

Condensateurs et Bobines : analyse transitoire

Alejandro Ospina Vargas– Enseignant-Chercheur UTC

Université de Technologie de Compiègne

Sommaire

- 1 Objectifs
- 2 Introduction/Rappel
- 3 Condensateurs
- 4 Bobines
- 5 Condensateurs et bobines dans les SEE

Objectifs

- Comprendre :
 - Le fonctionnement des condensateurs et des bobines

1. Systèmes d'Entraînement Électrique.

Objectifs

- Comprendre :
 - Le fonctionnement des condensateurs et des bobines
 - Pouvoir déterminer le comportement d'un circuit électrique avec condensateurs et/ou bobines en régime transitoire (variation des grandeurs physiques en fonction du temps).

1. Systèmes d'Entraînement Électrique.

Objectifs

- Comprendre :
 - Le fonctionnement des condensateurs et des bobines
 - Pouvoir déterminer le comportement d'un circuit électrique avec condensateurs et/ou bobines en régime transitoire (variation des grandeurs physiques en fonction du temps).
- Leur utilisation dans les SEE¹

1. Systèmes d'Entraînement Électrique.

Sommaire

1 Objectifs

2 Introduction/Rappel

- Les charges électriques
- Charges électriques statiques
- Le champ électrique
- Charges électriques en mouvement : courant électrique
- Courant électrique
- Le champ magnétique

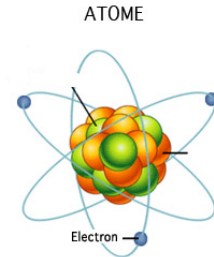
3 Condensateurs

4 Bobines

5 Condensateurs et bobines dans les SEE

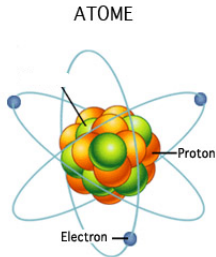
Les charges électriques

- Les électrons ont une charge négative $-e$;



Les charges électriques

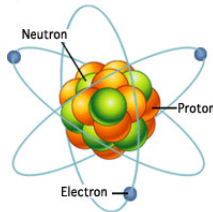
- Les électrons ont une charge négative $-e$;
- Les protons ont une charge positive e ;



Les charges électriques

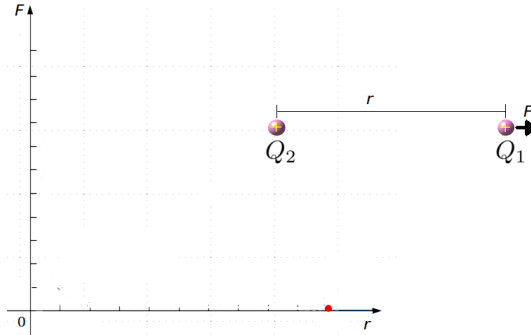
- Les électrons ont une charge négative $-e$;
- Les protons ont une charge positive e ;
- Les neutrons n'ont pas de charge électrique.

ATOME



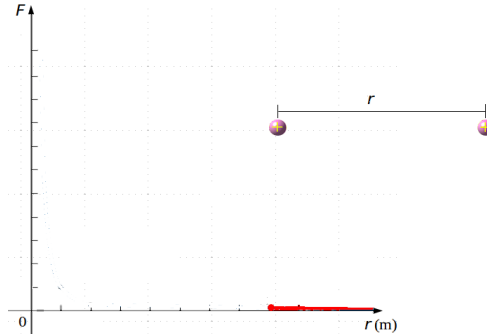
Forces entre les charges électriques statiques

Loi de Coulomb :



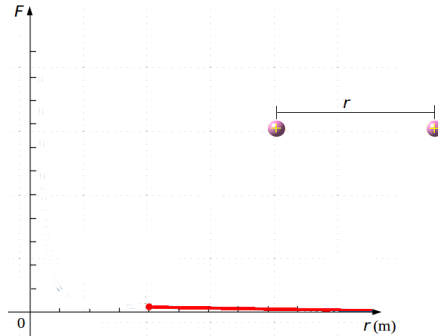
Forces entre les charges électriques statiques

Loi de Coulomb :



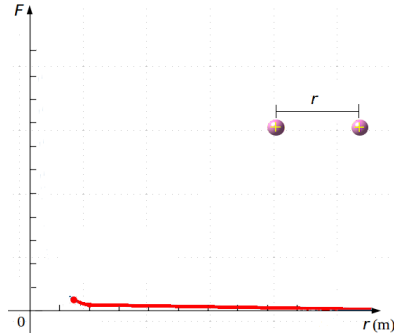
Forces entre les charges électriques statiques

Loi de Coulomb :



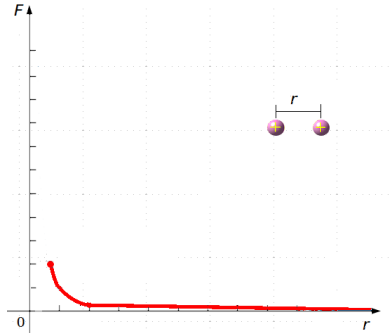
Forces entre les charges électriques statiques

Loi de Coulomb :



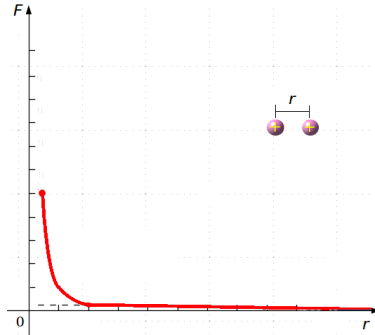
Forces entre les charges électriques statiques

Loi de Coulomb :



Forces entre les charges électriques statiques

Loi de Coulomb :

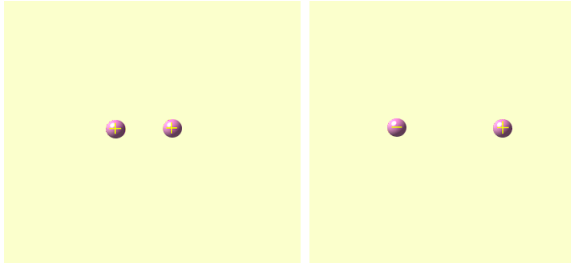


$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

avec $k \approx 9 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$, c'est la constante de Coulomb.

