

# Cube en lévitation

## Démonstration étonnante avec 3

Franz Raemy

**Pour la première fois notre Atelier se débrouille sans le moindre microcontrôleur. Nous vous proposons plutôt une expérience qui, depuis des décennies, ne cesse d'étonner ceux qui en sont les spectateurs. La diode laser utilisée et la compacité de l'électronique de régulation sont elles tout ce qu'il y a de plus moderne !**

Remarque préliminaire : l'expérience décrite ici est, indubitablement, un classique. Si vous avez fait de la physique il est fort probable que vous l'ayez déjà vue, réalisée ou que vous ayez imaginé votre propre approche pour lui donner vie. Il y a bien des années, en 1977, un des

concepteurs du labo d'Elektor, Loys Nachtmann, avait imaginé un « absorbeur de pesanteur » (article non publié dans l'édition française du magazine). Une régulation précise de la force d'attraction d'un aimant monté dans la partie supérieure d'un bras permettait de faire flotter une bille (ou un disque) en acier. La technique à utiliser est connue et expliquée dans tout manuel de leçons de régulation.

**Figure 1.**  
Coup d'oeil sur la construction : à gauche le photodétecteur, sur le pied est monté l'électro-aimant, sous lequel flotte le cube prenant la forme d'aimants permanents parallélépipédiques rectangulaires. On peut identifier la source de lumière sous la forme d'un module à diode laser. Le coffret à droite abrite l'électronique de la régulation et l'alimentation.



### Le principe

La force d'attraction exercée par un électro-aimant sur un corps métallique doit être exactement égale à la force de la pesanteur. La dite force est proportionnelle au courant circulant dans l'aimant et diminue avec l'accroissement de la distance entre l'aimant et l'objet en lévitation. Ceci implique par conséquent d'augmenter le courant en cas d'augmentation de la distance aimant-objet et inversement. La détection de la distance se fait par le biais d'une sorte de barrière lumineuse dans laquelle se déplace verticalement le corps flottant. Un photodétecteur se contente de mesurer la quantité de lumière que laisse passer l'objet. L'électronique de régulation est prise entre le courant du photodétecteur en grandeur d'entrée et le courant à travers l'aimant en grandeur de sortie. On parle souvent de régulation PID (**P**roportionnel, **I**ntégral et **D**ifférentiel). Le montage de Loys reposait sur 3 amplis op et une demi-douzaine (ni plus ni moins) de potentiomètres permettant d'effectuer tous les réglages possibles. Une paire d'amplis op additionnels servait à réaliser un convertisseur tension-courant monté en aval. Si l'article original (en allemand) vous intéresse, vous pouvez le télécharger sur le site Elektor [1].

**Figure 2.**  
Lorsqu'il est possible de positionner la hauteur de l'aimant par vis, le réglage devient un jeu d'enfant.



Si le phénomène de lévitation de sphère (il est possible, sans le moindre problème, de faire flotter d'autres formes d'objets, un cube voire une vis) peut paraître étonnant, plus surprenant est encore le fait que cette expérience puisse être réalisée à l'aide de 2 amplis ops et d'un transistor de puissance. L'auteur, un physicien diplômé, amateur d'électronique invétéré et professeur de mathématiques et de physique depuis 25 ans, a mis au point une régulation qui se contente du faible nombre de com-

# fois rien



posants évoqué. Le système a été réalisé pour un cours de physique et a subi l'épreuve du feu lors d'une journée « Portes Ouvertes ». Il fonctionne donc et comme nous le faisons souvent, nous appelons la Communauté des Ateliers d'Elektor à s'en assurer en reproduisant le montage !

