

Driver pulsé:

Une autre méthode de mise au point des amplificateurs RF de puissance

Joël REDOUTEY F6CSX f6csx@free.fr

(Révision B4)

Le système que nous allons décrire est destiné à la mise au point des amplificateurs RF de puissance (PA) dans la gamme s'étendant des bandes décimétriques au 13cm. Il est constitué d'une boîte que l'on appellera *pulseur* qui s'intercale entre un générateur RF et le PA en test. Ce système permet de faire fonctionner le PA en régime pulsé, à faible rapport cyclique, c'est-à-dire pendant un temps très court devant la période de récurrence.

Sa puissance crête sera donc égale à sa valeur nominale, mais sa puissance moyenne sera très faible, d'où une diminution drastique de l'échauffement, de la consommation et des risques dus à la désadaptation en cours de réglage.

Régime pulsé

Le régime pulsé consiste à faire fonctionner périodiquement un appareil pendant un temps très court. Le rapport entre le temps de fonctionnement et la période T (inverse de la fréquence) est appelé rapport cyclique et noté α (duty cycle D dans la littérature anglo-saxonne). C'est un nombre sans dimension compris entre 0 et 1, souvent exprimé en %. Durant la phase de marche, le circuit fonctionne de manière nominale. Durant la phase de repos, il est à l'arrêt.

Prenons l'exemple d'un émetteur CW de 100W transmettant une série de points. Si la durée du point est égale à l'espace entre 2 points, nous sommes en présence d'un régime pulsé de rapport cyclique 50%. La puissance crête transmise est bien de 100W, mais la puissance moyenne n'est que de 50W. Si nous augmentons l'espace entre 2 points, nous pouvons diminuer le rapport cyclique jusqu'à une valeur très faible. Si par exemple, l'espace entre 2 points est égal à 9 fois la durée du point, le rapport cyclique sera de 10% et la puissance moyenne de 10W.

Observons maintenant l'aiguille du wattmètre de notre émetteur. Si nous manipulons à très faible vitesse, nous verrons l'aiguille monter puis redescendre, mais si nous augmentons la vitesse, nous verrons l'aiguille frétiller à une valeur intermédiaire. En augmentant encore la vitesse, l'aiguille finit par se stabiliser à une valeur égale à la puissance nominale multipliée par le rapport cyclique.

Autrement dit, l'aiguille du wattmètre de notre émetteur de 100W indiquera 10W si le rapport cyclique est de 10%. Ceci est dû au fait qu'un galvanomètre à cadre mobile est sensible à la valeur moyenne du courant qui le traverse. Si la période T est suffisamment faible devant la constante de temps du galvanomètre, l'aiguille prendra une position stable.

Intérêt du système

La première mise sous tension d'un PA est souvent source de stress autant pour les composants que pour l'opérateur... Ce système permet une mise au point en toute sécurité sous tension et puissance nominales, sans risque de casse et sans échauffement excessif puisque le PA fonctionne en régime pulsé à très faible rapport cyclique.

L'alimentation du PA ne devra fournir qu'une puissance réduite. On pourra donc mettre au point un gros PA avec une petite alimentation, ce qui limite beaucoup les risques. Prévoir cependant une

capacité tampon suffisamment grande pour pouvoir fournir l'intensité nécessaire durant le temps de fonctionnement. La capacité nécessaire se calcule par la formule approchée par excès $C = I\Delta t / \Delta V$ où I est l'intensité consommée par le PA, Δt le temps pendant lequel le PA fonctionne et ΔV la chute de tension admissible durant la période de conduction.

