

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 99 (1973)
Heft: 23

Artikel: Moteur linéaire à induction: possibilités de réglage de la vitesse
Autor: Jufer, Marcel / Mattatia, Sydney / Wavre, Nicolas
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-71708>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Moteur linéaire à induction

Possibilités de réglage de la vitesse¹

par MARCEL JUFER, SYDNEY MATTATIA, NICOLAS WAVRE

1. Généralités

Le moteur linéaire à induction présente toutes les caractéristiques usuelles des moteurs asynchrones. Il ne s'en distingue principalement que par la possibilité de générer directement un effort de propulsion et par les effets d'extrémités inhérents à cette propriété. La caractéristique de poussée en fonction de la vitesse présente un maximum, puis s'annule pour une vitesse généralement hyposynchrone [1] (fig. 1). La vitesse sera donc une fonction de l'effort résistant. Il faudra généralement une variation importante de charge pour une faible variation de vitesse. Les difficultés d'un réglage de la vitesse indépendant sont évidemment un handicap dans un domaine tel que la traction. Nous nous proposons d'examiner les possibilités pratiques de réaliser une adaptation de la vitesse. Pour cela, exprimons la vitesse d'un moteur à induction linéaire :

$$V = (1-s) 2\tau f \quad (\text{m/s})$$

avec τ = pas polaire du moteur (m),
 f = fréquence d'alimentation,
 s = glissement.

Les moyens à disposition pour agir sur la vitesse sont donc au nombre de trois, selon la relation ci-dessus :

- action sur le glissement, par l'intermédiaire de la poussée du moteur ou de l'effort résistant imposé par la charge
- action sur le pas polaire. Ceci ne peut se faire que de façon discontinue, par commutation
- action sur la fréquence. Ce procédé est le plus efficace, mais également le plus coûteux.

Dans les paragraphes qui suivent, les impératifs et les limites d'emploi de ces trois procédés seront examinés au travers d'un cas particulier. Outre la souplesse et les possibilités différentes de ces divers procédés, le bilan énergétique au démarrage ou au freinage peut être très variable. Cet aspect n'est pas à négliger dans un système où la masse entraînée est importante et où les régimes d'accélération-décélération sont fréquents.

En dernier lieu, nous examinerons l'incidence des harmoniques imposées par une alimentation non sinusoïdale, telle qu'un générateur statique à fréquence variable. En

particulier l'influence sur le rendement sera mise en évidence.

2. Réglage de la vitesse par action sur le glissement

Pour les points 2 à 5, l'exemple traité consiste en un moteur à un inducteur présentant les caractéristiques suivantes :

- Puissance mécanique 75 kW, tension nominale 500 V 50 Hz.
- Inducteur : Longueur 1600 mm, largeur 160 mm, épaisseur 95 mm, pas polaire 189 mm (8 pôles).
- Induit aluminium, épaisseur 3 mm, largeur 200 mm, culasse en acier massif, « entrefer » 5 mm.

Il a été tenu compte, pour toutes les caractéristiques, des effets d'extrémités.

2.1 Réglage de la tension

Un réglage de la tension d'alimentation a pour conséquence une variation de la poussée proportionnelle au carré de la tension :

$$F = k U^2$$

La caractéristique de poussée décroît donc avec le niveau de tension et impose le déplacement du point d'équilibre avec l'effort résistant. Il s'ensuit une variation de vitesse dans des conditions particulièrement défavorables (fig. 1).

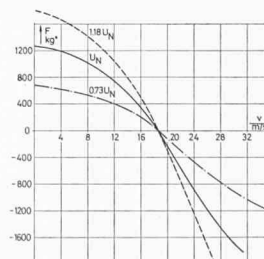


Fig. 1. — Moteur linéaire 75 kW, 15 m/s. Caractéristique de démarrage à tension constante.

— $U = U_N$
 - - $U = 0,73 U_N$
 - - - $U = 1,18 U_N$

¹ Texte d'une conférence présentée par la Chaire d'électromécanique de l'EPFL au Symposium sur les moteurs linéaires organisé à Capri du 19-21 juin 1973 par l'Institut d'électrotechnique de l'Université de Naples et l'Institut de Machines électrique de l'UT Hannover.

