

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

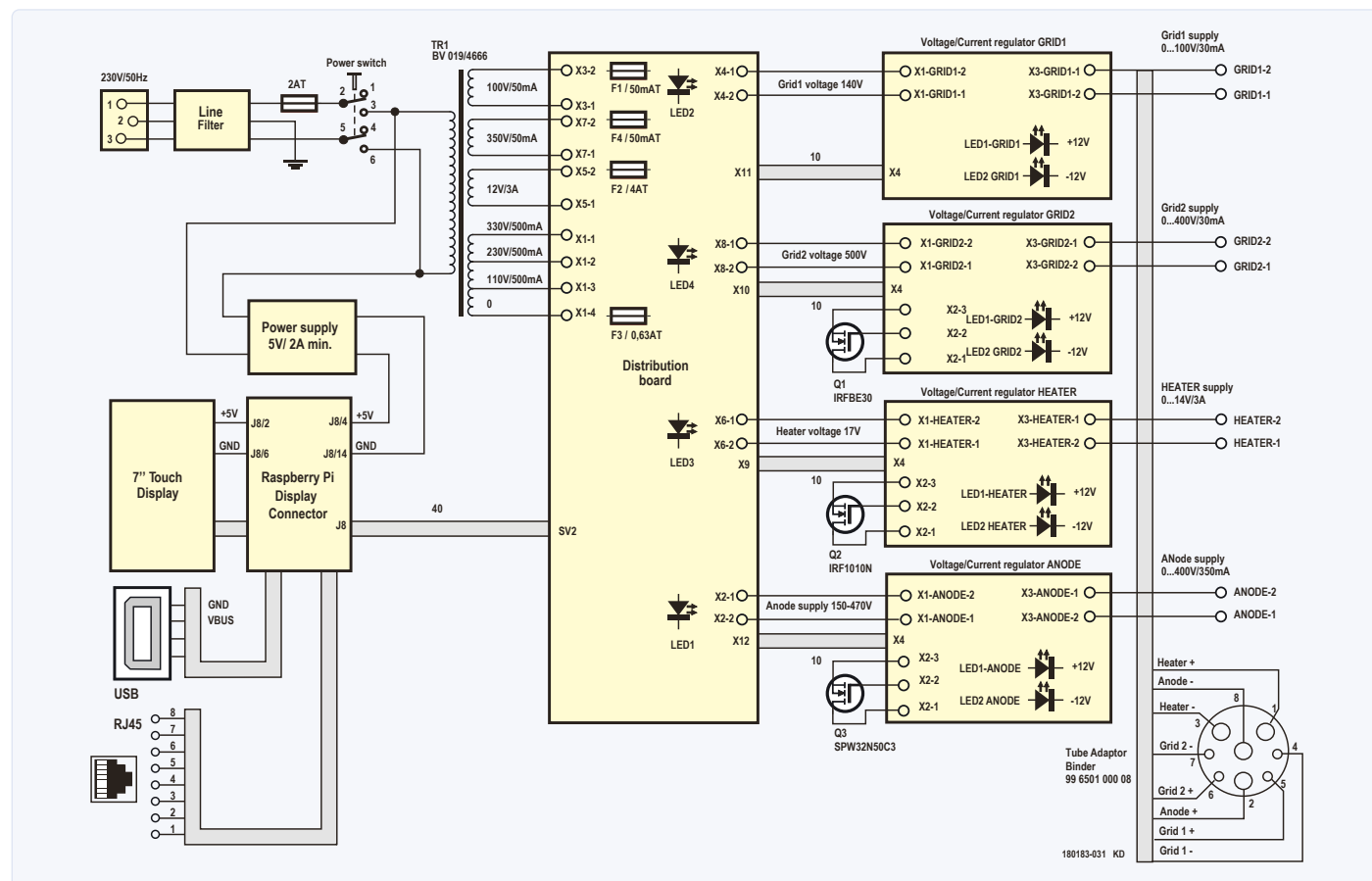


Figure 1. Synoptique de l'alimentation haute tension, avec l'interconnexion des différentes sections.

