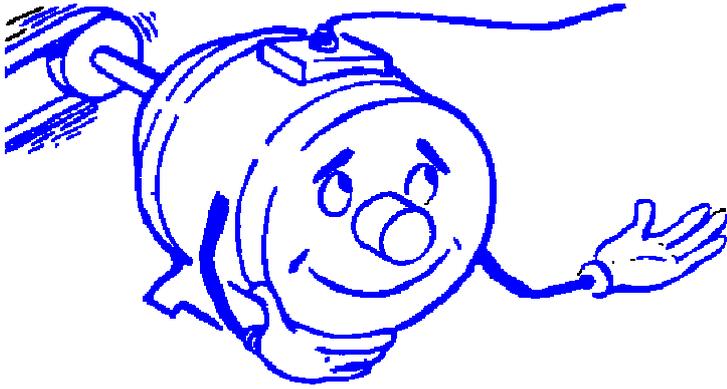


La machine à courant continu

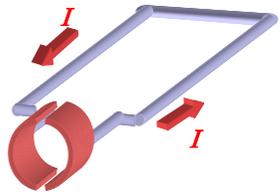


Ce cours utilise de nombreux ouvrages et sites web sur lesquels j'ai repris des photos ou des diagrammes.
Je tiens à remercier toutes les personnes qui directement et/ou indirectement ont contribué à l'enrichissement de ce cours.

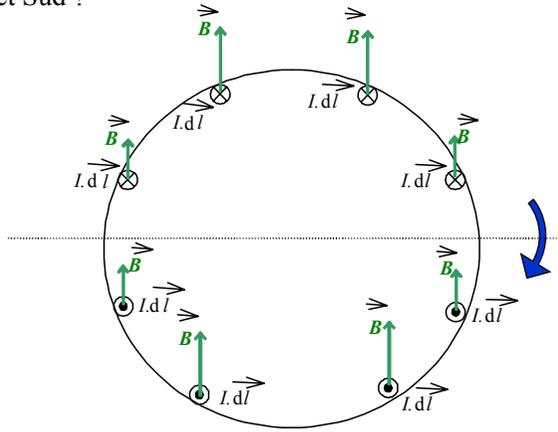


Fonctionnement en moteur des MCC

Hypothèse :
On considère un champ magnétique constant
Ou se trouvent les pôles Nord et Sud ?



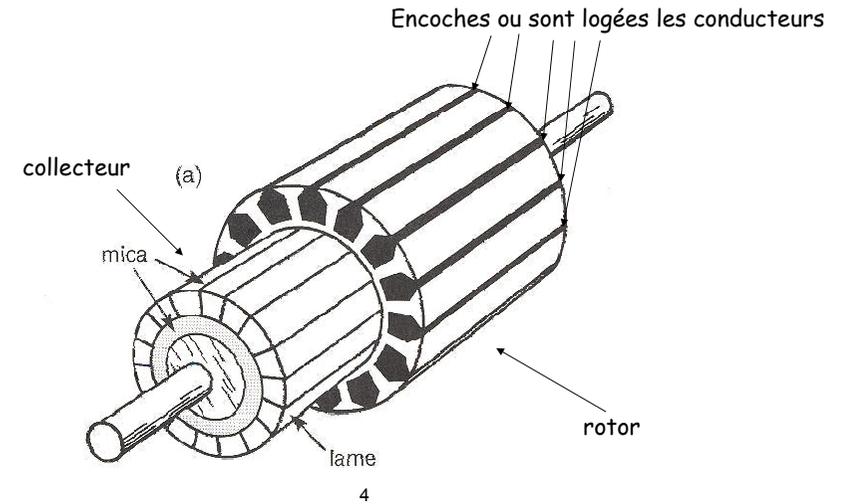
Où se trouvent
les pôles Nord et Sud ?



Sous un pôle magnétique les courants des encoches circulent tous dans le même sens et sont orthogonaux au champ magnétique

3

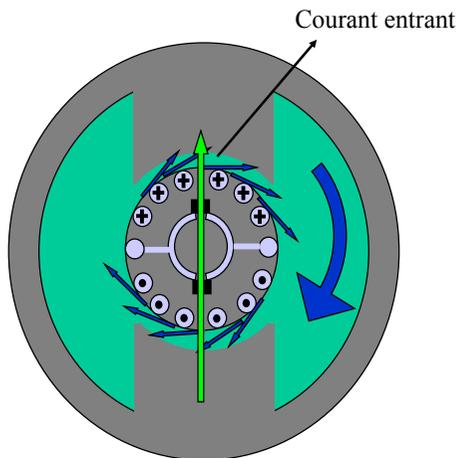
Fonctionnement en moteur des MCC



4

Fonctionnement en moteur des MCC

On essaye d'implanter un grand nombre de « cadres de courant » au rotor.
-> encoche

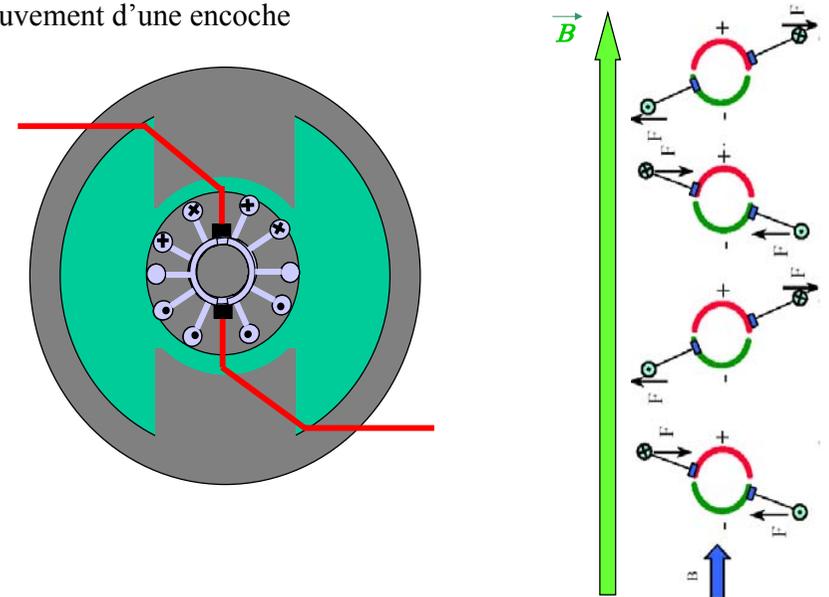


Sous un pôle magnétique les courants **des encoches** circulent tous dans le même sens et sont orthogonaux au champ magnétique

5

Principe d'aiguillage du courant dans une encoche

Mouvement d'une encoche



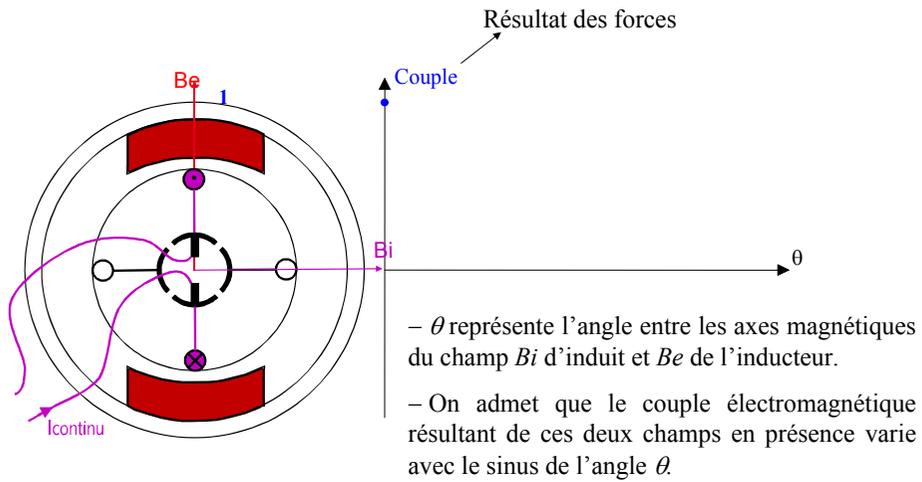
6

Origine du couple

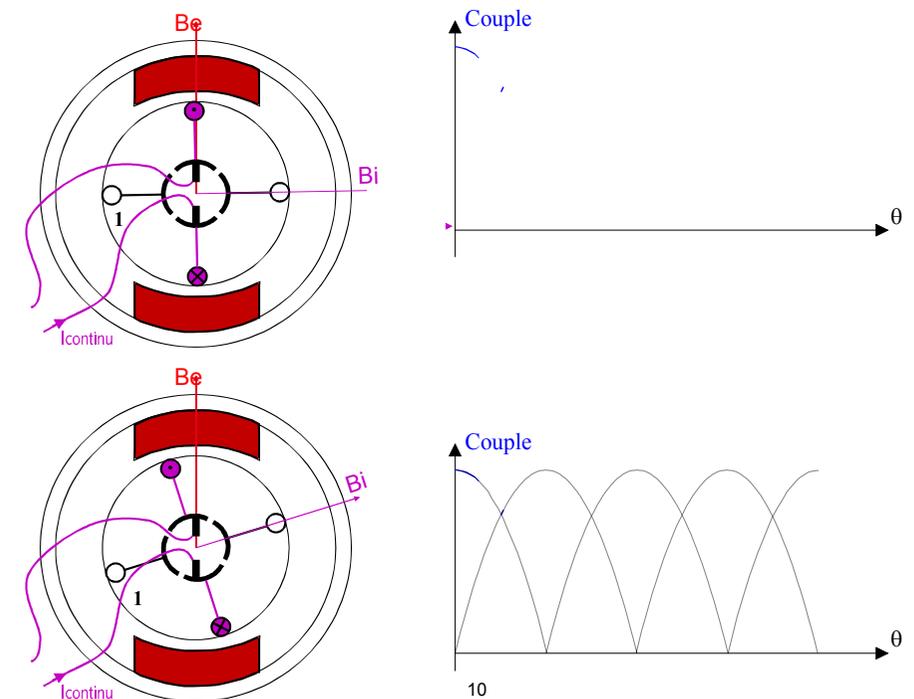
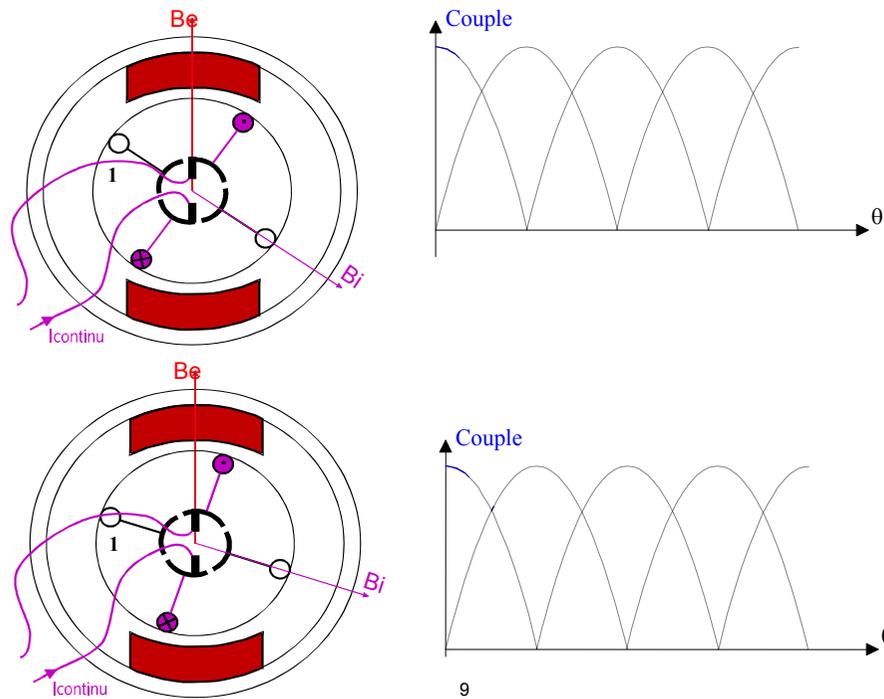
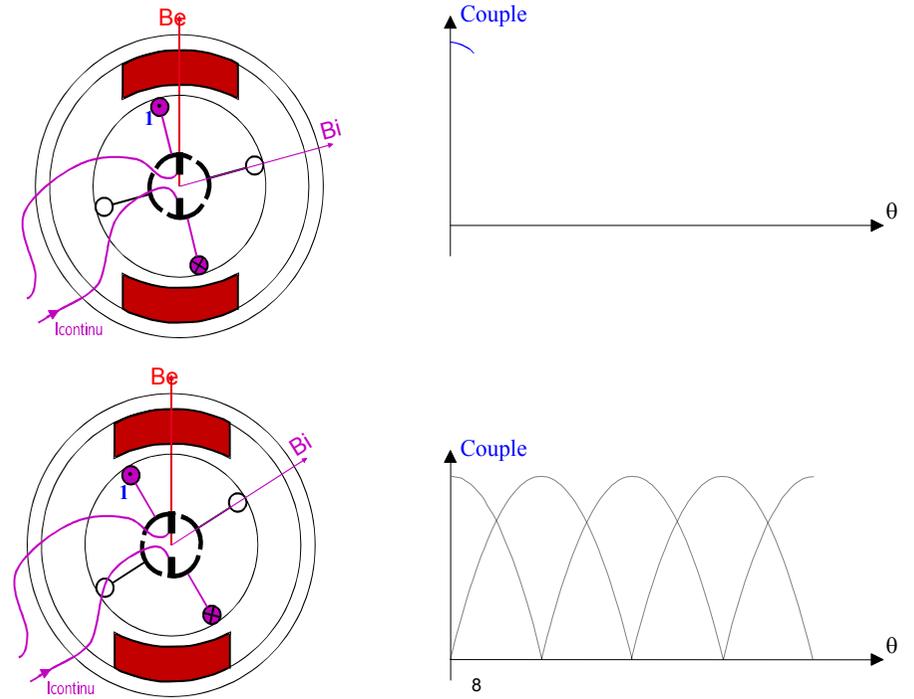
B_e est le champ magnétique créé par l'excitation (B)

