

Inversion du + et du –

Détrompeur contre les inversions de polarités

par F5RCT Jean-Matthieu STRICKER

La rédaction de cet article ainsi que le développement d'un tel dispositif de protection partent d'une malencontreuse situation arrivée à un radioamateur. Celui-ci a confondu la polarité des câbles d'alimentation de son transceiver au moment où il l'a branché sur la batterie de son véhicule. En dépit des fusibles de protection, la diode en parallèle avait grillé et le reste de l'appareil avait subi de sévères dommages (circuit internes d'alimentation à découpage, amplificateur BF). Nous allons découvrir qu'un simple dispositif peut protéger votre appareil contre tout risque d'inversion, sans même faire fondre un fusible !

Protéger un appareil contre les inversions de polarité n'est pas simple, surtout pour bloquer un courant inverse sans occasionner de chute de tension d'alimentation. Une diode insérée dans le conducteur du +12 V (fil rouge) est l'idée qui vient en premier à l'esprit. Encore faut-il que la diode supporte le courant en émission de l'ordre de 20 A pour 100 W HF. La chute de tension dans la diode fait perdre de la puissance et détériore la linéarité du PA en émission SSB.

Une autre possibilité est de mettre une diode en parallèle qui conduira en inverse afin de faire sauter un fusible. Cette configuration, appliquée sur tous les transceivers destinés à être embarqués sur un véhicule, ne cause pas de perte de chute de tension d'alimentation. En cas d'inversion de polarités, il circulera un fort courant de court-circuit dans la diode qui entraînera la fonte du fusible. L'intensité peut être tellement élevée qu'elle peut entraîner des dommages internes au transceiver. Sous un courant direct intense, la tension aux bornes de la diode dépasse allègrement 1 V.

Pour mieux comprendre les dispositifs de protection des transceivers que nous utilisons analysons différentes situations. Vous êtes-vous déjà demandé pourquoi il y a un fusible sur chaque conducteur du câble d'alimentation ?

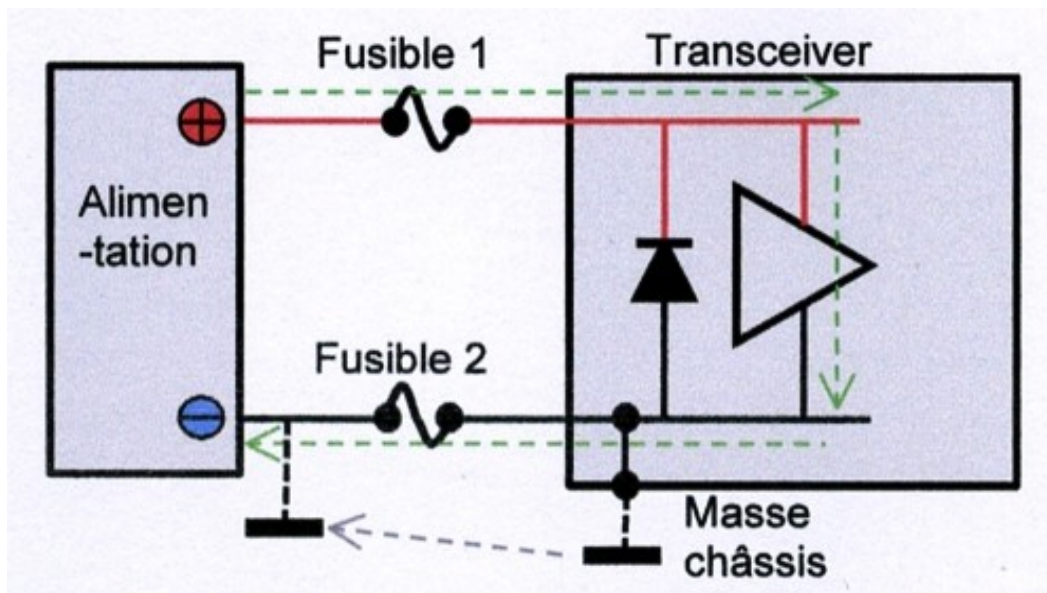


Figure 1 : Raccordement et protection du transceiver dans le cas d'un utilisation normale.

