

# zone D

Astuces, bonnes pratiques et autres informations pertinentes

# Tout mis ensemble

Le transistor unijonction programmable expliqué

Roel Arnts (Pays-Bas)

Connaissez-vous (ou peut-être vous en souvenez-vous) le transistor unijonction programmable (PUT)? C'était un composant particulier des années 70. Dans cet article, nous allons expliquer son mode de fonctionnement et le faire revivre dans une petite collection de circuits.

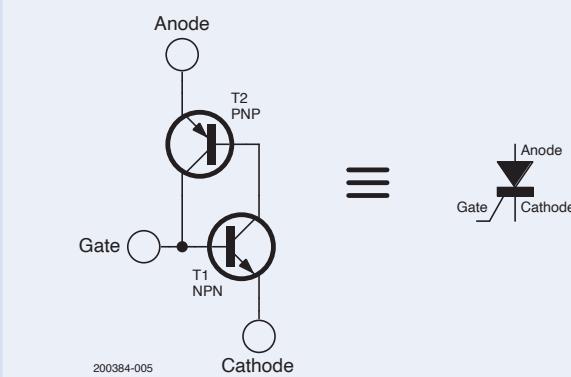


Figure 1. Le thyristor universel à transistors (TUT).

## Bienvenue au PUT !

Retournons dans le monde de l'électronique analogique à l'ancienne et voyons ce qu'on peut réaliser d'intéressant avec une simple combinaison de transistors (**fig. 1**). Ces deux transistors complémentaires ont un comportement de verrouillage mutuel bistable similaire à celui du thyristor (SCR) et du transistor unijonction (UJT). Si, dans le circuit de la **figure 1**, nous ajoutons une deuxième gâchette, nous obtenons le transistor unijonction programmable, ou PUT, de la **figure 2**. Notez que dans le symbole du thyristor, la gâchette s'est déplacée du côté de l'anode. L'UJT et le PUT étaient des composants populaires dans les années 70 car ils permettaient de réaliser des générateurs de dents de scie ou d'impulsions. On en produit toujours, mais ils sont rares dans les circuits modernes. Dans cet article, nous allons présenter quelques circuits à base de PUT.

## Mais commençons par notre vieux ami le thyristor

Le circuit de la **figure 1** se comporte comme un thyristor, mais il ne le remplace pas directement. On l'appelle un Thyristor Universel Transistorisé (TUT). Rappelons d'abord comment fonctionne un thyristor. Lorsqu'un faible courant (quelques milliampères) circule dans la gâchette, le thyristor bascule dans l'état conducteur permanent dès que le courant anode-cathode dépasse un certain seuil, le courant d'amorçage. La gâchette n'a alors plus d'effet et la seule façon de faire cesser la conduction est d'abaisser le courant anode-cathode en dessous du courant de maintien. Un moyen d'y parvenir est d'interrompre brièvement l'alimentation électrique.

## Un PUT se comporte comme un thyristor

Pour comprendre le fonctionnement d'un PUT, reportez-vous à la **figure 3**. Il y a deux gâchettes, G- et G+, mais si nous nous limitons à G+, la description est également valable pour l'UJT.

À la mise sous tension, S1 et S2 sont ouverts. T2 bloque car sa base est tirée vers le haut par R1 et T1 bloque car sa base est flottante. Comme T2 ne conduit pas, la sortie est tirée vers le haut par R2.

Quand on appuie sur S1, la base de T1 est tirée vers le haut et T1 commence à conduire. Cela va tirer la base de T2 vers le bas, T2 devient conducteur et la sortie passe au niveau bas. La base de T1 reçoit du courant à travers R2 et T2, ce qui maintient la sortie au niveau bas, même quand on relâche S1. La seule façon de réinitialiser le circuit est de couper brièvement l'alimentation. Il s'agit du même comportement d'auto-verrouillage que celui d'un thyristor.

## Et avec l'autre gâchette ?

En appuyant sur S2 au lieu de S1, on obtient le même résultat, mais d'une manière légèrement différente. Dans ce cas, la base de T2 est mise à la masse, ce qui le rend conducteur. La sortie passe au niveau bas et la base de T1 commence à recevoir du courant à travers R2 et T2, rendant T1 conducteur, offrant ainsi un chemin alternatif au courant de base de T2 quand on relâche S2. Comme précédemment, le circuit s'est verrouillé avec la sortie au niveau bas.

