

# Détection de météores et d'aéronefs

Cédric Willmin, Gymnase français de Bienne, cedric@willemin.li

12 avril 2020

## 1 Introduction

Le radar militaire français GRAVES (Grand Réseau Adapté à la VEille Spatiale) émet des ondes électromagnétiques en permanence sur la fréquence de 143.05MHz. Les antennes émettrices du réseau GRAVES sont situées entre Dijon et Vesoul, dans le département français de Haute-Saône (cf. Figure 1). Les ondes générées par le radar sont réfléchies par tout objet électriquement conducteur, comme par exemple des satellites ou des avions. Le signal réémis par l'objet est réceptionné par un réseau composé d'une centaine d'antennes, situé sur le plateau d'Albion.



FIGURE 1 – Emetteurs du radar GRAVES, situé entre Dijon et Vesoul. Fréquence d'émission à 143.05MHz.

La détection de météores et d'aéronefs est réalisée selon le même principe. L'antenne émettrice est celle du radar GRAVES et la réception est effectuée au moyen d'une antenne Ground-Plan  $3/4 - \lambda$  (cf. Figure 2), placée sur la toiture de la halle de gymnastique du Gymnase de la rue des Alpes à Bienne. Un tel système est communément qualifié de radar bistatique, car l'émetteur  $T_x$  est significativement éloigné géographiquement du récepteur  $R_x$  (cf. Figure 3).



**FIGURE 2** – Système de réception placé sur le toit de la Halle de gymnastique du Gymnase des Alpes à Bienne. Un préamplificateur est placé directement sur le mât de l'antenne pour gagner en qualité de signal.

Si l'objet est en mouvement, l'onde réfléchiée verra sa fréquence augmenter ou diminuer en fonction de sa vitesse radiale par rapport au radar, mais aussi par rapport au mouvement de l'observateur. Ce phénomène de décalage de fréquence  $\Delta f$  est connu sous la dénomination d'effet Doppler-Fizeau.

$$\Delta f = f_{RX} - f_{TX} \quad (1)$$

où  $f_{TX}$  est la fréquence émise par le radar et  $f_{RX}$  la fréquence captée par l'antenne.

Les objets qui réfléchissent l'onde se déplacent à une vitesse relativement élevée dans le cas d'un météore et bien plus faible s'il s'agit d'avions. En ayant connaissance de la trajectoire du météore, il est possible dès lors de localiser son éventuel point d'impact sur notre planète.

$$\Delta f = \frac{2f_{TX} \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}{c} \cdot \cos \delta \cdot \|\vec{v}\| \quad (2)$$

La constante  $c$  correspond à la vitesse de la lumière, soit environ  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s. L'angle bistatique  $\beta$  n'est pas connu mais peut être estimé; sa valeur étant relativement faible lorsque le signal provient d'un météore ou d'un satellite et est plus élevé pour un avion.

Malheureusement, la vitesse  $\vec{v}$  et la position de l'objet ne peuvent pas être définies avec une seule station de réception, car l'angle  $\delta$  (cf. Figure 3) est inconnu. Mais il est néanmoins possible de définir la projection de la vitesse sur l'angle bistatique  $\vec{w}$ .

$$\|\vec{w}\| = \cos \delta \cdot \|\vec{v}\| \quad (3)$$

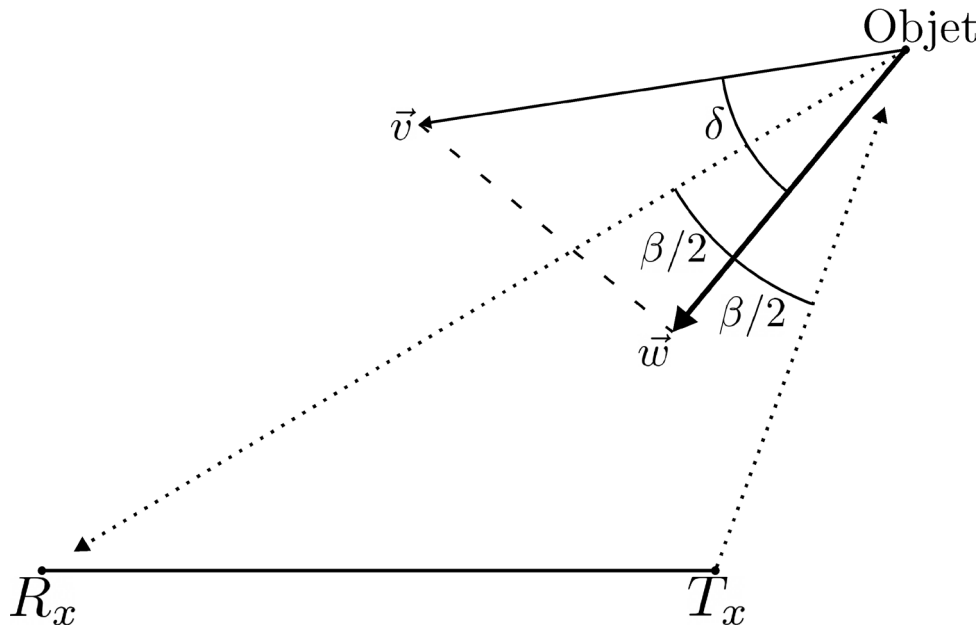


FIGURE 3 – Représentation géométrique du radar bistatique. L'émetteur est éloigné du récepteur. L'angle  $\beta$  correspond à l'angle bistatique.

