

# lévitation magnétique encore plus simple



Troisième version : la plus compacte



Peter Neufeld (Allemagne)

Voyons un circuit analogique simple permettant de faire léviter de petits objets, qui a suscité de nombreuses discussions et expériences. Le matériel ressemble à celui déjà publié dans *Elektor*, mais avec encore moins de composants. L'électronique tient même dans le boîtier d'un relais industriel standard modifié !

J'ai partagé mes expériences sur les circuits de lévitation magnétique sur la page *Elektor Labs*. Les deux premières versions ont été publiées en ligne et dans *Elektor* : la 1<sup>re</sup> était entièrement analogique avec un comparateur *LM311* [1], et la 2<sup>e</sup> numérique [2], pilotée par un module à microcontrôleur, basé sur *ESP32*. Je ferai ici référence à ces articles par **Partie I** et **Partie II**. En discutant de la lévitation magnétique avec Luc Lemmens, ingénieur du labo d'*Elektor*, certaines idées sont apparues. Je les ai suivies pour améliorer et optimiser les projets que j'avais déjà réalisés. Certaines modifications avaient déjà été mises en œuvre dans les circuits des dites publications, mais nos discussions ont aussi débouché sur une optimisation supplémentaire. Le résultat, objet de cet article, a permis de simplifier notablement « l'ancien » circuit analogique de lévitation pour petits objets (magnétiques). Ceci est la 3<sup>e</sup> et, du moins pour l'instant, dernière partie de mes projets de lévitation magnétique. Même si la conception est plus simple que pour les deux autres projets, cela fonctionne très bien.



## Le principe, en bref

L'idée-force de ces trois projets de lévitation magnétique est que le champ magnétique de la bobine de relais modifiée ne fournit qu'une faible partie de la force de lévitation nécessaire. La majeure partie est celle qu'un aimant permanent placé dans l'objet en lévitation exerce sur le noyau de fer du solénoïde. Un capteur à effet Hall mesure l'intensité du champ magnétique total (champ statique de l'aimant + champ de la bobine). La tension sur sa broche de sortie est une mesure de la distance entre la bobine et l'objet en lévitation. Son retour en entrée du circuit de commande du courant de l'électroaimant forme une boucle de contre-réaction et donc régule la distance entre le noyau et l'objet en lévitation.

Un potentiomètre permet le préréglage fin du circuit de commande pour l'ajuster à l'objet magnétique qui doit léviter sous la bobine. Si vous êtes novice sur cette expérimentation, ce réglage peut être vite décourageant. En cas de problème, lisez la **Partie I** [1] pour ses conseils et astuces. Le circuit marche bien, mais il est bien sûr limité pour ce qui concerne la taille et le poids des objets qu'il peut soulever.

## Circuit simplifié

La **figure 1** donne le schéma de cette 3<sup>e</sup> version, une version simplifiée de la **Partie I**. Le comparateur LM311 [3] fournit ici le courant de commande (assez faible) directement à la bobine, donc sans transistor externe. Peut-être le savez-vous : la sortie à collecteur ouvert du LM311 peut piloter une petite charge. Cela simplifie notablement le circuit de la 1<sup>re</sup> solution 100 % analogique, conçue pour la **Partie I**, dans laquelle un transistor BC550 NPN ajouté à la sortie du comparateur alimentait l'électroaimant.

Pour réduire encore plus le nombre de composants et gagner un peu de place, le diviseur de tension réglable de la référence sur l'entrée inverseuse du comparateur (P1 et R4) peut aussi être modifié. On peut remplacer ces deux composants par un seul ajustable multitour ; il n'est pas critique, toute valeur entre 1 kΩ et 1 MΩ fera l'affaire. Comme la **figure 2** le prouve, l'ajustable de préréglage à un tour et la résistance fixe R4 s'insèrent bien dans le boîtier du relais, cette dernière modification n'est donc pas indispensable.

