

Les machines électriques

Électricité 2 — Électrotechnique

Christophe Palermo

IUT de Montpellier
Département Mesures Physiques
&

Institut d'Electronique du Sud
Université Montpellier 2

e-mail : `Christophe.Palermo@univ-montp2.fr`

Année Universitaire 2009–2010



Plan

- 1 Les machines électriques tournantes
 - Présentation
 - Principe de fonctionnement
- 2 Description d'une machine électrique tournante
 - Point de vue mécanique
 - Point de vue électrique
- 3 Le parc de machines électriques
 - Exemple de la traction
 - Robustesse des moteurs
- 4 Moteurs électriques contre moteurs thermiques
 - Le choix d'un moteur
 - Grandeurs physiques et performances
- 5 Le véhicule hybride

Plan

- 1 Les machines électriques tournantes
 - Présentation
 - Principe de fonctionnement
- 2 Description d'une machine électrique tournante
 - Point de vue mécanique
 - Point de vue électrique
- 3 Le parc de machines électriques
 - Exemple de la traction
 - Robustesse des moteurs
- 4 Moteurs électriques contre moteurs thermiques
 - Le choix d'un moteur
 - Grandeurs physiques et performances
- 5 Le véhicule hybride

Définition

- Dispositif électro-mécanique
- Énergie électrique $\longrightarrow$ Énergie mécanique
 $\Rightarrow$ *Moteur*
- Énergie mécanique $\longrightarrow$ Énergie électrique
 $\Rightarrow$ *Génératrice*
- Une **seule et même** machine : conversion **dans les deux sens**

Réversibilité

Les machines électriques tournantes peuvent fonctionner en **moteurs et** en **génératrices** : elles sont dites **réversibles**.

Types de machines électriques tournantes

Une machine électrique tournante peut fonctionner avec :

- du courant continu

- ⇒ Machine à courant continu

- Moteur à courant continu
 - Dynamo (génératrice à courant continu)

Types de machines électriques tournantes

Une machine électrique tournante peut fonctionner avec :

- du courant continu

- ↳ Machine à courant continu

- Moteur à courant continu
- Dynamo (génératrice à courant continu)

- du courant alternatif, monophasé ou triphasé

- ↳ Machine synchrone

- Moteur synchrone
- Alternateur synchrone

- ↳ Machine asynchrone

- Moteur asynchrone
- Génératrice hypersynchrone

Types de machines électriques tournantes

Une machine électrique tournante peut fonctionner avec :

- du courant continu
 - ⇒ Machine à courant continu
 - Moteur à courant continu
 - Dynamo (génératrice à courant continu)
- du courant alternatif, monophasé ou triphasé
 - ⇒ Machine synchrone
 - Moteur synchrone
 - Alternateur synchrone
 - ⇒ Machine asynchrone
 - Moteur asynchrone
 - Génératrice hypersynchrone

Les lois de l'électromagnétisme

Les machines électriques tournantes fonctionnent grâce à :

- La loi d'Ampère (ou de Biot et Savart)
- La loi de Laplace
- La loi de Faraday
- La loi de Lenz

Les lois de l'électromagnétisme

Les machines électriques tournantes fonctionnent grâce à :

- La loi d'Ampère (ou de Biot et Savart)
- La loi de Laplace
- La loi de Faraday
- La loi de Lenz

PAS DE PANIQUE !

Dans ce cours : pas de calcul de champs magnétiques $\Rightarrow$ **Phénomènes physiques** et leurs conséquences

La loi d'Ampère (ou de Biot et Savart)

Énoncé

Courant dans un conducteur $\implies$ Champ d'induction magnétique $\vec{\mathbf{B}}$

La loi d'Ampère (ou de Biot et Savart)

Énoncé

Courant dans un conducteur $\implies$ Champ d'induction magnétique $\vec{\mathbf{B}}$

- En **tout point** de l'espace (mais décroît en $1/r^2$)
- Courant et champ de **même nature**
 - Courant continu $\implies \vec{\mathbf{B}}$ continu
 - Courant alternatif $\implies \vec{\mathbf{B}}$ alternatif

La loi d'Ampère (ou de Biot et Savart)

Énoncé

Courant dans un conducteur $\implies$ Champ d'induction magnétique $\vec{\mathbf{B}}$

- En **tout point** de l'espace (mais décroît en $1/r^2$)
- Courant et champ de **même nature**
 - Courant continu $\implies \vec{\mathbf{B}}$ continu
 - Courant alternatif $\implies \vec{\mathbf{B}}$ alternatif

Utilité

On peut créer des champs magnétiques avec du courant

La loi de Laplace

Énoncé

Un conducteur **parcouru par un courant**

La loi de Laplace

Énoncé

Un conducteur parcouru par un courant **et plongé dans un champ magnétique**

La loi de Laplace

Énoncé

Un conducteur parcouru par un courant **et** plongé dans un champ magnétique **subit une force mécanique appelée force de Laplace**

La loi de Laplace

Énoncé

Un conducteur parcouru par un courant **et** plongé dans un champ magnétique subit une force mécanique appelée **force de Laplace**

- Conducteur libre $\longrightarrow$ mouvement
- Technologie $\longrightarrow$ contrôle du mouvement

Utilité

On peut faire bouger des circuits avec des champs magnétiques

La loi de Faraday

Énoncé

La force électromotrice e induite dans un circuit sous l'effet d'un champ magnétique est proportionnelle à la variation du flux magnétique ϕ .

Qu'est-ce que cela veut dire ?

La loi de Faraday

Énoncé

La force électromotrice e induite dans un circuit sous l'effet d'un champ magnétique est proportionnelle à la variation du flux magnétique ϕ .

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \implies \begin{cases} \vec{\mathbf{B}} \text{ variable induit } e \text{ variable} \\ \vec{\mathbf{B}} \text{ continu n'induit pas de f.é.m} \end{cases}$$

La loi de Faraday

Énoncé

La force électromotrice e induite dans un circuit sous l'effet d'un champ magnétique est proportionnelle à la variation du flux magnétique ϕ .

