

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 75 (1984)

**Heft:** 12

**Artikel:** Evolution des moteurs électriques pour la robotique moderne

**Autor:** Wavre, N.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-904424>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 26.01.2026

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

# Evolution des moteurs électriques pour la robotique moderne

N. Wavre

*Cet exposé est une analyse des possibilités d'évolution des moteurs électriques compte tenu des besoins de la robotique moderne. Il situe les connaissances actuelles dans le domaine en se référant aux solutions existantes et éprouvées. Une analyse objective des tendances permet de deviner l'évolution future des techniques d'entraînement électrique.*

*Der Aufsatz enthält eine Analyse der Entwicklungsmöglichkeiten der verschiedenen Elektromotortypen für die moderne Robotertechnik. Ausgangspunkt bilden die heutigen Kenntnisse aufgrund bewährter Lösungen. Eine objektive Untersuchung der Tendenzen ermöglicht es, die zukünftige Entwicklung der elektrischen Antriebstechnik auf diesem Gebiet abzuschätzen.*

## 1. Historique et situation actuelle

Le moteur électrique à collecteur à courant continu fut le premier moteur «industriel». Mais très tôt déjà, avec l'apparition des réseaux à courant alternatif, le moteur à induction (également appelé moteur asynchrone) l'a devancé et est devenu le moteur industriel le plus courant.

Pendant les vingt dernières années, les progrès de l'électronique de puissance ont permis la mise au point du thyristor, très bien adapté à la commande du moteur à courant continu. De ce fait, les entraînements réglés ont été en majorité des systèmes avec moteur à courant continu. Le moteur à induction exige un convertisseur de fréquence à transistors dont le coût actuel est encore supérieur à celui des thyristors. A l'heure actuelle, l'apparition de transistors de puissance FET (MOSFET), de GTO<sup>1</sup> et de transistors de puissance Darlingtons permet une évolution très rapide des techniques de commande des moteurs électriques. Il est maintenant possible de commander un moteur à courant continu comme un moteur pas à pas et un moteur asynchrone comme un moteur à courant continu. Cette évolution a naturellement incité les constructeurs de machines à réaliser des moteurs à courant continu à commutation électronique. De telles machines sont directement dérivées du moteur synchrone pour lequel le bobinage est fixe, et les aimants ou l'inducteur mobiles.

## 2. Critères de choix entre différents types de moteurs

Compte tenu de l'évolution de l'électronique, il règne une certaine

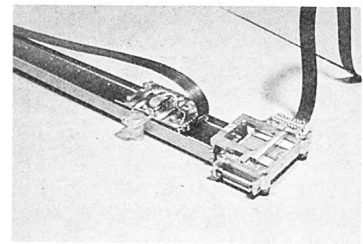


Fig. 1 Moteurs linéaires pas à pas pour table x-y

Pas 0,125 mm, poussée 5 N, vitesse max. 3,5 m/s, accélération max. 50 m/s<sup>2</sup>

confusion entre les choix possibles issus d'un moteur à courant continu sans collecteur, d'un moteur synchrone ou d'un moteur pas à pas. Ces moteurs ont néanmoins tous la même caractéristique de base qui consiste à avoir une partie bobinée fixe et une partie mobile ferro-magnétique avec ou sans aimants permanents. Suivant comment les courants sont contrôlés en fréquence et en amplitude dans les enroulements statoriques, il est possible de commander un moteur en mode synchrone, en mode proportionnel ou en mode pas à pas. Il est dès lors possible d'utiliser un moteur pas à pas en moteur synchrone et un moteur synchrone, ou à courant continu sans collecteur, en moteur pas à pas, lorsque ceux-ci sont associés à un capteur de position angulaire.

Toutefois, afin de qualifier les évolutions futures, nous ne prendrons en considération que les éléments principaux suivants:

- le moteur à courant continu à collecteur,
- le moteur à courant continu sans collecteur,
- le moteur pas à pas.

