



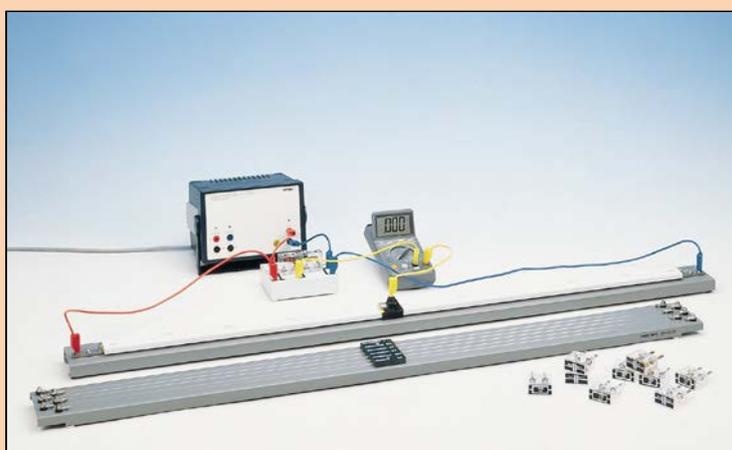
Département de physique

## La Collection TP de PHYSIQUE

### Travaux Pratiques d'ELECTRICITE



Etude d'un transformateur



Méthode du pont à fil



**Faculté des Sciences**  
**Département de Physique**



**Travaux Pratiques d'Electricité 1ère année**

Liste des séances de TP

**0. Séance d'introduction**

- 1. Mesure de résistance: Méthodes Amont-Aval (M)**
- 2. Etude d'un transformateur (M)**
- 3. Mesure de résistance: Méthodes de comparaison et d'opposition (M)**
- 4. Etude de l'oscilloscope (M)**
- 5. Charge et décharge d'un condensateur (M)**
- 6. Cuve rhéographique (M)**

**M= TP sur Matériel**



## **TP n° 0 : Séance de préparation aux TP d'électricité**

### **1. Termes associés**

Utilisation des appareils de mesure électriques, voltmètre, ampèremètre, oscilloscope, boîte de connexion, fils électriques, différents types de résistances (standard, filaire, boîte AOIP, variable...), condensateur, appareil de mesure de champ électrique, bobines multi-spires, transformateur.

### **2. Principe et objectifs**

Les travaux pratiques de physique constituent l'élément indispensable de l'étude de la physique. D'une part, on apprend les méthodes fondamentales de mesures; on apprend à faire correctement les mesures et à évaluer leurs incertitudes. D'autre part, on se familiarise avec les appareils de mesure électriques. Cette séance d'initiation ou d'introduction permettra à l'étudiant de se familiariser avec le matériel qu'il utilisera durant ces travaux pratiques d'électricité, notamment l'ampèremètre, le voltmètre, les différentes résistances, les boîtes de connexion, l'oscilloscope, le transformateur, ...etc. Il apprendra également à:

- Reconnaître les divers constituants d'un circuit électrique.
- Faire correctement des mesures de tension et de courant électriques dans un circuit.
- Utiliser un multimètre numérique : ses fonctions (voltmètre, ampèremètre, ohmmètre, capacimètre, etc.), les précautions à prendre, l'estimation de l'erreur sur la mesure.
- Vérifier expérimentalement la loi d'Ohm et les lois de Kirchhoff : loi des nœuds et loi des mailles.
- Réaliser un circuit électrique d'après un schéma.
- Visualiser une tension sur l'oscilloscope.

Et enfin, apprendre à respecter certaines mesures de sécurité (car toute manipulation "imprudente" des circuits électriques pourrait constituer un danger pour le manipulateur et pour son entourage).

### **3. Conseils généraux**

#### **3.1. Avant la séance :**

Pour être profitable, une manipulation doit avoir été préparée à l'avance par l'étude du texte de la manipulation et des paragraphes correspondants du cours. Au début de chaque séance de TP, l'enseignant procédera à une interrogation écrite brève (environ 10mn) pour évaluer la préparation de la manipulation. Il faut donc, en conséquence, que l'étudiant ait préparé à l'avance la partie

théorique du TP (titre de la manipulation, son but, théorie brève du phénomène à étudier, principe de la méthode de mesure...).

### **3.2. Pendant la séance :**

Pendant la séance, l'étudiant devra :

- a – examiner le dispositif expérimental et les appareils de mesure; se rendre compte du rôle de leurs différentes parties.
  - b – procéder à la préparation expérimentale de la manipulation (montage des dispositifs, des circuits électriques, ... etc.) en cherchant toujours à opérer dans un cadre logique.
  - c – manipuler les appareils de mesure avec la plus grande attention; n'encombrez pas votre table de travail d'objets inutiles tels que livres, cahiers ...
  - d – le dispositif expérimental comprend, dans certains TP, un circuit électrique; vérifier que votre montage correspond bien au schéma indiqué; le faire toujours contrôler par l'enseignant de TP avant de le relier à la source de tension (secteur ou pile).
  - e - noter tous les résultats de mesures obtenus sur votre feuille de réponse.
- Ces résultats doivent presque toujours être groupés dans un tableau. Inscrire les résultats au fur et à mesure qu'ils sont obtenus.
- f- bien indiquer les unités choisies; dans une colonne de résultats exprimés avec le même unité, on se contentera d'indiquer l'unité une fois pour toutes en tête de colonne.
  - g- vérifier rapidement, par quelques calculs approchés, que l'ordre de grandeur des phénomènes observés conduit à un résultat vraisemblable; cela permet de déceler les mesures défectueuses et de les refaire.
  - h- lorsque toutes les mesures sont terminées, regrouper les appareils comme ils étaient à votre arrivée; assurez-vous que la table de travail et les alentours sont aussi propres qu'au début de la séance.
  - i- compléter alors la rédaction de la feuille de réponse (tableaux de mesures, calculs et graphes sur papier millimétré, calculs d'incertitude et conclusions).

## **4. Ampèremètre et voltmètre analogiques**

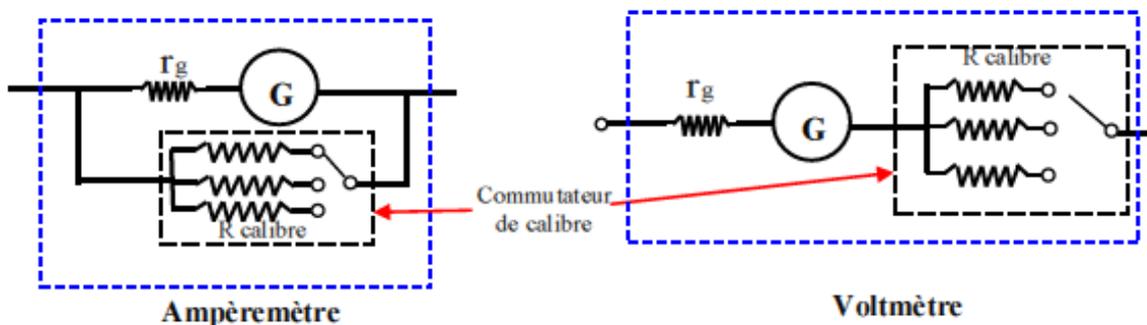
### **4.1. Utilisation:**

Les ampèremètres et voltmètres utilisés durant les séances de TP d'électricité sont en général des appareils analogiques, le plus souvent magnéto-électriques, utilisant un galvanomètre à cadre

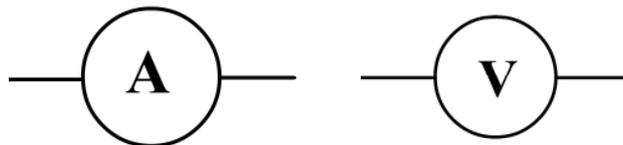
mobile (milliampèremètre) et des résistances internes qui permettent le changement de calibre de mesure (voir figure 1). Ils sont dotés d'un cadran gradué (contenant généralement deux échelles de lecture, 0-100 et 0-30), permettant la lecture de la grandeur mesurée, et d'un bouton commutateur permettant de choisir le calibre adéquat pour la mesure et le type de courant à mesurer (continu ou alternatif).

Les résistances internes  $r_i$  sont généralement de faibles valeurs dans le cas des ampèremètres (elle est nulle pour un ampèremètre idéal), alors qu'elles sont de valeurs élevées dans le cas des voltmètres (elle est infinie pour un voltmètre idéal). Les valeurs de ces résistances internes dépendent également du calibre utilisé:

- pour l'ampèremètre, elles sont données par le constructeur sur sa notice d'utilisation;



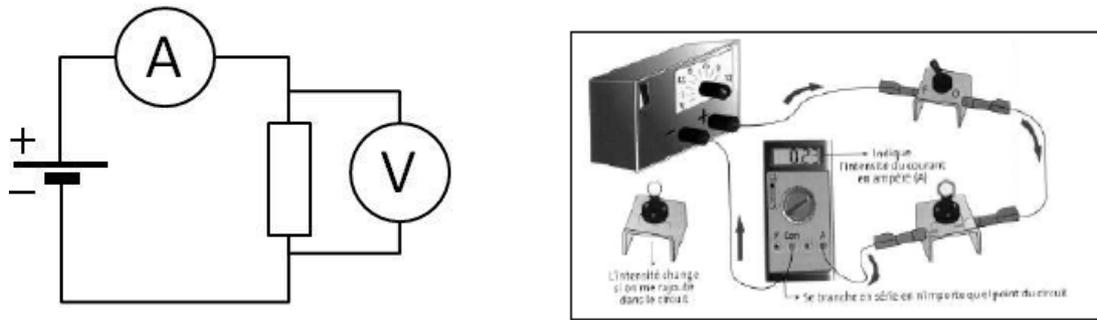
- pour le voltmètre, un nombre en  $k\Omega/V$  indiqué sur le cadran, permet de les évaluer en multipliant ce nombre par le calibre utilisé.



**Figure 1:** Représentation simplifiée d'un ampèremètre et d'un voltmètre où  $r_g$  est la résistance due à la bobine du galvanomètre et  $R_{calibre}$  celles introduites pour permettre des mesures sur plusieurs calibres. L'association de ces résistances donne la résistance interne  $r_i$ .

#### 4.2. Branchement:

Un ampèremètre se branche toujours en série dans un circuit électrique, alors qu'un voltmètre doit être branché en parallèle sur la portion de circuit dont on veut mesurer la tension (ou différence de potentiel entre deux points du circuit), comme le montre la figure 2 ci-dessous.



**Figure 2:** Mode de branchement de l'ampèremètre (1 et 2) et du voltmètre (1).

### 4.3. Lecture et choix du calibre de l'appareil:

Le choix du calibre pour une mesure correcte de la grandeur électrique (tension ou courant) doit être effectué en suivant les étapes ci-après:

- On choisit d'abord le calibre le plus élevé pour éviter tout endommagement de l'appareil,
- puis, grâce au commutateur, on le diminue jusqu'à ce que l'aiguille du cadran soit déviée sur la partie droite du cadran, sans toutefois sortir de l'échelle.
- Le calibre adéquat est celui qui est immédiatement supérieur à la valeur mesurée.
- Pour la lecture de la valeur X de la mesure (intensité de courant avec un ampèremètre ou tension avec un voltmètre), on utilise la relation:

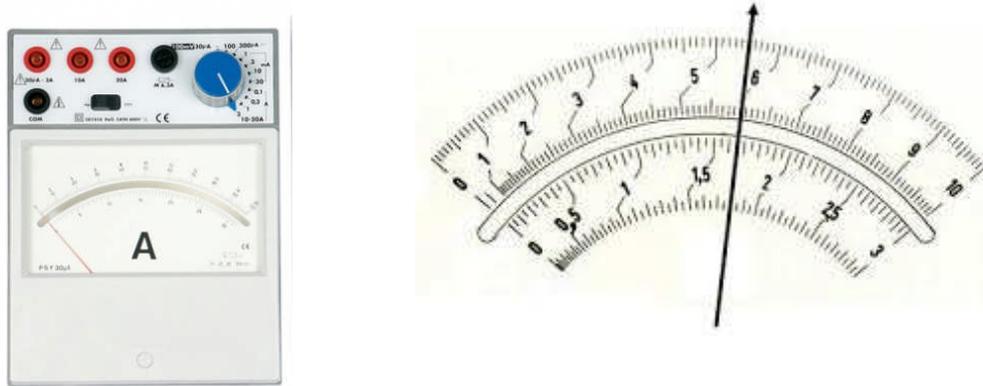
$$X = \text{lecture} \cdot \frac{\text{calibre}}{\text{échelle}}$$

Pour les appareils disponibles au laboratoire, leur échelle peut être de 100 ou de 30; afin de faciliter les calculs, on choisit l'échelle 100 pour les calibres de fraction ou de multiple de 10 (0.1, 1, 10, 100, ...etc.), et celle de 30 pour les calibres multiples de 3 (0.3, 3, 30, 300,...etc.).

### 4.4. Incertitudes de mesures:

Parmi les incertitudes signalées dans le fascicule de Mécanique, il y a celle due aux appareils de mesure. Dans le cas de l'ampèremètre ou du voltmètre, cette incertitude est fournie par le constructeur par le biais de la classe de l'appareil, un nombre figurant sur l'appareil; ce chiffre indique la précision des mesures effectuées avec l'appareil; plus il est petit, plus la précision est meilleure. L'incertitude absolue due à l'appareil est donnée par la relation:

$$\Delta X = \frac{\text{classe} \cdot \text{calibre}}{100}$$

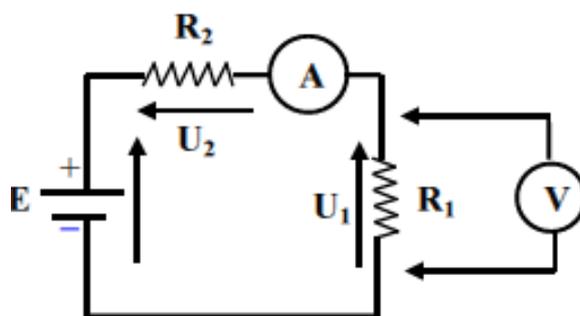


**Figure 3:** Ampèremètre et échelles de lecture

## 5. Travail à effectuer

En utilisant la boîte de connexion, les résistances  $R_1$  et  $R_2$ , les fils de connexion, le commutateur et le générateur (sur le pupitre de travail):

- Réaliser le montage de la figure 4 ci-dessous (**le faire vérifier par l'enseignant de TP avant d'alimenter**),
- Fixer la tension délivrée par le générateur à 6V (à contrôler avec le voltmètre),
- Mesurer, à l'aide de l'ampèremètre, l'intensité du courant traversant  $R_1$  et  $R_2$ . Pour l'ampèremètre, il faut toujours choisir, au début, le plus grand calibre (pour éviter de le 'griller'), puis diminuer le calibre jusqu'à celui juste supérieur à la valeur mesurée du courant. A l'aide du voltmètre, mesurer la tension  $U_1$  aux bornes de  $R_1$  (en respectant la procédure du calibre le plus élevé jusqu'au calibre adéquat pour la mesure), puis  $U_2$  aux bornes de  $R_2$ .
- Faire un calcul d'incertitudes sur les mesures effectuées.
- Comparer  $U_1+U_2$  à  $E$ . Conclusion.



