



# Electrotechnique

© Fabrice Sincère ; version 3.0.5

<http://pagesperso-orange.fr/fabrice.sincere/>

# Sommaire

## **1<sup>ère</sup> partie : machines électriques**

Chapitre 1 Machine à courant continu

Chapitre 2 Puissances électriques en régime sinusoïdal

Chapitre 3 Systèmes triphasés

Chapitre 4 Transformateur en régime sinusoïdal

Chapitre 5 Champ magnétique tournant

Chapitre 6 Machine synchrone triphasée

Chapitre 7 Machine asynchrone triphasée

## **2<sup>ème</sup> partie : électronique de puissance**

Chapitre 0 Introduction

Chapitre 1 Montages redresseurs

Chapitre 2 Les hacheurs

Chapitre 3 Les onduleurs

Chapitre 4 Les gradateurs

# Sommaire du chapitre 1 : Machine à courant continu

## 1- Constitution

1-1- L'inducteur (ou circuit d'excitation)

1-2- L'induit (circuit de puissance)

1-3- Le collecteur et les balais

## 2- Principe de fonctionnement

2-1- Fonctionnement en moteur

2-2- Fonctionnement en génératrice

## 3- Schéma électrique équivalent

3-1- Expression de la fem induite

3-2- Expression du couple électromagnétique

3-3- Conversion de puissance

3-4- Flux magnétique créé sous un pôle

3-5- Schéma équivalent de l'induit

## 4- Les différents types de machines à courant continu

5- Moteur à excitation indépendante

6- Moteur série

7- Génératrice à courant continu (dynamo)

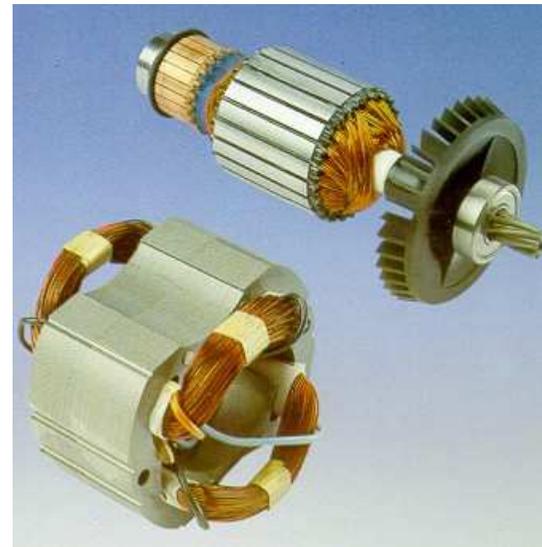
# Chapitre 1

## Machine à courant continu

### 1- Constitution

La machine à courant continu est constituée de trois parties principales :

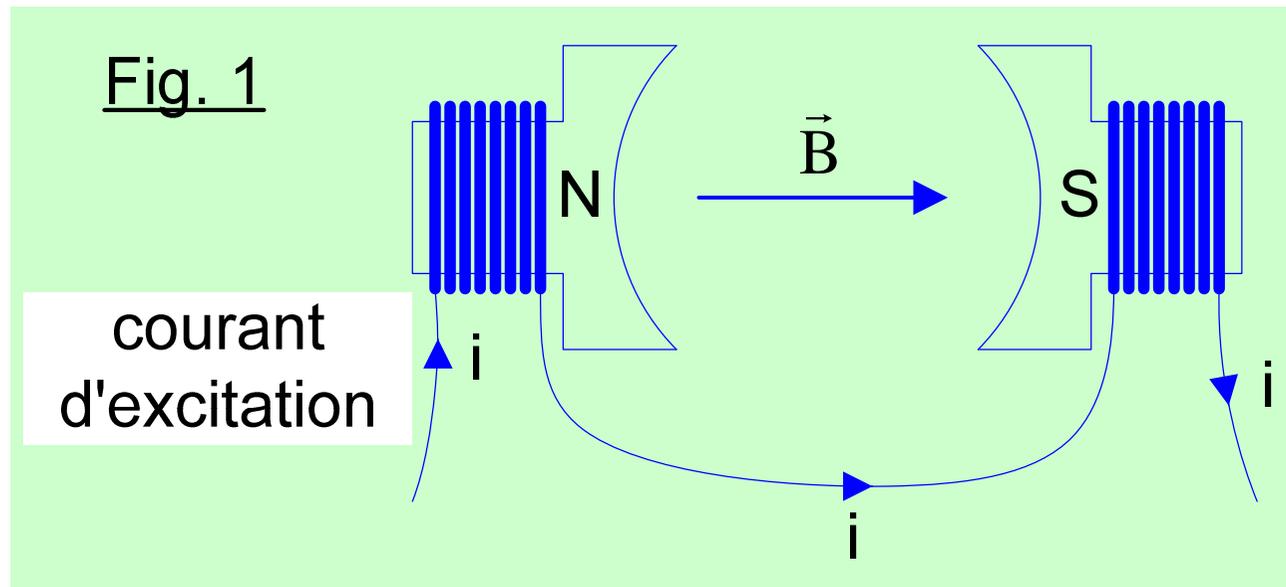
- l'inducteur
- l'induit
- le dispositif collecteur / balais



## 1-1- L'inducteur (ou circuit d'excitation)

C'est un aimant ou un électroaimant (bobinage parcouru par un courant continu  $i$ ).

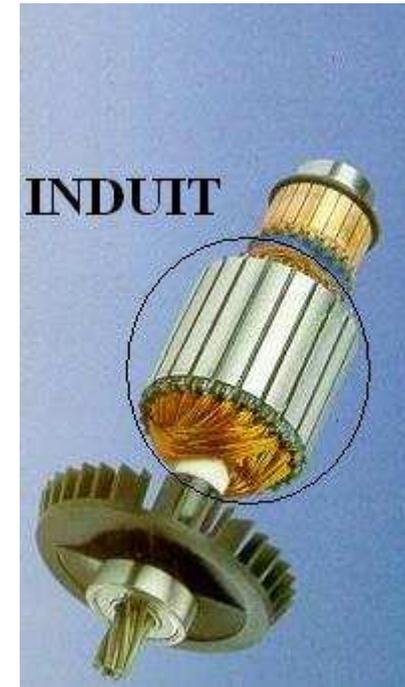
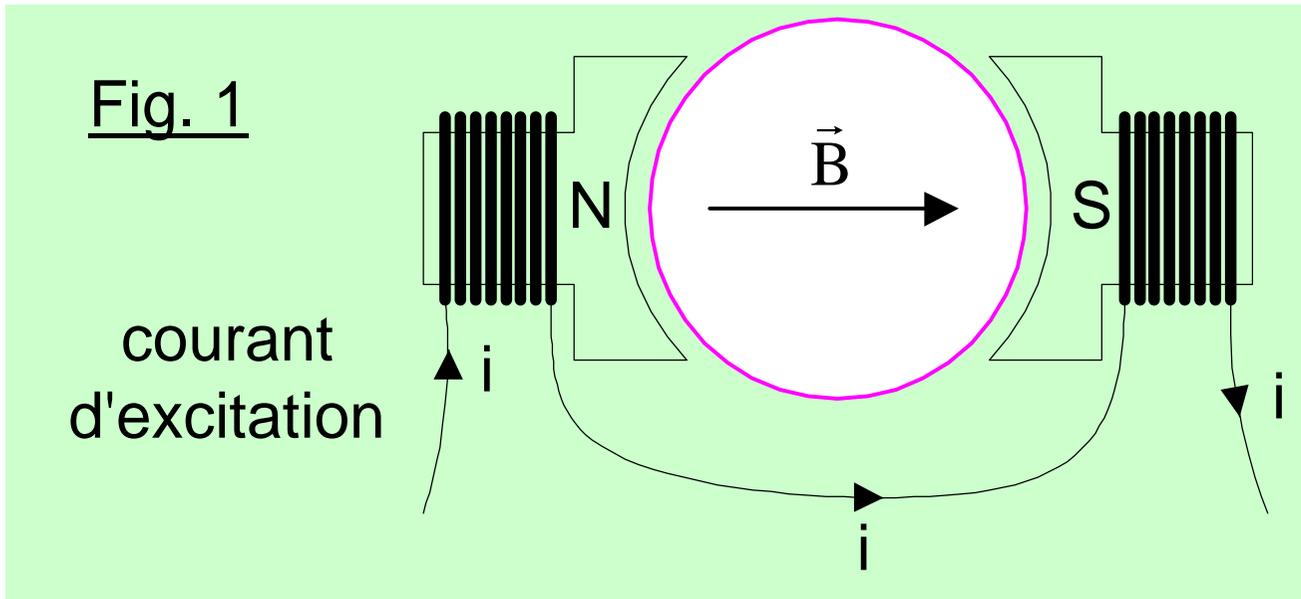
Il est situé sur la partie fixe de la machine (le stator) :



