Puit de courant

**Table des matières**

[1 Cahier des charges 3](#_Toc164424114)

[2 Planification 3](#_Toc164424115)

[3 Analyse 3](#_Toc164424116)

[3.1 Analyse de l'existant 3](#_Toc164424117)

[3.2 Prise de décisions 3](#_Toc164424118)

[4 Conception 3](#_Toc164424119)

[4.1 Schémas 3](#_Toc164424120)

[4.2 Dimensionnement de composants 3](#_Toc164424121)

[4.3 Design de PCB 4](#_Toc164424122)

[5 Réalisation 5](#_Toc164424123)

[5.1 Instructions de fabrication 5](#_Toc164424124)

[5.1.1 Référentiel de production 5](#_Toc164424125)

[5.1.2 Identification des dangers et mesures de protection/sécurité 5](#_Toc164424126)

[5.1.3 Qualification du personnel 5](#_Toc164424127)

[5.1.4 Liste des équipements et outillages 5](#_Toc164424128)

[5.1.5 Consommables 5](#_Toc164424129)

[5.1.6 Instruction de travail 5](#_Toc164424130)

[5.1.7 Enregistrements qualité 5](#_Toc164424131)

[5.1.8 Prochaine étape 6](#_Toc164424132)

[6 Tests 7](#_Toc164424133)

[6.1 Mise en service 7](#_Toc164424134)

[6.1.1 But 7](#_Toc164424135)

[6.1.2 Liste de matériel 7](#_Toc164424136)

[6.1.3 Schéma électrique 7](#_Toc164424137)

[6.1.4 Schéma de mesures 7](#_Toc164424138)

[6.1.5 Conditions de mesures 8](#_Toc164424139)

[6.1.6 Marche-à-suivre 8](#_Toc164424140)

[6.1.7 Résultats 9](#_Toc164424141)

[6.1.8 Décision 9](#_Toc164424142)

[6.2 Rapport de test 10](#_Toc164424143)

[6.2.1 But 10](#_Toc164424144)

[6.2.2 Schéma de mesure 10](#_Toc164424145)

[6.2.3 Liste de matériel 10](#_Toc164424146)

[6.2.4 Tableau de mesure 11](#_Toc164424147)

[6.2.5 Conclusion 11](#_Toc164424148)

[6.3 Évaluation du projet 12](#_Toc164424149)

[6.4 État d'avancement du projet 12](#_Toc164424150)

[6.5 Travaux restants à effectuer 12](#_Toc164424151)

[6.6 Améliorations 12](#_Toc164424152)

[7 Conclusion 12](#_Toc164424153)

[Annexe A Planification 13](#_Toc164424154)

[A.1 Journal de travail 13](#_Toc164424155)

[A.2 Planification et suivi 13](#_Toc164424156)

[Annexe B Documents de production 13](#_Toc164424157)

[B.1 Schémas 13](#_Toc164424158)

[B.2 Plan d'implantation 13](#_Toc164424159)

[B.3 Maquette PCB 13](#_Toc164424160)

[B.4 Liste de pièces 13](#_Toc164424161)

[Annexe C Autres documents 13](#_Toc164424162)

[C.1 Rapport R&D pré-TPI 13](#_Toc164424163)

[C.2 Autocontrôle de la qualité de l’assemblage 13](#_Toc164424164)

**Versions**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Version** | **Date** | **Auteur** | **Remarques** |
| 00 | AAAA-MM-JJ | Alyx Vasseur | Version initiale |

# Cahier des charges

L’objectif de ce travail de TPI est de réaliser une carte de puit de courant réglable. Le design est tiré d’un article paru dans le magazine Elektor numéro 503 à la page 42. Pour plus de détail, consulter le cahier des charges numéro 1438.3001.00.

# Planification

|  |  |
| --- | --- |
| ***Liste des tâches*** | ***Durée*** |
| Routage et commande de PCB | 15H40 |
| Fabrication et mise en service | 13H20 |
| Documentation et administratif | 17H00 |
| Total | 46H00 |

Planification complète, voir Planification

# Analyse

## Analyse de l'existant

Lors du pré-TPI, j’ai déjà analysé la réalisation de l’article d’Elektor et réalisé un schéma adapté dans Altium, et commandé les composants adaptés. Le détail de ce travail se trouve dans le document numéro 1438.3500.00.

## Prise de décisions

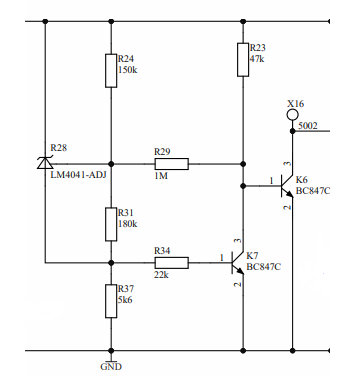
J’ai choisi de partir sur une conception de PCB sur deux faces, avec des composants THT et SMD sur la face avant uniquement. Ainsi, la fabrication et le dépannage sont simplifiés et le stockage dans des racks est potentiellement plus simple. J’ai décidé d’organiser le PCB de la manière qui me semblait le plus ergonomique possible : Les connexions à l’alimentation et le fusible sur la gauche, et les réglages et points de connexion pour les instruments de mesure sur la droite. J’ai décidé de mettre des points de mesure à anneaux sur tous les points où une mesure au voltmètre serait envisageable, et des picots jumpers à tous les endroits où une mesure à l’oscilloscope serait envisageable. J’ai également fait attention à ne placer aucun trimmer ou jumper immédiatement derrière un dissipateur thermique, ce qui rendrait moins pratique l’utilisation.

