

# **S8 – CONSTRUCTION ELECTRIQUE**

## **Le moteur à courant continu**

*S841 : Normes et conventions*

*S871 : Technologie et utilisation des moteurs*

*S872: Classification des moteurs en fonction de leur utilisation*

#### 1) Principe de fonctionnement

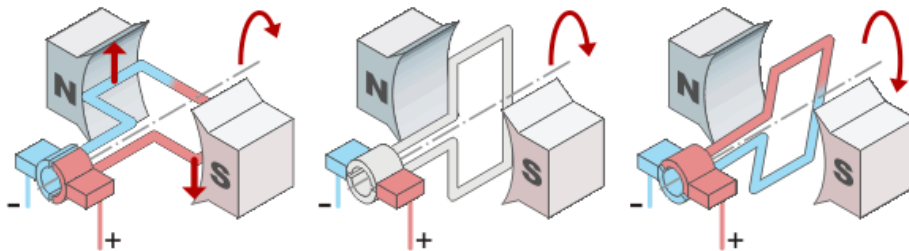
Le moteur à courant continu se compose :

- de l'inducteur ou du stator,
- de l'induit ou du rotor,
- du collecteur et des balais.

Lorsque le bobinage d'un inducteur de moteur est alimenté par un courant continu, sur le même principe qu'un moteur à aimant permanent (comme la figure ci-dessous), il crée un champ magnétique (flux d'excitation) de direction Nord-Sud.

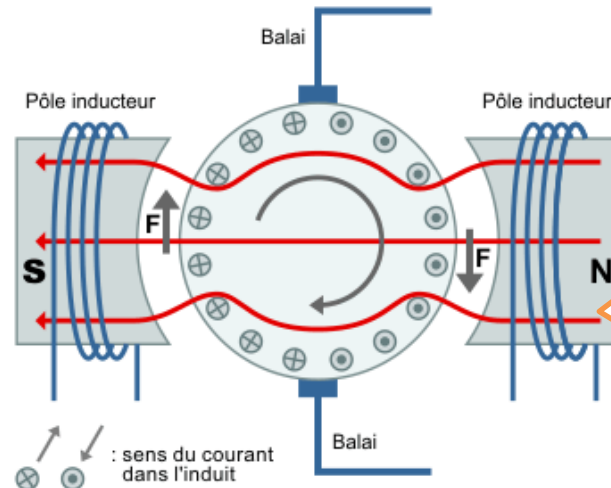
Une spire capable de tourner sur un axe de rotation est placée dans le champ magnétique. De plus, les deux conducteurs formant la spire sont chacun raccordés électriquement à un demi collecteur et alimentés en courant continu via deux balais frotteurs.

D'après la loi de Laplace (tout conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force), les conducteurs de l'induit placés de part et d'autre de l'axe des balais (ligne neutre) sont soumis à des forces  $F$  égales mais de sens opposé en créant un couple moteur : l'induit se met à tourner !



Si le système balais-collecteurs n'était pas présent (simple spire alimentée en courant continu), la spire s'arrêterait de tourner en position verticale sur un axe appelé communément "ligne neutre". Le système balais-collecteurs a pour rôle de faire commuter le sens du courant dans les deux conducteurs au passage de la ligne neutre.

Le courant étant inversé, les forces motrices sur les conducteurs le sont aussi permettant ainsi de poursuivre la rotation de la spire.



Lignes de champ magnétique générées :

- Soit par un aimant permanent.
- Soit par l'alimentation électrique d'un bobinage de l'inducteur

Dans la pratique, la spire est remplacée par un induit (rotor) de conception très complexe sur lequel sont montés des enroulements (composés d'un grand nombre de spires) raccordés à un collecteur "calé" en bout d'arbre.

Dans cette configuration, l'induit peut être considéré comme un seul et même enroulement semblable à une spire unique.

### Avantages :

- accompagné d'un variateur de vitesse électronique, il possède une large plage de variation (1 à 100 % de la plage),
- régulation précise du couple,
- son indépendance par rapport à la fréquence du réseau fait de lui un moteur à large champ d'application,
- ...