Prenons l'exemple d'un PA qui consomme 5A sous 24V. Nous allons le faire fonctionner en régime pulsé à 100Hz et 20% de rapport cyclique. La période est donc de 10ms et le temps de fonctionnement de 2ms. Supposons qu'on admette que pendant ces 2ms la capacité se décharge de 1V. La valeur de la capacité nécessaire sera donc d'environ $C = 5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} / 1 = 10\,000 \mu\text{F}$

Principe du pulseur

Le circuit se compose essentiellement d'un modulateur de largeur d'impulsion (MLI ou PWM) contrôlant un interrupteur à courant continu et un interrupteur RF (figure 1). La fréquence de la MLI est réglable d'environ 40Hz à 300Hz et le rapport cyclique de 0 à 100%.

La puissance délivrée par le générateur RF, typiquement 10dBm, n'est en général pas suffisante pour attaquer correctement le PA. Dans ce cas il est nécessaire d'utiliser un amplificateur intermédiaire pour atteindre le niveau de puissance d'excitation requis par le PA en test. Celui-ci sera alors placé entre le switch RF et le PA, et pourra être alimenté par la tension pulsée (ceci n'est pas obligatoire car l'entrée du booster est en permanence chargée par 50Ω ce qui limite les risques d'instabilité). Dans le cas d'un amplificateur linéaire, la tension de polarisation du PA pourra être prise sur la tension pulsée.

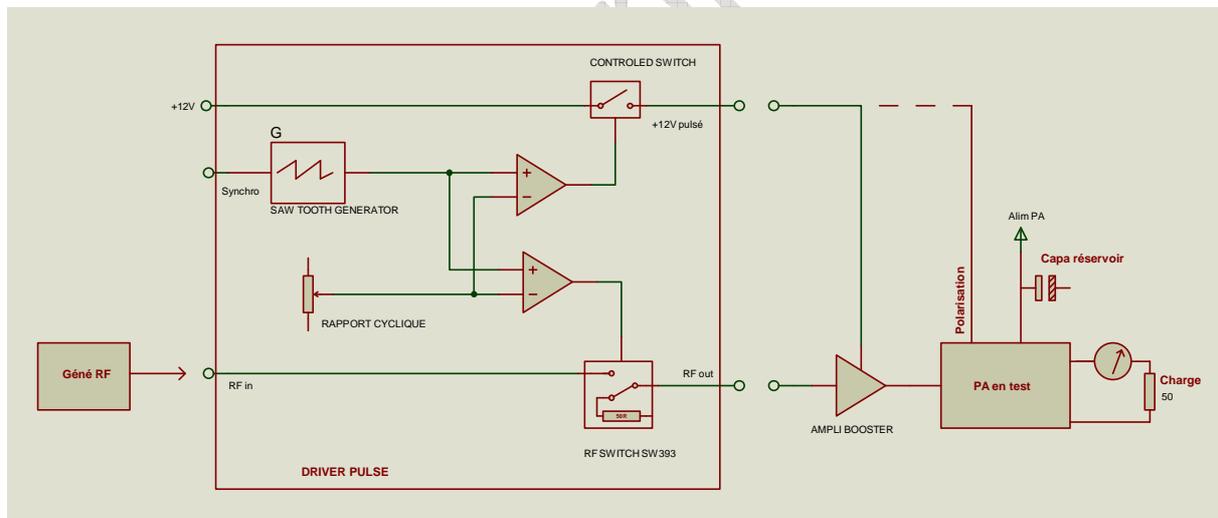


Figure 1 - Schéma de principe du système

Description du circuit pulseur (voir schéma)

Le générateur de dents de scie

On utilise un timer 555 monté classiquement en astable dans lequel, la charge de la capacité C1 ne se fait pas à travers une résistance, mais via le transistor Q1 monté en générateur de courant. Son intensité est ajustée par le potentiomètre de réglage de la fréquence RV1.

Le condensateur C1 étant chargé à courant constant, la tension à ses bornes croît linéairement. On obtient aux bornes de la capacité C1 une tension qui croît linéairement entre 1/3 et 2/3 de la tension d'alimentation Vcc.

La décharge de C1 s'effectue à travers le 555, jusqu'à ce que la tension atteigne $1/3$ de V_{cc} , ceci dure quelques μs . Ensuite, le cycle recommence et on dispose aux bornes de C1 d'un signal en dents de scie.

