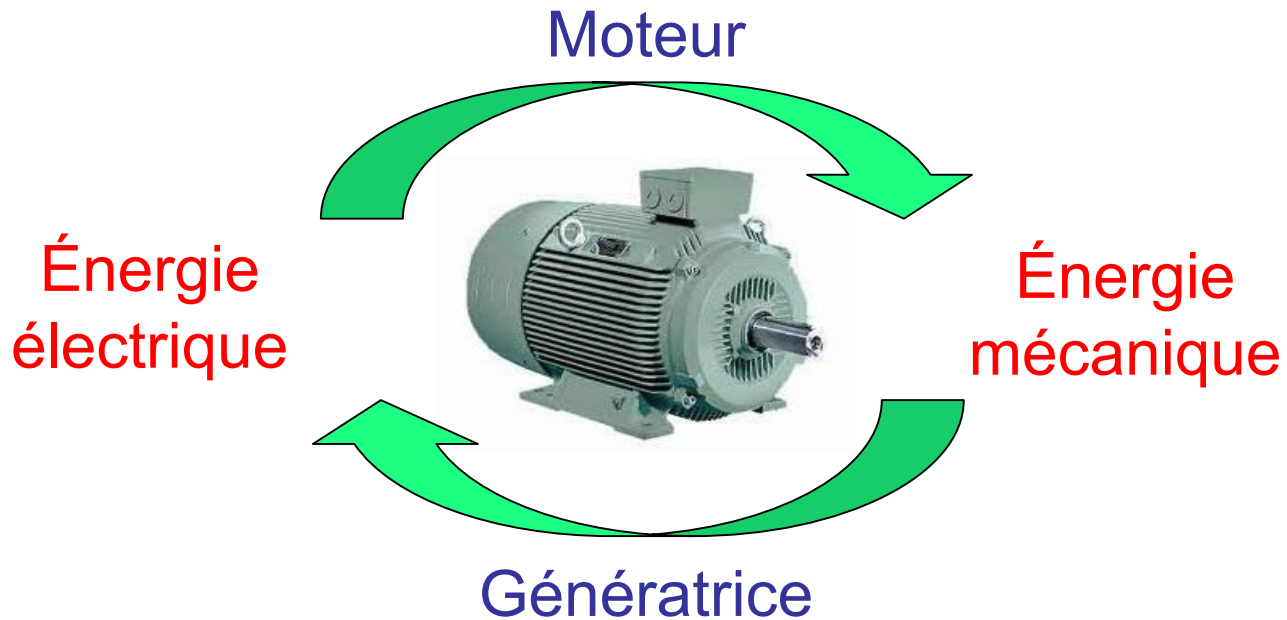


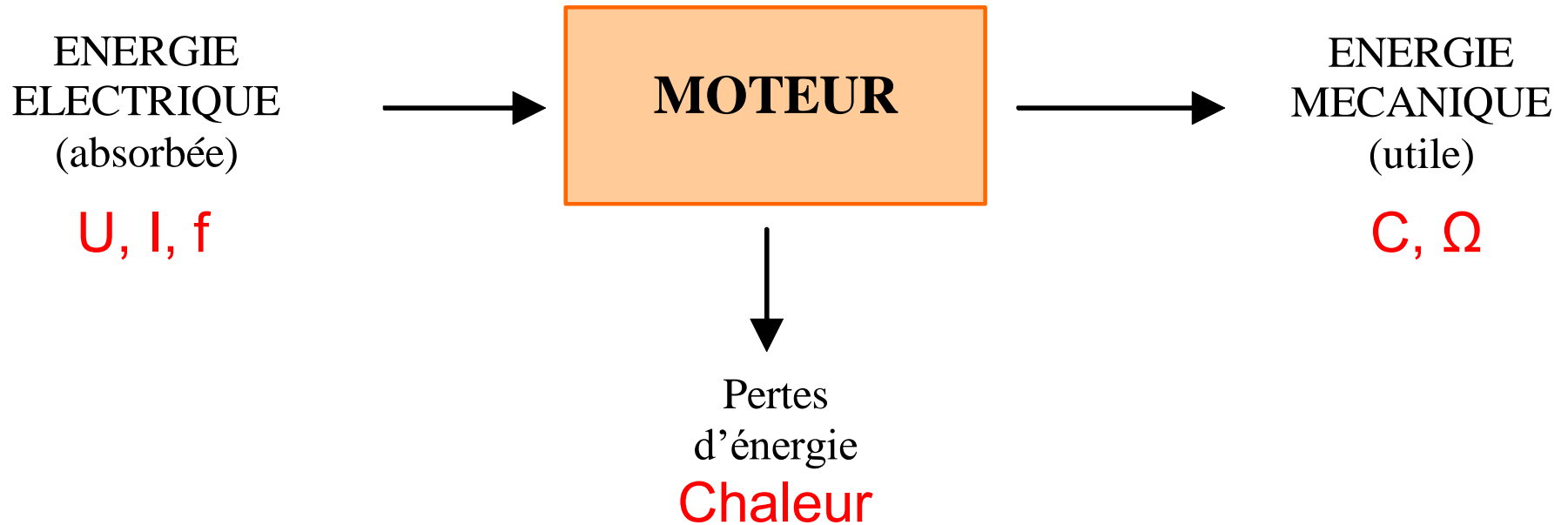
MACHINE ELECTRIQUES TOURNANTES

2022 / 2023

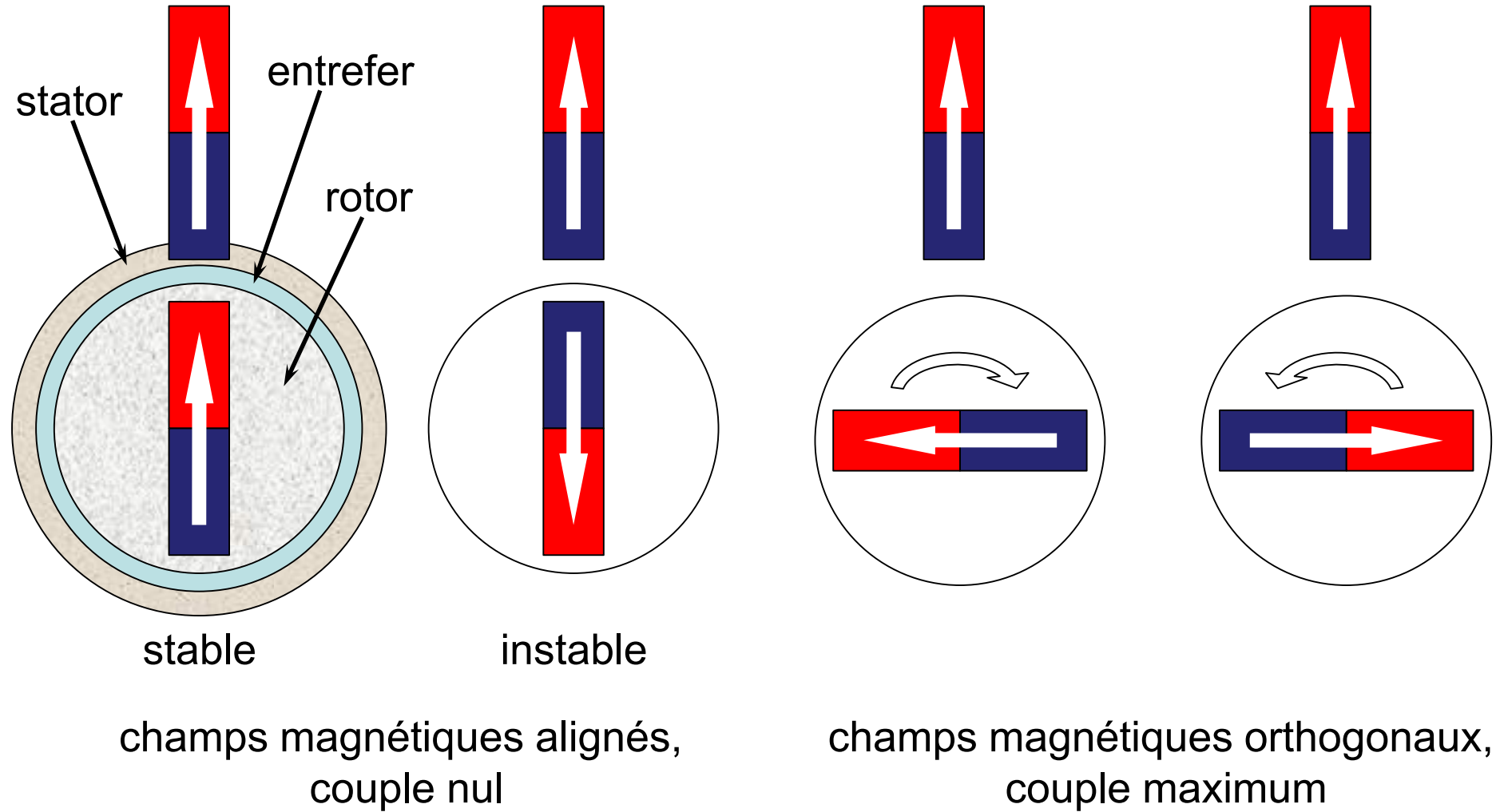
La conversion
énergie électrique \leftrightarrow énergie mécanique
fait appel aux machines tournantes.



