

**CHAPITRE 2**

**LA CONVERSION DE L'ENERGIE ELECTROMECHANIQUE**

**OBJECTIFS**

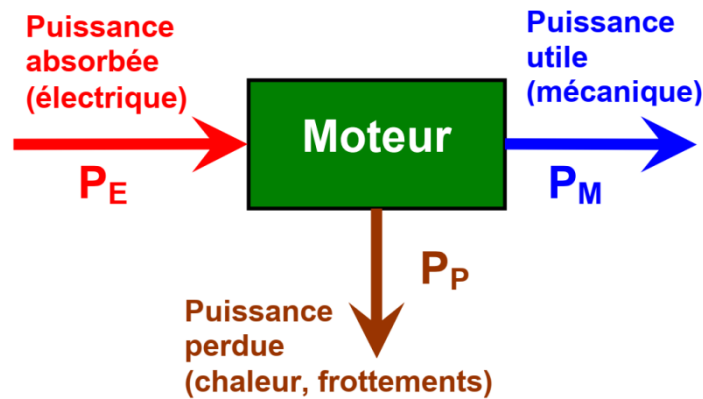
- Posséder des connaissances générales sur les convertisseurs électromécaniques (machines tournantes).
- Connaître les propriétés élémentaires des trois types de moteurs (continu, alternatif et pas à pas).
- Savoir quelle grandeur électrique (U, I ou f) agit sur quelle grandeur mécanique (T ou  $\Omega$ ).
- Etudier le couplage d'une machine à sa charge (démarrage et point de fonctionnement)

**1- Conversion d'énergie**

Un convertisseur électromagnétique ou Une machine électrique tournante est un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant et un dispositif mécanique. Selon la conversion utilisée, on distingue deux régimes de fonctionnement peuvent alors exister :

Fonctionnement "moteur"

L'énergie électrique est transformée en énergie mécanique (schéma ci-dessous):  
 On rappelle qu'en régime continu, l'énergie W est égale à la puissance P multipliée par le temps t (  $W = P.t$  ) avec  $1kW.h = 1kW.1h$  ou  $1Joule = 1W.1s$



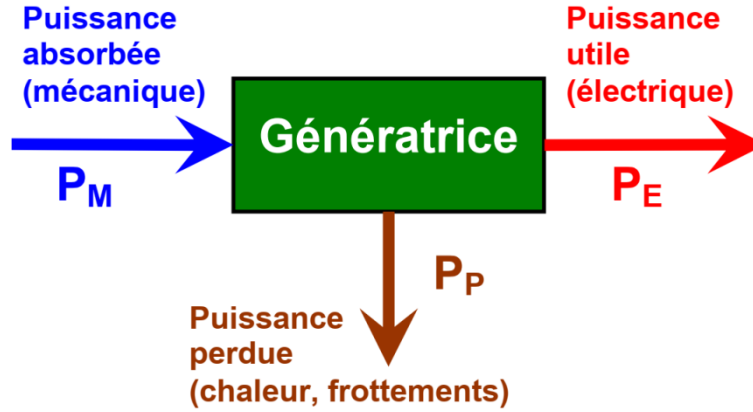
**Figure (2.1):** Fonctionnement d'un convertisseur électromécanique en moteur

On peut définir le rendement :

$$\eta = \frac{P_M}{P_E} = \frac{P_M}{P_M + P_P}$$

Fonctionnement "génératrice"

L'énergie mécanique est transformée en énergie électrique (schéma suivant) :



**Figure (2.2):** Fonctionnement d'un convertisseur électromécanique en générateur

On peut définir le rendement :

$$\eta = \frac{P_E}{P_M} = \frac{P_E}{P_E + P_P}$$

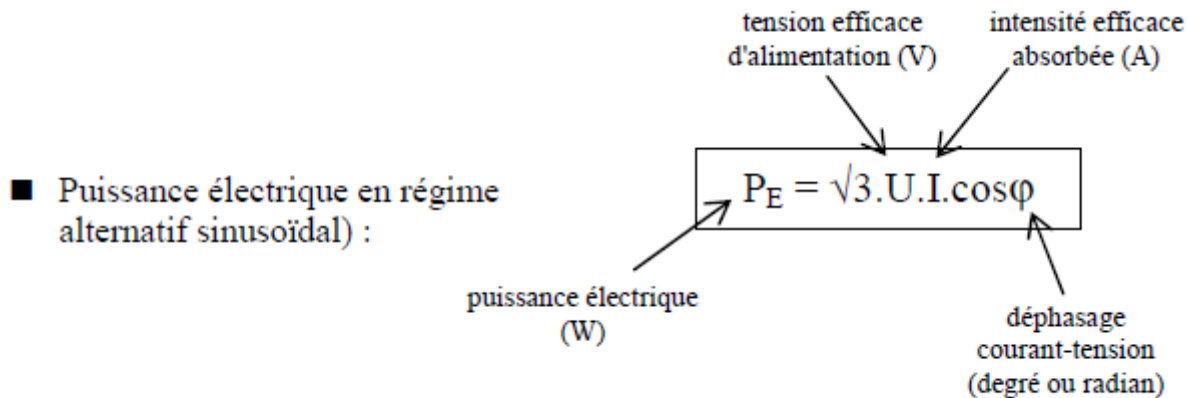
Expression des puissances

■ Puissance mécanique :

The diagram shows a box containing the equation  $P_M = T_U \cdot \Omega$ . An arrow labeled "couple utile (N.m)" points down into the box. An arrow labeled "vitesse rotation (rad.s<sup>-1</sup>)" points down into the box. An arrow labeled "puissance mécanique (W)" points from the box to the left.

■ Puissance électrique en régime continu :

The diagram shows a box containing the equation  $P_E = U \cdot I$ . An arrow labeled "tension d'alimentation (V)" points down into the box. An arrow labeled "intensité absorbée (A)" points down into the box. An arrow labeled "puissance électrique (W)" points from the box to the left.



## 2- Réversibilité des machines électriques tournantes

Les machines électriques tournantes sont réversibles, la même machine peut fonctionner en moteur ou en génératrice (exemples ci-dessous avec trois familles de moteurs).

### Le moteur à courant continu:

Une action mécanique sur le rotor produit une tension continue au stator, c'est la génératrice à courant continu (dynamo).

### Le moteur à courant alternatif:

Le moteur synchrone utilisé en génératrice va produire une tension de fréquence directement proportionnelle à la vitesse de rotation c'est la génératrice synchrone (alternateurs des centrales électriques).

Le moteur asynchrone utilisé en génératrice va produire une tension de fréquence légèrement inférieure au cas de la génératrice synchrone c'est la génératrice asynchrone (centrales éoliennes).

### Le moteur pas à pas:

Une action mécanique sur un moteur pas à pas va produire une tension alternative à chaque enroulement du stator.

Le moteur pas à pas est lui aussi réversible mais n'est, en principe, pas utilisé en génératrice.

## 3- Constitution des machines électriques tournantes

### Le stator:

Le stator est la partie fixe de la machine.

Dans le cas d'un moteur, le stator est alimenté en électricité et produit un champ magnétique inducteur.

Dans le cas d'une génératrice, le stator produit une tension induite par le champ magnétique variable produit par le rotor en rotation.

