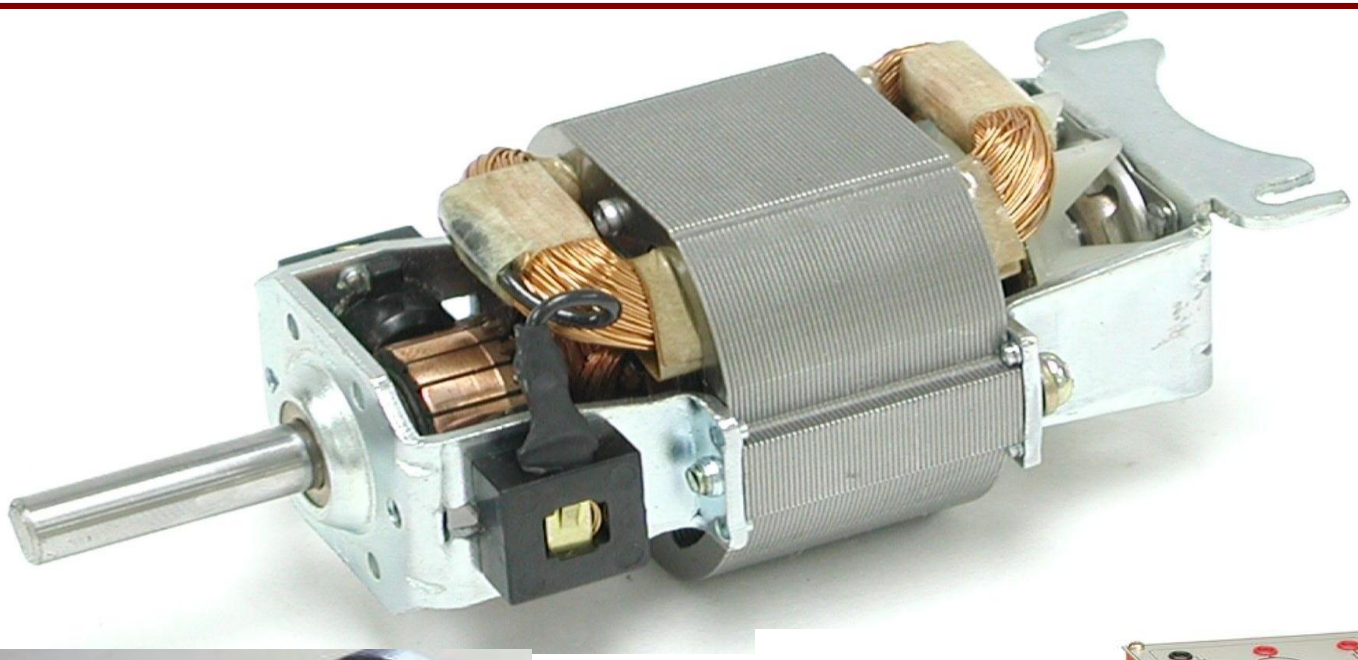
CRMEF Casa-Settat
Agrégation: SII-IM
Module: Ingénierie électrique
2020/2021

ELECTROTECHNIQUE

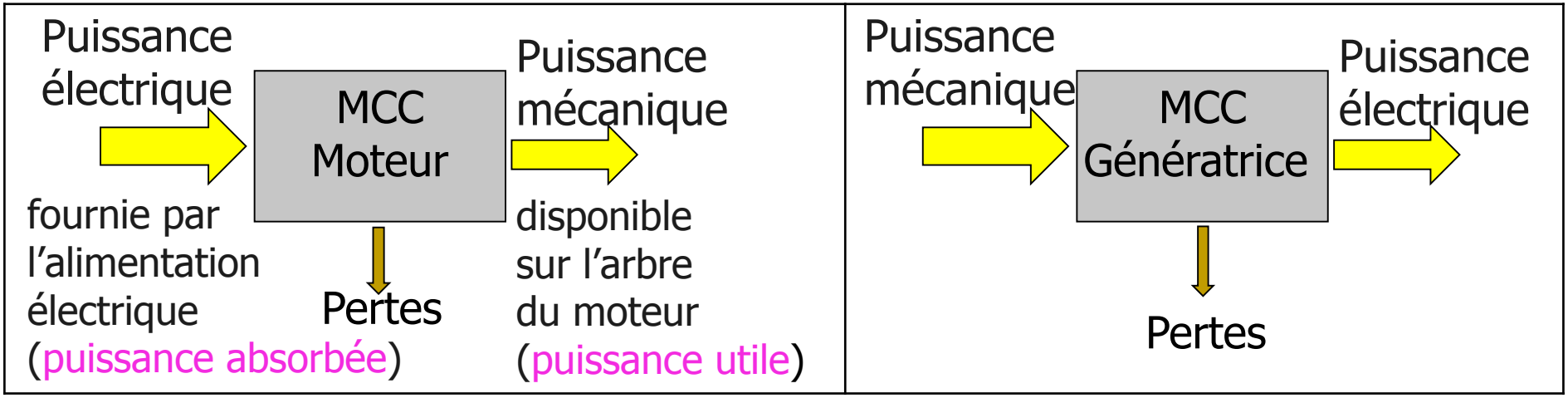
M'hammed GUISSER

Chapitre 3 : Machine à courant continu (MCC)



Introduction

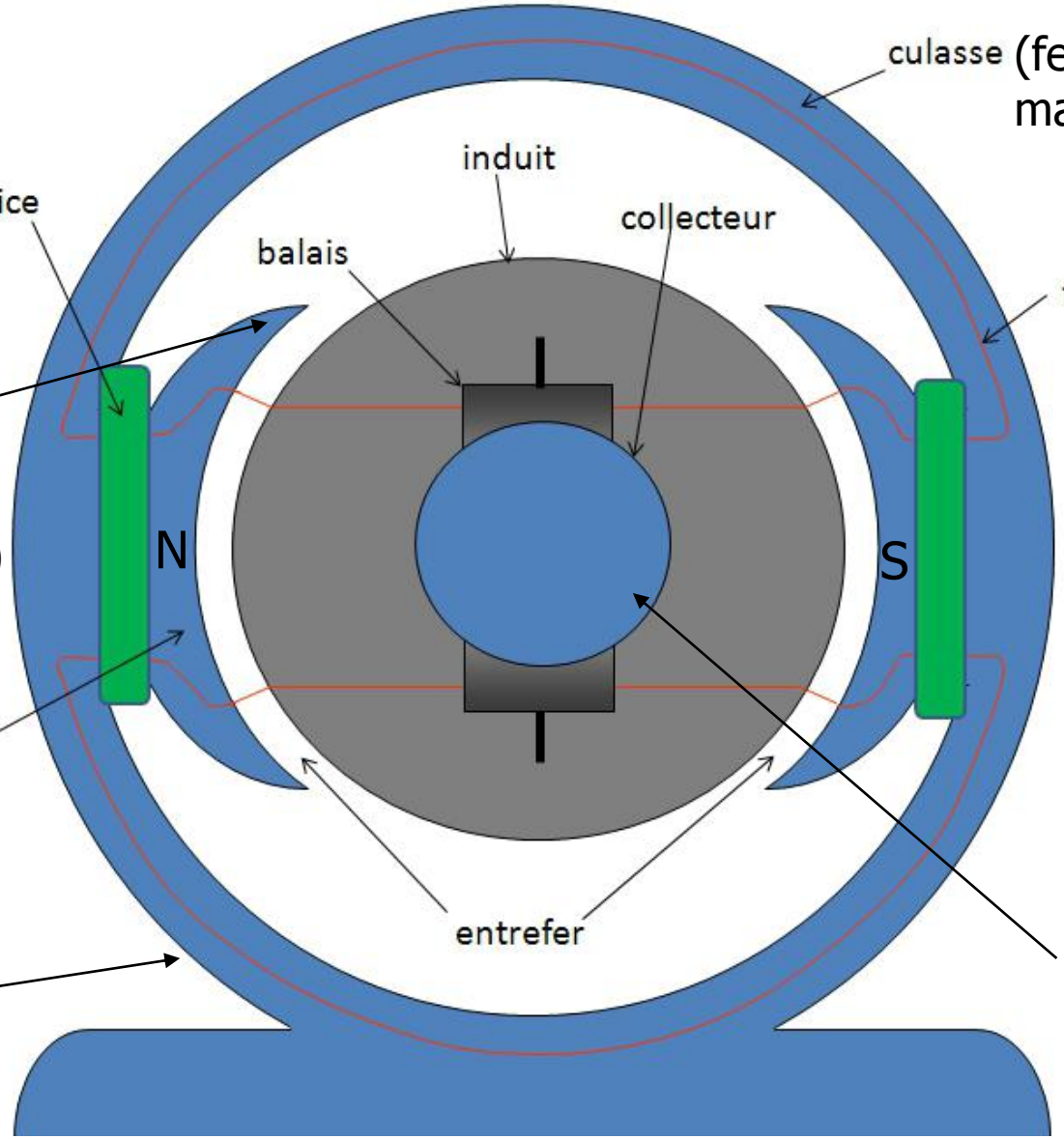
- Une machine à courant continu est un convertisseur d'énergie électromécanique réversible. En fonctionnement moteur, elle permet de produire de l'énergie mécanique à partir d'énergie électrique ; en fonctionnement génératrice c'est l'inverse:



Les moteurs à courant continu restent très utilisés:

- Dans le cas de faibles puissances: industrie automobile (essuie-glace, ventilateurs, lève-vitre, démarreur, etc.), la robotique, ainsi dans l'électroménager et l'outillage.
- Dans le cas de moyennes puissance: engin de levage (treuils, grues, etc.)
- Dans le cas de grandes puissances: traction électrique (train).

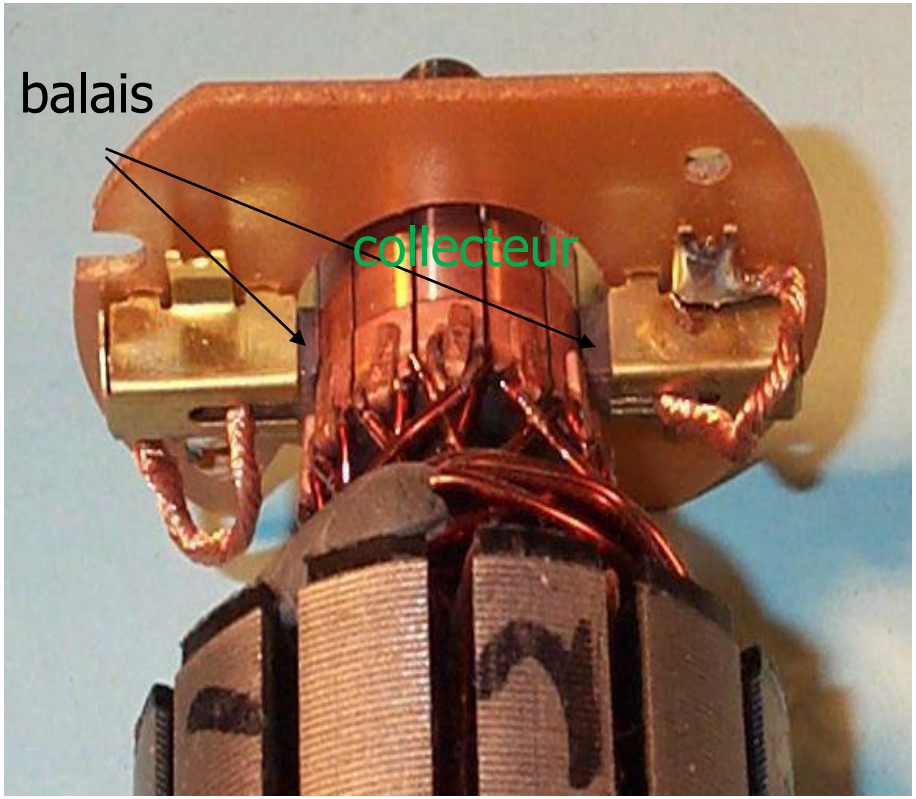
1. Constituant:

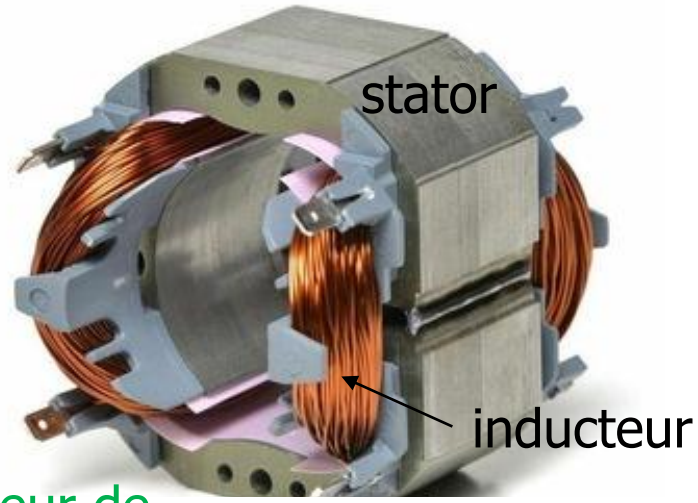


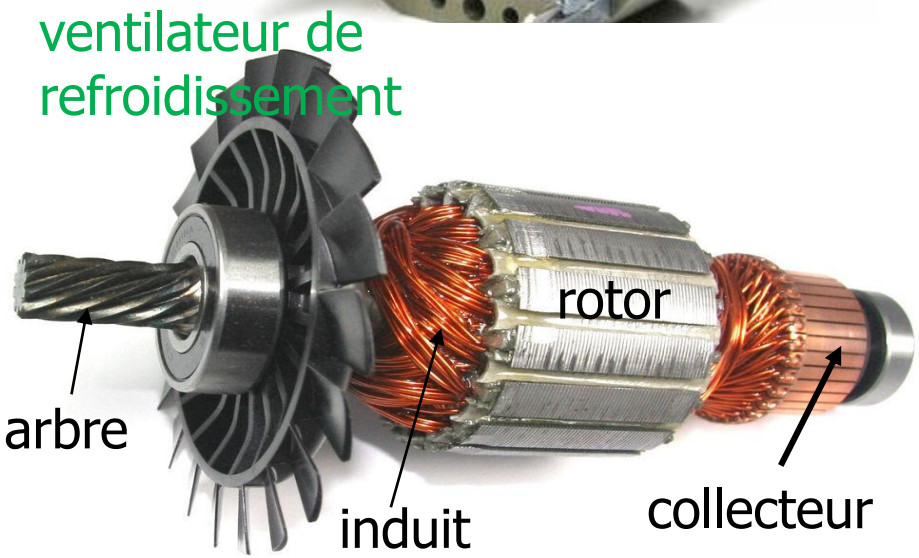
Machine à courant continu

Une machine à courant continu comprend quatre parties principales :

- Le stator (inducteur) ;
- Le rotor (induit) ;
- Le collecteur ;
- Les balais également appelés charbons.







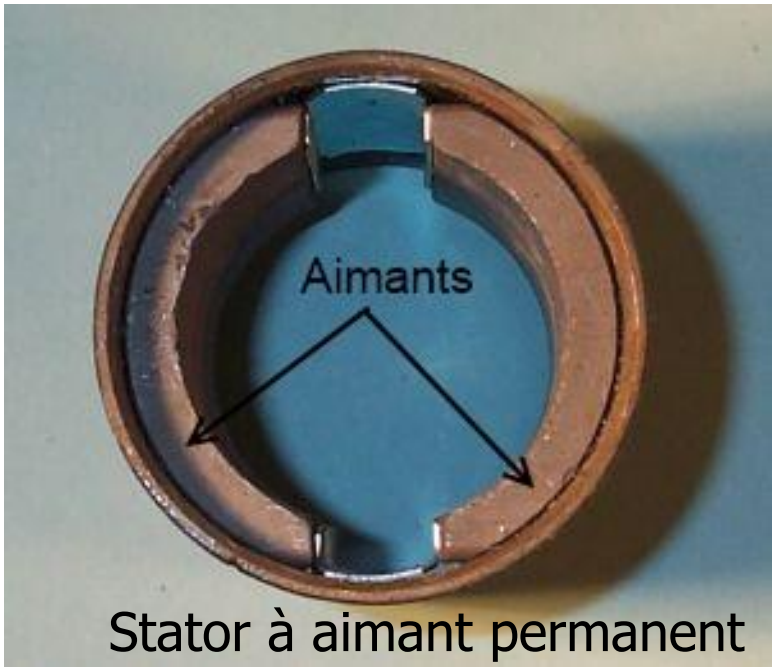
Machine à courant continu

❑ Le stator

Le stator est la partie fixe: constitué d'un circuit magnétique portant l'enroulement d'excitation parcouru par un courant continu (ou des aimants permanents), dont le rôle est de créer un flux magnétique dans l'entrefer.

Stator à enroulement et pièces polaires

- La variation de l'excitation peut rendre possible la variation de la vitesse de la machine



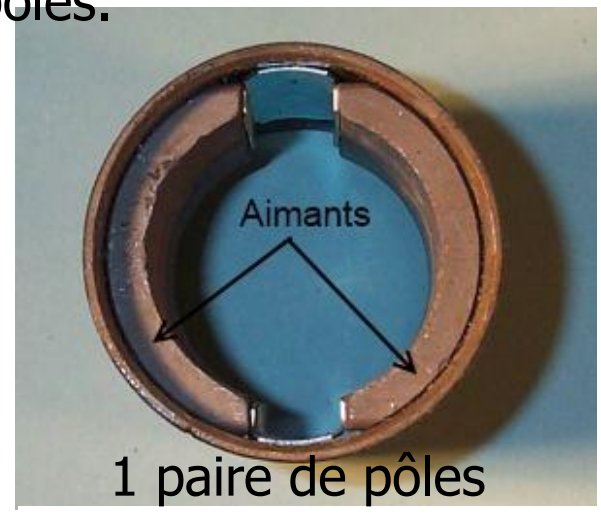
Stator à aimant permanent

- Avantages: Pertes joules supprimées;
- Inconvénients: en industrie, le coût de l'aimant limite son utilisation;
- Limites: le champ magnétique est fixe; impossibilité d'exploiter sa variation.

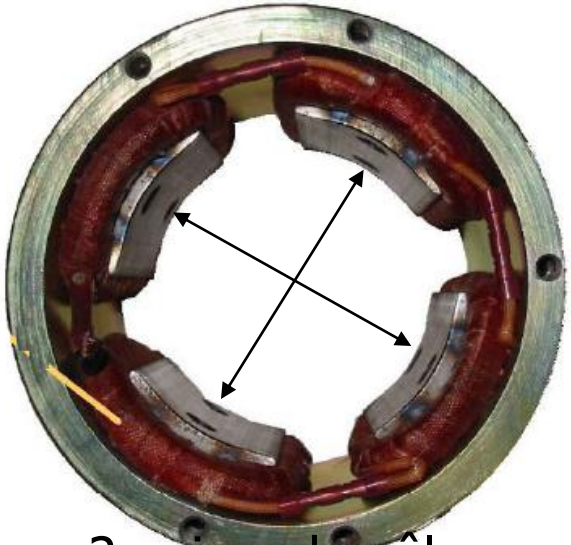
Machine à courant continu

Dans une machine à courant continu, le stator est constitué de plusieurs paires de pôles magnétiques. Plus une machine est puissante et plus sa vitesse est basse, plus grand sera le nombre de pôles.

1 paire de pôles



1 paire de pôles



2 paires de pôles

l'inducteur comporte un nombre de paire de pôles, successivement Nord, Sud,...

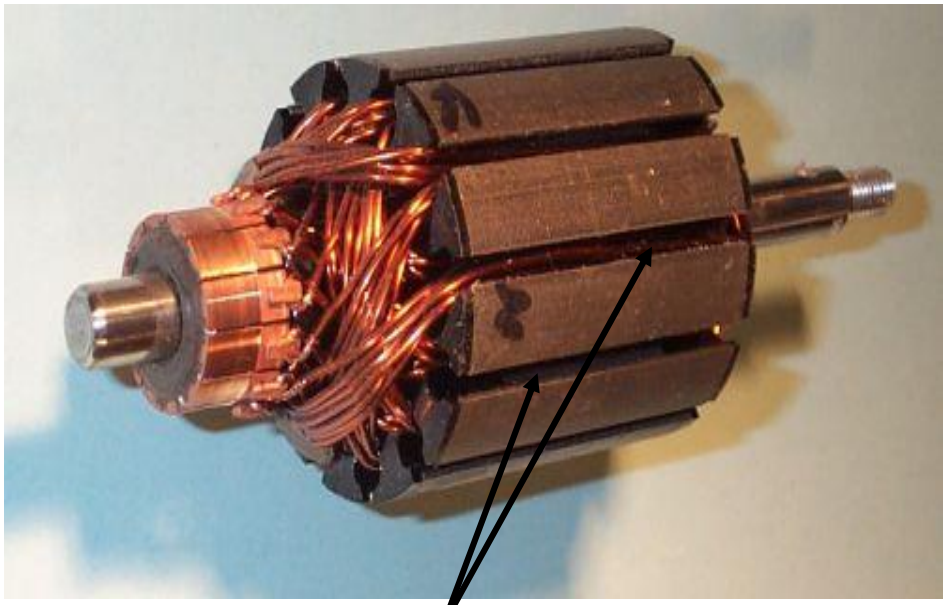
Lignes de champ magnétique

2 paires de pôles

Machine à courant continu

❑ Le rotor:

Le rotor est la partie tournante: formé d'un empilage de tôles magnétiques, comprenant un certain nombre d'encoches, sur lesquelles sont placés un certain nombre de bobinages. Les conducteurs de l'induit sont parcourus par le courant continu absorbé (moteur) ou débité (génératrice) par la machine.

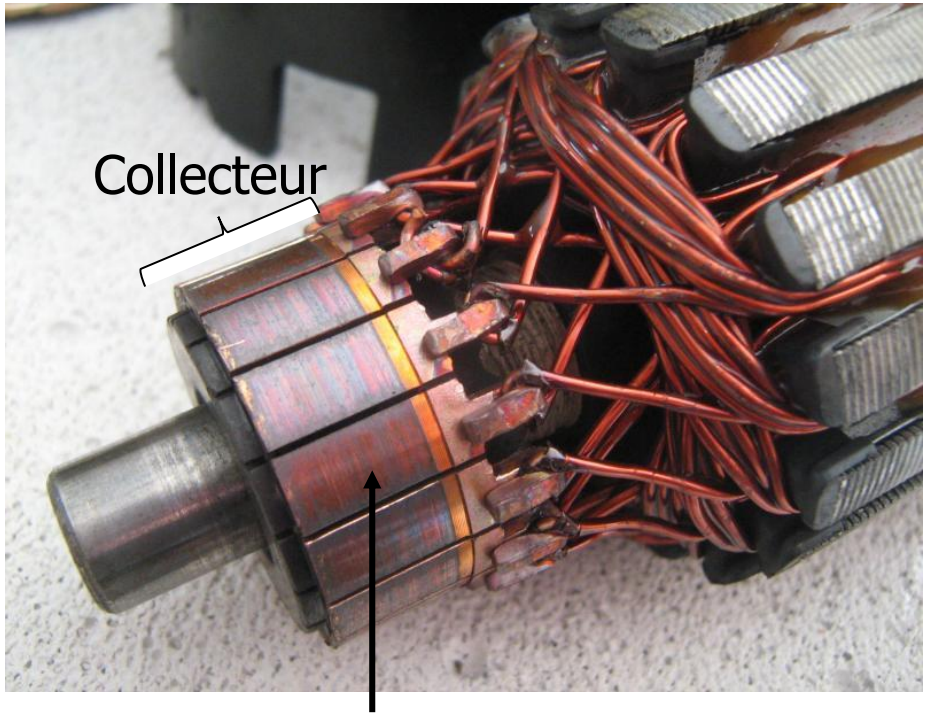


Encoches pour logement des conducteurs dits actifs (parallèle à l'arbre)

Mise en place des conducteurs d'induit dans les encoches et soudure de ceux-ci sur le collecteur

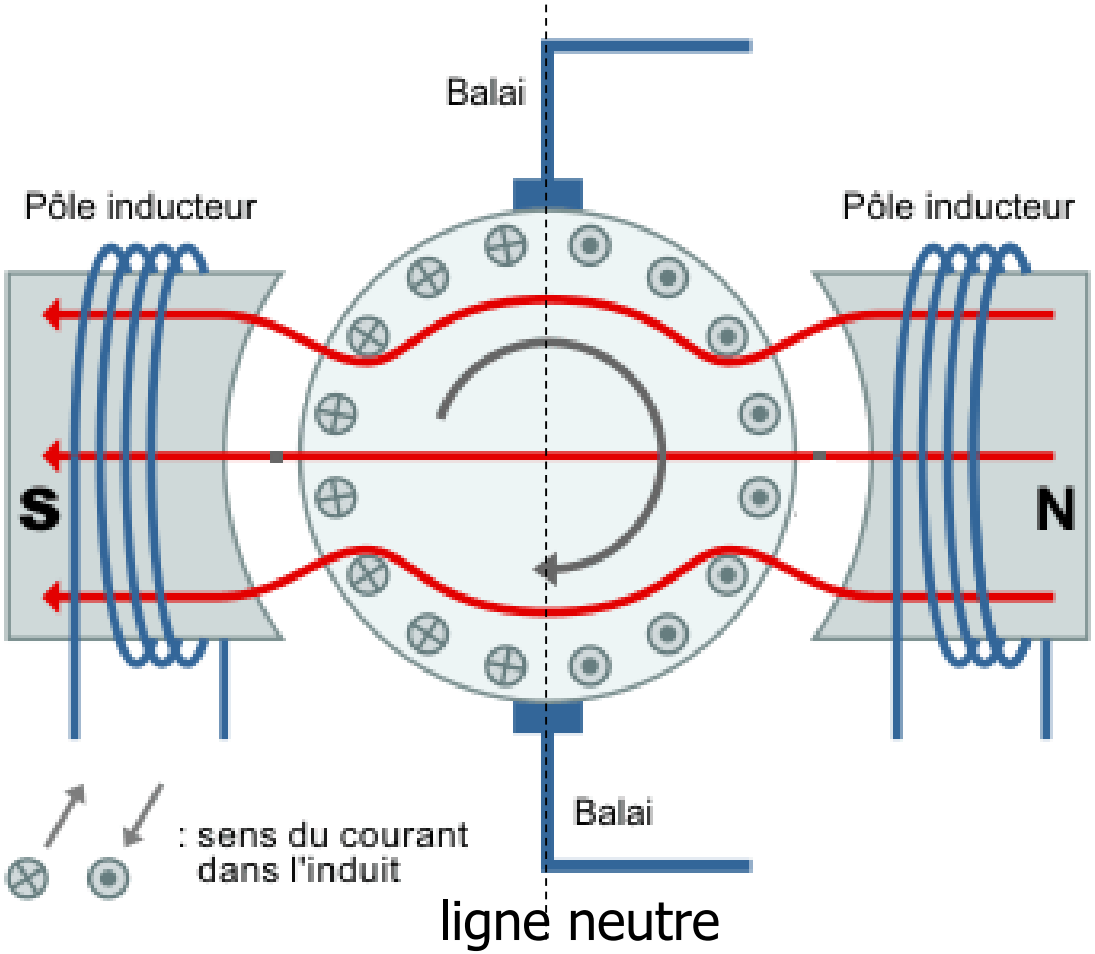
❑ Le collecteur

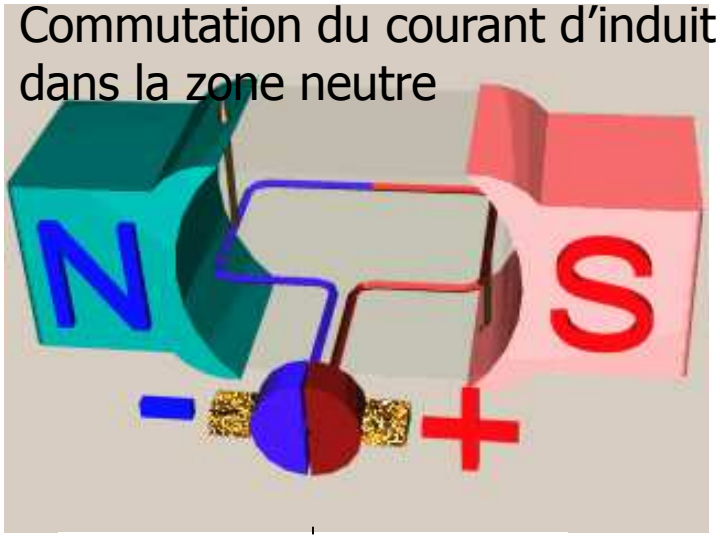
- **le collecteur** est monté sur l'arbre de la machine et fait de lames de cuivre isolés les unes des autres.
- Les deux fils sortant de chaque bobine de l'induit sont successivement et symétriquement soudés aux lames du collecteur.
- Chaque lame est reliée électriquement au bobinage induit.