## La mécanique

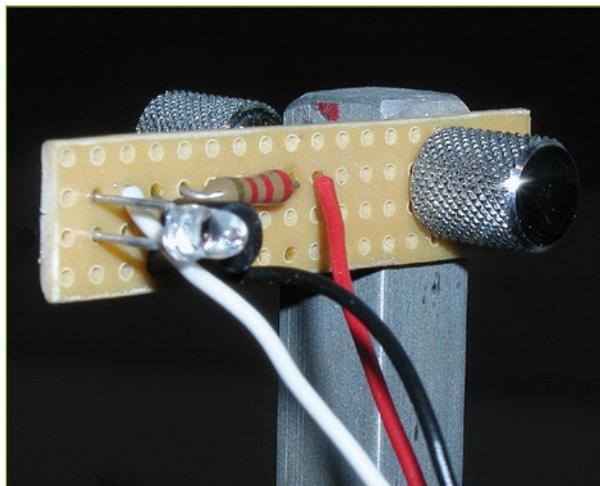
On retrouve, en **figure 1**, tous les composants entrant en lice. Sur la gauche le photocapteur, l'électro-aimant est monté sur le pied, en-dessous duquel flotte le « cube » qui prend ici la forme d'aimants permanents parallélépipédiques rectangles (2 x 2 x 1 cm). On identifie au centre la source de lumière. S'il fallait, il y a trente ans, utiliser une lentille de focalisation devant l'ampoule, pour réaliser un rayonnement quasi-parallèle, les choses sont aujourd'hui plus simples si l'on fait appel, comme l'auteur, à un module laser. Le coffret à droite incorpore l'électronique de la régulation et l'alimentation qui alimente la diode laser (sous 5 V) et la régulation (entre 12 et 18 V).

L'électro-aimant, le photocapteur et le module à diode laser sont fixés au pied que l'on peut trouver à différentes adresses, mais aussi par le biais d'eBay [2] [3]. Le reste des pièces de la mécanique viennent d'un supermarché « Bâtiment ».

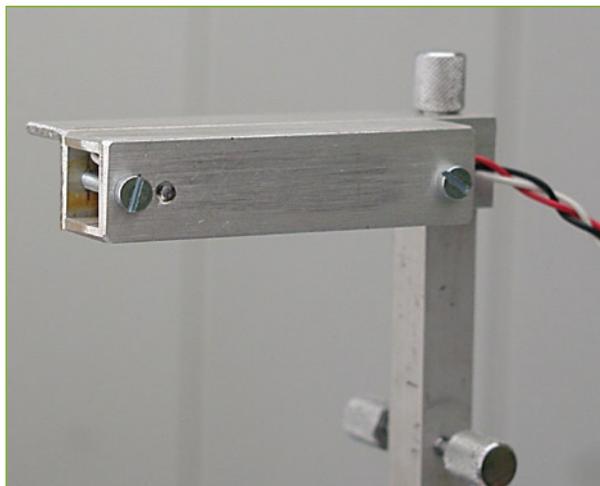
L'auteur a extrait l'électro-aimant d'un relais de bonne taille. L'opération est bien plus simple qu'il y a 30 ans lorsqu'il fallait démonter un vieux transfo. Si vous optez pour l'utilisation d'un vieux transfo, il faudra enlever les tôles « I » et tourner toutes les tôle « E » dans le même sens. On peut alors utiliser l'enroulement du secondaire (2 A minimum). L'électro-aimant réglable en hauteur est à monter sur le pied de manière à ce qu'une seule vis permette de le fixer. Plus pratique encore la solution de définition de la position en hauteur de l'aimant par écrou à ailettes (**figure 2**).

## L'électronique

Une paire de pieds additionnels supporte le module laser et la photodiode (**figure 3**). Cette dernière, une SFH229, devrait être montée dans un petit boîtier pour