**Figure 4:** Mesure de courant et de tension à l'aide de l'ampèremètre et du voltmètre



## TP n° 1 : Mesure d'une résistance par les méthodes Amont et Aval

### 1. Termes associés

Résistance ohmique, voltmètre, ampèremètre, différence de potentiel, tension, courant électrique, méthode courte dérivation, méthode longue dérivation, erreur systématique, erreur relative, calibre d'un appareil de mesure électrique, classe de l'appareil, résistance interne d'un appareil.

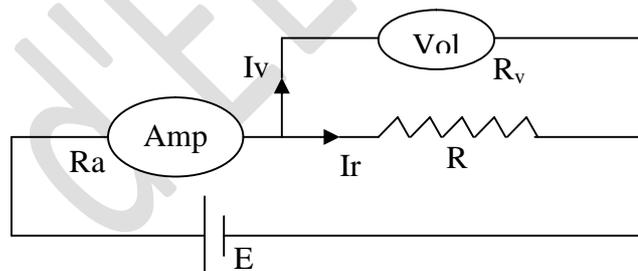
### 2. Principe et objectif

On fait passer un courant dans une résistance  $R$  qu'on se propose de mesurer. On mesure la tension aux bornes de celle-ci à l'aide d'un voltmètre et le courant qui la traverse à l'aide d'un ampèremètre. Pour ce faire, deux montages sont possibles: AVAL et AMONT.

### 3. Théorie et évaluation

Ici, on présente les deux méthodes de mesures de résistances, avec notamment leurs différences (erreurs systématiques et erreurs relatives); ces données théoriques permettent le choix de la méthode à utiliser lors de la mesure d'une résistance en fonction de son ordre de grandeur.

#### 3.1. Montage courte dérivation ou aval



**Figure 1: Montage courte dérivation (aval)**

**R:** résistance inconnue à mesurer

**Ra:** résistance interne de l'ampèremètre

**Rv:** résistance interne du voltmètre

**La valeur  $V_{lue}$ ,** indiquée par le voltmètre, est la valeur exacte de la tension aux bornes de la résistance  $R$ , mais la valeur  $I_{lue}$  sur l'ampèremètre mesure la somme des courants ( $I_{lue}=I_R+I_V$ ), où  $I_R$  est celui qui traverse cette résistance et  $I_V$ , celui qui traverse le voltmètre.

La valeur de R mesurée est  $R_{mes} = V_{lue} / I_{lue}$ , alors que la valeur réelle de cette résistance est

$$R = V_{lue} / I_R$$

$$R_{mes} = V_{lue} / I_{lue} = V_{lue} / (I_R + I_V).$$

La valeur mesurée est différente de la valeur réelle de cette résistance; nous apporterons donc une correction C à  $R_{mes}$ , correction due à la méthode de mesure (erreur systématique).

$$R = R_{mes} + C$$

### Calcul de C:

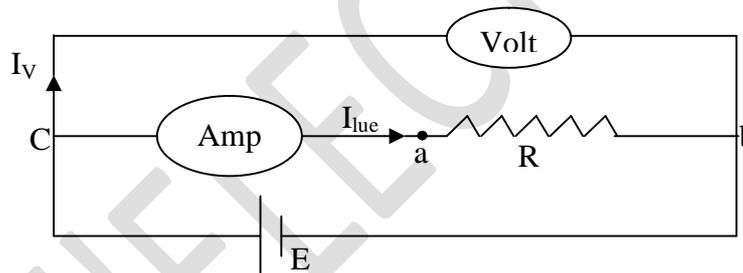
On a:  $R = R_{mes} + C$ , soit  $C = R - R_{mes}$

$$R = \frac{V_{lue}}{I_R} = \frac{V_{lue}}{(I - I_V)} = \frac{1}{\frac{(I - I_V)}{V_{lue}}} = \frac{R_{mes} \cdot R_V}{(R_{mes} - R_V)} \quad \text{car} \quad \frac{I}{V_{lue}} = \frac{1}{R_V} \quad \text{et} \quad \frac{I_V}{V_{lue}} = \frac{1}{R_{mes}}$$

d'où:  $C = R - R_{mes} = -R_{mes}^2 / (R_{mes} - R_V)$ , soit  $C = -R_{mes}^2 / (R_{mes} - R_V)$

L'erreur relative est  $C/R_{mes}$

### 3.2. Montage longue dérivation ou amont :



**Figure 2: Montage longue dérivation (Amont)**

**R:** résistance inconnue à mesurer

**R<sub>a</sub>:** résistance interne de l'ampèremètre

**R<sub>v</sub>:** résistance interne du voltmètre

La valeur  $I_{lue}$  indiquée sur l'ampèremètre est la valeur exacte du courant qui traverse la résistance R, mais la valeur  $V_{lue}$  sur le voltmètre indique la tension aux bornes de cette résistance et de l'ampèremètre: ( $V_{lue} = V_R + V_a$ ).

La valeur mesurée de la résistance R est donc:  $R_{mes} = V_{lue} / I_{lue}$

alors que sa valeur réelle est:  $R = V_R / I_{lue}$

Donc, on peut écrire:  $R_{mes} = V_{lue} / I_{lue} = (V_R + V_a) / I_{lue}$

$$\text{soit: } R_{mes} = \frac{V_R}{I_{lue}} + \frac{V_a}{I_{lue}} = R + R_a.$$

La valeur mesurée est différente de la valeur réelle de cette résistance, nous apporterons donc une correction  $C$  à  $R_{mes}$  due à la méthode de mesure (erreur systématique).

$$R = R_{mes} + C.$$

### Calcul de C

$$R = R_{mes} + C, \text{ soit } C = R - R_{mes}$$

$$R_{mes} = V_{lue} / I_{lue} = (V_R + V_a) / I_{lue} = R + R_a$$

$$C = R - (R + R_a) = -R_a \quad \text{d'où } C = -R_a.$$

L'erreur relative est  $C/R_{mes}$ .

### 3.3. Conclusion

Le montage qui convient le mieux pour la mesure d'une résistance est celui pour lequel l'erreur relative est la plus faible.

## 4. Manipulation

Avant de commencer les manipulations, l'étudiant doit vérifier la présence sur la table du matériel suivant:

- Un ampèremètre
- Un voltmètre
- Une boîte de connexions
- Deux résistances inconnues  $R_{x1}$  et  $R_{x2}$
- Une résistance  $R = 1 \text{ K}\Omega$

### 4.1. Montage Aval ou Courte Dérivation:

On utilise pour les deux montages la source de tension continue et variable (0..12V). A l'aide du voltmètre, fixer la tension à 10V.

- Réaliser le montage 1 avec  $R_{x1}$ .
- Placer les indicateurs des calibres des appareils sur les valeurs maximales.
- Faites vérifier le montage par l'enseignant.
- Allumer. Choisir les calibres des appareils pour avoir une meilleure précision sans dépasser les valeurs max.
- Noter les valeurs de  $V_{lue}$  et  $I_{lue}$ , ainsi que les calibres correspondants.

- Couper le courant et remplacer  $R_{x1}$  par  $R_{x2}$ . Refaire la lecture de  $V_{lue}$  et  $I_{lue}$ .
- Couper le courant et remplacer  $R_{x2}$  par  $R_C$ ; refaire la lecture de  $V_{lue}$  et  $I_{lue}$ .
- Présenter les résultats sous forme d'un tableau (Tableau 1).

#### **4.2. Montage Amont ou Longue Dérivation:**

- Réaliser le montage 2.
- Refaire les mêmes opérations faites pour le montage aval.
- Dresser alors le tableau de mesures (Tableau 2).

#### **4.3. Conclusion:**

- Quel montage préférez-vous utiliser pour chacune des résistances?
- Que constatez-vous pour la résistance  $R_C$ .

#### **4.4. Etude d'une caractéristique:**

La caractéristique d'un élément est la courbe de la tension aux bornes de cet élément en fonction de l'intensité de courant qui la traverse.

Choisissez le montage qui convient le mieux pour tracer la caractéristique de la résistance  $R_C$ .

Faites varier la tension de 0 à 6v.

Déterminer la valeur de  $R_C$  à partir du graphe  $V = f(I)$ .

#### **Données:**

##### ***RÉSISTANCES INTERNES DES APPAREILS DE MESURE***

Les valeurs des résistances internes  $R_a$  de l'ampèremètre sont données par le tableau suivant:

<b>Calibre (mA)</b>	0.12	0.6	1	3	6	10	30	60	100	300	600	1000	2000
<b>Ra (Ohm)</b>	2000	330	300	100	33	30	10	3.3	3	1	0.42	0.3	0.1

Les valeurs des résistances internes  $R_V$  sont indiquées par le constructeur sur l'appareil.

#### **L'incertitude absolue associée à un appareil de mesure**

Pour le voltmètre:  $\Delta V = \text{Classe} \times \text{calibre} / 100$ .

Pour l'ampèremètre:  $\Delta I = \text{classe} \times \text{calibre} / 100$ .



## TP n° 2 : Etude d'un transformateur électrique

### 1. Termes associés

Induction, flux magnétique, transformateur en charge, transformateur à vide, bobines primaire et secondaire, nombre de spires, tension primaire, tension secondaire.

### 2. Principe et objectif

On se propose d'étudier les relations caractérisant le fonctionnement d'un transformateur et de réaliser quelques expériences illustrant ses principales utilisations.

### 3. Théorie et évaluation

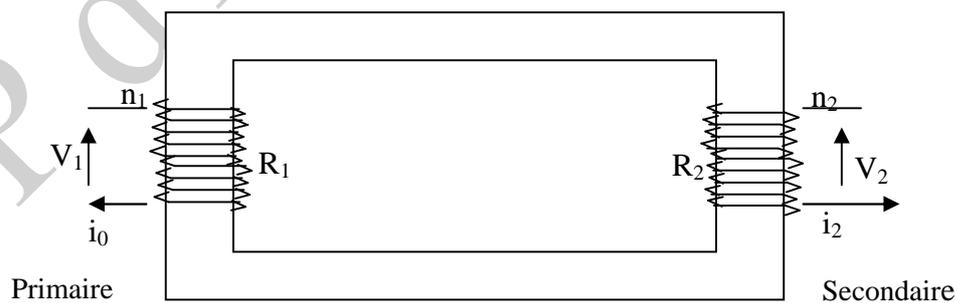
Ici, on présente les constituants et le principe de fonctionnement d'un transformateur électrique; on rappellera également le rendement d'un transformateur, ainsi que ses principales caractéristiques.

#### 3.1. Constitution et principe de fonctionnement

- **Constitution**

Le transformateur est constitué essentiellement :

- d'un circuit magnétique fermé fait de tôles minces en acier spécial au silicium (faibles pertes magnétiques).
- de deux bobinages indépendants enroulés sur le circuit magnétisant. L'un est dit « primaire », l'autre « secondaire », traversés par le même flux (aux pertes magnétiques près).



Circuit magnétique

## • Principe de fonctionnement

On considère un circuit magnétique dont le bobinage primaire comporte  $n_1$  spires et le secondaire  $n_2$  spires. On affecte l'indice 1 aux grandeurs primaires et l'indice 2 aux grandeurs secondaires.

### a) Etude à vide

On dit qu'un transformateur fonctionne à vide lorsque l'enroulement secondaire est ouvert ( $i_2=0$ ). On applique aux bornes du primaire une tension sinusoïdale  $v_1 = V_1 \sin \omega t$ . Si l'on suppose que les résistances des enroulements sont nulles ( $R_1=R_2=0$ ) et les fuites magnétiques également nulles, on a les relations simples :

$$V_1 = n_1 d\phi/dt \text{ et } V_2 = n_2 d\phi/dt \text{ d'où } V_2/V_1 = n_2/n_1 = n$$

$n$  est appelé rapport de spires des enroulements : c'est le rapport de transformation du transformateur. On voit que si l'on choisit :

$n_2 > n_1$  :  $n > 1$  : le transformateur est un élévateur de tension.

$n_2 < n_1$  :  $n < 1$  : le transformateur est un abaisseur de tension.

Le courant primaire, appelé courant à vide  $i_0$  a pour expression  $i_0 = (V_{1m} R / n_1^2 \omega) \sin(\omega t - \pi/2)$  où  $R$  est appelée reluctance du circuit magnétique;  $i_0$  est en général très faible.

### b) Etude en charge

Le secondaire, dans ce cas, est fermé sur une charge (résistance  $R$  par exemple). L'application de la loi d'Ohm aux deux circuits donne ( $R_1$  et  $R_2$  pris non nuls) :

$$v_1 = R_1 i_1 + n_1 d\phi/dt$$

$$v_2 = R_2 i_2 + n_2 d\phi/dt$$

La rapport de transformation n'est plus rigoureusement  $n_2/n_1$ , mais on peut écrire avec une certaine approximation :  $V_2/V_1 = n_2/n_1 = n$  (loi des tensions).

Par ailleurs,  $i_1$  et  $i_2$  étant les intensités dans le primaire et le secondaire, le flux d'induction à travers une section du circuit magnétique est donné par :

$$\phi = n_1 i_0 / R = (n_1 i_0 + n_2 i_2) / R \quad (i_0 : \text{à vide}) ; \quad i_1 = i_0 - (n_2/n_1) i_2.$$

En général, le courant  $i_0$  est faible. On a alors la relation approchée :

$$i_2/i_1 = n_1/n_2 = 1/n \quad (\text{loi des intensités})$$

### c) Rendement d'un transformateur

On relève la puissance  $P_1$  dissipée au primaire (à l'aide d'un wattmètre). La puissance dissipée au secondaire (refermé sur une résistance) est relevée à l'aide d'un ampèremètre et d'un voltmètre :

$$P_2 = V_2 I_2. \text{ Le rendement est donc égal à : } \rho = P_2/P_1.$$

Si on fait varier la charge  $R$ , en relevant la courbe  $\rho=f(R)$ , on constate que le rendement est maximal pour une valeur déterminée de la charge ( $R_0$ ).

Dans le cas d'un bon transformateur, ce rendement est voisin de 0,9.

Dans ces méthodes de mesure de résistances, on compare la grandeur à mesurer (résistance inconnue) à une grandeur de même nature parfaitement connue (étalon).

Il existe deux types de méthodes de comparaison, selon la nature de grandeur auxiliaire qui permet la mesure (courant ou tension).

### 3.2. Principales utilisations

#### 3.2.1. Transport d'énergie en courant alternatif

On matérialise la ligne de transport d'énergie électrique par une résistance  $R$  importante. Le récepteur est une lampe à incandescence de résistance  $r \ll R$ .

