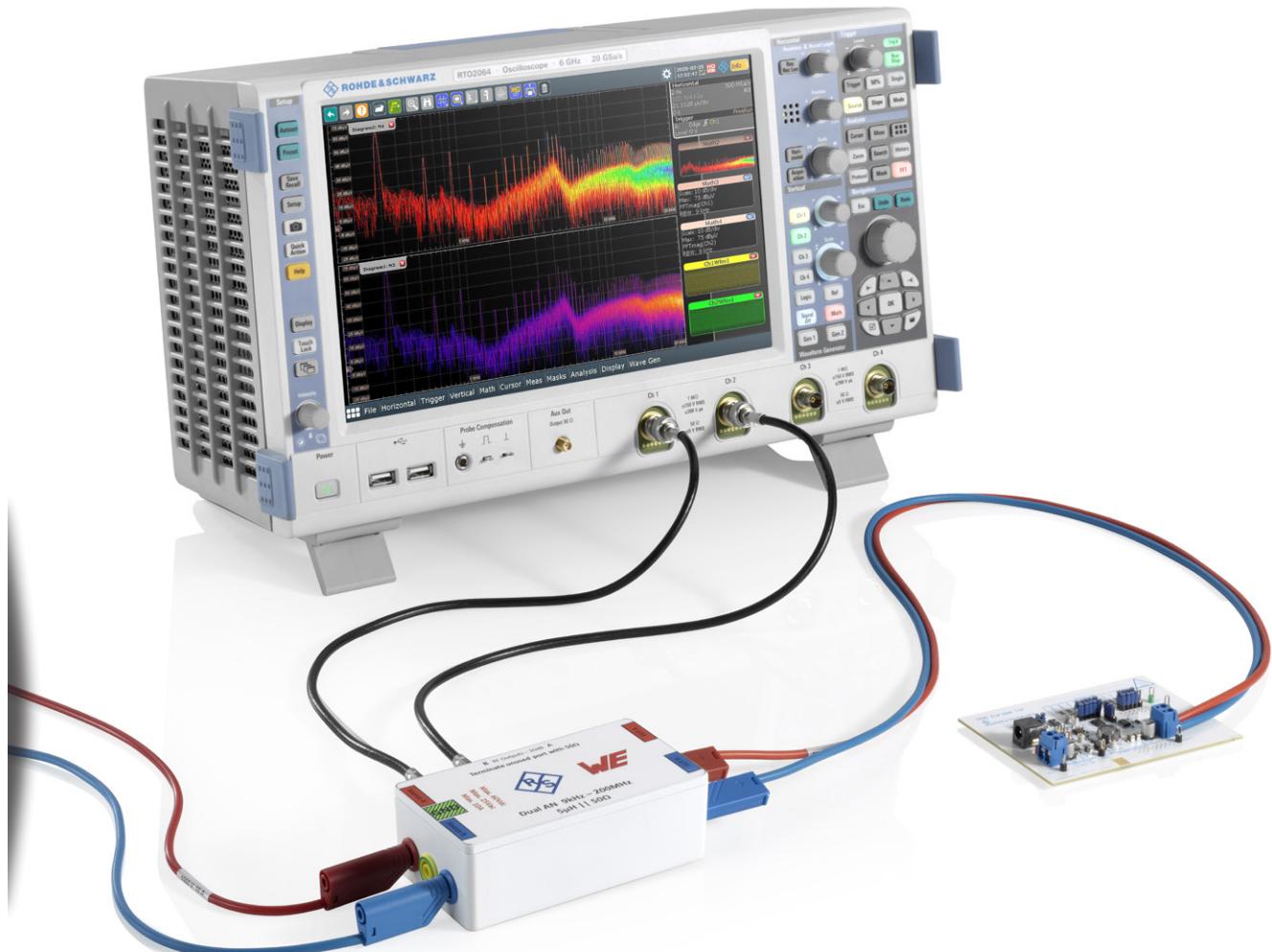


test de préconformité CEM pour un projet alimenté en courant continu

Partie 2 : le matériel et son utilisation

Robert Schillinger (Würth Elektronik) et Ton Giesberts (Elektor)



Dans notre article précédent, nous avons présenté le réseau de stabilisation d'impédance de ligne (RSIL) pour courant continu qu'Elektor et Würth Elektronik proposent dans la boutique en ligne d'Elektor. Cette fois-ci, nous examinons le matériel de plus près et son utilisation dans les tests de préconformité CEM des montages électroniques.

Un RSIL est un filtre passe-bas, généralement placé entre une source de courant alternatif ou continu et le M&T (matériel à tester), pour créer une impédance connue et fournir un port de mesure du bruit radiofréquence (RF). Il isole également les signaux RF indésirables de la source d'alimentation. En outre, les RSIL peuvent être utilisés pour prédire les émissions conduites pour les tests de diagnostic et de préconformité [1].

Le double RSIL pour courant continu (DC) présenté ici est utilisé pour mesurer les émissions d'interférences conduites d'un objet de test dans la gamme de fréquences de 150 kHz à 200 MHz. L'appareil est basé sur la norme CISPR 25/ISO 7637 pour les systèmes électriques automobiles. Il mesure les interférences RF sur les deux canaux de ces systèmes en utilisant des inductances

de blocage de $5 \mu\text{H}$, valeur typique pour les RSIL de test des équipements automobiles. La conception est basée sur une note d'application d'Analog Devices (DC2130A – anciennement Linear Technology [2]). Ce RSIL offre la possibilité de mesurer le bruit en mode différentiel (DM) et en mode commun (CM).

