



## Étude de la loi de Faraday

### Objectif

Etude expérimentale de la loi de Faraday de l'induction. La loi de Faraday de l'induction est abordée par l'observation de la force électromotrice induite dans un enroulement par l'oscillation d'un barreau aimanté. La dépendance dans le temps de la densité de flux magnétique résultant du mouvement de l'aimant et la dépendance dans le temps de la fem induite dans l'enroulement sont étudiées. L'étude de la dépendance, dans le temps, de la fem au changement du flux de champ magnétique pénétrant dans l'enroulement est utilisée pour vérifier la loi de Faraday.

### Contenus

- I. **Modèle théorique.**
- II. **Appareillage pour l'étude expérimentale.**
- III. **Acquisition des données.**
- IV. **Analyse des données (TI83)**
- V. **Analyse des données (MS Excel)**

### **Le modèle théorique**

La loi de Faraday énonce que la force électromotrice induite dans un circuit fermé baigné par un champ magnétique est directement proportionnelle à la variation dans le temps du flux du champ magnétique pénétrant dans le circuit.

Le fem induite dans le circuit est la dérivée négative par rapport au temps du flux du champ magnétique à travers les circuits (Eq. 1).

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1)$$

Le signe négatif détermine le sens du courant induit dans le circuit. Il est régi par la loi de Lenz qui énonce que le sens du courant induit est tel qu'il s'oppose par ses effets magnétiques à la cause qui a produit le courant.

Le changement du flux du champ magnétique peut résulter du changement de l'un des paramètres (Eq.2).

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \angle(\vec{B}, \vec{S}) \quad (2)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt} (B \cdot S \cdot \cos \angle(\vec{B}, \vec{S})) \quad (3)$$

Ainsi, la fem peut être induite dans différents cas. Les exemples typiques sont : variation du champ magnétique et mouvement relatif de la source de champ magnétique et du circuit. L'effet d'induction résultant du mouvement de rotation des spires dans le champ magnétique est le principe de fonctionnement des générateurs électromagnétiques.

### Champ magnétique de la barre aimantée.

La distribution spatiale du champ magnétique produit par la barre aimantée est semblable à celle d'un enroulement parcouru par un courant - Comparer les figures 1 et 2 . En particulier, la densité de flux magnétique de la barre aimantée peut être assimilée à un champ produit par un dipôle magnétique caractérisé par un moment dipolaire magnétique<sup>#</sup>. La densité de flux magnétique (induction magnétique) le long de l'axe de l'aimant à la distance  $y$  dans le vide est donnée par:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi y^3} \vec{\mu} = C \frac{1}{y^3} \quad (4)$$

L'induction magnétique sur l'axe de l'enroulement formé de  $N$  spires circulaires de rayon  $r$  parcouru par un courant  $i$  est donnée par une équation similaire :

$$B_y = \frac{\mu_0 N i r^2}{2(y^2 + r^2)^{3/2}} \quad (5)$$

On définit un moment magnétique dipolaire de l'enroulement comme :

$$|\vec{\mu}| = N i \pi r^2 \quad (6)$$

Pour les points loin du centre de l'enroulement où  $y \gg r$ , l'expression pour l'induction magnétique devient :

$$\vec{B}_y = \frac{\mu_0 \vec{\mu}}{2\pi y^3} \quad (7)$$

qui est identique à celle de la barre aimantée

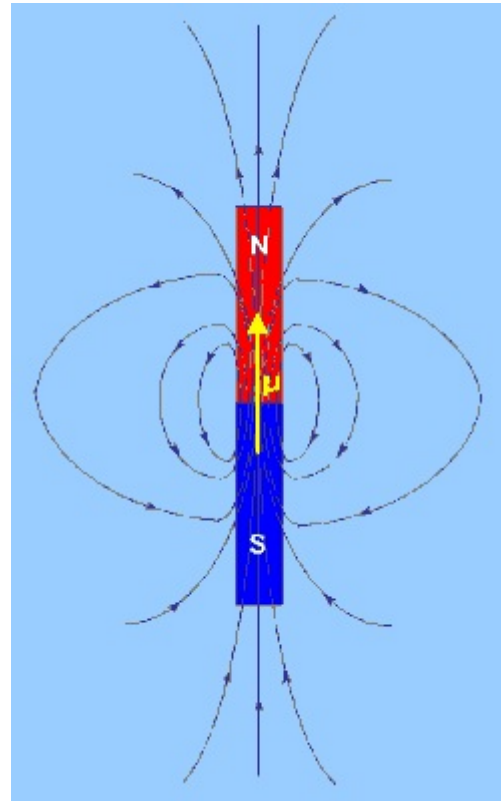


Fig. 1.