D'une part le point stable est souvent particulièrement mal défini. D'autre part les possibilités de réglage à faible vitesse sont pratiquement inexistantes. Il s'agira donc plus souvent d'un réglage de la poussée au démarrage que de la vitesse. On recourra à une telle technique lorsqu'il s'agira de régler une accélération. Par ailleurs le rendement s'effondre avec la vitesse par suite de l'augmentation des pertes d'induit. Cette solution est peu intéressante, mais présente l'avantage d'un investissement peu important. Ce réglage peut s'effectuer pour un autotransformateur à gradins ou par un dispositif à thyristors.

2.2 Réglage de la charge

Pour un système de propulsion linéaire, la charge est fréquemment peu variable (perte, frottement, etc.) avec la vitesse. L'introduction d'un système permettant de varier l'effort résistant offrira la possibilité de régler la vitesse de façon indépendante. Un frein linéaire alimenté à courant continu présente un effort résistant pratiquement proportionnel à la vitesse (dans le domaine d'emploi). Ceci permet de définir un point d'équilibre à vitesse stable (fig. 2).

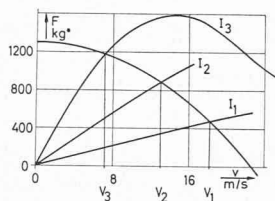


Fig. 2. — Moteur linéaire 75 kVA, 15 m/s. Alimentation à tension constante. Réglage de la vitesse par un frein à courant continu.

L'effort de freinage sera proportionnel au carré du courant d'excitation du frein, ce qui permet d'ajuster la pente de la caractéristique du frein, donc la vitesse.

Outre les inconvénients liés aux pertes dans l'induit fonctions du glissement, le frein génère également des pertes à ce niveau. Une telle solution ne pourra donc

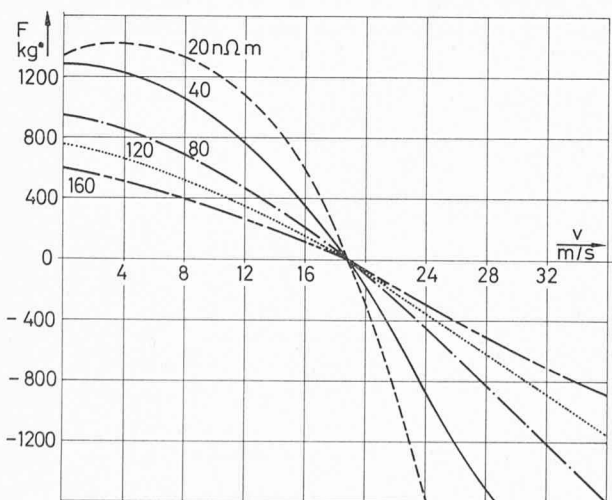


Fig. 3. — Moteur linéaire 75 kVA, 15 m/s. Influence de la nature de l'induit (en fonction de la résistivité en $n\Omega m$).

intervenir que pour de faibles puissances. L'investissement représenté par le frein, son alimentation et sa commande, est également important. On ne recourra à une telle solution que pour des systèmes à faible vitesse.

2.3 Réglage par la nature de l'induit

Pour un moteur asynchrone tournant, une variante à rotor bobiné permet un réglage de la vitesse par la variation de la résistance rotorique. On modifie ainsi la caractéristique de poussée par affinité. Le résultat, sans être bon pour autant, est plus favorable qu'un réglage de tension.

Un même effet peut être produit avec un moteur linéaire en agissant sur la résistivité ou la géométrie de l'induit. Ceci peut s'effectuer de différentes façons :

- par la résistivité de l'induit (fig. 3),
- par l'épaisseur de l'induit,
- par la hauteur de l'induit,
- par la réalisation d'un induit sandwich dont l'épaisseur de la zone conductrice est variable (épaisseur totale constante) (fig. 4).

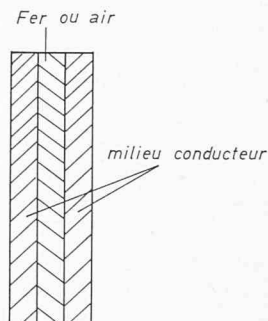


Fig. 4. — Induit de type sandwich.

