

A la découverte des fréquences basses suite et fin

Jean-Louis Rault F6AGR¹

Dans un premier article, nous avons exploré de façon théorique le domaine des basses fréquences. Nous vous proposons à présent de poursuivre par des travaux pratiques en construisant et en exploitant vous-même un petit système de réception VLF très simple couvrant la gamme 400 Hz/20 kHz environ.

L'ennemi juré de tout amateur d'écoutes radio très basses fréquences est ... l'EDF.

Les réseaux de distribution d'Electricité de France qui sillonnent tout le pays ont le défaut majeur de rayonner un signal radioélectrique à 50 Hz, ainsi que toutes sortes de parasites couvrant un large spectre s'étendant jusqu'à plusieurs kilohertz. Ceci perturbe gravement toute tentative d'écoute VLF/ELF en milieu urbain.

Une seule solution : éloigner le récepteur VLF de toute ligne EDF, et ce de plusieurs kilomètres si possible. Pour capter les signaux radio VLF, nous sommes donc amenés à imaginer un système de réception autonome et facilement transportable, dans le but de nous éloigner le plus possible de toute source polluante d'énergie secteur.

Plusieurs solutions s'offrent à nous (voir figure 1) pour traiter les

signaux VLF reçus dans de bonnes conditions en pleine nature :

- écoute directe au casque,
- enregistrement sur un petit magnétophone à K7, ou mieux, sur un enregistreur audio numérique du type DAT (solution coûteuse mais performante),
- enregistrement et/ou traitement en temps réel des signaux avec un PC portable alimenté sur batterie,
- transmission à distance des signaux reçus grâce à une liaison V, U ou SHF.

Cette dernière solution, la plus performante, est également la plus stimulante au point de vue technique puisqu'il faut mettre en œuvre une liaison radio et réfléchir à un système d'alimentation autonome (panneau solaire par exemple).

Avec cette option, nous suggérons là un projet très formateur qui pourrait parfaitement convenir à un radioclub orienté "sciences et technique".

Le système de réception VLF

L'antenne

Les longueurs d'onde des signaux qui nous intéressent sont extrêmement grandes, puisqu'elles vont de 15 000 mètres pour un émetteur transmettant sur 20 kHz jusqu'à 600 kilomètres ou plus pour les bruits radioélectriques naturels proches de 500 Hz.

Dans ces conditions, il est inutile de songer à utiliser des antennes accordées résonantes telles que nous les pratiquons habituellement en émission d'amateur

Imaginez la taille d'un dipôle demi-onde ou d'un fouet quart d'onde taillé pour ces fréquences VLF !

Nous sommes donc obligés de nous contenter d'antennes très courtes par rapport aux longueurs d'ondes à recevoir.

Il existe deux types de collecteurs adaptés à la réception de ces signaux :

- les cadres, qui sont sensibles à la composante magnétique du champ rayonné,
- les antennes filaires courtes qui captent la composante électrique du signal.

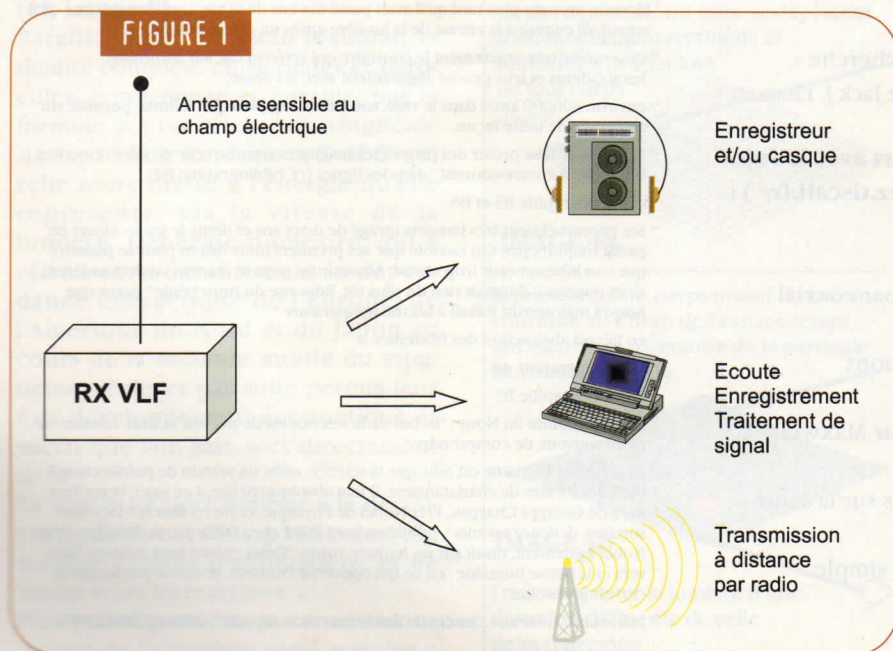
Les cadres à air sont réalisés avec du fil bobiné sur un support de forme circulaire, carrée ou polygonale.

