

# alimentation haute tension

## avec traceur de courbes

Des tensions régulées jusqu'à 400 V & des courbes caractéristiques de tubes

Rainer Schuster (Allemagne)

Cette alimentation HT universelle fournit non seulement les tensions d'alimentation élevées pour des circuits à tubes, mais peut également servir de traceur de courbes caractéristiques pour les tubes et les semi-conducteurs. Tout cela avec un Raspberry Pi et un écran tactile de 7 pouces !

Dans la liste des outils indispensables à l'électronicien, l'alimentation de labo arrive en deuxième, après le fer à souder et à égalité avec le multimètre. Pour la plupart des applications, les tensions dont vous avez l'usage restent sous le seuil des 60 V et pour mesurer

en ampères l'intensité des courants, un seul chiffre suffit. Sauf si vous fricotez avec des tensions beaucoup plus élevées, comme c'est le cas si vous vous intéressez aux tubes.

Et tant qu'à réaliser une alimentation pour des tensions plus élevées, autant utiliser les

moyens modernes pour obtenir quelques fonctions supplémentaires intéressantes. Au rang des moyens modernes se trouve le Raspberry Pi. Cependant, pour cette application, les exigences en matière de puissance de calcul sont modestes. Il n'est donc pas

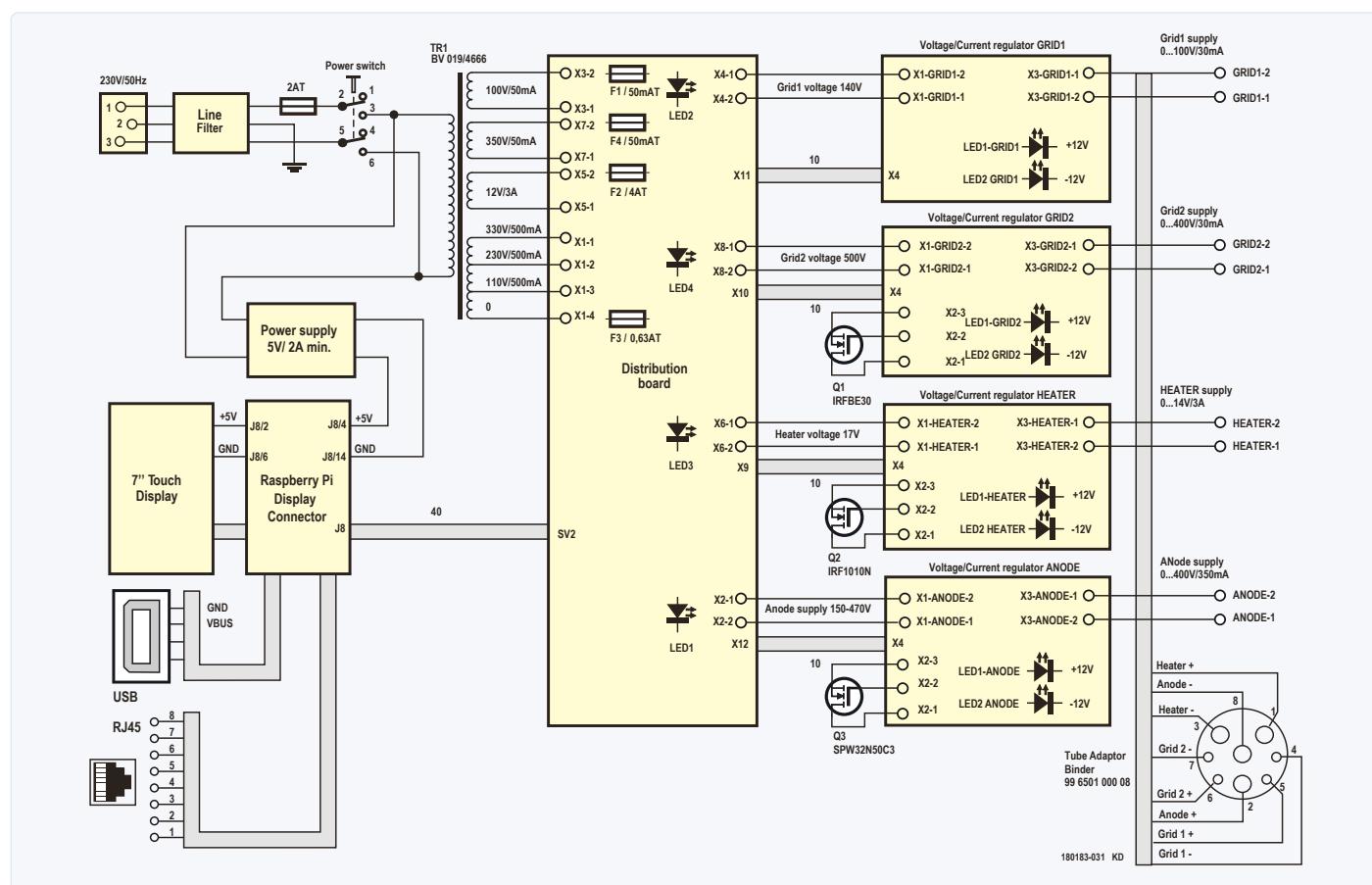


Figure 1. Synoptique de l'alimentation haute tension, avec l'interconnexion des différentes sections.

nécessaire que ce soit la dernière version 4. Un RPi 3 ou même un 2 feront l'affaire. Avec un écran tactile de 18 cm, vous serez parfaitement dans l'air du temps. Parmi les fonctions supplémentaires utiles, citons encore le traceur de courbes caractéristiques de tubes et de semi-conducteurs, facilement mises en œuvre par le logiciel.

## Matériel

Bien sûr, on attend d'une telle alimentation qu'elle fournit non seulement une tension élevée (qui n'est pas à proprement parler une *haute* tension, puisqu'elle n'atteindra ni ne dépassera 1,5 kV CC). Si vous voulez alimenter des tubes, vous aurez besoin d'une tension de chauffage en plus de la tension de l'anode. Et pour les tracés de courbes caractéristiques, vous lui demanderez des tensions auxiliaires (grilles de contrôle et grille-écran indispensables). Toutes ces tensions et tous ces courants sont réglables.

La commande de la tension et du courant des différentes alimentations subalternes est constituée de quatre unités indépendantes et galvaniquement isolées qui peuvent fournir les tensions ou courants suivants :

- anode : 0...400 V ; 0...300 mA
- grille de contrôle : 0...100 V ; 0...30 mA
- grille-écran : 0...400 V ; 0...30 mA
- chauffage : 0...14 V ; 0...3 A

**La figure 1** montre le circuit global de l'alimentation, c'est-à-dire le câblage de ses différentes parties. Les différentes fonctions de l'alimentation sont situées sur la carte de distribution et les cartes auxiliaires.

## Distribution

L'ensemble dit de distribution est composé des redresseurs, des condensateurs de lissage et des fusibles pour les différentes cartes de commande. Le connecteur SV2 à 40 broches reliera l'alimentation HT aux ports d'E/S du Raspberry Pi et distribue les signaux SPI par X9...X12 aux cartes auxiliaires de commande.