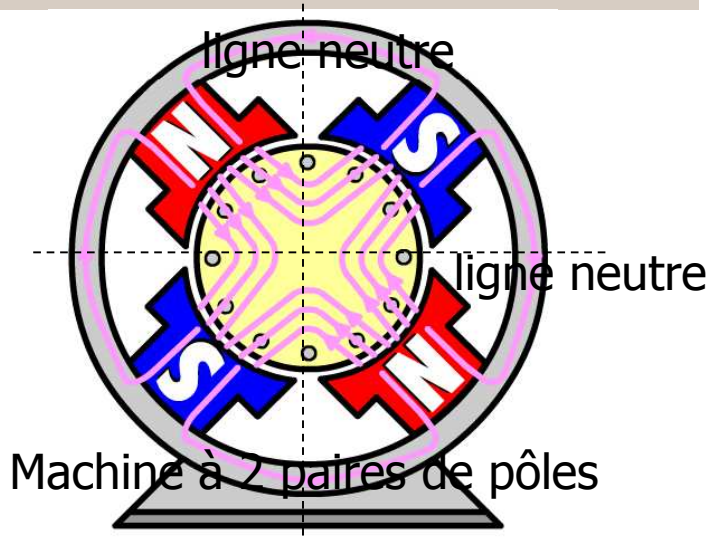


Machine à courant continu

- Le collecteur est formé de deux demi-sections (stator bipolaire) qui permettent de changer le sens du courant (commutation) dans les conducteurs lors du franchissement de la ligne neutre (La perpendiculaire à l'axe des pôles d'une machine bipolaire).



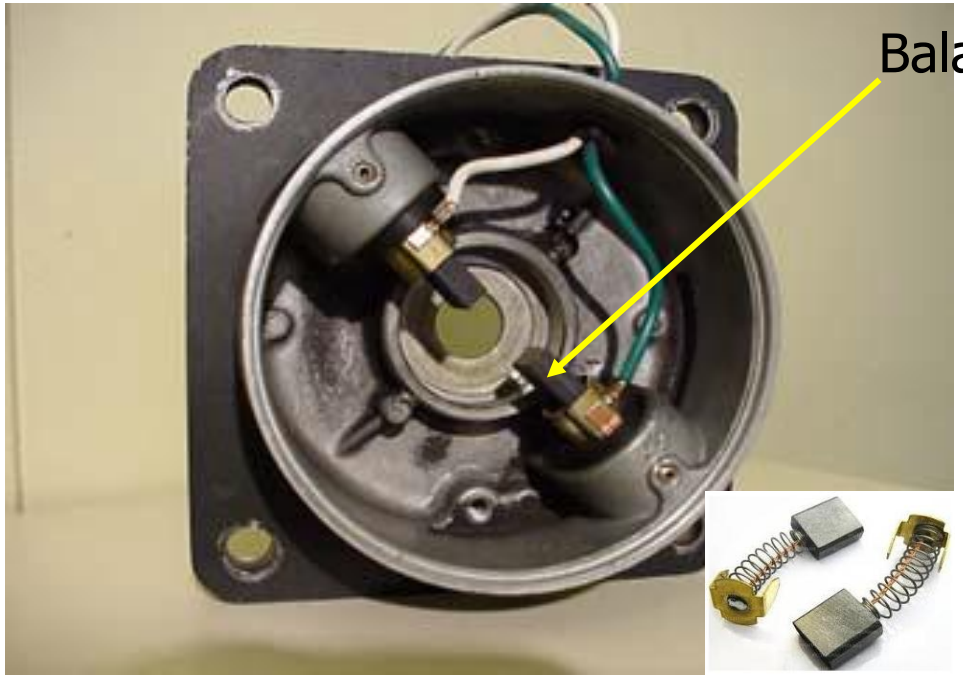


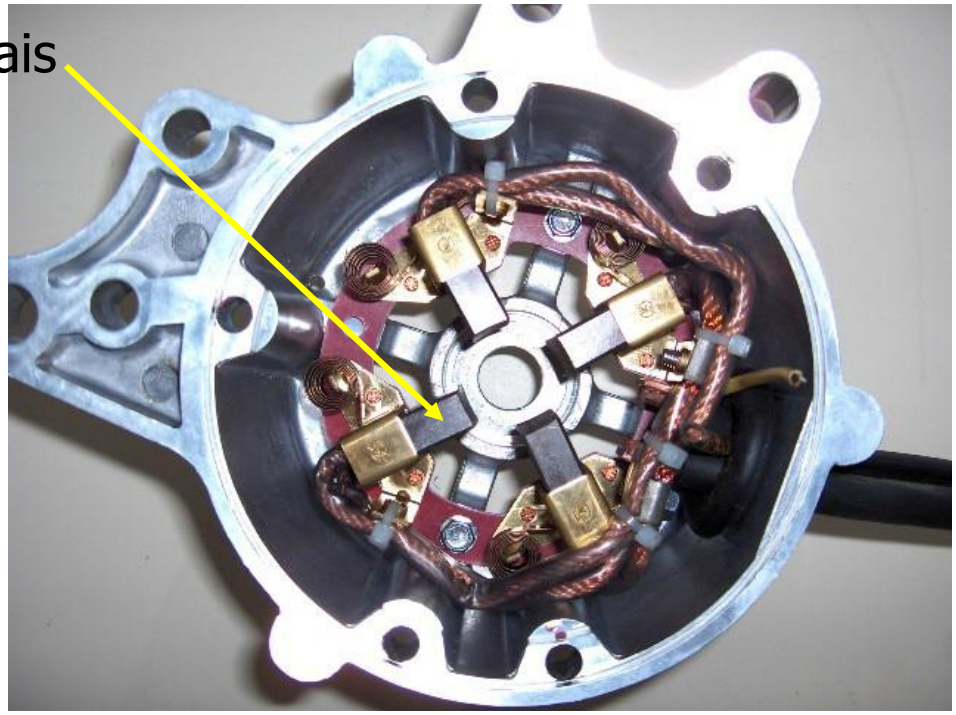


Machine à courant continu

❑ Les balais

- **les balais** faits en carbone en raison de sa bonne conductivité électrique et de son faible coefficient de frottement.
- Les balais solidaires du stator frottent sur le collecteur (contacts glissants), ils assurent le contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur.
- Les machines multipolaires ont autant de balais que de pôles.





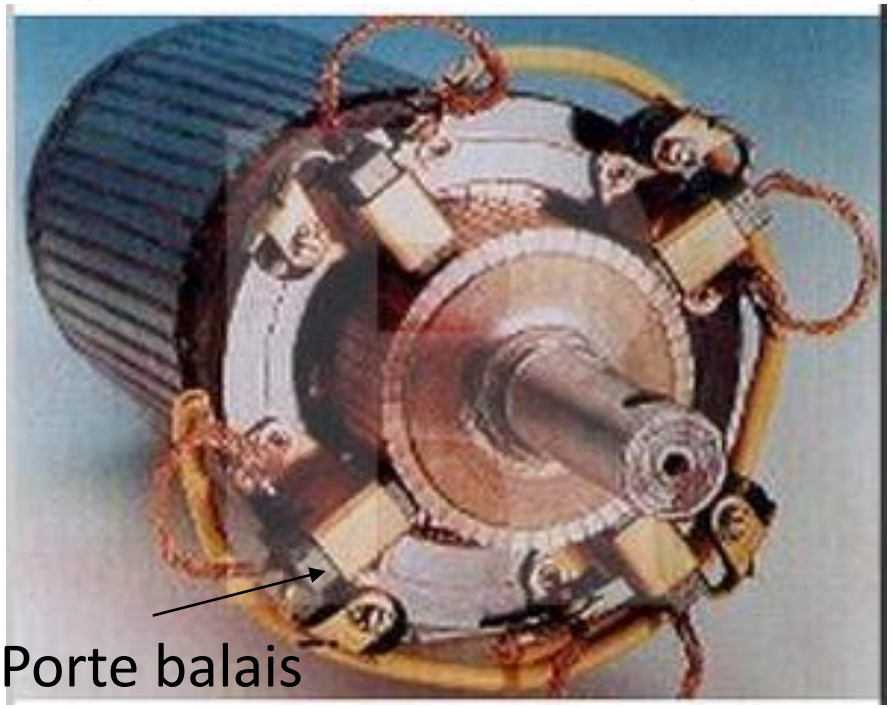
La pression des balais sur le collecteur peut être réglée par des ressorts ajustables

Machine à courant continu

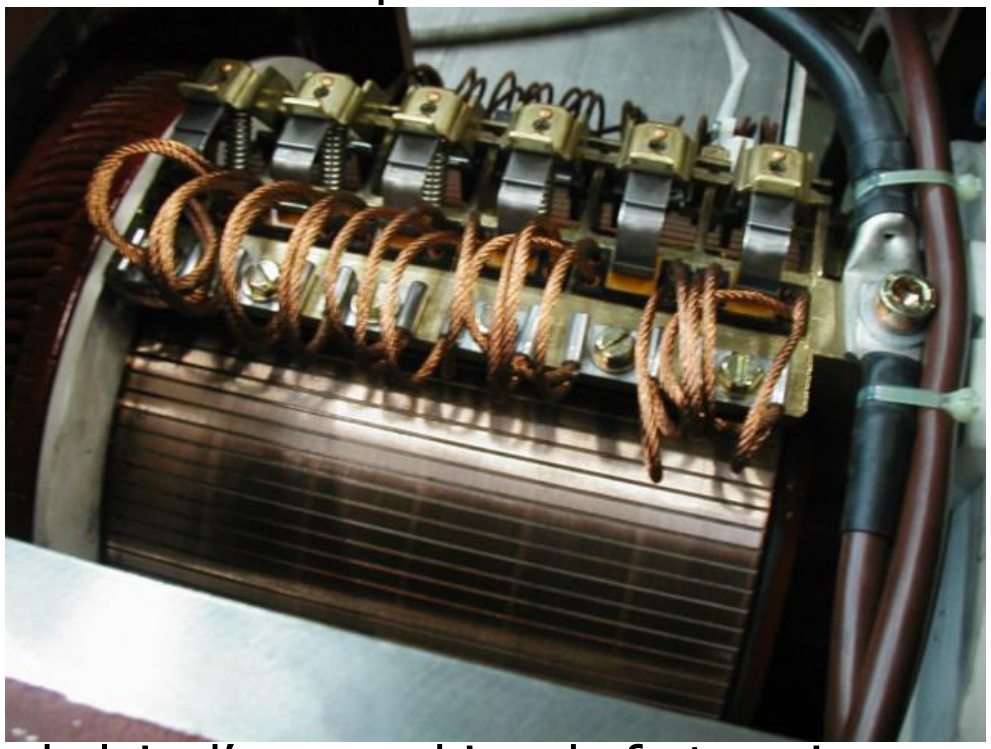
- Pour des machines de forte puissance, la mise en parallèle des balais est alors nécessaire.

Remarque:

- Les balais et le collecteur constituent les points faibles de la machine MCC (usure prématurée des balais et collecteur).
- Plus la vitesse de rotation est élevée, plus les balais doivent appuyer fort pour rester en contact et plus le frottement est important.



Balais d'une machine multipolaire



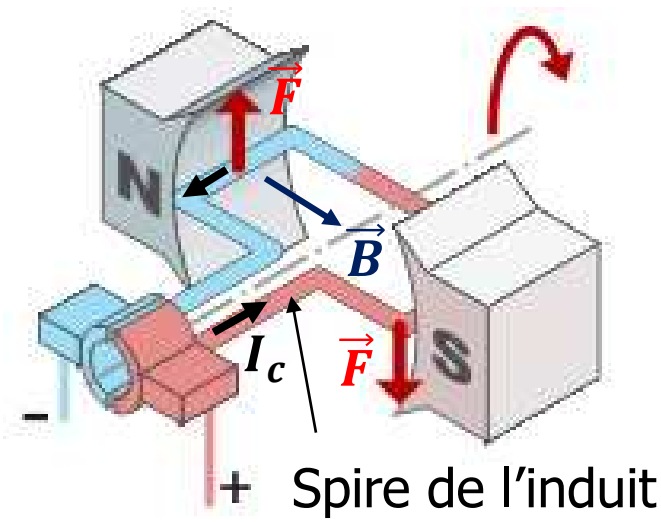
balais d'une machine de forte puissance

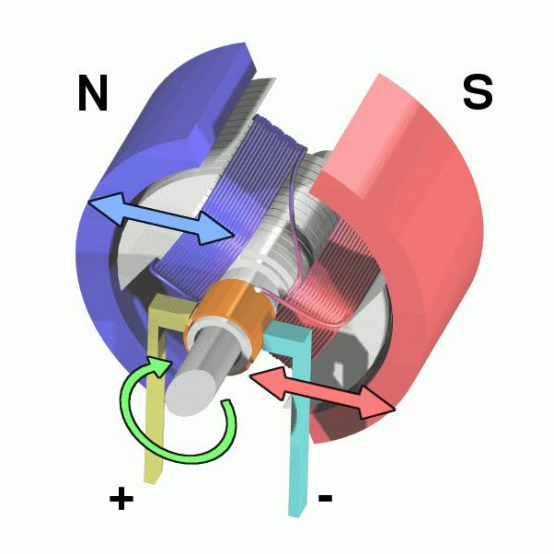
2. Principe de fonctionnement

Loi de Laplace:

Un conducteur traversé par un courant, placé dans un champ magnétique est soumis à une **force de Laplace**.

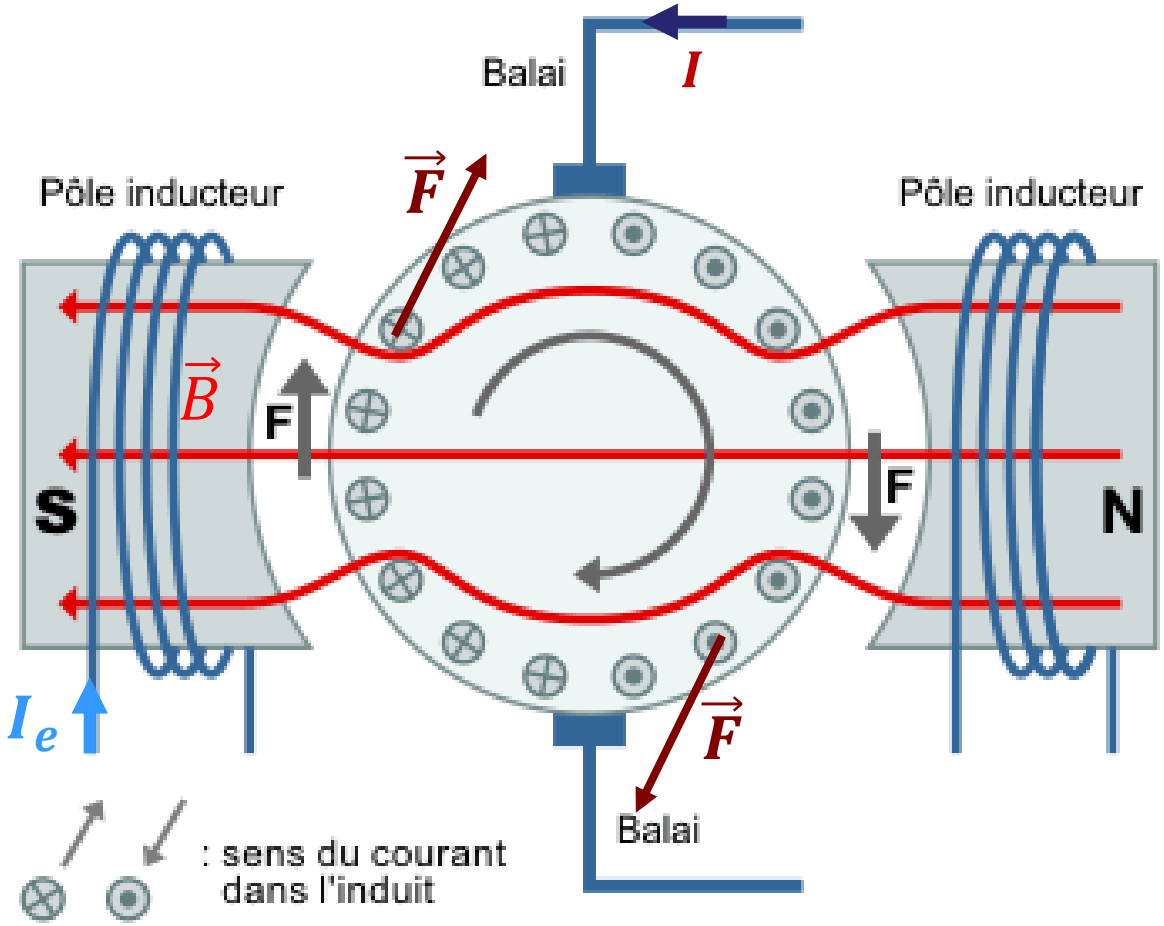
- L'induit est plongé dans le champ magnétique $\vec{B}$ créé par l'inducteur.
- Par l'intermédiaire des balais et du collecteur, un courant électrique circule dans les enroulements de l'induit par une source continue.
- D'après la loi de Laplace, les conducteurs de l'induit sont soumis à une **force électromagnétique** $\vec{F} = I_c \vec{\ell} \wedge \vec{B}$, avec ℓ est la longueur du conducteur actif (largeur d'un pôle inducteur) traversé par le courant I_c.





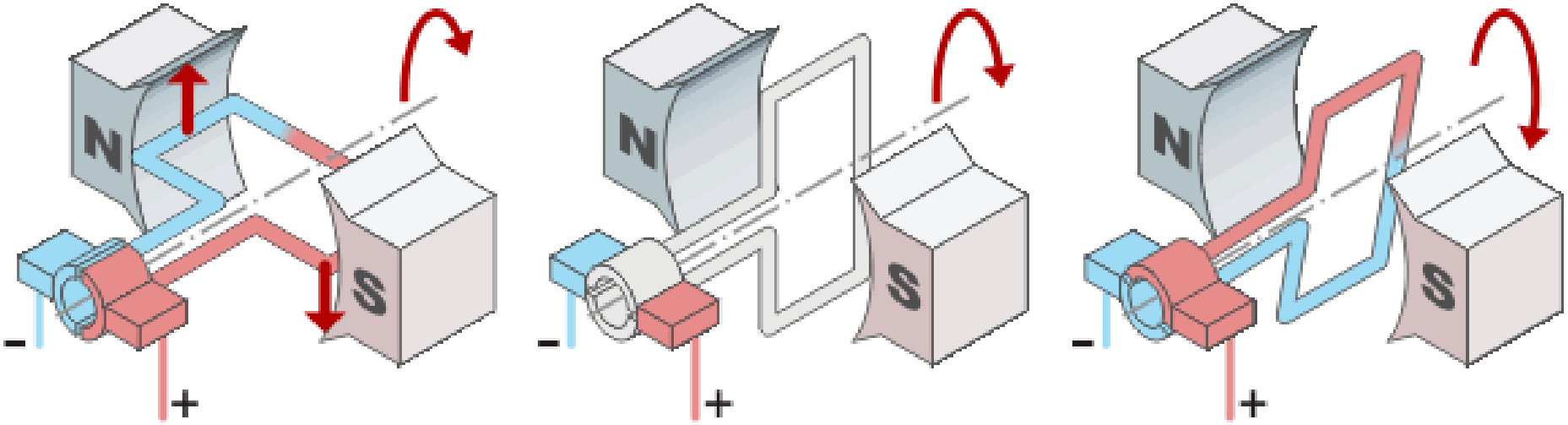
Machine à courant continu

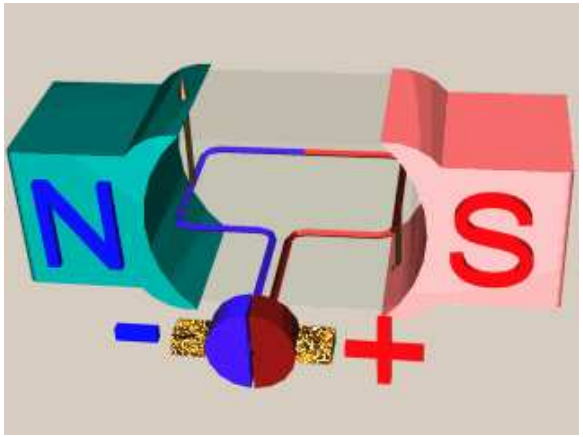
- Le bobinage de l'induit est composé de spires réparties sur un cylindre: seuls les conducteurs actifs sont soumis aux forces électromagnétiques.
- La résultante des forces électromagnétiques se traduit par un couple qui fait tourner l'induit de la machine autour de son axe.



Machine à courant continu

- Le système balais-collecteur a pour rôle de faire commuter le sens du courant dans les deux conducteurs placés de part et d'autre de l'axe des balais (ligne neutre), permettant ainsi aux forces d'agir dans le même sens et de poursuivre la rotation du rotor.

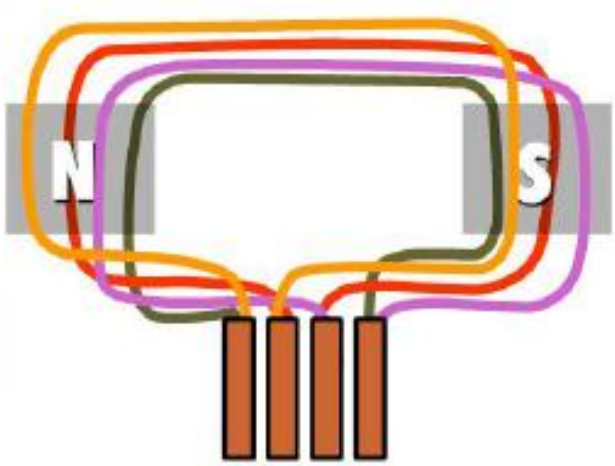




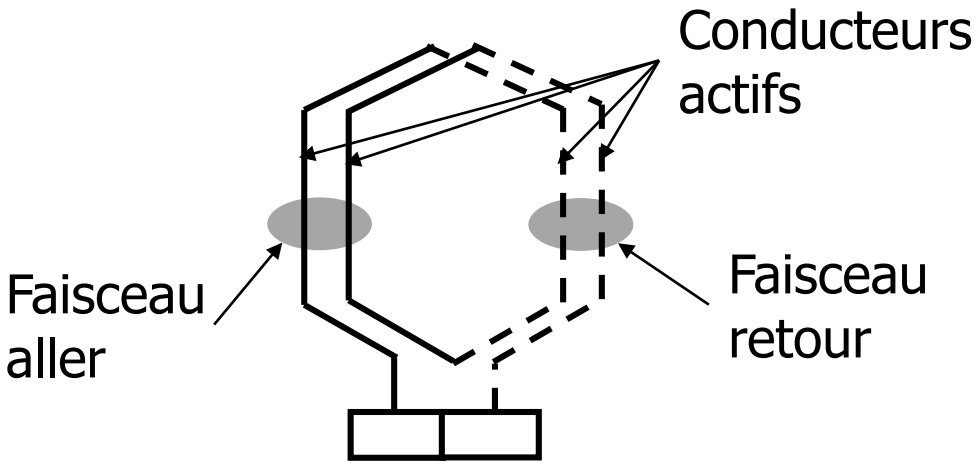
3. Bobinage de de l'induit

Phénomène d'induction: Un conducteur se déplaçant dans un champ magnétique est le siège d'une force électromotrice (f.e.m) induite (loi de Lenz-Faraday).

- L'enroulement actif soumis à un couple moteur, est entrainé en rotation dans le flux inducteur (variation de flux à travers les bobines de l'induit). Il est donc le siège d'une force contre-électromotrice (f.c.e.m) s'oppose au courant d'alimentation en fonctionnement moteur ou f.e.m en fonctionnement génératrice.
- L'induit est constitué d'un enroulement de spires réunies en faisceaux disposés de telle manière que lorsqu'un coté est soumis au pôle nord, l'autre est au pôle sud.



