

Labo 02

Canon à électrons

Aurore Delessert, Magali Tornare
Physique — HEIG-VD

Date du laboratoire : 12 décembre 2025
Professeure : Dr Anne-Gabrielle Pawlowski
Salle de classe : T06

Contents

1. Introduction	2
2. Matériel utilisé & Caractéristiques techniques	3
3. Prise en main & Calibration du système	4
4. Manipulation 1 - Déviation électrique du faisceau électronique	5
4.1 Rappels théoriques	5
4.2 Notations	5
4.3 Vitesse des électrons	5
4.4 Déviation horizontale du faisceau	5
4.5 Incertitudes sur la déviation	6
4.6 Application numérique	6
4.7 Analyses des résultats	6
5. Manipulation 2 - Déviation magnétique du faisceau électronique	7
5.1 Introduction	7
5.2 Rappel Théorique “Déviation des électrons”	7
5.3 Rappel Théorique “Solenoides”	8
5.4 Calculs des incertitudes	11
5.5 Mesure et résultats	12
5.6 Analyse numérique des résultats	15
5.7 Analyse des résultats	15
5.8 Conclusion manipulation 2	15
6. Manipulation 3 - Représentation oscilloscopique	17
6.1 Théorie	17
6.2 Résultats	17
6.3 Analyse	18
6.4 Conclusion manipulation 3	18
7. Manipulation 4 - Formes de lissajous	19
7.1 Introduction	19
7.2 Équations des mouvements	19
7.3 Exemples de figures de Lissajous	19
7.4 Parallèle avec le canon à électrons	21
7.5 Conclusion manipulation 4	21
8. Résumé	22

1. Introduction

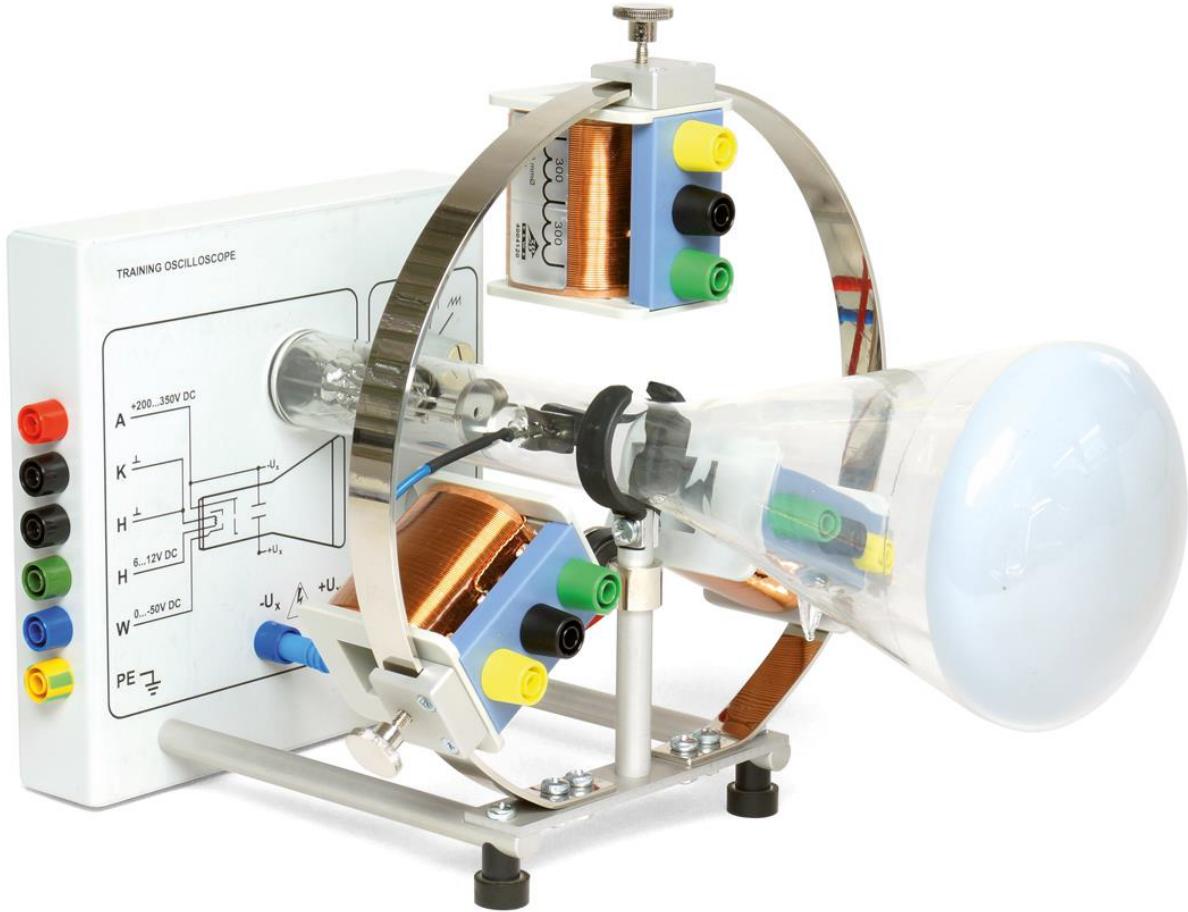


Figure 1: canon à électrons

Des faisceaux d'électrons sont aujourd'hui beaucoup utilisés industriellement, par exemple pour la gravure de microstructures pour la microélectronique ou pour le soudage ou l'impression 3D par faisceau d'électrons. Ces applications sont récentes, d'autres exemples plus traditionnels d'application de faisceaux à électrons se trouvent dans des sources à rayons X pour l'imagerie médicale ou dans des microscopes électroniques pour l'analyse de matériaux, mais aussi dans des oscilloscopes ou télévisions traditionnelles qui utilisent des faisceaux d'électrons pour l'affichage d'un signal électrique ou d'une image.

Ces instruments et applications se basent sur la déviation d'un faisceau d'électrons dans des champs électriques et magnétiques. Ces systèmes contiennent donc un canon à électrons (tube cathodique) pour générer le faisceau d'électrons et utilisent des champs électriques et magnétiques pour le dévier.

Le système d'expérimentation "oscilloscope didactique" du laboratoire PHY3 permet d'étudier la déviation d'un faisceau d'électrons par des champs électriques et magnétiques. De plus, un balayage contrôlé du faisceau à l'aide de signaux périodiques peut être étudié, ainsi que la représentation à résolution temporelle de signaux électriques sur un écran fluorescent, telle que réalisée dans des oscilloscopes traditionnels. Le faisceau est généré et focalisé sous vide dans un tube cathodique (dit aussi tube de Braun). Le point d'impact des électrons peut être observé sur un écran fluorescent sous la forme d'une tâche lumineuse verte.

- Afin d'observer également le tracé de la trajectoire du faisceau, on peut obscurcir le système, par exemple à l'aide d'un grand carton. La trajectoire du faisceau des électrons est visible grâce à l'ionisation d'un gaz résiduel (ici néon) par lequel le tube à vide avait été rempli à faible pression (les électrons qui entrent en collision avec des molécules du gaz, les excitent et on observe ensuite la lumière qui est émise par les atomes du gaz).
- Un champ électrique axial appliqué à l'intérieur de la partie tube cathodique (entre la cathode et l'anode) permet l'accélération des électrons qui sont libérés par la cathode (chauffée à l'aide d'un filament) et ainsi de régler la vitesse des électrons.
- Un champ électrique latéral et orienté horizontalement (entre deux plaques d'un condensateur à plaques parallèles) permet une déviation et balayage horizontal du faisceau, à l'aide d'une tension à dents de scie (le faisceau

d'électrons se déplace ainsi à vitesse constante de gauche à droite pour revenir d'un saut à son point d'origine ; le processus se répète de manière périodique avec une fréquence réglable).