La figure 1 illustre les protections du transceiver : fusibles sur le cordon d'alimentation et diode de protection interne. Le PA est souvent connecté en permanence sur l'alimentation, sa polarisation est coupée quand l'appareil est éteint. Dans cette configuration, le courant circule normalement vers les circuits du transceiver (flèches en pointillés verts). La diode de protection interne est bloquée et les deux fusibles sont en série au cas où il y aurait une surintensité.

Si le châssis du transceiver est relié à la masse ou à la terre (traits en pointillés noirs), et que l'alimentation ou la batterie l'est également, le courant ne passe plus principalement par le fusible 2 dans le négatif, mais se trouve dévié dans la masse du châssis ou par la mise à la terre (flèche en pointillés gris). Seul le fusible 1 dans le positif de l'alimentation protège l'installation.

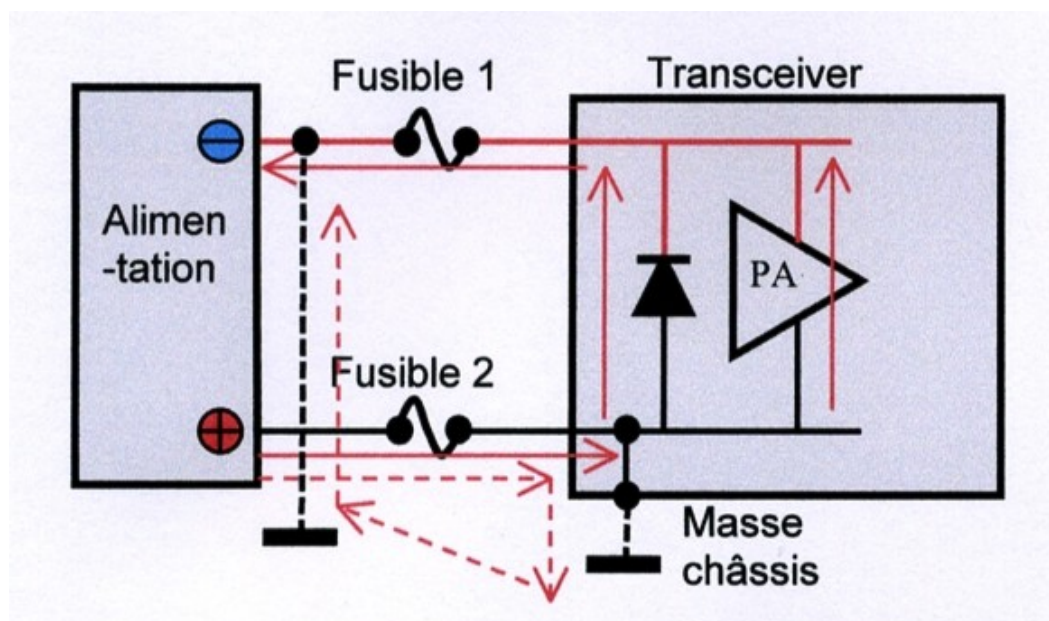


Figure 2 : Circulation des courants en cas d'inversion de polarités du câble d'alimentation.

Maintenant inversons les câbles d'alimentation du transceiver comme le montre la figure 2 :

Si le poste et l'alimentation ne sont pas reliés au châssis, le courant prend le trajet des flèches rouges en trait plein. La diode de protection interne au transceiver devient passante et limite par sa tension directe (environ 1 V) la tension négative sur les étages du PA et de l'alimentation interne. La chute de tension de la diode de protection dépend du courant et de la résistance de l'alimentation qui ne sont absolument pas maîtrisés ; une partie du courant traverse le PA et les autres circuits ce qui peut créer des dommages irréversibles. Sur une batterie de voiture le courant crête peut atteindre des centaines d'Ampères. Les deux fusibles en série mettent « un certain temps » avant de fondre.

Si le poste et l'alimentation sont chacun reliés au châssis ou à la terre, une partie du courant prend le trajet en pointillés rouges passant par le fusible 2 qui se trouve sur le fil négatif noir. Si la résistance des masses est faible, le transceiver est mieux protégé par le courant passant dans la masse. Le fusible 1 ne protège rien car il n'est pas traversé par le courant inverse. Toujours dans ce cas, si une diode de puissance était montée en série avec le fusible 1, celle-ci serait inefficace pour la même raison.