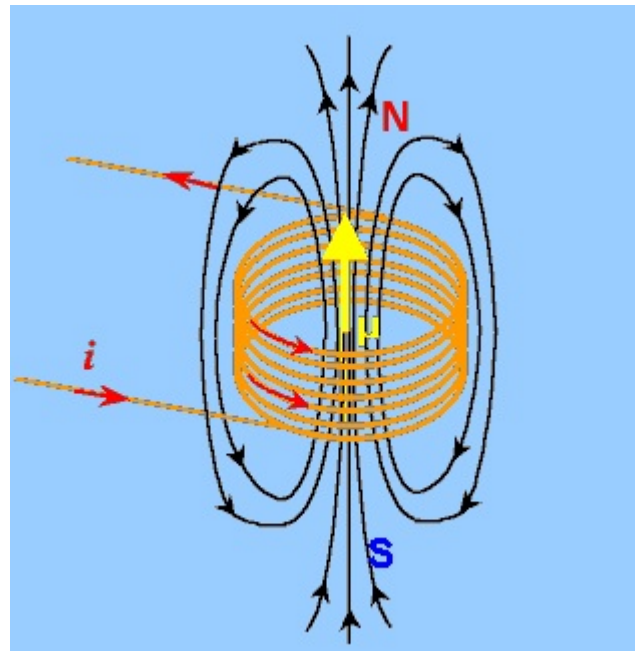


Fig. 2.

(Eq. 4).

### Champ magnétique dû aux oscillations de la barre aimantée

Le champ magnétique d'induction en un certain point de l'espace, dû à la barre aimantée en mouvement, varie dans le temps en fonction de la distance du point concerné au centre de l'aimant.

La figure 3 montre la situation expérimentale étudiée.

Avec :

$D$  - est la distance de l'enroulement à la position d'équilibre de l'aimant,

$A$  -est l'amplitude des oscillations de l'aimant,

$\omega$  - est la pulsation des oscillations,

$\varphi$  - est la phase initiale des oscillations,

$y$  - la distance de l'enroulement à la position initiale de l'aimant est donnée par :

$$y = D + A \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

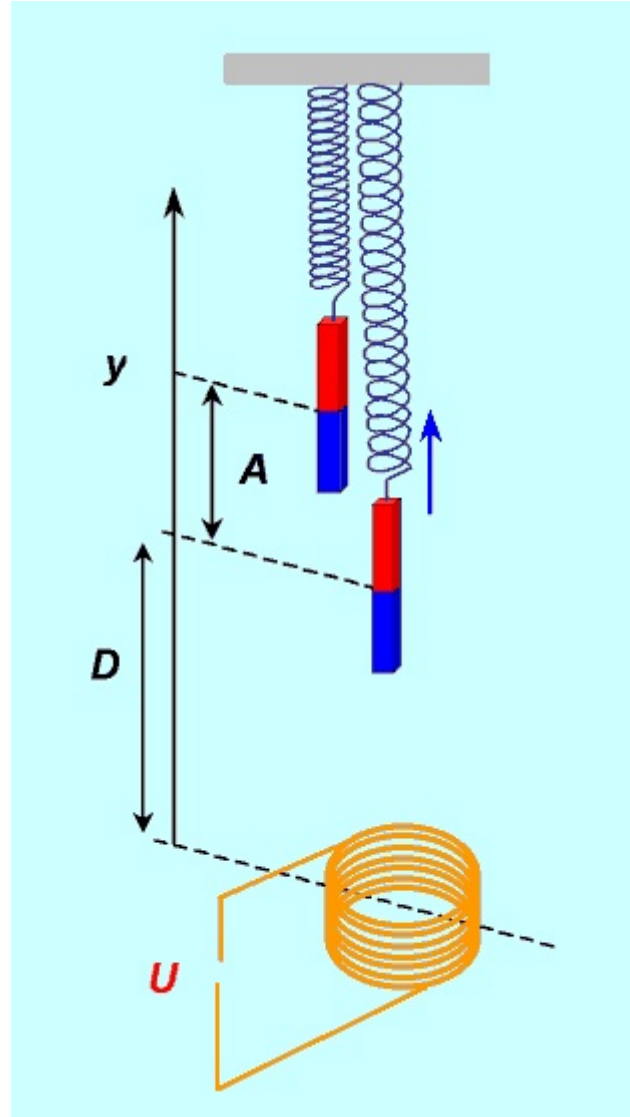


Fig. 3.

Le champ magnétique au centre de l'enroulement est donné par (comparer à Eq. 4):

$$B_y(t) = C \frac{1}{(D + A \sin(\omega t + \varphi))^3} \quad (9)$$

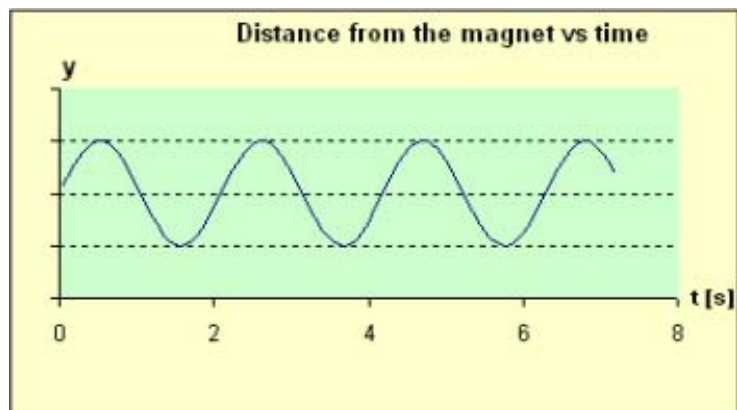


Fig. 4.