- Des champs magnétiques, orientés perpendiculairement par rapport au faisceau d'électrons, peuvent également dévier le faisceau. Pour générer les champs magnétiques des bobines électriques sont utilisées et peuvent être placées sous différents angles à l'extérieur du tube à vide, sur une armature circulaire et concentrique autour de l'axe du tube cathodique, afin d'étudier la déviation du faisceau de manière contrôlée en fonction de l'alimentation des bobines et de la vitesse des électrons. Lorsque l'on choisit l'emplacement d'une bobine telle que la déviation du faisceau d'électrons par le champ magnétique résulte le long l'axe verticale, on peut alimenter la bobine avec un signal électrique que l'on souhaite représenter en fonction du temps, simultanément à un balayage horizontal du faisceau, et ainsi rendre visible le signal électrique sur l'écran fluorescent comme sur un oscilloscope.

2. Matériel utilisé & Caractéristiques techniques

Tout au long de notre laboratoire, nous allons utiliser le matériel suivant :

- Le canon à électron montré en figure 1
- Un écran fluorescent affichant à l'aide d'un point vert l'endroit de l'impact du faisceau à électron.
- 2 Multimètres qui nous serviront à mesurer la tension et le courant dans le montage.
- 3 Bobines
- Une alimentation spécifique pour le laboratoire.

Pour parler un peu plus en détails des caractéristiques techniques à prendre en compte :

- Une tension anodique (V_a) que nous devions choisir entre 200 et 350 Vcc. Nous avons pris 250 ± 2 Vcc.
- Un courant anodique de maximum 1 mA.
- une tension de chauffage entre 6 et 12 V
- Une tension en dents de scie de 100 V avec une fréquence entre 3,5 et 650 Hz.
- Des bobines de déviation qui ont soit 300 ou 600 spires, avec une résistance interne de $4,2 \Omega$ et impédance de 6 mH.

Pour le module de commande, le voici :

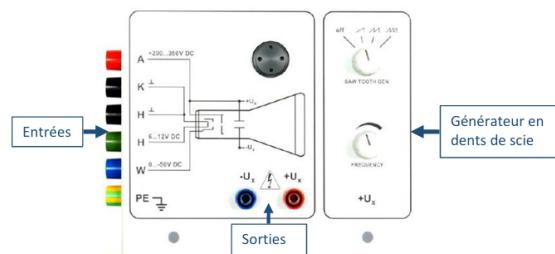


Figure 2: module de commande

Avec:

- A : Anode
- C : Cathode
- H : Chauffage
- W : Cylindre Wehnelt
- PE : Terre de protection
- U_+ : Electrode de déviation droite
- U_- : Electrode de déviation gauche

Pour le branchement, voici le schéma :

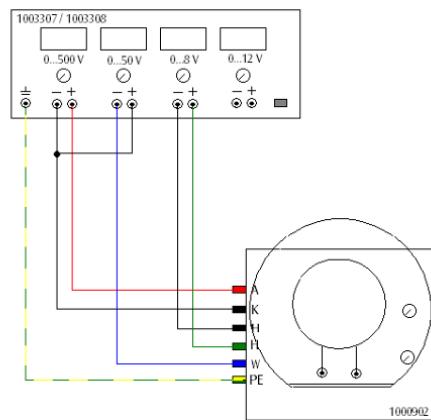


Figure 3: branchement

3. Prise en main & Calibration du système

Afin de pouvoir réaliser ce laboratoire avec une meilleure visibilité des mesures, nous avons :

- Fixer une tension anodique à 250V
- Comme la tension de chauffage n'impacte normalement pas les manipulations, nous l'avons mise au maximum, soit 8V.
- Pour pouvoir trouver la meilleure position du point sur l'oscilloscope didactique (c'est-à-dire au maximum au centre), nous avons orienté / tourné les 2 petits aimants qui se situaient sous l'écran comme montré sur la photo ci-dessous.
- Dans le but de pouvoir mieux comprendre comment régler le système et de réaliser des mesures précises et plus simple à analyser, nous avons calibré notre oscilloscope en déterminant la tension de Wehnelt.

En testant différentes tensions de Wehnelt, nous avons trouvé que la meilleure tension pour pouvoir bien visualiser le point est de $-18 \pm 0,2\text{V}$.

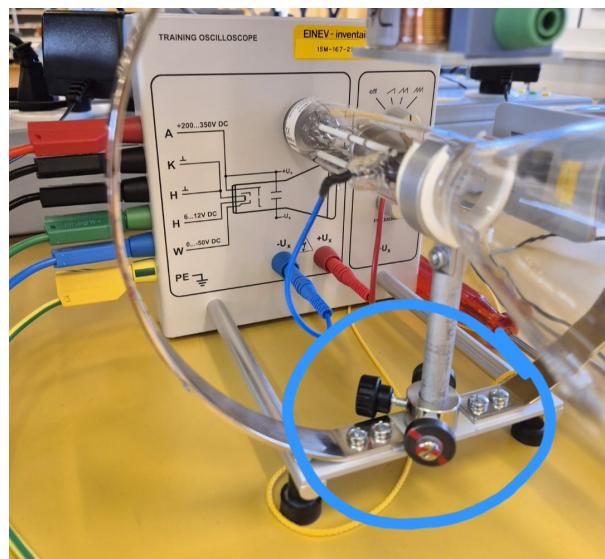


Figure 4: Aimants

4. Manipulation 1 - Déviation électrique du faisceau électronique

4.1 Rappels théoriques

La génération des électrons Les électrons sont produits par **une émission themoïonique** à partir d'une cathode chauffée. "Une émission thermoïonique (ou émission thermoélectronique) est un flux d'électrons provenant d'un métal ou d'un oxyde métallique, qui est provoqué par les vibrations des atomes dues à l'énergie thermique lorsque ceux-ci parviennent à surmonter les forces électrostatiques." (source : Wikipedia) Le chauffage diminue la barrière de potentiel et permet aux électrons de s'échapper de la surface. Un **cylindre de Wehnelt**, polarisé de quelques dizaines de volts encore plus négativement que la cathode, repousse les électrons émis hors axe et les focalise en faisant un point de croisement sur l'axe. Une **anode** est placée à environ 10mm plus loin, portée à une tension positive par rapport à la cathode, attire et accélère les électrons à travers l'ouverture centrale.

Le rôle des plaques de déviation Le tube est équipé de 2 plaques de déviation électrostatiques. Cette paire de plaques latérales génère un champ électrique transverse \vec{E} , qui exerce sur les électrons une force $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$. Cette force change la direction du faisceau perpendiculairement à son axe. Pour réaliser cette déviation latérale (droite ou gauche) les plaques sont polarisées de manière différentielle (+V ou -V) ce qui permet de modifier la trajectoire du faisceau sans toucher à son énergie. Contrairement à la déviation magnétique $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$, qui sera étudié par la suite, la déviation électrostatique agit directement dans la direction du champ imposé entre les plaques.

Pour calculer la déviation, nous allons partir de l'hypothèse que les électrons ne sont pas *relativistes*, c'est-à-dire que leur vitesse est suffisamment faible pour que les effets de relativité soient négligeables. Nous allons donc utiliser la mécanique classique. Nous démontrerons plus bas que comme la vitesse des électrons est très loin de la vitesse de la lumière, les effets relativistes (comme l'augmentation de la masse effective) sont négligeables.

4.2 Notations

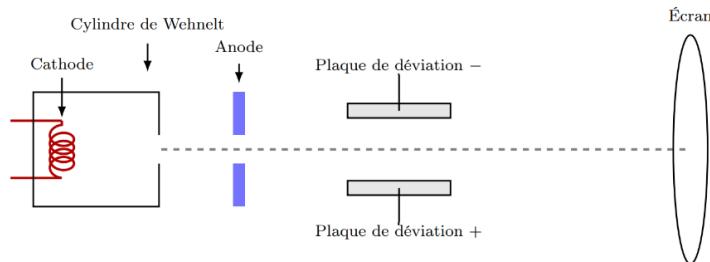


Figure 5: Schéma

$$\begin{cases} V_a = \text{tension d'accélération (anode-cathode)}[V] \\ V_p = \text{tension appliquée aux plaques de déviation}[V] \\ d = \text{distance entre les plaques}[m] \\ l = \text{longueur des plaques}[m] \\ L = \text{distance entre la sortie des plaques et l'écran}[m] \end{cases}$$

4.3 Vitesse des électrons

$$\text{On sait que : } E_c = \frac{1}{2} m_e v^2 = eV_a.$$

$$\text{Alors on peut facilement trouver la vitesse de l'électron qui donne : } v_e = \sqrt{\frac{2eV_a}{m_e}} \quad (1)$$

