Titre : Induction électromagnétique

Présentée par : Martin Bouillard **Rapport écrit par** : Rémi Metzdorff

Correcteur : Jérémy Neveu **Date** : 13/12/2019

Bibliographie de la leçon :			
Titre	**Auteurs**	**Éditeur**	**Année**
Electromagnétisme, Fondements et applications	Pérez	Dunod	
Tout en un Physique, PC-PC*	Sanz	Dunod	
Cours d'électromagnétisme	J. Neveu		
Electromagnétisme	Bertin, Faroux, Renault		

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : L3

Pré-requis :
- Electrocinétique ;
- Magnétostatique ;
- Forces de Laplace ;
- Equations de Maxwell ;
- Potentiels scalaires vecteurs ;

Les encadrés bleus sont les expériences, verts les slides, oranges les transitions et rouges les remarques

1.1 Introduction

Qu'est ce que l'induction ?

En approchant un aimant d'une bobine, on constate l'apparition d'un courant. C'est l'induction : à partir d'un champ $\overrightarrow{B}$ on peut créer un courant dans un conducteur.

Expérience historique de Faraday (1831) dans laquelle il observe le courant dans une bobine créé par une autre bobine alimentée par une pile. Il pensait que le courant été créé par un champ magnétique, mais c'est en allumant la bobine qu'on observe effectivement un courant : il faut une variation du champ $\overrightarrow{B}$.

On observe l'apparition de courant quand l'aimant se déplace dans la bobine. En revanche, il n'y a pas de courant quand $\overrightarrow{B}$ est statique.

On va essayer de quantifier cet effet.

Induction mise en évidence par faraday au XIX siècle. Experience : oscilloscope branché sur la bobine, aimant permanent. On bouge aimant devant la bobine ce qui change la tension observée.

Slide 1 : bobine alimenté par pile (haut droite) tension mesurée par un galvanomètre de une AUTRE bobine.

Variation de flux de champ magnetique.

Montrer slide applications, moteurs, micros, transformateur.

1.2 Les lois de l'induction

1.2.1 La loi de Faraday 2'30

Dans le cadre de l'ARQS, on s'intéresse à un contour fermé $ABCD$ placé dans un champ magnétique $\overrightarrow{B}$ et on donne une vitesse $\overrightarrow{v}$ au circuit. On calcule la force de Lorentz qui s'applique aux porteurs de charge du circuit

$$\overrightarrow{F} = q(\overrightarrow{E} + \overrightarrow{v} \wedge \overrightarrow{B}). \tag{1}$$

La démonstration est faite dans [?]. On en déduit la force électromotrice qui correspond au travail de la force de Lorentz divisé par q. On utilise les potentiels scalaire et vecteur pour réécrire E. Le terme en $\overrightarrow{\mathrm{grad}}V$ est nul car le contour fermé. Avec le théorème de Stokes-Ampère, on transforme l'intégrale sur $\mathrm{d}\overrightarrow{A}/\mathrm{d}t$... En intégrant sur tout le circuit, on obtient finalement

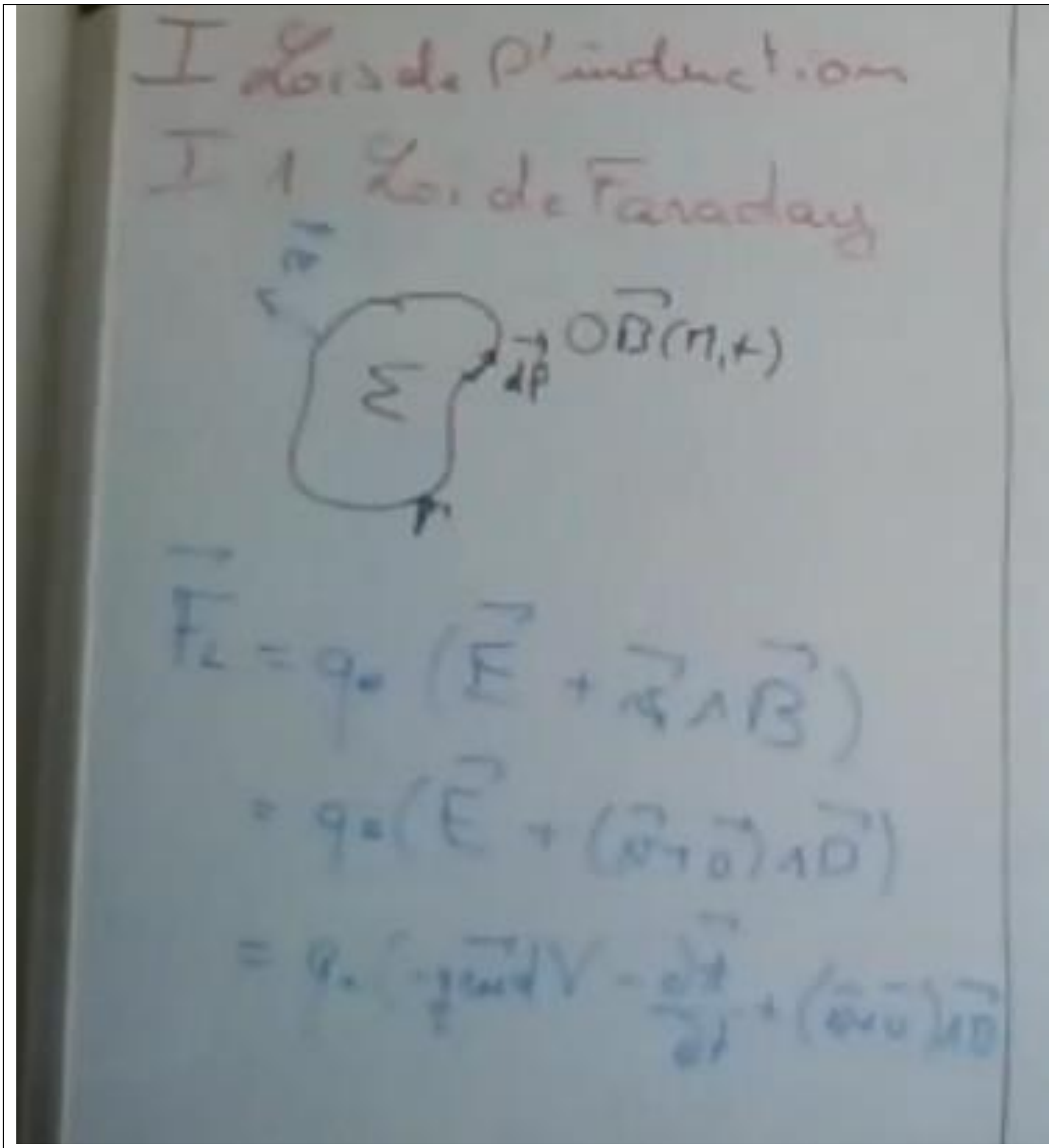
$$e = -\iint \frac{\partial \overrightarrow{B}}{\partial t}\mathrm{d}\overrightarrow{S} + \int (\overrightarrow{v} \wedge \overrightarrow{B})\overrightarrow{\mathrm{d}l} \tag{2}$$

Cette expression fait apparaitre les deux termes de l'induction :

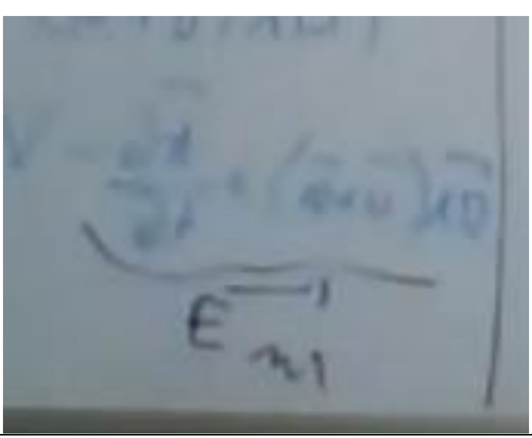
On s'interese à un conducteur filiforme dans un champ magnetique, on l'oriente (TRES IMPORTANT TOUT LE LONG DE LA LEÇON). Le sens de parcours du courant oriente aussi la surface. Ce conducteur est animé d'une vitesse vfil.

Ce qui mettre en mouvement les éléctrons c'est la force de Lorentz. Or la vitesse v de l'expression de la force de Lorentz est la composition de la vitesse des éléctrons dans le circuit et la vitesse du circuit !

On exprime le cmap E en fonction des potentiels gradient et vecteur.

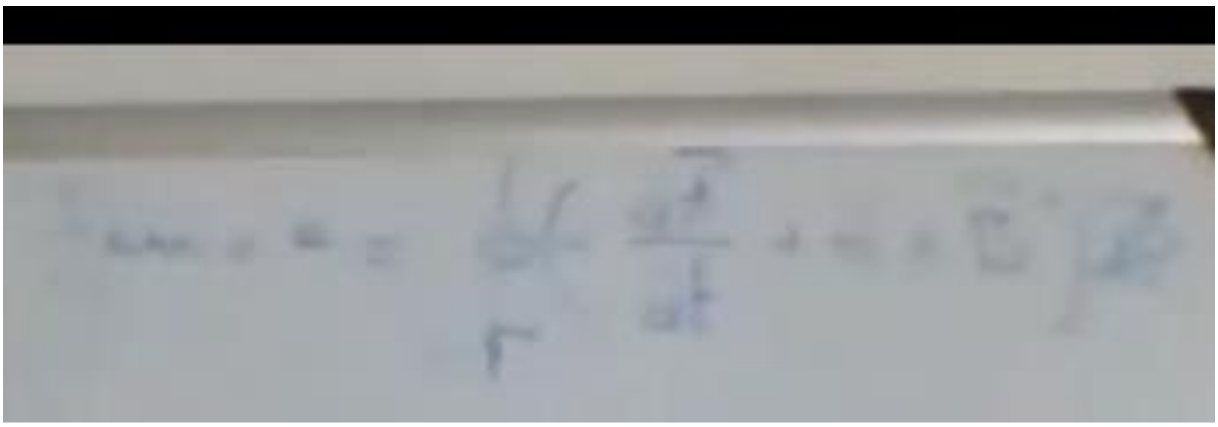


On se limite au cas d’un circuit indéformable. On définit le chamo electromoteur.



