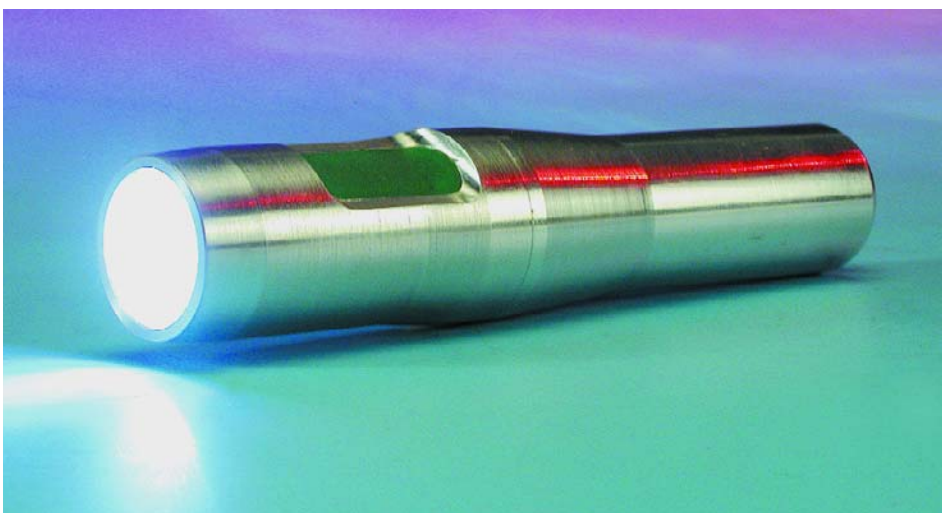


# Torche à LED

## Modèle High-Tech à microcontrôleur

Dans le numéro double du tournant du siècle, nous vous avons déjà proposé notre première lampe de poche à LED qui « brillait » surtout par sa simplicité. Si le modèle que nous vous présentons ici ne comporte guère qu'un ou deux composants supplémentaires, il peut se vanter de comporter un microcontrôleur (!) ce qui lui donne des fonctionnalités intéressantes.



Une lampe de poche à LED se doit d'être aussi petite et légère que possible pour être mise facilement dans un sac à main, la poche ou un sac à dos sans causer la moindre gêne. Pour des raisons de respect de l'environnement et de coût, elle se doit de comporter un accumulateur rechargeable qui doit pouvoir fonctionner même si l'on a oublié de recharger la lampe de poche depuis de nombreux mois, voire années. Elle devrait indiquer l'état de charge momentané de l'accumulateur et être dotée d'un dispositif de protection au cas où on aurait oublié de la couper. Ajoutons à ce cahier des charges qu'elle devrait éclairer dans un rayon de plusieurs mètres de manière à pouvoir servir, par exemple, d'éclairage d'appoint ou de lampe de chevet pendant plusieurs heures. À luminosité réduite,

elle devrait pouvoir tenir plusieurs nuits sans interruption et même pouvoir, alors que son accumulateur est pratiquement vide, si on lui laisse le temps de récupérer un peu, avec le reste du dernier pour cent de sa capacité (10 mA) pouvoir servir, pendant quelques heures encore, d'éclairage de secours utilisable. Vu l'énormité de ce cahier des charges, nous avons opté pour des LED blanches plutôt que pour une ampoule halogène. Contrairement à une opinion répandue, le rendement des LED de couleur blanche n'est pas sensiblement plus élevé que celui des ampoules de faible puissance (1 W) voire même inférieur à

celui d'ampoules à incandescence de 3 W et plus. Il n'en reste pas moins que les LED blanches présentent nombre d'avantages par rapport aux ampoules : il est possible d'abaisser les LED au millième de leur puissance maximale sans nuire à leur rendement alors que dans le cas d'une ampoule, son rendement s'effondre à zéro quasiment en deçà de la moitié de sa puissance nominale. La durée de vie d'une LED est mille fois supérieure à celle d'une ampoule, ce qui évite d'avoir à prévoir d'ampoule de rechange. L'optique intégrée de la LED permet de donner à la lampe de poche des dimensions sensiblement plus compactes que ne le permettrait l'utilisation d'une ampoule avec réflecteur.

En ce qui concerne l'accumulateur, nous avons opté pour un accu Li-Ion, qui bien que sensiblement plus cher qu'un accu CdNi, mais qui pour la même énergie ne pèse que le tiers du poids de ce dernier, se caractérise par une auto-décharge de quelque 10% par an seulement (comparés aux 20% par mois (!) dans le cas d'un CdNi et qui ne connaît pas d'effet de mémoire.