Un tel réglage, de nature semblable à un ajustement de la tension, ne peut s'effectuer que dans des zones bien déterminées fonction de la nature de l'induit. On peut envisager un tel procédé pour un réglage de la poussée lors d'un démarrage, lorsqu'il se produit toujours au même endroit.

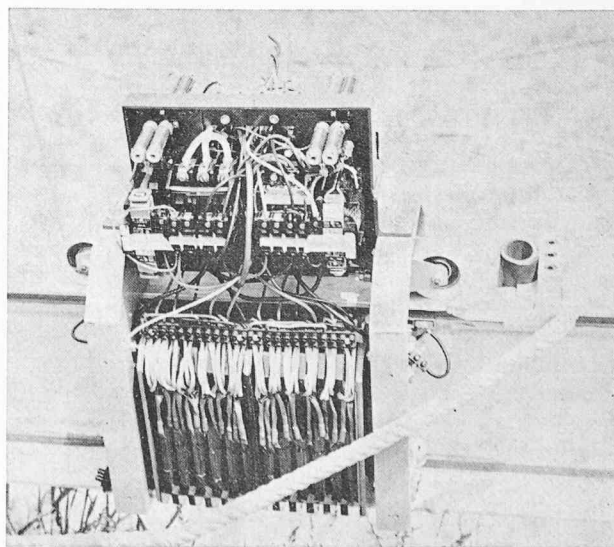


Fig. 5. — Moteur linéaire 15 kVA, 6-12 m/s à pôles commutables. A la partie supérieure, contacteurs assurant la commutation de pôles.

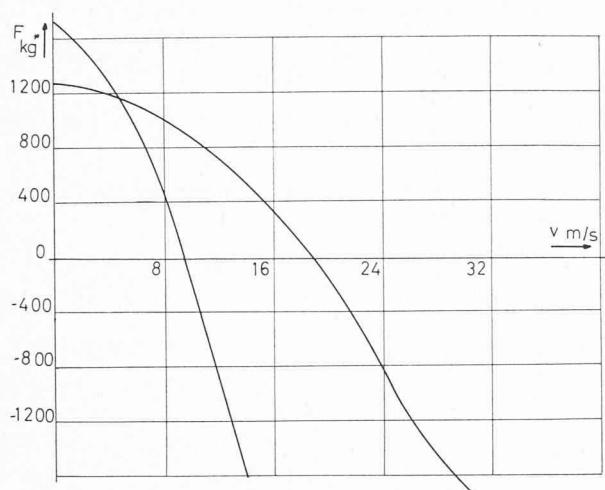


Fig. 6. — Moteur linéaire 75 kVA, 7,5-15 m/s à pôles commutables. Caractéristique de poussée.

3. Commutation de pôles

La vitesse synchrone étant proportionnelle au pas polaire, une modification de la polarité entraîne une variation de la vitesse en conséquence. La commutation de pôles est un procédé connu pour les moteurs tournants. Elle peut être réalisée par un bobinage commutable ou deux bobinages séparés. La technique la plus connue, le couplage Dalhander, permet de réaliser des vitesses synchrones dans un rapport 1 à 2. La figure 5 montre un moteur équipé d'un tel bobinage avec le système de contacteurs assurant la commutation en marche.

De façon générale, il ne sera possible de réaliser que deux ou trois vitesses avec un seul moteur. En général, la commutation d'un moteur linéaire sera simplifiée, eu égard à une machine tournante, dans la mesure où le bobinage est de type anneau de Gramme.

A titre d'exemple, la figure 6 donne les caractéristiques de poussée lors d'un démarrage à deux vitesses, 9,45 et 18,9 m/s.

Par rapport à une action sur le glissement, cette technique est plus avantageuse compte tenu d'un meilleur rendement. Nous verrons qu'il est également possible de réaliser une économie d'énergie lors d'un démarrage ou d'un freinage.

