
Les paliers magnétiques

Introduction

Ce dossier D de TIPE est une version retravaillée de l'article de **Jérôme Delamarre** et **Fabien Faure** paru dans le numéro 15 de **La Revue 3EI** en décembre 1998.

Résumé

Les paliers magnétiques sont utilisés lorsque les autres paliers ont atteint leur limite. Ils permettent à un rotor de tourner sans frottement ni contact. Leur domaine de prédilection concerne les applications à très haute vitesse de rotation, celles pour lesquelles il faut minimiser les pertes, éviter l'usure, ne pas polluer un environnement sensible par des poussières ou un lubrifiant, supprimer les vibrations, fonctionner à très basse ou très haute température ou limiter la maintenance. Cet article, après une introduction sur la lévitation, explique l'intérêt des paliers magnétiques, énumère leurs domaines d'application, décrit les principes de fonctionnement et détaille un exemple simple de suspension magnétique.

Contact

Jérôme Delamare et Fabien Faure
Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble
B.P. 46, 38402 Saint Martin d'Hères CEDEX
<http://www-leg.ensieg.inpg.fr>

Localisation de la version originale de ce document:
http://www-leg.ensieg.inpg.fr/pdf/paliers_magnetiques.pdf

Remarque

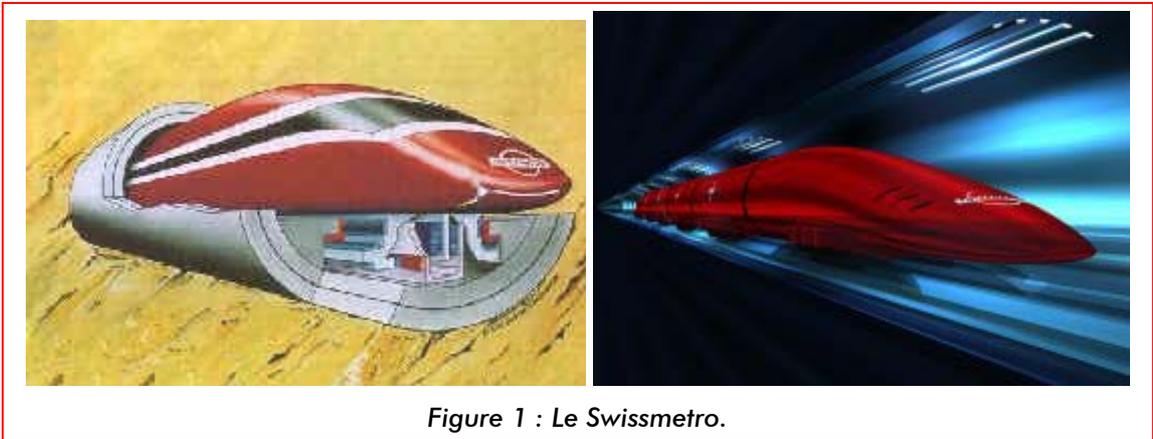
Les repères numériques entre crochets **[n]** renvoient aux références en fin de document.

Sommaire

I. Introduction la lévitation magnétique	2
II. Domaines d'utilisation	5
III. Applications des suspensions magnétiques.....	6
IV. Les différents types de palier magnétique.....	8
IV.1. Les suspensions magnétiques passives.....	8
IV.1.1. Les paliers à aimants permanents	8
IV.1.2. Les paliers à réductance variable.....	9
IV.2. Les paliers actifs.....	9
V. Exemple de suspension magnétique.....	11
VI. Références	13

I. Introduction : La lévitation magnétique

Les champs magnétiques sont utilisés pour générer des forces dans la majorité des actionneurs qui nous entourent. Souvent, ces actionneurs ne fonctionnent que suivant un degré de liberté. Dans le cas d'un moteur, par exemple, seuls les efforts magnétiques qui permettent la rotation de l'arbre sont utilisés. Dans le cas d'un objet en lévitation dans un champ magnétique, c'est à dire flottant sans contact, les efforts doivent être générés et contrôlés suivant les six degrés de liberté. Prenons l'exemple du Swissmetro [1], un train en sustentation magnétique dans un tunnel sous vide (Figure 1).



30

Dans ce projet, les concepteurs doivent gérer le roulis, le tangage, le lacet, la hauteur et la position latérale du train. Le sixième degré de liberté correspond au déplacement du train, géré par un moteur linéaire. La lévitation du Swissmetro est complexe car, à part le déplacement du train, tous les degrés de liberté sont instables. Plus concrètement, sans un contrôle très précis de tous les électroaimants servant à sa sustentation, le train a une forte tendance naturelle à venir se coller à son rail.

40

Lorsque l'on cherche à faire léviter un objet, obtenir sa stabilité relève d'un véritable casse-tête. Pour en être convaincu, il suffit de prendre deux aimants en répulsion et tenter de les faire tenir l'un au-dessus de l'autre. On arrive aisément à obtenir un équilibre, mais cet équilibre est instable : à coup sûr l'aimant prend son envol... En 1839, S. Earnshaw [2] a démontré qu'une particule polarisée ne pouvait être stable dans un champ statique. Son théorème a depuis été étendu aux aimants et aux matériaux ferromagnétiques. Il est donc vain de tenter d'obtenir la lévitation d'un corps uniquement avec des aimants ou du fer. Par contre, il existe de nombreuses solutions pour détourner ce théorème. Une solution élégante consiste à utiliser un matériau diamagnétique. Contrairement à un matériau ferromagnétique qui conduit les lignes de champ, un matériau diamagnétique les repousse. Un supraconducteur peut être considéré comme un diamagnétique puisque les courants induits en son sein engendrent un flux qui s'oppose au flux qui les a créés. Il est ainsi possible de faire léviter un aimant au-dessus d'une pastille supraconductrice (Figure 2). Des progrès récents sur les supraconducteurs (laboratoire MATFORMAG, CNRS Grenoble) liés à de judicieuses associations d'aimants permettent d'obtenir des forces impressionnantes [3].

50



Au Japon, un train expérimental plane à une vitesse de 400 km/h sur des bobines supraconductrices [4]. Malheureusement, pour fonctionner, un supraconducteur doit être refroidi à l'azote ou à l'hélium liquide. Une ligne commerciale a donc peu de chances de voir le jour, car de telles performances ne sont réalisables que grâce à des systèmes cryogéniques complexes et très coûteux.