La figure 5 montre la relation de l'induction en fonction du temps.

La dérivée en fonction du temps du champ magnétique d'induction résultant des oscillations de l'aimant peut-être obtenu analytiquement à partir de Eq. 9, dB/dT s'écrit:

$$\frac{dB}{dt} = C \frac{-3Aw \cos(\omega t + \varphi)}{(D + A \sin(\omega t + \varphi))^4} \quad (10)$$

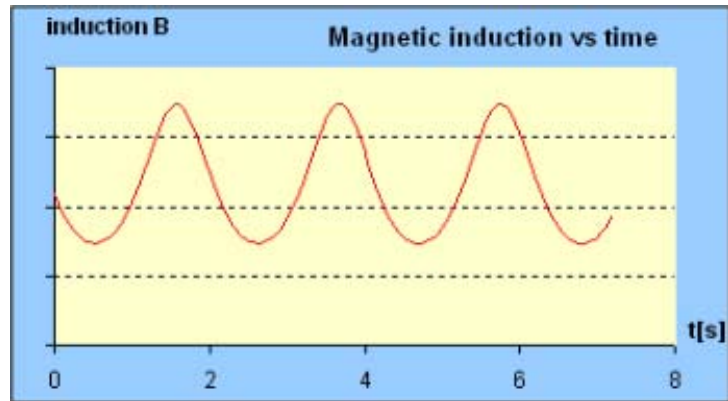


Fig. 5.

La figure 6 montre la relation de dB/dt en fonction du temps.

En supposant que l'orientation et les paramètres géométriques ne changent pas dans le temps le flux du champ magnétique à travers l'enroulement est donné par l'équation :

$$\Phi = NS \cdot C \frac{1}{(D + A \sin(\omega t + \varphi))^3} \quad (11)$$

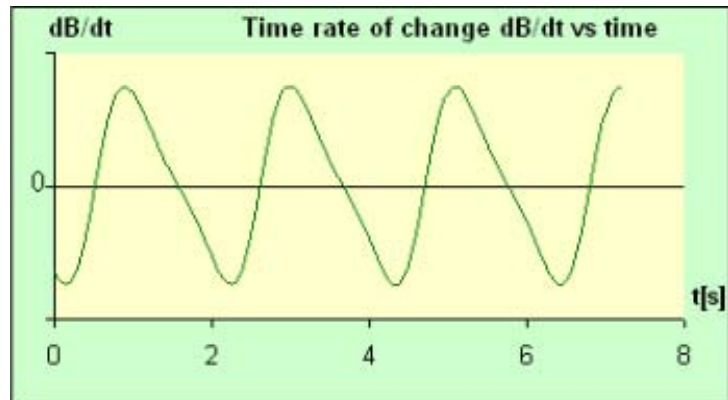


Fig. 6.

Où:

$N$  - est le nombre de spires;

$S$  - est l'aire d'une spire.

**Note:**

L'équation 11 est basée sur l'hypothèse simplificatrice suivant : le champ magnétique est le même pour toutes les spires.

Ainsi la dérivée du flux du champ magnétique à travers l'enroulement est donnée par :

$$\frac{d\Phi}{dt} = NS \cdot C \frac{-3Aw \cos(\omega t + \varphi)}{(D + A \sin(\omega t + \varphi))^4} \quad (12)$$

Le graphe de  $\frac{d\Phi}{dt}$  en fonction du temps est similaire à celui présenté par la figure 6.