Dans les années 1940, une expérience similaire avait déjà été réalisée. Par contre, la technologie de l'époque ne permettait pas d'atteindre les résultats actuels. Le but d'alors était d'écouter l'écho des météores sous forme sonore. Les fichiers audio étaient enregistrés sur des bandes magnétiques, technologie totalement obsolète de nos jours.

## 2 Acquisition des données

Un météoroïde (terme désignant un météore lorsqu'il est encore dans l'espace) pénètre dans la mésosphère, couche de l'atmosphère située à une centaine de kilomètres d'altitude, à une vitesse hypersonique. L'onde incidente est réfléchie par la traînée d'ionisation formée par le météore lors de sa chute dans l'atmosphère (cf. Figure 4). L'onde émise par le radar est également réfléchie par des satellites, avions et autres objets conducteurs.

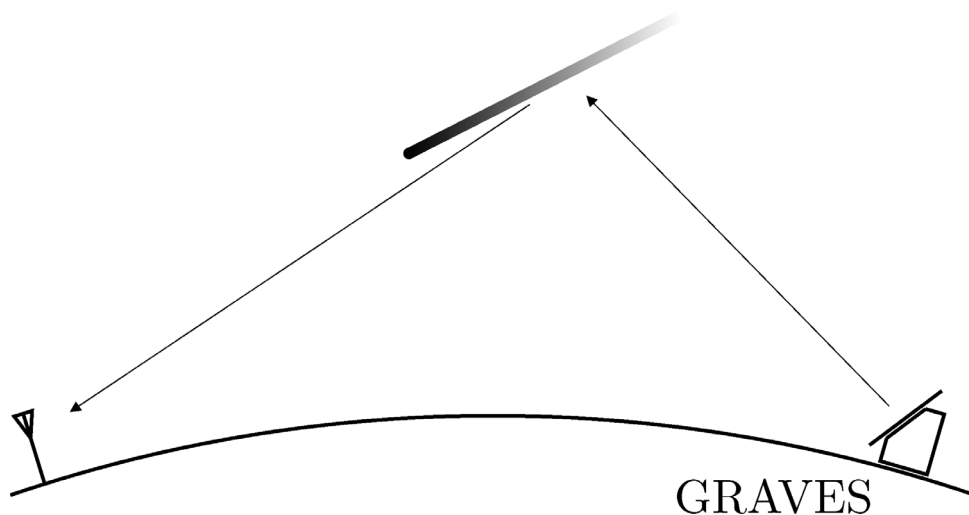


FIGURE 4 – L'onde n'est pas réfléchie par le météore lui-même, mais par sa traînée.

L'onde réfléchie est captée par le système de réception via l'antenne Ground-Plan  $3/4 - \lambda$ . Un préamplificateur et un filtre passe-bande ont été insérés pour offrir plus de sensibilité et de sélectivité (cf. Figure 5). Le signal est



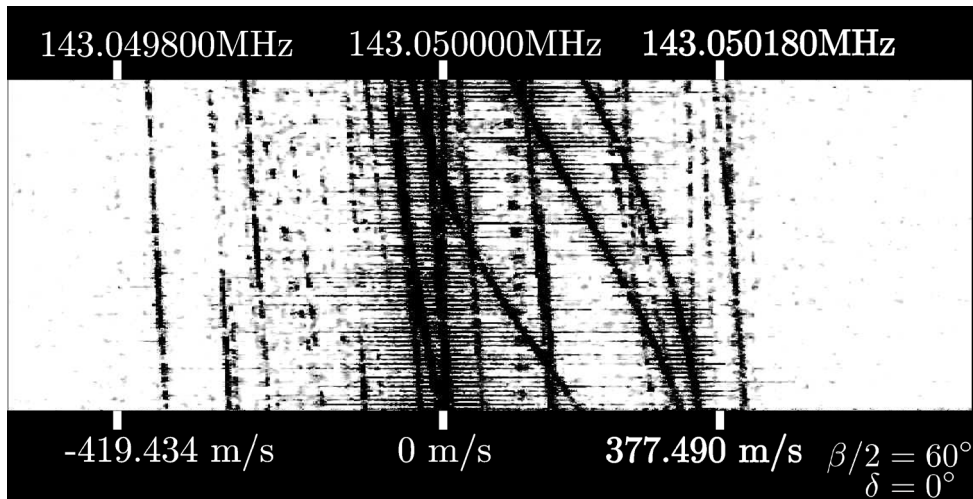


FIGURE 7 – Signature des avions, leurs décalages en fréquence est relativement faible.

Météores : Beaucoup de météores pénètrent dans l'atmosphère et une grande partie d'entre eux se consomment intégralement quasiment instantanément. Contrairement aux aéronefs, le météore présente de très fortes variations Doppler sur une très brève durée.