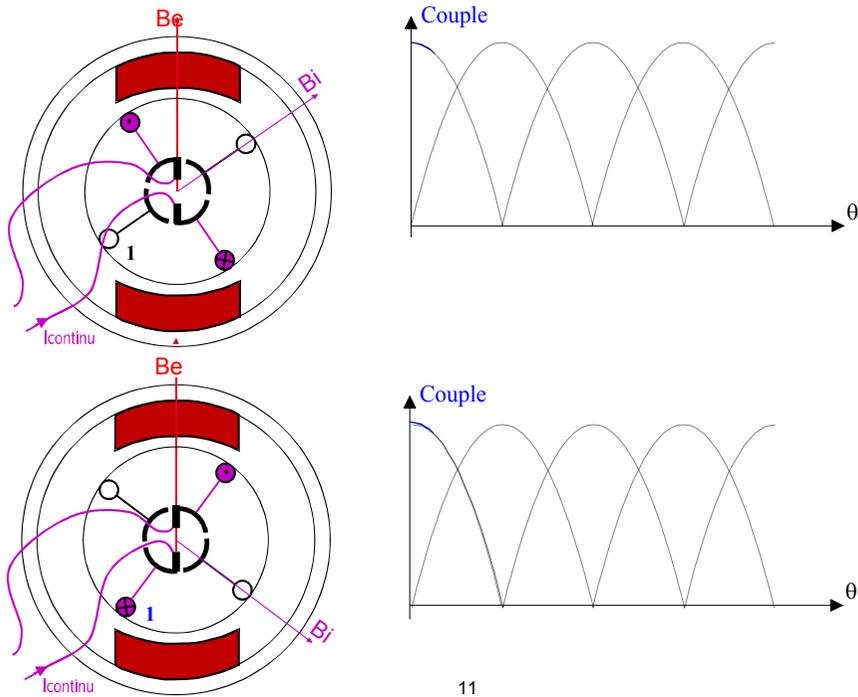
B_i est le champ magnétique créé par les courants à l'induit

La force exercée entre ces deux champs est à l'origine de forces motrices

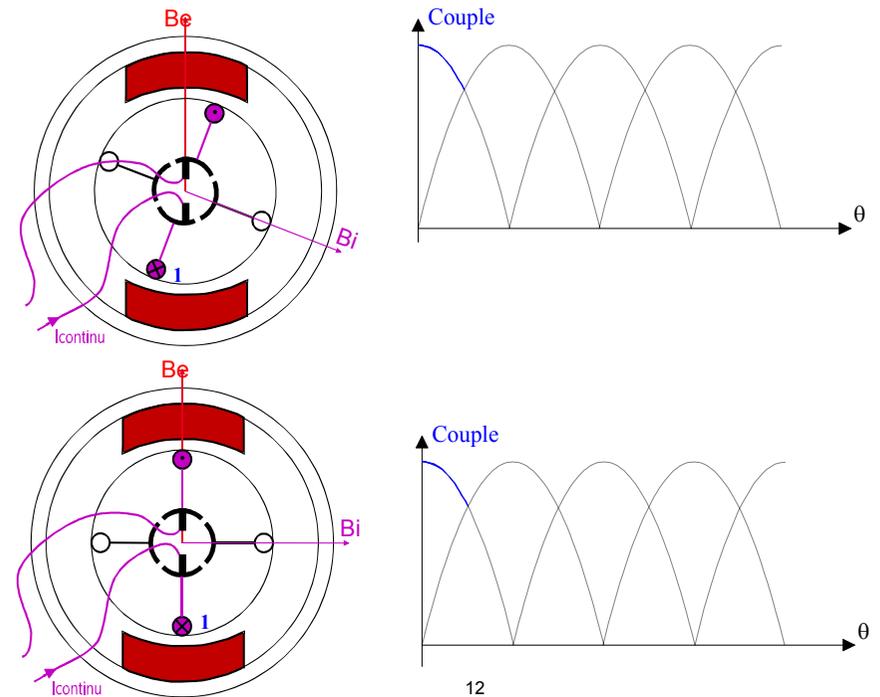


7





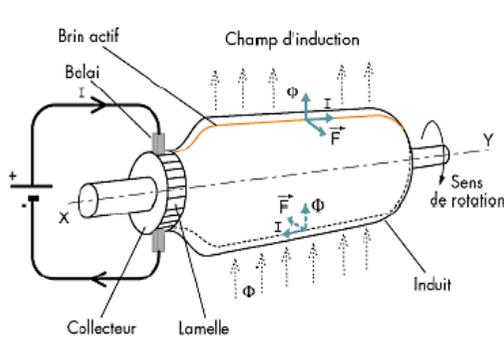
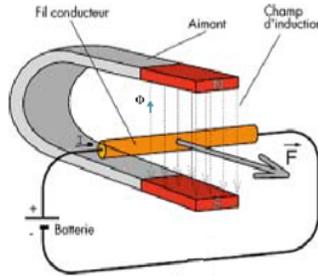
11



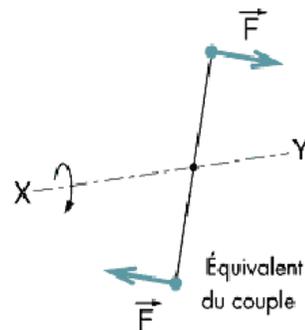
12

Construction du moteur à courant continu

Chaque fil conducteur est soudé à ses extrémités sur deux lamelles du collecteur.
 Le collecteur solidaire de l'induit alimente tour à tour chaque brin actif par l'intermédiaire des balais et des lamelles.
 Il assure ainsi l'alimentation synchronisée de chaque brin.

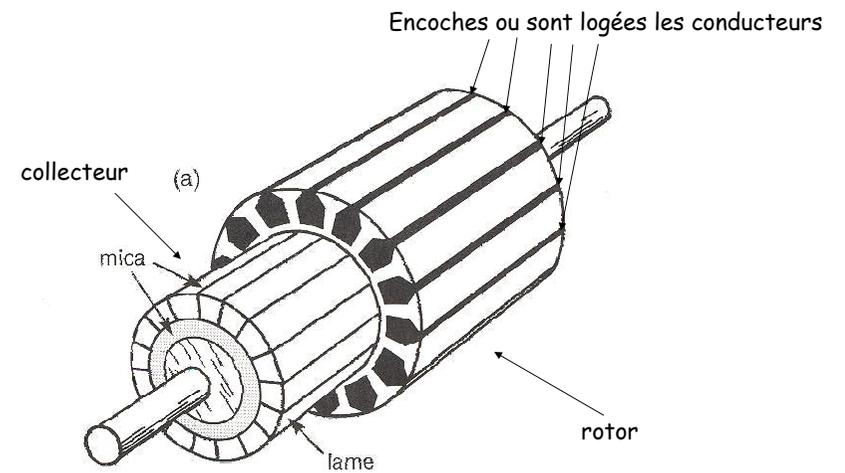


13



Le collecteur

- Ensemble cylindrique de lames de cuivre isolées les unes des autres
- Chaque lame est soudée à un des deux fils sortant d'une des bobines de l'induit
- Il tourne avec le rotor

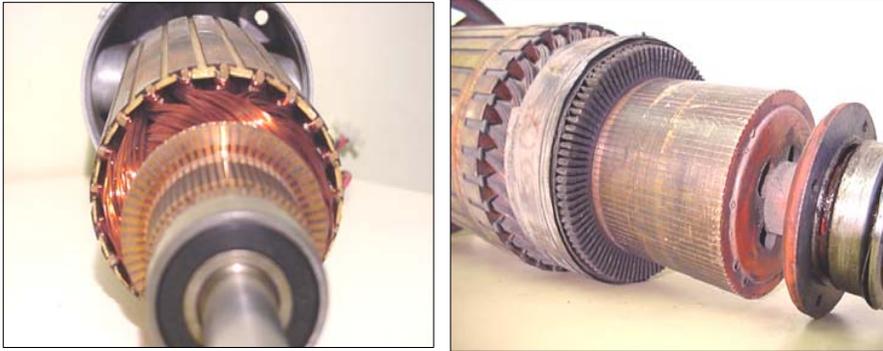


14

Le collecteur

Il est essentiellement constitué par une juxtaposition cylindrique de lames de cuivre séparées par des lames isolantes.

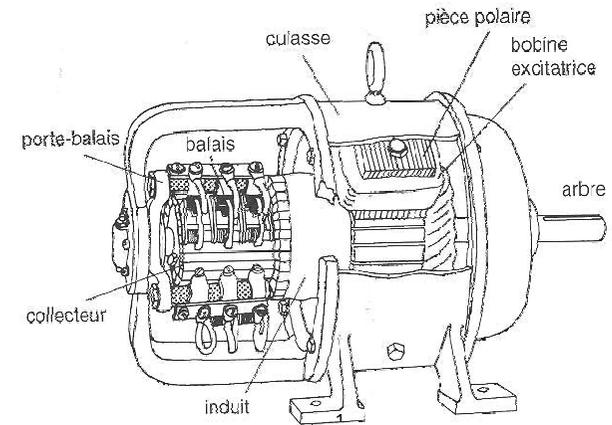
Chaque lame est reliée électriquement au bobinage induit.



15

Balais

- Faits en carbone en raison de sa bonne conductivité électrique et de son faible coefficient de frottement
- Assurent la liaison électrique (contact glissant) entre la partie fixe et la partie tournante.
- En s'appuyant sur le collecteur, assurent un contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur
- Dans une machine à enroulements imbriqués, il y a autant de balais que de pôles magnétiques inducteurs



Balais

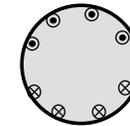
- Pour des machines de forte puissance, la mise en parallèle des balais est alors nécessaire.



17

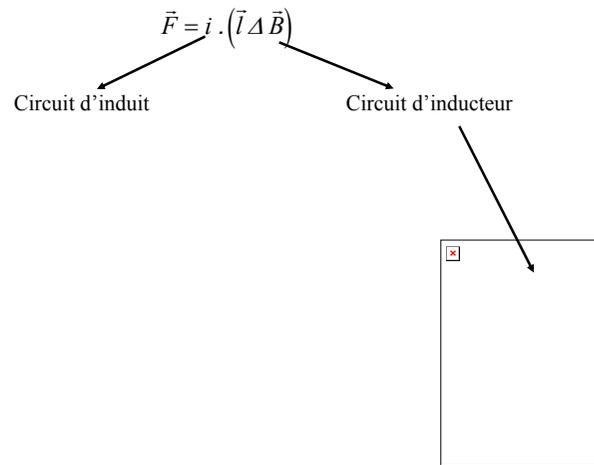
Le rotor

- * Cylindre plan
- * Ferromagnétique
- * Creusés d'encoches ou sont logés des conducteurs
- * constitué de tôles circulaires isolées et empilées sur l'arbre de façon à obtenir le cylindre d'induit.
- * Ces tôles sont en acier au silicium et isolées par vernis.