Le circuit RSIL

La partie supérieure de la **figure 1** montre le schéma de base de tous les types de RSIL : une inductance de blocage du bruit RF, un condensateur pour supprimer la composante continue de la sortie RF, et une impédance de 50Ω pour le port de mesure. En pratique, cette dernière impédance est beaucoup plus complexe qu'une simple résistance. La partie inférieure de ce

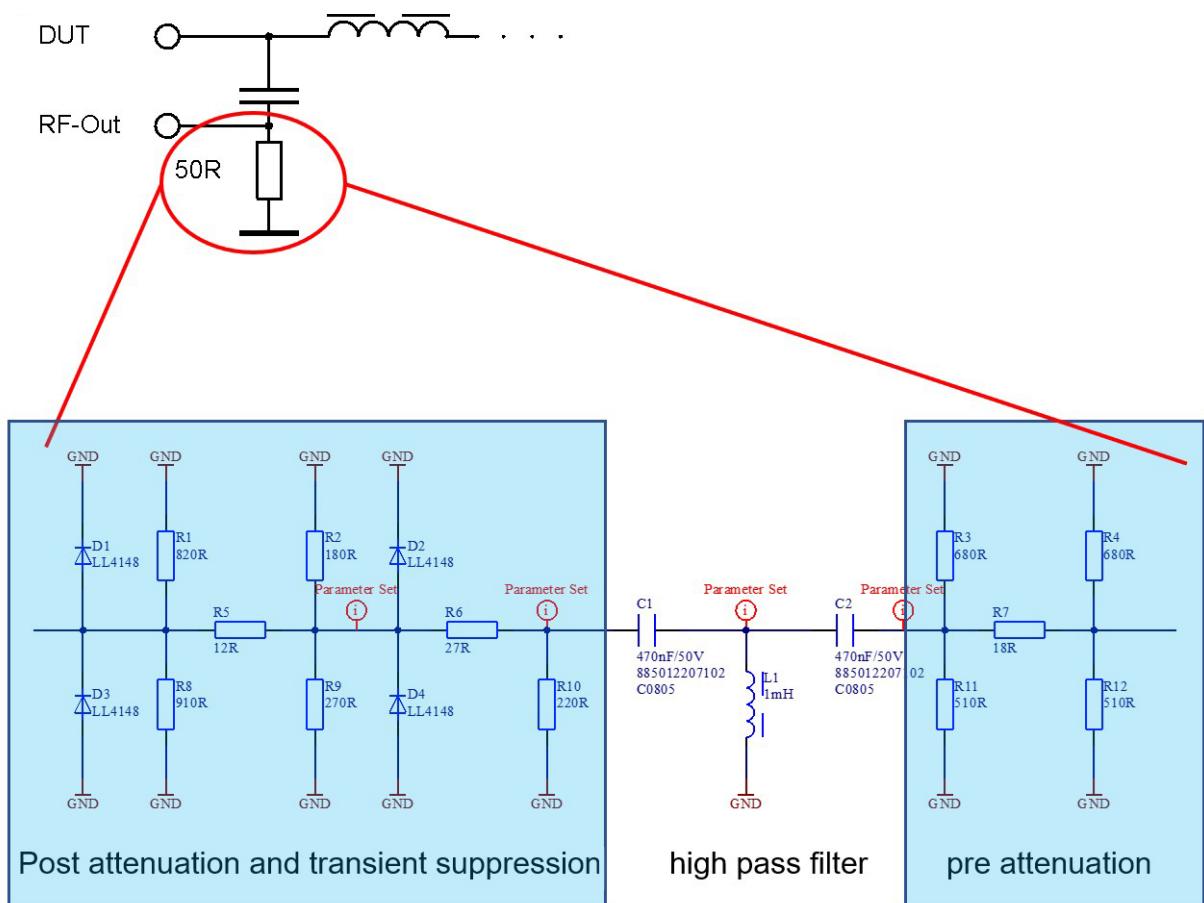


Figure 1. Les étages de sortie RF en détail.

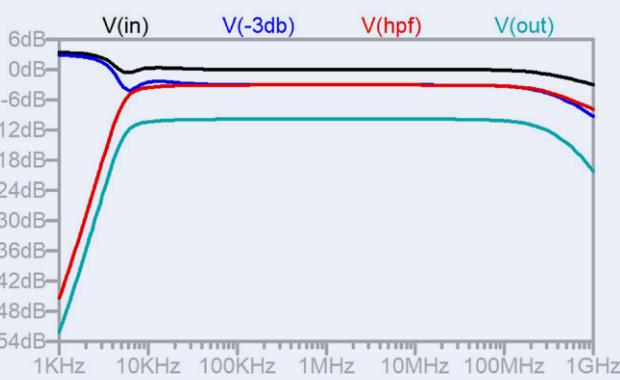


Figure 2. Caractéristiques du RSIL.

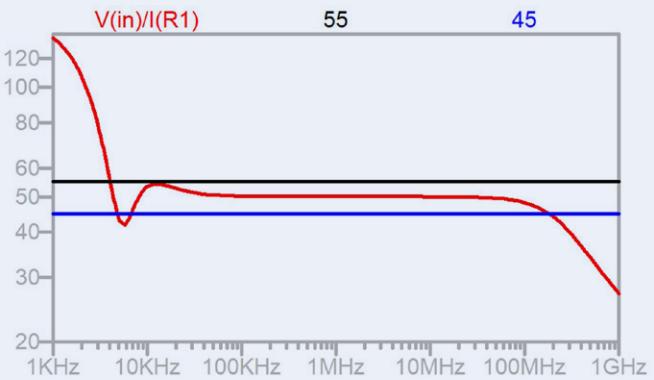


Figure 3. Courbe d'impédance.