Parallèlement, on récupère sur la sortie Q du 555 un signal rectangulaire qui est mis en forme par le transistor Q3. Nous obtenons ainsi d'un signal de synchronisation (niveau TTL) compatible avec la plupart des analyseurs de spectre. Nous verrons son utilité par la suite.

A noter que l'impulsion de synchronisation arrive avant le début de la phase de conduction, ce qui permet d'observer l'établissement de l'impulsion RF et la présence d'un éventuel overshoot potentiellement dangereux, notamment avec les amplificateurs à LDMOS.

Elaboration du rapport cyclique

La tension en dents de scie est appliquée aux entrées non-inverseuses d'un double comparateur LM393. Les entrées inverseuses reçoivent une tension continue variable entre $(1/3) V_{cc} - \epsilon$ et $(2/3) V_{cc} + \epsilon$ par l'intermédiaire du potentiomètre RV2. En sortie de comparateur (collecteur ouvert), on récupère un signal rectangulaire dont le rapport cyclique est proportionnel à la tension fournie par RV2 et ajustable entre 0 et 100%.

L'alimentation pulsée

Le premier comparateur attaque un transistor MOSFET canal P Q2 monté en série avec l'alimentation V_{cc} . Les transistors Q4 et Q7 assurent une commutation correcte de Q2. Selon le choix de Q2, le courant disponible est plus ou moins important. Avec un IRF9530, on dispose d'au moins 4A. La sortie 12V pulsée pourra être utilisée pour alimenter un circuit driver ou la polarisation du PA en test (bipolaire ou LDMOS). Une LED D1, branchée sur la sortie, fournit un éclairage variable selon le rapport cyclique et sert de témoin.

Le circuit fonctionne pour V_{cc} compris entre 10 et 18V. Moyennant quelques petites modifications, il est possible de le faire fonctionner jusqu'à 30V (non testé pour l'instant).

Le switch RF

Le second comparateur commande un circuit switch RF SW-393 de fabrication MA/com. Ce petit circuit en boîtier SO8 est donné pour une plage de 0,5 à 2 GHz, mais il fonctionne très bien du 13cm jusqu'aux bandes décimétriques basses! Sa sortie est commutée soit sur l'entrée, soit sur une résistance interne de 50Ω , ainsi le circuit placé derrière voit toujours une charge adaptée. Il s'alimente en +5V via un régulateur 78L05.

La perte d'insertion est de quelques dB et varie légèrement avec la fréquence. L'isolation est supérieure à 40dB dans toute la gamme, elle est maximale vers 15MHz et atteint 70dB !

Circuit d'arrêt

Un interrupteur permet de forcer le rapport cyclique à zéro (switch RF ouvert et switch d'alim ouvert). Cette fonction est très pratique lors de la mise au point.

Il n'est pas possible d'utiliser l'entrée reset du 555 car cela provoque l'effet contraire (rapport cyclique à 100%). On utilise la broche CONTROL du 555 en la positionnant à $+V_{cc}$ par l'intermédiaire du transistor Q6.

Option CW

Il est parfois possible d'utiliser son TX, en position CW comme générateur pulsé. Il suffit de connecter la diode d'un opto-coupleur en série avec la diode D1, les sorties de l'opto-coupleur attaquant l'entrée KEY du TX. Cependant certains TX n'acceptent pas une fréquence de manipulation élevée, c'est le cas notamment du FT817, il faudra donc faire des essais.

Réalisation du pulseur

Le circuit est réalisé sur un circuit imprimé double face en époxy de 0,8mm. Ses dimensions sont compatibles avec un boîtier Schubert de 148x55x30 mm. On utilise des composants traditionnels sauf pour le switch RF monté en cms format 805 coté cuivre (4 condensateurs, 4 résistances et un ci SO8). Attention, le Switch RF SW-393 est très sensible aux décharges électrostatiques.



