

# **Laboratoire d'électrotechnique**

Microtechnique

Bachelor semestre 1

2023

## **1ère séance – Version corrigée**

### **L'OSCILLOSCOPE ET LES ÉQUIPEMENTS DE BASE**

### **LOI D'OHM ET LOIS DE KIRCHHOFF**

## **Table des matières**

<b>A. OBJECTIFS .....</b>	<b>2</b>
<b>B. LABORATOIRE .....</b>	<b>2</b>
1. Générateur de fonctions HMF2525 .....	3
2. Multimètre HMC8012 .....	4
3. Oscilloscope HMO2024 ou HMO724 .....	6
3.1. Influence du couplage d'entrée.....	9
3.2. Le mode DC.....	11
3.3. Influence du signal de déclenchement et du mode de déclenchement.....	11
4. La masse.....	12
5. Loi d'Ohm .....	13
6. Les lois de Kirchhoff .....	16
6.1. Loi de Kirchhoff pour les nœuds.....	16
6.2. Loi de Kirchhoff pour les mailles .....	18

## A. OBJECTIFS

- Familiarisation avec :
  - Le générateur de fonctions
  - L'alimentation de laboratoire
  - Le multimètre
  - L'oscilloscope
  - La plaque "Hirshman"
- Mesure de l'amplitude et de la fréquence d'une sinusoïde
- Introduction à la notion de masse
- Vérification de la loi d'Ohm
- Vérification des lois de Kirchhoff

## B. LABORATOIRE

Par ses fonctionnalités dont la principale est de permettre l'observation des variations d'un signal électrique en fonction du temps, l'étude d'un oscilloscope impose le recours à une source de signaux, un générateur de fonctions dans le cadre de ces travaux pratiques.

Le signal électrique utilisé est une tension sinusoïdale et sa valeur efficace et sa fréquence seront mesurées à l'aide d'un multimètre et de l'oscilloscope.



Cette séance comporte des calculs aux **pages 13, 14, 16, 17, 18 et 19** à effectuer lors de la préparation et **doivent donc se faire avant le TP**.

## 1. Générateur de fonctions HMF2525



Enclencher le générateur de fonctions **HMF2525** et effectuer les réglages nécessaires à l'obtention du signal sinusoïdal :

$$u(t) = \hat{U} \sin(\omega t) + U_0 \quad \begin{cases} \text{Fréquence} & f = 1 \text{ kHz} \\ \text{Amplitude (valeur de crête)} & \hat{U} = 5 \text{ V} \\ \text{Composante continue nulle} & U_0 = 0 \text{ V} \end{cases}$$

- La forme d'onde sinusoïdale est sélectionnée à l'aide de la touche
- La fréquence est ajustée avec la touche **FREQUENCY**
- L'amplitude **crête-à-crête** est ajustée avec la touche **AMPLITUDE**
- La composante continue (**OFFSET**) est ajustée avec la touche **OFFSET**

Chaque touche est multifonctionnelle et s'illumine en **BLEU** lorsqu'elle est activée.

Les valeurs désirées sont introduites avec le clavier alphanumérique.

Dans l'écran de visualisation du signal, on vérifie alors :

Frequency : **1.000 000 00 kHz**

Amplitude : **10.000 V**

Offset : **0.000 V**

Le signal est délivré uniquement si la touche **OUTPUT** est activée.

L'**OFFSET** est délivré uniquement si la touche **OFFSET** est activée.

## 2. Multimètre HMC8012



Enclencher le multimètre **HMC8012** et contrôler l'exactitude des 3 valeurs affichées par le générateur de fonctions.

- Envoyer le signal sur les deux bornes **V** et **COM**
- Sélectionner la mesure de la valeur alternative à l'aide de la touche **AC V**

Dans le cadran réservé à la mesure principale (**Main**) doit apparaître la **valeur efficace  $U$**

$$U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} = \frac{5}{\sqrt{2}} = 3.5355 \text{ V}$$

aux erreurs d'incertitude près introduites par le générateur lui-même et le multimètre.

Le nombre de valeurs décimales affichées et de conséquence la précision de la mesure, dépend du choix de la gamme de mesure. On peut la choisir à l'aide des trois touches **Auto Range**, **Range Up** et **Range Down**.

Vérifier que la touche **Auto Range** est activée en contrôlant que l'écriture de l'affichage correspondant est de couleur **JAUNE**.

Dans le cadran supérieur réservé à la 2<sup>ème</sup> mesure possible (**2nd**), faire apparaître la valeur de la **fréquence  $f$**  en sélectionnant la mesure grâce au menu **2nd Function**.

Avec la touche **SELECT** choisir **Frequency**.

Noter les valeurs mesurées :

$$U = 3.52826 \text{ V}$$

$$f = 1.00001 \text{ kHz}$$

Au lieu de la fréquence, mesurer la tension continue  $U_0$  en sélectionnant la mesure grâce au menu **2nd Function**. Avec la touche **SELECT** choisir **DCV**.