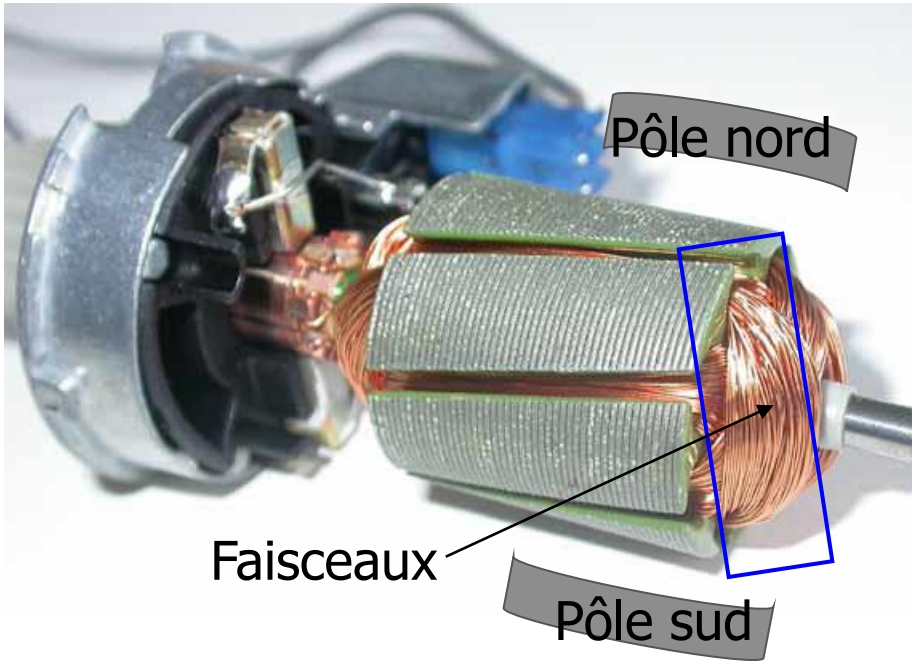
Lames

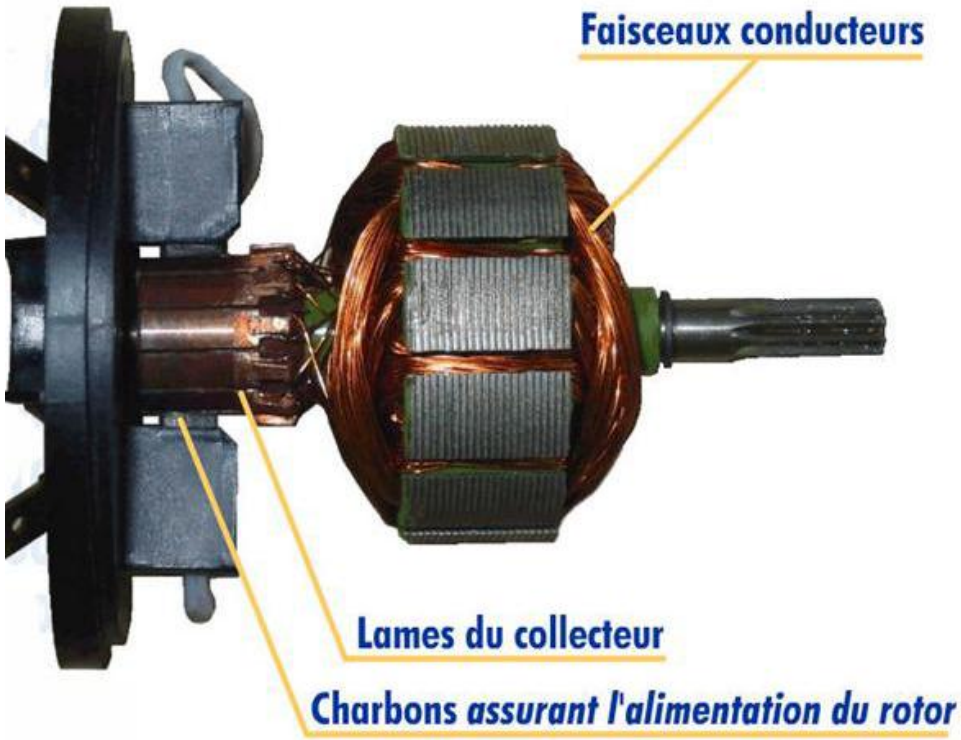


Section à deux spires

Machine à courant continu

- Les balais alimentent l'ensemble des faisceaux reliés par les lames du collecteur.
- Les faisceaux aller et retour constituent une section.
- Chaque lame du collecteur est soudée au fil de sortie d'une section et à l'entrée de la section suivante.



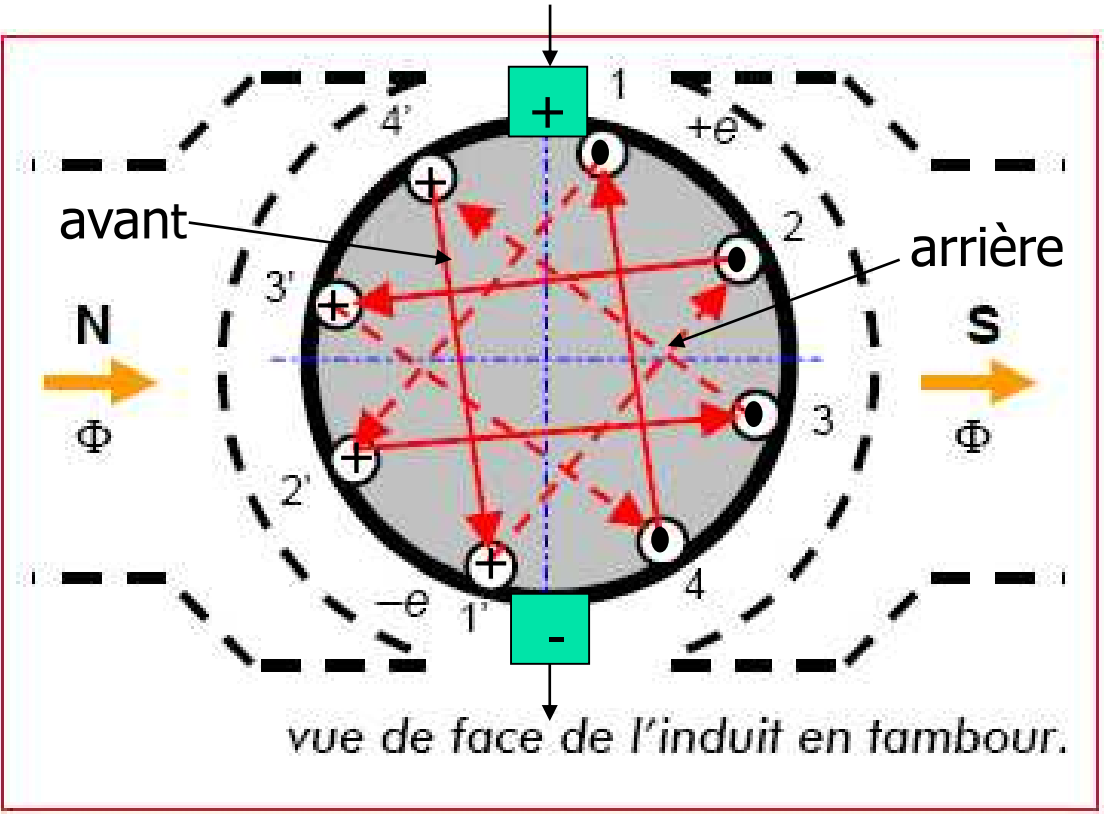


Machine à courant continu

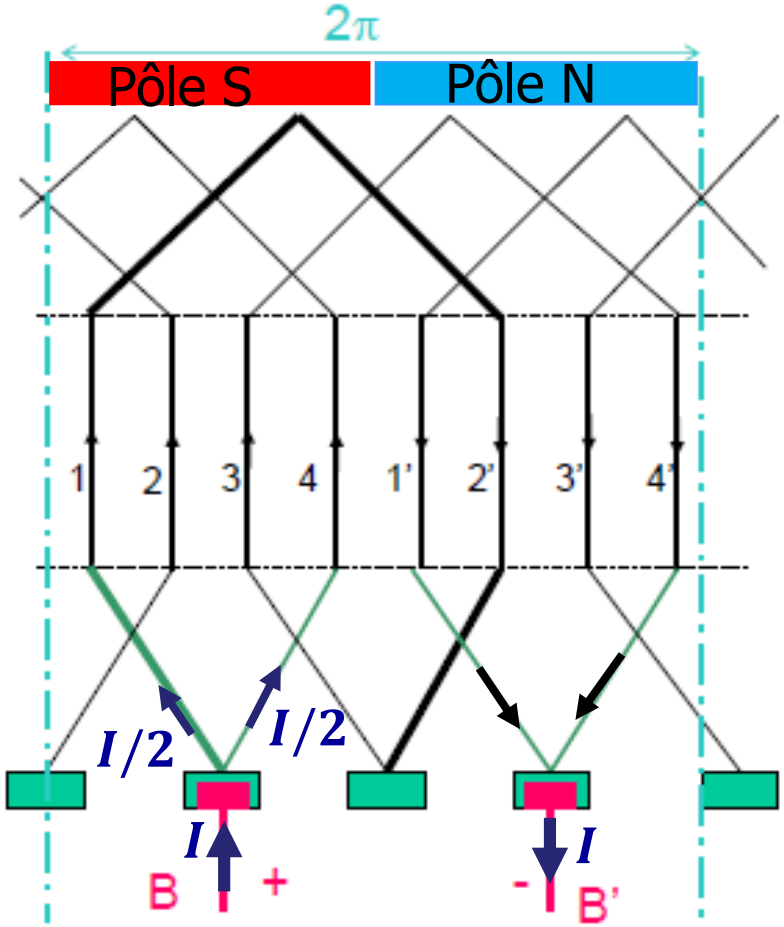
Il existe de nombreux procédés de mise en série des conducteurs de l'induit.

Exemple de réalisation:

- On choisit un induit simplifié avec 8 encoches contenant chacun un conducteur. Le conducteur 1 est réuni à l'arrière au conducteur 2'; Le 2' au 3 par une liaison avant; etc…



vue de face de l'induit en tambour.

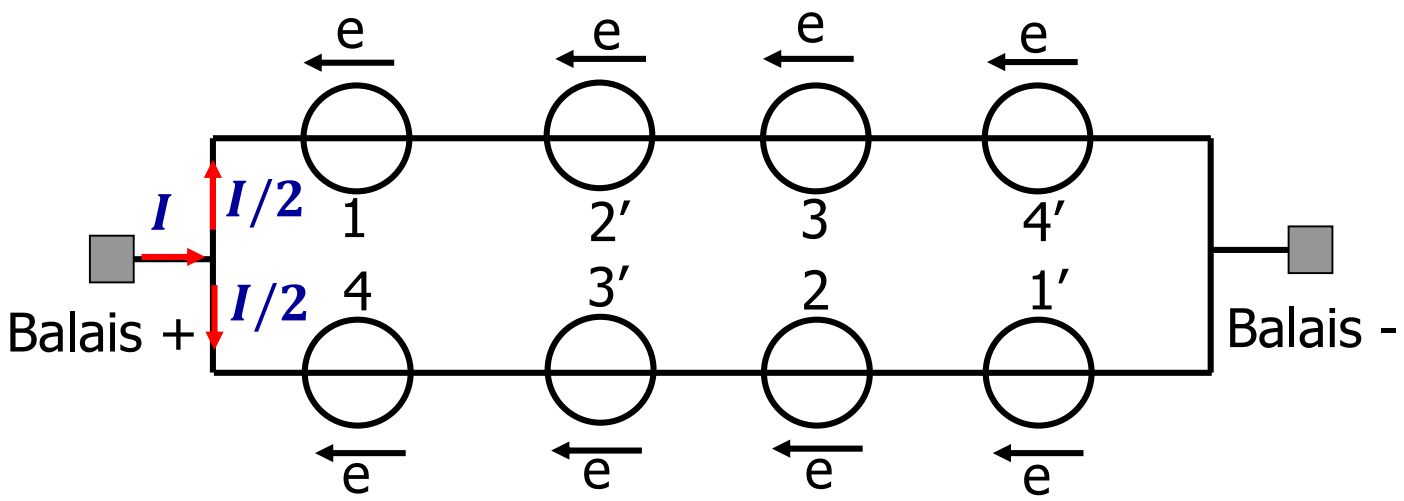


Le courant se divise dans deux voies

Machine à courant continu

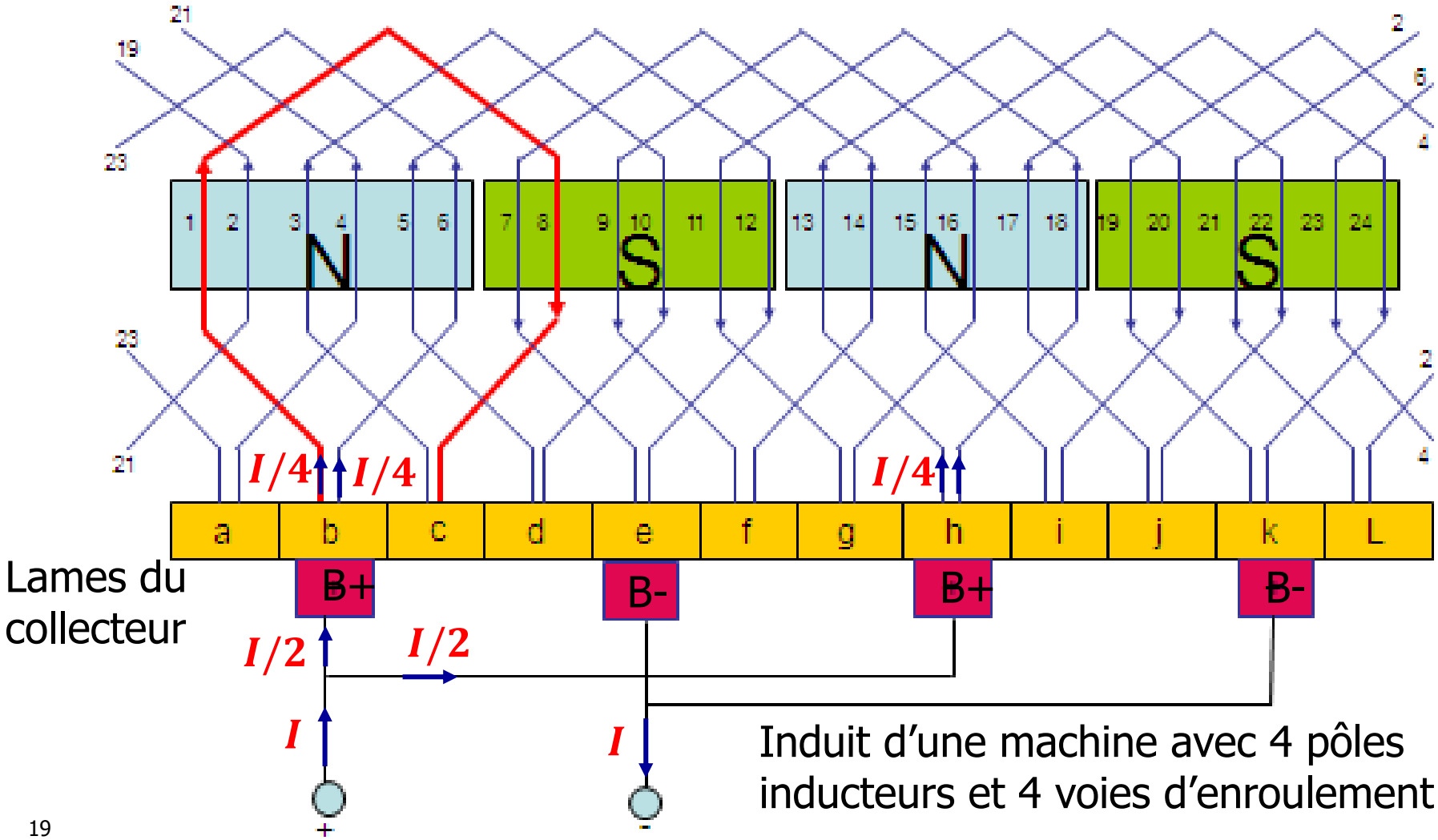
Représentation développée des f.c.e.m:

- Les portions de fils logées dans les encoches sont les conducteurs actifs. Ils sont donc le siège de f.c.e.m induites.
- Pour une machine bipolaire, il y'a deux chemins possibles ou voies d'enroulement pour aller du balais (+) au balais (-). Chaque voie est traversée par la moitié du courant.
- Ces 2 voies comportent le même nombre de conducteurs en série sont identiques et en parallèle.
- Lorsqu'un conducteur change de voie d'enroulement, le courant qui le traverse s'inverse, et la f.c.e.m aussi.
- Chaque conducteur est représenté par une f.c.e.m.



Machine à courant continu

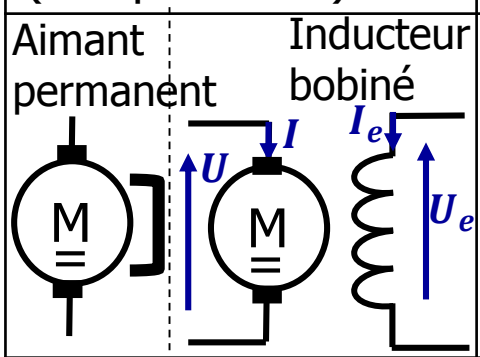
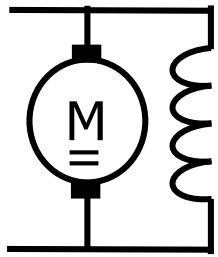
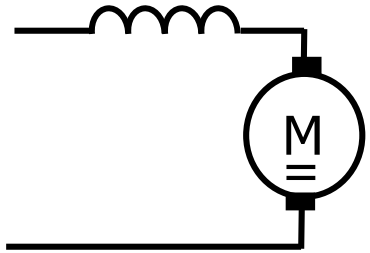
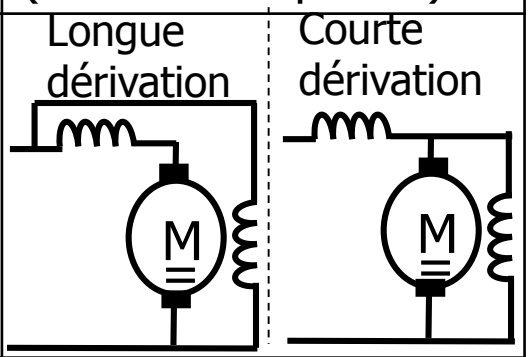
- Pour les machines multipolaires, avec un nombre de pôles $2p$ (p nombre paires de pôles). L'enroulement peut comporter un nombre de voies $2a$ (a nombre de paires de voies). Chaque voie est parcourue par $I/2a$.



Induit d'une machine avec 4 pôles inducteurs et 4 voies d'enroulement

4. Excitation de la machine à courant continu

On parle d'excitation pour décrire le mode d'alimentation des circuits inducteur bobiné et induit des moteurs à courant continu.

Excitation séparée (indépendante)	Excitation dérivation (moteur shunt)	Excitation série (moteur universel)	Excitation composée (moteur compound)
			
* Dans le cas d'un inducteur bobiné, nécessite 2 alimentations, * Petites puissances pour les moteurs à aimants permanents * Risque d'emballement à vide?	* Vitesse relativement constante, quelle que soit la charge (autorégulateur de vitesse), * Couple de démarrage moyen, * Absence d'emballement à vide.	* Fort couple à basse vitesse, Autorégulateur de puissance: la vitesse décroit lorsque la charge augmente, * Risque d'emballement à vide.	* Couple de démarrage meilleur qu'en dérivation, mais plus faible qu'en série, * Vitesse relativement stable quelle soit la charge, * Absence d'emballement à vide.

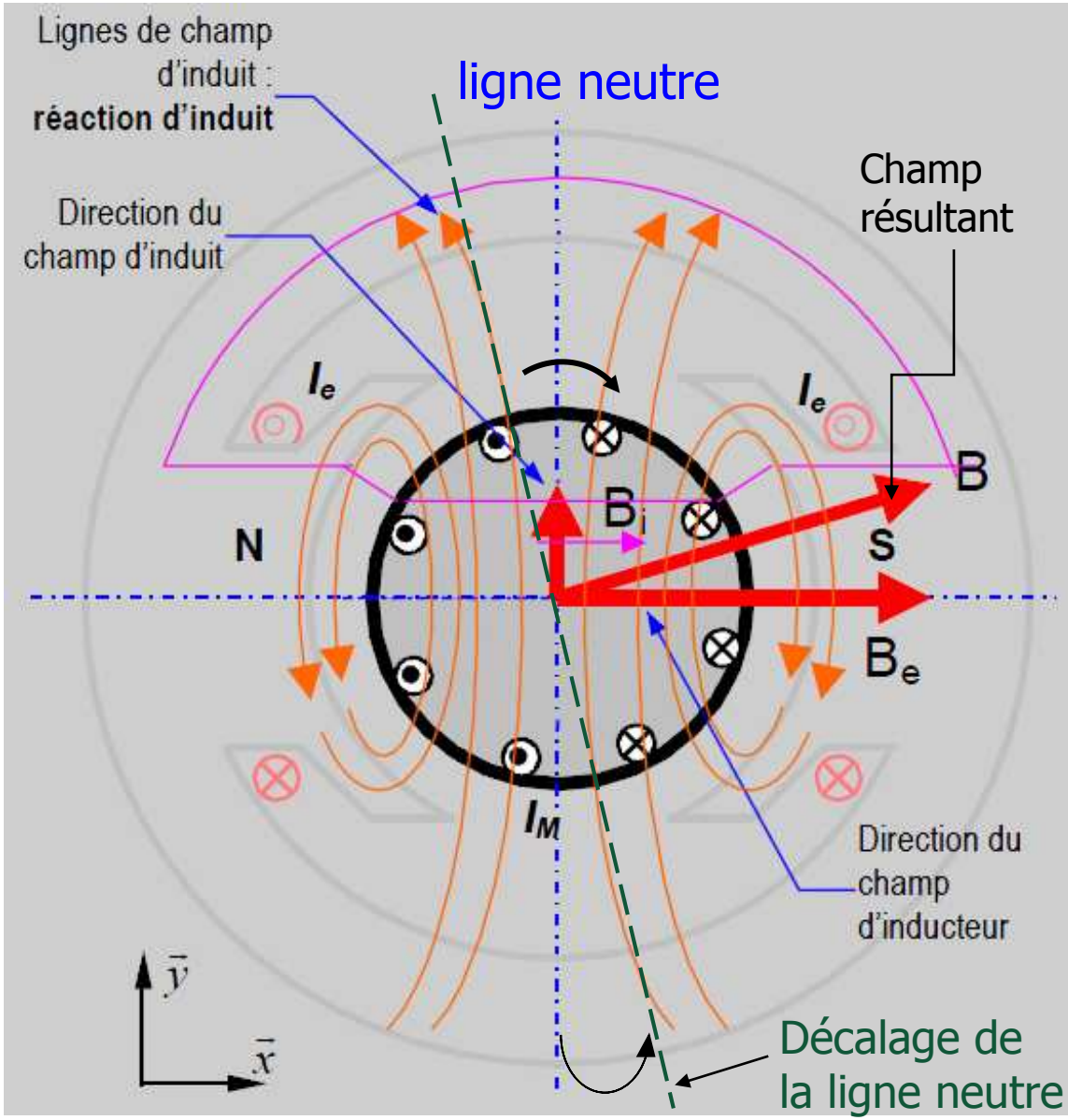
5. Réaction magnétique d'induit

- Le flux magnétique est crée par le courant inducteur, le courant d'induit crée son propre flux magnétique perturbateur, appelé réaction magnétique d'induit.
- Il y a distorsion des lignes de champ produit par l'inducteur, les deux champs se superposent et la résultante est décalée, il en résulte un décalage de la ligne neutre.

La réaction magnétique d'induit est néfaste:

✓ Elle réduit le flux utile sous un pole inducteur,

✓ Elle produit une chute de tension supplémentaire à l'induit en charge



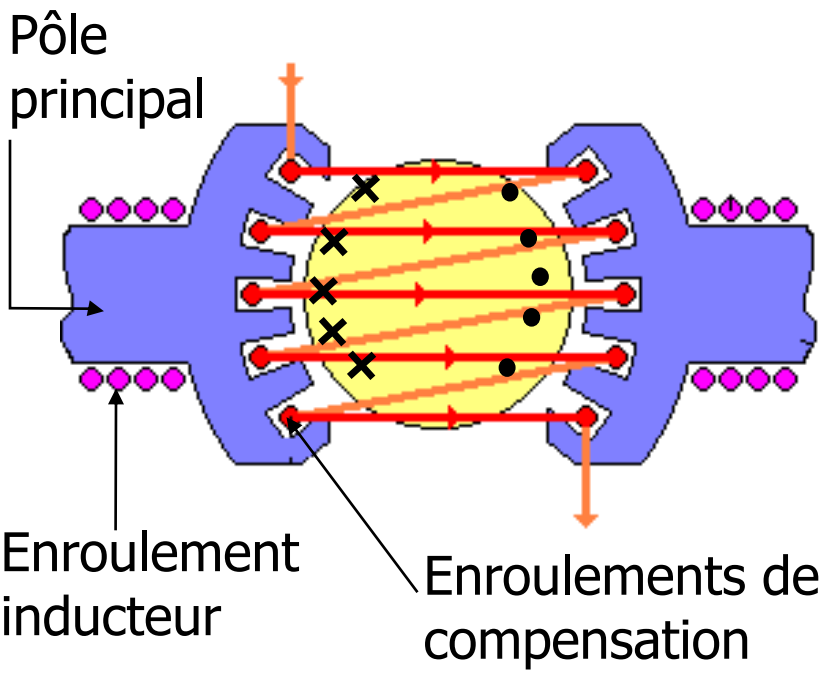
Machine à courant continu

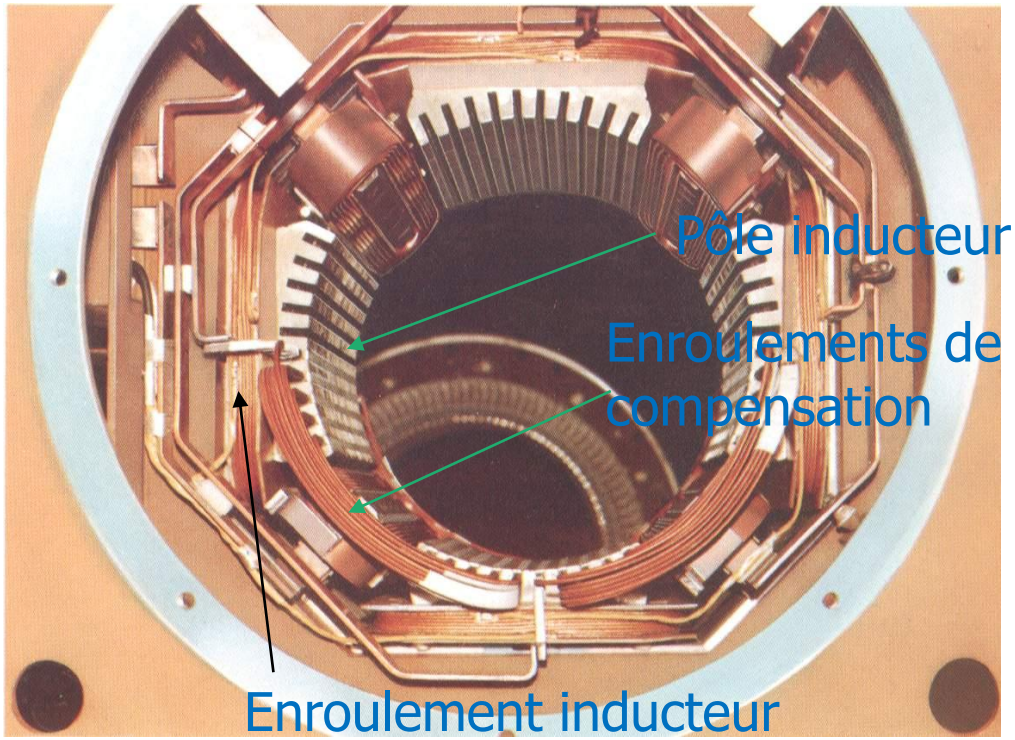
❑ Enroulements de compensation:

En pratique, on compense la réaction magnétique d'induit par l'intermédiaire d'enroulements de compensation situés dans des encoches de l'épanouissement polaire de l'inducteur, parcourus par le courant d'induit en sen inverse à celui circulant dans les conducteurs actifs de l'induit.

Remarque:

pour les machines de petites puissance, on ne tient pas compte de la réaction d'induit.