La sensibilité augmente avec le nombre de spires utilisées, ainsi qu'avec la taille du cadre. On est amené, pour la gamme de fréquences qui nous intéresse, à employer des cadres d'un mètre de côté ou plus munis d'un bobinage de plusieurs dizaines de spires.

L'utilisation d'un noyau de ferrite ou de mumétal permet de diminuer l'encombrement du cadre, grâce à sa grande perméabilité magnétique (m supérieur à quelques milliers, voire centaines de mille).

La complexité et le coût de réalisation d'une antenne cadre dépassant

FIGURE 1



¹ Courriel : f6agr@wanadoo.fr

l'objectif de simplicité que nous nous sommes fixé, nous opterons plutôt pour un capteur sensible à la composante électrique du champ, c'est-à-dire pour une antenne filaire.

Par rapport au cadre, ses principaux défauts sont sa faible sensibilité aux fréquences très basses, ainsi qu'une nette tendance à capter les parasites électrostatiques (bruits électriques divers générés par temps sec : souffle dû aux frottements du vent, flocons de neige électrisés, bruits de pneus lors du passage d'une voiture, et même bruissements d'insectes en vol). Un dipôle taillé pour les bandes décamétriques et situé à quelques mètres de hauteur (par exemple une G5RV ou une antenne Lévy) peut donner d'excellents résultats, à condition que les isolateurs d'extrémité soient de bonne qualité. Il suffit de relier ensemble les deux fils de descente et de les connecter à l'entrée du récepteur VLF. Ce sont les fils verticaux de descente d'antenne qui représentent la partie active de l'antenne sensible à la composante verticale du champ électrique du signal reçu. Les brins horizontaux, eux, ne participent pas activement.

Plus l'antenne est haute, plus la descente d'antenne est longue et donc plus l'amplitude du signal reçu est importante. La longueur des brins horizontaux du dipôle n'a que peu d'importance.

Le défaut majeur de ce type d'antenne est qu'il est en général installé à proximité de la station fixe, en zone habitée, et est donc quasiment dans tous les cas installé à portée de vue d'une ligne EDF ...

Sachant que les bruits parasites rayonnés par une ligne basse tension (50 Hz et tous les harmoniques du 50 Hz jusqu'à plusieurs kilohertz) sont encore détectables à plusieurs kilomètres, on comprendra que tout le bas du spectre VLF soit difficilement

exploitable lorsqu'on emploie une telle antenne fixe.

Afin de pouvoir nous affranchir du bruit rayonné par les lignes d'alimentation électrique, nous opterons donc pour une antenne fouet verticale autorisant une utilisation aisée en mobile (sur le toit d'une voiture par exemple) ou en portable (canne à pêche télescopique en fibre de verre ou de carbone).

Quelles sont les caractéristiques électriques d'un tel monopôle en VLF ?

Un monopôle très court devant la fréquence à recevoir peut être représenté par une source de tension en série avec une impédance composée d'une résistance de radiation R_r , d'une résistance de pertes R_p et d'une réactance capacitive C (voir figure 2).

Pour un fouet court, la résistance de radiation en ohms a pour valeur

$$R_r = 40 \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2$$

et la valeur de la capacité en picofarads (pF) est

$$C_c = \frac{24,2 \cdot h}{\log_{10} \left(\frac{2h}{d} \right) - 0,7353}$$

h représente la hauteur de l'antenne, d son diamètre et λ la longueur d'onde (tous exprimés dans la même unité, en mètres par exemple).

Pour un fouet métallique de 2,5 m de longueur et de diamètre 3 mm, on obtient à 5 kHz une résistance de radiation extrêmement faible (quelques 3×10^{-7} ohms) donc négligeable, en série avec une résistance de pertes de quelques ohms et un condensateur de 25 pF environ.