Si la gamme de mesure de la tension pour le menu **2nd Function** n'est pas adaptée, le message *clipped* apparaît et la mesure de  $U_0$  n'est pas précise.

Utiliser la touche **Range Up** ou **Range Down** pour fixer la gamme de mesure à 4 V.

Noter la valeur mesurée :

$$U_0 = -1.66 \text{ mV}$$

Le générateur de fonctions et le multimètre ne sont pas parfaits. Les fabricants des appareils utilisés dans le cadre des travaux pratiques prévoient une erreur relative de 1 %. Avec l'utilisation de deux appareils, on peut supposer une erreur relative **maximale** de 2 %.

Vérifier si l'erreur relative introduite par les appareils reste inférieure à cette valeur de 2 %.

Utiliser la mesure de la **valeur efficace**  $U$  et de la **fréquence**  $f$  (page 4) pour effectuer le calcul de l'erreur relative.

La formule suivante donne le résultat exprimé en % :

$$\delta = \left| \frac{\text{valeur mesurée} - \text{valeur théorique}}{\text{valeur théorique}} \right| \cdot 100$$

Tension :  $\delta_U = 0.2 \%$

Fréquence :  $\delta_f = 0.001 \%$

### 3. Oscilloscope HMO2024 ou HMO724

Enclencher l'oscilloscope à mémoire numérique **HMO2024** (200 MHz) ou **HMO724** (70 MHz).

	<p>Réinitialiser l'oscilloscope à ses paramètres par défaut en appuyant plus de 3 secondes sur la touche <b>AUTO SET</b> de la zone <b>GENERAL</b>.</p>
	<p>L'oscilloscope dispose de 4 voies ou canaux, activés ou désactivés par les touches <b>CH1</b>, <b>CH2</b>, <b>CH3</b> et <b>CH4</b> de la zone <b>VERTICAL</b>. Les signaux et leurs caractéristiques apparaissent dans la couleur d'éclairage de ces touches. Les paramètres d'un signal sont modifiables en sélectionnant le canal correspondant :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Le calibre de tension est choisi à l'aide du bouton rotatif <b>VOLTS/DIV</b>.</li> <li>• La position verticale est modifiée avec le bouton rotatif <b>POSITION</b>.</li> </ul>
	<p>La sélection d'un canal laisse apparaître les réglages de base :</p> <p><b>AC/DC – GND (Ground/Masse) – 50Ω (HMO2024) – BWL – INV</b></p> <p>Les boutons en regard de ces options donnent accès aux réglages possibles par simples pressions successives, voire par l'intermédiaire du bouton multifonctionnel si celui-ci est opérationnel, le symbole avec la flèche courbe qui lui est attaché est alors allumé.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>HMO2024</b> : Parcourir les réglages des 4 canaux et vérifier que le réglage <b>50 Ω</b> n'est pas activé.</li> </ul>

Vérifier que le signal de déclenchement du **générateur de fonctions HMF2525** est actif en suivant le chemin : MENU → SYSTEM → TRIGGER → TRIG OUTPUT → **On**

Brancher le générateur de fonctions à l'oscilloscope suivant les indications suivantes :

<b>SIGNAL OUTPUT</b>			<b>CH1</b>	
<b>TRIG OUTPUT</b>			<b>CH2</b>	

Activer la voie **2** en appuyant sur la touche **CH2**.

Appuyer sur la touche **AUTO SET** : l'oscilloscope laisse apparaître les deux signaux dans la couleur d'éclairage des deux touches **CH1** et **CH2** et avec un choix des réglages des fonctions principales. Ces valeurs sont visibles autour de la zone d'affichage.

- Sélectionner l'affichage de l'entrée **1** par action sur la touche **CH1** et court-circuiter l'entrée au moyen de l'option **GND** (masse).

Positionner la ligne de base représentative de la masse (0 V) au centre de la fenêtre avec le bouton rotatif **Position** associé au canal **1** ; contrôler en même temps la valeur de cette position sur l'écran qui doit afficher "0 V" et remarquer, à gauche de l'écran, le glissement simultané du symbole du marqueur de position de la masse .