Ces deux situations montrent l'importance du fusible 2 qui se trouve sur le fil négatif du transceiver qu'il ne convient pas de supprimer ! Le fusible 1 protège d'avantage d'un court-circuit interne à l'appareil quand il est raccordé normalement.

Retenons que c'est entre le transceiver et l'emplacement du fusible 2 qu'un dispositif de protection électronique efficace contre l'inversion de polarité doit prendre place dans le circuit.

Pour des raisons de sécurité, une batterie doit obligatoirement posséder un fusible de protection au plus près du pôle positif. Cette protection indispensable en cas de court-circuit évite tout risque d'incendie ainsi que la fonte des câbles. Une alimentation secteur ne demande pas de fusible en sortie puisque le courant est limité « électroniquement » et répercuté sur le circuit primaire de celle-ci.

Le transistor MOSFET : c'est aussi une diode parfaite !

Nous savons qu'une diode traversée par un courant engendre une tension directe entre 0,5 et 1 V selon le type de diode et la valeur du courant. Les diodes Schottky ont une tension deux fois moindre que les diodes à jonction PN, mais traversée par un courant de 20 A comme c'est le cas d'un transceiver en émission, les pertes sont non négligeables. Ainsi, 0,5 V fois 20 A font 10 W qui sont perdus en chaleur !

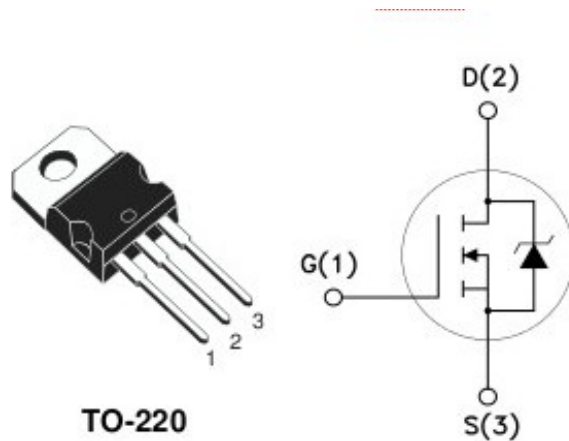


Figure 3 : Le transistor MOSFET canal N.

Le transistor MOSFET possède une diode intrinsèque (qui lui est propre) du canal entre drain et source, ceci par sa constitution physique dans le substrat du canal. On l'appelle aussi diode de substrat. Un transistor MOSFET en conduction a la propriété de présenter une très faible résistance du canal entre drain et source : environ 10 m Ω pour un MOS de puissance. En exploitant cette propriété pour un courant de 20 A nous n'aurons que 4 W à dissiper dans le MOS et seulement 0,2 V de chute de tension.

Pour le MOSFET de canal N comme sur la figure 3, ce dernier conduit si la tension V_{gs} est positive au-delà du seuil de conduction V_{gs_th} (1 à 2 V). La résistance de canal diminue drastiquement dès que la tension dépasse ce seuil. Vers 10 V on considère que le transistor possède sa résistance de conduction R_{ds_on} ; il est quasiment un conducteur parfait. En annulant la tension de commande pour $V_{gs} = 0$, le transistor se bloque et présente une résistance de canal infinie ; il est isolant ! Avec le développement de la conversion d'énergie et de la traction électrique, les MOSFET ont fait de nets progrès ces dernières années ; on atteint un R_{ds_on} de l'ordre de 2 m Ω pour un courant de drain de 300 A sur une surface de 1 cm² !

En exploitant les propriétés évoquées ci-dessus nous allons faire de ce composant une diode parfaite pour protéger un transceiver. Certaines alimentations à découpage exploitent cette propriété en redressement synchrone pour gagner en rendement ; ce ne sont plus des diodes mais des MOSFETs commandés.

