

Toupie électronique

Il affiche du texte ... tant qu'il tourne

Michael Bragard

Alignez et allumez quelques LED sur un plan. Mettez le tout en rotation et vous découvrirez une série de jolis anneaux concentriques. Plus excitant : ajoutez un microcontrôleur et moyennant un peu d'astuce vous pourrez afficher un motif, du texte ou un nombre. Reste la question du séquençement et de la synchronisation. La réalisation présentée ici innove dans la mesure où le signal de synchronisation dérive du champ magnétique terrestre capté par le microprocesseur. Dès lors les applications s'étendent aux compte-tours et aux boussoles.

Petit saut dans le passé : une leçon de physique en classe. Le bout de fil conducteur se balance paresseusement entre les pôles d'un aimant en forme de fer à cheval. Le prof, sérieux comme un pape, lance un courant continu dans le fil conducteur. Surprise et émerveillement - chez moi en tout cas - le fil conducteur se met à vivre et prend une position décalée contraire aux lois de l'équilibre. Il est soumis à l'action d'une force mystérieuse. « Vous avez vu ? Le fil a changé de place sous l'effet de la force de Laplace » indique le prof avec un demi-sourire. Une pause. Il modifie le montage. Il débranche le générateur de courant et le remplace par un ampèremètre. Il se saisit du fil conducteur et lui imprime un mouvement latéral, d'un pôle à l'autre. Nouvelle surprise : l'ampèremètre posé sur la table voit son aiguille trembler au rythme du fil. « Vous voyez cette magie *hindoue* : c'est le courant induit ». Puis redevenu sérieux : « Ce que je viens de vous montrer est le fondement de l'électromagnétisme et la preuve de sa réversibilité ». Nouvelle pause, remplacement du fil conducteur par un fil de cuivre bobiné et remplacement de l'ampèremètre par un oscilloscope. Le prof fait alors pivoter le plus rapidement possible la bobine qu'il s'efforce de mainte-

nir entre les pôles de l'aimant en fer à cheval. Il s'ensuit une onde de tension électrique sur l'écran de l'oscilloscope et le prof de conclure : « voici une sinusoïde, suivant le schéma universel de la production d'électricité industrielle : une surface bobinée mise en rotation dans un champ magnétique ».

Et trente années plus tard, aujourd'hui bien à sa place sur ma table, mon bel afficheur gyroscopique à LED, une toupie électronique. Par-dessous, un aimant de $5,977 \times 10^{24}$ kg - notre bonne vieille Terre. Rien de neuf sous le soleil car mon montage comporte une petite bobine en fil de cuivre qui intercepte les lignes du champ magnétique terrestre, dès lors en cas de mouvement relatif s'y développe une tension de même nature que celle apparue sur l'écran de l'oscilloscope. Les ordres de grandeurs sont certes différents : d'une part seulement $20 \mu\text{T}$ dans nos régions d'Europe pour le champ magnétique terrestre, et d'autre part une bobine de cuivre miniaturisée qui comporte néanmoins des centaines de spires, ce qui tend à compenser son manque de surface. Miniaturisation oblige puisque, rappelons-le, la bobine doit prendre place sur le carrousel. Pour éviter d'avoir à se lancer dans la fabrication d'un bobinage, on a préféré utiliser un

composant bobiné bien disponible, qui une fois amené en rotation dans le champ magnétique terrestre délivre tout de même une tension alternative exploitable, de l'ordre de $50 \mu\text{V}$.