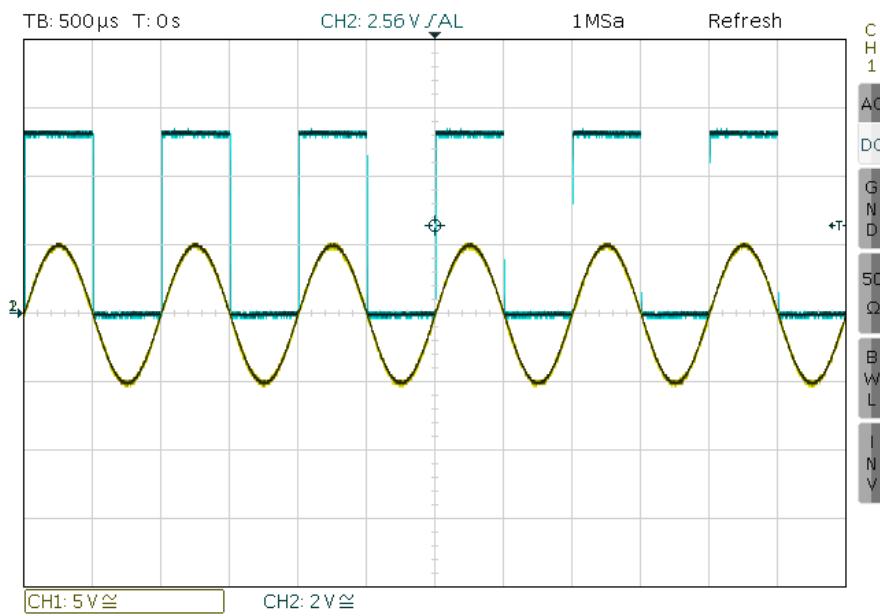
Appuyer à nouveau sur la touche **GND** pour faire réapparaître le signal envoyé sur l'entrée **1**

- Sélectionner l'affichage de la voie **2** et, de la même façon, centrer la ligne de masse.
- Mettre le sélecteur de couplage des entrées **1** et **2** sur la position **DC**

	<p>Le rôle du déclenchement (TRIGGER) est d'assurer l'instant où l'oscilloscope commence à acquérir les données et à les afficher. Pour fonctionner, ce système requiert un signal de déclenchement.</p> <p>Dans la zone <b>TRIGGER</b>, sélectionner le canal <b>2</b> comme "Source de déclenchement" à l'aide du bouton <b>SOURCE</b>.</p> <p>Le bouton <b>SLOPE</b> permet de choisir le flanc montant ou le flanc descendant pour le déclenchement.</p> <p>Le seuil en tension pour le déclenchement est modifié avec le bouton rotatif <b>LEVEL</b> et il est indiqué sur le signal de déclenchement par le symbole </p>
---	---

Représenter les signaux observés sur le graphique ci-dessous.

	<p>Indiquer clairement :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Les indications des calibres du temps et des tensions en marge du graphe.</li><li>• La position du marqueur de position de la masse.</li><li>• La description de chaque signal.</li></ul>
---	--



Sans modifier la position du **GND**, quels calibres en tension et en temps permettent d'utiliser au **maximum** la taille de l'écran et afficher **2 périodes** des 2 signaux ?

En tension CH1: 2 V , CH2 : 2 V

En temps TB : 200 µs

 <b>ANALYZE</b>     <b>AUTO MEASURE</b>	<p>Maintenir les deux signaux sous cette configuration.</p> <p>Dans la zone <b>ANALYZE</b>, sélectionner le menu <b>AUTO MEASURE</b> qui permet la mesure de nombreux paramètres.</p>
--	---

Seront ainsi affichées **simultanément** les 6 valeurs ci-dessous :

PLACE MESURE (MEAS. PLACE)	SOURCE (SOURCE)	TYPE (TYPE)	
1	CH1	Crête + (Peak +)	<b>5.08 V</b>
2	CH1	Crête – (Peak –)	<b>- 5.08 V</b>
3	CH1	Valeur RMS (RMS Value)	<b>3.53 V</b>
4	CH2	Valeur Moyenne (Mean Value)	<b>2.64 V</b>
5	CH1	Fréquence (Frequency)	<b>1.00 kHz</b>
6	CH2	Période (Period)	<b>1 ms</b>



La zone **HORIZONTAL** permet de choisir les paramètres de la base de temps :

- Le calibre de la base de temps est choisi à l'aide du bouton rotatif **TIME/DIV**.
- La position horizontale des signaux visualisés est modifiée à l'aide du bouton rotatif **POSITION**.

Augmenter et diminuer le calibre de la base de temps par rapport à la valeur sélectionnée précédemment. Qu'observe-t-on (plusieurs réponses possibles) ?

- Si la base de temps augmente, il devient impossible de mesurer la fréquence  $f$  car on visualise trop de périodes
- Si la base de temps diminue, il devient impossible de mesurer la fréquence  $f$ , le signal étant visualisé avec moins d'une période entière
- La mesure de la fréquence  $f$  ne dépend en aucun cas du choix de la base de temps

Modifier les calibres de tension, d'abord pour le canal **1** et ensuite pour le canal **2**.

Comment les valeurs calculées par l'oscilloscope évoluent-elles (plusieurs réponses possibles) ?

- Si le calibre de tension augmente, la précision sur la mesure des paramètres de tension ne fait que diminuer car l'image du signal perd en résolution
- Si le calibre de tension diminue, la mesure des paramètres de tension devient impossible, le signal étant écrêté
- La mesure des paramètres de tension ne dépend jamais du choix du calibre de tension

### 3.1. Influence du couplage d'entrée

Mettre le couplage de la voie **1** (signal sinusoïdal) en mode **AC**. Que se passe-t-il ?