Un UJT a une gâchette, un PUT en a deux (**fig. 2**). La différence entre les deux gâchettes d'un PUT est que lorsque la gâchette 1 (G-) est utilisée, le PUT est conducteur lorsque la tension de l'anode dépasse

$$dW = \int [ \psi(x_0, y_0, z_0) ] dV = 4\pi dV$$

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x$$

$$F(h, k, l)$$

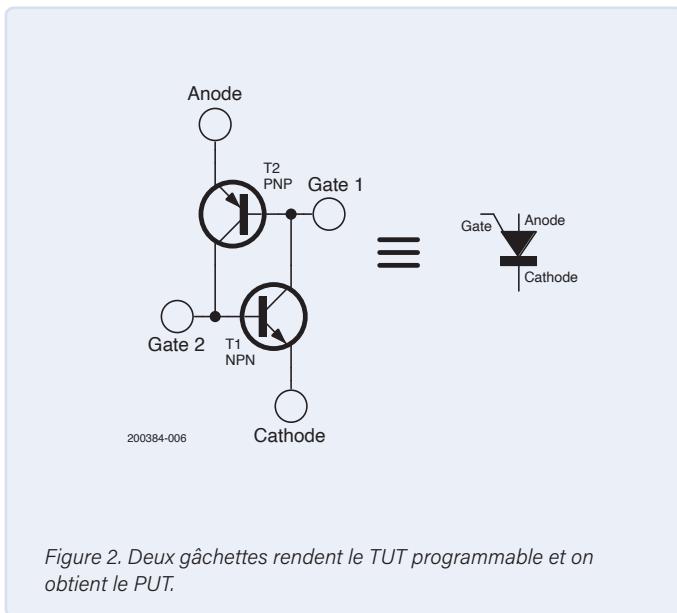


Figure 2. Deux gâchettes rendent le TUT programmable et on obtient le PUT.

la tension de la gâchette 1 de 0,7 V (chute de tension base-émetteur). Lorsqu'on utilise la gâchette 2 ( $G_+$ ), le PUT devient conducteur lorsque la cathode est inférieure de 0,7 V à la tension de cette gâchette. C'est de là que vient le « P » de PUT. La tension de déclenchement à laquelle le transistor commence à conduire peut être « programmée » en appliquant une tension de référence à la gâchette du PUT.

### Un circuit PUT simple

Le circuit de la **figure 4** illustre le comportement du PUT discret. Comme  $R_1$  et  $R_2$  ont des valeurs identiques, la tension au nœud 1 est la moitié de la tension d'alimentation (ici 2,5 V). La tension au nœud 2 peut être réglée à l'aide d'un potentiomètre.

Si la tension au nœud 2 est réglée à une tension inférieure d'au moins 0,7 V à la tension au nœud 1,  $T_1$  commencera à conduire. Le courant peut maintenant circuler à travers la base de  $T_2$  via  $T_1$ , et  $T_2$  devient également conducteur.  $T_2$  tire la base de  $T_1$  vers le rail positif, ce qui garantit que  $T_1$  reste conducteur. La combinaison de transistors est verrouillée et restera ainsi même si la tension au nœud 2 augmente et devient supérieure à la tension au nœud 1. Le circuit se déverrouille lorsque la tension du nœud 2 se rapproche du rail d'alimentation, car il empêche le courant de circuler dans  $T_1$ .

Le circuit de la **figure 5** est la version « à l'envers » du circuit de la **figure 4**. Il fonctionne de manière similaire, sauf que la tension au nœud 2 doit maintenant être supérieure de 0,7 V à la tension au nœud 1 pour que la paire de transistors se verrouille.

Bien entendu, dans les deux cas, le PUT se déverrouillera si l'alimentation électrique est brièvement interrompue.

### Un interrupteur à verrouillage

Le circuit de la **figure 6** est une application pratique de la **figure 3**. Lorsque l'alimentation est connectée, la LED s'allume, recevant son courant via  $R_1$  depuis l'alimentation. Le PUT formé par  $T_1$  et  $T_2$  n'est

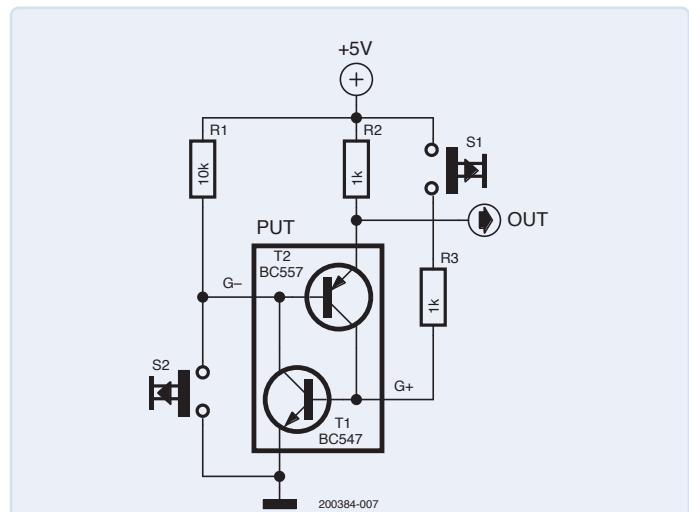


Figure 3. Appuyez sur S1 ou S2 et la sortie passe au niveau bas.