L'impédance de l'antenne est donc très grande puisqu'elle est assimi-

lable à un simple petit condensateur dont la réactance à 5 kHz vaut plus d'un mégohm !

La force électromotrice captée par notre fouet vertical est égale à la hauteur effective de l'antenne multipliée par la valeur du champ électrique du signal à recevoir, valeur exprimée en volts par mètre.

Notre fouet vertical de longueur 2,5 m présente une hauteur effective de 1,25 m environ.

Ainsi par exemple, la tension développée V_e sera égale à $5 \mu\text{V}$ pour un champ électrique incident de $10 \mu\text{V/m}$.

Le récepteur

Au vu des caractéristiques électriques de l'antenne fouet décrite ci-dessus, on conçoit que notre récepteur VLF devra présenter les qualités essentielles suivantes :

- une résistance d'entrée la plus grande possible
- une capacité d'entrée très faible
- un grand gain
- un bruit faible

Afin de répondre aux exigences d'utilisation en portable, les critères supplémentaires suivants devront être pris en compte :

- alimentation sur piles ou batterie 12 V
- légèreté
- facilité de mise en œuvre et d'emploi.

La troisième série d'exigences porte sur la facilité de réalisation et sur un coût faible.

Le prototype que j'ai développé, dont le schéma complet est donné en figure 3, tente de répondre à ces exigences. Il s'agit d'un premier montage qui est largement perfectible.

Si vous êtes suffisamment nombreux à manifester de l'intérêt pour l'expérimentation en VLF, nous pourrions envisager de distribuer un tel type de récepteur sous forme de kit par le

FIGURE 2

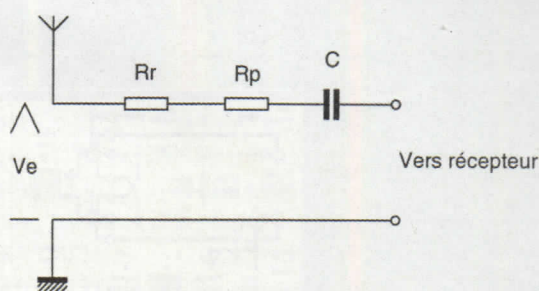
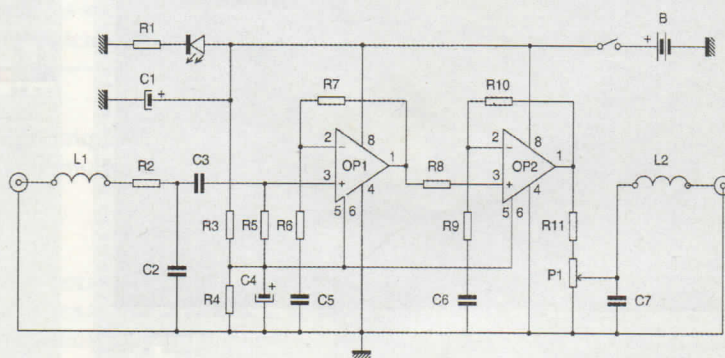


FIGURE 3



canal et au bénéfice de l'association AMSAT-France².

L'étage d'entrée du récepteur VLF est équipé d'un amplificateur opérationnel OP1 dont l'étage d'entrée est composé de transistors à effet de champ de type JFET.

Le choix s'est porté sur un amplificateur opérationnel TL072 de chez Texas Instruments, car ce circuit, outre une grande impédance d'entrée, présente un niveau de bruit intéressant ($18 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ à 1 kHz) et une faible distorsion harmonique (0,003%).

Il est disponible chez tous les revendeurs de composants grand public.

Le TL072 comporte deux amplificateurs identiques dans un même boîtier. Deux boîtiers séparés ont pourtant été utilisés, un pour chaque étage de la chaîne d'amplification, et ce afin d'éviter de possibles accrochages.

L'amplificateur inutilisé dans chaque boîtier voit ses entrées connectées au point milieu de l'alimentation.

Le TL071 (un seul amplificateur par boîtier) pourrait évidemment convenir.