### Le concept du circuit

Vu que la tension d'accu d'un accu Li-Ion pleinement chargé est de 4,1

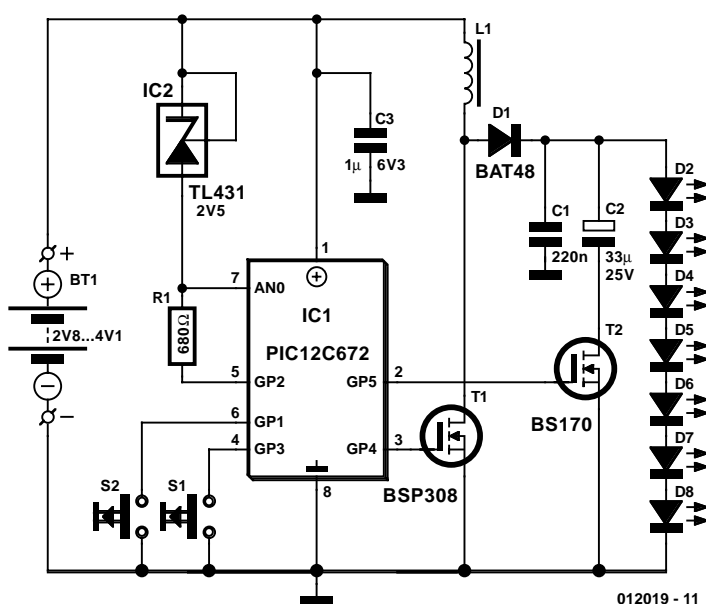


Figure 1. Un microcontrôleur pilote le convertisseur de tension.

V, tension qui tombe à 2,8 V lorsque l'accu est pratiquement vide (à titre de rappel, la tension directe des LED est de 3,6 V), il est impossible de réaliser une limitation de courant à base de résistances. La tâche primaire de l'électronique de la **figure 1** est de fournir aux LED une puissance constante quel que soit le niveau de tension de l'accu. C'est l'affaire d'un régulateur à découpage rehausseur de tension (*step-up*) que constitue le self L1, le commutateur FETMOS T1, la diode D1 et le condensateur de lissage C1. Son rendement est proche de 94%.

Le pilotage du régulateur rehausseur est confié à un microcontrôleur du type PIC12C672, ce à quoi ne s'attend guère dans le cas d'une lampe de poche. Ce PIC travaille avec un oscillateur RC tournant à 4 MHz et possède un convertisseur analogique/numérique (CAN) à 8 bits. L'entrée analogique AN0 mesure la tension de référence de IC2. De manière à économiser autant d'énergie que possible cette diode de référence n'est activée, par le biais de la ligne GP2, qu'aux instants où doit s'effectuer une mesure. Par le biais de la broche d'alimentation positive ( $V_{DD}$ , + ici, broche 1), le CAN intégré du PIC détermine la tension d'accu  $U_{pile}$  que tamponne le condensateur C3. À partir de ce niveau de tension  $U_{pile}$  le microcon-

trôleur calcule la fréquence de découpage qu'implique la puissance souhaitée et le rapport cyclique présent sur la sortie GP4. La fréquence de découpage maximale est de 30 kHz, valeur qui diminue pour un niveau de puissance moindre. Aux niveaux de puissance très faibles, la consommation du microcontrôleur risque de dépasser celle des LED. Ceci explique qu'aux niveaux de puissance les plus faibles, le microcontrôleur se trouve le plus souvent en mode de sommeil (*sleep*), n'étant « réveillé » brièvement que toutes les 18 ms pour fournir de l'énergie. Pour éviter que les LED ne clignent à ce rythme de 18 ms, on a pris en parallèle sur les LED, par le biais du transistor T2, du condensateur électrochimique C2. La mise en circuit de C2, au travers de la ligne GP5, n'a lieu qu'en mode faible consommation.

La mise en circuit de C2 empêcherait une extinction propre des LED lorsque l'on se trouve en mode « clignotement ». Une paire de touches permet de transmettre 6 instructions différentes au processeur.