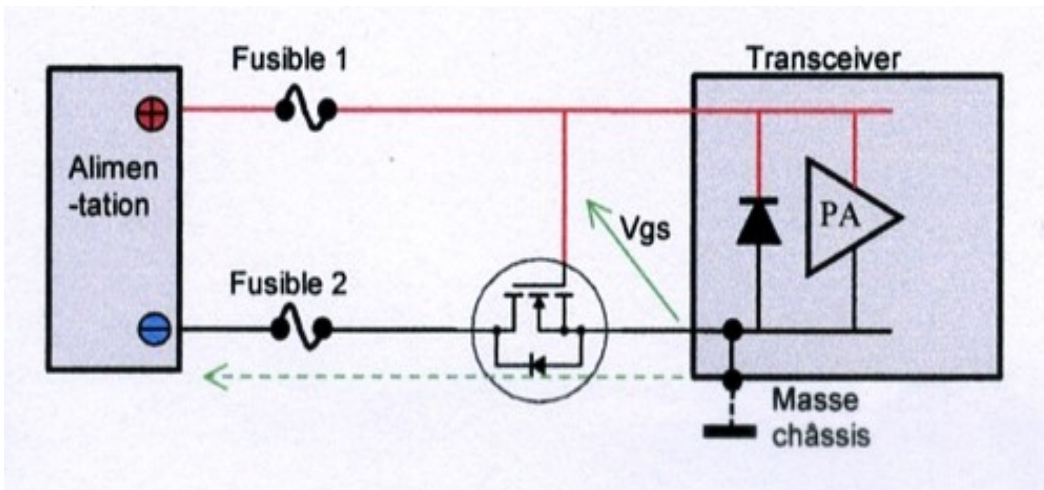


Figure 4 : Schéma de principe de la protection avec un transistor MOSFET canal N.

La figure 4 illustre l'exploitation du MOSFET canal N en diode de protection parfaite : La diode intrinsèque est dans le sens du courant de retour vers l'alimentation (pointillés verts).

De plus la tension V_{gs} est positive, ce qui entraîne la conduction du canal à sa plus faible résistance. La diode est court-circuitée par la résistance de canal R_{ds_on} de quelques $m\Omega$. Rappelons que la gate de commande du MOS est isolée ; elle n'est par conséquent traversée par aucun courant. Ce dispositif ne consomme pas de courant sur l'alimentation !

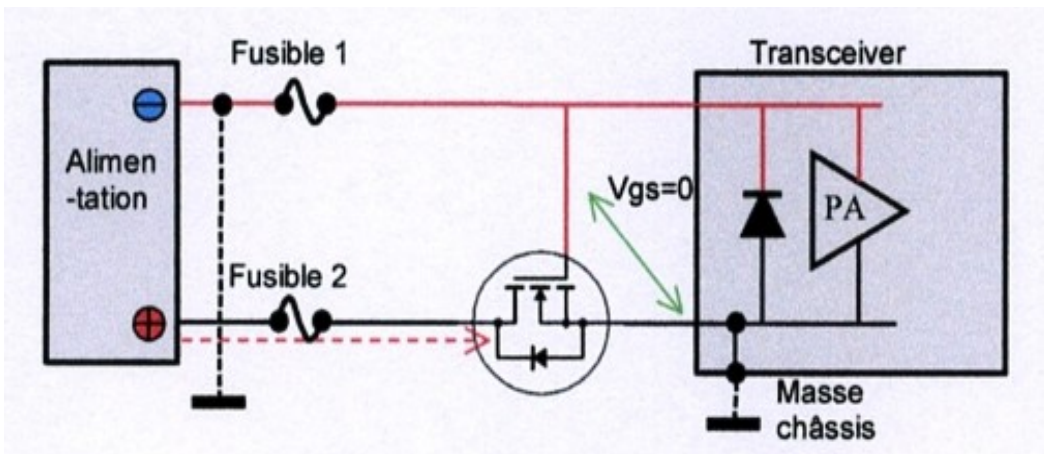


Figure 5 : Inversion des polarités avec la protection à transistor MOSFET canal N.

En inversant les polarités de l'alimentation comme en figure 5, le courant de la borne positive de l'alimentation est bloqué par la diode intrinsèque du MOSFET. On pourrait déjà supprimer le fusible 2 qui n'a plus d'utilité. De plus, par le transceiver, la tension V_{gs} est nulle même si les masses sont au châssis ou à la terre. Le MOSFET est donc « isolant », le transceiver est protégé et aucun fusible ne fondra !

Nous avons donc un dispositif conducteur en utilisation normale et isolant en cas d'inversion. On peut dire que le transistor MOSFET se comporte comme une diode parfaite !

Il est possible de remplacer ce MOSFET par un relais avec une diode en série dans la bobine ; cette solution simple, mais encombrante et gourmande en courant.