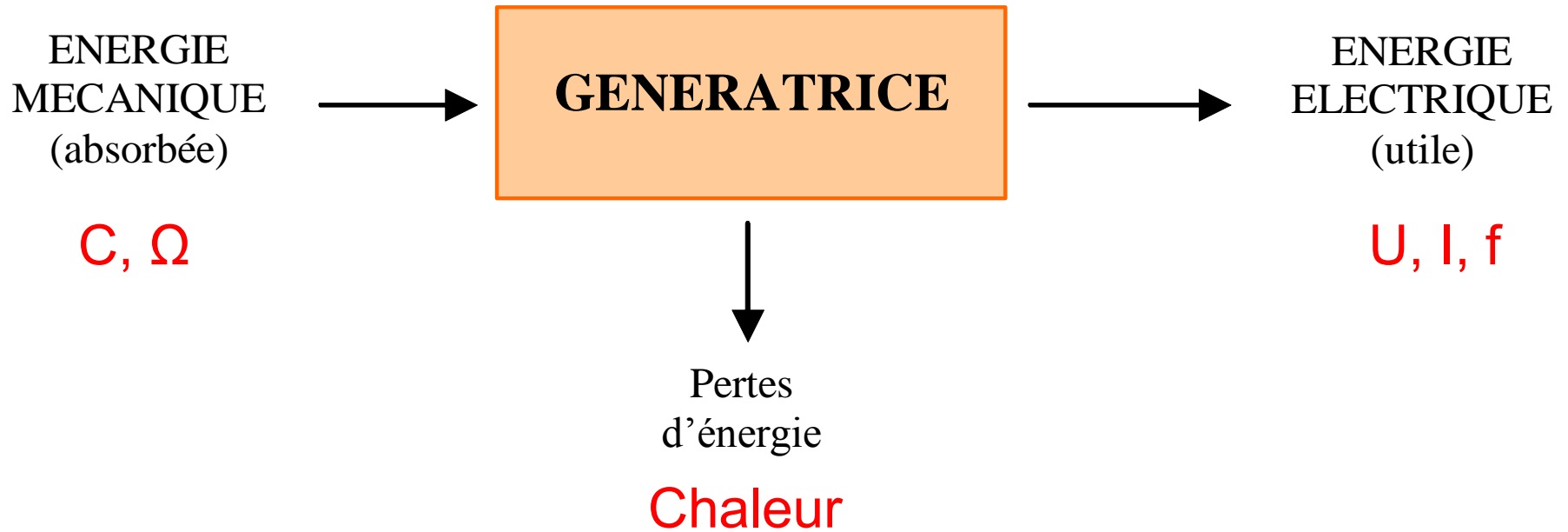
Cas du fonctionnement en moteur (actionneur)



Fonctionnement en moteur



Cas du fonctionnement en génératrice (source d'énergie électrique)



MACHINE A

COURANT CONTINU

2022/2023

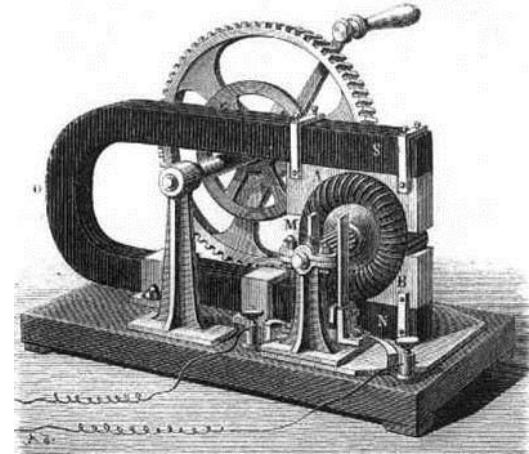
Définition :

Une **machine à C.C.** est un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un **courant continu** et un dispositif mécanique.



Zénobe Gramme
1826 - 1901

En 1868, **Zénobe Gramme** construit la première dynamo à courant continu, point de départ de l'industrie électrique moderne.



Lorsqu'un physicien a mis la dynamo en équation, Gramme a déclaré « ***s'il m'avait fallu savoir tout cela, je ne l'aurais jamais inventée*** »



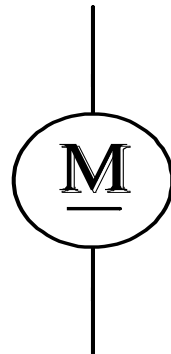
Hippolyte Fontaine
1833 - 1910

En 1873, **Hippolyte Fontaine** - réversibilité de la dynamo ; peut fournir de l'énergie mécanique à partir d'énergie électrique et donc servir de moteur.

L'énergie électrique se présente sous forme de **tensions et de courants continus ou unidirectionnels**.

L'énergie mécanique se présente sous forme d'un couple, de moment **T** [N.m], susceptible de tourner à la vitesse angulaire **Ω** [rad/s].

Symbole :



Induit



Inducteur

Les moteurs à courant continu sont généralement associés à des dispositifs qui permettent de régler leur vitesse.

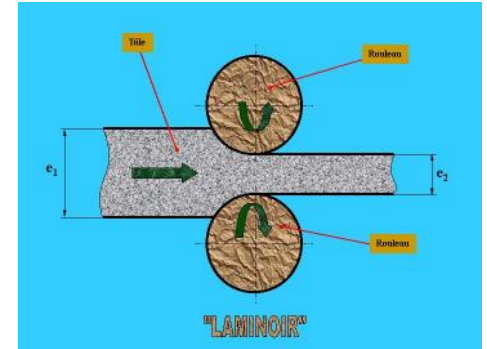
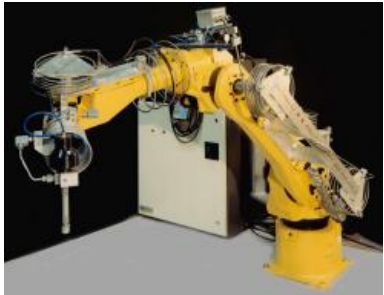
- les redresseurs
- les hacheurs.

S'ils sont branchés sur le secteur (ex. perceuse), le dispositif qui alimente le moteur peut être précédé d'un redresseur.

Utilisation du moteur à courant continu



- l'industrie (pompe et laminoir),
- la robotique,
- les jouets,
- la traction (locomotives),
- l'automobile (essuie glace, démarreur, motorisation hybride)
- l'électroménager.



CONSTITUTION DE LA MACHINE

- * un circuit magnétique (**stator** et **rotor** séparés par un entrefer).

- * des circuits électriques :
 - un circuit électrique sur le rotor (induit)
 - un circuit électrique sur le stator lorsque la machine n'est pas à aimants permanents (inducteur).

- * un **collecteur** solidaire du rotor, qui, associé à des **balais**, permet de relier l'induit de la machine au circuit électrique extérieur (source ou charge).

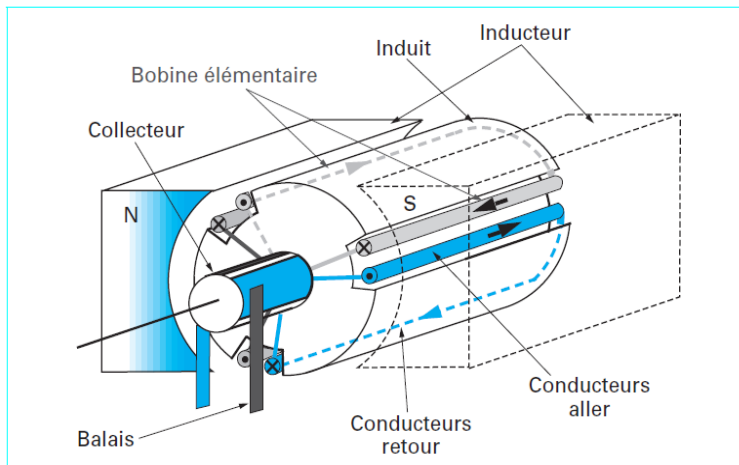
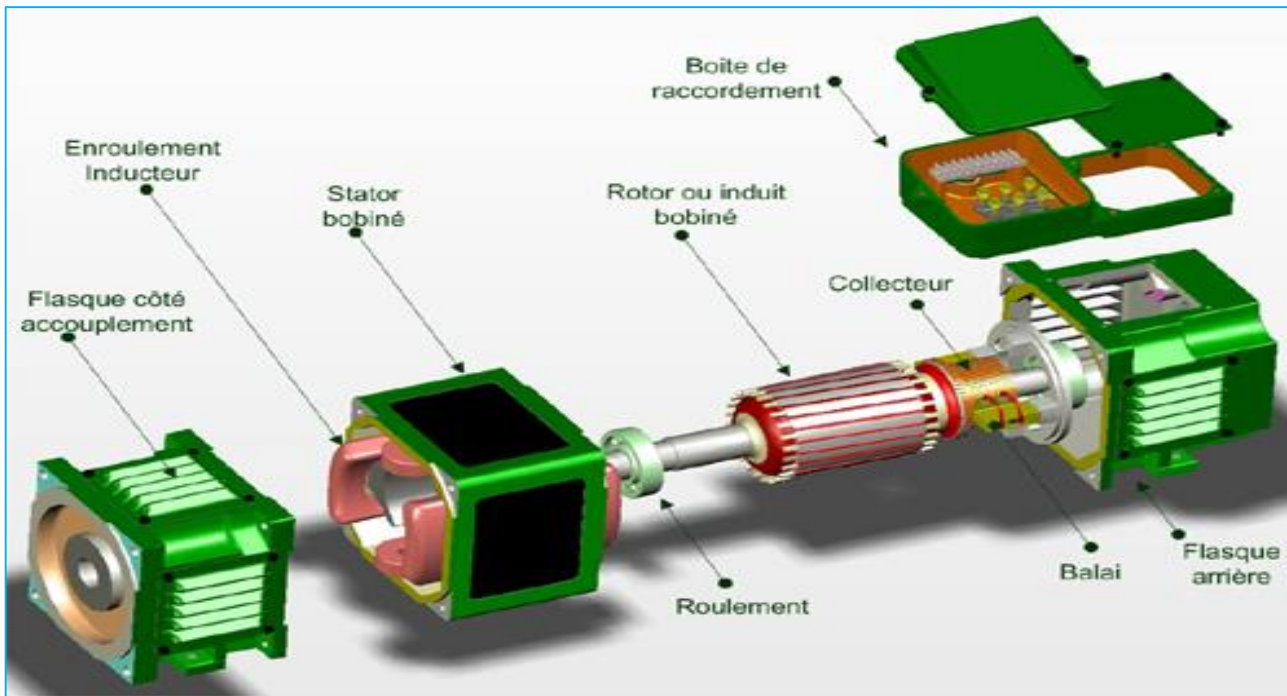


Figure 4 - Moteur simplifié à trois bobines au rotor

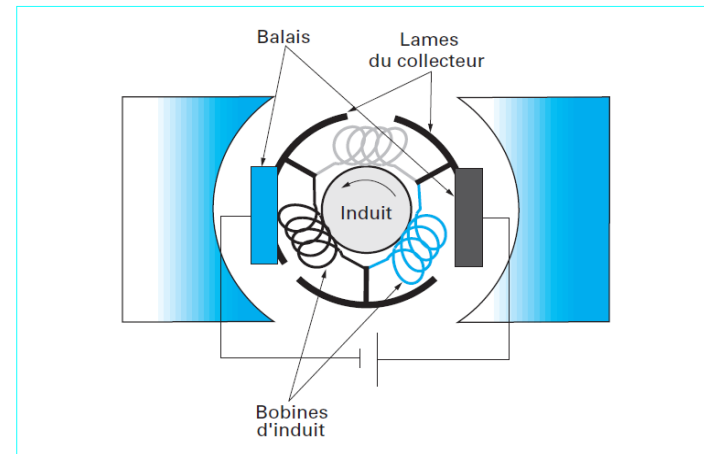


Figure 5 - Détail de l'induit dans un moteur simplifié à trois bobines au rotor

L'inducteur (porté par le stator)

2 possibilités :

- aimants permanents (flux magnétique constant)
- bobines enroulées autour des pôles (flux réglable par le courant dans l'inducteur)



L'inducteur a pour but de créer un champ magnétique au niveau de l'entrefer.