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \implies \begin{cases} \vec{\mathbf{B}} \text{ variable induit } e \text{ variable} \\ \vec{\mathbf{B}} \text{ continu n'induit pas de f.é.m} \end{cases}$$

⇨ Circuit fermé $\implies$ naissance d'un courant

La loi de Faraday

Énoncé

La force électromotrice e induite dans un circuit sous l'effet d'un champ magnétique est proportionnelle à la variation du flux magnétique ϕ .

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \implies \begin{cases} \vec{\mathbf{B}} \text{ variable induit } e \text{ variable} \\ \vec{\mathbf{B}} \text{ continu n'induit pas de f.é.m} \end{cases}$$

⇨ Circuit fermé $\implies$ naissance d'un courant

Utilité

On peut induire des tensions et des courants (puissance électrique) à l'aide d'un champ magnétique

La loi de Lenz

Énoncé

Le sens du courant induit est tel que, par ses effets électromagnétiques, il **s'oppose** toujours à la cause qui lui a donné naissance

La loi de Lenz

Énoncé

Le sens du courant induit est tel que, par ses effets électromagnétiques, il **s'oppose** toujours à la cause qui lui a donné naissance

Utilité

Décrit la conservation de l'énergie et permet d'établir les sens des tensions et des courants induits

La loi de Lenz

Énoncé

Le sens du courant induit est tel que, par ses effets électromagnétiques, il **s'oppose** toujours à la cause qui lui a donné naissance

Utilité

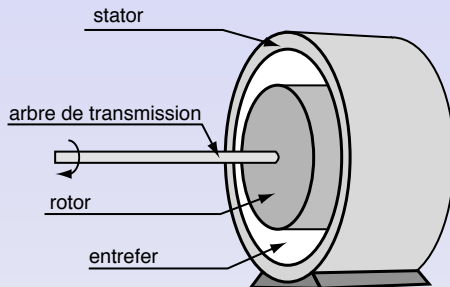
Décrit la conservation de l'énergie et permet d'établir les sens des tensions et des courants induits

↷ Rappel : convention générateur $\implies$ e et I dans le même sens

Plan

- 1 Les machines électriques tournantes
 - Présentation
 - Principe de fonctionnement
- 2 Description d'une machine électrique tournante
 - Point de vue mécanique
 - Point de vue électrique
- 3 Le parc de machines électriques
 - Exemple de la traction
 - Robustesse des moteurs
- 4 Moteurs électriques contre moteurs thermiques
 - Le choix d'un moteur
 - Grandeurs physiques et performances
- 5 Le véhicule hybride

Éléments mécaniques



- **Stator** : partie fixe, statique
- **Rotor** : élément entrant en rotation
- Le rotor est lié à l'**arbre de transmission**
- Stator et rotor séparés par l'**entrefer**

Éléments électriques

Deux circuits électriques :

- **L'inducteur :**

- ⇒ Créé le champ magnétique
- ⇒ Permet le transfert d'énergie rotor $\longleftrightarrow$ stator
- ⇒ Courant i

Éléments électriques

Deux circuits électriques :

- **L'inducteur :**

- ⇒ Créé le champ magnétique
- ⇒ Permet le transfert d'énergie rotor $\longleftrightarrow$ stator
- ⇒ Courant i

- **L'induit :**

- ⇒ Siège de l'induction électromagnétique
- ⇒ Expression des phénomènes physiques
- ⇒ Création des nouvelles grandeurs (couple ou f.é.m + courant)
- ⇒ Courant I

Rôles des éléments

Les rôles dépendent de la machine

Selon la machine :

- stator = inducteur **ou** induit !
- rotor = inducteur **ou** induit !

Pour une machine donnée :

- inducteur du moteur = inducteur de la génératrice
- induit du moteur = induit de la génératrice

Plan

- 1 Les machines électriques tournantes
 - Présentation
 - Principe de fonctionnement
- 2 Description d'une machine électrique tournante
 - Point de vue mécanique
 - Point de vue électrique
- 3 Le parc de machines électriques
 - Exemple de la traction
 - Robustesse des moteurs
- 4 Moteurs électriques contre moteurs thermiques
 - Le choix d'un moteur
 - Grandeurs physiques et performances
- 5 Le véhicule hybride

Trains

3 types de machines utilisées :

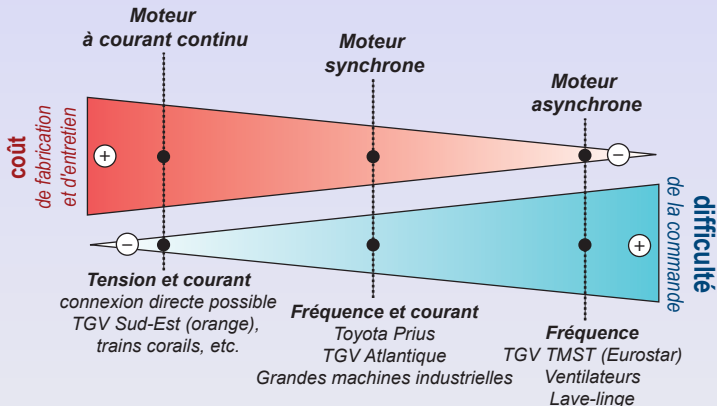
- Machine à **courant continu**
- Machine **synchrone**
 - ⇒ Rotor tourne à la même vitesse que le champ inducteur
- Machine **asynchrone**
 - ⇒ Vitesse du rotor $\neq$ vitesse du champ inducteur

Choix

Dépend des progrès techniques

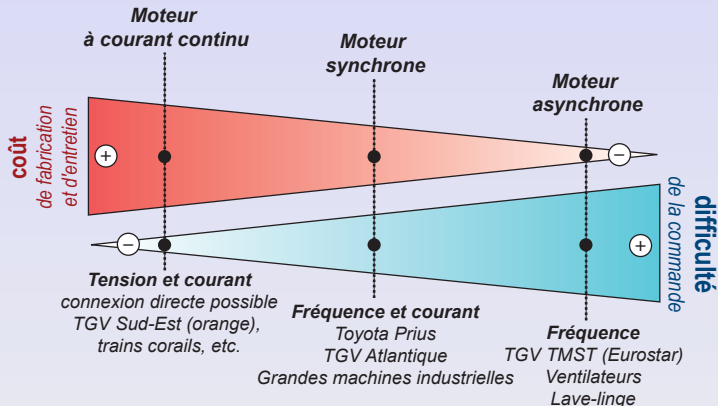
Les différents moteurs

- Compromis : **coût** et **difficulté** de la commande



Les différents moteurs

- Compromis : **coût** et **difficulté** de la commande



- Même chose dans d'autres domaines

Robustesse

✓ Question pertinente

Quelle est l'utilité d'apprendre le fonctionnement d'une autre machine que la machine asynchrone ?

