

Electrotechnique

© Fabrice Sincère ; version 3.0.5
http://pagesperso-orange.fr/fabrice.sincere/

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Sommaire

1ère 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

2ème partie : électronique de puissance

Chapitre 0 Introduction
Chapitre 1 Montages redresseurs
Chapitre 2 Les hacheurs
Chapitre 3 Les onduleurs
Chapitre 4 Les gradateurs

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

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 crée 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)

WWW.DZPENCOM | قلم الجزائر

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

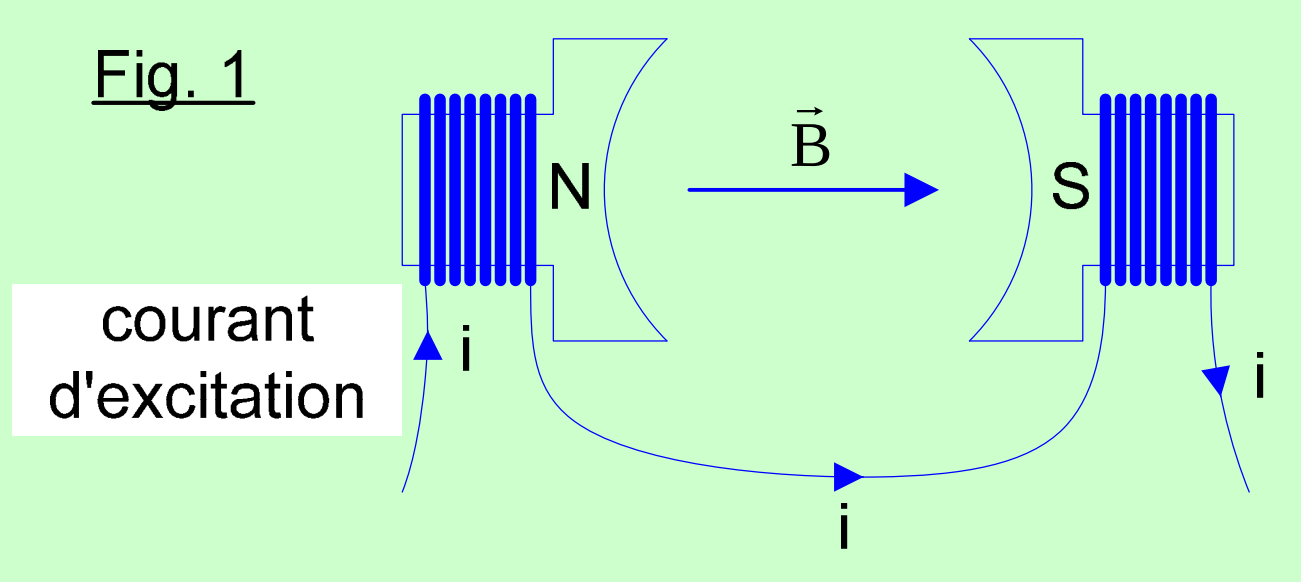


WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

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) :





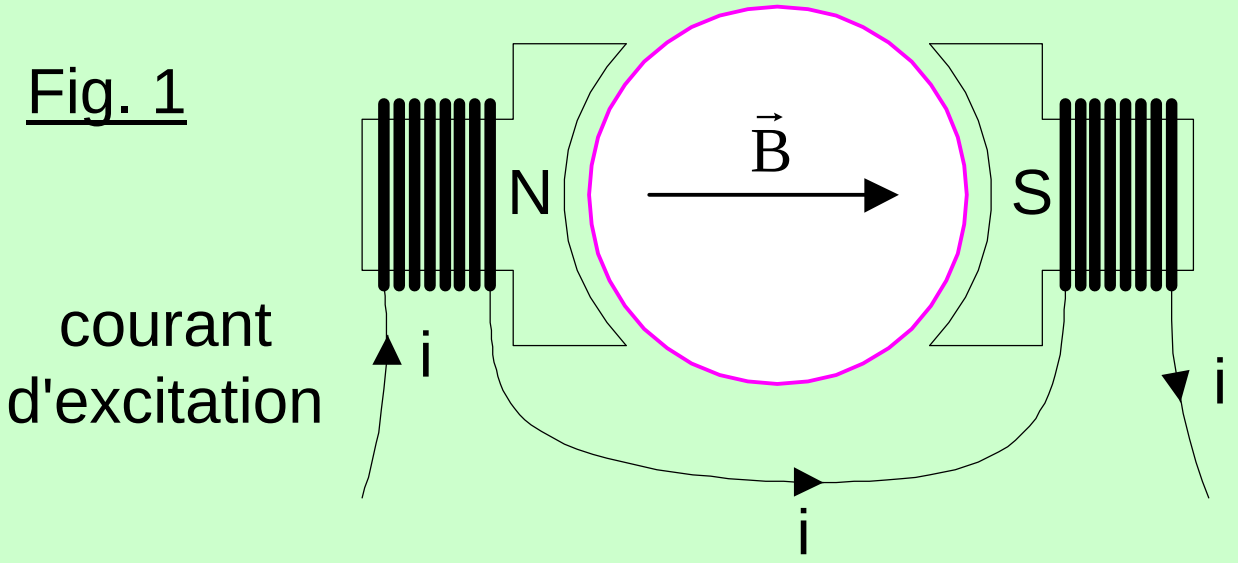
Il sert à créer un champ magnétique (champ "inducteur") dans le rotor.