4.4 Déviation horizontale du faisceau

Avec les notations du schéma, on peut calculer la déviation horizontale D du faisceau sur l'écran.

$$\text{La force exercée sur l'électron dans la région des plaques est : } F = qE = q \frac{V_p}{d} \quad (2)$$

$$\text{L'accélération subie par l'électron dans cette région est donc : } a = \frac{F}{m_e} = \frac{qV_p}{m_e d} \quad (3)$$

$$\text{Le temps passé par l'électron dans la région des plaques est : } t_1 = \frac{l}{v_e} \quad (4)$$

La vitesse acquise dans la direction horizontale à la sortie des plaques est donc : $v_x = at_1 = \frac{qV_p}{m_e d} \cdot \frac{l}{v_e}$ (5) Après la sortie des plaques, l'électron continue son mouvement avec une vitesse horizontale constante v_x pendant un temps $t_2 = \frac{L}{v_e}$ avant d'atteindre l'écran. La déviation horizontale D sur l'écran est donc : $D = v_x t_2 = \left(\frac{qV_p}{m_e d} \cdot \frac{l}{v_e} \right) \cdot \frac{L}{v_e}$ (6)

En remplaçant v_e par son expression (1), on obtient finalement :

$$D = \frac{qV_p l L}{m_e d \left(\frac{2qV_a}{m_e} \right)} = \frac{V_p l L}{2dV_a} \quad (7)$$

4.5 Incertitudes sur la déviation

La déviation D dépend linéairement de V_p , l , L et inversement de d et V_a . En utilisant la formule de propagation des incertitudes pour une fonction de plusieurs variables, on trouve que l'incertitude relative sur D est donnée par :

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta V_a}{V_a} \quad (8)$$

4.6 Application numérique

Avec les valeurs suivantes :

- $V_a = 250 \pm 2V$
- $V_p = 100 \pm 1V$
- $l = 0.02 \pm 0.001m$
- $L = 0.178 \pm 0.001m$
- $d = 0.014 \pm 0.001m$

On peut calculer la déviation D (7) et son incertitude ΔD (8).

$$D = \frac{100 \cdot 0.02 \cdot 0.178}{2 \cdot 0.014 \cdot 250} = 0.05085m = 50.85mm$$

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{1}{100} + \frac{0.001}{0.02} + \frac{0.001}{0.178} + \frac{0.001}{0.014} + \frac{2}{250} = 0.141$$

$$\Delta D = 0.141 \cdot 50.85mm = 7.17mm$$

Donc, la déviation du faisceau est $D = 50.85 \pm 7.17mm$.

4.7 Analyses des résultats

Lorsque nous appliquons une tension de 100V aux plaques de déviation, nous observons une déviation du faisceau d'environ 55mm sur l'écran, ce qui est en accord avec notre calcul théorique de $50.85 \pm 7.17mm$. Cette concordance entre la théorie et l'expérience confirme la validité de notre modèle pour la déviation électrostatique des électrons dans le canon à électrons. Pour expliquer les petites différences entre la valeur théorique et expérimentale, nous pouvons considérer des facteurs tels que les imprécisions dans les mesures des dimensions du système, les variations de la tension appliquée, des effets non idéaux dans le tube cathodique et aussi que l'écran ou on a mesuré est incurvé.

5. Manipulation 2 - Déviation magnétique du faisceau électronique

5.1 Introduction

Dans cette manipulation, nous allons étudier la déviation d'un faisceau d'électrons par un champ magnétique généré par une bobine. Nous allons analyser comment la trajectoire des électrons est influencée par le champ magnétique et vérifier les relations théoriques entre le rayon de courbure de la trajectoire, la vitesse des électrons et l'intensité du champ magnétique.

5.2 Rappel Théorique “Déviation des électrons”

La déviation magnétique d'un faisceau d'électrons permet d'étudier l'effet d'un champ magnétique sur des charges qui se déplacent. Quand un faisceau d'électrons se déplace dans un champ magnétique \vec{B} qui est perpendiculaire à sa vitesse \vec{v} , ce dernier subit une force de Lorentz qui est donnée par la formule :

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})[N]$$

dans laquelle q est la charge d'un électron. Cette fameuse force, qui est perpendiculaire à la direction du déplacement, provoque une trajectoire circulaire dont le rayon R peut être déterminé par l'équilibre entre la force centripète et la force magnétique, l'égalité donne :

$$\frac{mv^2}{R} = qvB \quad \Rightarrow \quad R = \frac{mv}{qB} \quad (20)$$

avec :
$$\begin{cases} m = \text{masse de la particule}[kg] \\ v = \text{vitesse}[m/s] \\ R = \text{rayon}[m] \\ q = \text{charge de la particule}[C] \\ B = \text{champ électrique}[V/m] \end{cases}$$

En utilisant la formule de l'énergie, on peut relier la vitesse de l'électron à la tension anodique V_a par :

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV_a \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2qV_a}{m}} \quad (21)$$

avec :
$$\begin{cases} m = \text{masse de la particule}[kg] \\ v = \text{vitesse}[m/s] \\ q = \text{charge de la particule}[C] \\ V_a = \text{tension anodique}[V] \end{cases}$$

Maintenant, si on veut trouver le rayon de courbure, il faut prendre l'équation (21) et la mettre dans l'équation (20) ce qui nous donne :

$$R = \frac{m}{qB} \cdot \sqrt{\frac{2qV_a}{m}} = \boxed{\frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV_a}{q}}} \quad (22)$$

avec :
$$\begin{cases} m = \text{masse de la particule}[kg] \\ R = \text{rayon de courbure}[m] \\ q = \text{charge de la particule}[C] \\ B = \text{champ électrique}[V/m] \\ V_a = \text{tension anodique}[V] \end{cases}$$

Nous remarquons donc que la déviation observée sur l'écran dépend du champ magnétique appliqué, de la tension d'accélération des électrons et également de la position et de l'orientation de la bobine. Cela veut donc dire que si le courant change de sens dans la bobine ou si nous déplaçons cette dernière, la déviation sera modifiée.

5.3 Rappel Théorique “Solenoides”

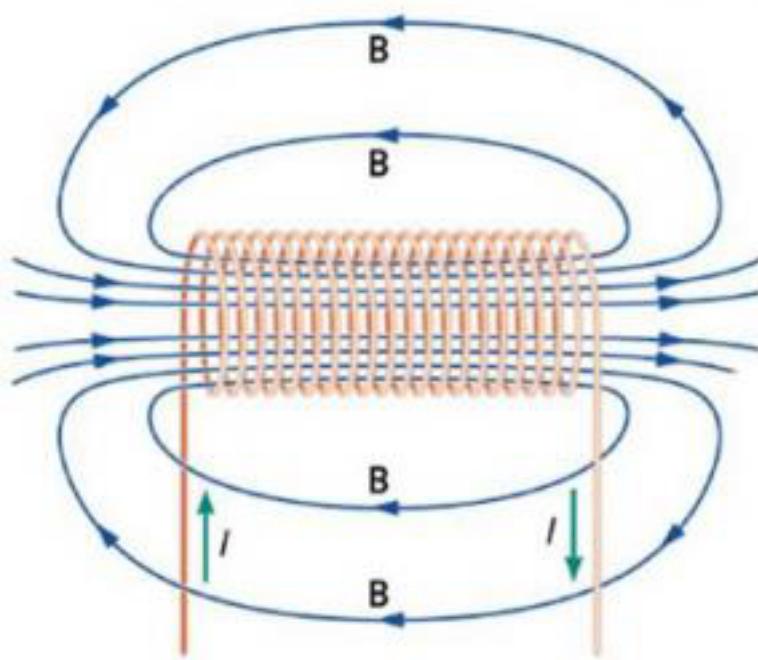


Figure 6: solénoïde

Un solénoïde est en réalité une bobine de fil conducteur entroulé de manière hélicoïdale. Quand un courant électrique le parcourt, il génère un champ magnétique qui sera principalement axial à l'intérieur des spires.