**Appareillage pour l'étude de la loi de**

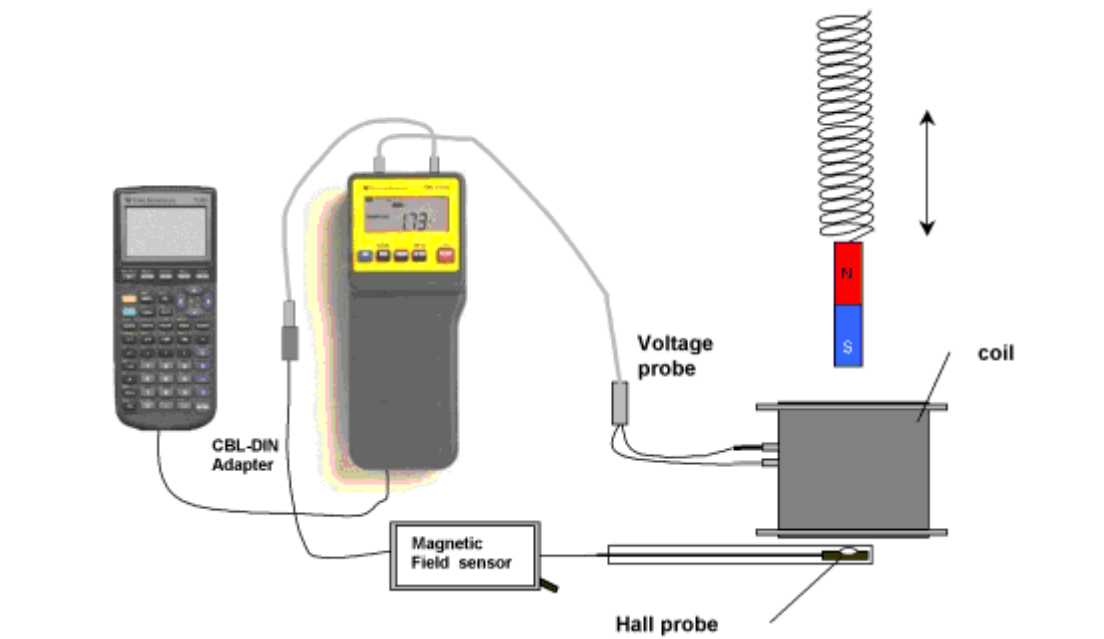
## Appareillage pour l'étude de la loi de Faraday

L'étude du phénomène d'induction magnétique peut être réalisé en utilisant:

- Une bobine de 6500 spires ( $d = 0.2\text{mm}$ ), section  $20\text{ cm}^2$ , diamètre 5 cm.
- Un barreau aimanté (10 cm de long)
- Un ressort (30 cm de long à l'équilibre) faisant avec l'aimant un oscillateur de période 1-3 sec.
- Un emplacement de manipulation (approx. 1 m de haut).
- Un calculator Based Laboratory unit CBL or CBL2
- Un capteur de champ magnétique pour CBL<sup>TM</sup> ([Vernier MG-DIN or MG-BTA](#))
- [CBL - DIN Adapter \(for MG-DIN only\)](#) –
- Un capteur de tension (standard CBL)
- Calculatrice TI83, [TI83 Plus](#), TI 83 Plus SE, TI89, TI92, TI92 Plus, TI Voyage 200
- Un câble (standard)
- Le programme Physics (pour la calculatrice correspondante):

<ftp://ftp.ti.com/pub/graph-ti/cbl/programs/83/>  
<ftp://ftp.ti.com/pub/graph-ti/cbl/programs/83plus/>  
<ftp://ftp.ti.com/pub/graph-ti/cbl/programs/89/>  
<ftp://ftp.ti.com/pub/graph-ti/cbl/programs/92/>  
<ftp://ftp.ti.com/pub/graph-ti/cbl/programs/92plus/>

- [TI-GRAPH LINK](#)<sup>TM</sup> (optionnel) câble et le logiciel Un micro-ordinateur avec le logiciel TI Connect<sup>TM</sup> (optionnel) - description:  
<http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/features/software.html> et ensuite:  
<http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/down/download.html>



### Notes pratiques sur l'appareillage installé

- L'aimant accroché au ressort oscille librement de haut en bas le long de l'axe qui coïncide avec l'axe de la bobine. Le sud magnétique de l'aimant doit être placé face à la bobine. La distance minimale du haut de la bobine à l'aimant ne doit pas être, pendant le mouvement, inférieure à 3 cm. Les paramètres de l'oscillation doivent être approximativement : amplitude 10 - 15 cm, période 1-3 sec.
- La sonde magnétique bien fixée (par exemple avec une bande) au-dessous du centre de la spire avec ses marques blanches vers le haut (vers le sud magnétique de l'aimant).
- Le switch sur la boîte de la sonde magnétique doit être mis en mode "Low".
- La sonde magnétique doit être connectée via l'adaptateur CBL-DIN à la voie CH1 du CBL.
- La sonde de tension doit être connectée à la voie CH2 ce CBL.

### Acquisition de données (TI 83, programme Physics)

Dans l'expérience le champ magnétique d'induction produit par un barreau aimanté est enregistré ainsi que la tension induite dû à la variation de flux dans la bobine. L'induction magnétique et la tension sont enregistrées simultanément en fonction du temps.

L'expérience est contrôlée par la calculatrice au moyen du programma Physics préalablement chargé.

La procédure expérimentale se divise en une préparation de l'expérience et l'acquisition des données.

### Préparation:

Le programme Physics doit être lancé en choisissant son nom dans le menu programme [PRGM] de la (TI83) ou dans le menu des applications [APPS]

Dans le menu principal choisir **1: SET UP PROBES** (Fig.1.) puis le nombre de capteurs et les capteurs choisis **2:TWO** (Fig. 2). **2: MAGNETIC FIELD** capteur magnétique (Fig. 3) et ensuite **3: VOLTAGE** capteur de tension.

Les mesures principales doivent être précédées par la calibration des capteurs.