En fonction de la tension de sortie, les relais K1 et K2 commutent sur les enroulements du transformateur 110, 220 ou 330 V pour réduire la dissipation de puissance dans le transistor en série. La commutation est effectuée par un logiciel au moyen des broches GPIO 20 et 21 du RPi (fig. 2).

## Régulation

Chaque carte de commande comporte des convertisseurs A/N et N/A pour le réglage

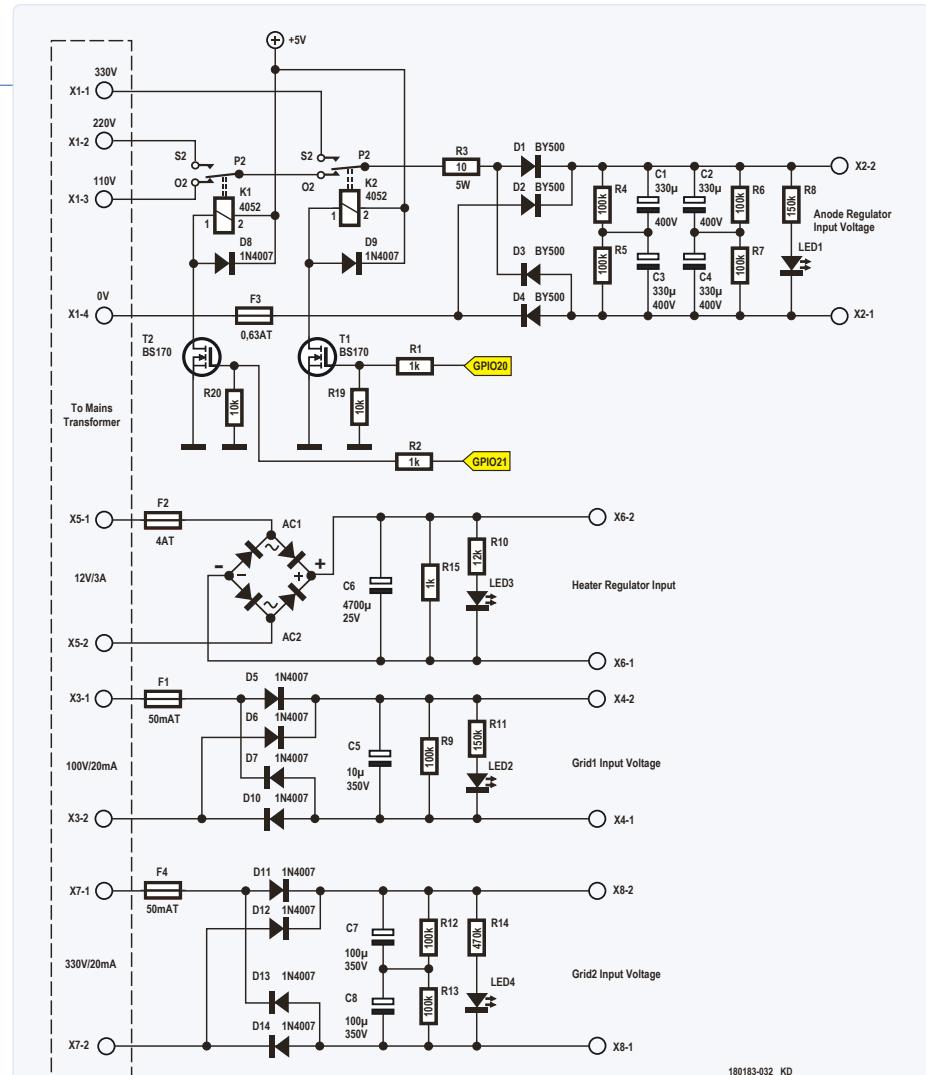


Figure 2. Le schéma du circuit de distribution.

et la mesure de la tension et du courant, qui communiquent avec le Raspberry Pi par l'interface SPI. Les signaux SPI sont isolés électriquement du mini-ordinateur.

## Principe du circuit

Le synoptique (fig. 3) montre le MOSFET T2 connecté comme régulateur en série de la tension de sortie. Pour permettre la commande de T2 par des amplis op ordinaires sous les tensions élevées que l'on trouve ici, le pôle positif de la tension de sortie est relié à la masse (GND) de l'alimentation de l'ampli op, qui fournit une tension symétrique de  $\pm 12$  V à cet effet.

Pour fixer les valeurs de consigne de courant et de tension, on fait appel au MCP4812, un CN/A à 2 voies avec une résolution de 10 bits. Ce CN/A a une tension de référence interne de 2,048 V, qui peut être doublée (4,096 V) par commande SPI. La tension de sortie est divisée par R17/R18 et la tension sur R18 est numérisée et envoyée au Raspberry Pi comme

valeur réelle par le convertisseur A/N à 12 bits LTC1298.

Pour la commande du courant, la chute de tension sur R1 est amplifiée cinq fois par un ampli op dont la tension est ensuite transmise au Raspberry Pi comme intensité réelle du courant par le deuxième canal du convertisseur A/N.

Pour l'isolation galvanique des signaux SPI MOSI, MISO, SCLK et LDAC ainsi que des lignes de sélection de circuit intégré pour les convertisseurs A/N et N/A, on fait appel à des optocoupleurs rapides de type 6N137, pilotés par un 74HC04.

L'alimentation de toutes les cartes de commande doit également être isolée galvaniquement. À cet effet, la sortie 5 V du Raspberry Pi alimente un convertisseur CC/CC TMA0512D par carte, qui délivre les  $\pm 12$  V nécessaires pour les amplis op.

Les valeurs réelles de tension et courant ne sont pas seulement présentes aux entrées du convertisseur A/N, mais aussi en retour aux deux amplis op pour la régulation de tension