60

L'expérience la plus spectaculaire reste la lévitation d'un animal dans un champ magnétique. En effet, contrairement à l'idée reçue, nous sommes tous légèrement diamagnétiques. Soumis à un gradient de champ intense (sous 18 T) nous pouvons donc tous léviter. Un parc d'attraction pourrait investir dans des bobines supraconductrices géantes capables de nous faire voler. En attendant, des chercheurs offrent ce type de distraction à des grenouilles (Figure 3). Une animation sur le web nous prouve qu'un batracien peut vivre sous l'eau, sur terre... et dans les airs ! [5].



Figure 3 : Grenouille volante.

Un autre moyen de détourner le théorème d'Earnshaw, et d'obtenir une lévitation stable, consiste à utiliser des champs alternatifs. Il est ainsi possible d'aller voir au palais de la découverte [6] un disque de cuivre qui flotte au-dessus d'une bobine (Figure 4). Le principe est le même que celui du moteur à induction :

70

- La bobine crée un champ alternatif,
- Le champ pénètre dans la plaque de cuivre,
- Des courants sont induits dans la plaque,
- Ces courants, soumis au champ magnétique, subissent la force de Laplace et soulèvent le plateau.



Figure 4 : Lévitation par courants induits.

L'inconvénient majeur de cette méthode vient de la puissance importante qu'il est nécessaire de fournir à la bobine. Cette puissance engendre un échauffement important de la partie suspendue et de l'inducteur. Pour cette raison cette méthode n'est utilisée de manière industrielle que dans des fours à induction. Cela permet de chauffer des métaux sans qu'ils soient en contact avec un creuset risquant de les polluer.

80

Enfin, il existe un moyen d'obtenir la lévitation d'un objet avec uniquement deux aimants. Pour cela il n'est pas utile d'avoir un champ intense, un supraconducteur ou des courants induits. On utilise juste l'effet gyroscopique. C'est ainsi que l'on peut trouver dans le commerce

(Nature & Découverte ou autre), des toupies capables de tourner quelques minutes à plusieurs centimètres au-dessus d'un socle magnétique (Figure 5) [7].



Figure 5 : Une toupie de la société Lévitron.

Ce type de suspension est donc très simple à mettre en oeuvre mais a deux inconvénients :

- L'équilibre obtenu n'est pas très stable,
- La partie suspendue doit obligatoirement être en rotation.

La lévitation par supraconducteur, dans de forts gradients de champ, par courants induits ou par stabilisation gyroscopique donnent lieu aujourd'hui à peu d'applications industrielles. Des problèmes technologiques, économiques ou tout simplement de performance les cantonnent pour l'instant dans les laboratoires. Cependant, les avancées scientifiques régulières obtenues sur les supraconducteurs laissent espérer que des applications verront le jour dans les prochaines années.

Pour réaliser une suspension magnétique, les industriels ont recours à des électroaimants asservis. Pour obtenir un centreur, par exemple, ils utilisent des électroaimants qui exercent des forces sur un arbre en matériau ferromagnétique. La Figure 6 représente le stator d'un centreur industriel produit par la société S2M [8].



Figure 6 : Centreur magnétique S2M

Lorsque tous les degrés de liberté d'un mobile en suspension magnétique sont contrôlés par électroaimants, la suspension est dite active. Cependant, afin de simplifier certaines suspensions, il est possible d'utiliser des paliers magnétiques à base d'aimants. On assure la stabilité grâce à un ou plusieurs paliers actifs. Ces suspensions sont dites partiellement passives.

II. Domaines d'utilisation

110

Les paliers magnétiques sont utilisés dans des domaines où les systèmes mécaniques atteignent leurs limites.

Domaine des hautes vitesses

120

La vitesse de rotation d'un roulement à billes est limitée sous peine de problèmes mécaniques et d'échauffements. L'absence de contact dans un palier magnétique permet d'atteindre des vitesses bien supérieures. La limite est définie par la rupture mécanique du rotor du fait de la force centrifuge engendrée par la rotation. Une suspension mécanique pose un problème d'équilibrage à haute vitesse. Mécaniquement, il est impossible de faire coïncider exactement l'axe de rotation d'un palier avec l'axe d'inertie de la partie tournante. Il en résulte un balourd qui, même s'il est très faible, peut entraîner des vibrations importantes. L'utilisation de paliers magnétiques permet de s'affranchir de tels problèmes d'équilibrage car l'axe d'inertie peut s'aligner sur l'axe de rotation.

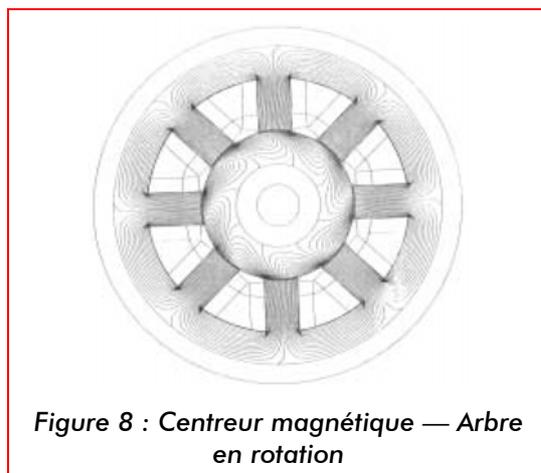
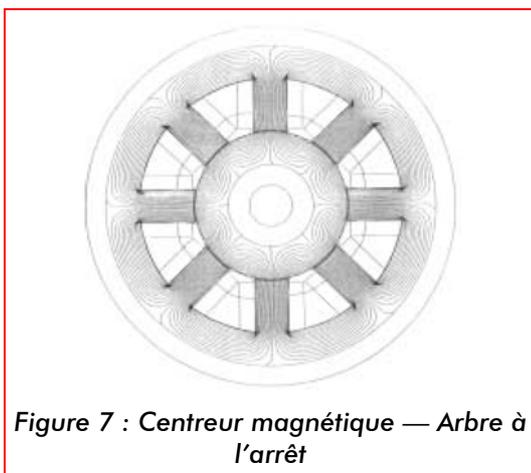
Domaine des atmosphères spécifiques ou du vide

Dans ce cas, il n'est absolument pas possible d'utiliser un gaz ou un lubrifiant pour permettre le fonctionnement d'un palier. Les roulements à billes lubrifiés ou les paliers hydrodynamiques sont donc prohibés.

