

lévitation magnétique, version numérique

comparateur analogique remplacé par un ESP32 Pico

Peter Neufeld (Allemagne) et
Luc Lemmens (Elektor)

Dans l'article « lévitation magnétique sans peine », nous avons vu que la lévitation magnétique n'est pas trop difficile à réaliser avec un aimant permanent, la bobine et le noyau d'un relais 5 V standard, un capteur à effet Hall et un bon vieux comparateur analogique. Dans ce deuxième projet, c'est un SoC ESP32 Pico qui est aux commandes, intégré dans le très pratique module ATOM de M5Stack.

Le titre du premier article, « Lévitation magnétique sans peine » [1][2], pouvait laisser penser que nous allions cette fois-ci envisager une méthode plus complexe pour réaliser la lévitation, mais ce n'est pas le cas. Dans ce 2^e volet du projet de lévitation [3], un petit module basé sur l'ESP32 (ATOM Lite ou Matrix de M5Stack, voir l'encadré « ATOM... ») reprend le rôle du comparateur analogique

du 1^{er} projet : il mesure la tension en sortie du capteur Hall et commande la bobine. En fait, pour construire cette version numérique, si on ne compte pas les composants internes du module M5Stack, il faut bien moins de pièces qu'avec le circuit analogique. C'est amusant : pour certains de nos lecteurs, l'utilisation d'un microcontrôleur est la solution de facilité, tandis que d'autres demanderont pourquoi utiliser un module ESP32 alors qu'un simple LM311 fait l'affaire. Alors pour satisfaire tout le monde, nous avons décidé de présenter les deux options.

Pour ce projet, tout module ESP32 conviendrait à la place de l'ATOM de M5Stack. Pour l'une des versions du prototype (voir ci-dessous), le bouton-poussoir (les modules ATOM en ont un) de réglage de la boucle d'asservissement de la lévitation sera très pratique.

Nous avons préféré les modules de M5Stack pour leurs qualités : bas prix, très faible encombrement et boîtier plastique protégeant bien contre les courts-circuits. Toutes les E/S nécessaires à ce projet sont facilement accessibles sur les prises SIL situées au bas des ATOM. Les LED Neopixel du modèle M5Stack ATOM Matrix ne sont utilisées qu'accessoirement et ne contribuent pas au processus de lévitation. Pour ce projet, le modèle Lite, à une seule LED Neopixel, convient aussi.

Au début de l'écriture de cet article, j'en discutais avec Peter qui a eu l'idée de remplacer le bouton-poussoir de réglage de la boucle d'asservissement par un trimmer ; il a finalement construit et testé cette solution également. Cette



« version supplémentaire » est traitée sur ses pages web [4] et dans cet article.

Le matériel, version originale

Comme le montre le schéma de la **figure 1**, le matériel utilisé est à peu près le même que dans la version analogique. La modification de la carte à relais est quasi identique, la différence la plus importante est que le capteur à effet Hall est désormais alimenté en 3,3 V, à partir du régulateur de tension interne du module ATOM. La **figure 2** montre l'electroaimant résultant avec le capteur Hall monté sur le noyau. Ici, la diode de roue libre (*flyback*) du relais est remplacée par deux LED blanches qui sont utilisées comme « spots » pour éclairer l'objet en lévitation. Comme dans la solution analogique, une seule LED conviendrait. Cependant, il semble que la stabilité de l'objet en lévitation soit meilleure dans la configuration à deux LED. Il est important de maintenir un courant de retour faible dans les LED, car un courant plus élevé maintient le champ électromagnétique trop longtemps, même lorsque le transistor est coupé [5]. Ce champ supplémentaire nuit à la boucle d'asservissement et déstabilise le vol stationnaire de la charge. Les LED et la résistance sont cependant nécessaires à la place de la diode d'origine, car elles limitent la tension d'induction appliquée au transistor du relais à une valeur inoffensive (< 50 V) et garantissent des impulsions de commutation assez courtes. Deux LED blanches en série avec une résistance de 220 à 330 Ω font très bien le travail.

À propos de capteurs à effet Hall...

