

---

# Machine à courant continu : fonctionnement et structure interne

---

« [] là semble naître un divorce entre l'esprit qui désire et le monde qui déçoit. »

Etienne Klein in « L'unité de la physique »

---

## Résumé

La **machine à courant continu** (MCC) repose sur le phénomène physique de **création d'une force électromotrice** (f.e.m.) aux extrémités d'un conducteur en mouvement dans un champ d'induction magnétique (par la loi de Faraday). Réciproquement, la circulation d'un courant dans ce conducteur le soumet à une force qui tend à le **mettre en mouvement** (loi de Laplace).

Sur ce fondement physique, une machine élémentaire comprenant une spire placée sur un rotor encadré par deux pôles inducteurs permet d'exprimer la **loi d'évolution de la f.e.m.** en fonction du flux sous les pôles magnétiques et de la vitesse de rotation. Mais la tension créée est alternative, si bien qu'un élément supplémentaire, le collecteur, permet de la redresser pour fournir une grandeur unidirectionnelle.

L'étape suivante est le passage à l'enroulement qui remplace la spire pour **augmenter l'amplitude de la f.e.m.** par la mise en série de plusieurs conducteurs. L'anneau de Gramme est la première solution. Elle est abandonnée au profit d'enroulements utilisant davantage de conducteurs actifs sur la périphérie du rotor d'abord, puis enfermés dans des encoches ensuite.

Toujours dans le souci d'augmenter la f.e.m., les **enroulements** sont câblés en **faisceaux** pour assurer d'avantage de conducteurs en série. Un autre moyen consiste à **augmenter le nombre de pôles inducteurs**.

Une fois la structure de la machine mise en place, **l'expression définitive de la f.e.m. d'induit** montre qu'elle dépend du flux sous un pôle, de la vitesse de rotation et de paramètres de construction. Quant au **couple électromagnétique** observé sur l'arbre, il dépend du flux sous un pôle, du courant dans l'induit et de paramètres de construction. L'expression des relations entre les grandeurs électriques et mécaniques conduit à montrer que la MCC est un convertisseur **électromécanique** qui peut échanger de manière réversible puissance mécanique et électrique. Cependant, le bilan final des puissances mises en jeu est l'occasion de montrer que ce convertisseur est le siège de différentes pertes tant électriques que mécaniques.

Pour terminer, la vue éclatée d'une MCC montre différentes solutions technologiques mise en œuvre pour réaliser une machine.

<b>I. Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>II. Principes physiques généraux .....</b>	<b>3</b>
II.1. Création d'une force électromotrice induite .....	3
II.2. Réversibilité du phénomène .....	3
<b>III. Mise en œuvre technologique .....</b>	<b>4</b>
III.1. Une première machine élémentaire .....	4
III.2. Principe du collecteur .....	5
III.3. Constatation au passage de la ligne neutre et conséquences .....	5
III.4. Conclusion .....	5
<b>IV. De la spire à l'enroulement .....</b>	<b>6</b>
IV.1. Enroulement sur un tore .....	6
IV.1.1. Représentation développée des f.e.m. ....	6
IV.1.2. Expression de la f.e.m. totale $E$ .....	7
IV.1.3. Bilan .....	7
IV.2. Évolution vers davantage de conducteurs actifs.....	7
<b>V. Augmentation de la tension d'induit .....</b>	<b>8</b>
V.1. Création de faisceaux .....	8
V.2. Machine multipolaire .....	8
<b>VI. Détermination des expressions de la f.e.m. et du couple d'une MCC .....</b>	<b>9</b>
VI.1. Force électromotrice .....	9
VI.2. Couple électromagnétique.....	9
VI.3. Symboles de la MCC .....	10
VI.4. Conversion d'énergie .....	10
<b>VII. Structure de la machine industrielle.....</b>	<b>11</b>
<b>VIII. Conclusion .....</b>	<b>11</b>

## Bibliographie

- [1] **Séguier Guy et Nottelet Francis**. Electrotechnique industrielle. Tec et doc (Lavoisier). 1982.
- [2] **Jean Bonal**. Entraînements électriques à vitesse variable. Prométhée — Groupe Schneider. Collection Tech & Doc (Lavoisier). 1997.

## I. Introduction

La machine à courant continu (MCC) a été utilisée très tôt dans les applications industrielles en raison d'un principe de fonctionnement très simple et d'une commande aisée.

## II. Principes physiques généraux

### II.1. Création d'une force électromotrice induite

Dans un repère, un conducteur de longueur  $L$  est en mouvement à vitesse constante  $\vec{V}$  dans un champ  $\vec{B}$  uniforme et orthogonal au plan de mouvement du conducteur (Figure 1).

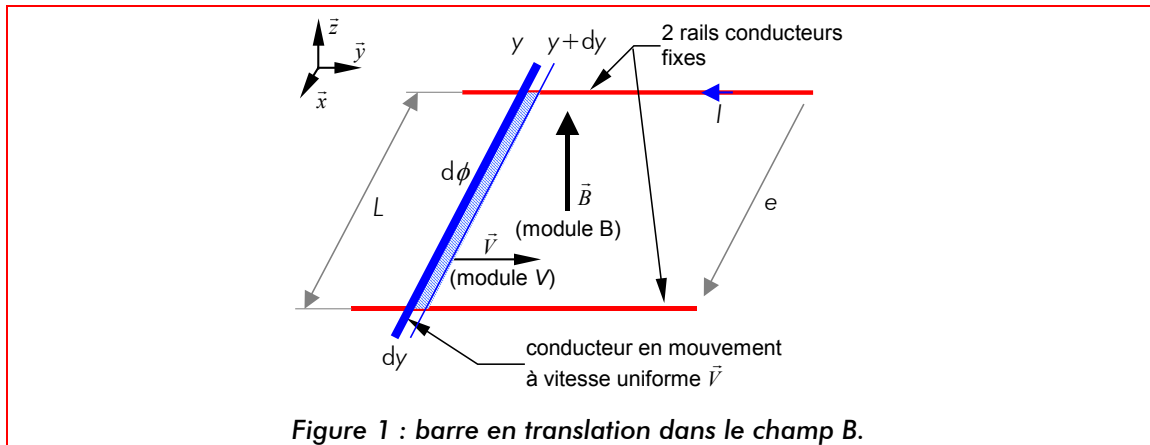


Figure 1 : barre en translation dans le champ B.