Les composants utilisés ici sont très répandus, disponibles et abordables. Dans la **Partie I**, nous avions écrit que *seuls* les capteurs à effet Hall A1302 ou A1308 d'Allegro Microsystems étaient utilisables bien que par ex. les SS49E fussent moins chers et plus facilement disponibles. Cependant, dans la **Partie II Lévitation magnétique, version numérique**, nous constations avec satisfaction que cette assertion était erronée. D'autres tests ont prouvé que le type et la marque d'IC2 ne sont pas vraiment critiques, ce qui facilite notamment la recherche des composants nécessaires à ces projets. Les capteurs Allegro sont plus chers et difficiles à trouver.

## Comment trouver le bon relais et le modifier ?

L'électroaimant (L1) est désormais le solénoïde d'un relais 5 V standard, pour être plus précis, de marque Finder (réf. 40.52.7.005.0000). Il est facilement disponible et bien plus facile à modifier que les relais 5 V suggérés auparavant. Les photos de la **figure 3** illustrent le processus complet de modification du relais.

Le boîtier transparent d'un relais Finder est souvent collé à sa base. Il est cependant facile de l'ouvrir en chauffant modérément le joint adhésif avec un sèche-cheveux, ou une station de soudage à air chaud. Un couteau Exacto, légèrement chauffé, peut faciliter l'ouverture sans faire de dégâts. C'est justement ce que nous voulons ici : garder le capot intact et le réutiliser comme boîtier pour l'électronique complète du dispositif de lévitation.

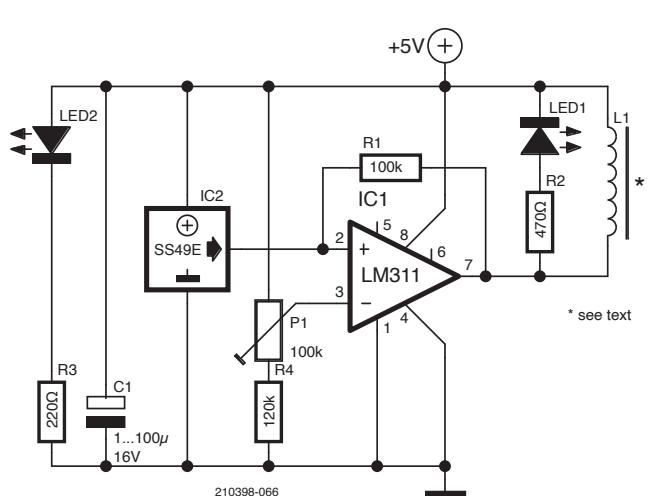


Figure 1. Schéma de cette version de la lévitation magnétique.



Figure 2. L'ajustable à un tour et la résistance en série tiennent dans le boîtier.

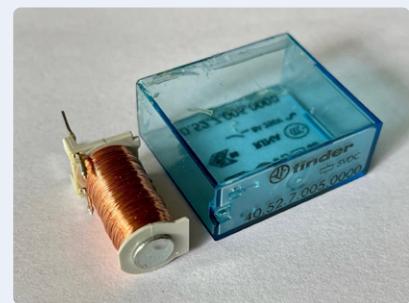
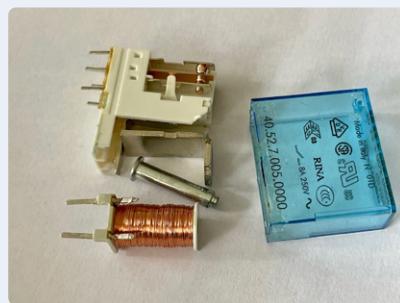
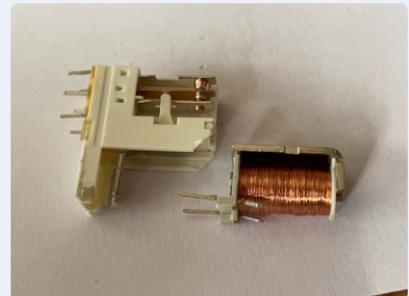
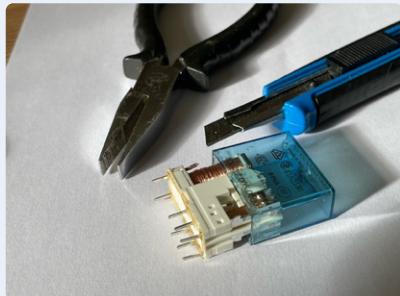
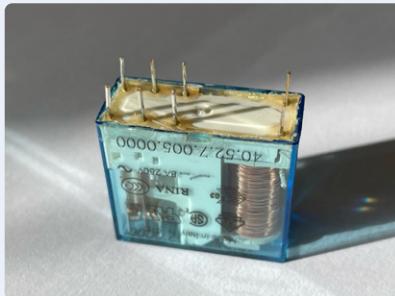