Alors pourquoi utiliser des TL072 ? Parce que ces doubles amplis coûtent pratiquement le même prix que les amplis simples. En vous procurant une seule sorte de boîtiers, vous rationalisez vos approvisionnements et la gestion de vos stocks de composants ! La série TL07x a été développée pour être utilisée entre autres comme préamplificateur B.F. dans les applications haute fidélité.

Le gain du premier étage, fixé par le rapport $R7/R6$, est égal à 100.

La résistance d'entrée de cet étage, la plus haute possible pour ne pas perdre les précieux microvolts parcimonieusement offerts par l'antenne, est fixée par $R5$ qui a pour valeur 10 M Ω .

Cette résistance devra être d'excellente qualité (technologie à couche métallique) pour ne pas créer de bruit parasite.

Le premier étage est suivi d'un deuxième amplificateur OP2 dont le gain, fixé par le rapport $R10/R9$, est à ajuster aux essais (gain de 3 dans notre cas).

Le niveau de signal de sortie est ajustable grâce au potentiomètre P1.

L1, L2, R2, C2 et C7 sont facultatifs : leur rôle est de supprimer les interférences produites par un émetteur local de radiodiffusion ondes moyennes.

A noter toutefois qu'il ne faut câbler L1, R2 et C2 que s'ils sont absolument nécessaires, car ils dégradent les performances de réception VLF.

La diode électroluminescente à placer en face avant du récepteur n'est pas indispensable (à elle seule, elle représente la moitié de la consommation du récepteur, soit près de 4 mA environ). Si vous êtes moins distrait que moi et que vous pensiez à arrêter le récepteur chaque fois que vous ne vous en servez pas, vous pouvez avantageusement supprimer ce voyant.

J'ai installé l'ensemble du récepteur (circuit câblé sur plaque d'époxy à pastilles + piles) dans une boîte métallique de thé (d'où le nom de Darjeeling v1.0 pour ce premier prototype).

Les 3 piles de 4,5 V sont fixées à la colle Araldite dans le couvercle, le circuit électronique est monté sur un côté de la boîte, et la face avant de l'équipement, qui supporte le potentiomètre de volume, la diode LED et les prises jacks, est constituée par le fond de la boîte.

Le montage étant à grand gain et à grande impédance d'entrée, il faudra prendre soin de bien séparer les fils d'entrée et de sortie, sous peine d'auto-oscillations aussi violentes que désagréables à entendre.

Je ne conseille pas de placer le connecteur BNC de l'antenne sur le

sommet de la boîte, contrairement à ce que j'ai fait.

L'idée de brancher l'antenne directement sur la boîte, à l'origine de cette disposition, ne s'est pas révélée bonne à l'usage : la boîte de thé n'est pas suffisamment rigide pour supporter solidement un long fouet dont la prise au vent n'est pas négligeable. Il est donc préférable de placer la prise coaxiale d'antenne directement en face avant et d'utiliser un câble coaxial pour relier l'antenne au récepteur;

Il faut employer un câble coaxial de liaison le plus court possible, car sa capacité parasite forme un pont diviseur de tension avec le condensateur série équivalent de l'antenne (voir figure 2). Ainsi, un fouet de 2,5 m de long avec 3 m de câble coaxial KX15 donne sensiblement les mêmes résultats qu'un fouet de 80 cm relié directement au récepteur !

Il serait bon d'expérimenter du câble coaxial de type "autoradio" dont la capacité linéique est volontairement très faible.

Une fois le montage entièrement câblé et monté dans sa boîte, un premier essai qualitatif vous permettra de vérifier le bon fonctionnement de l'ensemble : il suffit de placer une queue de résistance d'un ou deux cm dans la prise antenne, de mettre le récepteur sous tension et d'approcher la main du bout de fil. Une forte "ronflette" à 50 Hz devrait vous rassurer sur le bon fonctionnement de l'ensemble.

La figure 4 montre une mesure du bruit propre du récepteur lorsqu'il est relié à une antenne fictive constituée d'un simple condensateur de 47 pF. On constate que le bruit est presque constant sur toute la bande jusqu'à 24 kHz. Aux fréquences les plus basses, la remontée de bruit est due à l'effet "popcorn" des transistors d'entrée.

