

8.5 MOTEUR "LINÉAIRE" À INDUCTION

8.5.1 DESCRIPTION

Les "moteurs linéaires à induction" sont des moteurs fonctionnant selon le même principe que les moteurs asynchrones rotatifs (polyphasés à induction, courant alternatif), mais qui auraient été "développés" le long de l'entrefer. Ces moteurs ont ainsi une structure linéaire (fig. 21), où les enroulements du stator créent une induction "glissante" (et non plus tournante), et où le "rotor" est entraîné en translation le long de l'entrefer (et non plus en rotation).

Il est important de noter qu'il existe toutefois trois différences essentielles (et évidentes) entre ces 2 types de machines:

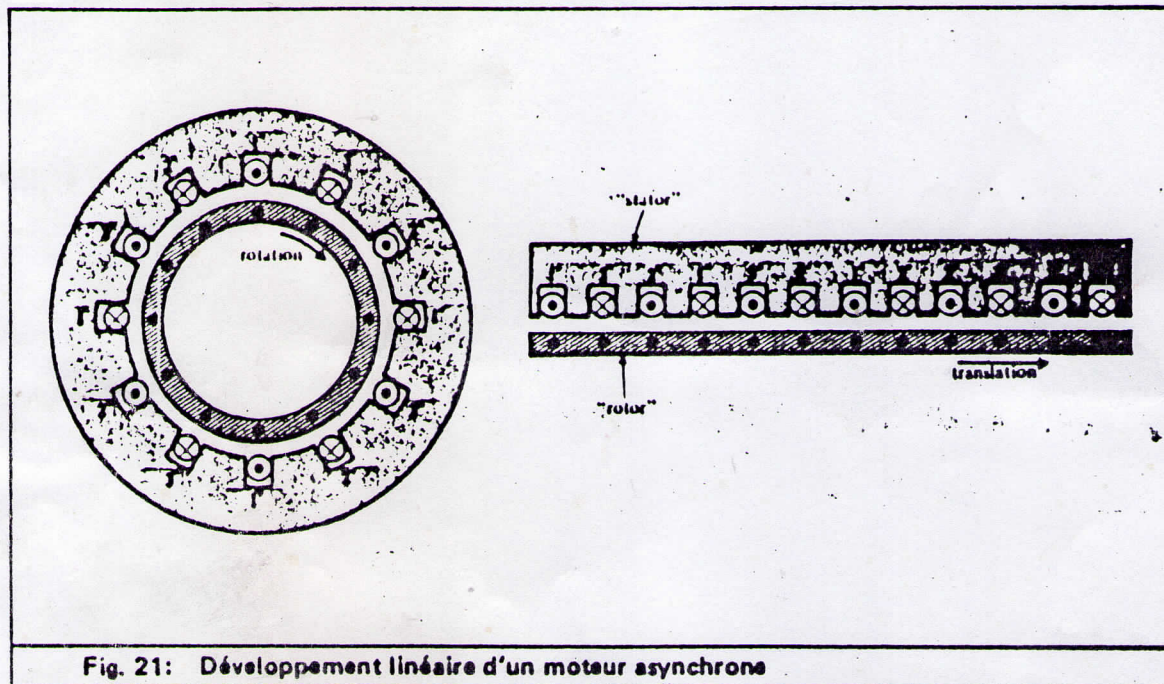


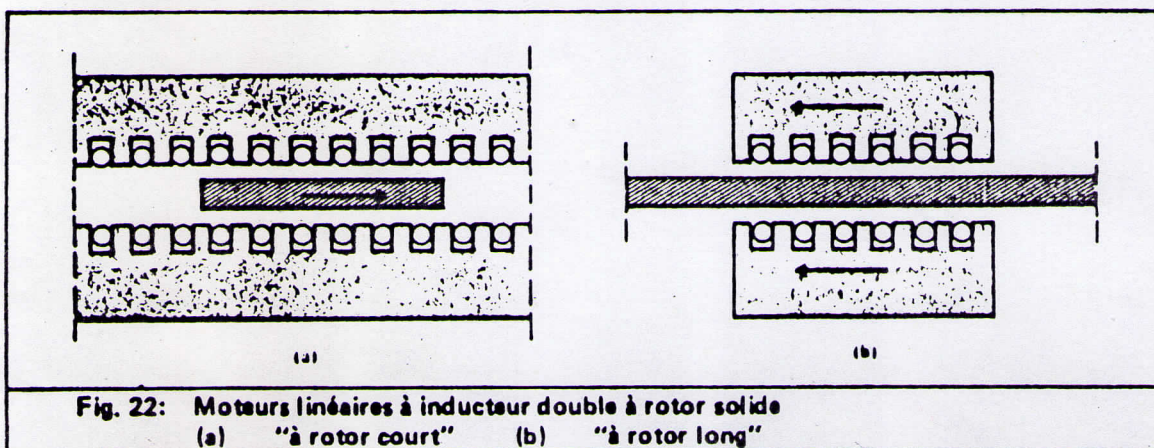
Fig. 21: Développement linéaire d'un moteur asynchrone