Dans l'expérience présentée on effectue seulement des mesures qualitatives, les calibrations standard peuvent être utilisées. Choisir alors **1: USE STORED** (Fig. 4.) et **4: LOW (MTESLA)** (Fig.5). Les deux capteurs sont réglés à zéro en l'absence du barreau aimanté. Cela évite l'effet du champ magnétique terrestre sur les mesures. Pour cela éloigner le barreau aimanté de la bobine et des capteurs et choisir l'option **5: ZERO PROBES** (Fig. 6.) et alors sélectionner **5: ALL CHANNELS** (Fig.7). Quand les valeurs affichées par le CBL deviennent constantes appuyer sur **TRIGGER** au dessous de l'écran du CBL.

Le calibrage doit être fait au moins une fois pendant l'expérience.

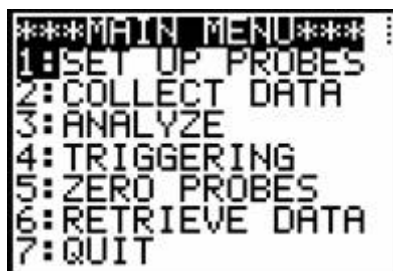


Fig. 1.

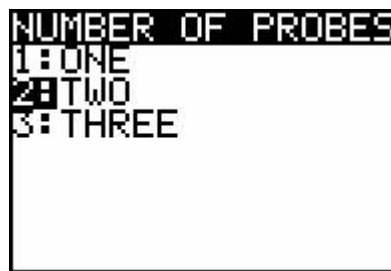


Fig. 2.

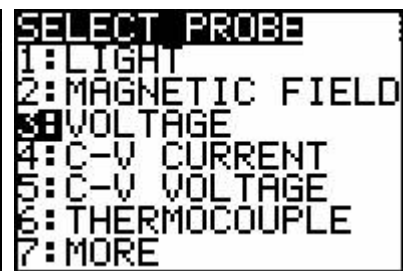


Fig. 3.



```

**CALIBRATION**
1:USE STORED
2:PERFORM NEW
3:MANUAL ENTRY

```

Fig. 4.

```

MG FIELD SETTING
1:HIGH(GAUSS)
2:HIGH(MTESLA)
3:LOW(GAUSS)
4:LOW(MTESLA)

```

Fig. 5.

```

***MAIN MENU***
1:SET UP PROBES
2:COLLECT DATA
3:ANALYZE
4:TRIGGERING
5:ZERO PROBES
6:RETRIEVE DATA
7:QUIT

```

Fig. 6.

### Session d'installation des paramètres de collecte des données

Dans le programme principal choisir l'option **2:COLLECT DATA** (Fig. 8) et **2:TIME GRAPH** (Fig. 9) afin d'enregistrer les canaux simultanément. Entrez la durée d'échantillonnage (0.04 sec) et le nombre d'échantillons (50) (Fig. 9).

Avant de déclencher la collecte des données (Fig. 10) Vous devez vérifier le positionnement du montage et faire osciller le barreau (de bas et haut).

```

SELECT CHANNEL
1:CHANNEL 1
2:CHANNEL 2
3:CHANNEL 3
4:MOTION
5:ALL CHANNELS
6:RETURN TO MAIN

```

Fig. 7.

```

DATA COLLECTION
1:MONITOR INPUT
2:TIME GRAPH
3:TRIGGER/PROMPT
4:TRIGGER
5:RETURN TO MAIN

```

Fig. 8.

```

ENTER TIME
BETWEEN SAMPLES
IN SECONDS:.04

ENTER NUMBER
OF SAMPLES:50

```

Fig. 9.

Les mesures sont exécutées automatiquement et les graphes correspondants s'affichent sur l'écran de la calculatrice (Fig. 11).

Le temps est stocké dans la liste  $L_1$ , l'induction magnétique dans la liste  $L_2$  et la tension induite dans l'enroulement dans la liste  $L_3$ .

```

READY EQUIPMENT.
PRESS [ENTER] TO
BEGIN COLLECTING
DATA.

```

Fig. 10.

```

TIME IN L1
CHANNEL 1 IN L2
CHANNEL 2 IN L3

[ENTER]

```

Fig. 11.

```

SELECT GRAPH
1:CHANNEL 1
2:CHANNEL 2
3:NEXT

```

Fig. 12.



Vous pouvez afficher le graphe de l'induction magnétique en fonction du temps en choisissant dans le menu (Fig. 12)

**1: CHANNEL 1** - (Fig. 13) ou le graphe de la tension (fem induite) en fonction du temps en choisissant **2: CHANNEL 2** (Fig. 14).

Si vous n'êtes pas satisfait des données obtenues vous pouvez facilement répéter l'expérience en utilisant le même paramétrage (Fig. 15).