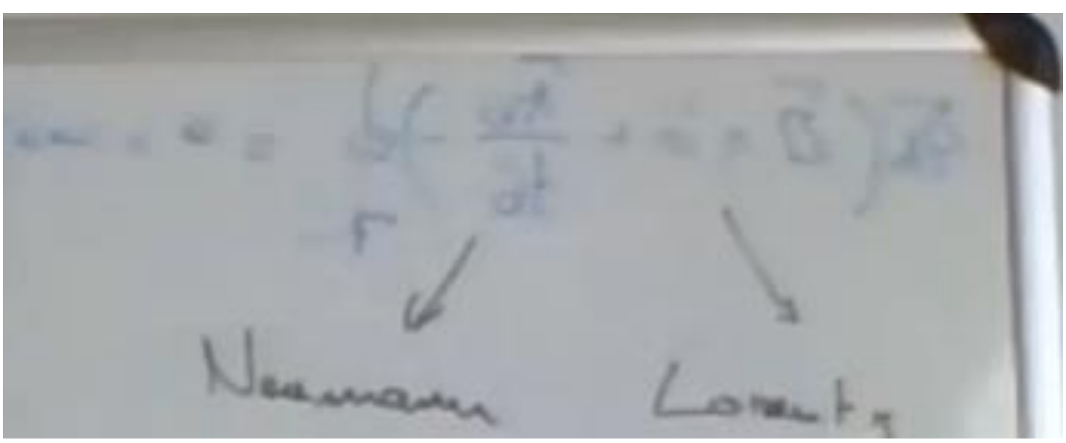
Dans le cadre de l'électromagnetisme on vas s'interesser à la circulation des champs.

L'integration le long d'un contours fermé d'un gradient est nul.
Le therme en derivé de A est inchangé
Le therme qui depend de la vitesse des eléctrons est nul car circuit fliforme, donc vitesse est colineaire au vecteur déplacement dans le circuit que on utilise pour integrer.

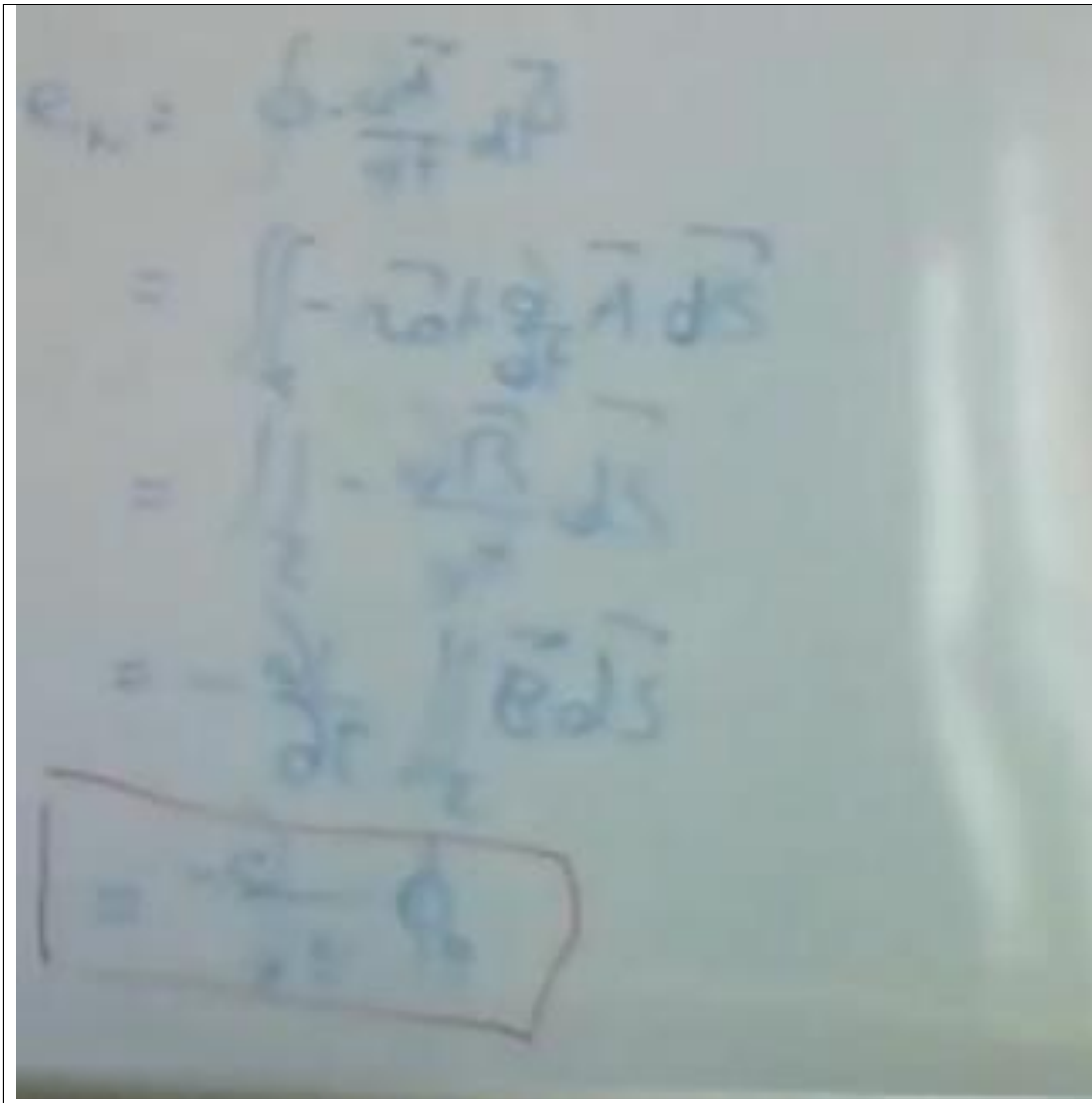


(seul v circuit est à prendre en compte pour les 2 vitesses, on notera cette vitesse v par la suite. Attention aux notations).

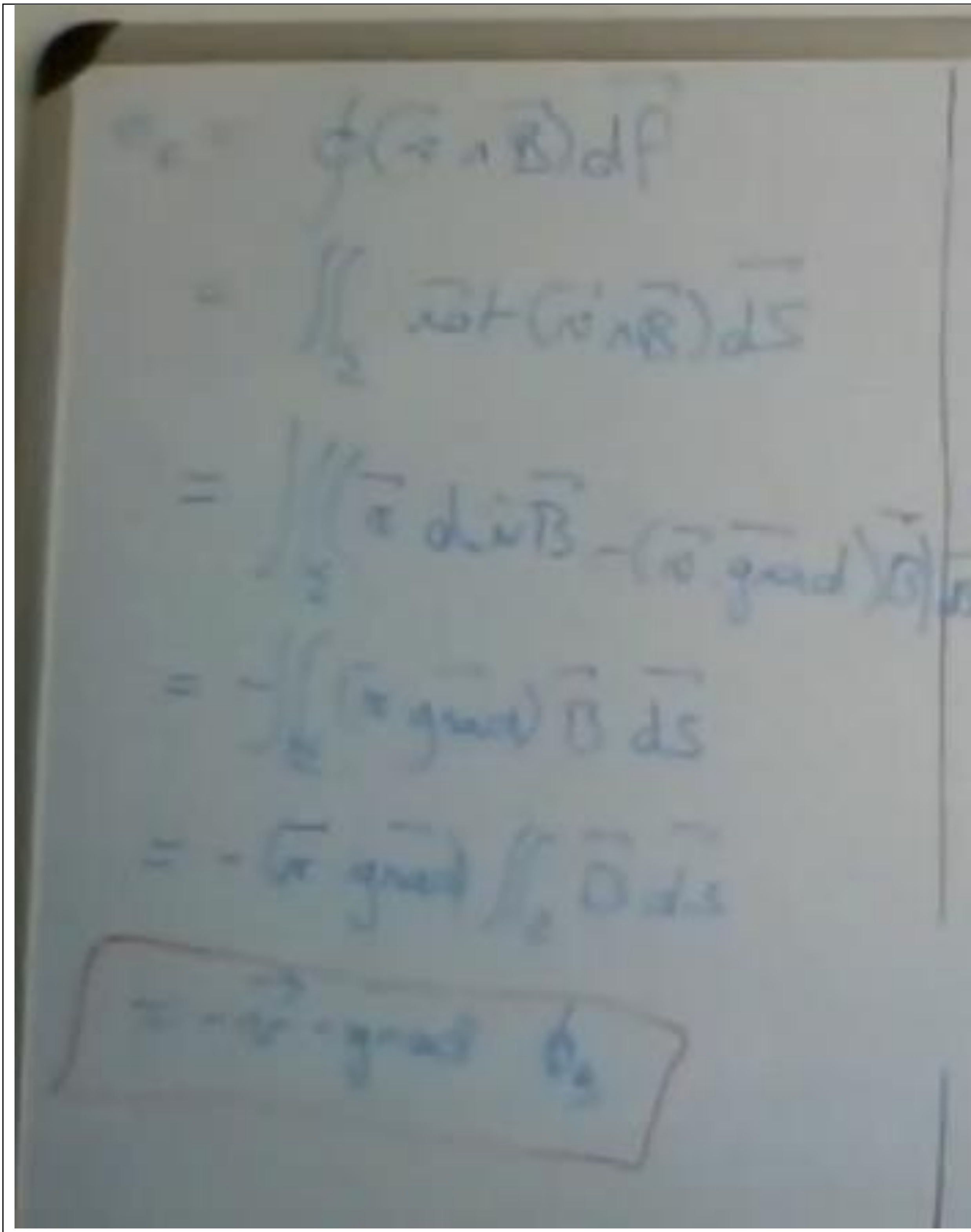
On a donc 2 types d'inductions qui se dégagent de l'expression, Newman et Lorentz.