L'idée

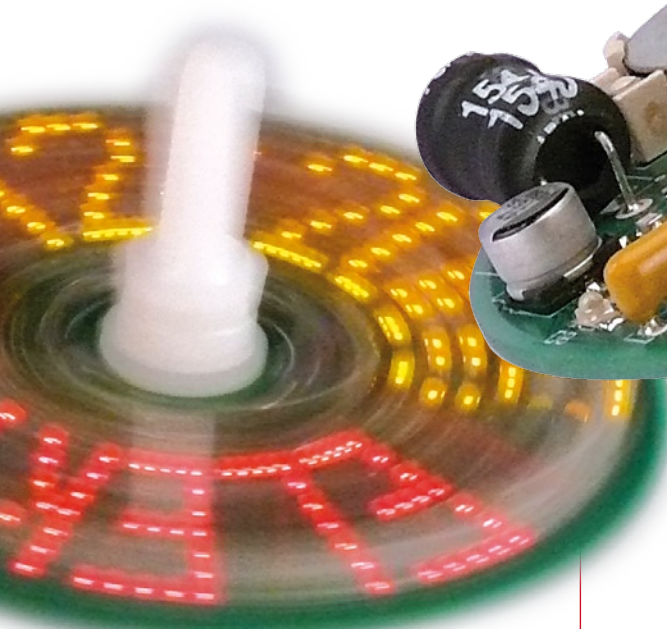
Bien que brillante sous tous rapports, elle n'est pas neuve. Il n'y a qu'à se reporter à notre article intitulé « Héli-message défilant » publié dans *Elektor* n°342 en décembre 2006. Huit LED bleues de forte puissance permettaient d'afficher un texte tel "ELEKTOR", bien visible et de loin [1].

Le principe de fonctionnement est basé sur le phénomène de la persistance rétinienne à l'instar des anciens tubes TV, qu'un fin pinceau d'électrons balayait rapidement de l'intérieur. Lorsque le clignotement dépasse une certaine vitesse, il n'est plus perçu. On obtient donc l'illusion que rien ne bouge, que tout est stable.

Tout l'intérêt du nouveau montage présenté aujourd'hui ici réside dans deux perfectionnements qui simplifient la mise en œuvre.

Premièrement, le fait d'obtenir la synchronisation dans le rotor lui-même via référencement par rapport au champ magnétique terrestre est un bel avan-





Ceci est à comparer avec le montage de l'année 2006 qui comportait un transformateur rotatif dans le stator en forme de pylône, ceci pour arriver à acheminer sans casse ni frottement le courant d'alimentation vers le rotor. On obtient donc une belle simplification mais cela se paie quelque part puisqu'en contrepartie le montage fonctionnera uniquement dans des environnements où règne un champ magnétique homogène. La surface de la terre répond grosso-modo à cette

Le schéma de la toupie électronique consiste essentiellement en un microcontrôleur ATmega8 de Atmel flanqué d'une circuiterie analogique chargée d'extraire le signal de synchronisation. S1.2 permet de choisir le sens de rotation.



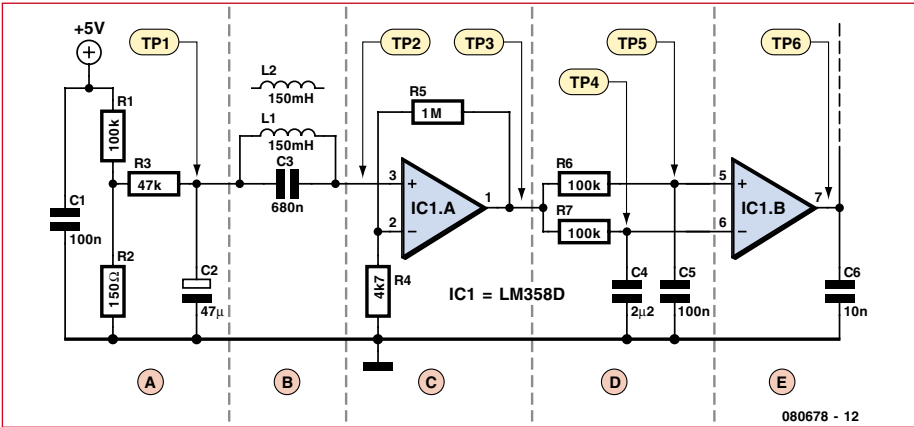


Figure 2. La circuiterie analogique comporte cinq sous-ensembles repérés A à E. On a relevé les signaux présents sur TP1 à TP6 qui correspondent à ceux représentés sur les figures 3 à 5.

les calorimètres, et bien évidemment certains individus malins - qui lisent Elektor – munis d'aimants, histoire de voir ce que cela donne.