Application pratique :

Calcul de la puissance maximale dissipée et du courant admissible :

Pour dimensionner le transistor dans les conditions les plus défavorables, nous allons partir de la résistance thermique en considérant qu'il n'est pas monté sur un dissipateur. Dans ce cas, nous devons considérer la résistance thermique jonction / boîtier : $R_{jc} = 40 \text{ }^\circ\text{C/W}$ pour un boîtier D²pack ou TO220 seul.

La température maximale de jonction ne doit pas dépasser 175 °C.

Considérons que nous avons une température ambiante maximale de 50 °C pour un poste dans l'habitacle d'un véhicule en plein soleil. Cela laisse une différence de température de 125°C entre l'ambient et la jonction.

Puissance admissible maximale : $P_{max} = \Delta T / R_{jc} = 125 / 40 = 3,1 \text{ W}$

A partir de la relation $P = R I^2$ on en déduit :

Courant maximal admissible de 17A pour $R_{dson} = 10 \text{ m}\Omega$. Ou bien pour un transistor ayant $R_{dson} = 4 \text{ m}\Omega$, on pourra admettre 27 A.

A partir des données ci-dessus, le transistor sera monté sur un petit circuit imprimé puis inséré sur le câble d'alimentation. Le transistor admet bien plus de courant à condition qu'il soit refroidit. Le montage du transistor sur un circuit imprimé lui-même monté sur un radiateur ou sur la tôle du capot aidera à la dissipation de chaleur.

Pour comparer ce que représente 10 mΩ de résistance de jonction face aux pertes dans le câble, la chute de tension sur le MOSFET s'élève à 200 mV pour 20 A ce qui est négligeable par rapport à ce qui peut être perdu dans le cordon d'alimentation : 4 m aller-retour en 2,5 mm² font déjà 30 mΩ et 600 mV perdus ! Les fusibles 6,35 x 32 mm font perdre également en tension : une documentation constructeur indique 130 mV par fusible pour 20 A.

C'est grâce au progrès technologique des applications dédiées à la mobilité électrique que les transistors MOS ont progressés non pas seulement au niveau des performances de la puce en silicium mais aussi au niveau de la technologie des boîtiers d'encapsulation. On s'est rendu compte qu'en passant du traditionnel boîtier TO220 au boîtier CMS D²PACK que la résistance des pattes est moindre. Depuis trois ans, la puce n'est plus reliée par des fils de « bounding » au « lead frame » (traduire faire un bond à la grille de connexion), mais montée à l'envers contre les broches à souder comme c'est le cas pour le boîtier TOLL en figure 6 ; on dit « TO-leadless ».

Passer 300 A sous 1,2 mΩ dans une surface de 1 cm², je vous assure que ça marche !

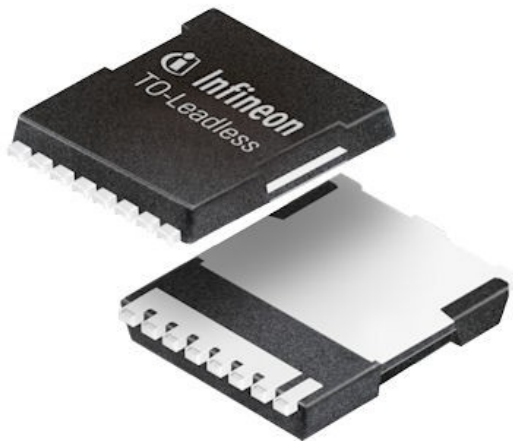


Figure 6 : Boîtier TO-leadless

<http://www.infineon.com/cms/en/product/promopages/aim-mc/to-leadless-package-toll.html>

Exemples de références de MOSFET N récents utilisés dans le domaine professionnel de la traction électrique :

Référence	Fabricant	Vds	Id	Rdson	Boitier
IRL2203NS	Infineon (ex IR)	30V	116A	10 mΩ	D ² -Pack
IRFU3607	Infineon (ex IR)	75V	56A	9 mΩ	TO-251AA
IRFB3077PbF	Infineon (ex IR)	75V	120A	3 mΩ	TO220
IPT012N08-N5	Infineon	80 V	300 A	1,2 mΩ	TOLL
IPB015N08-N5	Infineon	80 V	180 A	1,5 mΩ	D ² PACK-7
IPB025N10N3G	Infineon	100 V	180 A	2,5 mΩ	D ² PACK-7
STH310N10F7-6	ST	100 V	180 A	2,3 mΩ	D ² PACK-7
FDB035N10A	Fairchild	100 V	210 A	3,5 mΩ	D ² -Pack

