

**PS 94
2016**

ÉLECTRICITÉ
Philippe Pouletaut

TRAVAUX PRATIQUES

Université de Technologie de Compiègne

PS 94

TRAVAUX PRATIQUES D'ÉLECTRICITÉ

Conseils généraux

- I. Mesure de résistances par différentes méthodes, comparaison des précisions obtenues
- II. Oscilloscope numérique à mémoire, décharge d'un condensateur
- III. Mesures à l'oscilloscope, résonances

Objectifs des travaux pratiques

L'objectif des travaux pratiques est d'appréhender un domaine particulier de la physique et d'acquiescer des méthodes expérimentales, c'est à dire en particulier :

- confronter théorie et expérience,
- choisir un appareil de mesure et réaliser des montages,
- évaluer les incertitudes liées aux mesures, ainsi que celles liées au modèle physique,
- exploiter les mesures en tenant compte des spécifications du constructeur,
- argumenter et synthétiser sous la forme d'un rapport.

Organisation

Le travail de TP se fait en binôme. Chaque binôme devra rédiger 2 parties (préparation et rapport) :

- une partie préparation comprenant les réponses aux exercices du photocopié de TP,
- et un rapport de synthèse des résultats.

La **préparation** est un travail à faire en binôme et à remettre à l'assistant en début de séance. Les étudiants doivent chercher à faire les exercices proposés dans le photocopié de TP dans la partie introductive. Ce travail est d'autant plus nécessaire que la manipulation porte sur des principes non encore abordés en cours : il vise à mieux comprendre le phénomène étudié et les objectifs du TP.

Les étudiants devront arriver à la séance de TP avec un niveau de préparation tel qu'il ne reste plus qu'à faire les mesures et les interpréter. À chaque fois que cela est possible, il faut faire avant la séance le tracé des courbes théoriques : les points mesurés seront alors reportés directement sur ces courbes. La préparation rédigée sera rendue à l'assistant en début de séance.

La **séance de manipulation** est un travail fait en binôme. Toutes indications utiles (notice d'appareil, consignes) sont à prendre en compte de même que les remarques de l'assistant. L'objectif d'un TP n'est pas de faire tous les montages proposés mais d'apprendre à manipuler : le binôme ne commencera pas une nouvelle partie avant d'avoir terminé la précédente. Il s'agira en particulier de la validité des résultats en les comparant avec les valeurs théoriques et en estimant les incertitudes chaque fois que cela est possible.

La **réaction du rapport** est le résultat d'un travail de binôme fait en séance. Chaque binôme aura à remettre le rapport sur Moodle à la fin de la séance de manipulation.

Quelques conseils pour la rédaction du rapport sont donnés ci-après :

- 1) Les noms des auteurs et la date de la manipulation doivent figurer sur toutes les pièces du rapport. Ce dernier (4 pages maximum) peut être accompagné d'annexes pour les graphiques : ces annexes doivent être répertoriées dans le rapport.
- 2) Le rapport est destiné à un lecteur averti avant l'habitude de lire des résultats de mesures. Il peut faire référence aux notations et aux figures du fascicule de TP, aux tableaux de la copie d'analyse.
- 3) Il est indispensable de préciser en début de rapport les appareils de mesure utilisés avec leurs **caractéristiques** de façon à justifier l'évaluation des **incertitudes**. Le détail des calculs d'incertitude doit apparaître.
- 4) Pour les graphiques, l'usage d'Excel est tout indiqué ; mais la qualité du tracé et la facilité d'exploitation des graphiques doivent être équivalentes à celles obtenues à la main avec du papier millimétré.
- 5) Les résultats de mesure devront être reportés avec un nombre raisonnable de chiffres significatifs. Le dernier chiffre à reporter doit être de l'ordre de l'incertitude. Ainsi, si un calcul à la machine donne $f = 20,9458$ cm et si l'incertitude absolue est $\Delta f = 0,24$ cm, on écrira le résultat final : $f = 20,9 \pm 0,3$ cm.
- 6) Dans le cas où cela est significatif, les points de mesure seront reportés sur un graphique avec leur rectangle d'incertitude.

Évaluation

Chaque manipulation sera notée par binôme. La note d'une manipulation tiendra compte de trois parties égales : qualité de la préparation, conduite de la manipulation, qualité du rapport.

La note finale de TP prise en compte pour l'UV sera calculée par la moyenne des trois notes.

– MANIPULATION N°1 –

Mesure de résistances par différentes méthodes, Comparaison des précisions obtenues

Objectif du TP

Le TP comporte deux parties.

a) L'objectif de la première partie est d'appliquer plusieurs méthodes de mesure très classiques pour trouver les valeurs de quelques résistances. Nous utiliserons successivement :

- un ohmmètre,
- la méthode volt-ampérométrique (de type amont ou de type aval),
- un pont de Wheatstone.

Puis, nous appliquerons ces procédés pour mesurer trois types de résistances :

- une résistance faible RA dont la valeur est de l'ordre de quelques dizaines d'ohms,
- une résistance moyenne RB dont la valeur est de l'ordre de quelques centaines d'ohms,
- une résistance élevée RC dont la valeur est de l'ordre de quelques centaines de kilo-ohms.

À chaque fois, nous déterminerons la précision correspondante.

Nous terminerons en concluant sur le choix de la meilleure solution, en fonction de l'ordre de grandeur de la résistance à mesurer.

b) La seconde partie consistera à déterminer expérimentalement le modèle de Thévenin d'un dipôle réputé linéaire.

I – Utilisation d'un Ohmmètre

L'ohmmètre est un appareil (ou l'une des fonctions d'un multimètre) qui a été conçu de façon à indiquer directement la valeur d'une résistance connectée entre les deux bornes prévues à cet effet.

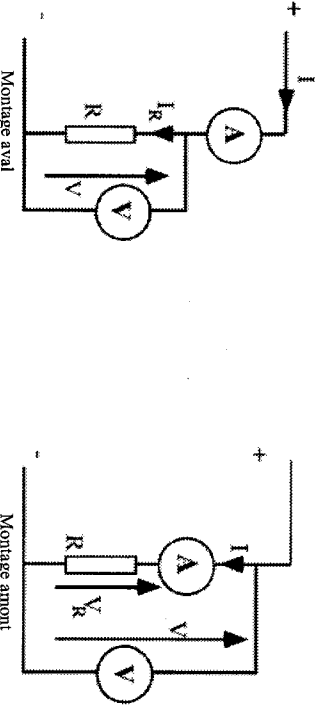
Vous disposerez pour les mesures d'un multimètre (de référence ISO-TECH IDM91E) à utiliser en ohmmètre.

Travail préparatoire

Déterminez d'après la notice de l'appareil (voir extrait de la notice en fin de texte) la formule pour calculer l'incertitude sur la mesure selon le calibre utilisé.

II – Méthode dite « Volt-Ampérométrique »

Cette méthode consiste à faire traverser un courant « I » et à mesurer ce courant « I » à l'aide d'un ampèremètre, ainsi que la tension « V » à ses bornes à l'aide d'un voltmètre. Nous en déduisons alors la valeur de la résistance R par la loi d'Ohm : $R = \frac{V}{I}$. En pratique, nous distinguons deux variantes : le montage dit amont et le montage dit aval.



Dans le montage aval, le courant I que mesure l'ampèremètre n'est pas exactement égal au courant IR qui traverse la résistance. Par contre, la tension V mesurée par le voltmètre est bien la tension aux bornes de la résistance.

De ce fait, le rapport $\frac{V}{I}$ n'est pas exactement égal à la résistance R, mais il est égal à l'association en parallèle de R et de la résistance équivalente à l'entrée du voltmètre (dite impédance du voltmètre) : R_V

$$\frac{V}{I} = \frac{R R_V}{R + R_V}$$

Nous pouvons en déduire que $\frac{1}{R} = \frac{1}{V} - \frac{1}{R_V}$

Nous en déduisons aussi que cette méthode est d'autant plus précise que l'impédance du voltmètre R_V est très élevée par rapport à R.

Nous choisirons donc cette solution pour mesurer des résistances R de valeur faible.

Nous pourrions alors admettre que $R \approx \frac{V}{I}$

Dans le montage amont, la tension V que mesure le voltmètre n'est pas exactement égale à la tension VR aux bornes de la résistance. Par contre, le courant I mesuré par l'ampèremètre est bien celui qui traverse la résistance.

De ce fait, le rapport $\frac{V}{I}$ n'est pas exactement égal à la résistance R, mais il est égal à l'association en série de R et de la résistance équivalente à l'ampèremètre (dite impédance de l'ampèremètre) : R_A

$$\frac{V}{I} = R + R_A$$

Nous pouvons en déduire que : $R = \frac{V}{I} - R_A$

Nous en déduisons aussi que cette méthode est d'autant plus précise que l'impédance de l'ampèremètre R_A est très faible par rapport à R. Nous choisirons donc cette solution pour mesurer des résistances R de valeur élevée.

Nous pourrions alors admettre que : $R \approx \frac{V}{I}$

Vous utiliserez comme ampèremètre le ISO-TECH IDM91E et comme voltmètre le SEFRAM 7210.

Travail préparatoire

En étudiant les extraits des notices des constructeurs joints à ce texte de TP, trouvez les valeurs des impédances des deux appareils RA et RV, selon les calibres auxquels ils sont utilisés.