Figure 3. Démontage du relais et préparation du solénoïde.

Comme pour les relais utilisés précédemment, le circuit magnétique doit être ouvert pour éviter un court-circuit magnétique : ce doit être un I et non un U. Cette opération est assez aisée, car le noyau rond et la partie plate rectangulaire ne sont liés que par martelage. On peut rompre cette liaison avec une petite disqueuse, un fraisage ou perçage superficiel. Le noyau de fer peut alors être retiré (s'il ne tombe pas tout seul) et retourné pour avoir une surface polaire un peu plus grande et également plate et y coller le capteur à effet Hall, (cf. **fig. 4**). Cela permet de placer l'électroaimant et le capteur à effet Hall dans le boîtier du relais. Ils y seront bien à l'abri des chocs de l'aimant.

Avec le montage alimenté en 5 V, le courant consommé avec un objet magnétique lévitant sous la bobine n'est que de 50 mA et au maximum de 90 mA, si la bobine est alimentée en continu (par ex., s'il n'y a pas d'aimant près du noyau).

Avec ce relais Finder modifié, l'électroaimant marche très bien et son capot procure même une bonne protection mécanique de l'ensemble du circuit vis-à-vis des chocs des aimants permanents sur le noyau ou le capteur. Si vous voulez vraiment le construire dans l'ancien boîtier de relais – comme je l'ai fait – c'est possible moyennant un effort mécanique acceptable et un peu de réflexion pour déterminer comment les composants peuvent être disposés dans ce volume plus petit. Il va de soi que le circuit peut aussi très facilement être construit sur une plaque d'essai ou une carte pastillée (cf. **fig. 5**), et il suffit de quatre fils pour connecter l'ensemble bobine, LED, résistance et capteur à effet Hall au reste du circuit. J'ai utilisé un morceau de câble plat de 20 cm de long dans un prototype.

### Bon ingénieur ou bricoleur courageux, mais téméraire ?

Luc du labo d'Elektor a analysé de manière critique et rigoureuse que le LM311 peut absorber 50 mA à sa sortie. Mais qu'en est-il de 90 mA ?

Eh bien, cela justifie le titre du paragraphe. Cela dit, mon but était de garder le circuit aussi simple que possible et de réduire le nombre de composants à un minimum absolu. Et tout simplement, le bricoleur qui m'habite refusait le transistor de commande supplémentaire pour prévenir la mort prématuée de mon circuit.