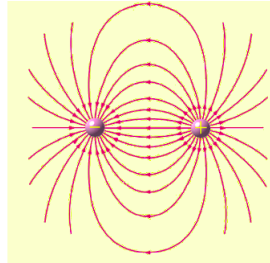
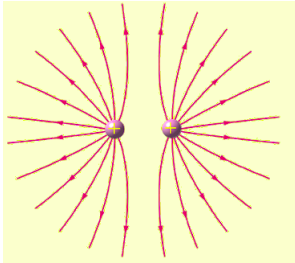
Forces entre les charges électriques

- Champ électrique



Forces entre les charges électriques

- Champ électrique

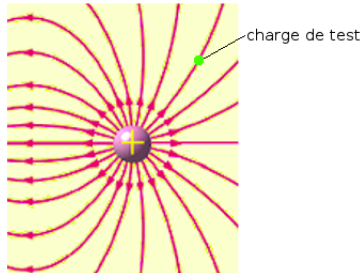


Le champ électrique

- La force exercée sur la charge de test q est définie comme :

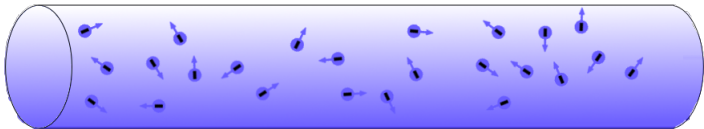
$$F = k \frac{qQ}{r^2} = q \frac{kQ}{r^2} = qE \quad (1)$$

- $\mathbf{E}$ est le **champ électrique** : la force appliquée par unité de charge électrique $\mathbf{E} = \mathbf{F}/q$.



Les charges électriques en mouvement

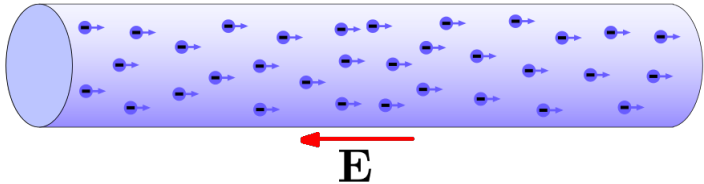
- Le mouvement des charges libres² reste chaotique tant que des forces externes ne sont pas appliquées.



2. en particulier des électrons libres qui sont présents dans les matériaux métalliques, pour mieux comprendre les différences entre les matériaux métalliques et isolants [voir la vidéo ici](#).

Les charges électriques en mouvement

- Le mouvement des charges libres² reste chaotique tant que des forces externes ne sont pas appliquées.



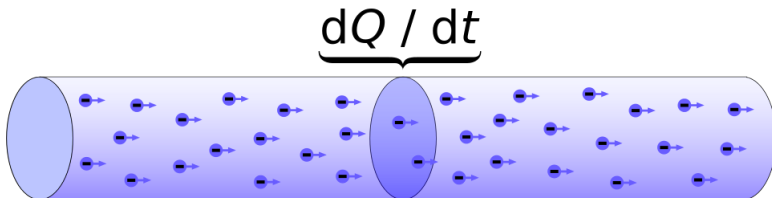
- Si des forces externes (**Champ Électrique**) sont appliquées une circulation de charge est établie, c'est le **courant électrique**.

2. en particulier des électrons libres qui sont présents dans le matériaux métalliques, pour mieux comprendre les différences entre les matériaux métalliques et isolants [voir la vidéo ici](#).

Les charges électriques en mouvement

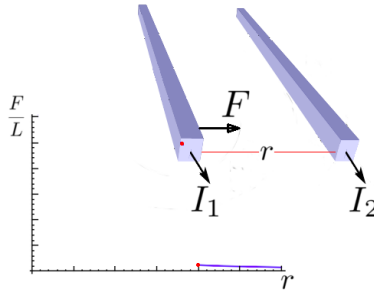
- **Courant électrique** : la quantité de charge Q qui traverse une section par unité de temps :

$$I(\text{Ampère}) = \frac{dQ \text{ (Coulomb)}}{dt \text{ (Seconde)}} \quad (2)$$



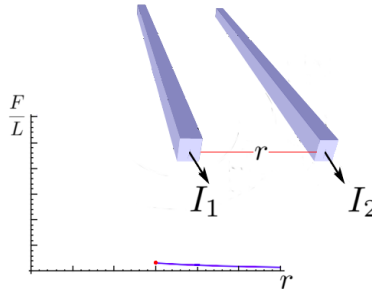
Force entre conducteurs transportant des courants

Force d'Ampère :



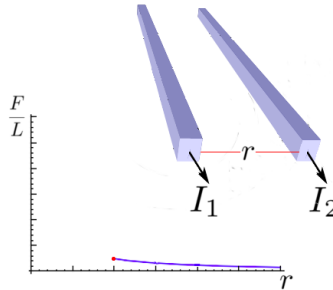
Force entre conducteurs transportant des courants

Force d'Ampère :



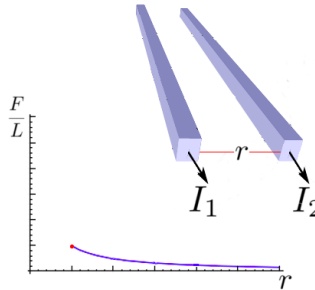
Force entre conducteurs transportant des courants

Force d'Ampère :



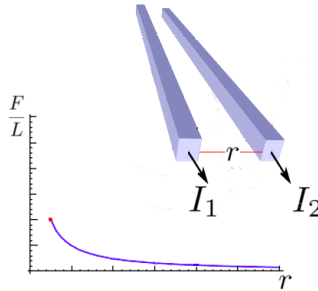
Force entre conducteurs transportant des courants

Force d'Ampère :



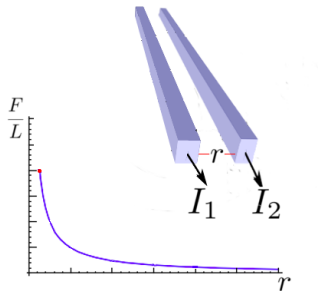
Force entre conducteurs transportant des courants

Force d'Ampère :



Force entre conducteurs transportant des courants

Force d'Ampère :

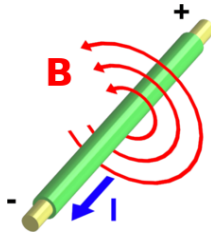


$$\frac{F}{L} = k_A \frac{I_1 I_2}{r}$$

avec $k_A \approx 2 \times 10^{-7}$ N/m, la constante d'Ampère.