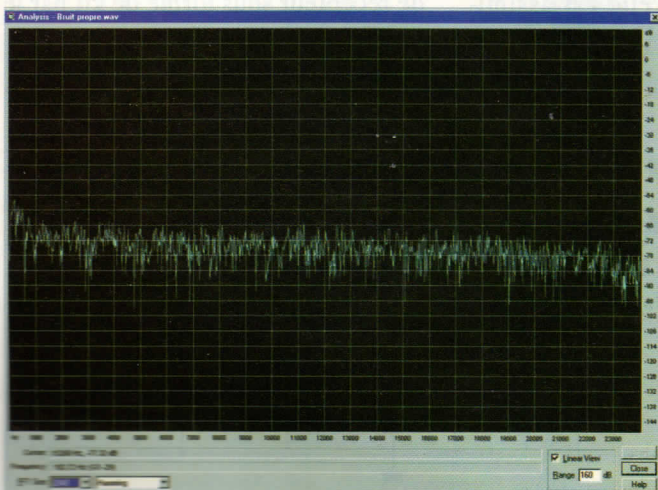


figure 4

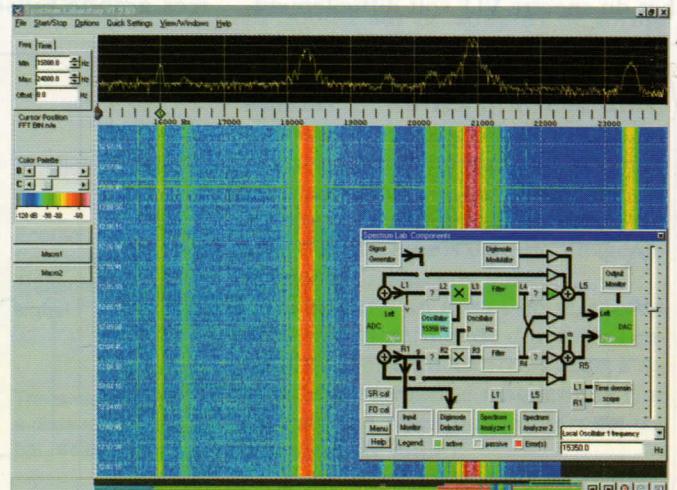


figure 5

Il ne vous reste plus qu'à partir en balade à pied en pleine nature, muni de votre récepteur et de son antenne, d'un casque d'écouteurs, d'un petit magnétophone ou mieux, d'un PC portable, et vous voilà prêt à chasser les signaux VLF. A noter que la plupart des tweaks et des whistlers que vous allez chasser sont des animaux nocturnes, qui se font entendre surtout l'hiver... Voilà une bonne raison de perfectionner à terme l'ensemble de réception en créant une véritable station d'écoute VLF déportée, avec télétransmission HF, ce qui vous permettra de rester à l'abri pour dépouiller tranquillement au chaud les signaux captés.

Dépouillement des signaux reçus.

L'écoute directe à l'oreille suffit pour détecter les tweaks, les whistlers et les "chœurs de l'aube" puisqu'ils se situent en grande partie en-dessous de 10 kHz. Par contre, pour mettre en évidence les transmissions radio VLF avec notre système simple de réception, il est indispensable d'employer un PC muni d'un programme d'analyse spectrale (Spectrogram de R.S. Horne ou Cool Edit de la société Syntrillium par exemple). Le premier logiciel a l'avantage d'être simple à utiliser et d'être un "shareware". Le second présente de nombreux outils de traitement audio très utiles (nombreuses fonctions d'affichage, de visualisation, de manipulation, etc). Ses fonctions sophistiquées de filtrage, d'écrêtage, etc permettent d'atténuer nombre de parasites gênants. En utilisant par exemple la fonction "retard", on peut atténuer fortement le bruit stationnaire (ronflettes à fréquences constantes par exemple) en additionnant au signal enregistré une copie du même signal judicieusement décalée de $(2k+1)p$ dans le temps, et le tout en quelques clics de souris! La place nous manque pour citer tous les outils disponibles dans le logiciel CoolEdit qui sont utiles à notre application.

Citons pour terminer un outil logiciel très puissant, Spectrum Lab de Wolfgang Büscher DL4YHF.

Entièrement gratuit, il offre une panoplie complète d'outils de traitement de signal.

De bonnes bases en traitement numérique du signal sont indispensables pour profiter pleinement de ce logiciel, car tous les paramètres et coefficients des fonctions sont modifiables par l'opérateur, pour le meilleur ...ou pour le pire.