Schéma

Il est représenté en **Figure 1** et consiste en un microcontrôleur ATmega8 de Atmel épaulé par un circuit analogique pour l'extraction du signal de synchronisation à partir du champ magnétique terrestre. Le microcontrôleur gère les 16 LED en direct, miniaturisées en montage SMD et limitées en courant via les réseaux de résistances R11 et R12 représentés sur le schéma de façon condensée, pour une meilleure lisibilité. Rien d'autre à signaler si ce n'est le réseau R8/C8 pour le Reset et l'embase K3 pour la liaison avec le

condition, mais ce serait oublier les habituelles perturbations du champ magnétique terrestre comme les moteurs électriques, les haut-parleurs,

LISTAGE

Squelette de l'application construite sur 3 sources d'interruption distinctes qui interagissent au moyen de variables partagées.

```
/* @brief Interruption INTO
 * @author Michael Bragard
 * @date 2008/09/24
 */
ISR (INT0_vect)
{
    // flanc montant détecté : on met à jour la variable qui mesure la période de rotation en ms
    current_round_time = current_round_time_zaehl;

    // ce flanc montant intervient-il à plus de 80% du précédent affichage ?
    if (current_column > (column_number*8)/10) {
        // oui, c'est bon et on revient à la première colonne via initialisation Timer1
        // c'est ici que l'on calcule la nouvelle période "colonne" qui gère Timer1
        // RAZ de la variable "colonne"
        timer1_startvalue = 1000/column_number*current_round_time;
        current_column = 0;
    }
    #ifndef ROTATION_COUNTER
        if (game_status == GAME_ONGOING)
            // mode compte-tour : ça ne coûte rien de comptabiliser le nombre de tours
            number_of_turns++;
    #endif // ROTATION_COUNTER
}

// RAZ de la variable temporaire après traitement
// car celle-ci sera incrémentée par la base de temps TIMER0
current_round_time_zaehl = 0;

// Donc filtrage inhérent via fenêtrage. On ignore les impulsions parasites trop en avance

/* @brief Interruption TIMER0 qui est la
```

```
base de temps de 1 ms, utilisée par INTO
 * @author Michael Bragard
 * @date 2008/09/24
 */
ISR (TIMER0_OVF_vect)
{
    // cette interruption intervient toutes les ms à la suite de quoi on recharge son compteur
    TCNT0 = 255 - 125;

    // on incremente le compteur de période avec protection anti-dépassement arithmétique
    if (current_round_time_zaehl < 255) {
        current_round_time_zaehl++;
    } else {
        current_round_time_zaehl = 255;
    }
}

/* @brief Interruption TIMER1 alimenté par l'horloge 1 MHz
 * @author Michael Bragard
 * @date 2008/09/24
 */
ISR (TIMER1_OVF_vect)
{
    // ici on définit la période d'interruption variable qui est la période "colonne"
    // on se sert à cet effet du calcul effectué dans INTO
    // noter l'arithmétique 16 bits car cette fois-ci on charge un compteur 16 bits
    TCNT1H = 255 - (timer1_startvalue >> 8);
    TCNT1L = 255 - (timer1_startvalue & 255);

    // on passe à la colonne suivante, mais vérifions qu'on n'est pas au-delà de la dernière
    if (current_column < column_number) {
        // c'est bon, on est toujours dans la fenêtre
        current_column++;
    } else {
        // zut, on est déjà trop loin; on recule
        current_column--;
    }
}
```

programmeur-debugger. La partie analogique bénéficie d'un découplage d'alimentation sous la forme de C1. On note une alimentation réduite à sa plus simple expression via les deux piles CR2032 en série qui définissent un voltage à l'état neuf pouvant aller jusqu'à 6 V prudemment rabotés aux alentours de 5,1 V via R10/D17. Le microcontrôleur exploite au mieux la tension des piles. Il s'arrête lorsque la tension totale tombe en-dessous de 3 V. Les condensateurs C7, C9 et C10 s'efforcent d'abaisser l'impédance dynamique des piles. On remarque que C9 et C10 sont stratégiquement dédoublés et placés sur le circuit imprimé pour respecter l'équilibrage mécanique.