Entre  $t$  et  $t + dt$ , la barre parcourt la distance élémentaire  $dy = V \cdot dt$

Le flux coupé par le conducteur est alors :  $d\phi = B \cdot L \cdot dy$

En appliquant (en module) la loi de Faraday, on obtient l'expression de la f.e.m. induite :

$$e = \frac{d\phi}{dt} = B \cdot L \cdot V$$

Remarque : si l'induction ou la vitesse changent de sens, le sens du flux change et la f.e.m. change de signe.

### II.2. Réversibilité du phénomène

Si le conducteur est maintenant parcouru par un courant constant  $I$ , la loi de Laplace  $d\vec{F} = I \cdot d\vec{x} \wedge \vec{B}$  donne l'effort élémentaire appliqué au conducteur :

$$d\vec{F} = B \cdot I \cdot dx \cdot \vec{x} \wedge \vec{z}$$

Le conducteur est soumis à l'effort

$$d\vec{F} = -B \cdot I \cdot dx \cdot \vec{y}$$

La force provoque un déplacement qui montre l'aspect de réversibilité du phénomène.

On remarquera que le mouvement a lieu dans le sens contraire au précédent ( $-\vec{y}$ ). C'est ce que l'on traduit souvent par l'expression de f.e.m. « s'opposant » au déplacement du conducteur.

### III. Mise en œuvre technologique

#### III.1. Une première machine élémentaire

Pour développer technologiquement le principe précédent, on propose les bases d'une machine industrielle. Le conducteur est enroulé sur un **rotor** cylindrique en fer de rayon  $R$  et de longueur  $L$ , pour former une spire mise en rotation autour de l'axe à la pulsation  $\Omega_r$  (Figure 2). Ce circuit électrique constitue l'**induit** de la machine. La spire comporte un conducteur aller sous le pôle sud qui génère une f.e.m.  $+e'$  et un retour sous le pôle Nord qui fournit  $-e'$  car la vitesse est opposée à celle sous l'autre pôle. L'association en série ajoute les deux f.e.m.

Pour bénéficier de l'induction magnétique, le rotor est situé entre deux pôles qui épousent au mieux la forme du rotor pour assurer un entrefer constant et minimal. Là, le champ d'induction  $\vec{B}$  est créé dans l'entrefer par les enroulements d'**inducteur**. Il est normal et de module constant en tout point de l'entrefer et par continuité à la surface du rotor aussi.

La Figure 3 retrouve le principe précédent (§II.1) car chaque point du conducteur a une vitesse de déplacement tangentielle au rotor et par conséquent orthogonale au champ d'induction.

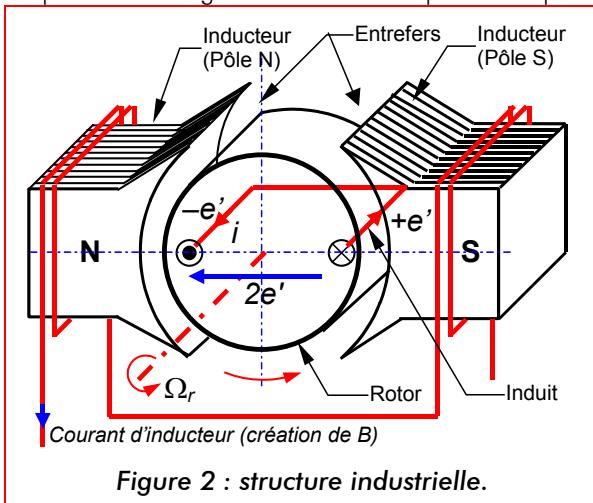


Figure 2 : structure industrielle.

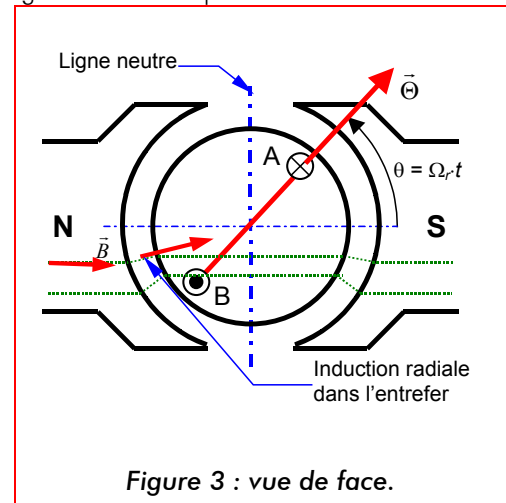


Figure 3 : vue de face.

Sous l'effet de la rotation, la spire voit l'induction sous la surface  $S(t) = 2 \cdot R \cdot L \cdot \sin \Omega_r t$ .

Par sa variation, le flux qui en découle,  $\phi = B \cdot S(t)$ , permet de créer la f.e.m.  $e(t)$  par spire :

$$e(t) = \frac{d\phi}{dt} = B \frac{dS}{dt} = 2 \cdot B \cdot R \cdot L \cdot \Omega_r \cdot \cos \Omega_r t = \Phi \cdot \Omega_r \cdot \cos \Omega_r t$$

Ce résultat montre que la f.e.m. induite est proportionnelle au flux  $\Phi$  sous un pôle et à la vitesse de rotation  $\Omega_r$ . Sa représentation temporelle est précisée à la Figure 4.