On travaille sur Newman dabord, et on utilise la formule de Stokes pour transformer la circulaton en un flux de rotationel, attention a l'orientation de dS dans la formule ! On perumet les differentielles car agissent sur vaiables independantes. Circuit indeformable, donc on sorts la derivée del'integrale.

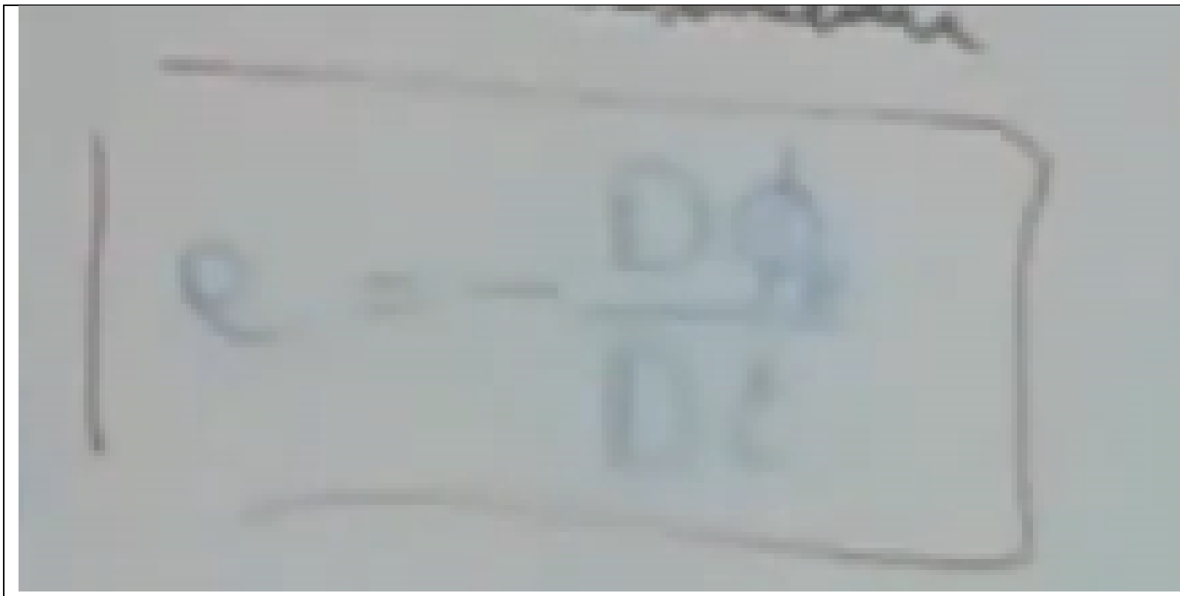


On peut faire la même chose pour l'induction de Lorentz. On utilise stokes pour faire apparaitre un rotationel et on utilise les formules d ; analyse vectorielle (div et grad). Div B est toujours nul. Caractère indeformable nous permet de sortir l'operateur v.grad. On retrouve le vlux à travrs le circuit à nouveau.



$$e_c = \oint (\vec{v} \wedge \vec{B})\, d\vec{l}$$
$$= \iint_\Sigma \overrightarrow{rot}(\vec{v} \wedge \vec{B})\, d\vec{S}$$
$$= \iint_\Sigma \left(\vec{v}\, \mathrm{div}\, \vec{B} - (\vec{v}\cdot\overrightarrow{grad})\vec{B}\right) d\vec{S}$$
$$= -\iint_\Sigma (\vec{v}\cdot\overrightarrow{grad})\, \vec{B}\, d\vec{S}$$
$$= -(\vec{v}\cdot\overrightarrow{grad}) \iint_\Sigma \vec{B}\, d\vec{S}$$
$$\boxed{= -\vec{v}\cdot\overrightarrow{grad}\ \Phi_B}$$

Finalement, la fem est la somme des 2, on reconnait (ou on introduit) la derivée totale.



Le flux de B s'exprime en weber (wb), le phénomène d'induction de rammène a des calcules de flux magnétique.

— Neumann, associé à une variation temporelle de $\vec{B}$;
— Lorentz, associé à un déplacement du circuit dans un champ magnétique non uniforme.

Dans le cas d'un circuit indéformable, on retrouve la loi de Faraday, qui fait intervenir la dérivée totale du flux :

$$e = \frac{\mathrm{D}\Phi}{\mathrm{D}t} \qquad (3)$$

> Le signe moins de la loi de Faraday est très important. Il indique que l'induction va créer un courant dont le sens s'oppose à sa cause (le champ magnétique créé par ce courant tend à s'opposer à la variation de flux qui lui donne naissance). C'est la loi de modération de Lenz.

Signe – viens d'une loi de moderation.

1.2.2 Loi de Lenz 10'

Les effets de l'induction s'opposent à la cause qui les a produit.
Cette loi qualitative permet de prévoir les effets de l'induction.

Chute d'un aimant dans différent tubes

- tube en plexiglas : c'est un isolant, il n'y a pas d'induction, l'aimant tombe rapidement sous l'effet de la gravité ;
- tube en cuivre : c'est un bon conducteur, le courant créé dans le tube par l'aimant qui tombe génère un champ magnétique qui ralenti l'aimant. C'est une manifestation de la loi de Lenz.

puis cuivre.

Maintenant que l'on a étudié les aspects théoriques de l'induction, on va étudier chacun des deux régimes. Commençons par l'induction de Neumann (champ $\overrightarrow{B}$ variable).

Loi de Lenz est une loi empirique.

Loi de Lenz : les effets de l'induction s'opposent aux causes qui leurn ont donné naissance.

Discussion de la chute de l'aimant dans un tube : https://www.youtube.com/watch?v=xOXwk6XtabE. (dure 1 minute)

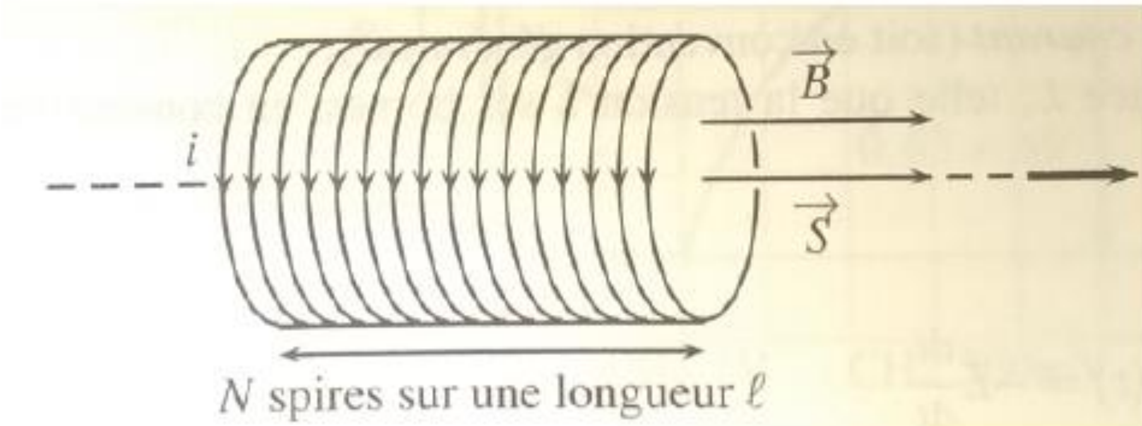
(plaques de plexiglass et d'aluminium (non magnetique)).

Que ce passe t'il ? l'aimant en chutant dans le tuyau crée un champ magnétique variable. Ce champ magnetique variable crée des courants à l'interieur du tube d'aluminium. Ces courants, d'après la loi de moderation créent alors un champ magnetique qui s'oppose au champ variable ce qui ralentis l'aimant (à mieux comprendre, voir video).

On vas s'interesser de plus près à l'induction de Newman.

