

DIPOLE RL

1. LA BOBINE.

1.1. QU'EST-CE QU'UNE BOBINE ?

Une bobine est constituée par l'enroulement d'un fil métallique conducteur.

- Elle peut être plate: l'enroulement est constitué de quelques tours de fils ou spires;
- Elle peut-être aussi longue: le fil est alors enroulé en hélice sur un support cylindrique.

Le fil conducteur gainé est en généralement enrobé dans un matériau isolant de faible épaisseur, de manière à serrer les spires les unes contre les autres sans contact entre elles et à augmenter leur nombre.

1.2. LES APPLICATIONS.

Les bobines sont des composants très souvent utilisés en électricité et en électronique. Elles jouent un rôle essentiel dans les haut-parleurs électrodynamiques, les moteurs électriques, les transformateurs, les alternateurs, les électroaimants.... Elles sont aussi présentes dans les systèmes de freinage ABS des automobiles ou dans les plaques de cuisson à induction. Les recherches sur la fusion nucléaire ont conduit les physiciens à construire de grandes bobines toriques (de forme semblable à celle d'un pneu) appelées tokamaks. Leur rayon atteint plusieurs mètres et des courants importants y circulent.

LE HAUT-PARLEUR ELECTROMAGNETIQUE.

On distingue:

- un **aimant** de forme complexe, qui crée un champ électromagnétique radial (c'est-à-dire, dirigé suivant un diamètre de la bobine);
- une **bobine**, qui peut être parcourue par un courant;
- une **membrane** en forme de pavillon, fixée en son pourtour sur le saladier, et solidaire de la bobine.

Le spider permet de garder l'ensemble bien centré.

L'aimant crée en chaque point d'une spire, un champ magnétique radial c'est-à-dire dirigé selon un rayon de la spire. De plus, ce champ est orienté vers le centre de la spire et a la même valeur tout le long de celle-ci.

Lorsqu'un courant circule dans la bobine, chaque spire est soumise à des forces électromagnétiques qui la déplacent. Chaque portion est soumise à une force électromagnétique \vec{f} de valeur $f = I.l.B$.

Tout le long des spires de la bobine, les forces telles que \vec{f} ont la même direction (parallèle à l'axe de la bobine), le même sens et la même valeur f : leur résultante \vec{F} est donc colinéaire à l'axe de la bobine et a pour valeur

$$\vec{F} = I.L.B \quad L \text{ étant la longueur}$$

totale du fil de la bobine.

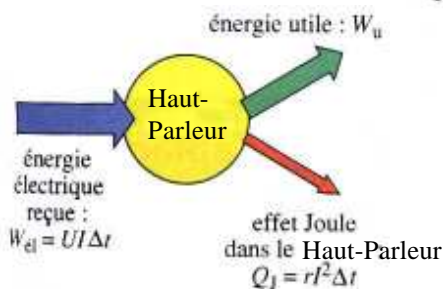
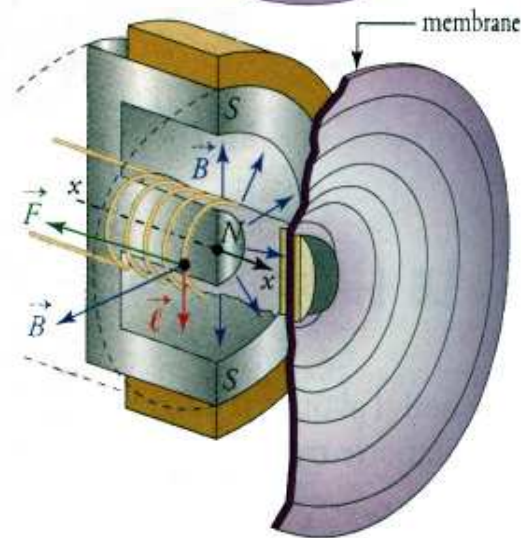
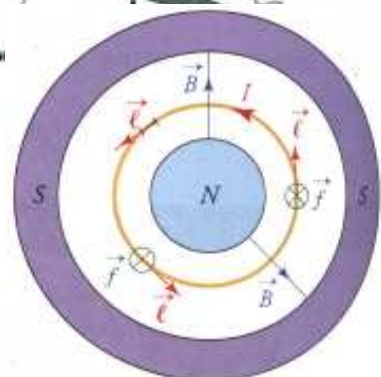
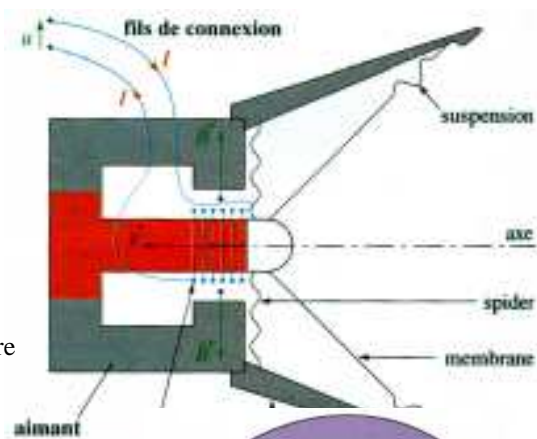
Sous l'action de la résultante des forces électromagnétiques, la bobine se déplace d'un mouvement de translation rectiligne dans l'entrefer de l'aimant.