L'induit (porté par le rotor)

C'est un circuit électrique constitué de conducteurs en série enroulés sur le rotor et placés dans des encoches.



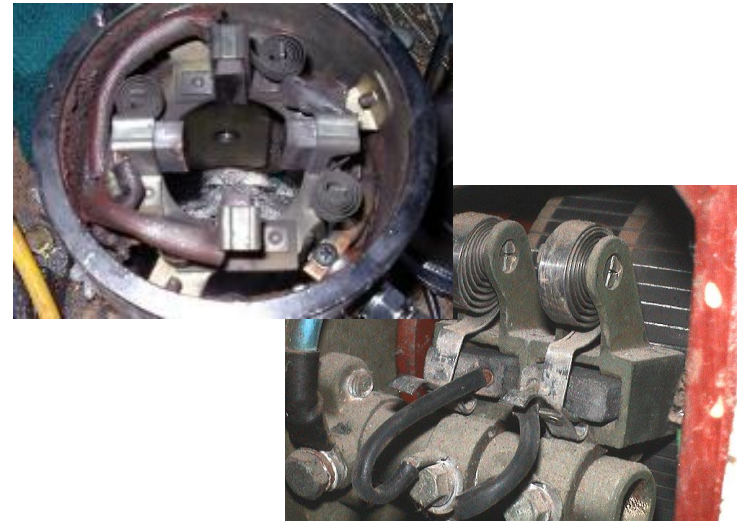
C'est au niveau de ce circuit que se produiront les phénomènes électromagnétiques.

Collecteur et balais



Le **collecteur** est un ensemble de lames de cuivre isolées les unes des autres et situées en bout d'arbre.

Les **balais** sont portés par le stator et frottent sur le collecteur de façon à assurer la liaison électrique entre le rotor et le circuit électrique extérieur.

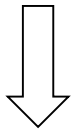


Dans le fonctionnement en générateur, l'ensemble collecteur – balais assure un effet de redressement mécanique

Fonctionnement en moteur

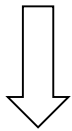
Considérons une machine simplifiée : bipolaire et constituée d'une seule spire.

Champ mag. B +
courant continu I

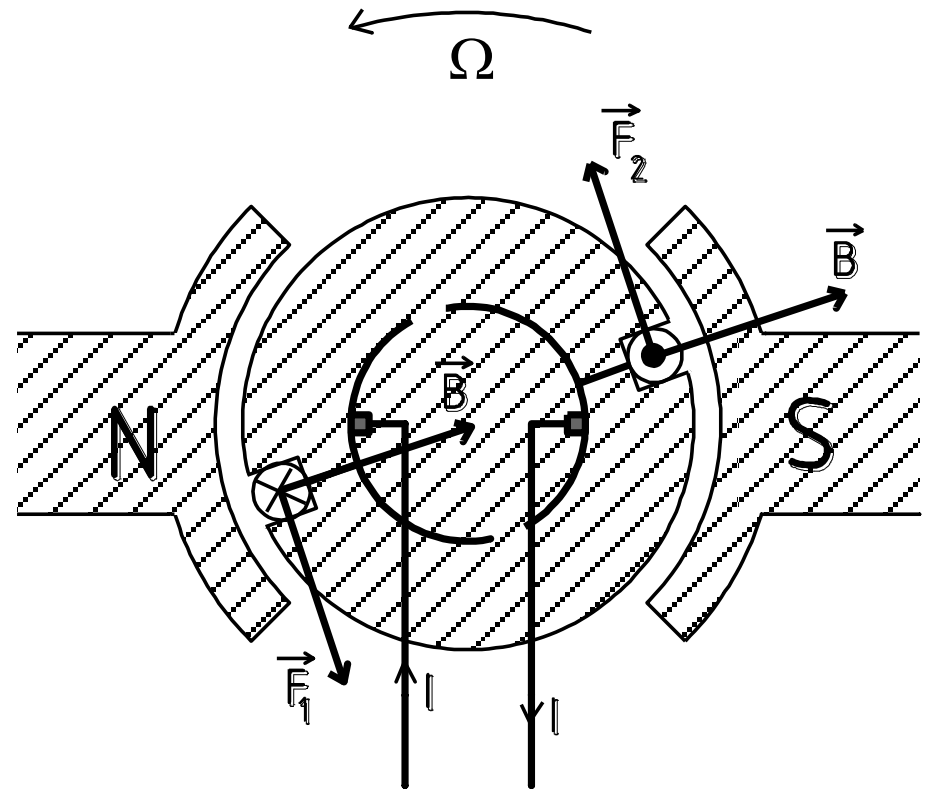


couple de forces de Laplace

F_1 et F_2



rotation du rotor avec
la vitesse Ω



Remarques :

- * Le collecteur et les balais permettent, à chaque demi-tour, d'inverser le sens du courant dans les conducteurs afin d'assurer la rotation.
- * Les conducteurs étant à présent en mouvement dans un champ magnétique, il va apparaître à leurs bornes une f.é.m. induite tendant à s'opposer à la rotation.

$$E = K \cdot \varphi \cdot \Omega$$

K : constante - dépend que des caractéristiques de la machine.

φ : flux utile sous un pôle (Wb)

Ω : vitesse de rotation (rad/s)

Réversibilité des machines à courant continu

Les machines à courant continu peuvent fonctionner tant en moteur qu'en génératrice :

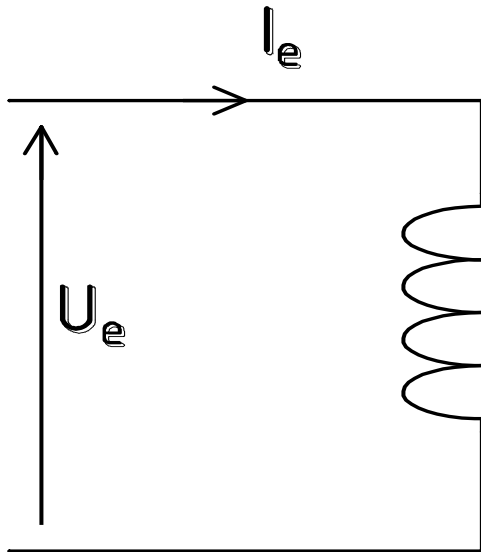
- * si on alimente l'induit, le rotor se met à tourner,
- * si on fait tourner le rotor, l'induit génère une f.é.m. E.

On dit que les machines à C.C. sont **réversibles**.

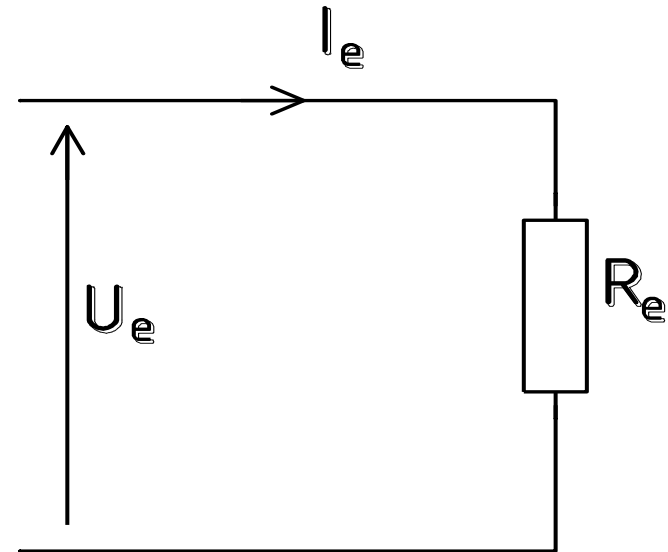
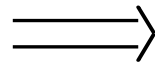
MODELES EQUIVALENTS DES MACHINES A COURANT CONTINU

Inducteur

Lorsque l'inducteur n'est pas à aimants permanents, il est constitué de bobines en série traversées par un courant continu I_e , appelé courant d'excitation.



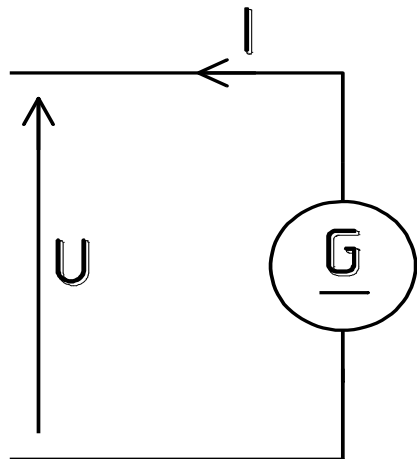
Inducteur



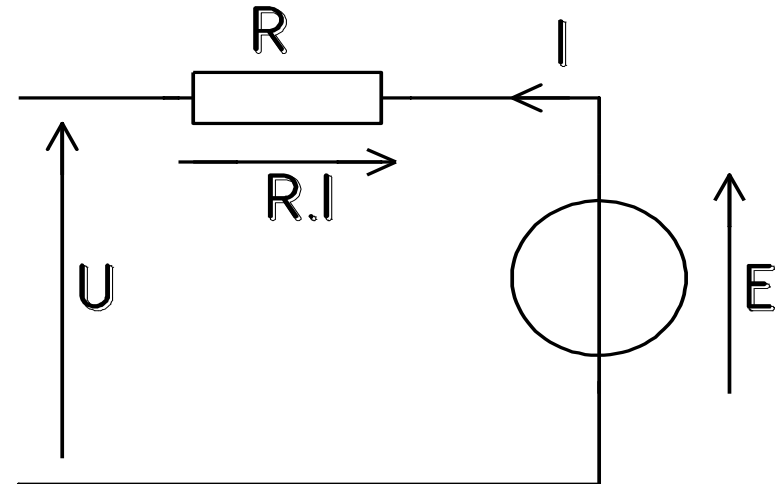
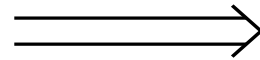
Modèle équivalent de l'inducteur