Champ magnétique dans un solénoïde Le champ magnétique qui est généré par le passage d'un courant I dans une bobine ou un solénoïde dépend de la géométrie de ce dernier. S'il a une longueur infinie, le champ est considéré comme "uniforme" à l'intérieur et à peu près nul à l'extérieur. Il est exprimé avec la formule suivante :

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} [T] \quad (23)$$

avec : $\begin{cases} N = \text{Nombre total de spires} [-] \\ \mu_0 = \text{Perméabilité du vide} [V \cdot s/m \cdot A] \\ I = \text{Intensité du courant} [A] \\ L = \text{Longueur du solénoïde} [m] \end{cases}$

Si la solénoïde est de longueur finie, il faudra prendre en compte les effets de bords (les variations du champ près des extrémités du solénoïde, plus précisément l'endroit où il n'est plus uniforme).

La formule pour le champ magnétique devient :

$$B = \frac{\mu_0 NI}{\sqrt{4R^2 + L^2}} [T] \quad (24)$$

avec : $\begin{cases} N = \text{Nombre total de spires} [-] \\ \mu_0 = \text{Perméabilité du vide} [V \cdot s/m \cdot A] \\ I = \text{Intensité du courant} [A] \\ L = \text{Longueur du solénoïde} [m] \\ R = \text{Rayon du solénoïde} [m] \end{cases}$

Pour illustrer ce cas, voici un schéma :

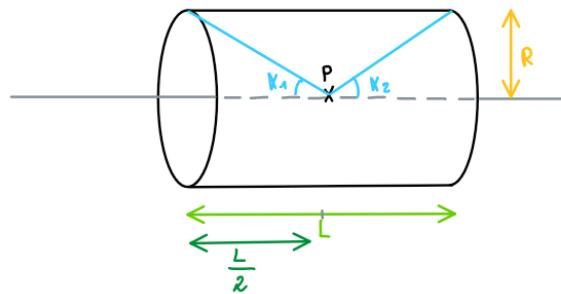


Figure 7: Mesure au centre de la bobine

Si nous sommes à l'extérieur de la bobine, nous allons utiliser la formule suivant pour calculer le champ :

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2L} \cdot (\cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2)) [T] (25)$$

Nous pouvons calculer les 2 angles à l'aide de la trigonométrie tel que :

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{R}{x + \frac{L}{2}}\right)$$

$$\alpha_2 = \arctan\left(\frac{R}{x + L}\right)$$

avec : $\begin{cases} N = \text{Nombre total de spires} [-] \\ \mu_0 = \text{Perméabilité du vide} [V \cdot s \cdot / m \cdot A] \\ I = \text{Intensité du courant} [A] \\ L = \text{Longueur du solénoïde} \\ \alpha_1, \alpha_2 = 2 \text{ angles (voir schéma ci-dessus)} [\text{rad}] \end{cases}$

Voici le schéma :

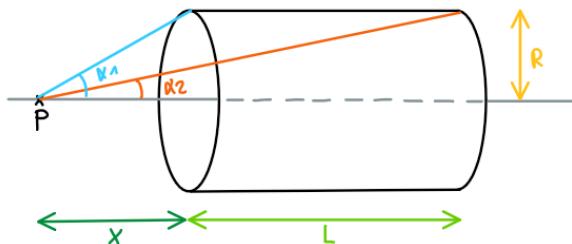


Figure 8: Mesure hors bobine

Information sur le champ maximal : Nous savons qu'il est maximal lorsqu'il est au centre des spires. Nous pouvons le confirmer en regardant l'image ci-dessous dans laquelle nous voyons un champ magnétique B généré par un courant I . Sur l'image ci-dessous, la longueur de la bobine est noté d alors que nous l'avons appelée L dans les calculs.

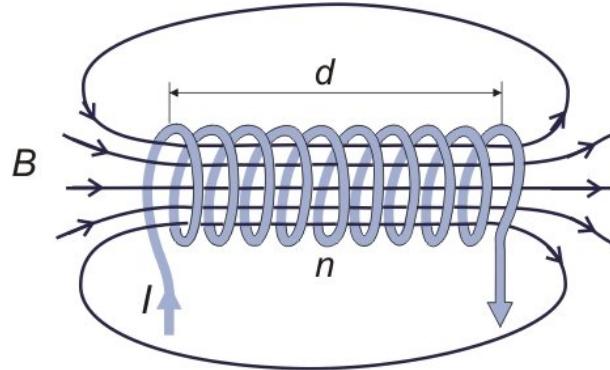


Figure 9: Champ électrique solénoïde

5.4 Calculs des incertitudes

Nous allons réaliser les incertitudes pour la formule : $R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV_a}{q}}$

Incertitude relative :

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 = \left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2 + \frac{1}{4} \left[\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_a}{V_a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta q}{q}\right)^2 \right]$$

La formule simplifiée et finale donne

$$\Delta R = R \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2 + \frac{1}{4} \left[\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_a}{V_a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta q}{q}\right)^2 \right]}$$

Nous allons réaliser les incertitudes par rapport à la formule : $B = \frac{\mu_0 NI}{\sqrt{4R^2 + L^2}} [T] (24)$

$$\left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2 = \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{R \cdot \Delta R + l \cdot \Delta l}{R^2 + l^2}\right)^2$$

La formule simplifiée et finale donne

$$\Delta B = B \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{R \cdot \Delta R + l \cdot \Delta l}{R^2 + l^2}\right)^2}$$

Maintenant, les incertitudes pour la formule : $B = \frac{\mu_0 NI}{2L} \cdot (\cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2)) [T] (25)$

On commence avec les angles:

$$\Delta \alpha_1 = \sqrt{\left(\frac{\Delta R}{(x + \frac{L}{2})(1 + u_1^2)}\right)^2 + \left(\frac{R \Delta x}{(x + \frac{L}{2})^2(1 + u_1^2)}\right)^2 + \left(\frac{R \Delta L}{2(x + \frac{L}{2})^2(1 + u_1^2)}\right)^2} \quad \text{avec } u_1 = \frac{R}{x + \frac{L}{2}}$$

$$\Delta \alpha_2 = \sqrt{\left(\frac{\Delta R}{(x + L)(1 + u_2^2)}\right)^2 + \left(\frac{R \Delta x}{(x + L)^2(1 + u_2^2)}\right)^2 + \left(\frac{R \Delta L}{(x + L)^2(1 + u_2^2)}\right)^2} \quad \text{avec } u_2 = \frac{R}{x + L}$$

Avec les valeurs des incertitudes sur les angles, nous pouvons passer à la formule suivante, voici la formule l'incertitude relative :

$$\left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2 = \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\sin(\alpha_1) \Delta \alpha_1 + \sin(\alpha_2) \Delta \alpha_2}{\cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2)}\right)^2$$

et voici l'incertitude absolue:

$$\Delta B = B \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\sin(\alpha_1) \Delta \alpha_1 + \sin(\alpha_2) \Delta \alpha_2}{\cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2)}\right)^2}$$

5.5 Mesure et résultats

Pour commencer, nous avons décidé de vérifier la polarisation du champ d'une bobine suivant la polarisation du courant avec une boussole. Nous en avons déduit que le pôle Nord est attiré par le V_{CC} et donc que le pôle Sud est attiré par le GND. Le champ \vec{B} se déplace donc du V_{CC} au GND.

Concernant les résultats suivants, les incertitudes des mesures de u et i sont respectivement de $\pm 0,005$ [V] et $\pm 0,003$ [A]. Ces dernières ont été déterminées en analysant quel digit du multimètre n'était pas stable et en regardant de combien ce dernier variait. Afin d'éviter de ralonger le rapport, nous avons réalisé les calculs avec les valeurs mesurées et juste reporté les valeurs trouvées.

Mesure 1e sens Nous avons décidé de faire 2 calques différents. Le premier avec un premier sens du courant et le 2e dans l'autre sens. Cela nous a permis de mieux comprendre et de mieux voir le changement de direction. Pour ce 1e sens, le courant va de la borne jaune pour 600 spires ou noire pour 300 spires à la borne verte. Ce que nous pouvons ajouter comme remarque visuelle est que dans chaque cas, les points partent dans une autre direction en s'éloignant du centre de l'écran.