Il sert à créer un champ magnétique (champ "inducteur") dans le rotor.

## 1-2- L'induit (circuit de puissance)

L'induit est situé au rotor (partie tournante de la machine) :



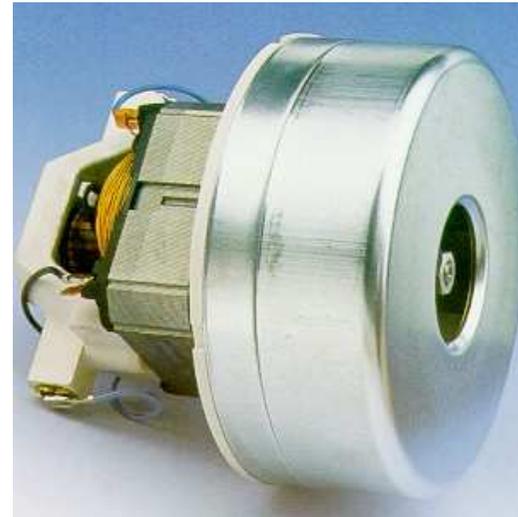
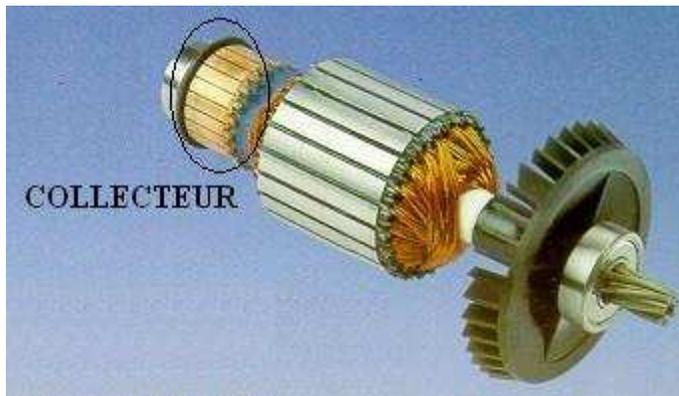
C'est un bobinage parcouru par un courant continu  $I$  (courant d'induit).

### 1-3- Le collecteur et les balais

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit.

Les balais (ou charbons) sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation.

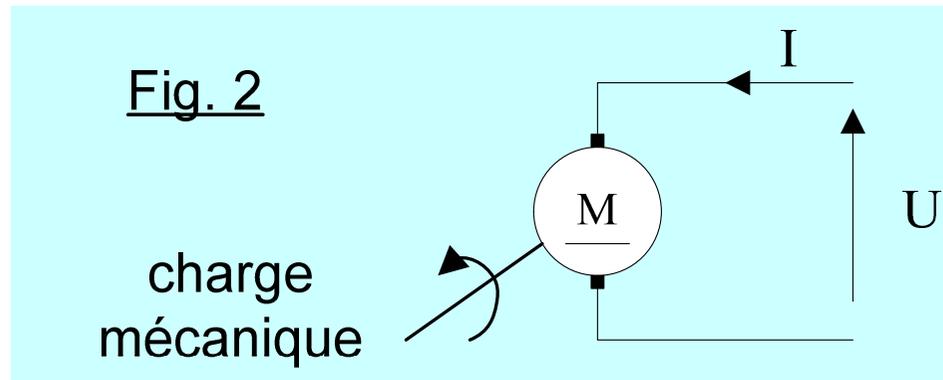
Le dispositif collecteur / balais permet donc de faire circuler un courant dans l'induit.



## 2- Principe de fonctionnement

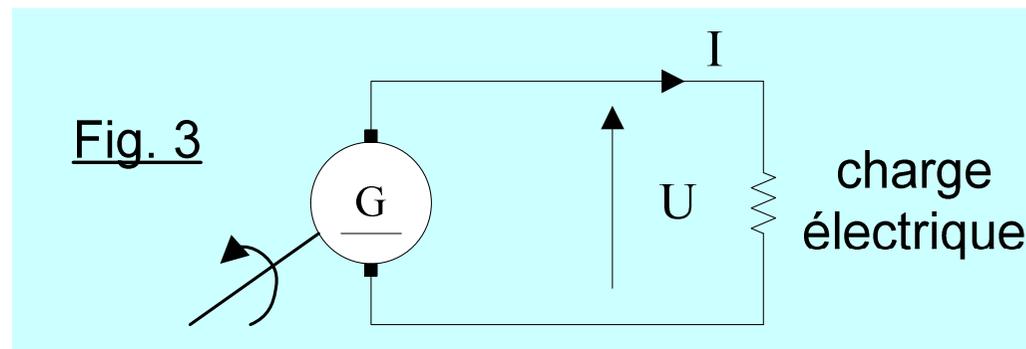
- Fonctionnement en moteur

Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique :



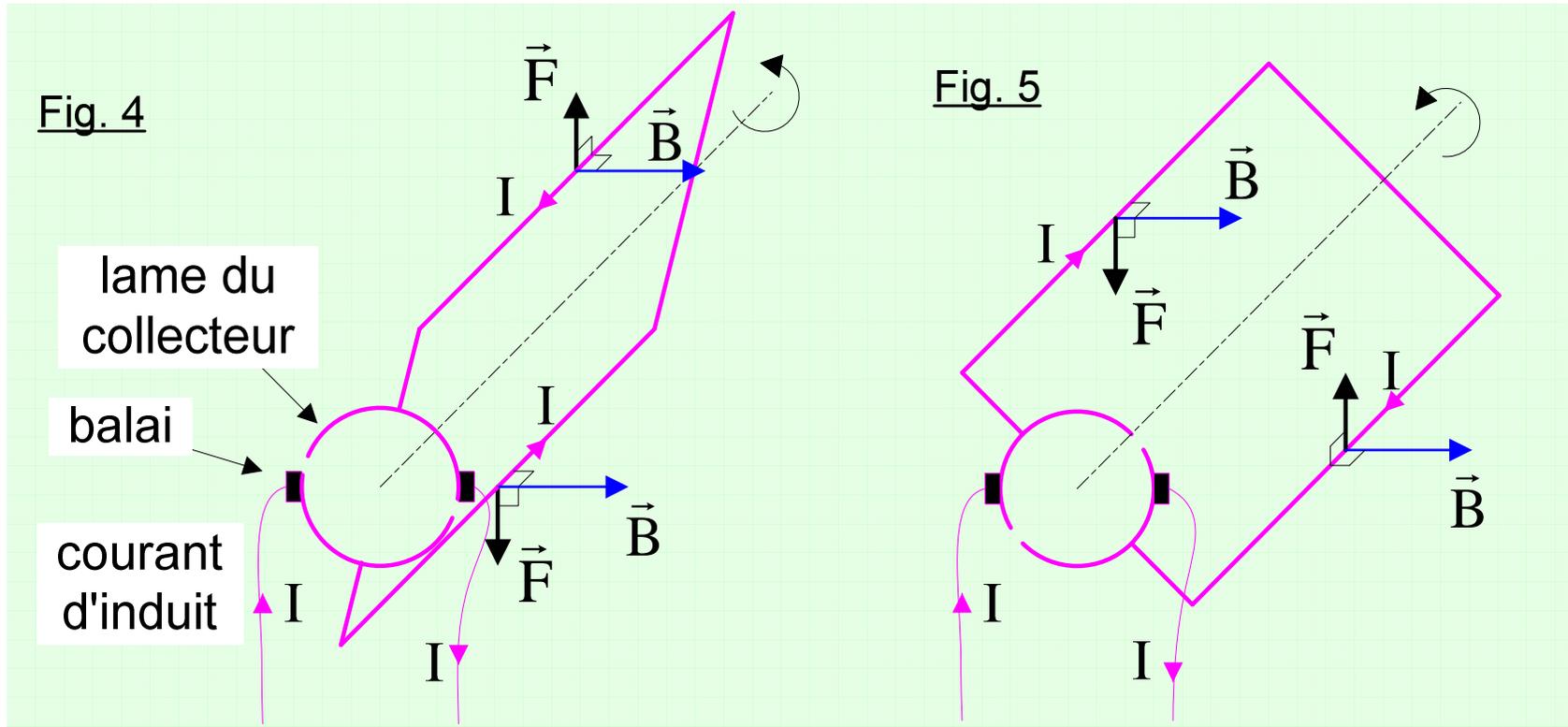
- Fonctionnement en génératrice (dynamo)

Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique :



## 2-1- Fonctionnement en moteur

Soit une spire du bobinage d'induit :



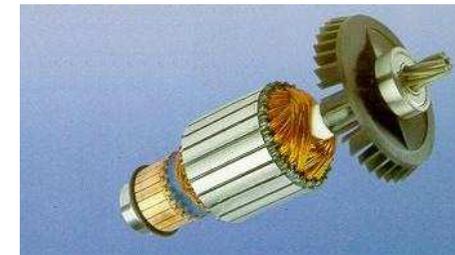
champ magnétique inducteur  $\mathbf{B}$

+ courant d'induit  $\mathbf{I}$

$\Rightarrow$  forces électromagnétiques (forces de Laplace)

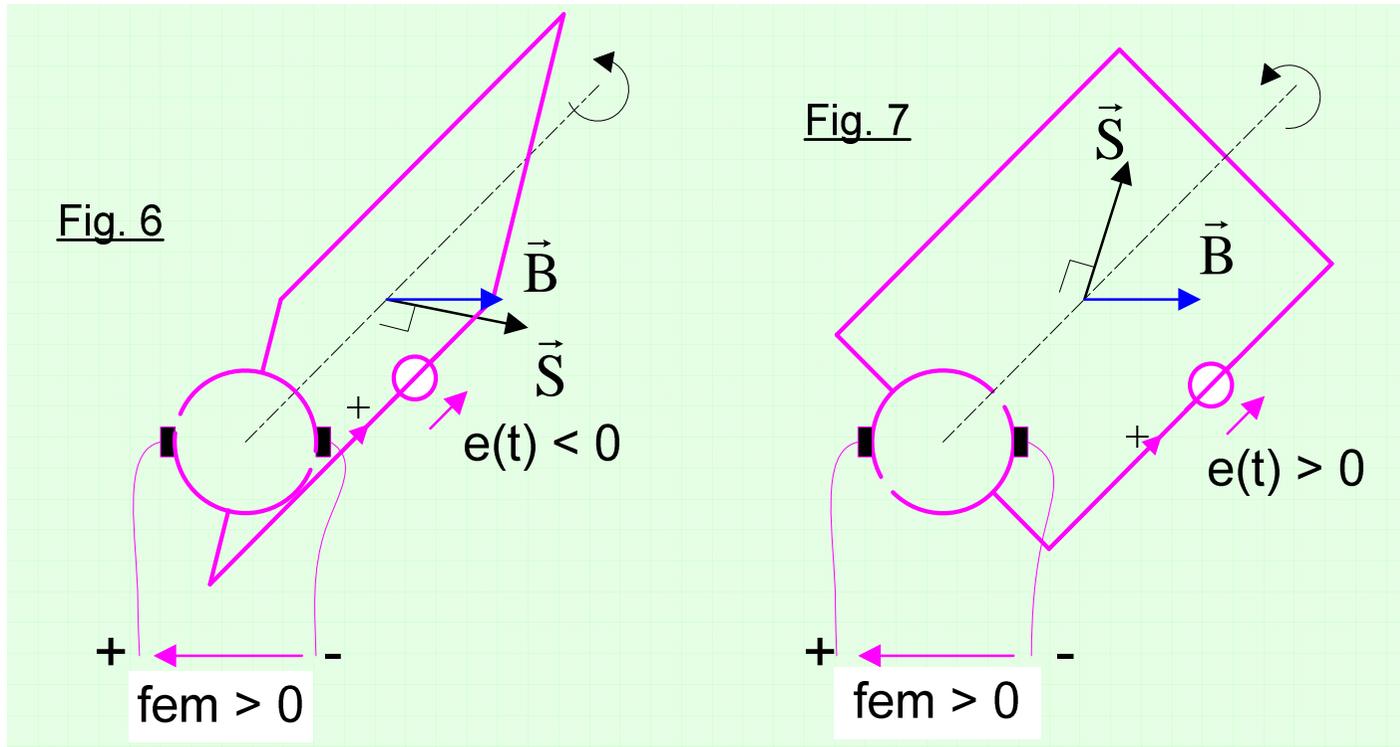
$\Rightarrow$  couple électromagnétique

$\Rightarrow$  rotation du rotor



## 2-2- Fonctionnement en génératrice

Le principe physique utilisé est le phénomène d'induction électromagnétique (loi de Faraday :  $e = -d\Phi/dt$ ) :



champ inducteur + rotation de la spire

⇒ variation du flux magnétique  $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$

⇒ création d'une fem induite (e) alternative

Le collecteur permet d'obtenir une fem de forme continue.

- Remarque

La machine à courant continu est réversible :  
elle fonctionne aussi bien en moteur qu'en génératrice.

### 3- Schéma électrique équivalent

Les matériaux ferromagnétiques de la machine sont supposés linéaires (pas de saturation).