On sait, qu'en courant continu, une bobine est équivalente à sa résistance

Induit (génératrice)



Induit



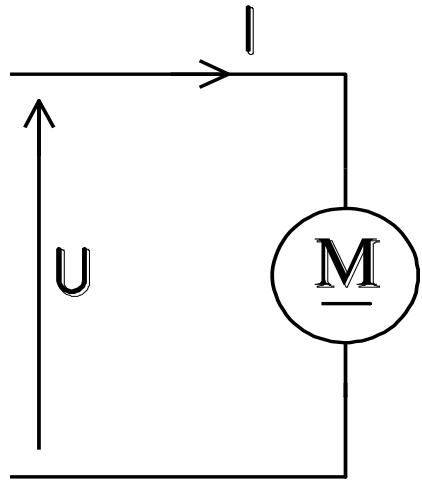
Modèle équivalent de l'induit

Loi des mailles : $U + R \cdot I - E = 0$

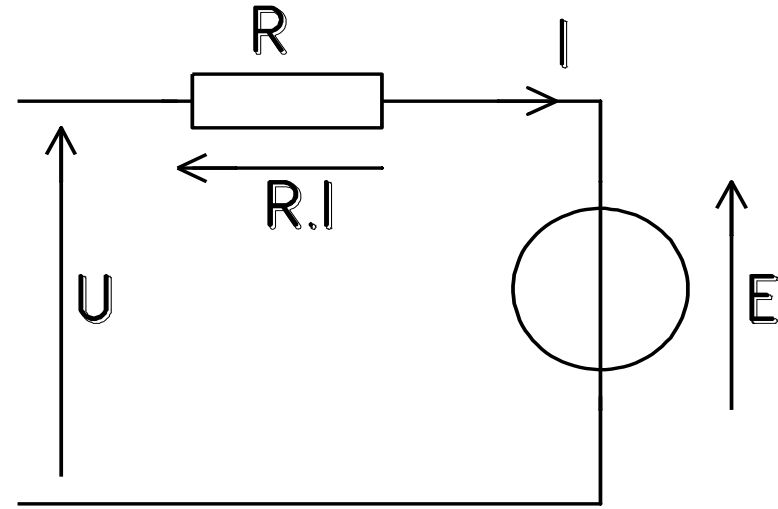
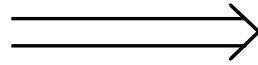
donc :

$$U = E - R \cdot I$$

Induit (moteur)



Induit



Modèle équivalent de l'induit

Loi des mailles : $U - R \cdot I - E = 0$

donc :

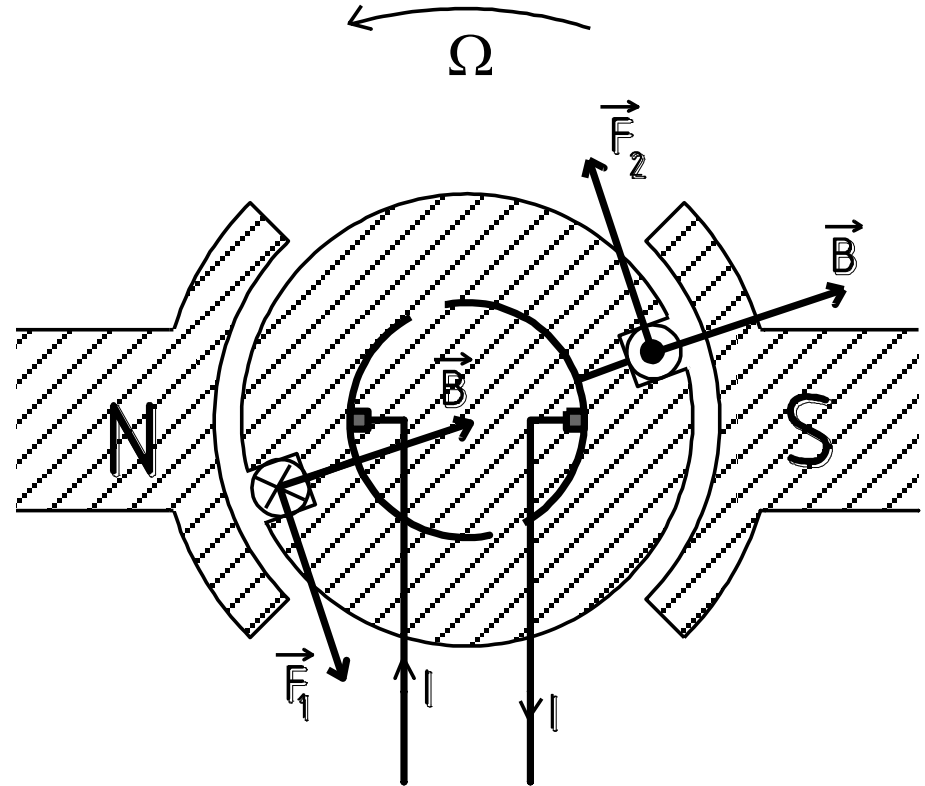
$$U = E + R \cdot I$$

COUPLE ET PUISSANCE

Couple électromagnétique

Les deux conducteurs sont soumis à un couple de forces F_1 et F_2 .

Un couple de forces se caractérise par son moment noté T .



Pour plusieurs conducteurs, la somme des moments est appelé le **moment du couple électromagnétique**, noté T_{EM} ²⁶

Couple électromagnétique

Puissance électromagnétique de l'induit

$$P_{EM} = E \cdot I$$

Puissance développée par le couple électromagnétique

$$P_{EM} = T_{EM} \cdot \Omega$$

$$P_{EM} = T_{EM} \cdot \Omega = E \cdot I$$



$$T_{EM} = E \cdot I / \Omega$$

$$E = K \cdot \varphi \cdot \Omega$$



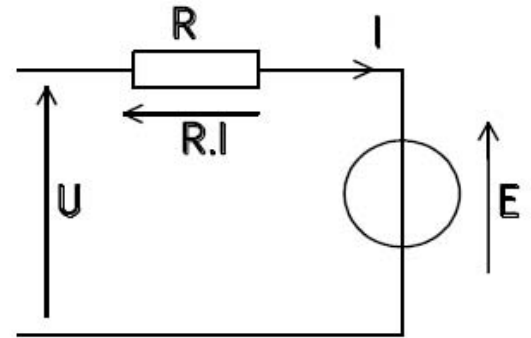
$$T_{EM} = K \cdot \varphi \cdot \Omega \cdot I / \Omega$$