1.3 Induction de Neumann (B variable) 12'

1.3.1 Auto-induction



On commence par s'interesser à une bobine avec N spires sur une longueur l parcouru par un courant i varable qui crée génère un champ magnetique lui aussi variable. **Dessiner la bobine ou la projeter.**

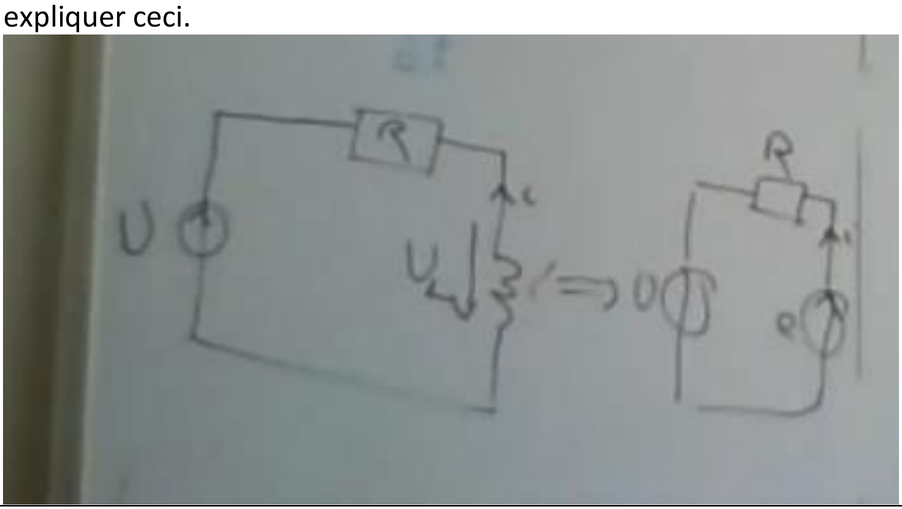
Pour simplifier les calcu ls on suppose que le champ magnetique crée est celui du solenoide infini. (le solenoidie fini est traité dans la leçon dipoles electrocinetiques).

Donner directement la valeur du champ B : $B = \mu_0 * N * i/l$ qui est uniforme sur la section. **Ce calcul est fait dans le dunod**.

Le flux propre, c.a.d le flux qui traverse la bobine s'exprime comme : Psi = N*B*S où S est la surface d'une spire.

On définit alors l'inductance propre comme L = Psi/i = $\frac{\mu_0 N^2 S}{l}$

On peut alors calculer la fem : e = -L*di/dt, forme connu pour la bobine !
-Dans un circui éléctrique on peut remplacer la bobine par une source de tension idéale ! Or le sens de cette tension (fem) impose le sens du courant. D'où l'importance de la convention générateur/recepteur dans les crcuits étudiées precedement. Passer au moins une minute à expliquer ceci.



Importance de l'agébrisation : l'orientation du courant défini l'orientation des surfaces. On calcule le flux propre dans le cas où l'on suppose que le champs $\overrightarrow{B}$ créé par la bobine est celui d'un solénoide infini. Le calcul du flux à travers une spire, puis N spires donne

$$\Phi_B = \frac{\mu_0 N^2 Si}{l} \tag{4}$$

En appliquant la loi de Faraday, on trouve

$$e = -L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}, \tag{5}$$

où $L = \mu_0 N^2 S/l$ est l'inductance de la bobine L s'exprime en Henri ($\mathrm{H} = \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{kg} \cdot \mathrm{s}^{-2} \cdot \mathrm{A}^{-2}$).

Ici la bobine est traitée en convention générateur car elle est assimilée dans le circuit à un générateur. En convention récepteur, on a l'habitude de travailler avec $U_L = -e$. (Schémas au tableau des deux circuits dans chacune des deux conventions, avec la bobine et une résistance R en série.)

L'énergie stockée dans la bobine est liée à son inductance et se trouve en exprimant la puissance électrique qui parcourt la bobine :

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2}Li^2 \tag{6}$$

Vérification de la dépendance en N^2 de l'inductance de plusieurs bobines en mesurant l'inductance d'après la fonction de transfert d'un circuit RL :

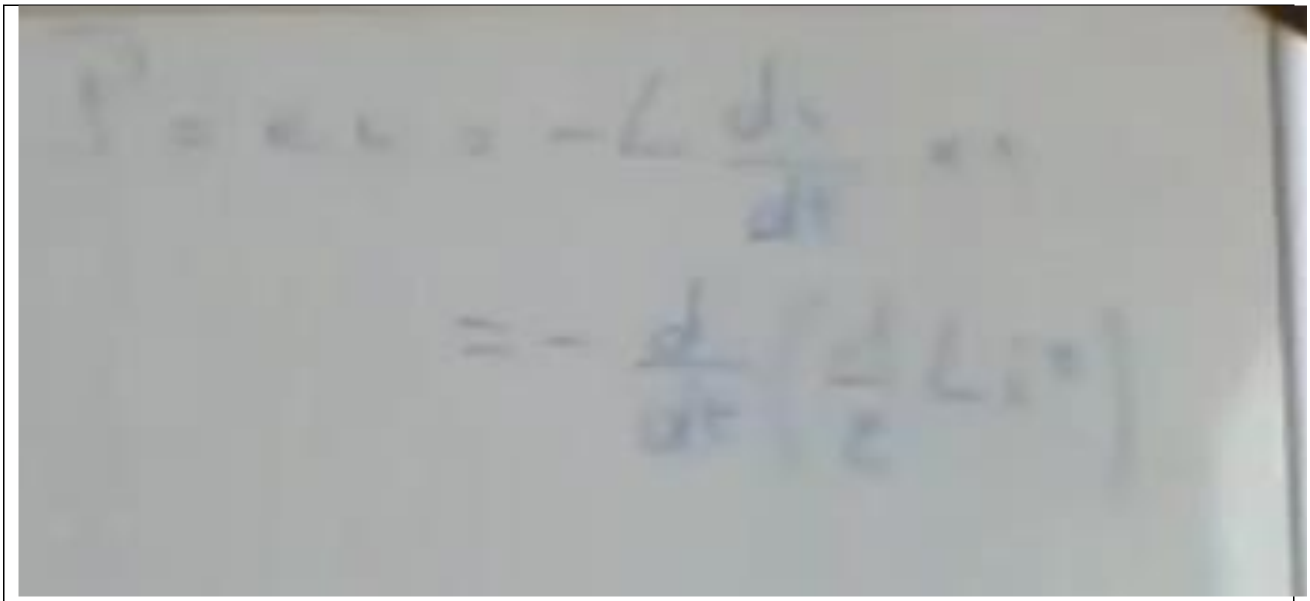
- mesure de l'inductance de quatre bobines de même géométrie mais avec des nobres de spires différents (125, 250, 500 et 1000 spires). Une mesure est réalisée devant le jury.
- il est nécessaire de mesure R à chaque fois car la résistance dépend de la longueur de fil de la bobine. Cette mesure est réalisée précisément à l'aide d'un multimètre Keithley permettant de faire une mesure à quatre points.
- la mesure de L se fait en déterminant la fréquence de coupure du filtre passe bas du premier ordre RL. Pour cela on mesure le rapport entre la tension U_R et la tension du GBF, et on réalise l'acquisition pour différentes fréquences à l'aide du programme python dédié à la mesure de diagramme de Bode.
- en ajustant sur Qtiplot la courbe obtenue par le modèle analytique $||H(\omega)|| = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega/\omega_c)^2}}$, on en déduit L (connaissant R) car $\omega_c = R/L$.
- les différentes valeurs de L obtenue sont ajustée en fonction du nombre de spire par un modèle $\mu_0 N^\alpha S/L$ et on obtient bien $\alpha \approx 2$.

Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs déduites de la géométrie des bobines.

Regardons ce qui se passe maintenant dans le cas de l'expérience de Faraday, avec deux bobines.

Discuter de la modération. Si le courant augmente dans le circuit (utiliser le schéma de la bobine), alors le champ B augmente. Or l'auto-induction de la bobine crée alors un courant dans le sens opposé à celui qui parcours la bobine ce qui diminue ainsi le courant total (montrer ceci dans le schéma des circuits).

Dire en 2 mots à la fin que l'énergie stocké par la bobine est trouvée à partir de la formule de la puissance émise par la fem qui lui est associée :



Le signe – vient du fait qu'on est en convention générateur, dans nos circuits éléctriques on se place en convention recepteur ce qui change le signe.

Revenons sur l'experience de Faaday. Cette fois-ci nous avons 2 bobines ce qui nous ammène à introduire un nouveau concept, l'inductence mutuelle.