C’est une configuration qui favorise évidemment les utilisateurs droitiers, car il est plus compliqué de manipuler le bord droit de la carte de la main gauche. Cependant, une fois l’alimentation connectée, tourner la carte de 90° dans le sens horaire permet un accès totalement ambidextre aux réglages et points de mesure.

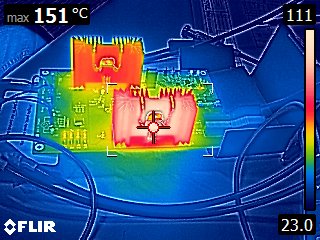
## Problèmes rencontrés

### Augmentation du courant à basse tension

Lors de la mise en service, j’ai remarqué que quand la tension d’alimentation est entre 3,1 et 3,6V, la linéarité du courant tiré n’est pas maintenu. Contre-intuitivement ce denier augmente dans cette plage. Ceci se produit car la tension normalement régulée de -1,25V servant à commander le LM317 commence à se rapprocher de zéro. Cela a pour effet d’augmenter la tension de sortie du LM317, et donc l’appel de courant de tout le circuit. Pour résoudre ce problème, j’envisagerais deux solutions : remplacer le LM317 par un autre régulateur capable de sortir une tension de 0V sans autre circuit autour, ce qui permettrait de se passer complétement du bloc pompe de charge, ou remplacer le transistor K8 par un transistor au germanium et adapter les diodes R41 et R46. Ainsi la tension au point X17 sera plus haute de 0.4V lorsque l’alimentation sera dans le régime problématique grâce à sa tension UBE réduite. Cette mesure devrait à minima repousser la zone problématique à moins de 3,3V. Même si le problème persisterait probablement dans une moindre mesure entre 3,1 et 3,2V environ, le problème ne se situerait plus dans la zone opérationnelle de la carte. Après en avoir paré à mon responsable de TPI, ses instructions sont de trouver un moyen d’augmenter la tension à partir de laquelle la protection contre les sous-tensions se déclenche. Ceci peut se faire sans trop de problème en changeant la résistance R24 par une valeur plus grande. Pour calculer cette valeur, il faut d’abord comprendre comment fonctionne cet arrêt.

Le régulateur shunt R28 laisse passer du courant de manière à toujours avoir 1,24V entre sa patte d’ajustement et son anode. Ainsi, on peut facilement calculer le courant qui passe dans R31 (1,24/180000=6,88µA). Considérant R29 comme étant négligeable par rapport à R31 ou R24 on peut établir que la chute de tension sur R24 vaudra (150 \* 6,88 \*10-3 =1,03333). On peut donc déterminer que la chute de tension aux bornes de R28 sera de 2,2733 V. Lorsque la tension d’alimentation passe en dessous de 3V, la chute de tension sur R37, qui correspond également à la tension UBE de K7 diminue à moins de 0,7V, ce qui déclenche la protection. Si on veut augmenter de 0,7V la tension à partir de laquelle la protection se déclenche, il suffit donc d’augmenter R24 de (0,7/(6,888\*10-6)=102kΩ. En E12 on peut donc choisir une résistance de 270 kΩ, ou une résistance de 140kΩ en E24

### Dissipateur thermique pas assez efficace

En utilisant une caméra thermique pour observer la carte, j’ai remarqué quelque-chose d’inquiétant. Alors que la puissance dissipée n’était que de 50% du maximum environ, le transistor K1 avait un point chaud mesuré à 151°C. La température maximale pour la jonction du BD912 est de 150°C. Après de rapides mesures pour s’assurer que le système fonctionnait correctement électroniquement, cela démontre un problème thermique évident. Ce résultat extrême peut potentiellement s’expliquer en partie par une émissivité mal réglée sur la caméra thermique. Cela dit, je suspecte principalement le fabriquant de survendre les capacités de son dissipateur. En effet la résistance thermique annoncée pour un dissipateur de cette taille est extrêmement basse. Il faut aussi noter que le fabriquant ne donne des valeurs que en comptant un flux d’air d’au minimum 1m/s (la valeur que j’ai prise pour mes dimensionnements). Même si c’est une vitesse faible, elle pourrait avoir un impact significatif également.

Pour résoudre ce problème la première chose que je vais essayer est d’utiliser un refroidissement actif externe pour déterminer si c’est une solution suffisante, et le cas échéant il pourrait être implémenté directement dans la prochaine révision de la carte.

Cette surchauffe imprévue serait un élément de réponse pour expliquer pourquoi le premier BD912 a brûlé aussi rapidement quand poussé à son maximum.

# Conception

## Schémas

Tous les schémas ont été réalisés durant le pré-TPI. Voir document numéro 1438.3500.00 pour plus de détails.