① Machines robustes

- Solides et fiables
- Durent dans le temps
- Présentes longtemps dans le parc

② Certains moteurs ne sont pas adaptés à certaines applications :

- ☹ Absurde d'utiliser un moteur synchrone dans un aspirateur
- ☹ Absurde d'utiliser une machine asynchrone comme alternateur d'automobile

Plan

- 1 Les machines électriques tournantes
 - Présentation
 - Principe de fonctionnement
- 2 Description d'une machine électrique tournante
 - Point de vue mécanique
 - Point de vue électrique
- 3 Le parc de machines électriques
 - Exemple de la traction
 - Robustesse des moteurs
- 4 Moteurs électriques contre moteurs thermiques
 - Le choix d'un moteur
 - Grandeurs physiques et performances
- 5 Le véhicule hybride

Le choix d'un moteur

- Utilisation **sédentaire** :
 - Bâtiments alimentés en électricité ;
 - Moteur thermique : faire le plein !
 - Choix du moteur électrique **évident**
- Utilisation **embarquée** (automobile) :
 - Stockage de l'énergie = problème ;
 - Recharge **plus lente** que le plein de carburant ;
 - Choix du moteur thermique **plus simple**
- Train : cas **particulier**
 - Caténaire
 - Pas de stockage

Intérêt de l'électricité pour les automobiles

Moteur électrique : **grands intérêts** pour l'automobile

- Rendements élevés
- Énergie “propre”
- Qualités mécanique :
 - Fonctionnement basse vitesse
 - Couple important (reprise)
- Indépendance énergétique

Le rendement η

Cas d'un moteur de véhicule :

- Meilleurs moteurs **diesel** : moins de 50 % (typiquement 30 – 40 %)
- Meilleurs moteurs **essence** : moins de 30 % (typiquement 25 %)
- Moteurs **électriques** : plus de 90 % (toute technologie confondue)

Avantage à l'électrique

Le rendement du moteur électrique est nettement plus grand que celui du moteur thermique

Le rendement η

Cas d'un moteur de véhicule :

- Meilleurs moteurs **diesel** : moins de 50 % (typiquement 30 – 40 %)
- Meilleurs moteurs **essence** : moins de 30 % (typiquement 25 %)
- **Moteurs électriques** : plus de 90 % (toute technologie confondue)

Avantage à l'électrique

Le rendement du moteur électrique est nettement plus grand que celui du moteur thermique

La densité d'énergie

Question

Quelle énergie est contenue dans un litre d'essence, et dans un accumulateur d'un litre ?

La densité d'énergie

Question

Quelle énergie est contenue dans un litre d'essence, et dans un accumulateur d'un litre ?

- 1 L de diesel ou d'essence : $36\,000 \text{ kJ/L} = 10 \text{ kWh/L}$

La densité d'énergie

Question

Quelle énergie est contenue dans un litre d'essence, et dans un accumulateur d'un litre ?

- 1 L de diesel ou d'essence : $36\,000 \text{ kJ/L} = 10 \text{ kWh/L}$
- Une batterie de 1 L : 0,1 à 1 kWh/L (grand maximum !)

La densité d'énergie

Question

Quelle énergie est contenue dans un litre d'essence, et dans un accumulateur d'un litre ?

- 1 L de diesel ou d'essence : $36\,000 \text{ kJ/L} = 10 \text{ kWh/L}$
- Une batterie de 1 L : $0,1 \text{ à } 1 \text{ kWh/L}$ (grand maximum !)
- $10 \text{ kWh} = \text{énergie énorme} = \text{énergie consommée}$

La densité d'énergie

Question

Quelle énergie est contenue dans un litre d'essence, et dans un accumulateur d'un litre ?

- 1 L de diesel ou d'essence : $36\,000 \text{ kJ/L} = 10 \text{ kWh/L}$
- Une batterie de 1 L : $0,1 \text{ à } 1 \text{ kWh/L}$ (grand maximum !)
- $10 \text{ kWh} = \text{énergie énorme} = \text{énergie consommée}$
 - par un lave-linge pendant trois heures

La densité d'énergie

Question

Quelle énergie est contenue dans un litre d'essence, et dans un accumulateur d'un litre ?

- 1 L de diesel ou d'essence : $36\,000 \text{ kJ/L} = 10 \text{ kWh/L}$
- Une batterie de 1 L : $0,1 \text{ à } 1 \text{ kWh/L}$ (grand maximum !)
- $10 \text{ kWh} = \text{énergie énorme} = \text{énergie consommée}$
 - par un lave-linge pendant trois heures
 - par un ordinateur pendant une journée

La densité d'énergie

Question

Quelle énergie est contenue dans un litre d'essence, et dans un accumulateur d'un litre ?

- 1 L de diesel ou d'essence : $36\,000 \text{ kJ/L} = 10 \text{ kWh/L}$
- Une batterie de 1 L : $0,1 \text{ à } 1 \text{ kWh/L}$ (grand maximum !)
- $10 \text{ kWh} = \text{énergie énorme} = \text{énergie consommée}$
 - par un lave-linge pendant trois heures
 - par un ordinateur pendant une journée
 - par une ampoule classique pendant une semaine

La densité d'énergie

Question

Quelle énergie est contenue dans un litre d'essence, et dans un accumulateur d'un litre ?

- 1 L de diesel ou d'essence : $36\,000 \text{ kJ/L} = 10 \text{ kWh/L}$
- Une batterie de 1 L : $0,1 \text{ à } 1 \text{ kWh/L}$ (grand maximum !)
- $10 \text{ kWh} = \text{énergie énorme} = \text{énergie consommée}$
 - par un lave-linge pendant trois heures
 - par un ordinateur pendant une journée
 - par une ampoule classique pendant une semaine
 - par une ampoule économique pendant un mois

La densité d'énergie

Question

Quelle énergie est contenue dans un litre d'essence, et dans un accumulateur d'un litre ?