1.3.2 Inductance mutuelle 25'

Schéma de deux bobines d'inductance L_1 et L_2, parcourue par des courants i_1 et i_2. L'inductance mutuelle traduit le couplage entre les deux circuits :

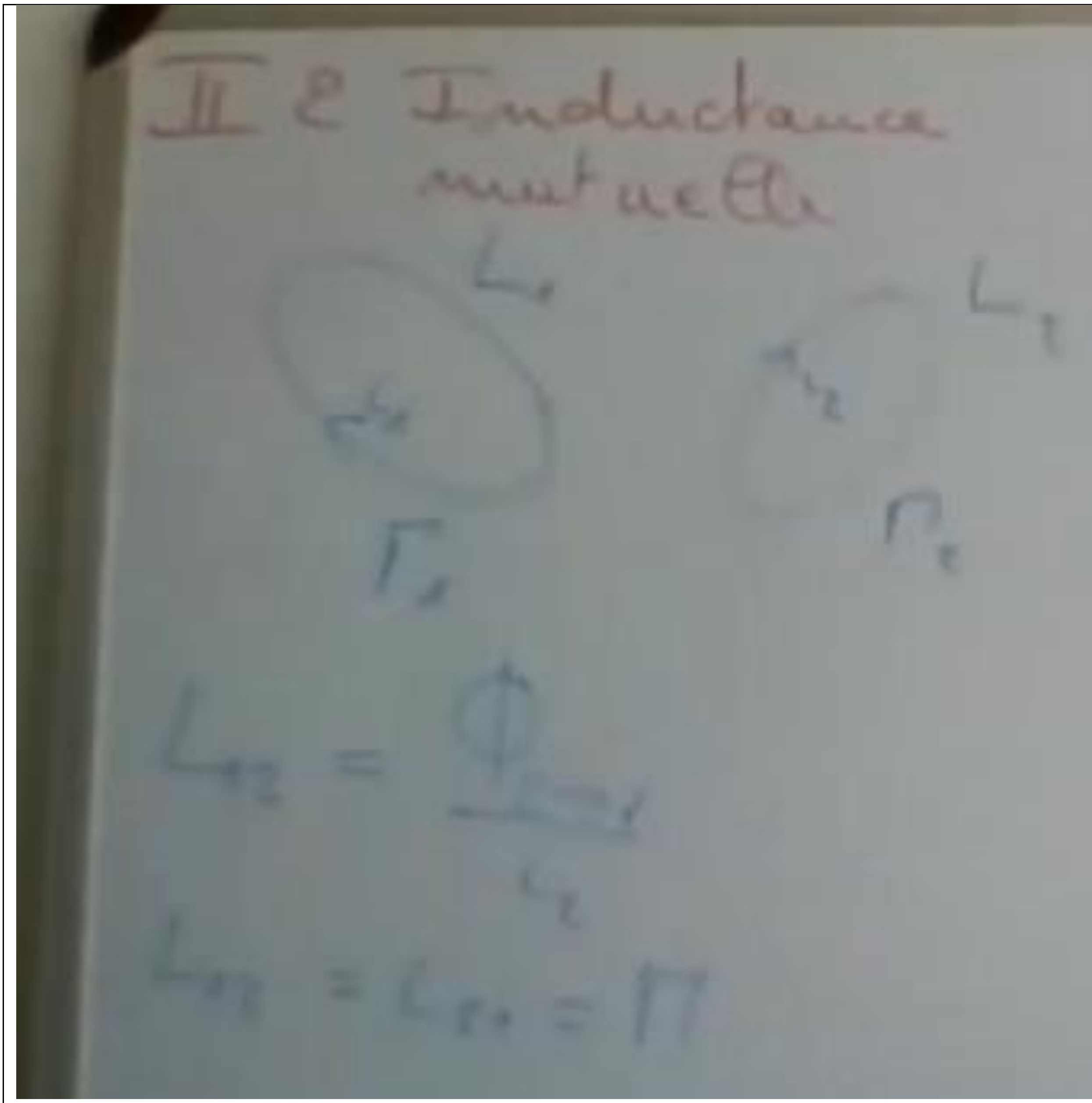
$$e_2 = -L_2 \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} - M \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} \tag{7}$$

— le signe de M dépend de l'orientation des deux circuits ;
— on montre que $M_{12} = M_{21}$: le résultat est presque immédiat en passant par le potentiel vecteur (démo dans [?] par exemple).

L'inductance mutuelle traduit le fait qu'il est possible de transférer de l'énergie d'un circuit à l'autre. Une application importante de cet effet est le transformateur, nécessaire au transport de l'énergie à haute tension pour diminuer les pertes dues au transfert (les pertes par effets Joule sont proportionnelles au carré de l'intensité. En travaillant avec des tensions très élevées ($\sim 400\,\mathrm{kV}$), il est possible de transporter des puissances importantes sans avoir un courant important. On a $P_J = Ri^2 = U^2/R$, mais le U ici correspond à la différence de potentiel entre les deux extrémités du fil électrique, et pas aux $400\,\mathrm{kV}$ qui est la différence de potentiel entre le cable et la terre.) Le transformateur est utilisé pour abaisser la tension en vue d'une utilisation par les particuliers.

Après l'induction de Neumann, on va s'intéresser à l'induction de Lorentz, c'est à dire à un circuit mobile.

Schéma :



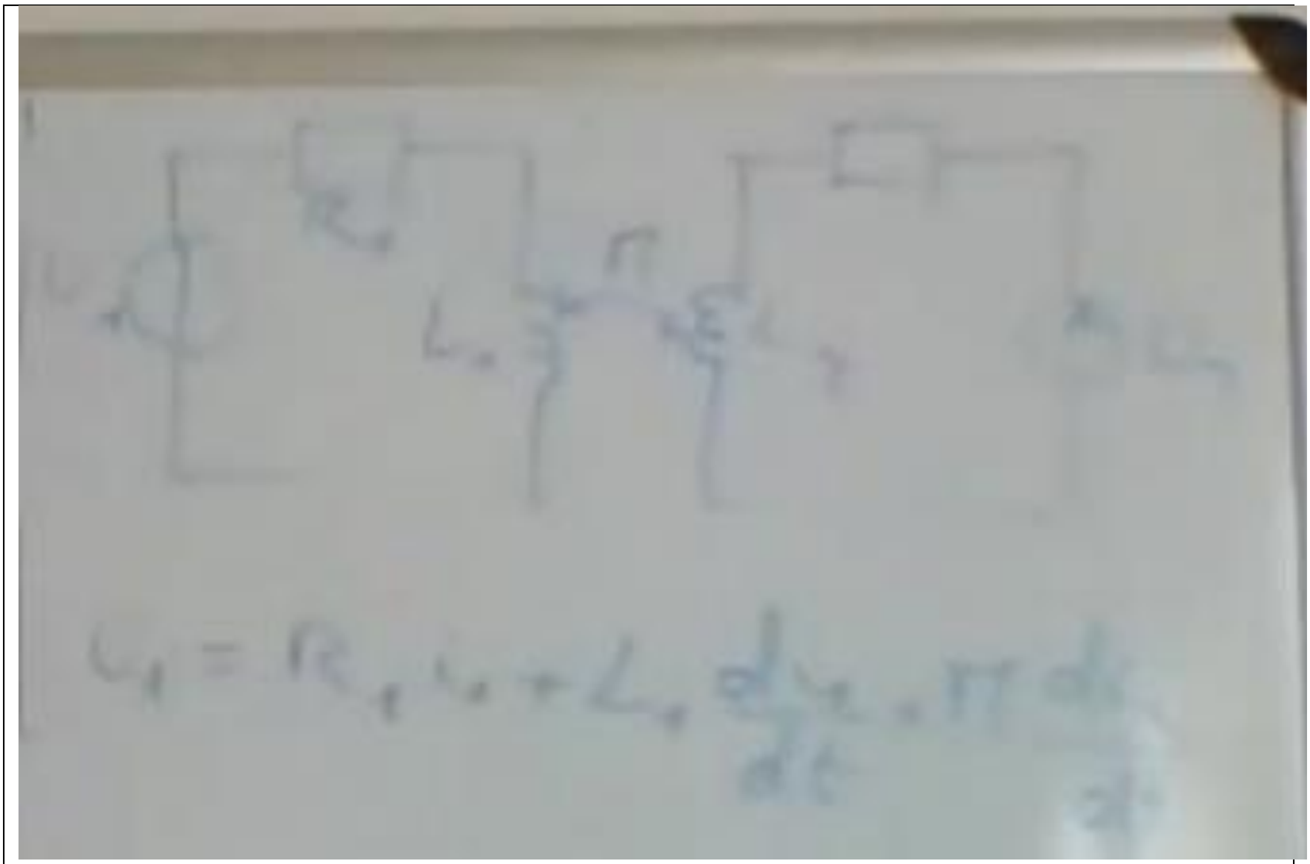
L'inductance mutuelle est définit comme le flux du champ magnetique crée par une bobine à travers l'autre bobie divisé par le courant divisé par la première bobine.

Par exemple le flux du champ crée par la deuxième et traversant la premiere divisé par le courant de la deuxième : L12 = Psi1-2/i2.

Le problème est symétrique entre les 2 bobines, on peut aussi définir alors L21 de la même manière et par symétrie il sera égal a L12.

On note la mutuelle inductance M.

On peut coupler deux circuits éléctriques en utilisant deux bobines liées par le phénomène d'inductance. (couplage car le premier circuit agis sur le deuxième et vice-versa). Alors on ecrit la loi des mailles pour l'un des crcuits :



Les variations de courant dans le deuxiem circuit vont imposer des variations de courant dans le premier circuit. Dd'où le nouveau therme du à l'inductance mutuelle.

Rq. Cette inductance mutuelle peut aussi être exprimé comme une fem.

Parler du transformateur comme application, C.F dunod PC p. 1084. **Montrer slide du transformateur**.

Cette explication est facultative :
On suppose un milieu ferro idéal (permeabilité infinie sans sources de pertes). Deux bobinages avec un nombre de spires différents.

On aplpique le théroème d'Ampère le long d'une ligne de courant (rq on utilise H qui est nul dans notre contour du à nos hypotèses).

$$\oint H\,dl = n_1 i_1 - n_2 i_2$$

$$0 = n_1 i_1 - n_2 i_2$$

$$n_1 i_1 = n_2 i_2$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{U_1 i_1}{U_2 i_2} = 1 \rightsquigarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

Ceci semble un peu en dessus du niveau attendu. On peut si non repartir du calcul du dunod PC p. 1084-1085 qui donne la relation u1/u2=N1/N2, puis utiliser la conservation de l'énergie qui implique P1/P2=1 pour remonter à i1 et i2 ce qui n'a pas un grand interet à mon avis.