$$T_{EM} = K \cdot \varphi \cdot I$$

Bilan des puissances en moteur

$$U = E + R \cdot I \quad | \quad \times I$$



Modèle équivalent de l'induit

$$U \cdot I = E \cdot I + R \cdot I^2$$

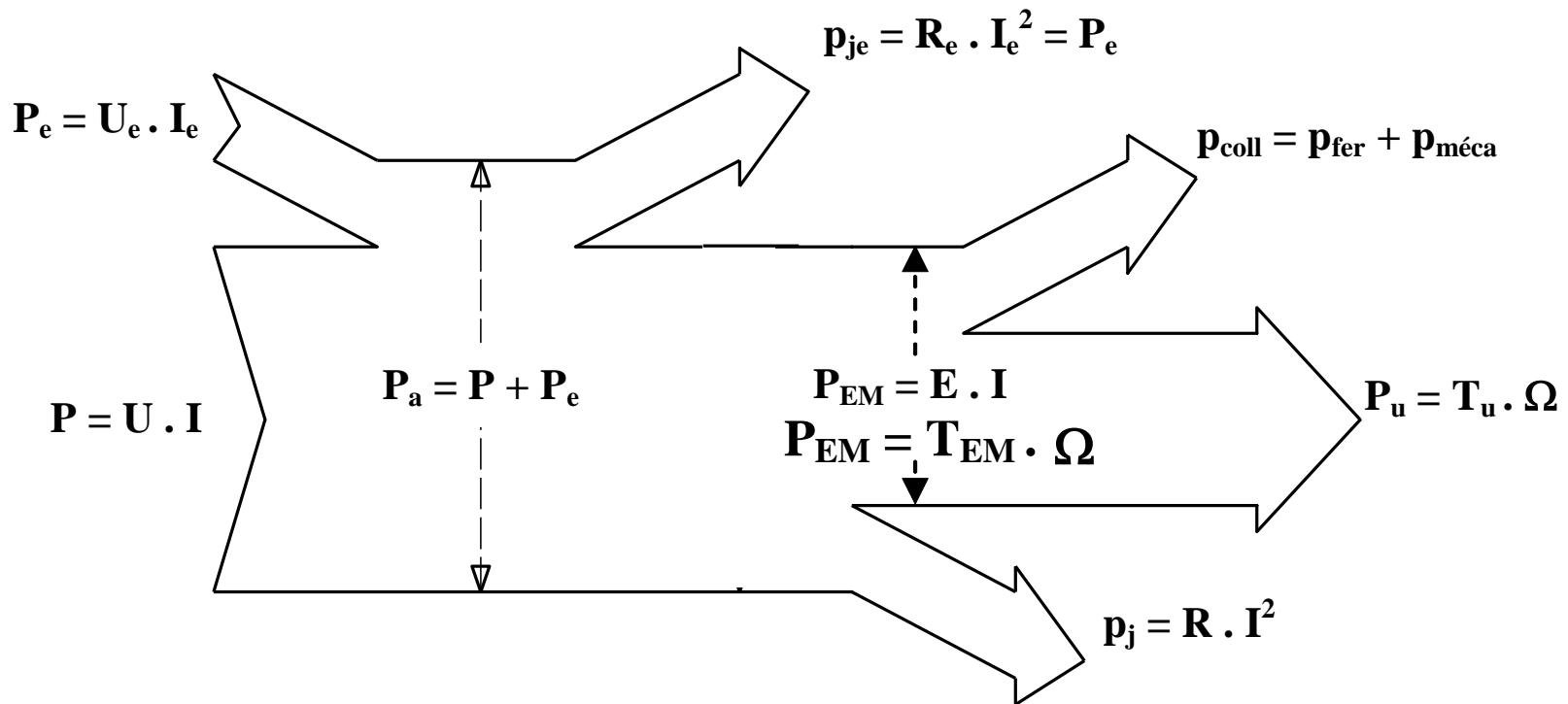
Puissance
absorbée

Puissance
électromagnétique

Pertes par effet
Joule dans l'induit

- pertes magnétiques : p_{fer}
- pertes mécaniques : $p_{\text{méca}}$

Bilan des puissances en moteur

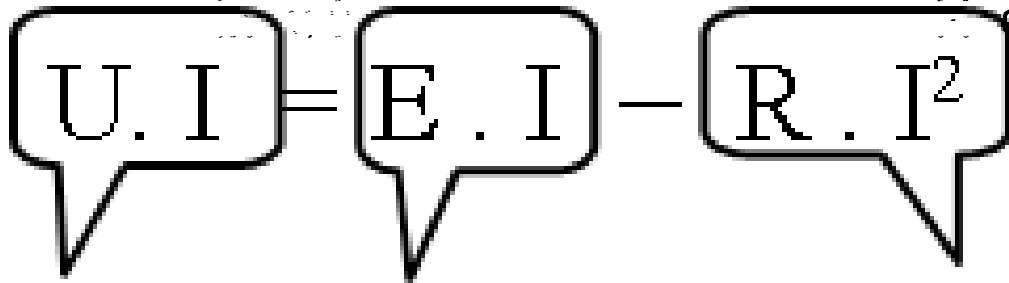
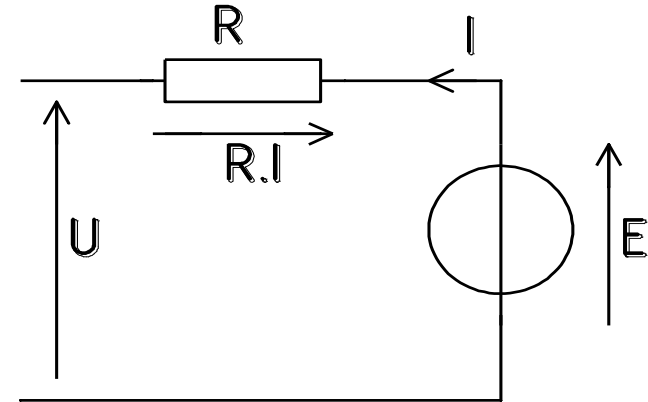


P : puissance absorbée par l'induit
(électrique)
 P_e : puissance absorbée par l'inducteur
(électrique)
 P_a : puissance totale absorbée par le
moteur
 P_{EM} : puissance électromagnétique
 p_{je} : pertes par effet Joule dans l'inducteur

p_j : pertes par effet Joule dans l'induit
 p_{coll} : pertes collectives (pertes
magnétiques + pertes méc.)
 P_u : puissance utile fournie par le moteur
(mécanique)
 T_{EM} : moment du couple
électromagnétique
 T_u : moment du couple utile
 Ω : vitesse de rotation

Bilan des puissances en génératrice

$$U = E - R \cdot I \quad | \quad \times I$$



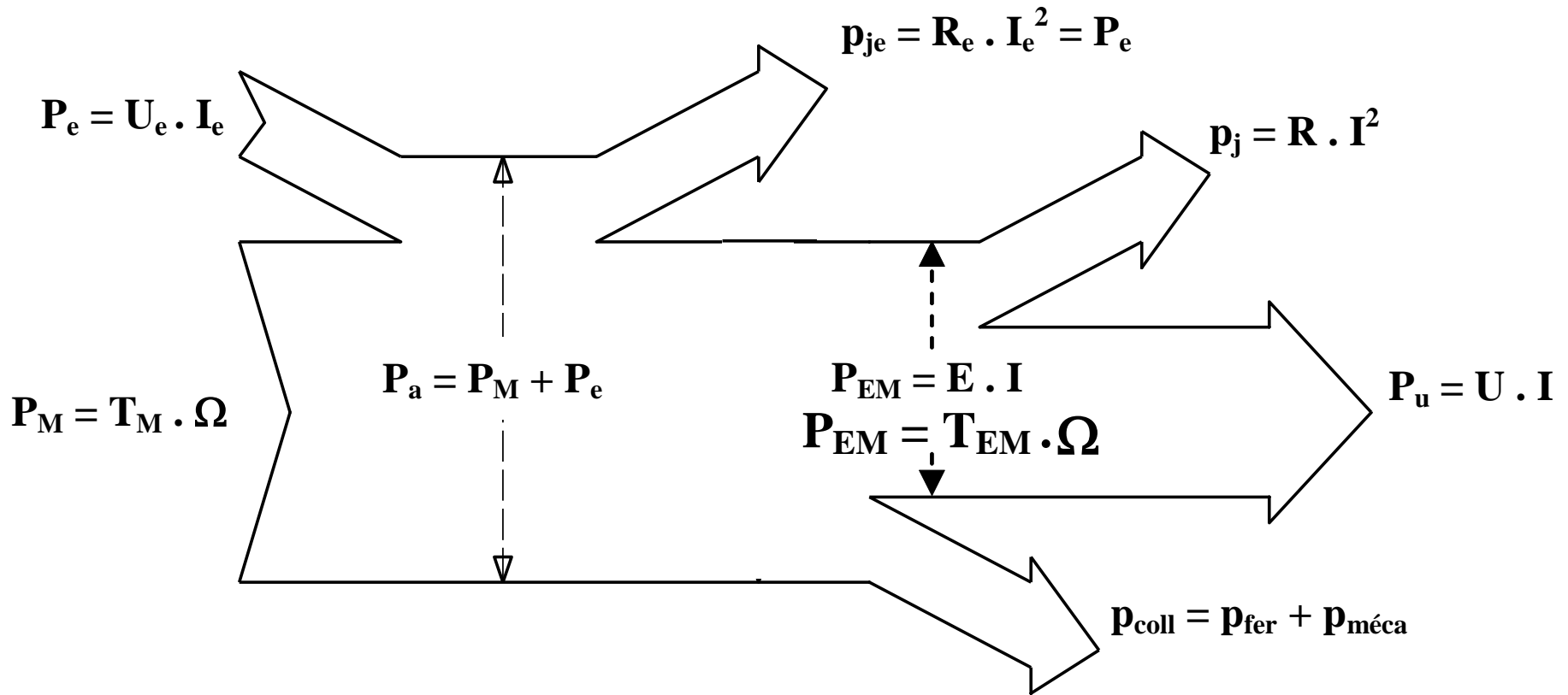
Puissance utile

Puissance électromagnétique

Pertes par effet Joule dans l'induit

- pertes magnétiques : p_{fer}
- pertes mécaniques : $p_{méca}$

Bilan des puissances en génératrice

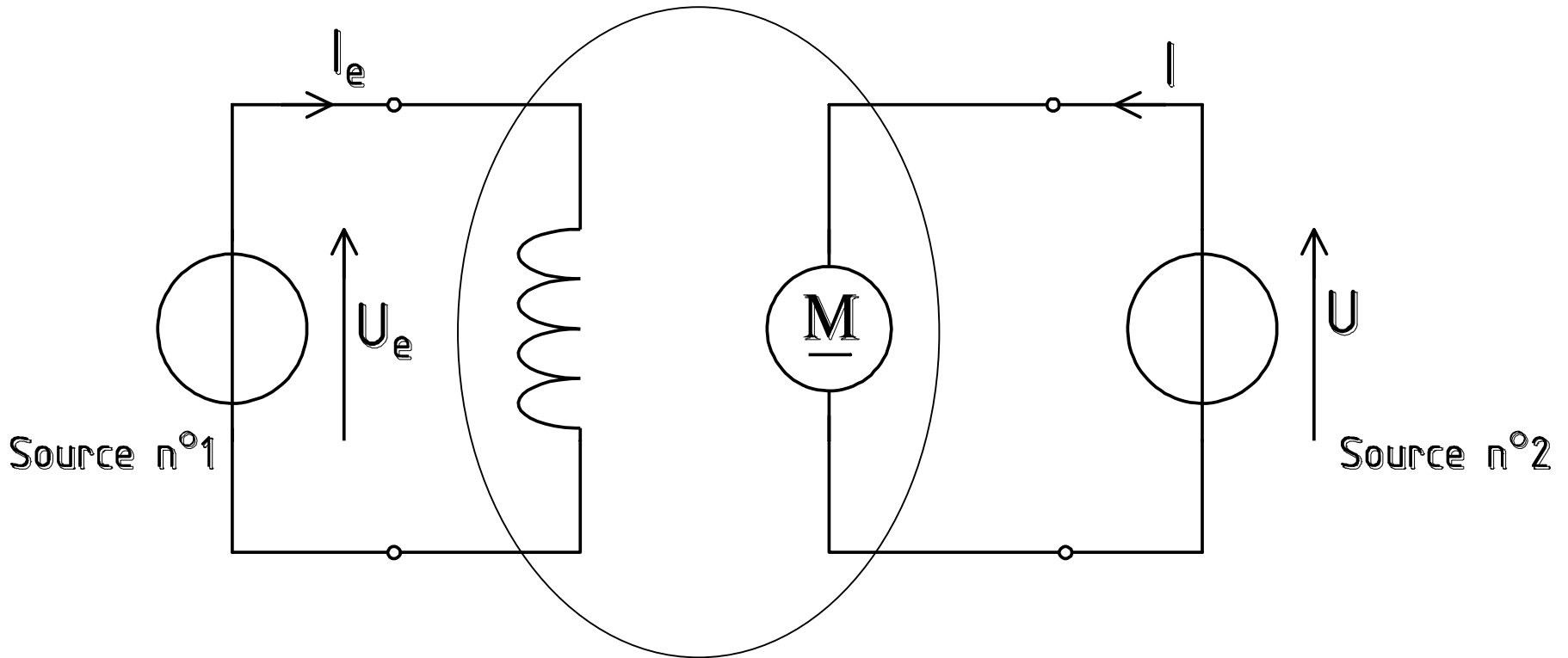


Remarque :

Toute la puissance absorbée par l'inducteur (P_e) est convertie en pertes par effet Joule (p_{je}).