4. Fréquence variable

Une alimentation à fréquence variable offre un maximum de possibilités de réglage, avec le rendement le plus élevé. On peut envisager aussi bien un fonctionnement à poussée maximale qu'à rendement optimum, en adaptant la fréquence et le courant au cas de charge et à la vitesse souhaités. La figure 7 donne un exemple des caractéristiques de poussée et de rendement pour le même moteur que précédemment.

Le domaine de fonctionnement pour chaque vitesse peut être aussi bien moteur que frein avec récupération.

En revanche, le coût d'une telle alimentation est encore prohibitif, d'autant plus que le facteur de puissance du moteur linéaire est généralement bas. De plus, pour des

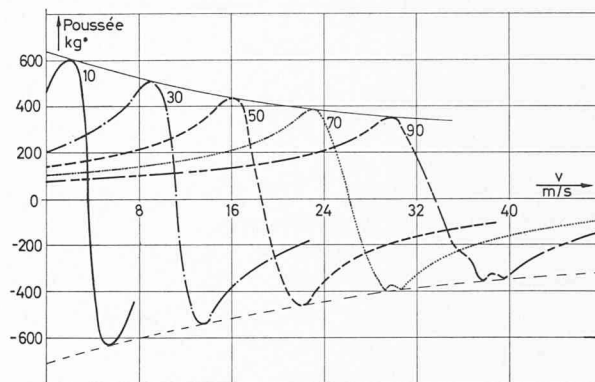


Fig. 7a. — Caractéristiques de poussée à fréquence variable d'un moteur 75 kVA.

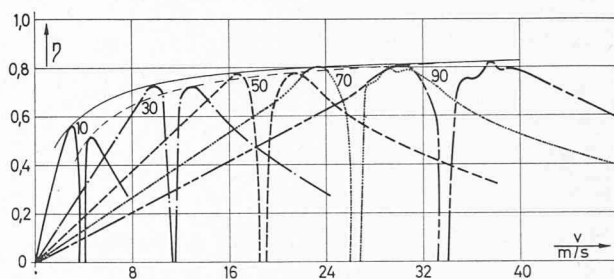


Fig. — 7b. Caractéristiques de rendement correspondantes.
— Lieu des rendements maximaux en moteur.
--- Lieu des rendements maximaux en générateur.

puissances très élevées, le convertisseur statique présente des difficultés de réalisation. Néanmoins, l'avenir laisse bien augurer de tels systèmes, aussi bien par une baisse de prix que par une augmentation des performances. De grandes vitesses nécessitant des fréquences supérieures à 50 ou 60 Hz, cette solution est presque indispensable pour l'utilisation de moteurs linéaires en traction.

5. Bilans d'énergie

Très souvent les systèmes de manutention ou de transport doivent assurer des démarrages fréquents. Comme dans tout moteur asynchrone, une certaine énergie est dissipée dans l'induit lors d'un démarrage ou d'un freinage. Celle-ci sera très différente selon le type d'alimentation et les possibilités de réglage en vitesse. Cependant, une différence apparaît entre le moteur linéaire et le moteur tournant. En effet, pour un moteur tournant (ou linéaire infini) on a les relations suivantes entre la puissance d'entrefer (P_δ) et les pertes d'induit (P_r) :

$$P_\delta = P_r + P_{\text{mécanique}}$$

$$P_r = s \cdot P_\delta$$

En revanche, pour un moteur linéaire :

$$P_{\delta l} = P_{rl} + P_{méc l}$$

$$P_{rl} > s P_{\delta l}$$

Ceci est dû à l'influence des pertes supplémentaires provoquées par les effets d'extrémités.

L'énergie dissipée dans l'induit lors d'un démarrage ou d'un freinage est donnée par :

$$W_r = \int_t P_r \cdot dt$$

Si les effets d'extrémités sont négligeables (cas infini), on a pour un démarrage ou un freinage à fréquence constante :

$$W_r = \frac{1}{2} M \cdot v_s^2 (s_1^2 - s_2^2) + \int_t s \cdot F_r \cdot v_s \cdot dt$$

avec : M = masse entraînée totale,

v_s = vitesse synchrone,

s_1 = glissement initial,

s_2 = glissement final,

F_r = effort résistant.