Le passage de la spire sous le flux maximal (en  $\theta = \frac{\pi}{2} [k\pi]$ ) correspond à une f.e.m. nulle. C'est à cet endroit, appelé **ligne neutre**, que la f.e.m. est prélevée pour être transmise à la partie fixe.

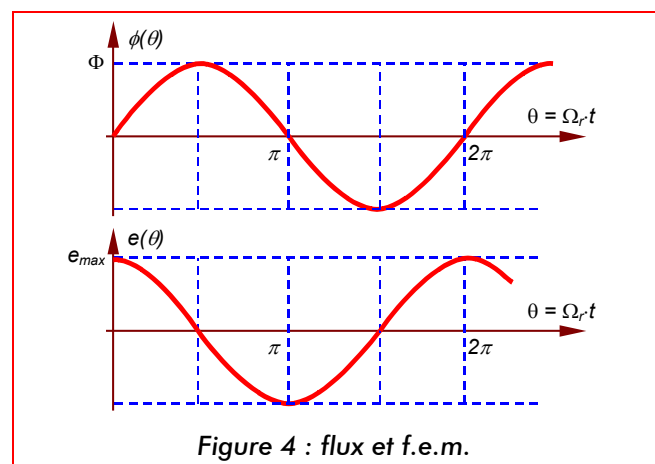


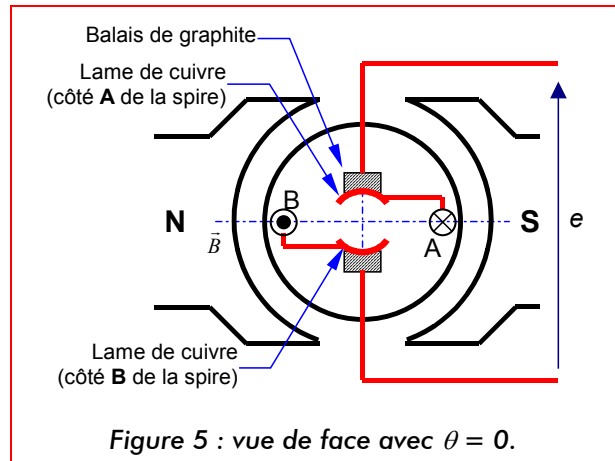
Figure 4 : flux et f.e.m.

Sur le plan théorique, cette étude montre le lien entre l'amplitude de la f.e.m. et les grandeurs dont elle dépend. Mais sur le plan technologique, on en tire deux conséquences :

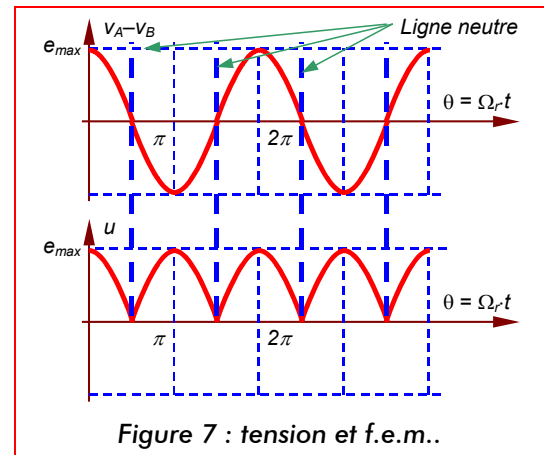
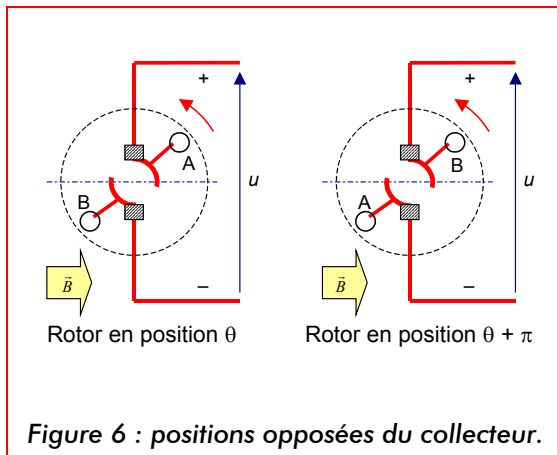
- la tension est disponible aux bornes d'une spire mobile, mais le besoin apparaît sur la partie fixe. Il faut donc trouver un moyen d'effectuer le transfert par un contact glissant ;
- la f.e.m. est alternativement positive et négative. Il faut la rendre unidirectionnelle.

### III.2. Principe du collecteur

Pour assurer les deux fonctions du paragraphe précédent, on met en place le **collecteur** : les extrémités d'une spire sont reliées électriquement à deux lames en cuivre (Figure 5). Pour prélever la f.e.m. sur la partie fixe, deux **balais** en graphite liés au stator frottent sur les lames.



L'étude du collecteur s'appuie sur la Figure 6 pour montrer qu'il assure la fonction de **redresseur mécanique**. On en déduit l'allure de la tension et de la f.e.m. (Figure 7).



### III.3. Constatation au passage de la ligne neutre et conséquences

Au passage de la ligne neutre, la tension entre les balais s'annule. A cet instant, le courant ne s'annule pas en raison du circuit inductif que constitue la spire. Pour éviter la rupture brutale du courant (et la surtension qui en découlerait), il faut décaler légèrement les balais par rapport à la ligne neutre pour caler au mieux les deux annulations simultanées et éviter ainsi les arcs qui ont tendance à détériorer les lames du collecteur.