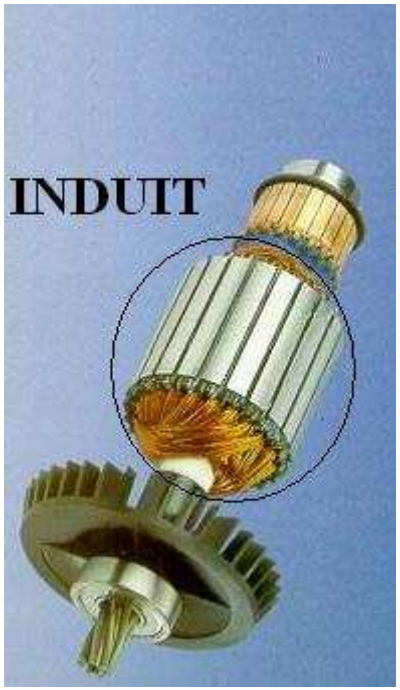
WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

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

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

Fig. 1





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

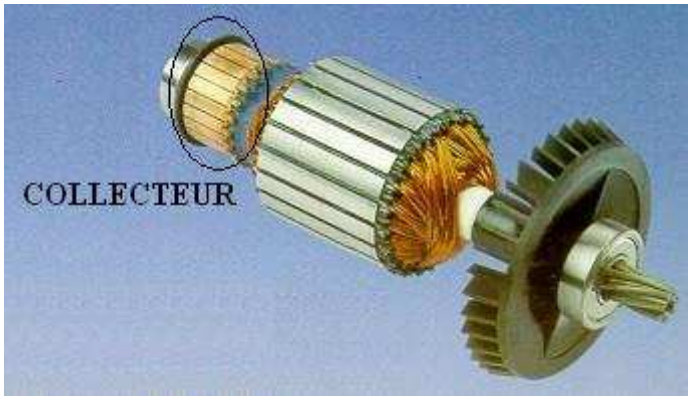
WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

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.





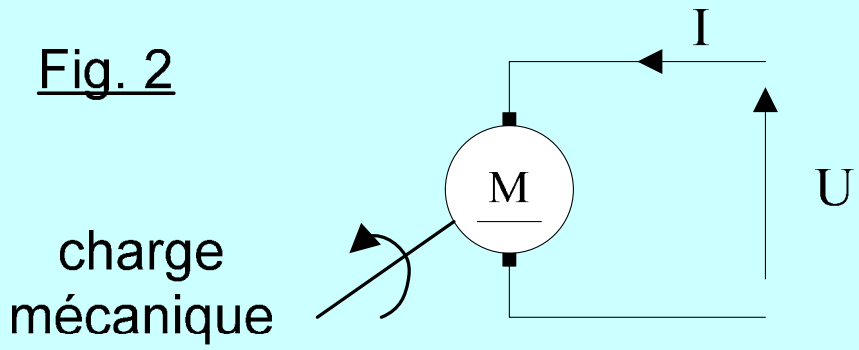
WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

2- Principe de fonctionnement

- Fonctionnement en moteur

Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique :

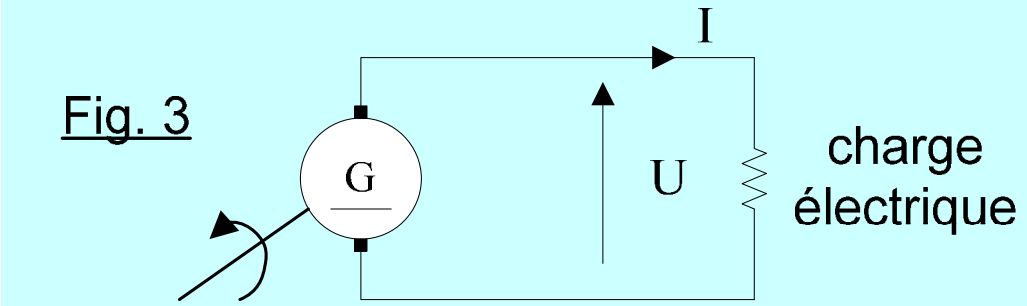
Fig. 2



- Fonctionnement en génératrice (dynamo)

Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique :

Fig. 3



WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

2-1- Fonctionnement en moteur

Soit une spire du bobinage d'induit :

Fig. 4

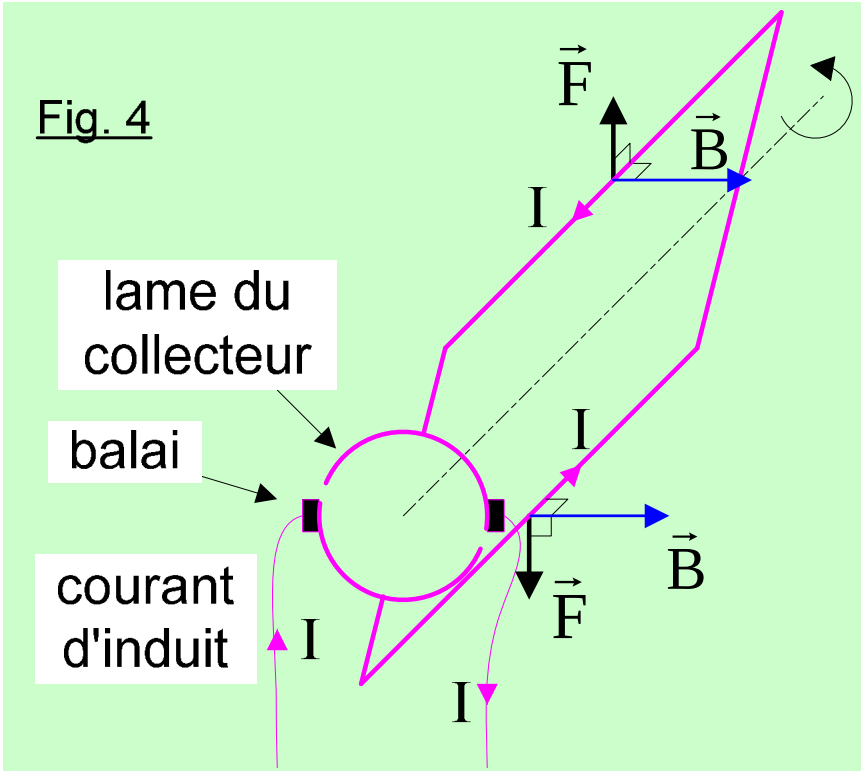
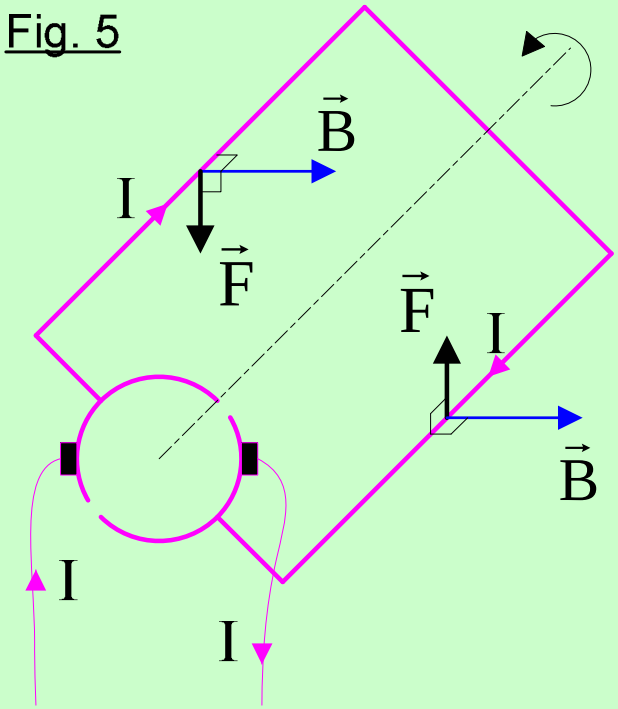