Un examen plus poussé du circuit interne du LM311 (**fig. 6**) et des diagrammes de la fiche technique révèle que la puce possède un circuit de protection interne qui limite le courant de sortie à un niveau inoffensif, même en cas de court-circuit de sortie, et assure une dissipation de puissance maximale de 350 mW sous une tension de 5 V. Cela rend la sortie presque immortelle, ou du moins, insensible à une charge de faible impédance. Pour finir, j'ai laissé mon circuit sous tension 48 h et, comme je l'attendais et l'espérais, il a survécu ! OK, prenons un peu de recul. Je respecte les limitations de vitesse, je paie mes impôts, je lis et je suis les fiches techniques... Je connais de nombreuses raisons de rester dans les limites de sécurité des spécifications des semi-conducteurs. Même si les circuits intégrés disposent de toutes sortes de circuits de protection, ce n'est pas bon de les garder aux limites. Cela réduit certainement la durée de vie des puces. On peut arguer que, dans ce cas, il durera encore assez longtemps et que changer le LM311 ne coûtera pas une fortune, mais avec cet assemblage compact, réparer le circuit est difficile.

Mieux vaut prévenir que guérir, mais je voulais aussi relever le défi de voir si le circuit peut fonctionner avec un courant de sortie plus faible. Un moyen facile et évident d'y parvenir est de remplacer le relais 5 V avec bobine de 50 Ω par un relais 6 V et bobine de 75 Ω (Finder, réf. 40.52.7.006.0000), mais je n'avais pas un tel relais sous la main. J'ai donc opté pour une meilleure solution : tout en conservant l'alimentation de 5 V, j'ai réduit la tension aux bornes de la bobine en insérant deux diodes 1N4148 en série entre l'alimentation et le solénoïde

(cf. **fig. 7**). Le courant de la bobine sans charge utile fut réduit à 50 mA et avec charge utile à 39 mA de moyenne. Une simple résistance de 22  $\Omega$  aura le même effet. Et cela fonctionne bien aussi ! Cela permet au comparateur de rester dans ses spécifications électriques. Malheureusement, cette puissance inférieure réduit aussi la distance entre l'électroaimant et l'objet en lévitation. Pire encore, le système de commande a moins de marge pour absorber les perturbations. En d'autres termes, à ce niveau de puissance réduite, l'objet tombera ou heurtera l'électroaimant même s'il ne s'écarte que peu de la distance d'équilibre. Le circuit est moins capable de corriger l'écart.

### De nouvelles idées de conception ?

Finalement, j'aime mieux cette petite version que la version analogique construite sur Veroboard pour la **Partie I**. Elle présente mieux et l'électronique est mieux protégée par le boîtier du relais. La version de la **Partie II** qui utilise un *M5Stack Atom* basé sur ESP32 a montré que le rôle du comparateur analogique pouvait être tenu par un microcontrôleur et un algorithme simple. Selon moi, les différentes variantes de ce



Figure 4. Le capteur à effet Hall collé au noyau de fer de la bobine.

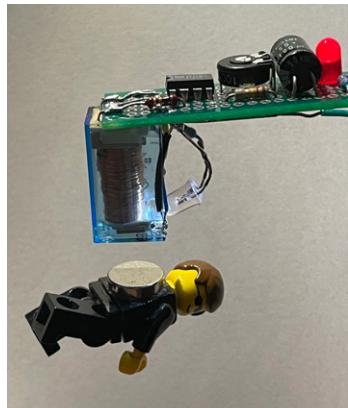


Figure 5. Un morceau de Veroboard convient aussi pour ce circuit.