## Fonctions

Puisque nous en sommes à évoquer différents modes de fonctionnement il est logique que nous vous proposons ici la palette des fonctions que

## Tableau I. Fonctions

Touche actionnée	Fonction
S1 brièvement	Niveau de luminosité +
S2 brièvement	Niveau de luminosité –
S1 et S2 brièvement	Extinction
S1 longuement	Mode de clignotement +
S2 longuement	Mode de clignotement –
S1 et S2 longuement	Test de la pile puis passage en standby, Reset mode continu

connaît notre lampe de poche à LED. Ces fonctions sont bien évidemment implémentées logiquement (vous avez liberté de modifier à votre gré le programme stocké dans le processeur). Passons en revue les caractéristiques de la lampe de poche :

- Possibilité de sélection entre 6 niveaux de luminosité, la puissance chutant approximativement d'un facteur 3 d'un niveau au suivant.
- Aux niveaux de luminosité les plus faibles, qui permettent fort bien de reconnaître l'environnement immédiat voire de lire au lit sous la couverture, la lampe de poche consomme de l'ordre de 0,5 mA. Un accu bien chargé permet ainsi de tenir 120 jours (voire un an si on se contente de lire 8 heures par nuit).
- En fonction du niveau de puissance sélectionné, la lampe de poche réduit automatiquement, au bout d'un certain temps (cf. Mise hors-fonction auto après du tableau 2), sa puissance, pour la couper enfin totalement, sachant cependant qu'elle avertit de l'imminence de cette coupure par une modulation, une minute durant, de la luminosité. De ce fait, un oubli d'éteindre la lampe de poche ne coûte que de l'ordre de 3% de la charge de l'accu.
- Lorsque l'accumulateur est presque vide et que la tension aux bornes de l'accu tombe en-deçà de 3,3 V, le processeur abaisse la puissance de la lampe de poche en fonction de la tension existant réellement de manière à garantir une durée de fonctionnement résiduelle de 15 mn au moins. À partir de 2,8 V, le processeur coupe le tout pour éviter une décharge profonde de l'accumulateur.
- Si on laisse le temps à l'accu de se rétablir, et qu'il reste, supposons, un demi pour cent (0,5%) de la capacité nominale, la lampe de poche fonctionnera encore pendant une heure à 20 mW ou 3 heures à 8 mW.
- On dispose, dans le cas d'une utilisation en clignoteur, de différents modes de clignotement caractérisés par des rapports cycliques différents, ce qui permet de jouer sur la puissance.

**Tableau 2. Niveaux de luminosité**

Niveau	Puissance	Consommation à $U_{pile} = 3,6 V$	Durée de vie de la pile (1,3 mAh)	Mise hors-fonction auto après
0	0,5 W	140 mA	10 h	20 min
1	0,2 W	55 mA	24 h	40 min
2	65 mW	18 mA	3 d	2 h
3	20 mW	6 mA	9 d	5 h
4	8 mW	2,4 mA	22 d	10 h
5	4 mW	1,0 mA	55 d	10 h
Stand-by	-	30 $\mu$ A	5 a	24 h
Éteint	-	2 $\mu$ A	70 a	-

– En mode *stand-by* la lampe de poche clignote le plus économiquement possible, permettant, par exemple, de la retrouver dans une tente obscure. Avant que la lampe de poche ne passe en mode *stand-by*, le patron du clignotement indique la charge approximative de l'accu. Une impulsion de clignotement correspond à 10% de la pleine charge, un état de charge inférieur à 10% étant signalé par de courtes interruptions qui représentent chacune 1% de charge.

Le **tableau 1** récapitule les différentes fonctions que les 2 boutons-poussoirs permettent de choisir. Le **tableau 2** donne des informations chiffrées quant aux différents niveaux de luminosité.

### Réglage de la puissance

La tâche première du convertisseur rehausseur est, nous le disons plus haut, de fournir aux LED une puissance constante en dépit des variations de la tension d'alimentation. L'énergie *E* stockée dans la self *L* par le passage d'un courant *I* répondant à la formule suivante :

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

Après mise en fonction pendant une durée  $t_{ON}$  du commutateur T1 (voire hors-fonction  $t_{OFF}$ ) le courant est passé, linéairement, de 0 à une valeur *I* :

$$I = \frac{U_{pile} \cdot t_{on}}{L}$$

On dérive de *E* et de la puissance moyennée sur la dite durée *P*, la formule suivante :

$$E = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{pile}^2 \cdot t_{on}^2}{L}$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{pile}^2 \cdot t_{on}^2}{L \cdot (t_{on} + t_{off})}$$

La variation de *P* est quadratique par rapport à  $U_{pile}$ , en l'absence de régulation *P* varierait d'un facteur 2 entre les valeurs de tension extrêmes de 2,8 et de 4,1 V. Le courant moyen vaut  $P/U_{pile}$ . On peut maintenant, en fonction de  $U_{pile}$ , jouer sur les temps  $t_{ON}$  et  $t_{OFF}$  de manière à garder constante la puissance *P*.