Champ magnétique - courant

Création d'un champ magnétique autour du fil grâce à la circulation du courant



Le champ magnétique, caractérisé par son intensité $\mathbf{H}$ et sa densité de flux $\mathbf{B}$, décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne du conducteur.

Voir la vidéo : [Champ magnétique créé par un fil rectiligne](#)

Champ magnétique - courant

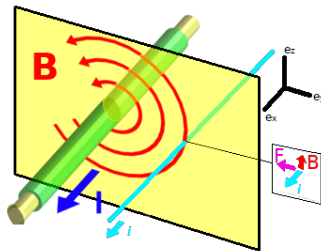
- Intuitivement, la force exercée sur un courant i peut être définie comme :

$$\frac{F}{L} \approx k_A \frac{iI}{r} = i \frac{k_A I}{r} = iB, \quad \text{d'où} \quad F = iLB$$

Plus rigoureusement (notation vectorielle - Force de Laplace),

$$d\mathbf{F} = i d\mathbf{l} \wedge \mathbf{B}$$

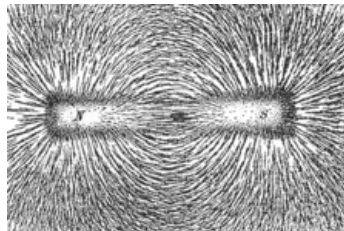
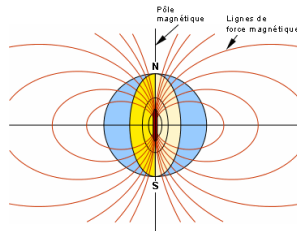
- $\mathbf{B}$ est la densité de flux du **champ magnétique**.



Champ magnétique - magnétisme naturel

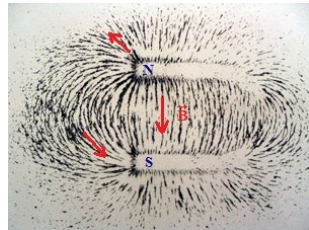
La terre possède une magnétisation naturelle.

Un barreau aimanté dans de la limaille de fer : les particules de limaille se collent sur le barreau, mais surtout aux extrémités. Ces extrémités sont appelées les **pôles**.



Champ magnétique - magnétisme naturel

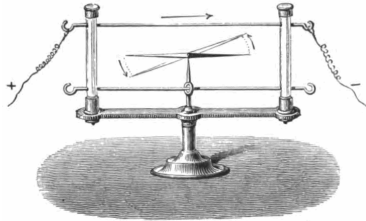
Les lignes dessinées par la limaille sont des **lignes de force ou lignes de champ**.



Voir vidéo : Des spectres magnétiques instantanés

L'expérience d'Oersted

Interaction courants - aimants, matériaux magnétiques



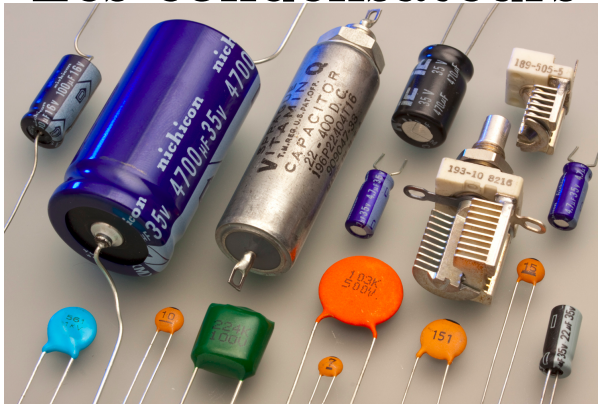
- Si on déplace une boussole le long d'un fil parcouru par un courant, l'aiguille s'oriente perpendiculairement au fil.
- Si on change le sens de parcours du courant, l'aiguille change de sens.
- Si le courant est annulé, la boussole reprend son orientation normale dans la direction du champ terrestre.

Voir la vidéo : [expérience d'Oersted](#)

Sommaire

- 1 Objectifs
- 2 Introduction/Rappel
- 3 Condensateurs
 - Principe de fonctionnement
 - Capacité
 - Régime transitoire : charge
 - Régime transitoire : décharge
 - Régime transitoire : valeurs initiales
- 4 Bobines
- 5 Condensateurs et bobines dans les SEE

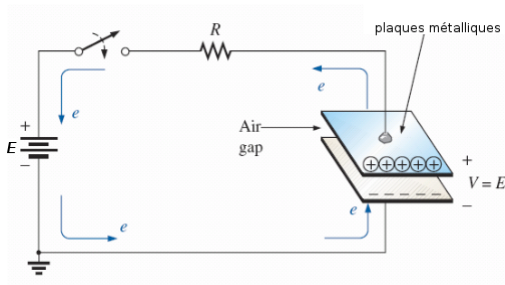
Les condensateurs



Principe de fonctionnement

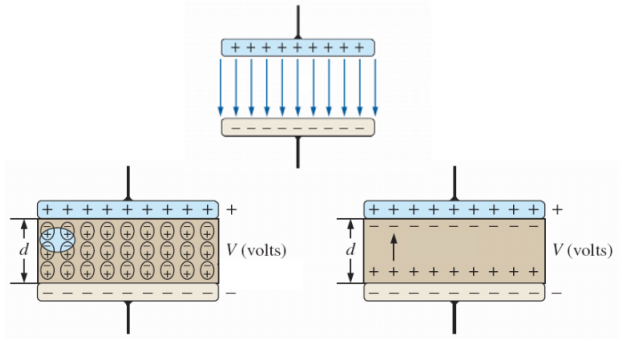
Condensateur : composant électrique capable de stocker de l'énergie dans un milieu isolant « sensible » au champ électrique.