### III.4. Conclusion

Pour assurer une tension qui ne s'annule plus, il faudrait multiplier le nombre de f.e.m. élémentaires. Puisqu'elles sont créées sur le pourtour du rotor, elles sont décalées d'un incrément angulaire. En les ajoutant la tension entre balais est plus importante et la superposition ne montre plus d'annulation. Pour réaliser ce scénario, il faut passer de la spire à l'enroulement, c'est-à-dire augmenter le nombre de conducteurs.

## IV. De la spire à l'enroulement

Une spire a donc été soumise à une f.e.m. induite lors de son déplacement dans le champ d'induction. Mais le niveau de tension n'est pas suffisant pour un usage industriel : il est nécessaire de multiplier la tension par association de spires en série.

### IV.1. Enroulement sur un tore

Une première version de la nouvelle machine consiste à enrouler les spires sur un rotor en forme de cylindre torique en fer. Chaque tronçon à la périphérie du rotor est le siège d'une f.e.m. Chaque conducteur de retour est placé à l'intérieur du tore, il est donc soumis à un champ induction très faible, voire nul, car la zone est pratiquement amagnétique. Ces conducteurs ne sont donc le siège d'aucune f.e.m. (Figure 8). L'association des deux conducteurs actif et inactif constitue une spire.

Les conducteurs actifs (placé sur la partie extérieure du rotor) sont le siège de f.e.m. et toutes placées en série. Cet ensemble constitue un **induit de Gramme**<sup>1</sup> tel qu'il fut conçu au début de l'histoire de la MCC.

Chaque extrémité de conducteur aboutit à une lame de collecteur. Les prises de balais ont lieu au niveau de la ligne neutre entre deux points diamétralement opposés.

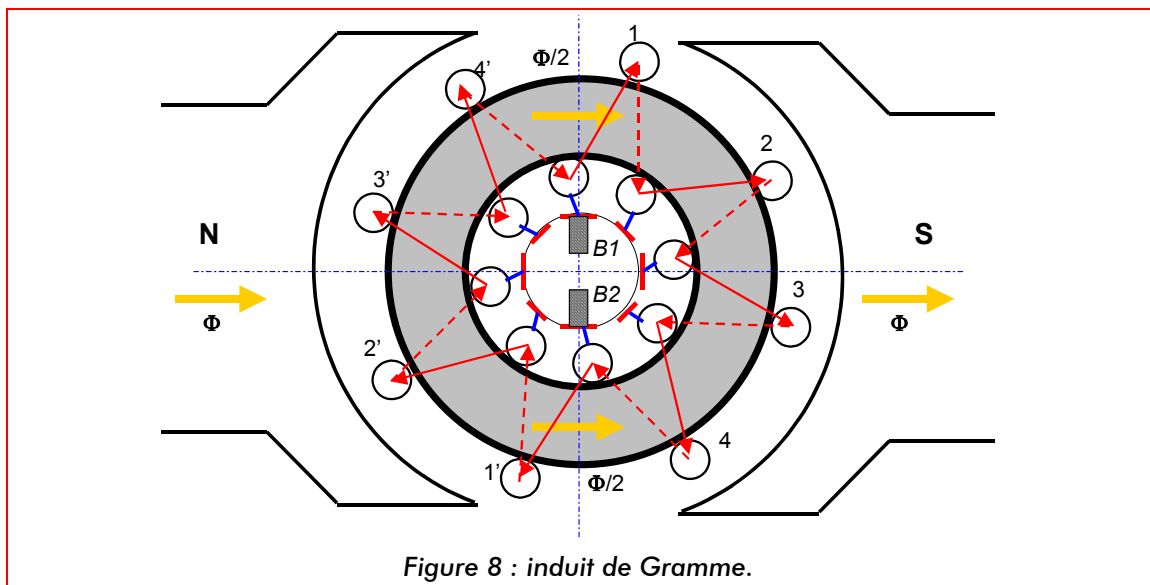


Figure 8 : induit de Gramme.

#### IV.1.1. Représentation développée des f.e.m.

Dans l'illustration de la Figure 9, chaque f.e.m. est issue d'un conducteur actif (une spire). Elles se répartissent par moitié sous chaque pôle, si bien qu'elles forment deux groupes de conducteurs placés en parallèle par les balais : ce sont les **voies d'enroulement**.

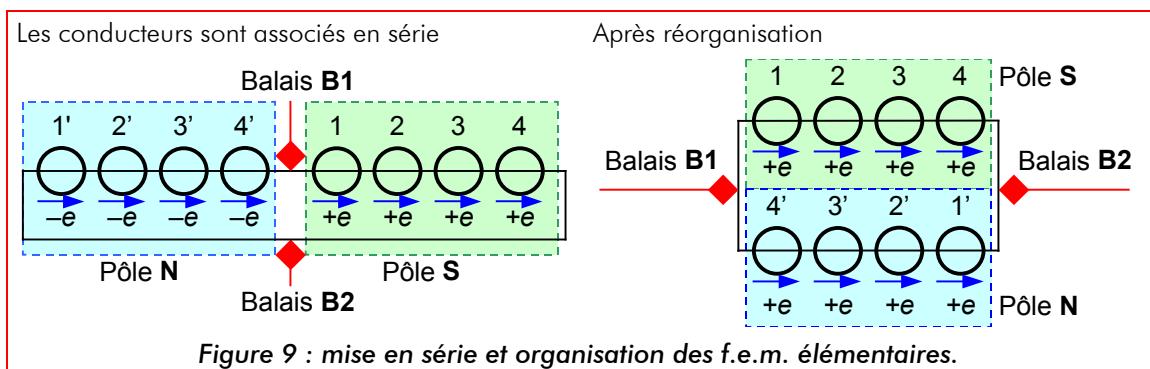


Figure 9 : mise en série et organisation des f.e.m. élémentaires.