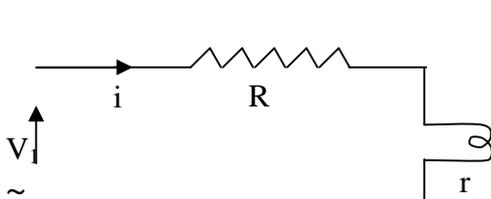


Figure 1

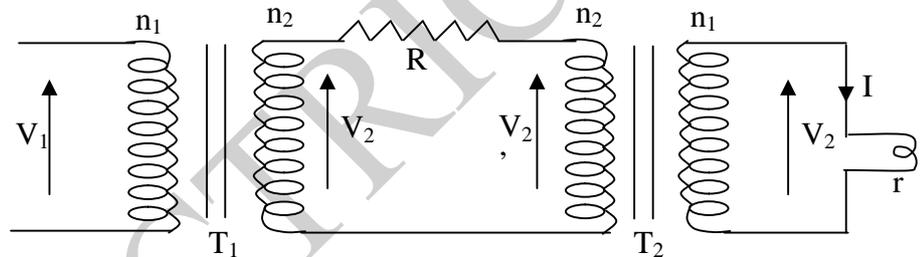


Figure 2

**1<sup>er</sup> cas (figure1)** : La lampe est reliée à la source par l'intermédiaire de la résistance ; elle ne brille pas car la chute ohmique à travers  $R$  est trop importante.

- puissance consommée par la lampe:  $P = r i^2$
- puissance perdue dans la ligne:  $P' = R i^2 > P$ .

**2<sup>ème</sup> cas (figure2)** : Pour diminuer la puissance perdue par effet joule dans la ligne (ici  $R$ ), on isole  $R$  au moyen de 2 transformateurs. Le transformateur  $T_1$  élève la tension de  $V_1$  à  $V_2$ . Le transformateur  $T_2$  abaisse la tension de  $V_2'$  à  $V_1$  ( $i$  étant très faible,  $V_2'$  est très voisin de  $V_2$  et on retrouve au secondaire de  $T_2$  une tension sensiblement égale à  $V_1$ ). On utilise donc  $T_2$  équivalent à  $T_1$  inversé. La puissance  $P'$  consommée dans la ligne s'écrit :

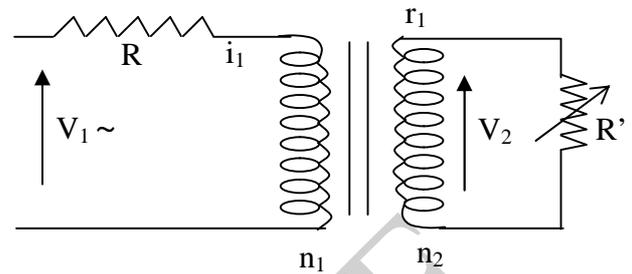
$$P' = R i^2 \quad \text{or} \quad i/I \cong n_2/n_1, \quad \text{on a alors } i^2 = I^2/(n_2/n_1)^2, \quad \text{d'où: } P' = I^2/(n_2/n_1)^2.$$

Comme  $n_2 > n_1$ , la puissance dans la ligne est divisée dans une large proportion par le carré du rapport de transformation. La puissance  $P$  parvenant au récepteur (lampe) s'écrit :  $P = V_1 I \cos \phi = V_1 I$ . ( $\phi$  est nul car la charge est résistive) : c'est ce qui explique que la lampe brille dans ce cas.

### 3.2.2. Adaptation d'impédance

On fait varier  $R'$  et on trace  $P=f(R')$ . On constate que  $P$  est maximale pour :  $R' = R/(n_1/n_2)^2 = n_2 R$ .

On dit alors qu'on a réalisé l'adaptation d'impédance si  $R'$  est une impédance fixe (résistance ou haut-parleur par exemple), il suffit de choisir un transformateur de rapport  $n$  tel que :  $R' = n_2 R$  et on transmet ainsi la totalité de la puissance disponible au primaire.



### 3.2.3. Chauffage par induction

Le primaire est une bobine de  $n_1$  spires, le secondaire une seule spire (rigole circulaire dans laquelle on place le métal à fondre) (figure3).

La quantité de chaleur dégagée par effet de joule au secondaire permet d'amener le métal en fusion (principe des fours à induction).

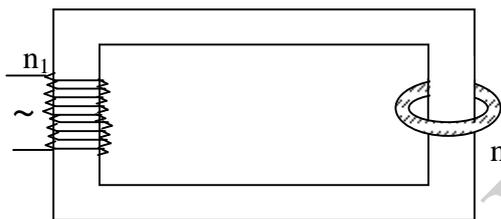


Figure 3

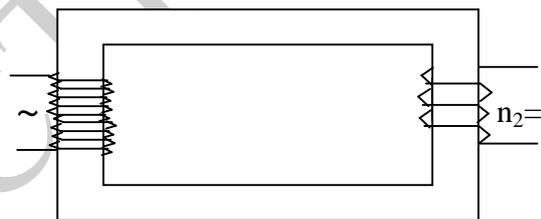


Figure 4

### 3.2.4. Soudure par points

Le secondaire à 3 spires (figure 4). Une pince dans le circuit permet de serrer entre 2 points les tôles à souder. La chaleur dégagée aux points de contact permet la soudure par fusion du métal.

## 4. Manipulation

**Attention !!** Ne pas dépasser 3 volts aux bornes de la bobine de 400 spires et 13 volts aux bornes de la bobine de 1600 spires

### 4.1. Essai à vide

- Réaliser le montage de la figure 5.
- Faire varier  $V_1$  progressivement de 0 à 13 volts (avec un pas de 2 volts)
- Relever à chaque fois  $V_2$  et compléter le tableau de mesure (voir feuille de réponse).

- Comparer  $m$  à la valeur de  $n$  du rapport de transformation et conclure.

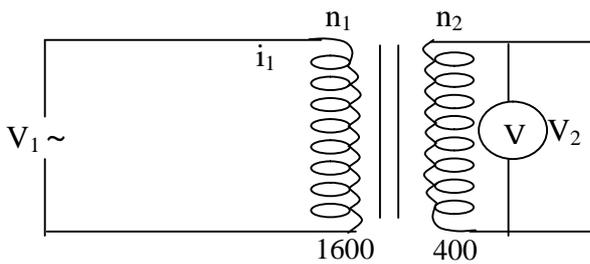


Figure5

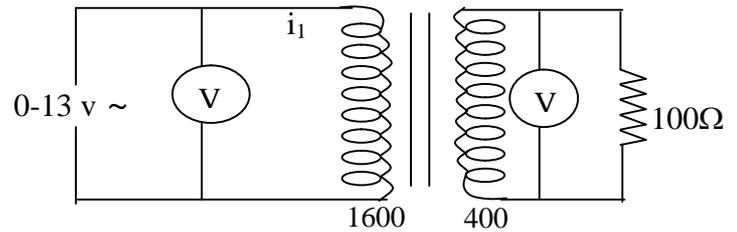


Figure6

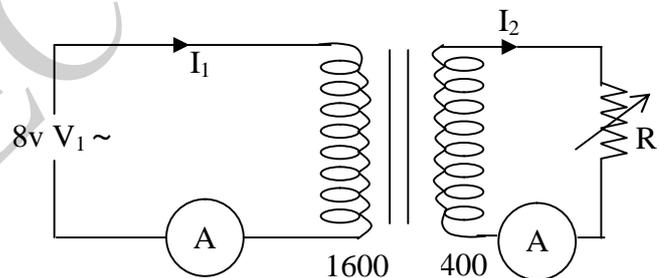
## 4.2. Essai en charge

### 4.2.1. Loi des tensions

- Réaliser le montage de la figure 6.
- Faire varier  $V_1$  de 0 à 13 par 2V; relever à chaque fois  $V_2$  et compléter le tableau de mesures (voir feuille de réponse).
- Comparer les valeurs expérimentales du rapport de transformation aux valeurs expérimentales précédentes (essai à vide) et au rapport théorique. Conclure.

### 4.2.2. Loi des intensités

- Réaliser le montage ci-contre.
- Fixer  $V_1$  à 8V. Donner à  $R$  les valeurs 0-5-10-30-50-70 et 100 $\Omega$ . Relever à chaque fois  $I_1$ ,  $I_2$  et compléter le tableau de mesures (voir feuille de réponse).
- Comparer  $I_2/I_1$  à l'inverse du rapport de transformation. Conclure.

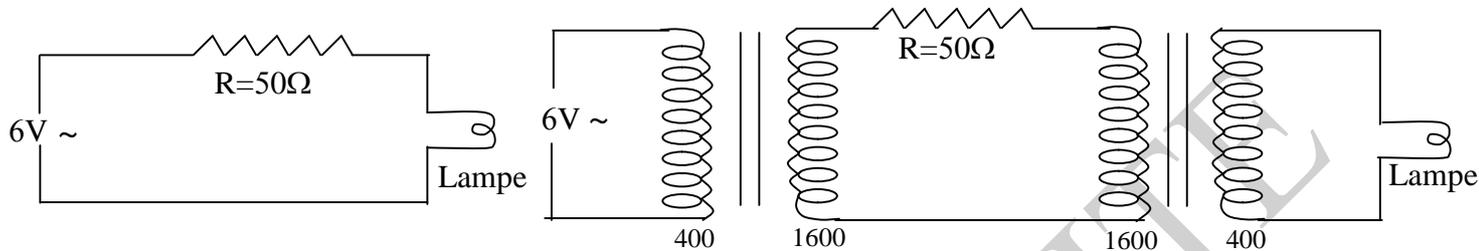


### 4.3. Transport d'énergie et courant alternatif

- Réaliser l'un après l'autre les deux montages ci-dessous :

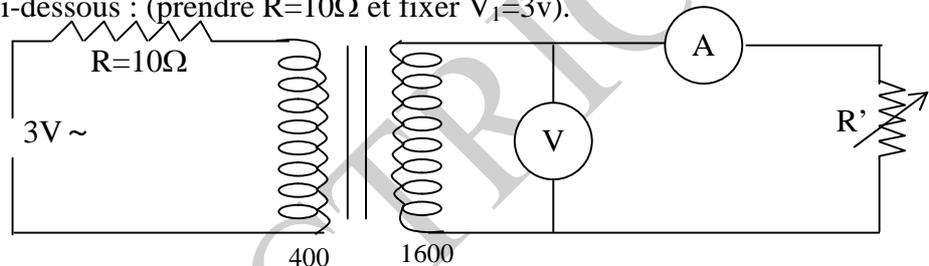
(prendre  $V_1=6v$  et  $R=100\Omega$ ).

- Observer et conclure.



### 4.4. Adaptation d'impédance

- Réaliser le montage ci-dessous : (prendre  $R=10\Omega$  et fixer  $V_1=3v$ ).



- Donner à  $R'$  les valeurs suivantes : 10, 20, 50, 100, 140, 160, 180, 200, 400, 600, 800, 1k, 2k, 4k  $\Omega$ .
- relever à chaque fois  $V_2$  et  $I_2$  et compléter le tableau de mesure (voir feuille de réponse).
- Tracer la courbe  $P = V_2 I_2 = f(R')$  en fonction de  $R'$ .
- Dédire la valeur d'adaptation et vérifier la relation  $R'(P_{\max}) = n^2 R$ .
- Conclusion.

### Matériel nécessaire

- une bobine 400 spires; une bobine 1600 spires
- un circuit magnétique ; un joug de serrage
- deux multimètres ou deux voltmètres + deux ampèremètres
- une résistance à décades : x1, x10, x100, x1000
- fils de connexion.



## **TP n° 3 : Mesure de résistances par les méthodes de comparaison et d'opposition**

### **1. Termes associés**

Résistance, lois de Kirchhoff, conducteur, circuit, tension, branchement série, branchement parallèle, méthode de comparaison (de courants ou de tensions), méthodes d'opposition ou méthodes des ponts ( pont à fil et pont de Wheatstone).

### **2. Principe et objectif**

On peut mesurer une résistance  $R_x$  inconnue à l'aide de plusieurs méthodes; on a vu dans le TP n°1 les méthodes Aval et Amont, nécessitant l'utilisation d'un voltmètre et d'un ampèremètre et l'application de la loi d'Ohm. Dans ce présent TP, deux méthodes alternatives de mesure de résistances sont proposées: celle dite de comparaison et celle dite d'opposition. Dans la première méthode, on accède à la mesure d'une résistance inconnue en la comparant à une résistance étalon, les deux résistances pouvant être branchées en parallèle (comparaison de 2 courants) ou en série (comparaison de 2 tensions). Dans la seconde méthode d'opposition dite 'des ponts', on utilise un assemblage fermé de quatre résistances dont la résistance inconnue à mesurer. Le principe est d'équilibrer le pont en utilisant soit des résistances connues ou variables (boite AOIP), dans le cas de la méthode du pont Wheatstone, soit une résistance standard connue et des fils métalliques de longueurs variables, dans le cas de la méthode du pont à fil.

### **3. Théorie et évaluation**

Ici, on présente les deux méthodes de mesures de résistances, différentes l'une de l'autre et connues sous le nom de méthodes de comparaison ou d'opposition.

#### **3.1. Méthodes de comparaison**

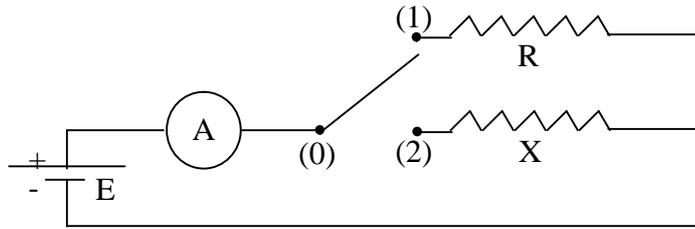
Dans ces méthodes de mesure de résistances, on compare la grandeur à mesurer (résistance inconnue) à une grandeur de même nature parfaitement connue (étalon).

Il existe deux types de méthodes de comparaison, selon la nature de grandeur auxiliaire qui permet la mesure (courant ou tension).

##### **3.1.1. Comparaison de deux courants**

On cherche à mesurer une résistance inconnue  $X$  en la comparant à une résistance étalon  $R$  et en choisissant comme grandeur auxiliaire, le courant traversant ces deux éléments.

Le schéma est le suivant:



Le courant étant établi entre les deux bornes (0) et (1), l'ampèremètre mesure un courant ( $I_1=E/R$ ), en supposant négligeable sa résistance interne.

En établissant la liaison (0) et (2), on aura de même: ( $I_2=E/X$ )

$$\text{d'où : } (X=R.I_1/I_2)$$

Examinons l'influence de la résistance interne de l'appareil de mesure :

On aura sur le schéma de principe :

$$E=(R + Ra) I_1= (X + Ra) I_2$$

$$\text{d'où: } X= [R.(I_1/I_2)] + [Ra (I_1-I_2)/I_2]$$

Le terme correctif est alors:  $[Ra (I_1-I_2)/I_2]$  .