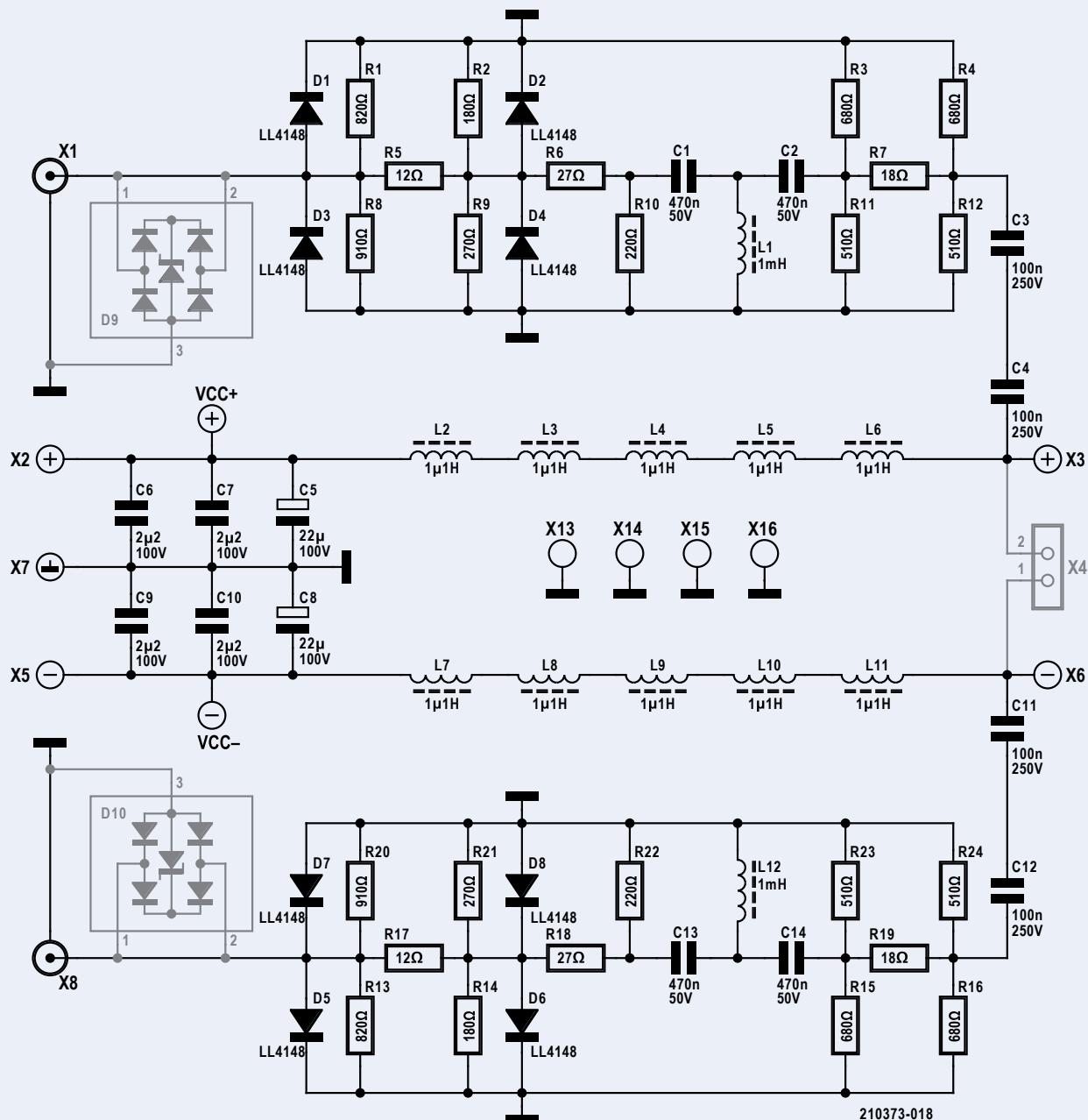


Figure 4. Le schéma complet de notre RSIL.

Webinaire sur la CEM : comment déboguer une alimentation à découpage à transfert indirect (flyback) !

Notre prochain webinaire présentera les bases du débogage d'une alimentation *flyback* à l'aide d'un oscilloscope et évaluera les instruments complémentaires nécessaires. Nous vous donnerons un aperçu approfondi des alimentations à découpage, de leurs sources de bruit et du type de filtrage nécessaire pour passer avec succès les tests de conformité CEM. À la fin du webinaire, vous devriez être en mesure de faire la distinction entre le bruit en mode différentiel (DM) et celui en mode commun (CM) ainsi que de comprendre comment déterminer le mode dominant. Ce webinaire aura lieu le 2 décembre 2021, à 16h00 CET. Davantage d'informations bientôt sur www.elektormagazine.com/webinars.

schéma montre qu'elle peut être subdivisée en trois étages : pré-atténuation, filtre passe-haut et post-atténuation. Nous allons les examiner tous les trois plus en détail. Les courbes présentées sont le résultat de simulations informatiques des circuits. Ce qui suit décrit le réseau d'atténuation, à l'exclusion des condensateurs de couplage C3/C4 et C11/C12. Ces condensateurs limitent la fréquence inférieure de la plage de mesure à la norme de 150 kHz (la fréquence de coupure est d'environ 64 kHz ; à 125 kHz, l'atténuation est d'environ -1 dB).

Pré-atténuation :

Au premier étage, un filtre en π [V(-3db)] de -3 dB à 50 Ω réduit le niveau de bruit. La courbe bleue de la **figure 2** représente l'atténuation en fonction de la fréquence.

Filtre passe-haut :

Le deuxième étage est un filtre passe-haut du troisième ordre [V(HPF)] avec une fréquence de coupure de 5,5 kHz (-3 dB) pour limiter la gamme de fréquences de 9 kHz à environ 200 MHz, comme le montre la figure 2 (courbe rouge). Cet étage ne filtre que les fréquences inférieures à 6 kHz et n'est pas absolument nécessaire pour atteindre l'atténuation de 10 dB pour le signal. Il serait possible de le supprimer de la conception.

Post-atténuation :

Le dernier étage porte l'atténuation à -10 dB [V(out)] (courbe bleue de la figure 2). Il s'agit d'une valeur typique pour un RSIL qui doit être compensée par l'appareil de mesure (par exemple, par un gain interne de 10 dB) ou par le post-traitement des données de mesure dans une feuille Excel.

Les inductances de 5 μ H bloquent le chemin de retour vers l'alimentation du bruit produit par le Mât sur toute la gamme de fréquences. 5 μ H est une valeur typique utilisée dans la norme CISPR25. Lorsqu'elle est utilisée pour une configuration CISPR22, il faut observer ce qui se passe aux fréquences inférieures à 400 kHz. En raison de la faible inductance (diminution de la réjection AC à des fréquences plus basses), vous mesurerez les niveaux les plus bas.

La diminution de l'impédance au-delà de 100 MHz (**fig. 3**) est due à la capacité parasite des diodes d'écrêtage. Ces diodes ont pour fonction de supprimer les pointes

de tension élevées sur les sorties RF. Pour les tests de préconformité, si l'on dispose d'un oscilloscope avec des entrées moins sensibles et protégées en interne, on peut les omettre.