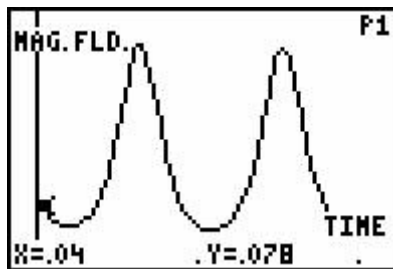


Fig.13

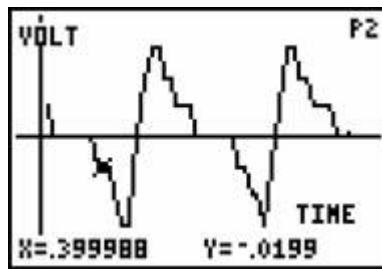


Fig.14



Fig.15

## Analyse des données (TI 83)

Davantage d'analyses sur les données de la loi de Faraday de l'induction peuvent être réalisées en utilisant les outils existant dans la calculatrice (ou dans d'autres logiciels d'analyse tel que MS Excel)

Les données sont stockées dans les liste de la calculatrice:

- temps en secondes - Liste **L<sub>1</sub>**
- induction magnétique en teslas - Liste **L<sub>2</sub>**
- tension (fem induite) en volts - Liste **L<sub>3</sub>**

## Analyse des graphes

Le flux du champ magnétique pénétrant dans l'enroulement est proportionnel à l'induction magnétique mesurée. Comme la source de champ est en mouvement le flux dans l'enroulement varie avec le temps.

En raison du mouvement de la barre aimantée la force électromotrice induite est mesurée comme une tension aux bornes de l'enroulement. La dépendance mutuelle de l'induction magnétique et de la tension induite peut être mis en évidence en analysant les graphes.

## Champ magnétique d'induction (et flux du champ magnétique) et fem induite en fonction du temps.

Définir Plot1 comme  $L_2$  fonction de  $L_1$  ce qui permettra d'avoir le graphe  $B(t)$ , définir Plot2 comme  $L_3$  fonction  $L_1$  on aura le graphe  $fem(t)$  (Fig.1.). En ajustant la fenêtre on pourra explorer simultanément les deux graphes (Fig.2.).

L'induction magnétique visualisée dans le graphe 1 montre la correspondance avec les mouvements du barreau magnétique. La tension représentée dans le graphe 2 montre les variations correspondantes avec un changement de "phase". Les changements de pente de la courbe  $B(t)$  se retrouvent dans la forme du graphe  $fem(t)$ . Les changements de signe observés correspondent aux changements de champ magnétique et peuvent être interprétés à partir de la loi de Lenz.

La comparaison avec le modèle théorique montre que les données expérimentales s'identifient bien avec le modèle.

Seule une analyse détaillée du sens des enroulements et des polarités des sondes de tension permettent de valider la loi de Lenz.



Fig.1.

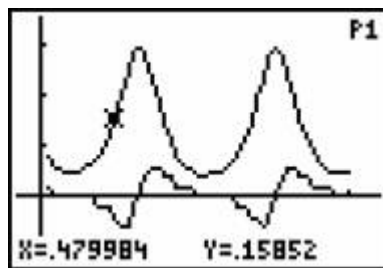


Fig.2.

## Vérification de la loi de Faraday

Les données collectées concernant la loi de Faraday sur l'induction permettent la vérification de la proportionnalité avec les changements en fonction du temps du flux de champ magnétique.

L'analyse exige de comparer la tension induite à la dérivée par rapport au temps du champ magnétique enregistrée par la sonde.

Le procédé proposé de dérivation numérique est tiré de G. Adie [in 'Using the TI89 in Physics' Bk Techware, 2000]. Il est basé sur le calcul des quotients de différence des données du champ magnétique originel. Les étapes du calcul sont :

1. définir une nouvelle liste  $L_5$  avec les différences des quotients résultant des valeurs de la liste  $L_2$  calculées pour des intervalles de temps ( 0.04 sec) et
2. définir de nouvelles listes  $L_4$  et  $L_6$  avec les données respectivement du temps et de la tension, réduites à la taille de la première liste (cette étape suit la réduction précédente de la taille de la liste  $L_5$  imposée par l'opération de l'étape 1).

Deux fonctions spéciales **List()** and **cumSum()** utilisé dans le procédé décrit sont appelées dans le menu **STAT OPS** – Fig. 3. La syntaxe de commande est décrite dans la Fig.4 .

En résumé trois nouvelles listes sont définies. Elles contiennent:

- le temps modifié - liste  $L_4$ ,
- la dérivée par rapport au temps de l'induction magnétique - liste  $L_5$
- la fem induite modifie (tension) - liste  $L_6$

Étude de la loi de Faraday pour un nouveau graphe (Plot3) montrant la fem induite en fonction de la dérivée par rapport au temps de l'induction magnétique ( $L_5$  en fonction de  $L_6$ ) Fig. 5.

```
NAMES OPS MATH
1:SortA(
2:SortD(
3:dim(
4:Fill(
5:seq(
6:cumSum(
7:ΔList(
```

Fig.3.

```
ΔList(L2)/.04→L5
(-.38065 -.1790...
L1(1)+cumSum(ΔLi
st(L1))→L4
(.0799936 .1199...
L3(1)+cumSum(ΔLi
st(L3))→L6
```

Fig.4.

```
STAT PLOTS
1:Plot1...Off
  ↗ L1 L2 .
2:Plot2...Off
  ↗ L1 L3 .
3:Plot3...On
  ↗ L5 L6 +
4:PlotsOff
```

Fig.5.