- Un exemple : le condensateur à plaques parallèles



Principe de fonctionnement

- En présence d'un matériau non conducteur (diélectrique), le champ électrique polarise les particules de celui-ci.

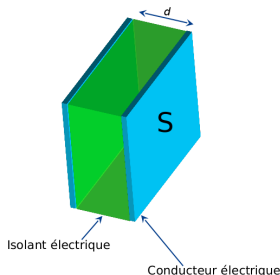


La capacité

- **Capacité** : quantité de charge stockée par unité de tension appliqué

$$C = \frac{Q}{V} \Rightarrow \frac{[\text{Coulomb}]}{[\text{Volt}]} = [\text{Farad}]$$

- La capacité dépend :
 - de la géométrie (surface de plaques S , distance de séparation d)
 - du type de diélectrique (isolant électrique) : permittivité ϵ



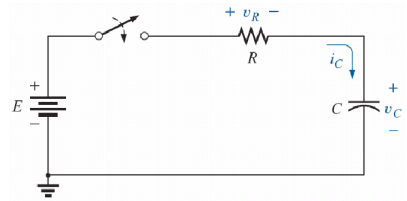
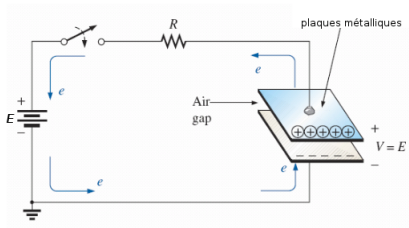
$$C = \epsilon \frac{S}{d}$$

Le condensateur

- Symboles associés :

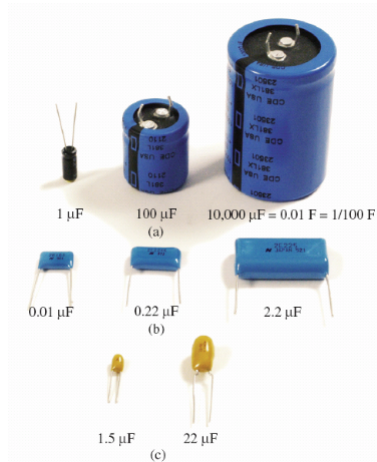


- Le circuit précédent :



Le condensateur

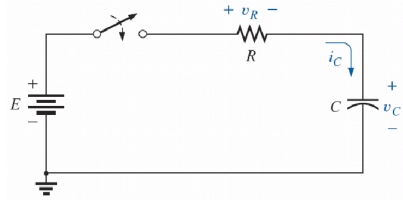
- Quelques exemples



Régime transitoire : charge

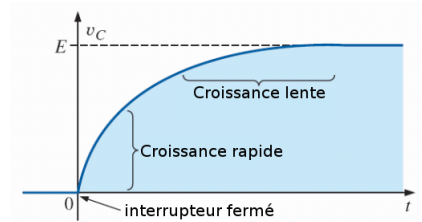
- Le charges ne vont pas *remplir* instantanément le condensateur.
- Le temps nécessaire à la charge dépend des composants présents dans le circuit.
- Le courant dans le condensateur est défini par :

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt}$$



Régime transitoire : charge

- La charge se traduit par une augmentation de la tension v_C
 $\Rightarrow$ comportement exponentiel

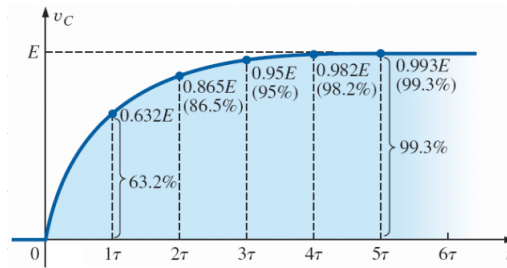


Régime transitoire : charge

- L'équation qui décrit le comportement de v_c :

$$v_c = E(1 - \exp^{-\frac{t}{\tau}})$$

- $\tau = RC$ est la constante de temps



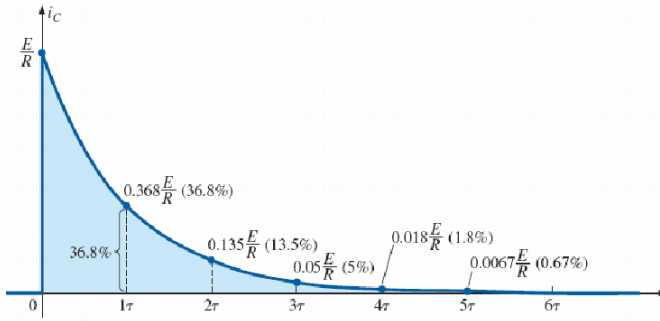
Régime transitoire : charge

- Le courant électrique i à partir de la loi de mailles :

$$E = R i + v_c$$

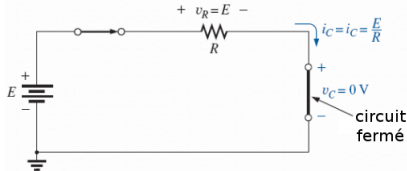
d'où,

$$i = \frac{E - v_c}{R} = \frac{E}{R} \exp^{-\frac{t}{\tau}}$$

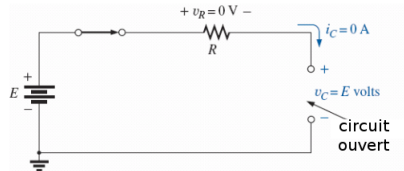


Régime transitoire : charge

- Pour $t \leq 0$, le condensateur peut être considéré comme un **circuit fermé**