Fig. 5



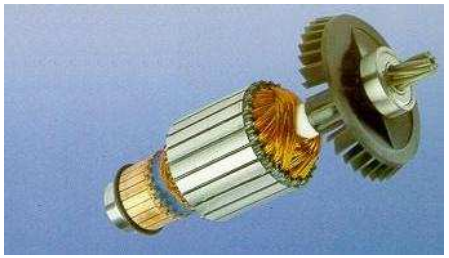
champ magnétique inducteur **B**

+ courant d'induit **I**

⇒ forces électromagnétiques (forces de Laplace)

⇒ couple électromagnétique

⇒ rotation du rotor



WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

2-2- Fonctionnement en génératrice

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

Fig. 6

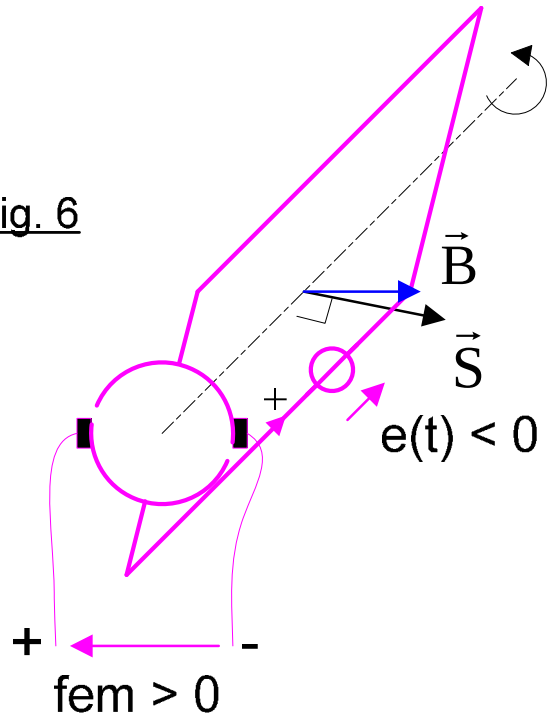
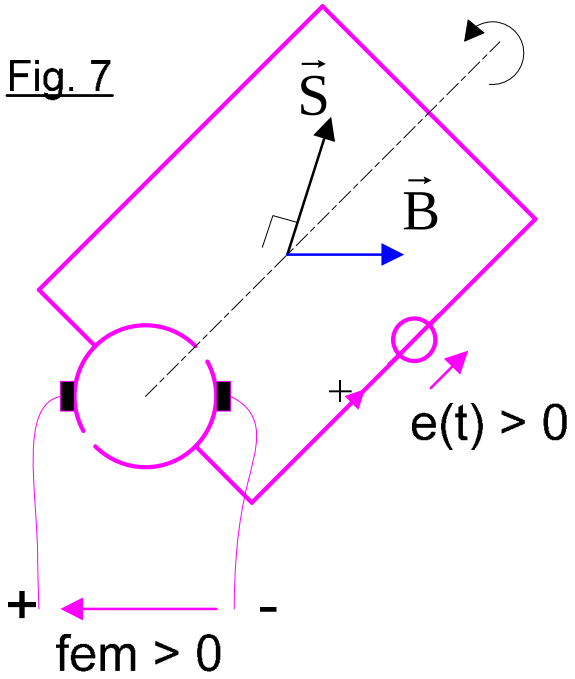


Fig. 7



champ inducteur + rotation de la spire

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

$\Rightarrow$ création d'une fem induite (e) alternative

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

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

• 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)

Φ : flux magnétique crée sous un pôle par l'inducteur (cf. fig. 1)

Ω : vitesse de rotation (en rad/s)

k : constante qui dépend de la machine considérée

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

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

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

3-3- Conversion de puissance

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

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

Il vient : $E\ I = T_{em}\Omega$

$(k\ \Omega\ \Phi)\ I = (k'\ \Phi\ \ I)\ \Omega$

$k = k'$

En résumé :

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

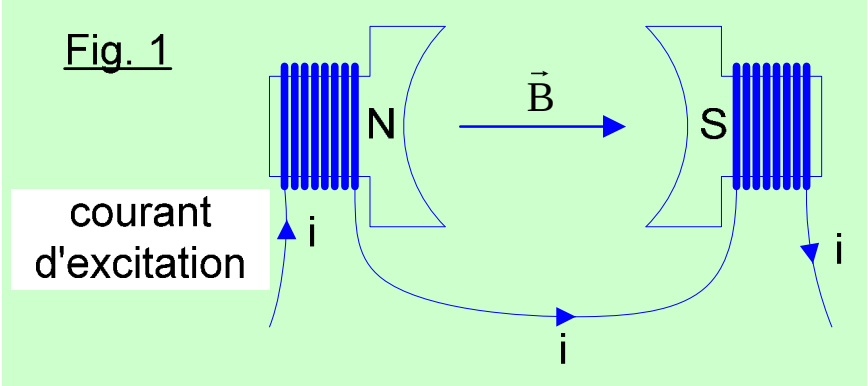
WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

3-4- Flux magnétique crée sous un pôle

$B \alpha i$

$\Phi \alpha B$ (par définition)

$\Rightarrow$ le flux est proportionnel au courant d'excitation : $\Phi \alpha i$



- La fem est donc proportionnelle :
  - au courant d'excitation
  - à la vitesse de rotation

$E \alpha i \Omega$

- Le couple électromagnétique est proportionnel :
  - au courant d'excitation
  - au courant d'induit