Figure 2 - Photo du prototype en cours de test

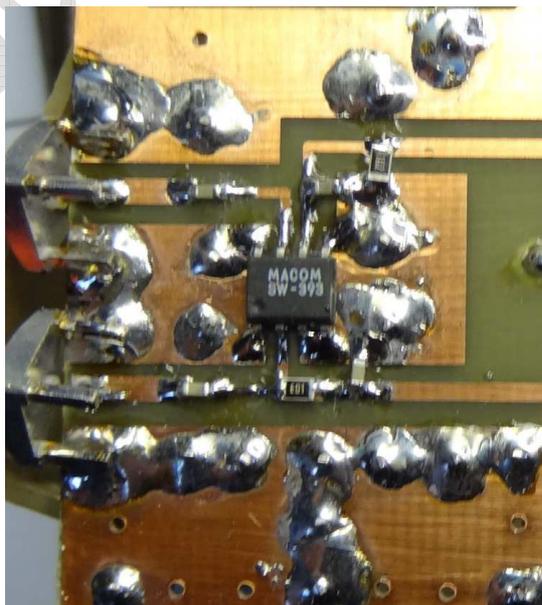


Figure 3 - Le switch RF est monté coté cuivre

Les photos des figures 4 et 5 montrent deux façons de monter le circuit dans le boîtier.



Figure 4 - Réalisation de F6CSX

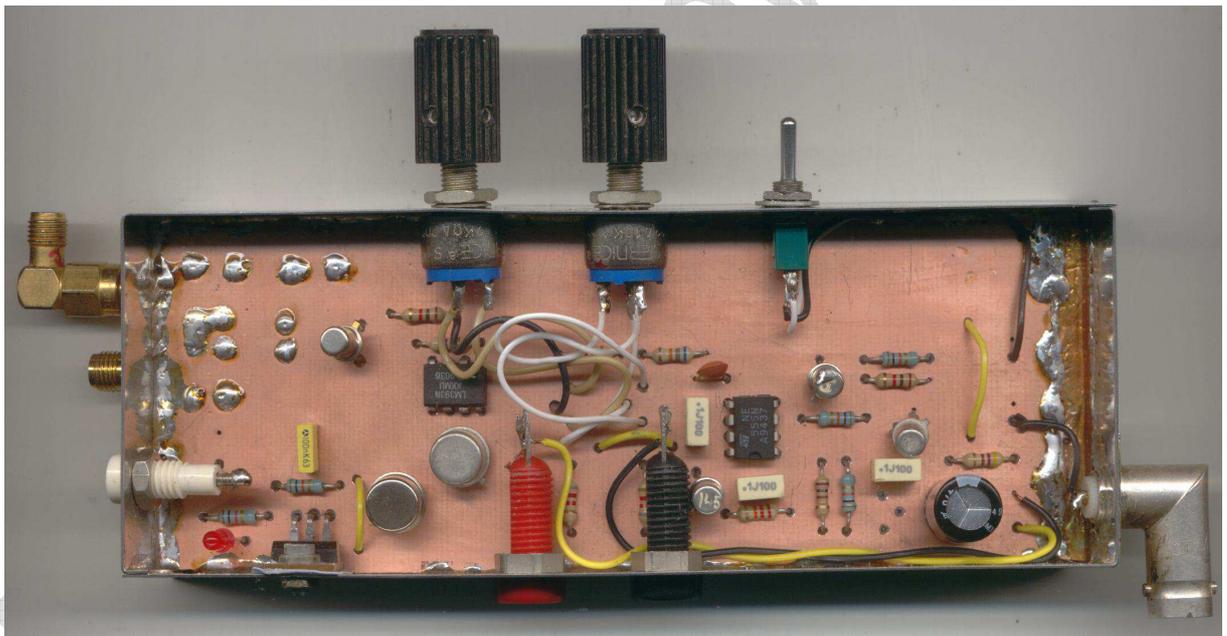


Figure 5 - Réalisation de F6BVA

L'alimentation s'effectue via une paire de douilles banane de 4mm et la sortie pulsée également sur des douilles banane (de 2mm ou 4mm).