elektor septembre/octobre 2020 93

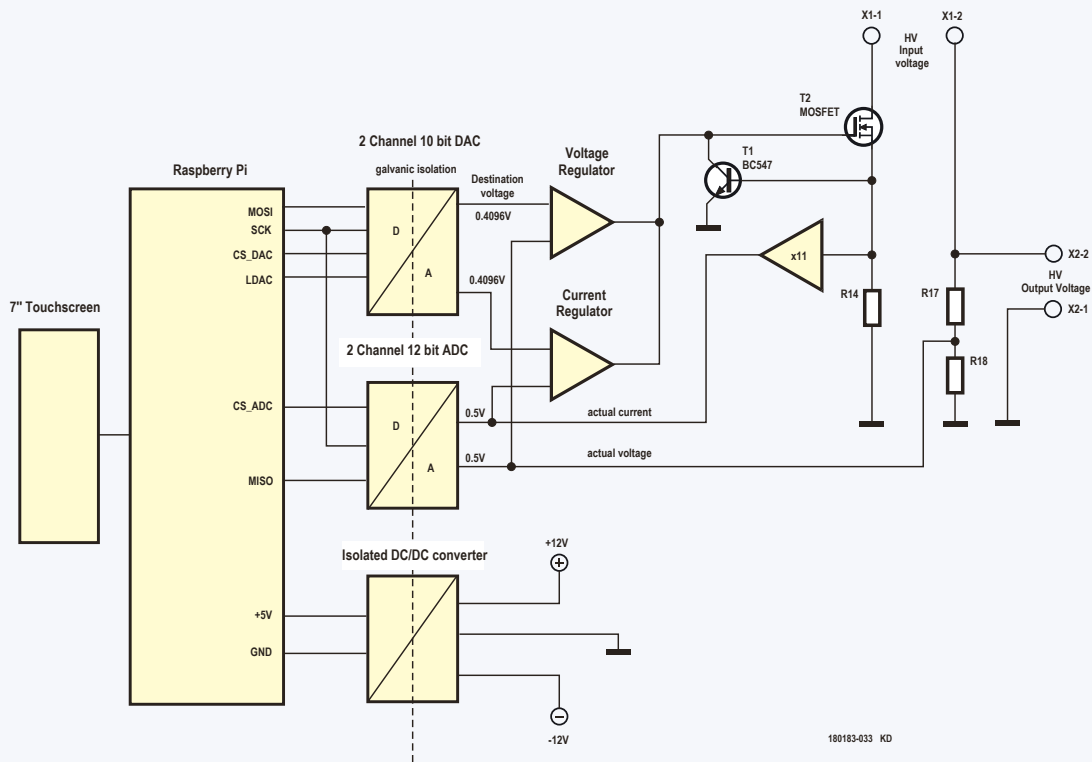


Figure 3. Le circuit principal de l'alimentation haute tension.