La gate d'un transistor MOSFET est isolée, encore faut-il ne pas dépasser +/- 20 V de tension par rapport à la source, sinon on risque de voir un courant apparaitre par la protection interne (deux diodes Zener en opposition). Au-delà de 20 V on risque d'endommager le transistor. Pour nos applications de transceivers alimentés sous 12 à 14 V cela ne pose pas de problème. Toutefois, nul n'est à l'abri de décharges électrostatiques également destructrices pour un transistor MOSFET. Nous allons simplement ajouter un circuit de protection avec une diode zener de 16 V et une résistance de 500 Ω à 1 kΩ environ. Celui-ci entrera en action si l'on dépasse 16 V ou si la tension est négative sur la gate. En utilisation normale entre 6 et 14,6 V le dispositif ne consommera aucun courant sur l'alimentation ou la batterie.

La gate d'un MOSFET de puissance étant très capacitive (environ 10 nF), nous avons préféré ajouter une résistance de forte valeur entre gate et source pour décharger celle-ci de toute accumulation de charge électrostatique. Ainsi nous empêchons toute conduction du transistor même si rien n'est connecté en aval. Cette sécurité est au détriment d'un léger courant inférieur à 30 μA sous 13,5 V.

Le schéma devient extrêmement simple comme le montre la figure 7. En supprimant le fusible 2 dans le fil négatif, on réduira les pertes par chute de tension sur ce dernier.

Lors de la présentation de ce dispositif aux membres du radio club F5KAV, il a été demandé s'il n'est pas possible de protéger des surtensions par ouverture du MOSFET. Cette demande n'est pas possible vu qu'il y a toujours la diode du MOSFET dans le sens direct, il faudrait ajouter un autre MOSFET en série dans l'autre sens...

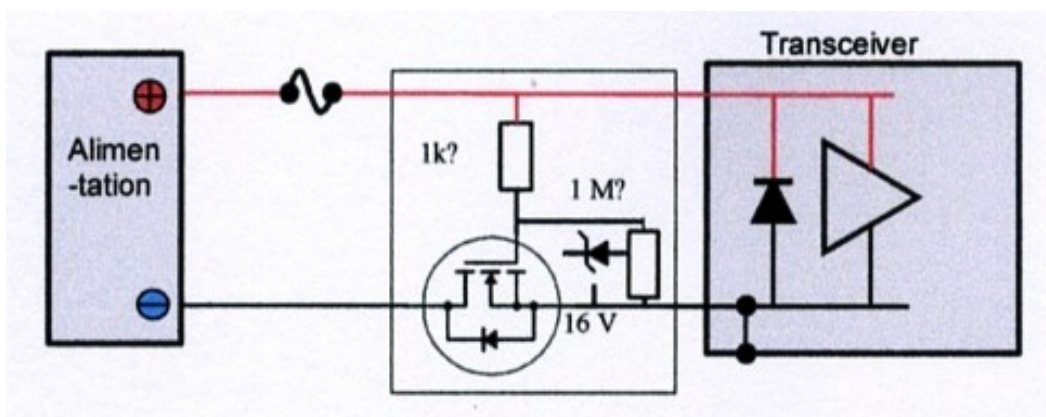


Figure 7 : Dispositif de protection complet inséré sur le cordon d'alimentation

L'ensemble des composants prend place sur un petit circuit imprimé (figure 8) qu'il suffit d'insérer sur le cordon d'alimentation.

Les quatre trous dans les coins servent à passer les conducteurs par le dessous et les souder sur les plages de la face composants.

Les deux trous médians peuvent servir à fixer la platine à condition d'y intercaler un isolant électrique conduisant la chaleur. Pour cette configuration les fils seront soudés à plat sur les plages

de la face composants.