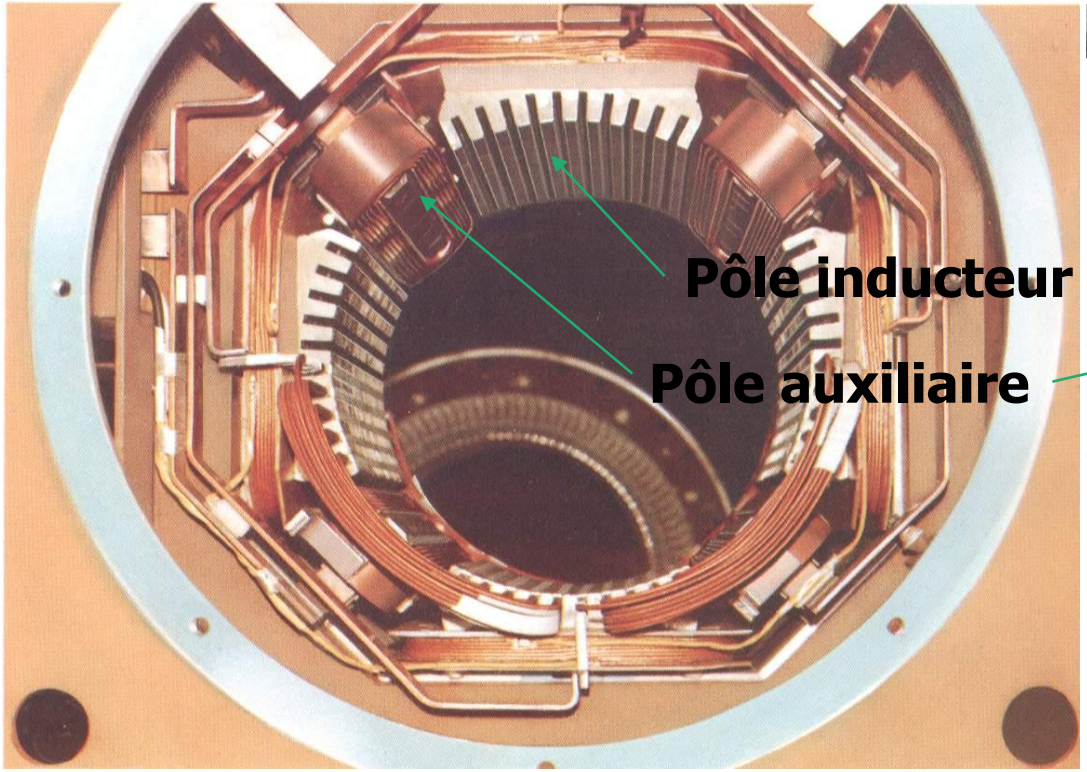


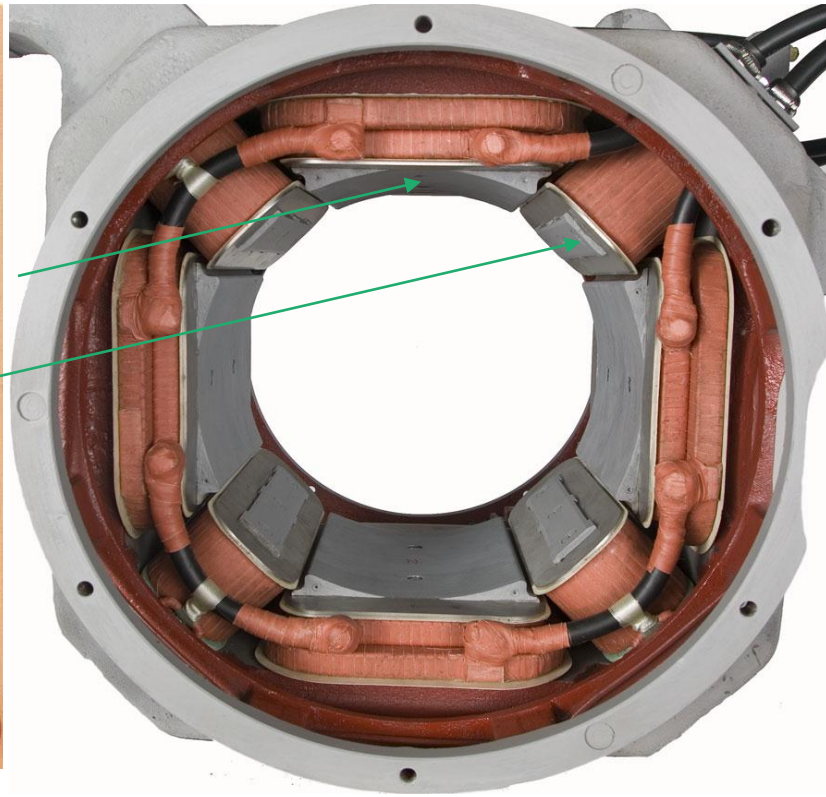


Machine à courant continu

- **Pôles auxiliaires de commutation**:

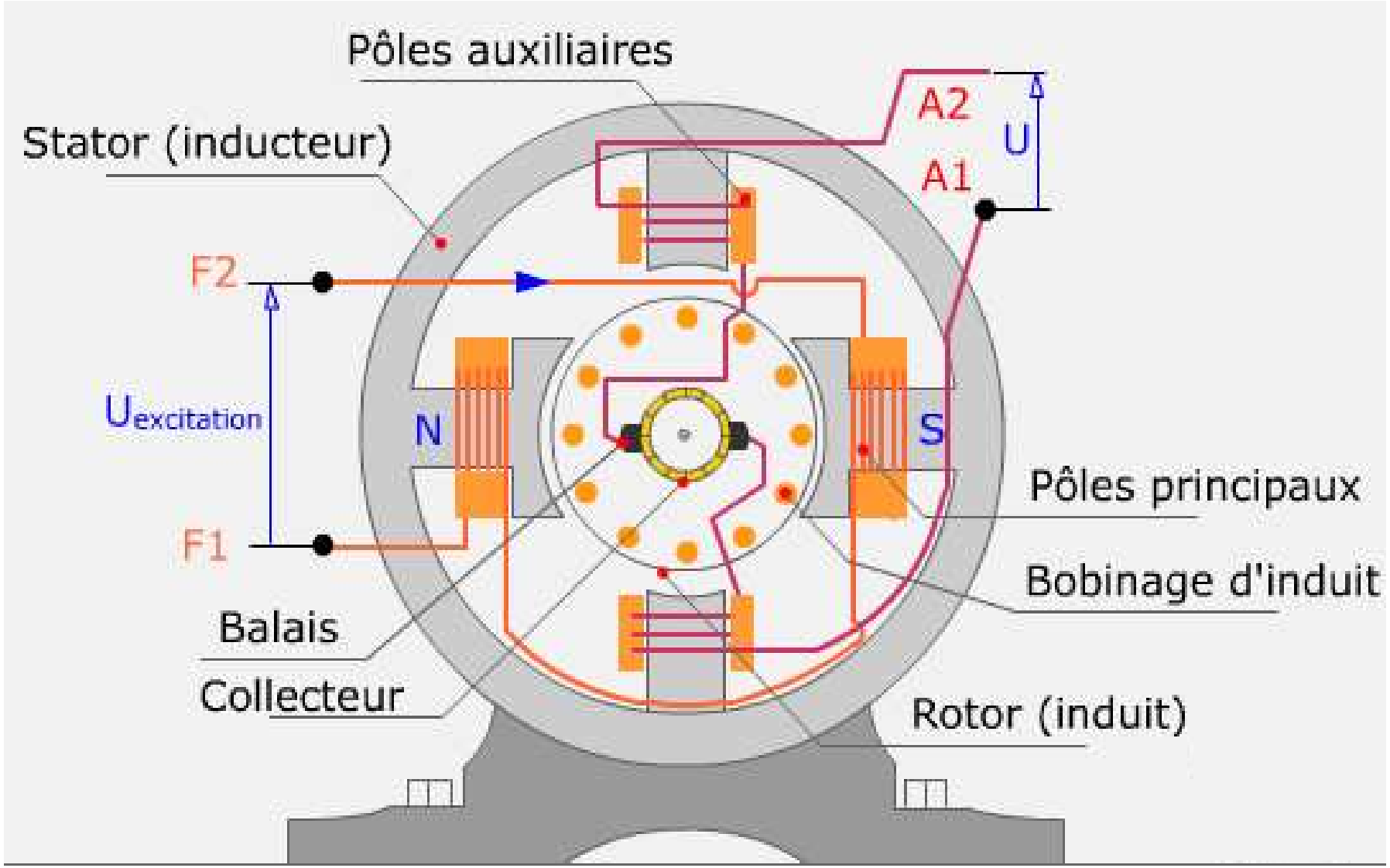
- La RMI augmente les problèmes liés à la commutation, qui conduit à une usure prématurée des balais et du collecteur (étincelles entre balais et collecteur),
- Pour corriger ce problème, la machine est équipée de pôles auxiliaires (ou d'enroulement) de commutation montés sur le stator en série avec l'induit et ont une action localisée à la zone de commutation du courant.





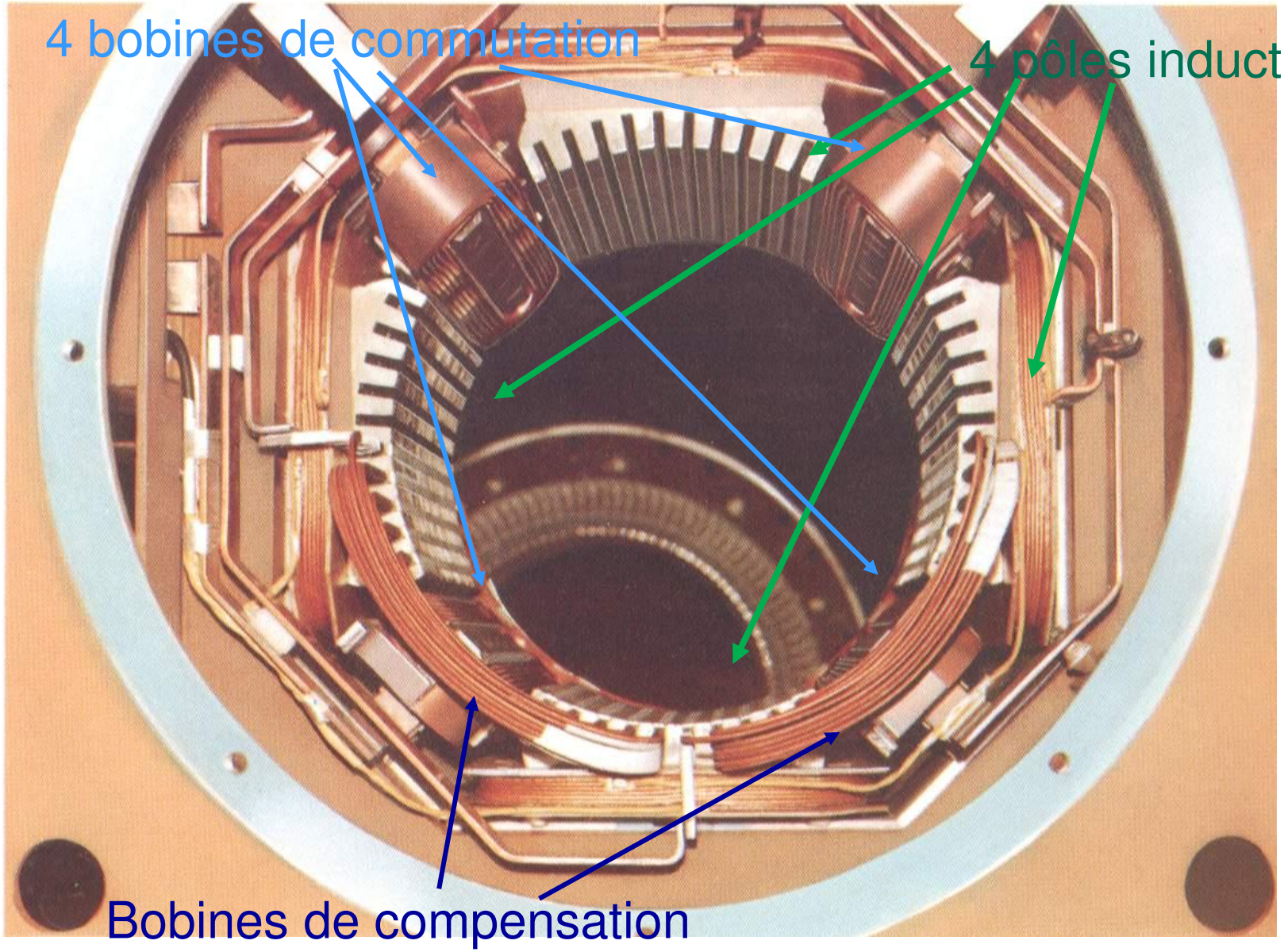
Machine à courant continu

Pôles auxiliaires de commutation d'une machine bipolaire:

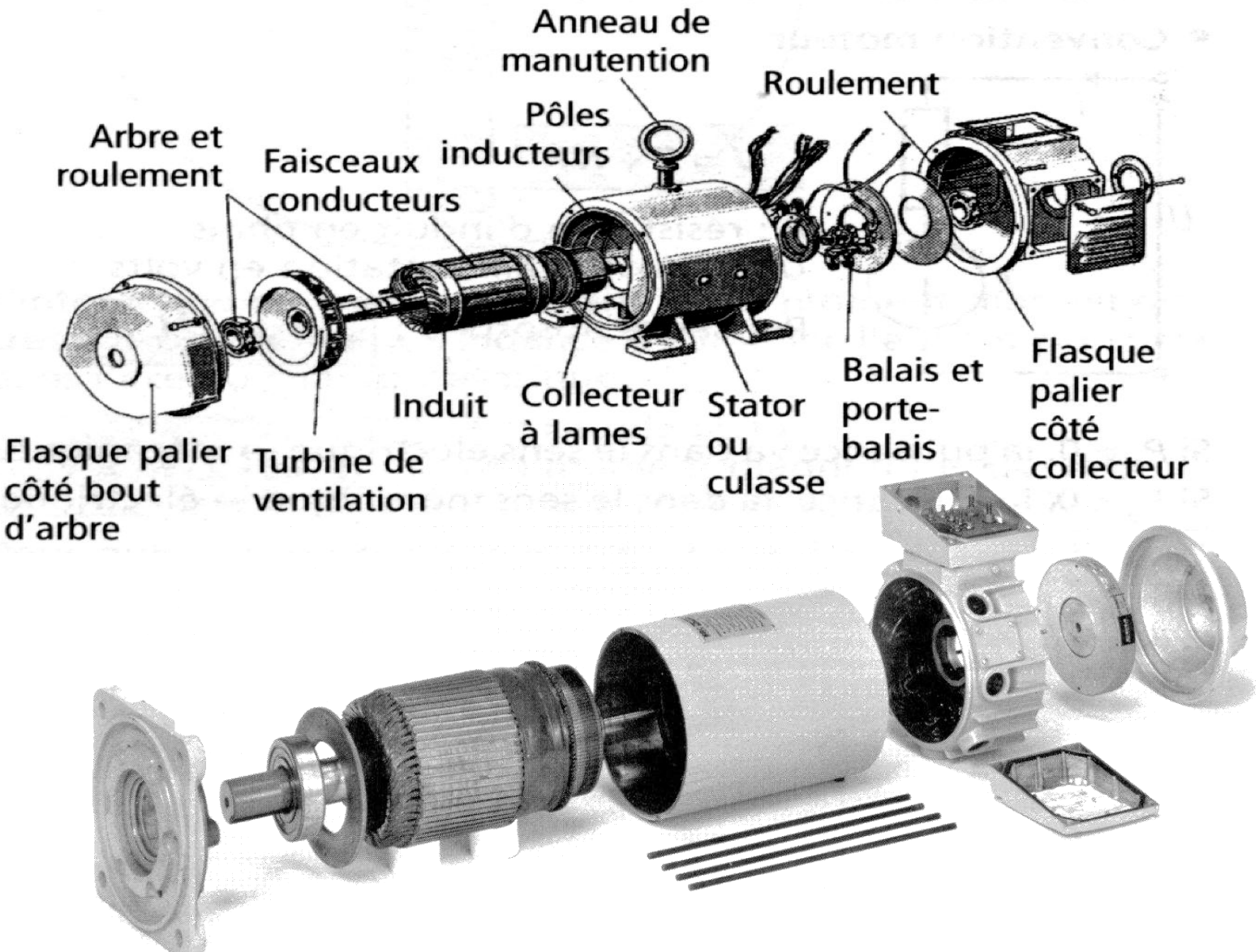


Machine à courant continu

Pôles auxiliaires de compensation/commutation:



6. Vue éclatée d'une machine à courant continu



7. Expression de la force contre-électromotrice

Grandeur	Désignation
U (V)	tension d'alimentation de l'induit
E (V)	force contre-électromotrice induite
R (Ω)	résistance de l'induit
I (A)	intensité du courant absorbé par l'induit
U_e (V)	tension d'alimentation de l'inducteur ou tension d'excitation
I_e (A)	courant inducteur ou courant d'excitation
R_e (Ω)	résistance de l'inducteur
p	nombre de paires de pôles
a	nombre de paires de voies d'enroulement
N	nombre de conducteurs actifs de l'induit
ϕ (Weber)	flux moyen sous un pôle inducteur
n (tours/s)	fréquence de rotation
Ω (rad/s)	vitesse angulaire de l'induit

Machine à courant continu

- Au cours d'un tour complet de durée $\Delta t = 1/n$, un conducteur actif coupe p fois le flux $+\phi$ et p fois le flux $-\phi$ sous un pole sud et un pole nord .
- La variation totale du flux coupé par un conducteur est:

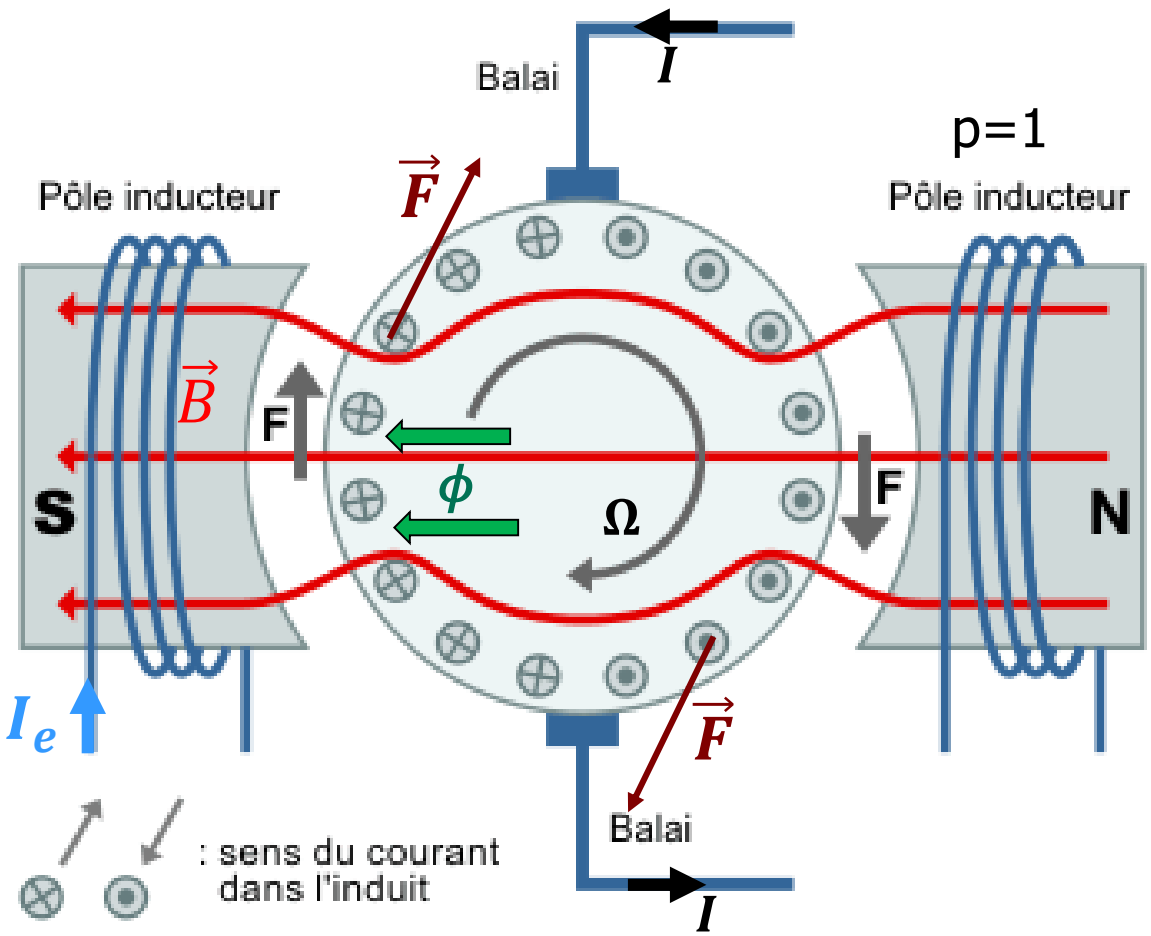
$$\Delta\phi = p\phi - (-p\phi) = 2p\phi$$

- Chaque conducteur est le siège d'une f.c.e.m (loi de Faraday):

$$e = \Delta\phi/\Delta t = 2pn\phi$$

- Les conducteurs sont organisés en $2a$ voies d'enroulement en parallèle de $N/2a$ conducteurs en série par voie.
- L'expression de la f.c.e.m totale est: $E = \frac{N}{2a}e$
- Alors:

$$E = \frac{p}{a}Nn\phi = \left(\frac{1}{2\pi}.\frac{p}{a}.N\right)\phi\Omega$$



Machine à courant continu

D'où l'expression de la f.c.e.m induite aux bornes de l'induit d'une machine multipolaire et multivoies d'enroulements:

$$E = K\phi\Omega \; ; \qquad K = \frac{1}{2\pi}\frac{p}{a}N$$

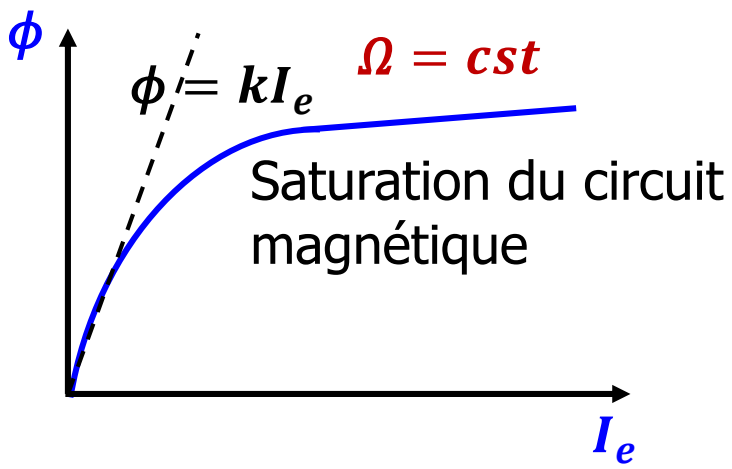
K (en $V.rad^{-1}.s.Wb^{-1}$) est une constante qui dépend de la machine.

La f.c.e.m dépend donc:

- des paramètres de construction, purement technologiques (p, a, N);
- du paramètre de fonctionnement interne, flux sous un pôle ϕ;
- du paramètre de fonctionnement externe, vitesse de rotation Ω.

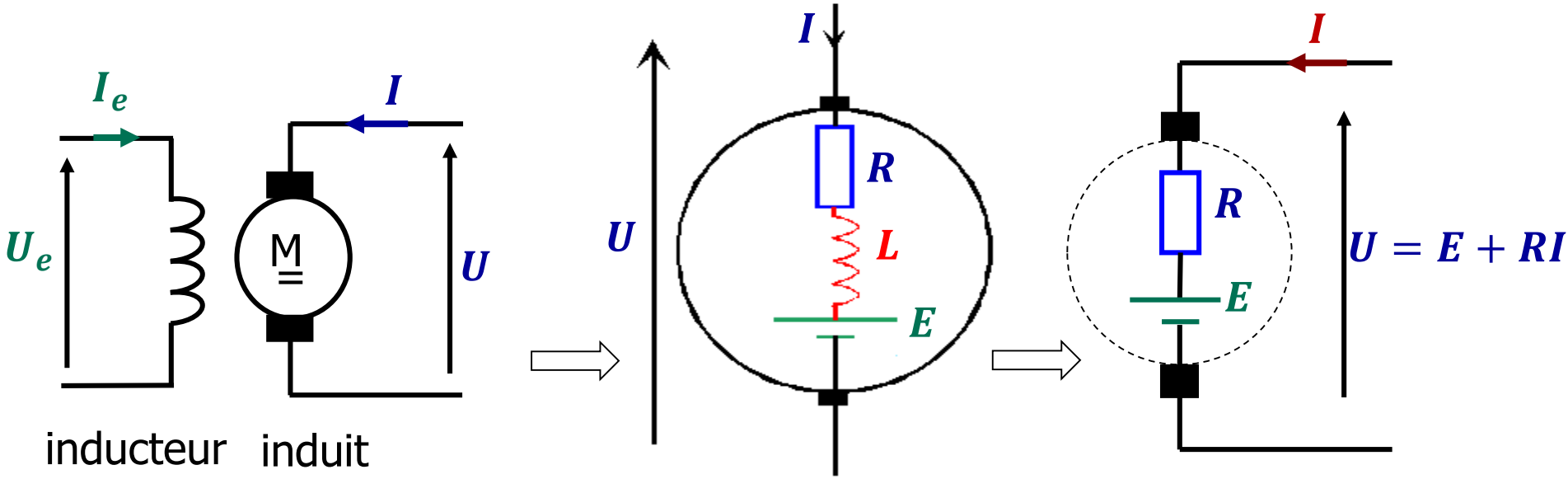
Propriétés:

- À vitesse constante $\Omega = cst$, la f.c.e.m est proportionnelle au flux ϕ, donc proportionnelle au courant d'excitation I_e, si le circuit magnétique n'est pas saturée. $E = kI_e$
- À flux constant $\phi = cst$, la f.c.e.m est proportionnelle à la vitesse de rotation Ω de la machine. $E = K_e\Omega$; $K_e = K\phi$



8. Schéma équivalent de l'induit en régime établi

Moteur à excitation indépendante:



Equation électrique à l'induit: $U = E + RI + L\frac{dI}{dt}$

- En régime permanent, l'inductance propre des enroulements d'induit n'a pas d'effet: $I = cst \Rightarrow L\frac{dI}{dt} = 0$
- La source fournit à l'induit la puissance électrique: $P_e = UI = EI + RI^2$
- Les pertes par effet de joule dans l'induit sont: $P_{ji} = RI^2$
- La puissance électromagnétique (transformée en puissance mécanique) transmise à l'induit est: $P_{em} = EI$

9. Expression du couple électromagnétique

Les forces électromagnétiques de Laplace constituent un couple électromagnétique qui entraîne la rotation du rotor. Ce couple provient de l'interaction entre le flux magnétique inducteur ϕ et le courant I dans les conducteurs d'induit.

Moment du couple électromagnétique:

- La puissance électromagnétique P_{em} est convertie en puissance mécanique:

$$P_{em} = EI = C_{em}\Omega$$

- Donc l'expression du moment du couple électromagnétique C_{em} (en N.m), souvent appelé par les électrotechniciens "couple électromagnétique" est:

$$C_{em} = K\phi I = \left(\frac{1}{2\pi}\frac{p}{a}N\right)\phi I$$

Comme dans toute machine électromagnétique, le couple C_{em} est proportionnel:

- Au flux ϕ crée par l'inducteur et,
- Au courant I absorbé par l'induit.

Sens de rotation:

Le sens du couple de forces électromagnétiques qui produit la rotation dépend de celui :

- du champ magnétique, donc du courant d'excitation I_e,
- de la polarité de l'induit obtenue par le sens du courant d'induit I.

Pour inverser le sens de rotation, il faut inverser, soit les polarités de l'induit, soit celles de l'inducteur.

Expression du couple utile:

Le couple utile C_u (ou couple moteur C_m fournit à la charge qui l'entraine) disponible sur l'arbre du moteur est légèrement inferieur au couple électromagnétique C_{em}:

$$C_u = C_{em} - C_p$$

Le coule de pertes $C_p = (P_{fer} + P_{pm})/\Omega$ est dû:

- aux pertes ferromagnétiques P_{fer} dans le rotor (par hystérésis et courants de Foucault). Ces pertes dépendent des valeurs du champ magnétique B et la vitesse de rotation Ω,
- aux pertes mécaniques P_{pm}: frottement aux paliers, frottement aux contacts balais-collecteur, pertes par ventilation. Elles augmentent avec la vitesse de rotation Ω.