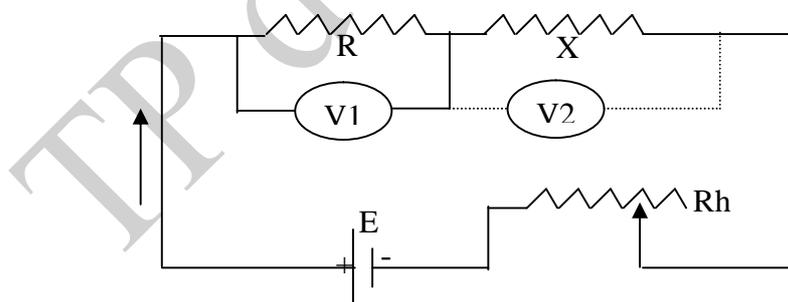
Il peut s'annuler si ( $I_1=I_2$ ) ou ( $X=R$ ).

### 3.1.2. Comparaison de deux tensions

Si dans la méthode de comparaison de deux courants, les deux résistances étaient alimentées sous une même d.d.p et si l'on comparait les deux courants, l'inverse est naturellement possible.

On fait parcourir les deux résistances par le même courant (résistances en série) et on va mesurer les deux d.d.p (ou tensions) aux bornes de chaque résistance.

Le schéma de principe est donné ci-dessous:



Si l'on suppose la résistance  $g$  du voltmètre très grande, on a, en branchant le voltmètre:

- aux bornes de R : ( $V_1=R_I$ )

- aux bornes de X : ( $V_2=X_I$ )

$$\text{d'où } X=R.(V_1/V_2)$$

Si la résistance  $g$  du voltmètre n'est pas infinie, le branchement de celui-ci aux bornes de  $R$ , puis de  $X$ , change le courant principal  $I$ .

En jouant sur le rhéostat  $R$ , on peut maintenir ce courant constant.

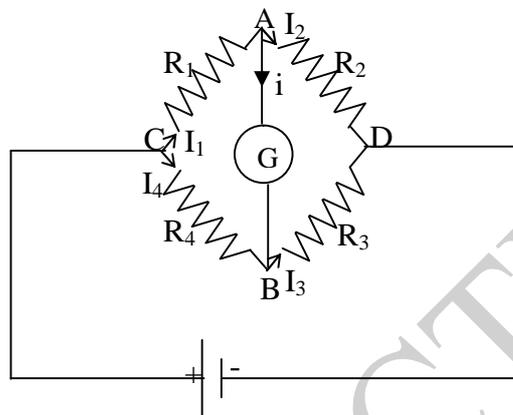
Montrez, dans ce cas, que  $X$  peut s'écrire:

$$X=R.(V_2/V_1).I/[1+R/g(1-V_2/V_1)].$$

### 3.2. Méthodes d'opposition (ponts)

#### 3.2.1. Pont de Wheatstone

On appelle pont de Wheatstone, l'assemblage de résistance ci-dessous:



La branche AGD représente le pont proprement dit, jeté entre CAD et CBD.

Dans le cas général, la d.d.p ou tension  $(V_A - V_B) \neq 0$ .

Toutefois, le pont est dit équilibré lorsque la tension  $(V_A - V_B)$  et le courant  $i$  traversant le galvanomètre sont nuls.

A l'équilibre:  $V_A - V_B = 0$  et  $i = 0$

On a:  $V_C - V_A = R_1 \cdot I_1$  et  $V_C - V_B = R_4 \cdot I_4$

On a d'autre part:  $V_A - V_D = R_2 \cdot I_2$  et  $V_A - V_D = R_3 \cdot I_3$

A l'équilibre  $(V_A - V_B = 0)$  ou  $(V_A = V_B)$

$$(i=0) \text{ ou } (I_1=I_2) \text{ et } (I_3=I_4)$$

$(R_1 \cdot I_1 = R_4 \cdot I_4)$ , donc:  $R_2 \cdot I_2 = R_3 \cdot I_4 \Rightarrow R_1/R_2 = R_4/R_3$

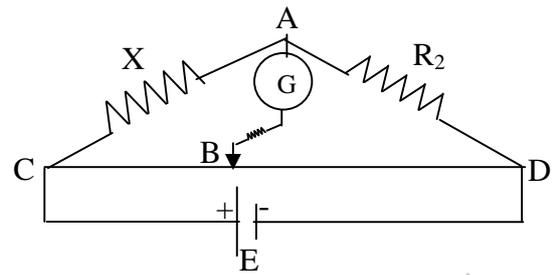
Si  $R_1$  représente la résistance inconnue, notée  $X$ , et  $R_2, R_3, R_4$  des résistances connues, on peut déterminer  $X$  en équilibrant le pont. Soit  $X = R_2 \cdot (R_4/R_3)$

On peut procéder de deux manières différentes pour équilibrer le pont.

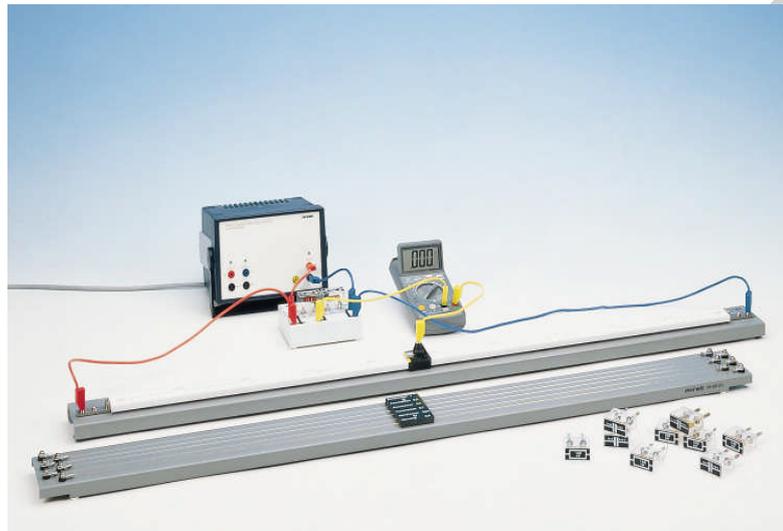
- Ou bien fixer  $R_2$  et faire varier le rapport  $(R_4/R_3)$ .
- Ou bien fixer le rapport  $(R_4/R_3)$  et faire varier  $R_2$ .

### 3.2.2. Pont à fil

Le pont à fil est un pont de Wheatstone dans lequel les résistances  $R_3$  et  $R_4$  sont remplacées par un fil résistant fin et calibré CD.



A l'équilibre, on a:  $X = R_2 \cdot (R_{CB}/R_{BD})$ . Comme les résistances  $R_{CB}$  et  $R_{BD}$  sont proportionnelles aux longueurs CB et BD. On a donc:  $X=R_2 \cdot (CB/BD)$



Dispositif expérimental pour la méthode du pont à fil

## 4. Manipulation

On mesure la (ou les) résistance(s) X par la:

### 4.1. Méthode de comparaison

#### 4.1.1. Comparaison de 2 courants

- Réaliser le montage de la figure (1)
- Choisir une tension  $E = 3V$  et mesurer la résistance X. Calculer la correction à apporter à X, en tenant compte de la résistance interne  $R_a$  de l'ampèremètre.

#### 4.1.2. Comparaison de 2 tensions

- Réaliser le montage de la figure (2)
- Choisir une tension  $E=3V$  et mesurer la résistance X, en tenant compte de la résistance interne du voltmètre.

- Comparer les valeurs obtenues pour les deux méthodes. Conclure.

## 4.2. Méthode d'opposition

### 4.2.1. Pont de Wheatstone

a) Réaliser le montage de la figure (3)

Prendre ( $R_2$ = résistance variable à décades, prendre au début ( $R_4/R_3 = 2,2/1$ )

\*\* Avant la mise sous tension, il est conseillé de suivre le mode opératoire suivant afin de ne pas détériorer le galvanomètre:

- 1- Vérifier que le potentiomètre de réglage de la source de tension est au zéro.
- 2- Fermer l'interrupteur K et mettre sous tension.
- 3- Afficher sur  $R_2$  une valeur quelconque au moyen des boutons à décades.
- 4- Donner à E une valeur telle que l'aiguille du galvanomètre dévie dans un sens.
- 5- Essayer de ramener l'aiguille à zéro en jouant sur  $R_2$  par petits bonds de 1 selon la vitesse de déplacement de l'aiguille.
- 6- Augmenter la valeur de E et établir l'équilibre du pont, puis mesurer la résistance inconnue X.

b) Refaire l'expérience en faisant ( $R_4/R_3 = 1/2,2$ ).

c) Donner une précision sur la mesure.

### 4.2.2. Pont à fil

a) Réaliser le montage de la figure (4)

Prendre le  $R_2$  fixe (1KOhms ou 2,2 KOhms), le rapport (CB/BD) variable.

b) Mesurer la résistance inconnue X en suivant les consignes de 1)

c) Poser (CB=X) et CD=e (longueur de CD), montrer qu'il existe une valeur de X pour laquelle l'incertitude sur X est minimale.

d) Le placer dans cette position et équilibrer le pont en faisant varier  $R_2$  (prendre le cas d'une résistance à décades).

En déduire de nouveau X.

Comparer les résultats obtenus pour les deux ponts.

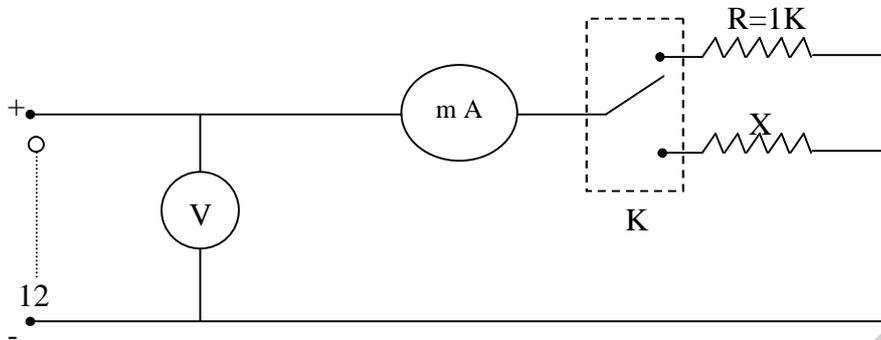


Figure 1

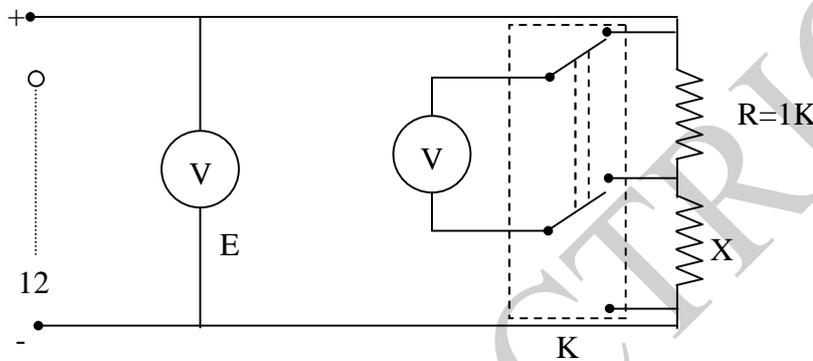


Figure 2

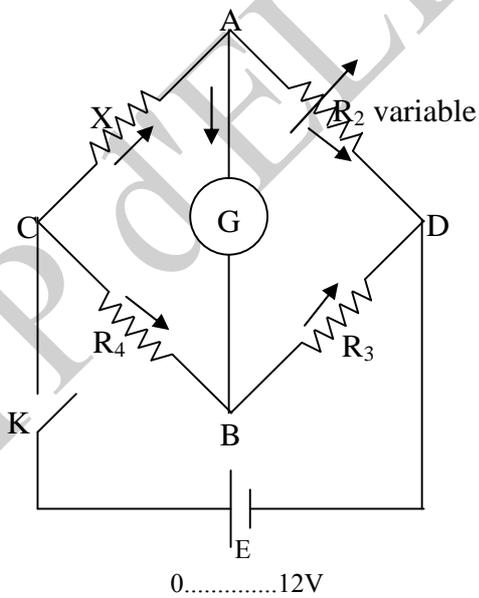


Figure 3

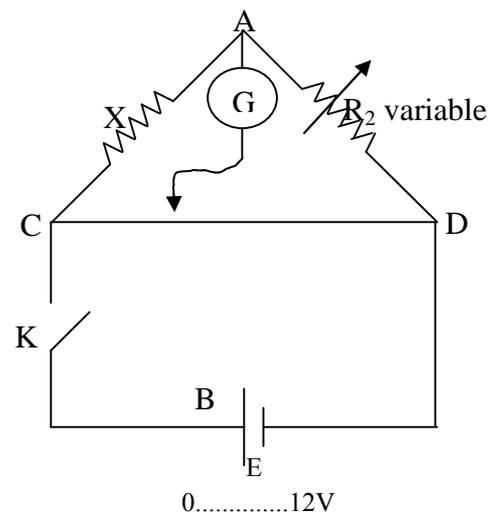


Figure 4



## TP n° 4 : Etude de l'oscilloscope

### 1. Termes associés

Appareil de mesure, circuit d'impulsion, tube cathodique, canon à électron, cathode, anode, Wehnelt, système de déflexion, base de temps, signal périodique, synchronisation, fréquence de balayage, observation d'un signal, mesure de déphasage.

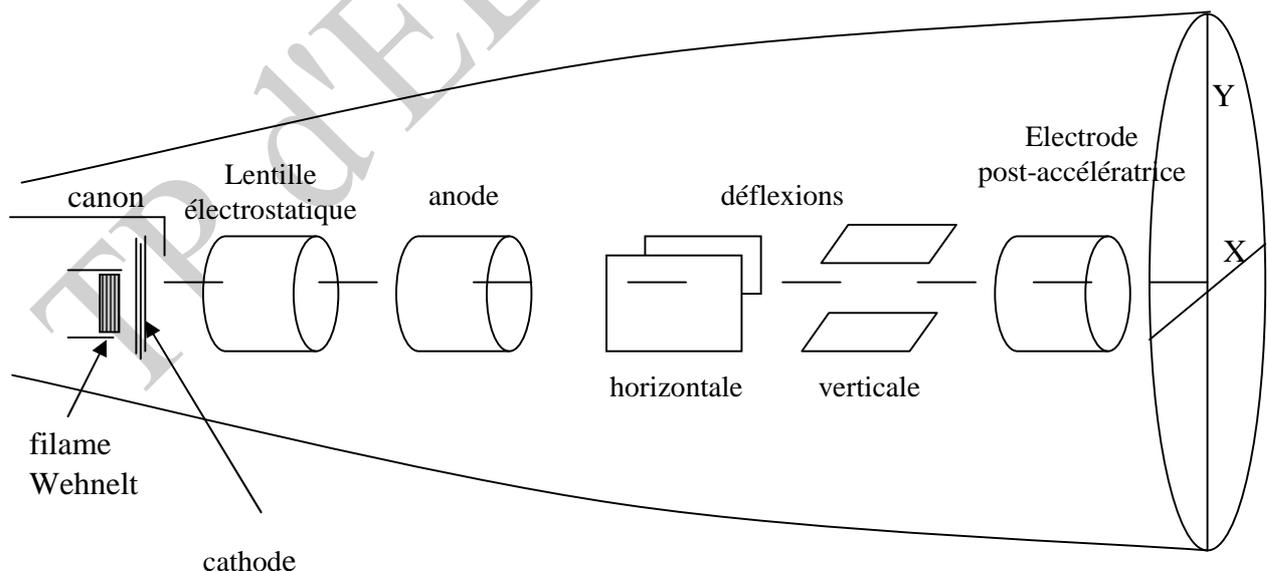
### 2. Principe et objectif

Par l'étendue de ses possibilités (mesures d'amplitudes, de temps, ... etc.) et la commodité de son emploi, l'oscilloscope occupe une place importante parmi les appareils de mesure. Grâce aux progrès réalisés dans le domaine des amplificateurs et des circuits d'impulsion, l'oscilloscope permet d'observer des signaux très complexes et très rapides.