La **figure 4** montre le schéma complet de notre double RSIL DC. Les circuits de sortie RF décrits sont facilement identifiables, X1 et X8 étant les sorties RF pour les mesures d'interférences conduites. L'alimentation en courant continu (entrée, mono-tension et connexion supplémentaire à l'alimentation et au plan de masse) est connectée à X2, X5 et X7. Les bornes d'alimentation du Mât (sortie) sont connectées à X3 et X6 (ou X4, qui n'est pas inclus dans notre kit RSIL).

Les inductances de 5 μ H normalement employées pour ce RSIL sont réalisées ici par la mise en série de cinq bobines standard de 1,1 μ H du catalogue de Würth Elektronik. Une des raisons du choix de ce composant est le courant maximal pouvant atteindre 10 A. Le modèle utilisé est petit, avec une fréquence de résonance élevée, et donc moins de capacité parasite. Il a un bon rapport inductance/courant (variation d'inductance limitée sur toute la gamme de courant jusqu'à 10 A). La plupart des RSIL du commerce utilisent des bobines à air, mais qui nécessitent plus d'espace et ne sont pas disponibles en tant que composants indépendants.

Acheter ou faire soi-même ?

Un kit complet pour ce RSIL – sponsorisé par Würth Elektronik – est disponible dans la boutique d'Elektor [3]. Comme tous les composants CMS sont préassemblés, vous n'aurez qu'à souder les connecteurs et monter le circuit imprimé à l'intérieur du boîtier déjà percé et fraisé pour réaliser le RSIL.

Pour les plus courageux d'entre vous, les fichiers Gerber nécessaires pour commander votre propre exemplaire du circuit imprimé à quatre couches sont disponibles sur la page Elektor Lab de ce projet [4] (voir **fig. 5**). La liste détaillée du matériel vous guidera pour dénicher les

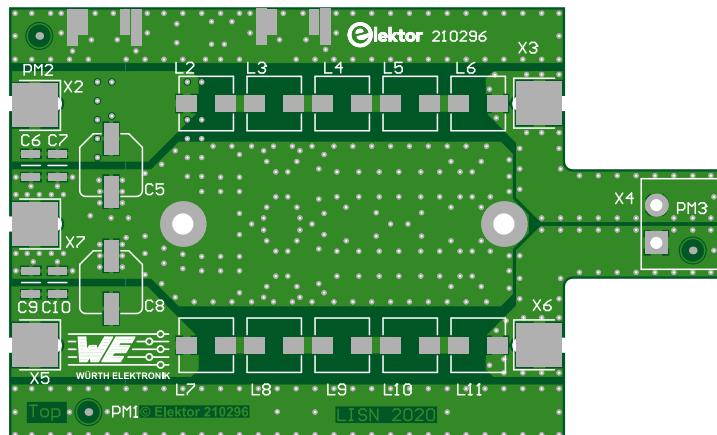


Figure 5. Implantation sur le circuit imprimé.

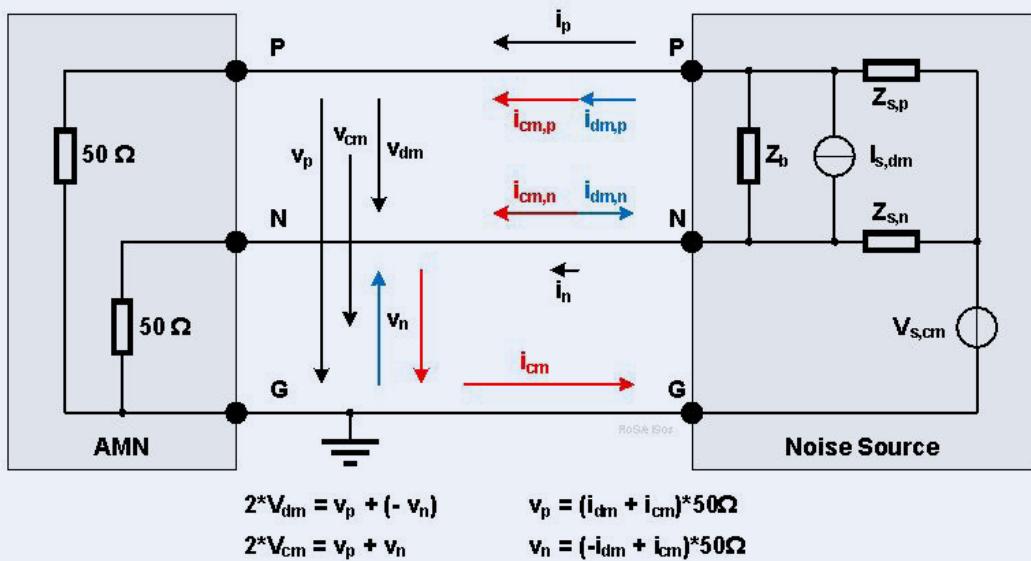


Figure 6. Tensions et courants en modes commun et différentiel.

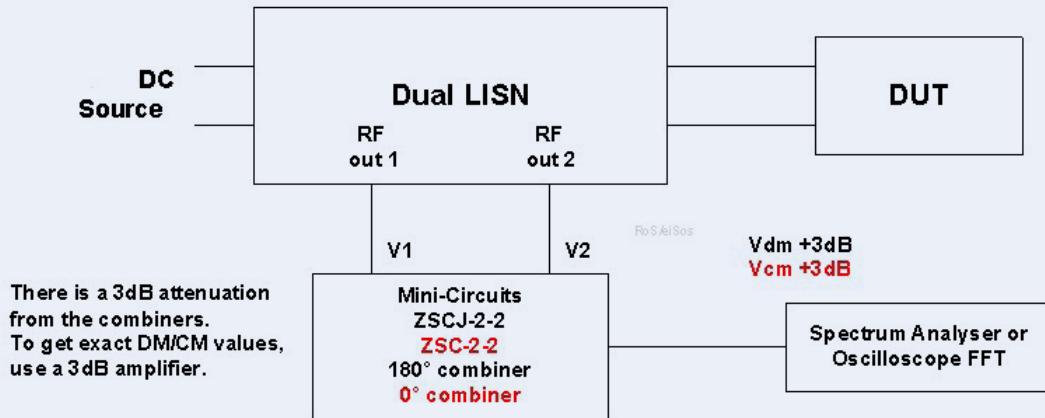


Figure 7. Configuration de test utilisant des combinateurs Mini-Circuit (ou pas).

composants nécessaires à la réalisation de votre RSIL.