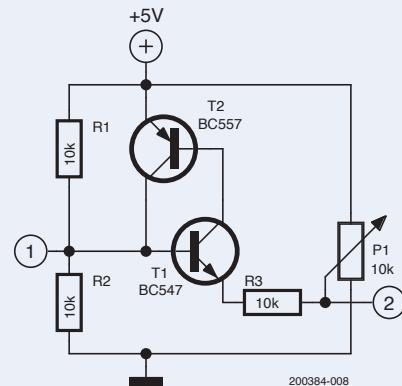


Figure 4. En tournant le potentiomètre  $P_1$  vers le bas, le PUT devient conducteur.

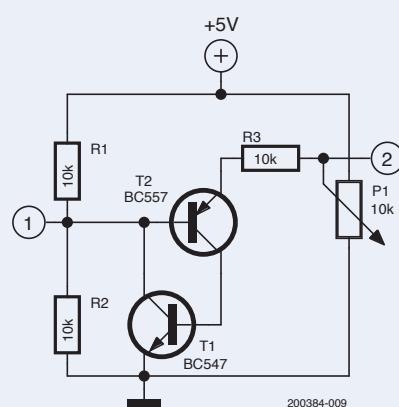
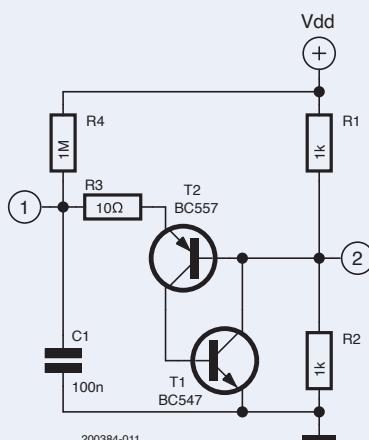
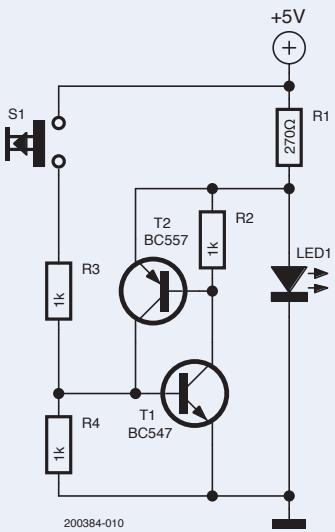


Figure 5. Figure 4 à l'envers :  $P_1$  doit être tourné vers le haut pour verrouiller le circuit.

# zone D

Astuces, bonnes pratiques et autres informations pertinentes



pas actif parce que la base de T1 est tirée vers le bas à la masse par R4 et la base de T2 est tirée vers le haut à la tension sur la LED. Ainsi, aucun des deux transistors n'est conducteur.

Lorsque l'on appuie sur S1, le circuit se verrouille en conduction (voir ci-dessus) et shunte la LED, qui s'éteint. Après avoir relâché l'interrupteur, le PUT reste verrouillé et la LED reste éteinte. Il suffit de couper brièvement l'alimentation pour rallumer la LED.

## Oscillateur de relaxation

Un oscillateur de relaxation (par opposition à un oscillateur harmonique) utilisant le circuit PUT est illustré à la figure 7. Ce circuit fonctionne avec une large gamme de tensions d'alimentation et génère au nœud 1 un signal en dents de scie à rampe montante et au nœud 2, des impulsions. La pente de la rampe, et donc la fréquence du signal de sortie, est déterminée par R4, C1 et la tension d'alimentation. Une augmentation de l'une ou l'autre de ces valeurs diminue cette fréquence. R3 détermine la largeur des impulsions qui sont produites au redémarrage de la rampe.

## Comment cela fonctionne-t-il ?

Initialement, C1 est déchargé, de sorte que le nœud 1 est à 0 V. La jonction émetteur-base de T2 est polarisée en inverse (la base de T2 est à Vdd/2, tandis que son émetteur est à 0 V), de sorte que T2 n'est pas conducteur. T2 bloqué, T1 ne reçoit pas de courant de base et ne conduit pas non plus. La tension au nœud 1 augmente à mesure que C1 est chargé à travers R4. Lorsque cette tension atteint la valeur qui polarise la jonction émetteur-base de T2 dans le sens direct (Vdd/2 + 0,7 V environ), T2 commence à conduire et le circuit se verrouille comme décrit précédemment. La tension au nœud 2 chute à 0 V.