- Alors qu'un moteur rotatif a en général un rotor constitué par des conducteurs physiquement séparés (cage d'écureuil ou rotor bobiné), un moteur linéaire peut avoir un "rotor" constitué d'une simple plaque solide conductrice, les courants induits circulant alors dans la masse même de la plaque.
- Alors qu'un moteur rotatif n'a en général qu'un stator inducteur, il est intéressant, dans un moteur linéaire, de disposer deux stators inducteurs se faisant face (ceci d'une part pour faciliter la fermeture du flux dans le circuit magnétique, d'autre part pour augmenter l'induction dans l'entrefer, dont l'épaisseur peut être plus grande).
- Alors qu'un moteur rotatif a un stator fixe et un rotor mobile, un moteur linéaire peut avoir soit un stator fixe et un rotor mobile, auquel cas le rotor sera plus court que le stator (supposé indéfiniment long), soit un stator mobile et un

rotor fixe, auquel cas le stator sera plus court que le rotor (supposé indéfiniment long). Ces 2 catégories de moteurs linéaires, représentés schématiquement sur la fig. 22, sont respectivement appelés:

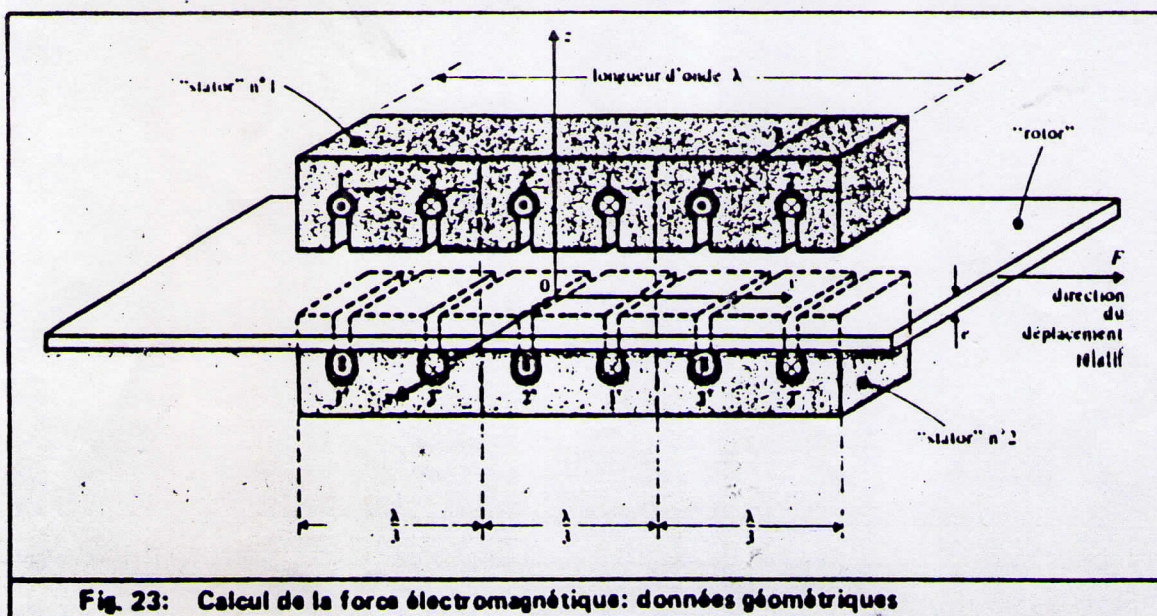
- Moteurs "à rotor court" (ou "à inducteur long")
- Moteurs "à rotor long" (ou "à inducteur court")

On voit qu'il intervient dans les moteurs linéaires des "effets d'extrémité" (discontinuité du champ) qui n'existent évidemment pas dans les moteurs rotatifs.