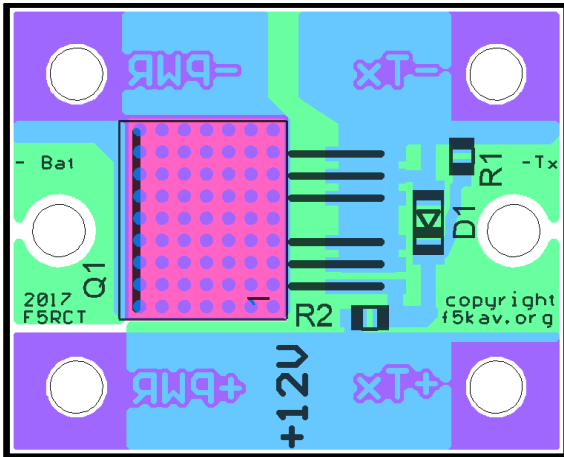
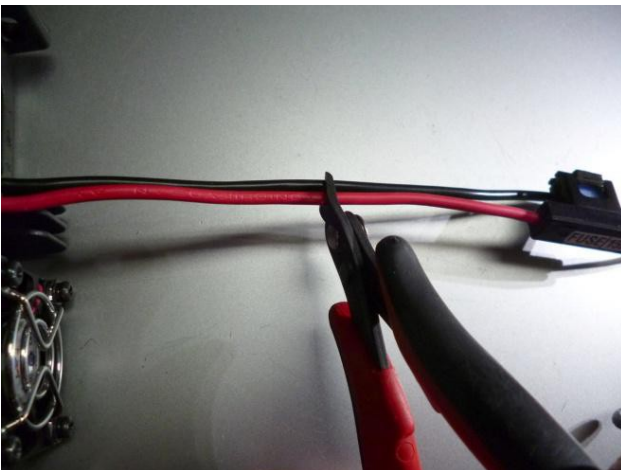


Figure 8 : Circuit imprimé du dispositif.

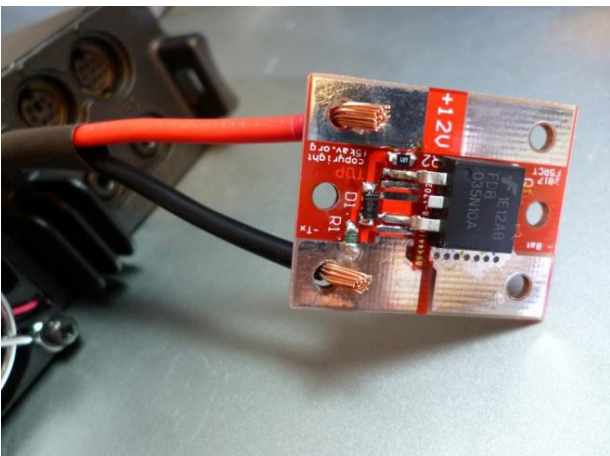
Les composants du kit livré par le radio-club F5KAV [*] sont déjà montés. Il vous suffit de le raccorder au faisceau d'alimentation et de glisser la gaine thermo-rétractable fournie avec le module.

La mise en œuvre est simple et rapide :

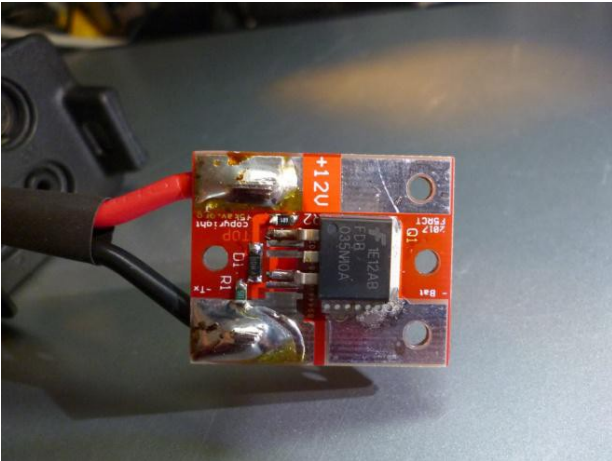


1. **Couper le cordon d'alimentation** entre le fusible et la fiche qui va au transceiver.