Les composants CMS sur la face supérieure de la carte, C5-C10 et L2-L11, peuvent être soudés dans un four à refusion. Le soudage des inductances à l'aide d'une station de retravail à air chaud ou d'un fer à souder à pointe fine sera difficile – voire impossible – car les pastilles situées entre les inductances sont presque inaccessibles. De plus, le circuit imprimé est de type 4 couches et une grande puissance de soudage est nécessaire pour chauffer une pastille, surtout si elle est reliée à un plan d'alimentation.

Les composants sur la face inférieure du circuit imprimé, comme les petites résistances 0603, les condensateurs et les deux petites inductances, peuvent être soudés à l'air chaud. Souder une 0603

avec un petit fer à souder est possible, mais beaucoup de chaleur est perdue dans les quatre couches. Avec l'air chaud, réglez son débit au minimum, sinon ces petits composants risquent de partir à la dérive.

Les connecteurs SMA femelles (X1, X8) peuvent être soudés à l'air chaud. Tout d'abord, appliquez de la pâte à souder sur toutes les pattes en haut et en bas du premier connecteur, positionnez-le sur le circuit imprimé, et augmentez le flux d'air pour le souder des deux côtés. Assurez-vous que la broche centrale est bien positionnée au milieu de sa pastille et soudez-la en premier. Puis soudez les pattes de masse des deux côtés du circuit imprimé.

Les contacts à ressort (doigts de contact) peuvent également être soudés à l'air chaud avec de la pâte à souder. Mettez-en

un peu sur les pastilles (X13-X16) et placez le contact en position verticale. Arrêtez lorsque toute la pâte à souder coule et que le contact a bien pris sa place.

Les diodes en boîtiers MiniMELF peuvent être soudées à l'aide d'un fer à petite panne plate et un fil de soudure très fin, par exemple de 0,35 mm. Commencez par mettre un peu de soudure sur une pastille, de préférence celle de masse, car faire couler la soudure sur ces pastilles prendra un peu de temps. Quand c'est prêt, placez la diode. La pastille de signal est plus facile à souder. À l'aide de brucelles, alignez soigneusement la diode bien au centre de son repère sur le circuit imprimé et soudez une extrémité. Pour chaque paire de diodes, la cathode de l'une (anneau noir) et l'anode de l'autre sont soudées à la masse. Soudez maintenant l'autre côté

et reprenez la première en ajoutant un peu de soudure.

Une fois que tous les composants sont soudés sur les deux faces, fixez les douilles bananes au boîtier avec les contacts en position verticale. Faites glisser le circuit imprimé dans le boîtier avec les prises SMA dans les trous correspondants. Veillez à ce que les contacts à ressort sur le bas du circuit imprimé n'accrochent pas le bord du boîtier.

Appuyez doucement sur le circuit imprimé et placez la rondelle frein et l'écrou sur les connecteurs SMA. Soudez ensuite les contacts des fiches bananes aux pastilles (X2, X3, X5, X6, X7) tout en maintenant le circuit imprimé en place. Fixez le couvercle sur le boîtier et le RSIL est prêt à l'emploi.

Utilisation du RSIL

La **figure 6** illustre les tensions et les courants impliqués dans la mesure des deux types de bruit conduit.

Pour le bruit en mode différentiel, le courant circule de la source vers la charge et revient sur l'autre ligne. La mise à la terre n'est pas importante dans ce cas. La tension en mode différentiel est calculée avec $V_{dm} = 0,5 * (V_p - V_n)$.

Pour le mode commun, le courant circule sur les deux lignes dans le même sens et retourne à la source via la terre. Ce courant de retour peut également être conduit par des effets de couplage parasite. La tension de mode commun est calculée avec $V_{cm} = 0,5 * (V_p + V_n)$.

Il y a deux façons de mesurer le bruit en mode différentiel et en mode commun avec notre RSIL (voir **fig. 7**). La première utilise un combinateur, disponible chez Mini-Circuits [5], pour additionner les deux sorties RF (avec ou sans déphasage de 180°), puis effectuer les mesures et les calculs de mode différentiel/mode commun.

La deuxième approche utilise un oscilloscope numérique à deux canaux et ses fonctions mathématiques (addition et FFT). Dans ce cas, les combinateurs de Mini-Circuits sont inutiles, car V1 et V2 sont directement connectés aux canaux d'entrée de l'oscilloscope.

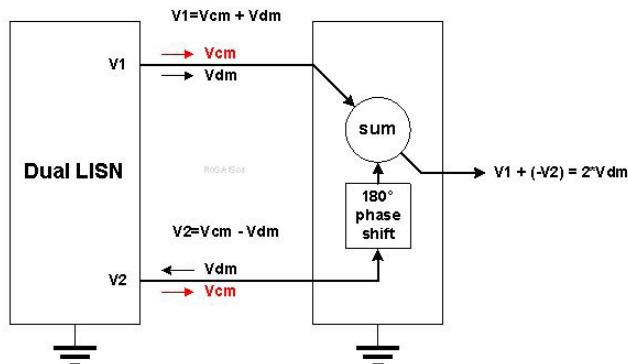
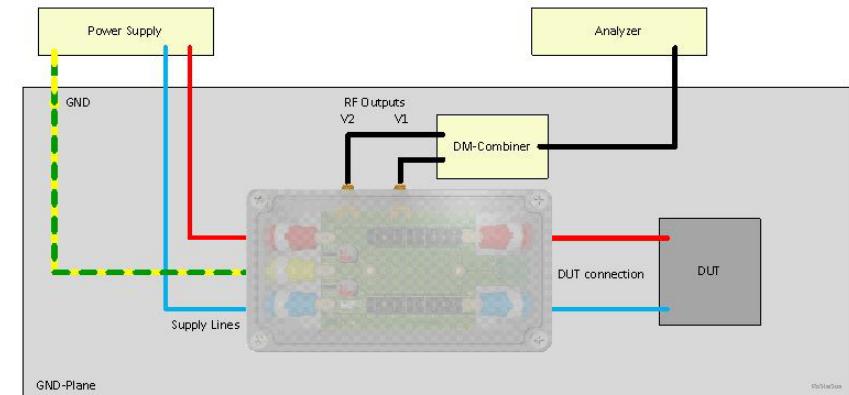


Figure 8. Configuration de la mesure du bruit en mode différentiel.