### Inconvénients :

- peu robuste par rapport à la machine asynchrone,
- investissement important et maintenance coûteuse (entretien du collecteur et des balais),
- ...

Réversibilité

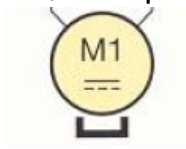
Exemple de machine réversible :

Dans le régime de fonctionnement des ascenseurs à traction, le treuil à courant continu peut :

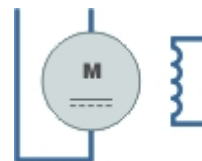
- Tantôt fonctionner en moteur lorsque le système cabine et contre-poids s'oppose au mouvement de rotation (charge dite "résistante"); le moteur prend de l'énergie au réseau.
- Tantôt travailler en générateur lorsque le même système tend à favoriser la rotation (charge dite "entraînante"); le générateur renvoie de l'énergie au réseau.

2) Différents types de moteurs à courant continu

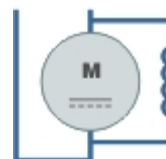
On peut trouver des moteurs à aimants permanent, donc pas de bobinage du stator (de l'inducteur), seul le rotor (l'induit) est bobiné :



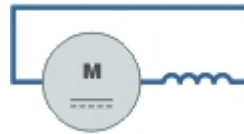
Suivant l'application, les bobinages du l'inducteur et de l'induit peuvent être connectés de manière différente. On retrouve en général :



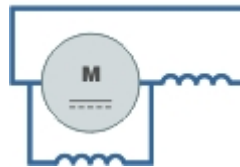
Des moteurs à excitation parallèle :



Des moteurs à excitation série :



Des moteurs à excitation composée :



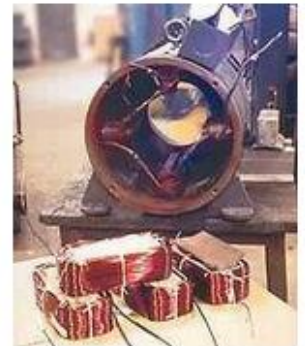
L'inversion du sens de rotation du moteur s'obtient en inversant soit les connections de l'inducteur soit de l'induit.

### 3) Technologie utilisée

#### L'inducteur

L'inducteur d'un moteur à courant continu est la partie statique du moteur. Il se compose principalement :

- de la carcasse,
- des paliers,
- des flasques de palier,
- des portes balais.



*Inducteur.*

Le cœur même du moteur comprend essentiellement (lorsque l'inducteur est bobiné):

- Un ensemble de paires de pôles constitué d'un empilement de tôles ferromagnétiques.
- Les enroulements (ou bobinage en cuivre) destinés à créer le champ ou les champs magnétiques suivant le nombre de paires de pôles.

Pour des moteurs d'une certaine puissance, le nombre de paires de pôles est multiplié afin de mieux utiliser la matière, de diminuer les dimensions d'encombrement et d'optimiser la pénétration du flux magnétique dans l'induit.

### L'induit

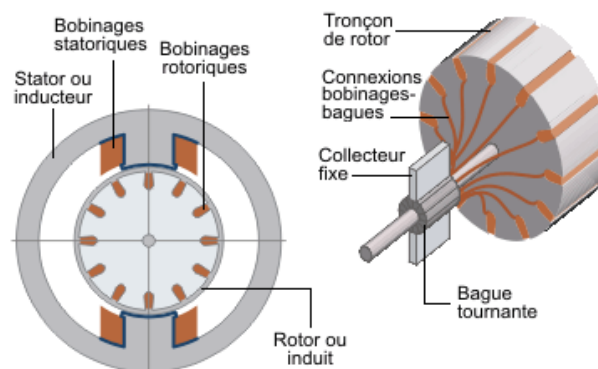
L'induit du moteur à courant continu est composé d'un arbre sur lequel est empilé un ensemble de disques ferro-magnétiques.

Des encoches sont axialement pratiquées à la périphérie du cylindre formé par les disques empilés. Dans ces encoches les enroulements (bobines de l'induit) sont "bobinés" selon un schéma très précis et complexe qui nécessite une main d'œuvre particulière (coûts importants). Pour cette raison, on préfère, en général, s'orienter vers des moteurs à courant alternatif plus robuste et simple dans leur conception.