## Dimensionnement de composants

Les dimensionnements ont été réalisés durant le pré-TPI. Voir document numéro 1438.3500.00 pour plus de détails.

## Design de PCB

Lors du design du PCB, j’ai dû porter mon attention sur plusieurs points. Premièrement, sachant que de forts courants allait passer dans les pistes, il fallait s’assurer que ces dernières aient une section suffisante pour ne pas trop s’échauffer. J’ai donc décidé de prendre un échauffement acceptable de 20K. Sachant que la carte est équipée d’un fusible de 2A, j’ai donc dimensionné la largeur des pistes à fort courant en prenant ces valeurs. En m’appuyant sur le guide de survie de M.Huser, j’ai pu déterminer qu’une largeur de piste de 0,75mm et une épaisseur de 35µm était suffisante. Pour éviter tout problème de dimensionnement de via, j’ai décidé de faire passer toutes les pistes à haut courant sur la face du dessus. Toutes les pistes à plus bas courant ont été faites avec une largeur de 0,25mm ce qui permet de facilement naviguer entre les pates des composants au format SOT-23 par exemple. Et dans le cas où un composant de faible courant venait à se mettre en court-circuit, le courant maximum de 2A défini par le fusible créerait un échauffement de moins de 100°C, qui ne devrait pas endommager le PCB.

La seule situation qui pourrait mener à un courant de plus de 2A sans que le fusible ne s’ouvre est dans le cas où un court-circuit est créé depuis un point de test avec un appareil connecté à la terre (s’il ne s’agit pas d’une source de tension flottante), ou à l’alimentation directement par exemple. Heureusement tous les points de mesure ont une impédance de sortie relativement élevée, et ne devrait pas poser de problème autre que l’invalidité de la mesure prise.

Les spécifications de la carte sont les suivantes :

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Paramètre** | **Valeur** | **Unité** |
| Dimensions (rectangle) | 160x100 | mm |
| Epaisseur totale | 1.6 | mm |
| Nombre de couches | 2 | - |
| Epaisseur cuivre fini | 35 | µm |
| Largeur minimale | 0.25 | mm |
| Isolation minimale | 0.15 | mm |
| Plus petit via (Øpastille / Øtrou / AR) [[1]](#footnote-1) | 1.25 / 0.711 / 0.2195 | mm / mm |
| Finition de surface | Sans plomb (HALS ou ENIG) | - |
| Vernis épargne brasure | Vert | - |
| Sérigraphie | Blanc | - |
| Pochoir | Non | - |

Certaines pistes sur la face top doivent supporter jusqu’à 2A. Elles sont dimensionnées à 0,75mm de largeur.

PCB contrôlé avec le document 1438.5700.00. Résultat du contrôle : aucun problème.

# Réalisation

## Instructions de fabrication

### Référentiel de production

Assemblage électronique : IPC-A-610, classe 1

### Identification des dangers et mesures de protection/sécurité

**Danger Mesures de protection**

Décharges électrostatiques (ESD) : Port du bracelet, blouse

**Dangers thermiques**

Outillage chaud (fer à braser, four)

### Qualification du personnel

* Niveau de formation : module FAB1
* Nombre de personnes : 1

### Liste des équipements et outillages

* Fer à braser
* Four (à phase vapeur)
* Bruxelles ou machine d’aide au placement/à la pose de pâte
* Cadre de montage