$T_{em} \alpha i I$

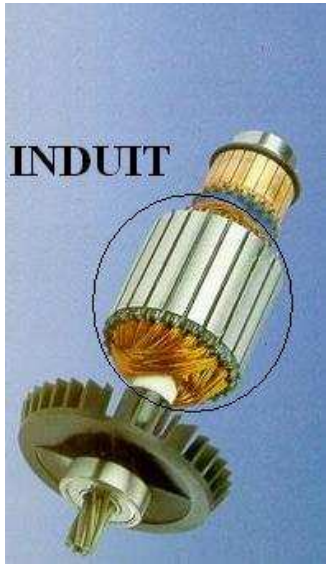
- Cas particulier : inducteur à aimants permanents

Flux constant $\Rightarrow$ $E \alpha \Omega$

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

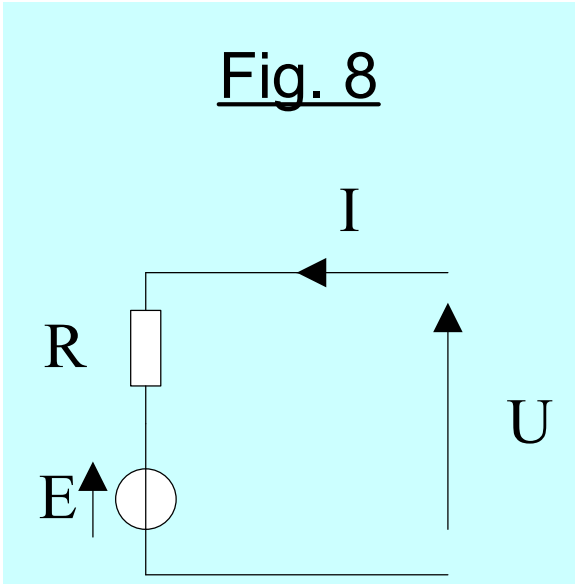
WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

3-5- Schéma équivalent de l'induit



On utilise un modèle de Thévenin :

Fig. 8



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

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

Fonctionnement :

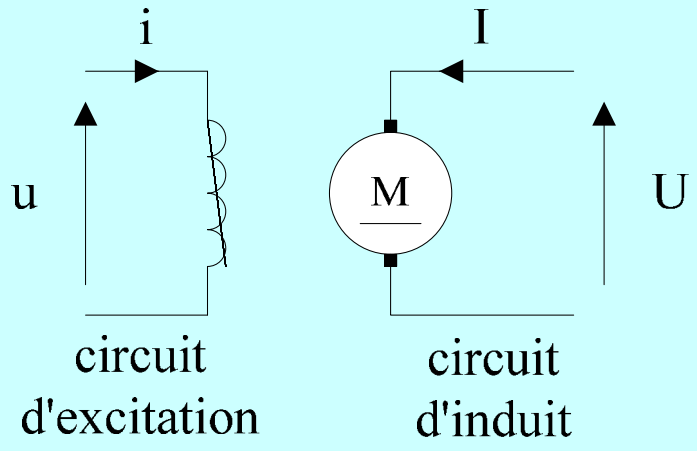
- en moteur : $I > 0$ $P_e = UI > 0$ $E < U$
- en génératrice : $I < 0$ $P_e = UI < 0$ $U < E$

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

4- Les différents types de machines à courant continu

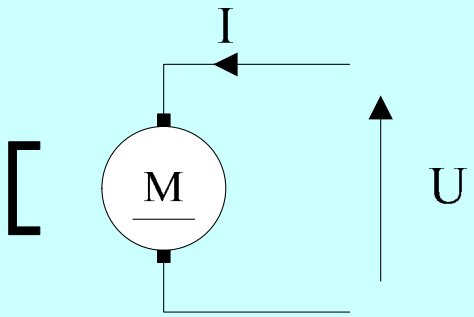
- Machine à excitation indépendante

Fig. 9



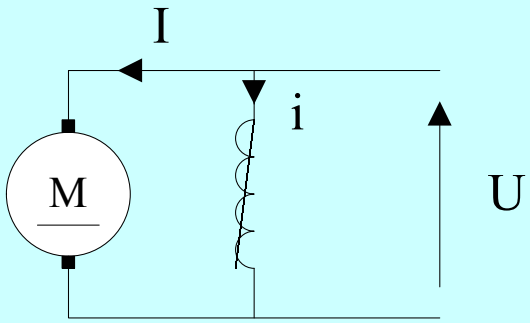
- Machine à aimants permanents

Fig. 10



- Machine shunt (excitation en dérivation)

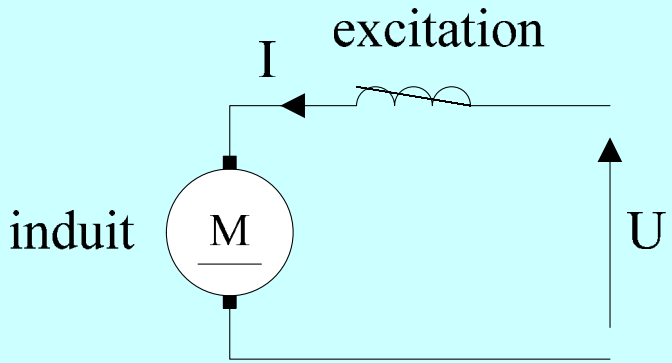
Fig. 11



WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

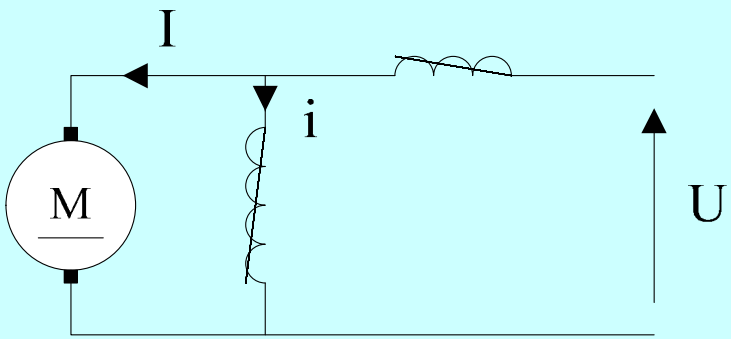
- Machine à excitation en série

Fig. 12



- Machine compound (excitation composée)