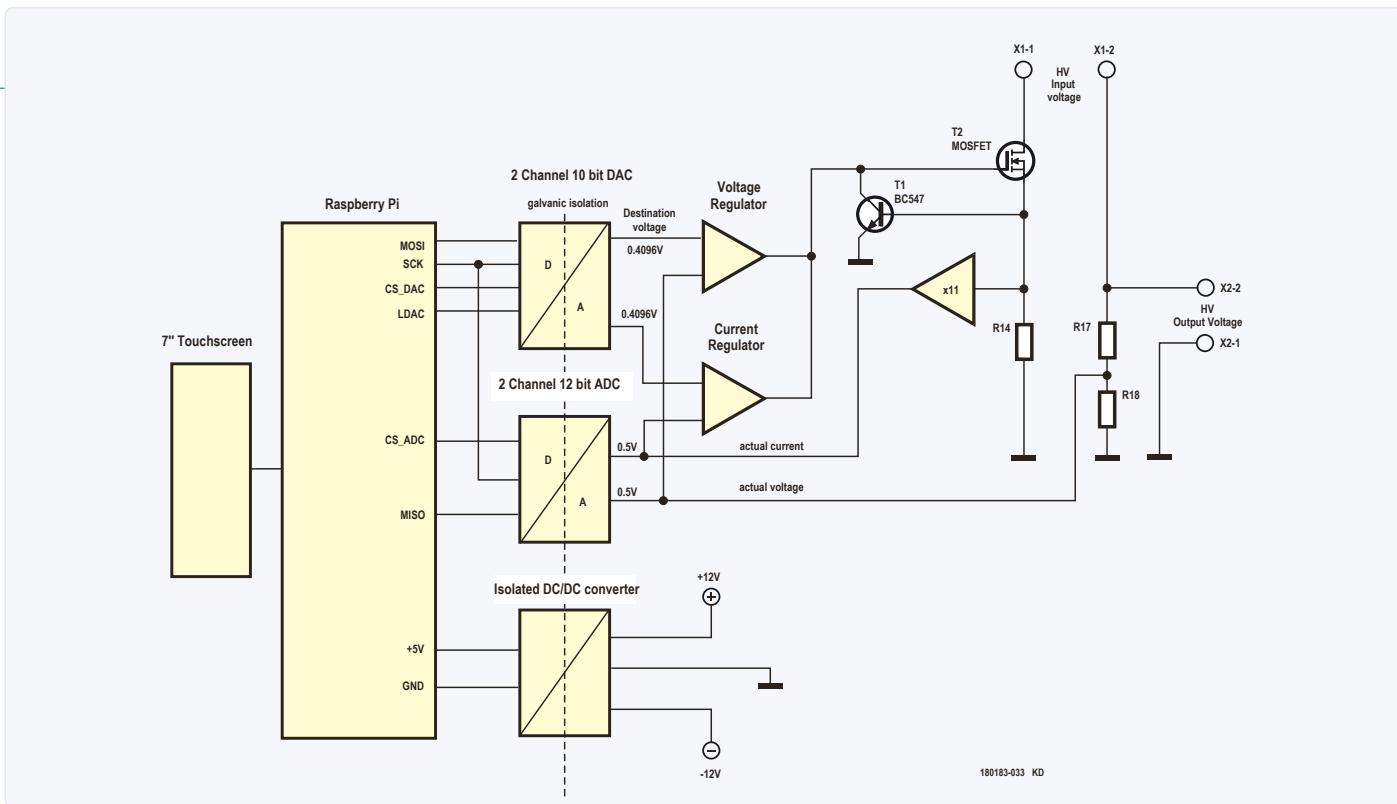


Figure 3. Le circuit principal de l'alimentation haute tension.

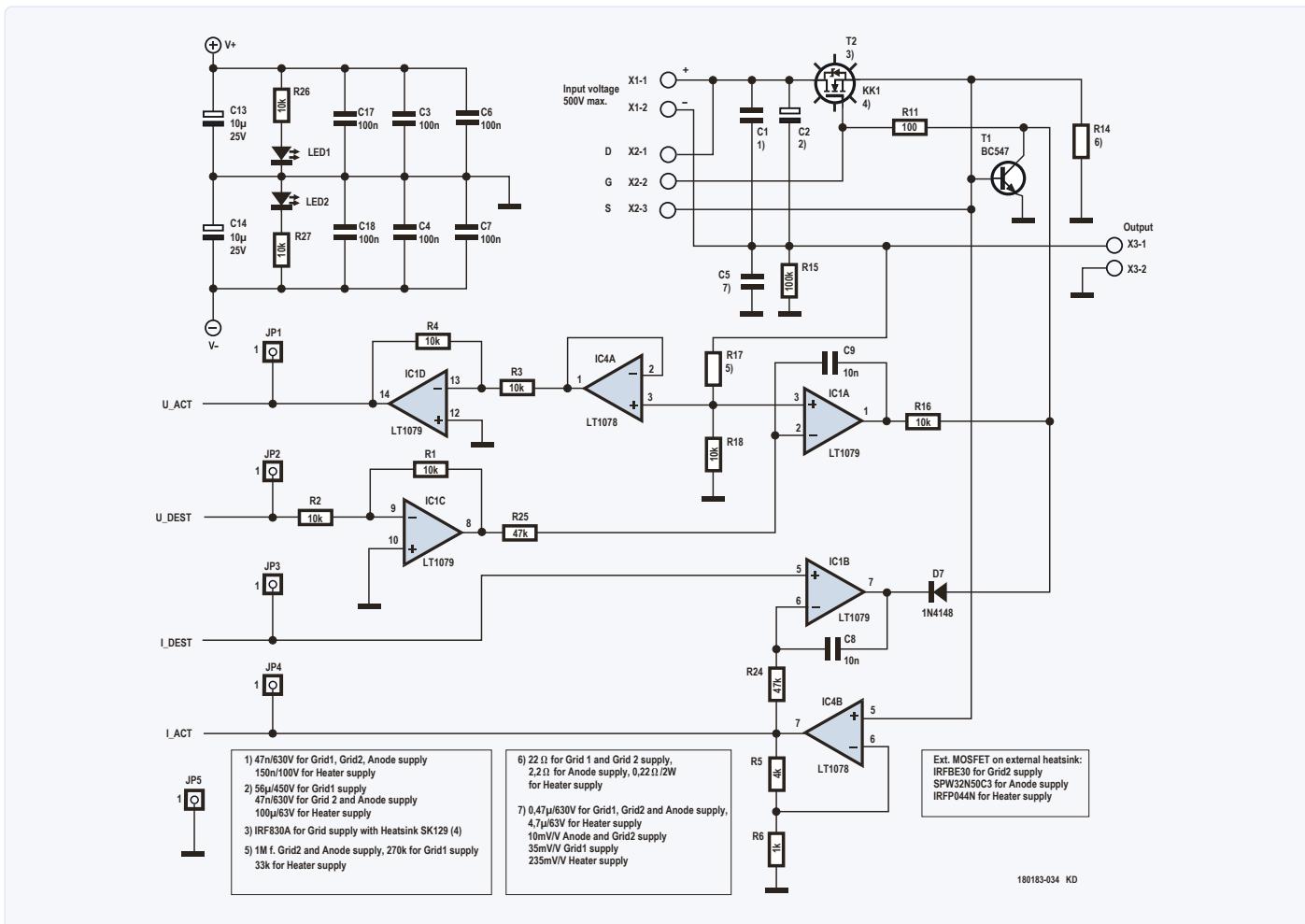


Figure 4a. Circuit de contrôle effectif de la carte de commande.

et de courant. Ces amplis op comparent les valeurs réelles avec les valeurs de consignes respectives des convertisseurs N/A. Le signal de correction de l'amplificateur du régulateur de tension qui en résulte commande alors la grille de T2. La régulation du courant entre en jeu si l'intensité mesurée dépasse la valeur de consigne. Il s'agit donc d'une commande à tension constante avec limitation de courant réglable.

En cas de court-circuit franc à la sortie, le comportement des régulateurs aura pour conséquence un bref dépassement de la valeur de consigne par le courant de sortie. Dans ce cas, la carte peut quitter la zone de sécurité dite SOA (*Safe Operating Area*) de T2 pour la tension anodique. Pour éviter cela, T1 limitera rapidement et radicalement le courant de sortie à un maximum de  $0,7V / R14 = 0,31A$ . La puissance dissipée est alors brièvement portée à  $465V * 0,31A = 144W$  jusqu'à ce que la tension d'entrée soit commutée à 110V par le logiciel. Selon sa fiche technique, T2 tolère une dissipation de puissance presque deux fois plus forte.