Pour quelles valeurs de R choisirez-vous le montage amont ?

Pour quelles valeurs de R choisirez-vous le montage aval ?

III – Pont de Wheatstone

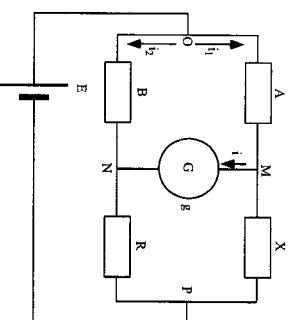
Le pont de Wheatstone utilise une méthode dite de zéro pour la détermination de la valeur des résistances. C'est une méthode qui permet d'obtenir de très bonnes précisions pour des résistances comprises dans la gamme 1 Ω – 1 MΩ.

Principe de la méthode

- X est la résistance à mesurer,
- A, B et R sont trois résistances réglables et connues avec précision,
- G est un microampèremètre : dans un circuit électrique en régime continu, il est assimilable à une simple résistance g.
- E est une source de tension supposée parfaite.

Le principe de la méthode consiste à ajuster les valeurs des résistances A, B et R de façon à annuler le courant i dans le microampèremètre.

Quand ce courant i est nul, le pont est dit équilibré. Un calcul élémentaire permet alors de déduire la valeur de la résistance inconnue.



Dans ce cas :

$$\begin{aligned} V_M - V_N &= 0 \\ V_M - V_N &= B i_2 - A i_1 \\ V_M - V_N &= X i_1 - R i_2 \end{aligned}$$

Donc :

$$\frac{B}{R} = \frac{A}{X}$$

En divisant membre à membre les deux égalités, on obtient :

$$\text{Si les trois résistances } A, B \text{ et } R \text{ sont connues, on peut en déduire la valeur de } X : X = R \frac{A}{B}$$

Calcul d'erreur

Un calcul classique donne :

$$\frac{\Delta X}{X} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$$

En général, on fixe les résistances A et B et on règle la résistance R pour obtenir l'équilibre. On a donc :

- une erreur de construction sur A : $\left(\frac{\Delta A}{A}\right)_e$,
- une erreur de construction sur B : $\left(\frac{\Delta B}{B}\right)_e$,
- une erreur de construction sur R : $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_d$,
- et une erreur de détermination sur R : $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_d$.

Les erreurs de construction sur les résistances-étalon A, B et R sont connues avec précision ; elles sont données par le constructeur pour R et K.

$$\left(\frac{\Delta A}{A}\right)_e + \left(\frac{\Delta B}{B}\right)_e = \left(\frac{\Delta K}{K}\right)_e$$

Dans notre pont, c'est le rapport $K = \frac{A}{B}$ que nous imposons et non pas les valeurs A, B. Les erreurs de construction

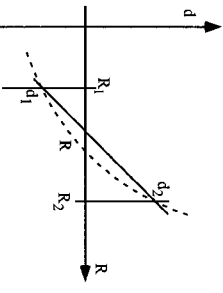
$$\frac{\Delta A}{A} \text{ et } \frac{\Delta B}{B} \text{ sont remplacées par l'erreur de construction unique du rapport } K = A/B, \frac{\Delta(A/B)}{A/B} \text{ (ceci parce que les résistances } A \text{ et } B \text{ ont été étalonnées avec le même étalon).}$$

L'erreur de détermination dépend de la sensibilité de notre microampèremètre.

Si le microampèremètre est très sensible, comme la résistance R varie de manière discontinue par bonds de r ohms, il est possible que l'équilibre ne soit jamais réalisé, mais encadré par deux valeurs R₁ et R₂ de R.

Pour R₁, G dévie dans un sens de d₁ divisions ; Pour R₂, G dévie dans un sens de d₂ divisions. Comme R₁ et R₂ sont deux valeurs très proches, on peut faire une interpolation linéaire entre R₁ et R₂.

$$\text{On peut ainsi approcher } R \text{ par : } R = R_1 + (R_2 - R_1) \cdot \frac{|d_1|}{|d_1| + |d_2|}$$



Les déviations d₁ et d₂ sont connues à l'erreur de lecture près Ad.

Les résistances R₁ et R₂ sont connues à l'erreur de construction près $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_e$.

$$\text{Donc : } \frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_e + \frac{|R_2 - R_1|}{R} \cdot \frac{Ad}{|d_1| + |d_2|}$$

Si le microampèremètre est peu sensible, l'équilibre est obtenu pour plusieurs valeurs de la résistance R. Nous allons détecter les valeurs R₁ et R₂ de R qui nous donnent une déviation minimale de l'aiguille du microampèremètre dans des sens opposés. Il suffit de remplacer les déviations d₁ et d₂ par Ad dans la relation précédente.

$$\text{Donc : } \frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_e + \frac{|R_2 - R_1|}{2R}$$

Travail préparatoire

La boîte de rapport K est réalisée avec 2 séries de résistances dont voici les valeurs approximatives.

Rapport K	A	I _{max} de A (mA)	B	I _{max} de B (mA)
0,001	0,99 Ω	1000	999 Ω	75
0,01	9,9 Ω	750	990 Ω	75
0,1	90,9 Ω	250	909 Ω	75
1	500 Ω	75	500 Ω	75
10	909 Ω	75	90,9 Ω	250
100	990 Ω	75	9,9 Ω	750
1000	999 Ω	75	0,99 Ω	1000

Sachant que R est compris entre 0 et 12222,1 Ω, pré-déterminez la valeur du rapport K à utiliser pour chacune des résistances R_A, R_B et R_C. On considérera le cas : R_A = 10 Ω ; R_B = 100 Ω ; R_C = 10³ Ω

Pour chaque résistance R_A, R_B et R_C, calculez la valeur maximale de la tension d'alimentation que vous pouvez utiliser sans dépasser les courants admissibles dans les résistances (valeurs du tableau suivant) ainsi qu'un courant maximum d'alimentation de 100 mA.

Boîte à décades	Courant max (en mA)
11 x 1 Ω	750
11 x 10 Ω	250
11 x 100 Ω	75
11 x 1000 Ω	25

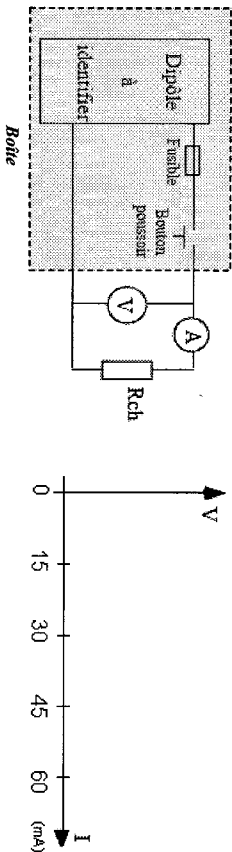
IV - Modèle de Thévenin d'un dipôle linéaire

Nous voulons déterminer expérimentalement le modèle de Thévenin d'un dipôle réputé linéaire.

Réfléchissez aux mesures nécessaires pour déterminer le générateur de Thévenin équivalent à la source mise à votre disposition. Cette source est constituée d'une pile alcaline de 9 V placée dans un boîtier support et associée à un fusible de 100 mA pour assurer une protection contre les courts-circuits et un bouton poussoir de marche pour éviter toute décharge inutile.

Proposez la méthodologie de détermination des éléments du générateur de Thévenin équivalent, sachant que vous pouvez reprendre la résistance R ajustable précédemment utilisée dans le pont de Wheatstone.

Afin de vérifier si le dipôle est vraiment linéaire, on ne se contentera pas de prendre 2 points de mesure, mais on tracera la courbe V = f(I) pour mettre en évidence la linéarité.



Sachant que la force électromotrice est de l'ordre de 9 V, calculez les valeurs approximatives à donner à la résistance de charge pour obtenir 4 points de mesure en charge assez régulièrement répartis entre 0 et 60 mA.

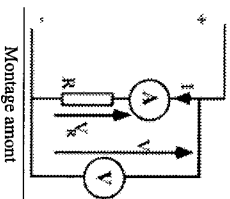
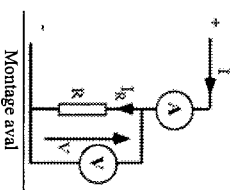
Manipulation

I - Utilisation d'un Ohmmètre

Mesurez avec l'ohmmètre (de référence ISO-TECH IDM91E) les valeurs des trois résistances R_A , R_B et R_C mises à votre disposition.

Pour chaque mesure, calculez l'incertitude sur la mesure. Donnez la plage d'incertitude sur la valeur de chacune des résistances R_A , R_B et R_C .

II - Méthode dite « Volt-Ampérométrique »



Vous utiliserez comme ampèremètre le ISO-TECH IDM91E et comme voltmètre le SEPRAM 7210. Trouvez les incertitudes sur les mesures effectuées par les deux appareils selon les schémas.

Pour chacune des résistances R_A , R_B et R_C dont vous connaissez les valeurs approximatives, dites s'il est préférable d'avoir recours à un montage amont ou aval.

Pour chacune des résistances, calculez les valeurs maximales à donner à la tension V et au courant I pour que la puissance dissipée dans la résistance n'excède pas 250 mW.