Fig. 13

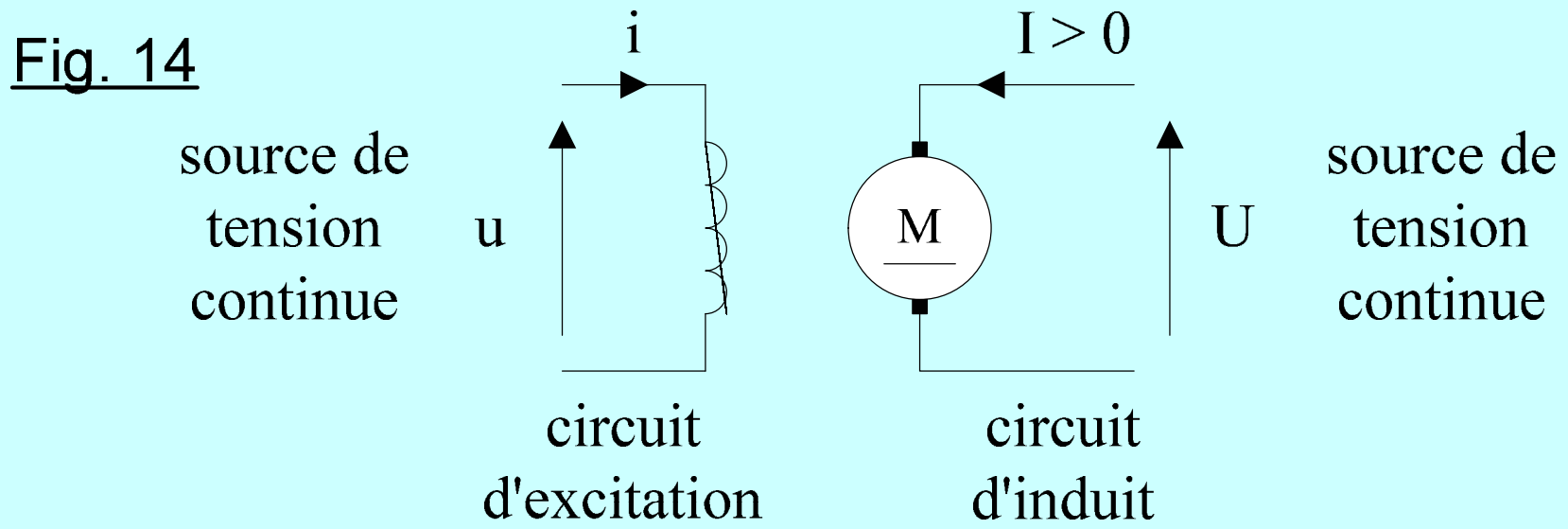


WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

5- Moteur à excitation indépendante

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

Fig. 14



WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

• Schéma électrique équivalent

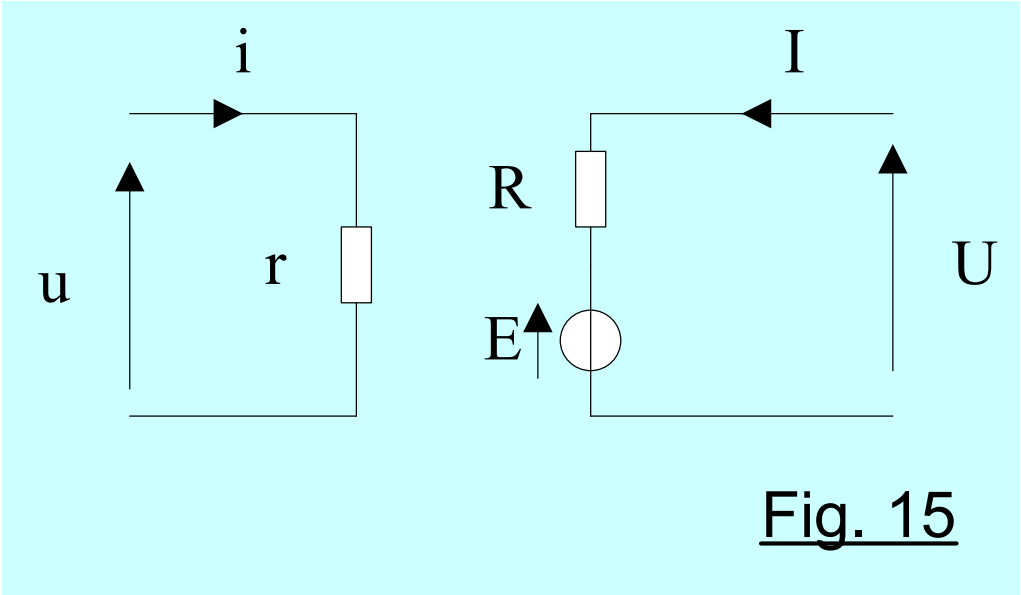


Fig. 15

Induit : $U = E + RI$

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

En pratique : $r >> R$

En charge : $I >> i$

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

• Vitesse de rotation

$$E = k \Phi \Omega$$

d'où : $$\Omega = \frac{U - RI}{k\Phi}$$

• Caractéristique Ω(i) à U constante

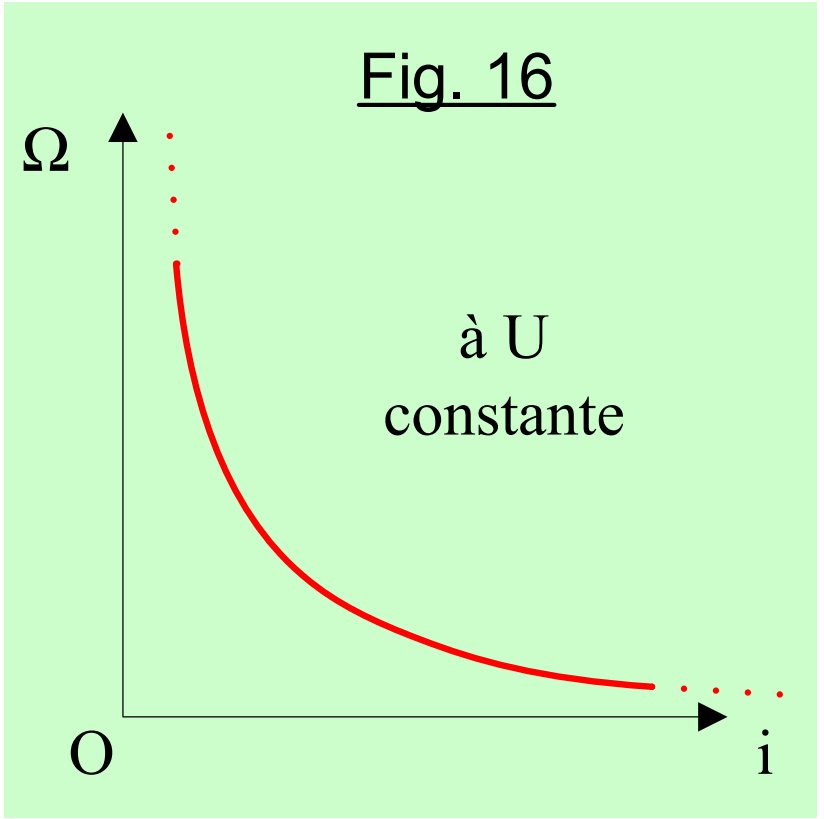
Charge ↗ courant d'induit I ↗

En pratique : RI << U