#### 3-1- Expression de la fem induite

Loi de Faraday :  $E = k \Phi \Omega$

$E$  : fem induite (tension continue en V)

$\Phi$  : flux magnétique créé sous un pôle par l'inducteur (cf. fig. 1)

$\Omega$  : vitesse de rotation (en rad/s)

$k$  : constante qui dépend de la machine considérée

## 3-2- Expression du couple électromagnétique

Loi de Laplace :  $T_{em} = k' \Phi I$

$T_{em}$  : couple électromagnétique (en Nm)

$I$  : courant d'induit (en A)

$k'$  : constante qui dépend de la machine

### 3-3- Conversion de puissance

La puissance électromagnétique  $P_{em}$  mise en jeu a deux formes :

- électrique  $P_{em} = E I$
- mécanique  $P_{em} = T_{em} \Omega$

Il vient :

$$E I = T_{em} \Omega$$
$$(k \Omega \Phi) I = (k' \Phi I) \Omega$$
$$k = k'$$

En résumé :

$$E = k \Phi \Omega$$
$$T_{em} = k \Phi I$$

### 3-4- Flux magnétique crée sous un pôle

$$B \propto i$$

$$\Phi \propto B \text{ (par définition)}$$

⇒ le flux est proportionnel au courant d'excitation :  $\Phi \propto i$

- La fem est donc proportionnelle :

- au courant d'excitation
- à la vitesse de rotation

$$E \propto i \Omega$$

- Le couple électromagnétique est proportionnel :

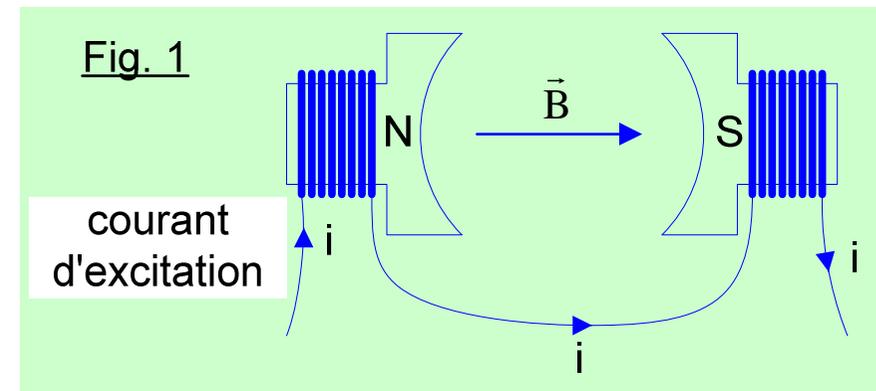
- au courant d'excitation
- au courant d'induit

$$T_{em} \propto i I$$

- Cas particulier : inducteur à aimants permanents

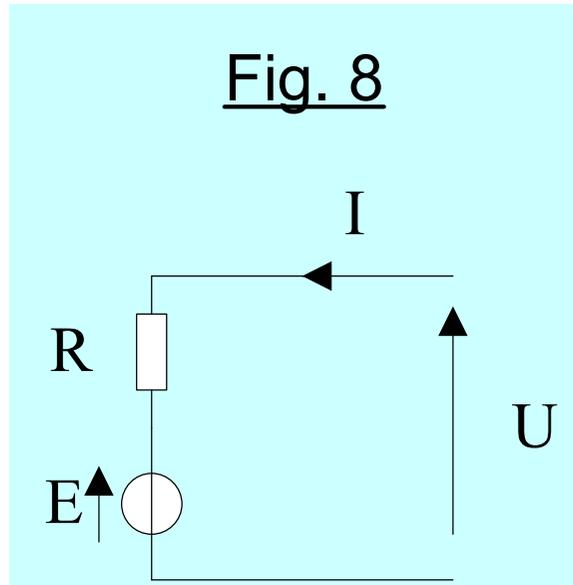
$$\text{Flux constant} \quad \Rightarrow \quad E \propto \Omega$$

Application : mesure de vitesse de rotation (dynamo tachymétrique).

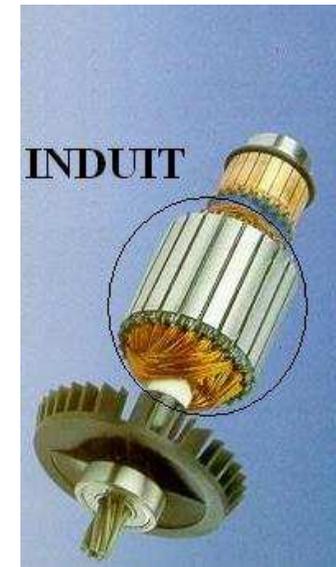


### 3-5- Schéma équivalent de l'induit

On utilise un modèle de Thévenin :



$E$  : fem induite (en V)  
 $U$  : tension d'induit (en V)  
 $R$  : résistance d'induit (en  $\Omega$ )  
(résistance du bobinage de l'induit)  
 $I$  : courant d'induit (en A)



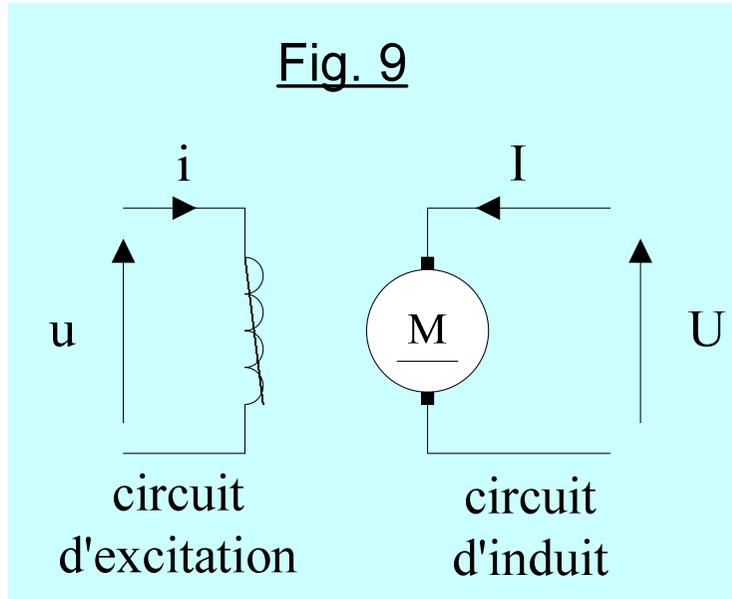
Loi des branches :  $U = E + RI$  (en convention récepteur)

Fonctionnement :

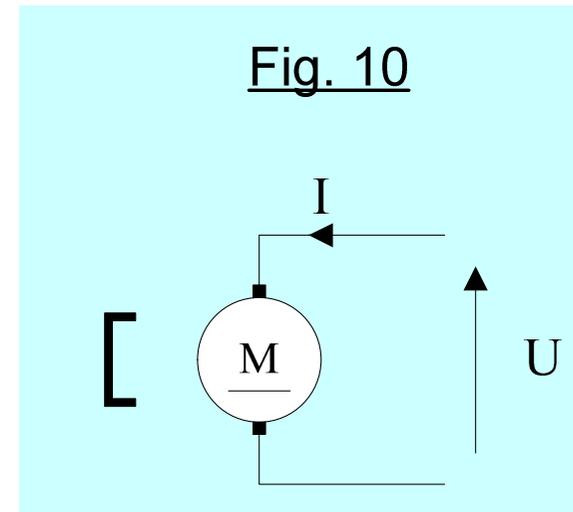
- en moteur :  $I > 0$     $P_e = UI > 0$     $E < U$
- en génératrice :  $I < 0$     $P_e = UI < 0$     $U < E$