MOTEUR A COURANT CONTINU A EXCITATION INDEPENDANTE

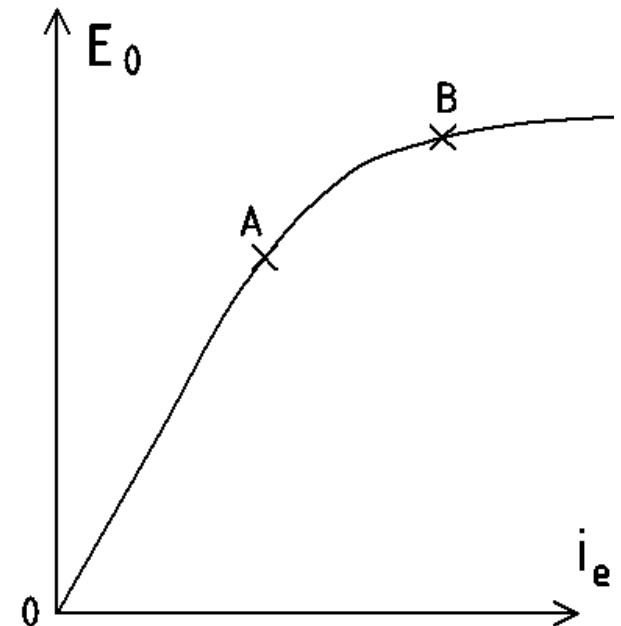
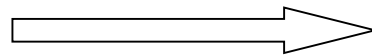
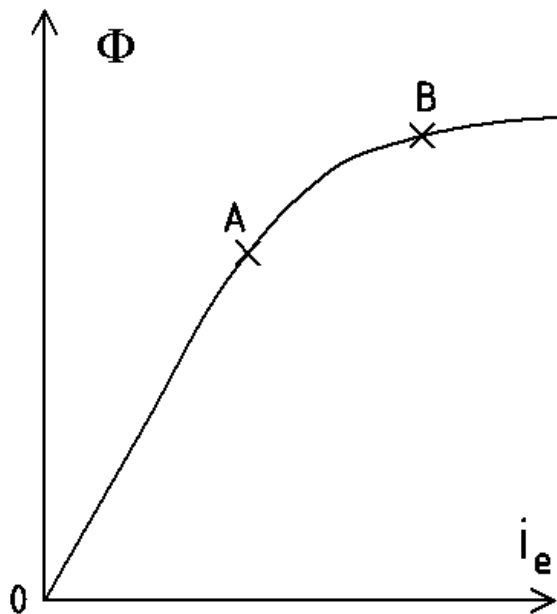
Un moteur à courant continu est dit à **excitation indépendante** lorsque l'alimentation de l'inducteur est indépendante de celle de l'induit : il faut donc deux sources de tension.



Caractéristique à vide (à fréquence de rotation constante)

« A vide » : le moteur n'entraîne aucune charge.

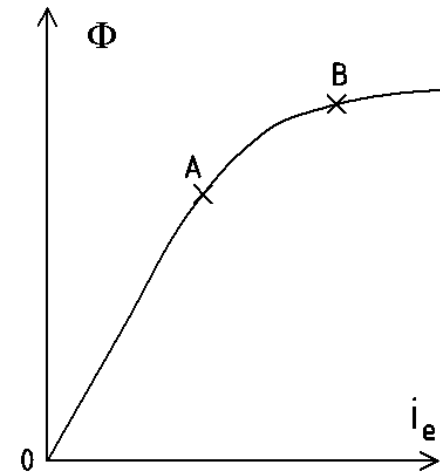
$$E_0 = K.\Phi.\Omega_0 = k.\Phi \quad (\text{car } \Omega_0 = \text{cste})$$



Remarques :

- Avant le point **A** (zone linéaire), le flux est faible
→ E_0 sera peu important.

- Après le point **B** (zone de saturation), le flux ne varie presque plus lorsque I_e augmente
→ trop de pertes par effet Joule dans l'inducteur, d'où un mauvais rendement.



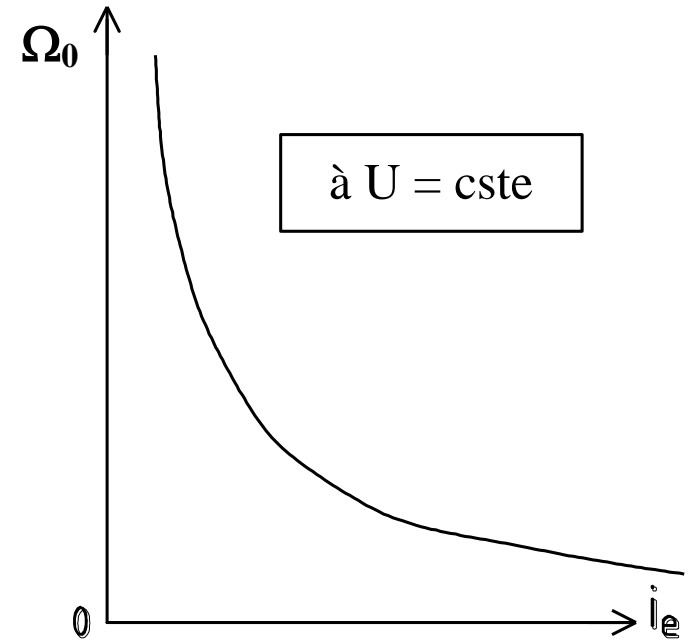
Afin d'optimiser la machine, on travaillera toujours au niveau du coude de saturation (entre les point A et B)

$$E_0 = K.\Phi.\Omega_0 = U - R.I_0 \quad \rightarrow \quad \Omega_0 = (U - R.I_0) / (K.\Phi)$$

A vide : $\rightarrow \Omega_0 \cong U / (K.\Phi)$

Remarques :

* Si $\Phi = 0$, le vitesse de rotation est très grande : **le moteur s'emballe.**

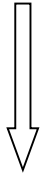


Il ne faut jamais couper l'alimentation de l'inducteur, lorsque l'induit est alimenté.

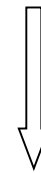
Démarrage d'un moteur à excitation indépendante

Au démarrage, le moteur ne tourne pas

$$\Omega_d = 0$$



$$E_d = K \cdot \Phi \cdot \Omega_d = 0 \quad \longrightarrow$$

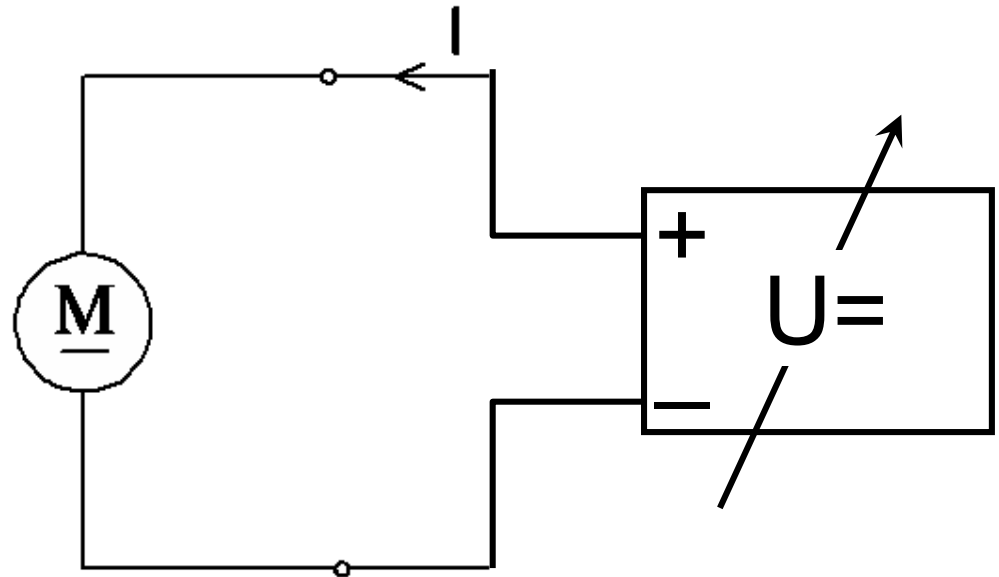
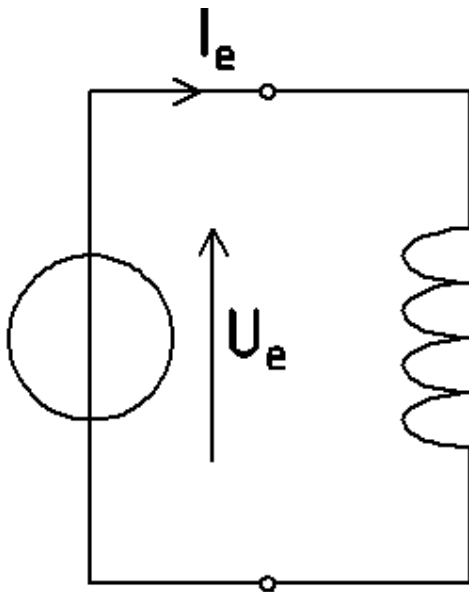


$$U_d = R \cdot I_d$$

Courant dans l'induit au démarrage : $I_d = U_d / R \gg I_N$

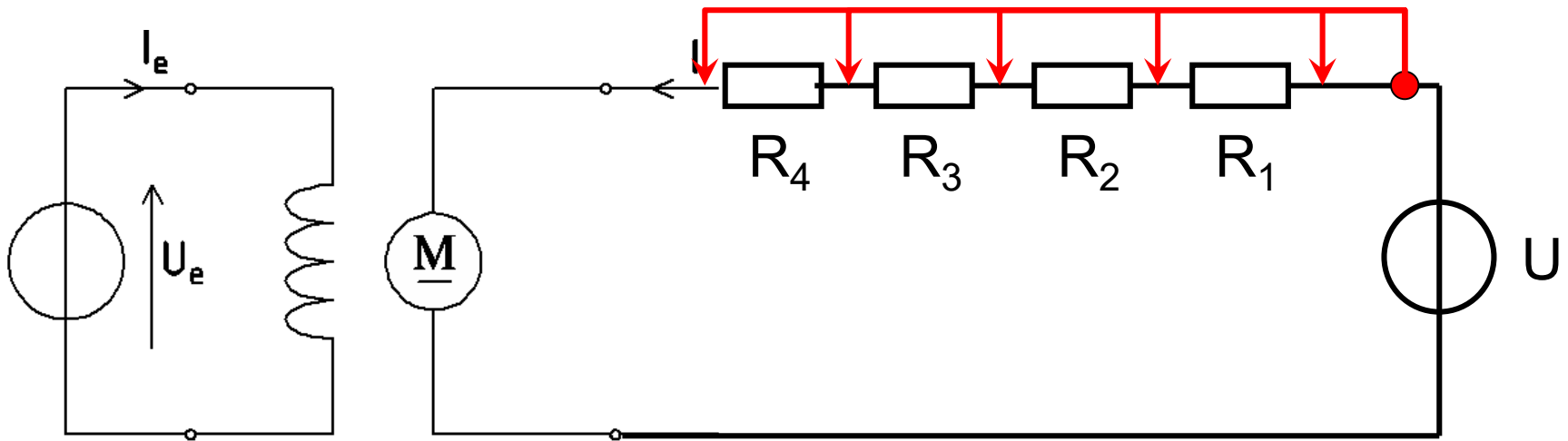
- Démarrage sous tension réduite

On alimente l'induit à l'aide d'un hacheur série ou d'un pont redresseur commandé afin de pouvoir augmenter progressivement U de 0 à U_N