La partie analogique (**Figure 2**) est relativement simple. Une faible tension de polarisation de 7,5 mV est définie à l'entrée par le diviseur R1/R2 puis énergiquement filtrée par C2 (TP1). La bobine de captation L1 ajoute son propre signal qui n'est autre que la tension induite par la rotation dans le champ magnétique terrestre (TP2) (**Figure 3**). Le condensateur C3 limite la bande passante en absorbant les signaux électromagnétiques parasites. Vient alors l'amplificateur opérationnel IC1A qui de par son réseau de rétroaction négative R4/R5 rehausse l'amplitude des signaux dans un rapport 200, y compris la tension continue. Partant donc d'un point de travail de 7,5 mV sur lequel se superpose le signal alternatif utile d'environ $50\text{ }\mu\text{V}$ au niveau de la bobine de captation (TP2), on obtient sur la sortie de IC1A un point de travail de 1,5 V sur lequel se superpose le signal utile alternatif de 10 mV (**Figure 4**). Si le mouvement de rotation est bien uniforme et dans le plan horizontal, le signal utile alternatif a toutes les chances de ressembler à une sinusoïde. C'est cette fragilité

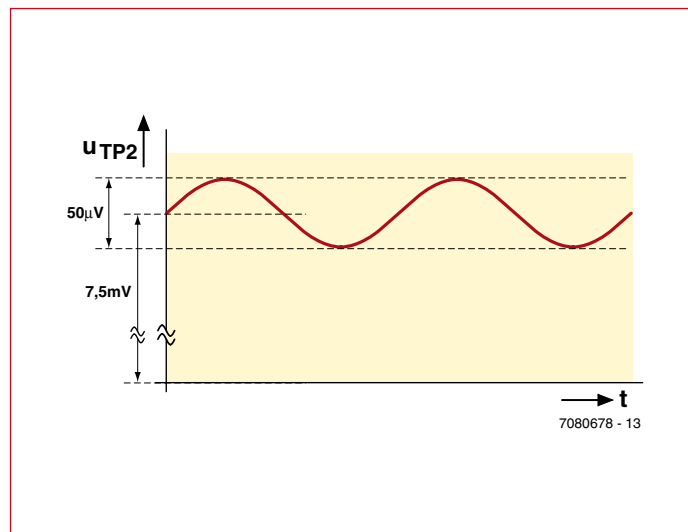


Figure 3. Voilà le signal présent aux bornes de L1 sur lequel tout est basé : pas plus de $50\text{ }\mu\text{V}$.

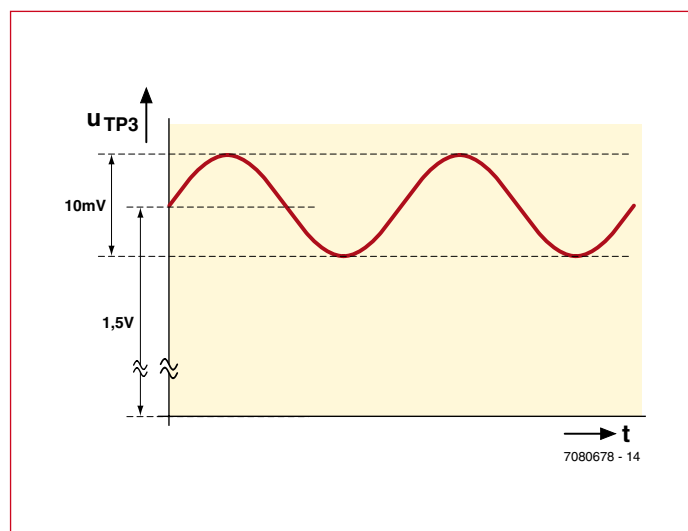


Figure 4. Voici le même, amplifié par IC1A.

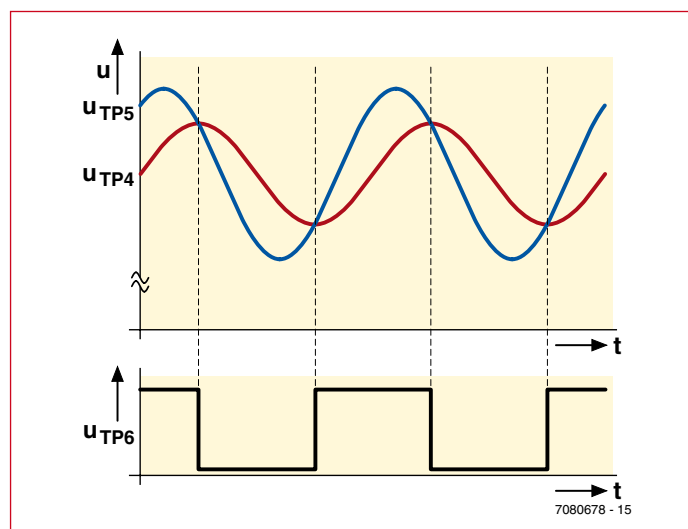


Figure 5. La comparaison des deux signaux filtrés de façon différente génère une impulsion qui est envoyé vers le microcontrôleur.