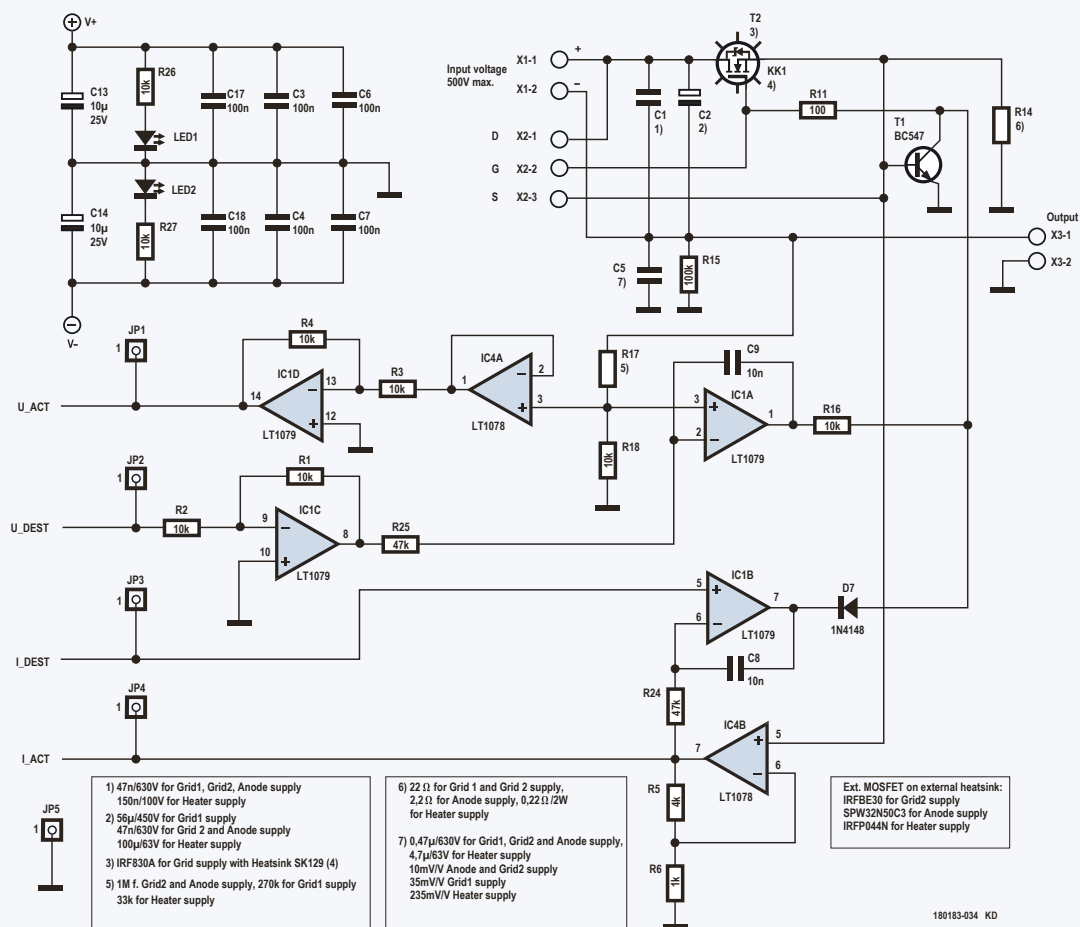


Figure 4a. Circuit de contrôle effectif de la carte de commande.

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 0,7 V / R14 = 0,31 A. La puissance dissipée est alors brièvement portée à 465 V * 0,31 A = 144 W jusqu'à ce que la tension d'entrée soit commutée à 110 V 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
anode	47 nF 630 V	47 nF 630 V	0,47 uF 630 V	SPW32N50C3 (KK ≤ 0,7 k/W)	2,2 Ω 1 W	1 MΩ
grille de contrôle	47 nF 630 V	56 uF 450 V	47 nF 630 V	IRF830A (KK SK129)	22 Ω	270 k
grille-écran	47 nF 630 V	47 nF 630 V	47 nF 630 V	IRFBE30 (KK ≤ 0,7 k/W)	22 Ω	1 M
chauffage	150 nF 100 V	100 nF 63 V	4,7 uF 63 V	IRFP044 (KK ≤ 0,7 k/W)	0,22 Ω 2 W	33 k