### 3. Fonctionnement d'un oscilloscope

Cet appareil est destiné à rendre visible et mesurable un phénomène électrique ou transformé en grandeur électrique. Ce faisceau est émis par une source (canon à électrons) et dirigé par un système de déflexion électrostatique (plaques de déviation) vers le fond du tube (écran) qu'il rend lumineux en un point d'impact (spot).

#### 3.1. Tube cathodique



**Figure 1:** Schéma du tube cathodique d'un oscilloscope

En général, dans un tube électronique, la cathode (source d'électrons) est à la masse; les autres électrodes (sauf la grille de commande) sont à des potentiels positifs. Dans un oscilloscope, afin de ne pas mettre de hautes tensions du côté de l'écran (celui de l'opérateur), la cathode est très négative; les autres électrodes (sauf wehnelt) le sont moins; la plus proche de l'écran est à la masse.

Nous indiquons ici le rôle des différentes électrodes composant le système d'émission des électrons (canon).

- **Cathode** : Les électrons sont éjectés de la cathode par effet thermique grâce à un filament chauffé. La cathode est portée à un potentiel très négatif.
- **Wehnelt** : C'est l'électrode portée à un potentiel légèrement négatif par rapport à la cathode. Toute modification de son potentiel agit sur le débit des électrons et, donc, sur la luminosité du spot (voir bouton '**intensity**').

- **Lentille électrostatique**

Pour une valeur convenable de son potentiel, les trajectoires des électrons se recoupent toutes sur l'écran et forment un spot fin (bouton '**focus**').

- **Anode** : (ou électrode accélératrice) en forme de cylindre comme la précédente, beaucoup moins négative que la cathode, elle attire les électrons vers l'écran en créant le champ électrique accélérateur  $E$ . A la sortie de l'anode, les électrons ont une vitesse  $v$ , telle que:

$$(1/2) mv^2 = eV$$

$m$  : masse de l'électron;  $e$  : charge de l'électron

$V$  : tension ou d.d.p entre anode et cathode.

Après le système de déflexion, on trouve une autre électrode qui a pour but de procurer une accélération supplémentaire des électrons et qui permet donc une meilleure fidélité en haute fréquence (le temps de passage des électrons entre les plaques de déviation devant être une fraction très petite de la période), cette électrode a donc un potentiel très positif par rapport à la cathode. Elle améliore également la finesse du spot.

- **Système de déflexion**

Le faisceau d'électrons monocinétique (même vitesse) émis par le canon est soumis à l'action de 2 champs électriques créés par 2 paires de plaques (condensateurs). C'est le système de déflexion qui modifie la trajectoire des électrons.

- les plaques verticales  $XX'$  déterminent la déviation horizontale (axe des  $X$ )
- les plaques horizontales  $YY'$  déterminent la déviation verticale (axe des  $Y$ ).

Si on applique une tension continue  $V_1$  entre les plaques  $X$  et  $X'$ , le champ électrique créé est proportionnel à  $V_1$  et il dévie le faisceau d'un angle lui aussi proportionnel à  $V_1$ ; le spot

initialement en O, centre de l'écran, vient en  $O_1$  tel que  $OO_1 = X = K_1 V_1$ . De même, avec une tension continue  $V_2$  appliquée entre Y et Y', le spot vient en  $OO_2$  tel que  $OO_2 = Y = K_2 V_2$ .

Si nous appliquons simultanément  $V_1$  entre XX' et  $V_2$  entre YY', le faisceau est soumis à la résultante des 2 champs et il vient frapper l'écran au point A de coordonnées:  $X = K_1 V_1$ ,  $Y = K_2 V_2$ , si les tensions sont constantes, le spot reste en A; mais si elles varient au cours du temps, il décrit alors la courbe paramétrique  $X(t) = K_1 V_1(t)$ ,  $Y(t) = K_2 V_2(t)$ .

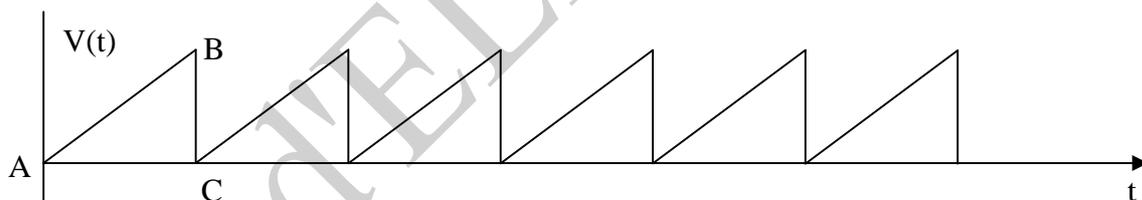
En raison de la persistance des impressions rétinienne et de la rémanence de l'écran (propriété de rester lumineux un court instant après le passage du spot), et sous réserve que le déplacement du spot soit assez rapide, la courbe apparaît continue bien que le spot se déplace sur cette courbe.

### 3.2. Base de temps

Une tension appliquée aux plaques de déviation verticale YY' n'entraîne qu'un déplacement vertical du spot. Afin d'observer sur l'écran les variations de cette tension en fonction du temps, il faut assurer le déplacement horizontal du spot en appliquant, aux plaques de déviation horizontale XX', une tension variant linéairement avec le temps.

A cet effet, il a été réalisé à l'intérieur de l'oscilloscope un montage électronique générateur d'une tension  $v(t)$ , tension en dents de scie (voir figure).

Ce montage constitue la "base de temps".



De A à B, la différence de potentiel entre les plaques croît; il en est de même pour le champ électrique, et donc le faisceau d'électrons est de plus en plus dévié vers la droite de l'écran. De B à C, la tension chute très rapidement et le spot revient donc à sa position initiale à gauche (pendant le retour du spot, on bloque l'émission des électrons en envoyant une impulsion de tension très négative sur le Wehnelt). C'est la composition de ce mouvement linéaire horizontal et du mouvement vertical qui produit la courbe visualisant l'évolution dans le temps du phénomène étudié; suivant la vitesse de celui-ci, on peut modifier la vitesse de balayage.

### Observation d'un signal périodique-synchronisation

On applique une tension périodique sur une des voies CH<sub>1</sub> ou CH<sub>2</sub> et on veut observer cette tension. La base de temps est soit "relaxée", soit "déclenchée" (bouton level); en fonctionnement "relaxé" (auto), le balayage de l'écran s'effectue suivant une fréquence déterminée. On observe alors une courbe qui se déplace sur l'écran et qui n'est donc pas "stable"; afin de stabiliser cette courbe, il faut avoir le même signal sur les plaques YY' au début de chaque balayage. Ainsi, à chaque balayage, la nouvelle courbe vient se superposer avec la précédente. On dit alors que l'on synchronise l'oscilloscope. La base de temps doit fonctionner alors en "déclenché".

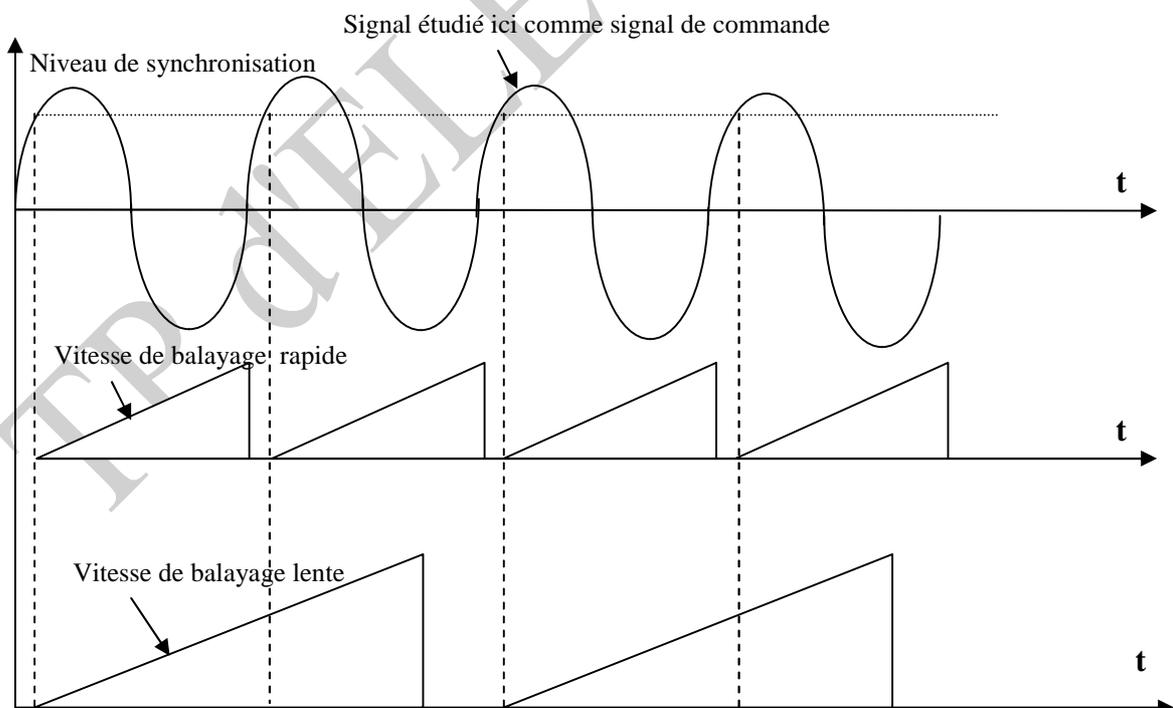
La fréquence de balayage de l'écran est alors commandée.

Cette commande peut être réalisée par:

- soit un signal extérieur (douille 'EXT TRIGG')
- soit le signal appliqué à l'entrée CH<sub>1</sub> ou à l'entrée CH<sub>2</sub>.

On peut régler le "niveau" de déclenchement par le bouton 'LEVEL'. Le début d'un balayage s'effectue au moment où le niveau choisi est atteint par le signal de commande. Le début du balayage se fait par un signal qui diminue (bouton 'NOR +'); en manipulation E, la base de temps sera toujours utilisée en "déclenché".

#### Exemple: Synchronisation pour 2 vitesses de balayage différentes

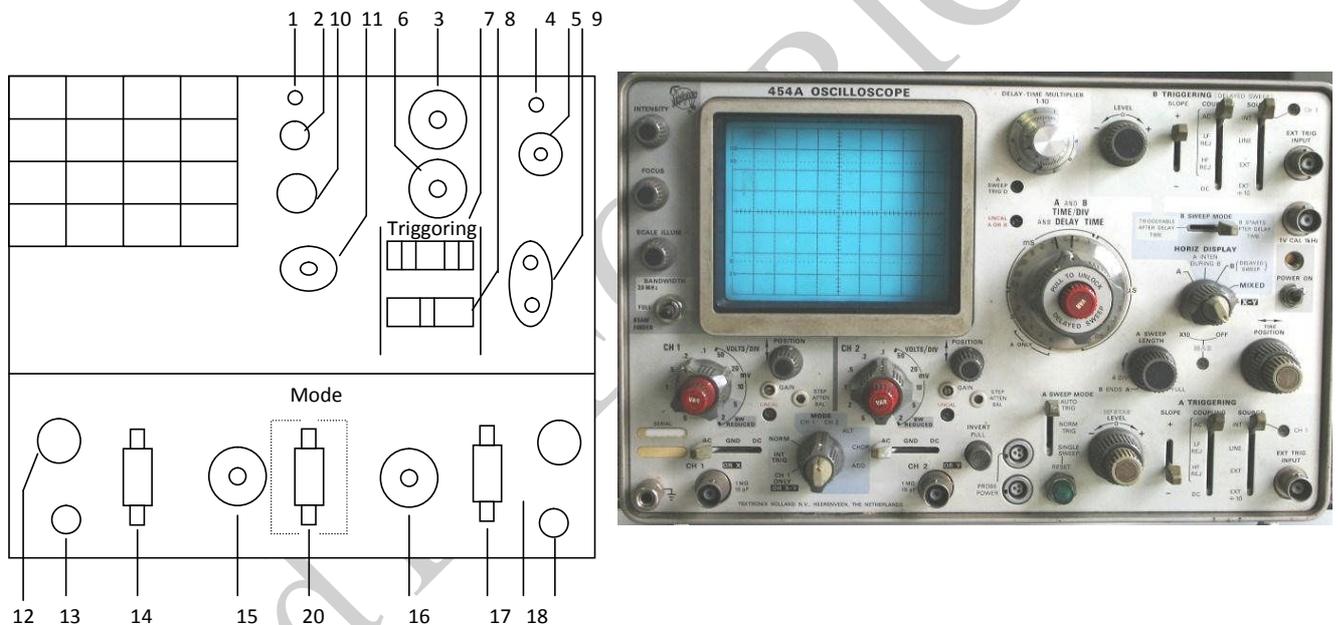


#### 4. Schéma de l'oscilloscope

Les tensions à mesurer peuvent être très petites. La sensibilité d'un tube pour oscilloscope ne dépassant pas en général 20V/cm, il a été nécessaire d'intercaler, entre la borne d'entrée et les plaques défectrices, un amplificateur de tension. Si on applique à l'entrée de l'amplificateur une tension  $V$ , on obtient à la sortie, donc aux bornes des plaques, une tension supérieure  $V' = AV$  où  $A$  est le gain de l'amplificateur.

Pour comparer 2 signaux sans les composer, l'oscilloscope est pourvu de 2 amplificateurs, verticaux attaquant tour à tour par commutation électronique les 2 plaques de déviation verticale.

Pour composer 2 signaux suivant les axes OX et OY, l'oscilloscope possède un amplificateur horizontal qui permet d'appliquer un signal d'amplitude convenable sur les plaques de déviation horizontale. Dans ce cas, la base de temps est mise hors circuit.



#### Répartition des boutons de commande des différents organes

En haut, à droite: réglage de la base de temps et de son déclenchement.