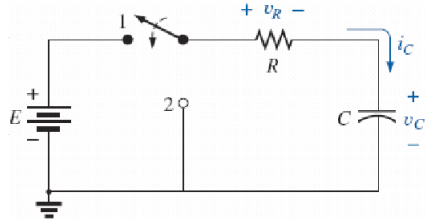


- Pour $t \gg 6\tau$, le condensateur peut être considéré comme un **circuit ouvert**

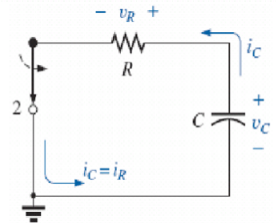


Régime transitoire : décharge

- Circuit de charge

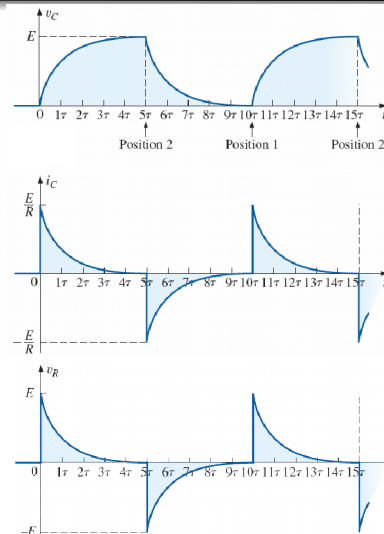


- Circuit de décharge



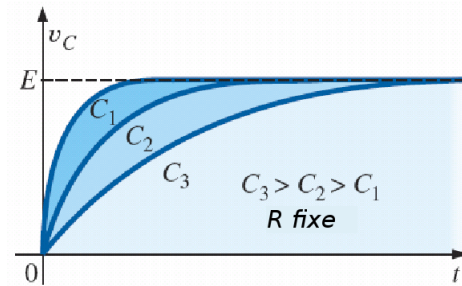
Régime transitoire : décharge

- Tension dans le condensateur v_C
- Courant dans le condensateur i_C
- Tension dans la résistance v_R



Régime transitoire

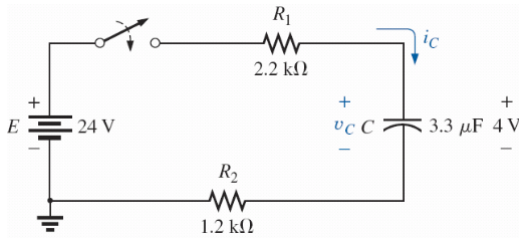
- Effet du changement de la capacité



- Même comportement pour C fixe et R variable

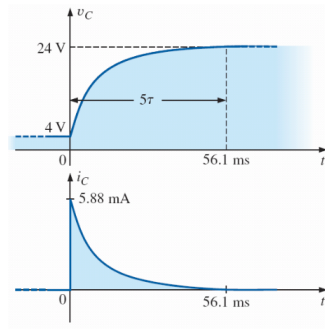
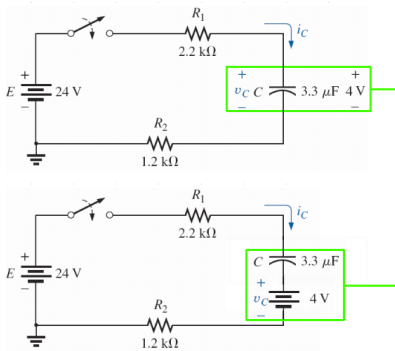
Régime transitoire : valeurs initiales

- Un exemple : condensateur chargé



Régime transitoire : valeurs initiales

- Un exemple : condensateur chargé

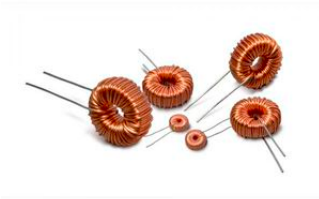


- À $t = 0$ le condensateur peut être assimilé à une source en série avec le condensateur.

Sommaire

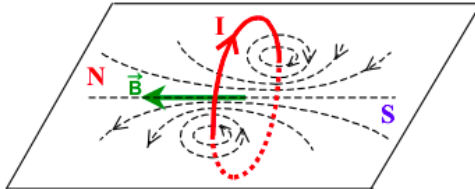
- 1 Objectifs
- 2 Introduction/Rappel
- 3 Condensateurs
- 4 Bobines
 - Principe de fonctionnement
 - L'inductance
 - Régime transitoire : introduction
 - Régime transitoire
 - Régime transitoire : valeurs initiales
- 5 Condensateurs et bobines dans les SEE

Les bobines



Principe de fonctionnement

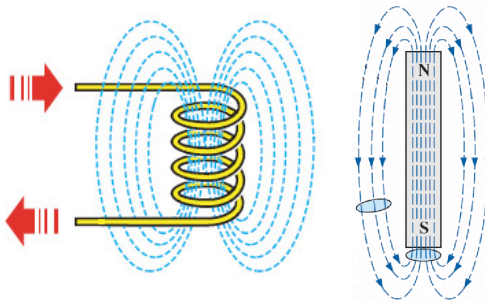
Spire : boucle de fil enroulé autour d'un noyau. Lorsqu'un courant électrique circule, un champ magnétique est produit.



Courant électrique et champ magnétique

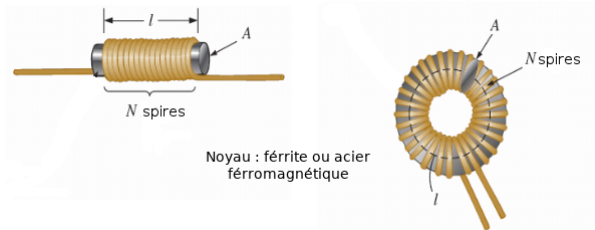
Bobine : ensemble de spires parcouru par un courant I . Composant électrique capable de stocker de l'énergie dans un milieu « sensible » au champ magnétique.