## 4- Les différents types de machines à courant continu

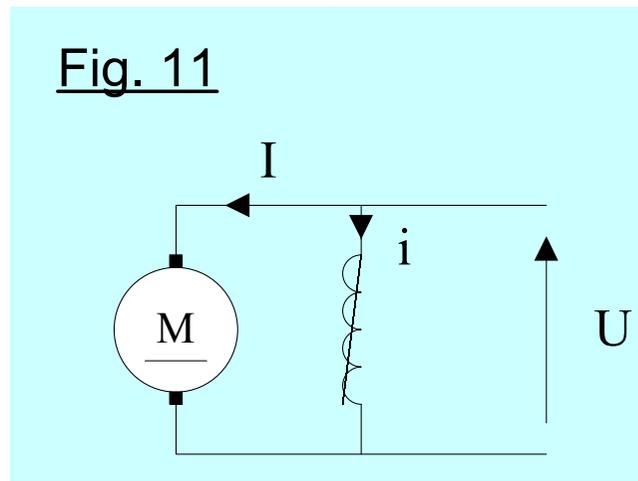
- Machine à excitation indépendante



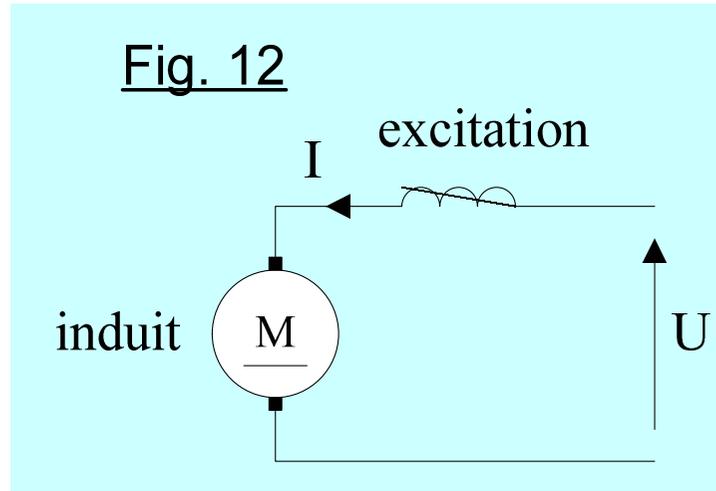
- Machine à aimants permanents



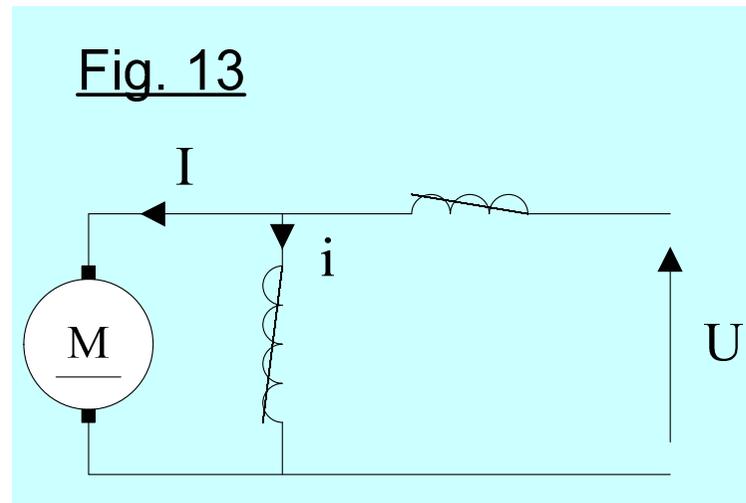
- Machine shunt (excitation en dérivation)



- Machine à excitation en série

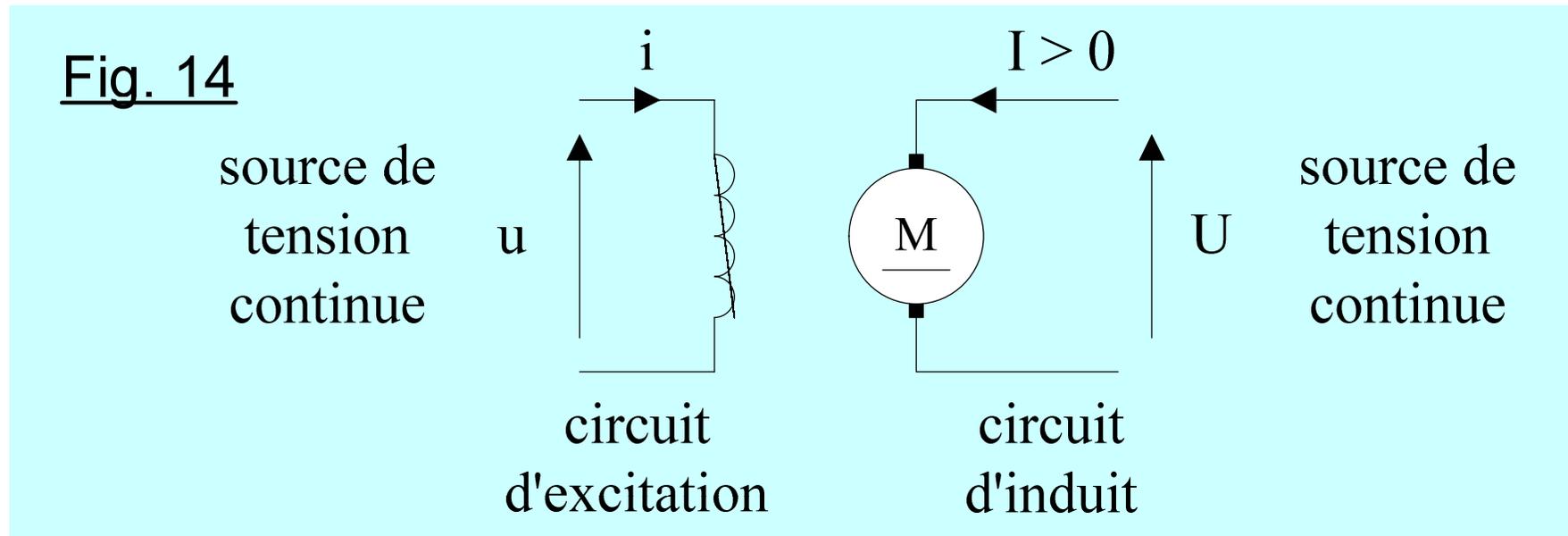


- Machine compound (excitation composée)



## 5- Moteur à excitation indépendante

On s'intéresse à la machine à excitation indépendante en fonctionnement moteur :



- Schéma électrique équivalent

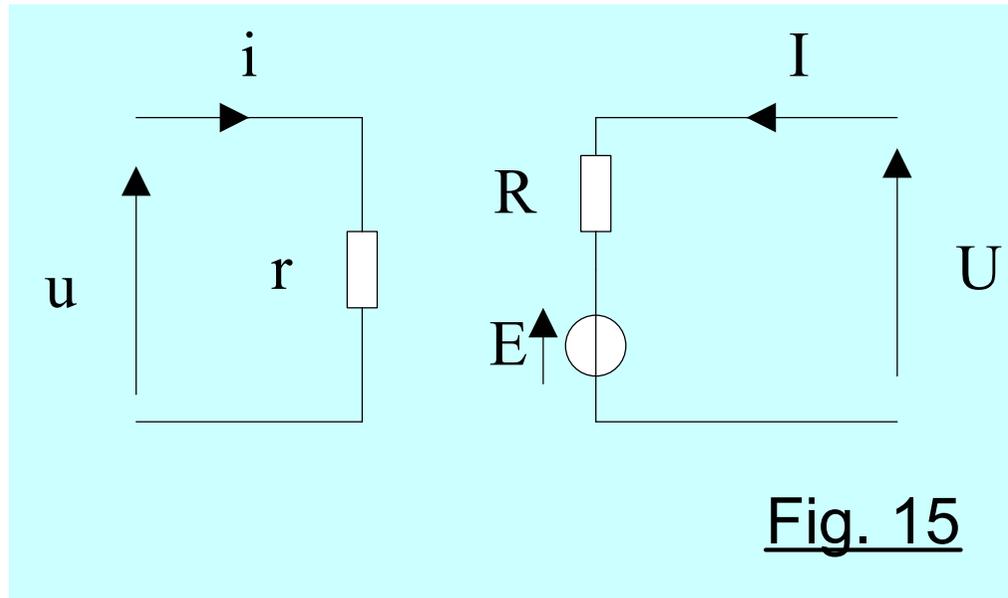


Fig. 15

Induit :  $U = E + RI$

Excitation :  $u = r i$  ( $r$  : résistance du bobinage de l'excitation)