La sortie synchro est disponible sur une embase BNC, l'entrée et la sortie du switch RF se font sur des fiches SMA.

Le transistor MOSFET est monté contre la paroi par l'intermédiaire d'un isolant mica recouvert de graisse silicone.

Les deux potentiomètres et l'interrupteur sont montés sur la paroi latérale du boîtier.

Le circuit ne nécessite aucune mise au point. Il faut cependant bien vérifier que le bouton *stop*

est bien actif quel que soit le réglage de la fréquence, du rapport cyclique et la tension d'alimentation.

Alimentation du PA



Figure 6 - Capacité réservoir 1

Comme indiqué précédemment, l'intérêt d'un système pulsé est de pouvoir utiliser une alimentation sous-dimensionnée et limitée en courant. Ceci est possible à condition d'avoir connecté une capacité réservoir capable de fournir l'énergie pendant la durée du pulse. Cette capacité, doit être placée au plus près du PA, ne pas oublier que dans les fils qui la relie au PA circule un courant pulsé dont la valeur crête est égale à la valeur nominale du courant consommé par le PA. Il faudra donc les dimensionner en conséquence.

Si la capacité de ce condensateur réservoir est très élevée, attention à bien respecter sa polarité, en cas d'inversion de polarité le condensateur peut éclater et causer de graves dégâts. Il est fortement recommandé de connecter de manière permanente une diode en antiparallèle ainsi qu'une résistance qui assurera la

décharge du condensateur après usage.

L'utilisation de cette capacité réservoir ne dispense pas de l'utilisation de capacités de découplage dans le PA. L'absence de découplages suffisants peut se traduire par l'apparition de surtensions dues à l'inductance des câbles (environ $1\mu\text{H}$ par mètre).

Utilisation – mode d'emploi

La configuration de mesure dépend du matériel dont on dispose et de la fréquence à laquelle on va travailler. Dans tous les cas, il faudra disposer d'une charge 50Ω capable d'absorber la puissance nominale de l'amplificateur en test et d'un moyen de mesure de la puissance. Pour les bandes basses (du décimétrique au 2m), un simple wattmètre peut suffire. Pour les bandes supérieures, un analyseur de spectre est quasiment indispensable.

Configuration minimale (bandes basses uniquement)

Nous aurons besoin d'un générateur RF connecté à l'entrée RFin du pulseur. Attention, ne pas dépasser 20dBm (100mW), dans la pratique il est conseillé de se limiter à 10 - 13 dBm. La sortie RFout du pulseur sera connectée à l'entrée du PA soit directement, soit via un petit amplificateur permettant de relever le niveau pour l'amener à environ 80% de l'excitation nécessaire pour l'obtention de la puissance maximale du PA. Si cet amplificateur intermédiaire est largement dimensionné, il est fortement conseillé de le sous-alimenter de manière à ce qu'il ne puisse pas délivrer plus que ce que le PA peut accepter (notamment avec des PA à LDMOS qui sont très sensibles aux surcharges). On intercalera avantageusement entre l'ampli auxiliaire et l'entrée du PA un wattmètre directionnel permettant de visualiser la puissance directe et la puissance réfléchi. L'amplificateur auxiliaire pourra être alimenté par le 12V pulsé, mais ce n'est pas obligatoire comme indiqué précédemment. C'est notamment le cas lorsque cet ampli fonctionne sous une tension différente de 12V.

La sortie du PA sera reliée à la charge via un wattmètre ou tout autre dispositif de mesure de la puissance.

Le réglage du rapport cyclique s'effectue de la manière suivante:

Si l'on dispose d'un oscilloscope, le brancher sur la sortie +12V pulsé.

Relier la sortie synchro du pulseur à l'entrée synchro extérieure de l'oscilloscope.