*Induit.*

Chaque enroulement est composé d'une série de sections, elles même composées de spires; une spire étant une boucle ouverte dont l'aller est placé dans une encoche de l'induit et le retour dans l'encoche diamétralement opposée. Pour que l'enroulement soit parcouru par un courant, ses conducteurs de départ et de retour sont connectés aux lames du collecteur (cylindre calé sur l'arbre et composé en périphérie d'une succession de lames de cuivre espacée par un isolant).



*Composition de l'induit.*

L'interface entre l'alimentation à courant continu et le collecteur de l'induit est assurée par les balais et les porte-balais.

Les balais

Les balais assurent le passage du courant électrique entre l'alimentation et les bobinages de l'induit sous forme d'un contact par frottement. Les balais sont en graphite et constituent, en quelques sortes, la pièce d'usure. Le graphite en s'usant libère une poussière qui rend le moteur à courant continu sensible à un entretien correct et donc coûteux.



*L'ensemble balais, porte-balais et collecteur.*

Le point de contact entre les balais et le collecteur constitue le point faible du moteur à courant continu. En effet, c'est à cet endroit, qu'outre le problème d'usure du graphite, la commutation (inversion du sens du courant dans l'enroulement) s'opère en créant des micros-arcs (étincelles) entre les lamelles du collecteur, un des grands risques de dégradation des collecteurs étant leur mise en court-circuit par usure.

4) Caractéristiques du moteur à courant continu

Lorsque l'induit est alimenté sous une tension continue ou redressée  $U$ , il se produit une force contre-électromotrice  $E$ .

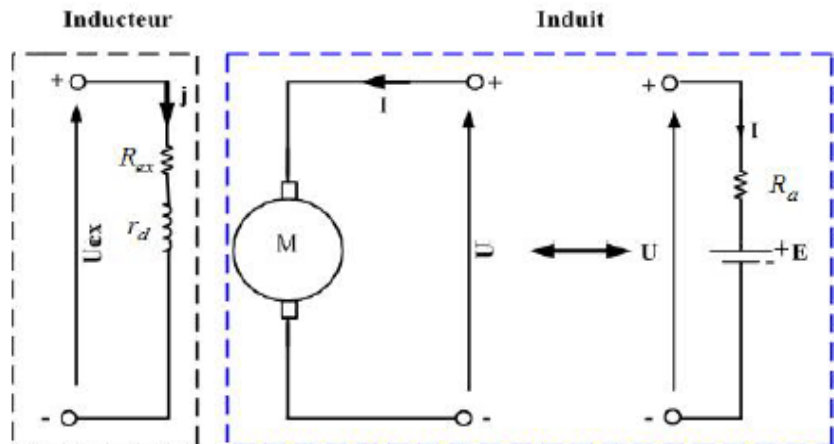
On a:

$$E = U - R_a \cdot I \text{ [volts]}$$

Où,

$R_a$  = la résistance de l'induit [ohm].

$I$  = le courant dans l'induit [ampère].



La force contre-électromotrice  $E$  est liée à la vitesse et à l'excitation du moteur.

On a :  $E = k \cdot \Phi \cdot \Omega$  [volt]

Où,

- $k$  = constante sans dimension, propre au moteur (dépendant du nombre de conducteurs de l'induit).
- $\Omega$  = la vitesse angulaire de l'induit [rad/s].
- $\Phi$  = le flux de l'inducteur [weber] qui dépend du champ magnétique  $B$  et de la surface  $S$  qu'il traverse, l'unité [weber] = [Tesla.m<sup>2</sup>], car :

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Lorsque l'inducteur (qui génère le champ magnétique) est bobiné :

$$U_{ex} = R_{ex} \cdot j \text{ pour une tension d'alimentation } U_{ex} \text{ continue, et } j = k' \cdot \Phi$$

( $j$  est l'intensité électrique qui passe dans le bobinage de l'inducteur).