- 1 L de diesel ou d'essence : $36\,000 \text{ kJ/L} = 10 \text{ kWh/L}$
- Une batterie de 1 L : $0,1 \text{ à } 1 \text{ kWh/L}$ (grand maximum !)
- $10 \text{ kWh} = \text{énergie énorme} = \text{énergie consommée}$
 - par un lave-linge pendant trois heures
 - par un ordinateur pendant une journée
 - par une ampoule classique pendant une semaine
 - par une ampoule économique pendant un mois

Avantage au thermique

Les batteries prennent beaucoup de place

Le couple moteur

Pour un moteur d'environ 100 ch ($1 \text{ ch} = 736 \text{ W}$)

- Couple moteur thermique :
 - $\sim 100 \text{ Nm}$
 - déployé à grande vitesse ($\sim 4000 \text{ tr/min}$, près de la **vitesse max**)

Le couple moteur

Pour un moteur d'environ 100 ch ($1 \text{ ch} = 736 \text{ W}$)

- Couple moteur thermique :
 - $\sim 100 \text{ Nm}$
 - déployé à grande vitesse ($\sim 4000 \text{ tr/min}$, près de la **vitesse max**)
- Couple moteur électrique :
 - $\sim 400 \text{ Nm}$
 - Déployé à faible vitesse ($0 - 1000 \text{ tr/min}$, à **vitesse nulle**)

Le couple moteur

Pour un moteur d'environ 100 ch ($1 \text{ ch} = 736 \text{ W}$)

- Couple moteur thermique :
 - $\sim 100 \text{ Nm}$
 - déployé à grande vitesse ($\sim 4000 \text{ tr/min}$, près de la **vitesse max**)
- Couple moteur électrique :
 - $\sim 400 \text{ Nm}$
 - Déployé à faible vitesse ($0 - 1000 \text{ tr/min}$, à **vitesse nulle**)

Avantage à l'électrique

Le moteur électrique déploie des couples plus élevés à faible vitesse

$\Rightarrow$ idéal pour le démarrage (ville)

La réversibilité

Grande force de la machine électrique

La réversibilité

Grande force de la machine électrique

- Moteur qui ne travaille pas $\Rightarrow$ génératrice
 - Véhicule en descente
 - Ralentissement

La réversibilité

Grande force de la machine électrique

- Moteur qui ne travaille pas $\Rightarrow$ génératrice
 - Véhicule en descente
 - Ralentissement
- Mouvement $\rightarrow$ puissance électrique
 - Ralentissement
 - Recharge de batterie
 - Renvoi dans la caténaire (trains, trams, etc.)

La réversibilité

Grande force de la machine électrique

- Moteur qui ne travaille pas $\Rightarrow$ génératrice
 - Véhicule en descente
 - Ralentissement
- Mouvement $\rightarrow$ puissance électrique
 - Ralentissement
 - Recharge de batterie
 - Renvoi dans la caténaire (trains, trams, etc.)
- Freinage **par récupération**

La réversibilité

Grande force de la machine électrique

- Moteur qui ne travaille pas $\implies$ génératrice
 - Véhicule en descente
 - Ralentissement
 - Mouvement $\longrightarrow$ puissance électrique
 - Ralentissement
 - Recharge de batterie
 - Renvoi dans la caténaire (trains, trams, etc.)
 - Freinage **par récupération**
- ☺ C'est **comme si** un moteur à explosion produisait du carburant

Le prix

Prix de l'énergie :

- 1,25 euros pour 1 L d'essence = 12,5 centimes par kWh
- Électricité (nucléaire) : 11 centimes par kWh (7 en HC)

En plus : rendements très différents !

L'énergie électrique est moins chère

Plan

- 1 Les machines électriques tournantes
 - Présentation
 - Principe de fonctionnement
- 2 Description d'une machine électrique tournante
 - Point de vue mécanique
 - Point de vue électrique
- 3 Le parc de machines électriques
 - Exemple de la traction
 - Robustesse des moteurs
- 4 Moteurs électriques contre moteurs thermiques
 - Le choix d'un moteur
 - Grandeurs physiques et performances
- 5 Le véhicule hybride

Concilier les avantages

- Le problème du stockage est **rédhibitoire**
- Le problème de la recharge **aussi**
- **MAIS** la machine électrique a de **très grands intérêts**

Solution

Utiliser les deux en même temps

Alternateurs **très rentables** (presque 100 %) $\implies$ cela est donc possible !

Fiche technique

Moteur Thermique	
<i>Type</i>	Essence – 1,5 L – 16 soupapes
<i>Cylindrée</i>	1497 cm ³
<i>Puissance maximale</i>	77 ch (57 kW) à 5000 tr/min
<i>Puissance fiscale</i>	4 CV
<i>Couple maximal</i>	115 Nm à 4000 tr/min
<i>Consommation (mixte)</i>	4,3 L/100 km

Moteur Électrique	
<i>Type</i>	Synchrone, à aimant permanent
<i>Puissance maximale</i>	68 ch (50 kW) à 1200–1540 tr/mn
<i>Tension nominale</i>	500 V
<i>Couple maximal</i>	400 de 0 à 1200 tr/mn

Fiche technique d'une *Toyota Prius Linea Sol*

Fiche technique

Moteur Thermique

<i>Type</i>	Essence – 1,5 L – 16 soupapes
<i>Cylindrée</i>	1497 cm ³
<i>Puissance maximale</i>	77 ch (57 kW) à 5000 tr/min sous-dimensionné
<i>Puissance fiscale</i>	4 CV
<i>Couple maximal</i>	115 Nm à 4000 tr/min vitesse élevée
<i>Consommation (mixte)</i>	4,3 L/100 km faible

Moteur Électrique

<i>Type</i>	Synchrone, à aimant permanent
<i>Puissance maximale</i>	68 ch (50 kW) à 1200–1540 tr/mn plage
<i>Tension nominale</i>	500 V
<i>Couple maximal</i>	400 de 0 à 1200 tr/mn vitesse nulle