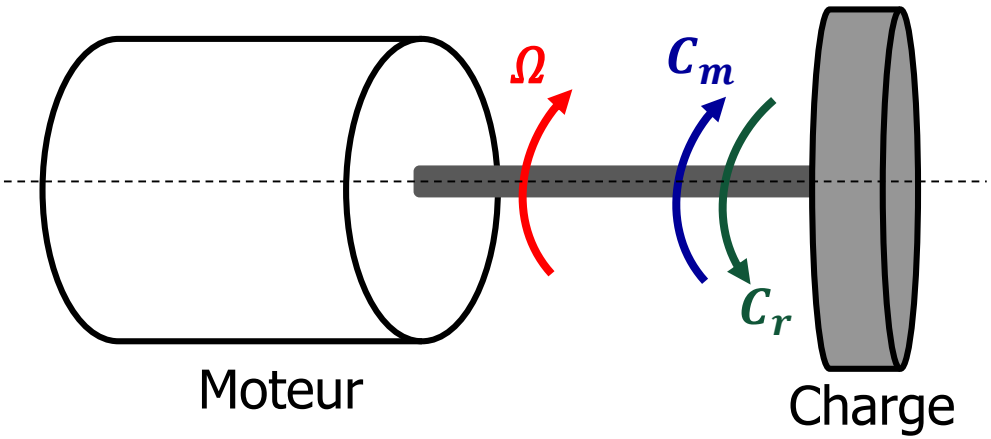
Machine à courant continu

- Équation générale de la dynamique du groupe moteur et charge entrainée de couple résistant C_r s'écrit:

$$J\frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r$$

Avec J est le moment d'inertie.

- En régime établit $\Omega = cst \Rightarrow \frac{d\Omega}{dt} = 0 \Rightarrow C_u = C_r$



À vide:

$$C_u = C_r = 0;$$

- L'induit absorbe un courant I_0, **le couple de perte** est:

$$C_p = C_{em} = K\phi I_0$$

En charge: Le couple de pertes C_p est très faible devant C_{em}, ce qui conduit à:

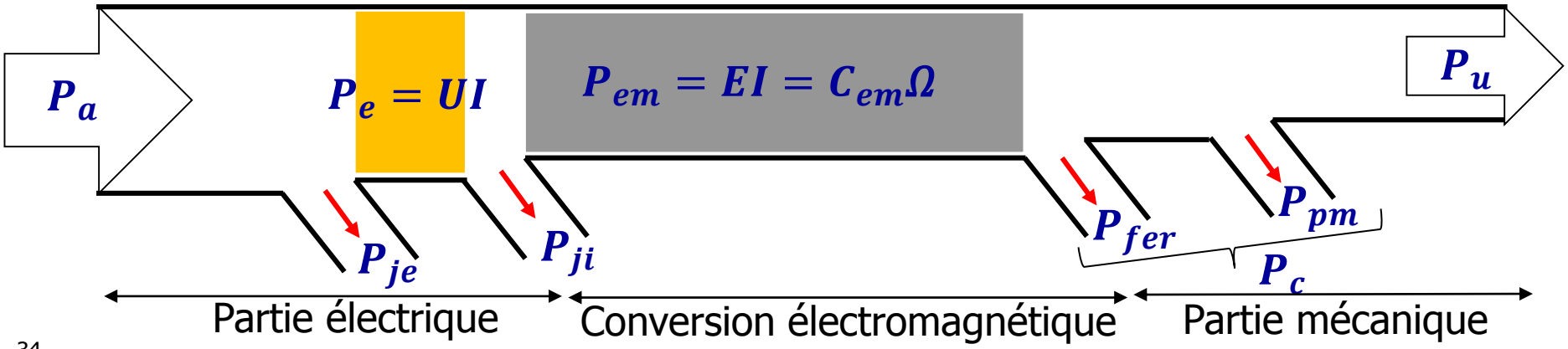
$$C_u = C_{em} - C_p = K\phi(I - I_0) \cong K\phi I$$

Propriété:

Pour un flux ϕ constant, le courant appelé I par le moteur est proportionnel au couple demandé par la charge. La charge impose donc le courant d'induit.

10. Bilan de puissance en moteur et rendement

- Puissance absorbée par l'induit et l'inducteur (Si le moteur est à aimant permanent, $U_e I_e = 0$): $P_a = UI + U_e I_e$
- Pertes Joule à l'induit: $P_{ji} = RI^2$
- Pertes Joule à l'inducteur (excitation): $P_{je} = U_e I_e = R_e I_e^2$
- Puissance électromagnétique: $P_{em} = EI = C_{em}\Omega$
- Pertes collectives (ou pertes constantes): $P_c = P_{fer} + P_{pm} = C_p\Omega$, qui représentent les pertes fer P_{fer} dans l'induit (dépendent de ϕ et Ω) et les pertes mécaniques P_{pm} (dépendent de Ω). À flux inducteur donné et tension d'induit donnée, la vitesse est à peu près constante, donc les pertes collectives sont constantes.
- Puissance utile $P_u = C_u\Omega$



Machine à courant continu

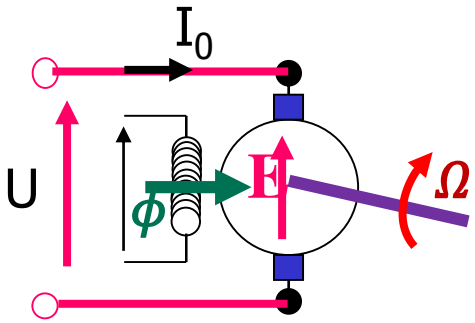
Le rendement est définit par:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - (P_j + P_{fer} + P_{pm})}{P_a}$$

- On obtient les pertes Joules en mesurant les résistances de l'induit R et de l'inducteur R_e.
- On mesure les pertes collectives $P_c = P_{fer} + P_{pm}$ par un essai à vide à vitesse de rotation nominale:
- La puissance absorbée par l'induit à vide P_0 est égale aux pertes collectives plus les pertes Joule à l'induits à vide, puisque $C_u = 0$:

$$P_0 = UI_0 = EI_0 + RI_0^2 \text{ ; } P_{em} = EI_0 = P_c = P_{fer} + P_{pm}$$

I_0 est le courant absorbé par l'induit à vide



- Donc:

$$P_c = UI_0 - RI_0^2 = P_0 - RI_0^2$$

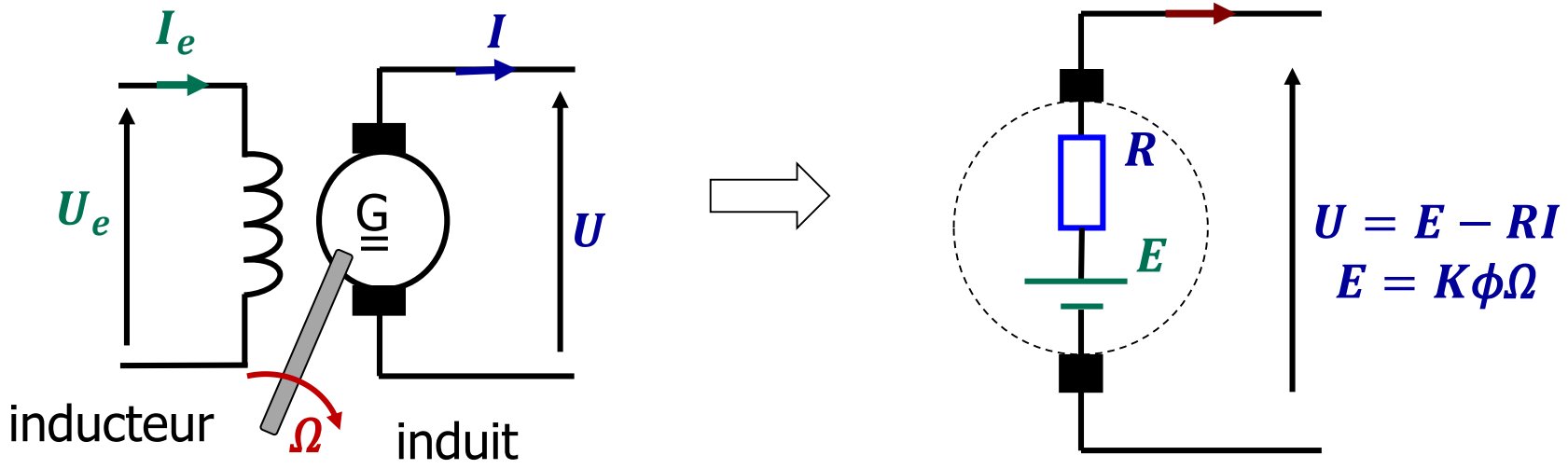
- Comme I_0 est faible, donc $R\ I_0^2$ est négligeable, alors:

$$P_c = C_p\ \Omega = EI_0 \approx UI_0$$

Remarque: En génératrice, le sens de l'écoulement de la puissance est l'inverse de celui de la marche en moteur.

11. Fonctionnement en génératrice

- La machine à courant continu est un convertisseur électromécanique réversible,
- Si on fait tourner le rotor tout en alimentant l'inducteur, une force électromotrice induite E apparait aux bornes de l'induit qui tourne dans le champ de l'inducteur. La machine transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.



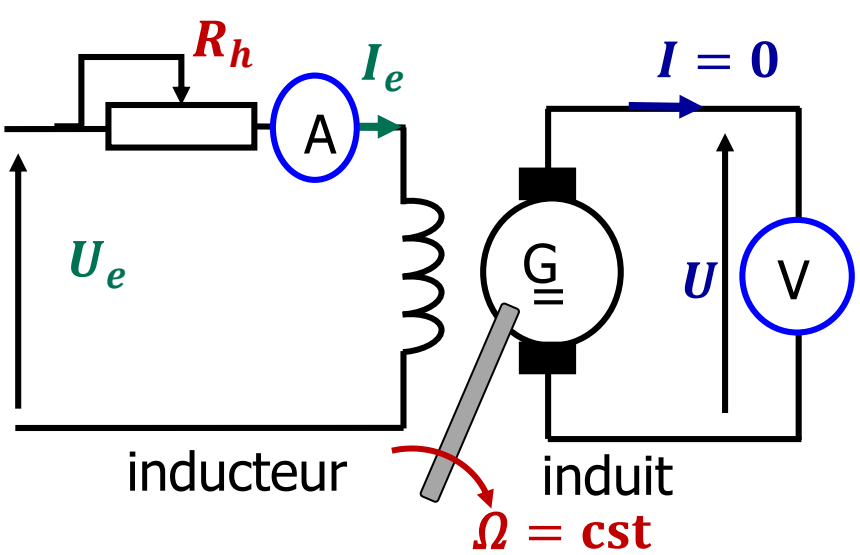
- La machine à courant continu entraînée, fonctionne en génératrice, Le signe du courant d'induit I est changé. Le couple électromagnétique C_{em} aussi change de sens et devient un couple résistant ou couple de freinage.

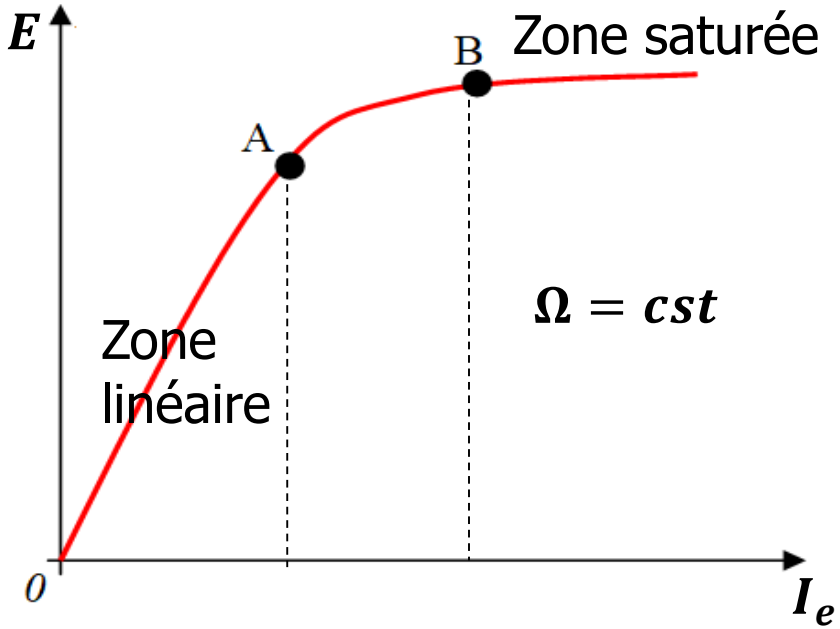
❑ Caractéristique à vide $E = f(I_e)$:

C'est la courbe expérimentale donnant, la f.e.m. E en fonction du courant d'excitation I_e, à vitesse constante $\Omega = cst$, obtenue par l'essai à vide. Elle est tracée à excitation séparée.

C'est une courbe de magnétisation: La caractéristique a la même forme que la courbe de magnétisation $\phi = f(I_e)$ du circuit magnétique de la machine, puisque $E = K\phi\Omega = K'\phi$

- À vide, le courant $I = 0$, et la tension mesurée est $U = E$

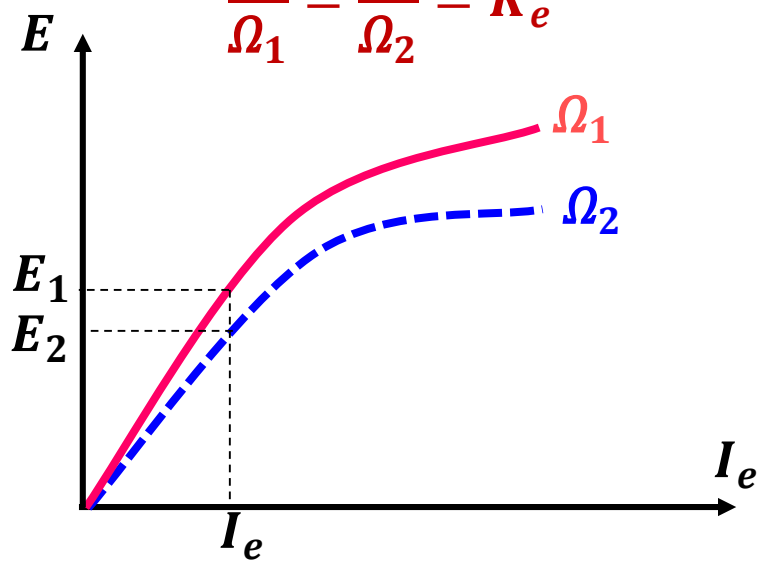




Machine à courant continu

- Cette caractéristique, montre que la zone utile de fonctionnement se trouve au voisinage de A (appelée courbe de saturation).
- Sous le point A, la machine est sous utilisée. Après le point B l'augmentation de courant I_e ne manifeste plus par un accroissement de E en raison de la saturation mais les pertes par effet joule dans le circuit inducteur continue d'augmenter ($P_{je} = R_e I_e^2$).
- Pour une valeur donnée du courant I_e, le flux ϕ reste constant et E reste proportionnel à la vitesse angulaire de rotation Ω.

$$\frac{E_1}{\Omega_1} = \frac{E_2}{\Omega_2} = K_e$$



Remarque:

Cette caractéristique est valable aussi bien en moteur qu'en génératrice.

Caractéristique en charge:

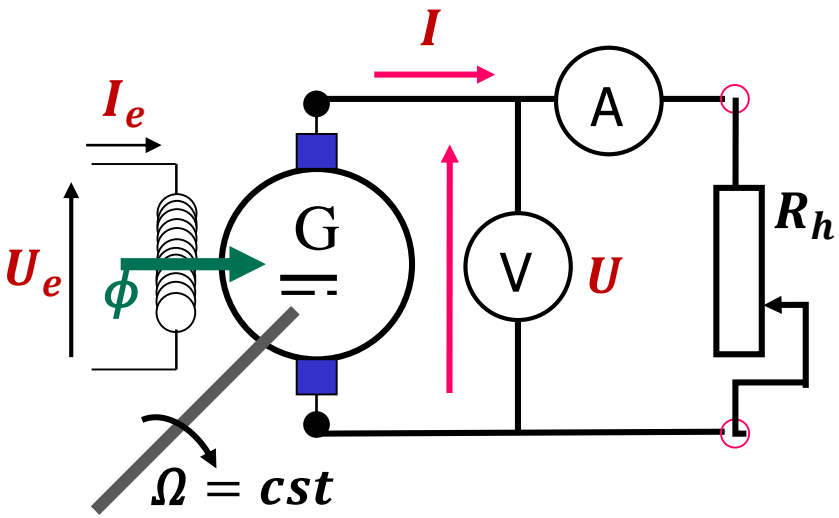
C'est la courbe $U = f(I)$, à vitesse constante $\Omega = cst$ et courant d'excitation constant $I_e = cst$. En faisant débiter la génératrice dans un rhéostat de charge.

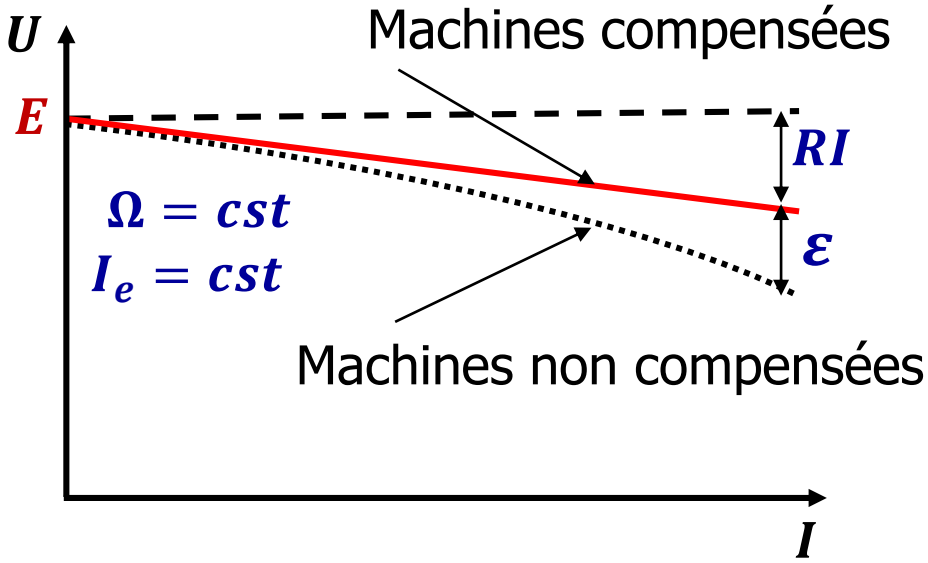
- La résistance du bobinage d'induit provoque une légère chute de tension ohmique:

$$U = E - RI$$

- Si on tenant compte de la réaction magnétique d'induit (RMI), on a une chute de tension supplémentaire $\varepsilon = RMI$:

$$U = E - RI - \varepsilon$$





12. Plaque signalétique

La plaque signalétique porte les caractéristiques nominales de la machine correspondant au fonctionnement nominal obtenu avec un service continu:

Caractéristiques mécaniques nominales:

$P_{un} = 36,3kW$

$C_{un} = 301N.m$

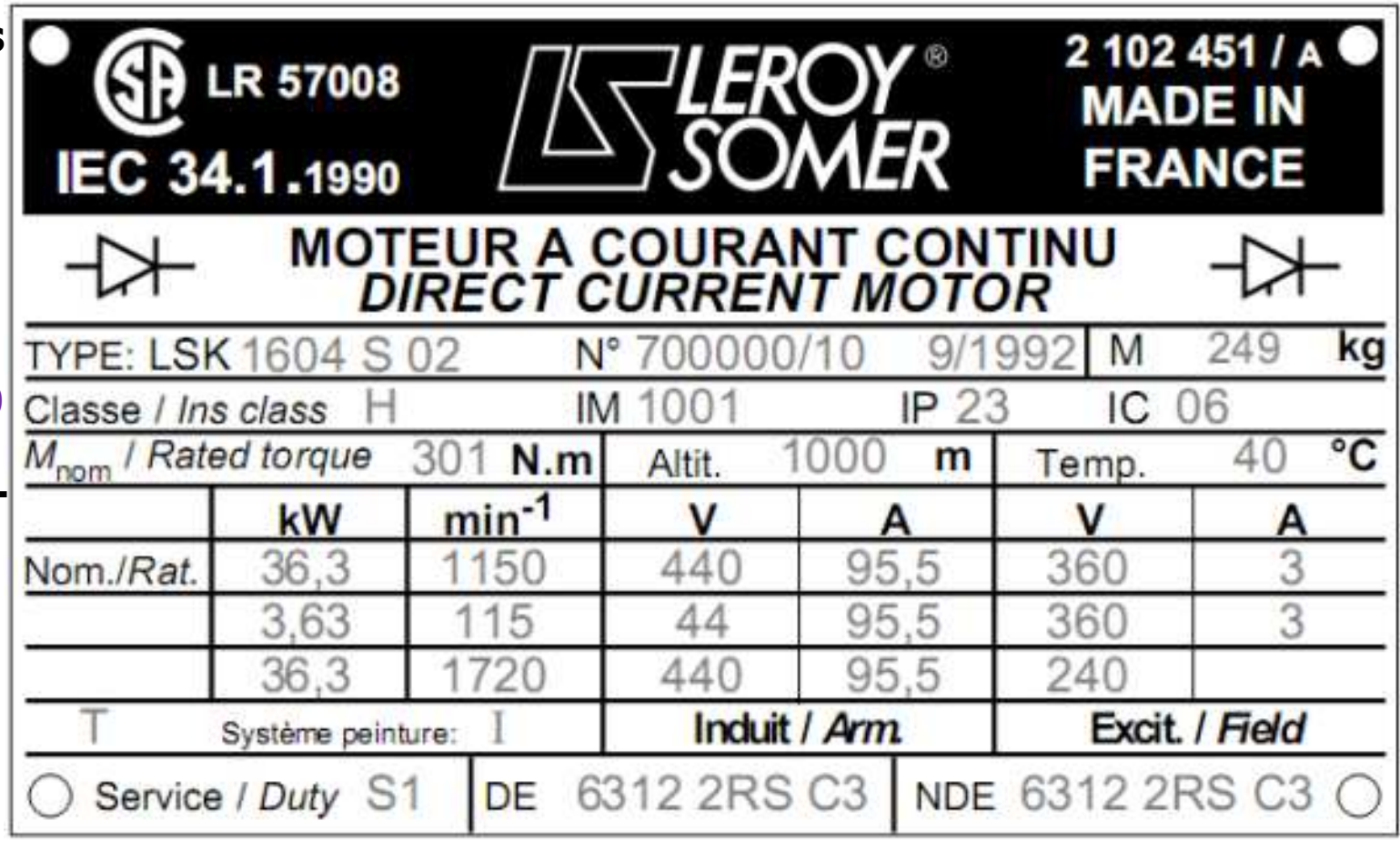
$n_n = 1150tr/min$

$P_{un} = C_{un}\Omega_n = C_{un}.2\pi n_n/60$

Caractéristiques électriques nominales:

$$\begin{cases} U_n = 440V \\ I_n = 95,5A \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{en} = 360V \\ I_{en} = 3A \end{cases}$$



LR 57008

IEC 34.1.1990

LEROY SOMER

2 102 451 / A

MADE IN FRANCE

MOTEUR A COURANT CONTINU

DIRECT CURRENT MOTOR

TYPE: LSK 1604 S 02			N° 700000/10 9/1992		M 249 kg	
Classe / *Ins class* H			IM 1001	IP 23	IC 06	
M_{nom} / *Rated torque* 301 N.m			Altit. 1000 m		Temp. 40 °C	
	kW	min^{-1}	V	A	V	A
Nom./*Rat.*	36,3	1150	440	95,5	360	3
	3,63	115	44	95,5	360	3
	36,3	1720	440	95,5	240	
T	Système peinture: I		Induit / *Arm.*		Excit. / *Field*	
Service / *Duty* S1		DE 6312 2RS C3		NDE 6312 2RS C3		

13. Caractéristiques lors du fonctionnement en moteur

- La machine à courant continu est presque toujours utilisée en moteur aux entrainements à vitesse variable.
- L'utilisateur d'un moteur s'intéresse à la caractéristique mécanique $C_u = f(\Omega)$ et la caractéristique électromécanique $C_u = f(I)$. On utilise aussi la caractéristique de vitesse $\Omega = f(I)$. Les propriétés obtenues dépendent du mode d'excitation.

Démarrage du moteur:

- Au démarrage, $\Omega = 0$; donc $E = K\phi\Omega = 0$
- Si le démarrage s'effectue sous tension nominale ($U = U_n$), le courant de démarrage imposé par la charge $I_d = (U - E)/R = U/R$ est très important (peut atteindre 10 à 20 I_n), ce qui entraîne:
  - ✓ un échauffement instantané des enroulements de l'induit,
  - ✓ une chute de tension inadmissible sur le réseau d'alimentation,
  - ✓ un couple de démarrage lui aussi très supérieur au couple nominal et risque d'endommager voire de rompre l'accouplement mécanique entre le moteur et la charge qu'il entraine.

Remarque: La pointe de courant est la même à vide qu'en charge.

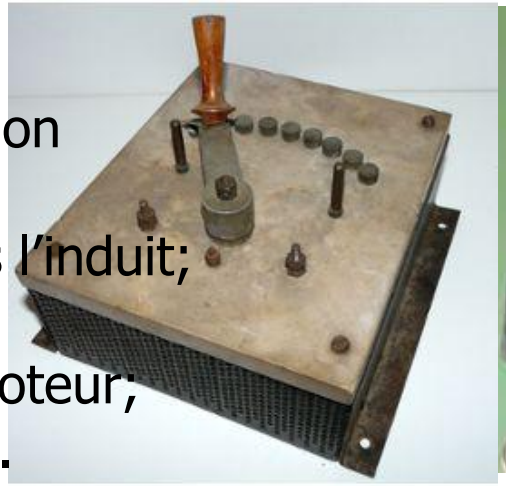
Machine à courant continu

Solution: pour limiter cette intensité à une valeur acceptable, au moment du démarrage,

- On place, on série avec l'induit un rhéostat de démarrage de résistance R_{hd}.
- Ce rhéostat est court-circuité progressivement au fur et à mesure que le moteur prend sa vitesse et que la f.c.e.m augmente.
- Pour avoir un bon couple de démarrage, on calcule R_{hd} afin que la pointe du courant acceptée $I_d = U/(R + R_{hd})$, soit de **1,5** à **2,5** fois le courant nominal I_n: $1,5I_n \leq I_d \leq 2,5I_n$
- Si le démarrage s'opère sous tension variable U, on démarre sous tension réduite (U croît progressivement).

Exemple:

- $U_n = 220V$: la tension d'alimentation nominale de l'induit;
- $I_n = 20A$: le courant nominal dans l'induit;
- $R = 1\Omega$: la résistance de l'induit;
- C_{ud}: le couple de démarrage du moteur;
- C_r: le couple imposé par la charge.



Rhéostat de démarrage

Au démarrage: $I_d = \frac{U}{R} = 240A \gg I_n$

Machine à courant continu

Dès que le moteur commence à tourner, E augmente et I diminue jusqu'à I_n.