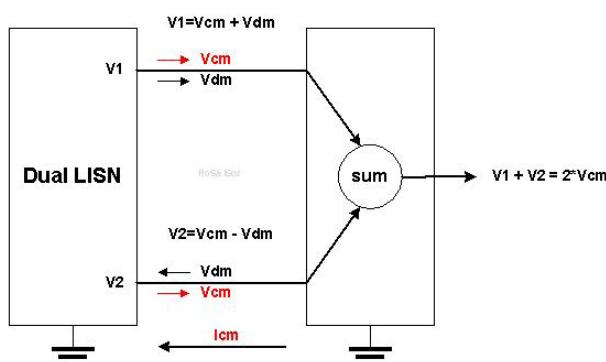
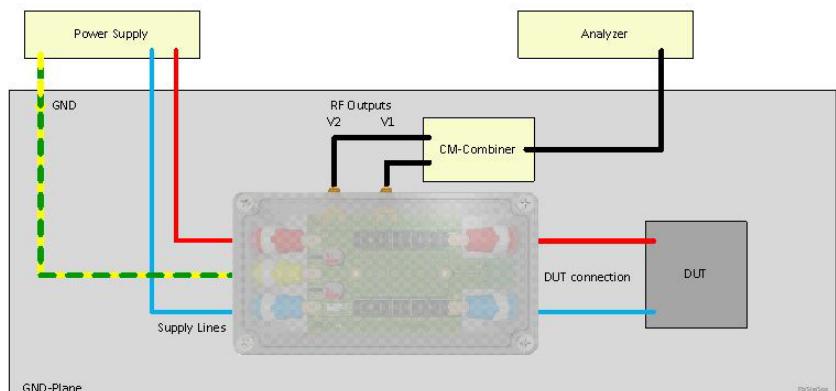


Figure 9. Configuration de la mesure du bruit en mode commun.

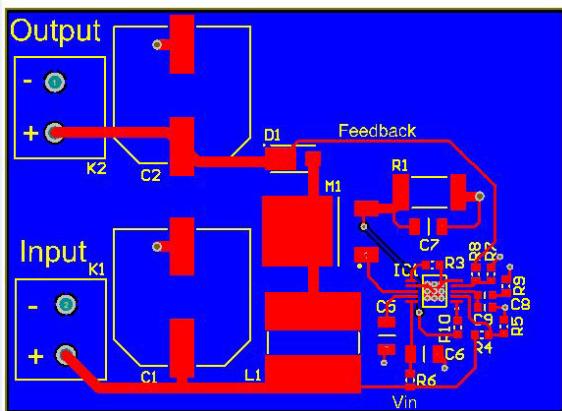


Figure 10a. Première version, non conforme.

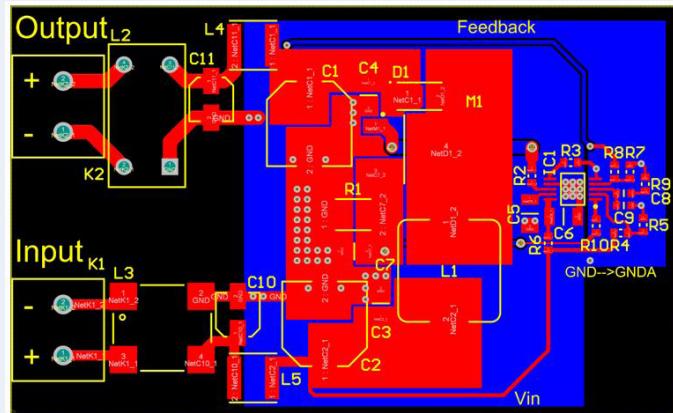


Figure 10b. Version avec implantation et filtrage améliorés, conforme à la norme CISPR22B.

Figure 10. Deux versions du circuit imprimé d'une alimentation à découpage :

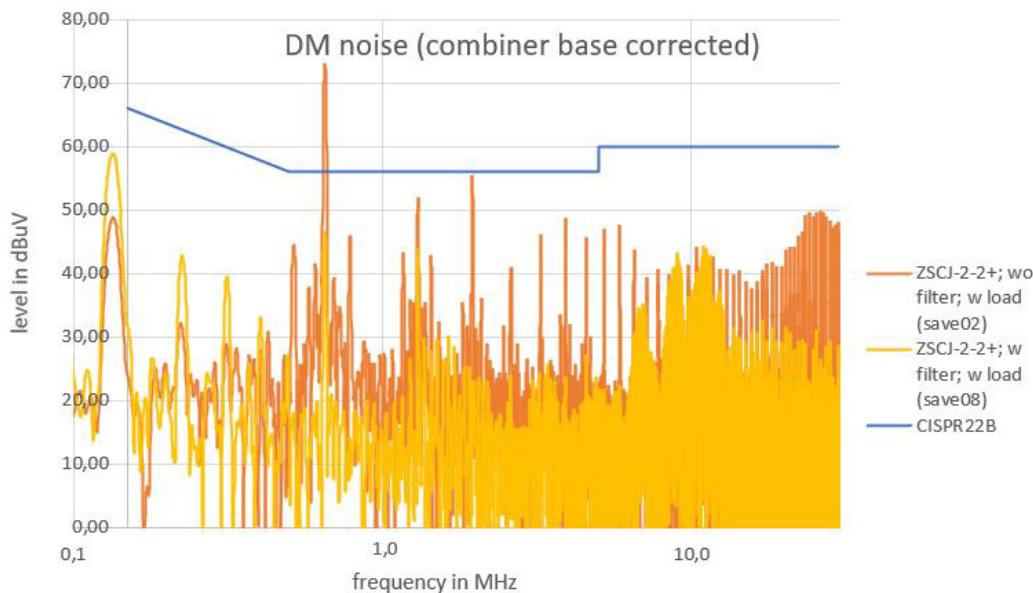


Figure 11a.
Mode différentiel.