- Le signal est décalé vers le haut
- Rien

Mettre le couplage de la voie **2** (signal rectangulaire) en mode **AC**. Que se passe-t-il ?

- Le signal oscille autour de 0 V
- Rien

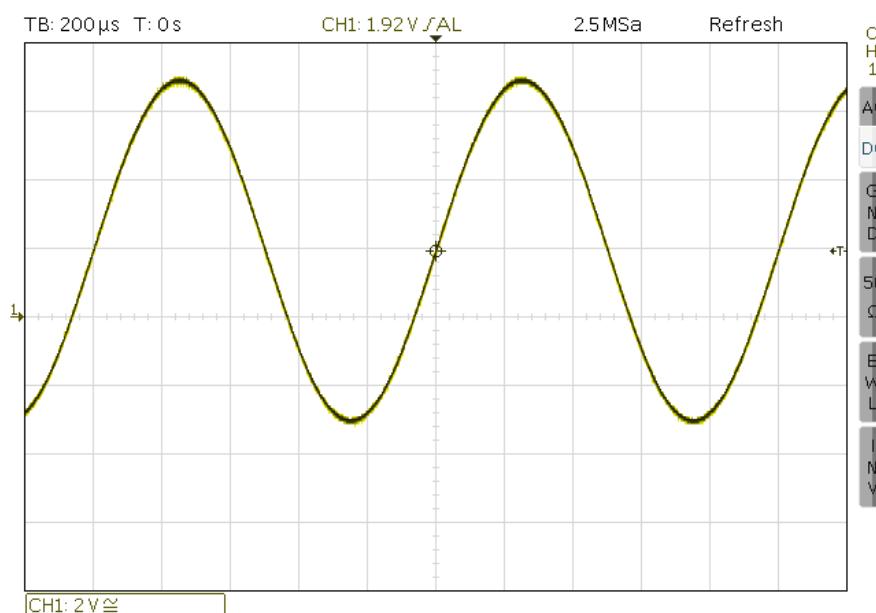
Remettre les couplages des 2 voies sur **DC**.

Au niveau du générateur de fonctions **HMF2525**, ajouter une composante continue de **2 V** au signal sinusoïdal en portant la valeur de l'**OFFSET** à **2 V** et en activant la touche **OFFSET**.

Observer uniquement le signal sur le canal **1**.

Dans la zone **TRIGGER**, sélectionner le canal **1** comme "Source de déclenchement" à l'aide du bouton **SOURCE**.

Ajuster le calibre de tension et reproduire le signal sur le graphique ci-dessous.



Mettre le couplage de la voie **1** en mode **AC**. Que se passe-t-il ?

- La composante continue de 2 V est éliminée ; ne subsiste que la composante alternative initiale
- Rien

Faire varier lentement la composante **continue** du signal. Que se passe-t-il ?

- Le signal se décale en fonction de la composante continue
- Rien, le signal reste centré sur 0 V, l'oscilloscope ignorant la composante continue sous un couplage **AC**

### 3.2. Le mode DC



Il y a une différence notable entre le mode DC d'un multimètre et le mode DC d'un oscilloscope

Quelles affirmations sont-elles correctes (plusieurs réponses possibles) ?

- Multimètre** : le mode **DC** permet de mesurer la valeur continue d'un signal électrique
- Multimètre** : le mode **DC** permet de mesurer la valeur efficace d'un signal électrique
- Oscilloscope** : le mode **DC** permet de visualiser uniquement la composante continue d'un signal électrique
- Oscilloscope** : le mode **AC** permet de visualiser uniquement la composante alternative d'un signal électrique
- Oscilloscope** : le mode **DC** permet de visualiser simultanément la composante continue et la composante alternative d'un signal électrique

### 3.3. Influence du signal de déclenchement et du mode de déclenchement

Déplacer les traces horizontalement avec le bouton rotatif **POSITION** de la zone **HORIZONTAL** afin d'amener le symbole  indiquant la position du déclenchement horizontal au centre de l'écran, s'il ne l'est pas.

Faire varier le seuil de déclenchement avec le bouton rotatif **LEVEL**.

Qu'observe-t-on ?

- Rien
- Un glissement du signal vers la gauche ou vers la droite lorsque le seuil du trigger augmente ou diminue

Déclencher alternativement l'oscilloscope sur le front montant et descendant à l'aide du bouton **SLOPE**.

Qu'observe-t-on ?

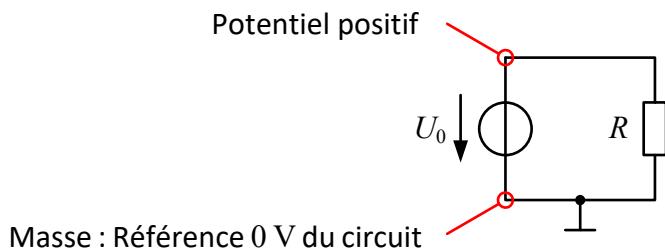
- Le point de démarrage du signal se fait alternativement sur la pente montante ou descendante
- Un glissement du signal vers le haut ou vers le bas

## 4. La masse

Dans un circuit électrique, la **masse** est la **branche de référence** de tous les potentiels électriques. Dans la grande majorité des cas, le potentiel électrique de la masse est la référence **0 V** du circuit considéré.