Le sens de déplacement de la bobine dépend du sens du courant dans la bobine.

Si le courant est alternatif, la bobine, et donc la membrane qui lui est solidaire, sont animées d'un mouvement vibratoire. Ces vibrations ont la même fréquence que le courant qui circule dans la bobine.

L'énergie électrique fournie par le générateur est convertie en énergie mécanique fournie à la bobine et à la membrane. Une partie de cette énergie mécanique est transférée aux couches d'air près de la membrane vibrante: elle produit un son qui peut alors se propager.

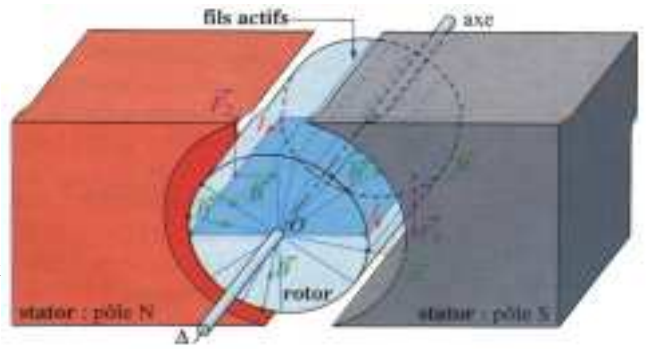
Un haut-parleur électrodynamique est un convertisseur d'énergie électrique en énergie mécanique.



LE MOTEUR ELECTRIQUE A COURANT CONTINU.

On distingue:

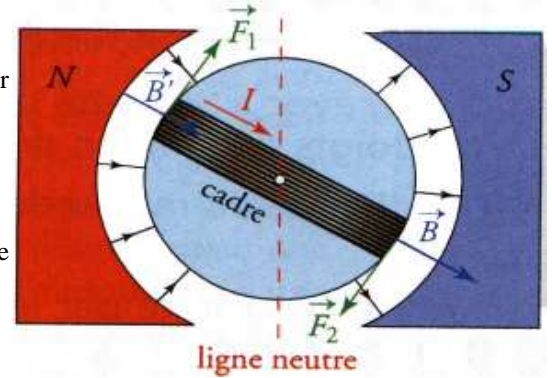
- une partie fixe, le **stator**, porte la source de champ magnétique: un aimant permanent dont l'entrefer est cylindrique. Le champ magnétique créé est radial, c'est-à-dire suivant un diamètre du cylindre;
- une partie mobile, le **rotor**, constitué d'un cylindre d'acier pouvant tourner autour de son axe. Il porte, dans des encoches, un grand nombre de fils conducteurs appelés fils actifs.



Le collecteur, par l'intermédiaire des balais, permet la circulation du courant électrique dans les fils du rotor.

Pour en comprendre le fonctionnement, il suffit d'étudier le mouvement d'une bobine rectangulaire (ou cadre) placée dans un champ magnétique radial: le vecteur \vec{B} est dirigé selon le rayon d'une section circulaire de l'entrefer. Du côté du pôle Nord, le vecteur \vec{B} est orienté vers l'axe. De l'autre côté, il est orienté vers le Sud.