8.5.2 CALCUL APPROCHE DE LA FORCE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

On peut donner une expression approchée de la force électromagnétique d'interaction entre rotor et stator en négligeant les effets d'extrémité et en supposant que le stator a une structure limitée à un intervalle polaire (chaque inducteur des stators 1 et 2 porte 3 bobines dont les axes sont parallèles à la direction z , et respectivement décalés d'une distance $\frac{\lambda}{3}$, dans la direction y , fig. 23). On peut considérer que



l'induction glissante créée par les enroulements inducteurs du stator est une "onde" à répartition sinusoïdale, fonction de l'espace et du temps, se déplaçant dans la direction y avec une certaine vitesse u_0 (à un instant donné, B a une répartition sinusoïdale le long de y , et, pour une valeur donnée de y , B varie sinusoïdalement en fonction du temps).

Dans le système de coordonnées rectangulaires défini par la fig. 23, on peut écrire les composantes de \vec{B} :

$$\begin{cases} B_x = 0 \\ B_y = 0 \\ B_z = B_{\max} \cos \left(\omega_0 t - \frac{2\pi}{\lambda} y \right) \end{cases} \quad [8-10]$$

en introduisant les paramètres suivants:

}	B_{\max}	valeur maximale de l'induction dans la direction z , en T	[8-11]
	ω_0	pulsation angulaire des courants inducteurs, en rd/s	
	$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$	fréquence des courants inducteurs, en Hz	
	λ	distance linéaire entre les axes de 2 bobines consécutives appartenant à la même phase, en m (cette quantité est appelée "longueur d'onde" ou "intervalle polaire").	
	$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$	"nombre d'ondes", en rd/m	
	$u_0 = \frac{\omega_0 \lambda}{2\pi} = \lambda f_0$	vitesse linéaire de déplacement de l'onde dans la direction y , en m/s	

Dans la théorie des champs glissants, on admet que la force exercée sur le rotor résulte de l'absorption de l'énergie électromagnétique de l'onde. Si on désigne par P la puissance absorbée et par u_0 la vitesse tangentielle du champ, la force électromagnétique exercée sur le rotor vaut, à l'arrêt:

$$F = \frac{P}{u_0} \quad [8-12]$$

Si le rotor se déplace avec une vitesse u (différente de la vitesse u_0 de propagation de l'onde), il absorbe une partie de l'énergie électromagnétique de l'onde.

sous forme de pertes JOULE, et il transforme l'autre partie en énergie mécanique. Si le rotor se déplace à la vitesse synchrone u_0 , il n'y a plus de mouvement relatif, donc plus de courants induits, et la force exercée est nulle.

On peut définir, par analogie avec un moteur asynchrone, le "glissement", comme la différence relative entre les vitesses u_0 de l'onde et u du rotor.

$$S = \frac{u_0 - u}{u_0} = 1 - \frac{u}{u_0} \quad [8-13]$$

En fonction de ce glissement, la vitesse du rotor vaut:

$$u = (1 - s) u_0 = (1 - s) \lambda f_0 \quad [8-14]$$

Si on désigne par P la puissance totale absorbée par le rotor, la force électromagnétique exercée vaut, si $u < u_0$:

$$F = \frac{P}{s u_0} \quad [8-15]$$

Considérons (fig. 24) deux éléments du rotor parallèles à la direction x , d'épaisseur e , de largeur dY , et situés respectivement aux abscisses $y - Y$ et $y + Y$ (distance $2Y$ entre eux)