- Démarrage à l'aide d'un rhéostat de démarrage

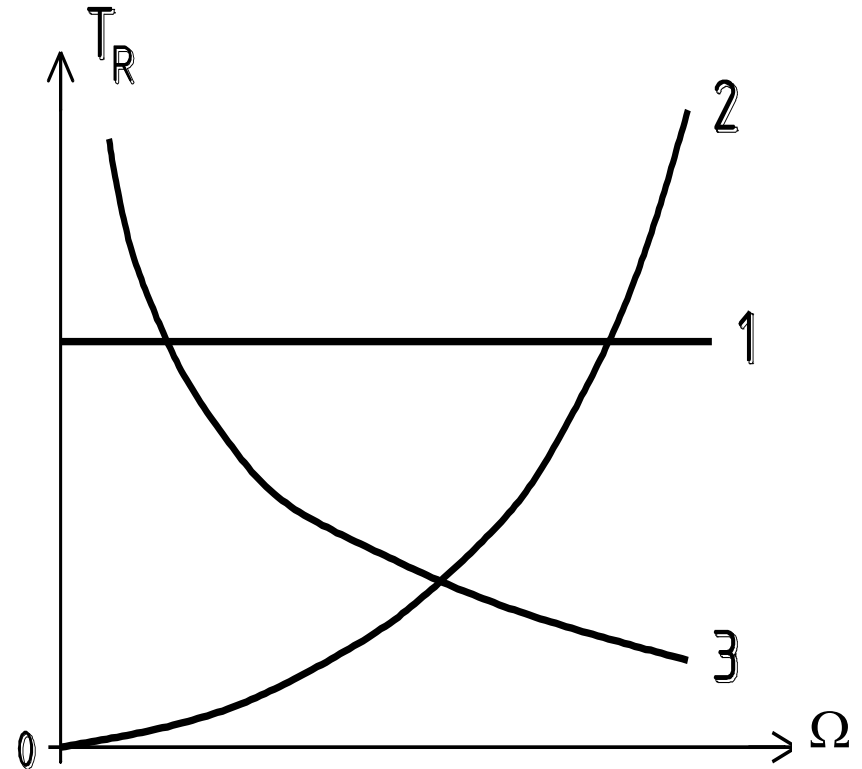
On place en série avec l'induit une résistance variable (rhéostat de démarrage) et on l'alimente sous tension nominale. Puis on diminue la résistance jusqu'à l'annuler au fur et à mesure que le rotor accélère.



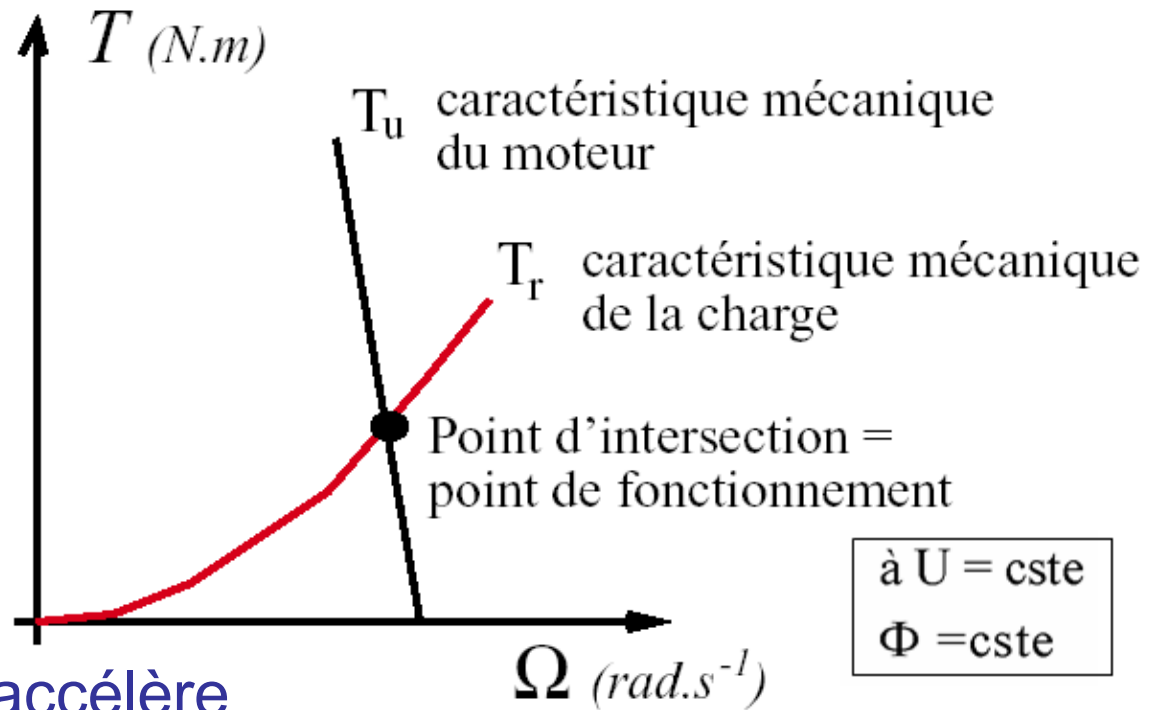
Point de fonctionnement

Caractéristique mécanique
de la charge $T_R = f(\Omega)$

- 1 : Levage
- 2 : Ventilation, pompage
- 3 : Essorage



Point de fonctionnement



- * si $T_u > T_r$: le moteur accélère
- * si $T_u < T_r$: le moteur ralentit
- * si $T_u = T_r$: le moteur tourne à vitesse constante (Régime établi).

Le point de fonctionnement correspond aux caractéristiques T_u et Ω du moteur lors du régime établi.

Utilisation du **moteur à excitation indépendante**

Il est caractérisé par une vitesse réglable par tension et indépendante de la charge.

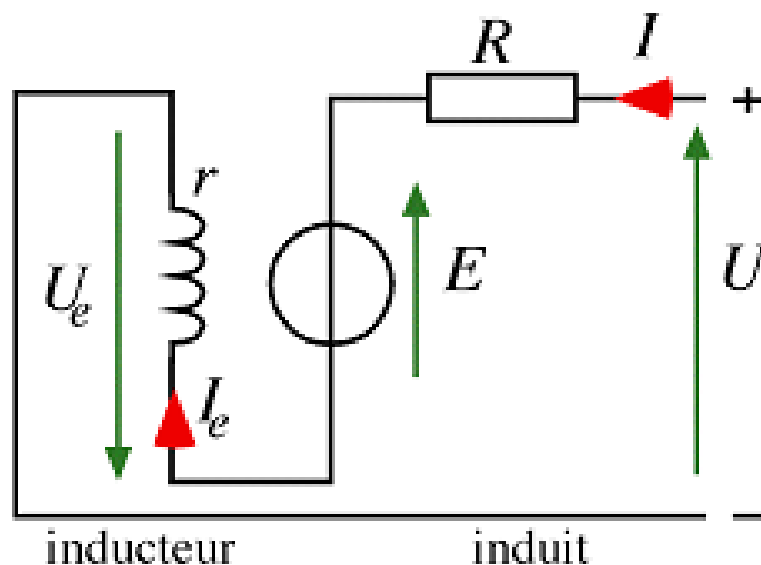
En association avec un convertisseur statique (hacheur) fournissant une tension réglable, la vitesse peut varier sur un large domaine.

Il fournit un couple important à faible vitesse (machines-outils, levage).

En petite puissance, il est souvent utilisé en asservissement avec une régulation de vitesse.

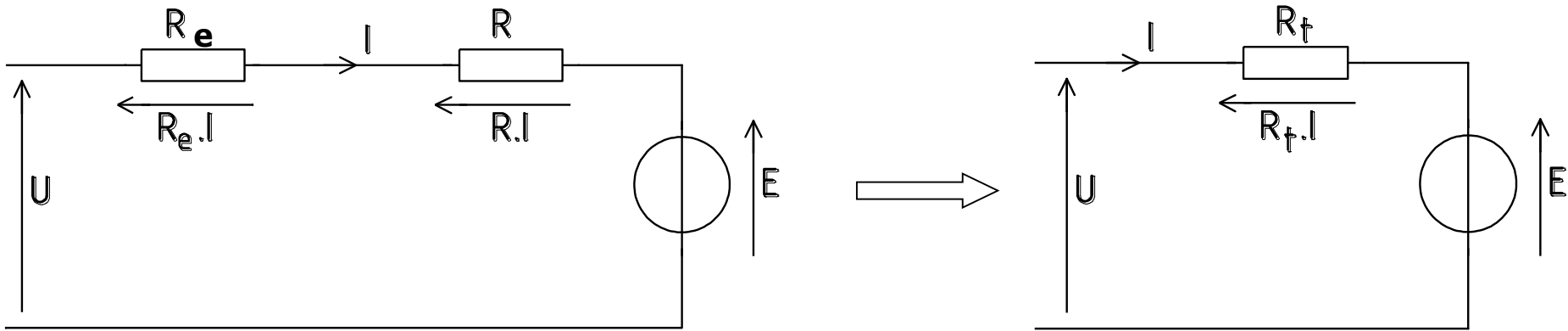
MOTEUR A COURANT CONTINU A EXCITATION SERIE

Un moteur à courant continu est dit à **excitation série** lorsque l'inducteur est branché en série avec l'induit.



Remarque : Dans ce cas, une seule source de tension suffit. L'induit et l'inducteur sont traversés par le même courant continu d'intensité I .