La masse d'un circuit est indiquée par le symbole 

Dans le cadre de ces Travaux Pratiques, la masse sera imposée par la tension d'alimentation du circuit à étudier et elle sera égale à **0 V** :



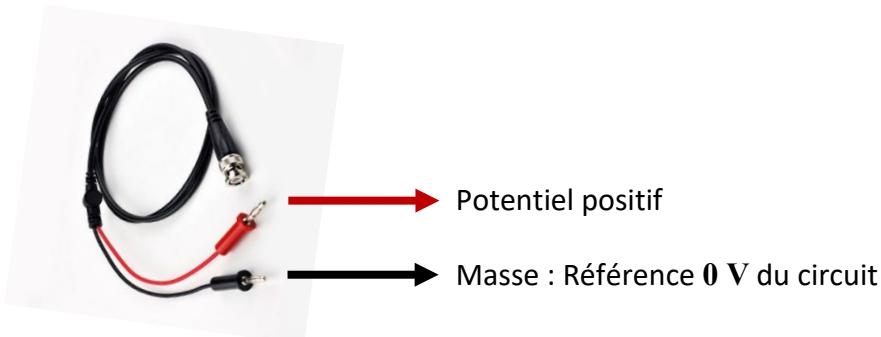
En fonction des besoins, la tension d'alimentation est fournie par les deux appareils suivants :

### Générateur de fonctions HMF2525

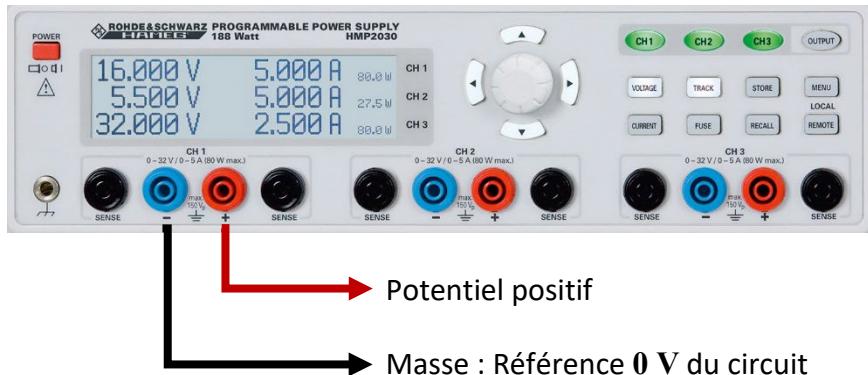


La tension est disponible sur la sortie BNC **SIGNAL OUTPUT**.

La connexion entre le générateur de fonctions et le circuit est réalisée à l'aide de l'un des deux connecteurs suivants :



## Alimentation de laboratoire HMP2030



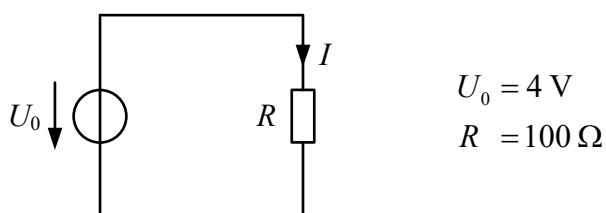
La tension continue est disponible sur trois canaux distincts, réglables séparément.

Afin de réaliser des montages qui soient le plus compréhensibles possibles, il est judicieux d'utiliser des câbles de couleurs bien définis et qui correspondent aux couleurs des bornes des différents appareils :

	Utiliser les câbles de couleur <b>ROUGE</b> pour connecter toutes les parties du circuit qui correspondent au <b>potentiel positif</b> de l'alimentation
	Utiliser les câbles de couleur <b>NOIRE</b> pour connecter toutes les parties du circuit qui correspondent à la <b>masse (0 V)</b> de l'alimentation

## 5. Loi d'Ohm

Schéma pour les calculs :



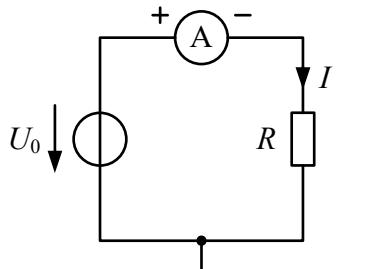
À l'aide de la loi d'Ohm, exprimer la relation qui permet de calculer le courant  $I$  à partir de la tension  $U_0$  et de la résistance  $R$  :

$$I = \frac{U_0}{R}$$

Donner sa valeur numérique :

$$I = \frac{4}{100} = 40 \text{ mA}$$

Schéma de montage pour la mesure du courant  $I$  :



$U_0 = 4 \text{ V}$  (Alimentation HMP2030)

$R = 100 \Omega$

A = Ampèremètre (Multimètre HMC8012)

La tension continue  $U_0$  est obtenue à l'aide de l'alimentation de laboratoire **HMP2030**



Utiliser le canal de sortie **CH 1**.