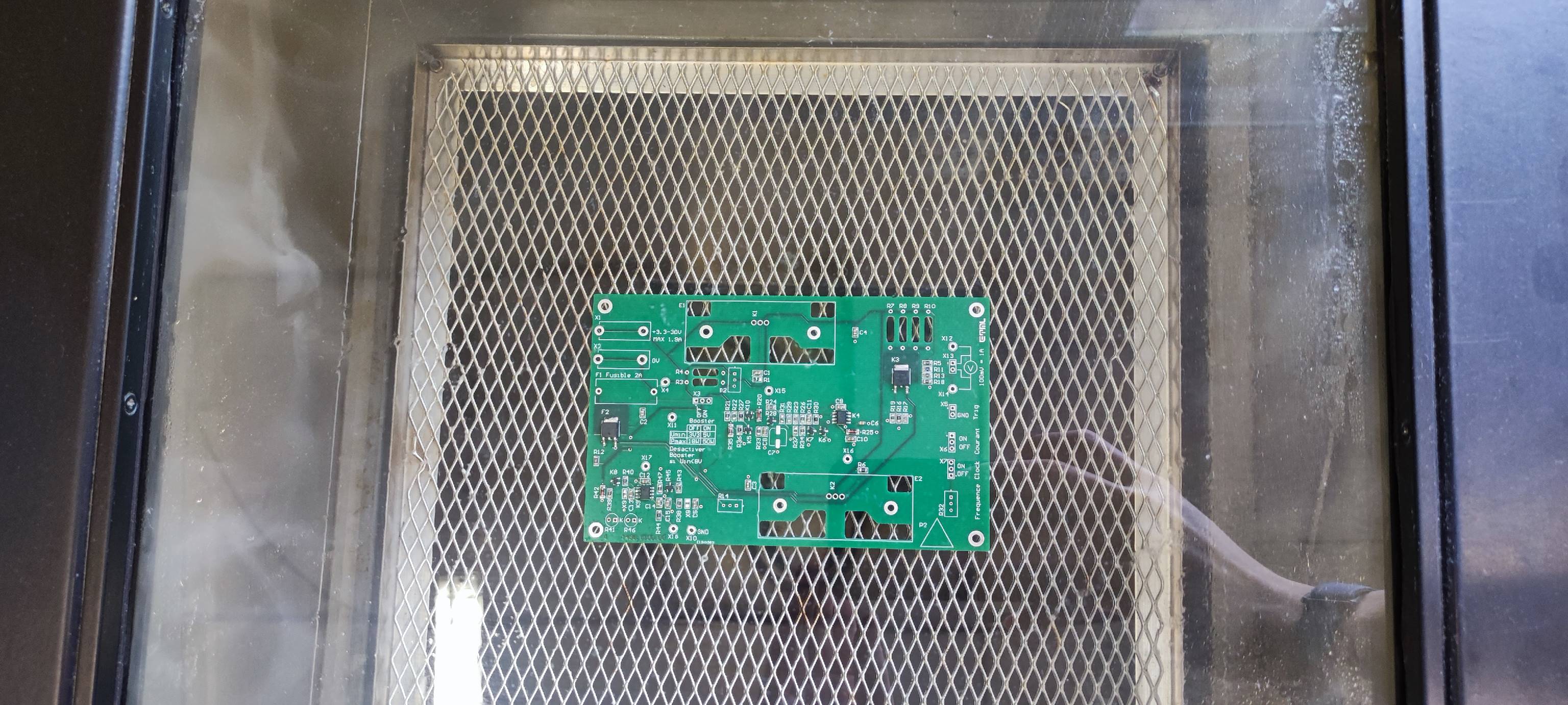
### Consommables

* Pâte à braser en seringue
* Fil de brasure

### Instruction de travail

Durée : 4h20 + 3h de contrôle

1. Déposer de la pâte à braser sur tous les pads SMD à l’aide de d’une seringue.
2. Déposer les composants SMD aux divers endroits nécessaires.
   1. Si vous avez choisi d’utiliser un LM2663 pour K9 (à la place d’un LM2662) il faut installer une résistance de 0Ω sur X9.
   2. Ne pas installer C7. Les condensateurs électrolytiques de ce type supportent assez mal le passage au four.
3. Passer la carte au four.



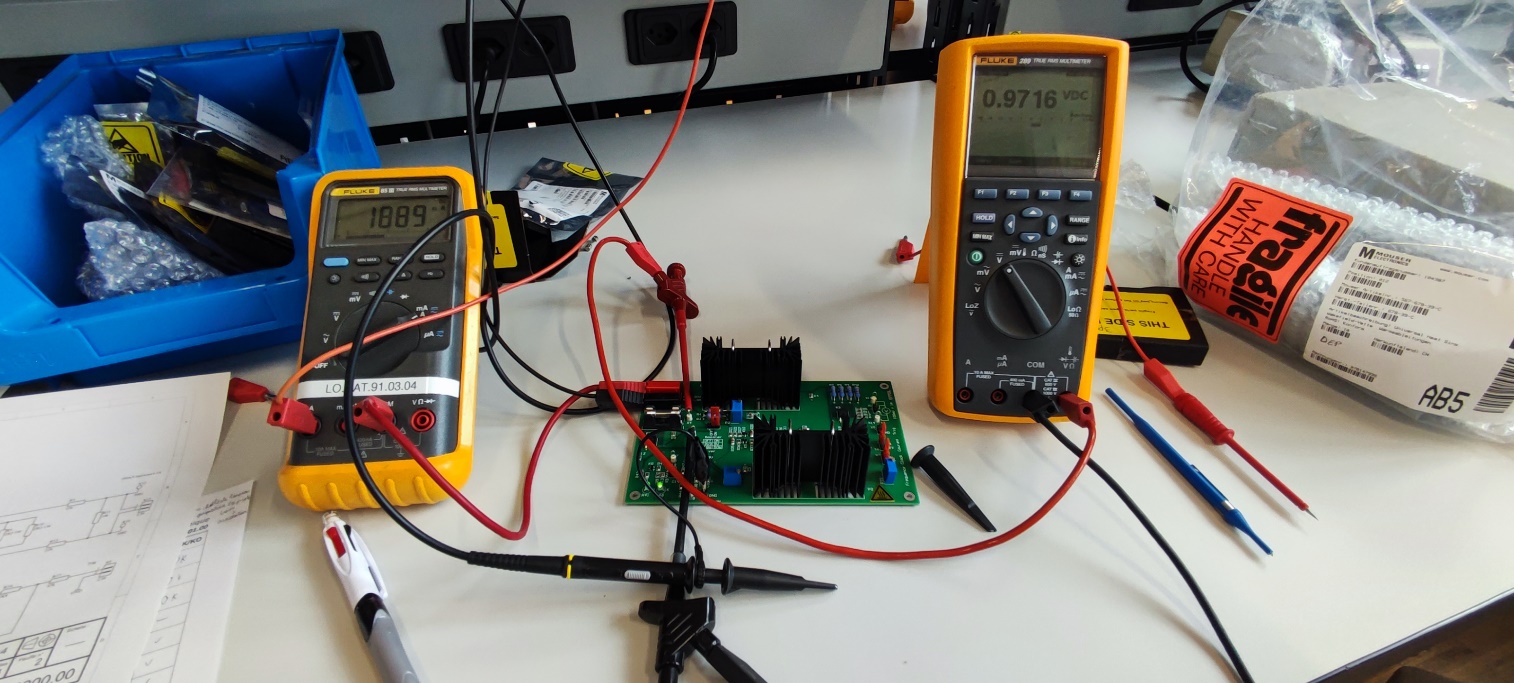
1. Vérifier et le cas échéant corriger les problèmes survenus au four (tombstone, patte mal brasée etc..). Ce sera plus compliqué quand les dissipateurs thermiques seront installés.
2. Installer les composants THT et C7. Les dissipateurs thermiques doivent être installés de telle manière à ce que leur côté avec beaucoup d’ailettes soit au-dessus des grandes ouvertures. N’oubliez pas de braser les pieds des dissipateurs, d’utiliser de la pâte thermo conductrice et d’installer le clip (ou la vis si vous utilisez la version à vis du dissipateur).
3. Coller le sticker P2. Il faut couper son coin pour que R32 ne gêne pas.