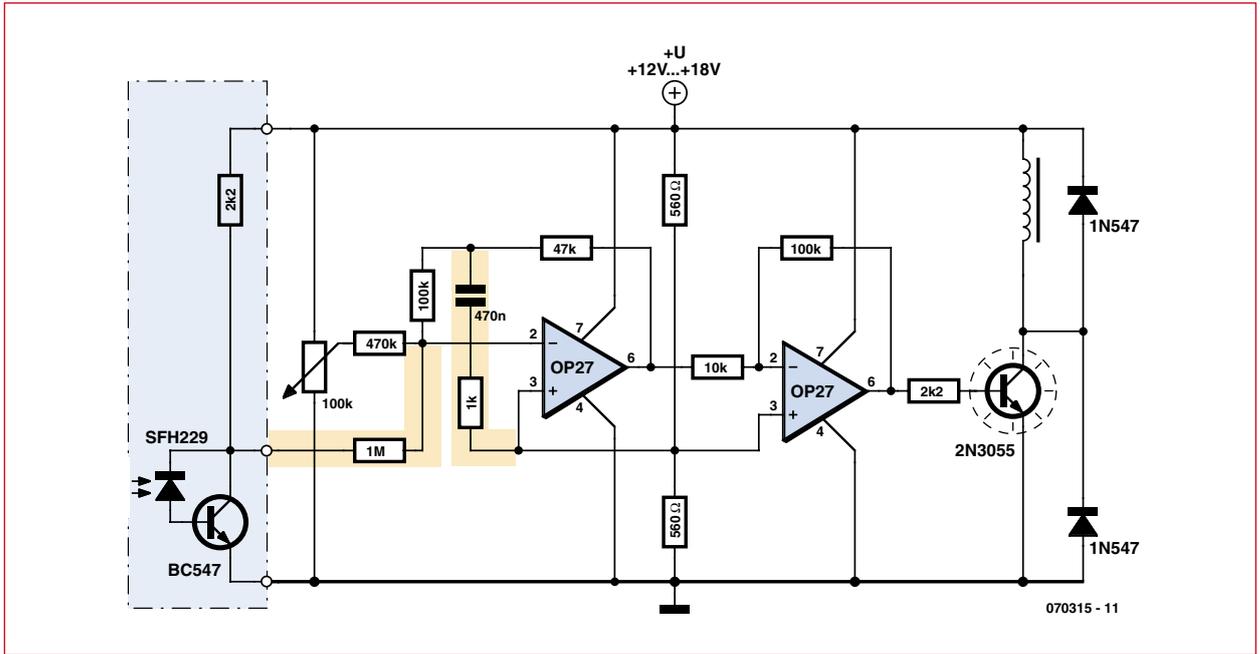


**Figure 3.**  
On voit ici la photodiode.  
Le transistor BC547 est caché.



**Figure 4.**  
Le photocapteur monté dans son boîtier.

Figure 5. Schéma de l'électronique de mesure, de régulation et de puissance. Si l'on fait abstraction des composants colorés, on se trouve en fait en présence d'un électro-aimant dont on fait varier le courant de bobine par le biais d'un potentiomètre. L'adjonction d'un capteur épaulé par 3 composants passifs en fait une régulation !



éviter qu'elle ne produise de signaux erronés engendrés par de la lumière parasite. On voit, en **figure 4**, comment une paire d'équerres de métal et un petit trou faisant office de fenêtre peuvent rendre d'éminents services. Dans le boîtier on ne trouve pas uniquement le photocapteur mais aussi une combinaison d'un transistor BC547 et d'une résistance faisant office d'amplificateur, une triplette de lignes (+U, 0 V et signal) en partent vers la platine sur laquelle se trouve l'électronique de régulation proprement dite. Cette approche rend la régulation moins sensible aux parasites incidents.

Le schéma de la **figure 5** présente l'ensemble de l'électronique de mesure, régulation et puissance, le résultat physique étant reproduit en **figure 6**. La bobine générant le champ magnétique est pilotée par le transistor de puissance 2N3055. La paire de diodes à droite sert à la protection du circuit vu que l'on se trouve en présence d'un champ magnétique relativement important et qu'il peut se créer, à la coupure, par effet d'induction, des courants importants pouvant atteindre plusieurs ampères, dérivés alors par les diodes 1N547. On pourra remplacer ces deux composants par d'autres diodes à condition

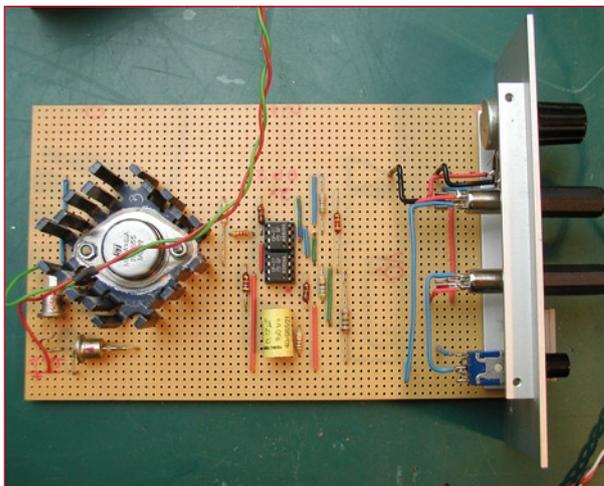
qu'elles aient des caractéristiques de charge similaires (une 1N4007 par exemple). L'ampli op de droite fait office d'amplificateur (inverseur) à gain (facteur d'amplification) fixe; on peut, formellement, considérer qu'il fait encore partie de l'étage de puissance. L'ampli de gauche épaulé par un potentiomètre constitue un amplificateur permettant de régler le passage dans la bobine d'un courant constant (imaginez-vous le circuit sans connexion aux 3 lignes vers le photocapteur). Par réglage il faut jouer sur ce courant constant de manière à ce qu'à l'écartement concerné, la force d'attraction de l'aimant compense exactement la force que la pesanteur exerce sur le corps en lévitation (cf. plus loin). La régulation n'étant pas encore en fonction, cet équilibre est très instable. À la moindre variation, le sphère tomberait par terre ou irait se coller à l'aimant.