18

Principe de la machine électrique

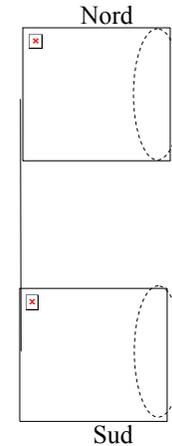


La machine est composée de deux circuits bobinés :
 _ un circuit inducteur qui va créer le champ magnétique et
 _ un circuit d'induit dont lequel doit circuler le courant (i)

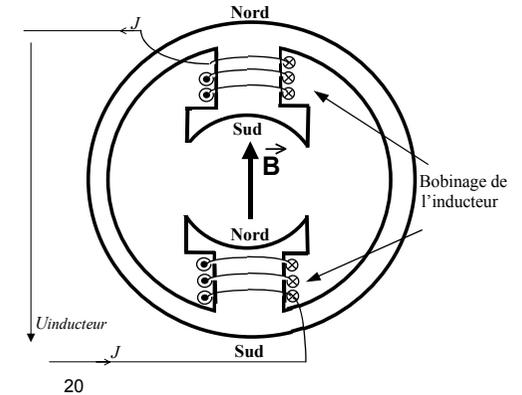
19

Le circuit inducteur

- Il crée le champ magnétique d'excitation au sein du stator : l'inducteur (bobiné)
- Aussi appelé «circuit de champ» ou «circuit d'excitation »
- Constitué de bobines série enroulées autour de noyaux ferromagnétiques portés par le stator



- Les bobines excitatrices d'un inducteur multipolaire sont connectées de façon à ce que les pôles adjacents aient des polarités magnétiques contraires



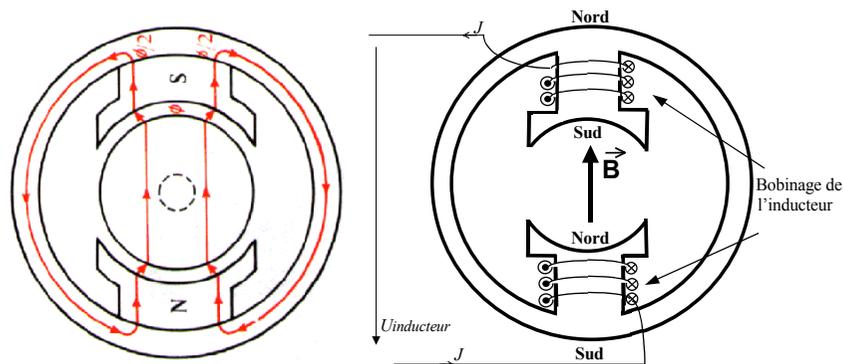
20

Le circuit inducteur

• Armature ferromagnétique fixe

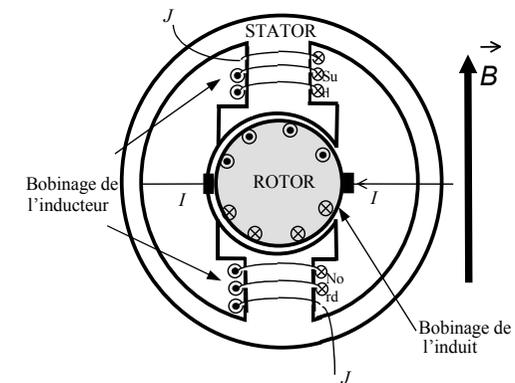
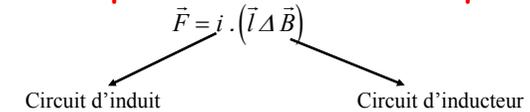
* Un courant continu (J) produit un champ magnétique qui traverse le circuit induit, le flux magnétique dépend de la surface.

* Sa permittivité (conductivité magnétique) est supérieure à celle de l'air, le stator canalise le flux (lignes rouge)



21

Principe de la machine électrique

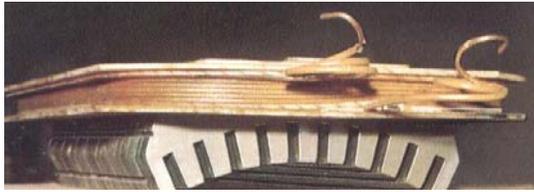


La machine est composée de deux circuits bobinés :
 _ un circuit inducteur qui va créer le champ magnétique et
 _ un circuit d'induit dont lequel doit circuler le courant (i)

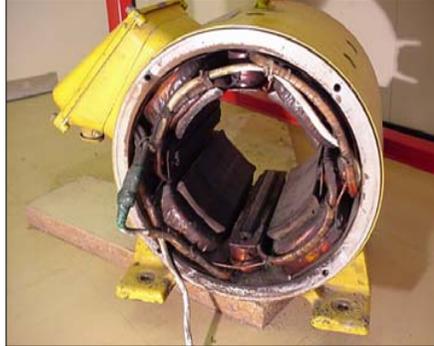
22

Le circuit inducteur

Pôle inducteur



stator



23

Inducteur à aimant permanent

Il existe aussi des machines dont le champ magnétique inducteur est créé par des aimants permanents.

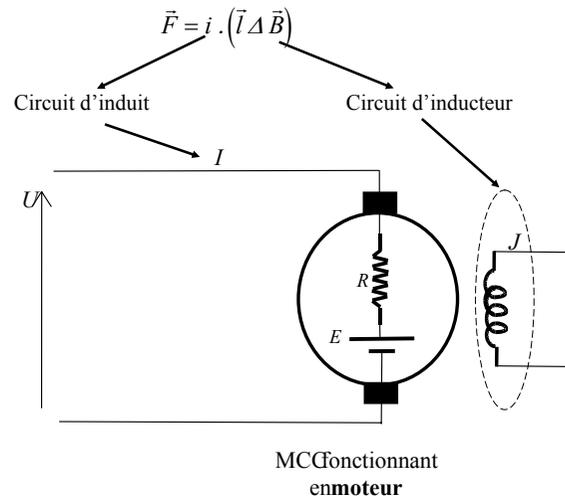
Les pertes joules sont supprimées mais l'excitation magnétique est fixe.

Mais, dans les grosses machines, le coût des aimants pénalise cette solution.



24

Principe de la machine électrique



Machine composée de deux circuits bobinés (un circuit inducteur et un circuit induit) et d'un dispositif de commutation (collecteur et balais)

25

Expression du Couple Electro-Mécanique Démonstration No 1

Force exercée par un conducteur : $d\vec{F} = i_c (d\vec{l} \Delta \vec{B})$
 i_c , courant circulant dans un conducteur

Sur toute la longueur (l), B est constant :

Couple exercé par un conducteur situé à une distance r (rayon) de l'axe de rotation:

$$C_{em}/\text{conducteur} = r \cdot i_c \cdot l \cdot B$$

Couple exercé par toutes les encoches sous un pôle :

$$C_{em}/\text{pole} = \sum_{k=1}^{\frac{n_e}{2}} r \cdot n \cdot i_c \cdot l \cdot dB_k$$

26

Expression du Couple Electro-Mécanique Démonstration No 1

On définit le champ magnétique moyen sous un pôle : $\langle B \rangle = \frac{1}{\frac{n_e}{2}} \sum_{k=1}^{\frac{n_e}{2}} B_k$

$$C_{em/pole} = r \cdot n \cdot i_c \cdot l \cdot \frac{n_e}{2} \cdot \langle B \rangle$$

On exprime le flux magnétique moyen traversant le 1/2 cylindre (rotor sous un pôle) :

$$\langle \Phi \rangle = \int_{aire} \langle B \rangle dA$$

Périmètre d'un demi cylindre (sous un pôle) : $\pi \cdot r$

Aire d'un demi cylindre (sous un pôle) :

Couple total : $C_{em} = n \cdot i_c \cdot \frac{n_e}{\pi} \cdot \langle \Phi \rangle$

27

Expression du Couple Electro-Mécanique Démonstration No 1

De part la mise en parallèle de deux voies d'enroulement : $i_c = \frac{i}{2}$



Couple total : $C_{em} = n \cdot i \cdot \frac{n_e}{2 \cdot \pi} \cdot \langle \Phi \rangle$



28

Expression du Couple Electro-Mécanique Démonstration No 2

i_c , courant circulant dans un conducteur

1 encoche comporte n conducteurs, le courant d'encoche $\rightarrow n \cdot i_c$

Considérons un déplacement angulaire virtuel $d\theta$ du rotor choisi égal à : $\frac{2\pi}{n_e}$

Le courant d'encoche de rang k coupe le flux d'induction $d\phi_k$ issu du pôle Nord, ainsi le travail virtuel exercé sur l'encoche s'exprime par :

$$dT_k = n \cdot i_c \cdot d\phi_k$$

Et, la dérivée du travail est liée au couple par :

$$dT_k = C_{em_k} \cdot d\theta$$

$$C_{em_k} = n \cdot \frac{i_c}{d\theta}$$

29

Expression du Couple Electro-Mécanique Démonstration No 2

$$C_{em_k} = n \cdot \frac{i_c}{d\theta}$$

La somme des couples développés sur les encoches de rangs 1 à $\frac{n_e}{2}$ s'écrit donc :

$$= \sum_{k=1}^{\frac{n_e}{2}} n \cdot i_c \cdot \frac{d\phi_k}{d\theta} = \sum_{k=1}^{\frac{n_e}{2}} \frac{n \cdot i_c}{\frac{2\pi}{n_e}} \cdot d\phi_k$$

Si on considère la contribution des encoches de rang $\frac{n_e}{2}$ à n_e , alors on obtient pour le couple électromoteur résultant :

$$C_{em} = \frac{n_e \cdot n \cdot i_c}{\pi} \cdot \sum_{k=1}^{\frac{n_e}{2}} d\phi_k$$

30

Expression du Couple Electro-Mécanique Démonstration No 2

$$C_{em} = \frac{n_e \cdot n_c \cdot i_c}{\pi} \cdot \sum_{k=1}^{\frac{n_e}{2}} d\phi_k$$

Flux total sortant du pôle Nord

$$C_{em} = \frac{n_e \cdot n_c \cdot i_c}{\pi} \cdot \langle \phi \rangle$$

En fonction du courant total

$$C_{em} = \frac{n_e \cdot n_c \cdot i}{2 \cdot \pi} \cdot \langle \phi \rangle$$

A flux constant

$$C_{em} = k \cdot i$$

i courant d'induit

La machine à courant continu **produit un couple électro-moteur** (effet)

proportionnel au courant d'induit (cause)

D'où provient ce courant ?

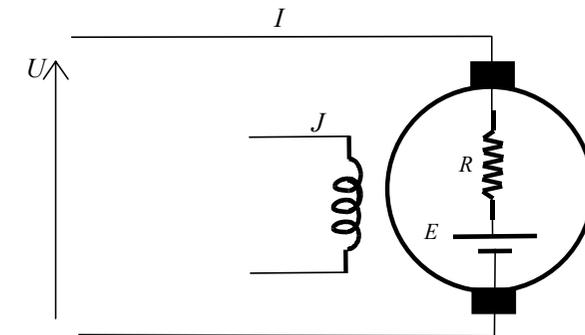
31

Réversibilité de l'actionneur

La rotation du rotor génère une tension induite (E) qui s'oppose à la tension appliquée aux bornes de l'induit (U).

C'est la force contre-électromotrice qui va s'opposer au mouvement

Principe de la loi de Lenz



MCC fonctionnant
en **moteur**

32

Origine du phénomène de l'induction électromagnétique (voir cours précédent)

Contexte :

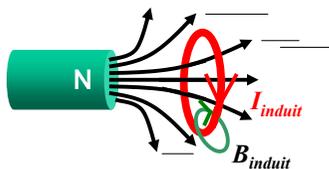
Les conducteurs logés dans une encoche traversent un champ magnétique, ils voient donc une variation de ce champ.

Quand une spire est traversée par un champ magnétique variable, il y apparaît un courant dit « courant induit ». C'est la loi de Lenz.

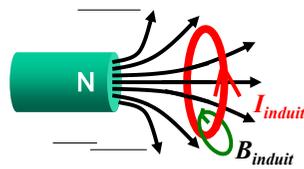
Principe :

Dans un conducteur, il y apparaît un courant dit « courant induit » qui va créer un champ magnétique induit (effet) B_{induit} qui va s'opposer à la variation du champ magnétique traversé (cause).

Si, dans la spire, B_e diminue



Si, dans la spire, B_e augmente



33

Application de la loi de Lenz sur un circuit électrique

Un flux coupé par un conducteur engendre

_ une force contre électro-motrice (qui s'oppose au mouvement) induite dans ce dernier,

_ d'expression :

$$e_k = - \frac{d\phi_k}{dt} \quad (\text{Loi de Faraday})$$

Cette force électro-motrice produit un courant induit de même sens (convention générateur).