En analysant la relation ci-dessus, on voit, qu'à excitation constante  $\Phi$ , la force contre-électromotrice  $E$  est proportionnelle à la vitesse de rotation.



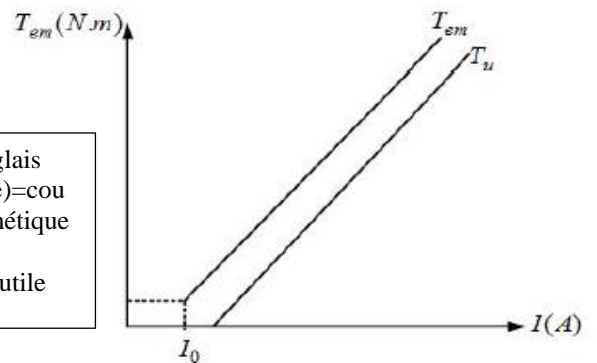
Quant au couple moteur, il est lié au flux inducteur et au courant de l'induit par la relation suivante.

Expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = k \cdot \Phi \cdot I \quad [\text{N.m}]$$

$C_{em} = T_{em}$  (en anglais  
Torque=Couple)=couple électromagnétique

$C_u = T_u$  = Couple utile



Où,

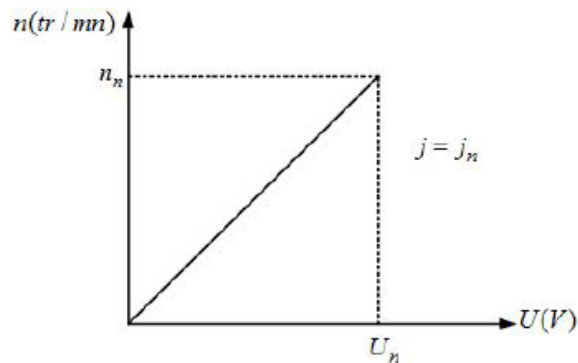
- $k$  = constante sans dimension propre au moteur (dépendant du nombre de conducteurs de l'induit).
- $\Phi$  = le flux de l'inducteur [weber].
- $I$  = le courant dans l'induit [ampère].

En analysant la relation ci-dessus, on voit qu'en réduisant le flux, le couple diminue.

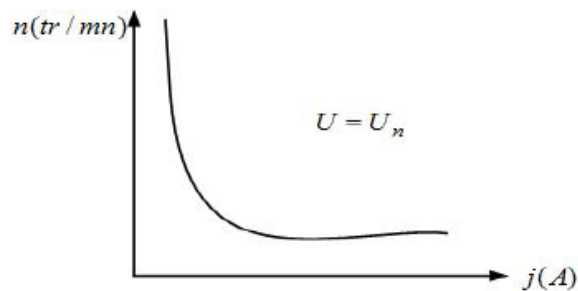
### Variation de la vitesse

Au vu des relations existant entre la vitesse, le flux et la force contre-électromotrice, il est possible de faire varier la vitesse du moteur de deux manières différentes. On peut :

- Augmenter la force contre-électromotrice  $E$  en augmentant la tension aux bornes de l'induit tout en maintenant le flux de l'inducteur constant. On a un fonctionnement dit à "couple constant".
- Diminuer le flux de l'inducteur (flux d'excitation) par une réduction du courant d'excitation en maintenant la tension d'alimentation de l'induit constante. Ce type de fonctionnement impose une réduction du couple lorsque la vitesse augmente.



-Par variation de courant d'excitation  $j$



5) Fonctionnement du moteur à courant continu

5-1) Fonctionnement à vide

Le moteur n'entraîne aucune charge mécanique. Le courant absorbé à vide est  $I_0$ .