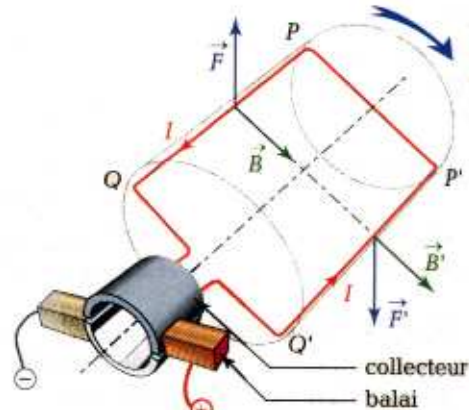
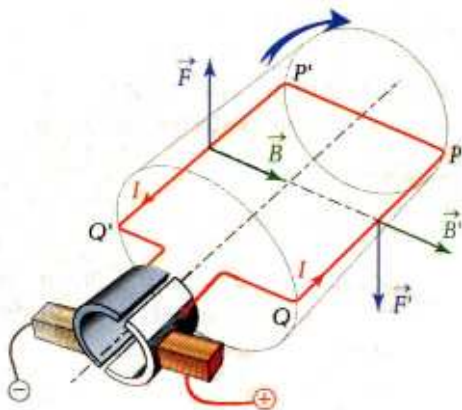
Sur les côtés horizontaux du cadre parallèles aux lignes de champ magnétique: les forces électromagnétiques sont nulles. Sur les côtés parallèles à l'axe de rotation sont appliquées les forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 qui font tourner le cadre autour de l'axe. Lorsque les côtés franchissent la ligne neutre, ils entrent dans des champs magnétiques inversés. Les forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 changent alors de sens et tendent à faire tourner le cadre en sens inverse.



Dans un moteur électrique, on évite le changement de sens des forces électromagnétiques, lors du passage de la ligne neutre, en changeant le sens de circulation du courant dans chaque spire à l'aide d'un dispositif constitué par des collecteurs et des balais. L'effet des forces sur le cadre n'est pas modifié et le sens de rotation du rotor est alors conservé.

Le courant parcourt la spire dans le sens QPP'Q'

Le courant parcourt la spire dans le sens Q'P'PQ



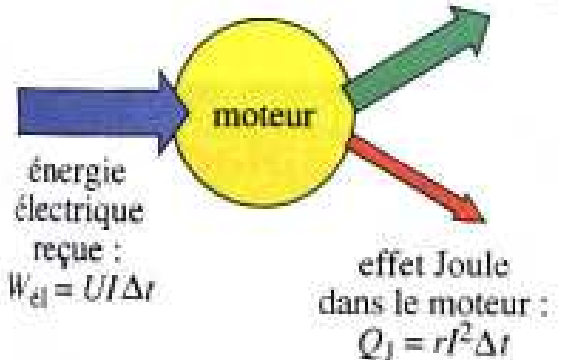
Dans un moteur électrique, les forces électromagnétiques convertissent l'énergie électrique reçue par le circuit en énergie mécanique.

Ordres de grandeurs.

Le tableau fournit les ordres de grandeur des puissances de quelques moteurs électriques usuels. Leurs principes de fonctionnement diffèrent, mais reposent toujours sur les **interactions électromagnétiques**.

Application	Puissance	Alimentation
Photocopieurs, Imprimantes.	10 W à 40 W	continu ou alternatif
Robot ménager	100 W à 200 W	alternatif
Démarrateur d'automobile.	environ 1 kW	continu
Aspirateur.	environ 1,5 kW	alternatif
Voiture électrique.	20 kW à 45 kW	continu ou alternatif
Motrice de train.	4,4 MW à 6,4 MW	alternatif

énergie utile : W_{u}



Les moteurs électriques ont un excellent rendement pouvant dépasser 90%, alors que celui des moteurs thermiques n'est que de 20 à 40%

L'ALTERNATEUR.

Dispositif.

Un aimant entraîné par un moteur à vitesse réglable tourne devant une bobine. Les bornes de cette bobine sont reliées à celles d'un oscilloscope dont le balayage est enclenché.

Observation.