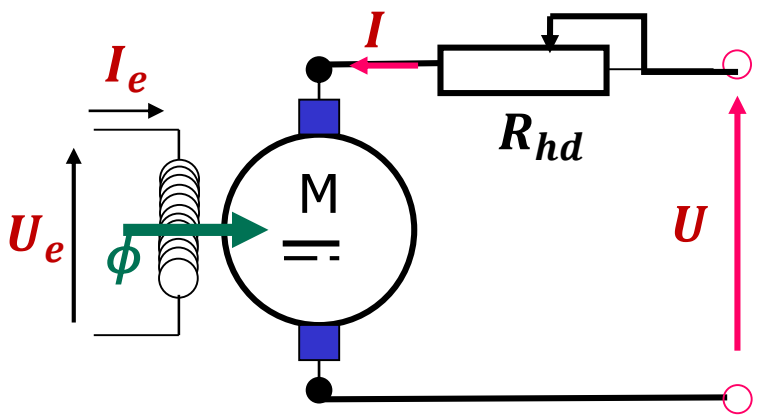
Couple de démarrage en charge:

- Pour garantir le décollage de la machine, l'intensité de démarrage doit être:

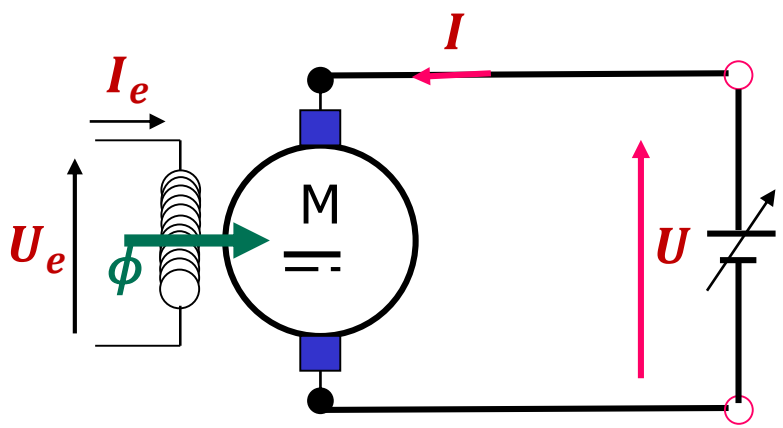
$$I_d \cong \frac{C_{ud}}{K\phi} > \frac{C_r}{K\phi} \cong I_n \Rightarrow C_{ud} > C_r \Rightarrow J\frac{d\Omega}{dt} = C_{ud} - C_r > 0 \Rightarrow \Omega \nearrow$$

Résistance de démarrage:

- Pour que le démarrage soit rapide, on accepte pendant le démarrage: $I_d = 1,5I_n \Rightarrow C_d = 1,5C_r$
- Donc la résistance du rhéostat: $R_{hd} = \frac{U}{1,5I_n} - R = 7\Omega$



démarrage avec rhéostat



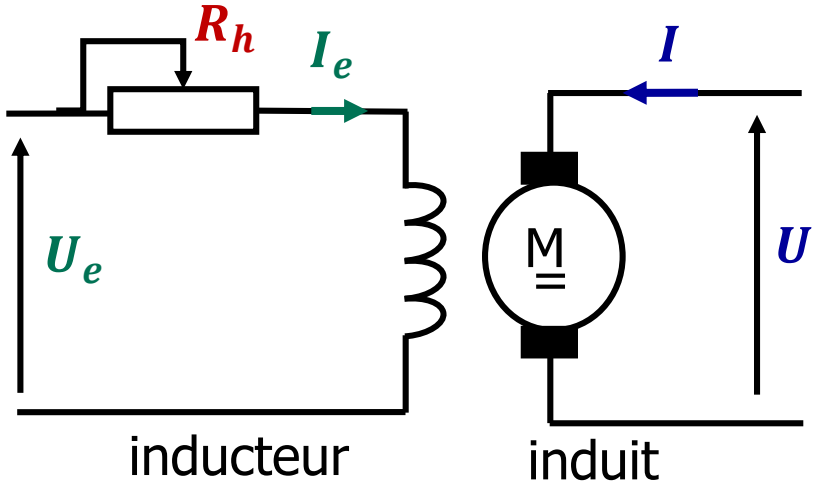
démarrage sous tension réduite

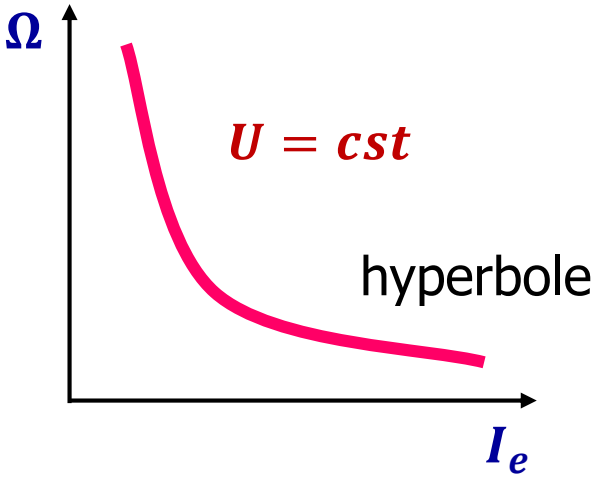
13.1 Moteur à excitation indépendante:

Fonctionnement à vide: $\Omega = f(I_e)$ **à** $U = cst$

- À vide, le moteur n'entraine aucune charge; la seule puissance absorbée sert à compenser les pertes, $P_u = 0$, $I_0 \ll I_n$, $RI_0 \ll U$,
- On obtient la vitesse à vide: $U = E + RI_0 \approx E = K\phi\Omega_0 \Rightarrow \Omega_0 = \frac{U}{K\phi}$
- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé $\phi(I_e) = \alpha I_e$
- Pour une tension d'alimentation constante $U = cst$, la vitesse de rotation à vide Ω_0 est inversement proportionnelle au flux ϕ, lequel dépend du courant d'excitation I_e.

Remarque: On peut alimenter l'induit sous tension constante et faire varier la vitesse par action sur le courant d'excitation I_e. ($I_e \searrow \Rightarrow \Omega \nearrow$; mais $C_u \searrow$).





Caractéristiques à flux constant ϕ=cst et tension constante $U = cst$

La machine est à aimant permanant ou le courant inducteur I_e est constant:

On a:

$$E = K\phi\Omega = K_e\Omega$$
$$C_{em} = K\phi I = K_c I$$

où $K_e = K_c = K\phi$;

K_e est la constante de f.c.e.m (V.s/rad) et K_c est la constante de couple (N.m/A)

❑ Caractéristiques électromécaniques: $\Omega = f(I)$; $C_{em} = g(I)$

- **Expression de la vitesse**:

On a:

$$U = E + RI = K_e\Omega + RI$$
$$\Omega = \frac{U - RI}{K_e} = \Omega_0 - \frac{RI}{K_e}$$

À vide :

$$\Omega_0 = \frac{U}{K_e} = \frac{U}{K\phi}$$

- À vide la vitesse est proportionnelle à la tension d'alimentation.

Machine à courant continu

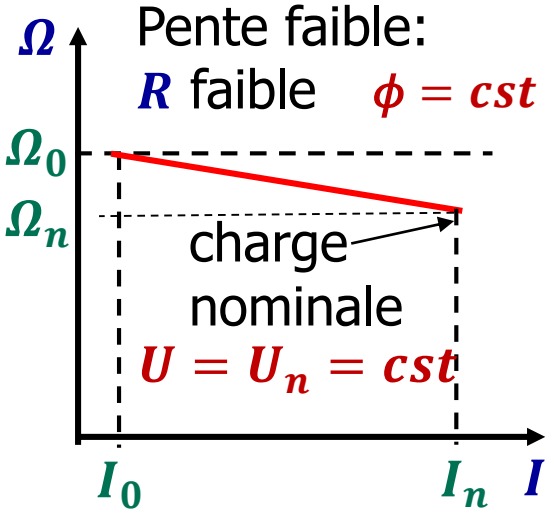
Attention:

- **À vide**, il ne faut jamais couper le courant d'excitation I_e lorsque l'induit est sous tension, car le moteur peut s'emballer. $I_e \to 0$, alors $\phi \to 0$, et $\Omega_0 \to \infty$;
- Pour assurer la tenue mécanique du rotor, $\Omega < \Omega_{max}$; où Ω_{max} est la vitesse maximale mécaniquement acceptable ou d'emballement.
- En charge, si $\phi \to 0$; $C_{em} \to 0$; $C_{em} < C_r$; $\Omega \to 0$; la machine s'arrête.

En charge:

$$\Omega = \frac{U - RI}{K_e} = \Omega_0 - \frac{RI}{K_e}$$

- Lorsque le courant d'induit I augmente, la vitesse de rotation Ω diminue peu avec la charge.
- En pratique U reste grand devant RI (la résistance d'induit est faible), la vitesse Ω est essentiellement fixée par la tension d'alimentation U.
- À tension d'induit constante $U = cst$ et excitation constante $\phi = cst$, la vitesse Ω d'un moteur à excitation séparée reste presque constante, elle varie très peu en fonction du courant imposé par la charge.



Expression du couple:

Au fur et à mesure que le couple demandé par la charge entrainée augmente, le courant d'induit augmente:

- Couple électromagnétique:

$$C_{em} = K\phi I = K_c I$$

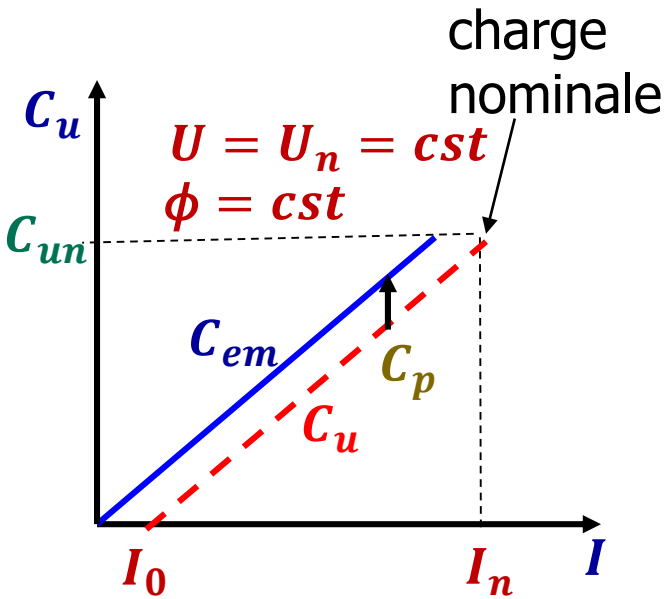
- Couple utile:

$$C_u = K\phi(I - I_0) = K_c(I - I_0)$$

- Couple de pertes:

$$C_p = C_{em} - C_u = K_c I_0$$

- Le couple électromagnétique C_{em} est proportionnel au courant I.
- Le couple utile C_u est approximativement proportionnel au courant I.
- À flux $\phi = cst$ et tension $U = cst$, la vitesse Ω varie peu avec la charge. Le couple de pertes C_p est à peu près constant quelle que soit la charge.



❑ Caractéristique mécanique: $C_u = f(\Omega)$

C'est la principale caractéristique de fonctionnement d'un moteur à courant continu. Elle s'obtient par élimination de I entre les deux caractéristiques électromécaniques.

- Le courant d'induit:

$$I = \frac{U - E}{R} = \frac{K_e}{R}(\Omega_0 - \Omega)$$

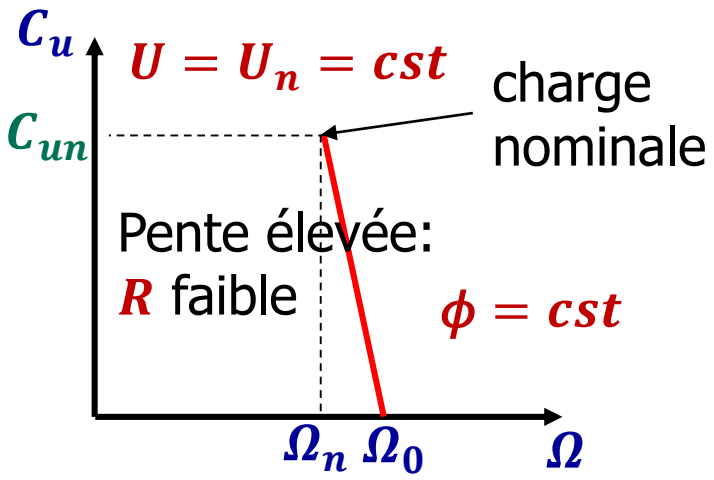
- Le couple utile:

$$C_u = K_c(I - I_0) \cong K_c I$$

- On obtient:

$$C_u = \frac{K_e K_c}{R}(\Omega_0 - \Omega)$$

- Le couple de démarrage C_{ud} $(\Omega = 0)$ est important.
- Le couple utile C_u développé par le moteur diminue au fur et à mesure que la vitesse Ω augmente.

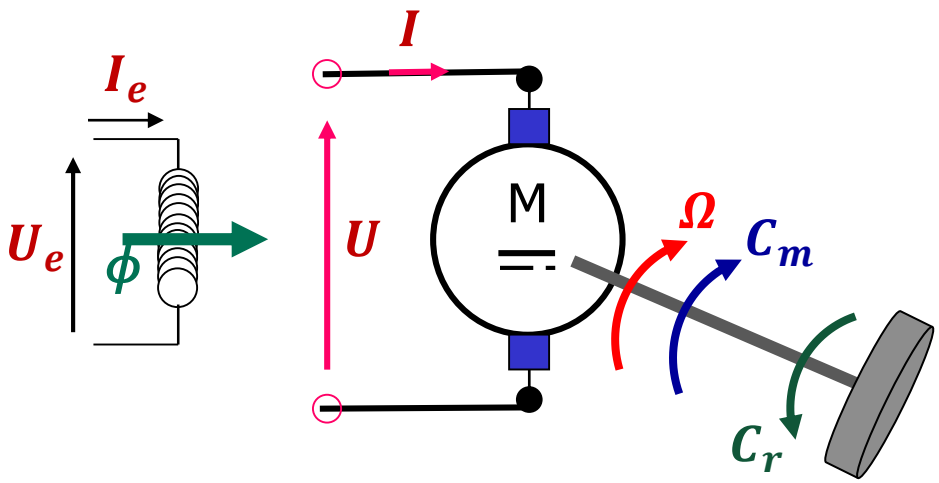


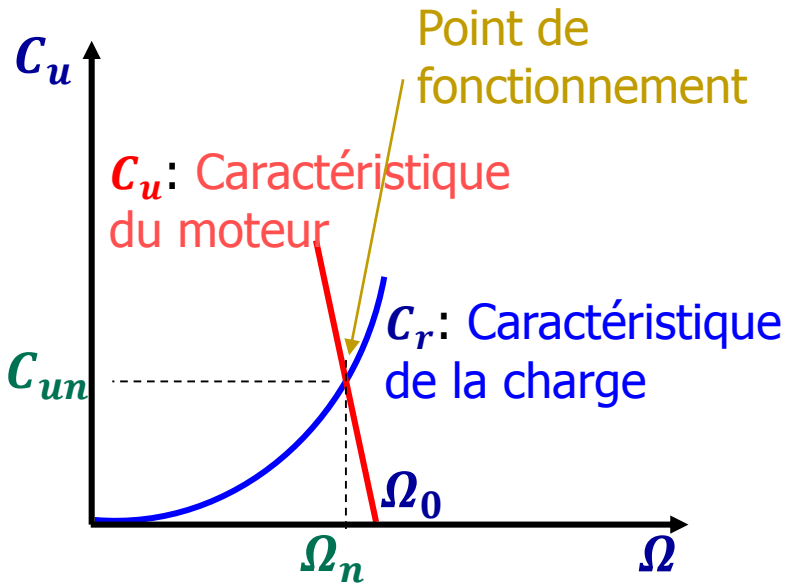
Point de fonctionnement:

- Une charge oppose au moteur un couple résistant C_r, La caractéristique mécanique de la charge $C_r = f(\Omega)$ est une donnée et elle ne dépend que de la charge.

On a: $J\frac{d\Omega}{dt} = C_u - C_r$

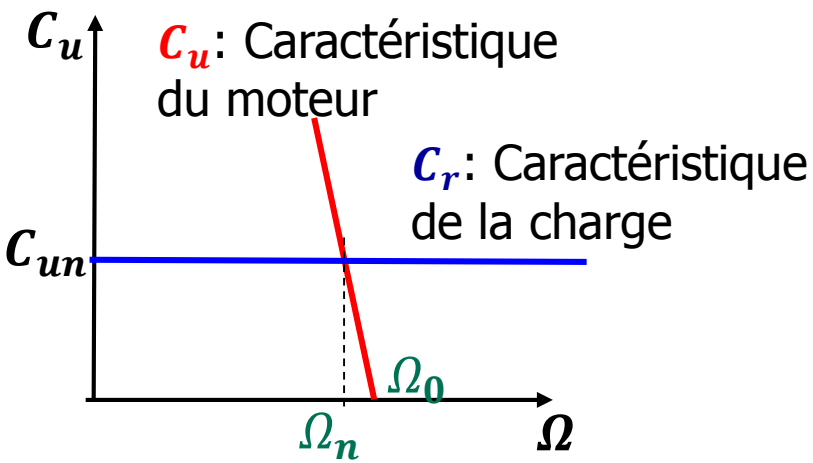
- En régime permanent $\Omega = cst$. Pour que le moteur puisse entrainer une charge, le moteur doit fournir un couple utile C_u de telle sorte qu'en régime permanent $C_u = C_r$.
- Le point de fonctionnement est donné par l'intersection des caractéristiques mécaniques du moteur et de la charge entraînée.



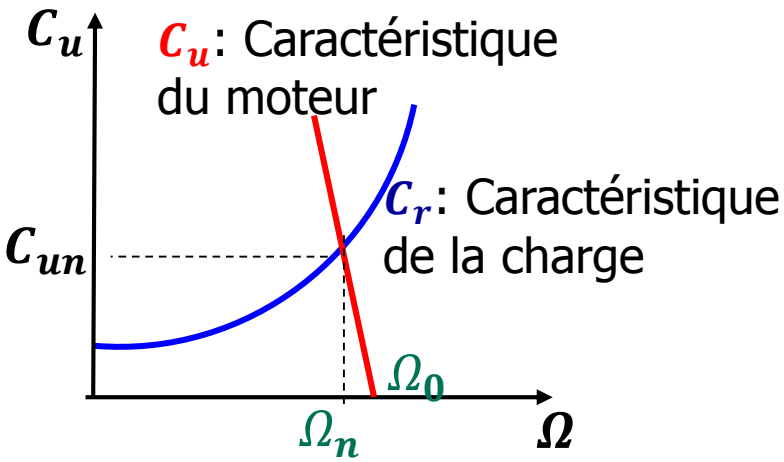


Exemples de caractéristiques mécaniques de la charge:

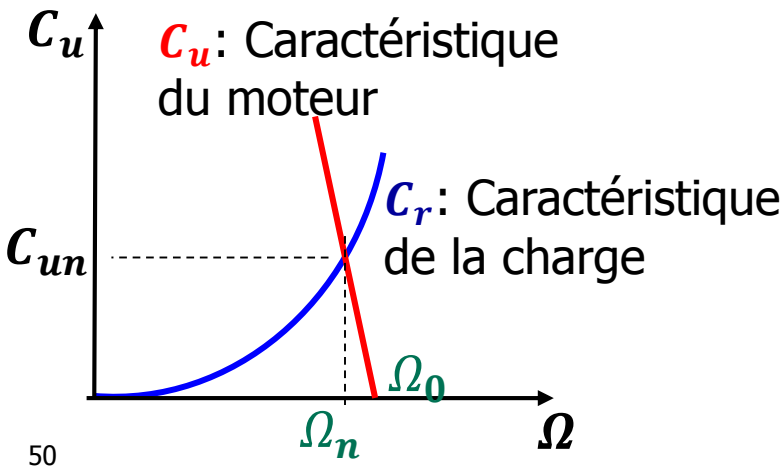
Treuil ou grue (engins de levage)



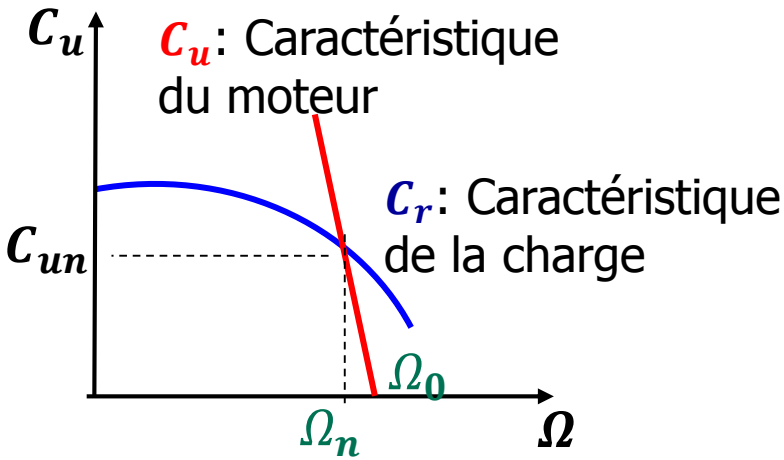
Pompe



Ventilateur



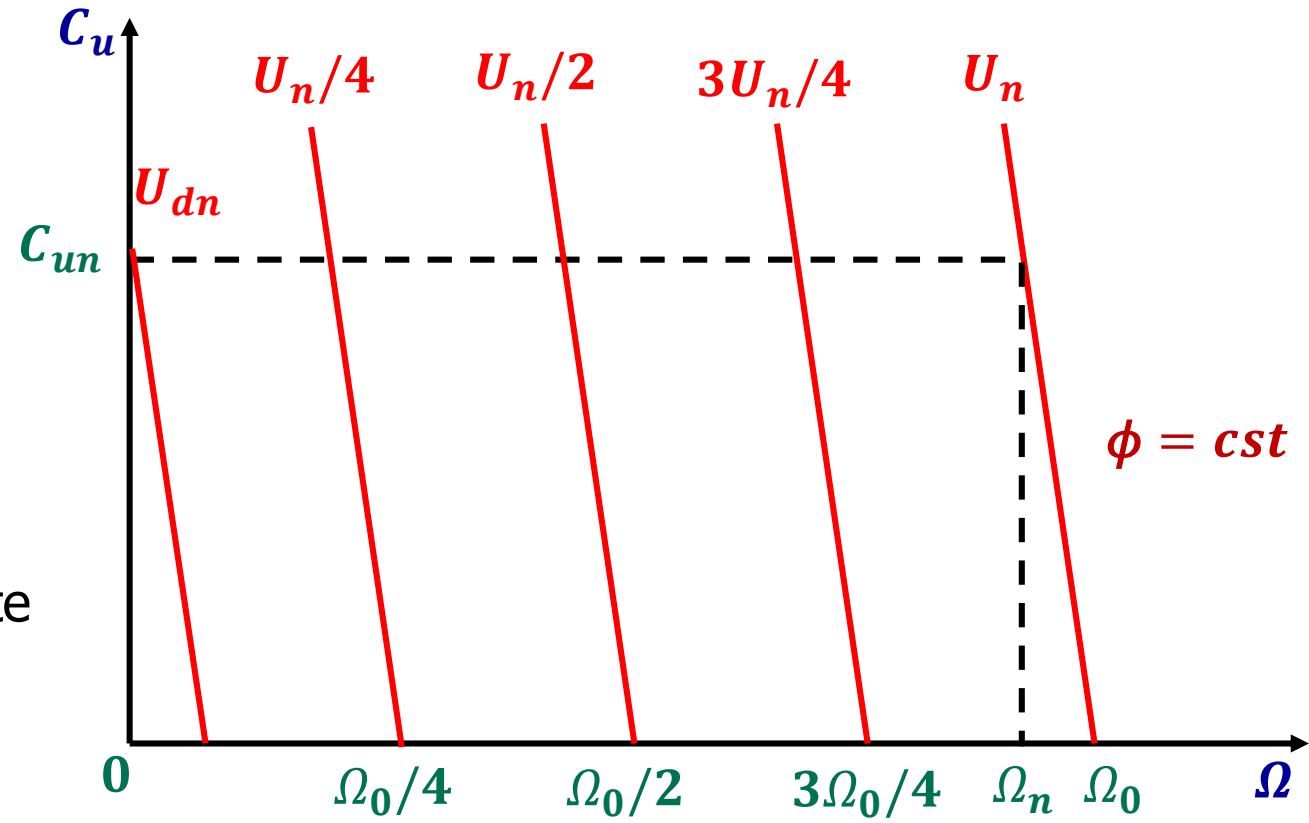
Concasseur



Caractéristique mécanique à tension variable:

- L'induit du MCC est le plus souvent alimenté par une source de tension continue réglable, appelée « variateur électronique de vitesse ».
- En faisant varier la tension d'alimentation d'induit U, on travaille sur une large plage de vitesse de rotation Ω.

Les caractéristiques mécaniques pour différentes valeurs de la tension d'alimentation sont des droites sensiblement verticales (R négligeable), s'obtiennent à partir de l'une d'entre elles par translation (la pente reste la même). La charge n'a qu'une très petite influence sur la vitesse.



Machine à courant continu

Utilisations:

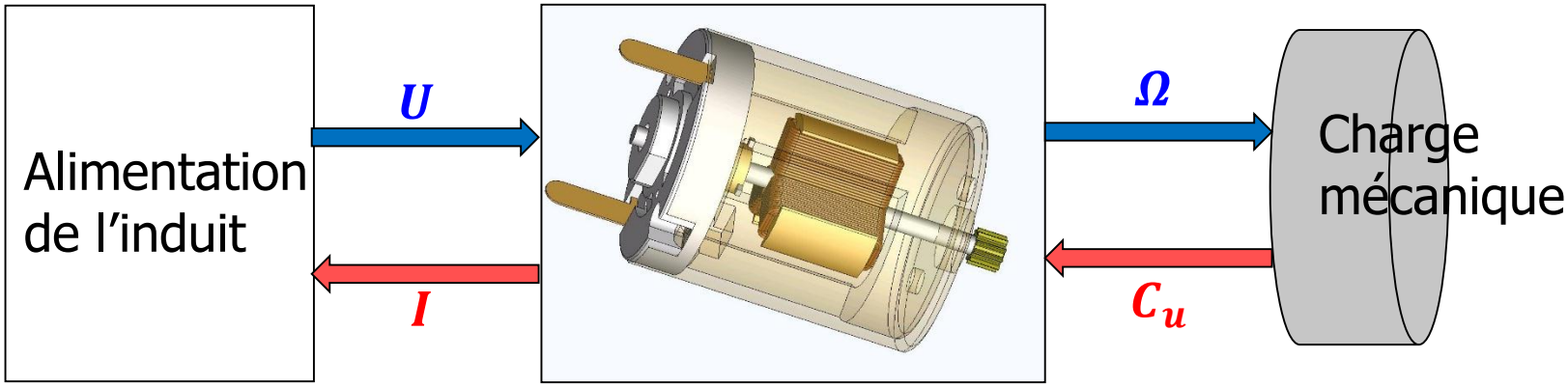
- Machines outils; pompes; ventilateurs; Appareils de levage,…

Propriétés:

- Vitesse sensiblement constante à tension d'induit constante quelle que soit la charge entrainée et facile à régler.