Fiche technique d'une *Toyota Prius Linea Sol*

La machine à courant continu

Électricité 2 — Électrotechnique

Christophe Palermo

IUT de Montpellier
Département Mesures Physiques
&

Institut d'Electronique du Sud
Université Montpellier 2

e-mail : `Christophe.Palermo@univ-montp2.fr`

Année Universitaire 2009–2010



Plan

- 1 Présentation et Fonctionnement
 - Principe de fonctionnement
 - Nécessité d'un collecteur
- 2 Technologie de la machine
 - Circuits électriques
 - Le collecteur et les balais
- 3 Fonctionnement de la machine
 - Caractéristiques électriques
- 4 Fonctionnement moteur
- 5 Fonctionnement en génératrice
- 6 Bilan

Plan

- 1 Présentation et Fonctionnement
 - Principe de fonctionnement
 - Nécessité d'un collecteur
- 2 Technologie de la machine
 - Circuits électriques
 - Le collecteur et les balais
- 3 Fonctionnement de la machine
 - Caractéristiques électriques
- 4 Fonctionnement moteur
- 5 Fonctionnement en génératrice
- 6 Bilan

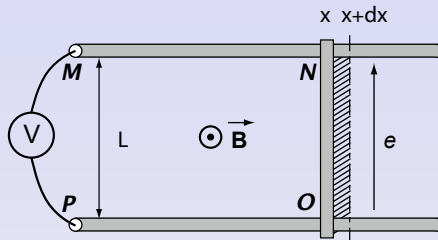
Définition

La machine à courant continu

Une machine à courant continu est une machine électrique tournante mettant en jeu des tensions et des courants continus.

- 2 tensions : induit U et inducteur u
- 2 courants : induit I et inducteur i

Les rails de Laplace : génération de f.é.m

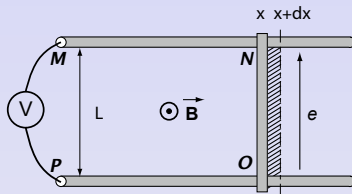


- MN et PO fixes et NO mobile
- $\vec{B}$ constant et uniforme
- Variation de surface $\Rightarrow d\phi$

$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

Mesurable avec un voltmètre

Les rails de Laplace : génération de f.é.m



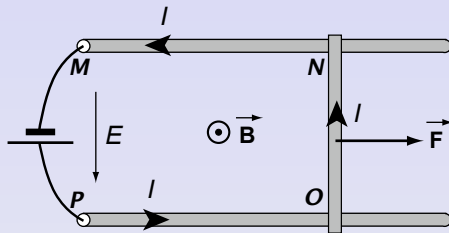
$$e = -BLv$$

- $|e| \uparrow$ quand $B \uparrow$;
- $|e| \uparrow$ quand $|v| \uparrow$;
- $\vec{B}$ change de sens $\Rightarrow e$ change de signe ;
- $\vec{v}$ change de sens, e change de signe

Même principe dans une génératrice

- Ampèremètre $\Rightarrow$ courant

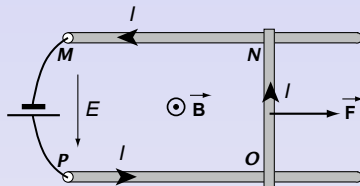
Les rails de Laplace : mise en mouvement



- MN et PO fixes et NO mobile
- $\vec{B}$ constant et uniforme
- E tension continue
- Circulation d'un courant

Force de Laplace $\vec{F} \Rightarrow$ Création
d'un mouvement
(ou flux maximum)

Les rails de Laplace : mise en mouvement

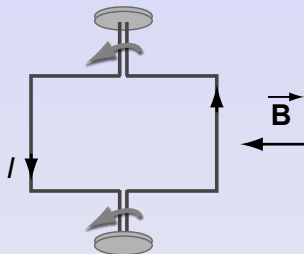


- $F \uparrow$ quand $B \uparrow$;
- $F \uparrow$ quand $I \uparrow$;
- $\vec{B}$ change de sens $\implies \vec{F}$ et $\vec{v}$ changent de sens
- E change de sens, I et $\vec{v}$ changent de sens

$$F = ILB$$

Même principe dans un moteur

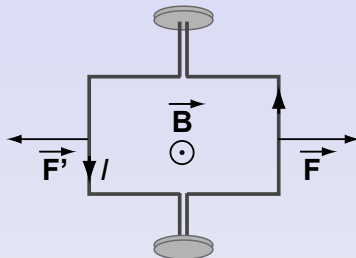
Le cadre tournant



- Rotation $\longrightarrow$ lois de **Faraday** et de **Laplace**
- $\vec{B}$ champ d'induction continu
- On impose le mouvement $\implies$ Faraday $\implies$ Génératrice
- On injecte un courant $\implies$ Laplace $\implies$ Moteur

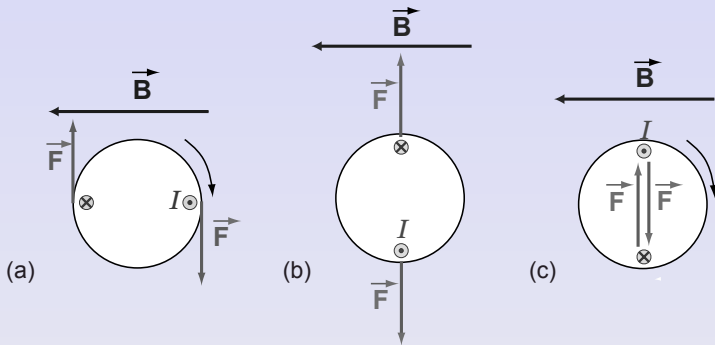
Problématique

Exemple du moteur :

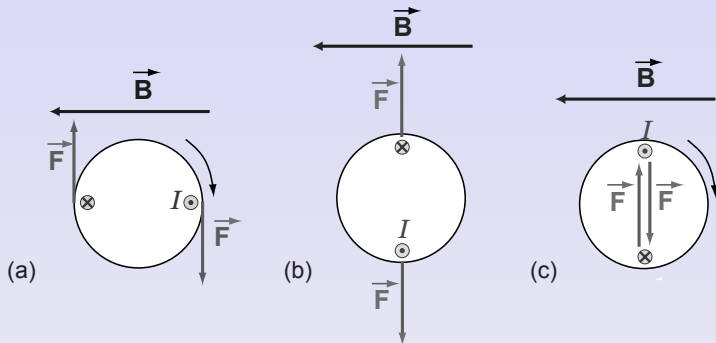


- $\vec{B} \perp \text{plan du cadre} \Rightarrow \text{couple nul} \Rightarrow \text{pas de mouvement}$
- Le cadre s'arrête au bout d'un demi-tour
- On n'a que du **courant continu** !