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

$\Phi \alpha$ i

Finalement : $$\Omega \alpha \frac{1}{i}$$



WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

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



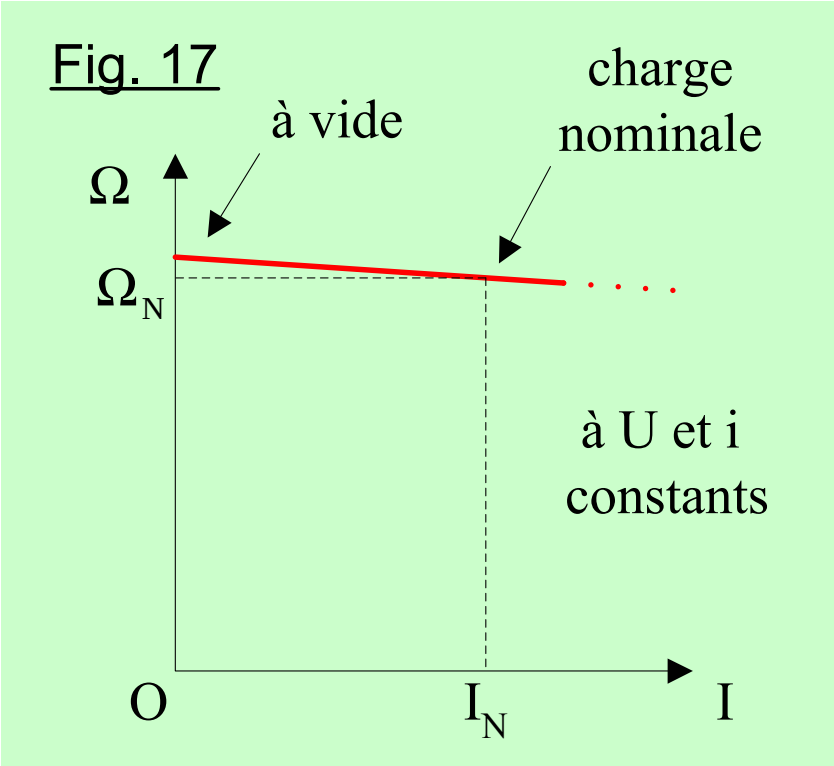
En marche, il ne faut jamais couper l'excitation d'un moteur à excitation indépendante.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

• Caractéristique Ω(I) en charge
à U constante et i constant (Φ constant)

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

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

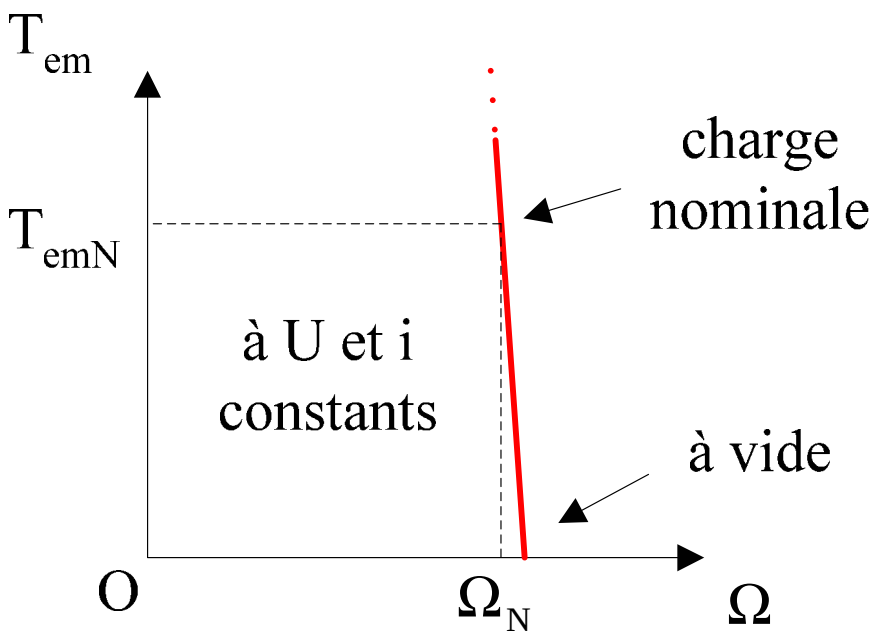


La vitesse de rotation varie peu avec la charge ☺.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