Pour pouvoir garantir une régulation de puissance efficace et correcte, le microcontrôleur doit être informé en permanence de la tension aux bornes de l'accu,  $U_{pile}$ . La mesure de cette tension n'est pas faite directement pour éviter de compliquer inutilement l'électronique requise. Nous avons mis la ligne AN0 à contribution, le CAN utilisant la tension  $V_{DD} = U_{pile}$  en tant que référence (= pleine échelle). La tension de la référence de barrière de potentiel (*bandgap*) TL431AC est de 2,495 V. Le résultat de mesure ADRES du

CAN 8 bit est partant le suivant :

$$AD_{RES} = \frac{U_{pile} - 2,495V}{U_{pile}} \cdot 255$$

ou en inversant

$$U_{pile} = \frac{2,495V}{1 - AD_{RES} / 255}$$

La mesure de  $U_{pile}$  et la régulation se font une fois toutes les 100 ms.

Disposant de la valeur de la tension aux bornes de l'accu, le logiciel recherche dans un tableau (comportant 16 plages de valeurs) une valeur convenable pour  $t_{ON}$  et  $t_{OFF}$  et pilote en conséquence la sortie GP4.

La tension inverse dans *L* étant de l'ordre de  $6 \cdot U_{pile}$ , le courant *I* est, lors de chaque période, mis à zéro au cours de la durée  $t_{OFF}$ , si tant est que l'on ait veillé à ce que la relation  $t_{OFF} > 1/6 \cdot t_{ON}$  soit vraie.

Le rendement du circuit dépend principalement des pertes au niveau de la diode Schottky et des pertes ohmiques dans la self, le FETMOS ainsi que de la résistance interne de l'accumulateur et des interconnexions. À la puissance maximale, le rendement atteint de l'ordre de 94%. On notera cependant que le rendement des LED, même si elles proviennent d'un même fabricant, peut varier fortement. Les LED blanches ayant actuellement le meilleur rendement sont fabriquées par Nichia. Bien qu'elles ne soient fabriquées que pour des utilisateurs