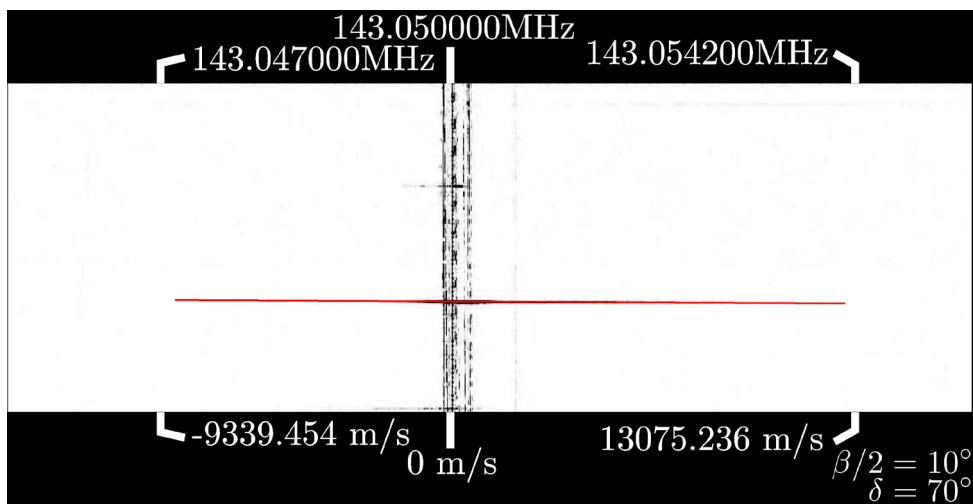
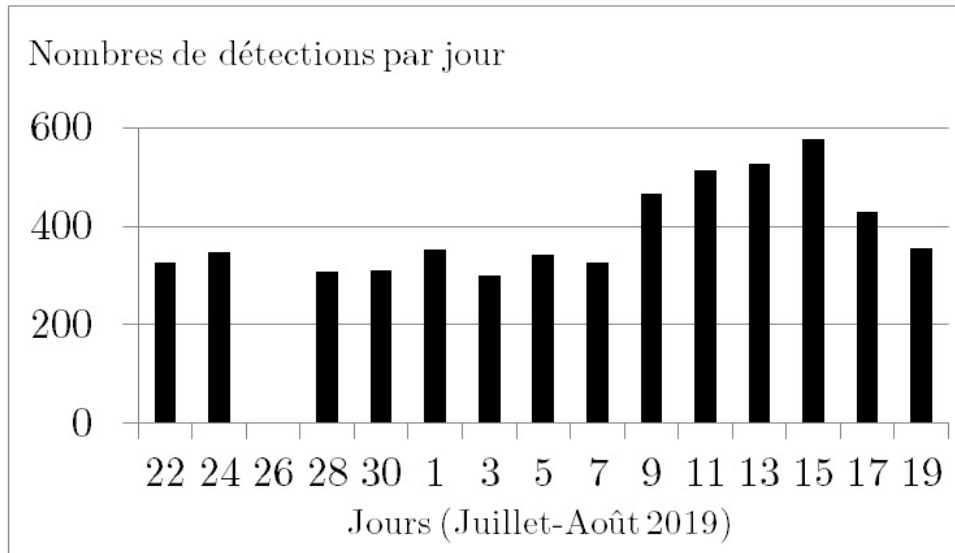


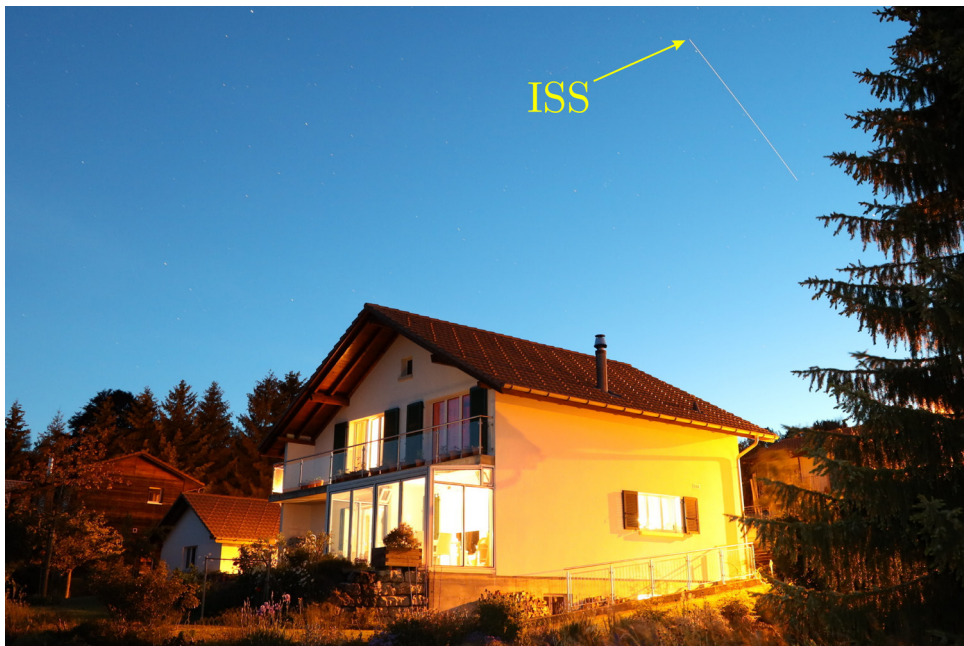
FIGURE 8 – Signature d'un météore, le décalage Doppler est bien plus important que pour celui d'un avion.

Pluies d'étoiles filantes : Il est intéressant de compter le nombre de météores détectés lors d'une période durant laquelle une pluie d'étoiles filantes est attendue, comme par exemple lors des Perséides ou lors des Aquarides (cf. Figure 9). Le nombre de détection de météores s'élève à plusieurs dizaines par heures en période de « pluies d'étoiles filantes », contre de l'ordre d'une dizaine par heure en période normale.