La **figure 4** montre le circuit des cartes de commande. La régulation du circuit a été simulée avec LTSpice. Le fichier *HVRegulator.asc* est disponible comme téléchargement gratuit sur la page de cet article [1] sur le site d'Elektor. Toutes les cartes de commande ont la même disposition, mais avec des valeurs

différentes pour les différentes tensions et courants (voir **tableau 1**).

## Raspberry Pi

Le Raspberry Pi qui avec son écran tactile de presque 18 cm assure la commande de régulation est alimenté lui-même par une toute petite

**Tableau 1.**

CARTE	C1	C2	C5	T2	R14	R17
<b>anode</b>	47 nF 630 V	47 nF 630 V	0,47 uF 630 V	SPW32N50C3 (KK $\leq 0,7$ k/W)	2,2 $\Omega$ 1 W	1 M $\Omega$
<b>grille de contrôle</b>	47 nF 630 V	56 uF 450 V	47 nF 630 V	IRF830A (KK SK129)	22 $\Omega$	270 k
<b>grille-écran</b>	47 nF 630 V	47 nF 630 V	47 nF 630 V	IRFB30E (KK $\leq 0,7$ k/W)	22 $\Omega$	1 M
<b>chauffage</b>	150 nF 100 V	100 nF 63 V	4,7 uF 63 V	IRFP044 (KK $\leq 0,7$ k/W)	0,22 $\Omega$ 2 W	33 k

\*  $R14 = 4,096V / (5 * I_{max})$

\*\*  $R17 = U_{max} * 2,441 k\Omega / V - 10 k\Omega$

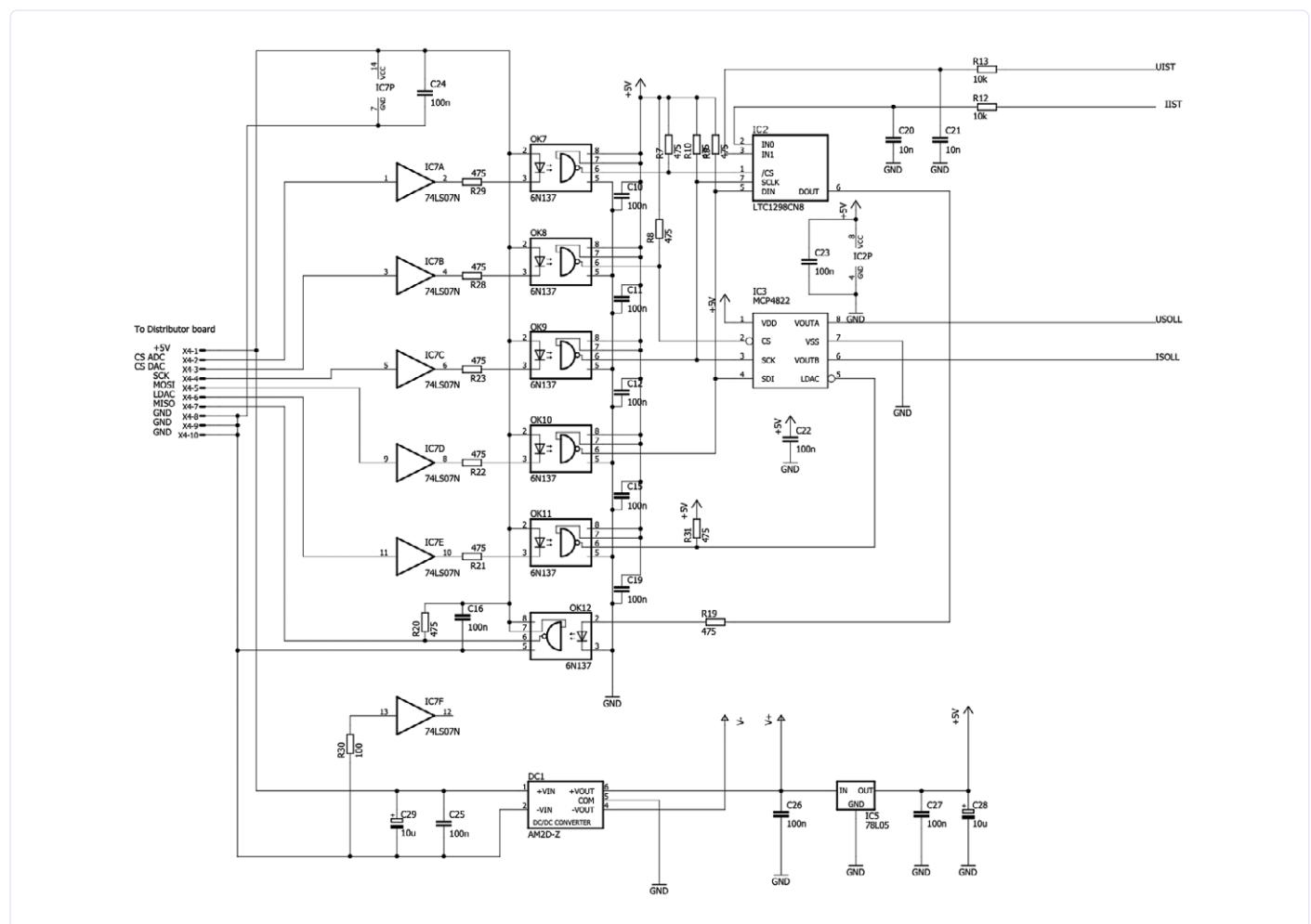


Figure 4b. Connexion de carte de commande à la carte de distribution.

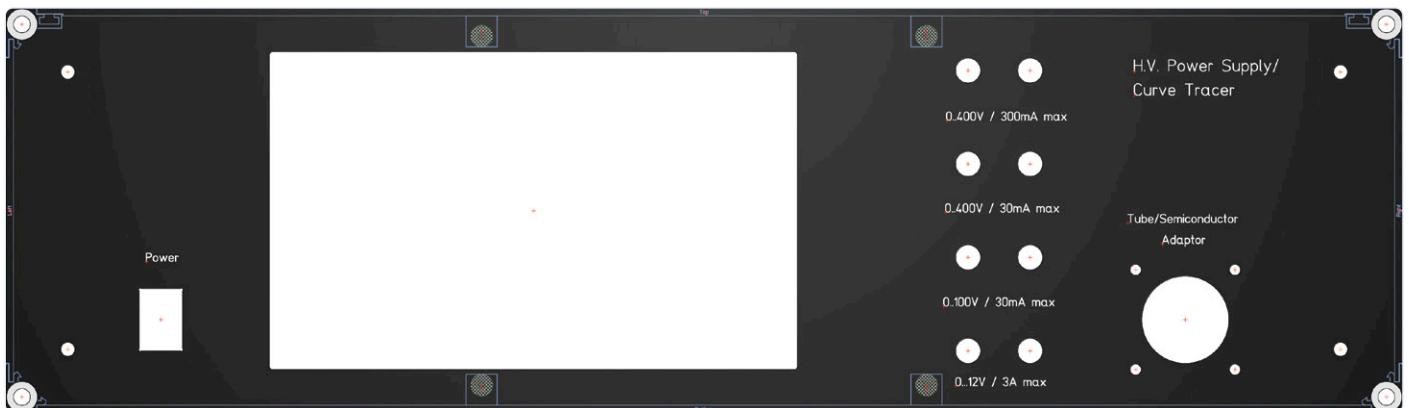


Figure 5. La face avant dessinée avec le programme FrontDesign.

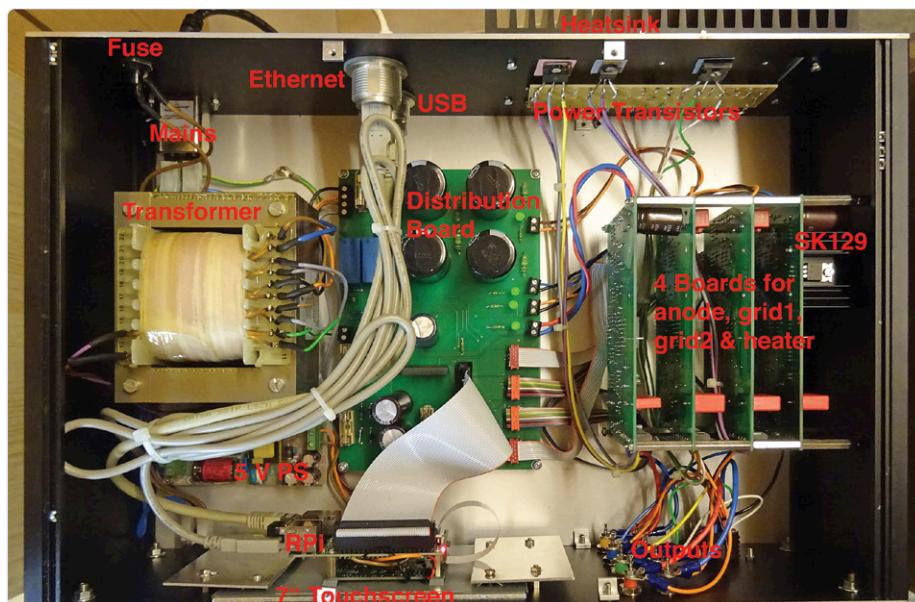


Figure 6. Les entrailles du prototype.

alimentation à découpage de 5 V – 2 A (3 A pour le RPi 4). La tension de sortie de cette alimentation doit être connectée directement au connecteur J8, car la chute de tension sur le connecteur micro-USB est trop forte.

## Construction

L'appareil a été monté dans un boîtier profilé, dessiné avec le programme FrontDesign, disponible gratuitement auprès de la société Schäffer [2] pour Windows, MacOS et Linux. La **figure 5** montre la façade. Les fichiers correspondants sont téléchargeables [1]. La **figure 6** montre le prototype vu de haut. On distingue notamment les quatre cartes de commande similaires sur la droite.

## Logiciels

Le logiciel Raspberry Pi a été créé en C++ pour Visual Studio de Microsoft [3]. Pour que le code fonctionne sur le Raspberry Pi, le compilateur croisé VisualGDB [4] est nécessaire, pour lequel il existe une version de test de 30 jours. Qt Designer [5] a permis de créer l'interface graphique.

Le fichier projet *HV\_PowerSupply.sln* joint au téléchargement [1] contient les paramètres nécessaires pour VisualGDB (**fig. 7**). Ici, vous devez indiquer qu'il s'agit d'un projet Linux. Le nom du projet et le répertoire du projet doivent aussi être précisés.

L'étape suivante consiste à définir le système comme un système basé sur Qt5 (**fig. 8**). Suit le paramétrage selon que le logiciel est créé sur le PC local ou sur le système cible (Raspberry Pi) (**fig. 9**). J'ai choisi le PC local, sinon le Raspberry Pi doit être allumé et connecté au PC pendant l'exécution du compilateur de liens. Puisque la bibliothèque WiringPi [6] est utilisée, elle doit également être spécifiée (**fig. 10**).

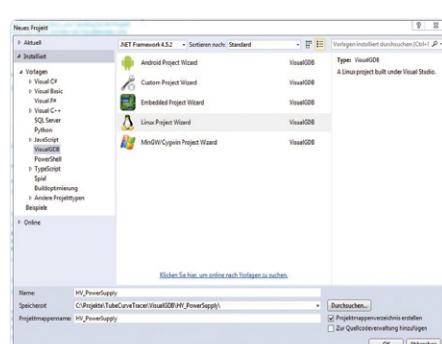


Figure 7. Paramétrage de VisualGDB en tant que projet Linux.

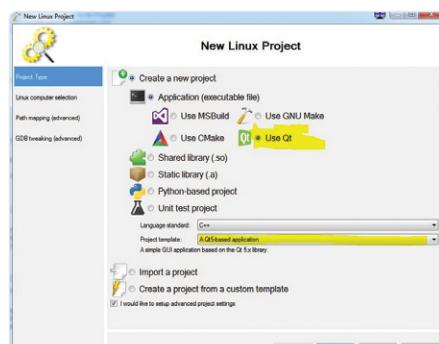


Figure 8. Il s'agit d'un système basé sur Qt5.

Une fois le logiciel créé, *HV\_PowerSupply* se trouve dans le dossier de débogage du projet sous la forme d'un fichier exécutable sur le Raspberry Pi. Le fichier doit maintenant être copié dans le répertoire */home/pi/HV\_PowerSupply* du Raspberry Pi, p. ex. avec WinSC [7]. Le fichier HV-PowerSupply-Icon *Tube.png* doit également être copié dans ce répertoire.

Pour lancer l'application depuis le bureau, le fichier *HV\_PowerSupply.desktop* doit être copié dans */home/pi/Desktop*. Si le programme doit démarrer automatiquement après la mise en marche, ce fichier doit également se trouver dans le répertoire */home/pi/.config/autostart*.

Pour un affichage correct des icônes haut/bas sur les boutons utilisés, il est nécessaire de copier les fichiers *collapse-arrow.png* et *expand-arrow.png* dans le répertoire */home/pi*. Si vous souhaitez afficher l'icône du tube dans la barre des tâches, le fichier *Tube.png* doit également être placé dans */home/pi*. Si vous souhaitez utiliser le logiciel sans modification, il vous suffit de copier les fichiers du téléchargement dans le Raspberry Pi comme décrit.