Cependant, puisque T2 est maintenant conducteur, C1 se décharge rapidement à travers R3. Lorsque la tension sur C1 devient inférieure à 0,7 V, T2 commence à se bloquer et le circuit se déverrouille. La tension au nœud 2 remonte à Vdd/2 et C1 peut à nouveau se charger à

travers R4. Ce processus se répète indéfiniment. La largeur de l'impulsion négative au nœud 2 peut être ajustée dans certaines limites en modifiant la valeur de R3.

Si vous réorganisez le circuit comme sur la figure 4 et que vous échangez C1 et R4, les signaux de sortie seront inversés.

## Quelques cas de figure

La valeur de R4 doit être suffisamment élevée pour permettre au PUT de se déverrouiller. Il est donc préférable de jouer sur la valeur de C1 pour ajuster la fréquence d'oscillation.

Lorsque les valeurs de R1 et R2 sont trop élevées, le PUT ne reçoit pas assez de courant de gâchette pour se verrouiller fermement et C1 ne sera pas suffisamment déchargé pour déverrouiller à nouveau le PUT. Ces valeurs doivent donc rester relativement basses. En diminuant la valeur de R4, les valeurs de R1 et R2 doivent également être diminuées pour permettre au PUT de décharger C1 suffisamment pour se déverrouiller.

La valeur de R3 ne peut pas être augmentée indéfiniment. Lorsqu'elle est trop élevée, le PUT ne reçoit pas assez de courant pour se verrouiller fermement et ne peut pas décharger suffisamment C1 pour se déverrouiller, ce qui empêche l'oscillateur de démarrer.

## Générateur d'ondes carrées symétriques

En ajoutant une résistance et une diode au circuit de la figure 7, il est possible de générer une onde carrée symétrique (figure 8). Grâce à D1, le côté inférieur de C1 n'est plus fixé à la masse, mais peut être poussé en dessous de zéro, devenant négatif.

Lorsque C1 se charge, D1 est polarisée dans le sens direct et le nœud 3 est à +0,7 V. Comme précédemment, lorsque T2 commence à conduire, la tension au nœud 1 chute jusqu'à 0 V. La tension au nœud 3 devient alors négative, car C1 est toujours chargé. D1 est maintenant polarisé en inverse, donc bloquée, et C1 se décharge à travers R5. En raison de la tension négative au nœud 3, la tension sur R5 est environ deux fois plus élevée que la tension sur R4. Par conséquent, sa valeur est

$$dW = \int [ \psi(x_0, y_0, z_0) ] dV = 4\pi dV$$

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x$$

$$F(h, k, c)$$

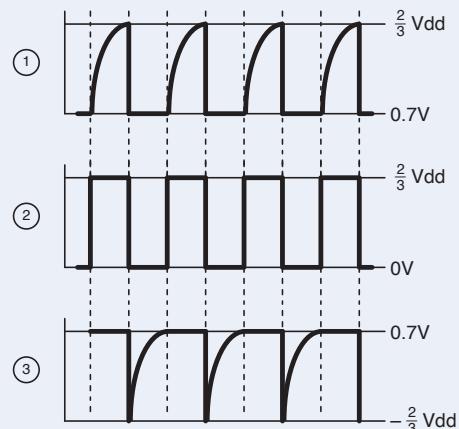
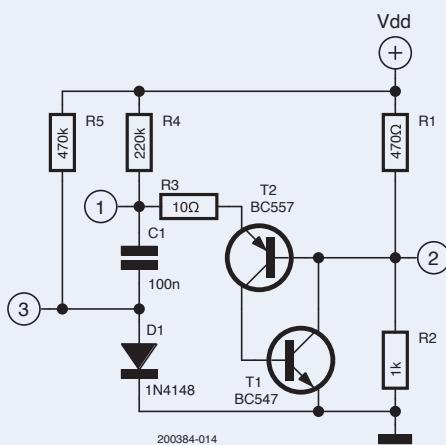


Figure 8. Un générateur de signaux carrés simple.

environ le double de celle de R4 pour obtenir des temps de charge et de décharge égaux. Le résultat est une forme d'onde symétrique au nœud 2. R3 n'a plus de fonction et peut être omis.