**FIGURE 9** – Nombre de météores détectés journalièrement durant les Perséides avec cette instrumentation. Le nombre de météores augmente lors du pic d'activité (11-15 août) à environ 30 détections par heure.

Satellites : La position et l'instant de passage de certains satellites comme par exemple l'ISS (Station Spatiale Internationale) sont des données accessibles au public. Il est possible d'affirmer avec certitude qu'il s'agit de satellites, car leur vitesse est par exemple d'environ 24'000 km/h, est plus élevée que des avions, mais bien plus faible que celle des météores.



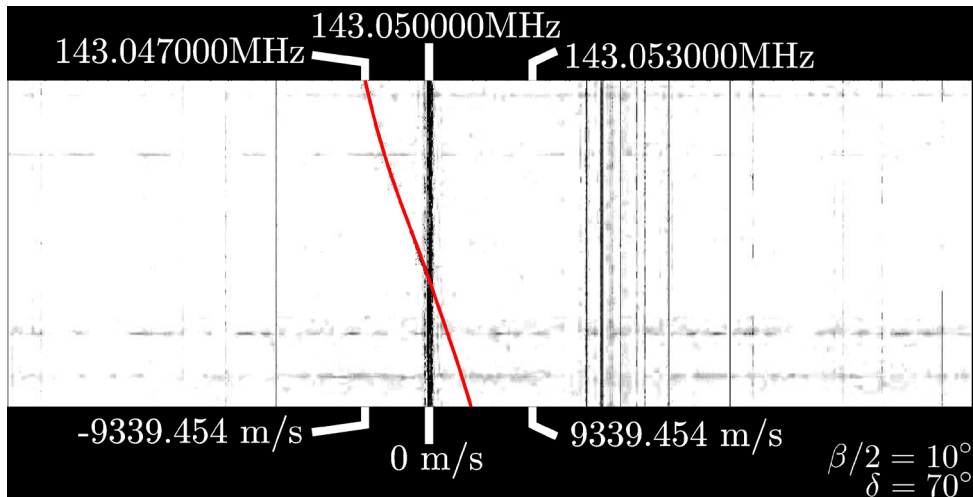


FIGURE 10 – Deux illustrations de l’ISS enregistrées simultanément : optiquement (photographie) et par détection radar bistatique.

## 4 Conclusions

Le système de détection basé sur le modèle du radar bistatique est opérationnel par tous les temps, de jour comme de nuit. La plausibilité des résultats a été vérifiée de différentes façons, comme la détection du passage de la Station Spatiale Internationale (ISS) ou les pluies d’étoiles filantes des Perséides.

L’installation de ce système relativement simple ne nécessite aucune, licence de radioamateur, ni d’autorisation particulière.

Pour approfondir les résultats, il serait possible d’opérer par triangulation sur plusieurs sites, permettant ainsi de quantifier raisonnablement la vitesse des objets détectés. Avis aux amateurs!

## 5 Remerciements

- Club de radioamateurs HB9XC section Pierre-Pertuis (USKA)
- Gymnase français de Bienne, Monsieur Philippe Drompt

## 6 Littérature

- <https://f6crp.pagesperso-orange.fr/ba/graves.htm>
- <http://www.astrosurf.com/luxorion/meteores-anomalies.htm>
- Olivier Pilloud (HB9CEM), 2018 - Le Radioamateur, Editions TECHNIP, ISBN 978-2-7108-1184-8
- [https://www.willemin.li/cedric/utiles/Detection\\_meteores\\_aeronefs\\_191022.pdf](https://www.willemin.li/cedric/utiles/Detection_meteores_aeronefs_191022.pdf)

## 7 Coordonnées

Cédric Willemin  
Chemin des Alouettes 6  
CH-2515 Prêles

cedric@willemin.li  
<https://www.willemin.li/cedric/>

# Conception et réalisation d'un cube de LED programmable par microcontrôleur

Lycée Denis-de-Rougemont, Neuchâtel

Tim Flückiger

[timflueckiger@outlook.com](mailto:timflueckiger@outlook.com)

## 1. INTRODUCTION

Le sujet de cet article est un projet qui a été mené lors de mon travail de maturité pour le Lycée Denis-de-Rougemont à Neuchâtel. Derrière le nom de ce projet, peut-être difficilement représentatif au premier abord, se cache un travail en électronique au résultat visuel.

L'électronique est un domaine de la physique à la fois vaste et passionnant. Toutefois, il n'est véritablement que peu connu par la plupart d'entre nous et effraie même parfois, puisque certaines de ses notions peuvent paraître abstraites, difficilement représentables, ou encore dangereuses. C'est de ce constat qu'est né l'idée de ce travail : donner un aspect visuel et plus perceptible à l'électronique. Pour cela, aucun composant ne s'y prête mieux que la diode électroluminescente, que nous connaissons tous sous l'acronyme de « LED ». Ainsi, mon projet s'est précisé : concevoir et fabriquer un cube de 216 LED (6x6x6) pouvant jouer des animations lumineuses, le tout programmé par un microcontrôleur. Je souhaitais accomplir personnellement l'entièreté de celui-ci : la conception et la soudure du cube, les calculs et schémas, le choix des composants, la réalisation du PCB, ainsi que la programmation du microcontrôleur.