## Fichiers source

Si vous souhaitez modifier le logiciel, vous devez installer les progiciels décrits ci-dessus et copier les fichiers source de ce projet dans le répertoire */VisualGDB/HV\_PowerSupply/HV\_PowerSupply*. Le projet se compose des fichiers source suivants :

- *HV\_PowerSupply.cpp* : Programme principal (*MainWindow.cpp* est lancé).
- *MainWindow.cpp*, *MainWindow.h*, *ui\_MainWindow.h* : Fichiers source pour l'alimentation
- *CurveTracerWindow.cpp*, *CurveTracerWindow.h*, *ui\_CurveTracerWindow.h* : Fichiers source pour le traceur de courbes de tubes
- *TransistorCurveTracerWindow.cpp*, *TransistorCurveTracerWindow.h*, *ui\_TransistorCurveTracerWindow.h* : Fichiers sources pour le traceur de courbes de semi-conducteurs
- *Hardware.cpp*, *hardware.h* : fonctions partagées pour contrôler les convertisseurs D/A et A/D, utilise le *câblage de la bibliothèquePi*
- *Qcustomplot.cpp*, *qcustomplot.h* : Bibliothèque pour la représentation graphique des courbes caractéristiques. Pour s'assurer que cette bibliothèque est correctement traduite, la ligne

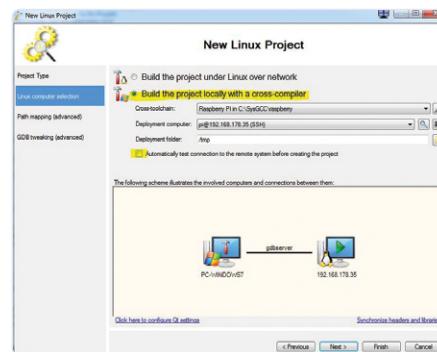


Figure 9. Logiciel pour PC ou système cible (RPI) ?

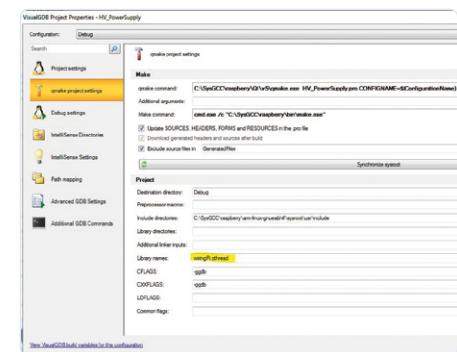


Figure 10. La bibliothèque WiringPi.

*QT += core gui xml printsupport*  
doit être ajoutée au fichier *debug.pro*.

Les fichiers *ui\_XXXX.h* sont produits par Qt Designer après que les interfaces graphiques des différents écrans ont été dessinées. La **figure 11** montre l'écran de l'alimentation. Le code source est produit en sélectionnant *Form-> Generate code* dans le menu. Il suffit ensuite de le stocker dans le répertoire source.

## Déroulement du programme

Lorsque le programme démarre, l'écran de l'alimentation s'affiche et le matériel est initialisé. Toutes les tensions et tous les courants sont initialement réglés sur 0. Il est maintenant possible de régler les tensions et les courants des différentes sorties. Cela peut se faire avec les boutons haut/bas de l'écran tactile, par une combinaison clavier/souris externe via USB ou par un clavier virtuel tel que le *Matchbox Keyboard* [9] (**fig. 12**).

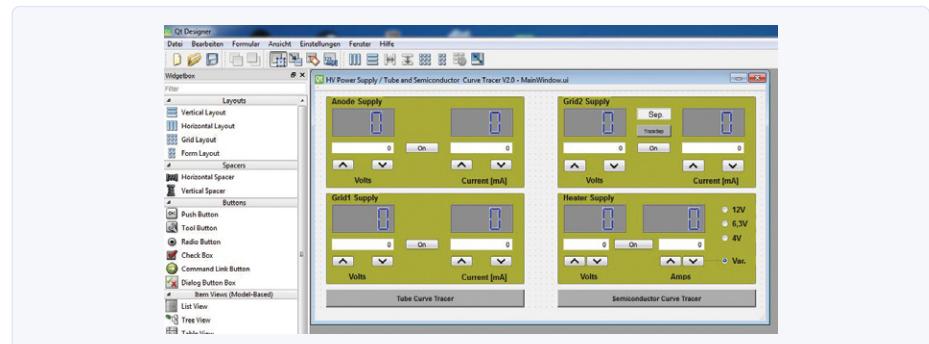


Figure 11. Maquette de l'écran de l'alimentation HT dans Qt Designer.

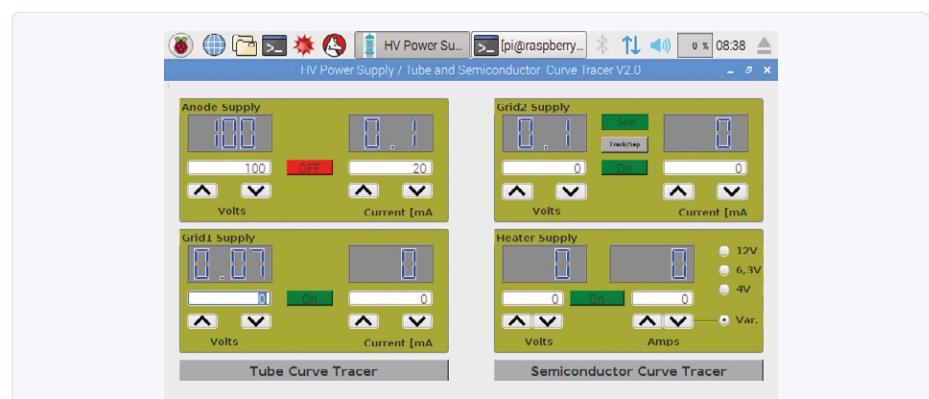


Figure 12. Interface graphique de l'alimentation HT.

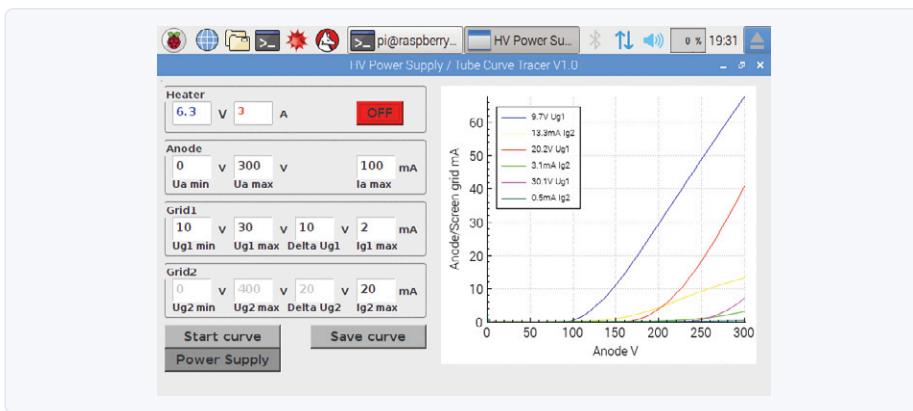


Figure 13. Interface graphique du traceur de courbes pour tubes.

Si la tension de la grille de l'écran doit suivre celle de l'anode, activez le mode de suivi avec le bouton *Track/Sep*. La tension de chauffage peut être réglée de 0 à 14 V avec *Var* ou être réglée sur les valeurs prédéfinies 4/6,3/12 V. Les boutons *On/Off* permettent d'activer ou de désactiver les différentes sorties individuellement.

### Enregistreur de caractéristiques de tubes

Le bouton *Tube Curve Tracer* active l'écran du traceur de courbes de tubes. Au début, toutes les tensions et tous les courants sont réglés sur 0.

Dans ce mode, les courbes caractéristiques des tubes sont enregistrées et, si nécessaire, sauvegardées sous forme de tableaux avec l'extension .csv, afin qu'elles puissent être lues directement (p. ex. Excel). Des valeurs minimales et maximales pour l'anode et la tension de commande peuvent être spécifiées pour la courbe caractéristique. Des valeurs maximales peuvent être fixées pour le courant de l'anode, de la grille de contrôle et de la grille de l'écran. La tension de la grille de l'écran suit la tension de l'anode. Un maximum de cinq courbes caractéristiques peut être affiché.

La **figure 13** montre les courbes caractéristiques enregistrées d'un tube EL34. Les courbes contiennent le courant d'anode en fonction de la tension d'anode avec la tension du réseau de commande comme paramètre. Les courants de grille d'écran correspondants sont également enregistrés.

Les données de la courbe caractéristique peuvent être enregistrées en appuyant sur le bouton *Enregistrer la courbe*. Une boîte de dialogue permettant d'enregistrer le fichier de courbe s'ouvre alors et vous pouvez l'enregistrer dans un fichier portant l'extension .csv. Les fichiers peuvent être copiés sur le PC avec, par exemple, WinSCP et traités ultérieurement avec Excel. Le téléchargement [1] contient le fichier d'exemple *EL34.csv*.

Pour tester les tubes de l'étage de puissance EL34, j'ai construit un adaptateur (fig. 15) qui peut être facilement connecté au traceur de courbes par un câble (**fig. 14**).

Avec d'autres socles, vous pouvez construire des adaptateurs pour d'autres types de tubes selon le même principe. Vous pouvez aussi connecter le tube à tester directement aux bornes de l'alimentation.



Figure 14. Adaptateur de tube pour EL34.

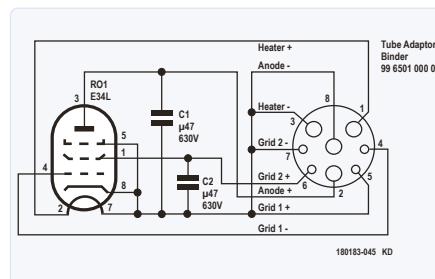


Figure 15. Schéma de l'adaptateur pour tube.

### Courbes caractéristiques de semi-conducteurs

Le bouton *Semiconductor Curve Tracer* affiche l'écran du même nom. La **figure 16** montre un exemple du comportement d'un transistor bipolaire bloqué à base ouverte. Des adaptateurs appropriés sont également très utiles pour les semi-conducteurs. La **figure 17** montre le circuit de l'adaptateur pour semi-conducteur et la **figure 18** le dispositif fini.

Le connecteur SV1 représente la connexion au traceur de courbes. La tension de chauffage alimente les relais K1 et K2, qui effectuent la commutation PNP/NPN ou NMOS/PMOS. La tension du réseau de commande est utilisée pour K3. Ce relais commute le courant de base ou la tension de grille. La tension d'anode est utilisée pour alimenter le collecteur/émetteur ou le drain/source. Pour tester les diodes Z, l'anode sera connectée au pôle négatif et la cathode au pôle positif de la tension d'anode.

Pour tester les transistors bipolaires, la tension de grille de l'écran est utilisée pour produire le courant de base. Cette tension est limitée par R2 et R3 à 4 mA sous 400 V. Pour tester les MOSFET, R1 est connecté comme diviseur de tension pour créer la tension de grille. D3 et D4 limitent  $U_{GS}$  à un maximum de 19 V.

### Diodes Z et $U_{ce\ max}$ des transistors bipolaires

Après avoir sélectionné *diode Zener*, le texte des champs  $U_{ce\ max}$  et  $I_{c\ max}$  devient  $U_z$  et  $P_{max}$  (fig. 16), car la puissance maximale est généralement spécifiée pour les diodes Zener. Après avoir appuyé sur le bouton *Start curve*, la tension d'anode est augmentée de 0... $U_z$  et au maximum jusqu'à  $P_{max}$  (selon celui qui sera atteint d'abord). Si le courant traversant la diode Z à  $U_z$  est inférieur à 1 % du courant Z maximum, le message d'erreur de la **fig. 20** est affiché. Dans ce cas, c'est soit

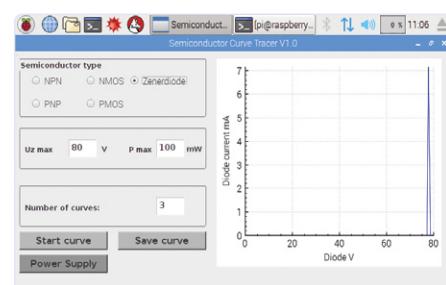


Figure 16. Tension maximale collecteur-émetteur d'un BC547C testé.

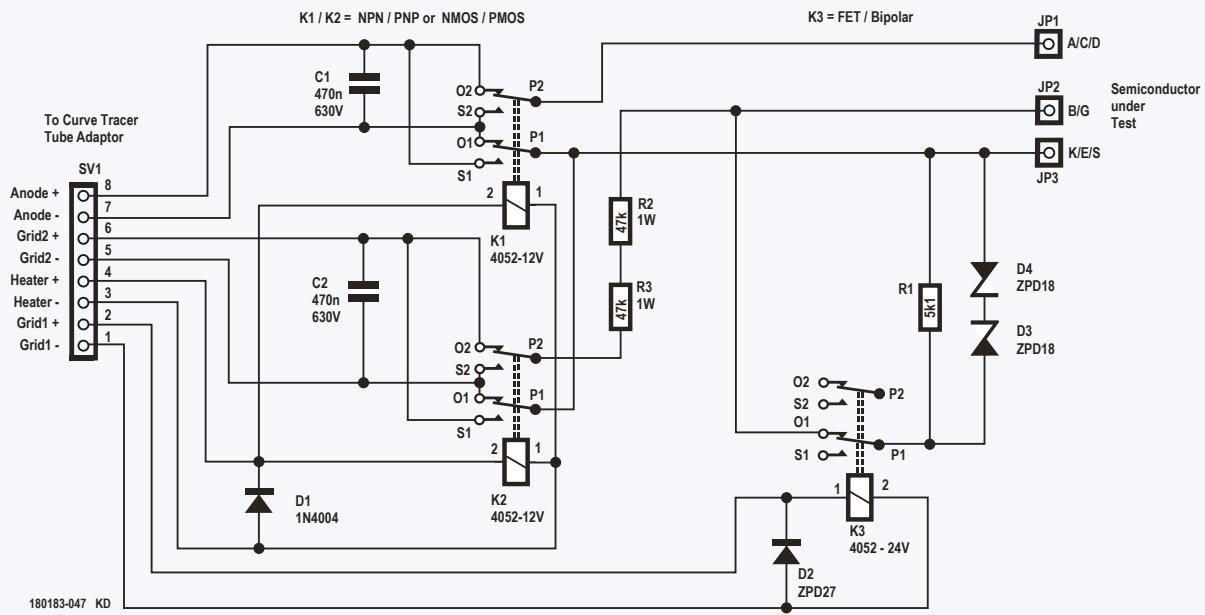


Figure 17. Circuit de l'adaptateur pour semi-conducteur.

la diode Z qui est défectueuse, soit il faut augmenter  $U_Z$ .

En raison de la tension d'anode élevée possible, la tension maximale collecteur-émetteur de nombreux transistors bipolaires peut également être testée avec une base ouverte ( $= U_{ceo\ max}$ ). La courbe de la figure 16 a été créée lors de l'essai d'un BC547C. Bien que la fiche technique n'indique que 45 V, ce transistor a atteint un  $U_{ceo}$  maximum de >75 V.

## Test des transistors bipolaires

Pour les transistors bipolaires, il faut choisir : *NPN* ou *PNP*.  $U_{ce\ max}$  et  $I_{c\ max}$  et le nombre de courbes caractéristiques peuvent être définis. Après le démarrage, le logiciel vérifie si un courant de collecteur de forte intensité circule déjà, même sans courant de base. Dans ce cas, le test se termine par un message d'erreur. Sinon,  $U_{ce\ max}$  est réglé sur la valeur sélectionnée et le courant de base est augmenté jusqu'à ce que  $I_{c\ max}$  soit atteint. Si le courant de collecteur réglé ne peut pas être atteint avec le courant de base maximum de 4 mA, un message d'erreur le signale.

Les courbes caractéristiques  $I_c = f(U_{ce})$  sont ensuite affichées avec les courants de base associés, qui sont indiqués dans la légende. Avec le bouton *Enregistrer la courbe*, les données des courbes caractéristiques de  $I_c$ ,  $I_b$  et  $U_{ce}$  peuvent être enregistrées dans un fichier avec l'extension *.csv*.

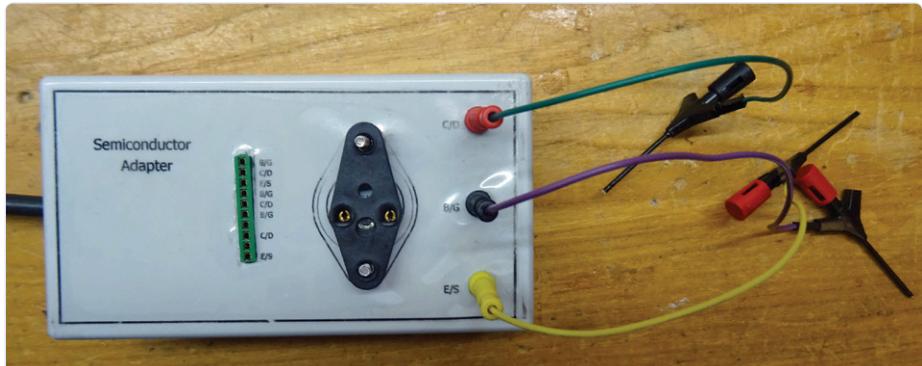


Figure 18. Adaptateur pour semi-conducteur de l'extérieur.



Figure 19. Adaptateur pour semi-conducteur de l'intérieur.



Figure 21. Prototype vu de face.

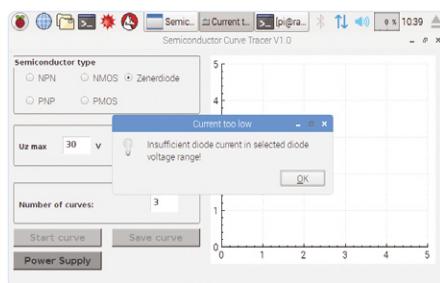


Figure 20. Message d'erreur lorsque l'intensité du courant à travers la diode Z est trop faible.

du transistor testé de 120 W ! Il est essentiel que les spécifications SOA de la fiche technique soient respectées, et le transistor en cours de test peut avoir besoin de refroidissement.

coffret, les fichiers LTSpice ainsi que le code source complet (disponibles pour un usage privé). Pour finir, la **fig. 21** donne une bonne impression de l'apparence du prototype. ↗

180183-02

### Voir aussi

Le téléchargement gratuit [1] contient les fichiers des cartes au format *Eagle*, y compris les listes de composants, les cotes pour le

## Test des MOSFET

Avec les MOSFET, vous devez choisir entre *NMOS* et *PMOS*. Les valeurs maximales pour  $U_{ds\ max}$  et  $I_{d\ max}$  et le nombre de caractéristiques peuvent être fixées. Après le démarrage, le logiciel vérifie si un courant de drain circule déjà à  $U_{gs} = 0$ . Dans ce cas, le test se termine par un message d'erreur. Sinon, la valeur de  $U_{ds\ max}$  est fixée et  $U_{gs}$  est augmenté jusqu'à ce que  $I_{d\ max}$  soit atteint. Si le courant de drain maximal ne peut être atteint à  $U_{gs\ max} = 18$  V, un message d'erreur s'affiche également.

Les courbes caractéristiques  $I_d = f(U_{ds})$  sont affichées avec les tensions de grille correspondantes, qui sont indiquées dans la légende. Le bouton *Enregistrer la courbe* permet de sauvegarder les données des courbes caractéristiques de  $I_d$ ,  $U_{gs}$  et  $U_{ds}$  dans un fichier portant l'extension *.csv*.

### Attention !

Veillez au réglage du courant maximal drain/collecteur et de la tension maximale drain-source ou collecteur-émetteur !

Un réglage de 400 V pour un courant de 300 mA entraîne une dissipation de puissance



## PRODUITS

- **Raspberry Pi 4 B (2 Go RAM)**  
[www.elektor.fr/raspberry-pi-4-b-2-gb-ram](http://www.elektor.fr/raspberry-pi-4-b-2-gb-ram)
- **écran tactile de 7 pouces pour Raspberry Pi**  
[www.elektor.fr/joy-it-7-touchscreen-for-raspberry-pi](http://www.elektor.fr/joy-it-7-touchscreen-for-raspberry-pi)
- **JOY-iT JT-RD6006 DC Power Supply Bundle (360 W)**  
[www.elektor.fr/joy-it-jt-rd6006-dc-power-supply-bundle](http://www.elektor.fr/joy-it-jt-rd6006-dc-power-supply-bundle)



## LIENS

- [1] Téléchargement associé à cet article : [www.elektormagazine.fr/180183-02](http://www.elektormagazine.fr/180183-02)
- [2] **FrontDesign** : [www.schaeffer-ag.de/fr/designer-de-faces-avant](http://www.schaeffer-ag.de/fr/designer-de-faces-avant)
- [3] **Visual Studio** : <https://visualstudio.microsoft.com/fr/downloads/>
- [4] **Compilateur croisé pour RPi** : <https://visualgdb.com/download/>
- [5] **Qt Designer** : <https://build-system.fman.io/qt-designer-download>
- [6] **WiringPi** : <http://wiringpi.com/>
- [7] **WinSCP** : <https://winscp.net/eng/download.php>
- [8] **QCustomPlot** : [www.qcustomplot.com/index.php/download](http://www.qcustomplot.com/index.php/download)
- [9] **Matchbox-Keyboard** : <https://github.com/xlab/matchbox-keyboard>