On peut par contre donner le résultat principal des transformateurs : U1/U2 = N1 / N2 et le commenter.

Ce resultat est utilisé dans les microondes ! CF slide 4 image de transformateur de gauche.

Parler des pertes par effet joule !

1.4 Induction de Lorentz (circuit mobile) 28'30

1.4.1 Rail de Laplace

Deux termes :

- force électromotrice : elle traduit le couplage mécanique → électrique ;
- force de Laplace, responsable du couplage électrique → mécanique.

Schémas du dispositif, mécanique et électrique.

Avant la mise en équation, on peut qualitativement déterminer l'évolution du système lors d'un déplacement de la tige avec la loi de Lenz (...). Mise en équation :

- équation électrique

$$Ri = -vlB \tag{8}$$

- équation mécanique : principe fondamental de la dynamique projeté selon x

$$m\dot{v} = ilB \tag{9}$$

La résolution de ce système donne

$$v = v_0 e^{-t/\tau} \tag{10}$$

où $\tau = \frac{mR}{B^2 l^2}$. La barre est ralenti, ce qui est en accord avec l'analyse qualitative avec la loi de Lenz. Si l'on souhaite arrêter complètement la barre, il faut rajouter un frottement mécanique.

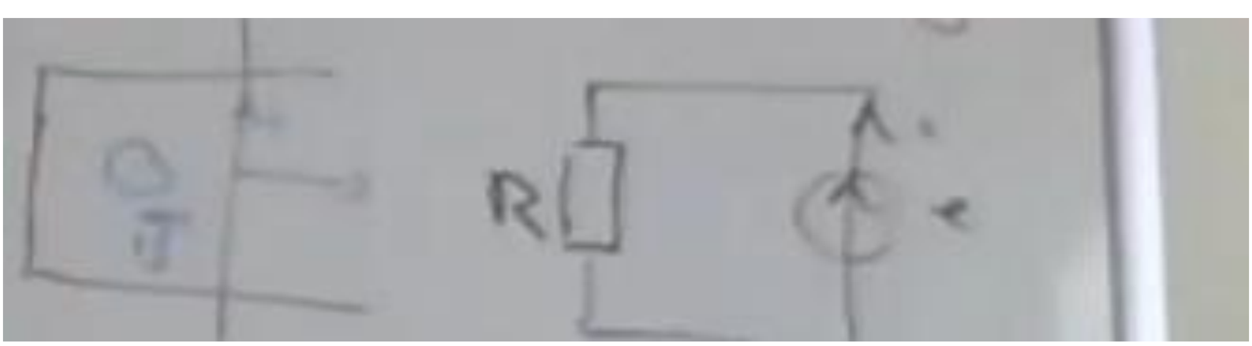
Conversion électromécanique : Schéma des échanges ($P_{laplace}$ et $P_{induction}$) pour faire le lien entre les pertes par effet Joule et la variation d'énergie cinétique. On a $P_{laplace} + P_{induction} = 0$

> Freinage par induction utilisé pour les poids lourds ou encore les trains (présente l'avantage de ne pas nécessité de pièce d'usure). Les courants créés dans la masse métallique sont appelés courants de Foucault. Une autre application de l'induction de Lorentz est la roue de Barlow qui peut être utilisée comme générateur de générateur de courant continu (actuellement, cette méthode sert encore pour générer les courants intenses nécessaires aux électrolyses). L'induction est aussi à la base des méthodes de production d'électricité (alternative) actuelles.

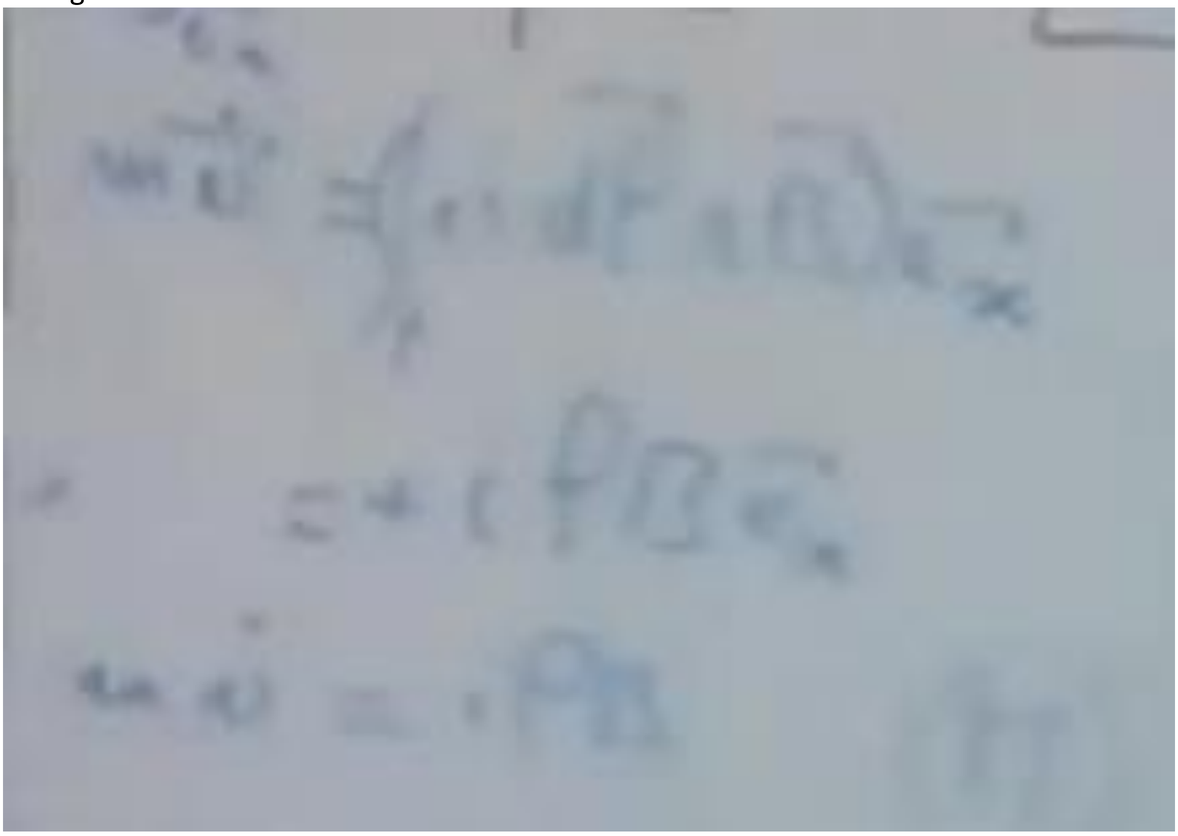
O s'interesse à present à l'inducatnce de Lorentz. On etudiera alors un problème classique, les rails de Laplace.

Faire le schéma. Pas de frottements et présence d'un champ B permanent. Faire le schéma éléctrique equivalent.

Le barreau métallique bouge ce qui modifie la surface du circuit et par conséquent le flux qui traverse le circuit donc génération d'une fem. NE PAS OUBLIER l'INTENSITÉ DANS LES 2 CIRCUITS et le champ B qui n'est pas dessine mais qui normalement viens vers nous..

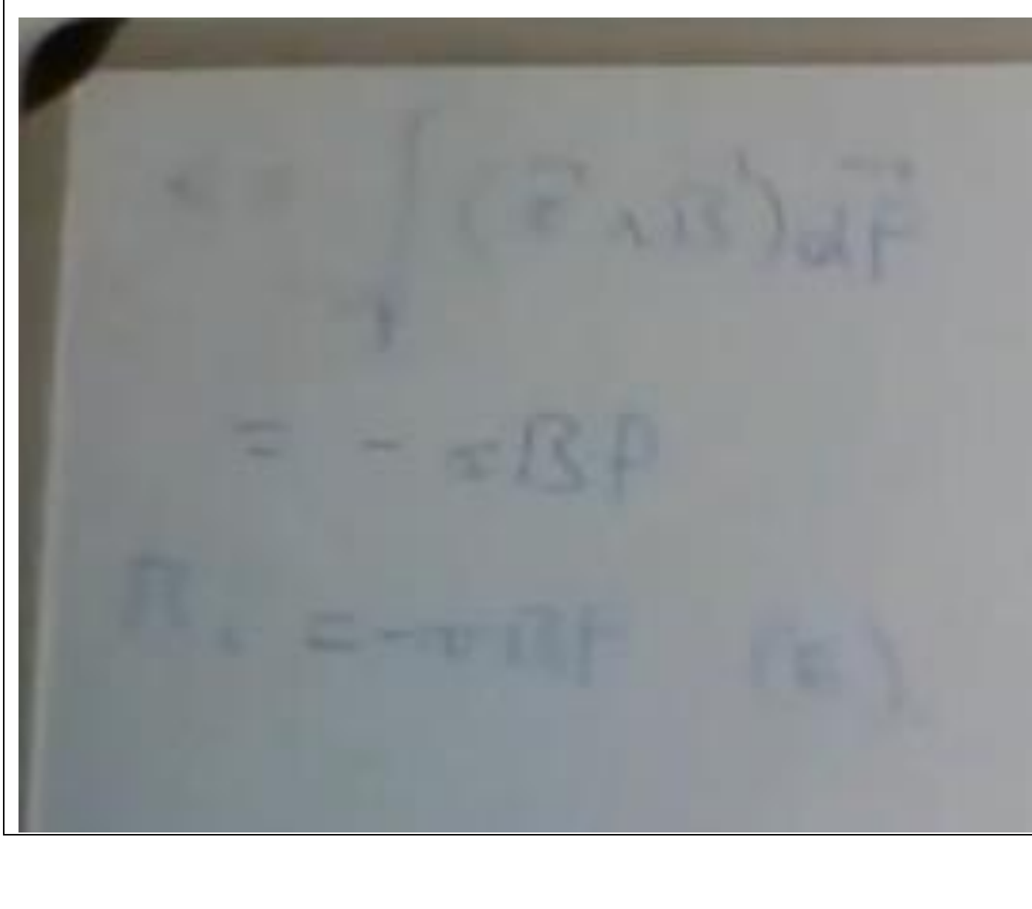


On établis les équations mécaniques et éléctriques. Le sens du courant est aussi le sens de l'intégrale.