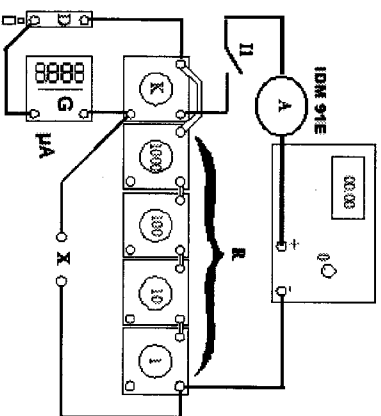
Effectuez le montage avec un générateur de tension réglé à 0 V (Bouton Tension tournée en butée gauche). En respectant bien les limites en tension et courant, réglez le générateur de tension depuis la position zéro à la position désirée ; mesurez les valeurs des résistances et effectuez le calcul d'incertitude correspondant.

Donnez la plage d'incertitude ainsi obtenue sur la valeur de chacune des résistances R_A , R_B et R_C . Comparez la précision des mesures entre l'utilisation d'un ohmmètre et la méthode volt-ampérométrique.

III - Pont de Wheatstone

Voici le montage à réaliser pour faire vos mesures.

Alimentation



Il utilise un interrupteur II (24 V max) avec fusible 100 mA et un ampèremètre ISO-TECH IDM 91E. L'élément D est un interrupteur permettant de protéger le microampèremètre.

Vous utiliserez les boîtes à décades X1000, X100, X10 et X1, ainsi que la boîte de rapport K donnant directement la valeur du rapport A/B.

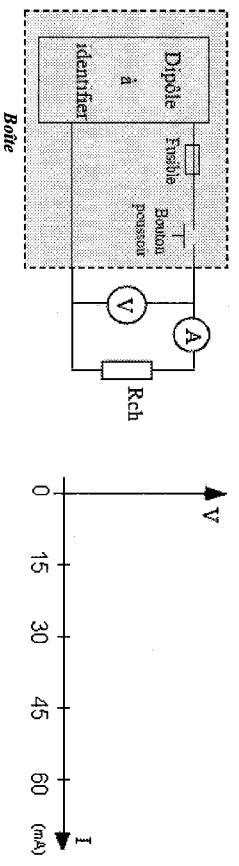
Le microampèremètre G est ici un milliammètre numérique portable réglé sur la position uA.

Réalisez le montage proposé avec interrupteur II ouvert et l'alimentation E à zéro.
 Pour chaque résistance R_A , R_B et R_C , vous allez successivement :

- brancher la résistance à mesurer;
- régler la valeur de la boîte de rapport K à la valeur que vous avez prédéterminée,
- mettre sous tension l'alimentation et la régler sur la valeur de tension aussi prédéterminée,
- régler R à la valeur supposée d'équilibre,
- appuyer sur l'interrupteur D (vers le bas) et observant le microampèremètre, (si sa déviation est très importante, relâchez immédiatement l'interrupteur I),
- modifier R pour annuler le courant dans le microampèremètre, quand vous approchez du zéro, vous pouvez bloquer l'interrupteur D (vers le haut) et augmenter la sensibilité du microampèremètre en appuyant sur le bouton (noté s appuyer) placé entre ses 2 bornes,
- modifier R pour apprécier le ΔR de détermination,
- replacer l'interrupteur D sur la position médiane (D ouvert) et régler la tension de la source à zéro avant de passer à la résistance suivante.

Calculez les valeurs des résistances et effectuez le calcul d'incertitude correspondant.
 Donnez la plage d'incertitude ainsi obtenue sur la valeur de chacune des résistances R_A , R_B et R_C .
 Comparez la précision des mesures entre cette méthode et les précédentes.

IV – Modèle de Thévenin d'un dipôle linéaire



- Utilisez en ampèremètre l'ISO-TECH IDM91E et en voltmètre le SEFRAM 7210.
- Mesurez la tension à vide V_{s0} (bouton poussoir appuyé, sans résistance de charge).
- Mesurez les tensions et courants en charge sous les quatre valeurs de résistance que vous avez calculées.
- Déterminez les incertitudes sur les mesures.
- Tracez la courbe $V = f(I)$, en visualisant les rectangles d'incertitude.
- Est-elle linéaire ?
- Peut-on déterminer un modèle de Thévenin ? Si oui, donnez les valeurs de E_{th} et de R_{th} .
- Quelles sont les limites d'utilisation de ce modèle ?

Annexe

SEFRAM 7210
MULTIMETRE NUMERIQUE DE TABLE
BENCHTOP DIGITAL MULTIMETER

(1) DC Volts

Range	Resolution	Accuracy	Over voltage protection
200mV	100µV	±(0.5%rdg + 2dgt)	1100C DC or 1100Vp-p
2V	1mV		
20V	10mV		
200V	100mV		
500V	1V		

Input Impedance: 10MΩ

ISO-TECH IDM 91E

(2) Resistance

Range	Resolution	Accuracy	Max Test	Max.Open
200Ω	0.1Ω	±(0.75%reading + 4dgt)	2.5mA	3.2V
2KΩ	1Ω		200 µA	
20KΩ	10Ω	±(0.75%reading + 1dgt)	40 µA	0.5V
200KΩ	100Ω		4 µA	
2MΩ	1KΩ		400nA	
20MΩ	10KΩ	±(1.5%reading + 4dgt)	40nA	

(3) DC Current

Range	Resolution	Accuracy	Voltage Burden
200 µA	0.1 µA	±(1.0%reading + 1dgt)	600mV max.
2mA	1 µA		
20mA	10 µA		
200mA	100 µA		
10A	16mA	±(2.0%reading + 3dgt)	900mV max.

– MANIPULATION N°II –

Oscilloscope à mémoire, décharge d'un condensateur

L'objet de la manipulation est l'étude de signaux transitoires, c'est à dire de signaux de durée relativement courte. La manipulation sera l'occasion d'utiliser un oscilloscope numérique à mémoire TDS1000 pour visualiser les signaux. On déterminera des constantes de temps à partir des tensions enregistrées.

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'OSCILLOSCOPE

Un oscilloscope traditionnel permet de visualiser les variations d'une tension $u(t)$ au cours du temps. Un oscilloscope numérique à mémoire assure les mêmes fonctions qu'un oscilloscope traditionnel, mais il stocke le signal dans sa mémoire sous forme digitale, ce qui permet de le conserver et de le restituer à l'écran ultérieurement. Le signal peut ensuite être exploité par un ordinateur ou transféré sur un micro-ordinateur. Il est particulièrement adapté à l'étude des phénomènes transitoires, non répétitifs.

Il faut se rappeler qu'un oscilloscope visualise des tensions entre une entrée (I) y en a deux désignées sur l'appareil par I et II) et la masse. Les entrées de l'oscilloscope sont des prises coaxiales de type BNC (femelle). La masse de l'oscilloscope est reliée aux gaines des câbles BNC (voir figure) : l'âme du câble BNC (conducteur central) transporte le signal. On utilise des cordons, dont au moins une extrémité est une fiche BNC mâle, pour être reliés aux entrées (I ou II). L'autre extrémité peut être de type banane (2 bornes masse et signal comme indiqué sur la figure ci-dessous).

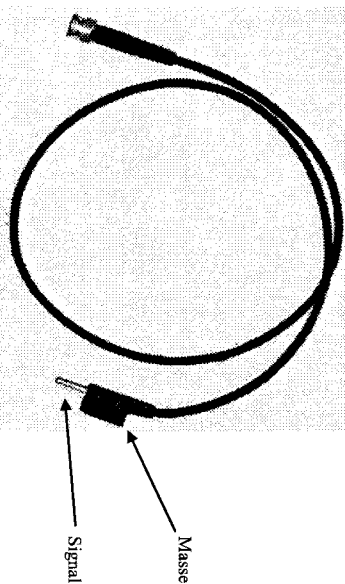


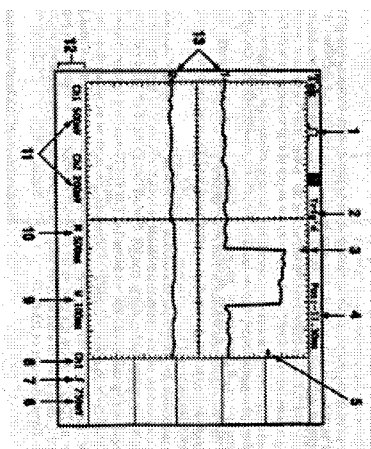
Figure - Cordon à fiche BNC mâle et fiche banane

Un enregistrement d'un signal à l'oscilloscope consiste dans la saisie de 2500 points de mesure, correspondant à la valeur de la tension (signal) à des intervalles de temps réguliers défini par la vitesse d'échantillonnage. Le début d'une acquisition est commandée par un signal de déclenchement généré par un dispositif appelé **TRIGGER** (en anglais : *gâchette, détente*) dont le fonctionnement et les réglages seront décrits plus loin. Chaque point de mesure représente un point de la courbe $u(t)$. La valeur de la tension est codée sur 8 bits (soit 256 valeurs possibles avec une échelle qu'on ajuste par un réglage de sensibilité). Le temps est donné par le numéro d'ordre de la mesure si on connaît la vitesse d'échantillonnage. La liste de 2500 valeurs peut être transférée sous forme de fichier à un ordinateur.