Avec Spectrum Lab, il est possible de bâtir en quelques clics de souris un logiciel radio complet.

La figure 5 montre ainsi un récepteur VLF à changement de fréquence fonctionnant de façon totalement logicielle grâce à une simple carte son. En fond d'écran, on reconnaît une analyse spectrale classique représentant de façon temporelle et fréquentielle les signaux VLF reçus sur un PC portable grâce au récepteur décrit dans cet article.

En bas à droite, on distingue le synoptique complet d'un récepteur logiciel à changement de fréquence.

Tous les paramètres des convertisseurs analogique/numérique et numérique/analogique, du multiplieur faisant office de mélangeur/ changeur de fréquence, de l'oscillateur local et du filtre passe-bas sont ajustables séparément.

Ce récepteur logiciel permet de visualiser et de faire entendre en audio (vers 600 Hz par exemple) toute émission radio de fréquence inférieure à 24 kHz (la limitation est due à la fréquence maximale d'échantillonnage de ma carte-son qui plafonne à 48 kHz). Il suffit d'ajuster le VFO à la souris pour se caler sur l'émission de son choix et d'écouter directement les signaux VLF transposés en basse fréquence!

Les adresses Internet des sites où l'on peut télécharger les logiciels cités dans cet article ne sont volontairement pas données, car elles changent souvent.

Le meilleur moyen de localiser ces logiciels sur Internet est d'utiliser un moteur de recherche (<http://www.google.fr> par exemple). En utilisant des mots-clé comme "Spectrogram Horne" ou "DL4YHF", vous localiserez très rapidement les sites permettant de télécharger les logiciels les plus à jour.

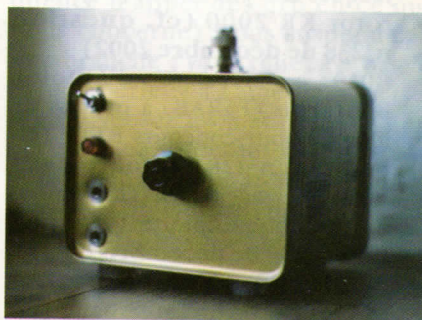
En guise de conclusion

Les basses fréquences, qui sont l'objet de nombreux thèmes de recherche scientifique et d'applications essentiellement militaires, sont un domaine peu connu des radioamateurs français. Aux Etats-Unis, aux Pays-Bas, en Allemagne et en Italie notamment existent des groupes de radioamateurs passionnés par l'expérimentation sur ces bandes de fréquence.

L'AMSAT-France envisage d'embarquer une chaîne de réception VLF à bord de son prochain satellite SATEDU.

Si ces articles suscitent de l'intérêt de votre part, sachez que Thierry Alves³, un jeune SWL membre du radio-club F6KEO de Bordeaux et passionné de VLF, s'est porté volontaire pour répondre à vos questions et alimenter au besoin une chronique VLF régulière dans cette revue.

Vous avez envie de sortir des sentiers battus ? Vous aimez découvrir de nouvelles disciplines? Responsable d'un radio-club ou d'un club scientifique, vous êtes à la recherche d'un projet simple et motivant accessible à des débutants ? Puissent ces deux articles d'initiation vous donner le goût de vous lancer à votre tour dans les VLF!



Récepteur VLF Darjeeling V1.0 prêt à l'emploi.



Les entrailles de la bête.



La station VLF portable au complet.

Liste des composants

R1 : 3,3 kΩ	R9 : 10 kΩ	C5 : 1 μF céramique
R2 : 47 kΩ	R10 : 27 kΩ (*)	C6 : 1 μF céramique
R3 : 22 kΩ	R11 : 330 Ω	C7 : 1 nF
R4 : 22 kΩ	P1 : 22 kΩ logarithmique	L1 : 1 μH
R5 : 10 MΩ	C1 : 470 μF 25V	L2 : 1 μH
R6 : 10 kΩ	C2 : 150 pF céramique	OP1 : TL072 Texas Instruments
R7 : 1 MΩ	C3 : 0,1 μF céramique	OP2 : TL072 Texas Instruments
R8 : 47 kΩ	C4 : 47 μF 25 V	B : Accumulateur 12 V ou 3 piles de 4,5 V en série.

³ Courriel : clf_vlf@hotmail.com