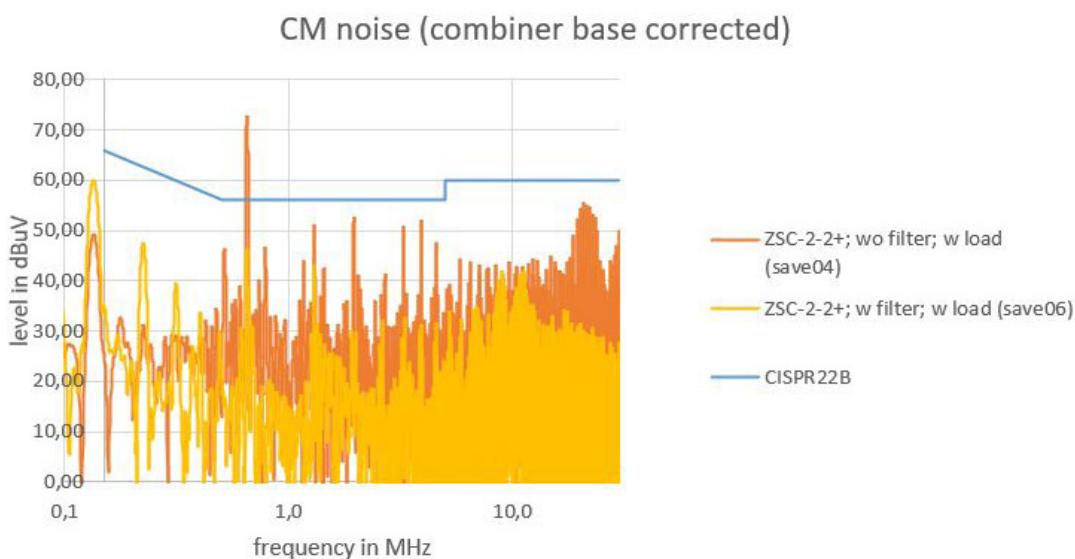


Figure 11b.
Mode commun.

Figure 11. Bruit en fonction de la fréquence pour les deux versions :

Caractéristiques techniques

Chemin RF

Canaux :	2 (avec diodes d'écrêtage)
Bandé passante :	200 MHz
Inductance :	5 μ H 50 Ω
Atténuation interne :	10 dB

Chemin DC

Courant max. :	< 10 A continu
Tension max. :	< 60 V continu
Résistance en continu :	< 2 x 70 m Ω
Taille du circuit imprimé :	94,2 x 57,4 mm (sans connecteurs)

Par précaution, ne connectez l'analyseur que lorsque la source d'alimentation connectée au RSIL est sous tension afin de protéger l'instrument de mesure. Déconnectez l'analyseur du RSIL avant d'éteindre ou de débrancher la source d'alimentation du RSIL. Tout port de sortie non utilisé doit être terminé avec 50 Ω .

La **figure 8** montre comment effectuer les mesures de bruit en mode différentiel. Les deux tensions de sortie du RSIL sont additionnées, l'une étant déphasée de 180° avant l'addition. Dans le cas idéal, les tensions de mode commun s'annulent et celles de mode différentiel sont doublées. Pour obtenir le niveau correct pour cette mesure, il faut soustraire 6 dB à la valeur mesurée. Il faut aussi tenir compte de l'atténuation de -3 dB du combinateur ce qui, avec les -10 dB du RSIL, conduit aux corrections suivantes :

- 6 dB + 3 dB + 10 dB = +7 dB (avec le combinateur)
- 6 dB + 10 dB = +4 dB (corrections uniquement mathématiques)

La **figure 9** illustre la mesure du bruit en mode commun. Idéalement, la somme de V1 et V2 donne deux fois la composante de tension en mode commun, tandis que celle en mode différentiel s'annule. Si les tensions sont égales en amplitude et en phase sur les deux lignes, on obtient le double (+6 dB) de la tension sur chaque ligne.

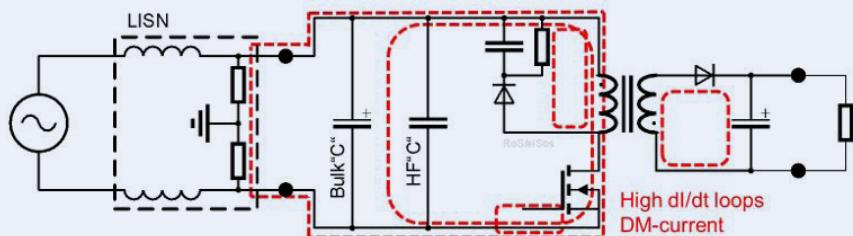
Exemple : test d'une alimentation à découpage

Pour montrer comment les tests de préconformité sont réalisés avec ce RSIL et comment les résultats doivent être traités, nous avons effectué des mesures sur deux exemples de circuits. L'un (**fig. 10a**) est un premier jus grossier d'une alimentation à découpage, l'autre (**fig. 10b**) est la version améliorée du premier après des tests de préconformité réalisés dans un labo CEM professionnel. Ces mesures nous ont permis de corriger les niveaux de CEM obtenus avec notre propre RSIL et l'instrument de mesure de notre labo. Voilà un bon usage de la préconformité ou des mesures croisées pour déboguer un circuit maison.

Bruit conduit

Il existe deux types de bruit conduit, et tous deux peuvent être mesurés avec ce RSIL.

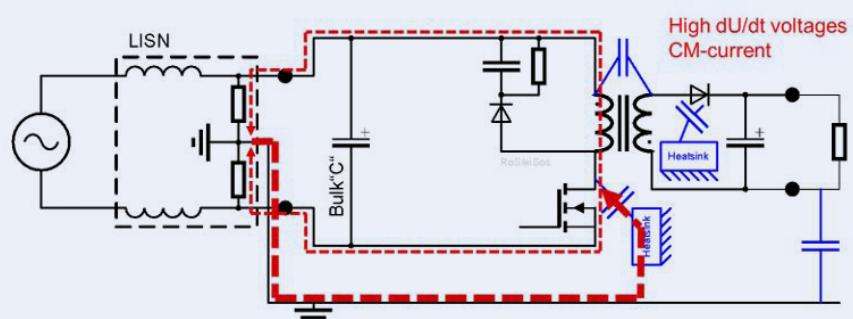
Mode différentiel



Il est causé par un dl/dt élevé ; les circuits se comportent comme des antennes-cadres ou des dipôles magnétiques.