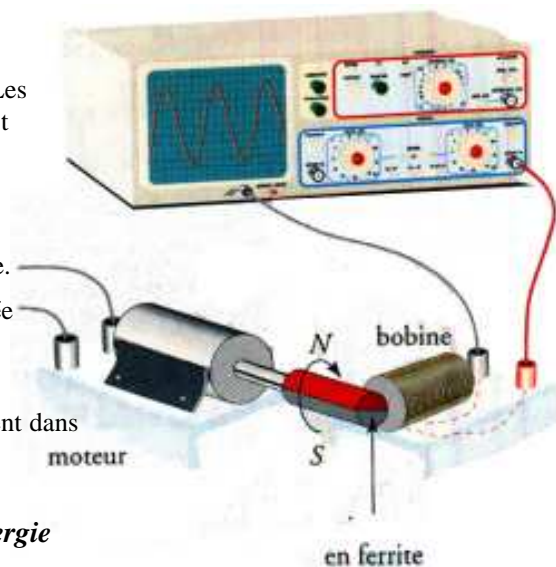
Le spot décrit une courbe périodique: une tension alternative, semblable à celle délivrée par le générateur très basse fréquence, apparaît aux bornes de la bobine.

Si on augmente la vitesse de rotation du moteur, la période de la tension délivrée diminue. Si on arrête le moteur, la tension disparaît.

Conclusion.

L'apparition d'une tension électrique entre les bornes de la bobine en mouvement dans le champ magnétique est appelée phénomène d'induction électromagnétique, phénomène qui a été découvert et interprété par Michael Faraday en 1832.

Le phénomène d'induction électromagnétique permet de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.



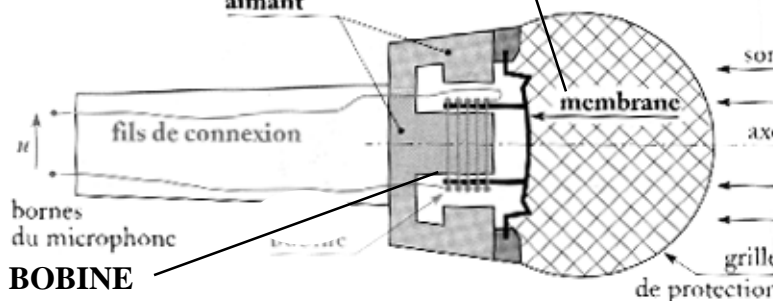
LE MICROPHONE.

AIMANT

aimant

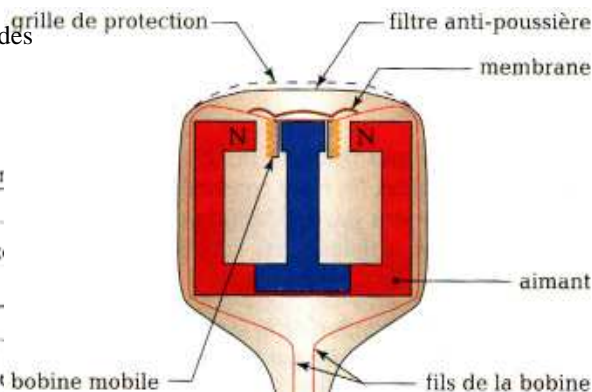
MEMBRANE

rigide, très légère (50 mg à 100 mg), fixée sur un pourtour; elle comporte des ondulations lui permettant de se déformer.



BOBINE

très légère possédant quelques dizaines de spires seulement et pouvant coulisser dans l'entrefer de l'aimant.



1.3. LA REPRESENTATION SYMBOLIQUE D'UNE BOBINE.

La représentation symbolique d'une bobine idéale parfaitement conductrice est donnée ci-contre.

Cet enroulement a en réalité une résistance, le plus souvent de faible valeur.

Une bobine de résistance reste équivalente à l'association en série:

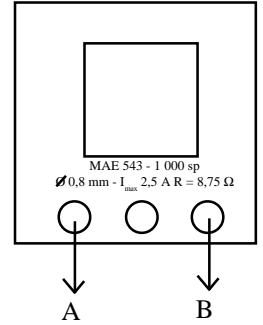
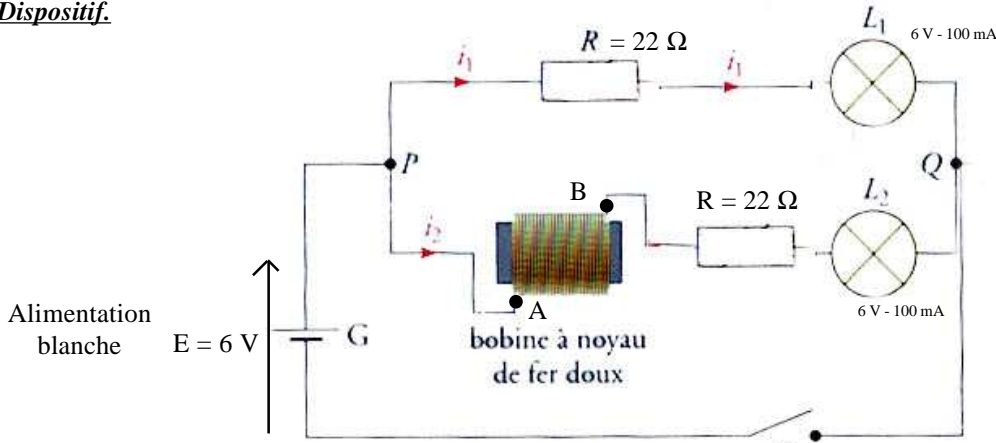
- d'une bobine de résistance négligeable;
- et d'un conducteur ohmique de résistance r .