<sup>1</sup> Gramme (Zénobe), physicien et inventeur belge (1826-1901). Perfectionna la machine alternative en 1867, imagina le collecteur en 1869 et présenta à l'académie des sciences la première dynamo en 1871 (machine de Gramme).

## IV.1.2. Expression de la f.e.m. totale $E$

Pour exprimer la f.e.m. totale délivrée par la MCC, on considère que les  $N$  conducteurs (ou  $N$  spires) sont répartis uniformément sur le pourtour du rotor. En raison de la mise en parallèle par les balais, la f.e.m. totale  $E$  est produite par les  $N/2$  spires placées sous un seul pôle.

$$\text{La f.e.m. résulte de la moitié du flux sous un pôle : } e(t) = \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2} \frac{d\theta}{dt} \frac{d\phi}{d\theta} = \frac{1}{2} \Omega_r \frac{d\phi}{d\theta}$$

Les spires sont régulièrement espacées, sur l'ouverture angulaire élémentaire  $d\theta$  :  $dN = \frac{N}{2\pi} d\theta$

$$\text{En conséquence : } dE = dN \cdot e = \frac{N}{2\pi} d\theta \frac{1}{2} \Omega_r \frac{d\phi}{d\theta} = \frac{N}{4\pi} \Omega_r d\phi$$

Par sommation sous un pôle, pour  $\theta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ , le flux  $\phi(\theta) \in \left[\phi\left(-\frac{\pi}{2}\right) = -\Phi, \phi\left(\frac{\pi}{2}\right) = \Phi\right]$  :

$$E = \int dE = \int_{-\Phi}^{\Phi} \frac{N}{4\pi} \Omega_r d\phi = \frac{N}{2\pi} \Omega_r \Phi$$

La f.e.m. est proportionnelle au nombre de conducteurs ( $N$ ), au flux sous un pôle ( $\Phi$  en Wb) et à la vitesse de rotation  $\Omega$ , en rad/s :

$$E = N \cdot \Phi \frac{\Omega_r}{2\pi}$$

## IV.1.3. Bilan

### Réversibilité

Si les conducteurs sont parcourus par un courant, les efforts sur les conducteurs permettent le mouvement de rotation.

### Critique de l'anneau de Gramme

Cette machine permet l'évaluation de la f.e.m., mais son efficacité technologique n'est pas satisfaisante car les conducteurs inactifs utilisent du cuivre sans créer ni f.e.m. ni effort.

De plus, la réalisation du bobinage d'un tore est toujours plus délicate qu'un enroulement simple qui peut être bobiné à l'extérieur du rotor puis logé dans les encoches par la suite.

### En conclusion

Il faut rechercher une optimisation de l'usage des conducteurs de retour en les rendant actifs. Pour cela, il faut les placer dans le champ inducteur, donc sur le pourtour du rotor.

## IV.2. Évolution vers davantage de conducteurs actifs

### Premier moyen

Pour assurer une meilleure utilisation des conducteurs, la mise en série a lieu par un conducteur séparé d'un pas polaire (spires quasi-diamétrales). La zone inactive est plus faible : c'est l'**induit en tambour**.

Exemple de la Figure 10 :

- 8 conducteurs,
- pas avants = +5 ,
- ou pas arrières = -3.

L'extrémité avant de chaque conducteur est reliée à une lame de collecteur.

Cette machine est plus efficace que l'anneau de Gramme, mais la mise en série des conducteurs ne permet pas de placer la moitié d'entre eux sous chaque pôle. Ce manque de symétrie provoque des aléas dans la création des f.e.m. élémentaires (ou des efforts dans le cas du moteur).

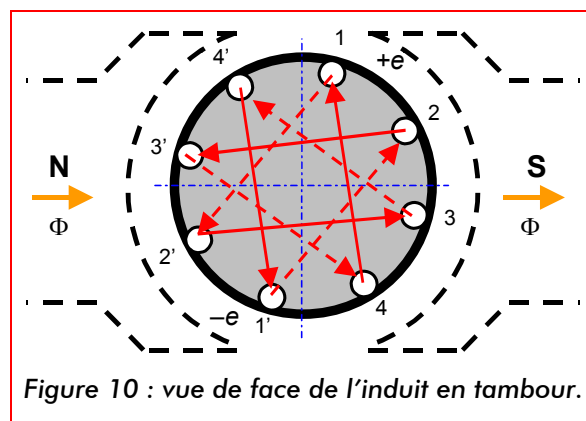


Figure 10 : vue de face de l'induit en tambour.

### Structure réelle

Pour assurer un fonctionnement en parallèle des deux voies d'enroulement, les f.e.m. doivent être identiques. Pour cela, chaque moitié des conducteurs voit un pôle en les associant par paires dans la même encoches (Figure 11).

Grâce à ce procédé, les conducteurs de fond et de surface s'équilibrent : toutes les différences s'effacent, la symétrie est totale.

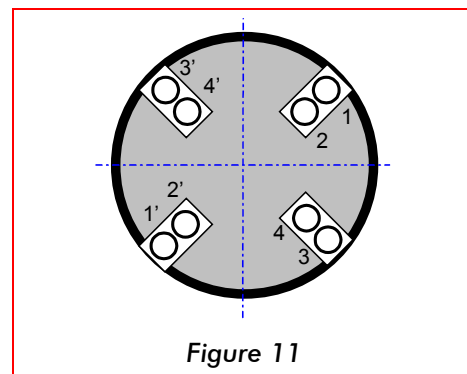


Figure 11

### Voies d'enroulement

Comme pour l'anneau de Gramme, les groupes de conducteurs sous chaque pôle sont placés en parallèle pour former les **voies d'enroulements**. Pour augmenter le courant d'induit, on les multiplie en ajoutant des prises de balais. En conséquence, le nombre de voies d'enroulements est toujours paires, noté  $2a$ .