Le choix entre différentes solutions fait intervenir les critères suivants, dont l'ordre peut être changé suivant les objectifs: la constante de temps mécanique, la fiabilité et le prix ou la masse.

### Adresse de l'auteur

Nicolas Wavre, ing. dipl. EPFL, Etel S. A., 19, rue de la Citadelle, 2114 Fleurier.

<sup>1</sup> FET Field Effect Transistor, MOSFET Metal-Oxide-Semiconductor FET, GTO Gate Turn-Off Thyristor

La constante de temps mécanique est donnée par l'expression suivante:

$$\tau = \frac{R \cdot J}{K_t \cdot K_e}$$

- $R$  Résistance ohmique du bobinage ( $\Omega$ )  
 $J$  Inertie du rotor et des masses tournantes rapportées au rotor ( $\text{kgm}^2$ )  
 $K_t$  Constante de couple ( $\text{Nm/A}$ )  
 $K_e$  Constante de tension induite ( $\text{V/rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Plus la constante de temps mécanique d'un moteur est faible, meilleure est sa dynamique. A l'heure actuelle, les moteurs présentant les constantes de temps mécaniques les plus faibles sont des moteurs à courant continu à rotor disque sans fer. Le disque est constitué d'un circuit gravé (brevet BBC) ou d'un bobinage sans fer moulé dans l'Araldite (brevet Mavilor et autres). Ces moteurs ont l'avantage de présenter une bonne commutation par l'absence de fer au rotor; ils autorisent aussi des vitesses de rotation relativement élevées jusqu'à 6000 tr/min.

La *fiabilité* d'un moteur électrique passe par la suppression des composants mécaniques d'usure. Pour cette raison, le moteur à collecteur est condamné à disparaître partout où l'usure des charbons ou du collecteur nécessite des interventions d'entretien.

Le *prix* est un paramètre très évolutif qui ne dépend pas ou peu du principe mais essentiellement des séries produites. A l'heure actuelle, les moteurs à courant continu sans collecteur sont encore plus chers que les autres solutions, mais ceci tient uniquement aux quantités fabriquées. Dans les prochaines années, cette tendance va probablement s'inverser. Il est également probable que l'on assiste à un recul du moteur pas à pas, concurrencé par le moteur à courant continu sans collecteur bouclé sur un capteur permettant une commande à la fois incrémentale et proportionnelle.

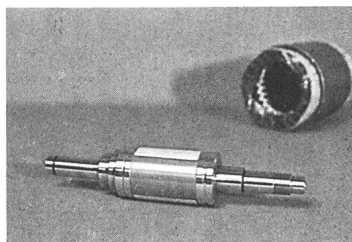


Fig. 2 Moteur synchrone 5 kW, 60 000 tr/min pour broches de rectification  
 Rotor avec aimants SmCo frittés

### 3. Moteurs à entraînement direct et moteurs sur réducteurs

Les performances volumiques d'un moteur électrique sont d'autant meilleures que sa vitesse de rotation est élevée. En régime statique, on s'efforcera de faire tourner le moteur à sa vitesse nominale et la plus élevée possible afin de réduire son encombrement, donc son coût. Toutefois, les limites actuelles sont données par les vitesses de rotation maximales du moteur à collecteur (env. 2000 tr/min) ou par les vitesses limites des moteurs à induction imposées par le réseau 50 Hz alimentant un moteur bi-polaire. Pour cette raison, la majorité des réducteurs mécaniques sont conçus pour des étages d'entrées tournant au maximum à 3000 tr/min.