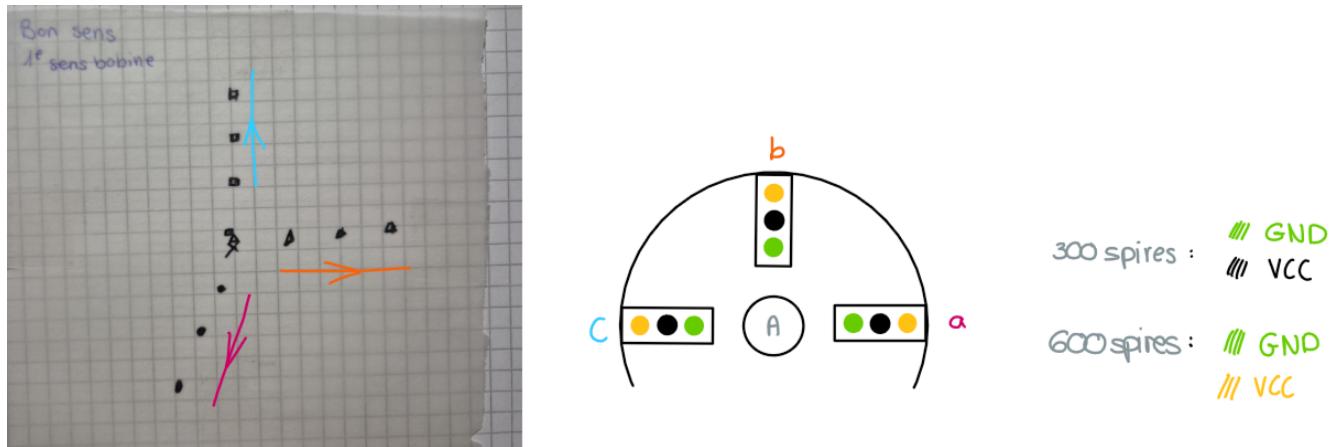


Figure 10: 1e sens bobine

Afin de mieux comprendre comment nous avons fait les mesures, nous avons inscrit les différentes positions de la bobine utilisée (a, b, c) ainsi que sur le calque, pour savoir quel tracé correspond à quelle position de la bobine. Voici les valeurs que nous avons obtenues pendant cette mesure :

point	u	i	spire
1	0,565	0,125	600
2	1,063	0,237	600
3	1,658	0,37	600

point	u	i	spire
1	0,562	0,124	600
2	0,995	0,22	600
3	1,374	0,305	600

point	u	i	spire
1	0,654	0,145	300
2	1,202	0,266	600
3	1,713	0,379	600

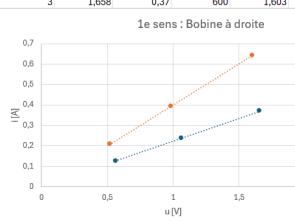


Figure 11: Mesure sens 1: bobine à droite

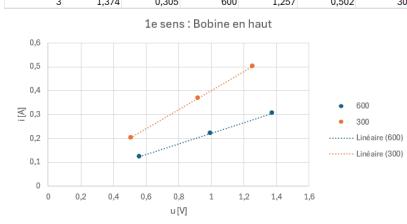


Figure 12: Mesure sens 1: bobine en haut

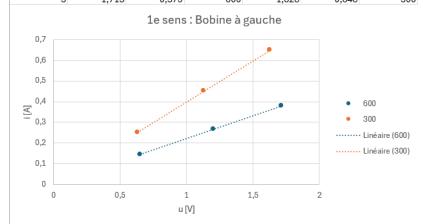


Figure 13: Mesure sens 1: bobine à gauche

Dans les tableaux, nous remarquons que les valeurs obtenues sont linéaires, ce qui est rassurant.

Pour mieux comprendre la trajectoire du faisceau, voici un croquis qui met en lumière les différents vecteurs utilisés : Cette trajectoire n'est pas droite car le fait de soumettre un champ magnétique (ou électrique) dévie les électrons de leur trajectoire initiale.

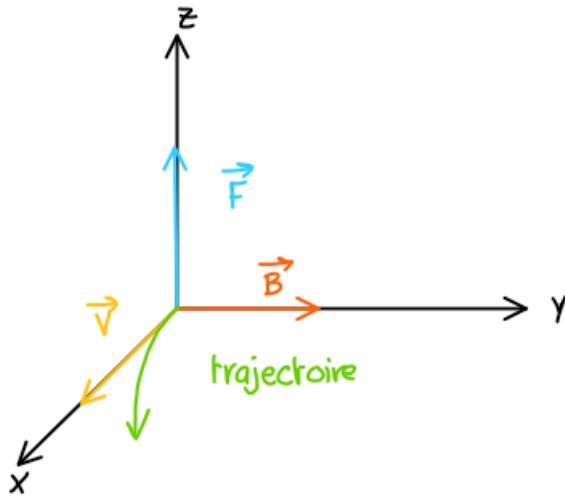
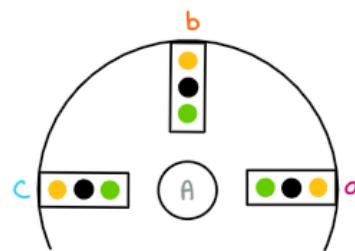
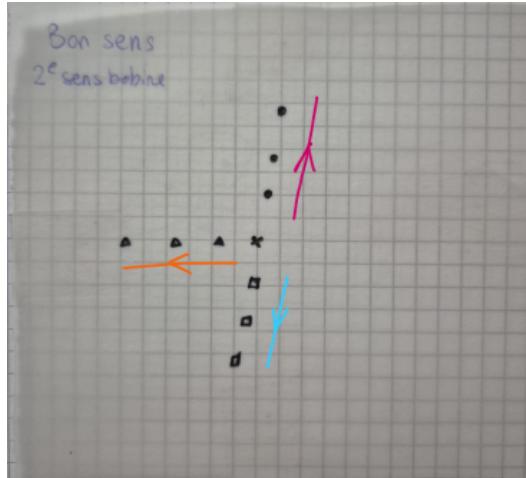


Figure 14: Trajectoire 1e sens

Mesure 2e sens Pour le 2e sens, le courant va de la borne verte à la borne verte à la borne jaune pour 600 spires ou noire pour 300 spires. Comme remarqué pour le 1e sens, les points partent toujours dans une autre direction en s'éloignant du centre de l'écran.



300 spires : VCC
 GND

600 spires : VCC
 GND

Figure 15: 2e sens bobine

Afin de mieux comprendre comment nous avons fait les mesures, nous avons inscrit les différentes positions de la bobine utilisée (a, b, c) ainsi que sur le calque, pour savoir quel tracé correspond à quelle position de la bobine. Voici les valeurs que nous avons obtenues pendant cette mesure :

point	u	i	spire	u	i	spire
1	0,489	0,108	600	0,539	0,249	300
2	0,86	0,19	600	0,976	0,451	300
3	1,338	0,296	600	1,536	0,717	300

2e sens : Bobine à droite

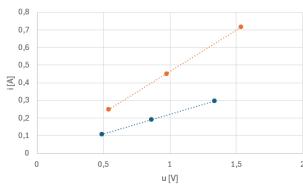


Figure 16: Mesure sens 2: bobine à droite

point	u	i	spire	u	i	spire
1	0,296	0,064	600	0,289	0,133	300
2	0,632	0,139	600	0,716	0,33	300
3	0,981	0,217	600	1,088	0,502	300

2e sens : Bobine en haut

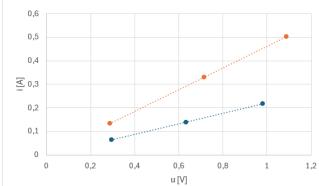


Figure 17: Mesure sens 2: bobine en haut

point	u	i	spire	u	i	spire
1	0,438	0,096	600	0,506	0,233	300
2	0,887	0,196	600	1,085	0,502	300
3	1,31	0,29	600	1,519	0,702	300

2e sens : Bobine à gauche

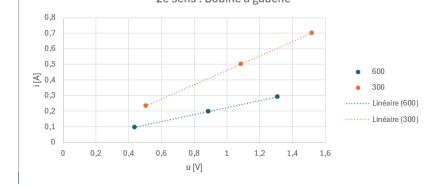


Figure 18: Mesure sens 2: bobine à gauche

Dans les tableaux, nous remarquons que les valeurs obtenues sont linéaires, ce qui est rassurant.