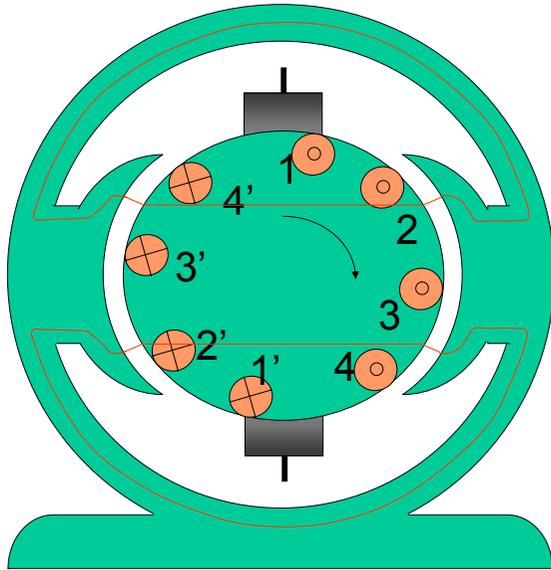
Ce courant induit fait apparaître une force de Laplace qui tend à s'opposer au mouvement.

Ainsi, la force électro-motrice (f.e.m.) induite par son effet tend toujours à s'opposer à la cause (mouvement) qui l'a fait disparaître :

Loi de Lenz

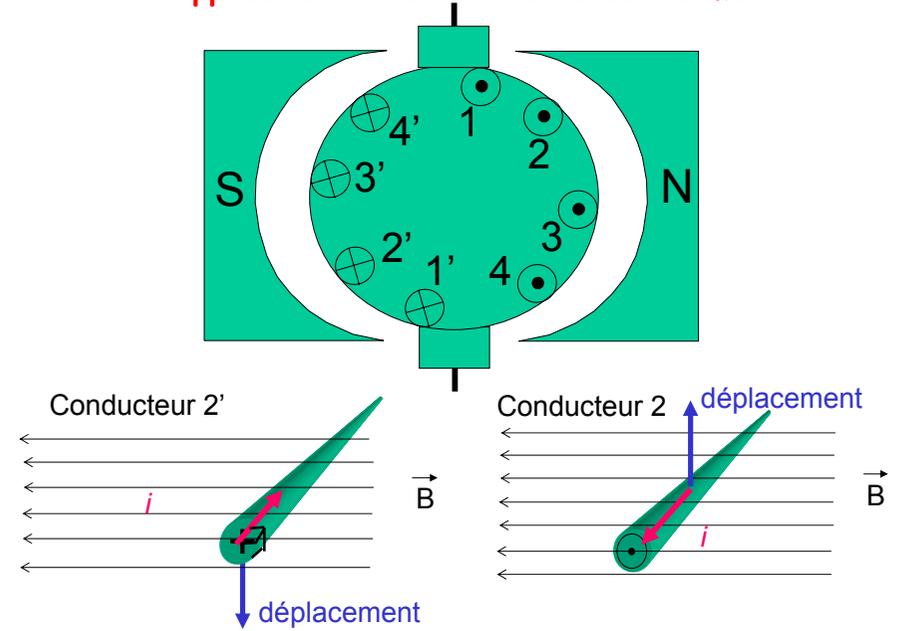
34

Application de la loi de Lenz sur la mcc



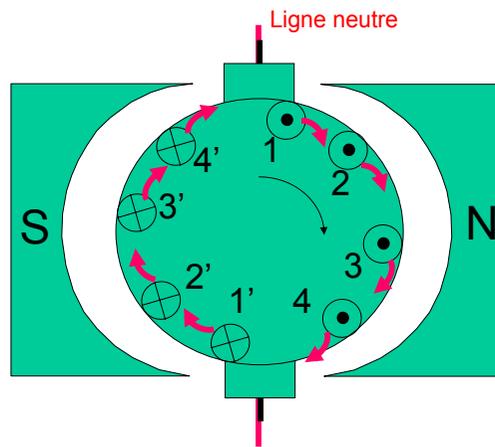
35

Application de la loi de Lenz sur la mcc



36

Application de la loi de Lenz sur la mcc

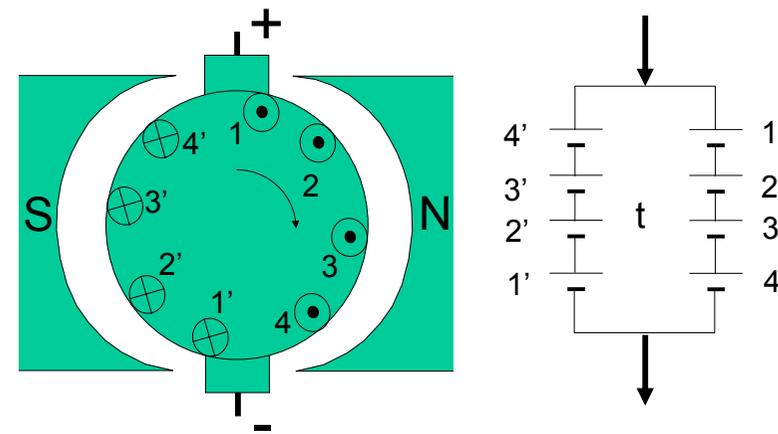


Les circuits électriques à l'induit tournent dans le champ magnétique généré par le circuit inducteur.

Dans chaque circuit de l'induit, il apparaît une f.e.m.

37

Application de la loi de Lenz sur la mcc

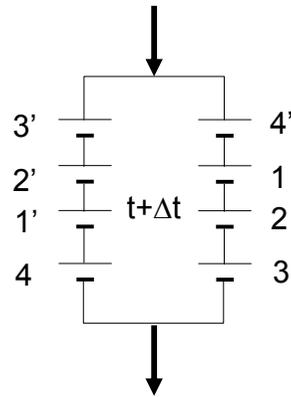
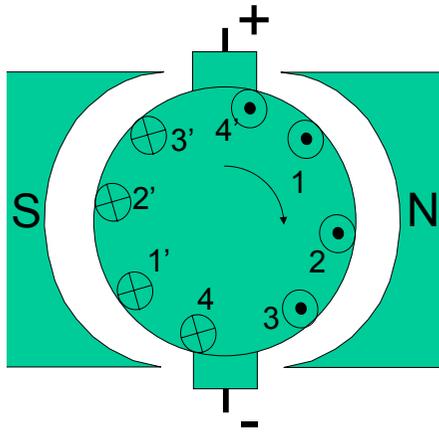


A vitesse constante, la valeur de la f.e.m. est constante.

Au cours du mouvement de rotation entre deux positions, elle varie

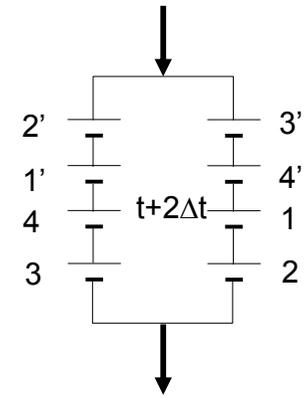
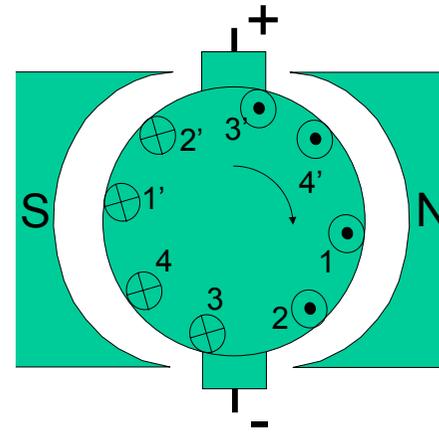
38

Application de la loi de Lenz sur la mcc



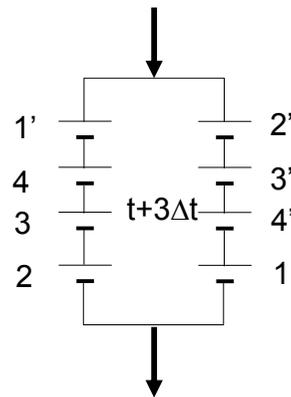
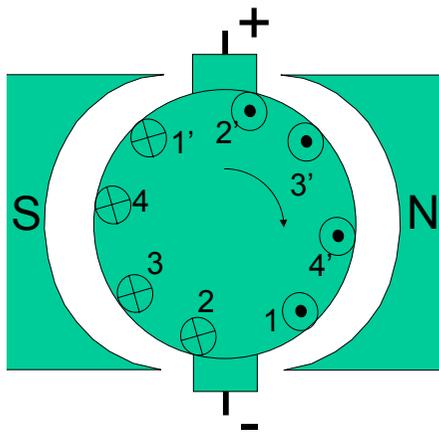
39

Application de la loi de Lenz sur la mcc



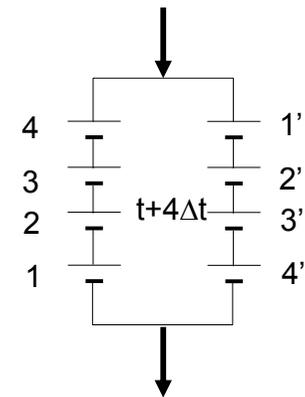
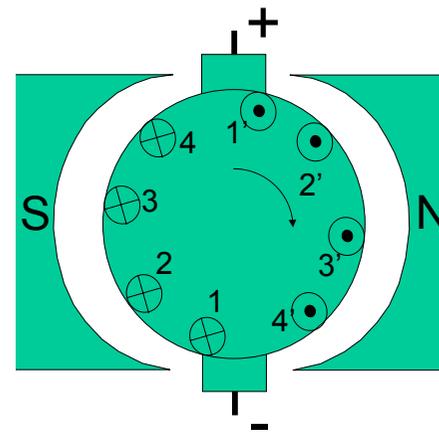
40

Application de la loi de Lenz sur la mcc



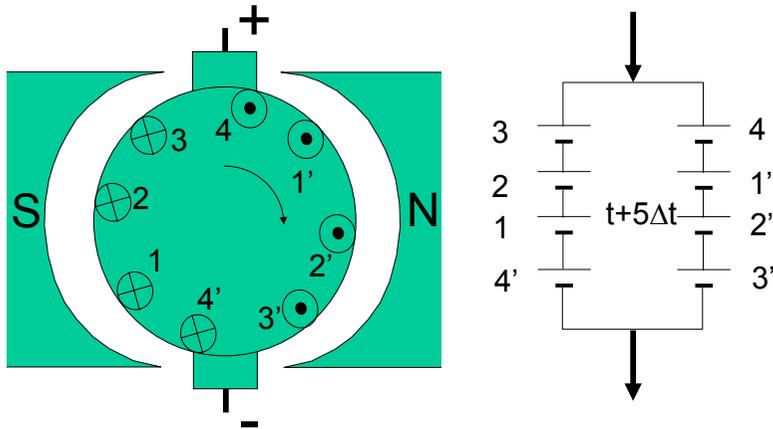
41

Application de la loi de Lenz sur la mcc



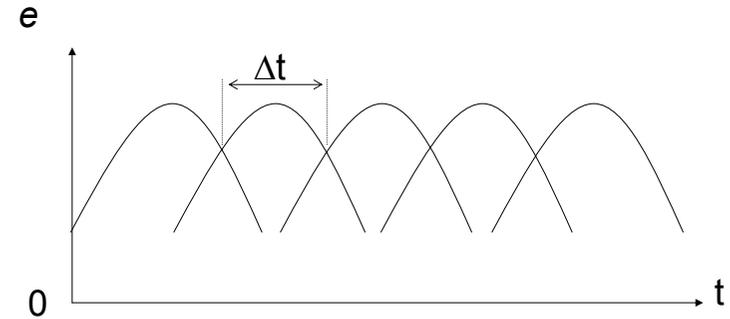
42

Application de la loi de lenz sur la mcc



A vitesse constante, la valeur de la f.e.m. est constante.
 Au cours du mouvement de rotation entre deux positions, elle varie

Evolution temporelle de la f.e.m. induite



Calcul de la f.e.m. Démonstration No 1

Un flux coupé par un conducteur engendre une force électro-motrice induite dans ce dernier, d'expression :

$$e_k = \frac{d\phi_k}{dt}$$

et dont le sens conventionnel est celui du courant.

Une encoche disposant de n conducteurs, la force électro-motrice résultante d'une encoche vaut donc :

$$e_e = n \cdot e_k =$$

On choisit comme intervalle de temps dt celui nécessaire pour effectuer une rotation élémentaire (d'une encoche à une autre):



Calcul de la f.e.m. Démonstration No 1

Il s'ensuit l'expression suivante pour la force électro-motrice :

$$e_e = n \cdot n_e \cdot \frac{\Omega}{2 \cdot \pi} \cdot d\phi_k$$

Si maintenant, on considère la force électro-motrice totale engendrée par toutes les encoches, on obtient :

$$e = \sum_{k=1}^{\frac{n_e}{2}} e_k =$$

A flux constant :

$$e = k \cdot \Omega$$

La machine à courant continu **produit une tension** (effet)
proportionnelle à la vitesse de son axe (cause)

Calcul de la f.e.m. Démonstration No 2

Champ électromoteur apparaissant dans un conducteur en mouvement :

$$\vec{E}_m = \vec{v} \Delta \vec{B}$$

F.E.M. apparaissant dans un conducteur en mouvement :

$$E = \int \vec{E}_m \cdot d\vec{l} = v \cdot B \cdot l$$

e s'oppose à i , c'est la loi de Lenz. On en déduit son sens.