## V. Augmentation de la tension d'induit

Une dernière étape reste à franchir pour élever la tension (ou le couple). Elle peut être obtenue au travers de deux moyens :

- augmenter la f.e.m. induite (l'effort) par spire grâce à des spires plus longues ;
- augmenter le nombre de sources inductrices grâce à davantage de paires de pôles.

### V.1. Création de faisceaux

Pour élever la tension par spire, il faut augmenter la longueur des conducteurs (dans l'expression  $B \cdot L \cdot V$ ). Mais c'est au détriment de l'encombrement de la machine (elle est plus longue). Pour éviter cet inconvénient, le conducteur est bouclé plusieurs fois dans les mêmes encoches pour augmenter la longueur équivalente. On réalise une **section** (qui ressemble à des spires concentriques, comme pour une bobine) composée de deux **faisceaux**.

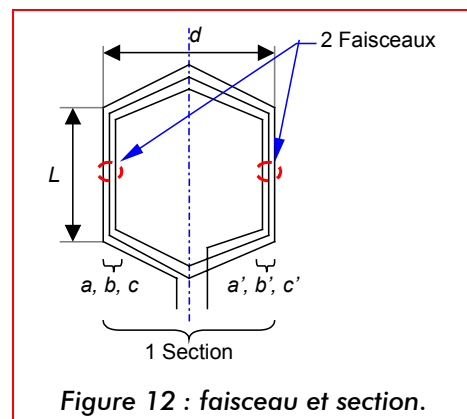


Figure 12 : faisceau et section.

### V.2. Machine multipolaire

Un autre moyen consiste à créer des f.e.m. induites sous des pôles supplémentaires (qui vont par paires) puis à placer en série les f.e.m. résultantes.

On appelle alors  $p$  le nombre de **paires de pôles** inducteurs de la machine.

A titre d'exemple, la Figure 13 présente une machine qui comporte 2 paires de pôles ( $p = 2$ ) et 8 encoches.

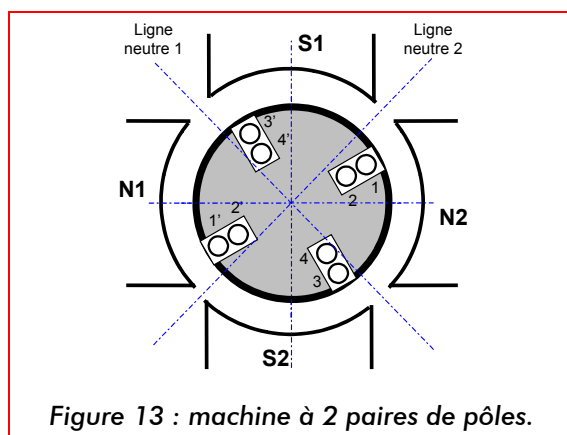


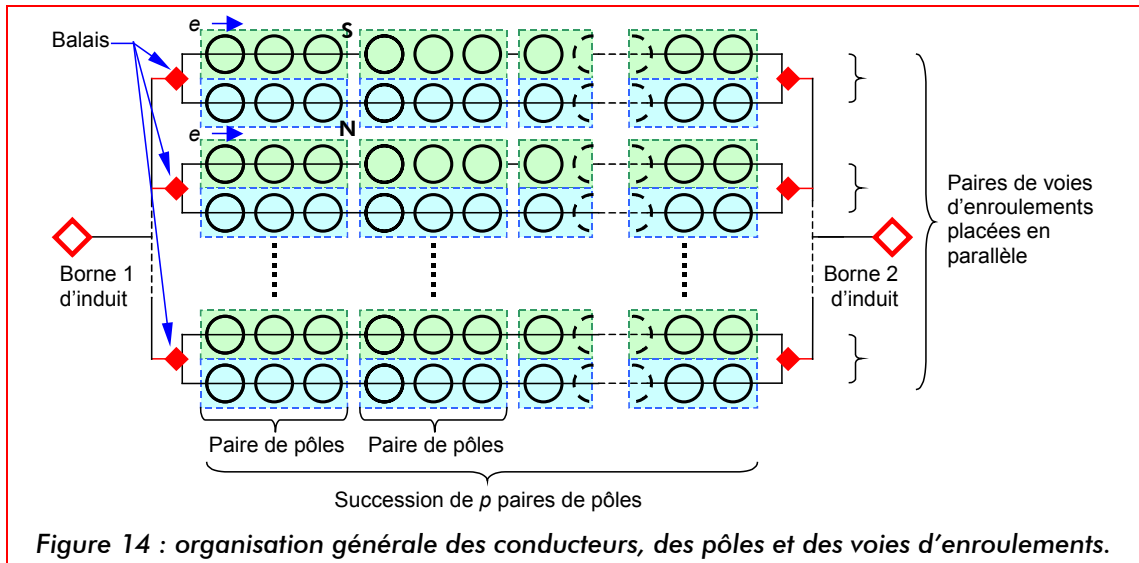
Figure 13 : machine à 2 paires de pôles.



## VI. La MCC : convertisseur d'énergie

### VI.1. Schéma électrique équivalent global de l'induit

La machine à courant continu dispose de  $2p$  pôles et  $N$  conducteurs répartis dans  $2a$  voies d'enroulement. Son schéma interne peut être représenté suivant la Figure 14.



### VI.2. Force électromotrice

#### Expression de la f.e.m.

L'augmentation du nombre de paires de pôles diminue le pas polaire, ce qui permet de créer les f.e.m. élémentaires sur une fraction de tour de la machine. En plaçant toutes ces f.e.m. par pôle en série, on augmente la f.e.m. totale d'un facteur  $2p$  (le nombre de répétitions des pôles).