Pour mieux comprendre la trajectoire du faisceau, voici un croquis qui met en lumière les différents vecteurs utilisés :

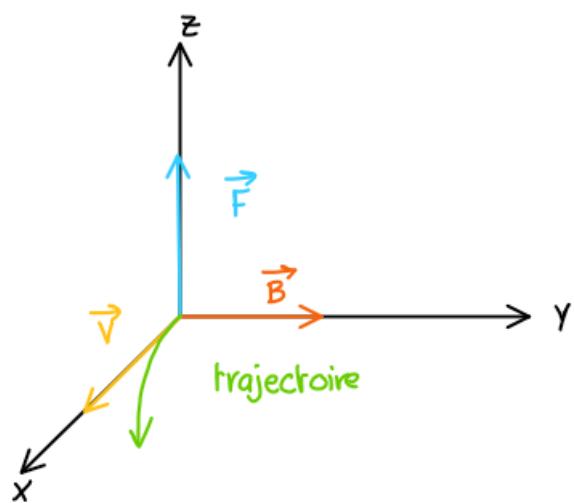


Figure 19: Trajectoire 1e sens

5.6 Analyse numérique des résultats

Pour commencer les analyses numériques, voici les différentes valeurs du champs que nous avons mesuré : Nous nous sommes rendues compte que les valeurs de tension sont totalement fausses car nous devions avoir la tension V_a et nous avons la tension aux bornes de la bobine.

Mesure	Tension	Courant	Champ magnétique	Nombre de spires	Position capteur
1	2,184	0,649	155,4 μ T	300	hors bobine
2	2,344	1,103	166,4 μ T	600	hors bobine
3	2,441	0,020	247,0 μ T	600	centre bobine

Pour les différentes mesures, voici ce que nous trouvons si nous calculons le champ magnétique avec les incertitudes:

Mesure	Champ magnétique	ΔB
1	153,9 μ T	9,81 μ T
2	164,2 μ T	6,68 μ T
3	245,6 μ T	7,88 μ T

Pour les résultats des calculs du rayon de courbure, si nous prenons les valeurs constantes :

$$\begin{cases} m = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg} \\ q = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C} \end{cases} \text{ comme nous n'avons pas mesuré la bonne tension, nous avons mis de manière arbitraire } V_a = 250 \text{ V. Nous trouvons :}$$

Mesure	Tension	Champ magnétique	Position capteur	Rayon de courbure	ΔR
1	250	155,4 μ T	hors bobine	0,343 [m] = 34,3 [cm]	9,3 [cm]
2	250	166,4 μ T	hors bobine	0,324 [m] = 32,4 [cm]	9,7 [cm]
3	250	247,0 μ T	centre bobine	0,218 [m] = 21,8 [cm]	11,1 [cm]

5.7 Analyse des résultats

Cette manipulation avait pour objectif d'étudier la déviation d'un faisceau d'électrons soumis à un champ magnétique, produit par une bobine (ou un solénoïde). Ce que nous avons pu constater :

- Le faisceau est bel et bien dévié sous l'effet de la force de Lorentz qui est perpendiculaire à la vitesse des électrons.
- Le rayon de courbure R dépend du champ magnétique B ainsi que de la tension d'accélération V_a .
- Les mesures ont été faites en utilisant différents nombres de spires et différentes positions de la bobine (mesure au centre de la bobine ou à l'extérieur) et aussi pour 2 sens de courant.

Les résultats montrent :

- Une relation linéaire entre le champ magnétique mesuré ainsi que le courant.
- Une variation du rayon de courbure qui suit la position de la bobine ainsi que l'intensité du champ.
- Une cohérence des incertitudes, qui va confirmer la validité des mesures malgré les erreurs de mesure (notamment sur la tension anodique non mesurée directement et donc déterminée par la suite avec une grande imprécision).

5.8 Conclusion manipulation 2

L'étude de la déviation magnétique du faisceau a permis de mettre lumière l'effet du champ magnétique sur la trajectoire des électrons. Les résultats montrent une bonne cohérence avec les modèles théoriques, mais aussi l'importance des incertitudes dans l'interprétation.

- Pour le **champ magnétique B**, les incertitudes absolues se situent entre **6,7 μ T et 9,8 μ T**, soit des incertitudes relatives de **3 à 6 %**. Ces valeurs restent faibles, ce qui montre la fiabilité des mesures du champ.
- Pour le **rayon de courbure R**, les incertitudes absolues sont comprises entre **9,3 cm et 11,1 cm**, ce qui correspond à des incertitudes relatives plus élevées (**27 % à 51 %**). Cela montre que le calcul du rayon est beaucoup plus sensible aux variations de B. Il ne faut pas oublier non plus la mesure éronnée de V_a ce qui rend l'approximation de la tension anodique V_a plus grande.

- Les constantes physiques (m , q) étant parfaitement connues, leur contribution est négligeable. L'incertitude dominante provient donc des mesures de **courant** et de la **géométrie de la bobine**, ainsi que de l'absence de mesure directe de V_a .

Tableau récapitulatif

Mesure	B (μT)	ΔB (μT)	Relative $\Delta B/B$	R (cm)	ΔR (cm)	Relative $\Delta R/R$
1	153.9	9.81	6.4 %	34.3	9.3	27 %
2	164.2	6.68	4.1 %	32.4	9.7	30 %
3	245.6	7.88	3.2 %	21.8	11.1	51 %

En résumé, la manipulation illustre bien que :

- Le champ magnétique est mesuré avec une bonne précision quelques μT d'incertitude.
- Le rayon de courbure présente des incertitudes plus importante ce qui impact grandement la précision de l'analyse quantitative.
- La cohérence totale des résultats reste validé. Mais une mesure directe de la tension V_a serait nécessaire pour réduire grandement cette incertitude.

6. Manipulation 3 - Représentation oscilloscopique

6.1 Théorie

L'oscilloscope à rayons cathodiques nous permet d'observer l'évolution d'un signal électrique au fil du temps en le convertissant en un mouvement lumineux sur un écran fluorescent. Le signal d'entrée est premièrement amplifié puis transmis à un système de déviation qui agit sur le faisceau d'électrons émis par le canon électronique. Quand ce faisceau arrive à l'écran, il génère un point lumineux dont la position dépend principalement des tensions de déviation appliquées.

Il y a deux types de déviations :

1. **Déviation horizontale** : Les 2 plaques reçoivent une tension en dents de scie, qui augmente de manière linéaire avec le temps. Cela crée un champ électrique constant qui permet au faisceau de se déplacer de gauche à droite. Quand la tension diminue d'un coup, le faisceau revient très rapidement à gauche. Ce mouvement représente le déroulement du temps.
2. **Déviation verticale** : C'est une bobine qui est parcourue par le signal à analyser qui génère un champ magnétique variable, qui fait monter ou descendre le faisceau suivant la polarité du signal. Ce déplacement vertical correspond normalement à la valeur instantanée de la tension mesurée.

Si on combine les 2 déviations, cela nous permet de visualiser un signal en fonction du temps. Si les 2 déviations sont correctement synchronisées, l'image est stable. Dans le cas contraire, le signal peut donner l'impression de se déplacer de manière horizontale sur l'écran.

6.2 Résultats

Nous avons pris plusieurs photos à plusieurs fréquences, les voici :

Pour cette première mesure, nous avons pris une tension de $100 \text{ Hz} \pm 2 \text{ Hz}$.



Figure 20: Signal sinusoïdal : 100 Hz

Pour cette deuxième mesure, nous avons pris une tension de $1000 \text{ Hz} \pm 2 \text{ Hz}$.