Du graphe obtenu (Fig. 6.) on peut formuler l'hypothèse de la dépendance quasi linéaire entre les grandeurs. Cette linéarité à l'aide de la régression linéaire **LinReg(ax+b)** pour les listes  $L_5$  et  $L_6$  (dans le menu **STAT CALC** – Fig. 7 et Fig. 8).

La dérivée linéaire numérique (Fig. 9) peut maintenant être comparée avec les données expérimentales Fig. 10.

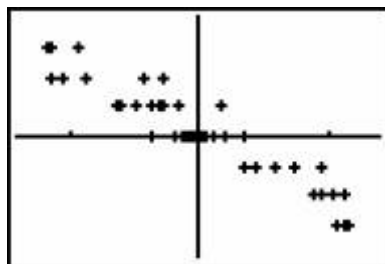


Fig. 6

```
EDIT CALC TESTS
1:1-Var Stats
2:2-Var Stats
3:Med-Med
4:LinReg(ax+b)
5:QuadReg
6:CubicReg
7:QuartReg
```

Fig. 7

```
LinReg(ax+b) L5,
L6,Y1
```

Fig. 8

La pente de la courbe représente les paramètres de l'enroulement et peut être comparée avec le modèle théorique.

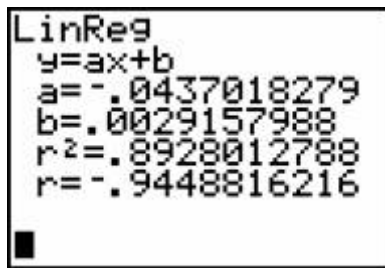


Fig. 9

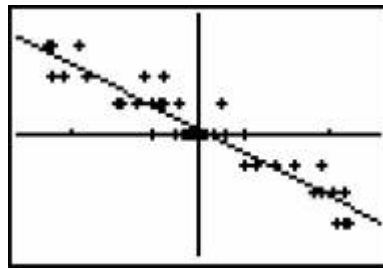


Fig. 10

### Conclusion:

Le caractère linéaire de la dépendance observée  $U(dB/dt)$  confirme les prévisions du modèle théorique et confirme la validité de la loi de Faraday sur l'induction.

### Complément:

On peut obtenir séparément la dépendance du temps et de la tension (listes  $L_4$ ,  $L_6$ ) et la dépendance de la dérivée  $dB/dt$  (listes  $L_4$ ,  $L_5$ ). La comparaison montre la coïncidence des deux fonctions.

La pente calculée peut être positive quand la polarité des raccordements des fils est inversée. Alors la même analyse peut être réalisée, exceptée la discussion sur la loi de Lenz.

### **Analyse des données (avec le logiciel EXCEL Microsoft)**

Une analyse plus approfondie peut être réalisée sur la loi de Faraday sur l'induction en utilisant les outils implantés dans la calculatrice et les fonctions offertes par le logiciel Excel.

### **Transfert des données expérimentales vers le micro-ordinateur**

L'expérience terminée les données expérimentales peuvent être transférées de la calculatrice vers le micro-ordinateur.

Le câble TI GRAPH LINK<sup>TM</sup> géré par le logiciel TI Connect<sup>TM</sup> offre des outils permettant d'explorer les contenus de la calculatrice (TI DEVICE EXPLORER) et d'éditer les données (TI DATA EDITOR).

Les données collectées dans l'expérience sont stockées dans les listes de la calculatrice :

- temps en secondes - Liste  $L_1$
- induction magnétique en mtesla - Liste  $L_2$
- tension (fem induite) en volts - Liste  $L_3$

Dans le programme TI Connect<sup>TM</sup> - le TI DEVICE EXPLORER permet de sauver les listes de la calculatrice sur le disque dur du micro-ordinateur puis de les ouvrir avec le TI DATA EDITOR. L'option **Special Lists Export** permet de sauver la liste choisie comme un dossier Excel avec comme séparateur une virgule (fichier\*.CSV ). Un tel fichier peut être ouvert et étudié avec le logiciel MS Excel<sup>TM</sup> .

## Analyses des graphes

Le flux du champ magnétique pénétrant dans la bobine est proportionnel à l'induction magnétique mesurée. Comme la source de champ est en mouvement le flux du champ change en fonction du temps.

En raison du mouvement de l'aimant a force électromotrice induite est mesurée par une tension dans la bobine. La dépendance avec le temps ainsi que la dépendance mutuelle de l'induction magnétique et de la tension induite peuvent être étudiées à l'aide des graphes.

Champ magnétique d'induction (et flux du champ magnétique) et fem induite en fonction du temps.