En pratique :  $r \gg R$

En charge :  $I \gg i$

- Vitesse de rotation

$$E = k \Phi \Omega$$

d'où :

$$\Omega = \frac{U - RI}{k\Phi}$$

- Caractéristique  $\Omega(i)$  à  $U$  constante

Charge ↗      courant d'induit  $I$  ↗

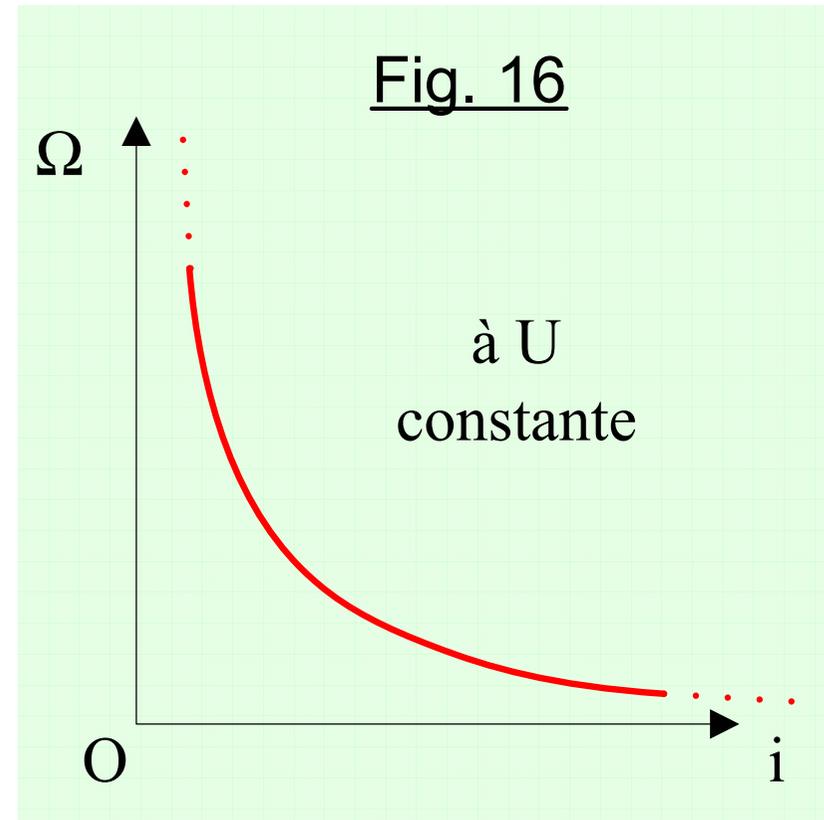
En pratique :  $RI \ll U$

$$\Omega \approx \frac{U}{k\Phi}$$

$\Phi \propto i$

Finalement :

$$\Omega \propto \frac{1}{i}$$



Si on coupe accidentellement le courant d'excitation ( $i = 0$ ),  
la vitesse augmente très rapidement :  
le moteur s'emballe ! 😞

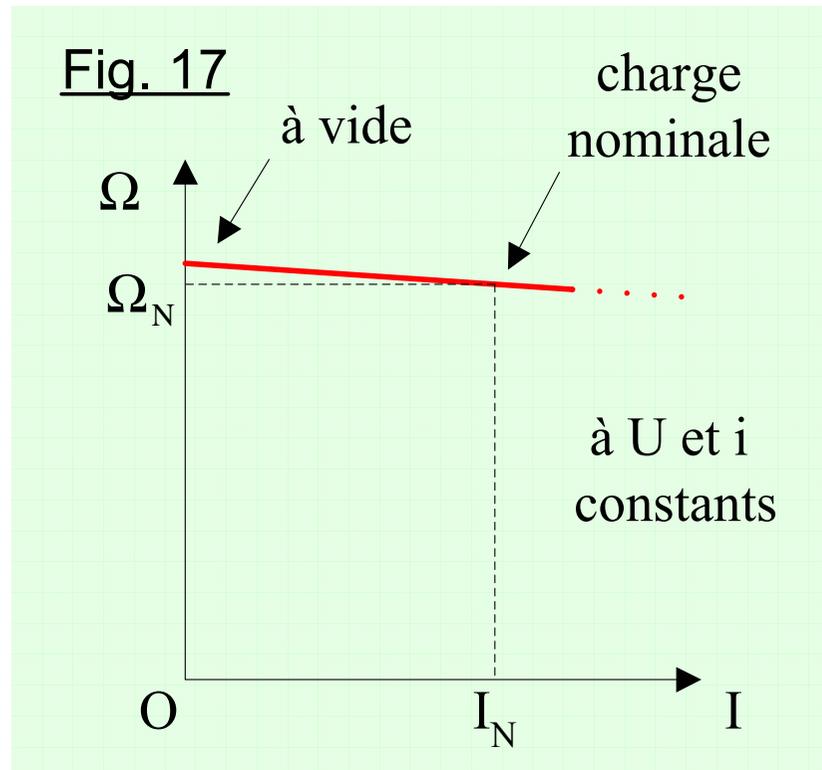


En marche, il ne faut jamais couper l'excitation d'un moteur à  
excitation indépendante.

- Caractéristique  $\Omega(I)$  en charge  
à  $U$  constante et  $i$  constant ( $\Phi$  constant)

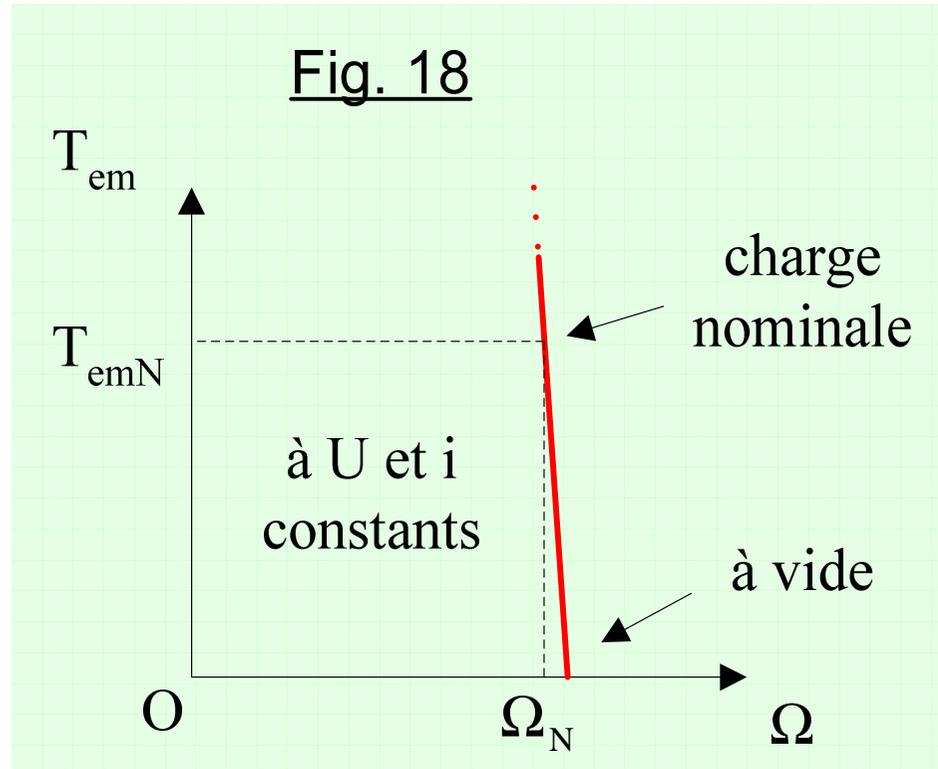
Charge ↗      courant d'induit  $I$  ↗    et    vitesse de rotation ↘

$$\Omega = \frac{U - RI}{k\Phi}$$



La vitesse de rotation varie peu avec la charge 😊.