Domaine dans lequel les frottements doivent être minimisés

130

Les frottements sont totalement inexistantes sur une suspension entièrement magnétique car il n'y a aucun contact entre les pièces mobiles et les pièces statiques. Cependant, des variations de champ vues par la pièce en rotation peuvent donner naissance à des pertes par courants induits et des pertes par hystérésis. La Figure 7 montre la déformation des lignes de champ due aux courants induits dans un arbre à l'arrêt et la Figure 8 en rotation [8]. Ces pertes, dues à la rotation, sont assimilables à des frottements fluides. Un palier magnétique ne possède par contre aucun frottement sec, ce qui élimine tous les phénomènes d'à-coups.



Domaine dans lequel l'usure doit être minimisée

140

Comme il n'y a aucun contact entre la partie fixe et la partie mobile, la durée de vie du palier est illimitée (sauf accident). Cet avantage peut être appréciable dans un dispositif tel qu'un satellite où les paliers d'un système tournant ne peuvent être remplacés régulièrement. L'absence d'usure est aussi intéressante en atmosphère spécifique car elle n'engendre aucune poussière.

Domaine dans lequel une grande précision est requise

Un palier magnétique actif, contrôlé par un asservissement permet de positionner la partie mobile avec beaucoup de précision. Celle-ci dépend essentiellement de la qualité des capteurs utilisés et n'est donc pas sujette aux modifications des contraintes extérieures.

Domaine dans lequel la variation de température est importante

Une suspension magnétique, fabriquée avec des matériaux appropriés, est capable de fonctionner à des températures extrêmes. Elle peut ainsi être soumise à des températures basses, proches du zéro absolu ou bien être utilisée à des températures élevées en sortie de turbine.

150

III. Applications des suspensions magnétiques

Les suspensions magnétiques sont utilisées dans des domaines très différents. Elles peuvent supporter des pièces d'à peine quelques grammes telles que des disques de compteur électrique jusqu'à des machines de plusieurs tonnes telles que certains compresseurs. Les parties sustentées peuvent être immobiles (télescopes) ou soumises à des vitesses élevées (centrifugeuses, turbines, etc.). Les principales applications sont maintenant précisées.

Le spatial

160

Une partie des recherches effectuées dans le domaine des paliers magnétiques a été menée par des entreprises telles que l'Aérospatiale en France ou la NASA aux Etats-Unis. La principale application des suspensions magnétiques dans le spatial concerne la mise en oeuvre des volants d'inertie permettant de stabiliser un satellite ou bien d'emmagasiner de l'énergie. Les paliers magnétiques sont aussi utilisés dans certains dispositifs de prise de vue.

L'usinage

170

Les suspensions magnétiques permettent d'équiper des broches d'usinage et de faire tourner des outils de coupe (rectification et fraisage) à des vitesses de rotation difficilement accessibles avec des broches à roulements plus conventionnelles (Figure 9). De telles broches tournent à des vitesses allant de 15 000 à 150 000 tr/min pour des puissances respectives de 50 kW à quelques centaines de Watts (source S2M). En dehors de leurs performances dans le domaine des vitesses élevées, les paliers magnétiques apportent une grande précision en rotation lors de l'usinage.



Figure 9 : Fraisage sur paliers magnétiques (S2M).

Les turbocompresseurs

Ce sont souvent des machines de grande puissance : il existe des gammes de 2 MW à 20 000 tr/min jusqu'à 25 MW à 7 000 tr/min (source S2M). Ils sont utilisés dans l'industrie du gaz, en production, transport et stockage ainsi qu'en pétrochimie. Les paliers magnétiques actifs apportent une solution aux problèmes de vibration, d'alignement, de joint et de maintenance.

Les turboexpanders

180

Ce sont des machines rapides permettant la détente des gaz. Ils sont utilisés dans des opérations de traitement, de refroidissement, de purification, de séparation ou de liquéfaction. Ces machines sont généralement puissantes et rapides : de 10 000 à 50 000 tr/min et quelques centaines de KW ou plusieurs MW (source S2M).

Les pompes turbomoléculaires

Elles permettent d'obtenir un vide très poussé grâce à une turbine tournant à grande vitesse (Figure 10). Le vide obtenu peut atteindre 10^{-10} mbar. Les paliers magnétiques sont employés dans les pompes turbomoléculaires car ils permettent d'atteindre des vitesses élevées (100 000 tr/min) sans polluer l'atmosphère environnante avec un lubrifiant. La suspension peut être active ou partiellement passive : les deux solutions existent industriellement.

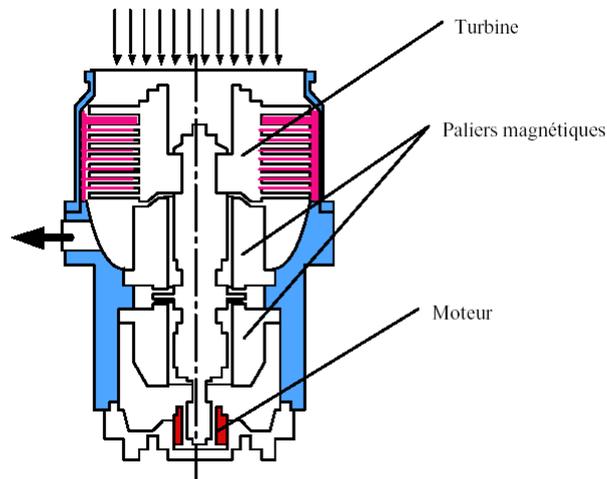


Figure 10 : Pompe turbomoléculaire sur suspension magnétique (d'après Alcatel DTV).

190

Les centrifugeuses

Elles permettent, grâce à leur vitesse de rotation extrêmement élevée, de séparer des substances de densités différentes. Elles rendent possible l'enrichissement de l'uranium à un taux que peu d'autres méthodes peuvent atteindre. Là encore, l'intérêt du palier magnétique vient du fait qu'il permet d'atteindre des vitesses importantes tout en étant compatible avec le milieu environnant. Ce sont essentiellement des paliers passifs qui sont utilisés pour cette application.