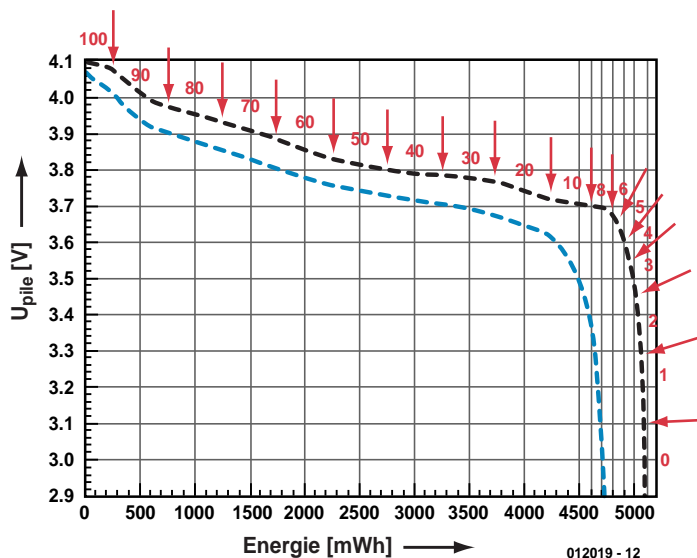


Figure 2. Courbe de décharge typique d'une cellule Li-Ion

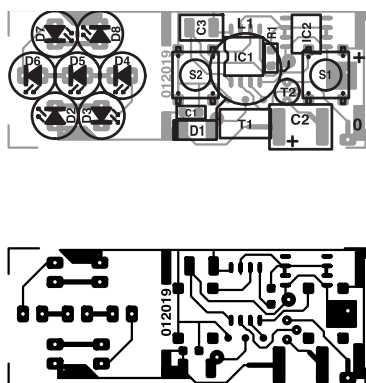
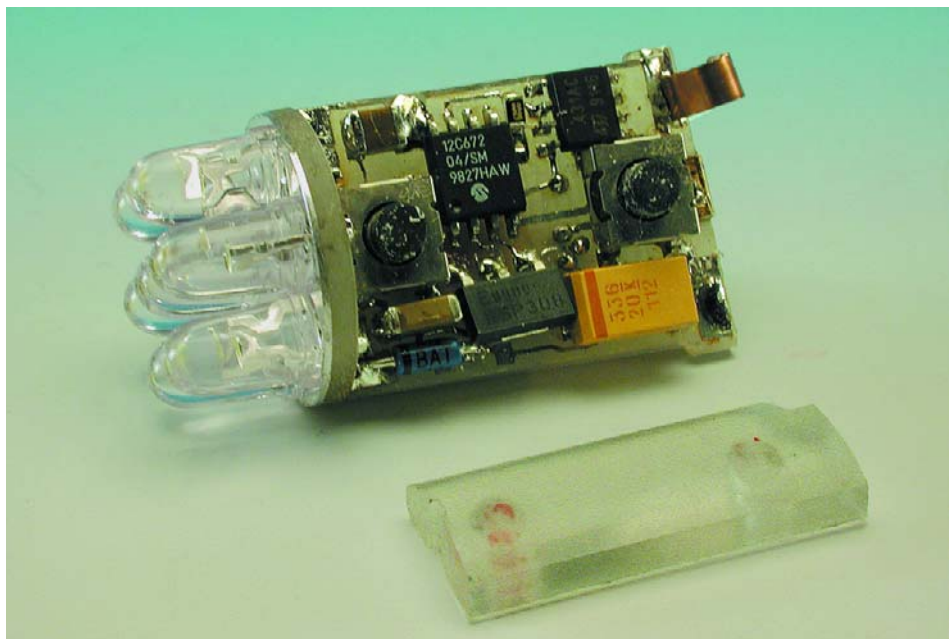


Figure 3. Dessin de la platine en 2 parties destinée à recevoir les composants CMS.



### Liste des composants

#### Résistances :

R1 = 680 Ω CMS 0805

#### Condensateurs :

C1 = 220 nF céramique CMS 0805

C2 = 33 μF/20 V CMS 2220

C3 = 1 μF/6V3 CMS 1210

#### Bobines :

L1 = 233 μH (100 kHz) ESR = 0,27 Ω

pot ferrite P9.0x5.0/N26 (Al = 250) doté de 30,5 spires de fil de cuivre émaillé de 0,22 mm de diamètre

#### Semi-conducteurs :

D1 = BAT48 ou 1N4148

D2 à D8 = LED 5 mm blanche, 640 mCd telle que NSPW500BS (Nichia) ([www.nichia.co.jp](http://www.nichia.co.jp))

T1 = BSP308, BSP319 (R<sub>ON</sub> = 50 mΩ)

T2 = BSI170, BSS138 (R<sub>O</sub> = 5 Ω)

IC1 = PIC12C672 04/SM

(programmé **EPS012019-41**)

IC2 = LM9140-2.5 ou TL431

#### Divers :

S1, S2 = interrupteur unipolaire CMS tel que, par exemple, (Mentor 1254.1007 ou 1301.9314 ou Omron B3FS-1052 chez Farnell)

pile = Sanyo UR18650 Li-Ion, 1350 mAh (diam. 18 mm, long. 65 mm, poids 40 g) ou Sanyo UR18500 Li-Ion, 1100 mAh (18 mm, long. 50 mm)

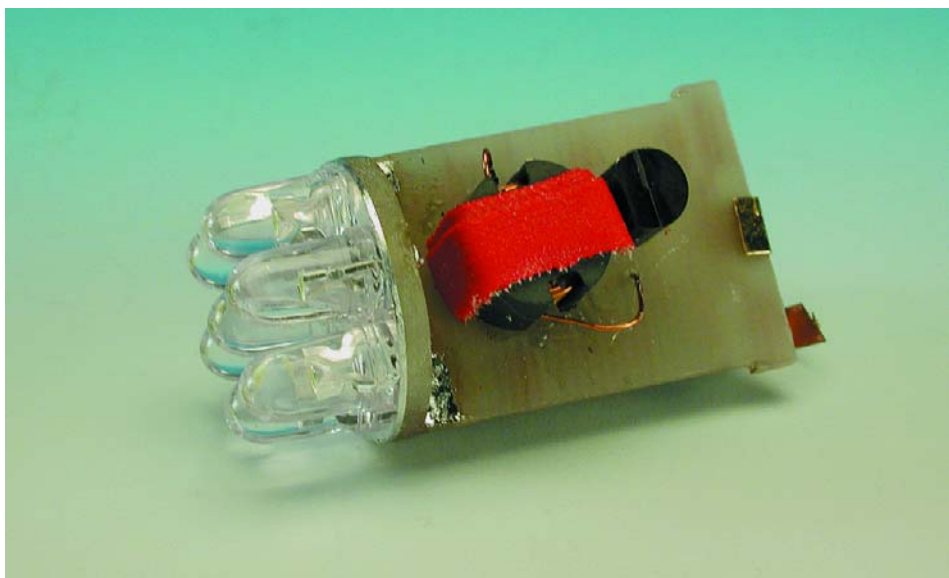
OEM (*Original Equipment Manufacturer*), on en trouve quand même dans le commerce.