Partie inférieure gauche: réglage de la voie  $CH_1$

Partie inférieure droite: réglage de la voie  $CH_2$

Partie inférieure médiane: choix du mode d'observation des signaux.

1: voyant allumé quand 2 n'est plus sur OFF

2: Interrupteur de mise en marche

**3:** Sélecteur du temps de balayage de la base de temps. Ce sélecteur permet de faire varier la vitesse horizontale du spot sur l'écran.

Gamme 0,5 s/div à 0,5  $\mu$ s/div.

**Sélecteur en position X-Y :** La base de temps est mise hors circuit et les plaques de déviation horizontale sont alors attaquées par le signal appliqué sur la voie CH<sub>2</sub>. On peut alors observer les variations du signal de la voie CH<sub>1</sub> en fonction du signal de la voie CH<sub>2</sub>.

**4:** Borne de sortie de la tension d'étalonnage (signaux carrés CAL 1 V).  
Cette tension sert à contrôler les calibrations des différents amplificateurs.

**5:** Réglage du positionnement horizontal de la trace.

Bouton enfoncé: vitesse de balayage correspond aux valeurs affichées par le bouton (3).

Bouton tiré: amplitude du balayage horizontal X 5; donc la vitesse de balayage indiquée par (3) doit être multipliée par 5. (PULL X 5 MAG).

**6:** Commande d'ajustage du niveau de déclenchement du balayage (LEVEL).

Bouton enfoncé: base de temps "déclenchée"

Bouton tiré: base de temps "relaxée" (PULL AUTO)

**7:** Sélection de mode de déclenchement de la base de temps. Seule l'utilisation sur la position NOR est faite en manipulation. Sélection du déclenchement sur le front à pente positive du signal (NOR+) ou sur le front à pente négative (NOR-).

**8:** Sélecteur de la source de déclenchement

CH<sub>1</sub>: commande le déclenchement du balayage par le signal appliqué sur CH<sub>1</sub>

CH<sub>2</sub>: même chose mais avec le signal de la voie CH<sub>2</sub>.

**9:** Douilles d'entrée du signal de déclenchement extérieur (EXT TRIGG).

**10:** Réglage de l'intensité des faisceaux (INTENSITY)

**11:** Commande de la focalisation des faisceaux (FOCUS)

**12:** Commande de cadrage vertical du spot du faisceau CH<sub>1</sub>

**13:** Borne d'entrée de la voie CH<sub>1</sub> (ou entrée verticale Y quand (3) est sur XY)

**14:** Sélection de l'entrée de l'amplificateur vertical de la voie CH<sub>1</sub> : sur la position GND, le signal appliqué en (13) n'est pas envoyé à l'amplificateur. On peut ainsi régler la position verticale de la trace; sur la position AC, seules les composantes variables du signal appliqué sont envoyées sur

l'amplificateur. Sur la position DC, toutes les composantes du signal sont envoyées sur l'amplificateur.

**15:** Commutateur atténuateur par bond de l'amplificateur vertical de CH<sub>1</sub>.

**16:** Même chose que (15), pour la voie CH<sub>2</sub>.

**17:** Même chose que (14) pour la voie CH<sub>2</sub>.

**18:** Borne d'entrée de la voie CH<sub>2</sub> (ou entrée horizontale X quand (3) est sur XY).

**19:** Commande de cadrage vertical du spot du faisceau CH<sub>2</sub>.

Commande de cadrage horizontal quand (3) est sur XY .

**20 :** Sélecteur de mode d'utilisation des voies

CH<sub>1</sub> : voie CH<sub>1</sub> seule en fonction du temps

CH<sub>2</sub> : voie CH<sub>2</sub> seule en fonction du temps

DUAL : voie CH<sub>1</sub> et voie CH<sub>2</sub> en fonction du temps

ADD : voie CH<sub>1</sub> + voie CH<sub>2</sub> en fonction du temps

SUB : voie CH<sub>1</sub> – voie CH<sub>2</sub> en fonction du temps

### **5. Mesure de déphasage entre deux tensions de même fréquence**

Soient deux tensions sinusoïdales :  $v_1 = V_1 \sin(\omega t + \varphi)$

$$v_2 = V_2 \sin(\omega t)$$

On mesurera le déphasage  $\varphi$  par deux méthodes différentes:

a) on évalue le déphasage  $\varphi$  en mesurant le décalage horizontal des 2 traces représentant les tensions  $v_1$  et  $v_2$ .

Envoyer la tension  $v_1$  sur CH<sub>1</sub> et  $v_2$  sur CH<sub>2</sub>; Mettre le sélecteur (20) sur DUAL. On peut alors mesurer le déphasage entre  $v_1$  et  $v_2$ .

b) on détermine le déphasage par la méthode des courbes de LISSAJOUS  
On met hors circuit la base de temps en plaçant le bouton (3) sur X-Y.

On applique  $v_1$  sur CH<sub>1</sub>(Y) et  $v_2$  sur CH<sub>2</sub>(X). La courbe fermée obtenue sur l'écran est le résultat de la composition rectangulaire de deux fonctions sinusoïdales du temps  $v_1$  et  $v_2$  déphasées de  $\varphi$ . Cette courbe a en général la forme d'une ellipse (ellipse de LISSAJOUS). Elle admet pour équations paramétriques :

$$x = k_x v_2 = k_x V_2 \sin(\omega t) \quad \text{et} \quad y = k_y v_1 = k_y V_1 \sin(\omega t + \varphi)$$

où  $k_x$  et  $k_y$  dépendent de la géométrie des plaques et du réglage des amplificateurs vertical et horizontal; en posant  $a = k_x V_2$  et  $b = k_y V_1$ , il vient :

$$x/a = \sin(\omega t) \quad \text{et} \quad y/b = \sin(\omega t + \varphi) = \sin \omega t \cos \varphi + \cos \omega t \sin \varphi$$

En éliminant le temps  $t$  entre ces deux équations, on a :

$x^2/a^2 + y^2/b^2 - 2(xy/ab) \cos \varphi = \sin^2 \varphi$ , qui est bien l'équation d'une ellipse inscrite dans un rectangle ABCD de dimensions  $AB=2a$  et  $AD=2b$ .

A l'instant  $t=0$ , le spot est en E tel que  $OE = b \sin \varphi = OF \sin \varphi$

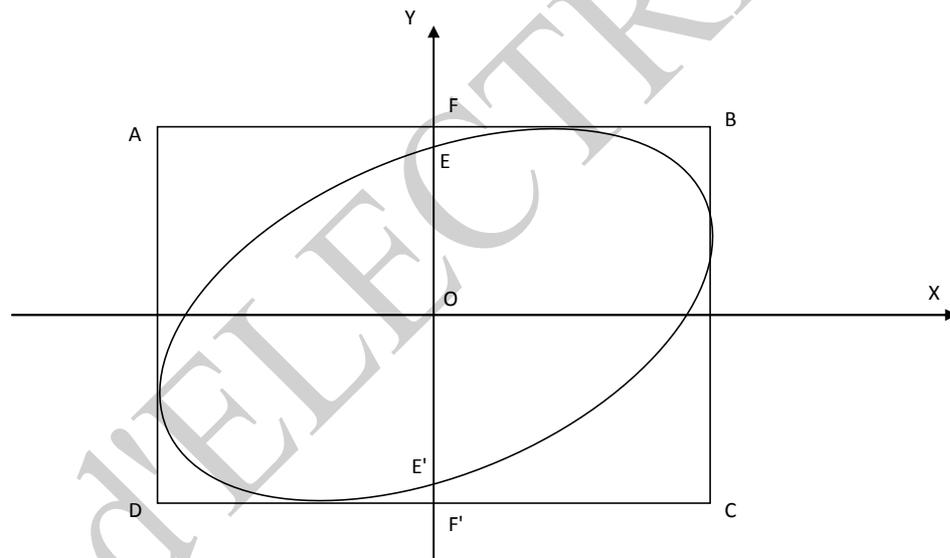
$\sin \varphi = OE/OF = EE'/FF'$ . On peut mesurer  $EE'$  et  $FF'$  sur l'écran et ainsi calculer  $\varphi$ .

### Cas particuliers :

Si  $\varphi=0$   $x/a - y/b=0$   $y = (b/a) x$  : équation d'une droite de pente  $b/a$

Si  $\varphi=\pi$   $x/a + y/b=0$   $y = -(b/a) x$  : équation d'une droite de pente  $(-b/a)$

Si  $\varphi=\pm\pi/2$   $x^2+y^2=1$  : équation d'une ellipse dont les axes sont les axes de coordonnées de l'écran.



## 6. Manipulation

Elle a pour but de se familiariser avec le fonctionnement d'un oscilloscope.

### 6.1. Mise en marche de l'appareil; réglage du spot

- Veiller à ce qu'aucune tension ne soit appliquée en  $CH_1$  et  $CH_2$
- S'assurer que les boutons de réglage du spot 10 et 11 sont en position médiane, ainsi que les boutons de cadrage vertical (12) et (19) et horizontal (5); laisser le bouton (5) enfoncé.

- Régler le bouton (6) en position AUTO.

Le spot doit apparaître et se déplacer sur l'écran ; si cela est nécessaire, corriger les réglages de (1) et (10) afin d'obtenir des spots fins de luminosité moyenne. Rectifier le cadrage.

**Remarque :** On observe sur l'écran une ligne horizontale (ou des spots se déplaçant) alors qu'aucune tension extérieure n'est appliquée sur CH<sub>1</sub> ou sur CH<sub>2</sub>. C'est que l'oscilloscope fonctionne en balayage. Le système interne à l'oscilloscope applique, sur les plaques de déviation horizontale, une tension en dents de scie (bouton (6) sur AUTO: fonctionnement "relaxé" de la base de temps).

## **6.2. Observation d'un signal; réglage de la base de temps**

**6.2.1. Mesure d'une tension :** la tension à mesurer sera reliée à la voie CH<sub>1</sub> par exemple. La base de temps fonctionnera en "déclenché". Le bouton (6) sera donc poussé; on placera le sélecteur (8) sur la source CH<sub>1</sub> et le sélecteur (7) sur des positions NOR+ ou NOR- suivant le front sur lequel on veut déclencher le bouton. On pourra vérifier son influence sur le niveau de déclenchement; on fera varier les différents réglages des amplificateurs et de la base de temps afin d'observer les modifications produites sur la trace. Le sélecteur (14) sera placé sur la position DC et le sélecteur (20) sur la position CH<sub>1</sub>.

### **a) Tension continue**

La tension continue fournie par le bloc d'alimentation étant médiocre, on fera cet essai avec une pile sèche (utiliser la voie CH<sub>1</sub>).

### **b) Tension alternative**

Injecter la tension du bloc d'alimentation délivrée entre les bornes 0-12 V sur la voie CH<sub>1</sub>. Observer le phénomène; mesurer la période, en déduire la fréquence; mesurer l'amplitude de la tension. Expliquer la différence entre la valeur 12 V indiquée par le bloc et la valeur mesurée sur l'écran.

### **c) Tension carrée**

Injecter la tension carrée délivrée par l'oscilloscope (bouton 4) sur la voie CH<sub>1</sub> de l'oscilloscope. Relever la courbe.

Déterminer l'amplitude crête à crête, ainsi que la fréquence

## **6.2.2. Mesure de déphasage**

- a) Réaliser le montage suivant (schéma 1)

Réaliser le montage d'abord et brancher aux bornes de l'oscilloscope ensuite.

- Respecter les polarités
- Vous n'avez besoin que d'un seul fil de masse pour relier la masse du montage à la masse de l'oscilloscope (les deux masses de l'oscilloscope sont reliées entre elles).

Visualiser la tension  $V_{AC}$  (aux bornes de  $(R_1+R_2)$ ) sur  $CH_1$  et la tension  $V_{BC}$  (aux bornes de  $R_2$ ) sur  $CH_2$ .

- Représenter les traces observées.
- Qu'observez-vous en DUAL

Représentez les traces.

- se mettre en mode XY; Qu'observez-vous?
- Quel est le déphasage entre les 2 signaux?

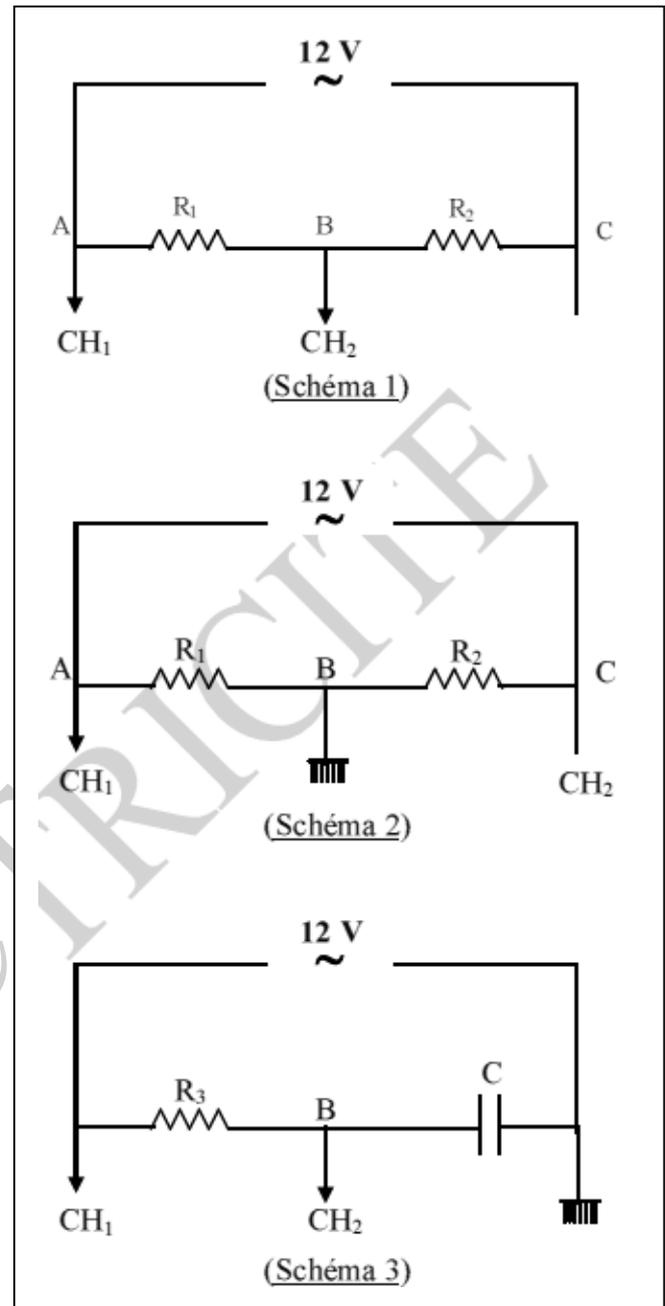
b) Inverser les polarités (schéma 2)

- Qu'observez-vous en DUAL?
- Se mettre en mode XY; qu'observez-vous?