### Clignotants à LED

Si, dans le circuit de la **figure 8**, on remplace R2 par une LED, on obtient un clignotant à LED (**fig. 9**). Avec les valeurs indiquées des compo-

Publicité

**TAKING THE NOISE  
OUT OF E-MOBILITY**



**WÜRTH  
ELEKTRONIK**  
MORE THAN  
YOU EXPECT

**WE meet @ electronica**  
Hall A4, Booth 406

#### Noise free e-mobility

e-Mobility is no longer a question of tomorrow and the number of e-vehicles is increasing day by day. Handling EMI noise is becoming more and more crucial, when it comes to design new electronic devices and systems. Würth Elektronik offers a wide range of EMC components, which support the best possible EMI suppression for all kinds of e-mobility applications. With an outstanding design-in support, catalogue products ex stock and samples free of charge, the time to market can significantly be accelerated. Besides ferrites for assembly into cables or harnesses, Würth Elektronik offers many PCB mounted ferrites and common mode chokes as well as EMI shielding products.

[www.we-online.com/emobility](http://www.we-online.com/emobility)

- Large portfolio of EMC components
- Design-in-support
- Samples free of charge
- Orders below MOQ
- Design kits with lifelong free refill

# zone D

Astuces, bonnes pratiques et autres informations pertinentes

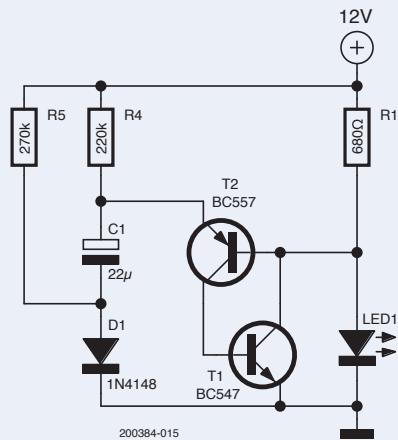


Figure 9. Un clignotant à LED à 1 Hz.

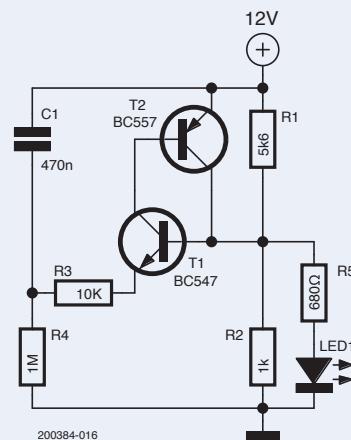


Figure 10. Un clignotant à LED à 1 Hz inversé.

sants, la LED clignote à environ 1 Hz. R3, devenu inutile, a été supprimé. La **figure 10** montre un circuit « à l'envers » pour faire clignoter une LED à une fréquence d'environ 1 Hz. R3 détermine la largeur d'impulsion et donc la durée du flash, qui, avec les valeurs utilisées, est d'environ 11 ms.

Comme dans la **figure 10**, mais avec la LED connectée à un autre endroit, la résistance de limitation de courant R5 devient superflue et peut être supprimée (**figure 11**). Son rôle a été repris par R2 qui est en série avec la LED lorsque le PUT est conducteur.

## Voilà, c'est tout.

Nous allons nous en tenir là, même s'il y a encore beaucoup à dire sur les PUT et leurs applications. Les circuits présentés dans cet article ont illustré quelques applications de base et expliqué comment les choses fonctionnent. L'intention n'était pas d'être exhaustif, mais de vous inspirer et en même temps de présenter quelques notions d'analyse de circuits analogiques. Vous trouverez d'autres circuits basés sur le PUT sous [1] et [2].

200384-04

## Des questions, des commentaires ?

Contactez Elektor (redaction@elektor.fr).

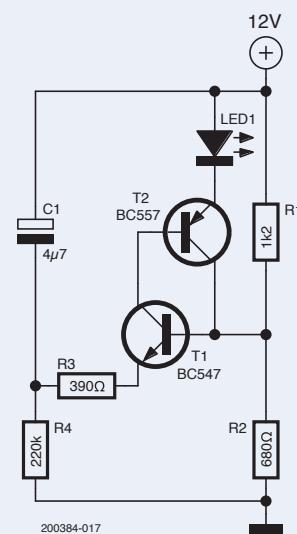


Figure 11. Ce clignotant à LED utilise un condensateur plus gros, mais économise une résistance.

## LIENS

[1] D'autres circuits PUT chez Elektor Labs: [www.elektormagazine.fr/labs/put-ting-it-all-together](http://www.elektormagazine.fr/labs/put-ting-it-all-together)

[2] Roel Arits, « variateurs pour LED (1) » Elektor 9/2018: [www.elektormagazine.fr/magazine/elektor-61/41852](http://www.elektormagazine.fr/magazine/elektor-61/41852)