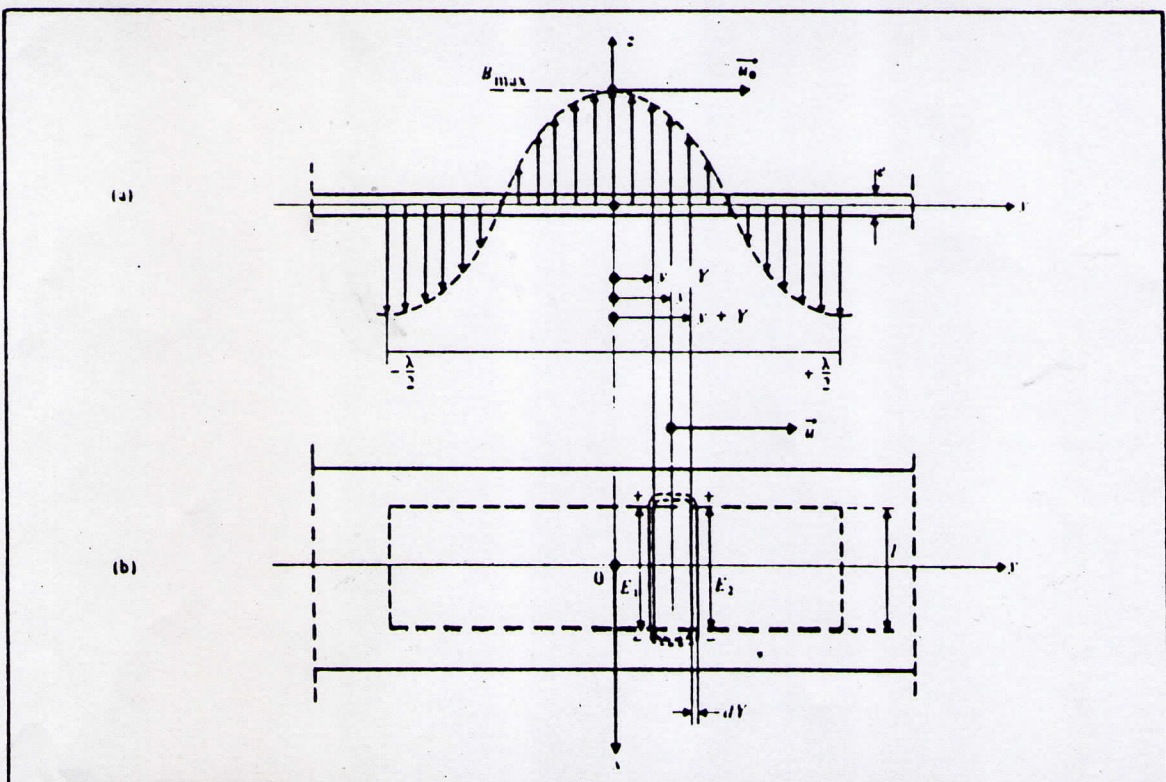


Fig. 24: Calcul de la f.e.m induite dans une boucle élémentaire du rotor
 (a) Répartition de l'induction le long de y à l'instant $t = 0$
 (b) F.e.m e_1 et e_2 induites dans 2 éléments distants de $2Y$ à l'abscisse y

Les f.e.m. induites "de vitesse" valent, d'après [1-34] où on doit considérer la vitesse comme celle de l'élément par rapport à B , c'est-à-dire $u - u_0$ avec nos notations:

$$\begin{cases} E_1 = B_1 l (u - u_0) = B_{\max} l (u - u_0) \cos \left[\omega_0 t - \frac{2\pi}{\lambda} (y - Y) \right] \\ E_2 = B_2 l (u - u_0) = B_{\max} l (u - u_0) \cos \left[\omega_0 t - \frac{2\pi}{\lambda} (y + Y) \right] \end{cases}$$

Dans la boucle élémentaire fermée d'épaisseur dY (fig. 24b), la tension induite vaut donc:

$$E = E_1 - E_2 = 2 B_{\max} l (u - u_0) \sin \left[\omega_0 t - \frac{2\pi}{\lambda} y \right] \sin \frac{2\pi}{\lambda} Y$$

On peut écrire, compte tenu de [8-11] et [8-13]:

$$\omega_0 t - \frac{2\pi}{\lambda} y = \omega_0 t - \omega_0 \frac{u}{u_0} t = \omega_0 \left(1 - \frac{u}{u_0} \right) t = s \omega_0 t$$

d'où

$$E = 2 B_{\max} l s u_0 \sin s \omega_0 t \sin \frac{2\pi}{\lambda} Y$$

La valeur efficace de cette f.e.m. vaut, en intégrant par rapport au temps sur une période:

$$E_{\text{eff}} = \sqrt{2} B_{\max} l s u_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} Y \quad [8-16]$$