Les "choppers" de particules

Ils sont utilisés dans les Laboratoires de physique pour filtrer des particules d'énergies différentes. Ils sont constitués d'un disque muni de fentes tournant à grande vitesse (Figure 11). Selon la largeur des fentes, l'épaisseur du disque et la vitesse de rotation, le "chopper" ne laisse passer que des particules ayant une énergie donnée. Les particules trop lentes ou trop rapides sont déviées par les bords des fentes ou les autres disques.

200

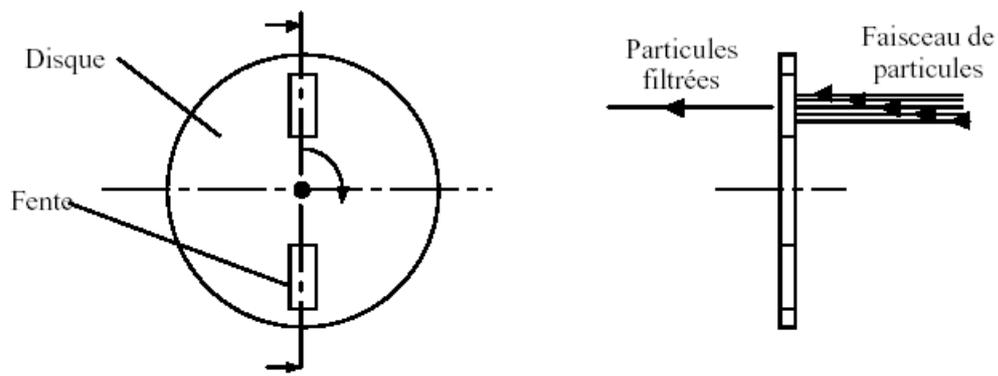
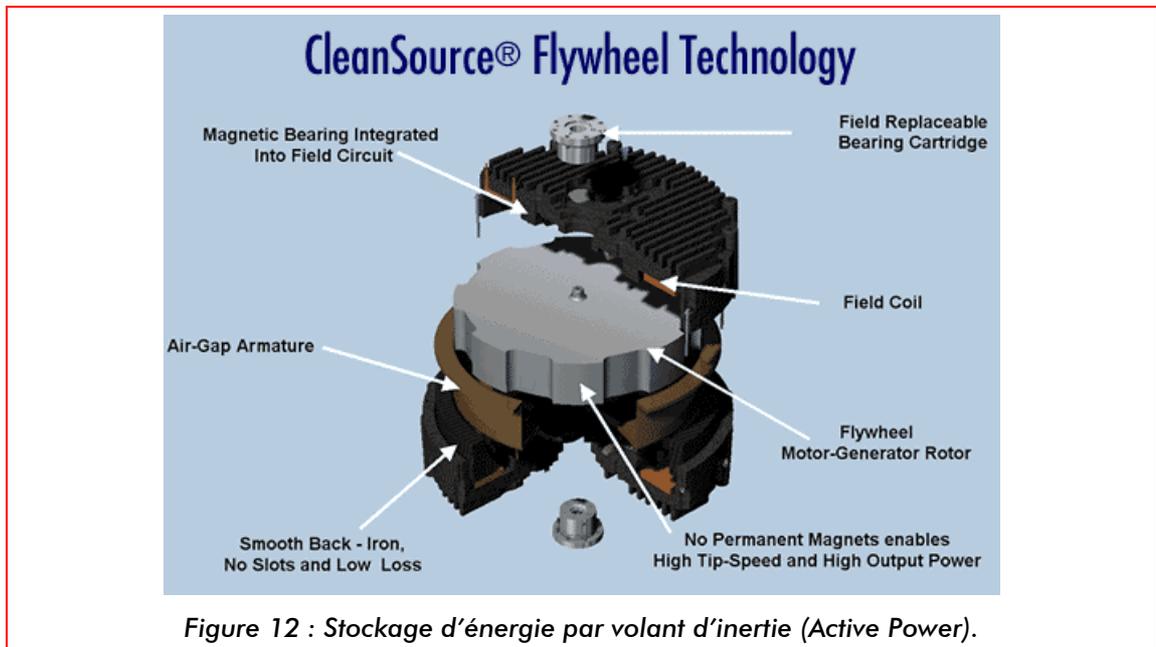


Figure 11 : Choppers de particules.

Les volants d'inertie

Ils permettent de stocker de l'énergie sous forme cinétique (Figure 12). Ils sont constitués d'un rotor à grande inertie, d'un moteur et de paliers permettant la rotation à grande vitesse de l'ensemble. Le moteur permet d'accélérer ou de ralentir le rotor et donc de stocker ou restituer l'énergie. Les paliers doivent permettre la rotation de l'ensemble avec le moins de pertes possible et sans usure prématurée. Des sociétés américaines proposent des systèmes de stockage de ce type. Ce procédé est propre (pas de pollution chimique), à une grande durée de vie (pas d'usure) n'est pas sensible à la température, et permet dans certains cas d'offrir un coût inférieur à celui des batteries [10].

210



IV. Les différents types de palier magnétique

IV.1. Les suspensions magnétiques passives

220

Les paliers magnétiques passifs sont les plus simples à réaliser. Ils sont autonomes. Leur fonctionnement ne nécessite aucun apport d'énergie venant de l'extérieur, comme les paliers magnétiques actifs, ni un refroidissement comme les paliers supraconducteurs. Néanmoins ils ne peuvent être utilisés seuls pour des raisons de stabilité (voir les exemples ci-après). Les paliers magnétiques passifs doivent donc être associés à un système mécanique (roulement, palier hydrodynamique, butée à aiguille, etc.) ou à autre type de palier magnétique. Les paliers magnétiques passifs sont de deux types : les paliers à aimants permanents et les paliers à réluctance variable.

IV.1.1. Les paliers à aimants permanents

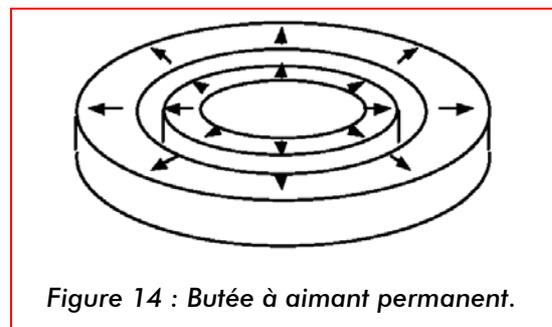
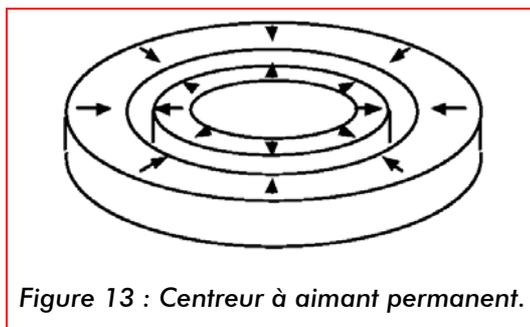
Ils sont constitués au minimum de deux bagues d'aimant permanent en interaction, l'une des bagues étant fixe tandis que l'autre est solidaire du rotor.

230

En fonction des directions d'aimantation des deux bagues, il est possible d'obtenir, avec la même géométrie, soit un centreur, soit une butée.

Dans le cas de la Figure 13, si la bague intérieure se décale radialement, la bague extérieure la repousse vers le centre, il s'agit donc d'un centreur.

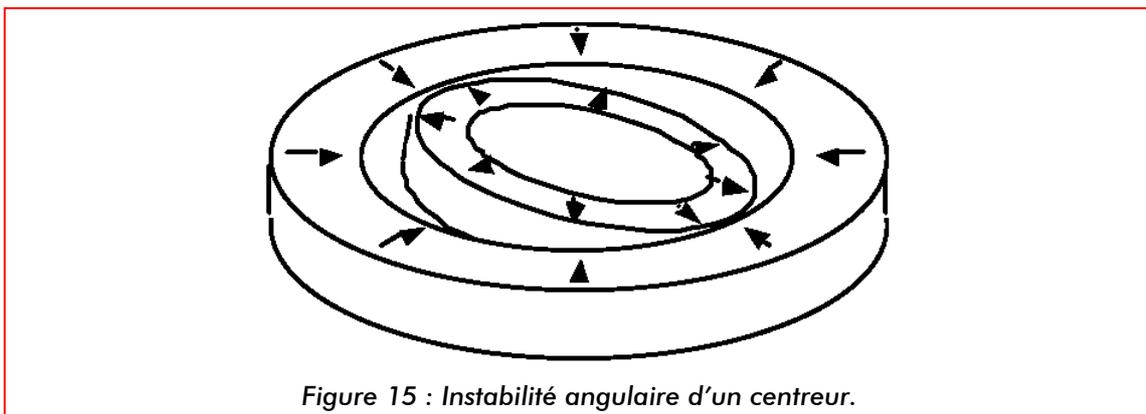
Dans le cas de la Figure 14, si la bague intérieure se décale axialement, la bague extérieure la rappelle dans son plan de symétrie. Il s'agit donc d'une butée.



240

On peut néanmoins mettre en évidence des problèmes d'instabilité liés à ces paliers. Si dans le cas de la butée, la bague intérieure s'éloigne radialement, elle est violemment attirée par la bague extérieure. La butée est donc instable radialement. Inversement, dans le cas du centreur, si la bague

intérieure est déplacée axialement, elle sera éjectée par la bague extérieure. Le centreur est donc instable axialement. De même, lorsque la bague intérieure du centreur est décalée angulairement, la bague extérieure exerce des forces qui tendent à créer une rotation plus importante. Le centreur est donc aussi instable angulairement (Figure 15).



En conclusion, nous pouvons retenir la simplicité de réalisation d'un centreur passif et d'une butée passive. Néanmoins, leur utilisation est rendue délicate par les différentes instabilités qui peuvent survenir. Rappelons qu'une stabilité complète est impossible à obtenir avec ce type de paliers.

250

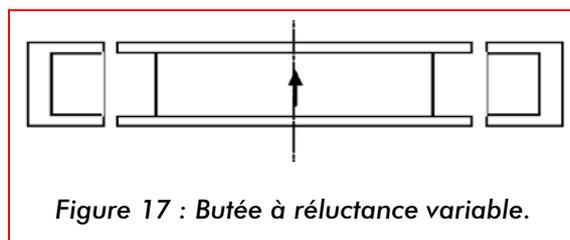
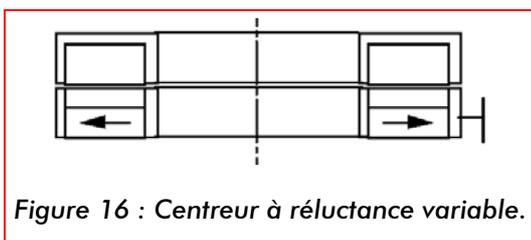
IV.1.2. Les paliers à réluctance variable

Là aussi, on a affaire à des systèmes passifs. Ils n'ont par conséquent besoin d'aucune source d'énergie extérieure pour fonctionner. Bien qu'ils puissent comporter des aimants, ces paliers ne fonctionnent pas sur un principe d'interaction directe entre aimants. Ils sont composés de deux circuits magnétiques séparés. L'un des circuits est lié au rotor tandis que l'autre est fixé au stator (Figure 16).

Les circuits magnétiques sont composés de dents en vis-à-vis. La moitié de ces dents est placée sur la partie statique du palier tandis que l'autre l'est sur la partie mobile. Une différence de potentiel magnétique est créée entre ces dents soit par une bobine soit par un aimant. Cette différence de potentiel magnétique crée un flux qui circule entre les dents. Ce flux engendre une pression qui tend à rapprocher les dents. Lorsque l'on décale latéralement ces dernières l'une par rapport à l'autre, on observe dans le même temps, un allongement des lignes de champ et donc une variation de l'énergie du système. Les dents cherchent alors à se réaligner afin de minimiser cette énergie.

260

Sur une butée à réluctance variable, les dents doivent être disposées de façon à s'opposer à un déplacement axial du centreur (Figure 17).

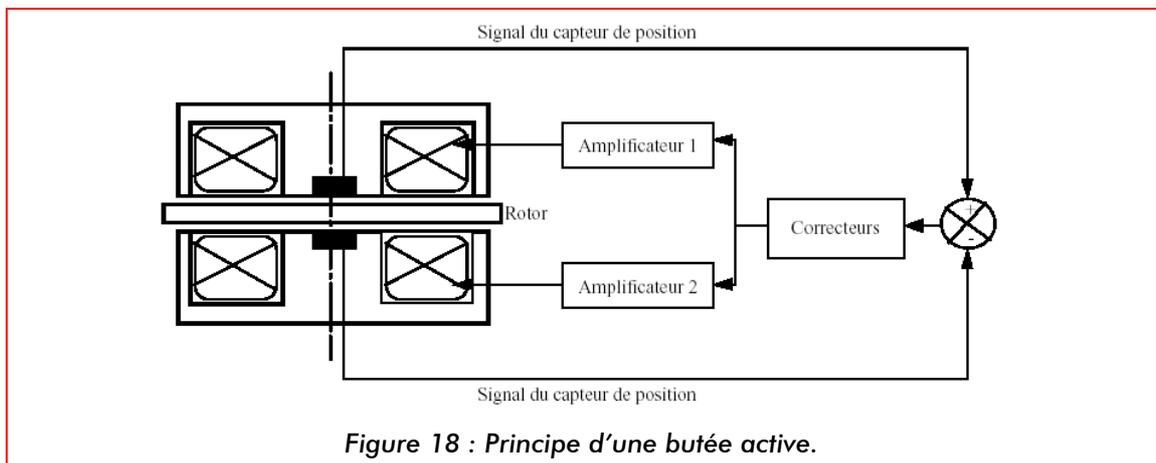


Cette butée assure donc la stabilité axiale mais est instable latéralement.

IV.2. Les paliers actifs

270

Les paliers actifs sont des électroaimants dont le courant est asservi pour maintenir la partie mobile du circuit magnétique dans une position fixée. Ils ont besoin d'un apport d'énergie pour fonctionner. Pour alimenter chacun des actionneurs constituant un palier actif, il faut une alimentation de puissance, une commande et un capteur de position. L'exemple le plus simple est celui de la butée active (Figure 18).

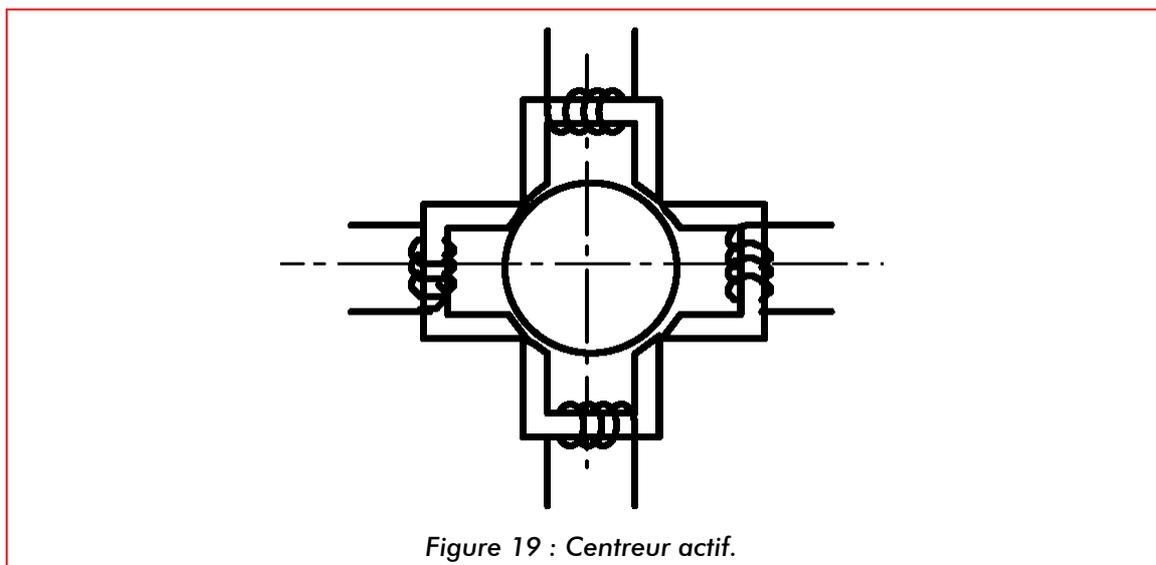


Nous remarquons la nécessité de mettre en oeuvre deux électroaimants pour constituer une butée. Cela s'explique par le fait qu'un électroaimant ne peut exercer que des forces d'attraction. Pour asservir un axe, soit 2 directions, il faut donc 2 actionneurs.

280

Grâce aux asservissements, la position peut être réglée avec une grande précision. Les limitations sont dues aux capteurs, aux saturations (des matériaux ou de la puissance) et à la dynamique de l'asservissement.

Pour pouvoir obtenir une suspension complète, il faut associer deux centreurs et une butée. Chaque centreur est constitué de quatre actionneurs et asservit deux axes de liberté (Figure 19).



Les paliers actifs sont à priori applicables à tout type de système mécanique à condition d'être correctement dimensionnés. Par contre, si leur structure est simple dans le principe (pas d'instabilité puisque correctement asservis), leur mise en oeuvre est assez lourde. Une suspension complète nécessite le contrôle de cinq axes de liberté, donc de dix directions. Cela peut entraîner la mise en oeuvre de dix actionneurs, dix capteurs, dix amplificateurs de puissance et cinq commandes reliées entre elles pour tenir compte des couplages mécaniques.

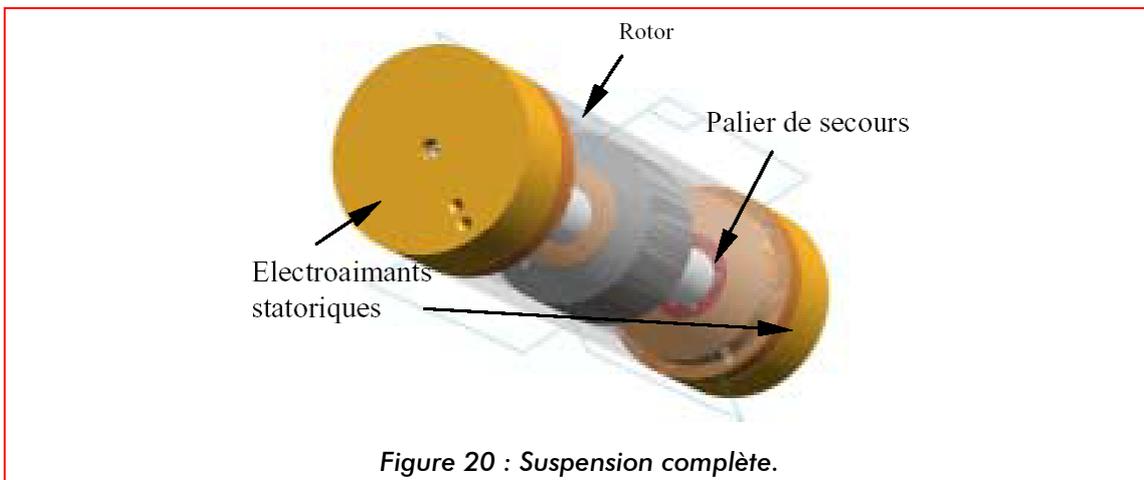
290

La pression magnétique dans un électroaimant est proportionnelle au carré de l'induction. Avec 1 Tesla, il est possible d'obtenir une pression magnétique de 4 bars. Une pression de 10 bars est obtenue sous une induction de 1,6 T et 20 bars sous 2,2 T. Une induction de 1,6 T est obtenue facilement avec des matériaux ferromagnétiques courants. Pour atteindre 2,2 T, il est nécessaire d'utiliser du fer-cobalt dont l'aimantation à saturation dépasse légèrement 2,4 T. Grâce à ces pressions importantes, les systèmes actifs peuvent supporter de très fortes contraintes. C'est la raison pour laquelle certaines machines de plusieurs tonnes utilisées dans l'industrie lourde (par exemple des compresseurs) sont équipées de paliers actifs. Pour ce type d'application aucun palier magnétique passif ne peut prétendre remplacer le palier actif.

300

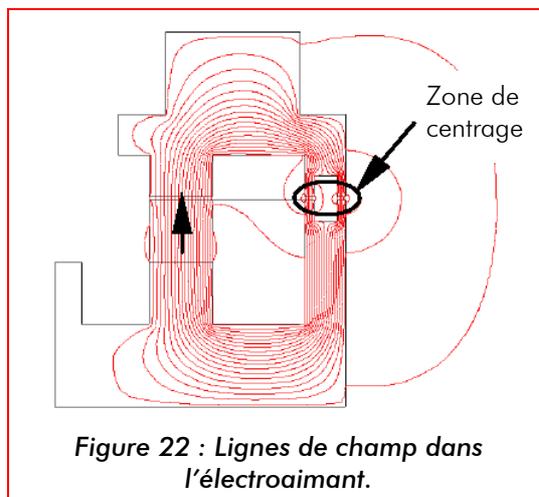
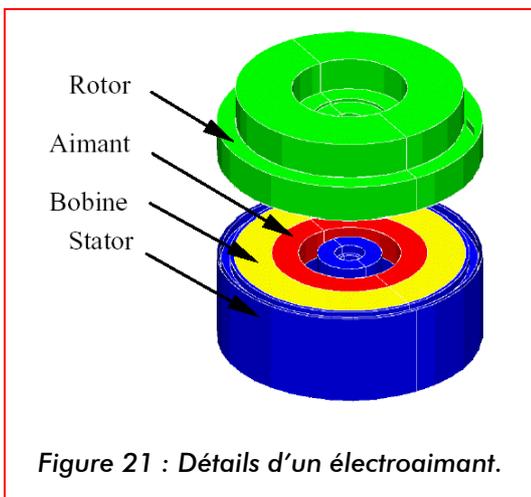
V. Exemple de suspension magnétique

La suspension présentée est une suspension partiellement passive. Sa longueur totale est de 25 cm et son diamètre de 7 cm. Elle est constituée d'un rotor cylindrique dont les deux extrémités sont attirées par des électroaimants (Figure 20).



310

Ces électroaimants sont asservis afin de positionner axialement le rotor. Le centrage et la position angulaire de la partie suspendue sont assurés par les dents de l'électroaimant (Figure 21). Un aimant aux terres rares possédant une polarisation rémanente de 1,1 Tesla engendre un champ permanent dans l'électroaimant (Figure 22). Le centrage par réductance est donc assuré même si les bobines ne sont pas alimentées. Cette configuration permet un fonctionnement stable et sans contact grâce à un contrôle axial unique. Elle nécessite donc un seul capteur, un seul correcteur et un seul amplificateur.



320

De plus, grâce à la polarisation fournie par les aimants, l'actionneur est parfaitement linéaire et bidirectionnel (Figure 23). Pour arriver à ce résultat, si la bobine du premier électro-aimant vient renforcer le champ de l'aimant, la bobine du second le diminue. Les deux bobines sont traversées par le même courant et alimentées par le même amplificateur.

La justification théorique de la linéarité obtenue est précisée ci-dessous.

- La force dans un électroaimant s'écrit : $F = \frac{B^2 S}{2\mu_0}$

où B est l'induction dans l'entrefer et S la surface de l'entrefer,

- En position centrée, la force totale exercée par les électroaimants sur le rotor s'écrit donc :

$$F_t = \frac{B^2}{2\mu_0} [(B_a + B_i)^2 - (B_a - B_i)^2]$$

B_a est l'induction dans l'entrefer due à l'aimant et B_i est l'induction dans l'entrefer due à la bobine,

- Après simplification : $F_t = \frac{2S}{\mu_0} B_a B_i$.

330

B_i est une image du courant. La force est donc totalement proportionnelle au courant, comme le prouvent les simulations numériques réalisées avec le logiciel FLUX2D (Figure 23).

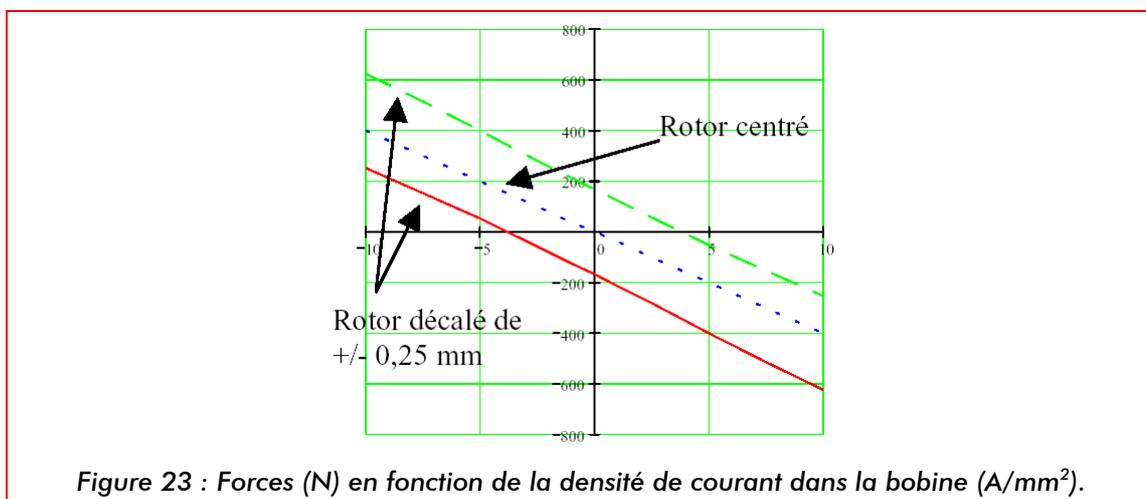


Figure 23 : Forces (N) en fonction de la densité de courant dans la bobine (A/mm²).

Avec une butée plus traditionnelle telle que celle décrite sur la Figure 17, il est nécessaire d'utiliser deux amplificateurs : l'un pour exercer une force dans un sens et l'autre pour exercer la force dans l'autre sens. De plus, un électroaimant non polarisé est fortement non linéaire car les forces exercées dépendent du carré du courant. L'asservissement doit alors être lui aussi non linéaire et l'utilisation d'un calculateur numérique est recommandée. Dans notre cas, le correcteur est plus simple à réaliser. Voici le calcul d'un correcteur à avance de phase dans un cas idéal :

340

- L'électroaimant possède un temps de réponse nul,
- Le capteur de position est parfait ($g_c = 10 \text{ mV}/\mu\text{m}$),
- L'amplificateur de courant qui alimente les bobines est parfait (1 A/V),
- 1 ampère dans l'amplificateur de courant engendre 1 A/mm^2 dans la bobine.

Pour calculer la fonction de transfert d'un palier, la démarche habituelle consiste à linéariser ses caractéristiques autour d'un point de fonctionnement. Dans notre cas cette linéarisation est naturelle. La force exercée sur le rotor s'écrit :

$$F_t = k \cdot x + \alpha \cdot I$$

350

Avec

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta x} = 0,7 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

$$\alpha = \frac{\Delta F}{\Delta I} = 40 \text{ N/A}$$

x correspond au déplacement axial par rapport à la position centrée.

Le principe fondamental de la dynamique permet d'écrire :

$$F_t = k \cdot x + \alpha \cdot I = m \frac{d^2x}{dt^2} \text{ avec } m \text{ la masse du rotor (1 kg)}$$

En utilisant la transformée de Laplace, la fonction de transfert se met sous la forme :

360

$$\frac{x}{I} = -\frac{\alpha}{k} \frac{1}{1 - \frac{m}{k} p^2} = -\frac{\alpha}{k} \frac{1}{(1 + \tau \cdot p)(1 - \tau \cdot p)} \text{ avec } \tau = \sqrt{\frac{m}{k}}$$

On remarque que cette fonction de transfert a une phase constante de 180°. On la diminue par le correcteur à avance de phase :

$$C(p) = K \frac{1 + \tau \cdot p}{1 + \tau_2 \cdot p}$$

Afin de simplifier les calculs, la constante de temps du numérateur a été choisie égale à celle de la fonction de transfert du palier (compensation de pôle). La fonction de transfert en boucle ouverte, incluant le capteur, le correcteur, l'amplificateur et le palier s'écrit alors :

$$H_{BO}(p) = -\lambda \frac{1}{(1 + \tau_2 \cdot p)(1 - \tau \cdot p)} \text{ avec } \lambda = K \frac{\alpha}{k} g_c$$

En boucle fermée on obtient :

$$H_{BF}(p) = -\frac{\lambda}{\lambda - 1} \frac{1}{1 + \frac{\tau - \tau_2}{\lambda - 1} p + \frac{\tau \tau_2}{\lambda - 1} p^2}$$

370

Cette fonction du deuxième ordre est stable si :

$$\lambda > 1 \text{ et } \tau > \tau_2$$

En choisissant un coefficient d'amortissement de 1 et avec $\tau_2 = \frac{\tau}{10}$, on obtient $\lambda = 9,1$ et on en

$$\text{déduit } K = 9,1 \frac{k}{\alpha \cdot g_c}$$

$$\underline{\text{a.n.}} : K = 16, \tau = 1,2 \text{ ms et } \tau_2 = 0,12 \text{ ms.}$$

D'autres correcteurs permettent de stabiliser un palier. Il est tout à fait possible d'utiliser un PID, qui permet d'obtenir une erreur statique nulle, ou même de stabiliser le palier par un correcteur lui-même instable.

380

VI. Références

- [1] <http://sentenext1.epfl.ch/swissmetro/> et <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168884496000011>
- [2] S. Earnshaw, "On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether"., Trans. Camb. Phil. Soc., 7, pp 97-112(1842)
- [3] P. Tixador, P. Hiebel, Y. Brunet, X. Chaud, P. Gautier-Picard, "Hybrid superconducting magnetic suspensions", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 32, pp. 2578-2581, 1996.
- [4] <http://www.rtri.or.jp/>
- [5] <http://www-hfml.sci.kun.nl/hfml/levitate.html>
- [6] <http://www.palais-decouverte.fr/>
- [7] <http://www.levitron.com>
- [8] <http://www.s2m.fr/>
- [9] P.E. Allaire, R. Rockwell, M.E.F. Kasarda, "Magnetic and electric field equations for magnetic bearing application", pp 259-270 MAG'95
- [10] <http://www.activepower.com/apframes.html>

390