Une bobine va créer l'équivalent d'un aimant :



Inductance

Inductance : rapport entre le champ magnétique créé et le courant injecté dans une bobine. Cette quantité mesure le champ magnétique qui peut être emmagasiné par une bobine.

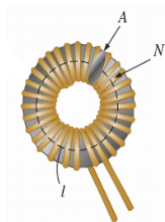


$$L = \frac{NB A}{i} = \frac{N\phi}{i} \Rightarrow \frac{[\text{Webers}]}{[\text{Ampères}]} = [\text{Henrys}]$$

Inductance

L'inductance dépend de caractéristiques géométriques (**nombre de spires N , longueur l et section A du circuit magnétique**), et du type de matériau qui constitue le noyau de la bobine (**perméabilité magnétique μ**).

Pour le noyau toroïdal,



$$L = \frac{N\phi}{i} = \frac{N^2}{\frac{l}{\mu S}}$$

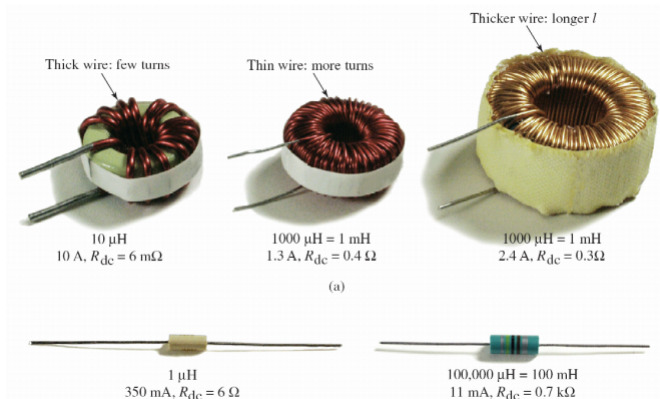
Inductance

- Symboles associés :



Inductance

- Quelques exemples



Régime transitoire

Avant de commencer l'analyse transitoire, il faut définir quelques notions :

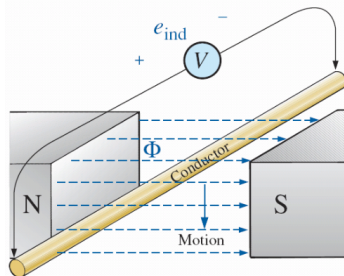
- Tension induite (Loi de Faraday)
- Polarité de la tension induite (Loi de Lenz)

Loi de Faraday : tension induite

Un conducteur qui se déplace dans un champ magnétique (en coupant les lignes de champ à angle droit) génère une tension induite e_{ind} aux extrémités.

Cette tension dépend de :

- le champ magnétique B
- la longueur "utile" l du conducteur,
- la vitesse de déplacement v .



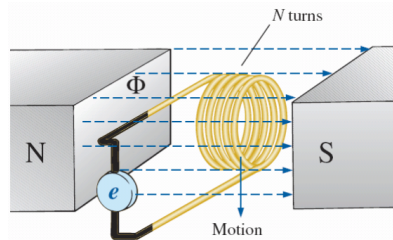
$$e_{\text{ind}} = Blv$$

Loi de Faraday : tension induite

Une bobine *plongée* dans un champ magnétique variable génère une tension induite e_{ind} .

Cette tension dépend de :

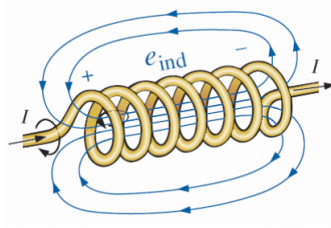
- le flux magnétique $\Phi = B A$,
- la géométrie de la bobine (nombre de spires, section)



$$e_{\text{ind}} = N \frac{d\Phi}{dt}$$

Loi de Lenz : polarité de e_{ind}

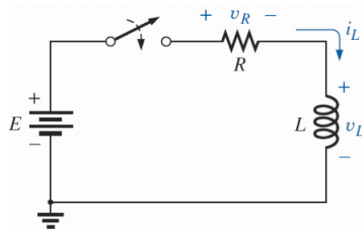
La tension induite e_{ind} aura tendance à produire un courant opposée au courant initial.



Régime transitoire : charge

- Le champ magnétique ne va pas *se créer* instantanément dans le noyau.
- Le temps nécessaire à la création dépend du type de matériaux (perméabilité μ).
- La tension dans la bobine est défini par :

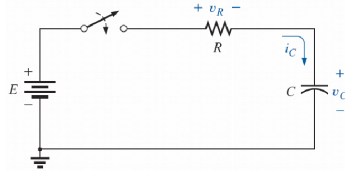
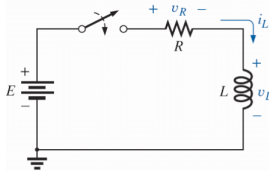
$$v_L = L \frac{di_L}{dt}$$



Régime transitoire

Le régime transitoire est complémentaire à celui des condensateurs :

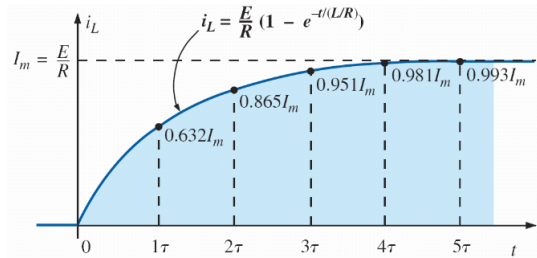
- Le courant dans l'inductance i_L est équivalent (comportement) à la tension dans le condensateur v_C .
- La tension dans l'inductance v_L est équivalent (comportement) au courant dans le condensateur i_C .