Cliquer sur la touche correspondante qui s'illumine en **VERT** lorsqu'elle est activée.

Choisir la valeur de la tension continue à l'aide de la touche **VOLTAGE** et du bouton rotatif.

À l'aide de la touche **CURRENT** et du bouton rotatif, fixer à **1 A** le courant maximal que le canal **CH 1** peut fournir.

Le passage au **ROUGE** d'une touche signale un courant insuffisant à l'alimentation du circuit connecté.

La valeur de sortie est délivrée uniquement si la touche **OUTPUT** est activée.

Réaliser le montage et mesurer le courant  $I$  à l'aide du multimètre **HMC8012**.



- Connecter le courant continu à mesurer entre les deux bornes **A** et **COM**

	<p>On obtient une mesure correcte en effectuant une connexion qui respecte le sens du courant :</p> <p>Le signe "+" du schéma correspond à la borne <b>A</b></p> <p>Le signe "-" du schéma correspond à la borne <b>COM</b></p>	
--	---	--

- Sélectionner la mesure d'un courant continu à l'aide de la touche **DCI**
- Vérifier que la touche **Auto Range** est activée en contrôlant que l'écriture de l'affichage correspondant est de couleur **JAUNE**

Noter la valeur mesurée :

$$I = 39.616 \text{ mA}$$

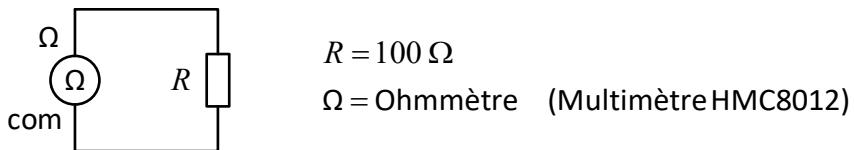
La tolérance de la résistance  $R$  influence la précision de la mesure du courant  $I$ .

Quelle est la tolérance des résistances utilisées pendant les travaux pratiques ?

$$\text{Tolérance en \%} = 5\%$$

Utiliser le multimètre **HMC8012** et la touche  **$\Omega$**  pour mesurer la valeur de la résistance  $R$  :

	<p>Pour effectuer une mesure correcte, on doit <b>déconnecter</b> la résistance du reste du circuit et ensuite la <b>connecter</b> au multimètre selon le schéma ci-dessous.</p>
--	--



$$R = 100.826 \Omega$$

Calculer l'erreur relative de la résistance  $R$  à l'aide de la formule suivante qui donne le résultat exprimé en % :

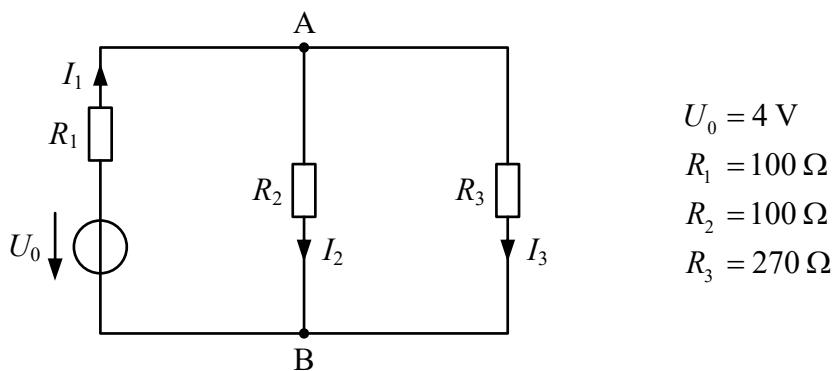
$$\delta = \left| \frac{\text{valeur mesurée} - \text{valeur théorique}}{\text{valeur théorique}} \right| \cdot 100$$

$$\delta_R = \left| \frac{100.826 - 100}{100} \right| \cdot 100 = 0.826 \%$$

## 6. Les lois de Kirchhoff

### 6.1. Loi de Kirchhoff pour les nœuds

Schéma pour les calculs :



Écrire la loi de Kirchhoff pour les nœuds à l'aide des trois courants  $I_1$ ,  $I_2$  et  $I_3$

$$\text{au nœud A : } I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$\text{au nœud B : } -I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