- › Chemin du courant comme sur le schéma ; relativement facile à identifier
- › Chemin de retour du courant très proche
- › Courants relativement élevés
- › dl/dt est le facteur principal
- › Filtrage possible par filtres LC en π et en T

Mode commun



Il est causé par un dV/dt élevé ; les circuits se comportent comme des antennes-dipôles et monopôles électriques.

- › Chemins inattendus des courants parasites
- › Long chemin de retour du courant
- › Courants relativement faibles (gamme des μ A)
- › dV/dt est le facteur principal
- › Filtrage possible avec condensateurs céramiques multicouches (CMC) et condensateurs Y



PRODUITS

- Kit RSIL DC double
www.elektor.fr/19869
- STEMlab 125-14 (kit de démarrage)
www.elektor.fr/17939

La **figure 11** donne les résultats des mesures pour le bruit conduit en mode commun et pour celui en mode différentiel. Pour les deux modes, la deuxième version, avec un dessin amélioré du circuit imprimé et un filtrage supplémentaire, est conforme aux limites de la norme CISPR22B.

Les deux types de bruit sont mesurés de 150 kHz à 30 MHz, la gamme de fréquences correspondant aux exigences de la norme CISPR22. À des fréquences plus élevées, les émissions rayonnées sont mesurées à l'aide d'antennes. Les courbes en orange représentent la carte sans filtre. À 650 kHz, on distingue la fréquence de base de l'alimentation à découpage (SMPS) avec 72 dB μ V. On voit également quelques harmoniques à 1,3 MHz, 1,95 MHz, etc. La ligne bleue indique la limite de la classe B

de la norme CISPR22 ; le bruit conduit doit se situer à environ 10 dB en dessous de cette ligne. Le pic à la fréquence de découpage doit donc être réduit de 22 dB !

En améliorant l'implantation des composants et en ajoutant des filtres dans la deuxième version, nous avons réussi à réduire ce pic. Les courbes en jaune montrent le nouveau résultat de 45 dB μ V à 650 kHz.

Quand on compare les résultats des tests CEM d'un labo certifié avec ceux de notre double RSIL DC, il en ressort qu'il faudra peut-être ajuster la configuration de mesure pour garantir que vos propres tests donneront une bonne évaluation de la conformité CEM de vos produits électroniques..

◀ 210373-01

LIENS

- [1] Wikipedia sur les réseaux RSIL : https://en.wikipedia.org/wiki/Line_Impedance_Stabilization_Network
- [2] Note d'application DC2130A d'Analog Devices : <https://bit.ly/2SS8dc>
- [3] Kit du double RSIL pour courant continu : <http://www.elektor.fr/19869>
- [4] Page de ce projet sur Elektor Labs : <https://bit.ly/2V9zBpJ>
- [5] Mini-circuits pour combinatoires : <https://bit.ly/3CrVzWg>

Contributeurs

Idée et conception :
Robert Schillinger (Würth Elektronik)
Texte : **Robert Schillinger**,
Ton Giesberts
Illustrations : **Robert Schillinger**,
Patrick Wielders
Rédaction : **Luc Lemmens**,
Stuart Cording
Traduction : **Helmut Müller**
Mise en page : **Harmen Heida**

Des questions, des commentaires ?

Envoyez un courriel au rédacteur (luc.lemmens@elektor.com) ou contactez Elektor (redaction@elektor.fr).



LISTE DES COMPOSANTS

Résistances (toutes CMS 0603)

- R1,R13 = 820 Ω 1%
- R2,R14 = 180 1%
- R3,R4,R15,R16 = 680 Ω 1%
- R5,R17 = 12 Ω 1%
- R6,R18 = 27 Ω 1%
- R7,R19 = 18 Ω 1%
- R8,R20 = 910 Ω 1%
- R9,R21 = 270 Ω 1%
- R10,R22 = 220 Ω 1%
- R11,R12,R23,R24 = 510 Ω 1%

Condensateurs

- C1,C2,C13,C14 = 470 nF, 50 V, CMS 0805 X7R (Würth Elektronik 885012207102)
- C3,C4,C11,C12 = 100 nF, 250 V, CMS 1206 X7R (Würth Elektronik 885342208004)
- C5,C8 = 22 μ F, 100 V, CMS WCAP-ASLL (8x10.5) (Würth Elektronik 865060853003 ou 865080853006)
- C6,C7,C9,C10 = 2,2 μ F, 100 V, CMS 1210 X7R (Würth Elektronik 885012209071)

Inductances

- L1,L12 = 1 mH, 200 mA, CMS WE-LQS 5040 (Würth Elektronik 74404054102)
- L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11 = 1,1 μ H, 15000 mA, CMS WE-HCI 7050 (Würth Elektronik 744314110)

Semi-conducteurs

- D1,D2,D3,D4,D5,D6,D7,D8 = LL4148 100 V 100 mA, CMS MiniMelf (SOD-80)
- D9,D10 = diode TVS, non utilisée/montée

Divers

- X1,X8 = SMA femelle 9,52, 5 broches, 180° pour circuit imprimé 1,6 mm (Würth Elektronik 60312242114510)
- X2,X3 = prise de sécurité, 4 mm, jack, montage sur panneau, 24 A, 1 kV, contacts dorés, rouge (Staubli 23.3000-22)
- X5,X6 = prise de sécurité, 4 mm, jack, montage sur panneau, 24 A, 1 kV, contacts dorés, bleu (Staubli 23.3000-23)

X7 = prise de sécurité, 4 mm, jack, montage sur panneau, 24 A, 1 kV, contacts dorés, vert/jaune (Staubli 23.3000-20)

X13,X14,X15,X16 = doigt de contact WE-SECF SMD EMI, 7x2,5x13 mm (Würth Elektronik 331161702513)

X4 = non monté

Boîtier = 1590N1 aluminium moulé, 121,2 x 65,5 x 39,8 mm, Hammond MFG

Circuit imprimé 210296-1 v1.0

Optionnel (pour connecter le RSIL au STEMlab 250-14)

4 adaptateurs SMA mâle – BNC en cas d'utilisation de 2 câbles BNC standard ou de 2 câbles SMA (mâle-mâle)