Mais les conducteurs organisés en voies d'enroulements sont mis en parallèle. Cela diminue la f.e.m. d'un facteur égal au nombre voies, soit  $2a$ . On obtient la nouvelle relation :

$$E = \frac{2p}{2a} N \cdot \Phi \cdot \frac{\Omega_r}{2\pi}$$

#### Conclusion et synthèse

La f.e.m. totale de la MCC dépend :

- de paramètres de construction, purement technologiques ( $p$ ,  $a$  et  $N$ ) ;
- du paramètre de fonctionnement interne, le flux sous un pôle  $\Phi$  ;
- du paramètre de fonctionnement externe, la vitesse de rotation  $\Omega_r$ .

On exprime alors la f.e.m. de la MCC de manière plus condensée par la relation :

$$E = K_E \Omega_r \text{ où } K_E \text{ est la constante de f.e.m. de la MCC.}$$

### VI.3. Couple électromagnétique

Chaque conducteur est le siège d'un effort créant un couple sur l'arbre. Leur somme génère le **couple électromagnétique**  $C_{em}$ .

#### Expression du couple électromagnétique

Suivant la relation issue de la loi de Laplace, le couple dépend du flux sous un pôle ( $\Phi$  en Wb), du courant total d'induit ( $I$  en A) et du nombre de conducteurs ( $N$ ). Le nombre de paires de pôles augmente la répétition des phénomènes, donc du couple, tandis que la mise en parallèle des conducteurs dans les voies d'enroulement y diminue le courant donc le couple. D'où la relation :

$$C_{em} = \frac{2p}{2a} N \cdot \phi \cdot \frac{I}{2\pi}$$

## Conclusion et synthèse

Le couple délivré par la machine dépend :

- de paramètres de construction, purement technologiques ( $p$ ,  $a$  et  $N$ ) ;
- du paramètre de fonctionnement interne, le flux sous un pôle  $\Phi$  ;
- du paramètre de fonctionnement externe, le courant d'induit  $I$ .

On exprime alors le couple sur l'arbre de la MCC de manière plus condensée par la relation :

$$C_{em} = K_C I \text{ où } K_C \text{ est la } \mathbf{constante de couple} \text{ de la MCC.}$$

## Remarque

L'examen des deux constantes  $K_E$  et  $K_C$  montre qu'elles sont égales.

## VI.4. Symboles de la MCC

Le symbole de la MCC rappelle les éléments de sa structure : un cercle représente le rotor tandis que les connexions d'induit ont lieu au travers des balais. C'est le symbole de l'inductance pour l'inducteur de la machine à excitation et un aimant dans l'autre cas.

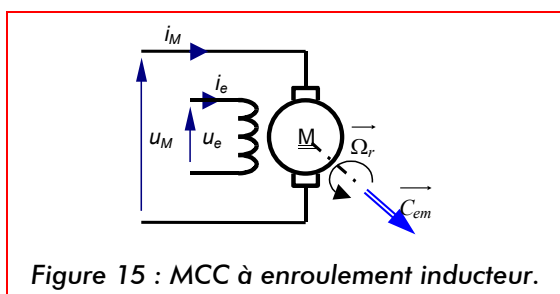


Figure 15 : MCC à enroulement inducteur.

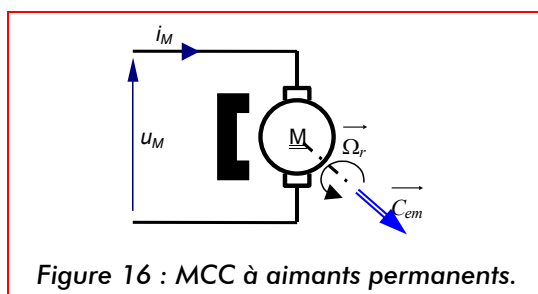


Figure 16 : MCC à aimants permanents.

## VI.5. Conversion d'énergie

A partir de  $E$  et  $I$ , la puissance électrique au niveau de l'induit de la MCC s'exprime par :

$$P_e = E \cdot I$$

Sur le plan mécanique :

$$P_m = C_{em} \cdot \Omega_r$$

Dans le cas d'une machine parfaite, le transfert de puissance est total, donc  $P_e = P_m$ , d'où :

$$E \cdot I = C_{em} \cdot \Omega_r$$

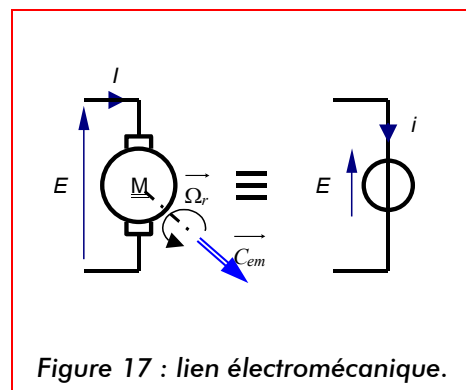


Figure 17 : lien électromécanique.

On constate que la MCC est un convertisseur d'énergie transformant à tout instant une puissance électrique en puissance mécanique et réciproquement.

### Le fonctionnement en « moteur »

La machine absorbe une puissance électrique (qui est donc positive pour le système) pour fournir une puissance mécanique (négative pour le système).

Le transfert s'opère du réseau vers la charge mécanique au travers de la MCC.

Remarque : le bilan de puissance indique un apport électrique  $P_e$  positif et une fourniture  $P_m$  négative, soit un équilibre des puissances comme le veut la machine supposée parfaite (sans pertes).