Conclusion:

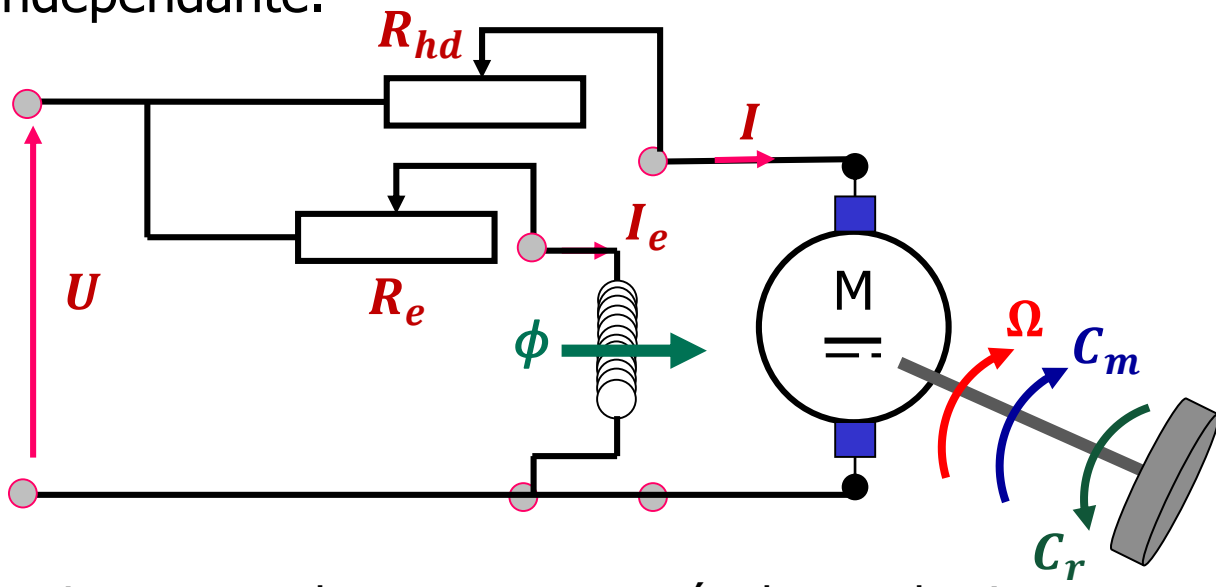
- L'alimentation du moteur impose la tension donc la vitesse de rotation,
- La charge impose le couple utile donc le courant d'induit.



13.2 Moteur à excitation shunt alimenté sous tension constante $U = Cst$

- L'inducteur est en parallèle avec l'induit et alimenté par une tension $U = U_e$, indépendante du courant I absorbé par l'induit.
- Si l'induit est alimenté sous tension $U = cst$, il est donc logique d'utiliser la même source d'alimentation pour alimenter l'inducteur et l'induit.
- Les caractéristiques d'un moteur à excitation shunt sont identiques à celle d'un moteur à excitation indépendante.

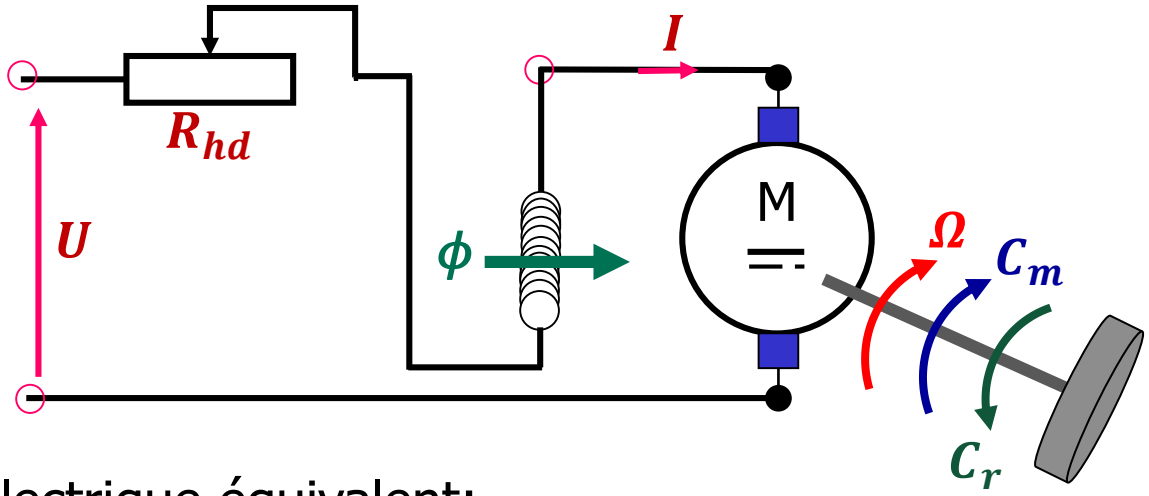
- Le rhéostat d'excitation R_e permet de faire varier la vitesse.
- Le rhéostat de démarrage permet de limiter le courant de démarrage, est éliminé en fonctionnement normal.
- Absence d'emballement à vide.



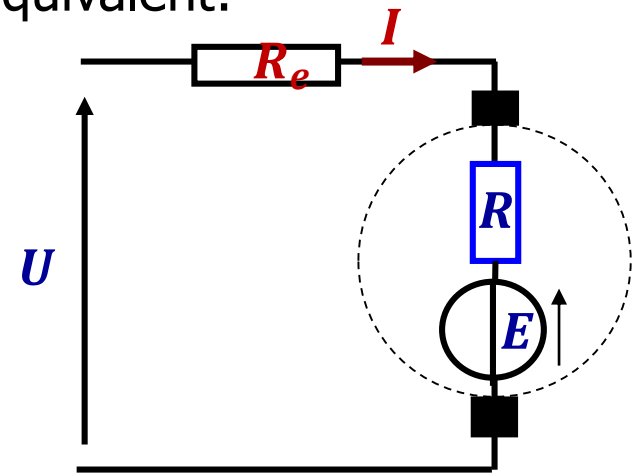
Le moteur shunt est un autorégulateur de vitesse, il convient dans les entrainements des machines dont la vitesse doit rester sensiblement constante

13.3 Moteur à excitation série

- L'inducteur et l'induit sont reliés en série et parcourus per le même courant $I = I_e$.
- Le rhéostat de démarrage et éliminé en fonctionnement normal.



- Schéma électrique équivalent:



Machine à courant continu

Équations de fonctionnement:

- Le flux magnétique est produit par le courant d'induit, il dépend donc de la charge.
- On suppose que le flux magnétique proportionnel au courant d'excitation I (circuit magnétique non saturé): $\phi(I) = \alpha I$.

Equations électromagnétiques:

$$E = K\phi(I)\Omega = kI\Omega$$
$$C_{em} = K\phi(I)I = kI^2$$
$$k = K\alpha = cst$$

Equation électrique:

$$U = E + R_t I$$
$$R_t = R + R_e$$

Expression de la vitesse:

- On a:

$$U = E + R_t I = kI\Omega + R_t I$$

- Donc:

$$\Omega = \frac{U - R_t I}{kI}$$

Machine à courant continu

Fonctionnement à vide:

- La charge impose un courant :

$$I = \sqrt{C_{em}/k}$$

- À vide, le couple résistant est nul $C_r = 0$ (ou aux faibles charges $C_r \simeq 0$), Le couple utile $C_u = C_{em} \simeq 0$ (s'il on ne tient pas compte des frottements $C_p \simeq 0$)
- Le courant consommé est très faible $I = I_0 \simeq 0$. Ce qui se traduit par un flux faible $\phi \simeq 0$, d'où une vitesse de rotation très élevée ($I \to 0 \Rightarrow \Omega \to \infty$, et la machine s'emballe et l'induit peut être détruit).

Conséquence:

- Alimenté sous tension proche du nominal U_n, le moteur série ne doit jamais fonctionner à vide au risque de s'emballer. **Il doit nécessairement démarrer en charge.**

Démarrage:

- Sous la tension nominale $U = U_n$, le moteur absorbe au démarrage ($\Omega = 0 \Rightarrow E = 0$) le courant: $I_d = U_n/R_t \gg I_n$
- Pour éviter la pointe de courant au démarrage, il faut:
  - ✓ Démarrer sous tension d'alimentation réduite.
  - ✓ Démarrer avec un rhéostat de démarrage.

Couple de démarrage:

On suppose qu'on limite la pointe de courant au démarrage à: $I_d = 1,5I_n$, alors:

- En excitation indépendante :

$$C_{emd} = K\phi I_d = 1,5K\phi I_n = 1,5C_{emn}$$

- En excitation série :

$$C_{emd} = kI_d^2 = k(1,5I_n)^2 = 2,25kI_n^2 = 2,25C_{emn}$$

Conséquence:

Pour les même conditions, le moteur série possède un meilleur couple de démarrage que le moteur à excitation indépendante.

Caractéristique de vitesse: $\Omega = f(I)$

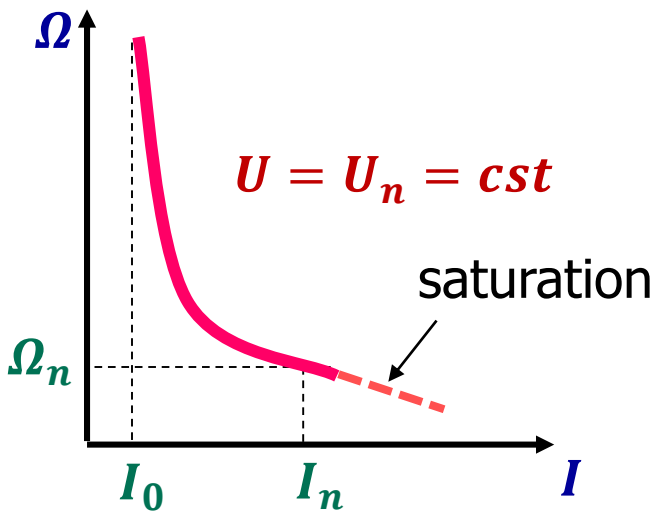
- A tension d'alimentation constante $U = U_n$, la charge impose le courant I qui augmente avec le couple résistant de la charge:
- Pour les faibles valeurs de I, le flux ϕ est proportionnel à I (le circuit magnétique n'est pas saturé); $\phi(I) = \alpha I$ alors:

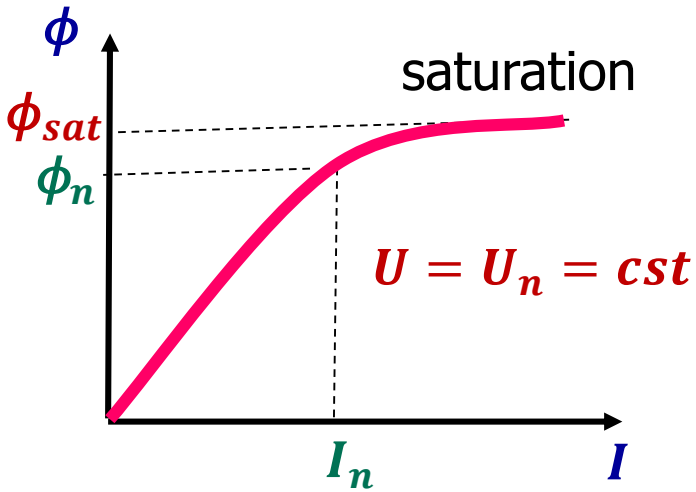
$$\Omega = \frac{U - R_t I}{K\phi(I)} = \frac{U - R_t I}{kI}$$ Fonction homographique

Machine à courant continu

- Si I augmente fortement, il y a saturation du circuit magnétique, le flux magnétique devient donc constant $\phi(I) = \phi_{sat} = cst$;
- Alors:

$$\Omega = \frac{U - R_t I}{K\phi_{sat}}$$ Fonction affine





Conséquence:

- La vitesse de rotation dépend fortement de la charge; elle augmente rapidement quand la charge diminue.
- Le moteur série ralentit fortement avec la charge.

Machine à courant continu

Caractéristique de couple: $C_{em} = f(I)$

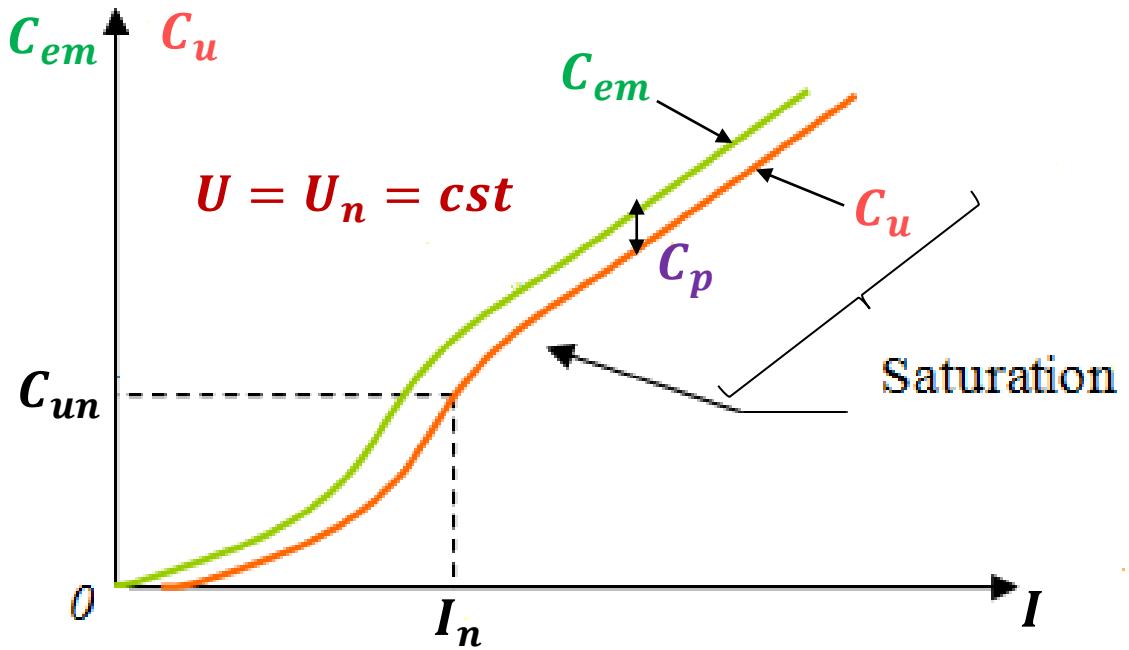
- Aux faibles charges (I faible); le circuit magnétique n'est pas saturé, $\phi(I) = \alpha I$:

$$C_{em} = K\phi I = kI^2$$ Fonction parabolique

- Aux fortes charges (I élevé); le circuit magnétique est saturé, le flux est constant $\phi(I) = \phi_{sat} = cst$:

$$C_{em} = K\phi I = k'I$$ Fonction affine

- Si on suppose le couple de pertes constant, alors $C_u = C_{em} - C_p$ à la même allure de C_{em}.



Caractéristique mécanique: $C_u = f(\Omega)$

Fonctionnement sous tension nominale constante: $U = U_n$

Si on néglige les différentes pertes:

- Aux faibles charges (circuit magnétique non saturé):

$$U = E = K\phi(I)\Omega = k\Omega I \quad ; \quad C_u = K\phi(I)I = kI^2 \quad ; \quad C_u = \frac{U^2}{k\,\Omega^2} = \frac{Cte}{\Omega^2}$$

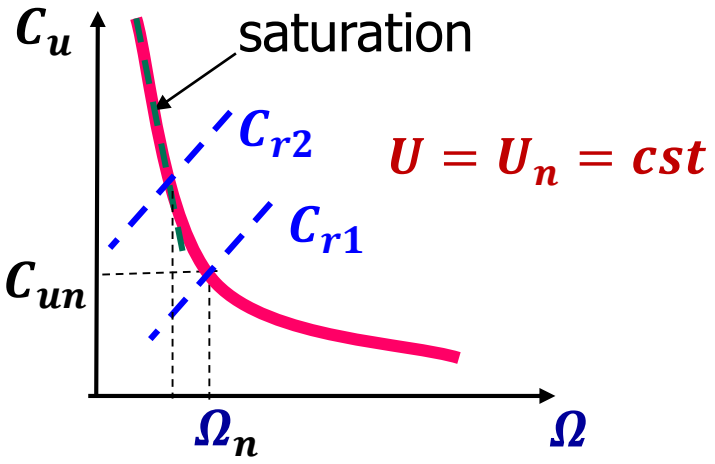
- Aux fortes charges (circuit magnétique non saturé), on revient aux équations du moteur à excitation indépendante:

Conclusion:

- Le moteur à excitation série peut développer un très fort couple en particulier à basse vitesse.
- Si $C_r \nearrow \Rightarrow \Omega \searrow \Rightarrow P_u = C_u\Omega \simeq cst$. Le moteur série est dit **autorégulateur de puissance**.

Remarque:

- Couple moteur élevé au démarrage,
  - ✓ Exemple fort couple + faible vitesse (traction).
  - ✓ Exemple faible couple + forte vitesse (centrifugeuse).

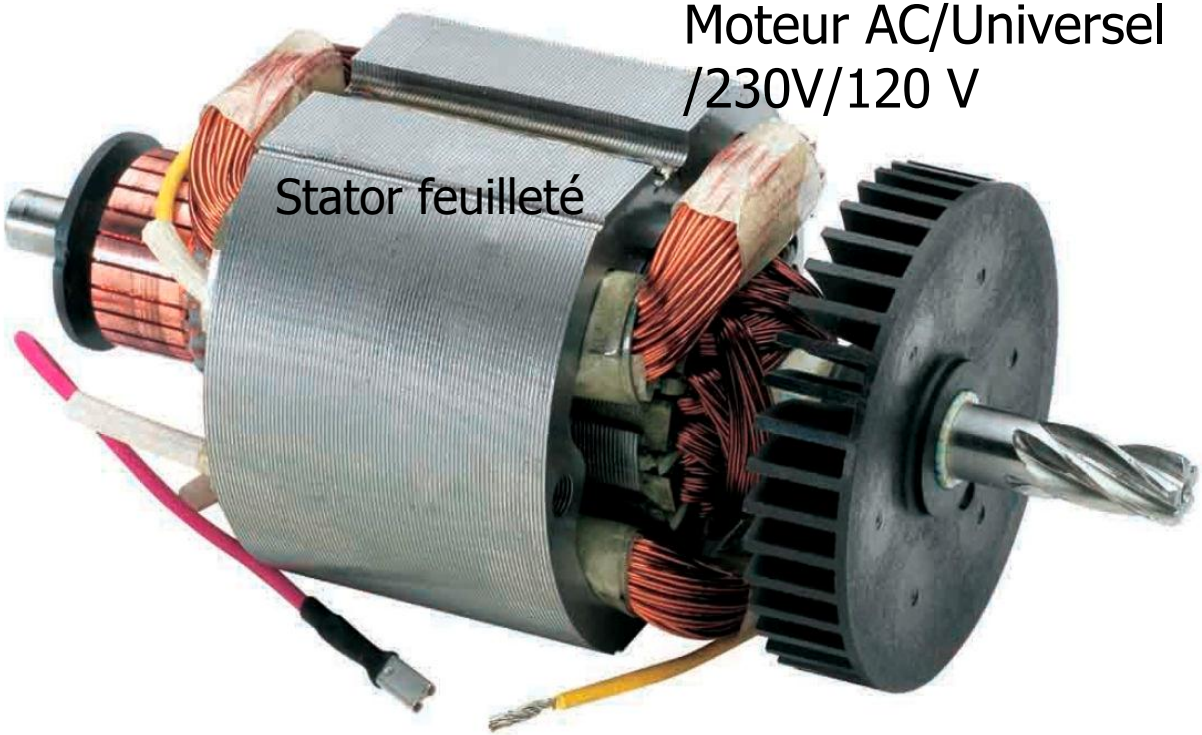


Machine à courant continu

Moteur universel.

- Le couple du moteur série est proportionnel au carré du courant d'alimentation, donc toujours de même signe. Il peut fonctionner aussi en régime sinusoïdal.
- Le stator d'un tel moteur est feuilleté pour limiter les pertes.
- Il est très utilisé pour les petites puissances, applications en électroménager (mixeurs, ventilateurs, perceuses,…) car sa vitesse n'est pas liée à la fréquence du réseau.

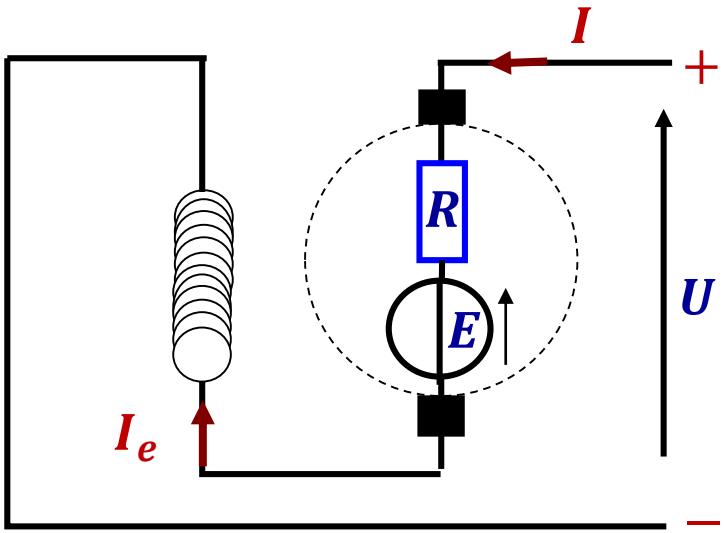
Moteur universel pour mélangeur 230V

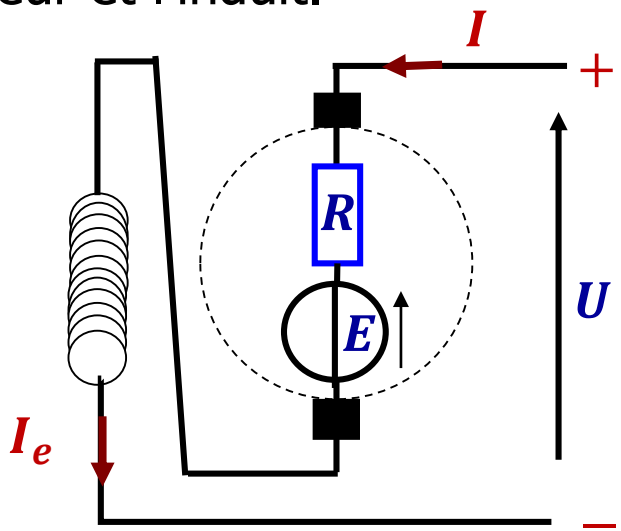


Moteur AC/Universel /230V/120 V

Sens de rotation:

- Pour changer le sens de rotation d'un moteur à courant continu, il faut inverser soit I, soit I_e.
- Dans le moteur à excitation série $I = I_e$. Pour changer son sens de rotation il faut inverser la connexion entre l'inducteur et l'induit.





Bilan de puissance: Il s'effectue comme pour le moteur à excitation indépendante avec les différences suivante :

- Puissance absorbée (une seule source) $P_a = UI$. Pertes Joule: $P_j = R_t I^2$.
- Les pertes collectives sont déterminées lors d'un essai en moteur à excitation indépendante, avec les conditions nominales de flux et de vitesse.

Avantages du moteur série:

- Couple important (en particulier au démarrage).
- Réduit les appels de courant lors d'une augmentation de couple (puisque $I \cong \sqrt{C_u/k}$). Il supporte bien les surcharges.

Inconvénients du moteur série:

- La vitesse de rotation dépend fortement de la charge (elle augmente rapidement quand la charge diminue).
- le moteur s'emballe à vide.

Applications pratiques:

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

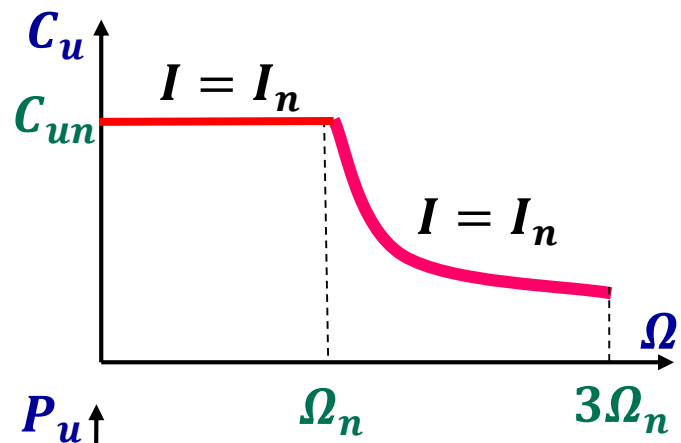
- Démarreur (automobile ...)
- Traction électrique (locomotive, train, métro ...)
- Appareils de levage ...
- Ventilateurs, pompes centrifuges, compresseurs, pompes à piston

13.4 Fonctionnement à couple constant ou à puissance constante

Fonctionnement à couple constant:

À flux constant $\phi = \phi_n$, par réglage de la tension d'induit entre 0 et U_n, un moteur à courant continu peut fonctionner en régime permanent, sans dépasser le courant nominal I_n à couple constant pour toute vitesse entre 0 et Ω_n.

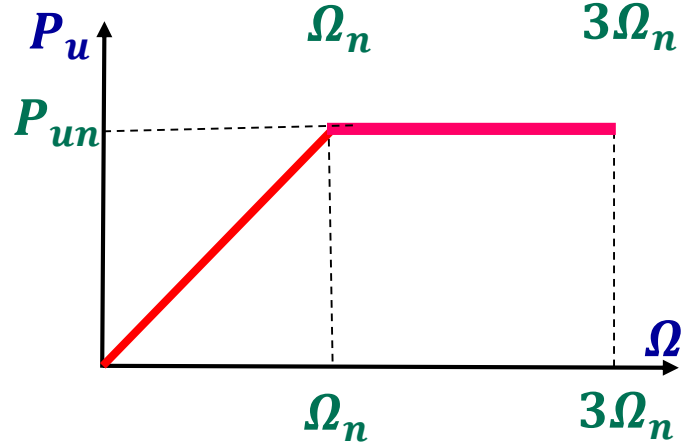
$$C_{un} = K\phi_n I_n = cte \; ; \quad P_u = C_{un}\Omega$$



Fonctionnement à puissance constante:

À tension constante $U = U_n$, par réglage du flux entre ϕ_n et $\phi_n/3$, un moteur à courant continu peut fonctionner en régime permanent, sans dépasser le courant nominal I_n à puissance constante pour toute vitesse entre Ω_n et $3\Omega_n$.

$$P_{un} = C_u\Omega \cong U_n I_n = cte \; ; \; C_{un} \cong U_n I_n/\Omega$$

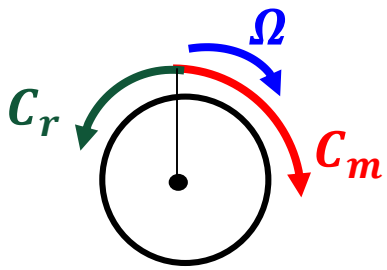
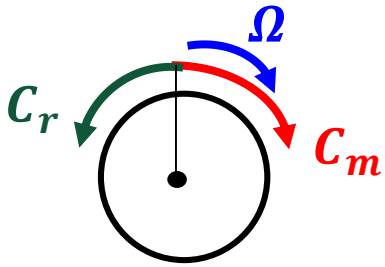
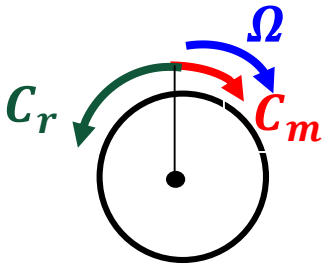


Remarque: un moteur shunt alimenté sous tension constante, ne peut fonctionner en régime établi que dans la zone à puissance constante. Donc dans une plage de vitesse assez réduite.