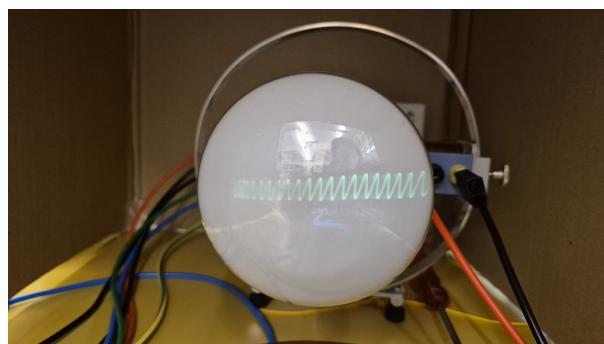


Figure 21: Signal sinusoïdal : 1 kHz

6.3 Analyse

Lorsque la fréquence de la tension en dents de scie et celle du générateur de fonctions sont synchronisées, l'scoilloscope affiche un signal stable. Ce signal résulte de l'action combinée de 2 tensions sur le faisceau d'électrons :

1. La tension en dents de scie crée un champ électrique entre les 2 plaques de déviations qui sont horizontales, ce qui déplace le faisceau de gauche à droite. Quand la tension chute, le champ s'inverse et le faisceau revient rapidement à gauche et ne bouge presque plus du tout. Ce mouvement représente le déroulement du temps.
2. En même temps, la tension sinusoïdale appliquée à une bobine génère un champ magnétique variable qui dévie le faisceau verticalement, en suivant la tension instantanée du signal.

La trajectoire du faisceau sur l'écran reflète donc bel et bien la variation du signal sinusoïdal pendant le temps.

Losque la fréquence du signal augmente progressivement (100 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 750 Hz) le nombre de périodes visibles sur l'écran augmente aussi (1, 3, 5, 7 ou même 8).

Ce que nous remarquons aussi, c'est que à 100 Hz et 500 Hz, l'image est **stable** car les fréquences sont bien synchronisées. Alors que à 250 Hz ou 750 Hz, l'image est instable et donne l'impression de se déplaçer horizontalement. Cette instabilité provient du manque de synchronisation entre le balayage horizontal et le signal d'entrée, surtout quand le rapport entre les 2 fréquences n'est pas un nombre entier.

6.4 Conclusion manipulation 3

L'oscillation à rayons cathodiques est un instrument indispensable pour visualiser l'évolution dans le temps d'un signal électrique. Il repose sur la déviation d'un faisceau d'électrons, qui est influencé par 2 tension distinctes :

1. Tension en dents de scie - Assure le balayage horizontal qui représente le déroulement du temps.
2. Tension du signal à mesurer (Souvent un sinus) - Provoque une déviation verticale qui traduit la valeur instantanée de la tension.

Quand les 2 tensions sont combinées, cela permet de tracer le signal en fonction du temps sur l'écran fluorescent.

Les observations expérimentales montrent que :

- Quand les fréquences du balayage horizontales et du signal sont synchronisées, alors l'image sur l'écran est stable.
- Si les 2 fréquences ne sont pas synchronisées alors le signal devient instables et semble se déplacer de la gauche vers la droite sur l'écran.
- Si la fréquence du signal augmente, cela entraîne une augmentation du nombre de périodes visible sur l'écran. C'est ce phénomène qui permet de faire une estimation de la fréquence relative entre 2 signaux.

Les images ci-dessus illustrent bien ce phénomène. Plus il y a de cycles affichés, plus la fréquence est élevée. Ainsi, l'analyse visuelle devient un outil rapide et efficace pour comparer les fréquences de signaux.

7. Manipulation 4 - Formes de lissajous

7.1 Introduction

Les formes de Lissajous tiennent leurs noms du physicien Jules Antoine Lissajous. Il a étudié les mouvements vibratoires et a découvert que lorsque deux mouvements sinusoïdaux sont combinés, ils peuvent créer des figures géométriques complexes. Ces figures sont obtenues en traçant la trajectoire en X et Y d'un point en fonction du temps, où chaque axe représente un mouvement sinusoïdal différent.

7.2 Équations des mouvements

Les mouvements en X et Y sont décrits par les équations suivantes :

- Mouvement en X : $x(t) = A_x \sin(\omega_x t + \phi_x)$
- Mouvement en Y : $y(t) = A_y \sin(\omega_y t + \phi_y)$

Toutes les figures de Lissajous sont caractérisées par le rapport des fréquences (et donc des pulsations) $\frac{\omega_x}{\omega_y}$ et le déphasage entre les deux mouvements $\Delta\phi = \phi_x - \phi_y$.

La figure la plus simple est obtenue lorsque les pulsations sont égales ($\omega_x = \omega_y$) et le déphasage est nul ($\Delta\phi = 0$), ce qui donne une ligne droite diagonale.

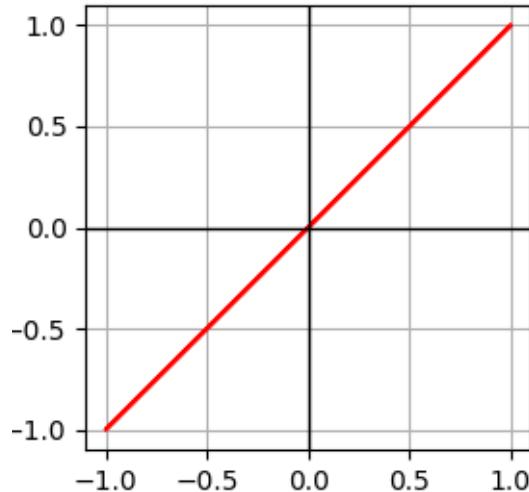


Figure 22: Figure de Lissajous diagonale

7.3 Exemples de figures de Lissajous

Variations des amplitudes Voici quelques exemples de variation d'amplitude avec une phase et fréquence identique :

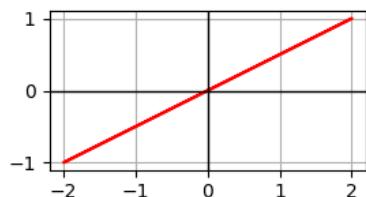


Figure 23: Amplitude de Y plus grande que celle de X

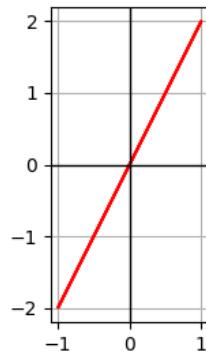


Figure 24: Amplitude de X plus grande que celle de Y

Variations du déphasage Voici quelques exemples de variation de déphasage avec des amplitudes et fréquences identiques :

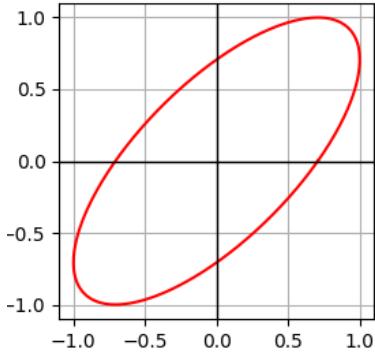


Figure 25: Déphasage de $\frac{\pi}{3}$

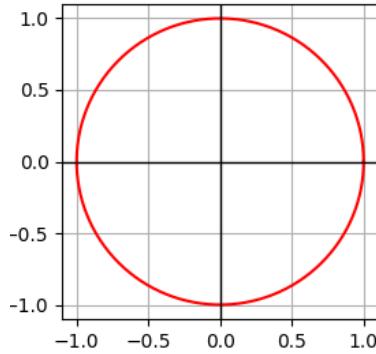


Figure 26: Déphasage de $\frac{\pi}{2}$

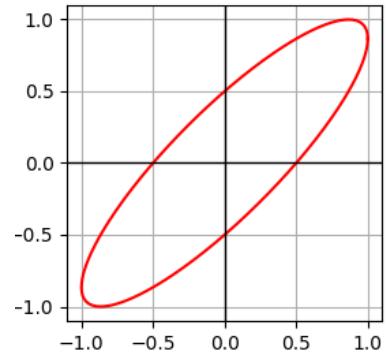


Figure 27: Déphasage de $\frac{\pi}{3}$ en x et $\frac{\pi}{2}$ en y

Variations du rapport des fréquences Pour trouver le rapport des fréquences, on peut compter le nombre de pics dans chaque direction. Le rapport des fréquences est alors donné par le ratio du nombre de pics en X sur le nombre de pics en Y.