sinusoïde que IC1B se charge d'analyser, notamment son passage par zéro. L'astuce réside dans le réseau R7/C4 qui se comporte comme un moyenneur d'auto-centrage (TP4) et le réseau R6/C5 qui se comporte comme réjecteur de parasites impulsifs (TP5). IC1B est monté sans rétroaction et fonctionne dès lors en boucle ouverte, en comparateur. Sa sortie est à « un » lorsque la sinusoïde est dans sa partie haute, et à « zéro » lorsque la sinusoïde est dans sa partie basse. Les plus fûts verront sur la **Figure 5** que c'est un peu plus compliqué que cela étant donné les retards (déphasages) que les deux réseaux induisent. Les quelques éventuels parasites de commutation qui pourraient subsister autour de la transition un/zéro et zéro/un sont crûment absorbés par C6, monté sans procés à la sortie de IC1B qui aboutit sur l'entrée d'interruption externe (INT0) du microcontrôleur. Le choix d'un LM358 pour IC1 s'explique au niveau de IC1A qui doit traiter à son entrée une tension très proche de son alimentation négative (la masse). On remarque que L2 n'est pas connectée. Elle est là uniquement pour l'équilibrage mécanique du rotor.

Assemblage

L'assemblage du rotor représenté en **Figure 6** et **Figure 7** se simplifie notablement si l'on opte pour le kit disponible sur le site Internet d'Elektor, tous les composants SMD s'y trouvant déjà installés et soudés. Ne reste plus qu'à installer et souder les quelques composants à fils. En jouant quelque peu sur le positionnement des composants à fil, on arrive à parfaitement équilibrer le rotor. Si par contre on opte pour un circuit nu il faudra installer et souder tous les composants SMD, et gare aux erreurs notamment la polarité des LED au format SMD que l'on devra tester une à une au

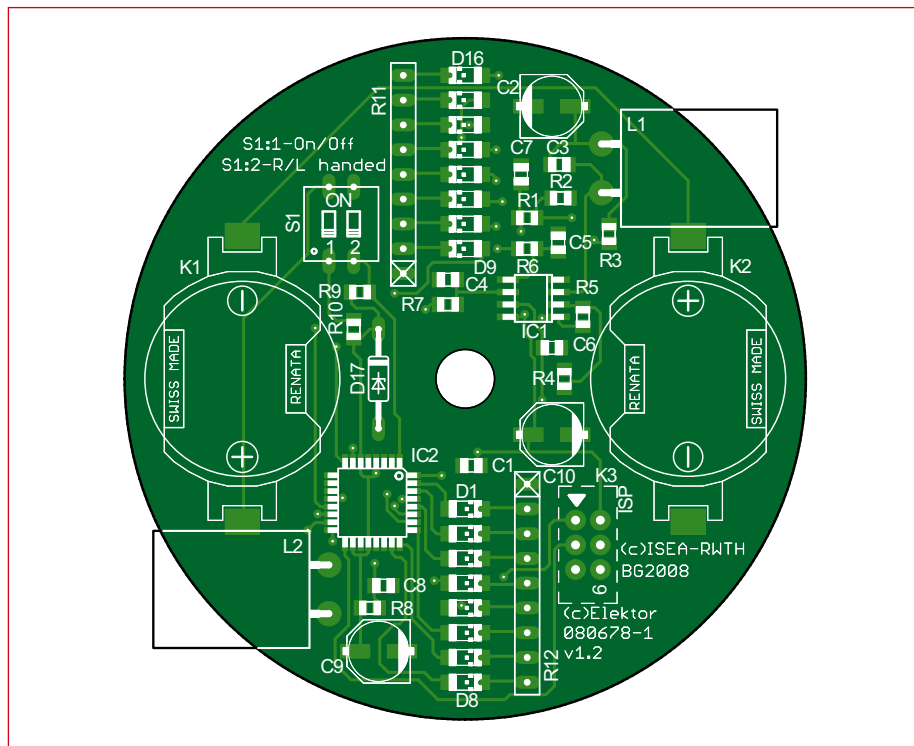


Figure 6. La platine circulaire de la toupie électronique est disponible partiellement montée, déjà munie des composants SMD.