$C_u = cte$	$P_u = cte$
$\phi = \phi_n$=cte $0 \leq U \leq U_n$	$U = U_n$=cte $\phi_n/3 \leq \phi \leq \phi_n$

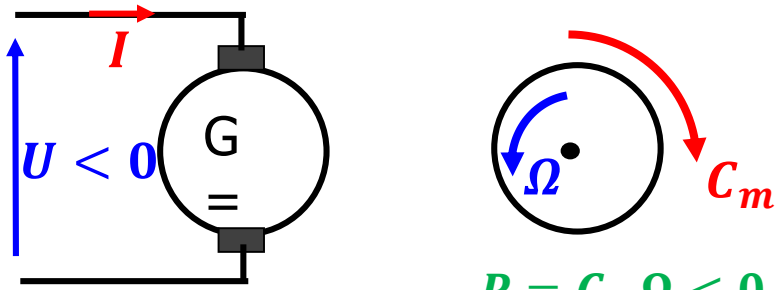
14. Quadrants de fonctionnement

Phases du mouvement d'une charge: Les variateurs de vitesse actuels permettent l'accélération et la décélération contrôlée, la variation et la régulation de vitesse, l'inversion du sens de marche, le freinage d'arrêt.

Accélération: lors du démarrage	Régime établi: lorsque la vitesse est stabilisée	Décélération: lors du ralentissement précèdent l'arrêt
$J\frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r > 0$ 	$J\frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r = 0$ 	$J\frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r < 0$  $C_m = 0$; ou $C_m < C_r$; ou $C_m = -C_f < 0$ C_f: couple de freinage

Machine à courant continu

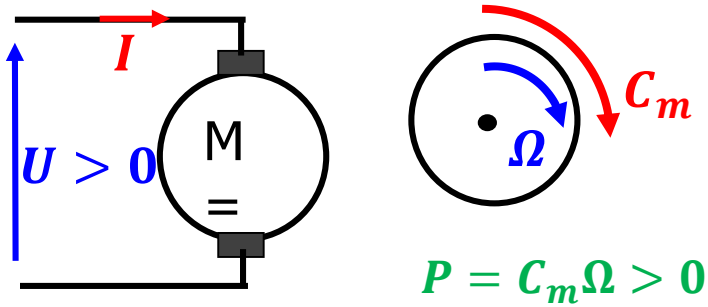
Il existe pour un moteur accouplé à une charge quatre quadrants de fonctionnement:



$P = C_m\Omega < 0$

Quadrant 4:

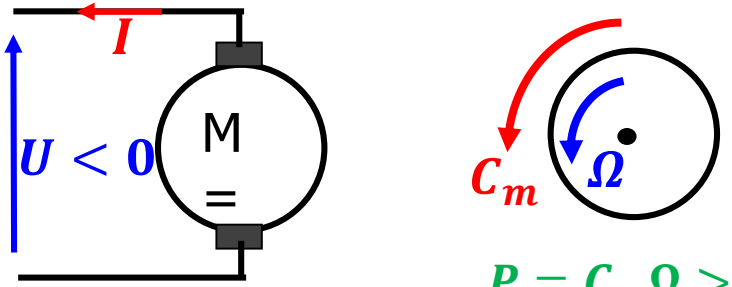
- Freinage en marche arrière $\Omega < 0$
- Moteur fournit un couple de freinage C_f
- Puissance mécanique fournie par la charge



$P = C_m\Omega > 0$

Quadrant 1:

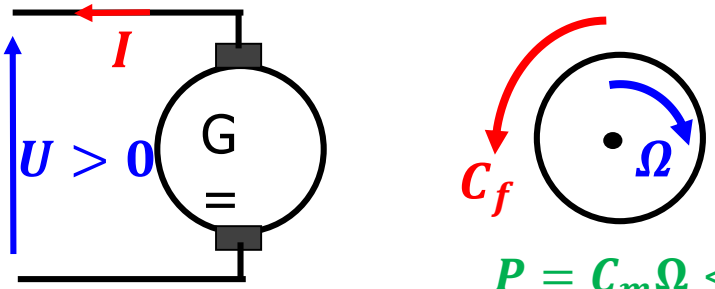
- Moteur en marche avant $\Omega > 0$
- Moteur fournit un couple moteur $C_m > 0$
- Puissance mécanique fournie à la charge



$P = C_m\Omega > 0$

Quadrant 3:

- Moteur en marche arrière $\Omega < 0$
- Moteur fournit un couple moteur C_m
- Puissance mécanique fournie à la charge



$P = C_m\Omega < 0$

Quadrant 2:

- Freinage en marche avant $\Omega > 0$
- Moteur fournit un couple de freinage C_f
- Puissance mécanique fournie par la charge

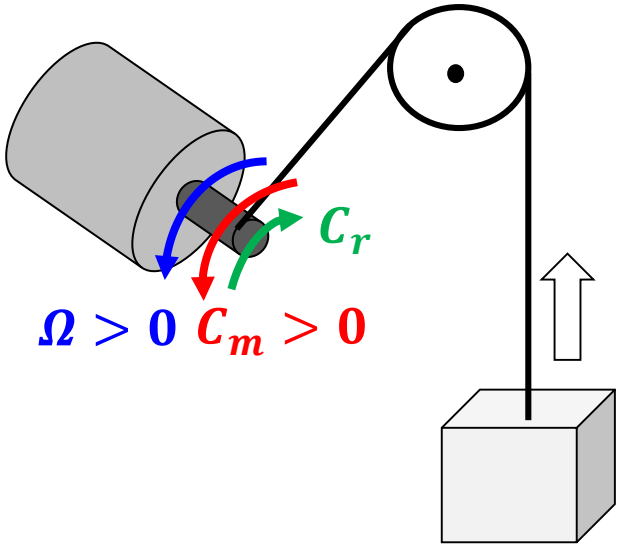
Machine à courant continu

Remarque:

- Pour passer des quadrants 1 et 4 (ou des quadrants 2 et 3), la source d'alimentation doit être réversible en tension.
- Pour passer des quadrants 1 à 2 (ou des quadrants 3 et 4), la source d'alimentation dot être réversible en courant.
- Les quadrants de fonctionnement dépondent du type de moteur (séparé ou série); du mode de réglage (action sur I_e ou sur U) et du type d'alimentation (réversible ou non).

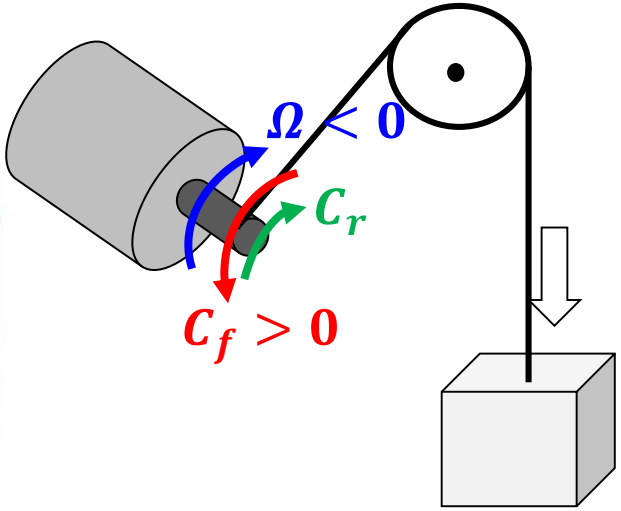
Exemple :

Quadrant 1: Montée = moteur AV



treuil

Quadrant 4: descente = freinage AR



❑ Trajets possibles du point de fonctionnement

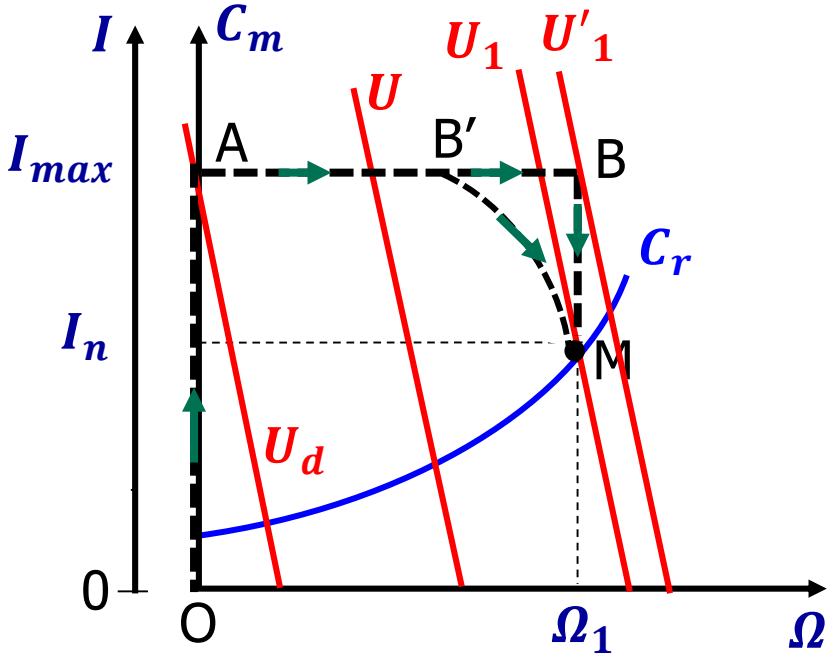
❑ Démarrage rapide:

Pour démarrer rapidement le groupe moteur-charge entrainée et l'amener à la vitesse Ω_1.

- On applique la tension $U = U_d$ au démarrage, qui pour $\Omega = 0$; $I = I_{max}$.
- Puis on augmente U au fur et à mesure que Ω croit pour maintenir $I = I_{max}$, de façon à satisfaire à tout instant:

$$U = E + RI_{max} = K\phi\Omega + RI_{max}$$

- Arrivé à la vitesse Ω_1 sous la tension U'_1. On réduit légèrement U pour passer à U_1 qui en régime établi, donne la vitesse Ω_1.



Remarque:

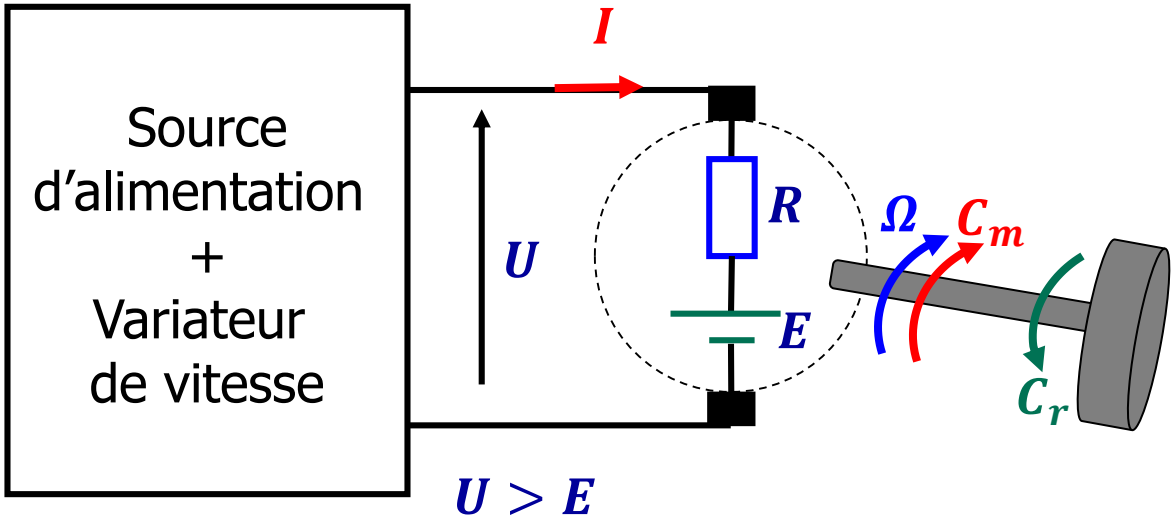
- Au trajet OABM du point de fonctionnement, on substitue le trajet OAB'M.
- La plupart des variateurs de vitesse comportent deux boucles de régulation en cascade (une boucle de vitesse et une boucle de courant).

❑ Freinage électrique:

- Lors des freinages (marche en génératrice), le moteur se comporte en frein convertissant la puissance mécanique fournie par la charge entraînante, en puissance électrique renvoyée vers l'alimentation (freinage par récupération) ou dissipée dans des résistances (freinage rhéostatique).
- Dans de nombreuses applications (traction, levage), on préfère le freinage électrique que le freinage par systèmes mécaniques.

Exemple:

Pour arrêter un moteur entrainant une charge de couple résistant C_r:



Machine à courant continu

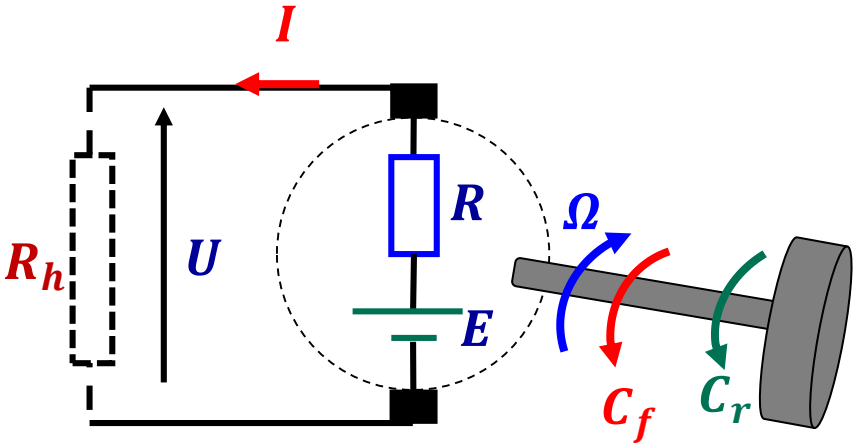
- On peut couper l'alimentation $I = 0 \Rightarrow C_m = 0$; l'ensemble ralentit sous l'effet de C_r: $J\frac{d\Omega}{dt} = -C_r < 0$
- Pour arrêter rapidement le groupe, il faut permettre à la machine de fonctionner en génératrice et de délivrer de la puissance en inversant le sens du courant d'induit I. Dans ce cas C_m change de sens et devient un couple de freinage C_f: $J\frac{d\Omega}{dt} = -C_f - C_r < 0$

❑ Freinage rhéostatique:

- On coupe la source d'alimentation et on connecte l'induit sur un rhéostat R_h
- L'énergie est dissipée dans le rhéostat
- Le couple de freinage:

$$C_f = K\phi I = K\phi\frac{E}{R + R_h} = \frac{(K\phi)^2}{R + R_h}\Omega$$

$$\Rightarrow C_f = k\Omega$$



(analogue à un couple de frottement visqueux), à l'arrêt $C_f = 0$.

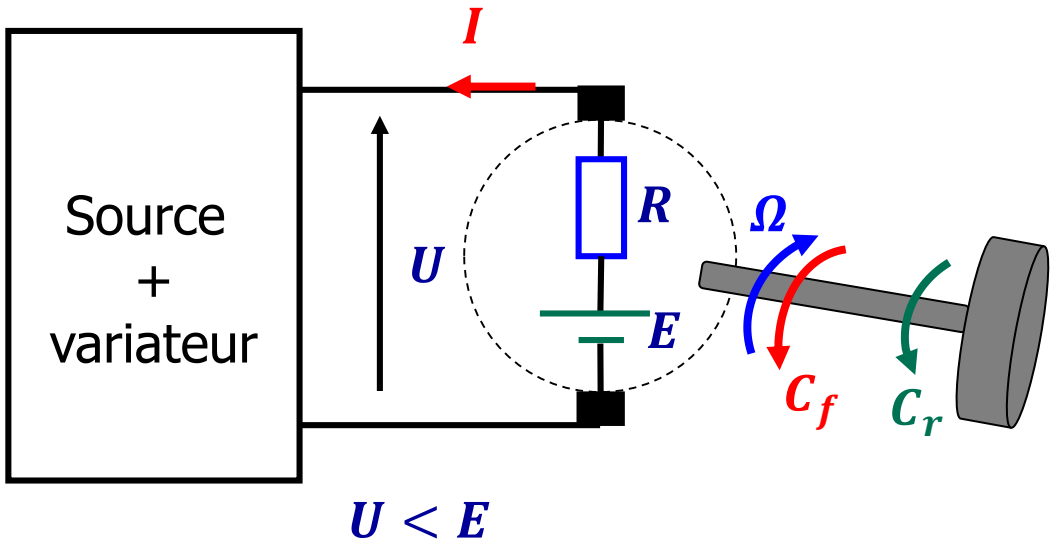
- Ce procédé est simple, mais ne permet pas de stopper complètement la machine: nécessite un dispositif de blocage mécanique (frein mécanique).

Freinage par récupération d'énergie:

- On conserve la source, mais on diminue la tension U pour l'inversion du courant I

$$U = E + RI \Rightarrow I = \frac{U - E}{R} < 0$$

- L'énergie est renvoyée sur la source d'alimentation ou stockée dans des condensateurs suivant la structure du variateur de vitesse.
- La source d'alimentation doit être réversible en courant, c'est la réversibilité la plus rencontrée.



Machine à courant continu

Pour arrêter rapidement le groupe moteur-charge fonctionnant au point M sous la tension U_1, il faut freiner:

- On réduit brusquement la tension à partir de la valeur U_1 (la vitesse Ω est pratiquement inchangée):

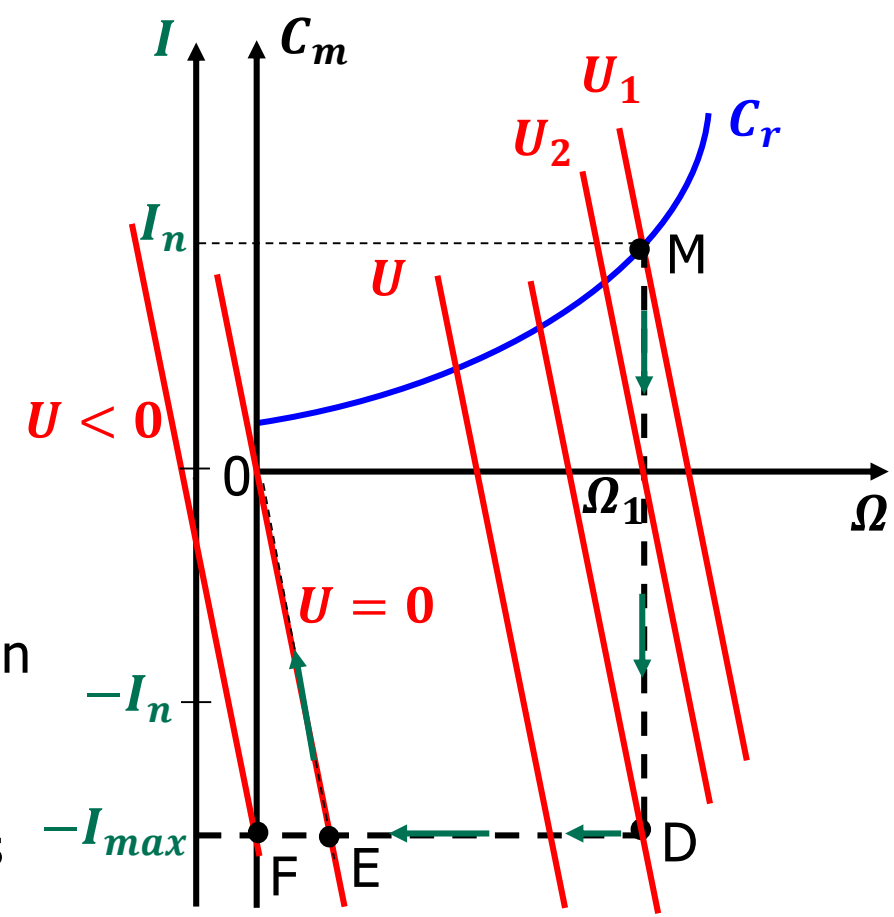
$$U = U_2 \Rightarrow I = 0$$

$U < U_2 \Rightarrow I < 0 \Rightarrow C_m < 0$: freinage

- Pour obtenir un freinage le plus énergique possible, c-à-d à courant $I = -I_{max}$ tout au long du ralentissement, il suffit que la tension reste liée à Ω par la relation:

$$U = E + R(-I_{max}) = K\phi\Omega - RI_{max}$$

- Si on veut freiner à couple maximum jusqu'à $\Omega = 0$; il faut inverser la tension ($U < 0$). il faut alors couper l'alimentation quand on arrive à $\Omega = 0$ (point F). Sinon le groupe part en sens inverse.



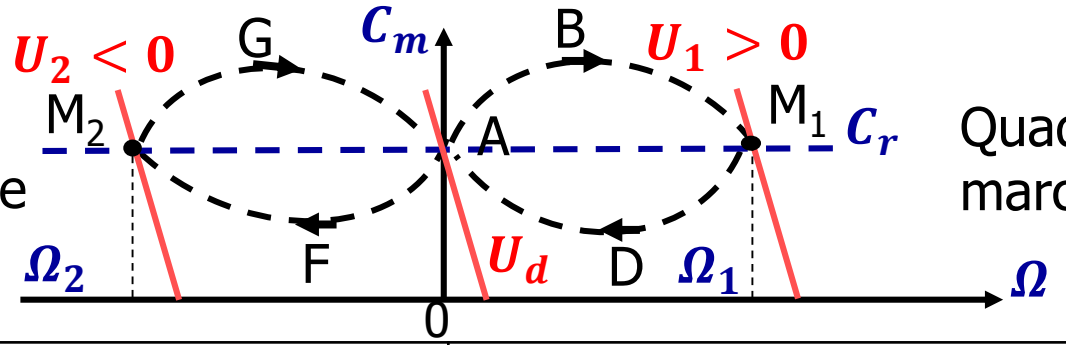
Machine à courant continu

Si le variateur de vitesse qui doit être réversible en courant ($I > 0$ ou < 0) n'est pas réversible en tension, le freinage à couple maximum n'est possible que jusqu'au point E. Le point de fonctionnement suit le trajet MDEO.

Freinage à vitesse constante:

En levage, le couple C_r de la charge soulevée est constant.

Quadrant 4: marche en freinage



Quadrant 1: marche en moteur

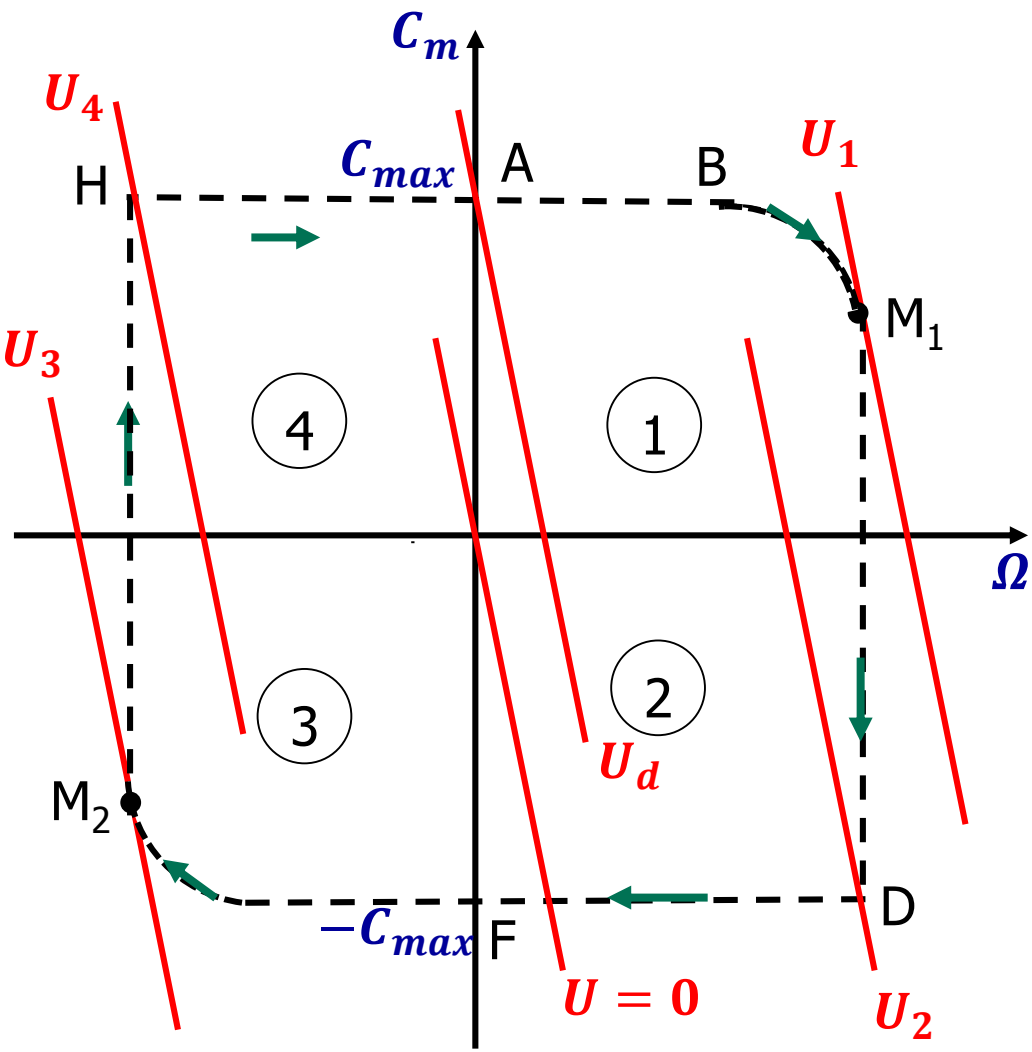
Phase de descente	Phase de montée
• Arrêt (point A): $U = U_d$, • Phase d'accélération: trajet AFM_2. U passe de $U_d > 0$ à $U_2 < 0$, • Descente à vitesse constante (point M_2) • Phase de décélération: trajet M_2GA. U augmente et passe de U_2 à U_d, • Arrêt en position basse.	• Arrêt (point A): $U = U_d$, • Phase d'accélération: trajet ABM_1. U passe de U_d à $U_1 > 0$, • Montée à vitesse constante (point M_1) • Phase de décélération: trajet M_1DA. U diminue et passe de U_1 à U_d, • Arrêt en position haute.

Remarque: Le variateur de vitesse doit être réversible en tension

Moteur travaillant dans les quatre quadrants

Dans certains équipements, on veut: travailler dans les deux sens de rotation et passer rapidement d'un sens à l'autre.

- On démarre rapidement: trajet ABM_1, U passe de U_d à U_1
- Apres une phase de travail en M_1 sous U_1. On inverse le couple en réduisant brusquement U à U_2 (point D). Puis on freine à couple maximum $-C_{max}$ et on démarre en sens inverse: trajet DFM_2.
- Apres une phase de travail en M_2 sous U_3. On inverse rapidement le couple en passant de U_3 à U_4 (point H). Puis on augmente U pour décrire le trajet $HABM_1$.



Variateur de vitesse réversible en U et en I

Résumé sur la MCC:

Les avantages et inconvénients du moteur à courant continu sont repris ci-dessous :

Avantages:

- Variation aisée de la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu à l'aide d'un variateur électronique de vitesse, il possède une large plage de variation (0 à 100 % de la plage par action sur la tension d'induit généralement),
- 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 au moteur à courant alternatif,
- Plus coûteux que le moteur à courant alternatif. Investissement important et maintenance coûteuse (entretien délicat du collecteur et des balais).