Au début, sur les pages web de Peter pour les deux versions du projet de lévitation, il était mentionné que seuls les A1302 ou A1308 d'*Allegro Microsystems* convenaient, et que le SS49E (*Honeywell*), plus abordable, ne donnait pas satisfaction. La raison en est restée un peu obscure, jusqu'à ce qu'il se rende compte que pendant le développement du tout 1^{er} prototype, à un moment donné, il avait changé plus d'une pièce à la fois (dont le SS49E remplacé par un A1302) et ensuite, le montage avait fonctionné. On soupçonnait que le capteur Hall était le coupable, mais des essais plus récents prouvent que le SS49E fonctionne dans les deux versions du projet. Bonne nouvelle, à cause du prix, mais aussi parce que les capteurs *Honeywell* sont beaucoup plus faciles à trouver.

Bien entendu, la tension d'alimentation de 3,3 V permet de maintenir la sortie du capteur entre 0 V et 3,3 V, sans excéder la tension d'entrée max. du CA/N du M5Stack ATOM. Nota : cette tension n'est pas conforme aux spécifications de la plupart des capteurs Hall (voir l'encadré « À propos de... »). Selon les fiches techniques, la tension d'alimentation minimale des A1302/A1308 devrait être de 4,5 V, mais ils semblent fonctionner à une

tension inférieure (en tout cas pour ce projet) et cela évite un diviseur de tension pour rester dans les limites d'entrée du CA/N. Cependant, il y a un inconvénient : apparemment sous 3,3 V, la tension de sortie du capteur commence à plafonner à une intensité de champ magnétique plus faible, et cela limite le poids de la charge qui peut l'éviter. Et pour le SS49E c'est aussi un facteur limitant, bien que ce capteur Hall soit spécifié pour une tension d'alimentation minimale de 2,6 V.

Le circuit est alimenté en 5 V soit par le connecteur USB-C, soit par son connecteur Grove ou encore par la prise SIL située au-dessous du M5Stack ATOM.

Le logiciel

Le croquis Arduino pour piloter la lévitation est très simple : le CA/N de l'ESP32 mesure la tension de sortie du capteur Hall, la compare à un seuil de déclenchement (avec une certaine hystérésis) et active ou coupe l'alimentation de la bobine, le logiciel imite donc le comparateur LM311 de la 1^{re} réalisation. Dans le 1^{er} exemple sur la page web de Peter (*MagLev_1/NO*), le seuil de déclenchement et l'hystérésis sont définis comme constantes dans le croquis et doivent être ajustés à la charge utilisée.

Figure 2. Carte relais modifiée et capteur à effet Hall sur le noyau de l'électroaimant.

Trouver le seuil de déclenchement correct peut prendre un certain temps, car il dépend de la charge et bien sûr de la taille et de la force de l'aimant permanent utilisé.

Le code de ce 1^{er} croquis s'apparente plutôt à une démo de l'algorithme d'asservissement, car il faut le recompiler et le télécharger à chaque fois que l'on change une de ces constantes, ce qui n'est pas très pratique. Le 2^e croquis utilise le bouton-poussoir intégré à l'ATOM pour modifier le seuil de la tension de sortie du capteur Hall pendant l'exécution. Au démarrage de ce programme, le niveau est à une valeur prédéfinie ; ensuite il suffit d'appuyer sur le bouton-poussoir pour la diminuer jusqu'à ce que la charge plane sous l'électroaimant. Avec la version actuelle de ce croquis (*MagLev_2*,