Au moment de l'enregistrement le signal est visualisé sur l'écran, mais il est impossible de visualiser tous les points de mesure directement à cause de la résolution limitée de l'écran. Les paramètres qui gouvernent un enregistrement sont la **sensibilité** et la **vitesse d'échantillonnage**.

AFFICHAGE

L'affichage du signal se fait sur un écran LCD, qui fournit également des informations sur les paramètres de la configuration de l'instrument. Un exemple obtenu par copie d'écran est reproduit ci-dessous. Les chiffres en marge renvoient aux explications de la page suivante.



Légende de la copie d'écran

1. Cette icône indique le mode d'acquisition.
Mode normal
2. Cette icône indique le mode de détection de crête.
Mode de moyennage

3. L'état du déclenchement indique la présence d'une source de déclenchement adéquate ou montre si l'acquisition est arrêtée.
4. Ce marqueur indique la position du déclenchement horizontal. Il montre aussi la position horizontale, car la commande de Position horizontale déplace la position de déclenchement sur le plan horizontal.
5. L'affichage de la position de déclenchement indique la différence en temps entre le réticule central et la position de déclenchement. Le centre de l'écran est égal à zéro.
6. Ce marqueur indique le niveau de déclenchement.
7. Cet indicateur donne la valeur numérique du niveau de déclenchement.
8. Cette icône montre la pente de déclenchement sélectionnée pour le déclenchement par front d'impulsion.
9. Cet indicateur montre la source de déclenchement utilisée.
10. Cet indicateur montre le paramètre de base de temps de la zone de la fenêtre.
11. Cet indicateur montre le paramètre de base de temps principal.
12. L'écran affiche momentanément les messages en ligne.
13. Les marqueurs situés sur l'écran montrent les points de référence de terre des signaux affichés. Aucun indicateur ne signale qu'une voie n'est pas affichée.

RÉGLAGES

Réglage de la sensibilité, résolution et étendue de mesure en tension

La sensibilité se règle comme sur un oscilloscope traditionnel par un bouton VOLTS/DIV sur la partie « vertical » de la face avant de l'oscilloscope, la valeur active est affichée à l'écran (11). (Les chiffres entre parenthèses renvoient à la figure de la page 1) en bas de l'écran en volt (pour volt par division). Il y a deux voies d'entrée notées CH1 et CH2 (CH pour channel) avec des sensibilités distinctes.

Sur l'écran une division correspond à un quadrillage carré de 1cm de côté. Chaque carré est formé de 25x25 pixels. La résolution d'affichage est donc égale à la sensibilité divisée par 25 et l'étendue d'affichage est égale à la sensibilité multipliée par le nombre de divisions, par 8 (l'écran a 8cm de haut). Chacun des 256 niveaux du codage sur 8 bits correspond à un pixel, il y a 256 niveaux et seulement 200 pixels, donc on ne peut pas afficher tous les niveaux, au moment de l'enregistrement et l'étendue de mesure est un peu plus grande que celle de l'affichage.

Mais une fois un enregistrement unique (monocoup par exemple) effectué, si on augmente la sensibilité de l'affichage, on verra les valeurs des tensions se répartir en fonction des niveaux du codage 8 bits (voir page 3).

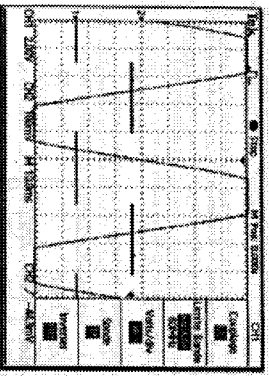
Réglage de la vitesse d'échantillonnage et de la vitesse de balayage

Le temps est donné par le numéro d'ordre de la mesure parmi les 2500 points mesurés ; le temps est connu si on connaît la vitesse d'échantillonnage. La vitesse d'échantillonnage se règle par le choix de la « vitesse de balayage » (ou paramètre de base de temps) comme sur un oscilloscope traditionnel en agissant sur le bouton SEC/DIV de la partie « horizontal » de la face avant. La valeur de SEC/DIV est affichée en bas de l'écran (10). Sur le TDS210 utilisé elle peut varier de 5 ns/DIV à 5 s/DIV.

La totalité du signal enregistré est affichée à l'écran. Les 10 cm de l'écran vont correspondre aux 2500 points de mesure. Les 25 pixels d'une division correspondent à 250 mesures. Les mesures ne seront donc pas toutes représentées par un point à l'écran. La vitesse d'échantillonnage correspond au 250ème d'une division (sauf pour les petites valeurs de SEC/DIV). Sur le TDS210 utilisé elle peut varier de 50 à 5.10⁹échs. Sur la figure de la page 1, l'enregistrement à été fait à 500 ns/DIV, donc avec un intervalle de temps entre deux mesures consécutives de 2ms (résolution temporelle) soit une vitesse d'échantillonnage de 500 échs.

La résolution à l'affichage (un pixel sur l'écran) est donc de 1/25 de SEC/DIV. La résolution à l'enregistrement est dix fois plus petite que la résolution à l'affichage au moment de l'enregistrement. Au moment de l'enregistrement tous les points ne peuvent pas être affichés. On peut faire apparaître à l'écran les points de mesure, il faut, après l'enregistrement, augmenter la vitesse de balayage au moins d'un facteur 10 (diviser SEC/DIV au moins par 10) en s'assurant que l'affichage se fait bien par point et non en continu (voir le menu AFFICHAGE).

Les copies d'écran suivantes illustrent comment la numérisation des mesures influe sur l'aspect de l'écran.



Le premier écran correspond à ce qui apparaît après l'enregistrement simple séquence (monocoup) sur CH1 d'un signal carré, qui donne un trait horizontal de deux pixels d'épaisseur. A cause de fluctuations parasites, les valeurs mesurées à l'enregistrement se trouvent essentiellement sur deux niveaux contigus séparés de 2000/25 = 80 mV sur CH2 d'un signal sinusoïdal. La sinusoïde est coupée à ± 400 mV à cause de la sensibilité de 100 mV de CH2. L'étendue d'affichage est limitée à ± 4x100 mV. La résolution est de 100/25 = 4 mV.

Le deuxième écran est le même enregistrement affiché avec des sensibilités différentes.

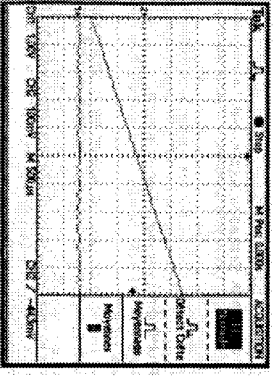
Sur CH1 on a augmenté la sensibilité qui est passée de 2 V/DIV à 1 V/DIV (attention la sensibilité augmente quand le nombre de volt par division diminue). On voit que le trait horizontal du premier écran s'est dédoublé. La résolution à l'affichage est passée à 1000/25 = 40 mV. Les valeurs mesurées distinctes de 80 mV, n'apparaissent plus sur des pixels contigus.

Sur CH2 on a diminué la sensibilité, ce qui a diminué la hauteur de la sinusoïde. La résolution à l'affichage est passée à 200/25 = 8 mV. La courbe est coupée à 64 pixels au-dessus et en-dessous du zéro, soit ± 64x8 = ± 512 mV. L'étendue de mesure est supérieure à ce qui est affiché immédiatement après l'enregistrement, des points mesurés ne sont pas affichés au moment de l'enregistrement.

Encore le même enregistrement est affiché avec une vitesse de balayage 20 fois plus grande, 500 µs/DIV au lieu de 10 ms/DIV. Seule la partie centrale de l'enregistrement est visible.

On voit que les points affichés sont séparés. A l'enregistrement la résolution est de 10/250 = 40 µs. A l'affichage elle est de 500/25 = 20 µs, il y a une mesure tout les deux pixels.

Choisir le mode d'affichage par point, sinon avec le mode continu le système ajoute des points pour faire une ligne continue et la résolution temporelle n'apparaît plus.

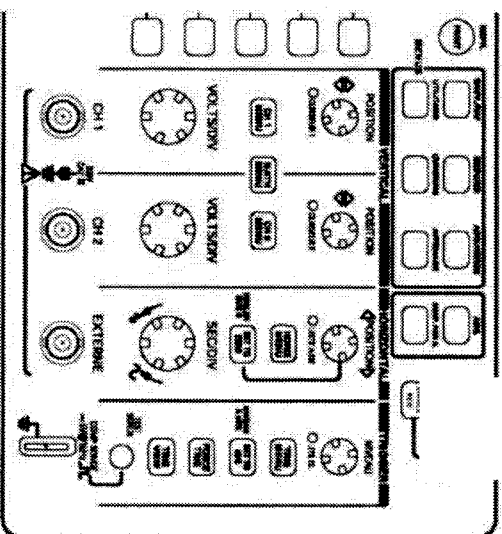


Commandes et réglages

Les réglages se font à travers des menus activés par des touches de commandes marquées MENU sur la face avant. Les plus importants sont :

- CH1 et CH2 : le réglage d'entrée verticale pour chacune des deux voies, il permet en particulier de régler la sensibilité.
- HORIZONTAL : réglage de la vitesse de balayage, donc de la vitesse d'échantillonnage (possibilité de zoom).
- TRIGGER : système de commande du déclenchement.
- CURSEURS : l'outil permet de créer des deux lignes horizontales (ou verticales) qu'on peut ajuster pour mesurer à l'écran une différence de potentiel (ou un intervalle de temps).
- AFFICHAGE : l'outil permet de modifier l'apparence du signal à l'écran, permet aussi l'utilisation en XY.
- ACQUISITION : l'outil permet entre autres de faire une moyenne sur plusieurs acquisitions.

Les différentes rubriques des menus sont affichées sur la partie droite de l'écran (voir les copies d'écran).



DECLENCHEMENT

La compréhension de cette fonction est essentielle pour obtenir rapidement des signaux utilisables.

Le TRIGGER étant armé, l'enregistrement se produit, quand un certain signal (signal de déclenchement) atteint une certaine valeur (niveau de déclenchement) avec une certaine pente (descendante ou montante). En choisissant ces paramètres on peut provoquer le début d'un enregistrement de façon à observer et à enregistrer la partie intéressante du signal étudié. Ces paramètres sont affichés en bas à droite de l'écran.

La source du signal de déclenchement se choisit dans le menu TRIGGER, ce peut être le signal qu'on observe, ou un autre signal envoyé sur l'entrée EXT/TRIG. Sur la figure page 1, c'est CH1 (8) qui est choisi pour commander le déclenchement. Le sens de la pente se choisit aussi dans ce menu (7), voir aussi la figure de la page 6.

Le niveau de déclenchement se règle avec le bouton NIVEAU du TRIGGER. Sa valeur est affichée (6). Il est visualisé par une flèche sur le bord droit de l'écran (5) si l'échelle le permet.

L'endroit où l'instant du déclenchement apparaîtra sur l'écran est choisi en agissant sur le bouton position HORIZONTAL, qui déplace une flèche sur le bord supérieur de l'écran (3). Sa position temporelle est affichée (4) par rapport au centre de l'écran.

Sur la copie d'écran, le point de déclenchement se trouve au niveau de la flèche (5) à l'instant correspondant à la flèche (3), la pente est montante. Attention : les valeurs réellement enregistrées dans la mémoire correspondent à l'intervalle de temps qui est observé à l'écran immédiatement après l'acquisition.

Modes de déclenchement

Le mode de déclenchement se choisit dans le menu TRIGGER, il détermine les conditions de réarmement du TRIGGER.

En mode **NORMAL**, le réarmement se fait automatiquement à la fin d'un enregistrement, éventuellement avec un retard (inhibition).
 En mode **AUTO**, l'acquisition continue même si les conditions de déclenchement ne sont pas remplies. Ce mode est utile quand on recherche un signal inconnu.
 En mode **MONOCUP** (ou single sequence), un enregistrement unique est effectué. Le réarmement ne se fait pas à la fin d'un enregistrement. Le réarmement se fait manuellement par le bouton RUN/STOP.

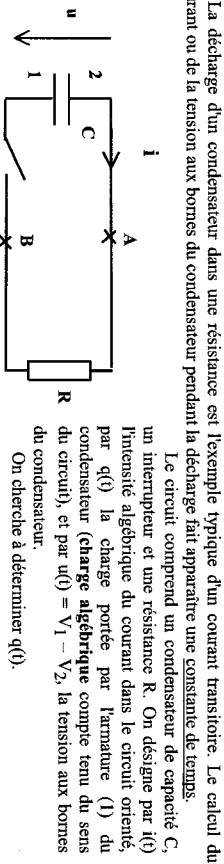
CONFIGURATIONS

Une configuration est en ensemble de réglage. Les éléments d'une configuration sont (avec un exemple de valeurs) :

CH1 sensibilité sur la voie 1 et position du zéro 1	500mV
CH2 sensibilité sur la voie 2 et position du zéro 2	200mV
Mode de couplage	continu
M vitesse de balayage principale (donne la vitesse d'échantillonnage)	500ms
Position de la zone retardée (zoom)	
W vitesse de balayage de la fenêtre affichée	100ms
Source de déclenchement	CH1
Niveau de déclenchement	750mV
Pente de déclenchement	montante
Mode de déclenchement	auto
Type d'affichage (continu ou par points)	continu
Mode d'acquisition (moyennage)	normal
Paramètre d'atténuation de la sonde	x1
(si on n'utilise pas de sonde ce paramètre doit être x1)	

Les éléments de la configuration active peuvent être affichés par le menu UTILITAIRE. Etat du système. On peut sauvegarder et rappeler cinq configurations différentes par le menu SAUV/RAP. Cela permet de retrouver rapidement une configuration qu'on sait être efficace pour un certain type de signaux.

DÉCHARGE D'UN CONDENSATEUR À TRAVERS UNE RESISTANCE



Au début l'interrupteur est ouvert, le condensateur est chargé avec la charge q_0 . La tension à ses bornes est : $u(t) = q_0/C$.

On cherche l'évolution de la charge (ou de la tension qui lui est proportionnelle) après la fermeture de l'interrupteur. A l'instant $t=0$, l'interrupteur est fermé : la décharge commence. Avec les notations de la figure, on a les relations suivantes (voir chapitre régime transitoire du cours) :

$$q(t) = C u(t) \text{ (définition de la capacité d'un condensateur) et } u(t) = R i(t) \text{ (loi d'Ohm)}$$

$$\frac{dq(t)}{dt} = i(t) = -\frac{q(t)}{RC}$$

On obtient une équation différentielle en $q(t)$.

On peut vérifier que : $q(t) = q_0 \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) = q_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ est la solution avec la condition initiale $q(0) = q_0$

Cette fonction montre que la charge décroît avec la constante de temps $\tau = RC$.

La mesure de la tension entre A et B donne la charge et le courant, puisque : $u(t) = \frac{q(t)}{C} = -Ri(t)$

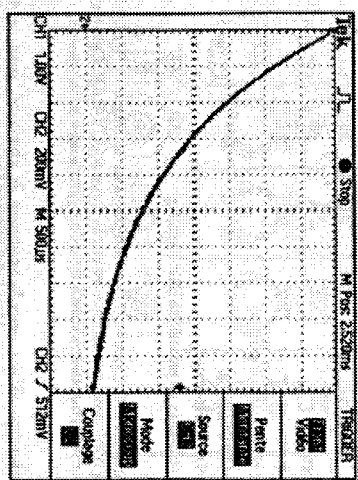
Méthode rapide de mesure de la constante de temps

Pour trouver la constante de temps, on observe à l'oscilloscope la tension $u(t)$ (image de $q(t)$), et on mesure le temps mis par la tension observée pour décroître dans un rapport simple (3/4, 1/2, 1/4 par exemple). A partir de ce temps on peut calculer τ . Si la charge diminue du facteur α entre t et $t+T$, on peut écrire :

$$q(t+T) = q_0 \exp\left(-\frac{t+T}{\tau}\right) = \alpha q_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) = \alpha q(t), \text{ d'où } \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right) = \alpha$$

On en tire : $\tau = -\frac{T}{\ln \alpha}$.

La tension observée a la forme suivante :



En pratique, on prend souvent un facteur α de 1/2, sur la figure, (attention le zéro de tension correspond à la flèche à gauche de l'écran) on obtient $T = 2,2 \text{ div} = 1,1 \text{ ms}$, d'où $\tau = 1,59 \text{ ms}$.

Sur cette figure le point de déclenchement se trouve en dehors de l'écran.

Exercice

Sont U_1 et U_2 des valeurs de la tension mesurées aux instants t_1 et t_2 . Exprimez l'incertitude sur la mesure de la constante de temps τ en fonction des incertitudes sur le temps et sur la tension.

Calculez τ pour : $U_1 = 8,00 \pm 0,04 \text{ V}$; $U_2 = 4,00 \pm 0,04 \text{ V}$; $t_1 = 0,00 \pm 0,02 \text{ ms}$; $t_2 = 1,38 \pm 0,02 \text{ ms}$

Remarque importante

Avec un oscilloscope numérique ou analogique, il est indispensable pour chaque mesure de tension de noter la sensibilité verticale (pour chaque mesure de temps de noter la vitesse de balayage). Cette donnée permet de connaître la résolution en tension (ou en temps) et d'en déduire une évaluation d'un minimum pour l'incertitude qu'on doit prendre au moins égale à la moitié de la résolution. Cette remarque montre l'importance de choisir la sensibilité (ou la vitesse de balayage) pour avoir la plus faible résolution compatible avec la grandeur à mesurer.

Manipulation

I - Prise en main de l'oscilloscope

Observation d'un signal périodique

Pour s'habituer au fonctionnement de l'oscilloscope on va observer un signal fourni par l'oscilloscope lui-même (connecteur COMP SONDE). C'est un signal carré de fréquence 1 KHz d'amplitude spécifiée. Uref (indiquée sur la face avant).

Envoyez le signal sur l'entrée CHI.

Appuyez sur AUTOSET. Le système va rechercher automatiquement une configuration qui donne un bon signal à l'écran. Quand l'écran est obtenu noter les éléments de la configuration. On peut lire directement un certain nombre de ces éléments. Les autres sont attendus en activant les menus qui les contiennent ou encore par le menu UTILITAIRES/Etai du système. Le mode de déclenchement doit se trouver Normal, l'acquisition continue, on constate que le signal fluctue un peu.

Faites apparaître les curseurs de temps (menu CURSEUR, Type, Temps), mesurez la fréquence (on peut la lire directement en encadrant une période avec les curseurs), vérifiez que l'effet sur l'écran est conforme à ce que vous attendez.

Étude du temps de montée

Le signal délivré par la sortie COMP SONDE est un signal carré, la tension passe brutalement de 0 à Uref. Ce passage rapide est en fait progressif si on l'observe avec soin. **Réglez** la configuration pour observer la montée au milieu de l'écran avec une vitesse de balayage de 1µs/DIV. **Mesurez** le temps de montée à 95 %.

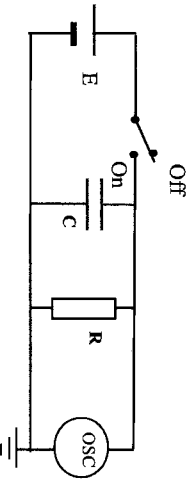
Observer l'effet d'un moyennage du signal, faire ACQUISITION, moyennage, réglez le nombre de mesures sur lesquelles on fait la moyenne.

Mise en évidence des résolutions en tension et en temps :

Pour mettre en évidence la discrétisation des mesures enregistrées, il faut opérer sur un enregistrement unique. Réglez le déclenchement en mode Normal (bouton TRIGGER). **Enregistrez** la montée du signal avec une vitesse de 1 µs/DIV puis appuyez sur le bouton STOP. Le signal à l'affichage ne présente plus de fluctuation. Augmentez progressivement la sensibilité pour faire apparaître les niveaux du codage 8 bits. Vérifiez que la résolution est celle que vous attendez. Augmentez la vitesse de balayage pour faire apparaître les points de mesures distincts mettez AFFICHAGE en TYPE points.

II - Observation de la décharge d'un condensateur dans une résistance

N'oubliez pas de noter la sensibilité et la vitesse de balayage pour toute mesure. **Réalisez** le montage RC ci-dessous.



On utilise un interrupteur simple à 2 positions (représenté par ON, OFF). Il permet de :

- charger le condensateur (position ON),
- décharger le condensateur à travers une résistance (position OFF).

La tension de charge sera fournie par une alimentation stabilisée dont on réglera la tension E à un peu plus de 8 V. Le signal est envoyé sur la voie CHI.

Il s'agit maintenant de choisir la configuration qui donnera à l'écran une image permettant une bonne mesure de la constante de temps. On sait que la signal va décroître de 8 à 0 V avec une constante de temps RC.

Exemple de réglage

On règle la sensibilité de CHI à 2V/DIV. On règle le déclenchement au niveau 4 V (bouton NIVEAU ou LEVEL) sur front descendant en mode Normal (bouton TRIGGER). On règle la position verticale de la voie CHI au centre de l'écran (0 V). On règle la position horizontale au centre de l'écran (MPOS=00). On repère à l'écran les flèches indiquant les positions réglées. On règle la « vitesse de balayage » égale à la constante de temps qu'on aura calculé à partir des caractéristiques des éléments R et C.

Chargez puis déchargez le condensateur à l'aide de l'interrupteur (position On, puis position Off). **Observer** la courbe à l'écran. **Modifiez** la configuration pour obtenir une exponentielle qui remplit bien l'écran.

III - Mesure de la constante de temps pour une décharge unique

L'objectif de la manipulation est d'enregistrer une décharge dans des conditions qui permettent de vérifier la loi exponentielle de décharge et d'évaluer avec précision la constante de temps τ .

Réglez la configuration pour avoir le zéro de tension en bas de l'écran, et une figure semblable à celle de la page 6. Une fois obtenue une courbe satisfaisante relevez à l'oscilloscope les niveaux de tension pour plusieurs valeurs de temps à l'aide des curseurs de type tension (MENU CURSEURS - Type : tension, voir notice). On mesurera la tension entre le niveau final (II est très important de connaître l'asymptote horizontale 0 V) et un niveau du signal correspondant à un temps donné de décharge.

On peut aussi utiliser les curseurs de temps et mesurer le temps de décharge pour plusieurs niveaux donnés de tension.

Tracez la courbe de la tension de décharge (image de la charge) en fonction du temps t en échelle semi-logarithmique : sur Excel, faites un clic-gauche sur l'axe du graphique puis faites un clic-droit et choisissez mise en forme de l'axe : ajustez les bornes de l'échelle et cochez échelle logarithmique.

Déterminez graphiquement la constante de temps.

Comparez avec la valeur théorique. Fau-il tenir compte de l'impédance d'entrée 1 MΩ de l'oscilloscope ?

Mesurez la valeur de τ par la méthode rapide décrite dans la partie théorique (avec un facteur α de 1/2). Évaluez la courbe pour avoir une meilleure précision.

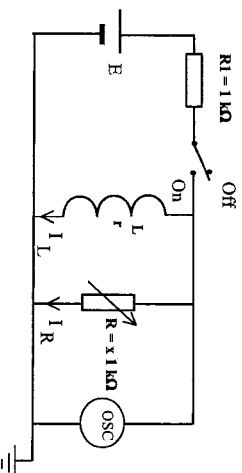
Montrez vos résultats à l'assistant pour vérification avant de passer à la suite.

IV - Décharge d'une bobine dans une résistance

On sait que le phénomène d'auto-induction (ou self-induction) empêche des variations instantanées de courant dans une bobine. Dans un circuit comprenant une bobine (inductance L) et une résistance (circuit RL), après suppression de la source de courant, la décroissance du courant dans l'inductance se fait de manière exponentielle avec une constante de temps L/R . Le courant i du montage RL obéit à une équation analogue à celle de la charge q du montage RC précédent.

$$L \frac{di}{dt} + Ri = 0$$

Avant d'observer une décharge de bobine (c'est le courant qui se décharge), on va mettre en charge la bobine (c'est à dire qu'on va établir un courant dans la bobine) en utilisant une source de tension selon le montage suivant :



L'interrupteur en position On permet d'établir un courant dans la bobine (mise en charge la bobine). La résistance R1 est une résistance de protection qui limite la valeur du courant.

Le passage de l'interrupteur en position Off supprime la source de courant.

Avant l'ouverture de l'interrupteur les courants I_{L0} (dans la bobine) et I_{R0} (dans la résistance) sont positifs. Au moment de l'ouverture le courant I_L ne change pas à cause de l'inductance. Rien ne s'oppose à une variation rapide du courant IR (résistance non inductive). Le courant de la bobine passe donc dans la résistance en sens inverse, immédiatement après l'ouverture on a $I_R = -I_{L0}$. La tension aux bornes de la résistance change de signe. Ensuite le courant diminue avec la constante de temps $L/(R+r)$.

On visualisera le courant à partir de la tension aux bornes de la résistance. On doit observer un signal négatif croissant vers 0 V à l'écran.

Réalisez le montage avec une tension E de 8 V, une résistance R1 de 1 kΩ et une résistance R = 1 kΩ.

Prévoyez la forme du signal pour **calculer** les éléments de la configuration qu'il faut utiliser pour obtenir une bonne courbe.

Exemple de réglage

Réglez la sensibilité à 1 V/DIV et la base de temps à 1 ms/DIV. Centrez le niveau 0 V.

Réglez le TRIGGER – Mode Normal – Pente Descendante – niveau : $-0,5$ V.

Effectuez un enregistrement en procédant comme précédemment : placez l'interrupteur en position On , puis basculez l'interrupteur en position Off .

Modifiez la configuration pour étaler le signal à l'écran ; gagnez en exactitude sur les mesures de temps et de tension.

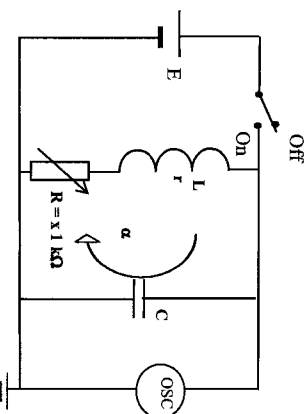
Mesurez la constante de temps en utilisant la méthode rapide décrite précédemment et comparez sa valeur avec la valeur théorique L/R (R représente la résistance totale du circuit de décharge).

Mesurez la constante de temps pour d'autres valeurs de la résistance (prenez $2\text{ k}\Omega$ et $4\text{ k}\Omega$ par exemple).

Commentez les résultats.

V – Décharge oscillante

Pour observer une décharge oscillante, on utilise une capacité C , une bobine (inductance L de 1 H), et une résistance variable R ($\times 1\text{ k}\Omega$) en « série » (le courant étudié circule dans la maille α de la figure, le même courant passe dans la bobine, dans la résistance et dans le condensateur, c'est bien un circuit série).



En position On , on charge la capacité C ainsi que la bobine. En position Off , on a une décharge de type oscillante, si la résistance n'est pas trop élevée.

Réalisez le montage avec une tension E de 1 V et une résistance R nulle. Réglez la sensibilité à 5 V/DIV et la vitesse de balayage à 5 ns/DIV . Centrez le niveau 0 V .