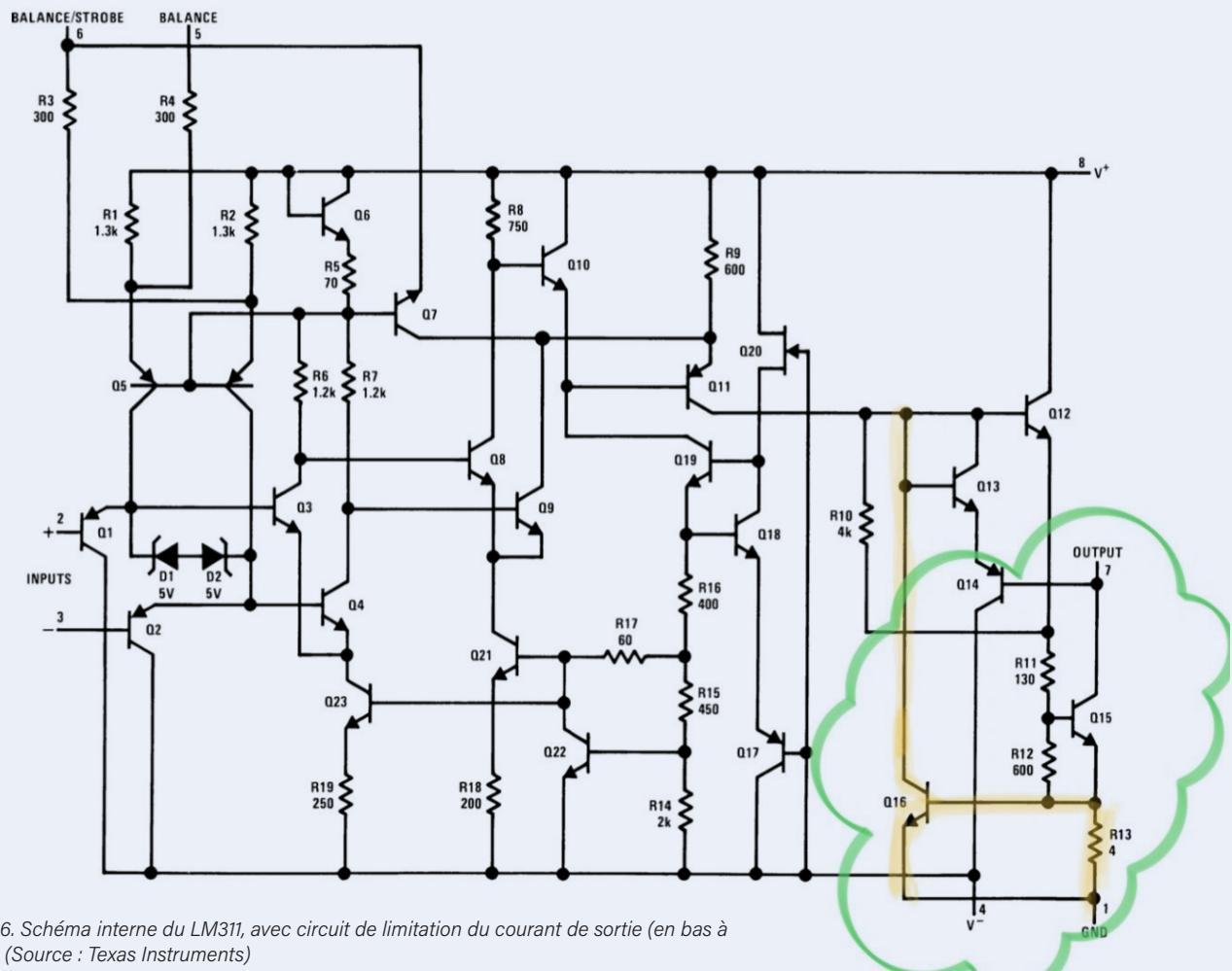


Figure 6. Schéma interne du LM311, avec circuit de limitation du courant de sortie (en bas à droite). (Source : Texas Instruments)