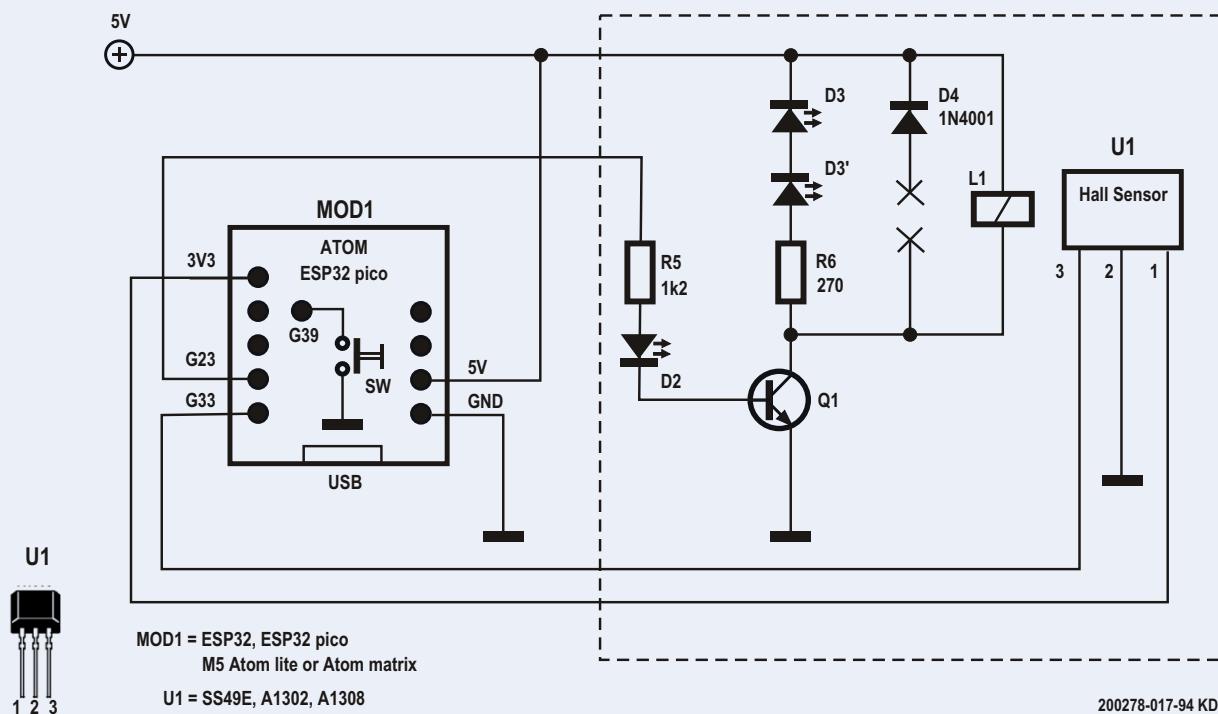


Figure 1. Le schéma ressemble à la version analogique, mais nécessite moins de composants.