Régime transitoire

Le régime transitoire et complémentaire à celui des condensateurs :

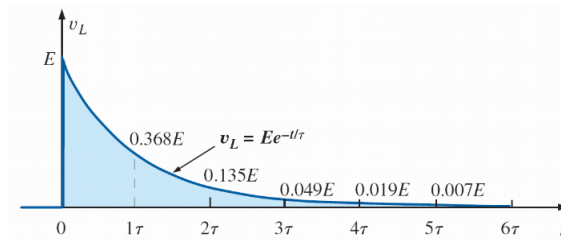
- Le courant dans l'inductance i_L a le même comportement exponentiel de la tension dans le condensateur v_C .



Régime transitoire

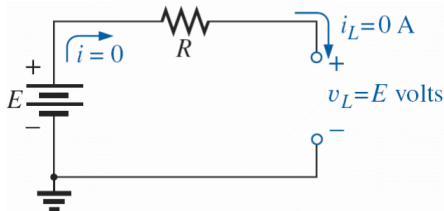
Le régime transitoire est complémentaire à celui des condensateurs :

- Pendant la phase de charge la tension dans l'inductance v_L a le même comportement exponentiel du courant dans le condensateur i_C .

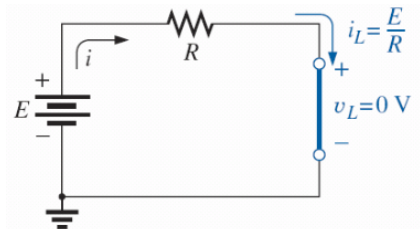


Régime transitoire

- Pour $t \leq 0$, l'inductance peut être considéré comme un **circuit ouvert**



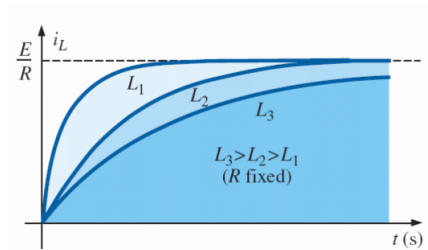
- Pour $t \gg 6\tau$, l'inductance peut être considéré comme un **circuit fermé**



Le courant dans une inductance ne peut pas changer instantanément.

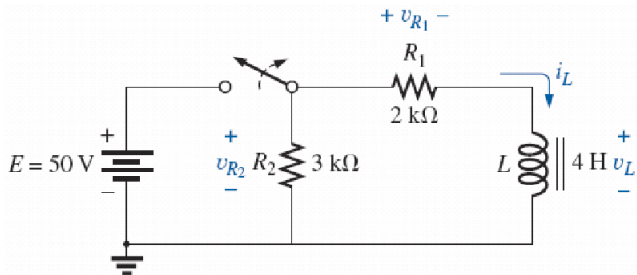
Régime transitoire

- Effet du changement de l'inductance



Régime transitoire : valeurs initiales

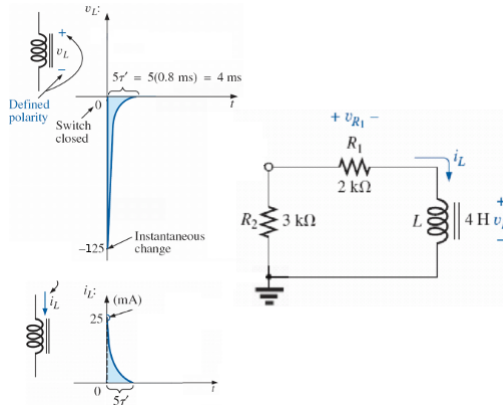
- Un exemple : inductance chargée



L'interrupteur est fermé un temps suffisamment long pour charger l'inductance, il s'ouvre à $t = 0$

Régime transitoire : valeurs initiales

- Un exemple : inductance chargée

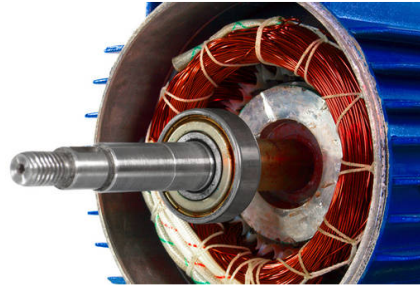


- À $t = 0$ l'inductance peut être assimilée à une source de courant en série avec l'inductance.

Sommaire

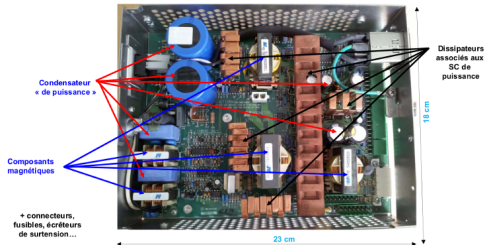
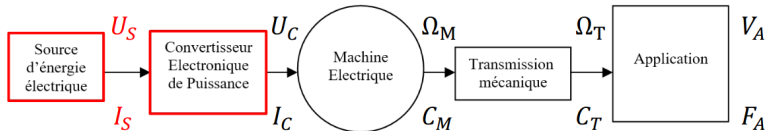
- 1 Objectifs
- 2 Introduction/Rappel
- 3 Condensateurs
- 4 Bobines
- 5 Condensateurs et bobines dans les SEE
 - Types de condensateurs
 - Types des bobines

Condensateurs et bobines dans les SEE



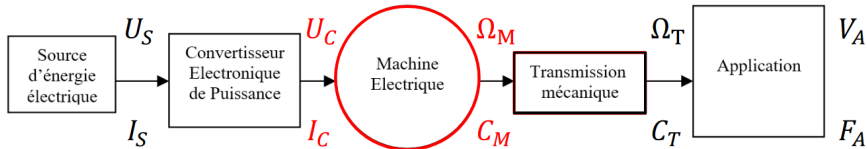
Condensateurs et bobines dans les SEE

Où les trouver ?



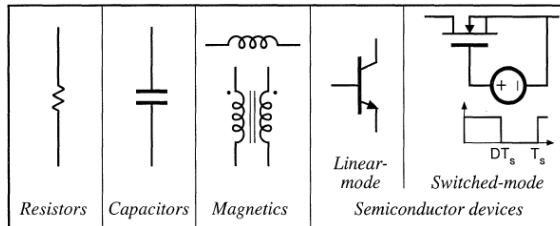
Condensateurs et bobines dans les SEE

Où les trouver ?