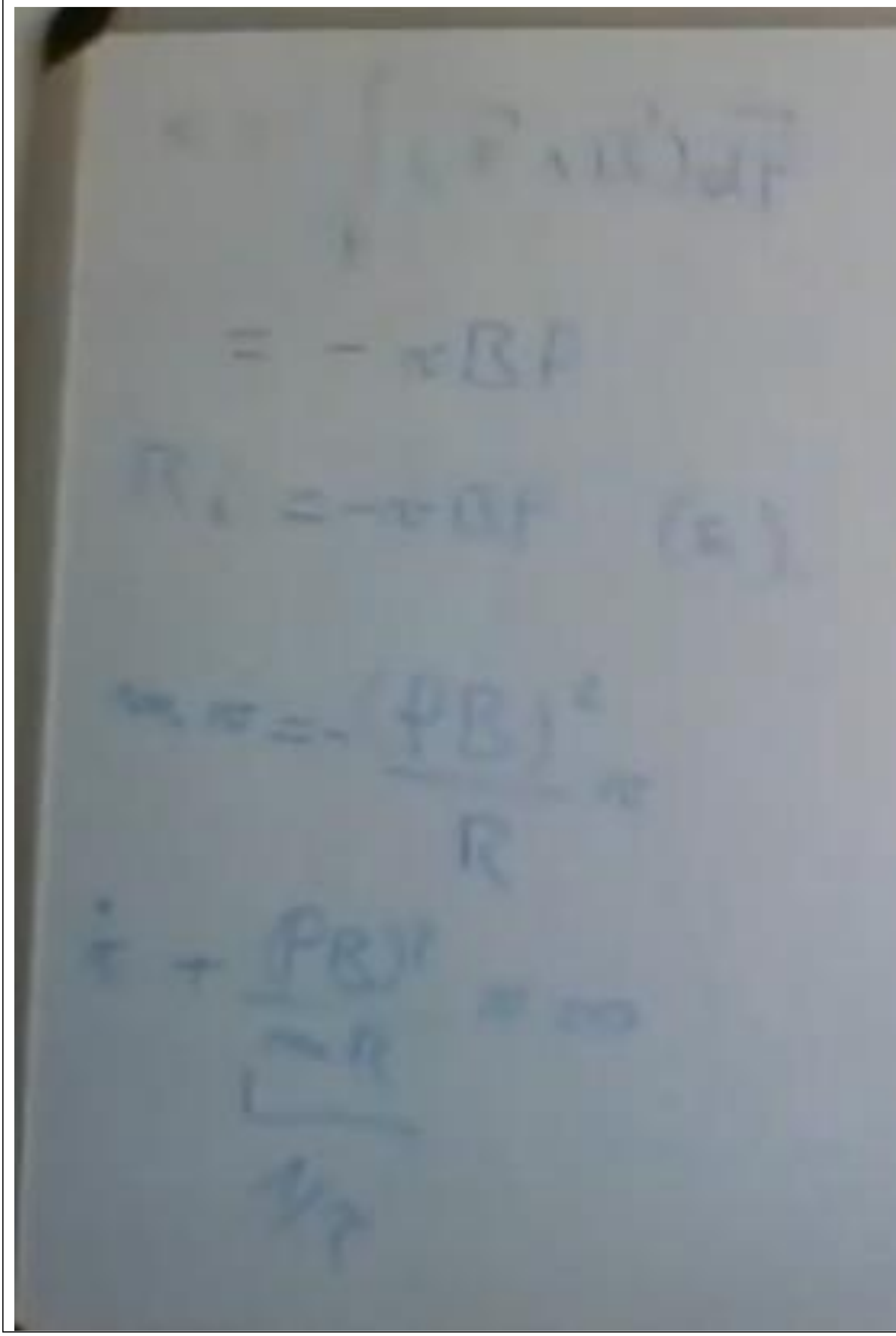


On etablis l'équation éléctrique avec la loi des mailles : e = Ri

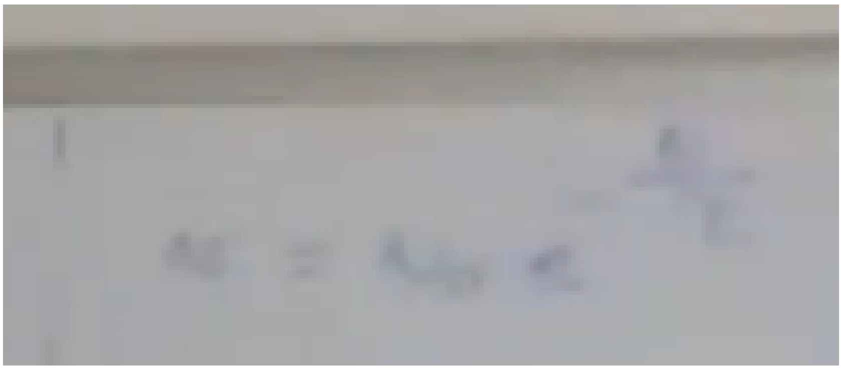
e est donné par la circulation du champ éléctromoteur :



On exprime i en fonction des autres variables dans l'équation éléctrique et on la reinjecte dans l''equation mécanique. On reconnait une EDF du premier ordre et un temps caracteristique associée.



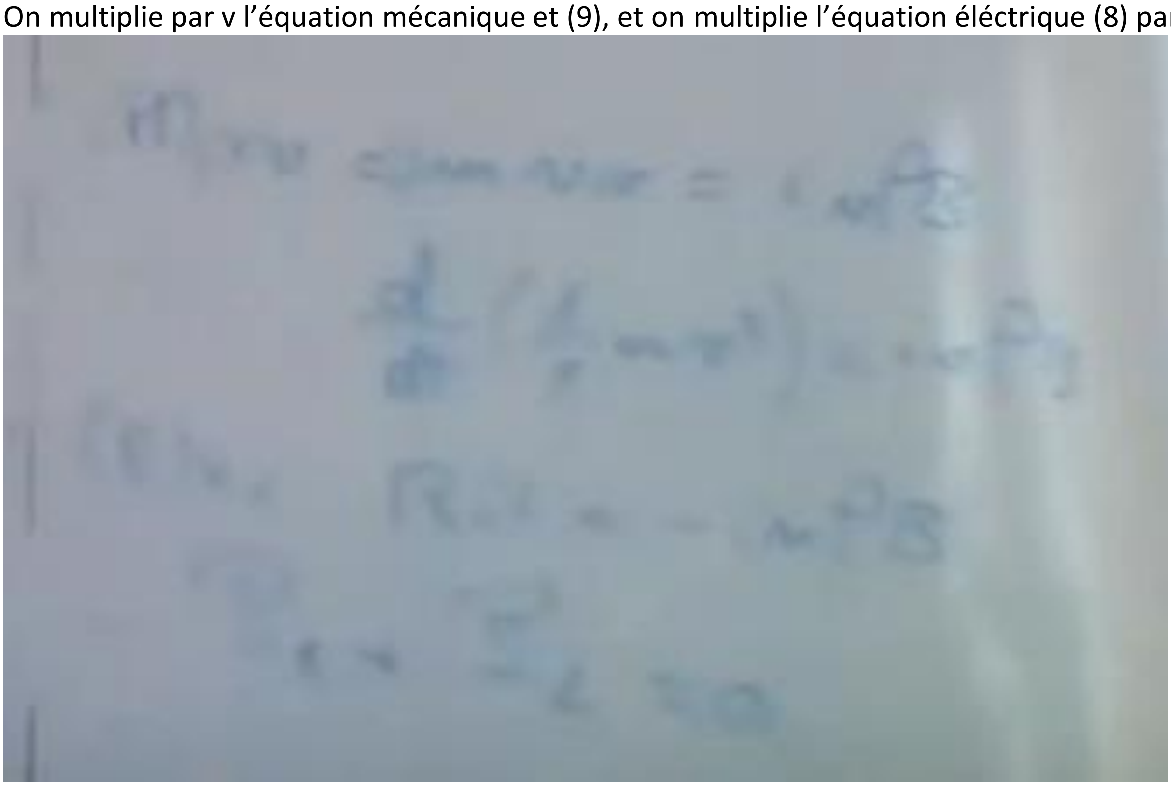
D'où :



On peu discuter de ce resultat avec laloi de Lenz :
- si un opérateur bouge le barreau vers la droite, la surface du circuit augmente, donc le flux de B qui traverse le circuit augmente. L'induction s'oppose à cet effet. Pour cela in crée un curant e = -vBl, qui a tendance à attenuer le champ magnetique existant. D'où le signe -, ce qui fait que le barreau sera ralentis.