La résistance électrique de la boucle élémentaire vaut, si on néglige les distances de retour $2Y$ dans les zones extérieures à l'action de B (fig. 24):

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{2l}{edY}$$

σ désignant la conductivité électrique du rotor, en siemens/mètre

La puissance élémentaire absorbée vaut donc:

$$dP = \frac{E_{\text{eff}}^2}{R} = B_{\max}^2 l s^2 u_0^2 \sigma e \sin^2 \frac{2\pi}{\lambda} Y dY$$

et la puissance totale absorbée vaut, en intégrant la relation précédente par rapport à la variable Y entre 0 et $\frac{\lambda}{2}$:

$$P = B_{\max}^2 l s^2 u_0^2 \sigma e \int_0^{\frac{\lambda}{2}} \sin^2 \frac{2\pi}{\lambda} Y dY = \frac{B_{\max}^2}{4} l s^2 u_0^2 \sigma e \lambda \quad [8 \cdot 17]$$

Ainsi, la densité de puissance absorbée par unité de surface du rotor perpendiculaire à la direction y vaut, pour un intervalle polaire:

$$p = \frac{P}{le} = \frac{\sigma B_{\max}^2}{4} s^2 u_0^2 \lambda \quad [8 \cdot 18]$$

On en déduit l'expression de la force électromagnétique qui s'exerce sur le rotor dans la direction y , d'après [8 - 15]:

$$F = \frac{B_{\max}^2}{4} l s u_0 \sigma e \lambda \quad [8 \cdot 19]$$

La densité de force dans la direction y , par unité de volume actif du rotor, vaut:

$$f = \frac{F}{le\lambda} = \frac{\sigma B_{\max}^2}{4} s u_0 \quad [8 \cdot 20]$$

8.5.3 APPLICATIONS

Les moteurs linéaires à induction ont de nombreuses applications dans le domaine de la manutention automatique de matériaux (transport de wagonnets dans les mines, contrôle automatique de stocks, transport sur chaîne, contrôle de portes coulissantes, essais de chocs de structures) et surtout dans le domaine de la traction électrique (sur rail ou sur "coussin" d'air).

La fig. 25 montre le principe d'utilisation d'un moteur linéaire "à inducteur court" dans la traction sur rail: le "rotor" est constitué par une feuille métallique fixe non magnétique disposée tout au long de la voie; le "stator" portant les inducteurs est installé sur le véhicule et guidé par rapport au rotor.

L'alimentation des inducteurs en triphasé peut être réalisée soit par une petite centrale embarquée à bord du véhicule, soit par collection du courant au moyen de contacts glissants tout au long de la voie.

