

# Milliwattmètre et coupleur - 50 dB

Jean-Paul Gendner F5BU

## Caractéristiques

Bien que relativement facile à réaliser et cela pour un coût raisonnable vues les performances, le milliwattmètre décrit est un appareil de mesure aux caractéristiques étonnantes, impensables il y encore quelques années. Son impédance d'entrée est de 50 Ω, sa bande passante s'étend de 25 kHz à 100 MHz à 1 dB près<sup>1</sup>, et il peut être utilisé jusqu'à 500 MHz (avec une perte progressive de sensibilité de 8,5 dB) voir 1,5 GHz pour certaines applications. Pour les fréquences inférieures à 100 MHz, sa dynamique est de 88 dB et il permet d'avoir une plage de mesure allant d'environ - 75 dBm (30 pW ou 40 μV<sub>eff</sub>) à 15 dBm (30 mW ou 1,2 V<sub>eff</sub>) selon les réglages. Un signal de sortie de 0,8V pour 0 dBm et une pente de 0,1 V/10 dB permet une lecture facile sur un voltmètre numérique.

Le coupleur - 50 dB permet de « passer » 1 kW et peut être utilisé du décimétrique jusqu'à 70 cm (à 23 cm, le couplage passe à environ - 40 dB et le R.O.S. (SWR en anglais) grimpe aux environs de 2).



Photo 1 Le milliwattmètre et le coupleur -50dB

## Utilisations

Ce milliwattmètre, associé ou non au coupleur, est un appareil qui a de nombreuses applications potentielles, de la mesure du niveau de sortie d'un émetteur au « sniffer » permettant de détecter une fuite HF en passant par la mesure de la puissance de sortie d'un oscillateur ou autre générateur (par prudence, il est conseillé de commencer une mesure avec un atténuateur intercalé entre la source et l'entrée) et la mesure du gain d'un amplificateur.

En effet, associé au coupleur - 50 dB branché entre émetteur et antenne, ce milliwattmètre permet d'effectuer des mesures de puissances d'un émetteur jusqu'à 1 kW, alors que l'appareil seul permet de détecter des puissances de l'ordre de 30 pW, ce qui correspond sensiblement à S9 en décimétrique et à S9 + 20 dB en VHF-UHF. Il s'agit donc d'un appareil de mesure très sensible. Attention toutefois, il s'agit d'un appareil large bande, donc non sélectif, et le raccordement d'un doublet 144 MHz, placé au grenier, amène un « bruit de fond » de l'ordre de - 35dBm (0,3 μW ou 4 mV<sub>eff</sub>).

En branchant simplement un petit bout de fil, ou une self de quelques spires, à l'entrée du milliwattmètre vous disposez d'un « sniffer » très sensible pour trouver des « fuites » de HF, visualiser la mise en route d'un émetteur même éloigné (attention de ne pas être trop près), rechercher un maximum de champ et en branchant la sortie sur un oscilloscope il est facile de visualiser, par exemple, les émissions impulsives d'un téléphone portable cellulaire (voir figure 4). En plaçant un circuit accordé en entrée, vous le transformez en ondemètre.

Si vous disposez d'un générateur wobulé et d'un oscilloscope, il est relativement facile de réaliser un analyseur de fonction de transfert (de filtres, coupleur...) avec quelques 90 dB de dynamique.

Etc., etc, les applications sont tellement

nombreuses qu'il est impossible de les citer toutes. Mais je suis sûr que vous vous êtes déjà dit qu'il vous permettrait de mesurer... Il ne faut pas être effrayé par les formules et discussions que vous pouvez voir, par-ci par-là dans l'article. Elles sont données pour ceux qui aiment comprendre et/ou adapter leur réalisation, mais ne sont pas nécessaires pour la réalisation pratique. Alors, suivez le guide.