On peut s'attendre à une évolution certaine dans ce domaine. En effet, le moteur à courant continu sans collecteur n'est plus limité en vitesse, il sera donc toujours possible de choisir le rapport le plus favorable. Seules des considérations mécaniques sur les réducteurs imposeront des limites. Ceci est particulièrement vrai pour les systèmes travaillant en régime dynamique sur la robotique et les commandes de machines. Quel que soit l'entraînement utilisé, il existe toujours un seul rapport de transmission optimum, qu'il s'agisse d'une masse rotative ou linéaire. On démontre que la puissance de la transmission et sa dynamique sont optimales lorsque l'inertie rapportée de toutes les charges est égale à l'inertie du rotor. Un tel objectif ne peut être atteint que si la liberté d'un rapport de réduction optimal existe. A l'heure actuelle, celle-ci existe pour autant que les rapports de réduction n'exigent pas des moteurs tournant à des vitesses supérieures à 3000 tr/min. Or, dans la robotique moderne, on est très souvent amené à devoir concevoir des systèmes sur lesquels les rapports de transmission exigent des moteurs tournant beaucoup plus vite. Plus les charges seront importantes en masse, plus la vitesse de rotation du moteur devra être rapide. Ceci favorisera le développement des moteurs à courant continu sans collecteur. Une évolution dans ce sens suppose l'apparition de réducteurs permettant des vitesses élevées sur les étages d'entrées.

Les entraînements directs, bien qu'étant intéressants sur le plan du principe, sont condamnés à terme en

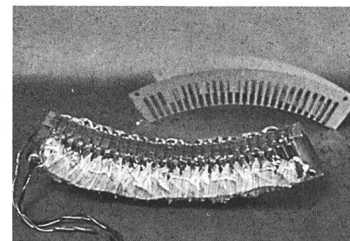


Fig. 3 Moteur linéaire synchrone (tangentiell) auto-commuté

Dynamique de vitesse:  $1/1000$  à couple constant sans oscillations. Utilisé pour l'entraînement de presses de pâtes alimentaires.

raison de l'encombrement et du prix. Un entraînement direct est, par nature, spécifique à son application et donc limité dans sa production. Ce phénomène est déjà largement observable pour les moteurs électriques linéaires.

### 4. Conclusions sur l'évolution des entraînements électriques rotatifs en robotique moderne

Nous pensons que l'évolution va dans le sens de moteurs électriques travaillant sur réducteurs, dont le rapport de réduction est optimal et suppose alors un moteur capable de tourner à des vitesses nettement supérieures à 3000 tr/min suivant les applications. Une telle évolution nécessite des progrès au niveau des réducteurs mécaniques. En robotique de positionnement, les réducteurs n'ont pas besoin d'être précis mais doivent être sans jeu. L'absence de précision dans le déplacement angulaire du réducteur est sans effet parce que les capteurs de position peuvent être montés sur la charge et non plus sur le moteur.

Le moteur pas à pas conservera de l'intérêt pour les petites puissances, jusqu'à quelques centaines de watts au maximum. Au-delà, et pour les moteurs à forte dynamique, la préférence ira au moteur à courant continu sans collecteur. De plus, associé à un capteur de position, il est actuellement possible de commander un moteur à courant continu sans collecteur aussi bien si ce n'est mieux qu'un moteur pas à pas, avec une résolution et un statisme variables suivant les exigences.

Le moteur pas à pas conserve un atout dans les petites dimensions où ses performances volumiques sont meilleures que celles du moteur à courant continu, surtout si celui-ci doit

travailler avec un capteur de position. L'avenir du moteur pas à pas est pour les systèmes relativement simples travaillant en boucle ouverte. L'avenir du moteur à courant continu est pour des systèmes à hautes performances travaillant en boucle fermée à forte dynamique.

## 5. Moteurs électriques linéaires

Ce qui a été dit pour les moteurs rotatifs est également valable pour les moteurs linéaires. Tous les problèmes liés au principe se retrouvent dans la configuration linéaire.