moyen d'une pile de 9 V et d'une résistance de 1 k Ω . Veiller à ne pas inverser les condensateurs électrolytiques non plus. Pour l'axe de rotation, une vis et deux écrous M6 en nylon conviennent parfaitement. On laisse la vis un

peu longue sur le bas, qui constitue dès lors le point d'appui de la toupie. A l'aide d'un cutter, on affûte ce point d'appui de façon à diminuer les frottements pour qu'une fois lancé, l'astucieuse toupie ainsi constituée tienne

debout le plus longtemps possible.

Logiciel

Comme d'habitude, nous nous sommes reposés sur l'environnement de développement AVR-Studio [2] disponible en téléchargement libre sur site de Atmel. S'agissant d'une petite application écrite en langage C, c'est le compilateur GCC qui a été mis à contribution. Comme à l'accoutumée, le code compilé est téléchargé dans le microcontrôleur via l'embase ISP repérée K3. Le Listage donné en annexe décrit le squelette de l'application qui est (vicieusement diront certains) construite sur trois sources d'interruption distinctes qui interagissent au moyen de variables partagées. Remarque en passant, on peut se demander ce qui se passe au cas où survient une interruption au moment où le processeur est déjà occupé à servir une autre interruption.

L'organisation du code laisse apparaître le rôle prédominant de l'interruption INT0, en relation avec le signal de commutation Nord/Sud. Une fois l'initialisation des périphériques du microcontrôleur effectuée, à chaque flanc montant du signal présent sur la broche INT0 s'exécute la routine d'INT0 qui met à jour la variable `akt_rundenzeit_zaehl` qui reflète la période en millisecondes. Si les rotations successives sont du même ordre de grandeur et en légère perte de vitesse, cela veut dire que la toupie a été lancée et tourne librement. Si l'on détecte une accélération, ce n'est peut-être pas la peine de poursuivre l'affichage car cela veut dire que la toupie est manipulée (on le lance). Bien évidemment pour pouvoir disposer d'une base de temps en millisecondes nous utilisons le Timer0 matériel qui se signale à chaque milliseconde via l'interruption Timer0. Si entre deux interruptions INT0 on a enregistré 156 interruptions Timer0, cela veut dire que la période de rotation est de 156 ms, dès lors on positionne la variable `akt_rundenzeit_zaehl` à la valeur 156. Il faut ensuite gérer l'affichage proprement dit qui est organisé en colonnes. Cela se fait à l'aide de Timer1, de haute précision car alimenté par l'horloge de 1 MHz. La période d'interruption que définit Timer1, une fois préchargé, est soigneusement calculée à chaque tour en fonction de la variable `akt_rundenzeit_zaehl` définie par INT0, et du nombre de colonnes virtuelles que l'on affiche. A chaque occurrence de l'interruption Timer1,

Liste des composants

Résistances (CMS 0805, 1%) :

R1, R6, R7 = 100 k Ω
R2 = 150 Ω
R3, R9 = 47 k Ω
R4 = 4k Ω 7
R5 = 1 M Ω
R8 = 10 k Ω
R10 = 22 k Ω
R11, R12 = 8x 330 Ω , réseau de résistances masse commune (SIL09)

Condensateurs :

C1, C5, C7 = 100 nF (CMS 0805)
C2, C9, C10 = 47 μ F/16 V (CMS Electrolytique)
C3 = 680 nF (CMS 0805)
C4 = 2,2 μ F/16 V (CMS 0805)
C6 = 10 nF (CMS 0805)
C8 = 47 pF (CMS 0805 NPO)

Inductances :

L1, L2 = 150 mH, Q_{min} = 50, RM5 (12x16 mm), par exemple Fastron 11P-154J-50

Semiconducteurs :

D1 à D8 = LED rouge 628 nm, CMS 1206 avec lentille intégrée Kingbright

KPTD-3216SURC
D9 à D16 = LED jaune 588 nm, CMS 1206 avec lentille intégrée Kingbright
KPTD-3216SYC
D17 = Z-Diode 5,1 V/1,3 W (ZD 5,1, BZV85-C5V1)
IC1 = LM358 (CMS SO8)
IC2 = ATmega8-16AU (Atmel), CMS TQFP-32