Calculer la valeur numérique des trois courants  $I_1$ ,  $I_2$  et  $I_3$ :

$$I_1 = 23.125 \text{ mA}$$

$$I_2 = 16.875 \text{ mA}$$

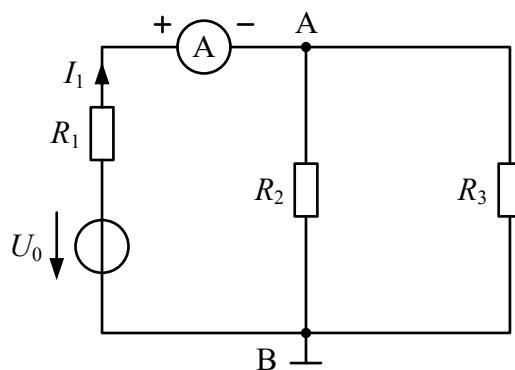
$$I_3 = 6.25 \text{ mA}$$

Vérifier la loi de Kirchhoff pour les nœuds à l'aide des trois courants calculés  $I_1$ ,  $I_2$  et  $I_3$ :

$$\text{au nœud A : } 23.125 \text{ mA} - 16.875 \text{ mA} - 6.25 \text{ mA} = 0 \text{ mA}$$

$$\text{au nœud B : } -23.125 \text{ mA} + 16.875 \text{ mA} + 6.25 \text{ mA} = 0 \text{ mA}$$

Schémas de montage pour vérifier la loi de Kirchhoff pour les nœuds :



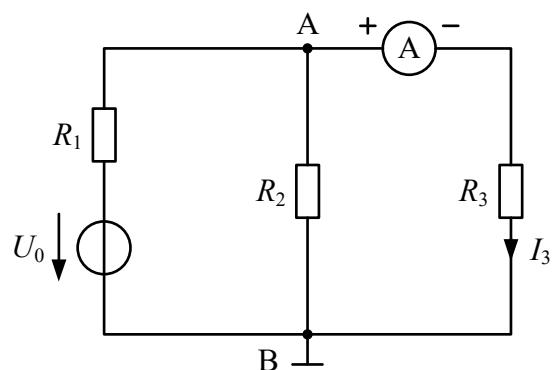
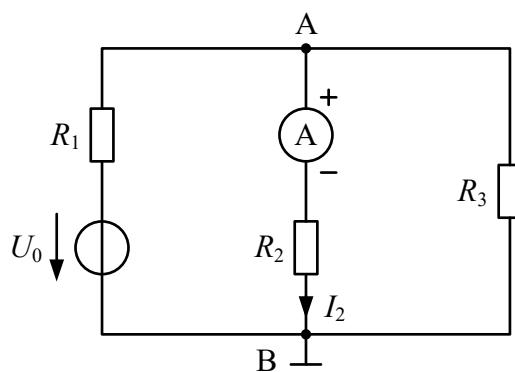
$$U_0 = 4 \text{ V} \quad (\text{Alimentation HMP2030})$$

$$R_1 = 100 \Omega$$

$$R_2 = 100 \Omega$$

$$R_3 = 270 \Omega$$

A = Ampèremètre (Multimètre HMC8012)



Réaliser les montages et mesurer les 3 courants  $I_1$ ,  $I_2$  et  $I_3$  à l'aide du multimètres **HMC8012**.

- Connecter le courant continu à mesurer entre les deux bornes **A** et **COM**
- Sélectionner la mesure d'un courant continu à l'aide de la touche **DC I**
- Vérifier que la touche **Auto Range** est activée

Noter les valeurs mesurées et vérifier qu'elles correspondent aux valeurs calculées :

$$I_1 = 21.84 \text{ mA}$$

$$I_2 = 15.41 \text{ mA}$$

$$I_3 = 6.48 \text{ mA}$$

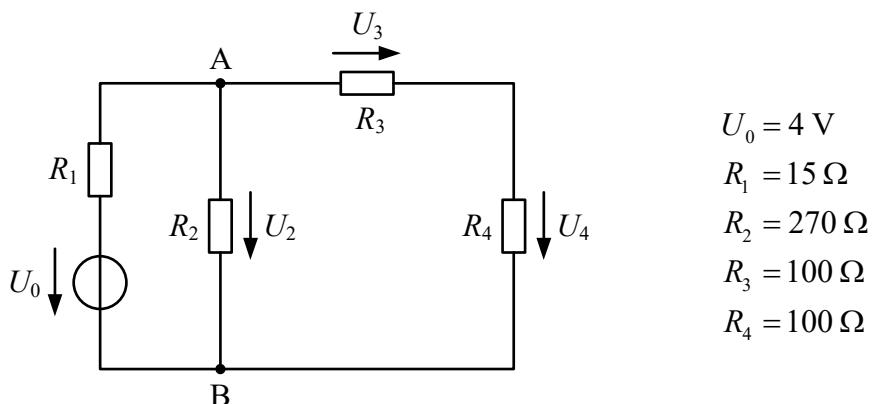
Vérifier la loi de Kirchhoff pour les nœuds à l'aide des trois courants  $I_1$ ,  $I_2$  et  $I_3$  mesurés

$$\text{au nœud A : } 21.84 \text{ mA} - 15.41 \text{ mA} - 6.48 \text{ mA} = -0.05 \text{ mA}$$

$$\text{au nœud B : } -21.84 \text{ mA} + 15.41 \text{ mA} + 6.48 \text{ mA} = 0.05 \text{ mA}$$