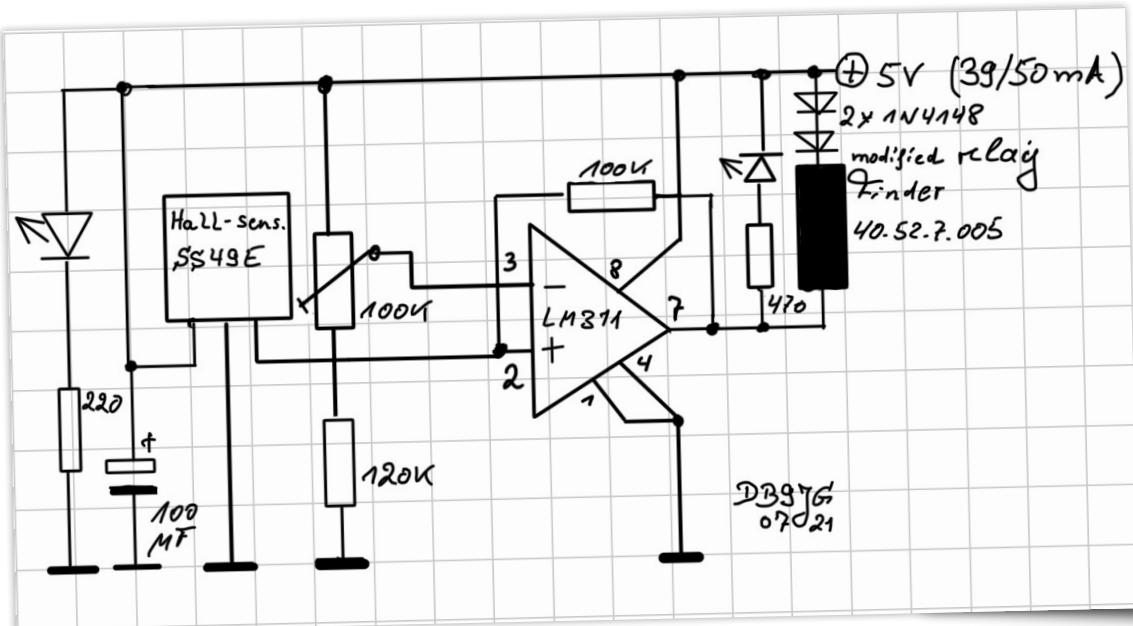


Figure 7. Le circuit de lévitation magnétique avec deux diodes 1N4148 pour limiter le courant dans la bobine.

petit projet, avec leur très classique problème de conception de l'asservissement, ont montré que l'analogique a toujours ses avantages, même à l'époque des microcontrôleurs rois !  
Comme annoncé en début d'article, c'est la dernière et ultime version de mes projets de lévitation magnétique, à moins que... Peut-être avez-vous des idées ou des suggestions pour de nouvelles améliorations ? 

210398-04

### Des questions, des commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur ([luc.lemmens@elektor.com](mailto:luc.lemmens@elektor.com)).

### LISTE DES COMPOSANTS

#### Résistances

R1 = 100 kΩ  
R2 = 470 Ω  
R3 = 220 Ω  
R4 = 120 kΩ  
P1 = ajustable 100 kΩ

#### Semi-conducteurs

LED1,LED2 = LED verte  
IC1 = capteur à effet Hall SS49E  
IC2 = comparateur LM311

#### Divers

L1 = relais 5 V, Finder,  
réf. 40.52.7.005.0000 (voir texte)

#### Condensateurs

C1 = 1 µF à 100 µF, 16 V, radial

### Contributeurs

Conception et texte : Peter Neufeld

Montage : Luc Lemmens

Illustrations : Peter Neufeld, Patrick Wielders, Luc Lemmens

Mise en page : Harmen Heida

Traduction : Yves Georges



### PRODUITS

➤ 3<sup>e</sup> main avec loupe, éclairage LED et support de fer à souder de Velleman [www.elektor.fr/19864](http://www.elektor.fr/19864)

➤ Station de soudage à régulation de température VTSS220 de Velleman [www.elektor.fr/19865](http://www.elektor.fr/19865)

### LIENS

[1] « Lévitation magnétique sans peine », Elektor 7-8/2021 : [www.elektormagazine.fr/200311-04](http://www.elektormagazine.fr/200311-04)

[2] « Lévitation magnétique, version numérique », Elektor 9-10/2021 : [www.elektormagazine.fr/200278-04](http://www.elektormagazine.fr/200278-04)

[3] Fiche technique du comparateur LM311 : [www.ti.com/lit/ds/symlink/lm311-n.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm311-n.pdf)