## Commençons par le commencement

Tout a commencé le jour où ayant réalisé une charge résistive 50 Ω (antenne fictive) pouvant dissiper 250 W, je cherchais un moyen d'y adjoindre un petit appareil de mesure de la puissance, mais permettant de déceler des puissances aussi faibles que possibles. Michel, F1CLQ m'a alors transmis un article de Wes Hayward, W7ZOI et Bob Larkin, W7PUA paru dans QST de juin 2001 (1)<sup>2</sup>. Cet article m'a laissé rêveur, et poussé par Michel je me suis lancé dans une réalisation.

Avec l'aimable autorisation des auteurs et de la rédaction du QST, la figure 1 donne le schéma qui y a été publié et sur lequel je me suis basé. Toutefois, dès le départ, j'ai apporté quelques modifications à ce schéma. Notamment, j'ai préféré avoir une tension de sortie de 0,1 V/10 dB, de manière à afficher des valeurs faciles à convertir en dBm sur un voltmètre numérique et/ou sur un oscilloscope. Sur le calibre 1 V, il suffit de retrancher 0,8 V et de multiplier par 100.

J'ai également effectué beaucoup d'essais concernant le réseau d'entrée R2, C2 et L1. Dans un premier temps j'avais réalisé ce réseau comme indiqué par W7ZOI, espérant ainsi obtenir, comme lui, une courbe de réponse quasi plate jusqu'à 500 MHz bien que cela fasse perdre un peu de sensibilité. N'obtenant pas le même résultat, j'ai échangé plusieurs messages avec Wes et Bob et cherché à obtenir ce résultat (les différences observées peuvent être

1 - Une variation de niveau de 1dB correspond à une variation de 26% de la puissance ou de 12% de la tension.  
2 - Voir Bibliographie.

liées au montage, à une disparité de caractéristiques entre les AD8307 ou les deux). A un moment, je croyais y être arrivé, lorsque je me suis rendu compte que la courbe de réponse était fonction du niveau du signal d'entrée (voir les graphiques des Figures 5, 6 et 7), et cela surtout pour un niveau d'entrée de + 10 dBm. Or j'avais fait tous mes essais à ce niveau ! Après de longues hésitations, j'ai alors opté pour la suppression de ce réseau, car c'est dans ces conditions que les courbes de réponse pour les différents niveaux sont les plus homogènes. Ce qui me permet de m'en servir jusqu'à 1,5 GHz pour certaines applications (mesure de courbes de réponse avec un générateur wobulé et un oscilloscope à mémoire permettant de retrancher la courbe de référence pour obtenir une réponse plate par défaut). Pour pouvoir tout de même effectuer des mesures de niveau jusqu'à 500 MHz, j'ai alors ajouté un potentiomètre (P1) de correction de niveau que j'ai gradué en fréquence. Ainsi, pour faire une mesure sur 2 mètres il suffit de mettre ce potentiomètre sur la bonne position pour rester dans la fourchette d'exactitude de 1 dB.

Afin de ne détecter que les signaux branchés à l'entrée, j'ai également ajouté un filtrage énergétique des fils d'alimentation (BP4, L2, L3 et L4) et un blindage interne du galvanomètre. Dans ces conditions, et avec un bouchon 50  $\Omega$  à l'entrée, la mise en route de n'importe quel émetteur de la station (100 W en décimétrique, 40 W en VHF) est sans effet. On ne mesure donc que le signal appliqué à l'entrée.

## Description du milliwattmètre

Il est basé sur l'AD8307 de Analog Devices, qui constitue le cœur de l'appareil. Ce circuit est un détecteur logarithmique (ou amplificateur logarithmique d'enveloppe) constitué de six étages d'amplification 900 MHz et d'un sommateur.

Le schéma est donné figure 2. L'entrée est « chargée » par la résistance R1 de 51  $\Omega$ , qui en parallèle avec les 1,1 k $\Omega$  de résistance d'entrée de U1 donne une impédance d'entrée proche de 50  $\Omega$ . L'entrée de l'AD8307 est « attaquée » par le condensateur C1 de 10 nF, qui limite l'utilisation vers les fréquences basses