2 f.e.m. en parallèle car 2 voies d'enroulement

Addition des f.e.m. de chaque circuit :

$$e = \sum_{k=1}^{\frac{n_e}{2}} E_k = \sum_{k=1}^{\frac{n_e}{2}} l \cdot r \cdot \Omega \cdot B_k$$

$$e = l \cdot r \cdot \Omega \cdot \frac{n_e}{2} \cdot \langle B \rangle$$

$$e = l \cdot r \cdot \Omega \cdot \frac{n_e}{2} \cdot \frac{\langle \Phi \rangle}{\pi \cdot r \cdot l} = \Omega \cdot \frac{n_e}{2 \cdot \pi} \cdot \langle \Phi \rangle$$

A flux constant :

$$e = k \cdot \Omega$$

47

48

Réversibilité de l'actionneur

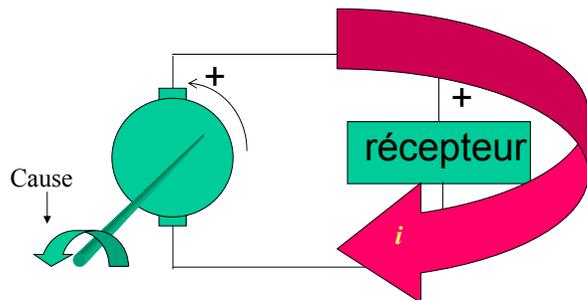
1^{er} cas :

La machine à courant continu est entraînée

Cause
↓

La machine à courant continu fonctionne en génératrice ← $e = k \cdot \Omega$

$$C_{em} = k \cdot i$$



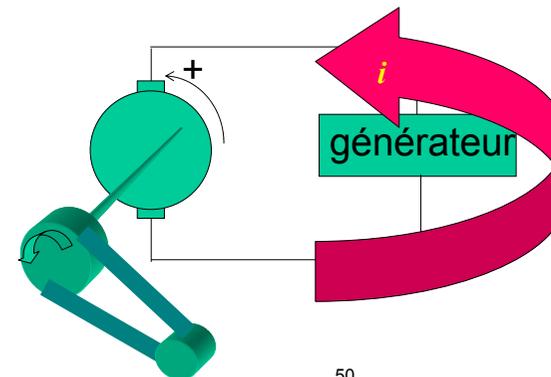
49

Réversibilité de l'actionneur

2^{eme} cas

La machine à courant continu est alimenté par un générateur $e = k \cdot \Omega$

La machine à courant continu fonctionne en moteur ← $C_{em} = k \cdot i$
↑
Cause

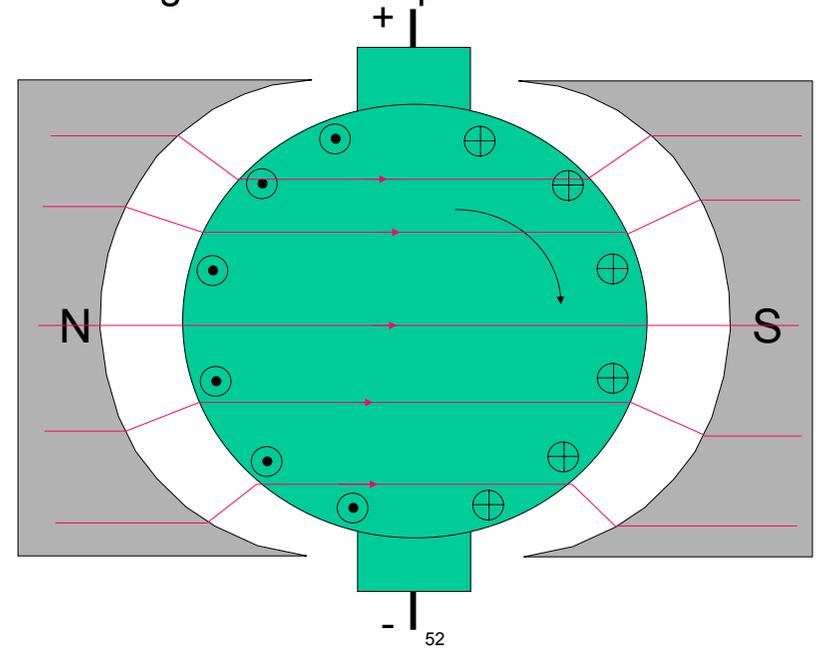


50

ANNEXE :
Réaction magnétique d'induit

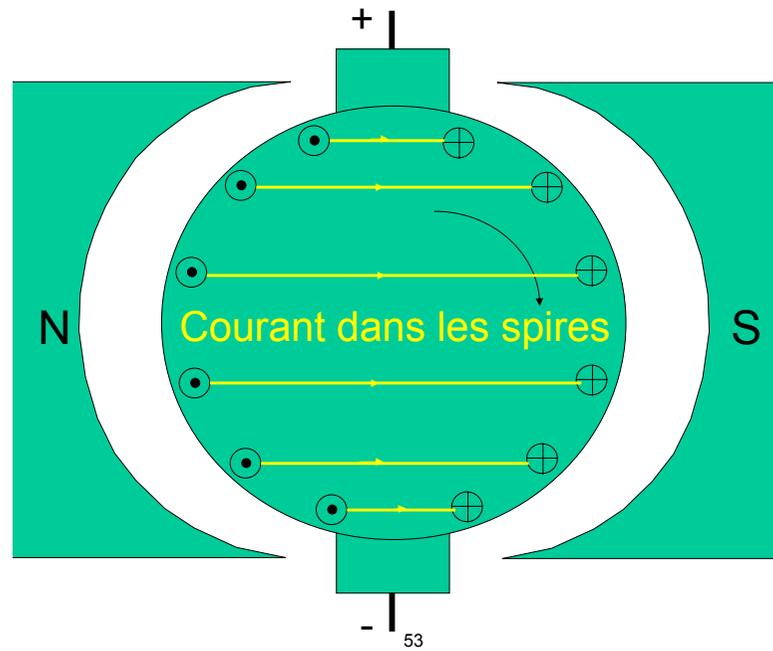
51

Lignes de champ dues à l'inducteur

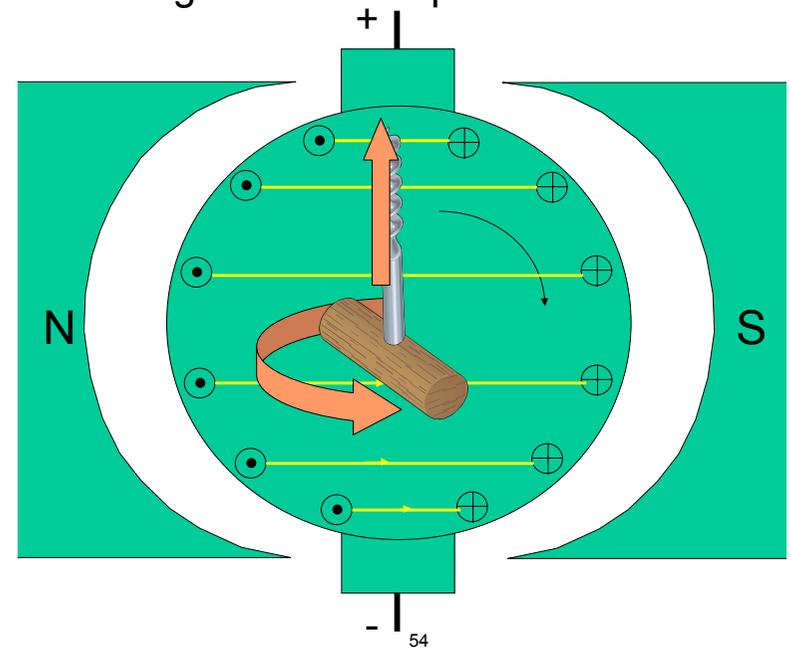


52

Lignes de champ dues au rotor

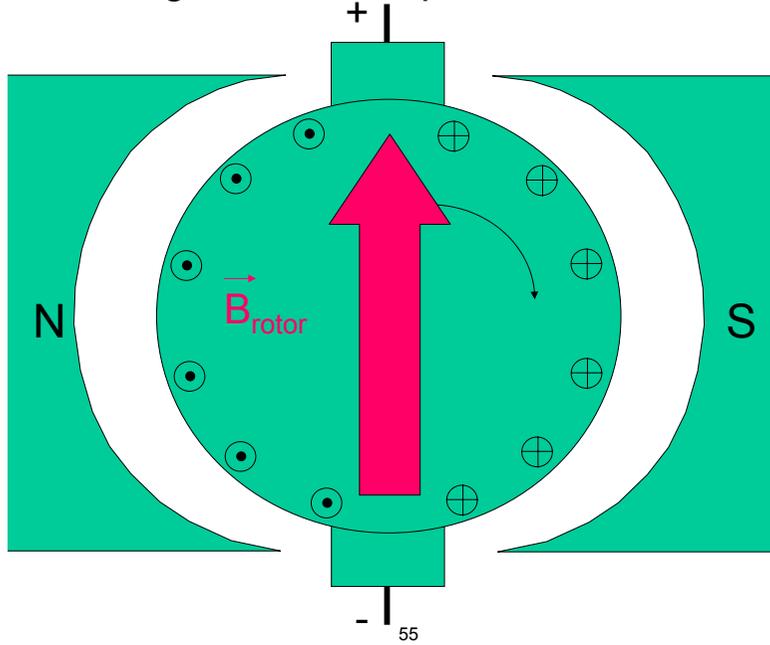


53

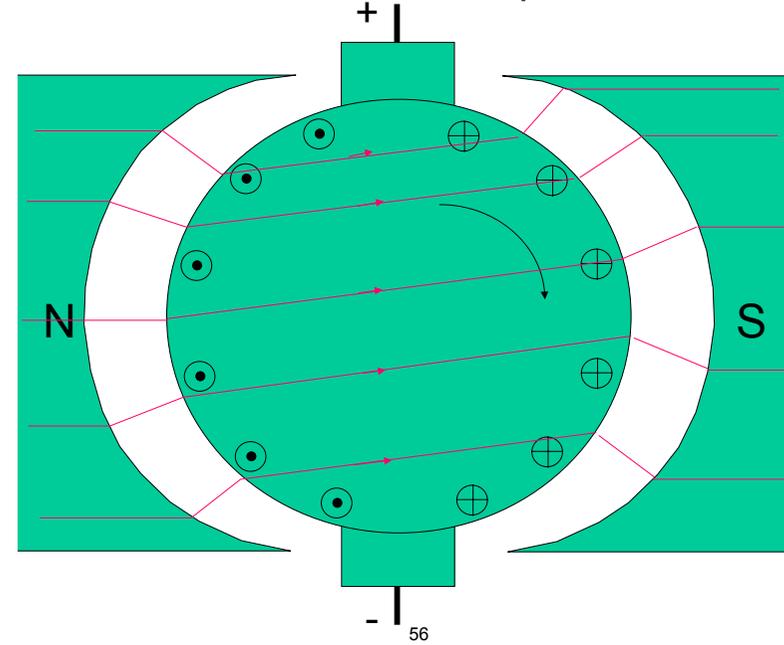


54

Lignes de champ dues au rotor



Déformation du champ résultant



Déformation du champ résultant

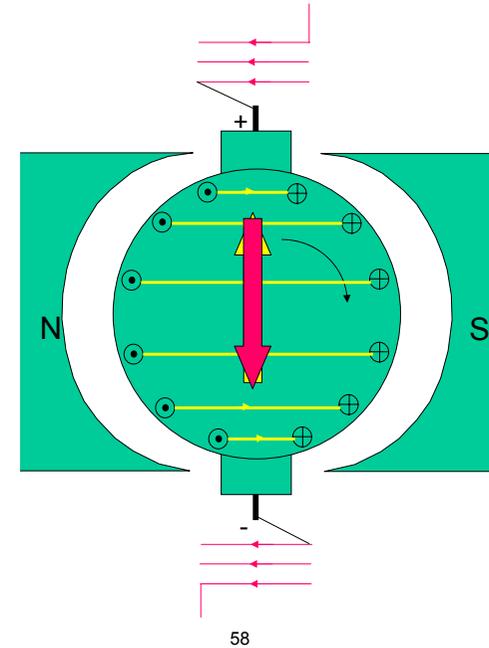
- Décalage de la ligne neutre
- Saturation de certaines cornes de l'inducteur \Rightarrow réduction du flux par pôle
- Au total : réduction du flux embrassé par le bobinage.