La force électromotrice vaudra donc :

$$E = U - R_a \cdot I_0 = k \cdot \Omega_0 \cdot \Phi_0$$

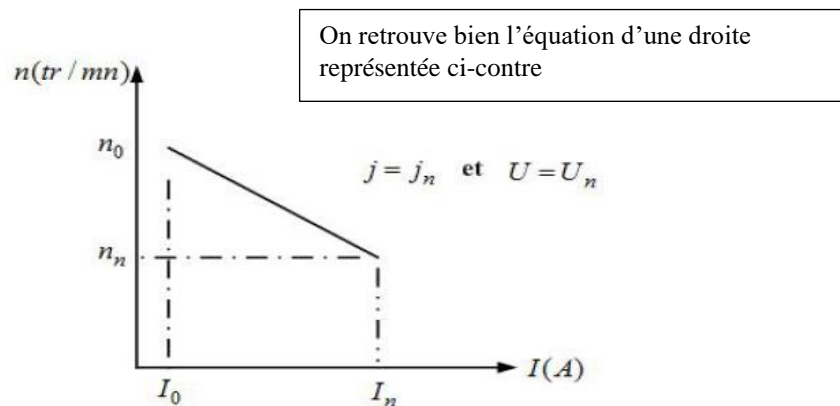
$$\text{et } \Omega_0 = (U - R_a \cdot I_0) / (k \cdot \Phi_0) \approx U / (k \cdot \Phi_0) \quad \text{car } I_0 \text{ est très faible}$$

5-2) Fonctionnement en charge

Dans ce cas, la tension d'alimentation de l'induit et le courant d'excitation sont réglés à leurs valeurs nominales.

Si on a le même flux qu'à vide :  $\Phi = \Phi_0$  (pour un même courant d'excitation de l'induit  $j_n$ )

$$\Omega = (U - R_a \cdot I) / (k \cdot \Phi_0) = U / (k \cdot \Phi_0) \cdot (1 - R_a \cdot I / U) = \Omega_0 \cdot (1 - R_a \cdot I / U)$$

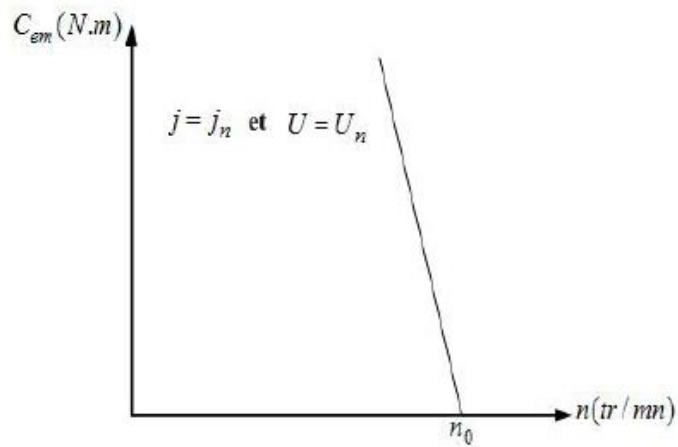


Pour l'évolution du couple en fonction de la vitesse de rotation, on a :