On peut traiter le problème par une aproche energetique :

On multiplie par v l'équation mécanique et (9), et on multiplie l'équation éléctrique (8) par i.



On retrouve l'énergie cinétique et les pertes joules. Ce que nous venons de calculer est la puissance des forces de Laplace et la puissance de la force éléctromagnetique liée à l'induction. Ces puissances sont égales en valeur absolus et nulles si on fait l'addition.

Ceci veut dire que nous avons un cuplage idéal entre l'énergie electromagnetique et l'énergie mecanique. Pas de dissipations, pas de pertes. Aussi on a conversion d'énergie cinétique en énerge electromagnetique et vice-versa.

Le freinage par induction que nous avons vu ici est utilisé dans les vehicules. Montrer slide de freinage par induction.

L'axe est liée à l'essieux sur lequel sont montés les roues. Le phénomène d'induction crée des courants qu'on appelle courants de Foucault. Ces courants dissipent de l'énergie par effet joule. L'énergie cinétique qui crée les courants de foucault est ainsi dissipé ce qui ralentis le disque et donc les roues.

Il est utilisé pour le freinage des camions et trains.

On a un slid sur les roues de Barlow mais je prèfère ne pas rentrer la dessus.

> Rail de Laplace : le rail a tendance à rester collé sur le support (les faux contacts entre les rails et la tige créent des arcs électriques qui soudent la barre aux rails). On pourrait ici faire une démonstration qualitative de la roue de Barlow.

1.5 Conclusion 39'

Au cours de cette leçon, on a vu :
— les lois de l'induction (Lenz et Lorentz) ;
— les inductions de Neumann et Lorentz.

> Applications : générateurs, chauffage par induction, micro, chargeur sans fil...

> Vidéo https://www.youtube.com/watch?v=nIFSZfKTUKA Railgun de l'espace pour la blague :)

On peut parler des générateurs mais lire le poly de Jeremy avant.

On peut aussi dire que les courants de foucault sont aussi utilisées pour chauffer. Chauffage par induction.

Questions posées par l'enseignant
Lors de l'approche historique avec l'expérience de Faraday, vous avez parlé de galvanomètre : qu'est-ce que c'est ? Il s'agit d'un instrument permettant de mesurer de faibles courants électriques. L'aiguille de l'appareil est liée à des spires parcourue par le courant à mesurer, spires placées dans un champ magnétique constant et homogène. Le dipôle magnétique formé par les spires est alors soumis à un couple qui dévie l'aiguille. **Lors de l'introduction des lois de l'induction, vous avez introduit trois ingrédients : force de Lorentz, E = - grad V – dA / dt et v × B : Commenter ces termes.** La force de Lorentz permet d'expliquer comment le champ électromagnétique peut mettre en mouvement ou dévier des particules chargées. On repart des équations de Maxwell pour exprimer E en fonction des potentiels vecteur et scalaire. **Que représentent V et A ?** Voir le cours d'électromag de Jérémy pour des discussions plus poussées. On ne peut pas mesurer directement ni l'un ni l'autre. On a seulement accès à des différences de potentiel ou à la circulation de A.

Dans le cas d'un solénoïde parfait avec une spire autour, le champ B est nul au niveau de la spire pourtant il est possible de créer une fem dans la spire en faisant varier le courant dans le solénoïde (le champ B est bien nul mais pas A au niveau de la spire).
Une autre expérience mettant en évidence le rôle de A dans la compréhension d'effets subtils est celle d'Aharonov-Bohm.

Comment pourrait-on préciser l'introduction de la force électromotrice e ?
Lien entre le travail et la ddp (le travail de la force de lorentz permet d'introduire la ddp)

Dans la force de Lorentz, que représente v ?
C'est la vitesse des porteurs de charge.

Quel est le référentiel dans lequel est défini v ?
Vitesse du circuit = vitesse des charges ?
Ici il faut utiliser la composition des vitesses : $v = v_{circuit} + u$, où $v_{circuit}$ est la vitesse du circuit dans le référentiel du laboratoire et u est la vitesse des électrons dans le référentiel lié au circuit.
Quand on considère l'effet d'un champ magnétique sur les électrons, on peut alors considérer le cas d'un conducteur filiforme : la vitesse u étant alors toujours colinéaire avec le conducteur, seule la vitesse des électrons liée au mouvement du circuit donne lieu à une circulation non nulle ($u \times B$ est toujours orthogonal au conducteur).
Dans le cas d'un conducteur ayant une section finie, le déplacement des électrons le long du circuit donne, en présence d'un champ magnétique l'effet Hall qui est très faible dans les conducteurs en raison de la densité importante de porteurs de charge.

Comment évolue la vitesse de chute de l'aimant en fonction du matériau du tube ?
Plus le matériau est conducteur, plus le freinage est efficace, donc la chute longue.

Justifier l'approximation du solénoïde infini pour les bobines ?
Cette approximation est sans doute discutable car : les bobines utilisées sont de section carrée et la dimension de la section est comparable à la longueur de la bobine.
Cependant, même dans le cas d'une simple spire, le champ créé en dehors de l'axe est compliqué à calculer.
Les résultats obtenus lors des expériences étant en accord raisonnable avec le modèle simple d'un champ uniforme, on peut ici justifier l'utilisation de cette approximation.

Pourquoi sommer les champs B ?
On peut appliquer le principe de superposition associé à la linéarité des équations de Maxwell.

Pourquoi se placer en convention générateur ?
Dans le cas de l'induction présenté ici, la bobine est la source de la force électromotrice.
Il s'agit d'un générateur qui justifie l'emploi de la convention associée.

Puissance stockée dans la bobine. Pourquoi $i \times U_L$ et pas $e \times i$?
Lié à la convention choisie : en convention générateur, on considère l'énergie cédée par la bobine au circuit.
En convention récepteur, on s'intéresse à l'énergie reçue par la bobine.

Manip : Quelle est la valeur de la résistance de la bobine et justifier le choix de la résistance ?
(dépend du nombre de spires de la bobine) Il faut que la résistance de la bobine reste faible devant la résistance placée en série avec la bobine.
De plus, on fait en sorte que la fréquence de coupure du passe base soit de l'ordre de 10 kHz.

D'où viennent les incertitudes sur la mesure ? Comment sont calculées les erreurs ?
Lors de la mesure de la fréquence de coupure, l'incertitude vient de l'ajustement des données expérimentales par le modèle analytique.
La déduction de L dépend aussi de la valeur de la résistance R+r qui est mesurée précisément avec l'ohmmètre numérique et une mesure à quatre points.
Cette incertitude est donnée par la notice de l'appareil.

Est-il possible de rajouter des erreurs sur les points acquis à l'oscilloscope à la main ?

Oui en se référant à la notice de l'instrument mais elles sont petites venant de l'oscilloscope.
Pourquoi avoir choisi de mesurer L d'après le diagramme de Bode ?
Essentiellement car il faut une mesure quantitative dans la leçon docteur.
Autres méthodes : umax/2, temps de montée, etc.
Justifiée par une approche pédagogique.
Valeur d'inductance comparée à quoi ?
A celle mesuré au RLC-mètre, à la valeur annoncée par le constructeur, à la valeur attendue compte tenu du modèle.
D'où vient l'incertitude sur l'inductance théorique ?
Principalement de l'inhomogénéité du champ B dans toutes les spires et sur toute la surface d'une même spire.
Inductance mutuelle ? pourquoi mettre des dérivées rondes ?
(petite erreur)
Une seule équation : couplage de 1 vers 2. Qu'est ce qui se passe dans l'autre sens ?
Le problème est symétrique.
L'inductance mutuelle est-elle la même de 12 ou 21 ?
Oui.
Équivalence des puissances de Laplace et induit ?
Oui car sinon on casse la physique.
Roue de Barlow pour générer du courant ?
Oui pour les forts courants de certaines électrolyses, non pour la production électrique actuelle (alternateurs).

Commentaires donnés par l'enseignant

Débit de parole important. Faire quelques pauses.
Bien expliqué
Point noir de la leçon : comment amener les lois de l'induction ?
On peut écrire que la vitesse des électrons est la composition des électrons dans le circuit + la vitesse du circuit.
Une autre possibilité serait de faire l'approche historique entière et introduire le d phi/dt directement.
Bonne utilisation des couleurs, mais défaut de diction : pas dire mon/ma tout le temps (mesurer mon inductance...)
Bq d'applications : bien
Faire des pauses, poser des questions ouvertes, pendant l'écriture du titre tu te tais.
A n'est pas mesurable car il y a une jauge près mais ddp mesurable et la circulation de A aussi.

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.)

Bon plan (classique…) il faut cependant beaucoup réfléchir à comment aboutir à la formule du champ electromoteur E_m, en respectant un programme ou des pré-requis raisonnables, car tout l'enjeu de la leçon est ici.

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates

Champ électromoteur, cas de Neuman et Lorentz illustrés pas des exemples et applications concrètes

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Mesure d'inductance, loi de Lenz (mais pas très quantitatif),

Bibliographie conseillée

Croiser plusieurs livres de prépa de différentes programmes pour l'introduction du champ électromoteur (vieux livre bleu PC Mauras, livre récent PCSI, Pérez…)