

GÉNÉRALITÉS SUR LES MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES

Claude CHEVASSU
[site mach elec](#)

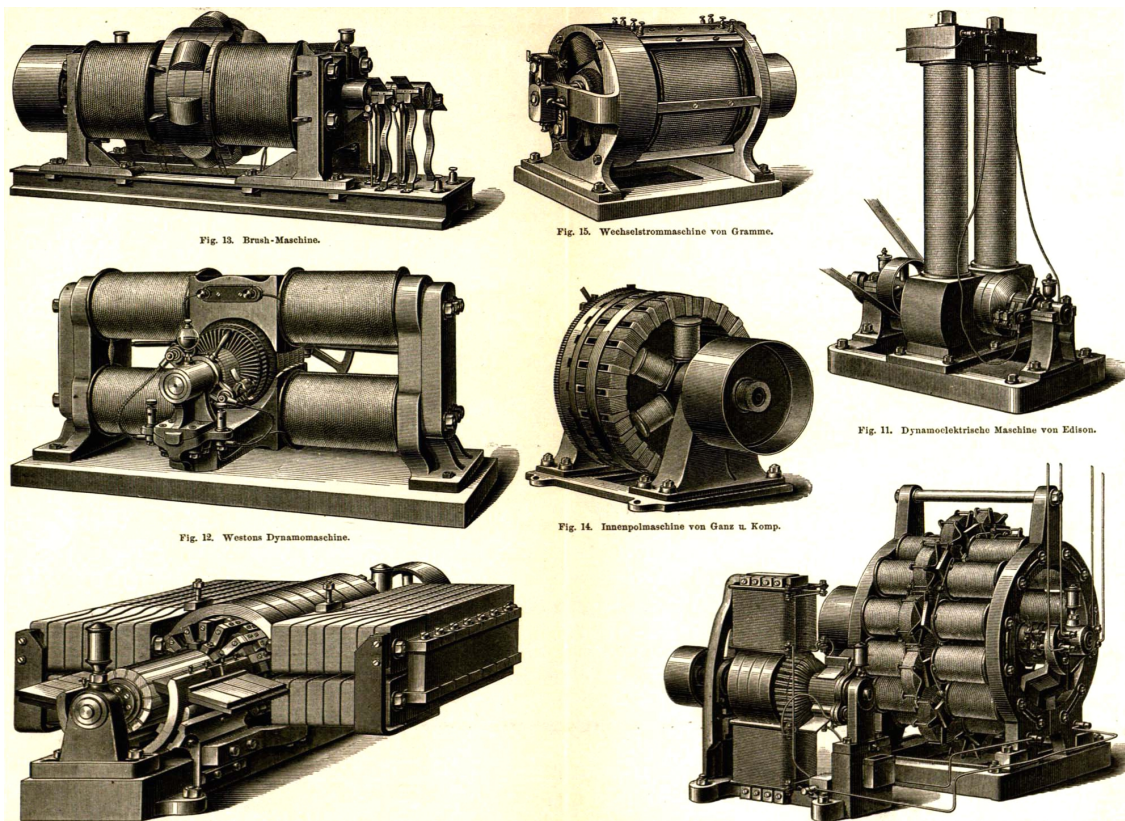


Table des matières

1 Généralités sur les machines électriques tournantes	1
1.1 Technologie des machines électriques	1
1.1.1 Matériaux magnétiques	1
1.1.2 Matériaux conducteurs	2
1.1.3 Matériaux isolants - Classe d'isolation	3
1.2 Services de marche	5
1.2.1 Échauffement des machines électriques	6
1.2.2 Indice de protection IPxx et IKxx	7
1.2.3 Indice IEx	8
1.2.4 Plaque signalétique	8
1.3 Lois générales de la conversion électromécanique	9
1.4 Production de forces électromotrices	12
1.4.1 Structure de la machine	13
1.4.2 Flux magnétique	13
1.4.3 Force électromotrice induite	14
1.5 Inductions tournantes	18
1.5.1 Inducteur tournant	18
1.5.2 Inducteur triphasé fixe	19
1.6 Machine bipolaire équivalente	25
1.7 Explication microscopique du fonctionnement	25

Chapitre 1

Généralités sur les machines électriques tournantes

1.1 Technologie des machines électriques

Les machines électriques comportent :

1. des matériaux magnétiques chargés de conduire et canaliser le flux magnétique ;
2. des matériaux conducteurs chargés de conduire et canaliser les courants électriques ;
3. des isolants ;
4. un « contenant » : carcasse d'un moteur, cuve d'un transformateur ;
5. un système de refroidissement.

1.1.1 Matériaux magnétiques

Les machines soumises à des champs magnétiques variables sont le siège de pertes par courants de Foucault et de pertes par hystérésis, la somme de ces pertes est appelée *pertes fer*.

Afin de réduire les pertes par courants de Foucault, on feuillète le circuit magnétique. Celui-ci est réalisé par assemblage de tôle de 2 à 3 dixièmes de millimètre d'épaisseur. Ces tôles sont recouvertes d'isolant électrique, cette opé-

ration est généralement réalisée en trempant les tôles dans un bain chimique qui réalise une phosphatation de la surface. Cela réduit la circulation des courants induits (les courants de Foucault). Toujours afin de limiter les courants de Foucault, on augmente également la résistivité de l'acier employé en réalisant un alliage acier-nickel-silicium, mais on ne sait pas mettre plus de 3 à 4 % de silicium dans l'alliage. Cela permet de réduire la « perméabilité » des tôles au courant électrique en maintenant la perméabilité aux lignes de champ magnétique.

Pour réduire les pertes par hystérésis, les métallurgistes soumettent les tôles, qui serviront à confectionner les circuits magnétiques, à des cycles de laminage à des températures très précises. Le but étant d'obtenir des cycles d'hystérésis très étroits et d'orienter les domaines magnétiques (domaine de Weiss) afin d'obtenir une direction où la réluctance est minimale. Les pertes par hystérésis étant fonction de la surface du cycle (et de la fréquence) on les diminue ainsi considérablement.

Les rouleaux de tôles sont découpés par emboutissage en considérant l'axe de laminage indiqué par le métallurgiste. Le fabricant de tôles soumet celles-ci à des essais et indique les pertes en W/kg pour telle fréquence et tel champ magnétique maximum.

On utilise par exemple :

- des tôles au silicium : alliage de fer et de 3,4 % de silicium, saturée à 2 T, $\mu_r = 6500$;
- des tôles spéciales à grains orientés, saturées à 3 T, $\mu_r = 35000$.

1.1.2 Matériaux conducteurs

Le cuivre est généralement utilisé pour réaliser les bobinages des machines électriques car, à part l'argent, c'est le matériaux dont la résistivité est la plus faible. Cependant, pour les lignes de transport de l'énergie électrique où l'on souhaite disposer de câble assez léger, on utilise l'aluminium. Certaines machines utilisent également l'aluminium en lieu et place du cuivre.

L'or et l'argent sont utilisés pour la réalisation de la surface de certains contacts électriques mobiles.

Suivant les applications, on ajoute au cuivre quelques % de chrome, de béryllium, de cadmium ou encore de nickel.

Matériaux conducteurs	Résistivité à 20°Celsius en ohms-mètre, $\Omega \cdot m$
cuivre	$1,72 \cdot 10^{-8}$
or	$2,04 \cdot 10^{-8}$
aluminium	$2,63 \cdot 10^{-8}$
argent	$1,59 \cdot 10^{-8}$
laiton	$7,0 \cdot 10^{-8}$

1.1.3 Matériaux isolants - Classe d'isolation

Les conducteurs sont isolés avec du papier, du coton, du bois, du PVC, du caoutchouc, des thermoplastiques ...

Une fois la machine construite, on l'étuve afin de supprimer l'humidité puis on l'imprègne avec des vernis ou des résines, suit éventuellement une phase de cuisson.

Les différents isolants répondent à un cahier des charges incluant la valeur de la tension électrique à supporter, la température de fonctionnement, les contraintes fonctionnelles et d'agencement de l'isolant dans la machine. Tous les facteurs de vieillissement thermique, électrique, mécanique et environnementaux ont un impact sur la durée de vie de tout type de machine, mais l'importance de l'un vis-à-vis des autres varie avec le type de machine et les conditions d'utilisation. C'est la qualité de ses isolants qui fait la qualité d'une machine. C'est par vieillissement puis destruction par claquage (amorçage d'un arc à travers l'isolant) que prend fin la vie d'une machine électrique.

La norme admet que pour les petites machines basse tension bobinées en vrac, la dégradation est essentiellement due à l'effet de la température et de l'environnement; les machines de moyennes à grandes dimensions, utilisant des enroulements préformés sont également affectés par la température et l'environnement, mais les contraintes électriques et mécaniques peuvent également constituer un facteur de vieillissement important.

La détermination de la capacité d'une machine à supporter un fonctionnement en régime permanent sous l'effet de la température est donc primordiale. Cette grandeur est définie comme étant sa *classe thermique* ou *classe d'isolation*. Dans notre cas, la classe d'isolation définira la température maximale de fonctionnement des bobinages. Les trois classes les plus utilisées et définies par les normes CEI 85 et CEI 34-1 ont été reportées dans le tableau ci-après; elles fixent les valeurs limites de l'échauffement et de la température des bobinages

4 CHAPITRE 1. GÉNÉRALITÉS SUR LES MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES

(au point le plus chaud). La classe la plus courante est la classe F.

Classe d'isolation	A	E	B	F	H
Température limite	110 °C	115 °C	130 °C	155 °C	180 °C

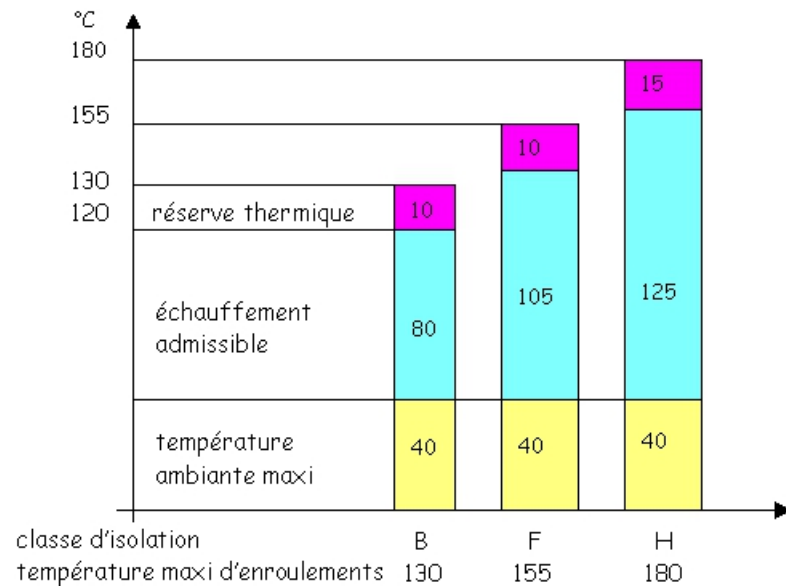


FIGURE 1.1 – Les trois classes d'isolation les plus courantes.

En fonction de la température ambiante dans laquelle fonctionne la machine, il en découle une réserve thermique de fonctionnement. Pour une température ambiante maximale fixée à 40 °C (température généralement prise en Europe), la figure 1.1 fournit les réserves thermiques d'échauffement disponibles pour les trois classes définies dans le tableau précédent.

Cette réserve thermique permet un échauffement supplémentaire, à caractère transitoire si l'on souhaite augmenter la durée de vie de la machine ou permettant l'existence de points chauds dans les bobinages. Pour une classe thermique donnée, cette réserve peut être augmentée par un dimensionnement approprié produisant un échauffement inférieur au maximum autorisé. A titre d'exemple, la construction des moteurs Leroy Somer de classe F conduit à un échauffement de 80°C au lieu des 105°C autorisés. Il en résulte que la réserve thermique passe de 10 à 35 °C (dans des conditions normales d'utilisation : altitude inférieure à 1000 m, alimentation sous fréquence et tension nominales).

La température atteinte est liée à l'échauffement, lui-même lié à la puissance mise en jeu, et à la température ambiante. Il faut également tenir compte d'un déclassement éventuel dû à l'altitude si elle est supérieure à 1000 m, de l'ordre de 10 % par 1000 m.

On se réfère en général à une température ambiante de 40 °C, par précaution, on se donne une marge de température de 10 °C (15 °C en classe H). On considère qu'un dépassement de 10 °C de la température maximum divise la durée de vie de la machine par 2.

Les machines peuvent être refroidies par rayonnement, conduction et convection. Dès que la machine est de taille importante, c'est la convection qui permet d'évacuer les pertes vers l'extérieur (l'atmosphère). Pour des machines de quelques kW, il est possible d'utiliser la convection naturelle : on munit le carter de nombreuses ailettes afin d'augmenter la surface d'échange carter/atmosphère. Généralement, la convection est forcée en plaçant un ventilateur sur l'axe du moteur.

Pour les applications à faible vitesse, le refroidissement doit être soigneusement étudié et on peut mettre en œuvre un moto-ventilateur séparé.

Pour de plus grandes puissances, on utilise un double circuit :

- circuit primaire avec air, huile ou hydrogène ;
- circuit secondaire à air généralement.

Il est à noter que l'hydrogène, qui possède une chaleur massique plus importante que celle de l'air 10140 J/kg · K pour l'hydrogène contre 710 J/kg · K pour l'air, permet une plus grande extraction de chaleur que l'air. De plus, il produit des frottements moindres, d'où son emploi malgré le danger qu'il représente.

1.2 Services de marche

La plupart des moteurs fonctionnent souvent en service non continu. Certains moteurs ne fonctionnent que pendant une brève période, d'autres tournent toute la journée mais avec une faible charge, et de nombreux moteurs doivent accélérer de fortes inerties ou sont commandés en mode commuté et freinés électriquement.

Dans tous ces divers types de service, un moteur ne chauffe pas comme en cas de service continu. Par conséquent, tous ces processus spécifiques d'échauf-

6 CHAPITRE 1. GÉNÉRALITÉS SUR LES MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES

fement doivent être pris en compte pour éviter une surcharge qui endommagerait les enroulements rotoriques et statoriques du moteur.

Le service des moteurs est indiqué sur la plaque signalétique. il indique le cycle de fonctionnement d'un moteur, correspondant à sa puissance nominale. Un moteur devant être démarré le matin à 8 heures et arrêté le soir à 20 heures n'aura pas le même échauffement qu'un moteur d'ascenseur qui n'arrête pas de démarrer et de s'arrêter et donc pas le même type de service.

Il existe neuf types de services différents, de S1 à S9, les plus courants sont les services S1, S2 et S3.

S1	Service continu
S2	Service temporaire
S3	Service périodique intermittent sans démarrage
S4	Service périodique intermittent à démarrage
S5	Service périodique intermittent à démarrage et freinage électrique
S6	Service continu à charge intermittente
S7	Service ininterrompu à démarrage et freinage électrique
S8	Service ininterrompu à variations périodiques de charge/de vitesse
S9	Service ininterrompu à variations non périodiques de charge/de vitesse

Les fabricants de moteurs doivent assigner la capacité de charge du moteur à l'un de ces types de service et fournir, le cas échéant, les valeurs relatives au temps de fonctionnement, à la période de charge ou au facteur de service relatif.

1.2.1 Échauffement des machines électriques

La température interne d'une machine est liée à ses pertes qui sont elles mêmes liées à la puissance électrique qu'elle convertit. Dans le cas le plus simple, une machine qui fonctionne en service continu S1 à sa vitesse nominale et délivre son couple nominal atteindra sa température de régime permanent au bout de 10 à 50 minutes. Celle-ci sera liée à sa classe d'isolement. Par exemple, en classe F (155 °C), l'échauffement ne dépassera pas 105 °C par rapport à une température ambiante de 40 °C, avec une marge thermique de 10 °C.

Dans le cas d'une température ambiante élevée (supérieure à 40 °C), ou si la machine est installée à une altitude supérieure à 1000 m, il convient de déclasser la machine. Cela se fait avec des abaques, ou encore par tranche, par exemple 5 % par élévation de 5 °C ou 1000 °C. Ainsi, un moteur asynchrone de 20 kW installé à 2000 m dans une température ambiante de 35 °C verra sa puissance limitée à $20 \times 0,95 = 19$ kW.

La protection thermique des machines peut être assurée par divers dispositifs, plus ou moins élaborés et coûteux :

- mesure du courant dans la machine et calcul de l'échauffement (relais thermique, disjoncteur) ;
- sonde interne tout ou rien ;
- sont de mesure PT100 ou thermocouple, intégrée au moteur raccordée à un relais de mesure ;
- calcul de l'état thermique de la machine par le calculateur du variateur de vitesse qui alimente la machine.

1.2.2 Indice de protection IPxx et IKxx

L'*indice IP* est donné pour tous les équipements électriques et est indiqué par deux chiffres :

- le premier correspond à la protection contre la pénétration des corps solides ;
- le deuxième correspond à la protection contre la pénétration des liquides.

Par exemple, IP55 signifie « protégé contre la pénétration de toutes particules solides et contre les jets d'eau de toutes direction ». On utilise une lettre supplémentaire pour indiquer le degré de protection des personnes, protection contre l'accès aux parties dangereuses.

L'*indice IK* détermine le degré de protection du matériel contre les chocs d'origine mécanique. Par exemple : IK08 indique que Le matériel est protégé contre un choc équivalent à la chute d'une masse de 1,25kg depuis une hauteur de 40cm (correspondant à une énergie de 5 Joules).

1.2.3 Indice IEx

Depuis 1998, en Europe, les moteurs à induction triphasés à cage étaient définis par trois classes de rendement, conformément à un accord européen mis en œuvre par le CEMEP (Comité Européen de Constructeurs de Machines Electriques et d'Electronique de Puissance) :

- EFF3 (rendement faible) ;
- EFF2 (rendement moyen) ;
- EFF1 (rendement élevé).

En 2009, le CENELEC (Comité Européen de la Normalisation Électrotechnique) a adopté la norme CEI 60034-30 qui définit les classes de rendement pour les moteurs à induction triphasés à cage.

Cette classification concerne les moteurs d'une puissance de 0,75 kW à 375 kW :

- IE1 : Standard (équivalent EFF2) ;
- IE2 : High (équivalent EFF1) ;
- IE3 : Premium.

1.2.4 Plaque signalétique

Toute machine électrique est munie d'une *plaque signalétique* qui indique les caractéristiques nominales électriques de la machine, tous les renseignements utiles y sont répertoriés. Une plaque signalétique porte généralement les indications suivantes, voir la figure [1.2 page 10](#) :

- Le numéro du modèle propre au constructeur ;
- la puissance utile délivrée sur l'arbre du moteur ;
- le facteur de puissance qui permet de calculer la puissance réactive consommée par le moteur dans le cas du moteur asynchrone. Dans le cas de la machine synchrone, l'indication du facteur de puissance est équivalente à la donnée du courant d'excitation maximal. Le facteur de puissance indiqué par la plaque signalétique d'une machine synchrone est la valeur minimum du facteur de puissance global du réseau que peut alimenter l'alternateur 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, 365 jours par an sans que

son inducteur ne subisse de contrainte thermique excessive. Si le réseau à alimenter possède un facteur de puissance inférieur, il faudra soit changer de modèle d'alternateur, soit plutôt équiper le réseau de batterie de condensateur afin de remonter son facteur de puissance à une valeur supérieure à celle indiquée par la plaque signalétique ;

- les tensions d'alimentation, par exemple (230 V/400 V). La plus petite valeur indique la tension nominale pour un enroulement statorique de la machine, elle indique le couplage (étoile ou triangle) à effectuer en fonction du réseau d'alimentation.
- les intensités en ligne en fonction du couplage étoile ou triangle ;
- le rendement qui permet de connaître la puissance électrique absorbée par la machine ;
- la vitesse de rotation nominale de l'arbre moteur qui permet de déterminer la vitesse de synchronisme dans le cas d'une machine asynchrone ;
- la fréquence des tensions devant alimenter la machine ;
- le nombre de phases ;
- la température ambiante maximum ;
- le service de marche ;
- la classe d'isolation (définissant la température maximum en exploitation) ;
- les indices de protection IP, voir IK indiquant par trois chiffres la résistance du moteur à la pénétration des poussières, à l'eau et aux chocs mécaniques.
- la masse de la machine ;
- différentes normes, par exemple IEC 34/1 est une norme européenne permettant aux constructeurs d'harmoniser la construction des moteurs en terme de support, diamètre, hauteur, axe, ...

1.3 Lois générales de la conversion électromécanique

Les machines électriques tournantes convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique et inversement : ce sont les générateurs (électriques) ou les moteurs. On rencontre :



FIGURE 1.2 – Plaque signalétique d'une machine asynchrone.

En courant continu :

- les machines à courant continu : moteur, génératrice (dynamo) ;

en courant alternatif :

- les machines synchrones : moteur synchrone, génératrice (alternateur) ;
- les machines asynchrones : moteur asynchrone, génératrice asynchrone.

Il s'agit d'une conversion d'énergie qui s'effectuera, bien évidemment, avec un rendement inférieur à un en raison des pertes inévitables.

L'exemple théorique suivant permet de matérialiser les diverses lois qui règlent cette conversion. Un conducteur de longueur ℓ , mobile, se déplace à la vitesse v sur deux rails indéfinis placés dans une induction uniforme et invariable B , normale aux conducteurs. On exerce la force mécanique F_m sur le conducteur et le circuit est alimenté par un générateur de f.é.m. E_0 et de résistance interne R . On note I le courant, avec les conventions de signes indiqués sur la figure 1.3 page ci-contre :

Quatre lois déterminent le système électromécanique :

La loi de Faraday : si la vitesse du conducteur est v ,

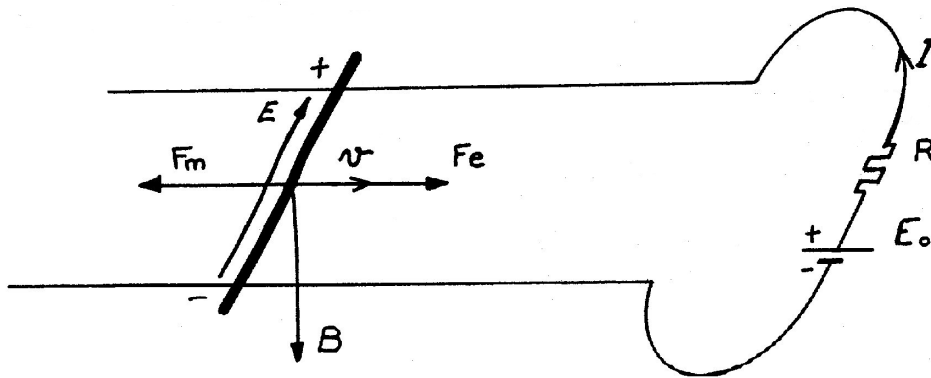


FIGURE 1.3 – Principe d'un moteur électrique.

il apparaît une f.é.m. E : $E = B \times l \times v$

La loi de Laplace : si le courant dans le conducteur est I ,

il existe une force électromagnétique F_e : $F_e = B \times l \times I$

La loi d'Ohm : $E_0 = E + RI$

La loi de la dynamique : si la vitesse v est constante,

elle implique : $F_m = F_e$

Si la résistance est nulle (aucune perte dans le circuit) on a alors :

- une vitesse v telle que $E = E_0$;
- un courant I tel que $F_e = F_m$.

Les vitesses sont liées aux f.é.m. et les courants aux forces.

Le fonctionnement sera *moteur* si F_e et v sont de même sens (ce sont les conventions de la figure). La f.é.m. E s'oppose alors au courant.

Si la vitesse est dans le sens de la force appliquée F_m , on obtient un *générateur* électrique ; la force électrique F_e s'oppose alors à F_m .

On peut exprimer la puissance au niveau du conducteur sous la forme mécanique ou sous la forme électrique :

$$P = F_e v = B \times l \times I \times \frac{E}{Bl} = E \times I$$

C'est la puissance électromagnétique. On notera que la conversion d'énergie est parfaitement *réversible*.

REMARQUE : On peut aussi imaginer que l'on translate l'induction magnétique B à la vitesse v_s en exerçant une force F_e , le circuit étant alors refermé sur R , comme on le voit sur la figure 1.4. Le conducteur, étant balayé par l'induction, donne naissance à une f.é.m. E qui engendre le courant I . Il apparaît alors une force F_e qui entraîne le conducteur dans le sens de v_s . Soit v la vitesse du conducteur :

$$E = B \times \ell \times (v_s - v)$$

$$F_e = F_m = B \times \ell \times I = B \times \ell \times \frac{E}{R}$$

d'où :

$$F_m = \frac{B^2 \times \ell^2}{R} (v_s - v)$$

Le conducteur est entraîné dans le sens de v_s mais à une vitesse inférieure v . C'est le principe du *moteur asynchrone*.

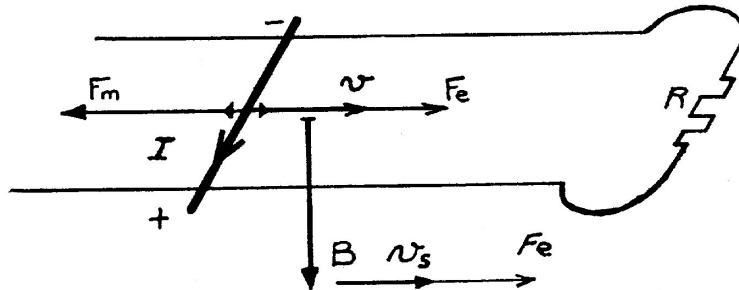


FIGURE 1.4 – Principe du moteur électrique.

1.4 Production de forces électromotrices

La rotation des conducteurs dans les machines tournantes engendre l'apparition de f.é.m. . Ce paragraphe traite essentiellement des machines syn-

chrones et des machines à courant continu. Bien qu'on y retrouve les mêmes lois, les machines asynchrones seront étudiées séparément.

1.4.1 Structure de la machine

Une machine électrique comprend (voir figure 1.5) :

Un circuit magnétique fermé : les lignes d'induction traversent la culasse, les pôles, les entrefers, le rotor, suivant un tracé représenté sur le schéma ;

des enroulements d'excitation : qui créent le flux magnétique. Ces enroulements sont disposés autour des pôles et sont alimentés en courant continu ;

le rotor ou induit : cylindrique, il renferme dans des rainures (ou encoches) des conducteurs rectilignes, parallèles à son axe de rotation. Ces conducteurs seront par la suite reliés entre eux.

Le rotor est entraîné à une vitesse de rotation constante N (en tours par seconde) ou ω (en radians par seconde) avec $\omega = 2\pi N$.

Des forces électromotrices seront induites dans les conducteurs du rotor : elles dépendront de l'induction régnant dans l'entrefer et donc de la position instantanée du conducteur considéré.

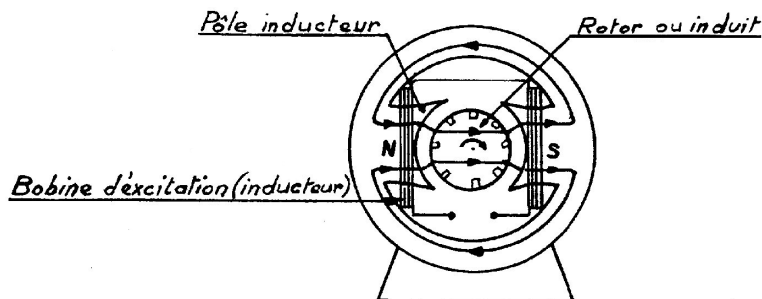


FIGURE 1.5 – Structure d'une machine électrique.

1.4.2 Flux magnétique

Mettons en série deux conducteurs diamétralement opposés sur le rotor et soit Φ le flux circulant dans les pôles inducteurs. On a schématiquement :

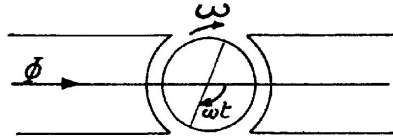


FIGURE 1.6 – Spire d'une machine électrique.

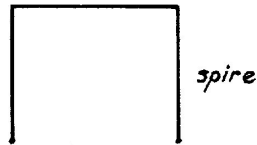


FIGURE 1.7 – Spire formée de deux conducteurs diamétralement opposés.

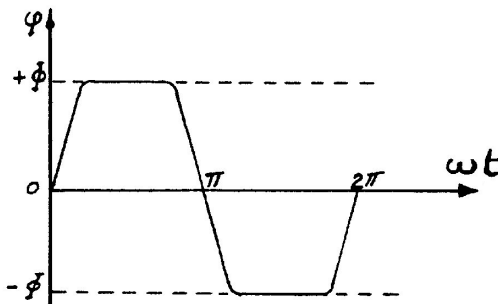


FIGURE 1.8 – Flux coupé par une spire.

On a réalisé une spire qui enserme un flux variable suivant la position de la spire, et dont la forme est donnée à la figure 1.8. Le flux vaut évidemment $\pm\Phi$ quand la spire est perpendiculaire à l'axe des pôles.

Nous supposons dans la suite du cours que le flux est à répartition sinusoïdale et donné par : $\phi = \Phi \sin \omega t$

Une étude plus complète consisterait par exemple à décomposer $\phi(\omega t)$ en série de Fourier ...

1.4.3 Force électromotrice induite

Dans la spire, la force électromotrice induite est :

$$e_s = \Phi \omega \cos \omega t$$

Dans chaque conducteur de la spire, on aura donc :

$$e_c = \frac{\Phi \omega}{2} \cos \omega t$$

Disposons n conducteurs à la périphérie de l'induit et soit A un conducteur origine et B un conducteur quelconque. Avec les notations indiquées à la figure 1.9 la force électromotrice dans un conducteur placé en B est :

$$e_c = \frac{\Phi \omega}{2} \cos(\omega t + \theta)$$

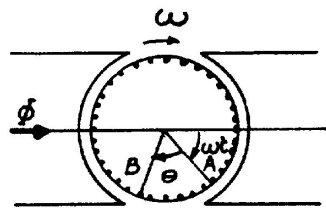


FIGURE 1.9 – F.é.m. dans un conducteur.

On remarque que la répartition des forces électromotrices est fixe par rapport à l'inducteur : les f.é.m. sont maximales sur l'axe des pôles et nulles sur la direction perpendiculaire ou *ligne neutre*. Des conducteurs diamétralement disposés ont des f.é.m. égales mais opposées comme le montre la figure 1.10.

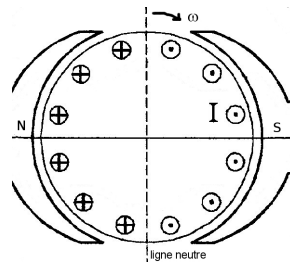


FIGURE 1.10 – Signe des f.é.m. par rapport à la ligne neutre.

Il reste à regrouper ces conducteurs pour obtenir une f.é.m. plus importante et facile à recueillir par des contacts glissants (balais ou charbons). Supposons

que nous puissions mettre en série les conducteurs, si le nombre de conducteurs est très grand on peut écrire :

— nombre de conducteurs dans un angle $d\theta$:

$$dn = \frac{n}{2\pi} d\theta$$

— force électromotrice induite dans ces conducteurs mis en série :

$$de = \frac{n}{2\pi} d\theta \times e_c(\theta) = \frac{n}{2\pi} \times \frac{\Phi\omega}{2} \cos(\omega t + \theta) d\theta$$

Si on considère les conducteurs situés dans un angle $(2\theta_0)$ de part et d'autre du conducteur A :

$$e = \frac{n}{2\pi} \times \frac{\Phi\omega}{2} \times \int_{-\theta_0}^{+\theta_0} \cos(\omega t + \theta) d\theta = \frac{n}{2\pi} \times \frac{\Phi\omega}{2} \times [\sin(\omega t + \theta)]_{-\theta_0}^{+\theta_0}$$

Soit :

$$e = \frac{n}{2\pi} \times \Phi\omega \sin\theta_0 \cos\omega t$$

ou :

$$e = nN\Phi \sin\theta_0 \cos\omega t$$

Cette force électromotrice est sinusoïdale, de pulsation $\omega = 2\pi N$ et d'amplitude fonction de la vitesse, du flux et de θ_0 .

CONSÉQUENCES :

1. Si on met en série les n conducteurs, soit $\theta_0 = \pi$, $e = 0$. On peut donc refermer le circuit de l'induit : aucun courant n'y circulera. L'enroulement n'a plus d'extrémités : la symétrie de révolution de l'induit est parfaite. Ce résultat est évident si on considère que les f.é.m. induites dans les conducteurs s'annulent par symétrie par rapport à l'axe de rotation. L'amplitude de la force électromotrice est maximale pour $\theta_0 = \pi/2$: $n/2$ conducteurs en série :

$$e = nN\Phi \cos\omega t$$

2. Pour recueillir la force électromotrice, on dispose de deux solutions :

Machine synchrone : 2 bagues conductrices sont reliées à l'enroulement en deux points fixes ($+\theta_0$ et $-\theta_0$) comme le montre la figure 1.11. Deux balais fixes frottent sur ces bagues et on recueille donc la *tension alternative* :

$$e = nN\Phi \sin\theta_0 \cos\omega t$$

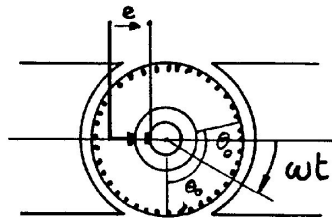


FIGURE 1.11 – Position des balais dans une machine synchrone.

Machine à courant continu : On place deux balais fixes en contact avec les conducteurs passant par la ligne neutre comme le montre la figure 1.12. On recueille donc à chaque instant la f.é.m. induite dans un demi-induit ($\theta_0 = \frac{\pi}{2}$) et à l'instant où elle est maximale ($\omega t = 0$). On obtient donc une tension constante de valeur :

$$E = nN\Phi$$

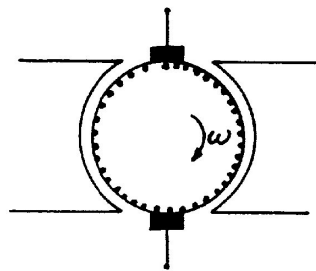


FIGURE 1.12 – Position des balais dans une machine à courant continu.

Machines synchrones et à courant continu ne diffèrent donc pas dans leurs principes. Les caractères spécifiques de ces deux types de machines seront développés dans la suite du cours.

1.5 Inductions tournantes

Dans ce paragraphe, nous supposons que les circuits magnétiques ne sont pas saturés, ce qui permet de parler indifféremment de forces magnétomotrices tournantes ou d'inductions tournantes car les inductions sont alors proportionnelles aux forces magnétomotrices.

S'il y a saturation, on ne peut parler que des forces magnétomotrices tournantes, dont on déduit, via les courbes d'aimantation, les flux et les inductions.

1.5.1 Inducteur tournant

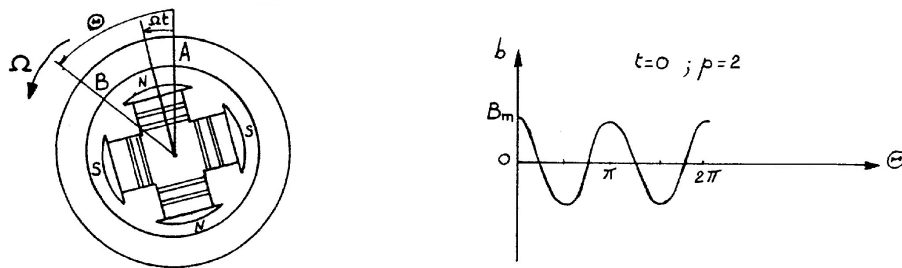


FIGURE 1.13 – Champ magnétique créé par un inducteur tournant.

Le rotor comporte p paires de pôles (paires Nord-Sud) dont les enroulements alimentés en *courant continu* créent une succession de pôles alternativement nord et sud.

A l'instant $t = 0$, l'induction en un point B de l'entrefer est représentée à la figure 1.13 : sa période est $\frac{2\pi}{p}$ et sa variation est supposée sinusoïdale :

$$t = 0 \quad b = B_m \cos p\Theta$$

Si le rotor tourne à la vitesse angulaire Ω , l'angle entre le point B et le pôle nord pris ici comme origine devient $(\Theta - \Omega t)$ et l'induction en B s'écrit :

$$b = B_m \cos p(\Theta - \Omega t)$$

En posant $\omega = p\Omega$, on écrira : $b = B_m \cos(p\Theta - \omega t)$

L'induction en un point fixe de l'entrefer varie sinusoïdalement à la pulsation ω soit donc à la fréquence $f = pN$ car $\Omega = 2\pi N$. On a engendré des inductions tournantes (ou forces magnétomotrices tournantes).

1.5.2 Inducteur triphasé fixe

1.5.2.1 Inducteur triphasé

On alimente par les trois phases d'un réseau triphasé trois bobinages identiques, engendrant chacun p paires de pôles et décalés dans l'espace de $\frac{2\pi}{3p}$ radians ($120^\circ/p$).

Exemples :

On repérera les phases par les symboles suivants :

phase 1 : $\circ \bullet$; phase 2 : $\triangle \blacktriangle$; phase 3 : $\square \blacksquare$

Inducteur bipolaire : une seule bobine par phase engendrant donc une paire de pôles par phase ($p = 1$). Ces bobines sont décalées de 120° comme le montre la figure 1.14.

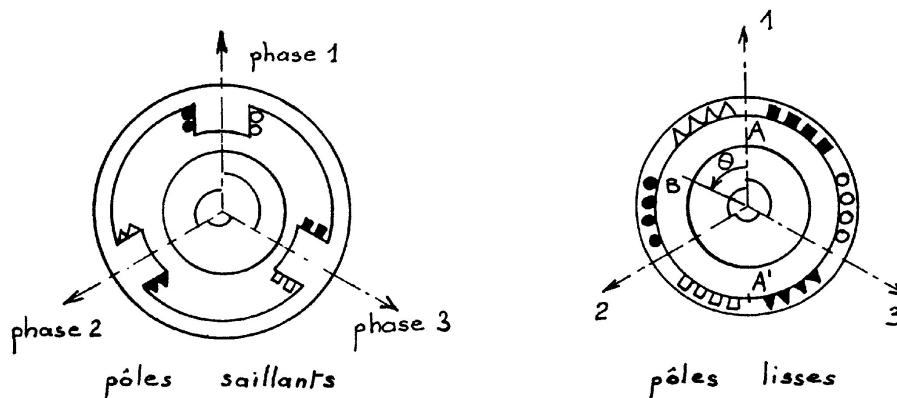


FIGURE 1.14 – Inducteur bipolaire à pôles saillants et à pôles lisses.

L'inducteur à pôles lisses comporte des bobines placées dans des encoches du circuit magnétique ; on peut, en développant la surface latérale de l'entrefer, en donner la représentation schématique de la figure 1.15 page suivante.

Inducteur tétrapolaire : Il comporte deux bobines par phase et par suite deux paires de pôles par phase ($p = 2$). Ces bobines sont décalées de 60° comme

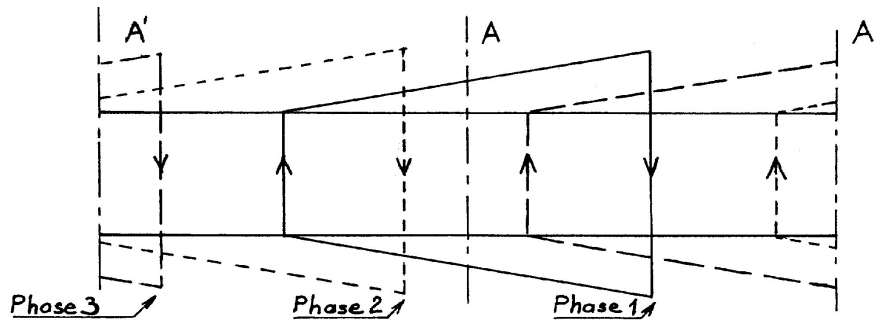


FIGURE 1.15 – développement de la surface latérale d'un inducteur à pôles lisses.

le montre la figure 1.16.

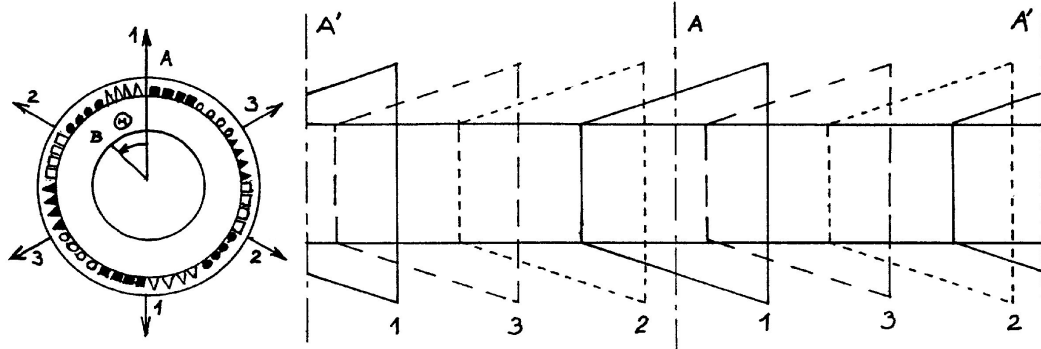


FIGURE 1.16 – développement de la surface latérale d'un inducteur tétrapolaire.

On retrouve deux fois la même succession de bobines. on peut généraliser à un nombre quelconque de paires de pôles.

1.5.2.2 Théorème de Ferraris

Calculons l'induction engendrée par un tel inducteur alimenté par des courants triphasés équilibrés. Supposons que les bobines de la phase 1 soient seules alimentées par un courant continu I_{max} . En supposant sinusoïdale la variation de l'induction dans l'entrefer en fonction de l'angle Θ dont on se déplace par rapport à une origine, on aura en un point B repéré par Θ une induction :

$$B_1 = B_{max} \cos p\Theta$$

Si cette phase est, seule, alimentée par un courant alternatif i_1 de pulsation ω , l'induction en ce point s'écrit :

$$b_1 = B_{max} \cos \omega t \cos p\Theta$$

avec

$$i_1 = I_{max} \cos \omega t$$

De même, la seconde phase, décalée de $\frac{2\pi}{3p}$ radians engendrera au même point une induction :

$$b_2 = B_{max} \underbrace{\cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)}_{\text{déphasage}} \underbrace{\cos p \left(\Theta - \frac{2\pi}{3p} \right)}_{\text{décalage}}$$

Enfin, la phase 3 donne :

$$b_3 = B_{max} \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cos p \left(\Theta - \frac{4\pi}{3p} \right)$$

En additionnant ces trois expressions, on obtient l'induction créée en un point par un inducteur triphasé :

$$b = b_1 + b_2 + b_3 = \frac{2}{3} B_{max} \cos (\omega t - p\Theta)$$

On retrouve la même expression qu'au paragraphe 1.5.1 page 18 : l'inducteur triphasé fixe se comporte donc comme un inducteur tournant. En comparant les expressions, on aura :

Un inducteur triphasé fixe, comportant p paires de pôles par phase, alimenté à la pulsation ω engendre une induction tournante à p paires de pôles tournant à la vitesse N_s (angulaire Ω_s) telle que :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad N_s = \frac{f}{p}$$

Ce résultat, fondamental, peut être intuitivement prévu : le courant étant successivement maximal dans les phases et les bobines étant décalées dans l'espace, au déphasage dans le temps correspond un décalage angulaire : en

22 CHAPITRE 1. GÉNÉRALITÉS SUR LES MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES

une période T , il y a un décalage de $1/p$ tour et la vitesse de rotation est donc :

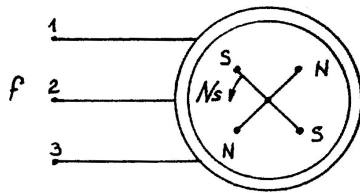
$$N = \frac{1}{T \cdot p} = \frac{f}{p}$$

Exemples : Les vitesses de rotation obtenues sont donc quantifiées, discrètes. On aura par exemple, sur les réseaux usuels de distribution électrique et pour $p = 1$ et $p = 2$:

	fréquences			
p	50 Hz	60 Hz	400 Hz	
1	3000	3600	24000	tr/min
2	1500	1800	12000	tr/min

Remarques :

- Si on intervertit deux phases, le sens de rotation est inversé ;
- on peut représenter le phénomène obtenu par un inducteur fictif (ou roues polaire fictive) comportant p paires de pôles, tournant à la vitesse N_s .



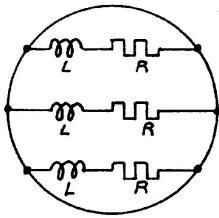
Exemple : $p = 2$, $N_s = \frac{f}{2}$, si on échange 1 et 2, l'inducteur fictif tournera en sens inverse.

Si le circuit magnétique est saturé, on compose, au lieu des inductions, les forces magnétomotrices dues à chaque phase et on obtient par le même calcul p forces magnétomotrices tournantes de vitesse N_s portées par l'inducteur fictif. On en déduit, compte-tenu de la courbe d'aimantation du circuit magnétique, les flux tournants ainsi que les inductions. Ce résultat peut être étendu à tous les systèmes polyphasés.

1.5.2.3 Inductance d'un enroulement triphasé

On peut attribuer, en fonctionnement équilibré, une impédance propre à chaque phase : c'est l'impédance cyclique ou synchrone. Elle tient compte implicitement des couplages existants avec les autres phases.

Un inducteur triphasé présentera donc, par phase, une résistance R et une inductance propre L .



En pratique, on aura : $R \ll L\omega$. Comme l'action simultanée des trois phases engendre un champ tournant, il est utile d'interpréter physiquement le phénomène.

Étudions le flux embrassé par les bobines de la phase 1. Les axes de ces bobines sont tels que : $\Theta = \frac{2k\pi}{p}$.

L'induction dans leurs axes est donc : $b = \frac{3}{2}B_{max} \cos \omega t$.

Le flux embrassé par la phase 1 s'écrira donc : $\phi_1 = \Phi_{max} \cos \omega t$

Ce flux varie proportionnellement au courant de la phase 1 et on peut donc écrire pour la phase 1 :

$\Phi_1 = LI_1$, avec L inductance cyclique ou synchrone.

La f.é.m. d'autoinduction E étant par la suite : $\underline{E}_1 = jL\omega \underline{I}_1$.

En représentant, pour simplifier, le cas d'une machine bipolaire pour laquelle $\Omega_s = \omega$, on aura la f.é.m. et le courant instantanés comme représentés à la figure 1.17

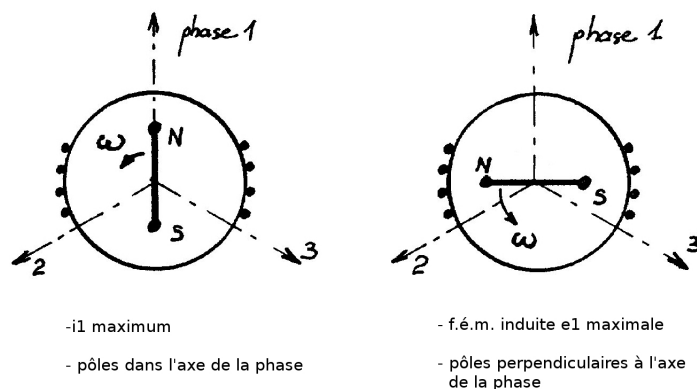


FIGURE 1.17 – f.é.m. et courant pour une machine bipolaire.

1.5.2.4 Cas particulier : inducteur monophasé

Une bobine alimentée par un courant sinusoïdal engendre une induction de direction fixe qui varie elle aussi sinusoïdalement en fonction du temps. On peut cependant considérer que ce bobinage engendre lui aussi des inductions tournantes.

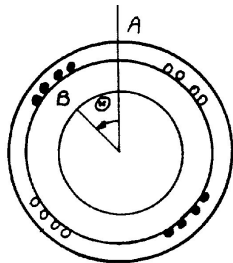
Exemple : $p = 2$

On retrouve la structure d'une phase d'un bobinage triphasé. L'induction engendrée en B s'écrit, ω étant la pulsation :

$$b = B_{max} \cos \omega t \cos p\Theta$$

ou encore :

$$b = \frac{B_{max}}{2} \cos(\omega t + p\Theta) + \frac{B_{max}}{2} \cos(\omega t - p\Theta)$$



En comparant aux résultats précédents, on peut considérer qu'un enroulement monophasé fixe, comportant p paires de pôles, alimenté à la pulsation ω , engendre deux inductions tournantes à p paires de pôles tournant en sens inverses à la vitesse N_s (angulaire : Ω_s) telle que $N_s = \frac{f}{p}$. C'est le théorème de Leblanc¹ qui est à la base des machines asynchrones monophasées.

Il n'y a pas de sens de rotation privilégié, le système étant parfaitement symétrique.

1. Maurice Leblanc (né le 2 mars 1857 à Paris et mort le 27 octobre 1923) est un ingénieur et un industriel français, concepteur de plusieurs appareils en électricité et en hydraulique. Outre une théorie complète du moteur d'induction on lui doit les circuits amortisseurs pour réduire l'influence des régimes transitoires des alternateurs.

1.6 Machine bipolaire équivalente

Si dans ce qui précède on pose :

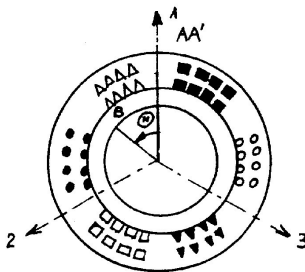
$$\theta = p\Theta$$

Les expressions des inductions s'écrivent :

$$b = A \cos(\omega t - \theta)$$

C'est l'induction qui serait engendrée par une armature *bipolaire*, soit *tour-nante*, de vitesse $\omega = p\Omega_s$ et alimentée en courant continu, soit *fixe* et alimentée à la pulsation ω en triphasé.

Les inductions tournantes et les vecteurs de Fresnel tournent alors à la même vitesse ω et on pourra donc superposer les diagrammes (voir paragraphe 1.5.2.3 page 22).



Par exemple, l'inducteur tétrapolaire du paragraphe 1.5.2.1 page 19 peut être représenté par un inducteur bipolaire équivalent, comportant le même nombre de conducteurs avec :

$$\theta = p\Theta$$

$$\omega = p\Omega_s$$

θ et ω sont les angles et vitesses « électriques ». Toute machine peut donc être étudiée sur ce modèle équivalent.

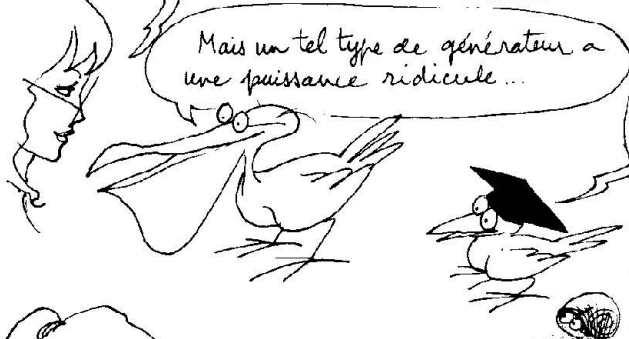
1.7 Explication microscopique du fonctionnement

Les pages suivantes expliquent le fonctionnement d'une machine électrique (moteur et génératrice) d'un point de vue microscopique. Ces pages sont extraites de l'album « Pour quelques ampères de plus » des aventures d'Anselme

26 CHAPITRE 1. GÉNÉRALITÉS SUR LES MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES

Lanturlu ayant pour auteur Jean-Pierre Petit. Monsieur Jean-Pierre Petit m'a aimablement autorisé à publier ces pages dans ce cours. Les bandes dessinées de vulgarisation scientifique des aventures d'Anselme Lanturlu sont téléchargeable gratuitement au format PDF sur le site <http://www.savoir-sans-frontieres.com/>

C'est l'anglais Michael Faraday, en 1857. Il se servit du mouvement de l'eau saumâtre de la Tamise, au moment de la marée et... de la composante verticale du champ magnétique terrestre : à peine un dixième de gauss*! Il inventa ainsi ce type de générateur électrique, dit **MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE**, en abrégé : **MHD**.



Mais un tel type de générateur a une puissance ridicule...

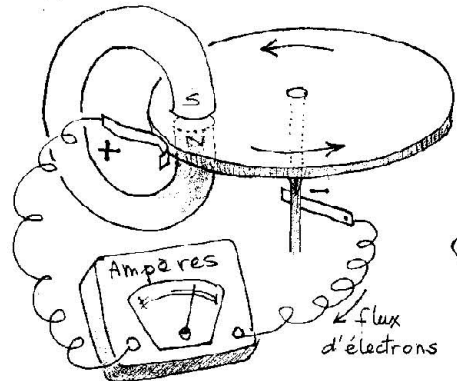
L'eau n'est peut-être pas le meilleur ingrédient pour créer un générateur électrique.

alors, que faut-il utiliser ? du cuivre en fusion ?



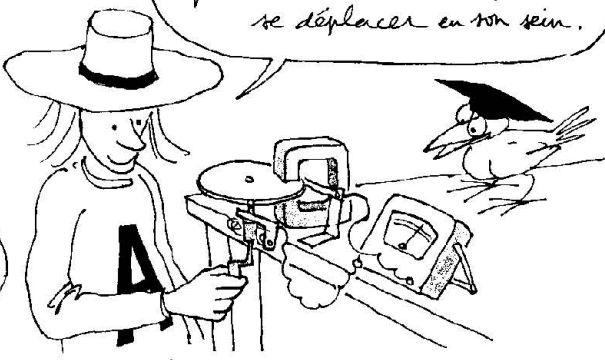
Pourquoi tiens-tu absolument à utiliser un liquide ?

LA ROUE DE BARLOW



Sophie a tout à fait raison. En faisant tourner ce disque de métal dans l'entrefer d'un aimant, je crée une migration des charges électriques, en l'occurrence ici des électrons, puisque les charges positives du métal ne peuvent se déplacer en son sein.

Voilà donc notre premier **GÉNÉRATEUR ÉLECTRIQUE**



* Le moindre aimant de couturière fait une centaine de gauss.

FIGURE 1.18 – Explication microscopique du fonctionnement d'une machine électrique.

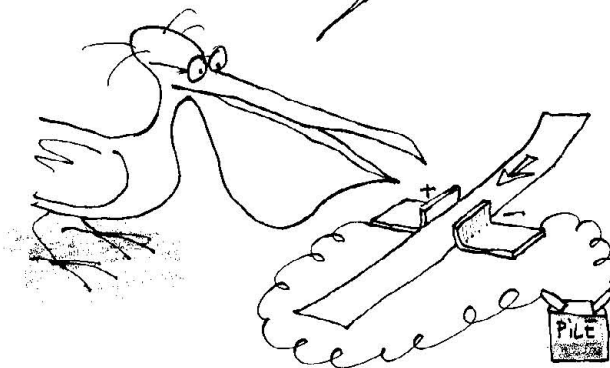
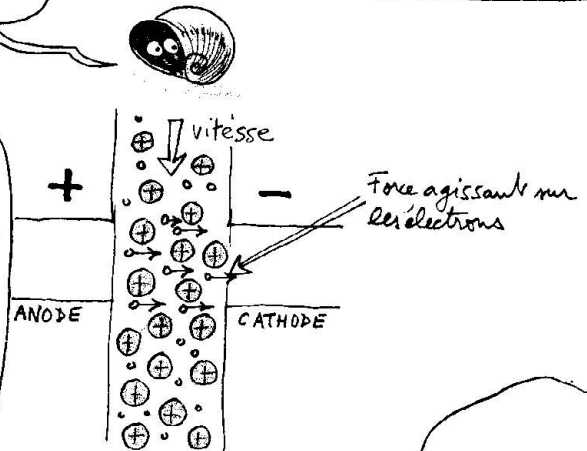


Tu vois, les charges sont comme des véhicules qui suivent une autoroute, qui représente le mouvement du métal. Les charges positives sont de lourds camions incapables de tourner à droite ou à gauche, ou de changer de vitesse. Ils sont liés au flot des véhicules, liés entre eux. Les électrons sont des petits motocyclistes, qui, au départ, suivent également le flot.



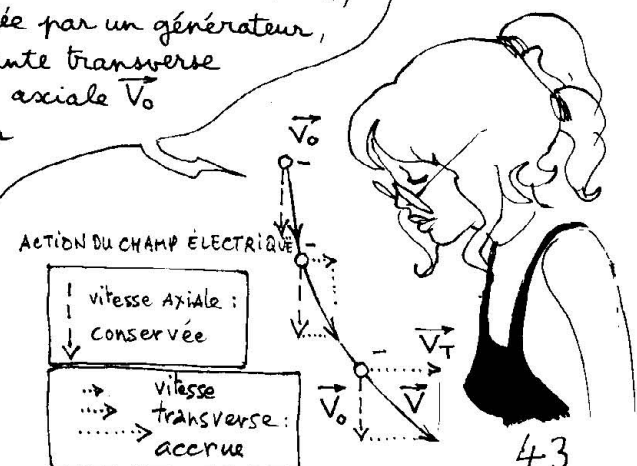
Voici donc, au niveau microscopique, l'explication du fait qu'il est nécessaire d'exercer une force, de fournir un **TRAVAIL** pour produire de l'énergie électrique.

Otez-moi d'un doute. Oublions le champ magnétique. Est-ce que je n'obtiendrais pas un freinage identique en provoquant cette dérivation latérale du flux d'électrons en direction des électrodes, mais à l'aide, cette fois, d'un champ électrique créé par un générateur?

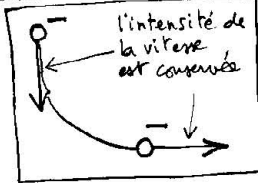


Non, Léon, cela serait fondamentalement différent.

Quand tu agis sur une charge électrique, noyée au milieu d'un flot d'atomes se déplaçant à une vitesse \vec{V}_0 , à l'aide d'une force électrique créée par un générateur, tu lui communique une composante transverse de vitesse \vec{V}_T . Mais la composante axiale \vec{V}_0 n'est pas modifiée. Un générateur communique donc de l'énergie aux charges électriques.



ACTION DU CHAMP MAGNÉTIQUE



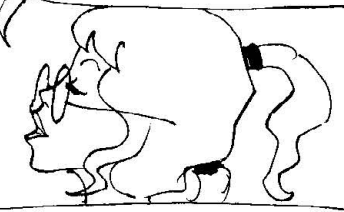
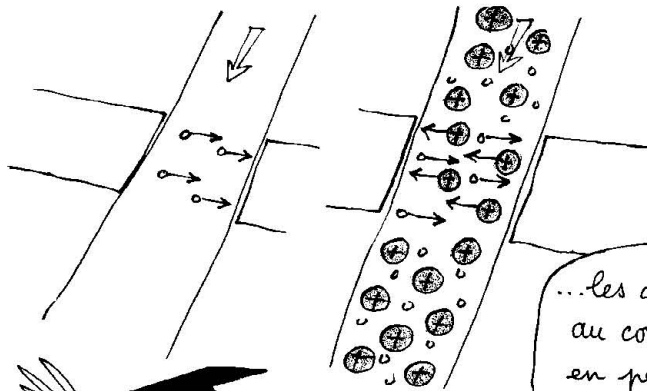
Un champ magnétique transversal, au contraire, ne modifie pas l'énergie cinétique $\frac{1}{2} m V^2$ de la particule chargée. La direction de la vitesse change mais non son intensité. Dans ce cas, la composante axiale de cette vitesse, parallèle au flux général, diminue. D'où un freinage du conducteur.



Bon, mais dans les deux cas de figure, je sollicite transversalement ma population d'électrons libres...

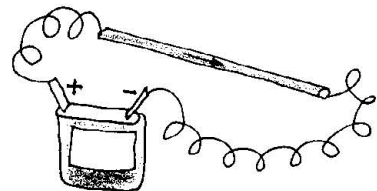
... donc je devrais observer une force transverse

Leon, tu oublies que la **FORCE DE LAPLACE** agit tout autant sur les charges positives et que ces forces se compensent...



... les charges électriques liées rigidement au conducteur transmettent cette force en permanence, alors que les charges libres retransmettent cette force périodiquement par le jeu des collisions.

Ce qui fait que lorsque l'électricité s'écoule dans un fil, elle ne tire pas dessus.

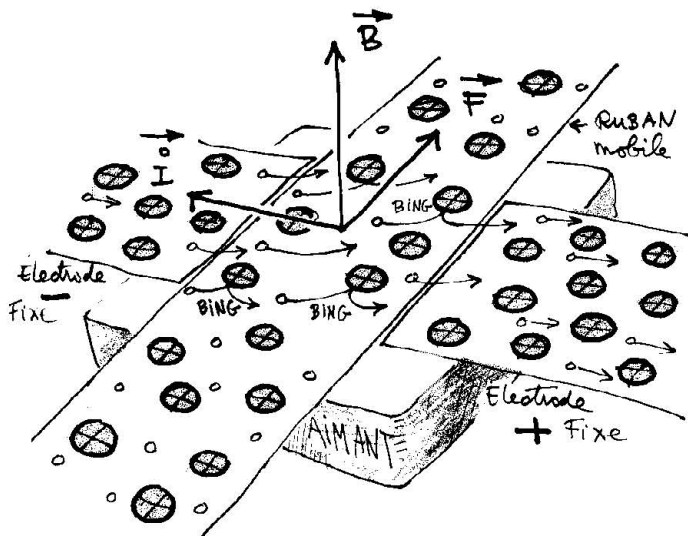


LE MOTEUR ÉLECTRIQUE



Tout cela me donne une idée. En faisant circuler un courant transversalement au ruban conducteur, je ne crée pas de force, c'est entendu, mais que se passe-t-il si je combine les deux effets : le passage du courant grâce au générateur et la rotation du vecteur vitesse due à l'effet d'un champ magnétique perpendiculaire à la vitesse de déplacement des charges ?

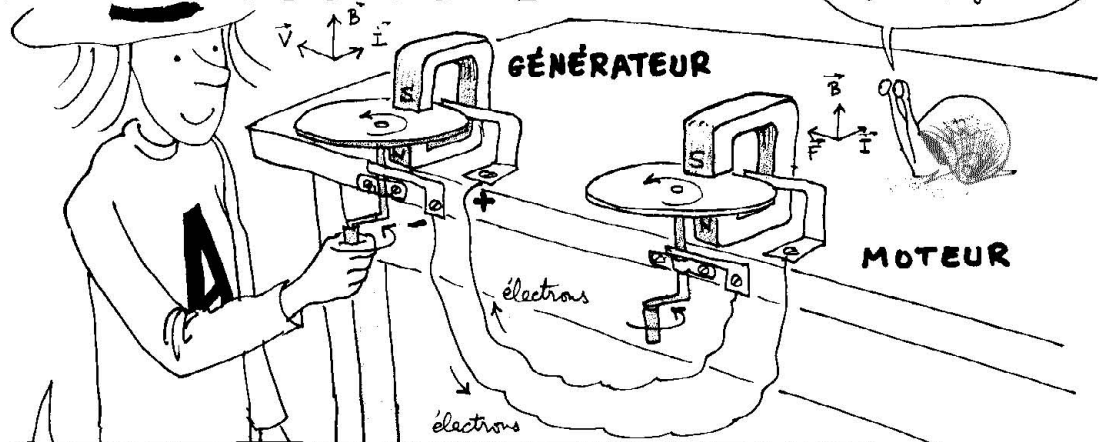
Le générateur va mettre en mouvement les électrons, qui vont tendre à traverser le ruban en passant de la cathode à l'anode. Mais le champ magnétique, en incurvant leur trajectoire, transmettra une partie de l'impulsion acquise selon l'axe de la bande, laquelle subira ainsi une force.



L'analyse du comportement microscopique, à l'échelle de l'atome, permet de déduire le comportement macroscopique, à l'échelle de la manip.



RÉVERSIBILITÉ



C'est tout à fait étonnant. La même machine peut être utilisée comme générateur de courant, ou comme moteur.