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

** R17 = U_{max} * 2,441 kΩ / V - 10 kΩ

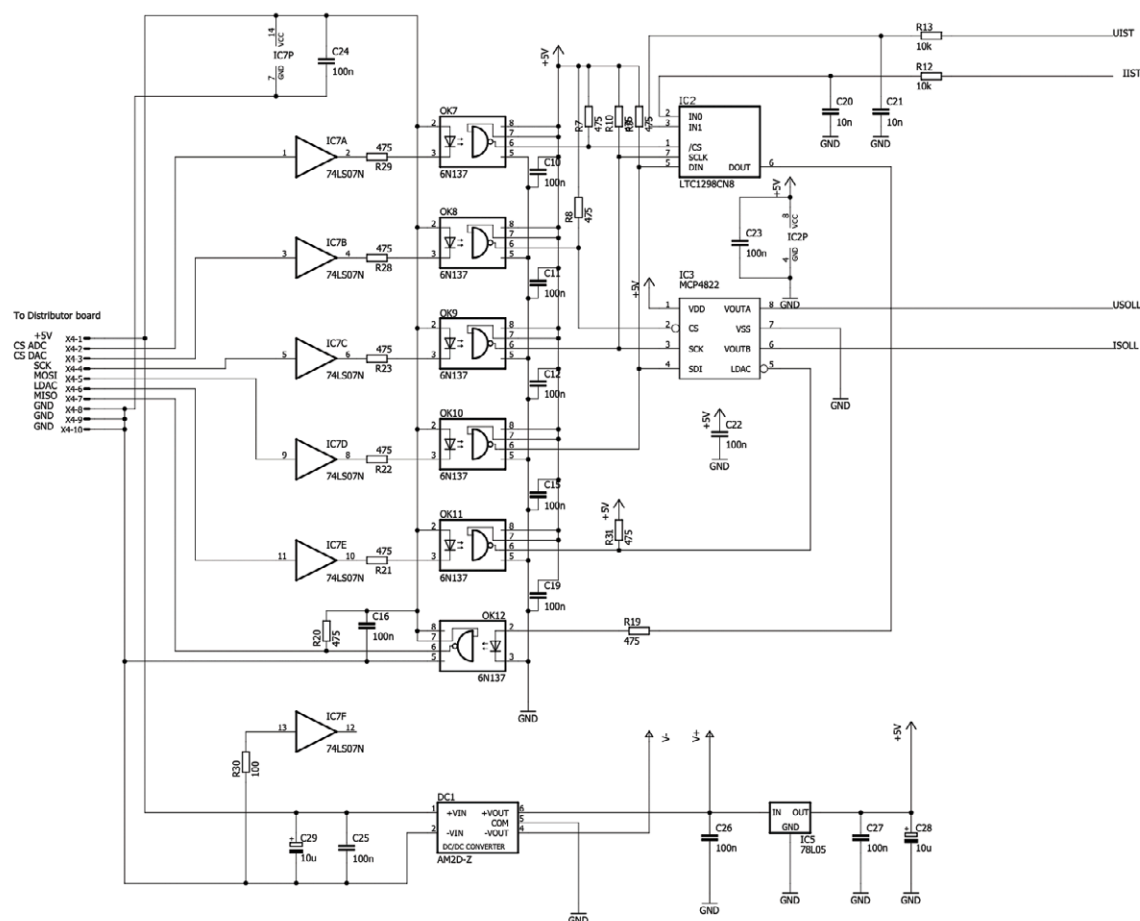


Figure 4b. Connexion de carte de commande à la carte de distribution.

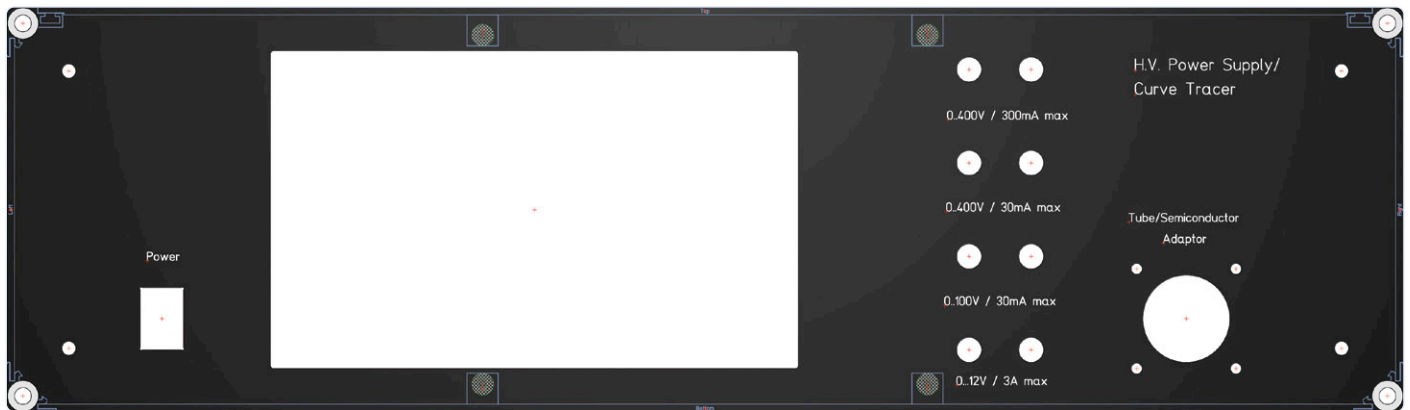


Figure 5. La face avant dessinée avec le programme FrontDesign.