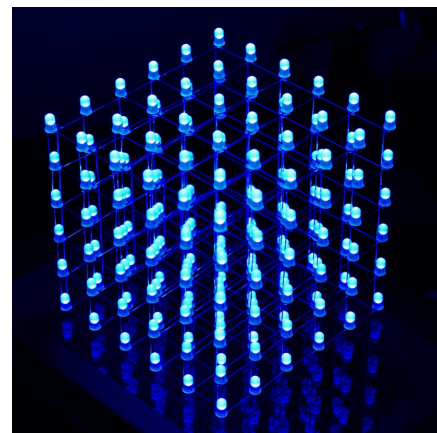


Figure 1: cube de LED allumé.

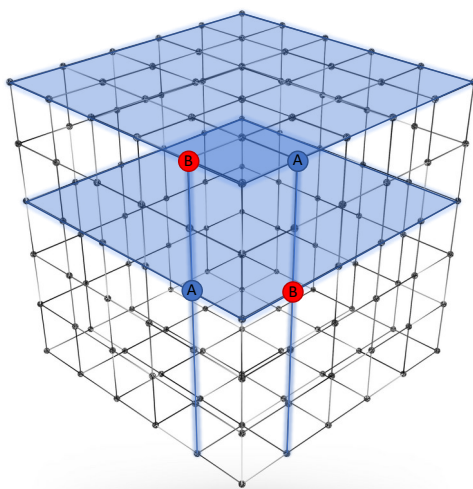


Figure 2: Modèle 3D du cube. L'allumage des deux LED A engendre l'allumage indésirable des deux LED B.

Le premier problème auquel j'ai fait face est la divergence entre le nombre de sorties d'un microcontrôleur standard (aux alentours de 20 sorties digitales) et celui qu'il en faut pour contrôler l'allumage de 216 LED. Pour pallier ce problème, j'ai construit le cube de façon à ce que toutes les LED d'un même étage aient leurs anodes en commun, et que toutes les LED d'une même colonne aient leurs cathodes en commun. En combinant l'état logique des étages et des colonnes, nous pouvons allumer chaque LED indépendamment. Une seconde difficulté intervient : l'allumage indésirable de certaines LED (illustré sur la figure ci-contre). La persistance rétinienne permet fort heureusement de la contourner.

## 2. PERSISTANCE RÉTINIENNE

La persistance rétinienne est un phénomène optique qui permet à l'œil de garder en mémoire une image pendant un court instant. Elle crée notamment l'illusion de mouvement lorsqu'on regarde une succession d'images à un rythme élevé. Le temps pendant lequel l'œil se souvient d'une image est, chez l'humain, d'environ 50 millisecondes. Calculons la fréquence :  $f = 1/T$ .  $T$  est la période, c'est-à-dire l'intervalle de temps pour qu'un phénomène périodique se répète, ici deux images successives.  $T = 50 \text{ ms} = 0.05 \text{ s} \rightarrow f = 1/0.05 = 20 \text{ Hz}$ . C'est la fréquence de « rafraîchissement » de l'œil humain.

Le problème d'allumage des LED est résolu en les allumant par alternance. Il en découle le premier principe de fonctionnement du cube : un seul étage sera allumé à la fois. Le cube possédant six étages, chaque LED se voit allumée qu'une fois sur six. Le rapport cyclique (ratio entre la durée à l'état haut et une période) vaut  $1/6 = 16.6\%$ . L'intensité lumineuse de la LED, étant définie par l'intensité moyenne du courant (DC) qui la traverse, est six fois plus faible que lorsqu'elle est allumée à plein temps. C'est pourquoi, je me suis tourné vers des LED particulièrement lumineuses. Le choix s'est fait pour des LED de 500 mcd (*millicandela*), pour un courant de 20 mA et ayant une tension de seuil ( $V_f$ ) de 3,3V. Finalement, nous avons 42 (36 colonnes et 6 étages) courants à gérer.

## 3. ARDUINO

Arduino est une marque commerciale produisant des cartes électroniques programmables en « licence libre » embarquant des microcontrôleurs. Elle a notamment été fondée dans le but de rendre la programmation de microcontrôleur plus accessible. Par ailleurs, elle encourage les acheteurs à comprendre leurs produits, à les modifier, voir à les améliorer. Le langage de programmation des cartes Arduino est basé sur le C++. Parmi les nombreuses cartes proposées, je me suis tourné vers un Arduino Micro, qui est la plus compacte d'entre elles. De plus, son format de fabrication lui permet d'être soudée sur un circuit électronique.

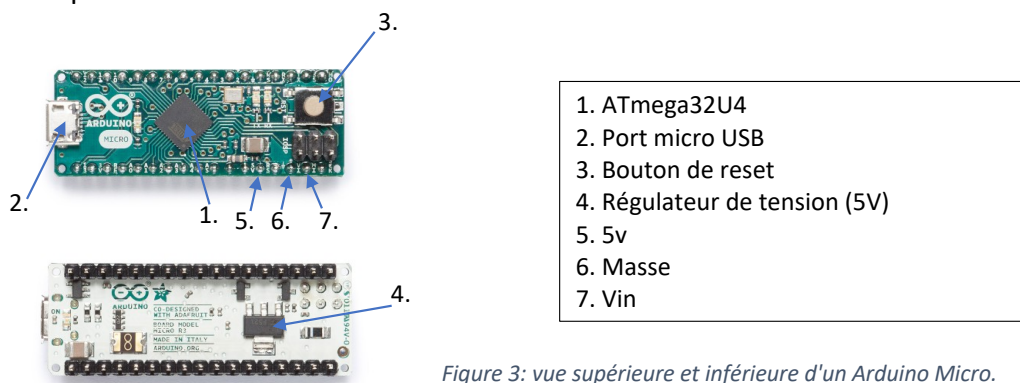


Figure 3: vue supérieure et inférieure d'un Arduino Micro.