à environ 25 kHz et filtre ainsi suffisamment le 50 Hz<sup>3</sup>. A sa sortie, le signal est filtré par la capacité C4 de 100 nF (celle-ci peut être omise ou de valeur plus faible si un oscilloscope est utilisé pour visualiser le signal de sortie) et la sensibilité relative est réglable par le potentiomètre ajustable A2, dont le signal va sur l'entrée non inverseuse d'un amplificateur opérationnel, un demi MAX492, monté en suiveur de tension (avec un tout petit peu d'offset). L'autre moitié de ce circuit intégré sert à fournir, en basse impédance, une tension pour l'ajustage du point d'interception (pour définir le niveau de sortie pour 0 dBm). Cet amplificateur doit-être « rail to rail » en sortie, ce qui a justifié le remplacement du LM358 d'origine par un MAX492. La patte 5 de l'AD8307 peut aussi être reliée directement au curseur de A1 si l'on ne souhaite pas mettre en place le potentiomètre P1 de correction de niveau en fonction de la fréquence. Le galvanomètre, pour une lecture analogique facile, est alimenté par une résistance fixe et une autre réglable pour permettre d'ajuster finement la déviation de l'appareil. Le signal disponible pour la pleine échelle

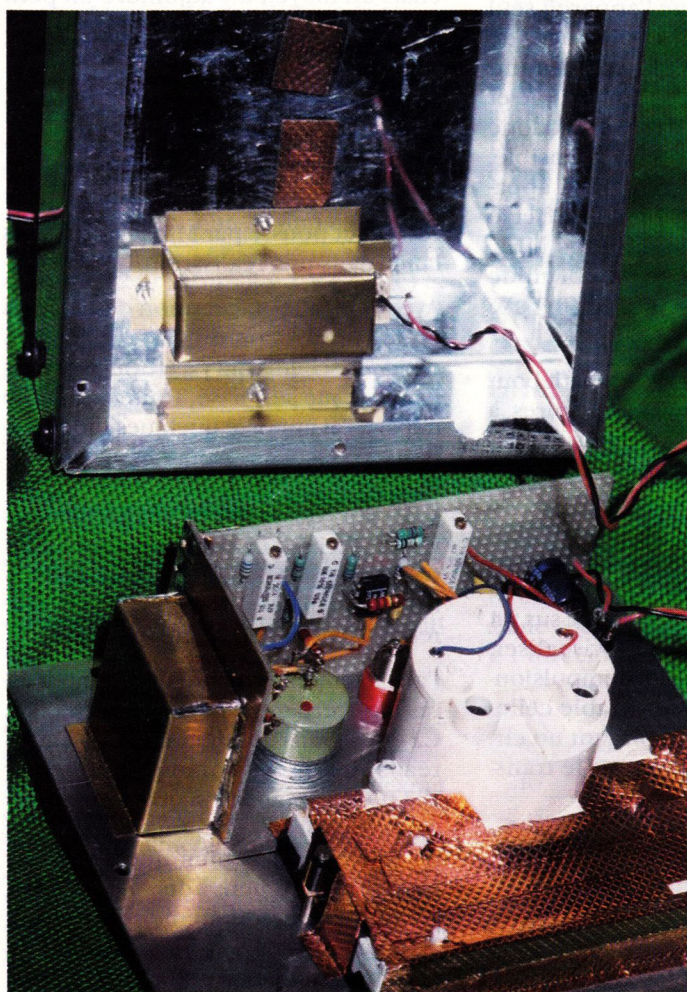


Photo 2 L'intérieur du milliwattmètre : à gauche le blindage du circuit d'entrée, à l'avant le blindage du galvanomètre, à l'arrière dans le coffret, le blindage du filtre placé à l'entrée des fils d'alimentation.