### L'état de charge

Pour éviter que la lampe de poche à LED ne laisse son propriétaire dans le noir en raison de l'épuisement de l'accu, le microcontrôleur doit connaître en permanence l'état de charge de l'accu. Comme la tension de décharge dépend non seulement du courant de décharge, mais aussi de l'historique des décharges précédentes et de la température, nous éliminons ces facteurs en faisant en sorte que le contrôleur ne détermine

l'état de charge que hors-circulation de courant, et ce longtemps après (1 000 s) après la coupure de la lampe de poche.

La **figure 2** montre la caractéristique de décharge d'un accu Li-Ion. Une fois la lampe de poche coupée, la tension aux bornes passe, en 1 000 s, de la courbe du bas vers la courbe du haut. Les flèches et les valeurs identifient l'état de charge exprimé en pour cent tel que l'affiche le microcontrôleur. L'erreur de mesure est de l'ordre de ±30 mV; déterminer fiablement l'état de charge dans les derniers 4% est quasiment impossible. En tout état de cause, même si l'erreur lors de la détermination de l'état de charge peut sembler quelque peu importante, il est parfaitement possible de faire la différence entre un niveau de charge de 80, 50 ou 20%. L'autodé-



charge est négligeable (inférieure à 5%/a), de sorte que l'accu pourra être utilisé, sans être rechargé, plusieurs années plus tard.

Un dispositif de *timeout* évite une décharge de l'accu au cas où l'on aurait oublié, par inadvertance, d'éteindre la lampe de poche. La coupure se fait (indépendamment de la puissance) après une consommation de l'ordre de 3% de la capacité maximale de l'accu qui est de 5 Wh.

Lorsque la charge de l'accu tombe en deçà de 10%, il est pris un certain nombre de mesures d'économie de courant destinées à éviter une décharge complète de l'accu. Selon le niveau de luminosité du moment, on passe, assez rapidement, à une puissance moindre. Normalement, suite à cette réduction de la demande, la tension de décharge remonte quelque peu. Si elle continue cependant de diminuer alors que l'accu se trouve dans un état de décharge avancé, le processeur éteint la lampe de poche purement et simplement. Il n'en reste pas moins possible de rallumer la lampe de poche pendant une durée relativement courte et à une puissance faible. S'il ne reste plus qu'1% de charge, la lampe de poche pourra éclairer 5 heures encore au niveau de luminosité 4, voire plus de 12 heures au niveau 5, à luminosité plus faible. Il ne devrait partant vous arriver de vous retrouver complètement dans le noir...

### Accumulateur et self

L'accu que nous avons utilisé possède en fait, avec ses 1,3 Ah (près de 5 Wh), une taille trop importante pour la lampe de poche. Cependant, il faut noter qu'il constitue actuellement la taille standard au prix le plus inté-

ressant sachant qu'on le retrouve dans les ordinateurs portables. Les accumulateurs pour téléphones portables sont plus difficiles à trouver sans même parler du fait qu'ils coûtent plus cher.

Si le sujet vous intéresse, vous pourrez trouver des fiches de caractéristiques consacrées aux accus Li-Ion sur Internet à l'adresse :

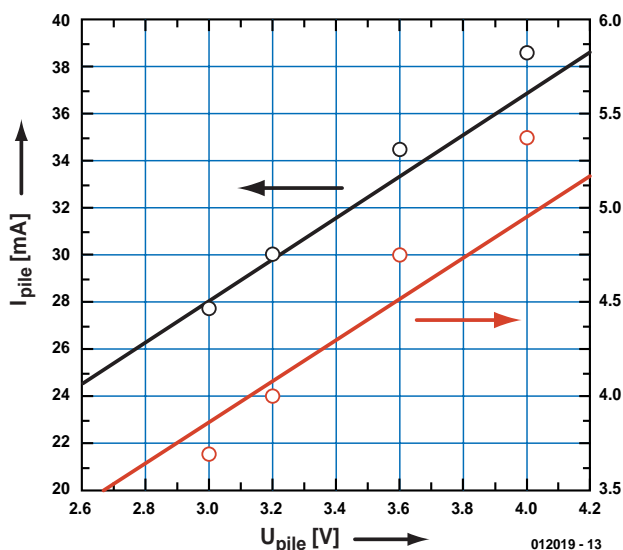


Figure 4. Consommation de courant de la lampe de poche à LED.