Cette carte possède un port micro USB, employé pour le transfert des programmes de l'interface de programmation vers le microcontrôleur, la communication série avec un ordinateur, et l'alimentation par USB. L'Arduino Micro fonctionne en 5V et possède un régulateur de tension qui accepte des tensions d'entrées allant de 7V à 12V.

#### 4. GESTION DES ÉTAGES

L'intensité du courant total par étage est 0.72 A (36 x 0.020 A). Des composants de puissance sont nécessaires afin de commuter ces « forts » courants. Le transistor est un composant électronique actif à trois électrodes, de la famille des semi-conducteurs. Son rôle est de contrôler un courant ou une tension sur l'électrode de sortie par une électrode d'entrée. Les transistors peuvent être utilisés en commutation, ou en amplification. Nous allons les utiliser en commutation en tant qu'interrupteur commandable. Les deux types de transistor les plus utilisés sont les transistors à effet de champ (MOSFET) et les transistors bipolaires. Pour ce projet, ce sont ces derniers qui ont été choisis.

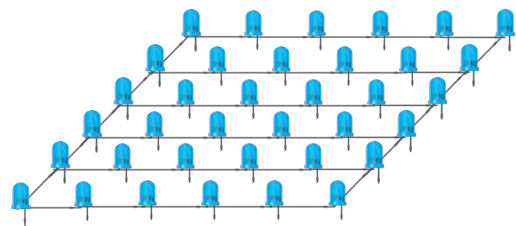


Figure 4: représentation d'un étage à anode commune.

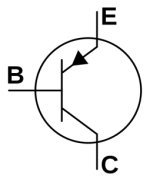


Figure 5: symbole du transistor bipolaire PNP.

Le transistor bipolaire possède trois broches (Figure 5) : la base (B), le collecteur (C), et l'émetteur (E). La base est la broche de commande, qui contrôle le passage du courant entre le collecteur et l'émetteur. Les transistors bipolaires utilisés sont de technologie PNP (l'autre type existant est le transistor NPN). Deux régimes de fonctionnement sont attribués au transistor bipolaire. On emploie le régime de saturation si l'on souhaite que le transistor ne puisse prendre que deux états : bloqué ou passant. Lorsque le transistor est dans un état intermédiaire, le régime est linéaire. Le courant de sortie (noté  $I_C$ ) est proportionnel (en théorie en tous-cas) au courant circulant dans la base (noté  $I_B$ ) du transistor :  $I_C = \beta \cdot I_B$ , où  $\beta$  est le facteur d'amplification (appelé aussi « gain » et parfois noté  $H_{FE}$ ).

Les transistors utilisés pour commuter les courants traversant les étages sont employés en régime de saturation. L'émetteur est relié à la borne positive de l'alimentation. Le collecteur est relié à l'anode commune d'un des six étages. La base du transistor est contrôlée par un second transistor NPN, dont la base est reliée à un pin du microcontrôleur. Le schéma ci-contre représente la gestion d'un étage. En utilisant les lois de bases de l'électricité, nous pouvons calculer les valeurs des résistances  $R_1$  et  $R_2$ . Celles-ci dépendent directement des transistors utilisés (gain et tension base-émetteur).

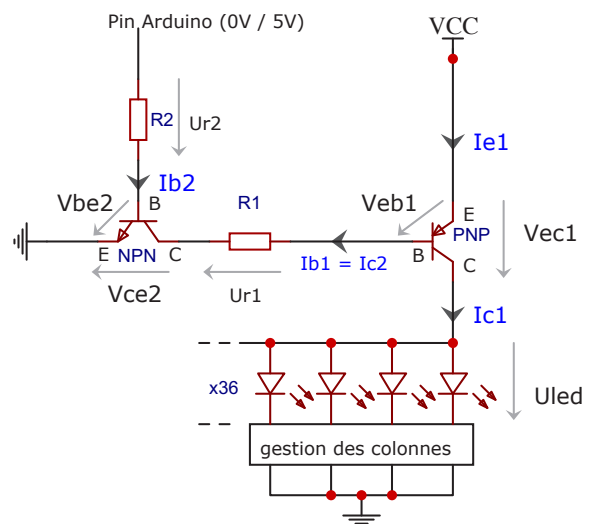


Figure 6: schéma du circuit gérant le courant d'un étage du cube. Toutes les grandeurs représentées sur le schéma se référant au transistor PNP portent l'indice 1, et celles se référant au NPN l'indice 2.

## 5. GESTION DES COLONNES

La gestion des courants traversant les différentes colonnes du cube est opérée par une série de circuits intégrés qui lui sont dédiés : des registres à décalages. Ils permettent la multiplication du nombre de sorties du microcontrôleur. Ce dernier ne disposant que d'une vingtaine de sorties digitales, il ne peut pas contrôler directement les 36 courants circulants dans les colonnes du cube.