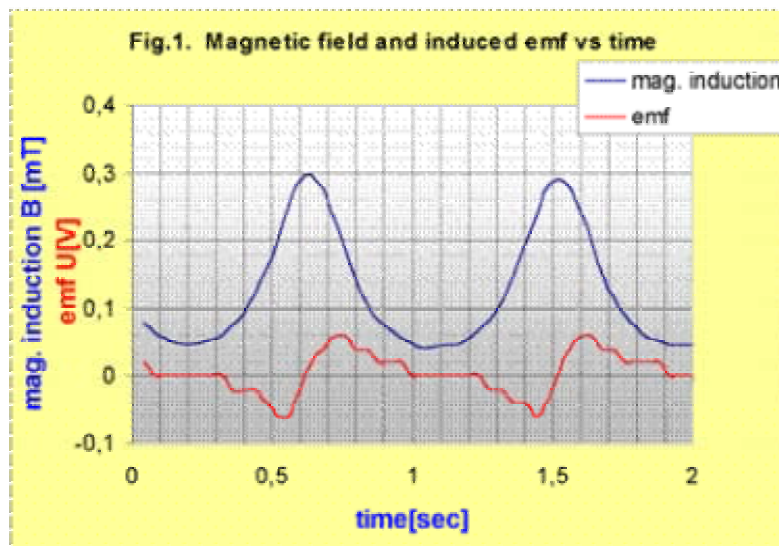


Fig. 1 graphes  $B(t)$  et  $fem(t)$ .

L'induction magnétique en fonction du temps montre que le graphe est harmonique avec le mouvement de l'aimant. Le graphe de la fem révèle un modèle similaire avec un déphasage.

Le changement de pente de la courbe  $B(t)$  se retrouve dans la forme de la courbe  $fem(t)$ . Les changements de signes observés correspondent aux changements du champ magnétique et peuvent s'expliquer en utilisant la loi de Lenz.

La comparaison avec le modèle théorique [1](#) montre que les données expérimentales s'adaptent bien à ce modèle.

## Vérification de la loi de Faraday

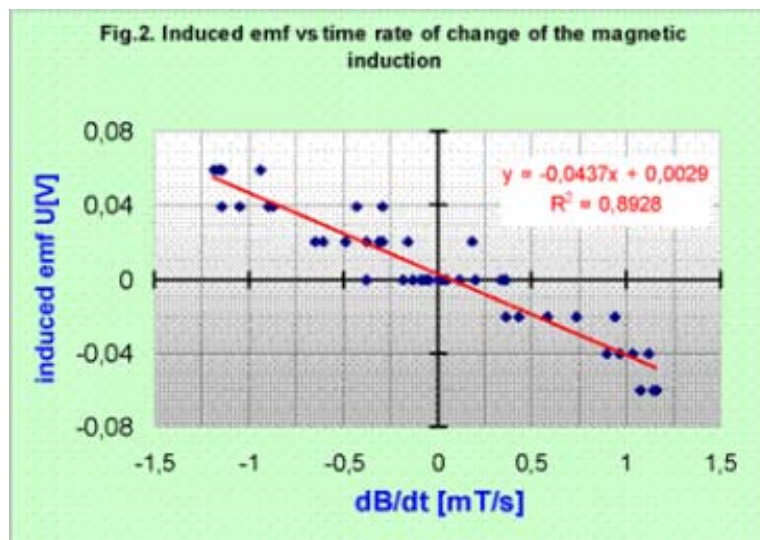
Les données collectées concernant la loi de Faraday sur l'induction vérifient la proportionnalité du taux variation des changements du flux de champ magnétique en fonction du temps.

L'analyse nécessite la comparaison de la tension induite avec la dérivée en fonction du temps du champ magnétique enregistré par la sonde magnétique.

La procédure proposée de la dérivée numérique est basée sur le calcul des différences de quotients des données du champ magnétique.

En conséquence trois listes modifiées sont définies. Elles contiennent :

- temps modifiés - colonne time1 –
- Dérivée en fonction du temps de l'induction magnétique - colonne dB/dt -
- fem induites modifiées (tension) - fem1 -



L'étude de la loi de Faraday nécessite un nouveau graphe montrant le fem induite en fonction de la dérivée du champ magnétique d'induction Fig. 2.

A partir du graphe obtenu on peut formuler l'hypothèse d'une dépendance quasi linéaire entre les quantités concernées. Cette linéarité peut être examinée à l'aide d'une régression linéaire associée au graphe.

La pente de la courbe représente les paramètres de l'enroulement et peut être comparée avec le modèle théorique.

### Conclusion:

Le caractère linéaire de la dépendance  $U(dB/dt)$  confirme les prévisions du modèle théorique et confirme la validité de la loi de Faraday sur l'induction.

### Complément

On peut obtenir séparément la dépendance de la tension en fonction du temps et la dépendance de la dérivée  $dB/dt$  en fonction du temps. La comparaison montrera la coïncidence de ces deux fonctions.

### **Note:**

La pente calculée de la dépendance linéaire peut être positive quand la polarité des raccordements des fils de sonde est inversée. Alors, la même analyse peut être réalisée à l'exception de la discussion sur la loi de Lenz.