### Enregistrements qualité

Un autocontrôle a été réalisé et peut être consulté dans le document 1438.6600.00

### Prochaine étape

Continuer avec le test de mise en service (point 6.1 de ce document).



# Tests

## Mise en service

### But

Tester le bon fonctionnement de la carte « Puit de courant » 1438.5100.00 et la calibrer.

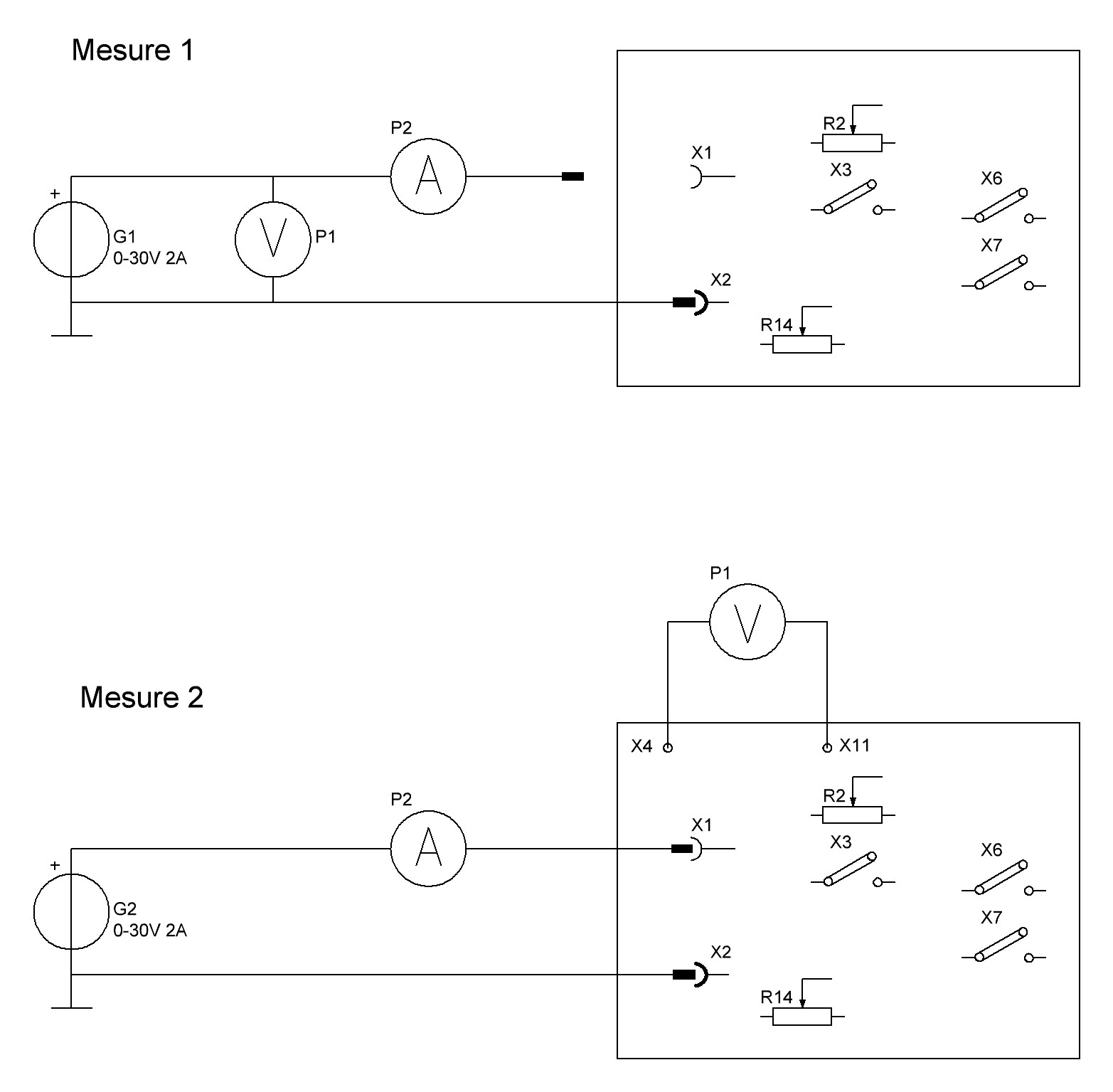
### Liste de matériel

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Désignation | Marque | Type | Caractéristiques | No d'inventaire |
| G1 | Siglent | SPD3303X | Alimentation 0-32V 3.2A | Table 03 DAT |
| P1 | Fluke | 289 | Multimètre | LO.DAT.91.03.05 |
| P2 | Fluke | 85 III | Multimètre | LO.DAT.91.03.04 |

### Schéma électrique

Voir document 1438.5200.00.

### Schéma de mesures



### Conditions de mesures

Disposer les instruments de mesure comme dans le schéma « mesure 1 ». Placer un cavalier sur X6 en position « Courant ON » et un cavalier sur X7 en position « Clock OFF ».

### Marche-à-suivre

|  | **Instructions de mesure** | **Conditions de validation** | **Valeur mesurée** | **OK/KO** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 1.1 | Contrôler que X9 soit correct | Si K9 est un LM2662 : X9 non installé  Si K9 est un LM2663 : X9 = 0Ω | LM2662 X9 non installé | OK |
| 1.2 | Désactiver le booster en mettant un cavalier sur X3 (booster OFF) | |  | OK |
| 1.3 | Régler G1 sur 3V et limitation de courant à 100mA puis brancher X1  Régler le courant au minimum avec R14 | |  | OK |
| 1.4 | Mesurer le courant | Courant absorbé = 10±5mA | 14,06mA | OK |
| 1.5 | Augmenter la tension[[2]](#footnote-2) à 3,7V, ajuster R14 pour obtenir un courant de 80±5 mA | | 80,0mA | OK |
| 1.6 | Réduire la tension à 3,05±0,05V | Courant =10±5mA | 14,05mA | OK |
| 1.7 | Augmenter la tension à 5V et régler le courant au minimum avec R14 | Courant < 30mA | 21,71mA | OK |
| 1.8 | Si le point 1.7 n’est pas vérifié, installer une résistance de 0Ω sur X8 et réessayer | | - | - |
| 1.9 | Tourner R2 dans le sens antihoraire au maximum | |  | OK |
| 1.10 | Mettre X3 sur « booster ON » | |  | OK |
| 1.11 | Augmenter la tension de G1 à 15V et la limite de courant à 1,1A. Utiliser R14 pour régler le courant consommé à 1A, connecter P1 comme sur le schéma de mesure numéro 2 | |  | OK |