### Le fonctionnement en « génératrice »

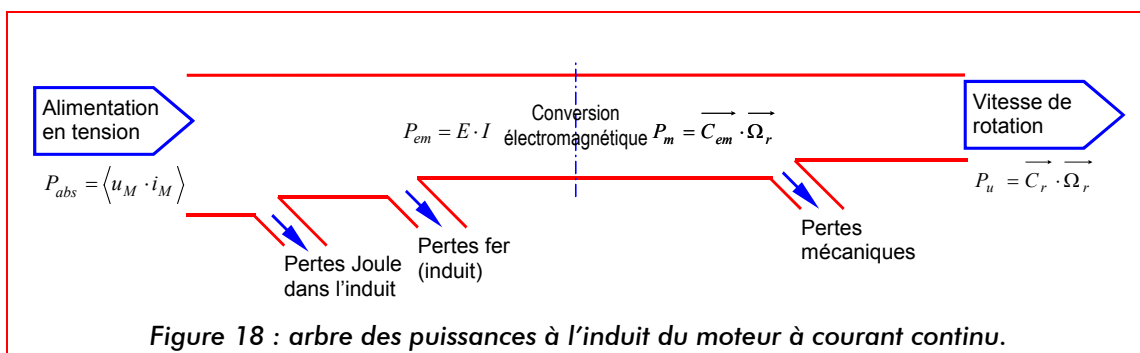
La machine fournit une puissance électrique (négative) qui provient de la puissance mécanique.

Le transfert s'opère de la charge mécanique vers le réseau au travers de la MCC.

## Bilan des puissances actives de la machine réelle

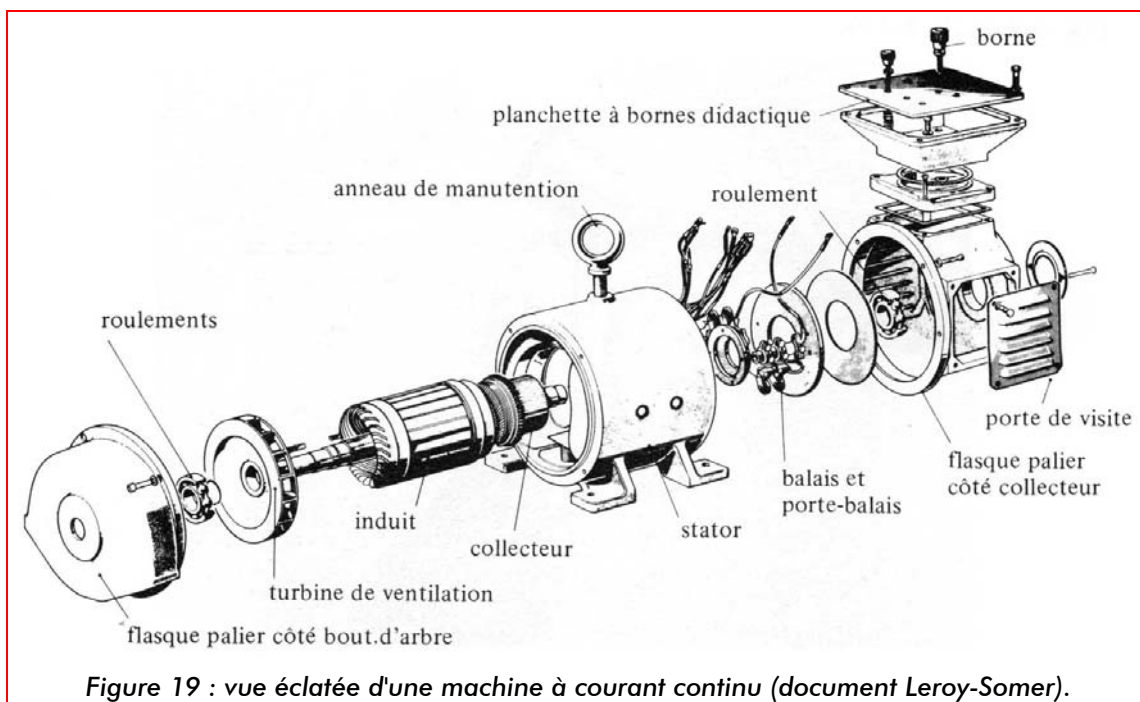
Si on effectue un bilan complet des puissances pour une machine réelle, on observe des puissances utiles et celles qui traduisent des pertes mécaniques ou électriques (Figure 18).

Remarque : ce bilan n'inclut pas l'inducteur.



## VII. Structure de la machine industrielle

La Figure 19 présente la vue éclatée d'une machine à courant continu industrielle. On y retrouve tous les éléments présentés dans ce document. On voit aussi apparaître des organes technologiques permettant la ventilation, la manutention, le guidage mécanique de l'arbre du rotor et les connexions.



## VIII. Conclusion

La machine à courant continu a été durant de nombreuses années l'actionneur principalement utilisé dans les applications à vitesse variable. En effet, comme cela a été mis en évidence, le contrôle de la vitesse de rotation peut être aisément réalisé par action sur la f.e.m. d'induit de la machine (en grandeur « permanente », donc moyenne). Sur un autre plan, on peut agir sur le flux inducteur qui est réglé par le courant dans l'inducteur (appelé aussi courant d'excitation).

Mais le transit de la puissance par des contacts glissants au niveau du collecteur rend cette machine fragile. Elle réclame un entretien périodique de contrôle des balais et des lames du collecteur, voire du changement préventif de ces organes. C'est pourquoi dans les applications de puissance, elle tend actuellement à être remplacée par la machine asynchrone (MAS) beaucoup plus robuste et plus économique. En raison de lois de fonctionnement non linéaires, il faut l'associer à des convertisseurs appropriés (cette partie sera développée dans le cours sur la machine asynchrone).