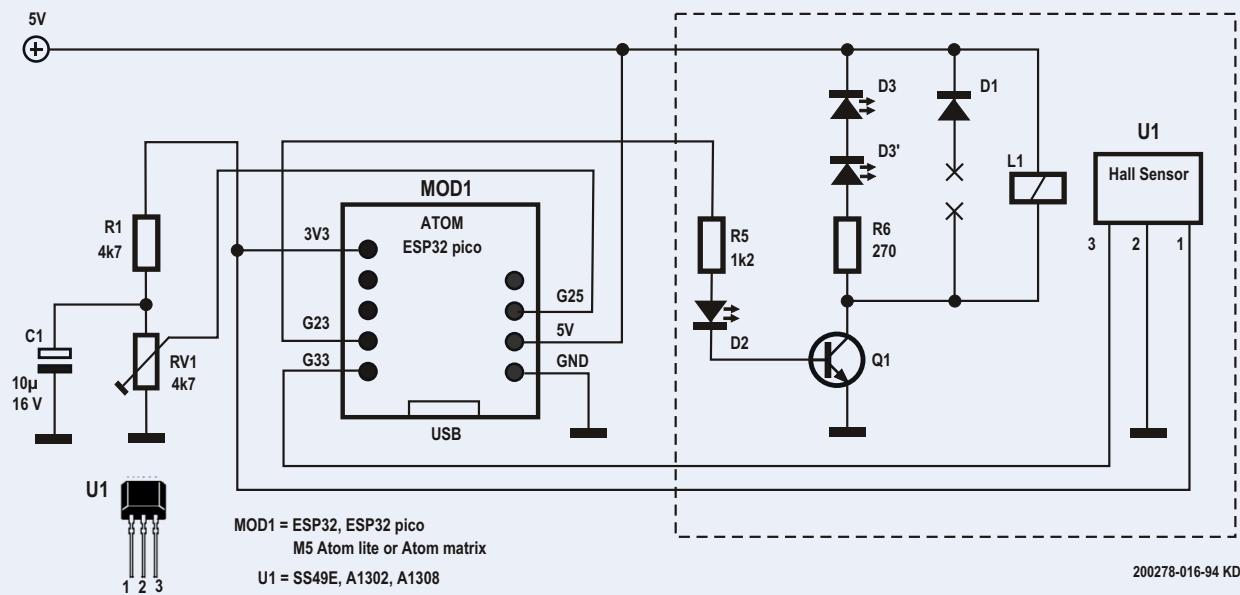


Figure 3. Trois pièces supplémentaires simplifient le réglage.

INO) et avec un seul bouton-poussoir défini par l'utilisateur pour commander l'étalonnage, le seuil ne peut être que décrémenté. Si la valeur réglée est trop basse, il faut réinitialiser l'ATOM et recommencer le processus. Le moniteur série de l'EDI Arduino permet de suivre la progression et une fois la valeur correcte du seuil déterminée, elle peut être entrée dans le code source du croquis qui peut ensuite être

recompilé et téléchargé dans le module ATOM. Bien sûr, tant que la charge n'est pas modifiée, aucun autre réglage n'est nécessaire lorsque le matériel est réinitialisé ou remis sous tension. En regardant le code de ce croquis, on remarque qu'il y a plusieurs lignes commentées avec différents paramètres par défaut pour le seuil. Bien sûr, chaque charge a son seuil et ce dernier peut varier selon le type de capteur

à effet Hall. Mais il y a des différences même lorsque le module ATOM Matrix est remplacé par la version ATOM Lite. Apparemment, les caractéristiques des CA/N (ou leur tension de référence ?) diffèrent d'un module à l'autre. L'hystéresis semble être un peu moins critique, mais c'est utile d'expérimenter avec différentes valeurs pour stabiliser l'objet en lévitation. Ce paramètre est codé en dur pour toutes les versions du logiciel, il ne peut donc être modifié que dans le code source qui doit être recompilé et téléchargé comme micropogramme.

À la croisée numérique/ analogique...

Le bouton-poussoir n'est pas la méthode la plus confortable pour régler ce projet de lévitation. Une fois que le programme a été chargé, il faut une connexion à un ordinateur et une reprogrammation de l'ESP32 pour adapter la commande par logiciel à la charge, car on ne veut pas régler les deux paramètres à chaque remise sous tension. Si la charge doit être modifiée ultérieurement, il faut à nouveau se connecter à un ordinateur pour adapter le seuil au nouvel objet. À cet égard, la solution analogique de la première partie était vraiment « la solution sans peine » : un tournevis suffisait pour régler le potentiomètre sur la bonne position pour que la nouvelle charge plane. Mais comme mentionné plus haut dans cet article, Peter a eu l'idée d'ajouter un potentiomètre pour ajuster le seuil pendant

ATOM Lite et ATOM Matrix de M5Stack

Le boîtier Lite (un peu) moins cher est légèrement moins haut que le boîtier Matrix (quelques mm), la différence est probablement due à la matrice Neopixel de ce dernier. En outre, le Matrix contient une LED IR et une unité de mesure inertielle (IMU) MPU8668. La différence de prix entre les deux versions est minime, et si vous souhaitez utiliser les modules pour de futurs projets, vous devriez peut-être considérer les extras du Matrix (un peu) plus cher.