Divers :

S1 = interrupteur DIP 2 poles (MULTICOMP MCDS02 DIL04)
K1, K2 = porte-piles CR2032 CMS (Renata SMTU-2032-1-LF, SMTU-2032-1)
K3 = embase à 2 rangées de 6 contacts au pas de 2,54 mm (Tyco-AMP 1241050-3 AMP)
Vis nylon ou polyamide M6x20, écrous et rondelles
BAT1, BAT2 = Piles-boutons au Lithium type CR2032
Platine PDF 080678-1 en téléchargement gratuit sur www.elektor.fr

Option :

Platine semi-montée équipée des composants CMS ref. 080678-71, voir boutique en ligne Elektor

il est nécessaire d'écrire un nouveau motif sur la petite barre de LED. Le code source au grand complet est disponible en téléchargement libre sur le site Elektor. On remarque tout en haut du code source une section qui contient le texte à afficher, texte que l'on peut modifier et qui après compilation fournit le nouveau code à télécharger via le connecteur ISP. C'est de cette façon que l'on définit, au labo, le texte à afficher. Noter qu'au niveau du microcontrôleur, les bits fusibles qui définissent la source d'horloge doivent rester dans leur configuration d'origine étant donné que c'est horloge interne à 1 MHz qui est utilisée. Les microcontrôleurs qui se trouvent déjà soudés ont été programmés par les soins de Elektor, ce qui signifie qu'ils sont prêts à l'emploi, affichant un petit texte démonstratif qu'il convient de changer comme expliqué plus haut via édition du texte, recompilation et téléchargement via l'embase ISP.

Applications

Elles sont quasiment sans limite. Elles vont du sempiternel "Hello World" au classique "Happy Birthday". Elles peuvent aller plus loin en raffinant quelque peu la programmation. On peut imaginer un texte variable en fonction du temps ou en fonction d'un calendrier établi. De cette façon la toupie affichera chaque jour un nouveau message en guise de surprise. On peut également penser aux jeux comme par exemple un concours de toupie, à celui qui la lance le mieux. Dans ce cas la programmation se limite à un simple compte-tours avant la chute. C'est ce qui a été réalisé pour l'expo de Munich où plusieurs gyroscopes de ce type étaient rassemblés. Ils ont déclenché une compétition qui a passionné le public. Une toupie bien lancée et bien équilibrée opérait plusieurs centaines de tours avant de tomber. Le gagnant est évidemment reparti avec une telle toupie en guise de trophée. La toupie peut être programmée pour avoir de la

mémoire, comme par exemple se souvenir du record et signaler si le record est battu. Il suffit pour cela d'utiliser la mémoire EEPROM du microcontrôleur. Il est possible d'afficher non seulement le nombre de tours, mais aussi la vitesse angulaire ou d'autres grandeurs physiques intéressantes. Une application consiste à afficher les points cardinaux N-S-E-O. Ce serait la première boussole-toupie avec, ce qui ne gâche rien, un bel aspect didactique puis-

que

allaient déboucher sur une toupie électronique. Plus proche de nous, mon prof d'il y a 30 ans ne pouvait se l'imaginer, lui non plus. Car trop de nouvelles notions sont ici en jeu qui n'existaient pas à l'époque. Cette application somme toute anodine d'un phénomène parfaitement connu aujourd'hui est le fruit de la réflexion d'un groupe de spécialistes, désirant offrir quelque chose d'amusant et instructif aux étudiants de l'école de l'ISEA à Aachen (Allemagne) [3]. Le but de l'opération a été de stimuler la curiosité de jeunes étudiants en électronique en les aidant à découvrir les notions essen-

tielles de l'électronique. Ceci avec des moyens simples et bon marché leur permettant de poursuivre la démarche chez eux en tant que hobby s'ils en éprouvent l'envie. Il suffit en effet d'une prise de courant, d'un fer à souder et d'un PC muni des logiciels adéquats. La beauté est que tout en s'amusant l'étudiant peut acquérir la maîtrise des principes ancestraux de l'électromagnétisme

(champ magnétique, tension induite). Il peut se frotter aux rudiments de la technique analogique d'il y a 30 ans (les amplificateurs opérationnels, les filtres, les comparateurs), et il peut comprendre des notions comme les microcontrôleurs modernes et leur programmation en langage C. Vaste programme qui une fois accompli tient dans la poche sous la forme d'un

étrange jouet qui, last but not least, peut éventuellement susciter d'autres vocations chez d'autres jeunes lorsque exposé et démontré.