La représentation symbolique d'une bobine en découle.



2. INFLUENCE D'UNE BOBINE DANS UN CIRCUIT: RETARD A L'ETABLISSEMENT DU COURANT.

Dispositif.



Observation.

La lampe L_1 brille immédiatement; l'établissement du courant dans cette dérivation est instantané.

La lampe L_2 s'illumine avec retard; il faut un certain temps pour qu'elle éclaire comme la lampe L_1 .

L'établissement du courant dans cette dernière dérivation est progressif: c'est un phénomène de transitoire.

Conclusion.

Une bobine s'oppose transitoirement à l'établissement du courant dans le circuit.

Au bout d'un temps suffisant, les deux lampes brillent de la même façon.

En régime permanent, le bobine se comporte comme un conducteur ohmique de résistance r .

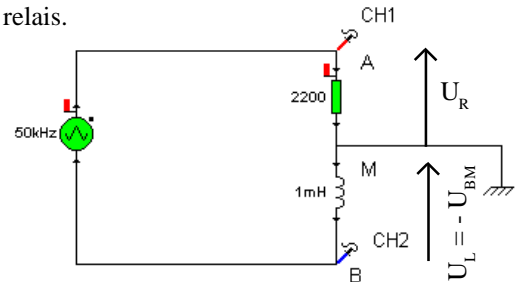
Remarque.

Lorsqu'on ouvre un circuit comportant des bobines, il peut apparaître une forte tension qui peut ioniser l'air entre les bornes de l'interrupteur et provoquer un arc électrique endommageant les interrupteurs ou les relais.

3. TENSION AUX BORNES D'UNE BOBINE. (Voir Tp φ 8)

Le circuit RL est branché aux bornes d'un GBF qui délivre une **tension alternative triangulaire**. Un système d'acquisition de données permet d'afficher à l'écran de l'oscillo les variations en fonction du temps:

- de la tension $U_L(t)$ aux bornes de la bobine;
- et de l'intensité $i(t)$ du courant qui circule dans le circuit.



3.1. INDUCTANCE D'UNE BOBINE.

La tension aux bornes d'une bobine de résistance négligeable est proportionnelle à la dérivée de l'intensité par rapport au temps:

$$u_L = L \frac{di}{dt}$$

u_L tension aux bornes de la bobine en Volts (V)
 L inductance de la bobine en Henrys (H)
 di/dt dérivée de l'intensité en Ampère par seconde.

3.2. RELATION ENTRE INTENSITE ET TENSION.

La tension u aux bornes d'une bobine de résistance r est la somme:

- de la tension aux bornes du conducteur ohmique de résistance r $u_r = ri$
- de la tension u_L .

$$u = r i + L \frac{di}{dt}$$

4. ETUDE D'UN DIPOLE RL SOUMIS A UN ECHELON DE TENSION E.

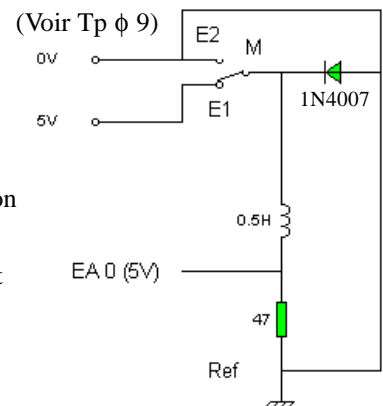
4.1. ETUDE EXPERIMENTALE DE LA REPONSE EN COURANT.