Les registres à décalages sont formés de bascules reliées les unes aux autres et commandées par un signal d'horloge commun. Lors d'une période d'horloge, le circuit lit l'état logique présent en entrée et le décale à une sortie, qui elle-même décale son état à la sortie suivante, et ainsi de suite. Nous pouvons alors contrôler l'état de chacune des sorties en les décalant un par un, à chaque signal d'horloge. Le plus gros avantage de ces circuits est la possibilité de les mettre en chaîne afin de contrôler un grand nombre de sorties, en utilisant seulement trois sorties digitales d'un microcontrôleur.

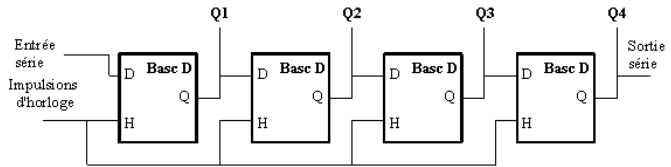


Figure 7: schéma interne d'un registre à décalage.

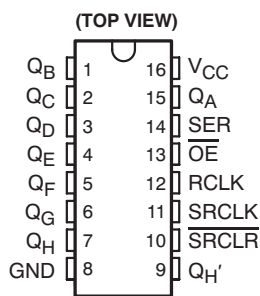


Figure 8: représentation d'un registre à décalage.

QA à QH sont les huit sorties digitales qui possèdent des mémoires internes, leur permettant de conserver leurs états logiques. Les trois pins nécessaires à l'utilisation d'un registre sont : SER, SRCLK, RCLK. Le pin SER (*Serial*) est l'entrée série du registre, c'est par celui-ci que le circuit reçoit les données provenant du microcontrôleur. Le pin SRCLK (*Shift Register Clock*) est l'entrée d'horloge du registre à décalage. Le pin RCLK (*Register Clock*) est l'entrée d'horloge du registre mémoire. Celui-ci permet la duplication des informations contenues dans le registre à décalages sur les huit sorties.

Lorsque le pin SRCLK passe de l'état bas à l'état haut (le terme exact est « contrôle par front montant d'horloge »), l'état du pin SER est transmis au premier emplacement du registre à décalage, et chaque état du registre est décalé. C'est seulement lorsque RCLK est mis à l'état haut, que les états contenus dans le registre sont transmis aux huit sorties. QH' permet la mise en cascade de plusieurs registres. Lorsque le dernier bit du registre est décalé, il est transmis sur ce pin, qui est relié à l'entrée série du registre suivant.

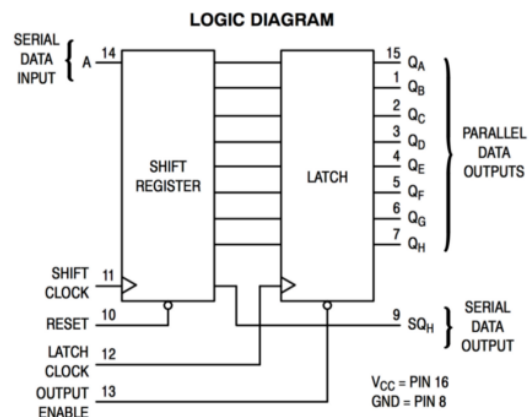


Figure 9: diagramme logique de fonctionnement du registre à décalage 74HC595. « LATCH CLOCK » correspond au pin RCLK.

Parmi les milliers de référence existantes, le circuit intégré choisi est le TLC5916. Ce circuit comprend un registre à décalage de type « SINK » et fournit du courant constant sur ses sorties, qui est défini par une seule résistance externe. SDI est l'entrée série, CLK est l'horloge du registre à décalage, LE : l'horloge du registre mémoire, SDO : la sortie série (afin de cascader des circuits), le pin R-EXT est relié à la masse via une résistance, qui définit le courant constant des huit sorties, et VDD l'alimentation du circuit.

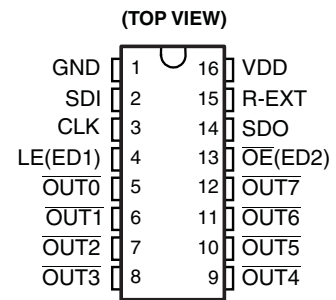


Figure 10: représentation du TLC5916IN en boîtier DIP-16.

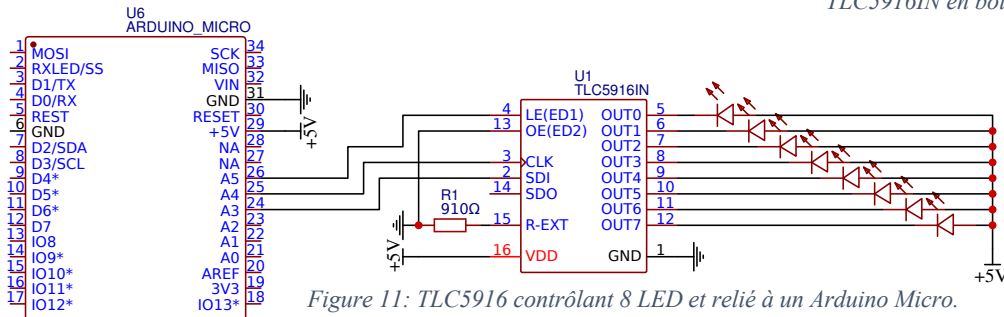


Figure 11: TLC5916 contrôlant 8 LED et relié à un Arduino Micro.