Configuration de l'EDI Arduino

Pour utiliser le module ATOM Lite ou Matrix dans l'EDI Arduino, il faut une certaine préparation. En supposant que l'EDI lui-même soit déjà installé, la 1^{re} étape consiste à ajouter le module complémentaire *ESP32 Arduino core* dans *Fichiers* → *Préférences de l'EDI* et à saisir https://m5stack.oss-cn-shenzhen.aliyuncs.com/resource/arduino/package_m5stack_index.json dans le champ *URL de gestionnaire de cartes supplémentaires*. Fermez les *Préférences* en cliquant sur *OK*, puis ouvrez *Outils* → *Type de carte* → *Gestionnaire de cartes...*, entrez « *M5Stack* » dans le champ de recherche en haut de cette fenêtre et appuyez sur le bouton d'installation « *M5Stack by M5Stack officiel* » ; au moment de la rédaction de cet article, la version 1.0.7 était la plus récente. Ensuite, vous pouvez sélectionner le module M5Stack ATOM dans *Outils* → *Type de carte* → *M5Stack Arduino* → *M5Stack-ATOM* ; n'oubliez pas de sélectionner le port série correct dans *Outils* → *Port*. En outre, si vous voulez utiliser les LED Neopixel, vous devez installer la bibliothèque Neopixel d'Adafruit via *Croquis* → *Inclure une bibliothèque* → *Gérer les bibliothèques*

l'exécution, comme on peut le voir sur le schéma modifié de la **figure 3**. Le curseur du potentiomètre prégréglé est connecté à un deuxième canal analogique de l'ESP32. Cela peut être une solution temporaire pour régler facilement la lévitation magnétique au seuil correct, au lieu d'utiliser le bouton-poussoir

LISTE DES COMPOSANTS

Résistances

R5* = 1,2 kΩ
R6 = 270 Ω

Semi-conducteurs

D2* = LED rouge
D3, D3' = LED blanche (voir texte)
D4* = non montée (ou à retirer de la carte à relais)
Q1* = BC550
U1 = capteur à effet Hall A1302 ou A1308 (Allegro) ou SS49E (Honeywell)

Divers

Carte à relais 5 V*

MOD1 = module ATOM Lite ou ATOM Matrix de M5Stack

Disques magnétiques en néodyme

*= voir [1] pour les détails sur la carte de l'électroaimant/relais.

Composants supplémentaires pour le réglage analogique

Résistances

R1 = 4,7 kΩ
RV1 = trimmer 5 kΩ

Condensateurs

C1 = 10 µF, 10 V radial

comme dans le croquis précédent. Ainsi, la 3^e version du logiciel (*MagLev_3.I/NO*) peut aider à déterminer le seuil correct qui peut ensuite être codé en dur dans *MagLev_2.I/NO*. Le code source est reproduit dans cet article. Pour simplifier, la partie concernant les LED Neopixel du module ATOM Matrix est omise du croquis. Si on souhaite réduire le matériel au strict minimum, le trimmer, la résistance et le condensateur électrolytique supplémentaires (R1, RV1 et C1) peuvent être omis ultérieurement, le seuil correct étant fixé dans la deuxième version du croquis. La photo de la **figure 4** montre que ces composants ne prennent que peu de place et peuvent effectivement être cachés. À mon avis, ce

réglage analogique de la version numérique est un ajout précieux au projet de lévitation. Je ne le supprimerais pas !

Pour télécharger le code source des trois croquis, voir [6].

Construction

Les photos de la **figure 5** montrent comment réaliser la construction mécanique du projet de lévitation numérique. L'électroaimant (la carte à relais modifiée) avec le capteur Hall est monté en haut d'un cadre en bois de 10 cm de Ø, le module M5Stack ATOM en bas. Si l'option « trimmer » est utilisée, le meilleur emplacement pour les trois composants supplémentaires est dans ou à la base de



Figure 4. Trimmer à la base de la construction mécanique.

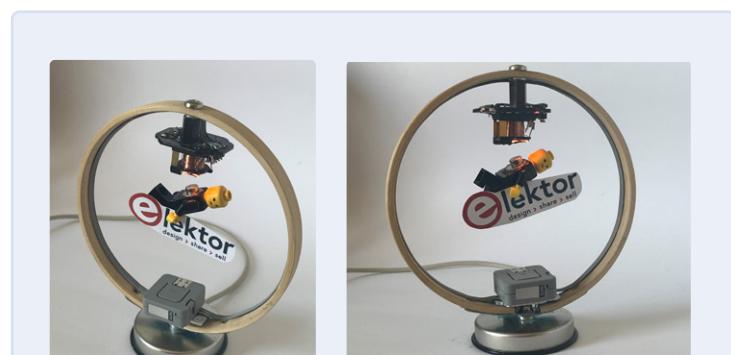


Figure 5. Construction mécanique, vue d'ensemble.