C'est là qu'entre en scène la régulation que constituent le capteur et notre trio de composants passifs. La résistance de 1 kΩ diminue la contre-réaction (et accroît par conséquent le gain); le condensateur ne permet à ce gain plus important de s'exercer uniquement sur la partie variable du courant du photocapteur par le biais duquel le système réagit à de petites dérives par rapport au point d'équilibre (la branche de régulation donne au circuit un comportement différentiel).

Le dimensionnement n'est pas, de l'avis de l'auteur, extrêmement figé, le système fonctionnant même si les valeurs des composants présentent une certaine tolérance. Il faudra, à l'évidence, adapter les valeurs au niveau de l'étage de puissance de manière à disposer d'un courant utilisable à travers l'aimant utilisé (typiquement entre 1 et 1,5 A).

Le système régule, dit l'auteur, à une fréquence comprise entre 300 et 400 Hz. On pourra, à l'aide d'un oscilloscope, observer les variations du courant de champ magnétique, de l'ordre de 0,1 A, dues à la simplicité du concept de régulation adopté. Le déplacement mécanique de l'objet qui en résulte n'est, normalement, que de quelques fractions de millimètre. Il est important de veiller

Figure 6. On voit ici l'électronique de régulation : tout à gauche, le transistor de puissance doté de son radiateur, les deux amplis op occupent le centre. Tout à droite, l'entrée du signal du photocapteur et la sortie du courant attaquant l'électro-aimant. Tout en haut le potentiomètre pour le réglage de la composante de courant constant et tout en bas le bouton poussoir permettant de couper le champ magnétique.



à une suspension suffisamment stable de l'électro-aimant (pied de poids, fléau court) vu que sinon les oscillations pourraient se transmettre aux axes. Dans le pire des cas les oscillations mécaniques s'influencent au point de rompre l'équilibre. Il faudra dans ce cas-là stabiliser le pied et utiliser le cas échéant un autre aimant ou objet à mettre en lévitation.

### La pratique

Pour le réglage, on met le potentiomètre en position médiane, place manuellement l'objet à faire flotter dans l'espace « éclairé » par la barrière lumineuse et on joue sur la hauteur de l'aimant (c'est-à-dire son écartement par rapport au corps métallique) de manière à ce qu'il paraisse ne plus rien peser (facile à sentir à la main). Dans le cas des aimants utilisés normalement, cela donne un écartement de quelques centimètres. Il va sans dire que la masse de l'objet ne doit pas être trop importante (quelques dizaine de grammes au maximum) vu que dans ce cas-là l'écartement utile devient trop faible, les forces exercées trop importantes et l'ensemble instable. Le réglage fin se fait électriquement par le biais du potentiomètre. L'idéal est que l'objet se trouve exactement à la moitié du maximum de la lumière frappant le photorécepteur. Si l'on constate une oscillation croissante il faut jouer, par action sur le potentiomètre, sur la distance (et donc sur l'intensité du courant constant). Si rien ne va plus, il faudra essayer d'autres aimants ou objets magnétisables.

L'auteur a réussi à faire flotter un roulement à bille de 22 mm ainsi que différentes vis. Une vis flottant la tête en bas, tourne sur elle-même en cas de variation de hauteur. Ainsi la vis remonte lorsque la fente n'est pas orientée dans le sens du rayon laser et descend de la profondeur de la fente lorsque le laser est parallèle à la fente. Le positionnement est facilité si l'on se fabrique un objet flottant par combinaison d'un aimant permanent et d'une vis tournée vers le bas. Cette approche stabilise la lévitation car un objet long tombe moins vite qu'un objet court-circuit. Il faut éviter impérativement l'entrée en vrille de la masse !

Armé de cette expérience, l'auteur se sent d'attaque pour son prochain défi : la réalisation d'un réseau ferroviaire à lévitation magnétique. Les essais préliminaires sont prometteurs !

(070315-1)

### Liens Internet

[1] [www.elektor.fr/schwerkraftabsorber](http://www.elektor.fr/schwerkraftabsorber) (allemand)

[2] [www.phywe.de](http://www.phywe.de) (allemand)

[3] <http://business.listings.ebay.de/Laborzubehoer/Gestelle-Stationaere/W0QQsacatz70325QQsocmdZListingItemList>