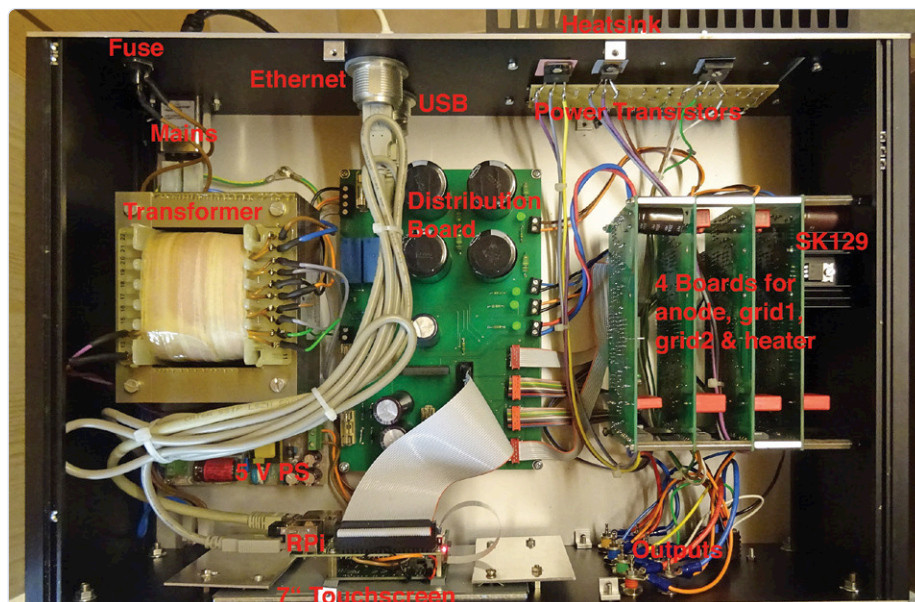


Figure 6. Les entrailles du prototype.

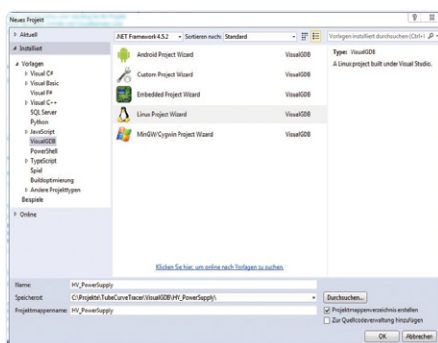


Figure 7. Paramétrage de VisualGDB en tant que projet Linux.

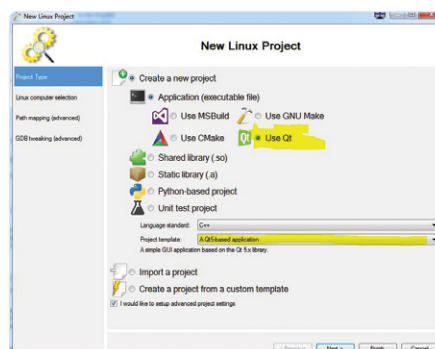


Figure 8. Il s'agit d'un système basé sur Qt5.

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**).

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.

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



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.

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).



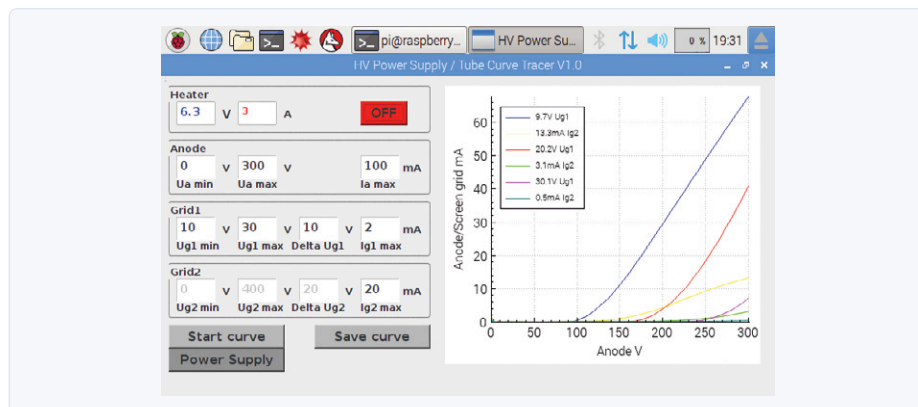


Figure 13. Interface graphique du traceur de courbes pour tubes.

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.

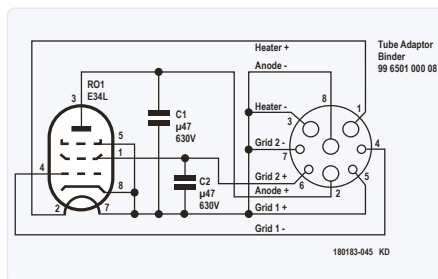


Figure 15. Schéma de l'adaptateur pour tube.