- Faire la figure.

c) Réaliser le montage (schéma 3)

- A quoi correspond la tension observée sur  $CH_1$ ?
- Faire la figure.
- Même question pour  $CH_2$
- Visualiser les 2 tensions en mode DUAL ;
- Faire la figure.
- Calculer directement le déphasage entre les 2 tensions.
- Se mettre en mode XY.
- Représenter la figure observée.
- En déduire le déphasage avec cette seconde méthode.





## **TP n° 5 : Charge et décharge d'un condensateur**

### **1. Termes associés**

Condensateur, oscilloscope à balayage, circuit RC, phénomène de charge d'un condensateur, décharge, courant de décharge, tension carrée, constante de temps, fonction exponentielle, temps de demi vie.

### **2. Principe et objectif**

La charge et la décharge d'un condensateur sont en général des phénomènes trop rapides pour être observés à l'aide d'un voltmètre ou d'un ampèremètre, à cause de l'inertie de ces appareils. De ce fait, on se propose d'étudier la charge et la décharge d'un condensateur en visualisant, sur un oscilloscope, la différence de potentiel (d.d.p) aux bornes d'un condensateur placé dans un circuit RC et alimenté sous une tension 'créneaux'. Ces résultats sont ensuite comparés aux résultats établis au préalable, en résolvant l'équation du circuit.

### **3. Théorie et évaluation**

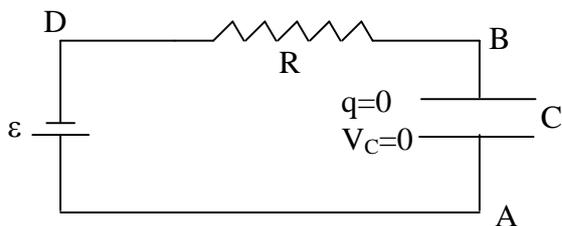
Ici, on rappelle l'aspect théorique concernant les phénomènes de charge et décharge d'un condensateur, qui sont en général des phénomènes très rapides, nécessitant l'utilisation d'un oscilloscope à balayage pour leur visualisation.



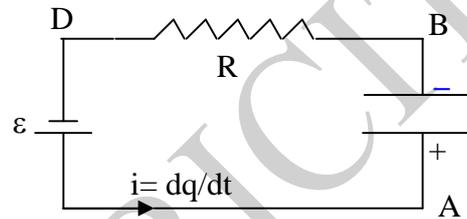
**Figure 0: Dispositif expérimental pour la charge et décharge d'un condensateur**

### 3.1. Charge d'un condensateur

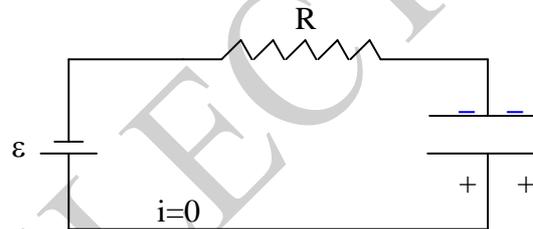
On place un condensateur de capacité  $C$  initialement non chargé dans un circuit RC alimenté par un générateur de tension continue (figure 1a). La charge  $q$  de ce condensateur augmente alors, et une d.d.p  $V_C = V_A - V_B = q/C$  croissante apparaît entre ces armatures. Le transfert de charge correspond à l'apparition d'un courant  $i$  qui a le sens indiqué sur la figure 1b. Les charges électriques ne pouvant traverser le condensateur, un régime d'équilibre va s'établir ( $i=0$ ), lorsque la d.d.p  $V_C$  sera égale à  $\varepsilon$  (tension aux bornes du générateur) (Figure 1c).



(Fig. 1a):  $t=0$



(Fig. 1b):  $t$  quelconque



(Fig. 1c): Condensateur chargé

Pour étudier le phénomène de charge du condensateur, appliquons la loi d'Ohm à un instant quelconque.

$$V_A - V_A = (V_A - V_B) + (V_B - V_D) + (V_D - V_A) = q/C + Ri - \varepsilon = 0$$

$i$  est la valeur du courant à cet instant. Si la plaque positive du condensateur reçoit la charge  $dq$  pendant le temps  $dt$ , le courant est  $i = dq/dt$ ; il a le sens du déplacement de  $dq$ , qui est positif comme  $q$ , d'où:  $\varepsilon = q/C + R dq/dt$  (1)

C'est une équation différentielle du premier ordre à variables séparées et ayant les conditions initiales: à  $t=0$ ,  $q=0$ .

Pour résoudre cette équation, on la résout d'abord sans second membre, c'est à dire :

$$\frac{q}{C} + R \frac{dq}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC} dt.$$

Elle admet comme solution:  $q(t) = \lambda e^{-t/RC}$ . La méthode de la variation des constantes conduit à prendre  $\lambda$  fonction du temps, ainsi:  $\frac{dq}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} e^{-t/RC} - \frac{\lambda}{RC} e^{-t/RC}$ . En remplaçant  $\frac{dq}{dt}$  dans (1), on

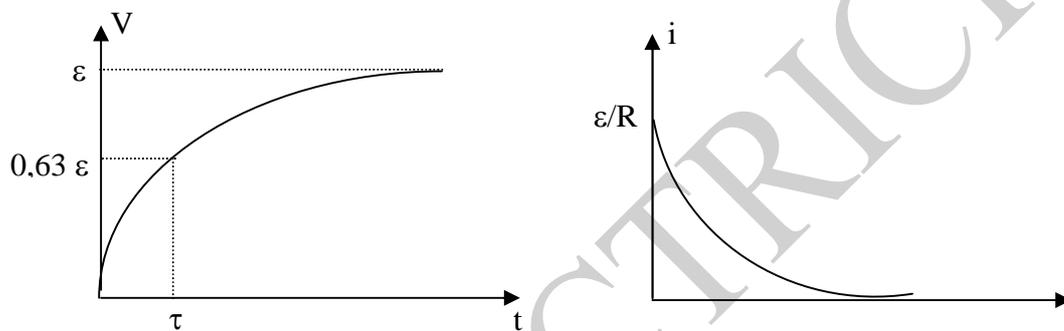
trouve:  $\frac{d\lambda}{dt} = \frac{\varepsilon}{R} e^{-t/RC} \rightarrow \lambda = C\varepsilon e^{-t/RC} + K$ ,  $K$  constante  $\Rightarrow q(t) = c\varepsilon + Ke^{-t/RC}$ .

On sait qu'à  $t=0$   $q=0 \Rightarrow 0 = c\varepsilon + K \Rightarrow K = -C\varepsilon$ .

D'où l'expression:  $q(t) = c\varepsilon (1 - e^{-t/RC})$

qui donne l'évolution de la charge du condensateur en fonction du temps.

La d.d.p aux bornes du condensateur a évidemment la même allure:  $V_C(t) = q/c = \varepsilon(1 - e^{-t/RC})$ . Le courant de charge est:  $i = dq/dt = \varepsilon/R e^{-t/RC}$ .



Le terme  $\tau = RC$  a les mêmes dimensions qu'un temps: on l'appelle constante de temps du circuit. Elle caractérise la "vitesse" de charge du condensateur.

En effet, à  $t = \tau \rightarrow q = c\varepsilon (1 - e^{-1}) = Q_{\text{final}}(1 - e^{-1}) = 0,63 Q_{\text{final}}$ : la charge est déjà aux deux tiers de sa valeur finale, de même que  $v$ . Et pour  $t = 3\tau$ , la charge atteint 99% de sa valeur finale.

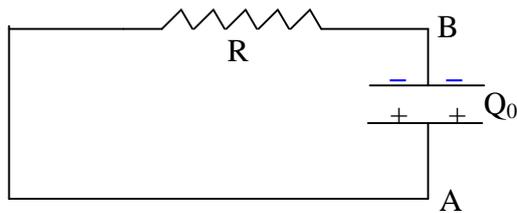
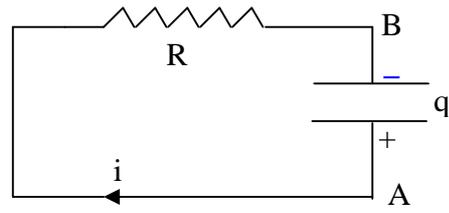
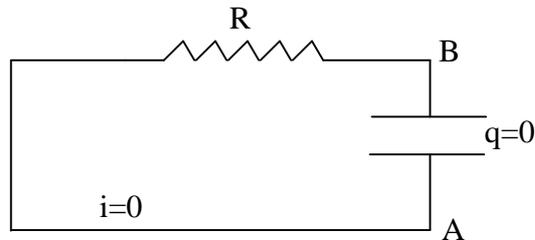
### 3.2. Décharge d'un condensateur

Le condensateur étant chargé à une valeur de  $Q_0$ , on supprime le générateur; la d.d.p entre ses armatures est  $V_0 = \frac{Q_0}{C} = V_A - V_B$ .

Au fur et à mesure que s'effectue la décharge, la charge  $q$  de la plaque positive diminue, de même que la d.d.p  $V_C$  aux bornes du condensateur. Un courant apparaît dont le sens est indiqué sur la figure 2b.

En choisissant comme sens de parcours sur le circuit le sens du courant réel, la loi d'ohm, appliquée à un instant quelconque, donne :

$$(V_A - V_A) = (V_A - V_B) + (V_B - V_A) = 0 \Rightarrow Ri - q/C = 0$$

(Fig. 2a):  $t=0$ (Fig. 2b):  $t$  quelconque

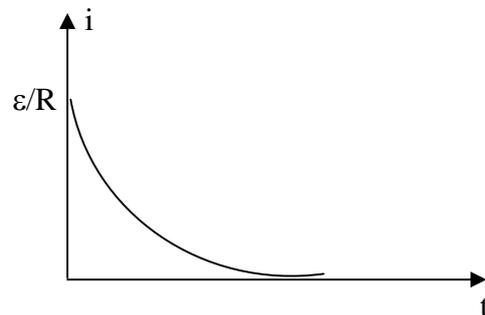
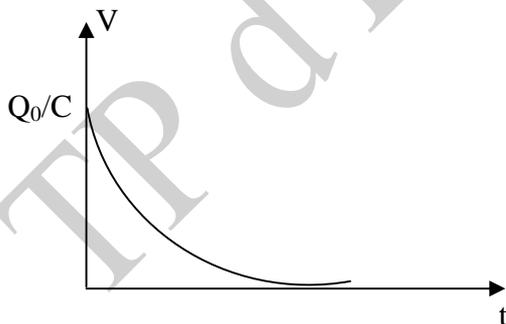
(Fig. 2c): Décharge complète

or  $i = -\frac{dq}{dt}$  car le terme  $i$  est positif, d'après notre convention. Et à l'instant  $t$ , le plateau porte la charge  $+q$  ; à l'instant suivant  $t'$ , il porte une charge  $q'$  inférieure à  $q$ . La variation de charge sur le plateau est  $dq = q' - q$  ;  $dq$  est négatif.

L'expression de la loi d'Ohm devient :  $\frac{q}{C} = -R \frac{dq}{dt}$ . C'est une équation différentielle que l'on résout en tenant compte des conditions initiales: à  $t=0$ ,  $q = Q_0 = c\varepsilon$ , ainsi:  $q(t) = Q_0 e^{-t/RC}$ .

La d.d.p aux bornes du condensateur est  $V_c = \frac{Q_0}{C} e^{-t/RC}$ .

Le courant de décharge est :  $i = \varepsilon/R e^{-\varepsilon/RC}$ .

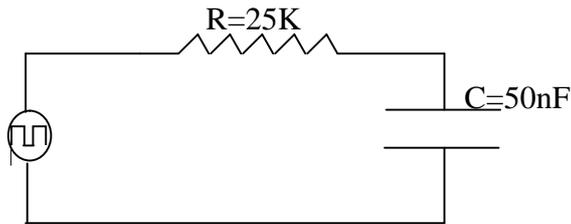


#### 4. Exploitation théorique

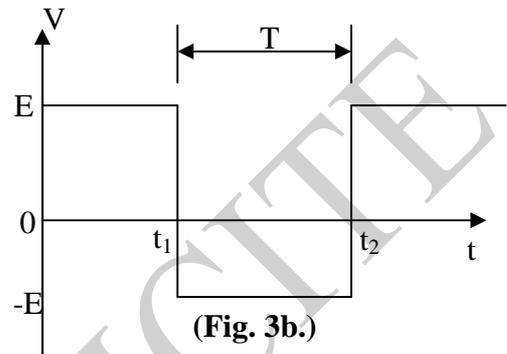
La charge et la décharge d'un condensateur sont en général des phénomènes trop rapides pour être observés à l'aide d'un voltmètre ou d'un ampèremètre à cause de l'inertie de ces appareils.

Il est possible de le faire à condition de répéter le phénomène identique à lui-même dans le temps. La répétition est obtenue en alimentant le circuit sous une tension carrée. Un oscilloscope à balayage permet alors de visualiser la charge et la décharge.

Ainsi, on se propose d'étudier le circuit RC ci-dessous en l'alimentant avec une tension carrée (figure 3b) d'amplitude  $E$  et de fréquence  $f = 100$  Hz.



(Fig. 3a.)



(Fig. 3b.)

- 1- Calculer la constante de temps  $\tau$  du circuit, ainsi que la durée  $T$  d'une seule alternance de la tension du générateur.
- 2- Décrire qualitativement ce qui se passe physiquement.
- 3- Durant la première alternance, la d.d.p  $V_C$  aux bornes du condensateur s'écrit :  $V_C = E (1 - 2e^{-t/RC})$ . Quelle est la d.d.p  $V_R$  aux bornes de la résistance?
- 4- Durant la 2<sup>ème</sup> alternance ( $V = -E$ ) et en prenant comme origine des temps  $t_1 = 0$ , la tension aux bornes du condensateur s'écrit  $V_C = CE (-1 + 2e^{-t/RC})$ . Quelle est  $V_R$ ?
- 5- Tracer sur un même graphe  $V$ ,  $V_R$  et  $V_C$  en prenant  $E = 5V$ .

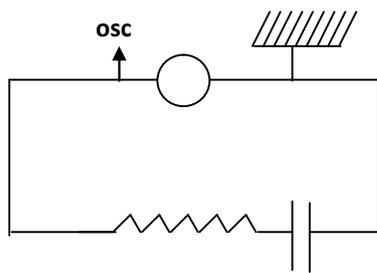
## 5. Exploitation expérimentale

- Matériel utilisé:

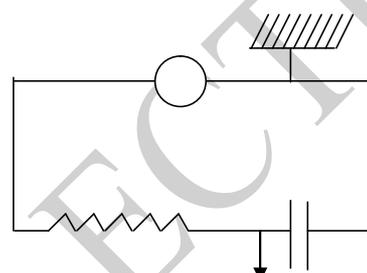
- 1 générateur de fonction
- 2 adaptateurs fiche BNC/douille 4mm
- 1 oscilloscope 1MHZ, 1 canal
- 1 boîte de résistance par décades  $1\Omega \dots 10M\Omega$
- 1 boîte de capacités par décades  $0,1 \text{ nF} \dots 1\mu\text{F}$
- 4 fils de connexion.