La bobine est maintenant montée en série avec une résistance R aux bornes **d'un générateur idéal de tension de f.e.m. E**

Un système d'acquisition des données relié à un ordinateur permet d'afficher à l'écran les variations en fonction du temps de la tension U_L et l'intensité $i(t)$ du courant dans le circuit en fonction du temps.

Dès qu'on ferme l'interrupteur, le dipôle RL est soumis à un échelon de tension. L'intensité croît jusqu'à atteindre de manière asymptotique une valeur maximale.

Le courant s'installe progressivement. Une bobine s'oppose aux variations de l'intensité du courant dans le circuit où elle se trouve.



4.2. ETUDE THEORIQUE DE LA REPOSE EN COURANT: ETABLISSEMENT DU COURANT.

Etablissement de l'équation différentielle.

Choisissons comme origine des dates ($t=0$), la date à laquelle on ferme l'interrupteur.

Appliquons la loi des tensions à une date $t > 0$. la tension E aux bornes du dipôle RL est la somme de la tension aux bornes de la résistance et de la tension aux bornes de la bobine:

$$u_R + u_L = E$$

Soit l'équation différentielle

$$Ri + L \frac{di}{dt} = E \quad \text{ou} \quad i + \frac{L}{R} \frac{di}{dt} = \frac{E}{R}$$

Solution de l'équation différentielle.

On peut vérifier que l'intensité $i = A(1 - e^{-t/\tau})$ où A et τ sont des constantes à déterminer, est solution de cette équation différentielle.

En dérivant l'expression proposée pour l'intensité, on obtient:

$$\frac{di}{dt} = \frac{A}{\tau} e^{-t/\tau} \quad \text{d'où en reportant dans l'équation différentielle:}$$

$$i + \frac{L}{R} \frac{di}{dt} = A - Ae^{-t/\tau} + \frac{L}{R} \frac{A}{\tau} e^{-t/\tau} = \frac{E}{R}$$

$$\text{soit} \quad \left(A - \frac{E}{R}\right) + A \left(\frac{L}{R\tau} - 1\right) e^{-t/\tau} = 0$$

$$\text{Ce qui implique} \quad A - \frac{E}{R} = 0, \text{ soit } A = \frac{E}{R} \quad \text{et} \quad \frac{L}{R\tau} - 1 = 0, \text{ soit } \tau = \frac{L}{R}$$

$$\text{Finalement la solution de l'équation différentielle s'écrit } i = \frac{E}{R} (1 - e^{-t/\tau}) \text{ avec } \tau = \frac{L}{R}$$

Interprétation physique.

Dans l'expression précédente, si t tend vers l'infini alors $i(t)$ tend vers E/R . Ce résultat est en adéquation avec l'oscillogramme obtenu: au bout d'un certain temps, $i(t)$ devient constante. Le régime permanent n'est pas atteint instantanément. La bobine s'oppose à l'augmentation de l'intensité du courant électrique.

4.3. ETUDE THEORIQUE DE LA REPOSE EN TENSION.

A partir de $U_L = L \frac{di}{dt}$ on obtient $u_L = E e^{-t/\tau}$ La tension décroît de manière exponentielle depuis la valeur E .

Remarque.

Rigoureusement, à partir de $U_L = L \frac{di}{dt} + Ri$, on obtient $u_L = E \left(1 - \frac{r}{R_{\text{Total}}}\right) e^{-t/\tau} + \frac{r}{R_{\text{Total}}} E$

4.4. CONSTANTE DE TEMPS $\tau = L/R$.

L'exposant $-\frac{t}{\tau}$ de l'exponentielle de la solution doit être sans dimension; τ est donc homogène à une durée.

C'est pour cette raison qu'on donne à τ le nom de constante de temps du dipôle RL.

La constante de temps est une durée caractéristique sur la réponse de la bobine du dipôle RL

La valeur de la constante de temps fournit un ordre de grandeur du temps de réponse du condensateur.