Comment vaincre la réaction magnétique d'induit ?

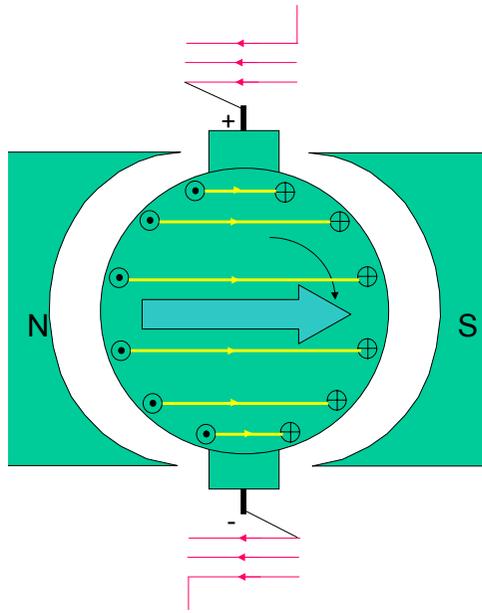
- Il faut compenser le champ du au rotor en ajoutant des pôles additionnels



Poles de commutation

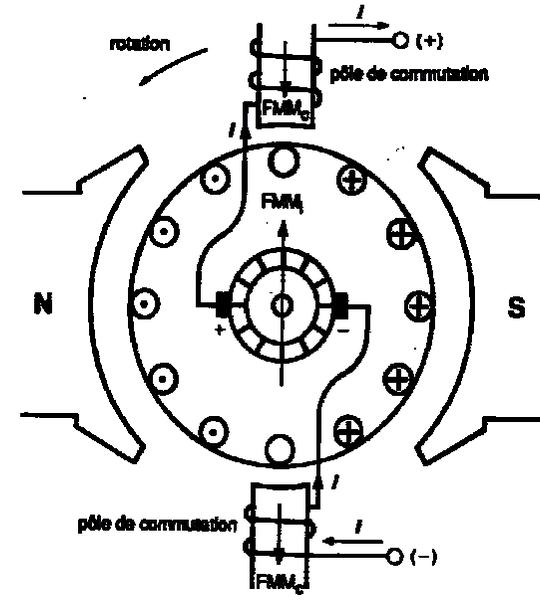


Poles de commutation



59

Poles de commutation



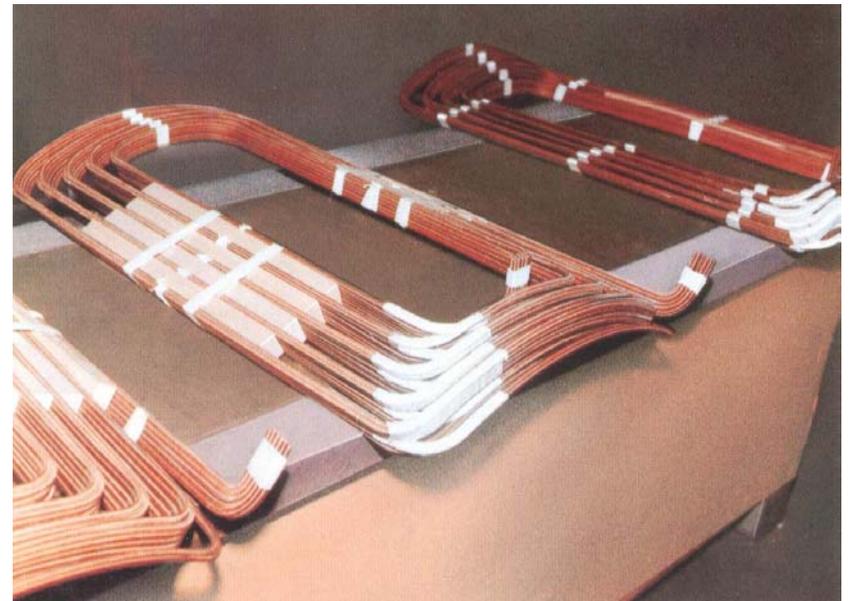
60

Pôles de compensation



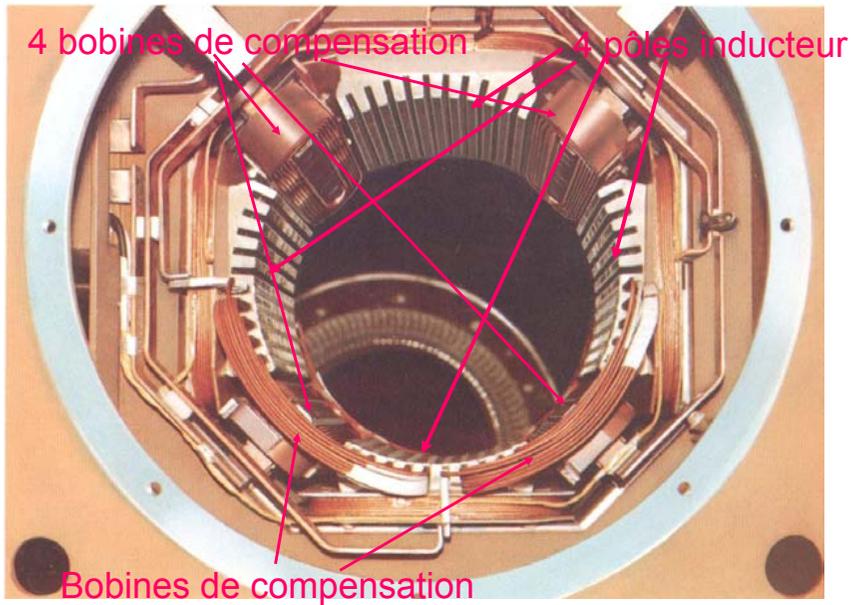
61

Bobines de compensation



62

Constitution d'un stator

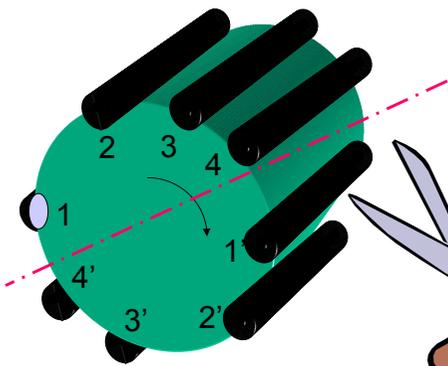
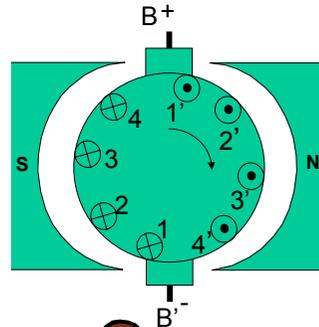


63

Le bobinage du circuit d'induit

Assurer à partir d'un seul courant I , la distribution de tous les courants à un instant donné

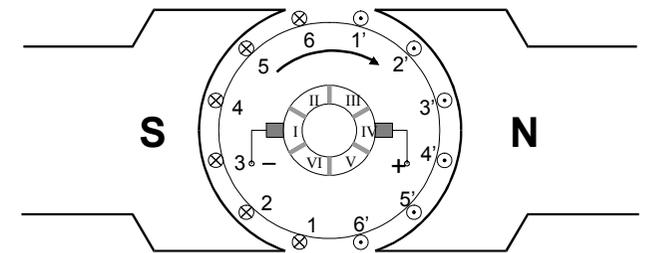
Relier 1 et 1', 2 et 2', 3 et 3', 4 et 4'