La différence fondamentale entre un entraînement rotatif et un moteur linéaire tient au fait que l'entraînement linéaire est direct, c'est-à-dire sans réducteur. Dans ces conditions, partout où le rapport de transmission optimum devrait être important, la solution en moteur linéaire n'est économiquement et techniquement pas compétitive. Les applications du moteur linéaire sont donc valables pour des entraînements à très forte dynamique et à vitesse maximum élevée, c'est-à-dire là où les masses à entraîner sont faibles. Des applications sont prévisibles, pour les moteurs à courant continu linéaire sans collecteur, dans le domaine de l'usinage laser et des machines de fabrication de puces électroniques.

Pour les entraînements linéaires à très basses vitesses, le problème est le même que pour un moteur rotatif tournant très lentement. De plus, compte tenu de l'absence d'un réducteur, se pose le problème de la rigidité. Dans ces conditions, un entraînement linéaire n'est concevable que si la charge entraînée n'exige pas un effort continu statique important.

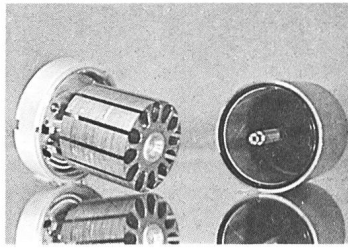


Fig. 4 Moteur à courant continu sans collecteur pour disques durs d'ordinateur  
 $P = 50 \text{ W}$  à 1200 tr/min. Exécution très économique avec des aimants souples plastifiés.

## 6. Secteur spatial

Le secteur spatial doit être considéré séparément. Il fait de toute façon appel à des solutions souvent spéciales et produites en quantités négligeables vis-à-vis des exécutions terrestres.

### 6.1 Entraînement rotatif

En micro-gravité, l'absence de référentiel d'inertie modifie complètement les données du problème. Des accélérations élevées avec des entraînements à forte dynamique ne sont pas tolérables en raison des couples de réaction.

Un réducteur restera une nécessité partout où les couples sont importants ( $> 10\text{--}50 \text{ Nm}$ ), afin de réduire la taille et le poids du moteur. L'optimum ne sera plus donné par le rapport de réduction, mais par la masse du réducteur et du moteur.

En raison des problèmes posés par les engrenages travaillant sous vide, le moteur à entraînement direct reste une solution compétitive en robotique spatiale. Le moteur doit alors être associé à un élément mécanique de blocage pour le cas où le moteur ne travaille pas, si l'on ne souhaite pas alimenter le moteur en permanence.

En règle générale, les moteurs de robotique spatiale sont plutôt des mo-

teurs tournant lentement, voire très lentement. De tels mouvements peuvent être générés par des moteurs pas à pas ou à courant continu sans collecteur. Le moteur pas à pas est alors conçu pour avoir un couple sinusoïdal en fonction de la position angulaire. Une commande appropriée avec des courants sinus/cosinus permet un fonctionnement en mode synchrone, sans capteur de vitesse, et pour autant que le couple de charge soit constant.

Le moteur à courant continu sans collecteur doit être associé à un capteur donnant une information sinusoïdale (ou triangulaire) analogique dont la fréquence par tour est proche du nombre de dents du rotor du moteur pas à pas.

Pour cette application, le moteur pas à pas a deux avantages: couple volumique élevé et absence de capteur. Le moteur à courant continu sans collecteur sera plus volumineux. En revanche, si la charge varie en amplitude (et en signe), seule la deuxième variante permettra de garantir le synchronisme.

### 6.2 Entraînement linéaire

Pour les mêmes raisons qu'en rotatif, les accélérations sont faibles et la vitesse basse voire très basse. L'objectif du linéaire est également la suppression de la transmission mécanique. Les solutions seront les mêmes: moteur pas à pas linéaire et moteur linéaire à courant continu sans collecteur, associé à un capteur de position.

Le moteur linéaire devra néanmoins être basé sur une structure magnétique symétrique, afin de supprimer l'effort d'attraction entre les parties fixes et mobiles qui sont un multiple de la poussée utile (10 à 100 fois). Le design du moteur doit donc être adapté à chaque cas d'application.