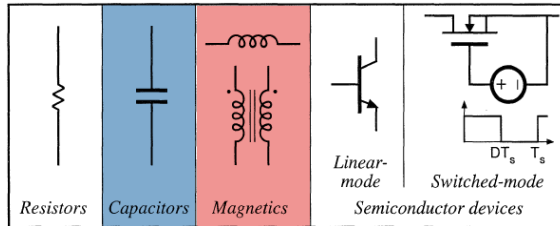
Condensateurs et bobines dans les SEE

Types de composants - convertisseurs :



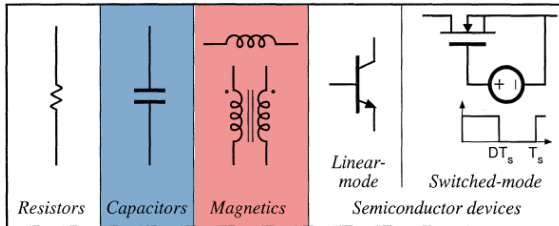
Condensateurs et bobines dans les SEE

Types de composants - convertisseurs :



Condensateurs et bobines dans les SEE

Types de composants dans le CEP :



Condensateurs dans les SEE

Types de condensateurs :

1. Film plastiques, papier ou mixtes



Technologies film plastique (polypropylène)

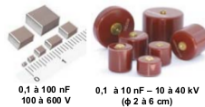
Condensateurs dans les SEE

Types de condensateurs :

1. Film plastiques, papier ou mixtes
2. Céramiques



Technologies film plastique (polypropylène)



Technologies céramiques

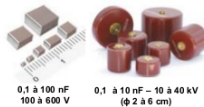
Condensateurs dans les SEE

Types de condensateurs :

1. Film plastiques, papier ou mixtes
2. Céramiques
3. Électrolytiques



Technologies film plastique (polypropylène)



Technologies céramiques



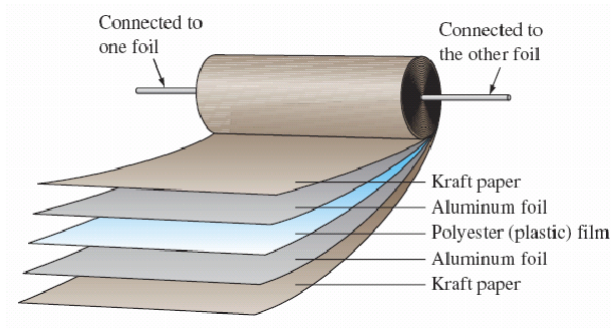
Technologies électrochimiques

Condensateurs dans les SEE

Types de condensateurs :

1. Film plastiques, papier ou mixtes

- Film métallisée avec une fine couche d'aluminium (armatures : *foils*).

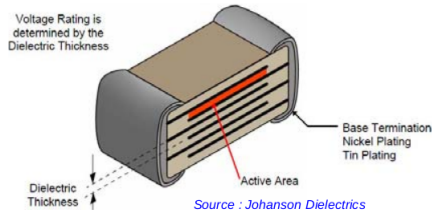


Condensateurs dans les SEE

Types de condensateurs :

2. Céramiques

- Des possibilités de température élevée
- Si Ferroélectriques (BaTiO_3) $\Rightarrow$ permittivité très élevée (1000 à 20000)
- Énergie volumique élevée
- Longue durée de vie
- Prix élevé

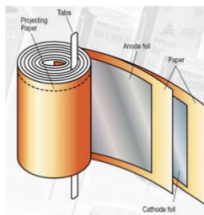


Condensateurs dans les SEE

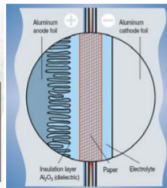
Types de condensateurs :

3. Électrolytiques

- Nécessitent d'être polarisés pour créer un oxyde isolant $\Rightarrow$ condensateurs polarisés.
- Electrolytes : liquides, gélifiés ou polymères
- Tensions : jusqu'à 600 V (aluminium) ou 100 V (tantale)
- Aux basses températures : forte dégradation des performances
- Aux hautes températures : accroissement du courant de fuites...
- Forte énergie volumique, surtout en « haute tension »

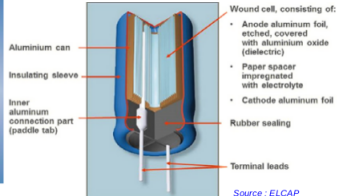


Aluminium



Source : EPCOS

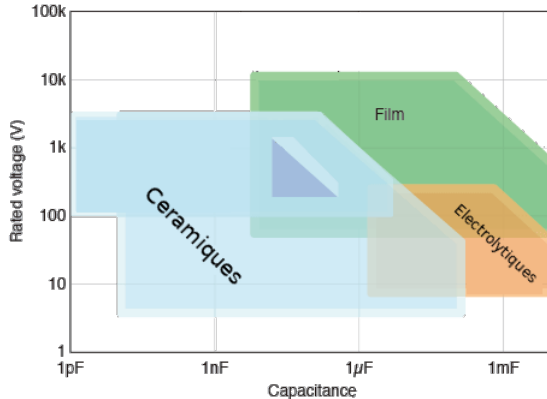
Tantale



Source : ELCAP

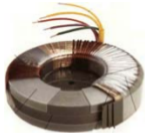
Condensateurs dans les SEE

Domaines d'utilisation :

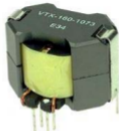


Bobines dans les SEE

Composant essentiel des convertisseurs statiques :



Transformateur torique,
circuit feuilleté enroulé



Transformateur
sur pot ferrite



Inductance torique
matériau faible μ



Inductance, circuit ferrite
avec entrefer



Transformateur
de courant



Transformateurs
d'impulsions

Bobines dans les SEE

Composant essentiel des machines électriques :