La solution

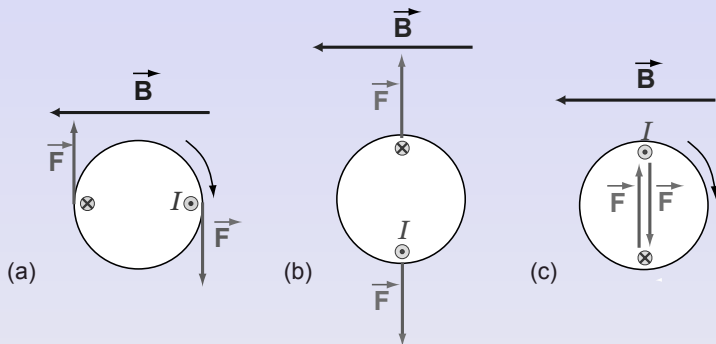


La solution



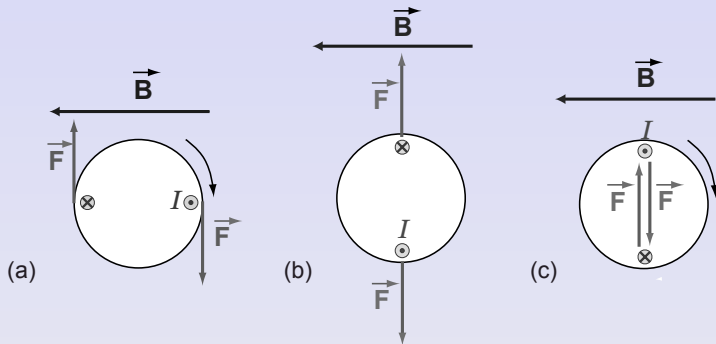
- Changer le sens du courant
- Changer le sens du champ

La solution



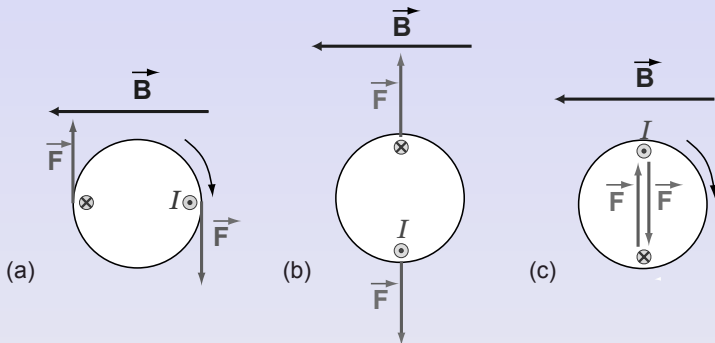
- Changer le sens du courant
- Changer le sens du champ
- Plusieurs cadres dans une MCC

La solution



- Changer le sens du courant
- Changer le sens du champ
- Plusieurs cadres dans une MCC

La solution



- Changer le sens du courant
- Changer le sens du champ
- Plusieurs cadres dans une MCC

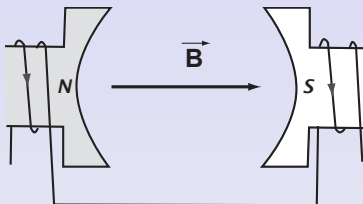
- Que du **courant continu**
- **Collecteur** : dispositif d'inversion

Plan

- 1 Présentation et Fonctionnement
 - Principe de fonctionnement
 - Nécessité d'un collecteur
- 2 Technologie de la machine
 - Circuits électriques
 - Le collecteur et les balais
- 3 Fonctionnement de la machine
 - Caractéristiques électriques
- 4 Fonctionnement moteur
- 5 Fonctionnement en génératrice
- 6 Bilan

Le stator

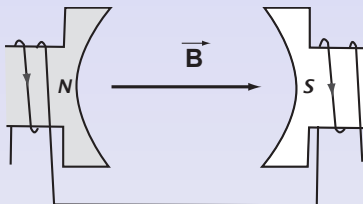
- Stator = inducteur
- Crée le champ inducteur (continu)



- Peut-être composé
 - d'aimants permanents (i fixe)
 - de bobinages (i réglable)
- Courant inducteur = courant d'excitation = i

Le stator

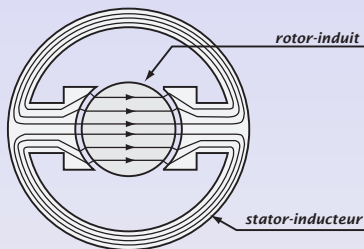
- Stator = inducteur
- Crée le champ inducteur (continu)



- Peut-être composé
 - d'aimants permanents (i fixe)
 - de bobinages (i réglable)
- Courant inducteur = courant d'excitation = i

Le rotor

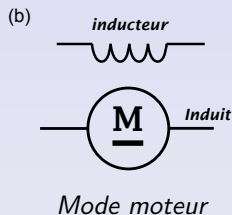
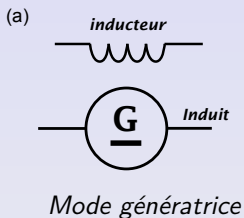
- Rotor = induit
- Ensemble de **cadres tournants**



- Baigne dans le champ magnétique
- Siège de la **conversion électro-mécanique**
- Apparition d'un **couple** ou d'une **f.é.m**

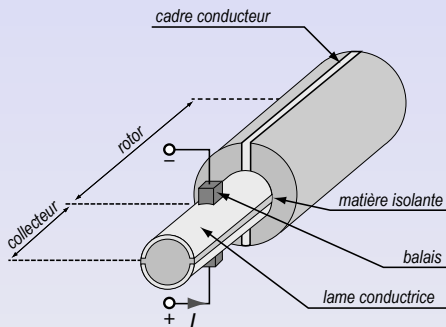
Symboles électriques

- Il en existe plusieurs
- Nous utiliserons :



Technologie

- Il faut inverser le courant
- Exemple **simplifié** pour 1 cadre



- 2 lames $\leftrightarrow$ 1 cadre
- Balais (= charbons) **assurent le contact électrique**