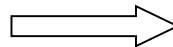
Modèle électrique équivalent



Loi des mailles :

$$U = E + R \cdot I + R_e \cdot I$$

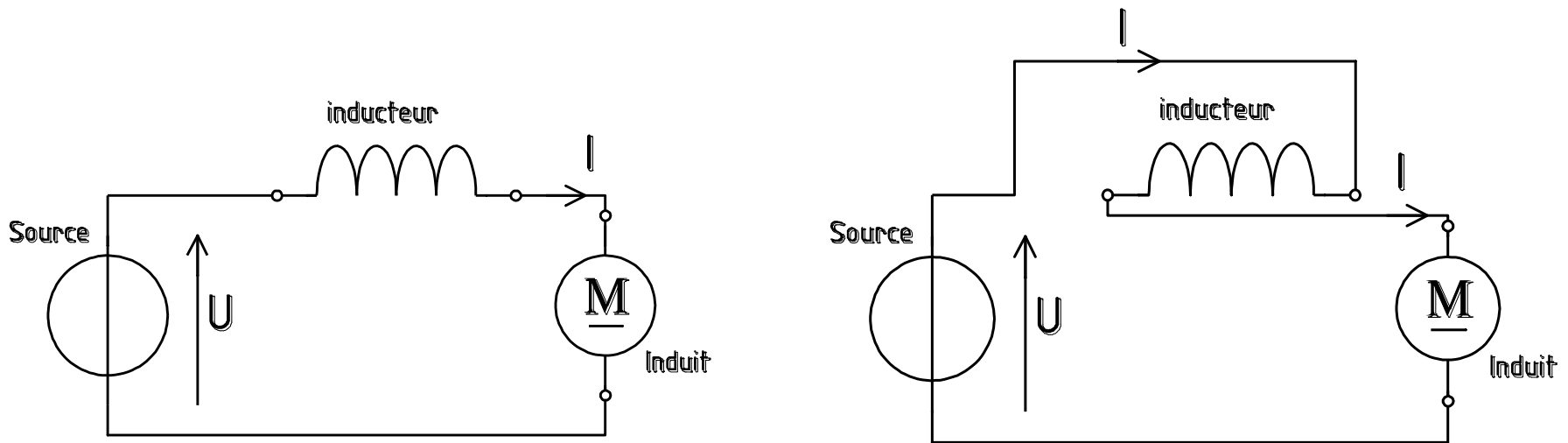
$$R_t = R + R_e$$



$$U = E + R_t \cdot I$$

Sens de rotation

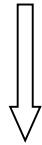
Pour inverser le sens de rotation d'un moteur série, il suffit d'inverser le sens du courant dans l'induit ou dans l'inducteur, en permutant par exemple les bornes de l'inducteur.



Moment du couple électromagnétique

$$T_{EM} = P_{EM} / \Omega = E.I / \Omega$$

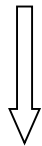
et $E = K.\Phi.\Omega$



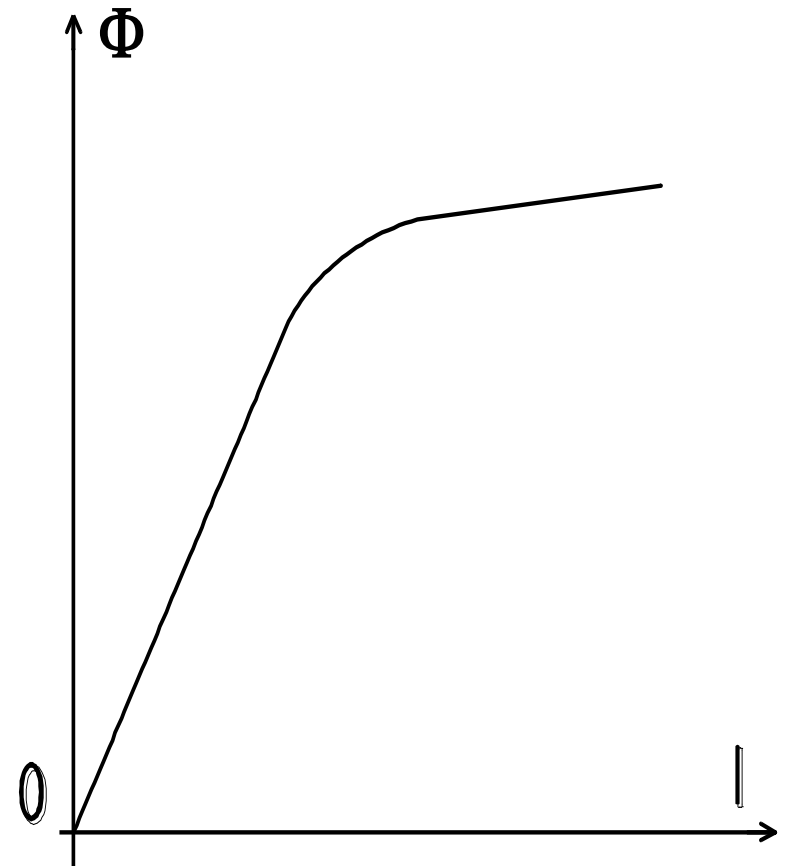
$$T_{EM} = K.\Phi.I$$

En supposant le circuit magnétique non saturé

$$\Phi = a.I \text{ (avec } a = \text{cste)}$$



$$T_{EM} = k.I^2 \text{ (avec } k = K.a = \text{cste)}$$

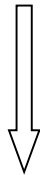


Vitesse de rotation

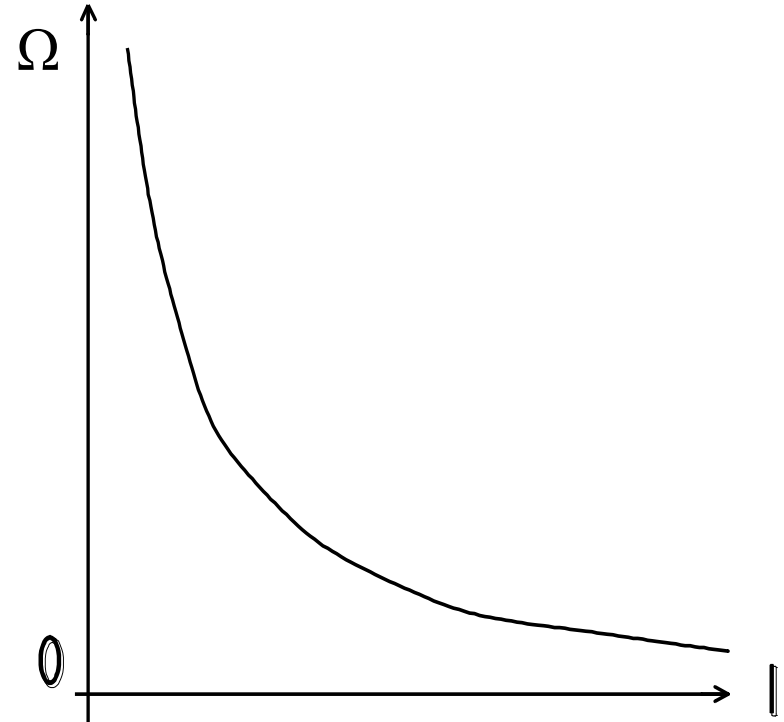
$$E = K.\Phi.\Omega = K.a.I.\Omega = k.I.\Omega$$

(si le circuit n'est pas saturé)

$$E = U - R_t.I$$



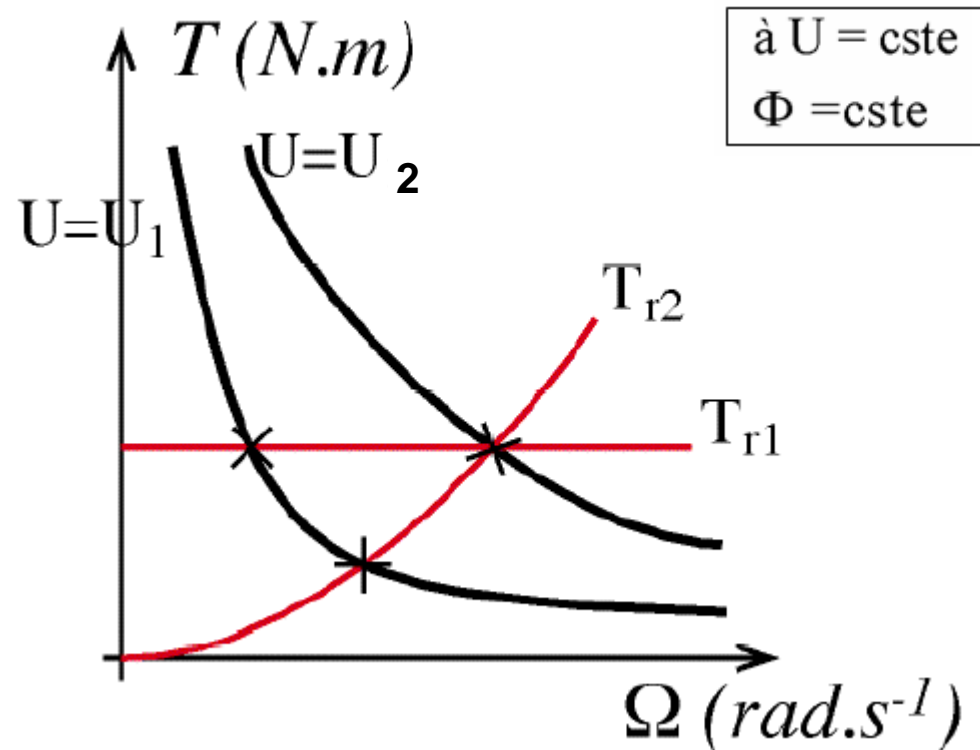
$$\Omega = \frac{U - R_t \cdot I}{k.I}$$



Si le moteur fonctionne à vide (pas de charge), le courant étant très faible, la vitesse de rotation sera très grande.

A vide, un moteur série s'emballé

Point de fonctionnement



Le changement de la tension d'alimentation permet d'obtenir un déplacement de la caractéristique mécanique (changement de la vitesse de rotation).

Utilisation du **moteur à excitation série**

Il possède un fort couple de démarrage.

Il convient très bien dans le domaine des fortes puissances (1 à 10 MW) pour obtenir un fonctionnement satisfaisant en faible vitesse (traction, laminoirs).

En petite puissance il est employé comme démarreur des moteurs à explosion.

Remarque

De part ses difficultés de réalisation et son coût d'entretien le moteur à courant continu tend à disparaître dans le domaine des fortes puissances pour être remplacé par le **moteur synchrone auto-piloté** (ou **moteur auto-synchrone**).

Bibliographie

François BERNOT : Machines à courant continu - Constitution et fonctionnement

Références : Techniques de l'ingénieur

Dossier : **D3555**

Bases documentaires : **Convertisseurs et machines électriques**