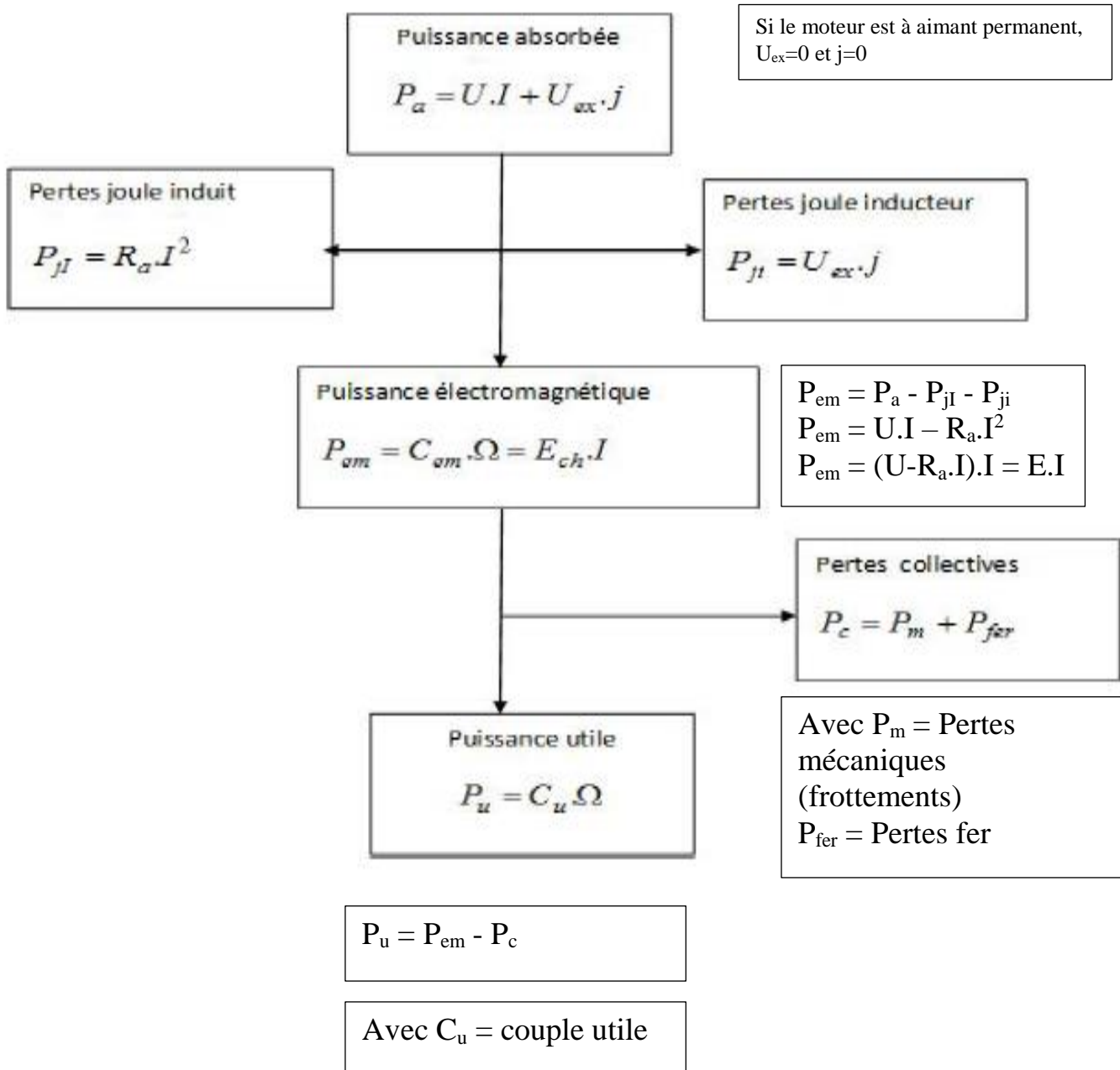
$$C = k \cdot \Phi \cdot I = k \cdot \Phi \cdot (U - E) / R_a = k \cdot \Phi \cdot (U - k \cdot \Omega \cdot \Phi) / R_a$$

$$\text{Et } C = -(k \cdot \Phi)^2 / R_a \cdot \Omega + k \cdot \Phi \cdot U / R_a \quad \text{équation d'une droite de forme } C = -a \cdot \Omega + b$$