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

Fig. 18



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

Le moteur démarre seul ☺.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

• Variation de vitesse

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

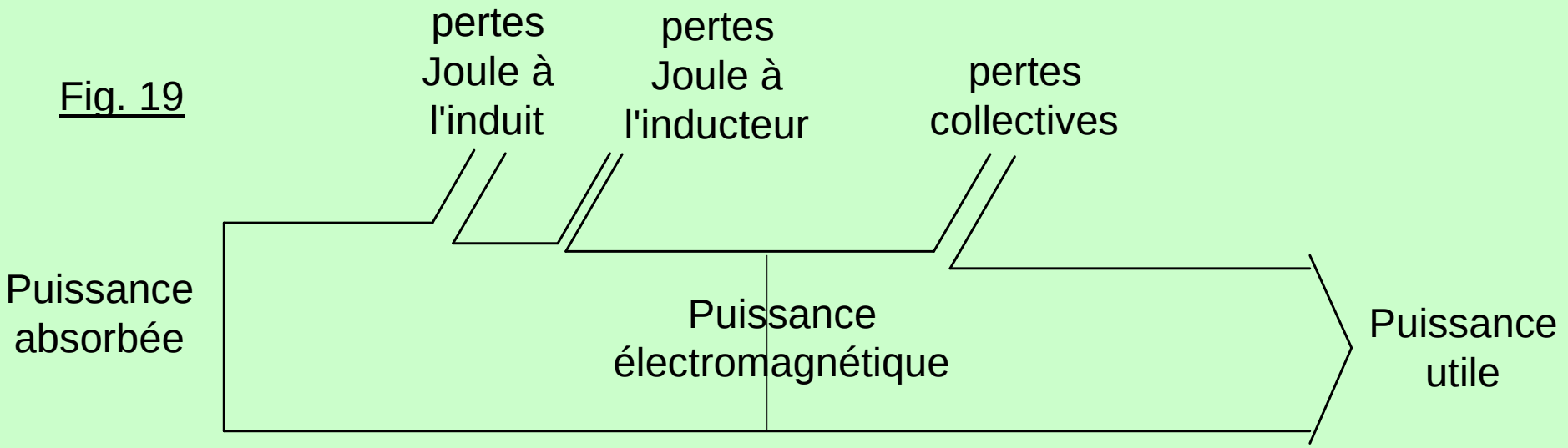
A excitation constante : $\Omega \alpha U$

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

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

- Bilan de puissance

Fig. 19



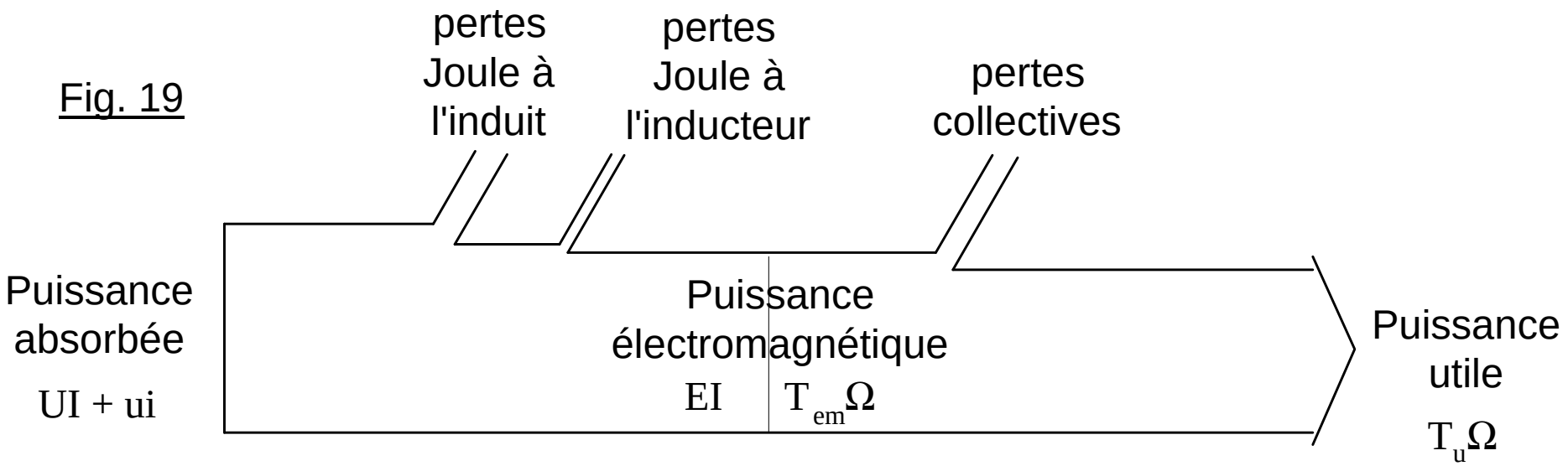
- Rendement

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

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

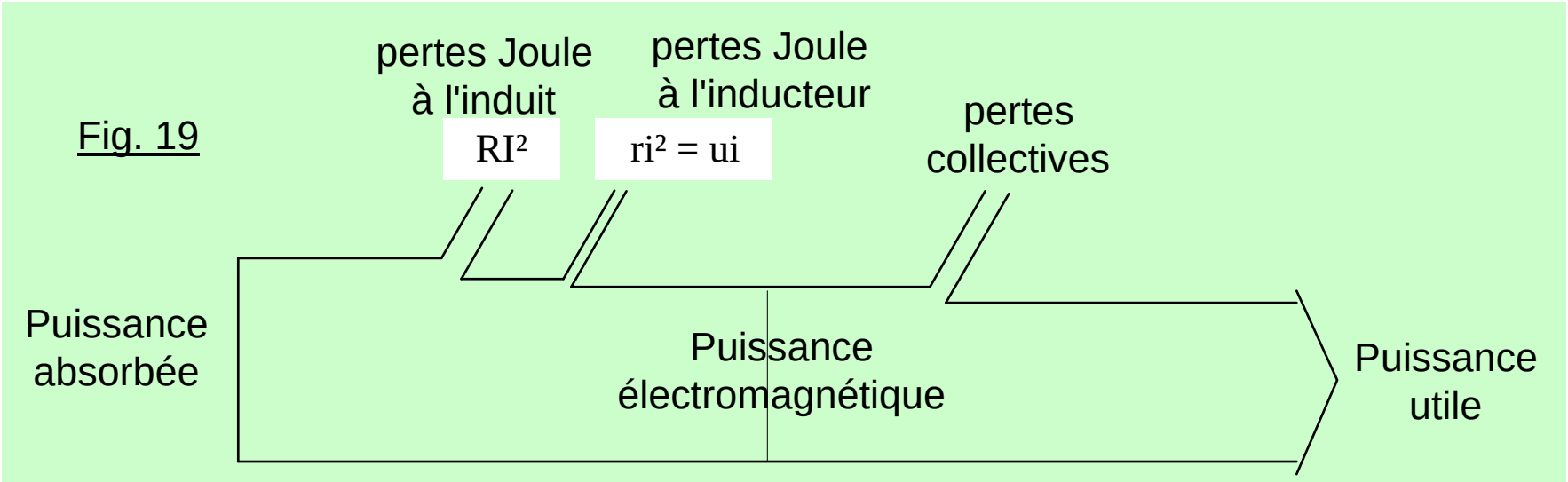
WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Fig. 19