#### Le rotor:

Le rotor est la partie tournante de la machine, les courants rotoriques produisent un champ magnétique (champ induit) qui réagit mécaniquement avec le champ inducteur (stator) et produit un couple de rotation.

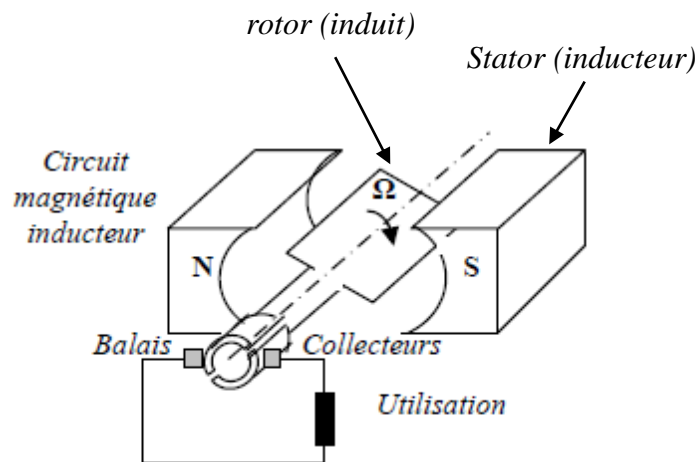
### 4. Machine à courant continu (CC).

Une machine à courant continu est une machine électrique tournante qui fonctionne avec des tensions/courants continus.

#### 4.1 Constitution:

La machine électrique à courant continu est composée des éléments suivants :

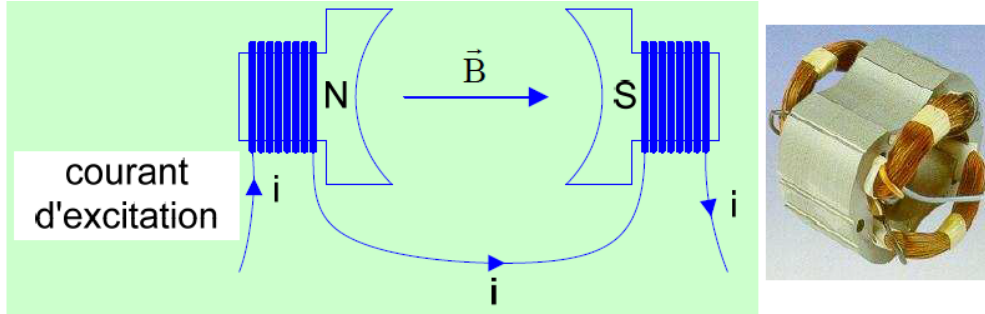
- Stator (inducteur)
- Rotor (Induit)
- Collecteur et balais



**Figure (2.3):** Constitution de la machine à CC

#### Stator «inducteur» ou circuit d'excitation :

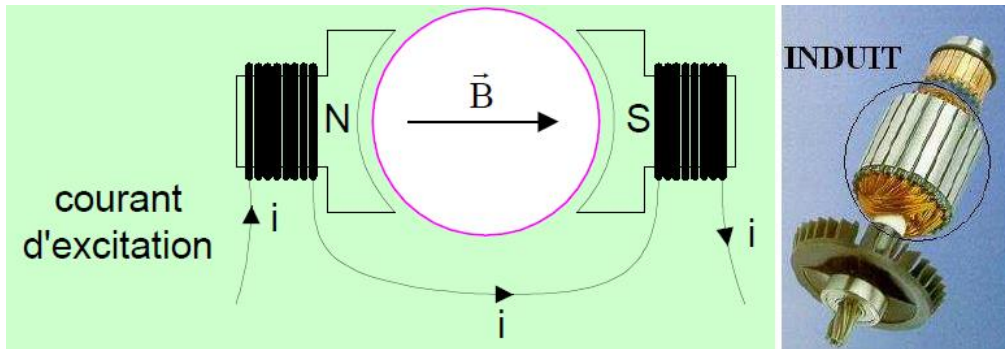
C'est la partie fixe de la machine, il est constitué soit d'un aimant permanent, soit d'un enroulement d'excitation qui sert à créer un champ d'induction magnétique.



**Figure (2.4):** Inducteur de la machine à courant continu

Rotor «induit» :

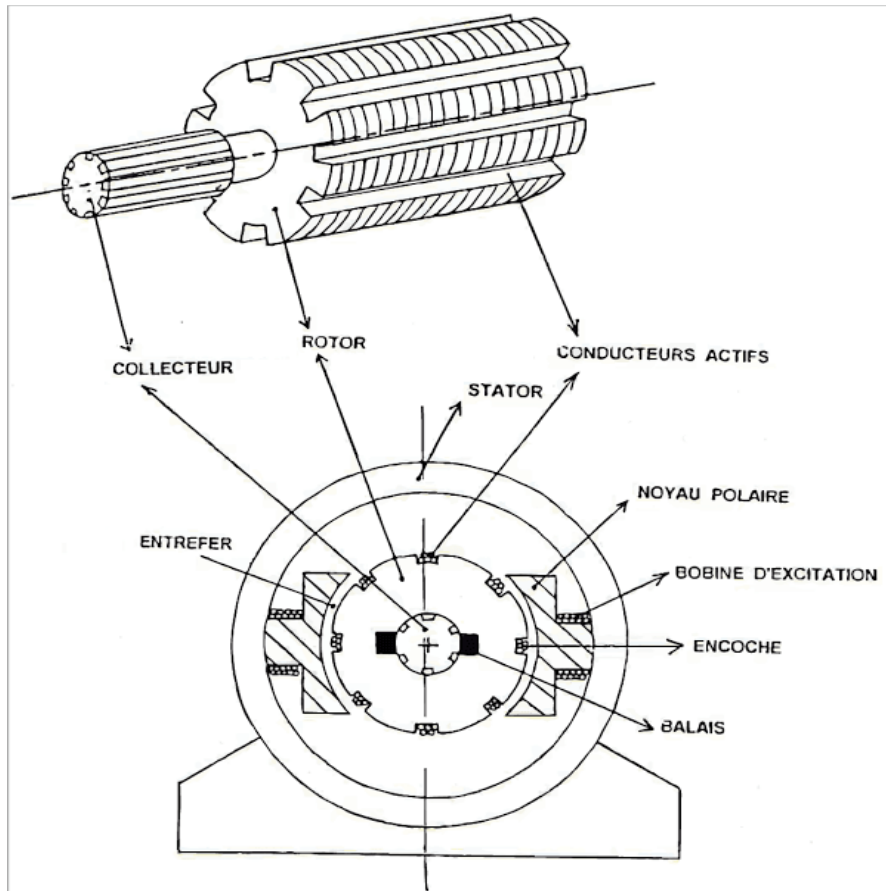
C'est la partie mobile ou tournante de la machine, il est formé d'un empilage cylindrique de tôles isolées, dans lequel des encoches ont été aménagées afin de loger les conducteurs de l'enroulement rotorique. Le rotor est séparé du stator par un entrefer n'excedant pas quelques millimètres.



**Figure (2.5):** Induit de la machine à courant continu

Collecteur et balais:

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

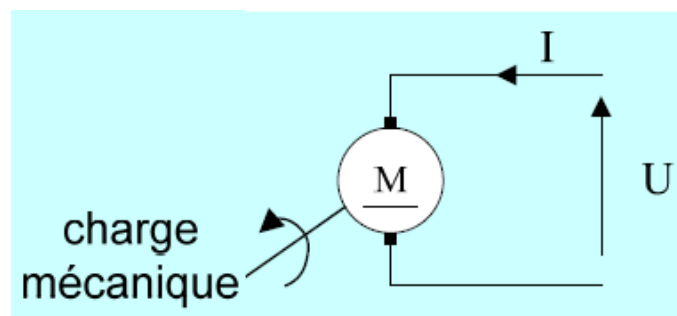


**Figure (2.6):** Schéma simplifié d'une machine à courant continu

**4.2 Principe de fonctionnement:**

⚡ Fonctionnement en moteur

Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique :



**Figure (2.7):** Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique

Rappel de la Force de Laplace

Un conducteur de longueur  $L$  parcouru par un courant  $I$  et placé dans un champ magnétique  $\vec{B}$  est soumis à une force dite **force de Laplace**  $\vec{F}$ .

$$\vec{F} = I \cdot \vec{L} \wedge \vec{B}$$

$F$  en newtons (N),  $I$  en ampères (A),  $L$  en mètre (m),  $B$  en tesla (T).

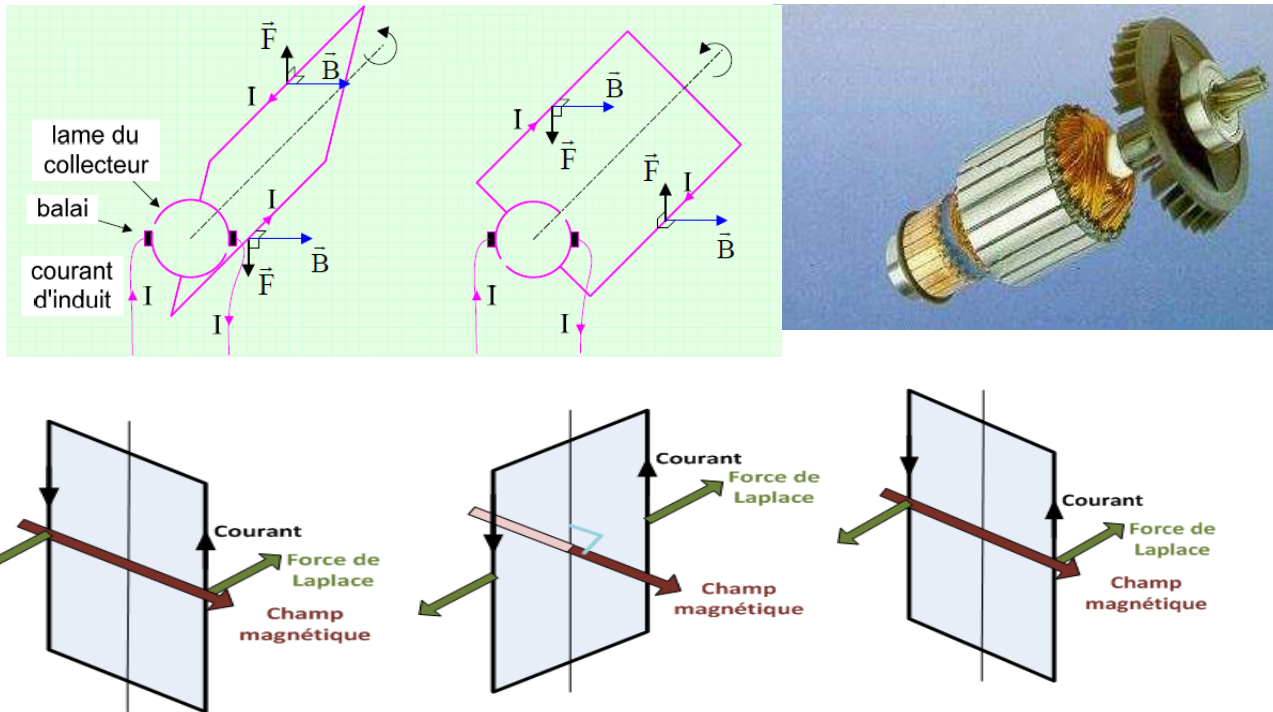


Figure (2.8): Principe de fonctionnement en moteur à CC

Champ magnétique inducteur  $\vec{B}$  + Courant d'induit  $I$

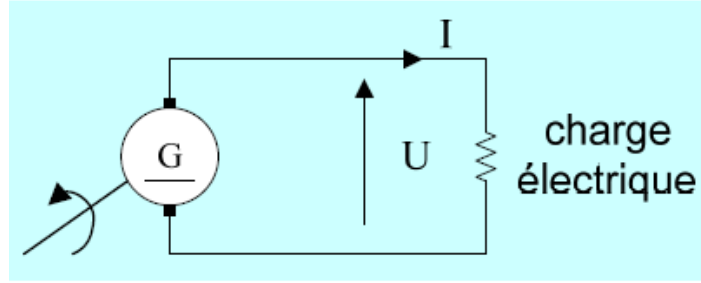
⇒ Forces électromagnétiques  $\vec{F}$  (forces de Laplace)

⇒ Couple électromagnétique

⇒ Rotation du rotor

⚡ Fonctionnement en génératrice (dynamo)

Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique :

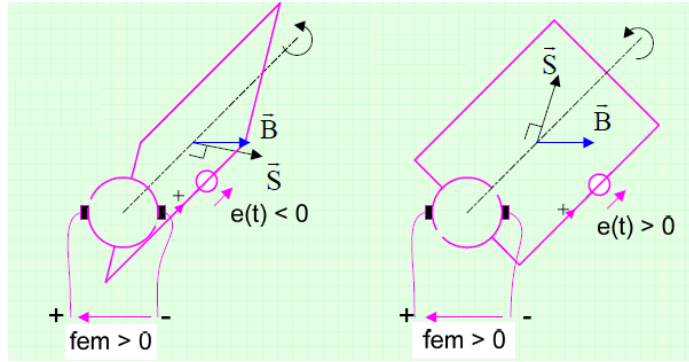


**Figure (2.9):** Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique

Rappel Loi de Faraday

Le principe physique utilisé est le phénomène d'induction électromagnétique (loi de Faraday :

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



**Figure (2.10):** Principe de fonctionnement en génératrice

Champ magnétique inducteur  $\vec{B}$  + Rotation de la spire

⇒ Variation du flux magnétique

⇒ Création d'une force électromotrice induite (e(t)) 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.

✚ Schéma électrique équivalent

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

Expression de la fem induite

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



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

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

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

$k$  : Constante qui dépend de la machine

Expression du couple électromagnétique

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

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

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

Schéma équivalent de l'induit

$E$  : fem induite (en V)

$U$  : Tension d'induit (en V)

$R$  : Résistance d'induit (en W) (résistance du bobinage de l'induit)

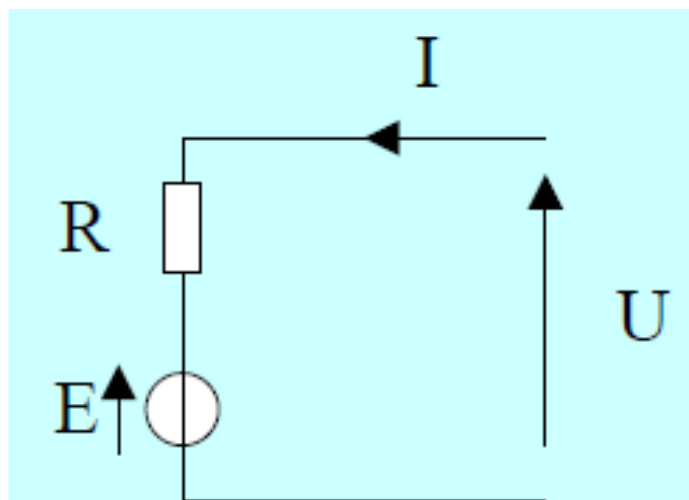
$I$  : Courant d'induit (en A)

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

Fonctionnement :

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

- En génératrice :  $I < 0$   $P_e = UI < 0$   $U < E$



**Figure (2.11):** Schéma équivalent de l'induit

4.3 Les différents modes d'excitation de la machine à courant continu

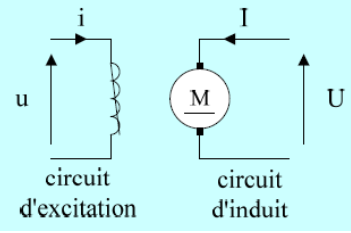
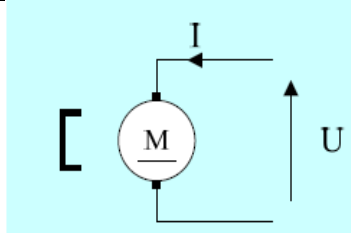
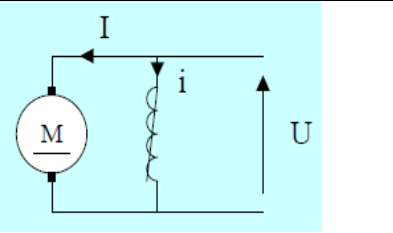
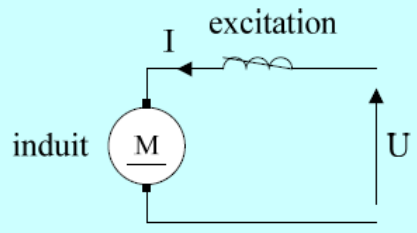
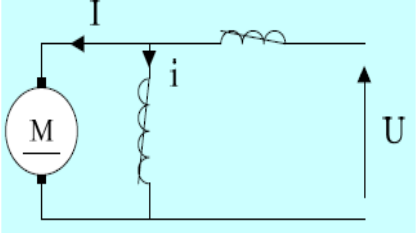
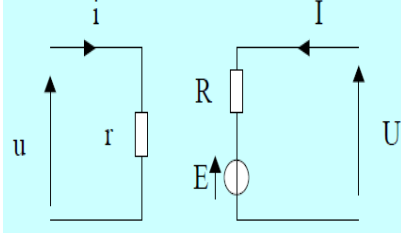
Excitation indépendante	Machine à aimant permanent	Machine shunt (excitation en dérivation)
		
Machine à excitation en série	Machine compound (excitation composée)	Schéma électrique équivalent
		

Figure (2.12): Modes d'excitation de la machine à courant continu

4.4 Bilan de puissances

Fonctionnement en Moteur :

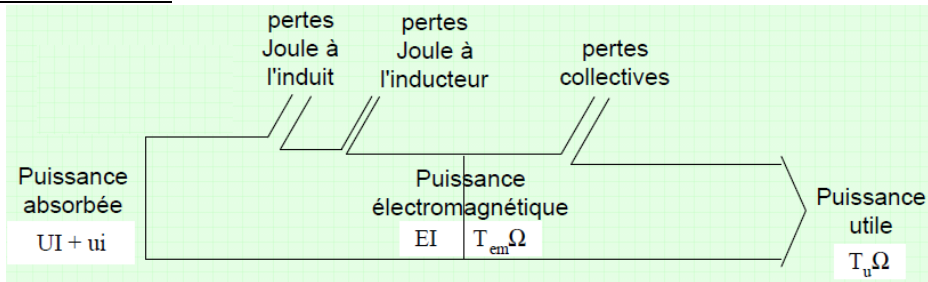


Figure (2.13): Bilan de puissance du moteur à CC

Fonctionnement en Générateur :

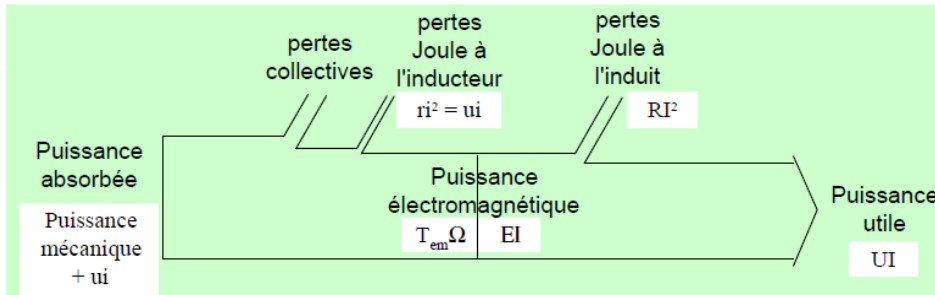


Figure (2.14): Bilan de puissance de la génératrice à CC

## 5. La Machine à Courant Alternatif CA (Machine Asynchrone-Machine Asynchrone) :

Le principal point faible des machines électriques à courant continu est le système mécanique collecteur-balais, cher et fragile, source de pannes fréquentes. Cherchant à concevoir un moteur électrique sans collecteur Tesla découvrit en 1882 les champs magnétiques tournants engendrés par un système de courants polyphasés. En 1883 il construisit son premier moteur à champ magnétique tournant.

### 5.1 Organisation de la machine

L'organisation d'une machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

- ✚ Le stator (partie fixe) constitué de disques en tôle magnétique portant des bobines fixes régulièrement disposées.
- ✚ Le rotor (partie tournante) constitué de disques en tôle magnétique empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement bobiné ou injecté.
- ✚ Les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous ensembles

Selon le principe de fonctionnement, on distingue deux grandes catégories de machines tournantes à courant alternatif :

- 1-Machines synchrones
- 2-Machines asynchrones

**5.2 Machines synchrones (MS) :** Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant.

Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

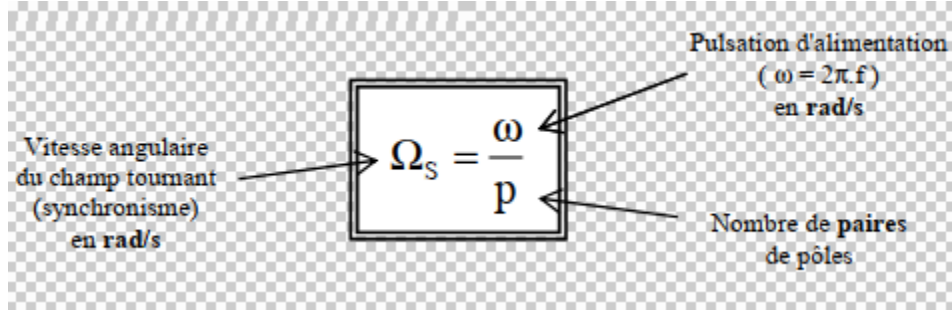
Comme toutes les machines, elles sont réversibles et peuvent fonctionner en générateur (alternateur) ou en moteur.

Fonctionnement en mode moteur :

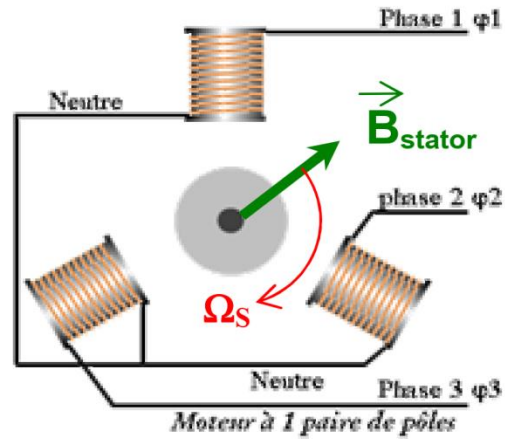
- L'alimentation des bobines statoriques fixes en courant alternatif crée un champ magnétique tournant.

- Le rotor de la machine (soit excité en courant continu s'il est bobiné, ou à aimants permanents) est le siège d'un champ magnétique constant solidaire au rotor lui-même.

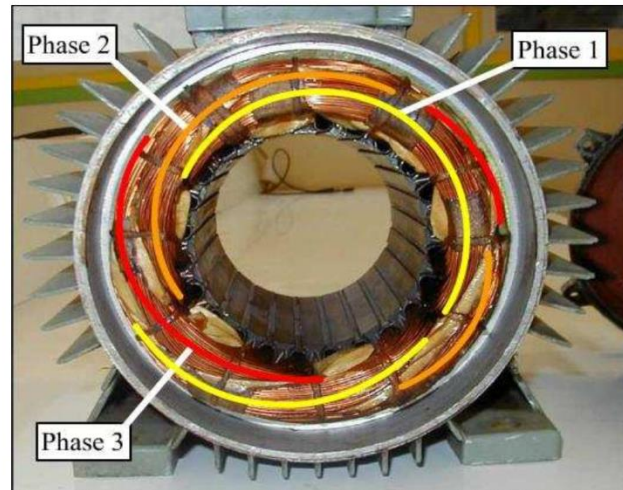
Résultat : Le champ statorique tournant avec une vitesse fait tourner le champ rotorique fixe par rapport au rotor et donc le rotor.



Le schéma ci-contre montre le principe de création d'un champ tournant à une paire de pôle (un seul champ :  $p=1$ )



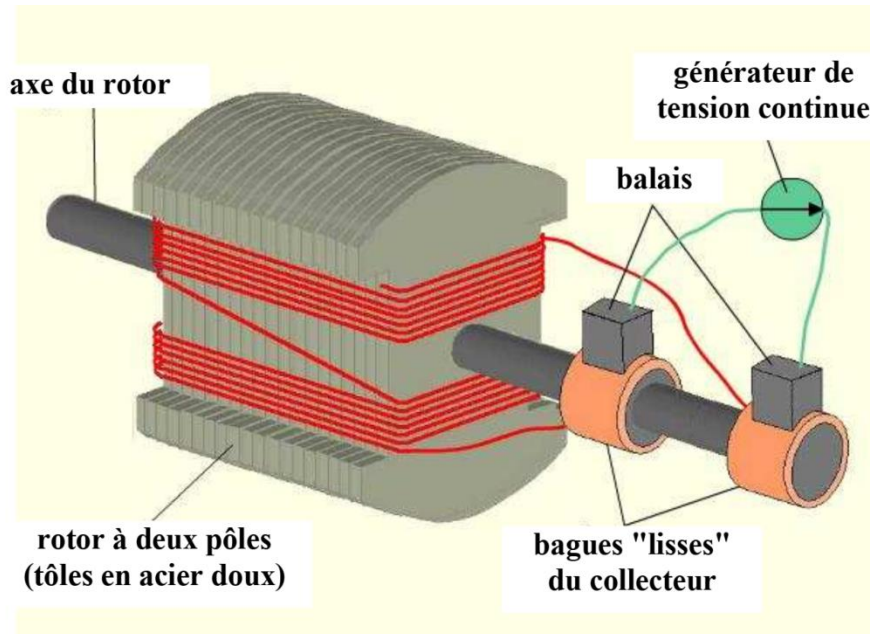
L'image ci-contre représente les bobinages d'un stator de machine synchrone triphasée à 2 pôles ( $p = 1$ )



**Figure (2.15):** Bobinages du stator d'une machine synchrone

Constitution du rotor :

Le rotor produit un champ magnétique fixe par rapport à lui-même. Il est donc composé d'aimants permanents pour des faibles puissances et d'électroaimants (bobinages) pour des puissances plus élevées (schéma ci-dessous):



**Figure (2.16):** Constitution du rotor de la machine synchrone

Fonctionnement en mode générateur:

- L'excitation du rotor en courant continu crée un champ magnétique solide au rotor.
- En tournant le rotor déjà excité son champ rotorique résultant va créer des flux magnétiques variables dans les bobines statorique fixes.

Résultat : Le passage des flux variables dans les bobines statoriques fixe crée des tensions induites dans ces dernières.

### 5.3 Machines asynchrones (à induction)

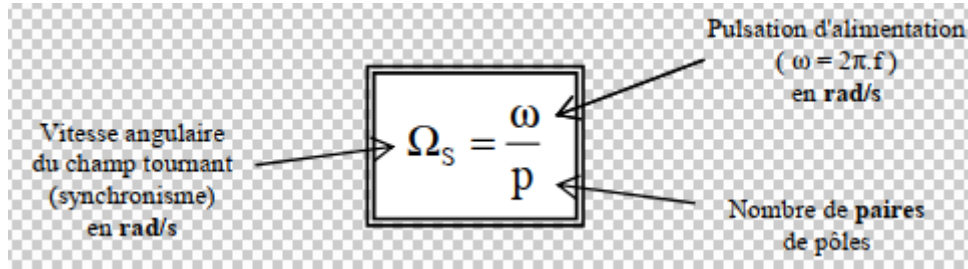
Champ magnétique tournant (stator)

Le principe de fonctionnement du moteur asynchrone repose sur la création d'un champ magnétique tournant.

Le stator sera donc identique à celui d'un moteur synchrone.

Les bobinages triphasés du stator créent un champ magnétique tournant à la vitesse  $\Omega_s$

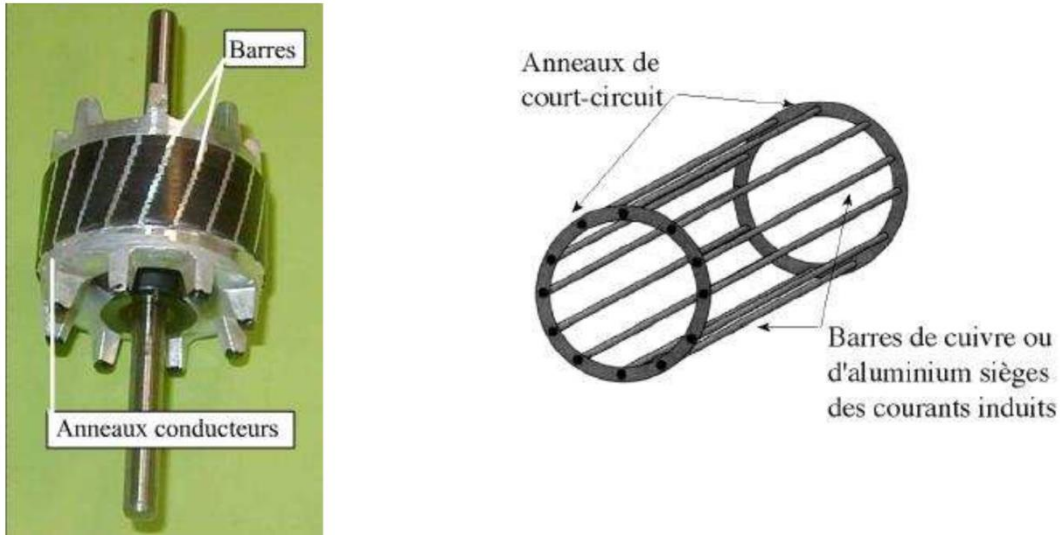
qui dépend de la pulsation d'alimentation  $\omega = 2\pi.f$ , mais aussi du nombre de paires de pôles  $p$  du stator (relation ci-dessous) :



Constitution du rotor

Le rotor n'est lié à aucune source d'alimentation. Il est constitué de bobinages en court-circuit.

Le rotor le plus utilisé est à "cage d'écureuil", il s'agit de barres de cuivre ou d'aluminium reliées aux extrémités par deux anneaux conducteurs (court-circuit). Le tout est noyé dans un empilement de tôles.



**Figure (2.17):** Constitution du rotor de la machine asynchrone

Principe de fonctionnement en moteur

Le champ tournant statorique inducteur  $\vec{BS}$ . (vitesse  $\Omega_s$ ) provoque des courants induits dans le rotor. Les courants induits du rotor créent un champ rotorique  $\vec{Br}$ . qui va interagir avec le champ statorique  $\vec{BS}$  et provoquer la rotation du rotor à une vitesse  $\Omega$  légèrement inférieure à  $\Omega_s$  (sinon pas de courant induit). On peut donc définir le glissement  $g$  :

Vitesse de synchronisme en rad/s

Vitesse du rotor en rad/s

Vitesse de synchronisme en tr/min

Vitesse du rotor en tr/min

Glissement

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Fonctionnement en générateur:

(Rotation + magnétisation ) du rotor ⇒

- ✚ Création des tensions alternatives au stator
- ✚ En régime normal, le rotor tourne à une vitesse supérieur à la vitesse du champ tournant.

**6. Les moteurs pas à pas**

Généralités

Un moteur pas à pas est une machine tournante dont le rotor se déplace d'un angle élémentaire,  $\alpha_p$  appelé pas, lors de chaque commutation du circuit de commande. La commande de moteur peut se faire en boucle ouverte car la position du rotor est connue à tous moments. On peut définir la résolution ou le nombre de pas par tour  $N_p$  :

Résolution

$$N_p = \frac{360}{\alpha_p}$$

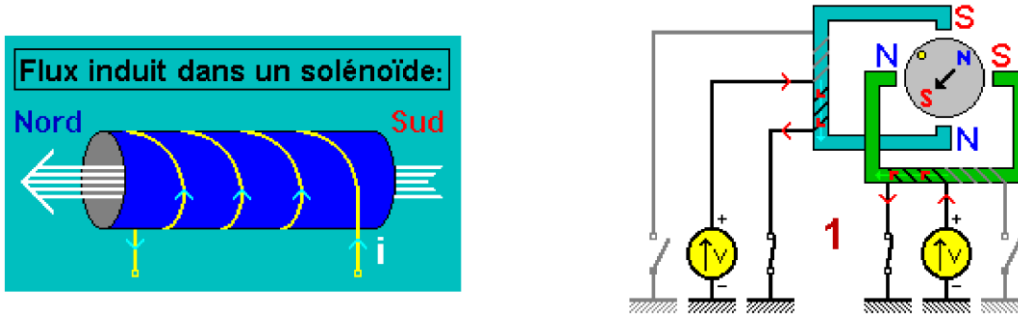
Pas en degré

- ✚ Les moteurs pas à pas comprennent un stator portant des bobines commutées en courant par une électronique de commande. Par contre, il existe trois technologies pour le rotor ce qui donne trois familles de moteur :

- moteur à aimant permanent;
- moteur à réluctance variable;
- moteur hybride.

Fonctionnement d'un moteur pas à pas 4 phases :

La circulation d'un courant électrique dans un bobinage entraîne l'apparition d'un champ magnétique, comme le détaille la figure de gauche dans le cas du solénoïde, et donc la présence de pôles Nord et Sud (deux pôles de même nature se repoussent, deux pôles Nord et Sud s'attirent) ; c'est sur ce principe de base que repose le fonctionnement de tout moteur électrique, et, de manière plus générale, de bon nombre de dispositifs électro-mécaniques : relais, compteurs, galvanomètres, certains hautparleurs ou microphones, gâches électriques de porte, etc....



**Figure (2.18):** Principe de fonctionnement du moteur pas à pas

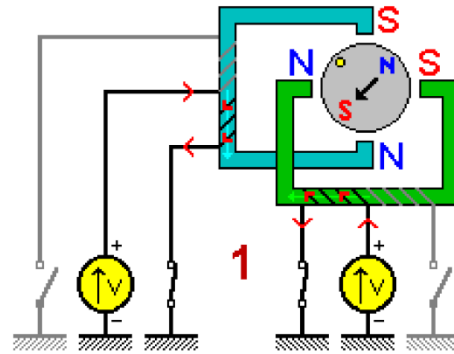
Le moteur pas à pas, représenté à droite, est constitué d'un rotor aimanté (en gris) avec deux pôles, Nord et Sud, ainsi que d'un double-stator (une partie en bleu, l'autre en vert) : à chacune de ces deux parties, est associé un bobinage avec un point milieu et deux phases ; en alimentant l'une ou l'autre des phases, on peut ainsi inverser l'aimantation au niveau du stator correspondant.

La flèche noire représente l'aiguille d'une boussole qui serait disposée en place et lieu du rotor ; elle indique l'orientation du champ magnétique (elle pointe vers le nord, qui attire donc le pôle Sud du rotor) et se décale alors d'un quart de tour à chaque étape :



**Etape 1, position 1**

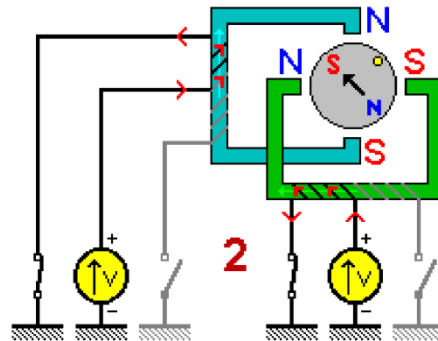
- Premier bobinage (stator bleu) :
  - Phase 1 (inter gauche) non alimentée.
  - Phase 2 (inter droit) alimentée.
- Second bobinage (stator vert) :
  - Phase 1 (inter gauche) alimentée.
  - Phase 2 (inter droit) non alimentée.



**Figure (2.19):** Moteur pas à pas (Position 1)

**Etape 2, position 2 :**

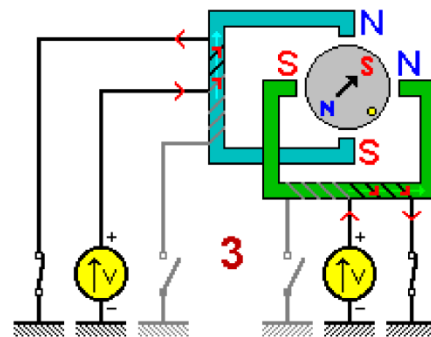
- Premier bobinage :
  - Phase 1 alimentée.
  - Phase 2 non alimentée.
- Second bobinage :
  - Phase 1 alimentée.
  - Phase 2 non alimentée.



**Figure (2.20):** Moteur pas à pas (Position 2)

**Etape 3, position 3 :**

- Premier bobinage :
  - Phase 1 alimentée.
  - Phase 2 non alimentée.
- Second bobinage :
  - Phase 1 non alimentée.
  - Phase 2 alimentée.



**Figure (2.21):** Moteur pas à pas (Position 3)

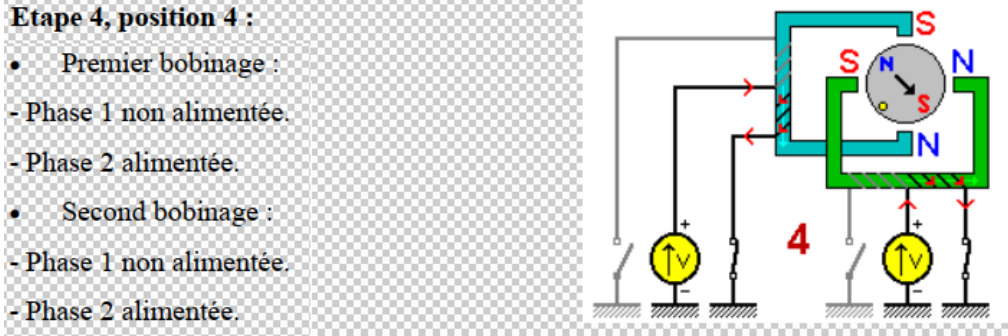


Figure (2.22): Moteur pas à pas (Position 4)

**7. Généralités sur le couplage (Machine – Charge)**

**7.1 Couplage moteur-charge**

Le couplage d'une charge à un moteur doit respecter deux règles principales :

- Le moteur doit être capable de démarrer avec sa charge.
- Après démarrage la vitesse et le couple doivent se stabiliser à des valeurs admissibles par le moteur et la charge (point de fonctionnement).

Prenons l'exemple d'un moteur asynchrone avec successivement plusieurs charges :

a) Charge de type "traction" à couple constant

1° cas : démarrage impossible

Dans le cas illustré ci-dessous, le démarrage est impossible car à **vitesse nulle (n=0)**, la charge demande un couple de démarrage  $TD_{charge} = 30N.m$  **supérieur** au couple de démarrage moteur  $TD_{moteur} = 16N.m$ .

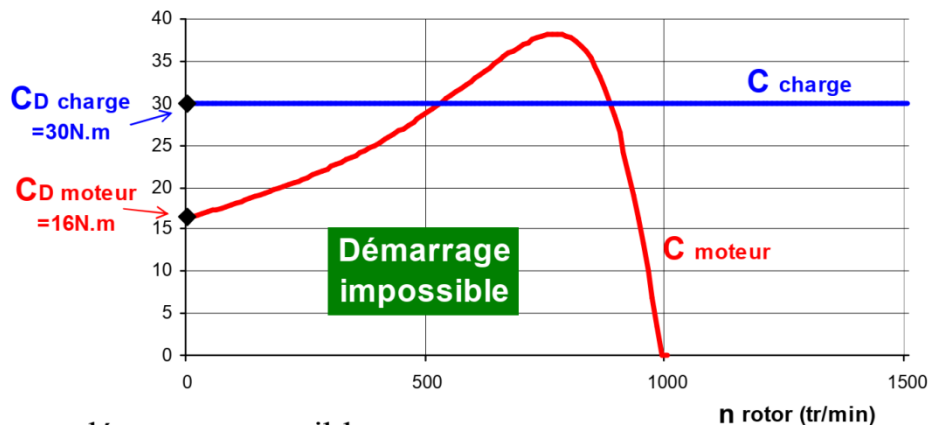


Figure (2.23): Démarrage impossible .(MAS-Charge à couple constant)

2° cas : démarrage possible

Dans le cas illustré ci-dessous, le démarrage est possible car à **vitesse nulle (n=0)**, la charge demande un couple de démarrage  $T_{D\text{ charge}} = 10\text{N.m}$  **inférieur** au couple de démarrage moteur  $T_{D\text{ moteur}} = 16\text{N.m}$ .

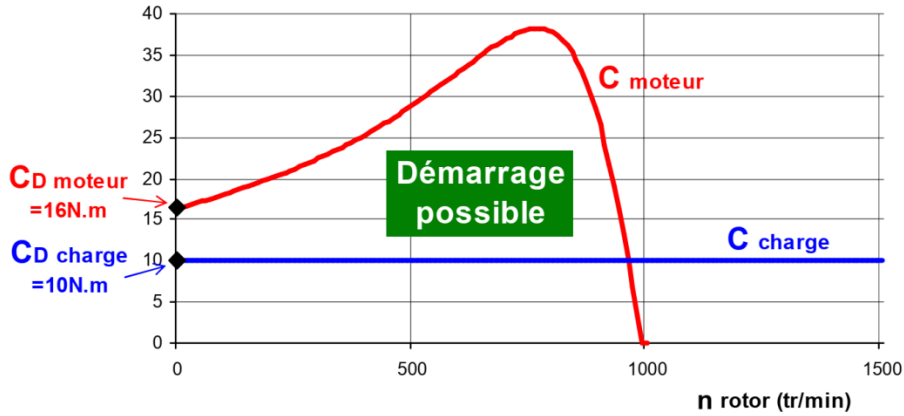


Figure (2.24): Démarrage possible .(MAS-Charge à couple constant)

b) Charge de type "ventilateur"

1<sup>er</sup> cas : point de fonctionnement non compatible avec le moteur

Après démarrage, la vitesse augmente et se stabilise à  $n = 410\text{ tr/min}$ . Le moteur ne fonctionne bien qu'entre 900 et 1000 tr/min. Le moteur n'est donc pas adapté à la charge.

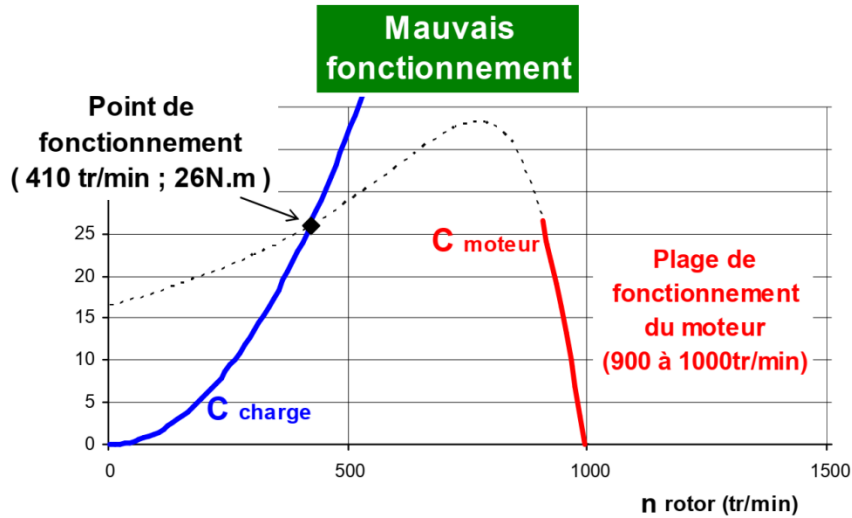


Figure (2.25): Mauvais fonctionnement (MAS-Charge de type ventilateur)

2<sup>ème</sup> cas : point de fonctionnement compatible avec le moteur

Après démarrage, la vitesse augmente et se stabilise à  $n = 940$  tr/min. Le moteur ne fonctionne bien qu'entre 900 et 1000 tr/min. Le moteur est donc adapté à la charge.

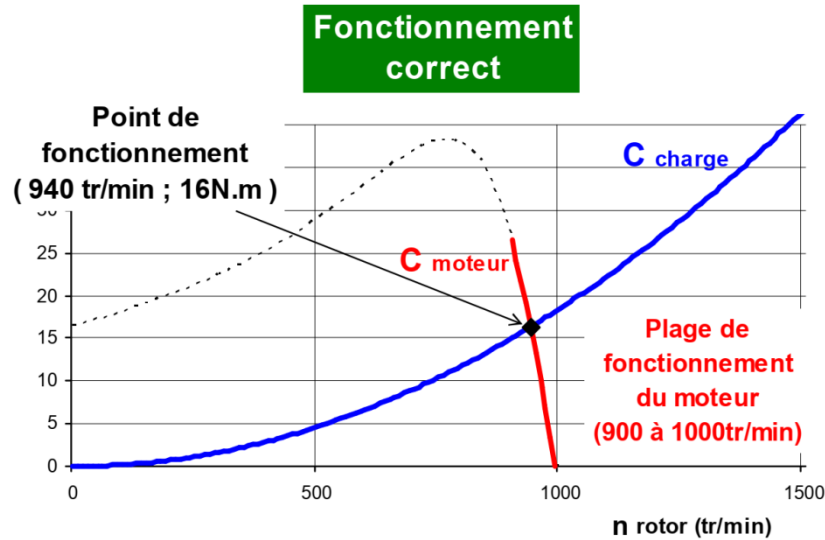


Figure (2.26): Fonctionnement compatible (MAS-Charge de type ventilateur)

### 7.2 Caractéristique "quatre quadrants"

Une machine électrique peut fonctionner en moteur ou en génératrice avec les deux sens possibles de rotation. La courbe "vitesse fonction du couple" est inscrite sur un graphe à quatre zones. Prenons l'exemple de la machine à courant continu qui peut fonctionner en moteur ou en génératrice:

Par exemple lors d'un déplacement horizontal (cas d'un train), la machine fonctionne :

- à l'aller, en **moteur** dans le **quadrant 1** avec  $P > 0$
- au retour, toujours en **moteur** dans le **quadrant 3** avec  $P > 0$ ,
- entre ces deux cas, le **freinage** ( $P < 0$ ) jusqu'à l'arrêt s'effectue dans le **quadrant 2** pour l'aller et dans le **quadrant 4** pour le retour.

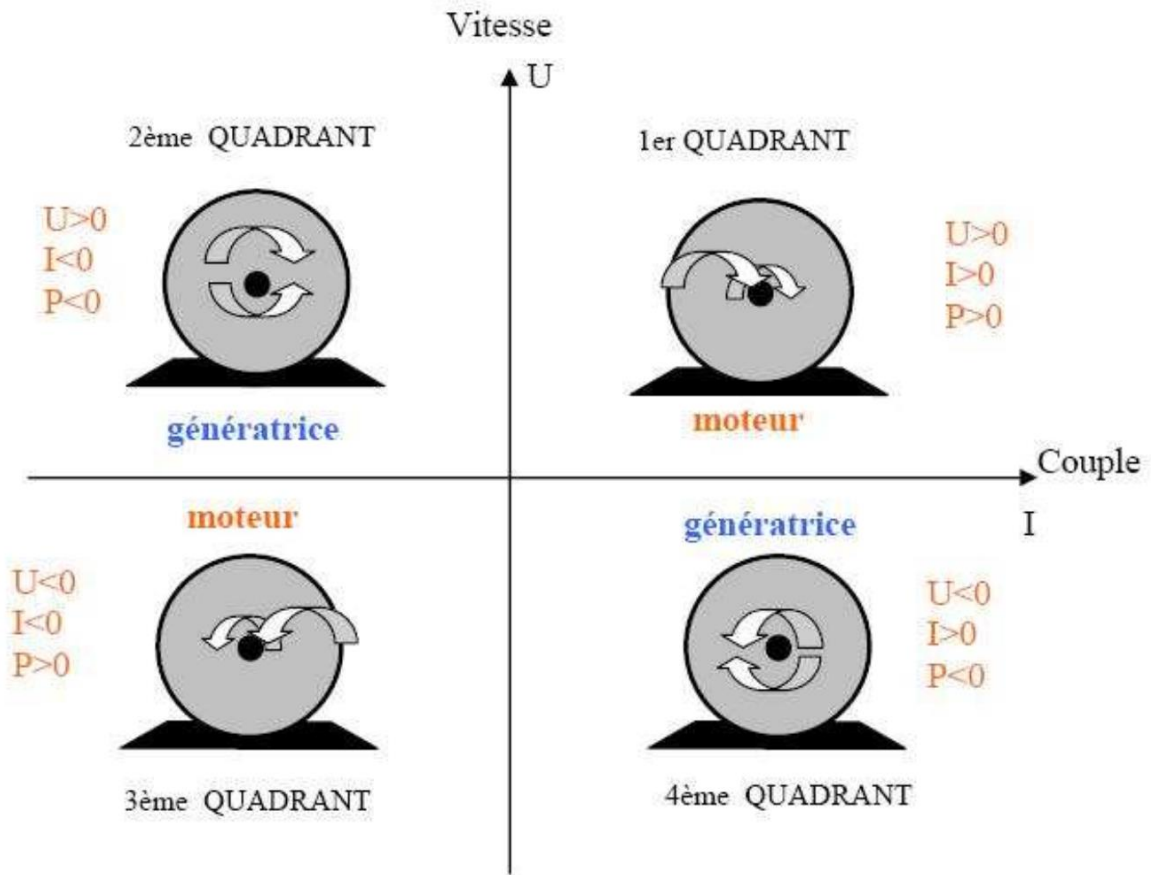


Figure (2.27): Caractéristique "quatre quadrants"