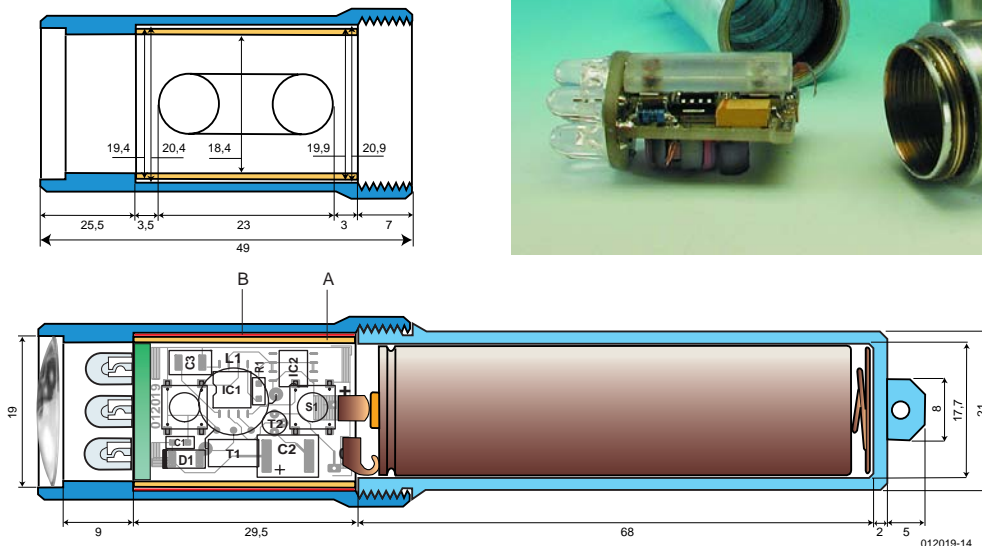


Figure 5. Croquis coté pour la réalisation d'un boîtier étanche pour la lampe de poche.

[www.sanyo.com/industrial/batteries/industrial\\_liion.html](http://www.sanyo.com/industrial/batteries/industrial_liion.html)

ou

[www.panasonic.com/industrial/battery/oem/chem/lithion/index.html](http://www.panasonic.com/industrial/battery/oem/chem/lithion/index.html)

On peut trouver la self dont l'inductivité sera comprise entre 220 et 250  $\mu\text{H}$  et ayant une  $I_{\text{MAX}}$  égale à 0,5 A, toute faite si tant est que l'on connaisse une source d'approvisionnement (et que l'on y ait une entrée). Si l'on veut faire sa self soi-même il faudra utiliser du fil de cuivre émaillé de 0,2 à 0,22 mm de diamètre que l'on bobine en couches de 10 spires sur un noyau EPCOS ayant une valeur Al de 250. De manière à minimiser la capacité de la self et obtenir un bobinage bien régulier d'une couche à l'autre, intercaler 2 tours de film plastique de 0,1 mm d'épaisseur. Il suffira, en principe, de faire 30,5 spires de manière à obtenir l'inductance recherchée, à savoir :

$$L = 30,5^2 \cdot 250 \text{ nH} = 233 \text{ mH.}$$

Il est préférable de prévoir une spire supplémentaire (qui accroît L de 6%), de mesurer le résultat voire l'essayer expérimentalement comme nous le décrivons dans le prochain paragraphe. Il ne sera pas difficile ensuite, si nécessaire, d'enlever 1 ou 2 spires. Une petite remarque au passage. Sachez, s'il vous venait à l'idée de fixer la lampe de poche sur une surface métallique à l'aide d'un aimant, qu'il faudra placer le dit aimant à au moins 2 cm de la self sous peine de voir chuter sinon l'inductivité à moins de 10% de sa valeur.

## Réalisation

Nous en savons maintenant assez sur le fonctionnement. Venons-en à l'aspect pratique ! Nous allons commencer par découper en 2 parties la platine représenté en **figure 3** : la partie LED et la partie du reste des composants qui sont tous, exception faite de la self, de type CMS (montage en surface). Le seul composant « normal » de la platine du processeur, la self, vient, cela va de soi, s'implanter côté « composants ». Une fois les composants montés, les 2 platines sont soudées à l'équerre de manière à ce que les

LED puissent recevoir leur tension d'alimentation.