Plan

- 1 Présentation et Fonctionnement
 - Principe de fonctionnement
 - Nécessité d'un collecteur
- 2 Technologie de la machine
 - Circuits électriques
 - Le collecteur et les balais
- 3 **Fonctionnement de la machine**
 - **Caractéristiques électriques**
- 4 Fonctionnement moteur
- 5 Fonctionnement en génératrice
- 6 Bilan

Montages électriques

- Machine : 1 circuit inducteur + 1 circuit induit

Montages électriques

- Machine : 1 circuit inducteur + 1 circuit induit
- Connexion en série : montage **série**
- Connexion en parallèle : montage **shunt**
- Connexion indépendante : montage à **excitation séparée**

Montages électriques

- Machine : 1 circuit inducteur + 1 circuit induit
- Connexion en série : montage **série**
- Connexion en parallèle : montage **shunt**
- Connexion indépendante : montage à **excitation séparée**
- **Des caractéristiques différentes**

Dans ce cours

Nous étudierons le montage à excitation séparée uniquement

- Équations :
 - shunt : on posera $U = u$
 - série : on posera $I = i$

Schémas électriques équivalents

Définition

On appelle **schéma électrique équivalent** d'un circuit un schéma permettant de rendre compte du **comportement électrique** de ce circuit à l'aide de **générateurs** et de **composants simples**.

- Échauffement $\Rightarrow$ **résistance**
- Fuites de courant $\Rightarrow$ **conductance**
- Force électromotrice $\Rightarrow$ **dipôle polarisé**
- Pertes de flux magnétique (**ALTERNATIF**) $\Rightarrow$ **bobine**
- Effets capacitifs (**ALTERNATIF**) $\Rightarrow$ **condensateur**

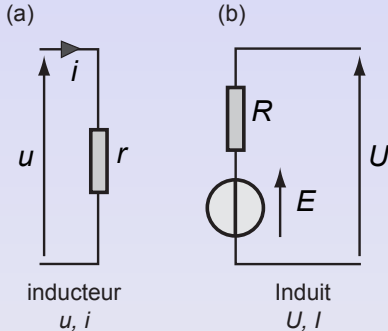
Schémas électriques équivalents

Définition

On appelle **schéma électrique équivalent** d'un circuit un schéma permettant de rendre compte du **comportement électrique** de ce circuit à l'aide de **générateurs** et de **composants simples**.

- Échauffement $\Rightarrow$ **résistance**
- Fuites de courant $\Rightarrow$ **conductance**
- Force électromotrice $\Rightarrow$ **dipôle polarisé**
- Pertes de flux magnétique (**ALTERNATIF**) $\Rightarrow$ **bobine**
- Effets capacitifs (**ALTERNATIF**) $\Rightarrow$ **condensateur**
- Et pour la MCC ?
 - ✧ **2** Bobinages traversés par un courant continu
 - ✧ Point de vue électrique $\Rightarrow$ échauffement $\Rightarrow$ résistance
 - ✧ Induction d'une f.é.m dans l'induit $\Rightarrow$ dipôle polarisé

Schémas électriques équivalents de la MCC



- r résistance d'inducteur
- R résistance d'induit
- E force électromotrice ou contre électromotrice

- Sens du courant induit I : dépend du mode de fonctionnement
 - Moteur $\longrightarrow$ Puissance mécanique $\longrightarrow E$ et I en sens inverses (récepteur)
 - Génératrice $\longrightarrow$ Puissance électrique $\longrightarrow E$ et I dans le même sens

La force électromotrice E

- Rotor-induit : siège d'une f.é.m
- Vrai pour le moteur et la génératrice
- Force **contre**-électromotrice pour le moteur

La force électromotrice E

- Rotor-induit : siège d'une f.é.m
- Vrai pour le moteur et la génératrice
- Force **contre**-électromotrice pour le moteur
- Rails de Laplace : $f.é.m = f(B, v)$

La force électromotrice E

- Rotor-induit : siège d'une f.é.m
- Vrai pour le moteur et la génératrice
- Force **contre**-électromotrice pour le moteur
- Rails de Laplace : $f.é.m = f(B, v)$

$$E = K\phi\Omega$$

avec K constante de la machine, ϕ en Wb et Ω en rad/s

Puissance et couple électromagnétique

- Puissance électromagnétique :
 - Transmise entre rotor et stator (champ magnétique)
 - Convertie (électrique $\longleftrightarrow$ mécanique)
 - En rapport avec E (et I)

$$P_{em} = EI$$

Puissance et couple électromagnétique

- Puissance électromagnétique :
 - Transmise entre rotor et stator (champ magnétique)
 - Convertie (électrique $\longleftrightarrow$ mécanique)
 - En rapport avec E (et I)

$$P_{em} = EI$$

- Couple électromagnétique T_{em} :
 - Appliqué par les forces de Laplace
 - Sur le rotor

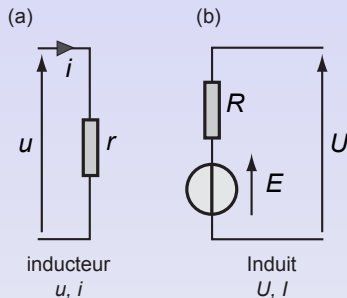
$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = K\phi I$$

⇒ T_{em} proportionnel à I

Plan

- 1 Présentation et Fonctionnement
 - Principe de fonctionnement
 - Nécessité d'un collecteur
- 2 Technologie de la machine
 - Circuits électriques
 - Le collecteur et les balais
- 3 Fonctionnement de la machine
 - Caractéristiques électriques
- 4 **Fonctionnement moteur**
- 5 Fonctionnement en génératrice
- 6 Bilan

Définition



Mode moteur

Une machine à courant continu fonctionne en mode moteur **si et seulement si** $U > E$.

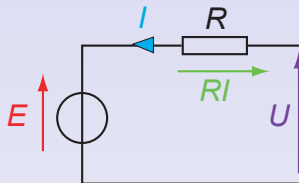
⇒ L'induit **absorbe** le courant I

Vitesse du moteur

- Vitesse n (tr/s ou s^{-1}) ou $\Omega = 2\pi n$ (rad/s)
- Usage : tr/min ou min^{-1}

Vitesse du moteur

- Vitesse n (tr/s ou s^{-1}) ou $\Omega = 2\pi n$ (rad/s)
- Usage : tr/min ou min^{-1}



$$\Rightarrow U = E + RI$$

$$\Omega = \frac{U - RI}{K\phi}$$

Deux remarques

- $RI \ll U \implies \Omega \simeq \frac{U}{K\phi}$

Commande du moteur

U permet de contrôler la vitesse de rotation pour ϕ donné.