Placez l'oscilloscope en mode de déclenchement normal sur pente descendante :

– Touche TRIGGER – Mode Normal – Pente Descendante – Source : CH1.

Réglez le niveau de déclenchement (bouton NIVEAU) à $0,6\text{ V}$.

Effectuez un enregistrement unique par basculement de l'interrupteur de la position On à la position Off .

Faites des essais pour plusieurs vitesses de balayage afin d'observer une décharge quasi-complète.

Mesurez la pseudo-période T_2 des oscillations ; comparez avec la période propre : $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}$.

On montre que le signal observé doit être de la forme (voir cours chapitre « oscillateur harmonique amorti ») :

$$u(t) = K \exp(-\gamma t) \cos(\omega_2 t + \varphi)$$

avec : - le coefficient d'amortissement : $\gamma = \frac{R+r}{2L}$ (où $R+r$ est la résistance totale du circuit)

- la pseudo-pulsation : $\omega_2^2 = \omega_0^2 - \gamma^2$

- K et φ sont des constantes qui dépendent de conditions initiales.

On va vérifier la loi exponentielle de décroissance de l'amplitude des oscillations (hauteur d'une oscillation par rapport à la valeur finale 0 V de décharge) pour une valeur R nulle.

Procédez comme pour le montage RC ; mesurez la tension des différents maximums et les temps correspondants.

Tracez la courbe des maximums en fonction du temps t en échelle semi-logarithmique.

Déterminez graphiquement la pente (coefficient d'amortissement) et la constante de temps τ correspondante.

Calculez γ et ω_2 . Comparez avec les valeurs théoriques.

Modifiez la valeur R de la résistance pour augmenter l'amortissement et déterminez la résistance critique (absence d'oscillation et décroissance rapide). Comparez sa valeur avec la valeur théorique : $R_c = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$.

— MANIPULATION N°III —

Mesures à l'oscilloscope, résonances

RÉSONANCES

Dans l'étude des phénomènes vibratoires, on appelle **résonance** l'existence d'un maximum pour une grandeur qui dépend de la fréquence. La courbe qui représente la variation de cette grandeur en fonction de la fréquence s'appelle **courbe de résonance**. En fait la notion de résonance ne prend de sens que quand ce maximum est net.

IMPÉDANCE

L'**impédance** est une généralisation de la notion de résistance. Pour un courant continu, la résistance d'un circuit à deux bornes (ou **dipôle**, ou encore **branche**) est définie par la loi d'Ohm $U = R \cdot I$, qui donne la relation entre la tension aux bornes du circuit et l'intensité du courant qui le traverse. La résistance est le rapport $R = U / I$.

En courant alternatif, pour des circuits comprenant des bobines ou des condensateurs la relation entre la tension et le courant est une équation différentielle. Dans le cas d'une tension sinusoïdale $u(t) = U \cdot \cos(\omega t)$ le courant est aussi sinusoïdal $i(t) = I \cdot \cos(\omega t + \phi)$. L'expression de i met en évidence un **décalage de phase** (déphasage) entre le courant et la tension. La quantité ϕ est l'avance de phase de l'intensité par rapport à la tension.

L'**impédance** Z d'un dipôle est le rapport des amplitudes de la tension et du courant, $Z = U / I$ (ϕ est aussi le rapport de la tension et de l'intensité efficaces).

Impédance d'un circuit RLC série

L'impédance Z de la branche AB, est définie par la relation $U = Z \cdot I$, entre U l'amplitude de la ddp entre A et B [$u(t) = u_A(t) - u_B(t)$], et I l'amplitude de l'intensité dans la branche AB.

Pour la branche RLC série ci-dessous, on a la relation : $Z = \sqrt{R^2 + \left(L \cdot \omega - \frac{1}{C \cdot \omega}\right)^2} = \left(R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2\right)^{1/2}$



ϕ avance de phase du courant sur la tension s'exprime par :

$$\tan \phi = \frac{1}{R} \left(\frac{1}{C\omega} - L\omega \right)$$

$$\cos \phi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(L \cdot \omega - \frac{1}{C \cdot \omega}\right)^2}}$$

Ces formules montrent que pour une résistance pure ($L = 0$ et C infini), on a $Z = R$ et $\cos \phi = 1$. Il n'y a pas de déphasage entre la tension et le courant.

Si on se rapporte aux notations du cours sur l'oscillateur mécanique en régime forcé qui obéit aux mêmes équations que le circuit RLC, on a $\phi = \alpha + \pi/2$.

Exercice

Le déphasage ϕ est-il une fonction croissante ou décroissante de la pulsation ω ? Justifier votre réponse.

RÉSONANCE DE L'INTENSITÉ

L'intensité (en amplitude ou en valeur efficace) passe par un maximum quand on fait varier la pulsation de la fém, on a donc une **résonance de l'intensité**.
La relation $U = Z \cdot I$ donne entre les modules U et I la relation :

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}$$

I passe par un maximum quand le dénominateur est minimal, c'est à dire quand son deuxième terme est nul, ce qui se produit pour $\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{L \cdot C}$. Ce maximum existe quelle que soit la valeur de R . La résonance est plus aiguë quand la résistance est plus faible.

A la résonance, le déphasage entre le courant et la tension est nul (tan $\phi = 0$).

RÉSONANCE DE LA TENSION

On appelle **résonance de la tension**, l'existence d'un maximum de la tension aux bornes du condensateur, quand la pulsation varie. L'amplitude de cette tension est donnée par l'impédance du condensateur :

$$U_C = Z_C \cdot I \quad \text{avec} \quad Z_C = \frac{1}{C \cdot \omega} \quad \text{et} \quad I = \frac{U}{Z}$$

$$U_C = \frac{U}{Z} = \frac{1}{\sqrt{R^2 \cdot C^2 \cdot \omega^2 + \left(L \cdot C \cdot \omega^2 - 1\right)^2}}$$

La recherche d'un minimum du dénominateur montre qu'il s'en produit un pour une valeur ω_1 de la pulsation donnée par :

$$\left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2 = 1 - \frac{R^2 \cdot C}{2 \cdot L}$$

La résonance ne se produit que si la résistance est relativement faible : $R^2 < 2 \cdot L/C$. La pulsation de résonance de la tension reste voisine de ω_0 tant que $R^2 \ll L/C$.

Pour caractériser l'acuité de la résonance on définit Q le facteur de surtension. Q est le rapport de la tension aux bornes du condensateur sur la tension aux bornes de la branche. On n'utilise la notion de surtension que quand il y a une résonance aiguë, donc ω_1 , la pulsation de résonance de la tension, est pratiquement égale à ω_0 .

$$\text{si } \omega = \omega_0 \text{ alors } \left(L \cdot C \cdot \omega_0^2 - 1 = 0\right) \text{ et } \frac{U_C}{U} = Q = \frac{1}{R \cdot C \cdot \omega_0} = \frac{L \cdot \omega_0}{R} = \frac{\sqrt{L \cdot C}}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \sqrt{\frac{L}{R^2 \cdot C}}$$

Le facteur de surtension peut facilement être supérieur à 10. Cela signifie que la tension U_C aux bornes du condensateur peut être 10 fois supérieure à la tension appliquée, ce qui n'est pas sans danger pour le matériel.

RÉSONANCE DE LA PUISSANCE ET BANDE PASSANTE

Le facteur de surtension est relié à la largeur de la bande passante. La bande passante $\Delta\omega$ est, par définition, la largeur de l'intervalle de fréquence dans lequel la puissance dégagée dans la branche est supérieure à la moitié de la puissance maximale.

Le **facteur de surtension est analogue au facteur de qualité défini pour un oscillateur mécanique**.

Le calcul de P la puissance moyenne consommée dans le circuit donne :

$$P = U \cdot I \cdot \cos \phi \quad \text{or} \quad U = Z \cdot I \quad \text{et} \quad \cos \phi = \frac{R}{Z} \quad \text{donc} \quad P = R \cdot I^2 = \frac{U^2 \cdot R}{R^2 + \left(L \cdot \omega - \frac{1}{C \cdot \omega}\right)^2}$$

La puissance moyenne présente une résonance qui se produit comme celle de l'intensité pour $\omega = \omega_0$. La puissance moitié est obtenue quand dans l'expression de P , le dénominateur vaut deux fois sa valeur minimale.

R^2 : Ce qui revient à dire que ω_1 et ω_2 les limites de la bande sont les racines de l'équation : $L\omega - \frac{1}{C\omega} = \pm R$

La bande passante en pulsation est donnée par :

$$\Delta\omega = \omega_+ - \omega_- = \frac{R}{L}$$

Dans le cas où la résonance est étroite ($\omega_+ \approx \omega_0 \approx \omega_-$), le calcul (voir le polycopie de cours) montre que le facteur de surtension s'exprime :

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{L \cdot \omega_0}{R} = \frac{1}{R} \cdot \frac{L}{\sqrt{L}} = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{L}$$

On peut montrer qu'aux limites de la bande passante, le courant vaut $1/\sqrt{2}$ fois sa valeur maximale. Ce résultat permet de trouver la largeur de la bande passante à partir de la courbe de résonance de l'intensité.

Exercice

Exprimez la bande passante en Hertz.

FREQUENCEMETRE

Pour connaître la fréquence, on utilise un fréquencemètre électronique. Un fréquencemètre est un compteur qui compte le nombre d'oscillations pendant un temps donné. Pour mesurer la fréquence d'un signal il faut appliquer la tension correspondante à l'entrée (prise BNC) du fréquencemètre. Pour éviter de compter comme une oscillation les parasites qui existent toujours plus ou moins, une oscillation doit avoir une certaine amplitude supérieure à un seuil, pour être prise en compte.

On envoie donc sur le fréquencemètre le signal de sortie du générateur. On règle le seuil en fonction de la tension (ou l'inverse). On a le choix entre deux valeurs de seuil en agissant sur un bouton du fréquencemètre. Un autre bouton permet de mettre en œuvre un filtre qui arrête (donc empêche de compter) les parasites de haute fréquence.

Remarque

Dans les calculs littéraux, il est plus simple d'utiliser la pulsation que la fréquence à cause du facteur 2π qu'il faudrait souvent introduire (on écrit $\sin(\omega t)$ plutôt que $\sin(2\pi f t)$), mais dans la pratique, on donne toujours la fréquence en Hertz, elle est beaucoup plus significative. On parle de courant à 50 Hz et jamais de courant à 314 rad/s. Dans le compte-rendu les fréquences seront toujours données en hertz. Pour des raisons analogues les déphasages seront toujours exprimés en degrés et non en radians.

MESURES À L'OSCILLOSCOPE

On utilisera un oscilloscope comme un voltmètre permettant de mesurer des tensions instantanées.

À moins de disposer d'autres informations, on admettra que l'incertitude vient seulement de la lecture. C'est à dire qu'on suppose que l'électronique est parfaite, en tout cas suffisante pour ne pas introduire d'erreur supplémentaire. La précision dépendra de la netteté du tracé. Dans le meilleur des cas (intersections nettes entre courbes ou avec les axes) on peut admettre pour chaque mesure une incertitude d'une demi-division, soit 1 mm sur l'écran.

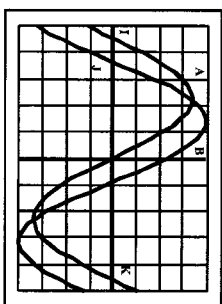
On aura intérêt à agrandir au maximum les figures observées en se servant des possibilités de réglage. Pour les grandeurs sinusoïdales il est préférable de faire toutes les mesures crête à crête. En effet, pour améliorer la précision il faut faire toutes les mesures crête à crête et agrandir l'image du signal pour qu'elle occupe la plus large place sur l'écran (pour les mesures absolues, attention à garder la commande d'atténuation (ou d'amplification) sur une position calibrée).

MESURE DES DÉPHASAGES

Avec un oscilloscope, la mesure d'un déphasage entre deux tensions sinusoïdales peut se faire par mesure directe du décalage des sinusoïdes obtenues sur l'écran.

Il faut disposer d'un oscilloscope à deux entrées verticales. On envoie chacune des deux tensions sur une entrée verticale. On règle la vitesse de balayage pour qu'une oscillation complète occupe la largeur de l'écran.

On règle les positions verticales pour que les zéros des deux voies coïncident avec l'axe Ox de l'écran. La longueur IK correspond à une période soit une variation de phase de $2\pi \text{ rad} = 360^\circ$.



L'avance de phase ϕ de B par rapport à A est obtenue en degré par :

$$\frac{\phi}{360} = \frac{IJ}{IK} = \frac{IJ}{f}$$

Il n'est pas nécessaire de connaître la vitesse de balayage. Pour déterminer le signe de la phase il faut bien identifier les deux sinusoïdes. Sur la figure c'est le signal envoyé sur l'entrée A qui est en avance sur l'autre : il passe avant l'autre par son maximum. L'avance de phase ϕ est donc négative.

Il faut aussi faire attention à la polarité, changer de polarité revient à augmenter la phase de π .

BIBLIOGRAPHIE

- L'étude théorique de ce circuit est faite dans la plupart des manuels courants au chapitre sur les circuits en régime sinusoïdal forcé.
- Alonso et Finn, Physique Générale I, p 358 et II, p 287
 - Cours de Berkeley, Électricité et Magnétisme, p 302
 - M. Bertin, JP. Faroux et J Renault, Électricité et Électromagnétisme
 - F. Lurçat, Cours de Physique DEUG 1ère année, Éditions Ellipses, ch. 7.

Manipulation

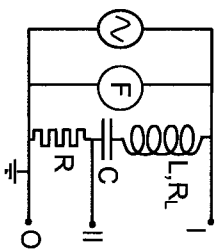
La manipulation consiste à tracer d'une part la courbe de résonance de l'intensité d'un circuit RLC-série, et d'autre part la courbe de déphasage en fonction de la fréquence.

Commencez par identifier les éléments disposés sur la palette et lisez les indications qu'ils portent.

Réalisez le circuit RLC avec une bobine, un condensateur et une résistance ; notez les valeurs des caractéristiques des éléments du circuit. I et II représentent les deux entrées verticales de l'oscilloscope. Le fréquencemètre F est intégré au générateur de tension.

Réglez la tension du générateur à environ 1 V crête à crête.

Le circuit permet d'obtenir en I un signal proportionnel à la tension appliquée à la branche et en II un autre signal proportionnel à l'intensité qui passe dans la branche. Rappelez-vous que le signal observé sur un oscilloscope est la tension entre une entrée et la masse.



I – Mesure de la fréquence de résonance de l'intensité

On commencera par chercher la valeur de la fréquence f_0 de résonance en cherchant la fréquence pour laquelle le déphasage entre courant et tension est nul.

Pour mettre en évidence la concordance des phases lorsqu'on fait varier la fréquence, on observera simultanément sur les deux voies (I et II) de l'oscilloscope, les sinusoides de l'intensité et de la tension. On réglera la fréquence pour observer un déphasage nul. *Agrandissez bien l'image pour avoir une bonne précision.*

Notez la fréquence f_0 lue sur le fréquencemètre, estimez l'incertitude. Comparez si possible avec la valeur théorique calculée avec les caractéristiques des éléments du circuit. Remarquez que l'incertitude dépend certes de l'exactitude du fréquencemètre, mais aussi de la difficulté à réaliser l'accord. Pour évaluer l'incertitude il faut effectuer la mesure une dizaine de fois, si possible par des opérateurs différents.

II – Courbes de l'amplitude et du déphasage de l'intensité

Il s'agit de tracer les courbes d'amplitude I et de déphasage ϕ de l'intensité (ϕ est l'avance de phase de l'intensité par rapport à la tension du générateur) en fonction de la fréquence, sur l'intervalle $[0, 2 f_0]$.

Avec le montage précédent on peut observer simultanément les signaux de la tension et de l'intensité.

➤ Le signal de la tension (I) sert à vérifier que la tension est bien constante (par exemple 1,6 V crête à crête). Il faut éventuellement ajuster la tension en agissant sur le générateur, surtout au voisinage de la résonance quand l'impédance diminue (Pourquoi ?).

➤ L'autre signal (II) sert à mesurer l'intensité, (toujours crête à crête). La mesure de la tension en II permet, connaissant la valeur de la résistance R_0 , de calculer l'intensité du courant. La tension en II a la même phase que l'intensité. Le déphasage entre les courbes observés est bien le déphasage entre le courant et la tension qu'il faut mesurer. Faites attention au signe de ϕ .

On choisira suffisamment de points autour de la fréquence f_0 pour pouvoir mettre en évidence les caractéristiques intéressantes de la courbe : l'existence du maximum, la bande passante, etc.

Faites des mesures préliminaires pour déterminer les échelles des graphiques ; préparez une feuille de mesures et de calculs sur Excel. La présentation de la feuille de mesures et de calculs doit permettre une vérification rapide des résultats.

Mettez au point une procédure permettant, pour une fréquence donnée, de faire successivement et rapidement, le contrôle de la tension aux bornes du générateur, la mesure de la tension aux bornes de la résistance, le calcul de l'intensité I, la mesure du déphasage ϕ et le report des points expérimentaux sur Excel.

Vérifiez la cohérence de vos résultats, grâce aux caractéristiques des éléments du circuit.

Mettez en forme le graphique sur Excel :

- déplacez l'objet graphique en feuille (clic-droit sur le graphique)
- ajoutez un quadrillage secondaire en horizontal et en vertical (onglet Disposition)
- ajustez le pas du quadrillage (clic-gauche sur une ligne du quadrillage, puis clic-droit mise en forme de l'axe)
- ajustez l'échelle en horizontal pour une mesure précise de bande passante (clic-gauche sur l'axe des abscisses, puis clic-droit mise en forme de l'axe)

- Déterminez la bande passante en Hertz à partir de la courbe d'amplitude. Comparez la valeur observée aux valeurs théoriques.
- Déterminez la bande passante en Hertz à partir de la courbe de déphasage : les limites de la bande passante sont les fréquences pour lesquelles le déphasage est de $\pm 45^\circ$.
- Justifiez ce résultat à partir de l'expression théorique de $\tan \phi$.

III – Mesure du facteur de surtension

Modifiez le montage de façon à pouvoir mesurer la tension aux bornes du condensateur. Ajustez la fréquence à la fréquence de résonance.

- Mesurez U_C/U .
- Comparez avec la valeur théorique.