PRODUIT

➤ Sphère magnétique en kit

www.elektor.fr/magnetsphere-kit

la construction : c'est mécaniquement plus stable pendant le réglage et il est plus facile d'y cacher les composants.

Analogique ou numérique ?

Être facile ou ne pas l'être, telle est la question. Nous vous laissons le soin de préférer la version « vieille école » avec comparateur analogique ou la version plus moderne à microcontrôleur de cette seconde partie. Comme nous l'avons mentionné plus haut, la tension d'alimentation de 3,3 V pour le capteur Hall limite le poids de la charge qui peut léviter avec cette solution numérique. Les modules ESP32 ont été utilisés en raison de leur prix et de leur petite taille, et non parce qu'il fallait une connexion « sans fil ». Au bout du compte, dans cette réalisation, l'objet en lévitation est la seule chose sans fil !

(200278-04)

Des questions, des commentaires ?

Envoyez un courriel au rédacteur (luc.lemmens@elektor.com) ou contactez Elektor (redaction@elektor.fr).

Contributeurs

Conception : Peter Neufeld
Texte et rédaction : Luc Lemmens
Illustrations : Peter Neufeld, Patrick Wielders, Luc Lemmens
Mise en page : Harmen Heida
Traduction : Yves Georges



Le croquis : la méthode numérique

```
int HALL_PIN = 33; //Entrée analogique du capteur Hall
int HALL_VAL = 0; //Sortie du capteur Hall
int ADJ_PIN = 25; //Entrée analogique du trimmer (0 à 2,5 V)
int ADJ_VAL = 0; //Seuil de déclenchement pour la charge utile
réelle
int HYSTERESIS = 50; //Hystérésis absolue pour le seuil de
déclenchement
int HYST = 0; //Ajoute ou soustrait l'hystérésis
int RELAIS_PIN = 23; //Sortie vers relais/électro-aimant 5 V
int i = 0;

//-----
//Sortie vers l'électroaimant
void setup(){

//Par défaut : CAN 12 bits avec atténuation de 11 dB.
//-----
void loop(){
    HALL_VAL = 0;
    ADJ_VAL = 0;
    for (i=1; i <= 2; i++){ //Lire 2 fois pour réduire le bruit
        HALL_VAL = (HALL_VAL + analogRead(HALL_PIN));
        ADJ_VAL = ADJ_VAL + analogRead (ADJ_PIN);
    }
    HALL_VAL = HALL_VAL / (i-1); //Calculer la moyenne
    ADJ_VAL = ADJ_VAL / (i-1); //Calculer la moyenne
    ADJ_VAL = (ADJ_VAL/3)+2450; //Décaler vers une gamme adéquate
    if (HALL_VAL < (ADJ_VAL + HYST)){ //Charge trop faible
        digitalWrite(RELAIS_PIN, HIGH); //Soulever la charge utile
        HYST = HYSTERESIS; //Définir le niveau supérieur d'hystérésis
    }
    else { //Charge trop élevée :
        digitalWrite(RELAIS_PIN, LOW); //Relâcher la charge utile
        HYST = 0 - HYSTERESIS //Définir le niveau inférieur d'hystérésis
    }
}
//-----
```

LIENS

- [1] « lévitation magnétique sans peine », elektor 07-08/2021 : www.elektormagazine.fr/200311-04
- [2] P. Neufeld, « Magnetic Levitation - The Easy Way » :
<https://peterneufeld.wordpress.com/2020/06/20/magnetic-levitation-the-easy-way/>
- [3] P. Neufeld, « Magnetic Levitation - The Digital Way » :
<https://peterneufeld.wordpress.com/2020/07/04/magnetic-levitation-the-digital-way/>
- [4] P. Neufeld, « Magnetic Levitation - Reloaded » :
<https://peterneufeld.wordpress.com/2021/05/01/magnetic-levitation-reloaded/>
- [5] Diode de roue libre ou d'amortissement (flyback ou snubber) : https://en.wikipedia.org/wiki/Snubber#Diode_snubbers
- [6] Téléchargement du logiciel : www.elektormagazine.fr/200278-04