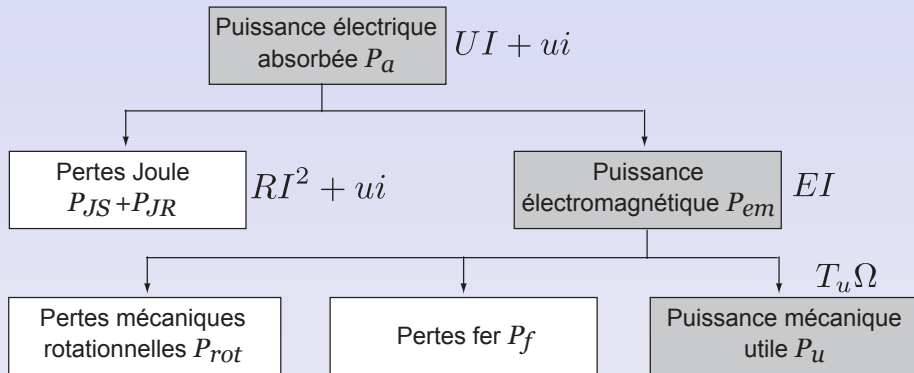
- $n \propto \frac{U - RI}{i}$

⇒ $i \longrightarrow 0 \implies n \longrightarrow \infty$

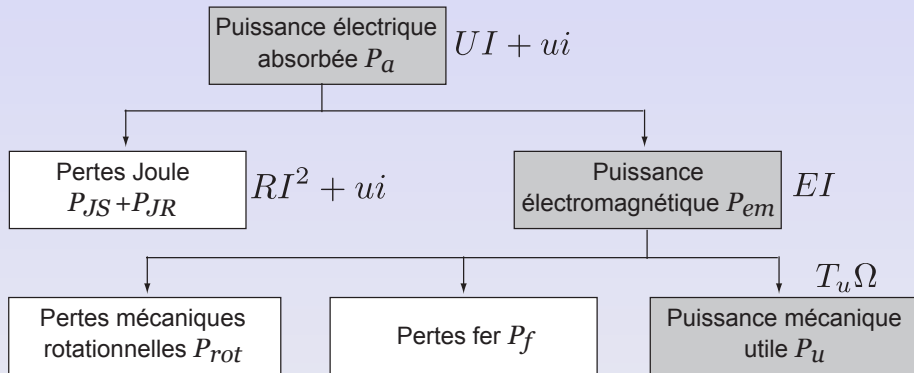
Emballement du moteur

Ne **jamais** couper l'inducteur d'un moteur à courant continu en fonctionnement. **Risque d'emballement !**

Bilan des puissances du moteur à courant continu



Bilan des puissances du moteur à courant continu



$$P_{cste} = P_{rot} + P_f \text{ se mesurent à vide (cf notes)}$$

Rendement du moteur

Définition

Le rendement η d'un moteur est le rapport entre la puissance mécanique utile P_u et la puissance électrique absorbée P_a .

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} (< 100 \%)$$

Rendement du moteur

Définition

Le rendement η d'un moteur est le rapport entre la puissance mécanique utile P_u et la puissance électrique absorbée P_a .

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} (< 100 \%)$$

À vide :

- Sans charge mécanique
- $P_u = 0$ (moteur inutile)
- $\eta = 0$

Couple utile d'un moteur à courant continu

$$\text{Bilan des puissances} \implies T_u \propto \phi I$$

Commande du moteur

Le courant I permet de contrôler le couple moteur pour ϕ donné.

- T_u et n sont contrôlables **indépendamment**
- Faibles vitesses et forts couples
- Idéal pour le **démarrage en charge**

Démarrage du moteur à excitation séparée

- Au démarrage :
 - $\Omega = 0 \implies E = 0$
 - La résistance d'induit R est **petite**
 - $I = U/R$ **très grand**
- Limiter la tension U :
 - Rhéostat de démarrage $\implies$ n'est plus utilisé
 - Variateur de vitesse (hacheurs, tension variable) $\implies$ TP

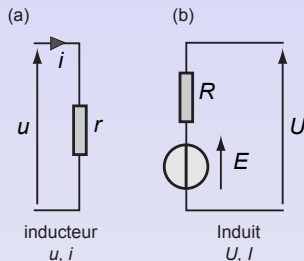
Tension de démarrage

Pour contrôler le courant, un moteur à excitation séparée doit être démarré à **tension réduite**.

Plan

- 1 Présentation et Fonctionnement
 - Principe de fonctionnement
 - Nécessité d'un collecteur
- 2 Technologie de la machine
 - Circuits électriques
 - Le collecteur et les balais
- 3 Fonctionnement de la machine
 - Caractéristiques électriques
- 4 Fonctionnement moteur
- 5 Fonctionnement en génératrice
- 6 Bilan

Définition



Mode moteur

Une machine à courant continu fonctionne en mode génératrice **si et seulement si** $E > U$.

- ⇒ L'induit **délivre** le courant I
- ⇒ $U = E - RI \implies$ on recalcule comme précédemment

Plan

- 1 Présentation et Fonctionnement
 - Principe de fonctionnement
 - Nécessité d'un collecteur
- 2 Technologie de la machine
 - Circuits électriques
 - Le collecteur et les balais
- 3 Fonctionnement de la machine
 - Caractéristiques électriques
- 4 Fonctionnement moteur
- 5 Fonctionnement en génératrice
- 6 Bilan

Bilan de la machine à courant continu

- Avantages :

- Commande facile : $U \longleftrightarrow n$ et $I \longleftrightarrow T_u$
- Connexion directe sur batteries possible
- Facilement réversible (U par rapport à E)
- Couple au démarrage réglable et important

- Inconvénients :

- Emballement possible
- Tension au démarrage à contrôler
- Prix élevé
- Maintenance nécessaire
- Source importante de nuisances (étincelles)