Chaque circuit intégré possède huit sorties digitales. Puisqu'on a besoin d'en contrôler 36, il faut cinq TLC5915IN. Ceux-ci seront mis en chaîne. Le pin SDO du premier sera relié au pin SDI du deuxième, et ainsi de suite. Les pins CLK, et LE (les deux horloges) sont communs à tous les circuits. L'ensemble du circuit est alimenté en courant continu 7,5V.

La construction du cube en lui-même constitue une importante partie pratique. Celle-ci débute par la mise en place d'un gabarit de soudure en bois qui maintiendra le cube. Il est fabriqué à partir d'une planche de bois auquel 36 trous sont percés, dont le diamètre concorde avec celui des LED. Il faut souder les six étages de 36 LED séparément. Puis, il faut assembler les étages en les soudant les uns sur les autres. Cette dernière étape s'est révélée être longue et fastidieuse. Le circuit électronique est un PCB artisanal permettant un encombrement réduit.

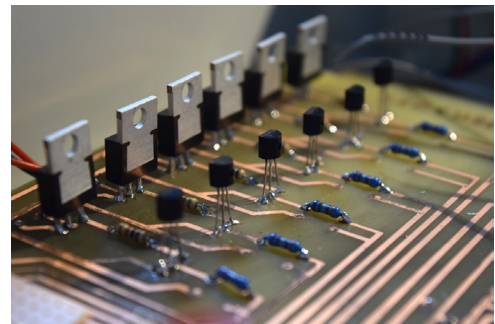


Figure 12: PCB (circuit imprimé) réalisé artisanalement.

## 6. PROGRAMMATION DU MICROCONTRÔLEUR

Les six étages et les circuits intégrés sont commandés par des sorties digitales de l'Arduino Micro. Ci-dessous un code qui allume une LED aléatoirement à intervalle régulier est commenté. Il faut tout d'abord déclarer et initialiser les variables. *dataPin* est le numéro du pin de donnée, *latchPin* celui du registre mémoire, et *clockPin* celui du signal d'horloge. Les variables stockant les numéros correspondants aux étages sont : *lvl1*, *lvl2*, ... *lvl5*.

```
#define nombreDeRegistres 5 // définition du nombre de registres
#define nombreDePins nombreDeRegistres * 8-4 // nombre total de pins des registres
boolean valeur[nombreDePins]; // tableau de booleens, de taille égale au nombre de pins.
```

```

void setup(){                                     // fonction setup qui ne s'effectue qu'une seule fois au démarrage
  pinMode(dataPin, OUTPUT);
  pinMode(clockPin, OUTPUT);
  pinMode(latchPin, OUTPUT);
  pinMode(lvl0,OUTPUT);
  ...
  pinMode(lvl5,OUTPUT);
  effaceRegistres();                               // réinitialisation des valeurs
  envoie();                                        // envoi des données
}

void loop(){                                     // fonction loop qui s'effectue en boucle à « l'infini »
  lvIOFF();                                       // extinction de tous les étages
  digitalWrite(random(7,13),1);                 // allumage aléatoire d'un étage
  effaceRegistres();                             // extinction de toutes les colonnes
  setVal(random(35),1);                          // une valeur du tableau "valeur" est mise à 1
  envoie();                                       // envoi des données
  delay(200);                                     // délai de 200 millisecondes
}

void envoie(){                                   // envoi des valeurs contenues dans le tableau "valeur" aux registres
  digitalWrite(latchPin, LOW);                  // tant que latchPin est à 0, les modifications ne seront
                                                // pas affectées aux sorties des registres (*)
  for(int i = nombreDePins - 1; i >= 0; i--){ // boucle pour l'envoi d'une valeur à chaque pin des registres
    digitalWrite(clockPin, LOW);               // clockPin doit être à 0 pour permettre plus tard le front montant (**)
    digitalWrite(dataPin, valeur[i]);          // envoie la valeur sur le pin de donnée
    digitalWrite(clockPin, HIGH);              // décalage d'un pin (**)
  }
  digitalWrite(latchPin, HIGH);                 // applique aux sorties toutes les valeurs (front montant) (*)
}

void setVal(int i, int valeurPin){               // enregistre une valeur dans le tableau "valeur"
  valeur[i] = valeurPin;
}

void effaceRegistres(){                         // réinitialisation des valeurs
  for(int i = nombreDePins - 1; i >= 0; i--){ // chaque valeur du tableur est mise à zéro
    valeur[i] = 0;
  }
}

void lvIOFF(){                                  // éteint tous les étages
  digitalWrite(lvl0,0);
  ...
  digitalWrite(lvl5,0);
}

```

définition du mode d'utilisation des pins de l'Arduino → sorties digitales

Allumage d'une colonne

## 7. CONCLUSION

Quelques autres animations plus complexes (vague sinusoïdale, ...) ont été programmées, mais les possibilités restent infinies. La portée de ce projet a été bien plus importante que ce que j'imaginai. Ayant au départ que très peu de notions d'électronique, il a été difficile de m'y retrouver parmi les milliers de références existantes pour un composant donné, notamment les transistors et les registres à décalages. C'est pourquoi, dans un premier temps, un important travail de recherche et d'auto-apprentissage des bases de l'électronique a été nécessaire. Finalement, ce travail a été très enrichissant et plus que bénéfique, tout particulièrement pour la suite de mes études, ayant commencé un Bachelor en microtechnique à l'EPFL.

## 8. ANNEXE