Régler la fréquence de découpage pour que la période fasse exactement 10 carreaux sur l'écran de l'oscilloscope. Compter le nombre de carreaux pendant lesquels le signal est à +12V. Un carreau correspond alors à 10% de rapport cyclique (même procédure avec un analyseur de spectre).

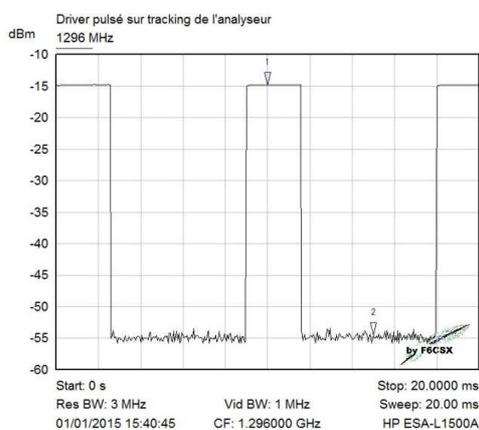
Si l'on ne dispose pas d'un oscilloscope, mesurer la tension d'alimentation V_{cc} (généralement +12V) et la tension $V_{pulsé}$ présente sur la sortie « +12V pulsé » à l'aide d'un multimètre. Faire le calcul :
Rapport cyclique = $V_{pulsé}/V_{cc}$.

Commencer toujours les réglages avec un rapport cyclique faible, 10% maximum pour la première mise sous tension et puissance d'excitation à 50% de la valeur nominale.

Il ne reste plus qu'à alimenter l'ensemble et à procéder aux réglages de manière classique, maximum de puissance de sortie pour un minimum de puissance réfléchi à l'entrée.

Tous les paramètres que vous mesurez sont à diviser par le rapport cyclique. Par exemple si vous mesurez 6W en sortie et une consommation de 1A avec 10% de rapport cyclique, cela veut dire qu'en réalité la puissance de sortie est de 60W et le courant consommé de 10A. En revanche, le radiateur chauffera 10 fois moins !

Configuration avec analyseur de spectre



Le principe est le même, mais nous allons utiliser un analyseur de spectre pour mesurer la puissance.

Un coupleur directionnel étalonné est placé à l'entrée du PA et un autre en sortie. Les relier à l'analyseur en ajoutant éventuellement des atténuateurs pour ne jamais en saturer l'entrée. Sur les fréquences élevées, utiliser des câbles dont la perte d'insertion a été mesurée. Faire un étalonnage très précis.

La figure 7 montre une copie d'écran de la sortie RFout

Figure 7 - Copie d'écran de l'analyseur

Configurer l'analyseur de spectre de la manière suivante (cas d'un analyseur HP/Agilent) :

1- MENU FREQUENCY

Régler la fréquence centrale à la valeur de travail (celle du générateur RF)

2- MENU SPAN

Passer en SPAN ZERO

3- MENU TRIG

Mettre sur EXTERNAL et relier l'entrée TRIG de l'analyseur à la sortie Synchro du pulseur.

4- MENU SWEEP

Choisir la durée de balayage, par exemple 10ms, et ajuster la fréquence de découpage en

conséquence pour voir à l'écran, une, deux ou trois périodes, pas plus. Vérifier le rapport cyclique, puis diminuer la durée de balayage pour que l'impulsion occupe au moins 3 carreaux sur l'écran de l'analyseur de manière à avoir une bonne précision de lecture

5- MENU AMPLITUDE

Ajuster le niveau de référence en tenant compte de la puissance à mesurer et de l'atténuation du coupleur, des câbles et des éventuels atténuateurs connectés.

Une phase de calibration préalable est impérative comme indiqué précédemment.

Travailler avec une échelle dilatée, 1 ou 2 dB par carreau si possible.

6- MENU BW

Il faut impérativement que l'analyseur soit configuré pour la bande passante la plus large possible, afin de ne pas manquer un éventuel overshoot ou parasite pouvant survenir à l'établissement de l'impulsion.