Si l'effort résistant est nul, il vient au démarrage :

$$W_{rd} = \frac{1}{2} M v_s^2 (1 - s_2^2) \simeq \frac{1}{2} M v_s^2 = \text{Energie cinétique}$$

que $= W_{cin}$

Pour un moteur à deux vitesses dans un rapport 1 à 2 :

$$W_{rd} = \frac{M v_s^2}{8} (1 - s_2^2) + \frac{M v_s^2}{2} \left\{ \left(\frac{1 + s_2}{2} \right)^2 - s_4^2 \right\}$$

avec : v_s = vitesse synchrone la plus élevée,

s_2 = glissement de commutation relatif à $v_s/2$,

s_4 = glissement final.

En première approximation, s_2 et s_4 sont faibles d'où :

$$W_{rd} \simeq \frac{M v_s^2}{4} = \frac{1}{2} W_{cin}$$

Pour un démarrage à fréquence variable imposant une poussée maximale en permanence, le glissement relatif à la fréquence instantanée varie peu (à l'exception du début du démarrage). Pour un effort résistant nul, on obtient :

$$W_{rd} \simeq \frac{M v_s^2}{2} \cdot s$$

avec : v_s = vitesse synchrone finale.

Au freinage, quatre cas sont à considérer (tous à effort résistant nul) :

— freinage par inversion de phases (fréquence constante) :

$$W_{rf} \simeq \frac{3}{2} M v_s^2 = 3 W_{cin}$$

— freinage à courant continu :

$$W_{rf} \simeq \frac{1}{2} M v_s^2 = W_{cin}$$

— freinage à deux vitesses, soit vitesse minimum puis courant continu :

$$W_{rf} \simeq \frac{1}{4} M v_s^2 = \frac{1}{2} W_{cin}$$

Energie récupérée =

$$\frac{1}{4} M v_s^2 = \frac{1}{2} W_{cin}$$

— freinage par récupération à fréquence variable et glissement environ constant :

$$W_{rf} \simeq \frac{M v_s^2}{2} \cdot s = s W_{cin}$$

$$\text{Energie récupérée} = \frac{M v_s^2}{2} (1 - s) = (1 - s) W_{cin}$$

L'avantage d'une fréquence variable ou d'une commutation de pôles est significatif. Le freinage par inversion de phases est à proscrire. Les paramètres exacts de glissement ainsi que les effets d'extrémités modifient ces relations approchées selon le tableau ci-dessous, rapporté à l'énergie cinétique :

	Démarrage W_{rd}		Freinage W_{rf}		$W_{récupéré}$	
	I	II	I	II	I	II
a	1	1,26	—	—	—	—
b	—	—	3	3	0	0
c	—	—	1	1	0	0
d	1/2	0,65	1/2	0,6	1/2	0,3
e	s	0,27	s	0,22	(1-s)	0,6

a = fréquence constante

b = inversion de phase

c = courant continu

d = deux vitesses

e = fréquence variable

I expression approchée

II expression exacte

La présence d'une charge au démarrage accroît encore l'influence des divers modes d'alimentation sur l'énergie dissipée dans l'induit.

6. Influence des harmoniques d'alimentation

Une alimentation à fréquence variable de type statique introduit généralement des harmoniques importants, de tension ou de courant. Le principe même de l'alimentation

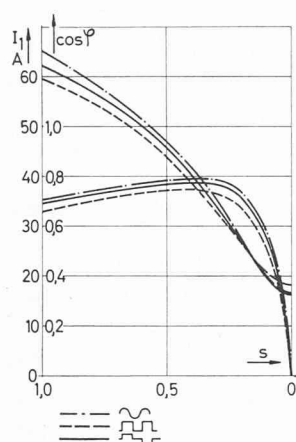


Fig. 8. — Moteur linéaire à induction 15 kVA, 12 m/s. Caractéristiques de courant et de $\cos \varphi$ alimentation :

- - - sinusoïdale
- - - ondes carrées
- ondes carrées 120°

statique impose des phénomènes de commutation incompatibles avec un comportement électrique sinusoïdal.