Si on calcule le rapport $\frac{iR}{E}$ à la date $t = \tau$, on obtient $\frac{iR}{E} = 1 - e^{-1} = 0,63$

à la date $t = 5\tau$, on obtient $\frac{iR}{E} = 1 - e^{-5} = 0,99$

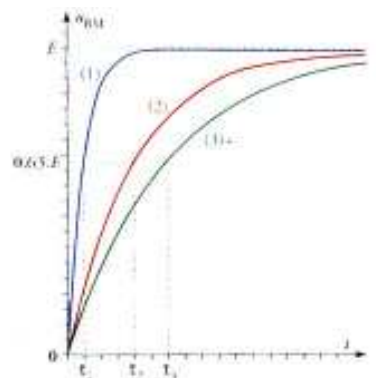
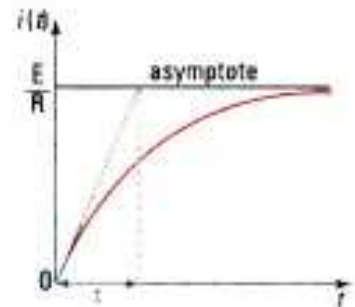
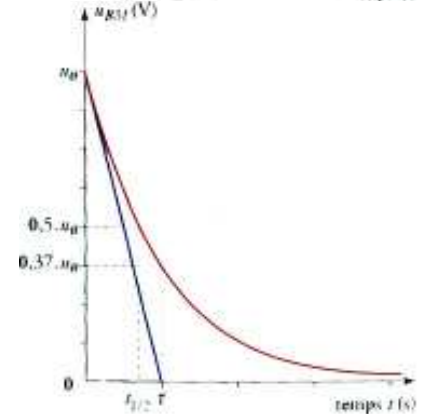
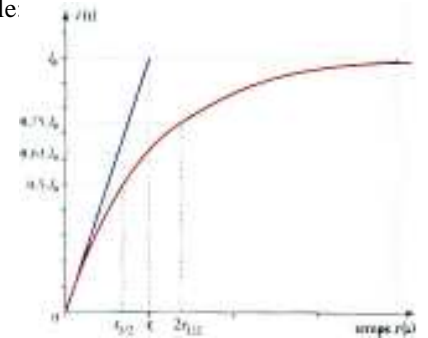
L'intensité est égale à 63% de sa valeur maximale au bout du temps τ et à 99% au bout du temps 5τ ; l'intensité a pratiquement atteint sa valeur maximale. On dit que, pratiquement, le régime asymptotique est atteint.

Conclusion.

La constante de temps τ correspond à la réponse d'un dipôle (R, L) à un échelon de tension

4.5. INFLUENCE DES PARAMETRES DU CIRCUIT.

Plus la valeur de la constante de temps τ est grande (plus R est faible ou bien plus L est grande), plus le courant s'établit (s'interrompt) lentement dans le circuit.



5. ETUDE D'UN DIPOLE RL SOUMIS A UN ECHELON DE TENSION 0.

5.1. ETUDE EXPERIMENTALE DE LA REPONSE EN COURANT. (Voir Tp φ 9)

Dès qu'on ouvre l'interrupteur, la bobine se comporte comme un générateur durant quelques instants. L'intensité décroît d'une valeur maximale jusqu'à atteindre de manière asymptotique l'axe des abscisses.

Le courant ne s'annule pas instantanément dans le circuit constitué de la bobine et de la résistance, comme cela aurait été le cas dans un circuit purement résistif.

La bobine s'oppose à la disparition du courant: di/dt est négatif mais i garde le même signe.

De ce fait il n'y a pas discontinuité de l'intensité, celle-ci passant progressivement de la valeur I_0 à la valeur nulle.

5.2. ETUDE THEORIQUE DE LA REPONSE EN COURANT: ETABLISSEMENT DU COURANT.

Etablissement de l'équation différentielle.

Choisissons comme origine des dates ($t=0$), la date à laquelle on ferme l'interrupteur.

Appliquons la loi des tensions à une date $t > 0$. la tension E aux bornes du dipôle RL est la somme de la tension aux bornes de la résistance et de la tension aux bornes de la bobine:

$$u_R + u_L = E$$

Soit l'équation différentielle

$$Ri + L \frac{di}{dt} = 0 \quad \text{ou} \quad i + \frac{L}{R} \frac{di}{dt} = 0$$

Solution de l'équation différentielle.

On peut vérifier que l'intensité $i = A e^{-t/\tau}$ où A et τ sont des constantes à déterminer, est solution de cette équation différentielle.