(080679e)

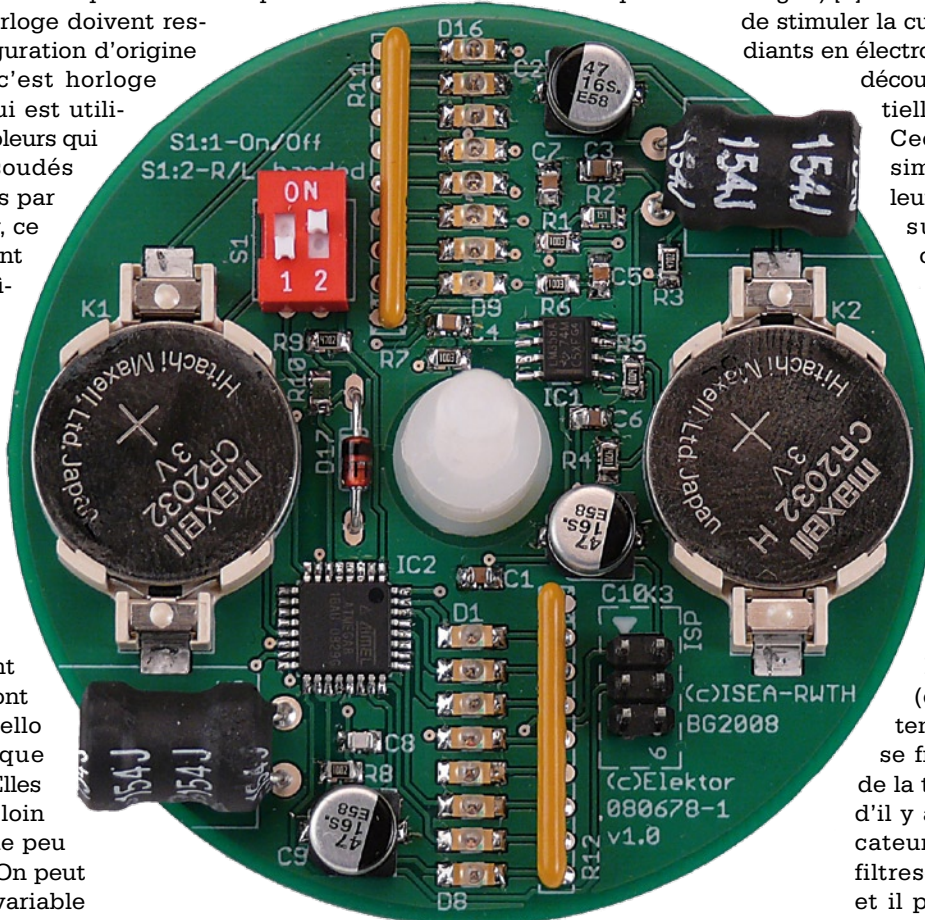


Figure 7. La platine de la toupie électronique, vue d'en haut. On distingue la deuxième bobine exploitée par l'électronique, uniquement présente pour assurer l'équilibre mécanique.

le principe de fonctionnement est lui-même basé sur le champ magnétique terrestre. Une vraie boussole doublée d'un amusante toupie. On s'imagine la réaction du Bédouin ou du copain, dans le désert, mis en présence d'un tel engin auquel il ne faudra toutefois pas confier sa vie.

En guise de conclusion

Il est certain que Michael Faraday, en 1831 lorsqu'il travaillait sur les lois de l'induction magnétique, ne pouvait s'imaginer qu'un jour ses travaux

Liens et ouvrages :

- [1] Steffen Sorge : « Héli-message défilant : Afficheur rotatif à LED à contrôleur AVR », Elektor n°342 – décembre 2006
- [2] AVR-Studio : www.atmel.com/avrstudio
- [3] ISEA : www.isea.rwth-aachen.de