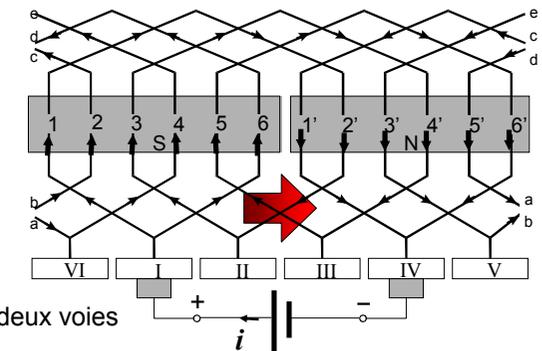
65

Représentation plane « développée » du rotor

Section radiale

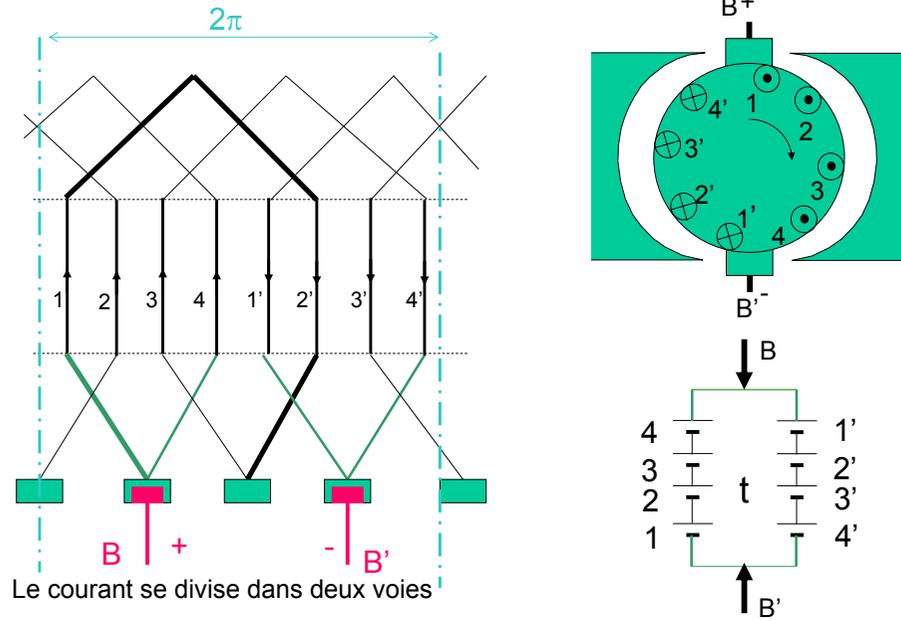


Vue développée



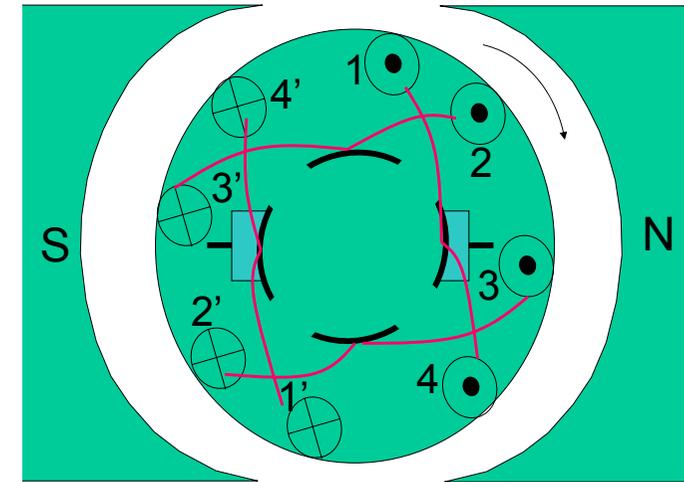
66

Représentation plane « développée » du rotor



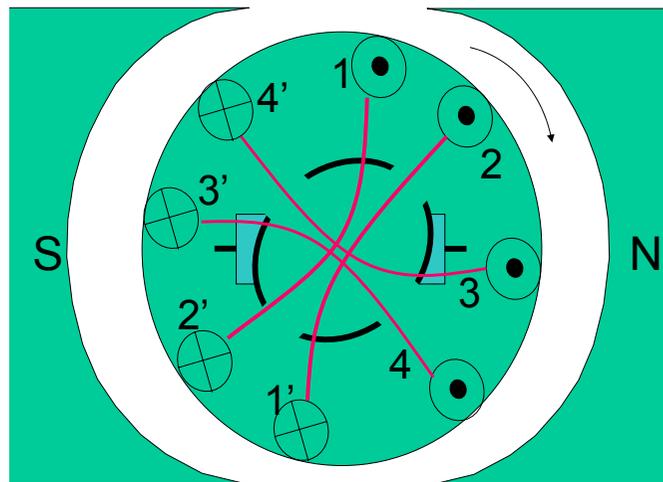
67

Connexions à l'avant du rotor



68

Connexions à l'arrière du rotor



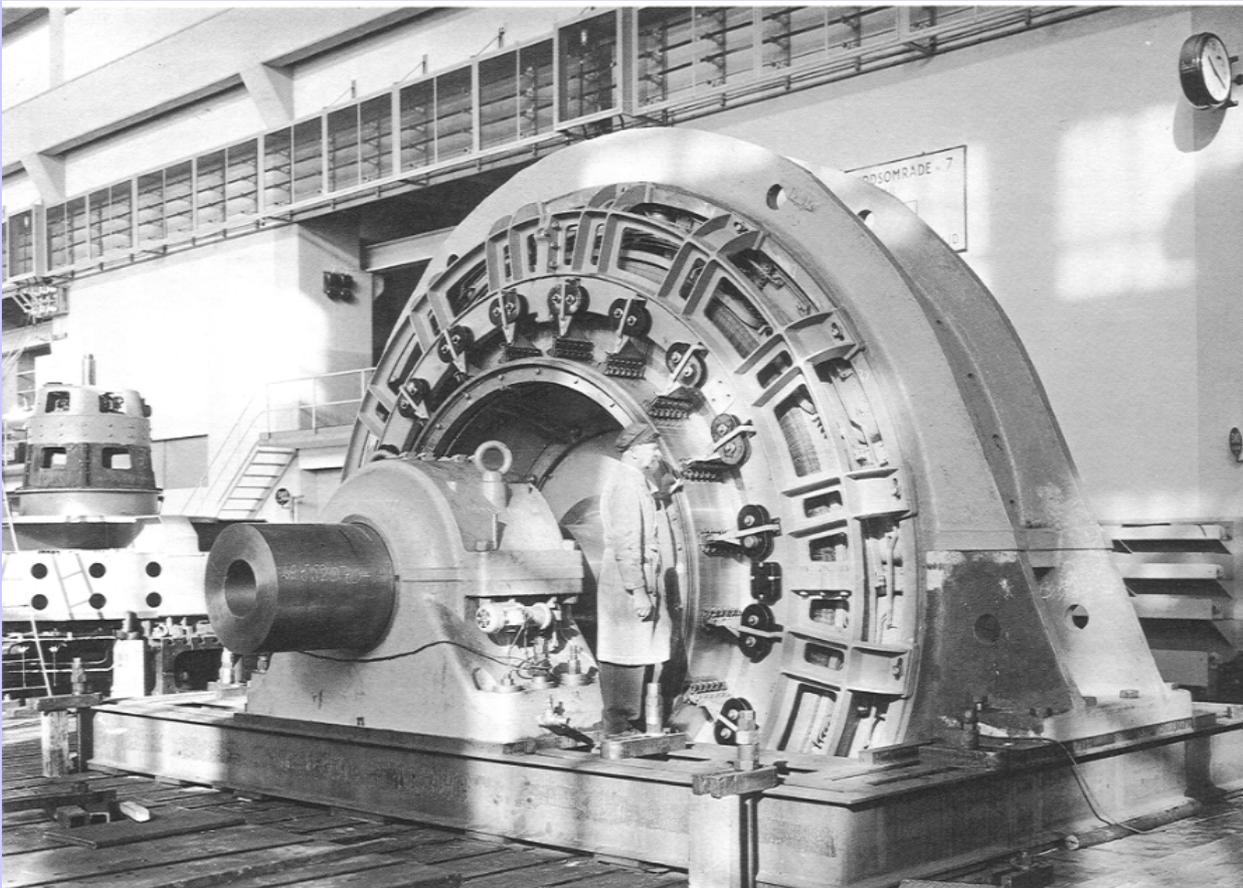
69

Modèle mathématique et alimentation de la machine à courant continu

Ce cours utilise de nombreux ouvrages et sites web sur lesquels j'ai repris des photos ou des diagrammes.
Je tiens à remercier toutes les personnes qui directement et/ou indirectement ont contribué à l'enrichissement de ce cours.



Moteur cc de laminoir couple max : 2500kNm à 50 tr/min, 1950

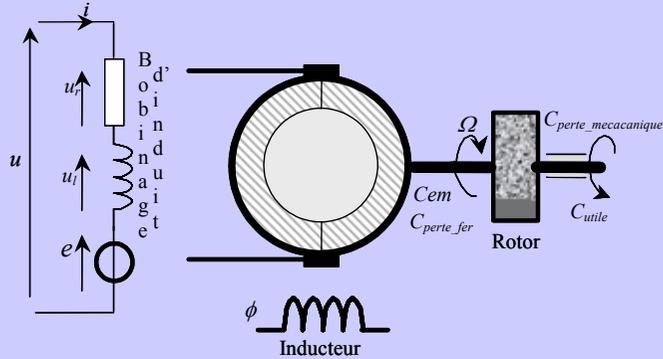


Modèle dynamique de la m.c.c.

Hypothèse : Fonctionnement à flux constant

PARTIE ELECTRIQUE

PARTIE MECANIQUE



Équations dynamiques :

$$C_{em}(t) = k \cdot i(t) \quad J \cdot \frac{d\Omega(t)}{dt} =$$

$$e(t) = k \cdot \Omega(t) \quad C_{em}(t) - C_{perte_fer}(t) - C_{perte_mecanique}(t) - C_{utile}(t)$$

Démarrage de la m.c.c.

- Au démarrage, le moteur est immobile
- La force contre-électromotrice est donc nulle ($e(t)=0$)

Équations dynamiques lors du démarrage :

$$u(t) = \cancel{e(t)} + r \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad \begin{matrix} C_{em}(t) = k \cdot i(t) \\ \cancel{e(t) = k \cdot \Omega(t)} \end{matrix} \quad J \cdot \frac{d\Omega(t)}{dt} = C_{em}(t) - C_{perte_fer}(t) - C_{perte_mecanique}(t) - C_{utile}(t)$$

$$i(t) = \frac{1}{r} \cdot u(t)$$

- Le courant d'induit est alors à son maximum : risque de **destruction**

Démarrage de la m.c.c.

- Au démarrage, le moteur est immobile
- La force contre-électromotrice est donc nulle
- Le courant d'induit est alors à son maximum : risque de **destruction**



- Il faut limiter le courant de démarrage
- On introduit un **rhéostat de démarrage** en série avec l'induit ce qui augmente sa résistance et diminue le courant

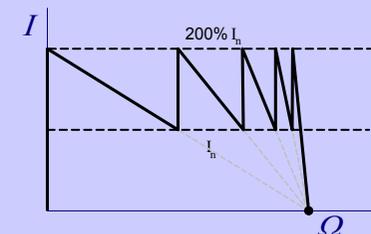
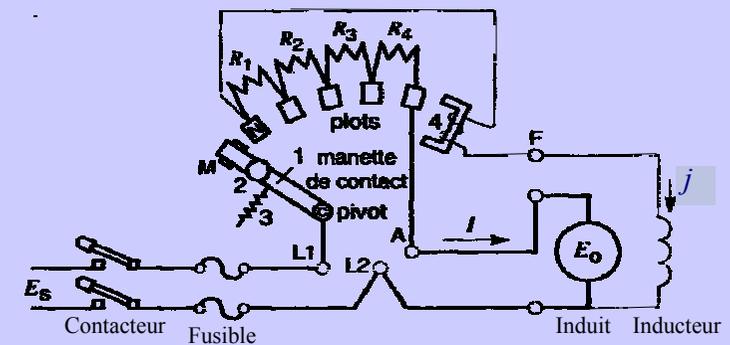
$$u(t) = \cancel{e(t)} + (r + R_{rhéostat}) \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

- Au fur et à mesure que la vitesse augmente, la f.e.m. (e) augmente, le courant diminue

$$u(t) = e(t) + (r + R_{rhéostat}) \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

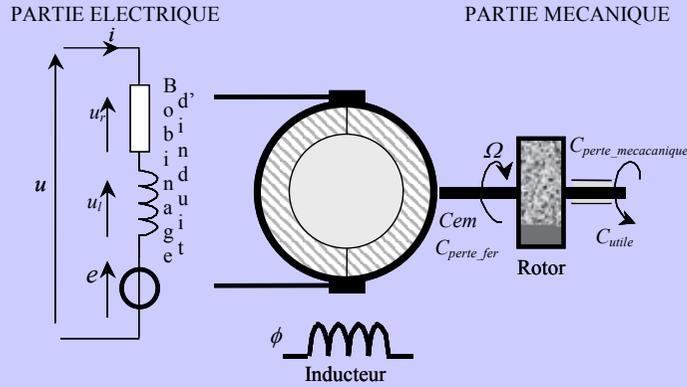
- On diminue la résistance du rhéostat jusqu'à ce qu'elle soit nulle

Démarrage de la m.c.c.



Modèle en régime permanent de la m.c.c.

Hypothèse : Fonctionnement à flux constant



Equations en régime permanent :

$$u = e + r.i$$

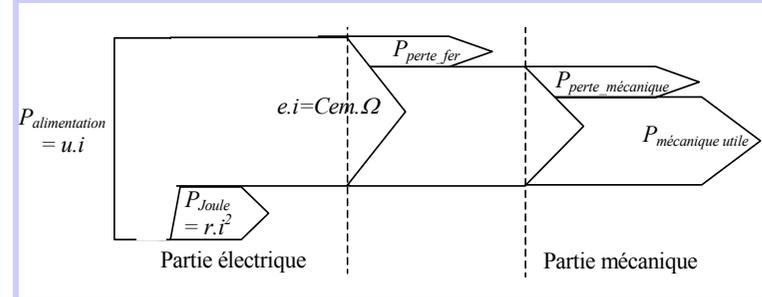
$$C_{em} = k.i$$

$$C_{em} - C_{perte_fer} =$$

$$e = k.\Omega$$

$$C_{perte_mecanique} + C_{utile_mecanique}$$

Bilan des puissances en fonctionnement moteur



Bilan de puissance :

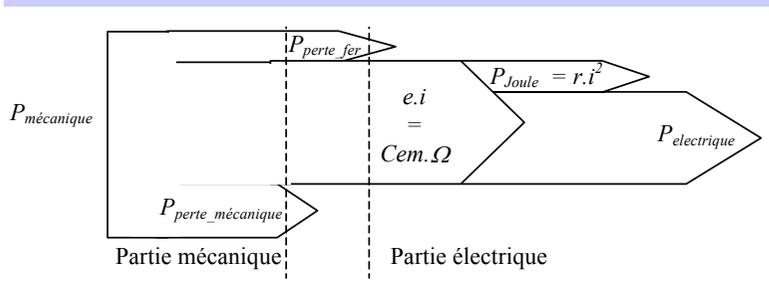
$$u.i = e.i + r.i^2$$

$$e.i = C_{em}.\Omega$$

$$C_{em}.\Omega - C_{perte_fer}.\Omega = C_{perte_mecanique}.\Omega + C_{utile_mecanique}.\Omega$$



Bilan des puissances en fonctionnement génératrice



Bilan de puissance :

$$u.i = e.i + r.i^2$$

$$e.i = C_{em}.\Omega$$

$$C_{em}.\Omega - C_{perte_fer}.\Omega = C_{perte_mecanique}.\Omega + C_{utile_mecanique}.\Omega$$



Caractéristique Couple/Vitesse

Hypothèse : Fonctionnement à flux constant, régime permanent

$$C_{em} = k.i$$

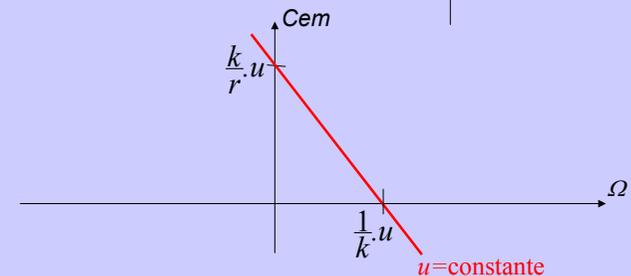
$$u = e + r.i$$

$$e = k.\Omega$$

$$u = k.\Omega + r.\frac{C_{em}}{k}$$

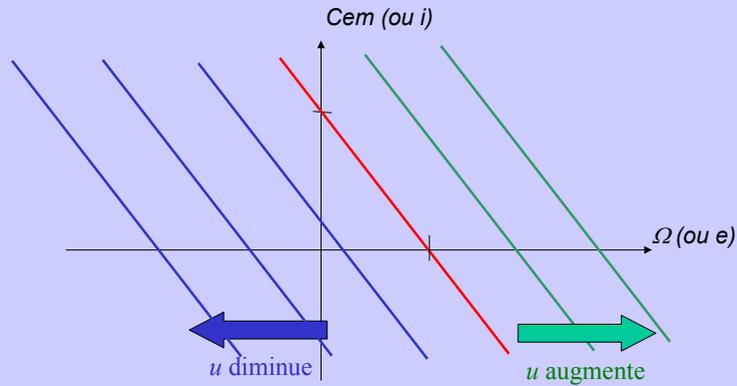
$$\Rightarrow C_{em} = \frac{k}{r}.u - \frac{k^2}{r}.\Omega$$

Équation linéaire, droite



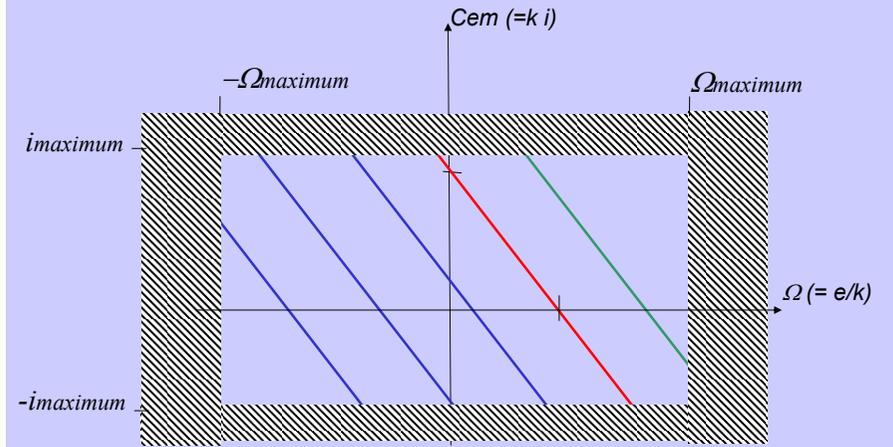
Caractéristique Couple/Vitesse

Fonctionnement en moteur : $Cem.\Omega > 0$
 Fonctionnement en génératrice : $Cem.\Omega < 0$



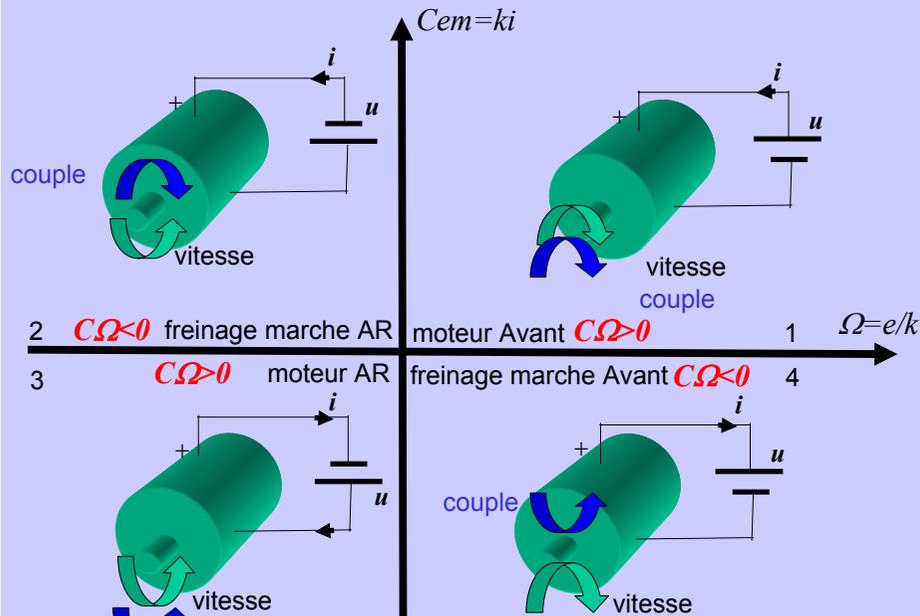
Caractéristique Couple/Vitesse

Fonctionnement en moteur : $Cem.\Omega > 0$
 Fonctionnement en génératrice : $Cem.\Omega < 0$

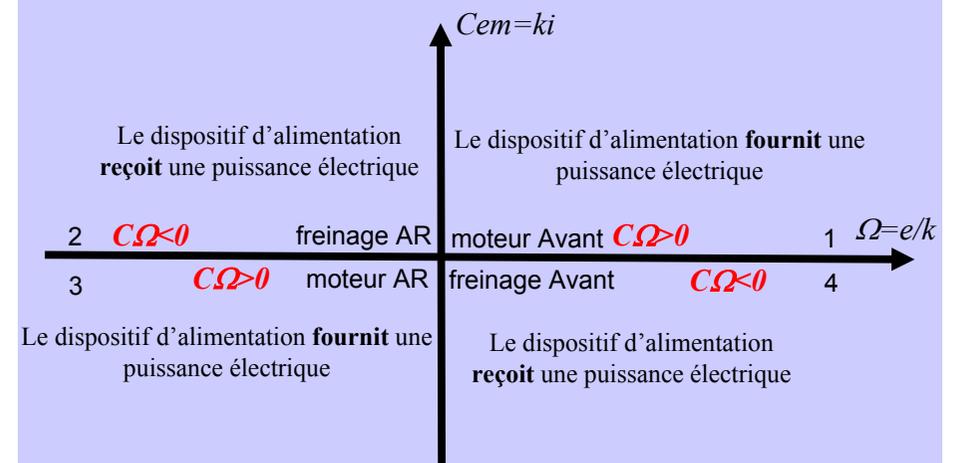


Un domaine fermé définit l'ensemble des couples (Cem, Ω) possibles pour une machine donnée

Les quadrants de fonctionnement



Les quadrants de fonctionnement



Pour passer des quadrants Q1 \leftrightarrow Q4 ou Q2 \leftrightarrow Q3, le dispositif d'alimentation devra être réversible en courant.

Pour passer des quadrants Q1 \leftrightarrow Q2 ou Q3 \leftrightarrow Q4, le dispositif d'alimentation devra être réversible en tension.

Exemple :

Montée = moteur AV

Vitesse > 0
Couple > 0

Quadrant 1

Cours d'Electricité, Bruno FRANÇOIS 15 La machine à courant continu

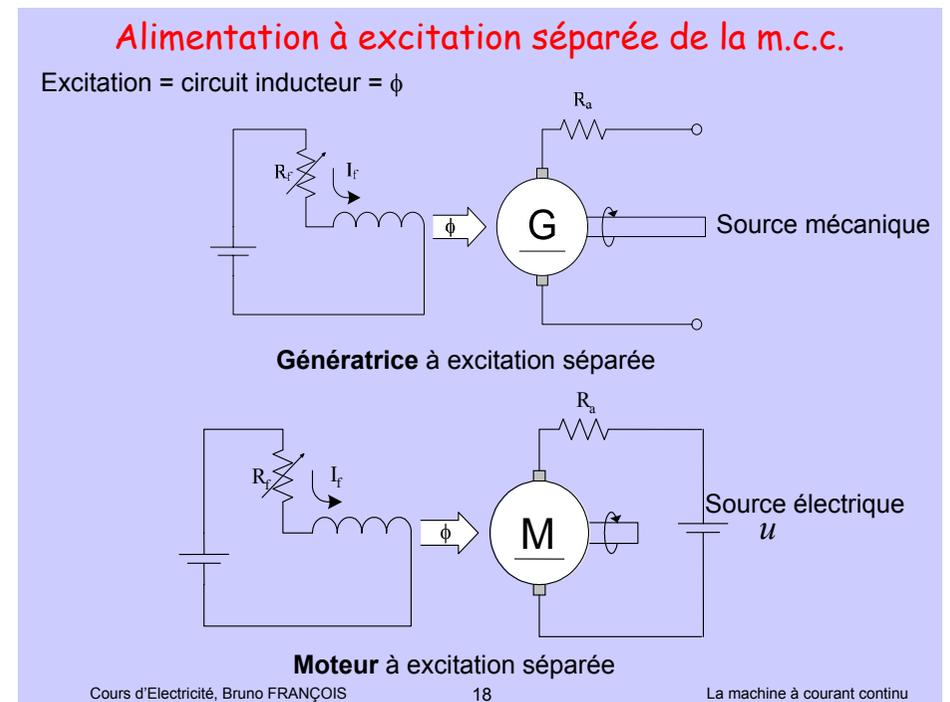
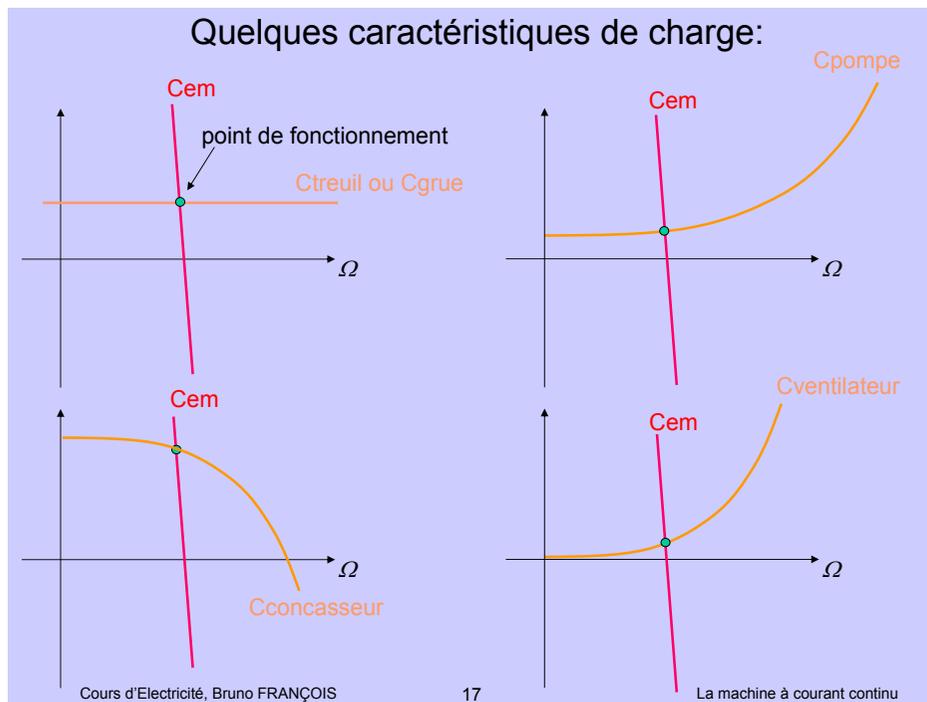
Exemple :

Descente = freinage AR

Vitesse < 0
Couple > 0

Quadrant 2

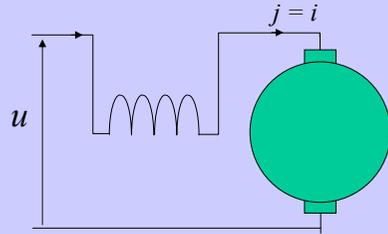
Cours d'Electricité, Bruno FRANÇOIS 16 La machine à courant continu



Alimentation à excitation série de la m.c.c.

Avantage : Très fort couple de démarrage

Utilisé en traction électrique



$$C_{em} = k \cdot i$$

$$e = k \cdot \Omega$$

- Au démarrage, un **fort courant de démarrage** parcourt le circuit d'induit
- Comme avec ce montage, ce courant est égal au courant inducteur, il crée un très **fort flux magnétique** dans le circuit d'inducteur
- La « constante » k est proportionnelle au flux, le **couple du moteur** C_{em} sera très fort au démarrage
- De même, pour une forte charge (et un fort courant), le couple sera plus important
- Pour une faible charge, le courant est plus petit et donc avec lui le flux ; cette diminution du flux entraîne une augmentation de la vitesse $\Omega = e/k$

=> un moteur série ne doit pas fonctionner à vide sous peine d'atteindre **des vitesses excessives** et risquer l'**endommagement**

Moteur universel

MCC à excitation série alimenté par une tension alternative (réseau)

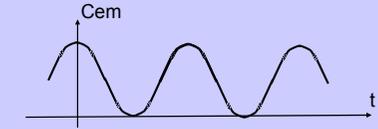
Si le flux est proportionnel au courant (pas de saturation) $\langle \phi \rangle = k'' \cdot j$

$$C_{em} = \frac{n_e \cdot n \cdot j}{2\pi} \cdot \langle \phi \rangle$$

$$C_{em} = k' \cdot j^2$$

$$C_{em} = k' \cdot Jm^2 \cdot \cos^2(\omega t)$$

$$C_{em} = \frac{1}{2} k' \cdot Jm^2 + \frac{1}{2} k' \cdot Jm^2 \cdot \cos(2\omega t)$$



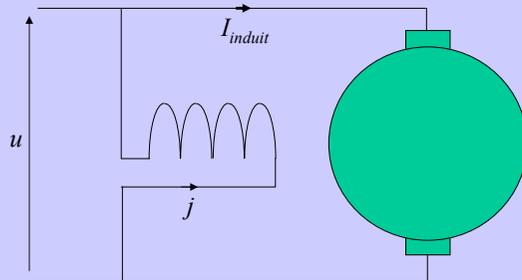
Couple pulsatoire important, ne pourrait pas fonctionner à basse vitesse

Mais $\langle C_{em} \rangle \neq 0$

Puissance faible -> applications en électroménager

Alimentation à excitation shunt de la m.c.c.

Autre appellation : Machine à excitation dérivée



Utilisation d'un rhéostat