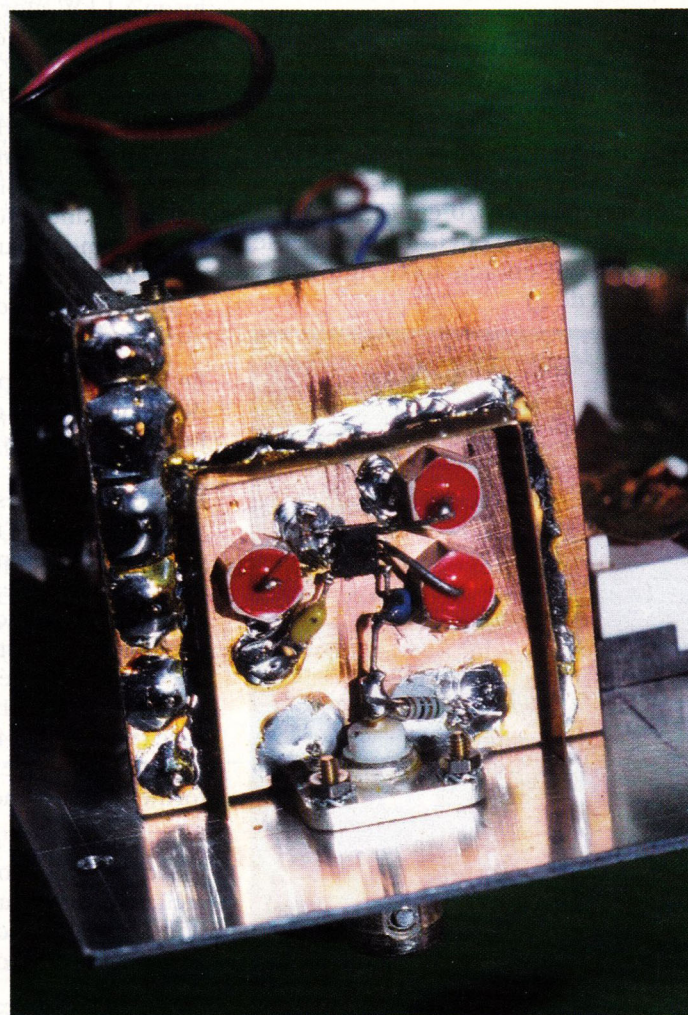


Photo 3 Le circuit d'entrée, avec l'AD8307, le couvercle du blindage enlevé, dans la version finale sans réseau de correction R2, C2, L1.

est de 1 V. A chacun de calculer la valeur de la résistance nécessaire en fonction du galvanomètre disponible :

$$R = \frac{1}{i_{galvaPE}} - r_{galva}$$

où R est la valeur de la résistance en

ohms à placer en série ( $\approx R11 + \frac{A3}{2}$ ),

$i_{galvaPE}$  la sensibilité pleine échelle du galvanomètre en ampères et  $r_{galva}$  la résistance interne en ohms du galvanomètre.

Photo 4 Plaquette pastillée du montage (avant la mise en place du potentiomètre P1) et à droite le circuit d'entrée recouvert de son blindage.

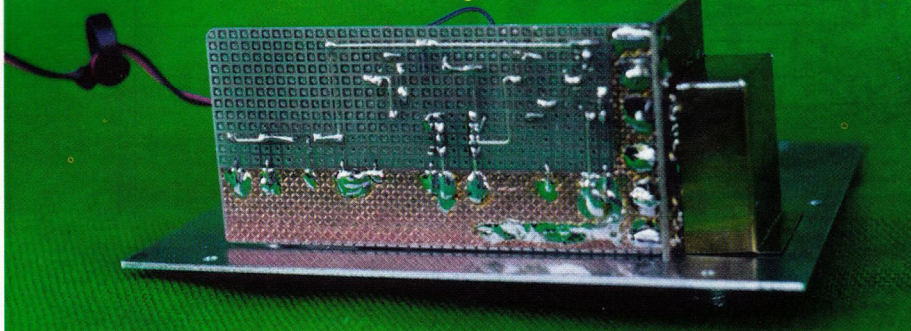


Photo 5 Le coupleur - 50 dB, avec deux fils (peu visible, car jaunes) torsadés pour la capacité.