| 1.12 | Régler R2 de manière à ce que la tension entre X4 et X11 vaille 1V | X4-X11=1±0.05V | 0.991V | OK |
| 1.13 | Augmenter la tension à 25V et le courant à 1.9A. Laisser la carte chauffer quelques minutes. | X4-X11=1±0.05V | 0.984V | OK |
| 1.14 | Au besoin, ajuster R2 pour que X4-X11 = 1±0.05V lorsque l’alimentation est à 25V 1,9A | | 0.972V | OK |

### Résultats

La carte est en état de fonctionnement. Il faut noter que lorsque l’alimentation est entre 3,1 et 3,6V, la protection s’active et se désactive à répétition à cause d’une chute de tension due à l’appel de courant lors de l’activation. Cette chute est due à la limitation de courant de l’alimentation. Celle-ci est déclenchée car la tension normalement régulée de -1,25V commence à se rapprocher de zéro lorsque la tension d’alimentation. Paradoxalement cela a pour effet d’augmenter la tension de sortie du LM317, et donc l’appel de courant de tout le circuit. Pour résoudre ce problème, j’envisagerais deux solutions : remplacer le LM317 par un autre régulateur capable de sortir une tension de 0V sans autre circuit autour, ce qui permettrait de se passer complétement du bloc pompe de charge, ou remplacer le transistor K8 par un transistor au germanium et adapter les diodes R41 et R46. Ainsi la tension au point X17 sera plus haute de 0.4V lorsque l’alimentation sera dans le régime problématique grâce à sa tension UBE réduite. Cette mesure devrait à minima repousser la zone problématique à moins de 3,3V. Même si le problème persisterait probablement dans une moindre mesure entre 3,1 et 3,2V environ, le problème ne se situerait plus dans la zone opérationnelle de la carte.

J’ai également appris à mes dépends (un BD910 a brulé) qu’il est impératif de respecter les 50W maximum de dissipation. Même si la tension maximale d’entrée est de 30V et le courant maximal est de 1,9A, ces deux valeurs ne peuvent pas être atteintes en même temps. Par sécurité il peut être sage de régler le booster pour tirer un peu moins de courant car le LM317 est équipé d’une protection thermique intégrée, ce qui n’est pas le cas du booster.