Dans le cas d'un moteur asynchrone tournant une telle alimentation peut faire apparaître des couples harmoniques gênants ou des pertes supplémentaires importantes. L'amortissement de la cage rotorique est variable selon le rang de l'harmonique.

Pour un moteur linéaire, le comportement est différent, par suite de la nature continue de l'induit. Plus précisément, l'amortissement de ce dernier est efficace quel que soit le rang des harmoniques. Considérons le cas d'un moteur à double inducteur de puissance 15 kVA. Caractéristiques principales :

- Inducteur : 2 pôles, 380 V, 50 Hz,
pas polaire : 120 mm,
longueur : 280 mm,
hauteur d'empilage : 145 mm,
masse : 75 kg* (avec la carcasse).

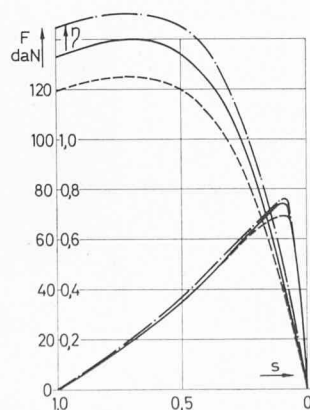


Fig. 9. — Moteur linéaire à induction 15 kVA, 12 m/s. Caractéristiques de poussée et de rendement.

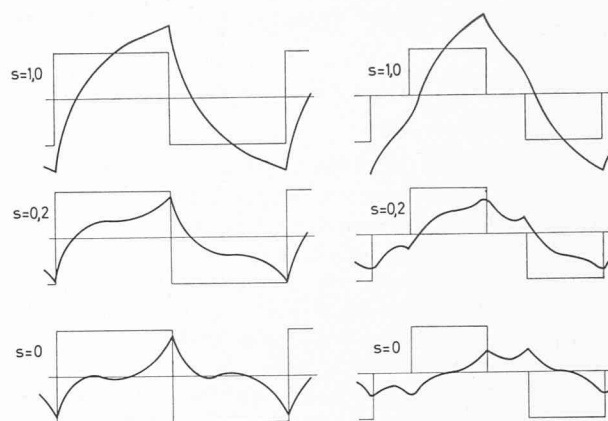


Fig. 10a. — Ondes de courant pour une alimentation en ondes carrées de tension et pour divers glissements.

10b. Ondes carrées à 120° de tension.

- Induit : Aluminium épaisseur 8 mm, hauteur 280 mm, « entrefers » 2×3 mm.

Trois cas d'alimentation ont été considérés. Il s'agit chaque fois d'une alimentation en tension de même valeur efficace :

- alimentation sinusoïdale (- - -)
- alimentation en ondes carrées (- - -)
- alimentation en ondes carrées de largeur 120° (—)

Ce dernier cas correspond au mode d'alimentation de certains générateurs statiques.

La figure 8 explicite les caractéristiques de courant et de facteur de puissance en fonction de la vitesse. On constate une diminution du courant efficace lorsque le taux d'harmoniques augmente. Ceci prouve l'efficacité de l'amortissement des harmoniques par l'induit. Ce n'est en effet plus le cas pour un glissement nul.

La figure 9 donne les caractéristiques de poussée, qui sont évidemment moins favorables pour les taux harmoniques les plus élevés, par suite de leur proportionnalité au carré du courant. Le rendement est relativement peu affecté par ces harmoniques. On constate en effet qu'il présente les valeurs maximales suivantes :

- 0,76 en sinusoïdal,
- 0,75 en ondes carrées de 120°,
- 0,695 en ondes carrées de 180°.

Il est à remarquer qu'il n'a pas été tenu compte des effets d'extrémités dans cet exemple.

Les figures 10a et 10b décrivent les courants pour divers glissements dans les cas présentant des harmoniques. On voit nettement la diminution de l'amortissement pour les faibles glissements.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. JUFER, N. WAVRE : *Le moteur linéaire — Développement théorique et applications*. Bull. ASE 63 (1972) 15, p. 844-856.

Adresse des auteurs :

Marcel Jufer, Sydney Mattatia, Nicolas Wavre
Chaire d'électromécanique de l'EPFL
22, ch. de Bellerive, 1007 Lausanne