En dérivant l'expression proposée pour l'intensité, on obtient:

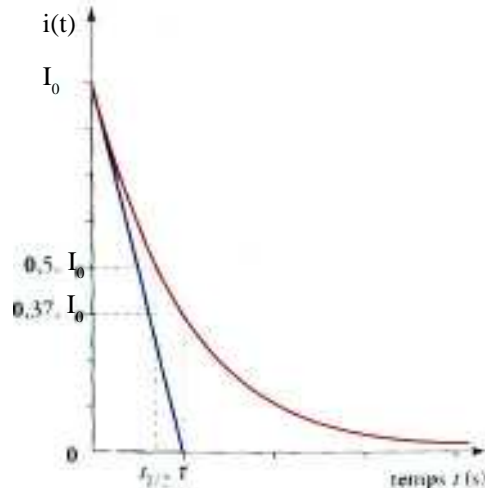
$$\frac{di}{dt} = - \frac{A}{\tau} e^{-t/\tau} \quad \text{d'où en reportant dans l'équation différentielle:}$$

$$i + \frac{L}{R} \frac{di}{dt} = A e^{-t/\tau} - \frac{L}{R} \frac{A}{\tau} e^{-t/\tau} = 0$$

$$\text{soit } A \left(\frac{L}{R\tau} - 1 \right) e^{-t/\tau} = 0 \quad \text{Ce qui implique } \frac{L}{R\tau} - 1 = 0 \text{ soit } \tau = \frac{L}{R}$$

Prenant en compte à l'état initial $i(t=0) = I_0$, on en déduit $A = I_0$

$$\text{Soit finalement } i = I_0 e^{-t/\tau} \quad \text{soit } \tau = \frac{L}{R}$$



5.3. ETUDE THEORIQUE DE LA REPONSE EN TENSION.

A partir de $u_L = L \frac{di}{dt}$ on obtient $u_L = -R I_0 e^{-t/\tau}$ La tension croît de manière exponentielle depuis la valeur $-E = -R I_0$

Remarque.

Rigoureusement, à partir de $U_L = L \frac{di}{dt} + r i$, on obtient $u_L = - \frac{R}{R_{\text{Total}}} E e^{-t/\tau}$

avec $R_{\text{Total}} = R + r$

Remarque.

Lorsqu'on débranche brusquement des appareils ménagers comportant des moteurs (donc des bobines) en fonctionnement, il apparaît de fortes étincelles sur la prise de courant, appelées étincelles de rupture.

En effet les étincelles prolongent le courant dans le circuit. Elles peuvent endommager les balais et les lames des collecteurs dans les moteurs et les commutateurs à haute fréquence.

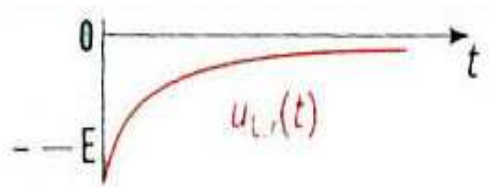
De plus la tension U_L , fonction de di/dt , apparaissant aux bornes de la bobine, peut prendre une valeur très importante si la coupure du circuit est rapide: il apparaît alors aux bornes de la bobine une surtension pouvant détruire d'éventuels composants électroniques du circuit.

On remédie à cela en plaçant aux bornes des bobines une résistance et une diode, ou un condensateur aux bornes des interrupteurs.

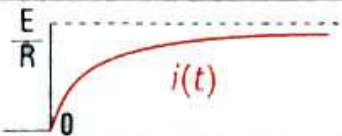
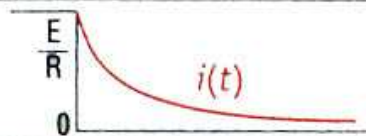
On supprime ainsi les parasites gênants pour les récepteurs radio ou de télévision, car les étincelles de rupture provoquent des ondes électromagnétiques qui perturbent la réception.

6. ENERGIE EMMAGASINEE DANS UNE BOBINE.

Une bobine d'inductance L traversée par un courant d'intensité i emmagasine l'énergie $E_L = \frac{1}{2} Li^2$



5. EN RESUME

	Établissement du courant (K fermé)	Interruption du courant (K ouvert à nouveau)
Allure de la courbe $i(t)$		
Expression de $i(t)$	$i(t) = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$	$i(t) = \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t}$
Expression de $u_{L,r}(t)$	$u_{L,r}(t) = E \left(1 - \frac{r}{R}\right) e^{-\frac{R}{L}t} + r \frac{E}{R}$	$u_{L,r}(t) = -\frac{r'}{R} E e^{-\frac{R}{L}t}$
Allure de la courbe $u_{L,r}(t)$	