Si l'analyseur dispose d'un générateur de tracking, on l'utilisera avantageusement à la place du générateur RF.

Il est commode de pouvoir lire directement la puissance en Watts. Procéder alors de la manière suivante:

Dans le menu AMPLITUDE, régler l'offset de la ligne de référence en fonction de la calibration effectuée précédemment et choisir l'affichage en W.

Conclusion

La mise au point d'un amplificateur RF de puissance en régime pulsé apporte une sécurité et une tranquillité d'esprit inégalée. Le circuit présenté peut être décliné de diverses façons et chacun pourra s'en inspirer. Il est possible par exemple de remplacer le switch RF par un atténuateur à diodes PIN.

L'auteur tient à remercier spécialement F6BVA à l'origine de ce projet ainsi que tous ceux qui ont bien voulu relire ce papier et lui faire part de leurs commentaires forts judicieux.

Les typons sont disponibles au format ARES

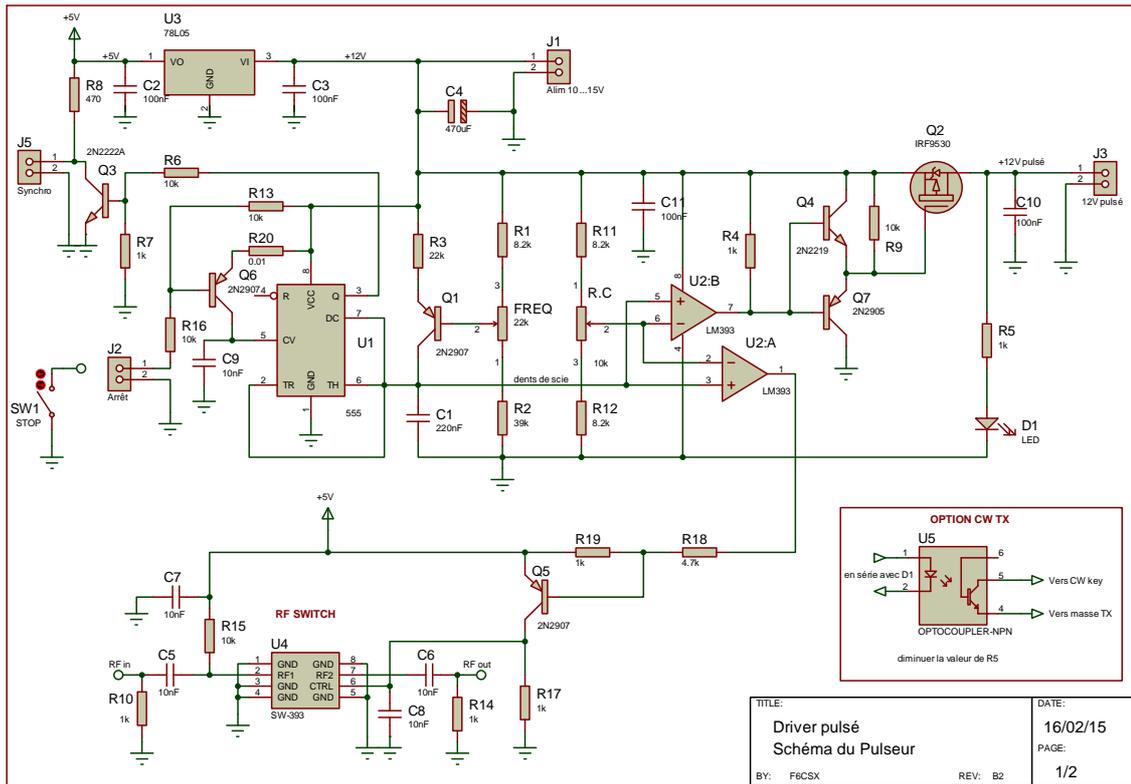


Figure 8 - Schéma du pulseur