4}$$

La période d'oscillation est donnée par :

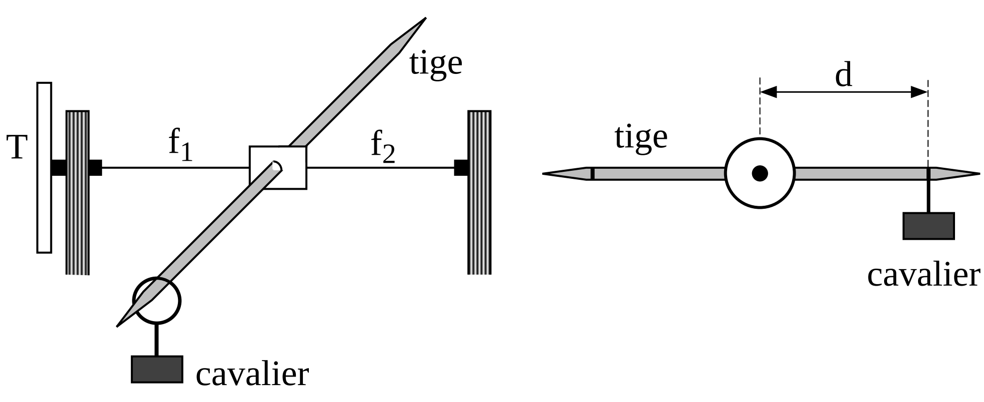
$$\tau = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{I}{C}}. \tag{5}$$

Le fait qu'elle est indépendante de l'amplitude θ_0 (propriété d'**isochronisme**) découle de la linéarité de la relation (1).

4 Travail à effectuer

4.1 Balance de torsion

Utilisez la balance de torsion en position couchée (fils horizontaux) (cf. figure ci-dessous). La petite tige étant fixée dans l'équipage (à centrer convenablement), amenez-la à l'horizontale en agissant sur le tambour T. Repérez de manière précise cette position à l'aide de la latte (en utilisant le reflet dans le miroir de la latte), ainsi que l'angle indiqué sur le tambour. Accrochez ensuite une masse (cavalier) à une extrémité de la tige (encoche prévue à cet effet), ramenez-la à sa position de départ et notez l'angle indiqué sur le tambour.



A l'aide des trois cavaliers à votre disposition, vous pouvez effectuer 8 mesures en plaçant les masses d'un côté ou de l'autre de la tige ou encore en les combinant de part et d'autre de la tige. Les masses, suivant leurs positions, font augmenter ou diminuer l'angle de torsion, leurs contributions seront alors considérées respectivement comme positives ou négatives.

La torsion du fil est liée au moment de forces Γ exercée par le cavalier :

$$\Gamma = C\,\theta. \qquad \text{et d'autre part} \qquad \Gamma = m\,g\,d \tag{6}$$

où m est la masse du cavalier, d est la demi-distance séparant les encoches de la tige (cf. dessin ci-dessus) et $g = 9.8\ m/s^2$.

- Estimez et justifiez l'incertitude sur l'angle de torsion θ.
- Réalisez le graphique de l'angle de torsion θ en fonction de la masse qui contribue au moment de forces, en représentant les barres d'incertitude pour chaque mesure.
- Etablissez à partir des équations (6) la relation entre l'angle de torsion et la masse qui contribue au moment de forces. Expliquez pourquoi la constante C qui apparait dans le coefficient angulaire est la constante de torsion du fil f_1 uniquement.
- Estimez C et son incertitude en unités du SI à partir de ce graphique (attention à la conversion des degrés).

4.2 Détermination de la constante de torsion d'un fil d'acier

Pour déterminer la constante de torsion du fil d'acier, nous utiliserons la balance de torsion en position verticale et fixerons à travers l'équipage un barreau de moment d'inertie I connu (cf. (8)). Nous mesurerons ensuite sa période d'oscillation τ. Elle est donnée par (cf. (5)) :

$$\tau = 2\,\pi\sqrt{\frac{I}{2\,C}} \tag{7}$$

où C est la constante de torsion de chacun des fils f_1 et f_2 (ceux-ci sont identiques et contribuent de façon additive au moment de forces de torsion). I est le moment d'inertie total, barreau + équipage, mais le matériel utilisé ici est tel que le moment d'inertie de l'équipage peut être négligé.

- La balance étant en position verticale, fixer à travers de l'équipage un des barreaux cylindriques (de moment d'inertie I) figurant parmi les accessoires, en le centrant correctement. Faites osciller le barreau horizontalement avec une amplitude de quelques degrés et déterminer τ en mesurant la durée totale d'**un nombre entier d'oscillations complètes**. Ce nombre, dépendant d'un barreau à l'autre, sera choisi de sorte que le chronométrage dure une minute environ. **Demander un chronomètre.** Estimez l'incertitude sur τ en prenant 0.1 seconde comme précision sur le moment de déclenchement du chronomètre.
  L'équipage étant muni de deux trous, on peut réaliser 5 mesures, en utilisant successivement un petit barreau, puis les deux petits, un grand, un grand et un petit, les deux grands.
- Calculer les moments d'inertie des barreaux utilisés. Rappelons que pour un barreau mince, de masse M et de longueur L, le moment d'inertie I par rapport à un axe perpendiculaire passant par son centre de masse est donné en bonne approximation par :

$$I = \frac{1}{12}\,M\,L^2. \tag{8}$$

- Réaliser un graphique de τ^2 en fonction de I.
- A partir du graphique, déterminer C et son incertitude.
- Comparez la valeur obtenue avec celle obtenue par la balance de torsion. Discutez.
- Placer l'objet X dans l'équipage. Mesurer sa période d'oscillation et déterminer à partir du graphique obtenu ci-dessus, son moment d'inertie et l'incertitude associée.

Manipulation E1 : Mesures courantes en électricité

1 But

1. Utilisation d'un multimètre
2. Vérification des lois d'association de résistances.
3. Détermination des résistances internes des voltmètre et ampèremètre.
4. Étude de la courbe caractéristique d'une résistance, d'une ampoule et d'une diode.
5. Étude de l'effet de la résistance interne d'un générateur électrique.

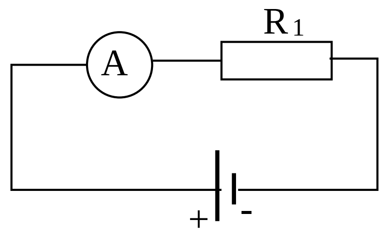
2 Appareillage

- Un bloc générateur de tensions fixes : tension alternative 8 V , tension continue variable 0-2V et tension continue variable 1-30V.
- Deux multimètres Velleman DVM68.
- Trois résistances R_1, R_2 et R_3.
- Une pile d'environ 1,5 V.
- Une ampoule (limitée à 40 mA) sur une planchette.
- Une plaquette pourvue d'une diode ordinaire (D1) et d'une diode Zener (D2).
- Une plaquette comportant une résistance (R) d'environ 100 Ω.

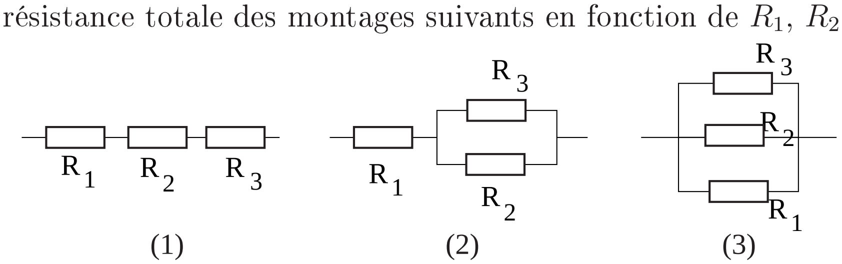
3 Préparation

Il peut être utile de lire les rappels théoriques (section 5).

- Introduisez un voltmètre de résistance interne $20M\Omega$ dans le schéma suivant pour mesurer la résistance R_1 sachant qu'elle est de l'ordre de $10M\Omega$.



- Exprimez la résistance totale des montages suivants en fonction de R_1, R_2 et R_3.



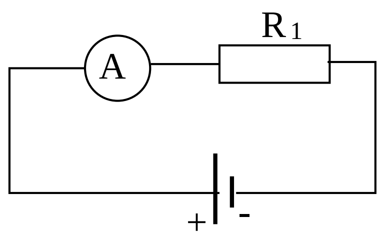
- Exprimez l'incertitude sur les résistances des circuits (1) et (2) si on mesure les résistances R_1, R_2 et R_3 avec des incertitudes relatives de $\Delta R_{1,2} = 5\%$ et $\Delta R_3 = 10\%$.

4 Travail à effectuer

4.1 Utilisation d'un multimètre

Attention : Bien préparer le multimètre (positions des fiches et du sélecteur) avant de le brancher dans un circuit. En position A-mètre ou Ω-mètre, **on risque de le détériorer si un courant trop important le parcourt**.

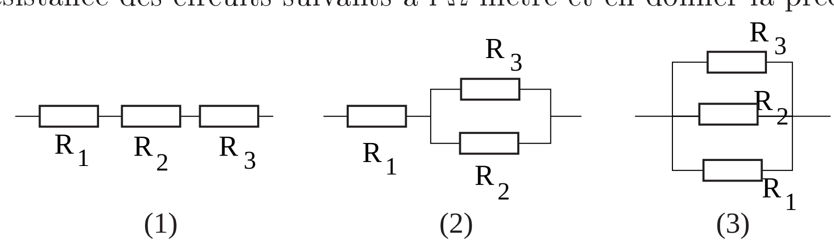
– En voltmètre.
  Fonction V-mètre (continu) : mesurer la tension de la pile et vérifier le bon fonctionnement des deux tensions continues variables du bloc générateur.
  Fonction V-mètre (alternatif) : vérifier le bon fonctionnement de la tension alternative du bloc générateur. Que signifie la tension affichée par le voltmètre pour une tension alternative ?
– En ohmmètre.
  Mesurer à l'Ω-mètre les résistances R_1, R_2 etR_3. Donner la précision de ces mesures à partir du tableau des précisions de votre multimètre affiché dans le laboratoire.
  Comparer avec les valeurs lues sur le code de couleur des résistances (voir tableau affiché dans le labo).
– En ampèremètre.
  Attention : Avant de brancher l'A-mètre, estimer l'ordre de grandeur du courant !
  - Fonction A-mètre (continu) : mesurer l'intensité du courant continu débité par le bloc générateur de tension continue de 5 V dans la résistance R_1 (voir fig.ci dessous).



  - Fonction A-mètre alternatif : mesurer l'intensité du courant alternatif fourni par le bloc générateur de tension alternative dans la résistance R_1 (Même circuit que précédemment).

4.2 Vérification des lois d'association de résistances

– Mesurer la résistance des circuits suivants à l'Ω-mètre et en donner la précision.



– Vérifier que les valeurs obtenues correspondent à celles que l'on obtiendrait par les lois d'association de résistances à partir des mesures de R_1, R_2 et R_3 effectuées en 4.1. Faire le calcul d'erreur pour la résistance du circuit (1) à partir des données obtenues en 4.1 et vérifier la compatibilité des mesures.
– Que se passe-t-il si on court-circuite la résistance R_3 dans les montages (1) et (2) ? Vérifier votre réponse en faisant l'expérience suivante : dans les montages (1) et (2), relier les bornes de la

résistance R_3 à l'aide d'un fil électrique. Mesurer la résistance totale à l'Ω-mètre des montages (1) et (2) ainsi modifiés.

4.3 Mesure des résistances internes du V-mètre et de l'A-mètre

- Mesurer les résistances internes dans le mode V-mètre (pour les différentes sensibilités si votre appareil en comporte plusieurs) en utilisant l'autre multimètre comme Ω-mètre.
- Mêmes mesures pour la fonction A-mètre.

4.4 Etude de la courbe caractéristique de la résistance R_2

- A l'aide d'un A-mètre et d'un V-mètre, prendre une dizaine de points de la caractéristique ($I = f(V)$) de l'élément R_2 en alimentant le circuit à l'aide du générateur de tension continue variable 1-30V. Dans ce but, choisir l'un des deux montages proposés dans le rappel théorique (courte dérivation ou longue dérivation). Justifier votre choix. Vérifier qu'il y a effectivement une différence entre les valeurs lues aux V-mètre et A-mètre, en utilisant successivement les deux montages possibles, pour une tension du générateur fixée.
- Vérifier que la résistance est un élément symétrique quant au sens du passage du courant ($I \rightarrow -I$) en refaisant les mêmes mesures après avoir inversé les bornes du générateur.
- Faire le graphique de la caractéristique de la résistance. La loi d'Ohm est-elle vérifiée dans le domaine de tension étudié ?
  Déterminer à partir du graphique la meilleure estimation de R_2 et l'erreur associée. Est-ce en accord avec la mesure directe à l'Ω-mètre faite précédemment ?

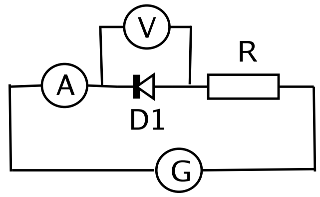
4.5 Etude de la courbe caractéristique de l'ampoule

Refaire le même montage que précédemment, en remplaçant la résistance R_2 par l'ampoule. Prendre une dizaine de points de la caractéristique de l'ampoule en alimentant le circuit à l'aide de la tension continue variable 1-30 V (limitée à 2,5 A).

La loi d'Ohm est elle vérifiée ? Discutez vos mesures.

4.6 Etude de la caractéristique d'une diode

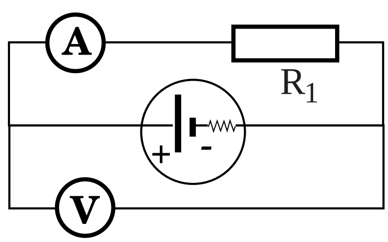
- Placer la diode D1 et une résistance de 100 Ωhm en série (la résistance a pour rôle de protéger les éléments du circuit contre des intensités de courant trop élevées).
- Etablir la caractéristique de la diode $I = f(V)$ où V est la différence de potentiel aux bornes de la diode et I, l'intensité du courant qui la traverse (schéma ci-dessous). Commencer par faire varier la valeur de la tension par pas de 0,1 V. Une fois que le courant augmente sensiblement, il est préférable de faire varier la tension de sorte d'avoir des mesures é des intervalles réguliers de valeurs du courant (1 mA, par exemple). **Il est recommandé de ne pas dépasser une intensité de 10 mA**.



– Faire le graphique de I en fonction de V. Les valeurs de V seront environ comprises entre -1 V et + 1 V. La valeur maximale de V sera celle correspondant é un passage de courant de 10 mA dans le sens direct. Les valeurs négatives de la tension correspondent á un changement de polarité. *On s'attend dans ce cas á ce que le courant ne passe plus du tout.* Est-ce bien ce qui est observé ?

4.7 Étude de l'effet de la résistance interne d'un générateur

– Réaliser le circuit ci-dessous avec la pile et la résistance R_1. Mesurer la tension V au V-mètre et le courant I à l'A-mètre. Faire de même en remplaçant R_1 par R_2, et puis par R_3. Porter ces 3 points sur un graphique V en fonction de I.



- Les points obtenus se placent-ils sur une droite ?
- La valeur extrapolée à $I = 0$ correspond-elle à la valeur V_E de la pile mesurée directement à l'aide du V-mètre ? Est-ce normal ?
- Estimer la résistance interne de la pile, R_i, à l'aide du graphique (cf. introduction à la manipulation).

NB : La résistance interne de la pile utilisée ici est anormalement élevée, elle ne vaut d'ordinaire que quelques ohms.

5 Rappels théoriques

5.1 Lois d'association de résistances

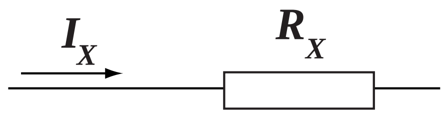
$$\text{En série :} \qquad R_{Total} = R_1 + R_2 + ...$$

$$\text{En parallèle :} \qquad \frac{1}{R_{Total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + ...$$

5.2 Résistances internes des instruments

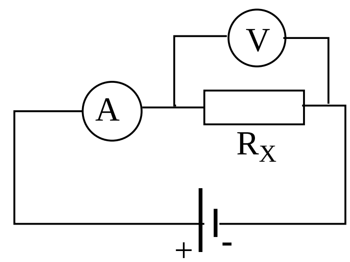
L'introduction d'un appareil de mesure perturbe toujours un circuit : un A-mètre (**toujours placé en série**) possède une résistance interne $R_A \neq 0$ alors qu'elle devrait idéalement être nulle ; un V-mètre (**toujours placé en parallèle**) possède une résistance interne R_V très grande mais finie, alors qu'idéalement elle devrait être infinie. La résistance interne associée à chaque fonction du multimètre dépend généralement de l'échelle utilisée. Il faut donc toujours être conscient des perturbations potentielles liées à l'introduction d'appareils de mesure dans le circuit.

On peut estimer la résistance inconnue d'un élément X par la relation $R_X = V_X/I_X$ où V_X est la tension aux bornes de X et I_X le courant qui le traverse (voir schéma)



En pratique, on a le choix entre les deux circuits ci-dessous (courte et longue dérivation) :

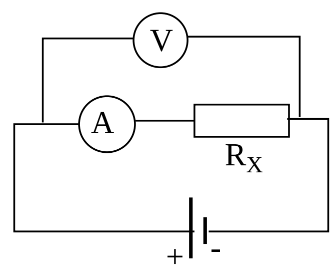
a) **Courte dérivation**



$$V_{\text{lu}} = V_X$$
$$I_{\text{lu}} = I_X + I_V$$
$$\text{avec} \qquad I_V = V_{\text{lu}}/R_V$$

où R_V est la résistance interne du voltmètre.

b) **Longue dérivation**



$$I_{\text{lu}} = I_X$$
$$V_{\text{lu}} = V_A + V_X$$
$$\text{avec} \qquad V_A = I_{\text{lu}} R_A$$

où R_A est la résistance interne de l'ampèremètre.

En pratique, il arrive souvent que l'un des deux montages convienne mieux que l'autre car les corrections liées à la non-idéalité des appareils de mesure (rappelées ci-dessus) y seront nettement plus faibles, voire négligeables. Par exemple : courte dérivation lorsque $R_X << R_V$ et longue dérivation quand $R_X \simeq R_V$.

5.3 Courbe caractéristique d'un élément

On appelle "caractéristique" d'un élément électrique la relation entre le courant I_X traversant cet élément X et la tension V_X entre ses bornes, relation exprimée éventuellement sous forme d'un graphe. Les mesures combinées de courant (A-mètre) et tension (V-mètre) lorsque l'élément est inclus dans un circuit alimenté par une tension continue variable permettent de déterminer cette caractéristique expérimentalement.

La loi d'Ohm prévoit une relation linéaire entre courant et tension :

$$I = \frac{V}{R},$$

où R est la résistance de l'élément. Cette loi est, en fait, un cas particulier mais on constate expérimentalement qu'elle s'applique é un grand nombre de matériaux : les métaux ou les solutions ioniques par exemple.

En toute généralité, le courant peut être une fonction quelconque, non-linéaire de la tension $I = f(V)$.

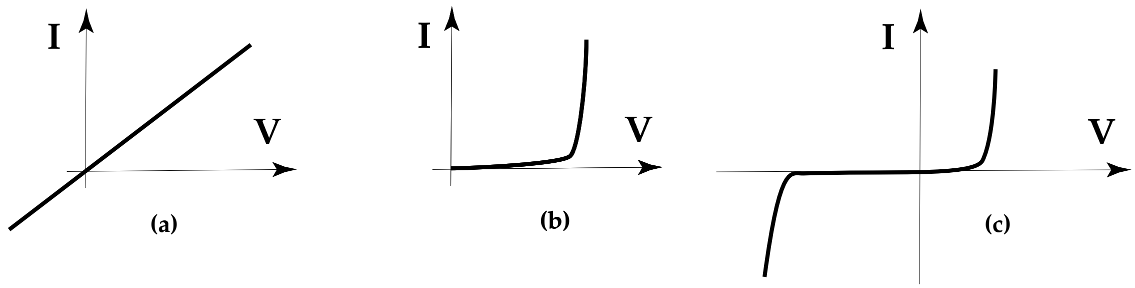
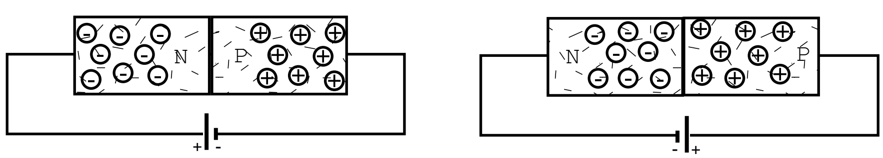


FIG. 1 – *Dans le cas (a), la loi d'Ohm est vérifiée. Les cas (b) et (c), qui schématisent respectivement les caractéristiques des diodes semi-conductrice et Zener, le courant n'est pas proportionnel é la tension.*

5.4 La diode à semi-conducteurs

Elle est formée par la jonction de deux semi-conducteurs, respectivement de type P (pour charges mobiles positives) et N (charges mobiles négatives). Les semi-conducteurs sont des matériaux ayant une conductivité intermédiaire, entre celle des métaux conducteurs et des isolants. Le mécanisme suivant explique le fonctionnement de la diode. Lorsqu'on connecte le semiconducteur de type N à la borne positive et le semiconducteur de type P à la borne négative, les charges mobiles sont attirées vers les bornes de la diode et s'éloignent de la jonction. Aucun courant ne peut effectivement passer. Dans le cas contraire, les charges mobiles sont repoussées vers la jonction où elles se neutralisent, ce qui permet à un courant électrique de passer.



La diode laisse donc passer le courant dans un seul sens. Elle est non seulement asymétrique mais la réponse $I = f(V)$ est fortement non-linéaire : au-delé d'un seuil, le courant qui passe augmente trés rapidement avec la tension (cf. Fig 1 (b)). Pour une tension basse, les porteurs de charge ne parviennent pas é traverser la jonction : les électrons sont repoussées par les charges fixes négatives du semi-conducteur de type P, et vice-versa de l'autre côté de la jonction pour les charges mobiles positives. A une valeur critique de la tension, qui correspond grossiérement é l'énergie moyenne é fournir aux électrons pour franchir la jonction, la diode devient bonne conductrice et l'intensité du courant augmente fortement avec la tension.

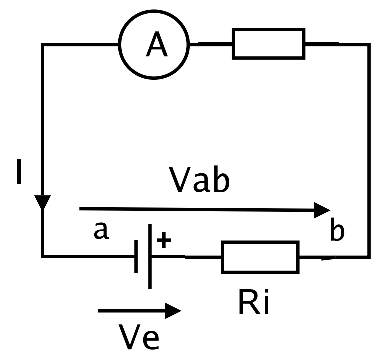
Dans un circuit, on représente une diode par le symbole  qui indique bien que la diode ne laisse passer le courant que dans un sens, le sens direct. *A vrai dire, si l'on augmente la tension du côté N de la diode, on atteint des valeurs où un courant important passe dans le sens inverse. Pour une* *diode ordinaire, cette tension est appelée tension de claquage car le passage du courant s'accompagne d'une dissipation de chaleur qui endommage la diode.*

5.5 Résistance interne d'un générateur

De façon générale, un générateur est caractérisé non seulement par sa force électromotrice (FEM) V_e mais aussi par sa résistance interne R_i. Lorsqu'il débite un courant I, la tension entre ses bornes V_{ab} est donnée par

$$V_{ab} = V_e - IR_i.$$

Elle diminue donc linéairement avec I croissant.



2 Manipulation E2 - Potentiel et champ électriques, densité de courant, conductivité

1 But

1. Mesure du potentiel électrique généré par deux électrodes.
2. Estimation du champ électrique.
3. Densité de courant électrique et conductivité électrique.

2 Appareillage

- Une cuve remplie d'eau.
- Electrodes de formes variées.
- Un boîtier contenant une pile.
- Deux multimètres ou un multimètre et un second emprunté temporairement.
- Un fil de mesure avec une fiche banane non protégée.
- Trois feuilles de papier millimétré et un transparent quadrillé.
- **Attention : avant de préparer la manipulation, assurez-vous de vous trouver sur une table sans prise électrique du réseau 220 V.**

3 Travail à effectuer

Les mesures que vous allez faire s'interprètent à partir de la conservation du courant électrique et non par les lois de l'électrostatique. Pour bien comprendre la différence, relisez l'introduction théorique.

3.1 Préparation du bassin

Placez sous le bassin une feuille millimétrée (le transparent en plastique). Remplissez le bassin d'une hauteur de 1 cm d'eau.

Connectez le fil noir (borne COM) du multimètre à la borne noire de la pile, et connectez le fil muni de la fiche banane non protégée à la borne V. Cette fiche servira de sonde pour mesurer la tension dans le bassin.

Verifiez que les électrodes ne sont pas oxydées. Si elles le sont, nettoyez-les avec du papier de verre. Connectez une électrode à chaque borne de la pile et posez-les dans l'eau. Commencez par les deux électrodes planes parallèles.

3.2 Procédure à suivre pour le tracé des courbes équipotentielles

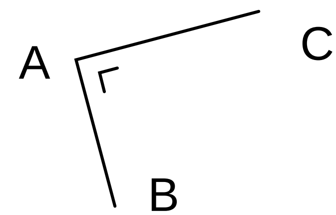
Vous allez dans la suite du laboratoire tracer des courbes de potentiel égal (équipotentielles) dans le bassin. Voici la procédure :

1. Reportez la disposition des électrodes sur votre papier millimétré.
2. Avec la sonde, mesurez la gamme de tensions accessible dans le bassin.

3. Choisissez une valeur dans cette gamme de tensions.
4. Repérez avec la sonde un point à ce potentiel. Reportez alors les coordonnées de la sonde sur une feuille de papier millimétré.
5. De la même façon, prenez d'autres points jusqu'à obtention d'une courbe équipotentielle la plus étendue possible.
6. Répétez les points 3. et 4. pour cinq valeurs de tension dans la gamme accessible.

3.3 Estimation du champ électrique

Pour estimer le champ électrique en un point dans le bassin, on peut estimer ses composantes selon deux directions perpendiculaires. Pour cela, mesurez la différence de potentiel entre le point de référence A et deux points B et C de sorte que l'angle $\widehat{BAC}$ soit un angle droit. Si on appelle V_A, V_B et V_C les valeurs de la tension en A, B et C, le champ électrique est estimé par :



$$\vec{E} = -\frac{V_B - V_A}{|AB|}\ \vec{1}_{AB} - \frac{V_C - V_A}{|AC|}\ \vec{1}_{AC}.$$

3.4 Réglage

Il faut faire attention à bien tenir la sonde verticale pendant les mesures.

Les électrodes ne doivent pas être oxydées avant de commencer la manipulation. Demandez du papier de verre si nécessaire.

3.5 Electrodes planes

La première mesure consiste à placer deux électrodes planes dans le bassin.

Branchez ces électrodes comme indiqué sur le schéma. Ajoutez un ampèremètre dans le circuit afin de mesurer le courant total fourni par la pile.

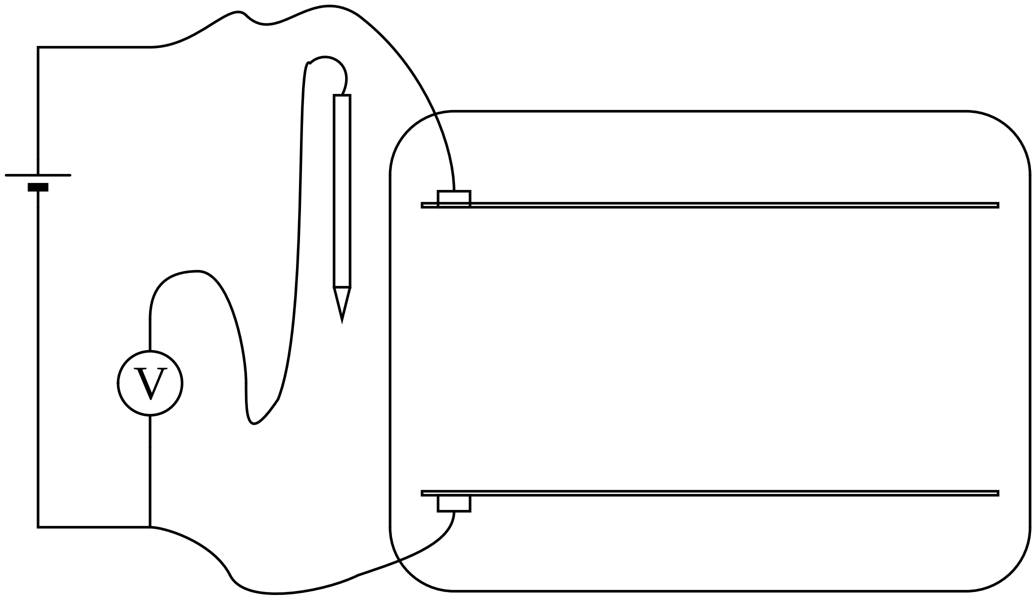
♣ Effectuez le tracé des équipotentielles pour cinq valeurs de tension bien choisies.

♣ Discutez l'allure des équipotentielles au voisinage des électrodes.

♣ Observez le comportement du potentiel au voisinage de l'électrode négative.

♣ Estimez le vecteur champ électrique en trois ou quatre points du bassin et tracez-le sur votre feuille. Comparez le champ avec une estimation théorique (norme et direction) et discutez.

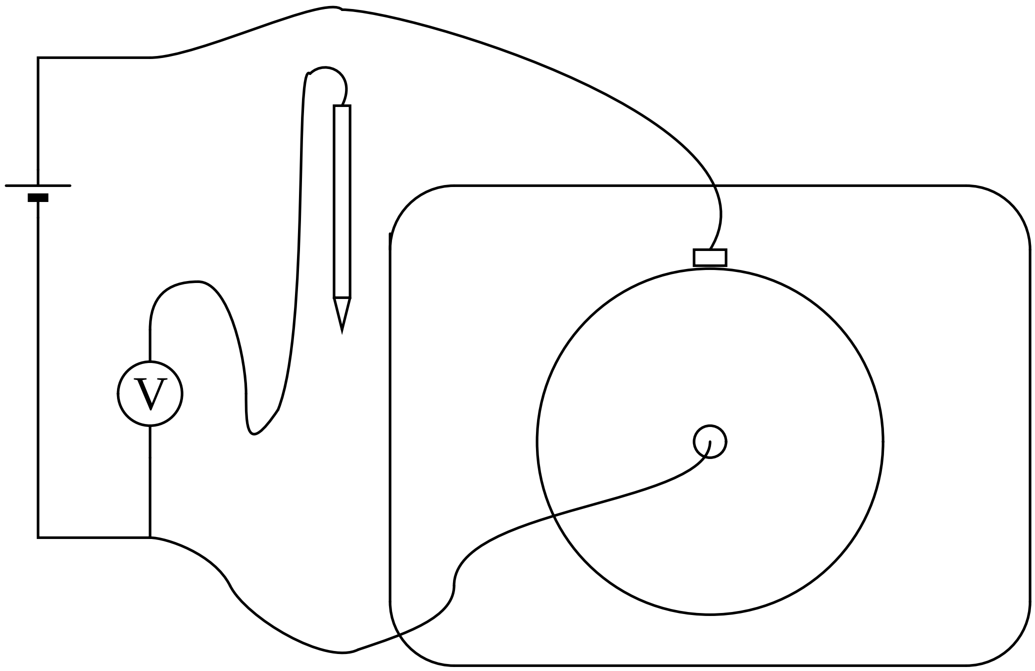
♣ Notez la valeur du courant total qui circule dans le bassin et estimez la résistance équivalente R_1 du système. Choisissez et justifiez la gamme de mesures de l'ampèremètre de manière à ne pas perturber la mesure (essayez différentes gammes de mesure et au besoin, refaites la mesure des resistances internes de l'ampèremètre). Ajoutez 5 mm d'eau. La couche d'eau ajoutée constitue une résistance R_2 en parallèle avec R_1 dans laquelle le champ électrique peut être considéré comme homogène dans l'épaisseur de la couche. Déduisez R_2 de l'augmentation du courant. Estimez la conductivité électrique de l'eau (voir rappel théorique). Le voltmètre dont vous disposez convient-il pour ces mesures ?



3.6 Electrodes concentriques

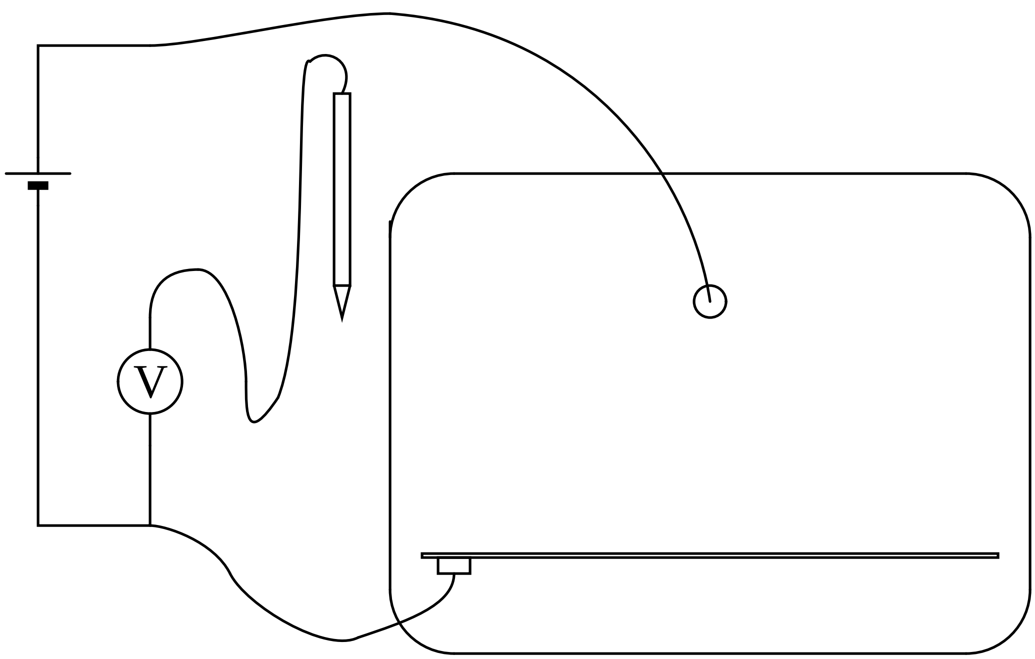
Mesurez la tension le long d'un rayon dans une géométrie circulaire (voir schéma ci-dessous).

- ♣ Prenez, le long d'un rayon, une dizaine de mesures de la tension et faites le graphe de V en fonction de r et de $ln(r)$.
- ♣ Discutez la symétrie du potentiel et du champ électrique.
- ♣ Estimez le champ électrique à deux distances du centre. Quelle est l'allure attendue du champ en fonction du rayon si vous supposez la conductivité électrique constante entre les deux électrodes ? Remarquez pour cela que le courant total qui traverse une section cylindrique à distance r de l'électrode centrale est constant. Déduisez-en l'allure attendue de V et comparez à votre graphique.



3.7 Electrode plane et électrode ponctuelle

♣ Suivez quelques équipotentielles dans le bassin à l'aide du voltmètre et de la sonde. Reportez-les sur papier millimétré et discutez-en l'allure.



4 Rappel théorique

Le potentiel électrique est l'énergie potentielle électrique par unité de charge, c'est-à-dire le travail nécessaire pour déplacer une charge électrique d'un point à l'autre du champ électrique par unité de charge déplacée :

$$V = -\frac{\int Q\vec{E}.\vec{dl}}{Q} = -\int \vec{E}.\vec{dl}. \tag{1}$$

Le champ électrique dans notre bassin plan est donné par la variation du potentiel électrique dans la direction où celui-ci varie le plus vite :

$$\vec{E}(x,y) = -(\vec{1}_x \frac{\partial V}{\partial x} + \vec{1}_y \frac{\partial V}{\partial y}). \tag{2}$$

Le champ électrique et le courant de charges locaux qui s'établissent dans le bassin sont liés par la relation suivante :

$$\vec{i}(x,y) = \sigma(x,y)\vec{E}(x,y). \tag{3}$$

où $\vec{i}(x,y)$ est la densité de courant au point (x,y), c'est-à-dire l'intensité du courant de charges par unité de surface en ce point, et $\sigma(x,y)$ est la conductivité de l'eau. La conductivité peut changer en différents points du bassin.

En situation stationnaire, il n'y a pas d'accumulation de charge dans le dispositif. La densité de courant locale est constante dans le temps. Le courant total qui traverse une section conductrice est conservé (continuité) :

$$i.S = I_{total} = \text{constante}.$$

La surface S est la section de la région conductrice, et non une surface fermée comme dans le théorème de Gauss de l'électrostatique.

Dans un conducteur ohmique de longueur L et de section S traversé par un courant homogène, la résistance électrique est donnée par : $R = \frac{L}{\sigma S}$. On peut dès lors estimer la conductivité électrique à partir du courant qui circule entre deux électrodes planes parallèles distantes de L et soumises à une différence de potentiel donné.

Manipulation E3+4 - Introduction à l'oscilloscope et étude d'un circuit RC

1 But

1. Observation de signaux à l'oscilloscope
2. Etude de la charge et décharge d'un condensateur
3. Impédance et déphasage dans un circuit RC

2 Appareillage

- Générateurs PM5132
- Oscilloscope Tektronix TDS 210, 1002 et 2002
- Une pile
- Une planchette multi-R (planchette de résistances allant de 47 kΩ à 100 Ω)
- Une planchette multi-C (planchette de capacités allant de 470 nF à 4,7 nF)

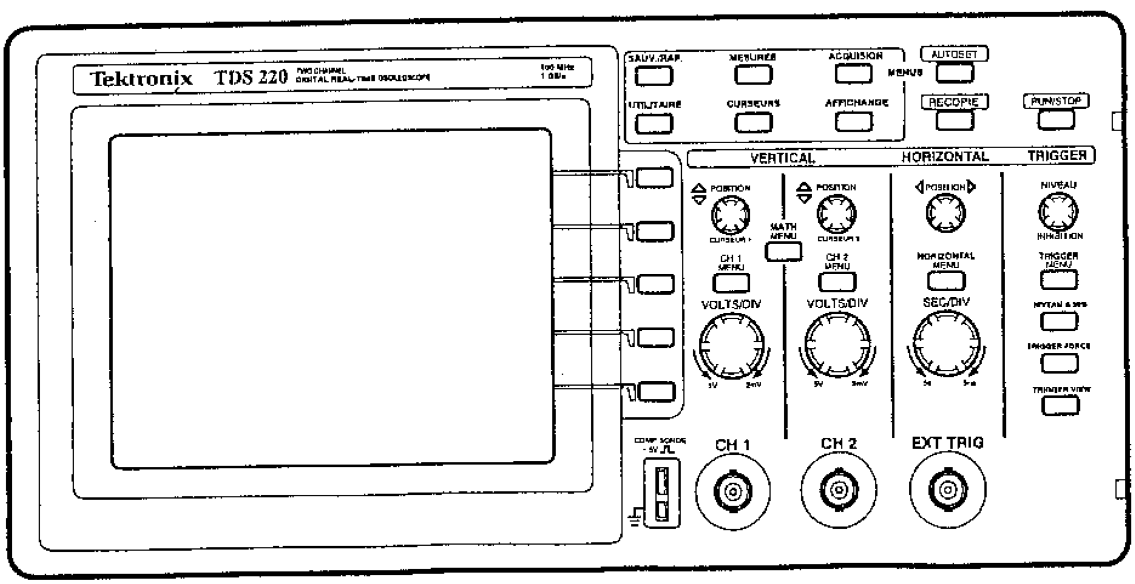
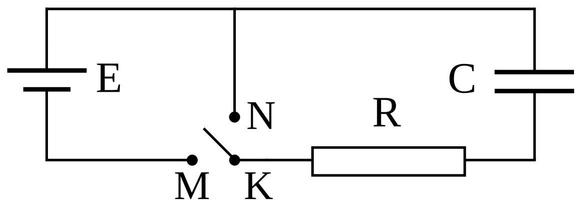


FIG. 1 – face avant de l'oscilloscope

3 Rappels théoriques

3.1 Charge et décharge d'un condensateur

Soit le circuit suivant :



Interrupteur K sur la position M

$$V_E = V_R(t) + V_C(t) \qquad \text{avec} \qquad V_R = RI \quad \text{et} \quad V_C = \frac{Q}{C}.$$

On s'intéresse à V_C. Exprimant V_R en terme de V_C :

$$V_R = RI = R\frac{dQ}{dt} = RC\frac{dV_C}{dt}$$

on obtient l'équation :

$$V_E = RC\frac{dV_C}{dt} + V_C,$$

dont la solution générale s'écrit :

$$V_C = V_E + a\ e^{-\frac{t}{RC}},$$

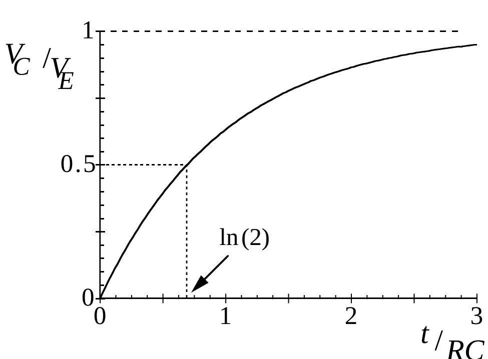
où la constante a dépend des conditions initiales.

- Charge, condition initiale : $t = 0$, $V_C = 0$:

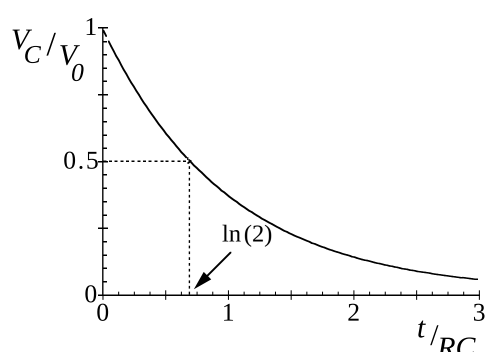
$$V_C = V_E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}).$$

- Décharge d'un condensateur dans une résistance : interrupteur K sur la position N. $V_E = 0$, condition initiale : $t = 0$, $V_C = V_o$:

$$V_C = V_o\ e^{-\frac{t}{RC}}$$

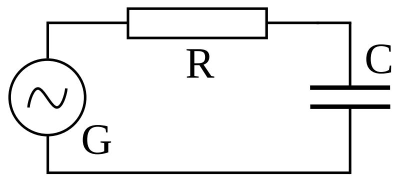


Charge



Décharge

3.2 Circuit RC série en courant alternatif



Soit un circuit RC (en série) soumis à une tension sinusoïdale $V_G(t)$:

$$V_G(t) = V_R + V_C \qquad \text{où} \qquad V_R = RI, \qquad V_C = \frac{Q}{C} \quad \text{et} \quad I = \frac{dQ}{dt}.$$

En dérivant par rapport à t, on obtient pour I l'équation différentielle :

$$\frac{dV_G}{dt} = R\frac{dI}{dt} + \frac{1}{C}I.$$

Si $V_G(t) = V_o \cos(\omega t)$, on peut montrer que la solution stationnaire est du type :

$$I(t) = I_o \cos(\omega t - \varphi) \qquad \text{où} \qquad I_o = \frac{V_o}{Z}, \qquad Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \qquad X = -\frac{1}{\omega C},$$

$$\text{et} \qquad \tan\varphi = \frac{X}{R}.$$

Z est ce qu'on appelle l'impédance, elle généralise la notion de résistance. La tension aux bornes de la résistance :

$$V_R = RI = \frac{R}{Z} V_o \cos(\omega t - \varphi)$$

est en phase avec le courant circulant dans le circuit, et sa mesure permet de déterminer le déphasage de ce courant avec la tension d'alimentation.

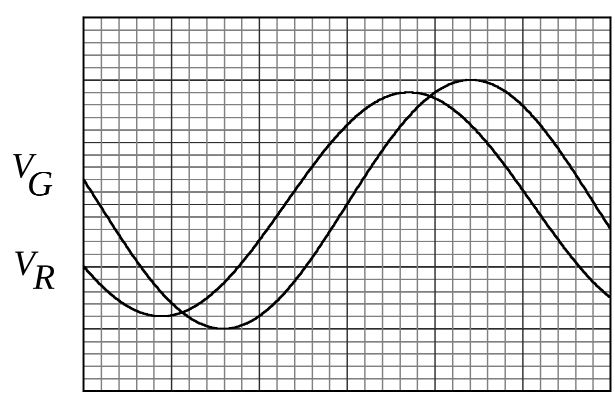


FIG. 2 – Dans ce graphique, le courant circulant dans le circuit (mesuré par V_R) est en avance sur la tension du générateur de $\pi/4$. Comme, suivant la définition, $I(t) = I_o \cos(\omega t - \varphi)$, le déphasage est de $-\pi/4$.

3.3 Introduction historique au principe de l'oscilloscope cathodique

L'oscilloscope cathodique est essentiellement un canon à électrons émis par une cathode chauffée et accélérés par une anode grille percée d'un trou. Le faisceau d'électrons ainsi obtenu passe ensuite entre deux paires de plaques. Il est dévié latéralement (selon x) ou verticalement (selon y) dès qu'une différence de potentiel est appliquée à la paire de plaques correspondantes.

Les déviations du faisceau observées sur l'écran sont proportionnelles aux différences de potentiel correspondantes. Le rapport entre déviations du spot sur l'écran (exprimées en divisions (div) de 1 cm) et différences de potentiel à l'entrée de l'instrument (volt) est fonction du choix d'échelle "volt/div" adopté.

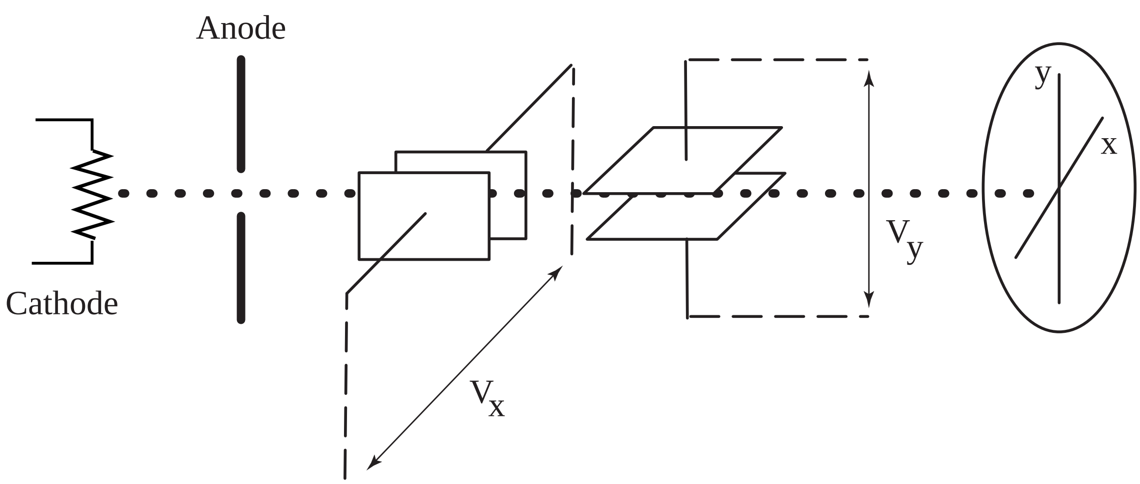


FIG. 3 – Schéma de l'oscilloscope cathodique

Utilisation de l'oscilloscope en régime de balayage

Soit $V(t)$ un signal périodique quelconque que l'on désire observer. En régime balayage, le signal $V(t)$ est envoyé d'office aux bornes des plaques de déflection verticale. Par ailleurs, une tension augmentant linéairement avec le temps, générée de manière interne par l'oscilloscope, est prise comme source de déflexion horizontale du spot. Les déflexions étant proportionnelles aux tensions, les coordonnées cartésiennes du spot sont

$$x(t) = ct \qquad\qquad y(t) \propto V(t)$$

où c est une constante. L'équation de la trajectoire parcourue par le spot s'obtient en éliminant t entre les deux équations, ce qui donne

$$y \propto V(x/c)$$

Il en résulte que la forme de la trajectoire $y = f(x)$ dessinée sur l'écran est en fait aussi la forme du signal $V(t)$ dans le temps, moyennant un changement d'échelle transformant l'abscisse x en $t = x/c$. Le facteur d'échelle c est en fait la vitesse latérale du spot, exprimée habituellement en div/s.

Ce principe est exploité pour le mode de "balayage" de l'oscilloscope car le mouvement latéral du spot à vitesse constante de gauche à droite de l'écran est répété continuellement suite à un retour quasi instantané du spot à gauche de l'écran en fin de course. Grâce à un mécanisme de synchronisation, la même trajectoire $y \propto V(x/c)$ du spot se répète et donne lieu dès lors à une image stable sur l'écran, donc facile à analyser. Du point de vue pratique, l'utilisateur fixe la vitesse de balayage (et donc l'échelle de temps) à l'aide du bouton time/div correspondant en fait à c^{-1} exprimé en s/div.

Utilisation de l'oscilloscope en simple ou double trace

L'oscilloscope utilisé est de type "double trace", c.à.d. que le dispositif de balayage permet de visualiser "simultanément" le comportement temporel de deux signaux différents $V_1(t)$ et $V_2(t)$ branchés sur les canaux distincts A et B.

En général, les deux signaux à observer, $V_1(t)$ et $V_2(t)$ sont de fréquences arbitraires et si on utilise un des deux signaux pour piloter le balayage, seul ce dernier signal laissera une image stable. L'autre signal, n'étant pas synchronisé au balayage, donnera une image mobile ou instable.

Lorsque les deux signaux à observer, $V_1(t)$ et $V_2(t)$ sont de fréquences égales ou telles que leur rapport est égal à un rapport de deux nombres entiers, et que l'on utilise l'un des signaux pour piloter le balayage, on obtient une image stable des deux signaux.

3.4 Déphasage entre deux signaux de même fréquence

Soit deux signaux de même fréquence, $V_x(t)$ et $V_y(t)$ tel que V_y est en retard de phase par rapport à V_x :

$$V_x \equiv x = A\cos(\omega t) \qquad ; \qquad V_y \equiv y = B\cos(\omega t - \phi).$$

Le déphasage ϕ se manifeste par un décalage temporel $\Delta t = \frac{\phi}{\omega} = \frac{\phi}{2\pi} \times T$, visible à l'oscilloscope en mode double trace comme montré à la Fig.4. NB : $T = \frac{2\pi}{\omega}$ est la période du signal.

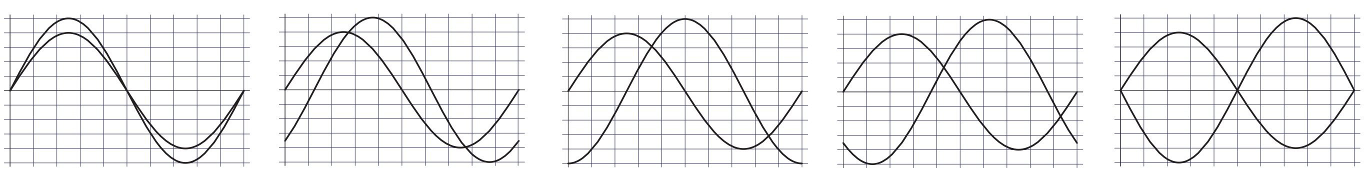


FIG. 4 – Composition en mode balayage de deux signaux sinusoïdaux de même fréquence pour diverses valeurs de l'angle de déphasage ϕ, respectivement $\phi = 0,\ \pi/4,\ \pi/2,\ 3\pi/4,\ \pi$.

Notez que lorsque le déphasage est de $\pi/2$ ($\sin\phi = 1,\ \cos\phi = 0$), alors

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1$$

ce qui est l'équation d'une ellipse rapportée à ces axes.

4 Mode d'emploi de l'oscilloscope

Mise en route

- La touche Marche/Arrêt se trouve sur le dessus de l'appareil, à gauche.
- Les signaux à étudier s'introduisent dans **CH1** ou **CH2**, au moyen d'un connecteur BNC.
- En enfonçant la touche **AUTOSET**, toute une série de réglages s'opèrent automatiquement, ce qui permet d'observer le signal sur l'écran en mode de balayage, c'est-à-dire qu'on observe l'amplitude de la tension V (sur l'axe vertical), en fonction du temps t (sur l'axe horizontal)

Description de l'écran

L'écran n'affiche pas seulement les signaux ; il fournit également de nombreux détails à leur sujet ainsi que sur les paramètres de contrôle de l'instrument (voir Fig.5).

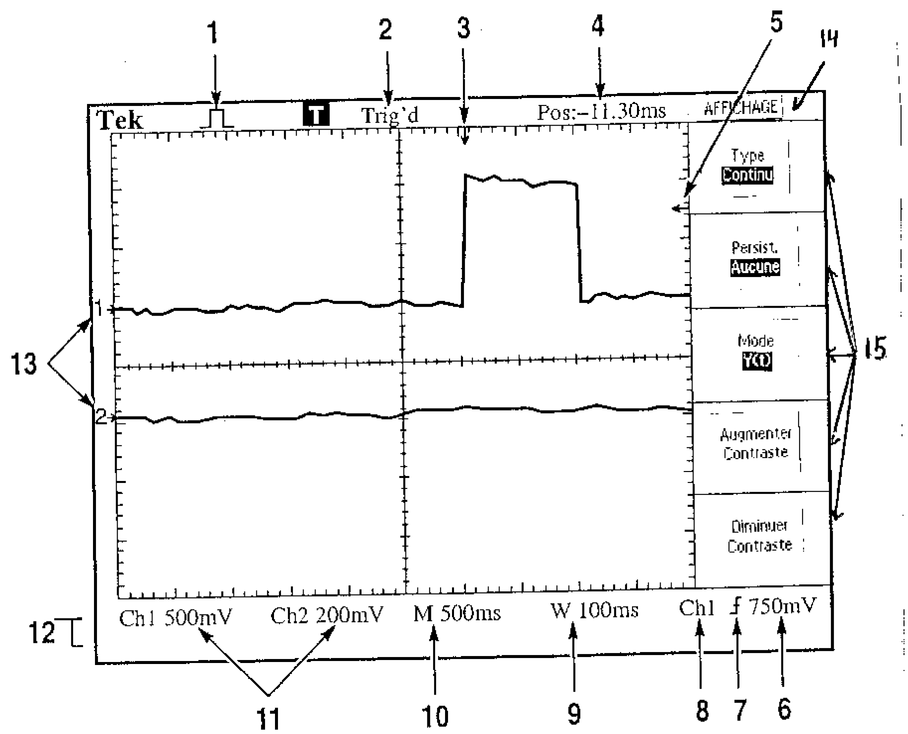


FIG. 5 – Ecran de l'oscilloscope

Ceux qui vous seront le plus utile sont les suivants :

- **13 :** Pour chacune des deux entrées, **CH1** et **CH2** , la flèche indique la position du zéro Volt ; elle se règle à l'aide de la commande **POSITION CURSOR1** ou **CURSOR2**, dans **VERTICAL**.
- **3 :** La flèche indique l'instant du déclenchement ; il se règle à l'aide de la commande **HORIZONTAL POSITION**.
- **4 :** La valeur affichée indique la différence de temps entre le centre du réticule et la position de déclenchement horizontale ; le centre de l'écran correspond au zéro.

- **5 :** La flèche indique l'amplitude à laquelle se produit le déclenchement, autrement dit, le niveau de déclenchement.
- **6 :** Cet indicateur donne la valeur numérique du niveau de déclenchement.
- **7 :** L'icône indique le type de déclenchement sélectionné, par exemple, sur le front montant (_/‾) ou sur le front descendant (‾_).
- **8 :** Cet indicateur montre la source de déclenchement utilisée par exemple, **CH1** ou **CH2**.
- **10 :** Cet indicateur montre l'échelle de temps utilisée sur l'axe horizontal ; elle se règle au moyen du bouton **SEC/DIV**.
- **11 :** Ces indicateurs montrent l'échelle utilisée sur l'axe vertical pour chacun des deux signaux ; elle se règle au moyen du bouton **VOLTS/DIV**.
- **14 :** Titre du menu sélectionné.
- **15 :** Blocs menu du menu sélectionné avec éventuellement, renforcé en noir, le paramètre sélectionné.

Le système de menus : L'accès aux fonctions spécialisées est réalisé grâce à un système de menus. Quand on appuie sur un bouton de menu, le titre du menu correspondant s'affiche dans le coin supérieur droit de l'écran. Il peut y avoir jusqu'à cinq blocs de menus sous le titre du menu. A droite de chaque bloc de menu se trouve un bouton qui peut être utilisé pour modifier les paramètres du menu.

Quelques touches qui vous seront utiles :

- **AUTOSET :** Réglage automatique du signal.
- **CURSOR :** Affiche les curseurs et leur menu, permet leur déplacement à l'aide des boutons **POSITION VERTICAL** et affiche les mesures correspondantes.
- **DISPLAY :** Affiche le menu "affichage" qui permet de modifier l'apparence de l'affichage : type, persistance, mode balayage ou mode XY, contraste.
- **MATH :** Affiche le menu correspondant qui permet de soustraire et d'additionner les deux signaux.
- **MEASURE :** Affiche le menu qui permet d'effectuer des mesure automatiques. Choisir le signal à mesurer à l'aide du sous-menu **SOURCE** et le type de mesures à effectuer à l'aide du sous-menu **TYPE** (fréquence, période, tension moyenne, tension pic-à-pic (**C-C**), tension efficace)
- **CH1 et CH2 :** Permet de sélectionner notamment le mode de couplage du signal à l'entrée (AC ou DC) et de corriger pour le facteur d'atténuation de la sonde.
- **TRIGGER :** permet de sélectionner la source du trigger, son mode, la pente, le couplage, etc......
- **UTILITY :** permet, entre autres, de sélectionner la langue de l'affichage.

5 Travail à effectuer

5.1 Familiarisation avec l'oscilloscope

Brancher l'oscilloscope sur le secteur. Mettre en circuit à l'aide du bouton **POWER** au-dessus du boîtier. Appuyer sur une touche quelconque.

Signal Constant

Connecter la pile sur le canal **CH1** de l'oscilloscope, appuyer sur **AUTOSET**. Si vous n'observez rien vérifiez dans le menu **CH1** si vous êtes en mode **CC** ou encore **DC** .

Mode Balayage (DISPLAY Y(t))

1. Jouer avec le changement d'échelle vertical **VOLTS/DIV**. Observer le changement d'échelle (cf. 11. Fig. 5). Estimer la tension de la pile.
2. Faire usage des curseurs en appuyant sur **CURSOR**. Sélectionner la source **CH1** (cf. 15 Fig. 5), comme type de curseur : "tension". Faire varier les curseurs 1 et 2 (**POSITION CURSOR 1 & 2**), observer les valeurs des positions des deux curseurs et de leur différence (dans 15 Fig. 5). Estimer la tension de la pile.
3. Aller dans le menu **MEASURE**, sélectionner la source **CH1** et le type de mesure tension moyenne. Noter la mesure.

Inverser les bornes de la pile. Observer.

Signal sinusoïdal

Connectez sur le canal **CH1** de l'oscilloscope un signal sinusoïdal fourni par le générateur PM5132 (**OUTPUT**), signal n'ayant pas de composante continue (bouton **DC OFF SET** sur zéro) et ayant des caractéristiques fixées (au choix), à savoir une amplitude pp(pic à pic)(bouton **AMPLITUDE**) et une fréquence (réglée par le cadran circulaire, la touche **FREQUENCY** Hz sur un facteur multiplicatif et le bouton **FREQ OFFSET** sur zéro).