- Travail à faire:

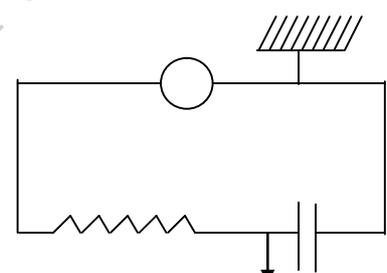
- 1- Réaliser le circuit de la figure 4a,  $R=25k\Omega$ ,  $C=50nF$  et  $T\cong 5ms$ . Ce circuit étant alimenté avec une tension carrée d'environ 6v crête à crête, relever la forme de la d.d.p V aux bornes du générateur.
- 2- Réaliser le montage de la figure 4b. Relever  $V_C$ .
- 3- Réaliser le montage de la figure 4c et inverser le bouton 'slope' de l'oscilloscope. Relever  $V_R$ .
- 4- Remonter le montage de la figure 4b et mesurer la constante de temps  $\tau$ . Comparer ces résultats avec ceux calculés en (III).
- 5- Multiplier par 10 la fréquence (c.à.d. tourner le bouton de sélection des fréquences sur le générateur de fonction); relever et expliquer qualitativement la forme des tensions (d.d.p).
- 6- Augmenter et diminuer de façon remarquable la résistance R. Observer et expliquer.
- 7- Faites de même avec la capacité C.



(Fig. 4a)



(Fig. 4b)



(Fig. 4c)



## TP n° 6 : Cuve rhéographique

### 1. Termes associés

Champ électrique, potentiel électrique, tension, surfaces équipotentielles, conducteurs chargés plans et cylindriques, lignes de champ, espace électrique, sonde-aiguille.

### 2. Principe et objectif

Un champ électrique  $\vec{E}$  est produit entre les plaques chargées fixées sur deux faces opposées d'une cuve remplie d'un liquide (eau, huile,...). Ces plaques sont portées à des potentiels différents générant ainsi un champ électrique dans l'espace séparant ces plaques, champ qui sera déterminé en un point de cet espace à travers le potentiel électrique mesuré en ce point.

### 3. Théorie et évaluation

#### 3.1. Rappels théoriques

A chaque point de l'espace  $\mathbf{M}(X, Y, Z)$  sont associées deux fonctions, l'une vectorielle et l'autre scalaire. Ces fonctions permettent de décrire l'espace électrique. Le champ s'écrit donc:

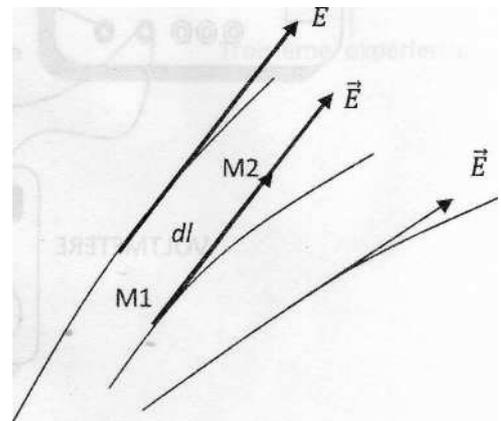
$$\vec{E} = \vec{E}(x, y, z) \quad \text{et le potentiel } V = V(x, y, z)$$

La relation entre ces deux fonctions est issue directement de la définition donnée pour le potentiel électrique.  $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V$ , où  $dV = \frac{\partial V}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial y} dy + \frac{\partial V}{\partial z} dz$

d'où les composantes du champ électrique:  $E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}$ ,  $E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}$ ,  $E_z = -\frac{\partial V}{\partial z}$

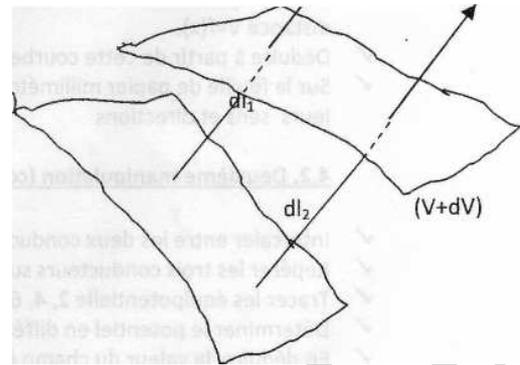
#### 3.2. Topologie de l'espace électrique

- Un repérage graphique des deux fonctions  $E$  et  $V$  est commodément réalisé par le tracé des lignes de champ et des surfaces équipotentielles; il faut noter à ce propos quelques propriétés importantes qui traduisent graphiquement la relation précédente entre  $\vec{E}$  et  $V$ . Le potentiel décroît le long d'une ligne de champ. Pour un déplacement particulier effectué dans le sens de la ligne de champ, on a:  $dV = -|E| \cdot |dl|$  montrant bien que le potentiel décroît.



- **Lignes de champ:**

On appelle ligne de champ une ligne qui, en chacun de ses points, est tangente au vecteur champ électrique  $\vec{E}$  en ce point. Voici les plus importantes propriétés des lignes de champ :



- 1) Les lignes de champ ne se coupent jamais si elles sont issues de la même source.
- 2) Les lignes de champ sont orientées dans le sens du champ électrique  $\vec{E}$ .
- 3) La direction du champ  $\vec{E}$  en un point est tangente à la ligne de champ.
- 4) L'intensité du champ, notée E, est proportionnelle à la densité des lignes de champ: ( $E_3 < E_2 < E_1$ )
- 5). Les surfaces équipotentielles se resserrent lorsque l'on passe d'une région où le champ est peu intense à une région de champ plus intense. De la surface (S) à la surface (S'), on a:

$$dV = -\vec{E}_1 \cdot \vec{dl}_1 = -|E_1| \cdot |dl_1| \quad \text{et} \quad dV = -\vec{E}_2 \cdot \vec{dl}_2 = -|E_2| \cdot |dl_2|$$

Si  $|dl_1| < |dl_2|$ , alors  $|E_1| > |E_2|$

- 6) Si le champ électrique est créé par des conducteurs chargés, les lignes de champ partent et entrent perpendiculairement à ces conducteurs. Elles sont perpendiculaires aux surfaces équipotentielles.

Remarque: La figure des lignes de champ est une représentation du champ. Elle est encore appelée spectre électrique.

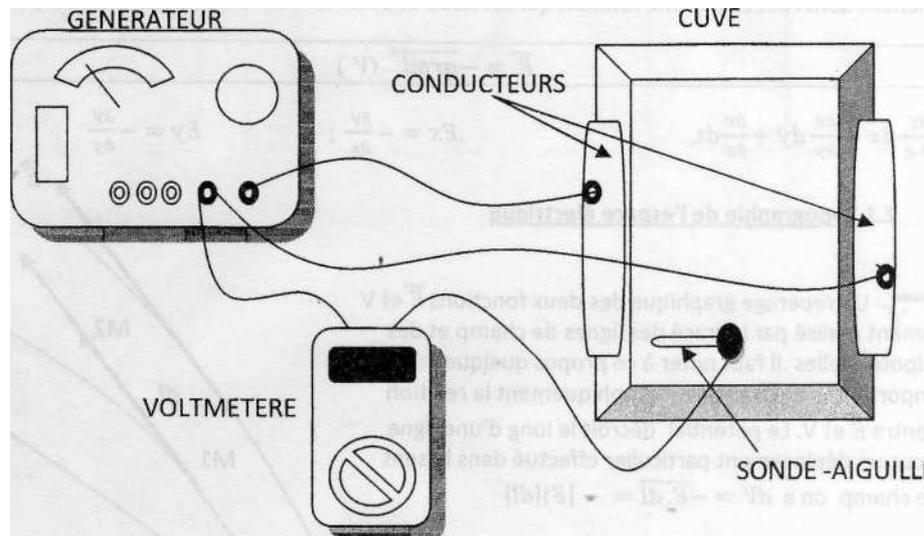
## **4. Manipulation**

### **4.1. Montage expérimental**

Le montage expérimental, illustré en figure 1, se compose d'un générateur de tension (pupitre de la table de travail), d'une cuve rhéographique en matière plastique munie de deux plaques conductrices sur deux faces opposées, et d'un chariot portant une sonde-aiguille permettant à celle-ci de se déplacer suivant deux axes (axe transversal et l'axe longitudinal). Le chariot, non illustré sur le schéma ci-dessous, permet aussi de repérer la position de la sonde sur une feuille de papier millimétré, placée sous la cuve.

La cuve est remplie d'eau de manière à ce que le niveau d'eau affleure le sommet des conducteurs. Un très faible courant circule dans l'eau, ce qui nous permettra de déterminer, à l'aide d'un voltmètre, le potentiel d'un point quelconque appartenant à l'espace entre ces deux conducteurs, par rapport à un conducteur de référence ( $V=0$ ). Le générateur sera réglé sur une tension de 12 V.

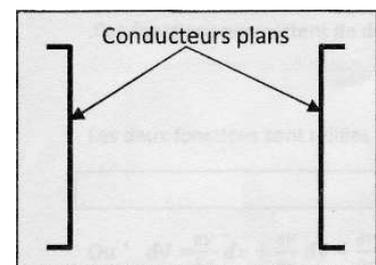
La sonde-aiguille jouant le rôle de capteur de tension est reliée à un voltmètre; il faut maintenir la sonde métallique (fine aiguille) bien verticale au cours des mesures pour obtenir une précision maximale.



**Figure 1:** Montage expérimental de la cuve rhéographique

#### 4.2. Cas de deux conducteurs plans

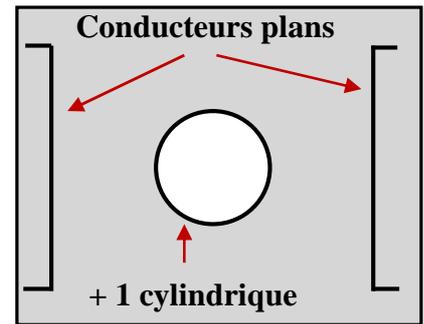
- ✓ Placer dans la cuve les deux conducteurs plans parallèlement, en les séparant d'une distance d'environ 12 cm. Mettre une feuille de papier millimétré sous la cuve de façon à faire coïncider l'axe Oy avec la plaque portée au potentiel  $V=0$  (voir figure 2).
- ✓ Repérer la position de ces deux conducteurs sur la feuille millimètre en unissant, d'un côté, la sonde collée à un des conducteurs et de l'autre côté, le stylo marqueur monté sur le chariot coulissant.
- ✓ Pour une différence de potentiel de 12 volts maximale entre les deux conducteurs plans, tracer les équipotentiels 2, 4, 6, 8, 10 Volts. Pour chaque équipotentielle, choisir cinq (5) points.
- ✓ Déterminer le champ électrique moyen  $E_{moyen}$  en un point M situé sur l'équipotentielle 6 V.
- ✓ Tracer, à partir du résultat obtenu de l'expérience précédente, la variation du potentiel électrique en fonction de la distance  $V = f(x)$ .
- ✓ En déduire l'expression mathématique de la relation entre V et x.
- ✓ Sur la feuille de papier millimétré de la première expérience, tracer quelques lignes de champ en précisant leurs sens et directions.



**Figure 2:** cuve avec 2 plaques parallèles

### 4.3. Cas d'un conducteur cylindrique placé entre les plaques parallèles

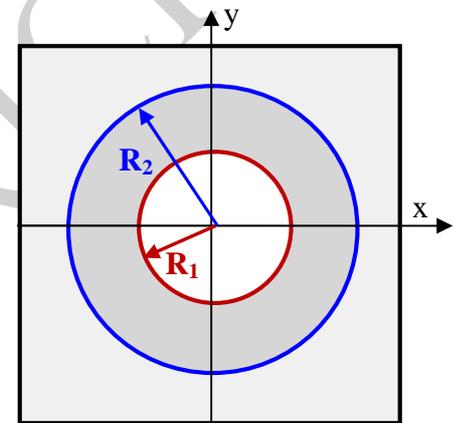
- ✓ Intercaler entre les deux conducteurs plans (au centre) un conducteur cylindrique isolé (voir figure 2).
- ✓ Repérer les trois conducteurs sur une nouvelle feuille de papier millimétré
- ✓ Tracer les équipotentielles 2, 4, 6, 8, 10 Volts
- ✓ Déterminer le potentiel en différents points intérieurs au conducteur cylindrique.
- ✓ En déduire la valeur du champ électrique dans cette partie de l'espace.



**Figure 3:** Cuve avec 2 conducteurs plans et un cylindrique

### 4.4. Cas de deux conducteurs cylindriques

- ✓ Placer les deux conducteurs cylindriques dans la cuve, en veillant à ce qu'ils soient concentriques (leurs centres étant confondus) (voir figure 4). Brancher le conducteur de rayon  $R_1$  au potentiel +12 V et celui de rayon  $R_2$  à 0 V.
- ✓ Repérer les positions de ces conducteurs sur une nouvelle feuille de papier millimétré en traçant les deux axes OX et OY.
- ✓ Déterminer la valeur du potentiel pour les valeurs de M de l'axe des x, en faisant varier x de  $-R_2$  à  $+R_2$  avec un pas de 1 cm.
- ✓ Refaire le même travail pour des points appartenant à l'axe des y, en faisant varier de  $-R_2$  à  $+R_2$  avec un pas de 1 cm.
- ✓ Dresser un tableau de mesures et tracer le graphe  $V = f(r)$  sur une feuille millimétré ( $0 < r < R_2$ ).
- ✓ Déduire la loi de variation du champ électrique en fonction de r.



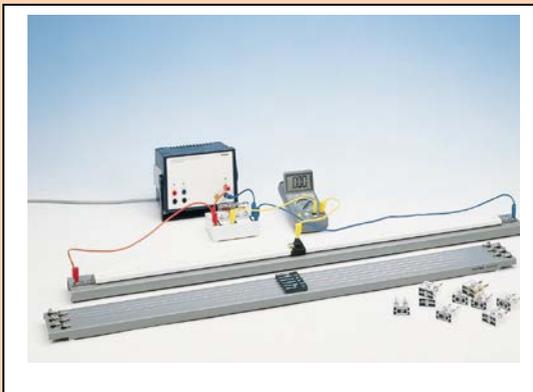
**Figure 4:** Cuve avec deux conducteurs cylindriques

# La Collection TP de PHYSIQUE



## Travaux Pratiques d'ELECTRICITE

*Cette collection TP de PHYSIQUE est un modeste recueil des travaux pratiques de physique assurés au sein des laboratoires du département de physique de la faculté des sciences (UMMTO); ces TP, conçus sur la base du matériel disponible, concernent plusieurs domaines de la physique (Mécanique, Electricité, Thermodynamique, Electromagnétisme, Physique de la Matière Condensée, Radiocristallographie, Optique,...). Ils constituent un apport pédagogique complémentaire aux cours magistraux dispensés dans les filières Licence et Master du département.*



Méthode du Pont à fil



Etude d'un transformateur