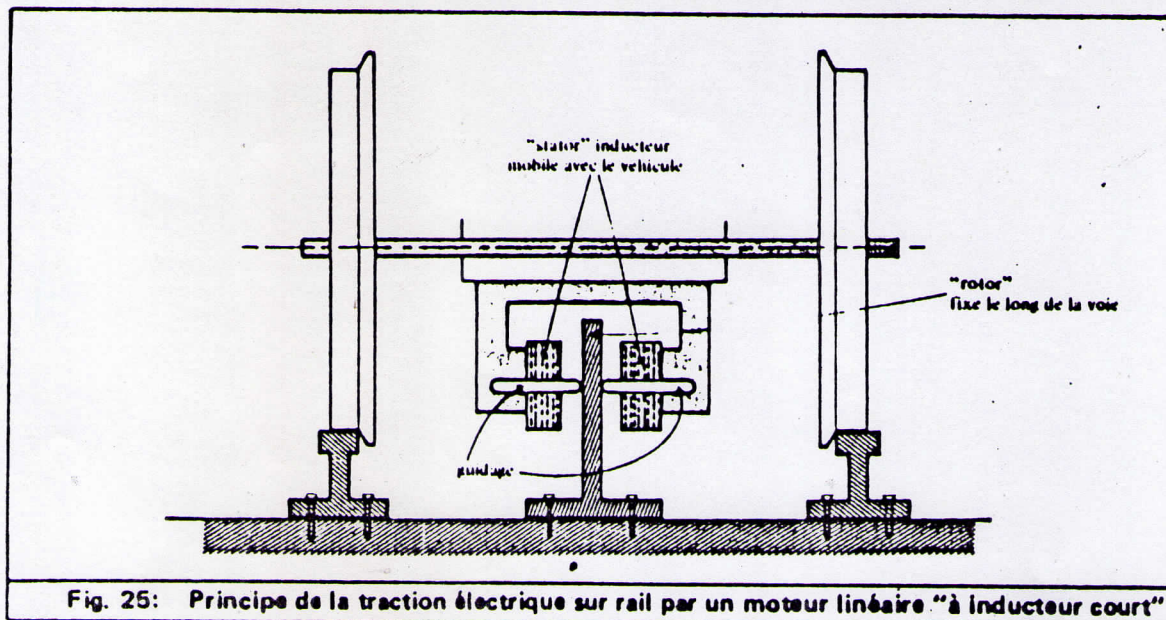


Fig. 25: Principe de la traction électrique sur rail par un moteur linéaire "à inducteur court"

8.5.4 MOTEUR LINÉAIRE À FLUX AXIAL

On peut donner aux moteurs linéaires à induction une forme "tubulaire", dans laquelle le rotor et le stator sont cylindriques, et le champ glissant dirigé le long de l'axe; ces moteurs sont alors appelés "linéaires à flux axial". Une façon de créer le champ glissant axial consiste à faire circuler des courants triphasés dans des bobines disposées comme il est indiqué sur la fig. 26; si on désigne par $\frac{\lambda}{2}$ (demi-longueur d'onde) l'intervalle entre 2 bobines successives d'une même phase bobinées en sens inverse, et par f_0 la fréquence des courants, on obtient un champ glissant le long de l'axe à la vitesse $u_0 = \lambda f_0$.

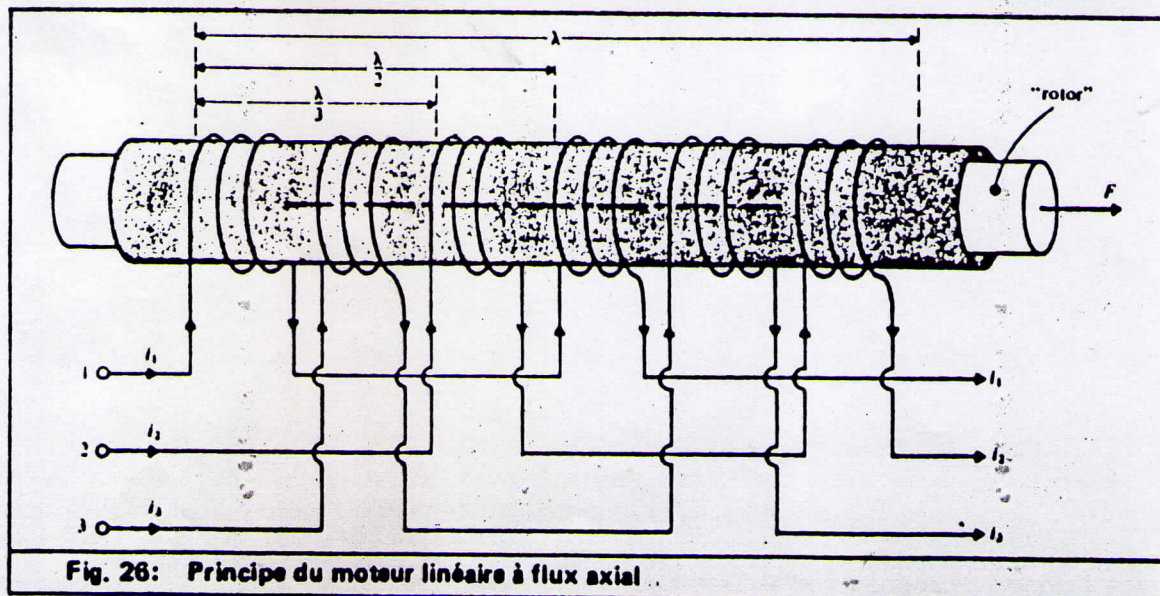


Fig. 26: Principe du moteur linéaire à flux axial