### Décision

Malgré les problèmes observés, la carte est sûre pour continuer les tests plus poussés.

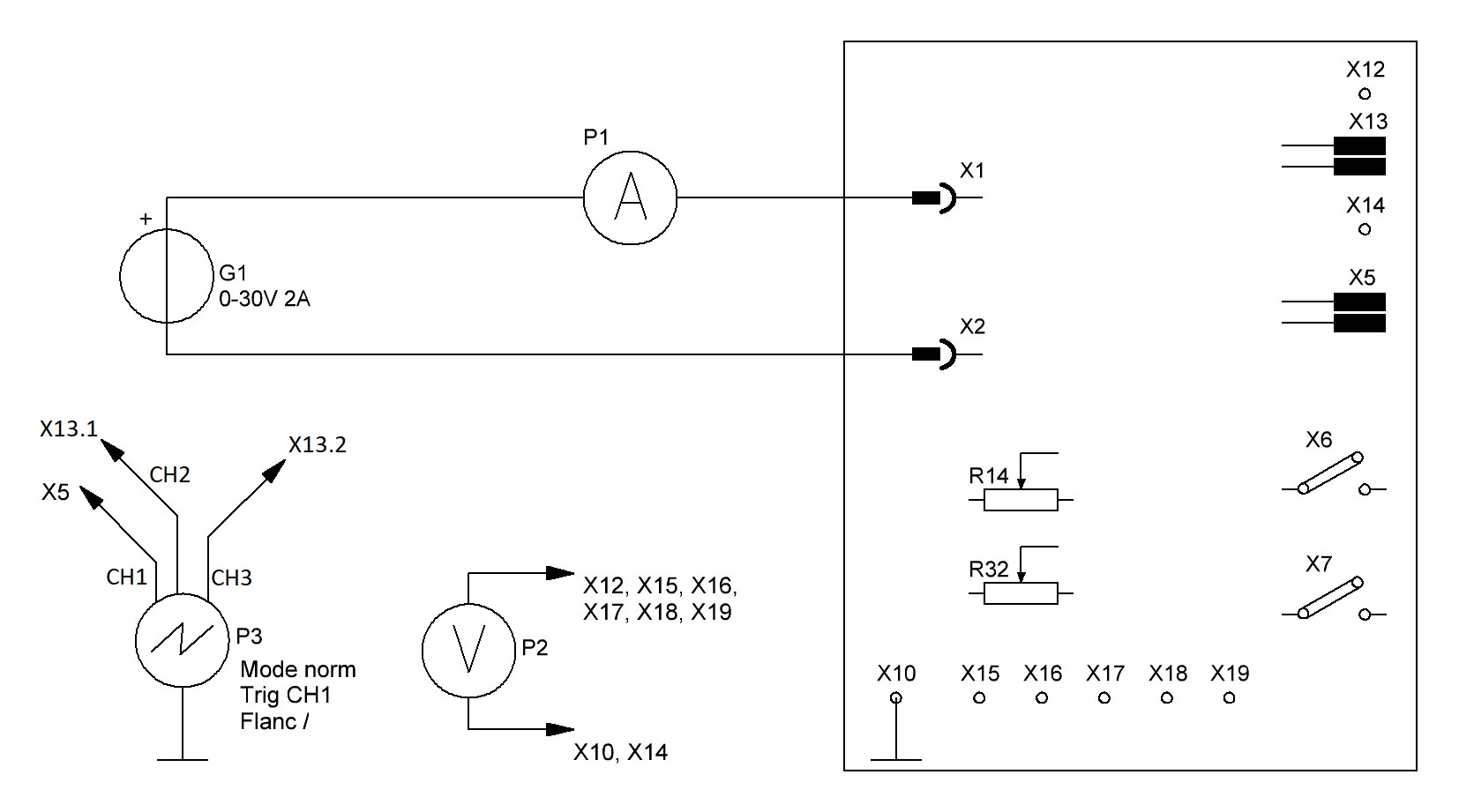
## Rapport de test

### But

Tester les différentes fonctionnalités de la carte « Puit de courant » numéro 1438.5100.00.

### Schéma de mesure

Booster ON pour toutes les mesures



### Liste de matériel

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Désignation | Marque | Type | Caractéristiques | No d'inventaire |
| G1 | Siglent | SPD3303X | Alimentation 0-32V 3.2A | Table 03 DAT |
| P1 | Fluke | 85 III | Multimètre | LO.DAT.91.03.04 |
| P2 | Fluke | 289 | Multimètre | LO.DAT.91.03.05 |
| P3 | Keysight | DSOX1204G | 100MHz 2GSa/s | LO.DAT.91.03.06 |