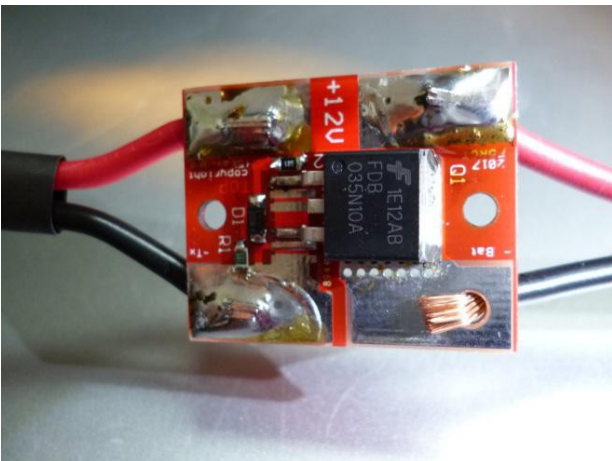
Profitez-en pour supprimer le fusible dans le moins du cordon d'alimentation



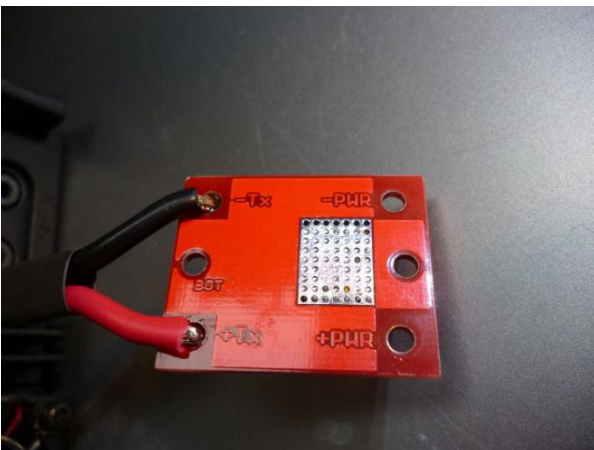
2. Passer la gaine thermo-rétractable en premier lieu. Dénuder les fils sur 1 cm et les passer dans les trous du circuit imprimé. Repérer -Tx et -PWR sous la platine. Rabattre les brins contre la surface du circuit imprimé.



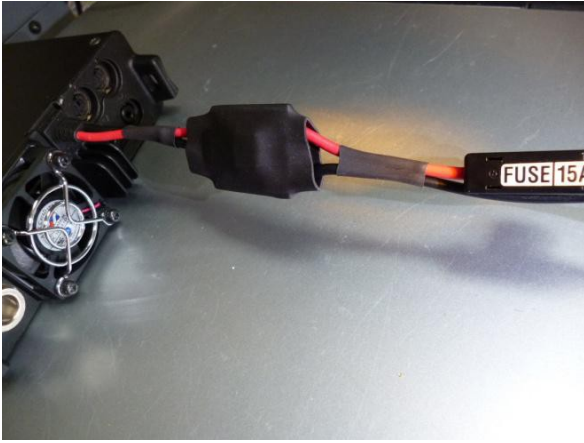
3. Souder abondamment à l'aide d'une panne large bien chaude (400 °C)



4. Vérifier le raccordement et les polarités. Pour une dernière fois !



5. La soudure doit remonter entre les brins du câble.



6. Glisser la gaine thermo-rétractable et la chauffer avec de l'air chaud. C'est terminé !

Glisser la gaine thermo-rétractable et la chauffer avec de l'air chaud. C'est terminé !

Faites un essai en raccordant une résistance de 1000 Ohms en série avec le cordon d'alimentation de votre appareil. Inversez les polarités sans crainte puisque le courant sera limité à 13 mA en cas de défaut. Vérifiez au voltmètre que la tension aux bornes de la résistance soit nulle, signe qu'aucun courant ne passe.

Finalement, pourquoi ne pas y avoir pensé avant ? C'est ce que l'on se dit des idées les plus simples quand il a été trop tard ! Cela faisait bien 15 ans que je connaissais ce dispositif pour l'avoir expérimenté une première fois sur un montage en cours de développement. Alors pourquoi avoir attendu si longtemps si ce n'est que pour y repenser quand cela est arrivé dans mon entourage ? La résistance de conduction des MOSFET de l'époque était voisine de 100 m Ω qui par conséquent aurait provoqué beaucoup trop de pertes avec quelques dizaines d'Ampères. C'est avec le progrès de la technologie MOSFET que de nouvelles approches sont possibles !