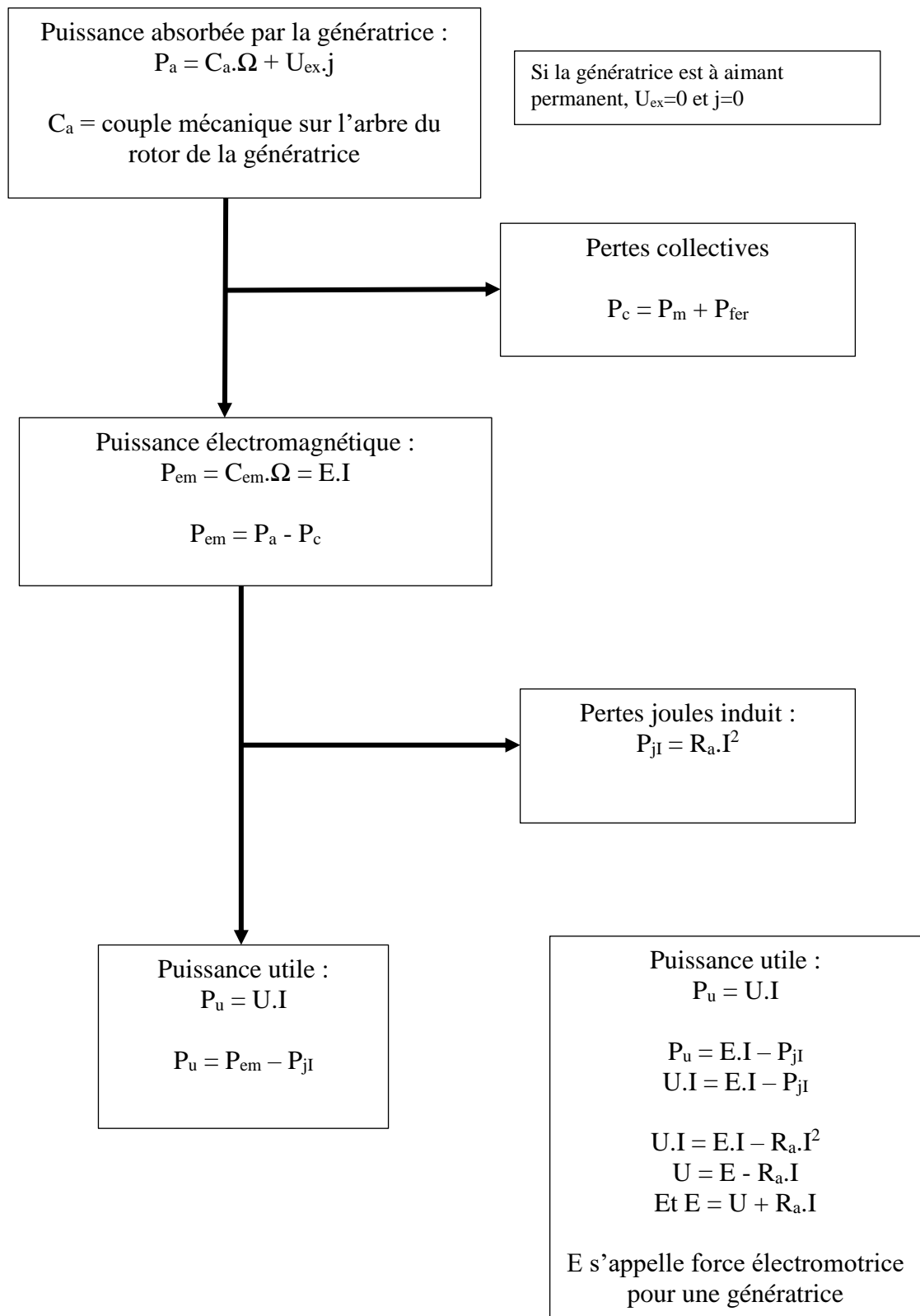
La caractéristique est donc une droite de pente fortement négative compte tenu de la faible valeur de la résistance de l'induit :



6) Bilan des puissances pour un moteur à courant continu



7) Cas d'une génératrice à courant continu



8) **Exercices d'application**

**Exercice 1 :**

Un moteur de puissance utile 3 kW tourne à 1500 tr/min.  
Calculer le couple utile en Nm.

**Exercice 2 :**

La force contre électromotrice ( $f_{cem}$ ) d'un moteur à courant continu, à excitation indépendante est de 210 V à 1500 tr/min.  
Calculer la  $f_{cem}$  pour une fréquence de rotation de 1000 tr/min, le flux étant constant.

**Exercice 3 :**

1. Un moteur à excitation indépendante alimenté sous 220 V possède une résistance d'induit de  $0,8 \Omega$ .  
A la charge nominale, l'induit consomme un courant de 15 A. Calculer la f.c.e.m. E du moteur.
2. La machine est maintenant utilisée en génératrice (dynamo).  
Elle débite un courant de 10 A sous 220 V. En déduire la f.e.m.

**Exercice 4 :**

Une génératrice à excitation indépendante fournit une fem de 220 V pour un courant d'excitation de 3,5 A. La résistance de l'induit est de  $90 \text{ m}\Omega$ .  
Calculer la tension d'induit U lorsqu'elle débite 56 A dans le circuit de charge.