- Caractéristique mécanique  $T_{em}(\Omega)$  à  $U$  constante et  $i$  constant



Le couple de démarrage ( $\Omega = 0$ ) est important.

Le moteur démarre seul 😊.

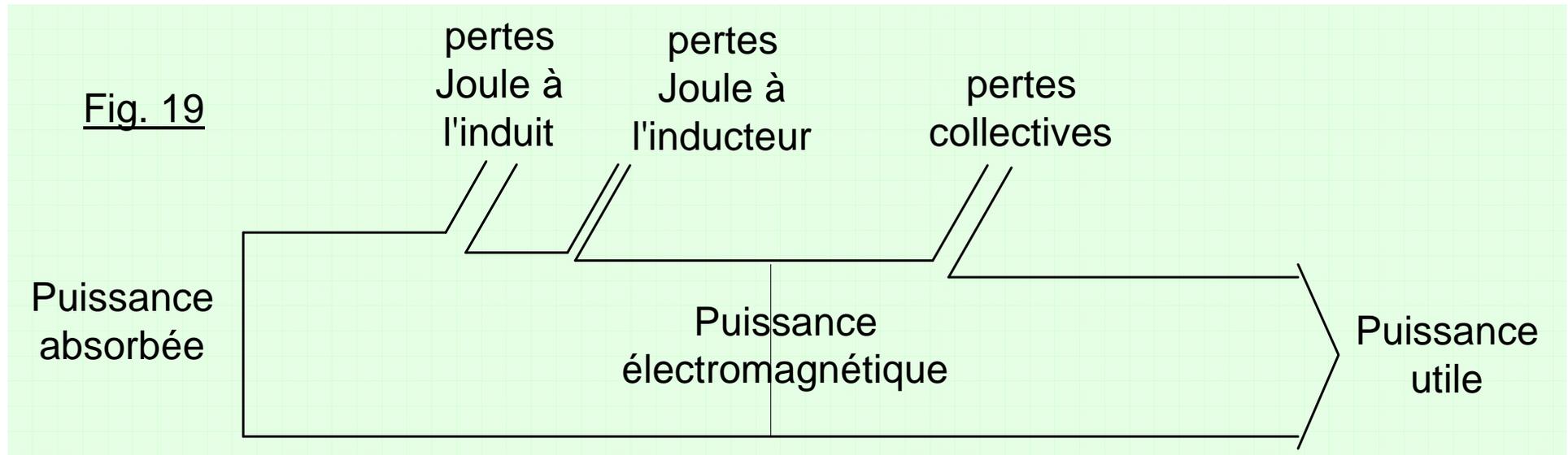
- Variation de vitesse

$$\Omega \approx \frac{U}{k\Phi}$$

A excitation constante :  $\Omega \propto U$

En faisant varier U, on travaille sur une large plage de vitesse de rotation 😊.

- Bilan de puissance

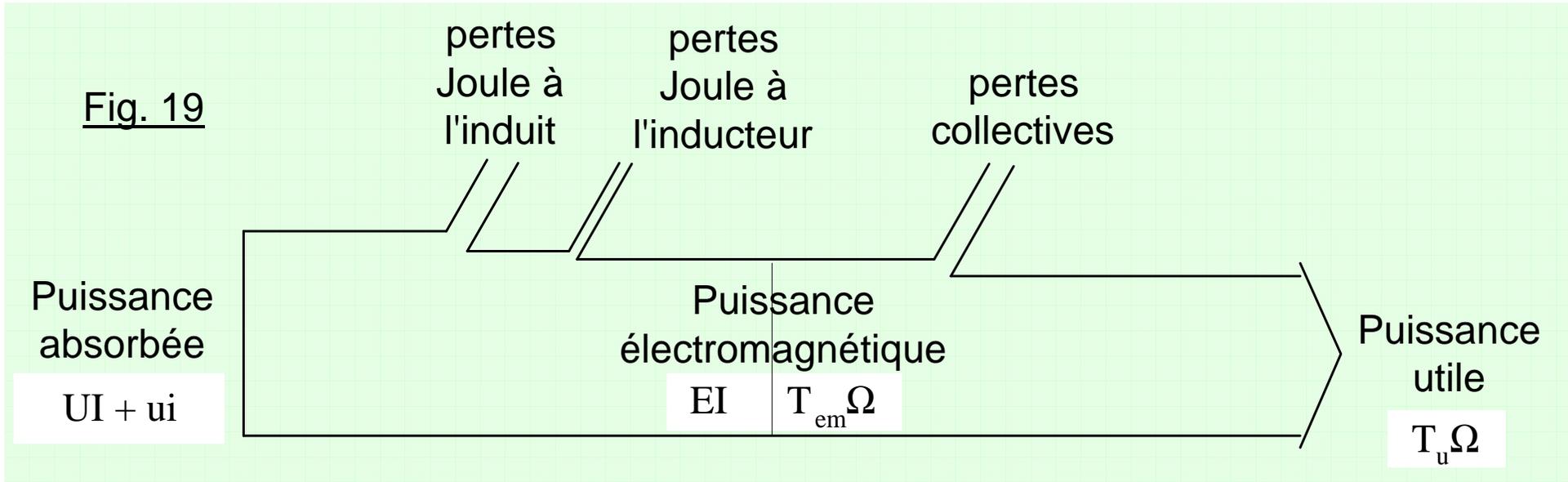


- Rendement

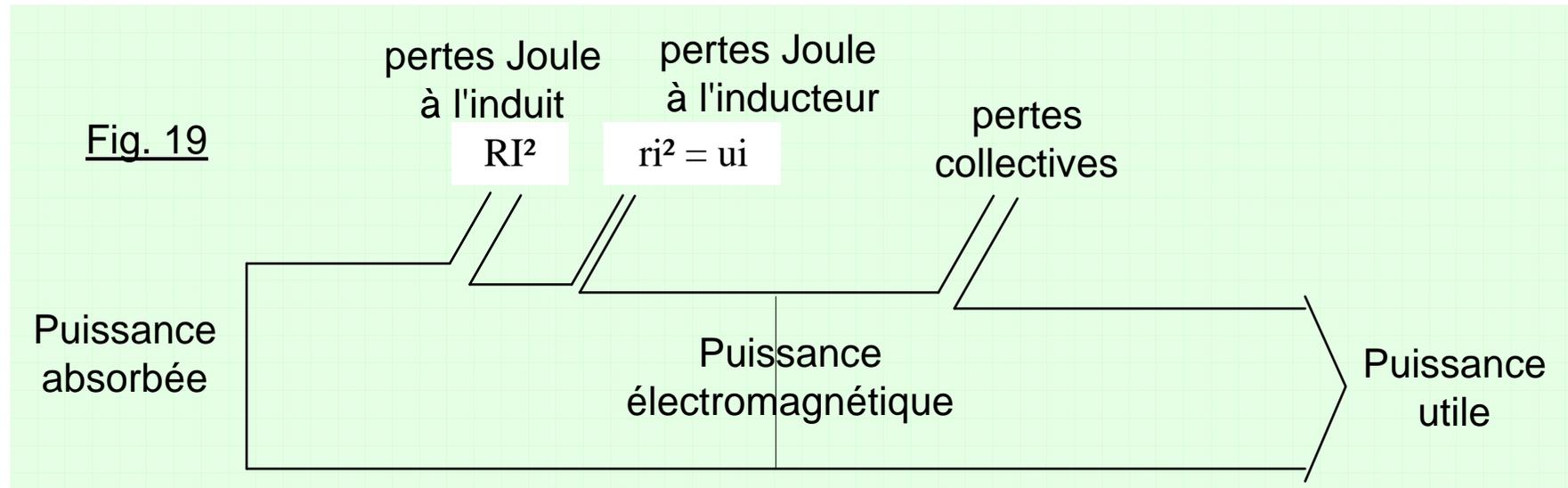
$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{absorbée}}}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{absorbée}} - \sum \text{pertes}}{P_{\text{absorbée}}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{utile}} + \sum \text{pertes}}$$