### Tableau de mesure

| Mesure | Condition de mesure | Valeur mesurée | Valeur attendue | Erreur absolue | Erreur relative |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| X12-X14 (P2) | Courant ON, Clock OFF Uin= 15V I= 500mA | 48,21mV | 50±5mV | 1,79mV | 3,58% |
| X12-X14 (P2) | Courant ON Clock OFF Uin= 15V I= 1A | 98,52mV | 100±5mV | 1,48mV | 1,48% |
| X12-X14 (P2) | Courant ON Clock OFF Uin= 15V I= 1,5A | 149,4mV | 150±5mV | 0,6mV | 0,4% |
| X15-X10 (P2) | Courant ON,  Clock OFF Uin= 15V I= 500mA | 6,474V | 6,5±0,5V | 0,026V | 0.4% |
| X16-X10 (P2) | Courant ON,  Clock OFF Uin= 15V I= 500mA | 6,377V | 6,5±0,5V | 0,123V | 1,9% |
| X16-X10 (P2) | Courant ON,  Clock OFF Uin= 3V I= 500mA | 6,7mV | 0±100mV  (I tombe à 10mA) | 6,7mV | N/A |
| X17-X10 (P2) | Courant ON Clock OFF Uin= 15V I= 500mA | 3,2442V | 3.3±0,3V | 0,0558V | 1,6% |
| X18-X19 (P2) | Courant ON Clock OFF Uin= 15V I= 500mA | -1,2531V | -1,25V±0,3V | 0,0031V | 0,248% |
| X5.1 X13.1-X13.2 (P3) | Courant ON Clock ON Uin =15V I=500mA  Mode math CH2-CH3 | Signal Carré  Fmin : 29,54Hz Fmax :  6,47KHz | Signal carré en phase, Plage de fréquence minimale en ajustant R32 : 36Hz-1,7kHz |  |  |
| Test protection inversion de polarité | Uin=-15V  Courant ON, Clock OFF  I=500mA | I=0mA | I = 0mA, fusible ne fonds pas. |  |  |

### Conclusion

À l’exception du problème en basse tension lors de la mise en service, la carte fonctionne parfaitement. Les réglages se font sans soucis, et la mesure est facile et relativement précise.

## Évaluation du projet

Le projet avance bien. L’unité montée fonctionne dans la grande majorité des cas d’utilisation. Pour la suite du projet plusieurs solutions se présentent.

## État d'avancement du projet

Une unité fonctionnelle a été montée. Malgré des erreurs de design mineures (le mauvais fonctionnement entre 3 et 3,6V, la position et la sérigraphie de R14) qui pourrait être améliorées, le projet est globalement terminé.

## Travaux restants à effectuer

Actuellement, nous disposons de tout le matériel pour monter le deuxième PCB comme une copie identique du premier, potentiellement en remplaçant K8 par un transistor au germanium, ou en modifiant R24 dans le but de diminuer voire supprimer la zone où le fonctionnement n’est pas idéal.

Pour le reste des composants destinées à la fabrication d’autres unités, deux options sont à envisager :

1. Corriger les petits défauts de sérigraphie et essayer de mitiger voir éliminer le problème à basse tension par divers moyens. Cela a l’avantage d’utiliser en grande partie des composants déjà achetés.
2. Revoir le design à un niveau plus fondamental en remplaçant le LM317 par un régulateur capable de descendre à 0V de sortie. Ainsi on supprime tout le bloc de pompe de charge, ce qui diminuerait par conséquent les coûts et la complexité, mais demanderait de ne plus utiliser les LM317 déjà achetés. Cela dit un LM317 est un composant fréquemment utilisé, qui sera probablement utilisé lors d’autres projets.

## Améliorations

Le projet présente quelques défauts et limitations qu’il pourrait être bon d’améliorer :

1. Remplacer le LM317 par un régulateur capable de descendre à 0V et supprimer le bloc pompe de charge
2. Déplacer R14, et ajouter une description de l’effet de R14 et R2 sur la sérigraphie
3. Ajouter des flèches qui indique le sens de réglage des potentiomètres.
4. Mettre le mosfet coupe circuit (et le remplacer par un canal P), le mosfet de protection et le fusible sur la branche positive du circuit pour permettre la mesure de l’indicateur de courant avec une seule sonde en référence à la masse.
5. Remplacer la sérigraphie du sticker P2 par un triangle ou carré plein pour un meilleur contraste sur le sticker.
6. Intégrer un système de protection pour éviter la surchauffe du K1.

# Conclusion

Au-delà de petits soucis d’ergonomie et de problèmes de conception remontant à plusieurs années (le choix d’utiliser un LM317 avec une pompe de charge, plutôt qu’un régulateur plus adapté a été fait par l’auteur de l’article Elektor plusieurs années avant la parution de l’article, simplement sur la base des composants en stock dans son atelier), le projet est pour moi un franc succès. C’est déjà incroyable d’avoir réussi à mener ce projet et sans aucune embûche majeure, obtenir un appareil fonctionnel et utile.

1. Planification
   1. Journal de travail
   2. Planification et suivi
2. Documents de production
   1. Schémas
   2. Plan d'implantation
   3. Maquette PCB
   4. Liste de pièces
3. Autres documents
   1. Rapport R&D pré-TPI
   2. Autocontrôle de la qualité de l’assemblage

1. [mm] Anneau résiduel [↑](#footnote-ref-1)
2. La valeur de test était initialement de 3,3V et a été augmentée durant la procédure en raison du problème relevé ci-dessous. [↑](#footnote-ref-2)