Mode XY

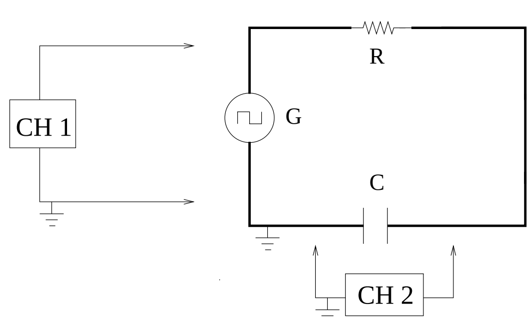
- Commencer avec une fréquence de 1Hz sur le **CH1**. Se Placer dans le mode **DISPLAY** mode **XY**. Observer que le signal provoque une déviation horizontale du spot, que la 'longueur' du segment varie selon l'amplitude du signal, et que la période du balayage correspond à environ 1 seconde.
- Augmenter graduellement la fréquence pour observer l'effet.
- Recommencer en branchant le signal sur **CH2**. Observer la déviation verticale.

Mode Balayage (DISPLAY Y(t))

- Appliquez un signal de fréquence 1Hz sur le **CH1**. Observez. Augmentez la fréquence et observez.

5.2 Charge et décharge d'un condensateur

Le montage proposé est composé d'un générateur G, d'une résistance R et d'un condensateur C mis en série.



La tension d'alimentation (observée sur **CH1**) de période T, en forme de créneaux, fait varier périodiquement les charges portées par les armatures du condensateur. On réalise ainsi une succession de charges et décharges du condensateur (voir fig. 6). Les courbes obtenues sur le **CH2** sont des exponentielles, croissantes ou décroissantes, de temps caractéristique $\tau = RC$.
Selon les valeurs relatives de T et de τ, les courbes de charge et de décharge observées peuvent s'approcher de la saturation ($T >> \tau$) ou en demeurer éloignées ($T << \tau$).

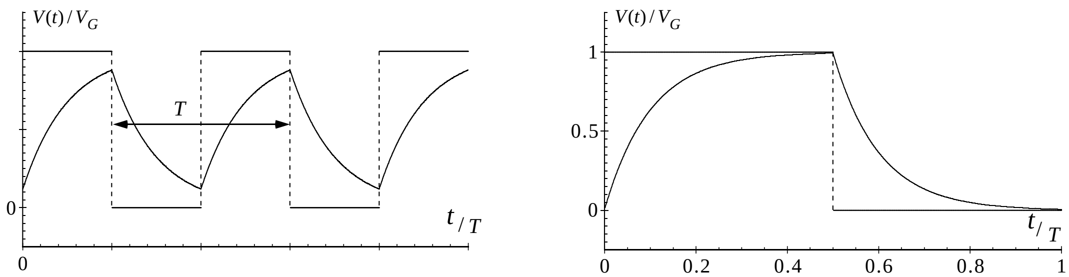


FIG. 6 – Les graphiques représentent les courbes de charge et de décharge du condensateur superposées à la tension d'alimentation de période T, en forme de créneaux. A droite, $T << \tau$, à gauche, $T >> \tau$.

- Réalisez le montage avec une résistance R de 10 kΩ et un condensateur C de 10 nF.
  Connectez le **CH1** de l'oscilloscope aux bornes du générateur et sélectionnez un signal à créneaux positifs d'une fréquence de 500 Hz et d'une amplitude de 6 V. (Si vous observez un signal carré et non pas un signal à créneaux positifs sur l'écran de l'oscilloscope, appuyez sur **CH1** et choisissez le mode **CC**.)
  Connectez le **CH2** aux bornes du condensateur (en veillant à raccorder les "masses" au même point du circuit). Essayez le réglage automatique de l'oscilloscope en appuyant sur **AUTOSET**. Vous devriez observer la saturation de la charge/décharge du condensateur.
- Familiarisez-vous avec les réglages manuels. Ajuster l'échelle verticale avec **VOLTS/DIV**, ainsi que l'échelle horizontale avec **SEC/DIV**. La position centrale du signal est choisie par le bouton **POSITION** de la section **VERTICAL**. Le signal apparaît stable si le déclenchement est sélectionné sur son canal dans **TRIGGER MENU - SOURCE**.
  - Dans le Mode **CURSOR** :
    1. avec des curseurs temps, estimer la période et la fréquence du signal.
    2. avec des curseurs tension, estimer la tension maximale du signal.
  - dans le mode **MEASURE** déterminer la période, fréquence, tension efficace, moyenne et pic-à-pic (**C-C**) en sélectionnant la source et les types de mesure souhaités.
- Investiguez les différentes possibilités de signaux périodiques fournis pas le générateur (en dents de scie, en crénaux, etc.).
- Retournez à un signal carré. A partir d'une portion de charge du condensateur observée sur l'écran de l'oscilloscope, estimez le temps $t_{50\%}$ nécessaire pour que la tension aux bornes du condensateur V_C arrive à 50% de la saturation (utilisez le menu **CURSOR**).
- Vérifiez que votre estimation de $t_{50\%}$ est proche de $RC \ln(2)$.

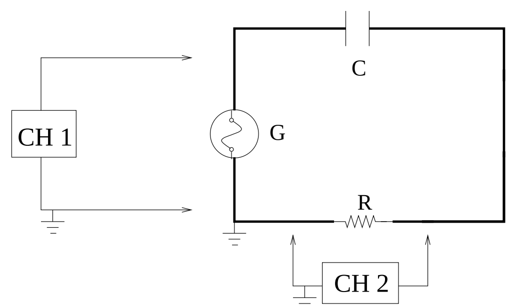
- Notez succintement dans votre cahier de laboratoire (avec dessins indicatifs) les observations que vous faites lorsque :
  – vous changez la fréquence du générateur (1000, 2000 Hz) pour le circuit RC déjà monté
  – vous changez de condensateur ou de résistance en maintenant une fréquence particulière du signal en crénaux.

5.3 Impédance et déphasage dans le circuit

Dans cette section, vous allez étudier les propriétés du circuit RC série en courant alternatif.

Mesures

- Effectuez le montage ci-dessous composé d'un générateur G, d'une résistance R de 10 kΩ et d'un condensateur C de 10 nF mis en série.



  Branchez le **CH1** de l'oscilloscope aux bornes du générateur et le **CH2** aux bornes de la résistance (en veillant à raccorder les "masses" au même point du circuit).
  Réglez au départ le générateur sur la position sinusoïdale pour obtenir une tension $V_G(t)$ de fréquence 100 Hz et d'amplitude 6 V. Réglez l'oscilloscope pour observer plusieurs périodes du signal. Si nécessaire appuyez sur **AUTOSET**.
- Mesurez l'amplitude de la tension V_R aux bornes de la résistance (utilisez le menu **MEASURE**) et le déphasage φ par rapport à la tension du générateur. Ce dernier est mesuré via l'écart temporel entre les deux signaux via le mode **CURSOR**.
- Ensuite mesurez simultanément les amplitudes de V_G, V_R (utilisez le menu **MEASURE**) et φ à l'oscilloscope pour des fréquences allant de 100 Hz à 2000 Hz par pas de 100 Hz. Prenez aussi 2 ou 3 mesures de V_G, V_R et φ, pour des fréquences allant de 4000 à 10000 Hz.

Etude du rapport $|V_R|/|V_G|$ en fonction de la fréquence

- Réalisez le graphique du rapport des amplitudes $|V_R|/|V_G|$ de V_R et de V_G en fonction de la fréquence $\nu = 1/T$. On s'attend au comportement suivant (voir rappel théorique) :

$$\frac{|V_R|}{|V_G|} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}$$

.

- Pour utiliser au mieux les résultats obtenus, les fonctions linéaires en la variable sont plus appropriées. Réalisez le graphique de

$$\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{|V_G|}{|V_R|}\right)^2 - 1}} = \omega RC$$

en fonction de ν, qui devrait être une fonction linéaire en ω avec $\omega = 2\pi\nu$.
Pour faire ce graphique, considérez seulement les valeurs obtenues pour les fréquences allant de 100 à 1000 Hz, ce sont pour les petites valeurs de la fréquence que la capacité intervient de la manière la plus significative.

- En déduire la valeur de C en utilisant la valeur de R mesurée avec un multimètre.

Etude du déphasage entre V_R et V_G en fonction de la fréquence

- Réalisez le graphique $\tan\varphi$ en fonction de $1/\nu$ pour les fréquences allant de 1000 à 2000 Hz (à partir des valeurs mesurées).
- A partir du graphique, estimez la valeur de C sachant que $\tan\varphi = -\frac{1}{\omega RC}$ (voir rappel théorique). Comparez ce résultat avec celui obtenu précédemment.