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

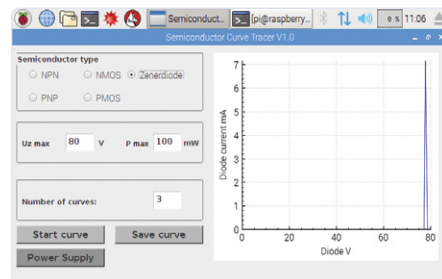


Figure 16. Tension maximale collecteur-émetteur d'un BC547C testé.

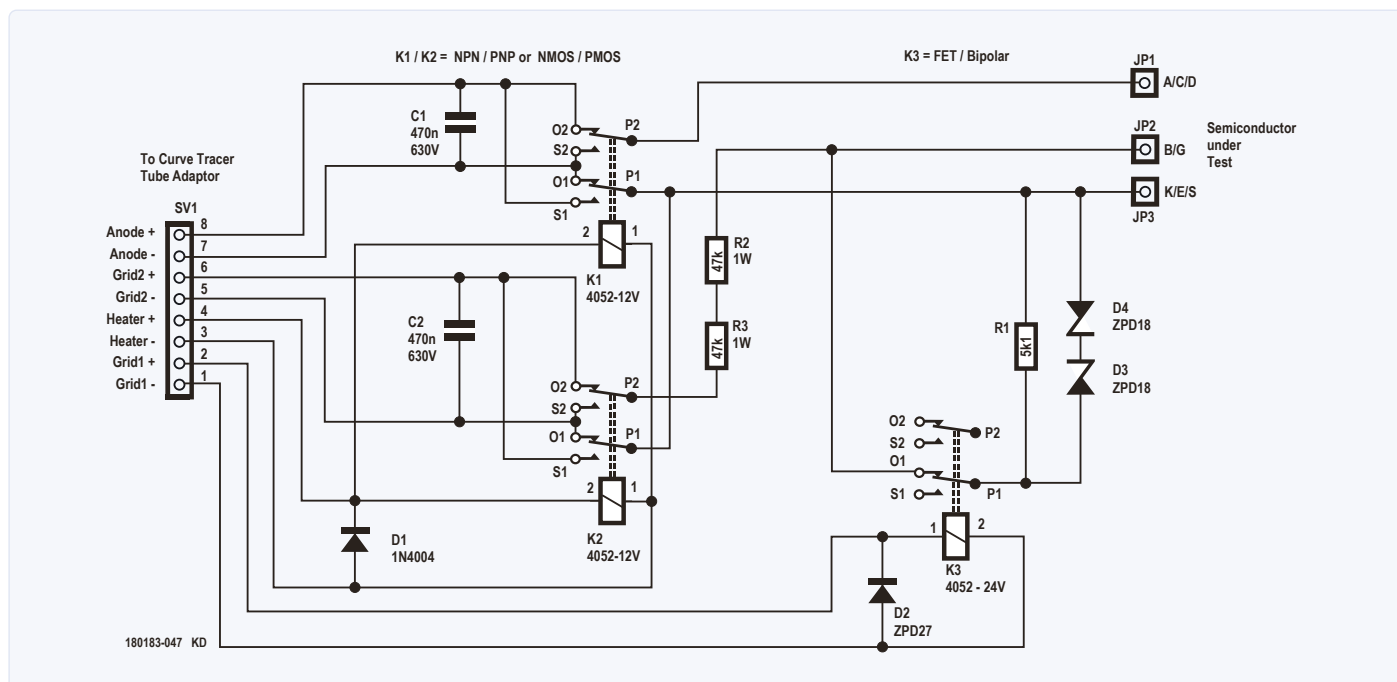


Figure 17. Circuit de l'adaptateur pour semi-conducteur.

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 ($= U_{ce0 \text{ max}}$). 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_{ce0} maximum de >75 V.

Test des transistors bipolaires

Pour les transistors bipolaires, il faut choisir : **NPN** ou **PNP**. $U_{ce \text{ max}}$ et $I_{c \text{ max}}$ 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, $U_{ce \text{ max}}$ est réglé sur la valeur sélectionnée et le courant de base est augmenté jusqu'à ce que $I_{c \text{ max}}$ 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.