Il faudra disposer, pour le premier test de bon fonctionnement, d'une alimentation de laboratoire (avec ampèremètre ou en combinaison avec un ampèremètre à faible résistance interne si l'alimentation ne comporte pas d'affichage de courant); on la branchera au montage. Pour être réinitialisé correctement, le PIC a besoin d'une raideur de pente de croissance de la tension d'alimentation minimale; il ne saurait partant être question « d'ouvrir » progressivement la tension; il faudra, à une tension de 2,8 V, connecter l'alimentation au montage, vu que sinon le FET peut entrer en conduction et drainer une intensité de courant importante. Il est recommandé, pour éviter toute mauvaise surprise lors du premier test, d'intercaler une résistance de limitation de courant de 10  $\Omega$  (limitation du courant à 0,4 A) dans la ligne d'alimentation.

Après la réinitialisation, le PIC se lance, sans qu'il ne soit nécessaire d'appuyer sur l'une des 2 touches, dans l'exécution de la première de 2 routines de test. Ces routines de test ne sont exécutées qu'une seule et unique fois, lors de la connexion de l'accu au système (mais bien évidemment également après chaque déconnexion de l'accu !).

On s'assurera de la présence d'un signal d'horloge d'une fréquence de 4 MHz (ce qui correspond à une durée de cycle de 1  $\mu\text{s}$ ) avant de vérifier l'inductance de L1 et le fonctionnement du CAN.

Au cours de la première routine de test la lampe de poche clignote à une période de 200 ms et un rapport cyclique de 0,5; ce clignotement dure 1 000 périodes (200 s) pour cesser ensuite si aucune des touches n'a été actionnée. Si les durées varient fortement par rapport aux valeurs données (en particulier si  $t_{\text{ON}}$  dure plus de 20% plus longtemps, encore qu'il y ait peu de raison que cela soit le cas) cela signifie que les LED sont traversées par un courant beaucoup trop important. Il faudra dans ce cas-là réduire le nombre de spires de la self d'1 ou de 2. Dans la première routine de test, les durées de  $t_{\text{ON}}$  et  $(t_{\text{ON}}+t_{\text{OFF}})$  ont été fixées à 10 et 100  $\mu\text{s}$  respectivement. On peut déduire la consom-

mation de courant à l'aide de la courbe inférieure de la **figure 4**.

Si tout se passe comme prévu, on appuiera brièvement sur l'une des touches. La lampe de poche s'éteint et le programme passe à la seconde routine de test qui prend la forme d'une mise en fonction continue avec un  $t_{\text{ON}}$  de 20  $\mu\text{s}$  et un  $(t_{\text{ON}}+t_{\text{OFF}})$  de 100  $\mu\text{s}$ .

Un doublement de  $t_{\text{ON}}$  se traduit par un quadruplement de la puissance, la lampe de poche restant en fonctionnement continu. Si on compare les 2 routines de test, la puissance a été multipliée par 8. La consommation de courant devrait correspondre à la courbe supérieure de la figure 4.

En l'absence d'action sur une touche, la lampe de poche s'éteint au bout de 50 s. On évite de cette manière une mise en fonction ininterrompue après une réinitialisation du processeur lorsque, par exemple, à la suite d'une chute, l'accu devait être déconnecté, un court instant, du reste du circuit. Une action rapide sur l'une des touches se traduit par l'allumage de la lampe en mode (presque) normal puisqu'on se trouve au niveau de luminosité 2 (c'est-à-dire le 3<sup>ème</sup> niveau de puissance).

## Travaux pratiques

Il n'est malheureusement pas possible de démonter une mini-lampe de poche du commerce et en utiliser le boîtier pour y installer notre électronique, pour la simple et bonne raison qu'un accu Li-Ion possède une section sensiblement supérieure à celle d'une cellule R6 (mignon).

Si donc vous voulez disposer d'un boîtier compact et attrayant et que vous ne disposez pas d'un tour et d'une fraiseuse, il vous faudra faire appel à l'aide d'un atelier disposant de ces machines.

Le croquis coté de la **figure 5**, disponible sous format Micrographx sur le site Internet d'Elektor, donne toutes les cotes des 2 parties qui constituent le boîtier et que l'on vissera l'une sur l'autre après avoir glissé la platine dans la partie supérieure et l'accu dans la partie inférieure.

On notera la forme légèrement conique du fraisage de la partie dans laquelle se glisse l'électronique. Cela permet d'assurer une bonne fixation du tube de cuivre et du joint de caoutchouc qui assurent l'étanchéité des 2 touches.

La platine sera dotée de 2 contacts de laiton chargés d'assurer un bon contact avec la cellule Li-Ion. Un ressort placé dans le fond de la partie inférieure du boîtier en dessous de la cellule génère la pression de contact nécessaire et suffisante.

(012019)