Fig. 19



- Puissance absorbée (électrique) :  $UI$  (induit) +  $u_i$  (inducteur)
- Puissance électromagnétique :  $EI = T_{em}\Omega$
- Puissance utile (mécanique) :  $T_{utile}\Omega$



- pertes Joule :

- à l'induit :  $RI^2$
- à l'inducteur :  $ri^2 (= u_i)$

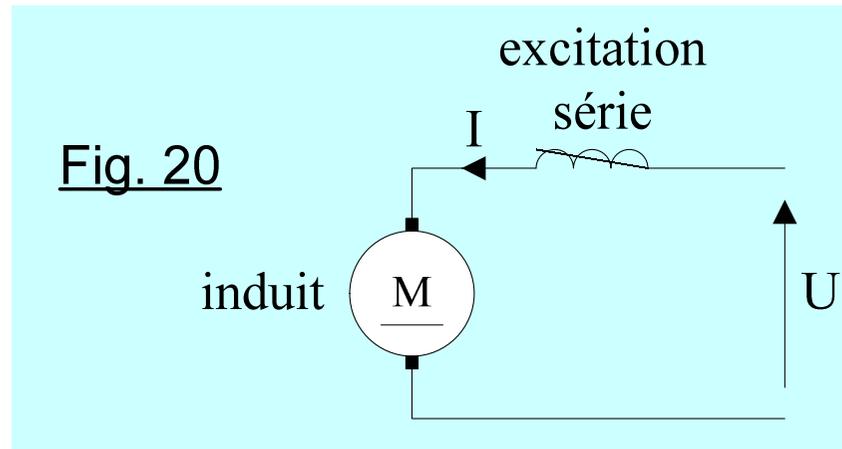
- pertes collectives (ou “constantes”) :

pertes mécaniques (frottements, vibrations, ventilation ...)  
 + pertes “fer” (dues aux matériaux ferromagnétiques)

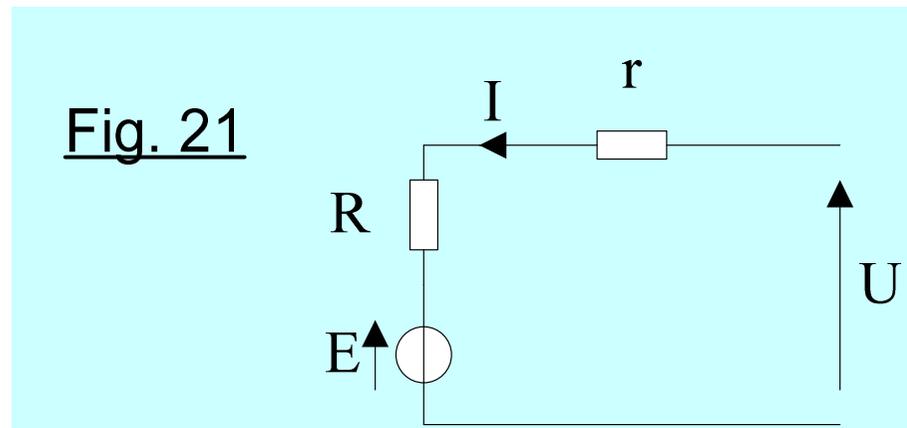
$$P_{\text{collectives}} = T_{\text{pertes collectives}} \Omega$$

$$T_{\text{pertes collectives}} = T_{\text{em}} - T_{\text{utile}}$$

## 6- Moteur série



- Schéma équivalent



$$U = E + R_{\text{totale}} I \quad \text{avec : } R_{\text{totale}} = r + R$$

- Avantages du moteur série

$$T_{em} \propto I^2$$

⇒ couple important (en particulier au démarrage).

Le moteur série fonctionne aussi en courant alternatif (moteur universel).

- Inconvénients

La vitesse de rotation dépend fortement de la charge : elle augmente rapidement quand la charge diminue.

$$\text{A vide, } I \approx 0$$

$$E \approx U$$

$$E \propto I \Omega \Rightarrow \Omega \rightarrow \infty$$

Ce moteur doit toujours avoir une charge car à vide il s'emballe !

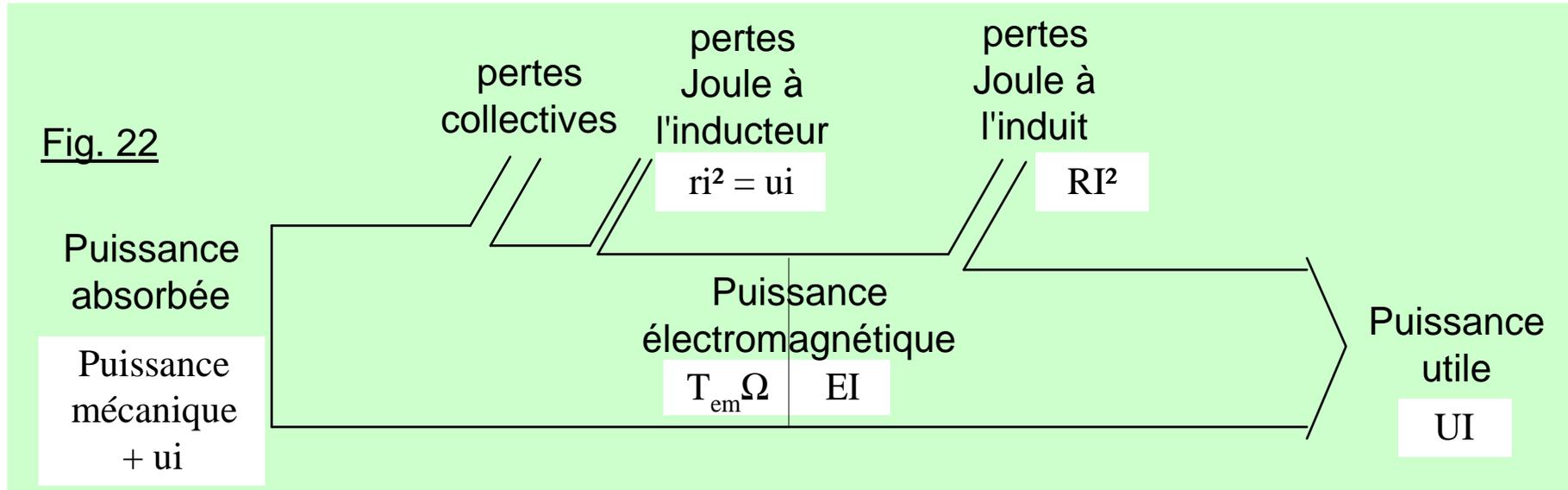
- Applications pratiques

Le moteur série est intéressant quand la charge impose d'avoir un gros couple, au démarrage et à faible vitesse de rotation.

- démarreur (automobile ...)
- moteur de traction (locomotive, métro ...)
- appareils de levage ...

## 7- Génératrice à courant continu (dynamo)

- Bilan de puissance de la génératrice à excitation indépendante



- Puissance absorbée :

puissance mécanique reçue

+ puissance consommée par l'inducteur :  $u_i = ri^2$

- Puissance utile (électrique) :  $UI$  (induit)

• Rendement :

$$\eta = \frac{UI}{P_{\text{mécanique}} + u_i}$$