## 6.2. Loi de Kirchhoff pour les mailles

Schéma pour les calculs :



Écrire la loi de Kirchhoff pour les mailles en tenant compte de la maille ABA et des tensions  $U_2$ ,  $U_3$  et  $U_4$ :

$$U_3 + U_4 - U_2 = 0$$

Calculer la valeur numérique des trois tensions  $U_2$ ,  $U_3$  et  $U_4$ :

$$U_2 = 3.538 \text{ V}$$

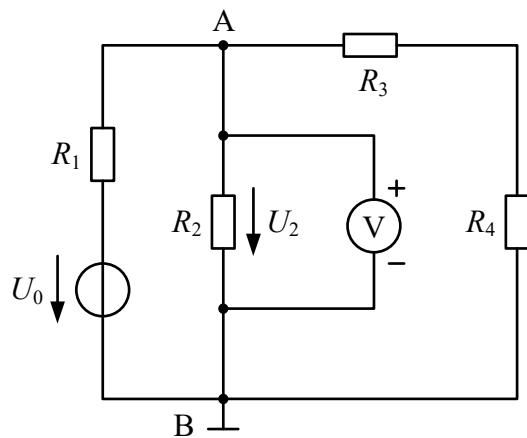
$$U_3 = 1.769 \text{ V}$$

$$U_4 = 1.769 \text{ V}$$

Vérifier la loi de Kirchhoff pour les mailles en tenant compte de la maille ABA et des tensions  $U_2$ ,  $U_3$  et  $U_4$  calculées :

$$1.769 \text{ V} + 1.769 \text{ V} - 3.538 \text{ V} = 0 \text{ V}$$

Schémas de montage pour vérifier la loi de Kirchhoff pour les mailles :



$$U_0 = 4 \text{ V} \quad (\text{Alimentation HMP2030})$$

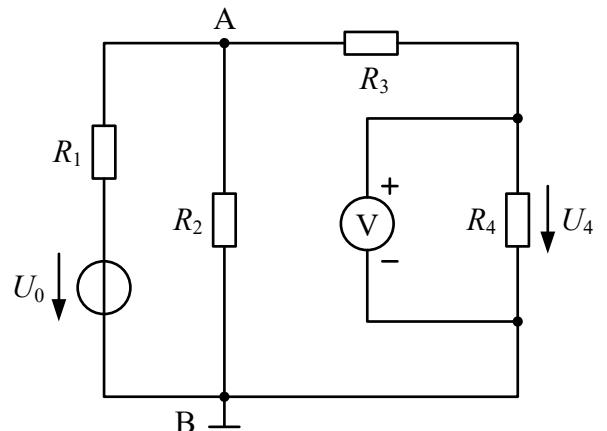
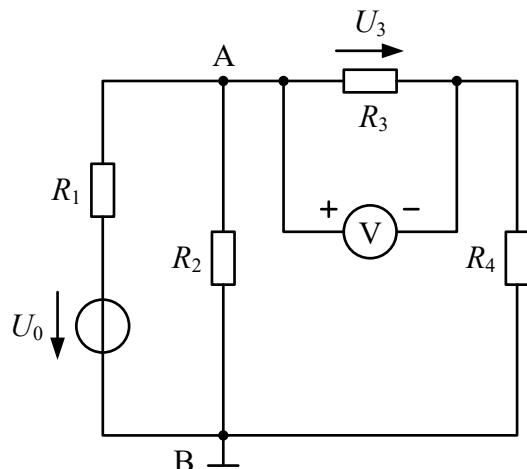
$$R_1 = 15 \Omega$$

$$R_2 = 270 \Omega$$

$$R_3 = 100 \Omega$$

$$R_4 = 100 \Omega$$

V = Voltmètre (Multimètre HMC8012)



Réaliser les montages et mesurer les 3 tensions  $U_2$ ,  $U_3$  et  $U_4$  à l'aide du multimètre **HMC8012**.

- Connecter la tension à mesurer entre les deux bornes **V** et **COM**

	On obtient une mesure correcte en effectuant une connexion qui respecte le sens de la tension : Le signe "+" du schéma correspond à la borne <b>V</b> Le signe "-" du schéma correspond à la borne <b>COM</b>	<b>V</b> ○ + <b>U</b> ↓ <b>COM</b> ○ -
---	---	---

Quelle touche permet-elle de sélectionner la mesure d'une tension continue ?

- DC I**  
 **DC V**  
 **AC V**

Noter les valeurs mesurées et vérifier qu'elles correspondent aux valeurs calculées :

$$U_2 = 3.508 \text{ V}$$

$$U_3 = 1.766 \text{ V}$$

$$U_4 = 1.740 \text{ V}$$

Vérifier la loi de Kirchhoff pour les mailles en tenant compte de la maille ABA et des tensions  $U_2$ ,  $U_3$  et  $U_4$  mesurées :

$$1.766 \text{ V} + 1.740 \text{ V} - 3.508 \text{ V} = -0.002 \text{ V} = -2 \text{ mV}$$