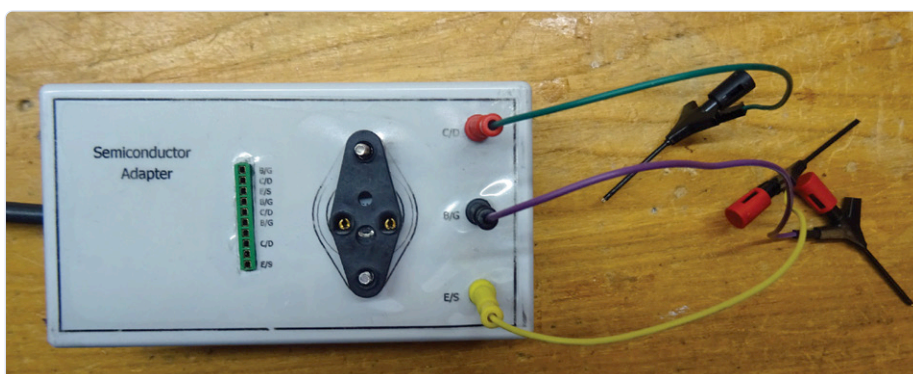


Figure 18. Adaptateur pour semi-conducteur de l'extérieur.

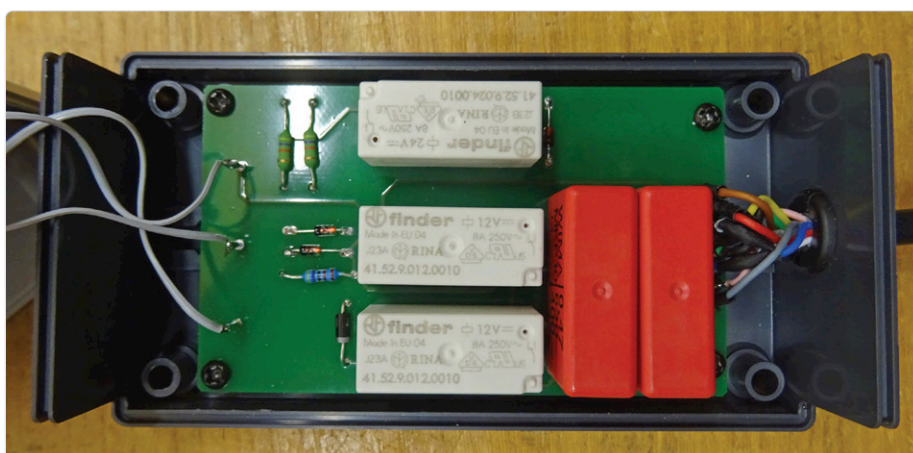


Figure 19. Adaptateur pour semi-conducteur de l'intérieur.



Figure 21. Prototype vu de face.

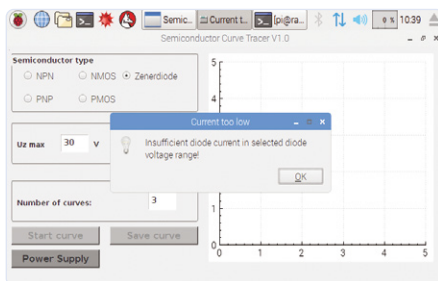


Figure 20. Message d'erreur lorsque l'intensité du courant à travers la diode Z est trop faible.

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

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.

Voir aussi

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

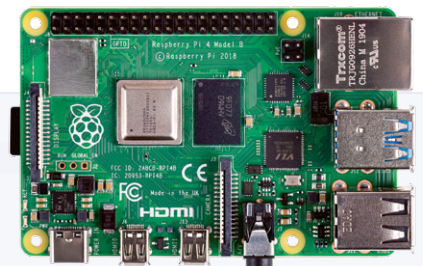
coffret, les fichiers LTSpice ainsi que le code source complet (disponibles pour un usage privé). Pour finir, la **fig. 21** donne une bonne impression de l'apparence du prototype. ▶

180183-02



PRODUITS

- **Raspberry Pi 4 B (2 Go RAM)**
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
- **JOY-iT JT-RD6006 DC Power Supply Bundle (360 W)**
www.elektor.fr/joy-it-jt-rd6006-dc-power-supply-bundle



LIENS

- [1] Téléchargement associé à cet article : www.elektormagazine.fr/180183-02
- [2] **FrontDesign** : 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
- [9] **Matchbox-Keyboard** : <https://github.com/xlab/matchbox-keyboard>