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

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر



- pertes Joule :
  - à l'induit : RI^2
  - à l'inducteur : ri^2 (= ui)
- pertes collectives (ou "constantes") :

  pertes mécaniques (frottements, vibrations, ventilation …)

  + pertes "fer" (dues aux matériaux ferromagnétiques)

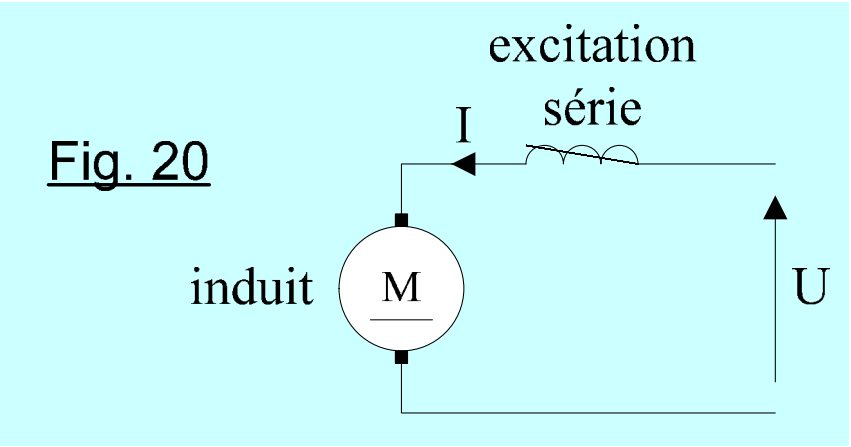
$$p_{collectives} = T_{pertes\ collectives}\ \Omega$$

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

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

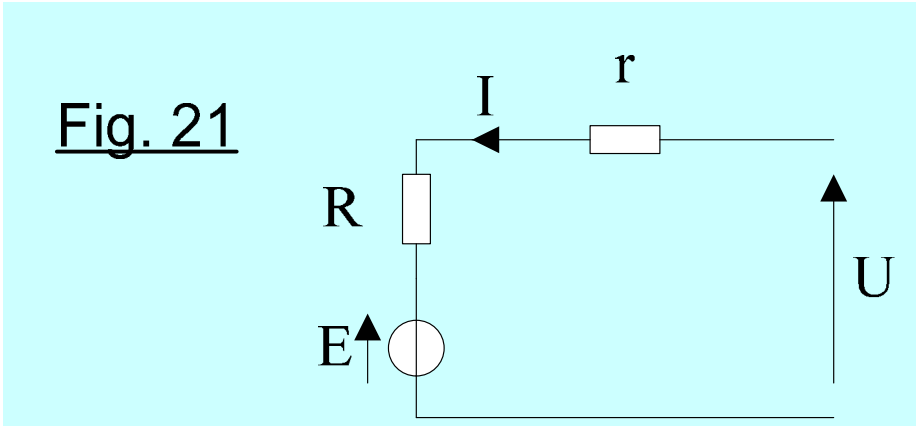
6- Moteur série

Fig. 20



- Schéma équivalent

Fig. 21



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

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

• Avantages du moteur série

$T_{em} \alpha I^2$

$\Rightarrow$ 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.

A vide, $I \approx 0$

$E \approx U$

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

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

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

• Applications pratiques

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

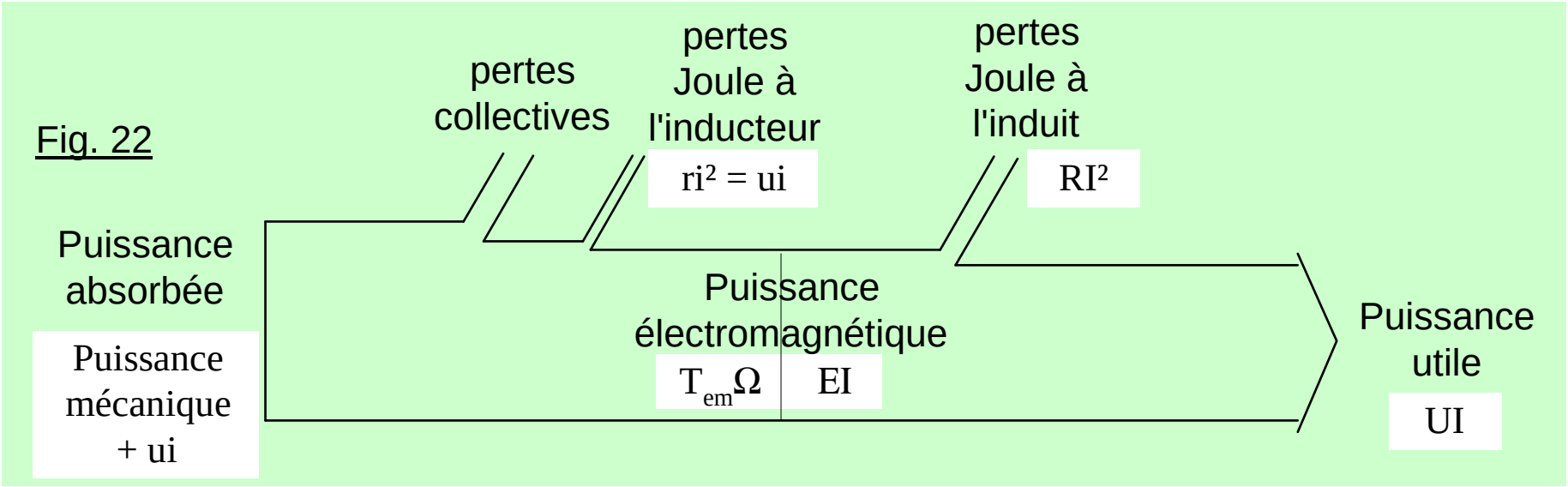
- démarreur (automobile ...)
- moteur de traction (locomotive, métro ...)
- appareils de levage ...

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

7- Génératrice à courant continu (dynamo)

• Bilan de puissance de la génératrice à excitation indépendante

Fig. 22



- Puissance absorbée :

  puissance mécanique reçue

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

- Puissance utile (électrique) : UI (induit)

• Rendement :

$$\eta = \frac{UI}{P_{mécanique} + ui}$$

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر