

# Journées UdPPC 2007

26 - 29 Octobre Paris

## LEVITATION



## I. Position du problème

Il est bien connu que sur Terre nous « subissons » l'influence du champ de pesanteur (ou de gravitation). En conséquence tout objet abandonné dans ce champ « tombe » sous l'action de son poids. La figure 1 rappelle une anecdote célèbre liée à ce phénomène (revue par le dessinateur M.Gotlib<sup>1</sup>) :



fig.1 - Newton et sa pomme

**Réaliser la lévitation d'un objet consiste à le mettre en équilibre dans le champ de pesanteur.**

Pour cela il est nécessaire d'introduire une nouvelle action (une « force ») qui va s'opposer au poids :

- Le plus simple est évidemment d'utiliser un fil (transparent par exemple) dont la tension va s'opposer au poids, mais c'est trop facile !
- Il est un peu plus spectaculaire d'utiliser un jet d'air. Si les paramètres sont bien choisis, une balle légère peut ainsi flotter dans l'air. Ce sont les forces de pression exercées par l'air *en mouvement* qui s'opposent au poids.

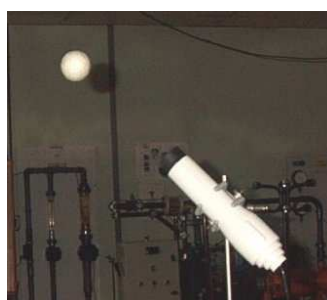


fig.2 - Une balle en lévitation

L'explication élémentaire de ce phénomène repose sur le théorème de Bernoulli : dans un fluide en mouvement, les zones de plus **grande vitesse** sont celles de plus **faible pression**. Il faut donc que lors du mouvement du fluide la vitesse soit plus élevée au-dessus de l'objet et plus faible en dessous, ainsi on aura une pression plus faible au-dessus et plus forte en dessous.

<sup>1</sup> Voir les bandes dessinées : La rubrique-à-brac ; Marcel Gotlib, Dargaud

Une autre explication plus globale consiste à remarquer que l'objet fait obstacle au jet d'air et le dévie. Il y a donc variation de la quantité de mouvement de l'air au passage de l'objet et d'après la *deuxième loi de Newton* ceci nécessite une force exercée par l'objet. Par *action réciproque* l'air exerce une force sur l'objet et dans une configuration adéquate celle ci peut s'opposer à son poids.

**Dans la suite nous essayons de faire mieux encore en supprimant tout *contact matériel* avec l'objet.**

Dans ces conditions pour s'opposer au poids on fait appel à une interaction, susceptible de s'exercer à distance, autre que la *gravitation*. Parmi les 3 autres interactions fondamentales connues seule l'*interaction électromagnétique* nous est accessible. De manière élémentaire elle prend deux formes :

- Les actions entre les corps chargés électriques : attractives pour des charges de signe contraire et répulsives pour des charges de même signe.
- Les actions entre les courants ou les aimants : attractives pour des « pôles » différents (nord et sud) et répulsives pour des « pôles » identiques (nord et nord ou sud et sud).

D'une manière un peu moins simple l'interaction électromagnétique fait appel au concept de « champs » : Le champ électrique qui peut agir sur les charges et le *champ magnétique* qui peut agir sur les *courants et les aimants*.

Il est facile de vérifier expérimentalement (et théoriquement !) qu'à notre échelle les forces les plus importantes correspondent au second cas. L'interaction « magnétique » est largement prédominante dans toute l'électrotechnique.

Remarque :

L'industrie produit actuellement des aimants très puissants. Les plus performants sont composés de fer, de néodyme et de bore (Fe, Nd, B). Nous utiliserons aussi des aimants moins puissants en « ferrites » (composés d'oxyde métalliques comprenant  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et un oxyde d'un autre métal comme le baryum Ba ou le strontium Sr).

## II. Utilisation d'aimants

En utilisant deux aimants et en utilisant la répulsion entre pôles identiques il semble facile de faire léviter un aimant.

L'expérience peut prendre la forme du système représenté sur la figure 3 :

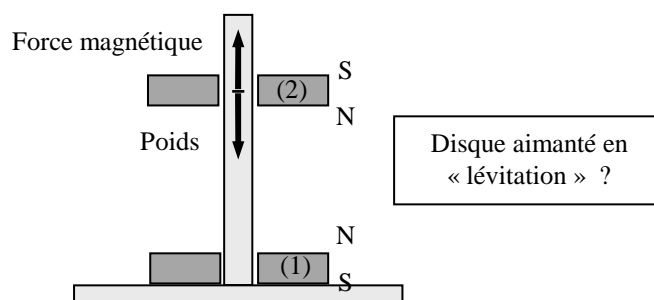


fig.3 - Lévitation d'un disque aimanté

Si ce système fonctionne parfaitement il ne répond pas exactement à nos exigences initiales car le disque qui lévite est **guidé** par la tige verticale ! Par contre l'équilibre est **stable** selon la verticale Oz.

Essayons de supprimer la tige : si on abandonne le disque (2) au-dessus du disque (1) on constate qu'il a tendance à se retourner et qu'il se précipite sur le disque inférieur du fait de l'attraction des pôles différents !

**Grâce à cette expérience élémentaire on prend conscience d'un nouveau problème : celui de la *stabilité d'un équilibre*.**

Pour être réalisable l'équilibre doit être stable, c'est à dire que les petites perturbations inévitables ne doivent pas être « amplifiées ».

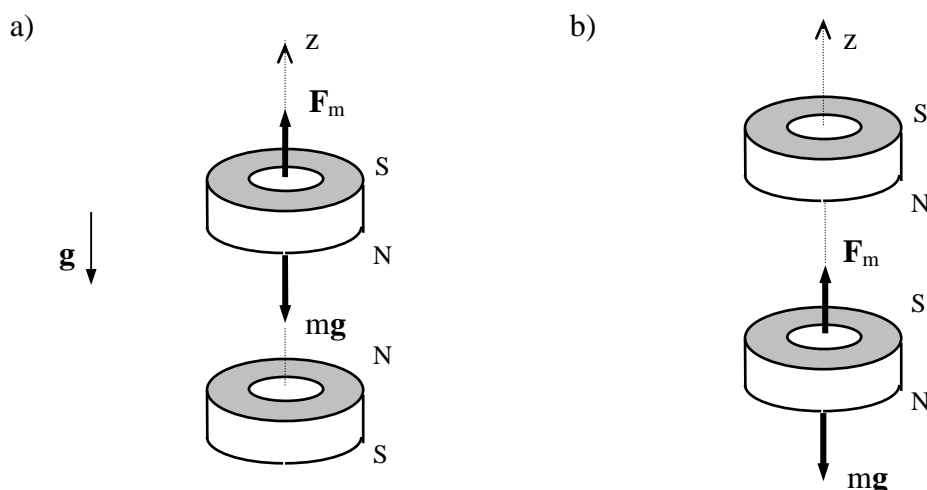


fig.4 – Equilibre et stabilité

Dans la situation illustrée sur la figure 4-a il y a stabilité verticale mais instabilité horizontale alors que dans la situation 4-b il y a stabilité horizontale mais instabilité verticale !

A l'issue de cette expérience on peut se demander si l'on pourrait obtenir un *équilibre stable* en utilisant plusieurs aimants bien disposés ?

Le dispositif s'approchant le mieux de nos exigences initiales est le « gadget » suivant :

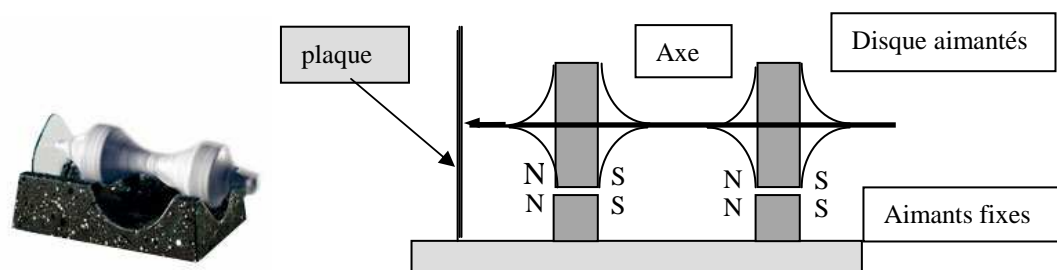


fig.5 - Un gadget à lévitation magnétique

La présence de la plaque montre que ce système n'est pas *exactement* une solution au problème posé !

Tous nos efforts pour réaliser une lévitation stable en utilisant que des aimants et des champs magnétiques « permanents » sont en réalité voués à l'*échec* ! Ce résultat négatif peut être déduit des propriétés des champs magnétiques (théorème d'Earnshaw).

### Le théorème d'Earnshaw (1805-1888)

« Tout ensemble *rigide* de charges électriques ou d'aimants *permanents* ne peut pas être en équilibre *stable* sous l'action uniquement d'un champ *électrostatique* ou d'un champ *magnétostatique* »

La présence supplémentaire du champ de pesanteur *uniforme* ne changeant rien au problème de la stabilité.

Etudions rapidement deux cas particuliers :

#### a) Une charge ponctuelle dans un champ électrostatique (dans le vide)

Energie potentielle :  $E_p(M) = qV(M)$

Equation de Laplace :  $\Delta V(M) = 0 = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}$ ,  $V(M)$  ne peut donc pas avoir d'extremum local (propriété connue des fonctions harmoniques).

Conclusion :

$E_p(M)$  ne peut pas présenter de minimum local  $\Rightarrow$  *instabilité* !

**b) Un dipôle rigide ( $\mathbf{p}$  ou  $\mathbf{M}$ ) dans un champ statique ( $\mathbf{E}$  ou  $\mathbf{B}$ )**

Energie potentielle :  $E_p(\mathbf{M}) = -\mathbf{p} \cdot \mathbf{E} = -\left(p_x E_x + p_y E_y + p_z E_z\right)$  (ou  $-\mathbf{M} \cdot \mathbf{B}$ )

Equations locales :  $\text{div } \mathbf{E} = 0, \text{rot } \mathbf{E} = 0 \Rightarrow \Delta \mathbf{E} = 0$

On calcule :  $\Delta E_p(\mathbf{M}) = -\left(p_x \Delta E_x + p_y \Delta E_y + p_z \Delta E_z\right) = 0$

Conclusion :

$E_p(\mathbf{M}) = -\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}$  (ou  $-\mathbf{M} \cdot \mathbf{B}$ ) ne peut toujours pas présenter de minimum local  $\Rightarrow$  **instabilité !**

Pour réaliser effectivement la lévitation nous allons *contourner* ce théorème en utilisant de nouveaux matériaux ou des champs magnétiques variables adéquats. Avant cela nous commençons par un dispositif très original.

### III. Une curiosité : le Lévitron

Le Lévitron est une toupie magnétique qui peut léviter au-dessus d'un aimant permanent pendant quelques minutes (ou plus si un dispositif d'entretien permet à la vitesse de rotation de se maintenir malgré les frottements avec l'air).

L'étude complète d'un tel dispositif est complexe, on peut néanmoins en comprendre simplement certains aspects. La disposition des deux aimants est analogue à celle de la fig.3 la tige en moins (!) et c'est la rotation rapide la toupie qui va empêcher le disque aimanté (2) de se retourner et de se précipiter sur (1) comme précédemment.

On utilise l'« effet gyroscopique » propre au solide en rotation rapide autour d'un axe : Il est alors bien plus difficile de le faire basculer que lorsqu'il est au repos.



fig.6 - Le Lévitron

On comprend ainsi la nécessité d'une vitesse de rotation **minimale** pour que le Lévitron fonctionne. Malheureusement tout n'est pas dit ! Il faut aussi expliquer la stabilité de la toupie vis à vis des petits déplacements horizontaux. L'expérience et la théorie (difficile !) montrent que la stabilité n'est assurée que si la vitesse de rotation est inférieure à une valeur **maximale** !

De manière simplifiée on peut remarquer que la stabilité nécessite que l'axe de l'aimant s'aligne sur le champ magnétique alors que si la rotation est trop rapide il reste vertical ! Dans les deux cas le comportement de l'énergie d'interaction de l'aimant et du champ est tout à fait différent et ce n'est que dans le second cas que l'on a un minimum d'énergie potentielle ...

## IV. Utilisation de matériaux particuliers

Nous allons utiliser les propriétés magnétiques de milieux matériels susceptibles de s'« aimanter » dans des champs magnétiques. On passe des systèmes *rigides* (*aimants permanents*) à des systèmes *induits* (Lord Kelvin (1850), Braunbeck (1939)).

Rappelons qu'il existe trois grandes familles de matériaux magnétiques : les ferromagnétiques, les paramagnétiques et les diamagnétiques.

Dans les ferromagnétiques les propriétés magnétiques sont importantes et l'aimantation peut être permanente (aimants).

Pour les paramagnétiques et les diamagnétiques il n'y a pas d'aimantation permanente. Ces matériaux ne s'aimantent qu'en présence d'un champ extérieur. L'aimantation étant dans le même sens que le champ pour les paramagnétiques et en *sens contraire* pour les diamagnétiques.

On montre que seuls les matériaux diamagnétiques sont susceptibles de léviter de manière *stable*, le principe du raisonnement est le suivant :

Dans un milieu linéaire, homogène et isotrope, l'aimantation est *proportionnelle* au champ :

$$\mathbf{M} = \chi \frac{\mathbf{B}}{\mu_0}, \text{ l'énergie potentielle s'écrit alors } E_p(\mathbf{M}) = -\frac{1}{2} k B^2 \quad (k = \frac{\chi V}{\mu_0}).$$

$$\begin{aligned} \text{Or } \Delta B^2 &= \Delta(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2) \\ &= 2 B_x \Delta B_x + 2 B_y \Delta B_y + 2 B_z \Delta B_z + 2(\text{grad} B_x)^2 + 2(\text{grad} B_y)^2 + 2(\text{grad} B_z)^2 > 0 \end{aligned}$$

Il est donc, *a priori* possible, de réaliser des champs magnétostatiques dont la norme présente un *minimum* local. (Par contre il n'est pas possible d'en construire avec une norme présentant un maximum local.).

L'énergie potentielle  $E_p(\mathbf{M}) = -\frac{1}{2} k B^2$  pourra un *minimum* local si  $k < 0$ , c'est à dire si le matériau est *diamagnétique*.

### IV.1. Matériaux diamagnétiques

Susceptibilités de quelques milieux diamagnétiques :

eau	:	$8,8.10^{-6}$
cuiivre	:	$9,7.10^{-6}$
argent	:	$24.10^{-6}$
or	:	$34.10^{-6}$
bismuth	:	$170.10^{-6}$
graphite pyrolitique	:	$450.10^{-6} (\perp), 85.10^{-6} (//)$

Les données précédentes nous conduisent à utiliser le *graphite* et le *bismuth* :

Nous montrerons deux expériences utilisant de tels matériaux :

- Présentation d'une plaque de graphite en lévitation au dessus d'un ensemble d'aimants très puissants (Fe, Nd, B) et judicieusement disposés. Le graphite est en effet le matériau diamagnétique le plus « performant » (la valeur absolue de sa susceptibilité magnétique est maximale).



fig.7 – lévitation d'une plaque de graphite

- Stabilisation d'une position d'équilibre, a priori instable, par addition d'un matériau diamagnétique :

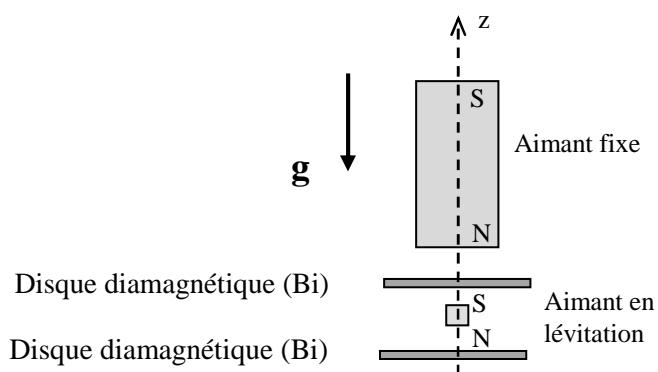


fig.8- Stabilisation par emploi de matériaux diamagnétiques

La présence des disques de bismuth introduit un nouveau terme dans l'énergie du système et permet, dans certaines conditions, d'avoir un minimum d'énergie potentielle.

## IV.2. Matériaux supraconducteurs

Les supraconducteurs sont des matériaux doués de propriétés électriques et magnétiques très particulières :

- Comme leur nom l'indique ils conduisent parfaitement le courant électrique sans qu'il y ait d'effet Joule (donc de pertes d'énergie).
- Placés dans un champ magnétique ils s'aimantent comme les matériaux diamagnétiques ce qui va permettre de réaliser une lévitation stable.

On peut préciser aussi que ces matériaux tendent à « expulser » le champ magnétique que l'on applique. Cette expulsion pouvant être totale ou seulement partielle selon les cas (selon le type I ou II de supraconducteurs). Dans les cas où l'expulsion n'est pas totale le champ pénètre dans le supraconducteur sous forme de filaments (vortex) qui peuvent s'accrocher aux défauts du matériau.



Ce phénomène d'**ancrage** joue un rôle essentiel dans la stabilité des équilibres observés.

Longtemps limitée aux très basses températures, la supraconductivité est actuellement observée dans certains matériaux à des températures supérieures à la température d'ébullition du diazote.

On utilise dans les expériences présentées le matériau  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-8}$  qui est supraconducteur pour une température inférieure à  $T < -183\text{ °C}$  ce qui est vérifié dans le diazote liquide à la température d'ébullition  $T_{\text{eb}} = -196\text{ °C}$ .

Dans une *première expérience* on place au-dessus d'un disque supraconducteur un petit aimant cubique. Le disque va tendre à « expulser » le champ de l'aimant. Pour cela des courants apparaissent dans le supraconducteur qui devient lui-même l'analogue d'un « aimant ». Cette aimantation est induite et de type diamagnétique ce qui permet en fin de compte de rendre stable l'équilibre.

On peut par ailleurs mettre en mouvement l'aimant et l'on constate que son mouvement est très peu amorti vu l'absence de contact matériel. On voit l'intérêt de tels dispositifs pour réaliser des machines tournantes très rapides.



fig.9 - Un aimant en lévitation au-dessus d'un disque supraconducteur

Dans une seconde expérience on fait l'« inverse », c'est à dire que l'on fait léviter le disque supraconducteur au-dessus d'un ensemble d'aimants créant un champ à la fois très intense et non uniforme.

Dans ce cas il n'y a pas expulsion totale du champ magnétique mais on contraire le champ magnétique pénètre partiellement le supraconducteur<sup>2</sup> sous forme de « filaments » qui peuvent s'accrocher aux défauts de la structure.

Il en résulte l'existence d'une infinité de positions d'équilibre stables donnant un peu l'impression que le disque est plongé dans du sable :



fig.10 - Un disque supraconducteur en lévitation au-dessus d'aimants

<sup>2</sup> Les supraconducteurs « haute température » s'apparentent aux supraconducteurs de type II.

Enfin on peut « soulever » un supraconducteur très riche en défauts grâce à un aimant puissant. Les filaments de champ magnétique qui pénètrent le supraconducteur se fixent aux défauts (de manière imagée c'est l'analogie d'une fourchette plongeant dans un plat de spaghettis...).

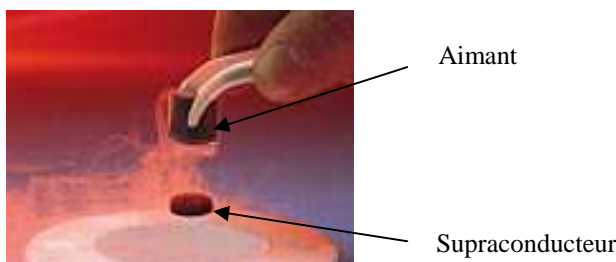


fig.11 – Suspension d'un supraconducteur sous un aimant

## V. Utilisons des systèmes asservis

Pour réaliser un équilibre stable nous avons vu que le système doit réagir convenablement aux perturbations inévitables. Plutôt que d'utiliser des matériaux adéquats où cette adaptation est en somme automatique on peut envisager des systèmes qui détectent les écarts à la position d'équilibre aux moyens de *capteurs* et qui grâce à des *actionneurs* permettent de les réduire.

Le premier système proposé utilise à nouveau des aimants ! Mais bien entendu dans des conditions différentes de celle du II. On fait confiance à l'opérateur pour agir en permanence sur la position de l'aimant (1) de manière à maintenir en équilibre l'aimant (2) :

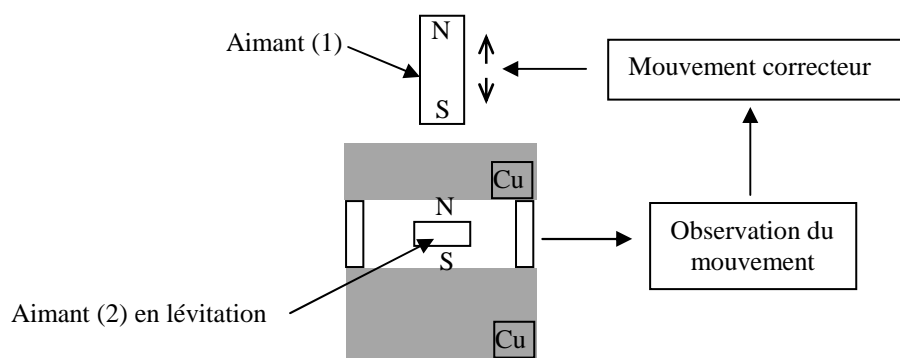


fig.12 - Lévitation d'un aimant (merci aux courants de Foucault)

Pour que l'opérateur ait le temps d'agir on a ralenti<sup>3</sup> le mouvement de l'aimant (2) en disposant des blocs de cuivre dans lesquels vont apparaître des courants (de Foucault) qui eux-mêmes sont la sources d'un champ magnétique (variable) qui exerce des forces de freinage sur l'aimant (2).

On notera l'analogie avec la situation précédente, d'un point de vue classique le diamagnétisme a pour origine la modification des courants électroniques atomiques dans la phase d'établissement du champ.

<sup>3</sup> L'idée de cette expérience est due à Paul Doherty :

<http://isaac.exploratorium.edu/~pauld/activities/magnetism/floatingincopper.html>

Bien entendu grâce à l'électronique on pourra réaliser des dispositifs « analogues » mais bien plus rapides. Le principe d'un tel dispositif (« gadget ») est présenté sur la figure 13 :

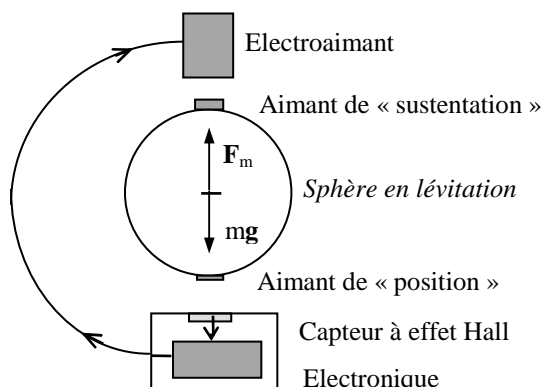


fig.13 - Un système asservi à lévitation magnétique

La sphère est en équilibre sous l'action de son poids et de la force magnétique exercée par l'électro-aimant sur l'aimant placé au sommet de la sphère.

Si l'on avait utilisé un aimant permanent fixe pour réaliser la sustentation l'équilibre serait instable ! Admettons en effet qu'une petite perturbation fasse monter la sphère les 2 aimants se rapprochent ce qui augmente la force magnétique... la sphère finit par se coller sur l'aimant. Dans le cas contraire elle finit par tomber.

Mais avec un l'électroaimant on peut *doser* convenablement la force magnétique. Si le capteur de position détecte un petit mouvement ascendant de la sphère on diminue le courant et donc la force magnétique si bien que la sphère tend à redescendre. Si on détecte un mouvement descendant on augmente le courant... Bien entendu pour que cela fonctionne il faut tenir compte des réponses des différentes parties du système et faire les *corrections nécessaires*<sup>4</sup>.

La description imagée précédente peut être résumée par le schéma-bloc ci-dessous :

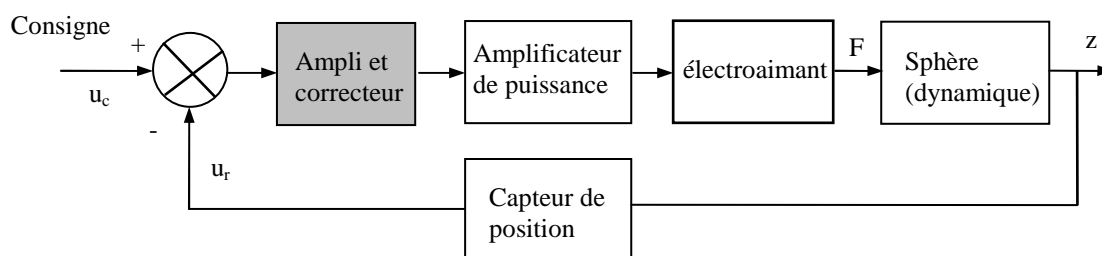


fig.14 - Schéma bloc du système asservi

<sup>4</sup> Une étude précise de tels dispositifs est effectuée en « Automatique », le rôle du bloc « correcteur » est essentiel pour la stabilité

## VI. Conclusion : le MAGLEV<sup>5</sup>

Les principes mis en jeu pour réaliser les expériences précédentes de lévitation magnétique sont mis en jeu dans les trains à lévitation magnétique, ou « maglev ». Ces trains sont actuellement l'application la plus spectaculaire de la lévitation.

Ils ont été développés à l'origine au Japon et en Allemagne, et mettent en jeu des électro-aimants supraconducteurs ou conventionnels et des systèmes complexes d'asservissements pour assurer d'une part la lévitation et d'autre part le guidage et la propulsion. Plus récemment une technique basée en partie sur des aimants permanents est en train de se développer aux USA.

L'université de Sherbrooke (Canada) a mis au point des maquettes de démonstration très réalistes de trains à lévitation magnétique, voici l'une d'entre elles :



fig.15 – Le train de l'université de Sherbrooke

## Bibliographie sommaire :

### I. Généralités

Ernst Helmut Brandt, « levitation in physics », Science 243, 349-355 (1989)

### III. Lévitron

- a) M.Berry “The levitron : an adiabatic trap for spins”  
[http://www.phy.bris.ac.uk/people/berry\\_mv/the\\_papers/Berry271.pdf](http://www.phy.bris.ac.uk/people/berry_mv/the_papers/Berry271.pdf)
- b) M.Simon, L.Heflinger, S.Ridgway “Spin stabilized magnetic levitation”  
<http://www.physics.ucla.edu/marty/levitron/spinstab.pdf>
- c) M.Berry, A.Geim “Of flying frogs and levitrons”  
<http://www.hfml.science.ru.nl/frog-ejp.pdf>

### IV. Matériaux diamagnétiques et supraconducteurs

- IV.1 M.Simon A.Geim “diamagnetic levitation”  
<http://www.physics.ucla.edu/marty/diamag/diajap00.pdf>
- IV.2 « Lévitation magnétique (EPFL) »  
<http://auditoires-physique.epfl.ch/uploads/735/735.pdf>

### V. Systèmes asservis

- a) <http://www.photologie.fr/> (levitation ...)
- b) V.Boitier, S.Kessedian, « maquette de sustentation magnétique », BUP N° 825, Juin 2000

### VI. Maglev

[http://www.rtri.or.jp/rd/maglev/html/english/maglev\\_frame\\_E.html](http://www.rtri.or.jp/rd/maglev/html/english/maglev_frame_E.html)

<sup>5</sup> En couverture un maglev japonais, le MLX01