Voici quelques exemples de variation du rapport des fréquences avec des amplitudes et déphasages identiques :

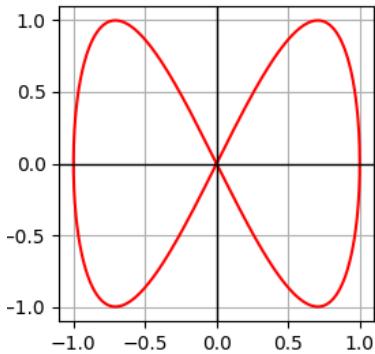


Figure 28: ratio 1:2

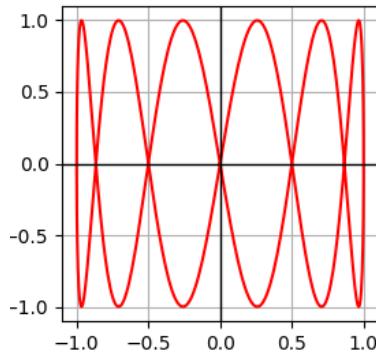


Figure 29: ratio 1:6

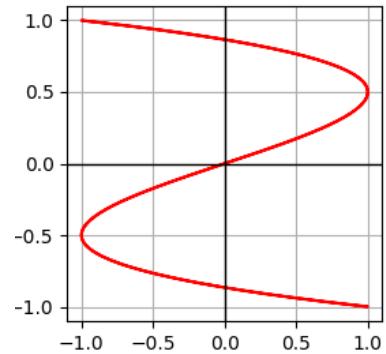


Figure 30: ratio 3:1

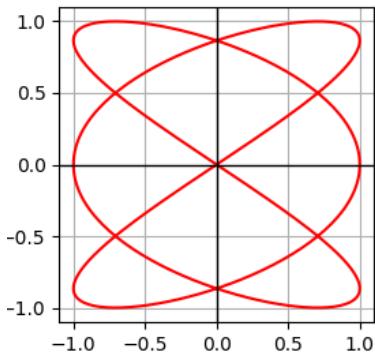


Figure 31: ratio 3:2

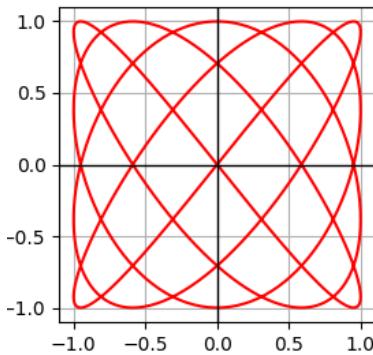


Figure 32: ratio 4:3

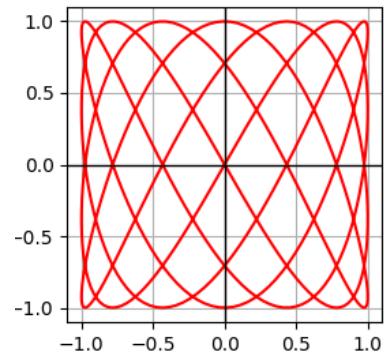


Figure 33: ratio 4:7

7.4 Parallèle avec le canon à électrons

Le canon à électrons utilise des champs électriques et magnétiques pour dévier le faisceau d'électrons (voir partie 2). En appliquant des tensions alternatives avec des générateurs de signaux aux bobines de déviation horizontales et verticales, on peut créer des mouvements sinusoïdaux similaires à ceux décrits par les équations des figures de Lissajous. Ainsi, en ajustant les fréquences et les phases des tensions appliquées, on peut obtenir des figures de Lissajous sur l'écran du tube cathodique, permettant d'analyser les signaux électriques de manière visuelle.

Voici des figures de Lissajous obtenues avec le canon à électrons :



Figure 34: ratio 3:4

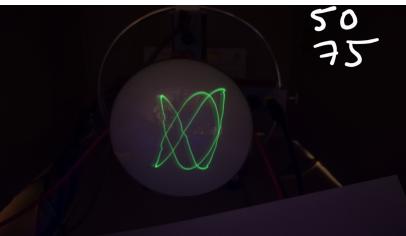


Figure 35: ratio 2:3

On remarque que les figures obtenues avec le canon à électrons sont similaires à celles générées mathématiquement, confirmant ainsi la relation entre les mouvements sinusoïdaux et les figures de Lissajous.

Avec le rapport de fréquence $\frac{200Hz}{150Hz} = \frac{4}{3}$, on obtient une figure de Lissajous correspondant au ratio 4:3, on voit bien les 4 pics en vertical et les 3 pics en horizontal. Avec le rapport de fréquence $\frac{200Hz}{100Hz} = \frac{2}{3}$, on obtient une figure de Lissajous correspondant au ratio 2:3, on voit bien les 3 pics en vertical et les 2 pics en horizontal.

Ces images confirment bien le lien entre les figures de Lissajous et la déviation des électrons par des champs électriques alternatifs ainsi que le rapport entre les fréquences des tensions appliquées et la forme obtenue.

7.5 Conclusion manipulation 4

Les figures de Lissajous offrent une représentation visuelle fascinante des interactions entre deux mouvements sinusoïdaux. En variant les amplitudes, les déphasages et les rapports de fréquences, on peut générer une multitude de formes géométriques complexes. Ces figures ne sont pas seulement esthétiques, elles ont également des applications pratiques en physique et en ingénierie, notamment dans l'analyse des signaux électriques à l'aide d'oscilloscopes et de canons à électrons. Comprendre les principes sous-jacents aux figures de Lissajous permet d'approfondir notre connaissance des phénomènes vibratoires et des interactions dynamiques dans divers systèmes physiques.

Plus précisément, cette partie de labo nous a permis de voir une application concrète de la déviation des électrons par des champs électriques alternatifs, et de comprendre comment les anciens oscilloscopes fonctionnaient pour analyser des signaux électriques.

8. Résumé

Ce laboratoire a exploré trois aspects fondamentaux de la physique des particules chargées et des signaux électriques.

Dans la première partie, nous avons étudié la déviation des électrons dans un canon à électrons soumis à un champ électrique. Nous avons confirmé que la trajectoire des électrons est influencée par la tension appliquée aux plaques de déviation, conformément à la formule $D = \frac{V_p l L}{2dV_a}$. Les résultats expérimentaux ont montré une relation linéaire entre la déviation verticale du faisceau et la tension appliquée, validant ainsi le modèle théorique.

Dans la deuxième partie, nous avons étudié la déviation magnétique d'un faisceau d'électrons dans un canon à électrons soumis à un champ magnétique généré par une bobine. Nous avons confirmé que le rayon de courbure du faisceau dépendait du champ magnétique et de la tension d'accélération des électrons, conformément à la formule $R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV_a}{q}}$. Les mesures ont montré une bonne cohérence avec les modèles théoriques, bien que des incertitudes significatives aient été notées, notamment en raison de l'approximation de la tension anodique.

Dans la troisième partie, nous avons exploré le fonctionnement d'un oscilloscope à rayons cathodiques. Nous avons observé comment un signal sinusoïdal pouvait être visualisé en fonction du temps grâce à la déviation horizontale (balayage en dents de scie) et verticale (signal sinusoïdal). Les observations ont montré que la stabilité de l'image dépendait de la synchronisation entre les fréquences du balayage et du signal, illustrant ainsi les principes fondamentaux de l'oscilloscopie.

Dans la quatrième partie, nous avons exploré les figures de Lissajous, qui illustrent les interactions entre deux mouvements sinusoïdaux. En variant les amplitudes, les déphasages et les rapports de fréquences, nous avons générée une variété de formes géométriques complexes. Ces figures ont été obtenues à l'aide du canon à électrons, démontrant ainsi l'application pratique des principes de déviation des électrons par des champs électriques alternatifs, ainsi que le fonctionnement des anciens oscilloscopes.

En résumé, ce laboratoire a permis de renforcer notre compréhension des interactions entre les particules chargées et les champs électriques et magnétiques, ainsi que des techniques de visualisation des signaux électriques à l'aide d'oscilloscopes et de figures de Lissajous. Les résultats expérimentaux ont globalement validé les modèles théoriques, tout en mettant en évidence l'importance de la précision dans les mesures et les calculs d'incertitudes.

Yverdon-les-Bains, le 12 décembre 2025

Aurore Delessert et Magali Tornare