La tension d'alimentation est obtenue par un LM2931-5 de National Instrument, qui est un régulateur 5 V à faible chute de tension permettant d'alimenter le montage avec une tension de seulement 5,5 V, mais tout régulateur 5 V (genre 7805) fait l'affaire à condition d'alimenter le montage avec une tension d'au moins 7 V (et dans ce cas, le condensateur C10 de 100 µF n'est plus indispensable). Il est aussi possible de loger une pile à l'intérieur de l'appareil pour le rendre plus autonome, car la consommation n'est que de l'ordre de 7 mA. Le filtrage des fils d'alimentation n'est évidemment pas nécessaire avec une pile interne à l'appareil.

Comme le montre la photo 3, l'AD8307 est enfermé dans un blindage (visible sur la photo 2), et toutes les connexions vers ce circuit se font par l'intermédiaire de condensateurs de découplage de type traversée (bypass) pour éviter toute détection de HF autre que celle provenant de l'entrée. Pour les mêmes raisons, les fils d'alimentation passent par un filtre blindé (photo 2).

### Description du coupleur - 50 dB

Le principe du montage est très simple, il s'agit d'un atténuateur résistif en dérivation d'une ligne de transmission du signal. L'une des entrées/sortie se branche à l'émetteur, l'autre à l'antenne. On veut un signal atténué de 50 dB par rapport aux entrées/sorties sur la sortie dérivation, lorsque celle-ci est chargée par 50 Ω. De plus, la liaison entre les deux entrées/sorties doit être à 50 Ω pour ne pas engendrer de réflexion, même aux fréquences élevées. L'atténuation en tension<sup>4</sup> devant être de :

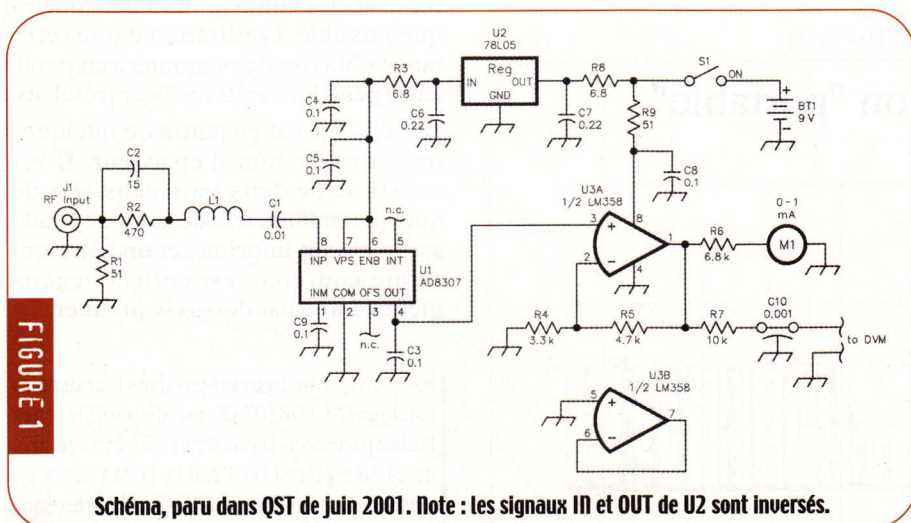
$$\sqrt{10^{50/10}} = \sqrt{100\,000} = 316$$

la résistance à mettre entre l'entrée et la sortie est de :  $(316 - 1) \cdot 25 = 7875 \Omega$  et pour une puissance à transmettre de 1 kW elle doit pouvoir dissiper<sup>5</sup> 6 W.

Seul 0,6 % de la puissance du signal transmis sont dérivés (perte de 0,03 dB).

### Montage du milliwattmètre

Le milliwattmètre est monté dans un boîtier en aluminium de 150 x 120 x 53 mm de fabrication « maison ». Les dimensions dépendent beaucoup de celle du galvanomètre, qui n'est en fait pas indispensable dans la mesure ou un voltmètre externe, analogique ou numérique, peut être branché sur la sortie. J'ai utilisé des douilles banane.



Schéma, paru dans QST de juin 2001. Note : les signaux IN et OUT de U2 sont inversés.

3 - Attention toutefois, l'atténuation n'est « que » de 46 dB, et si une antenne de mesure se trouve à proximité d'un transformateur, le champ peut être suffisamment fort pour être détecté. Ceux qui ne sont pas intéressés par les fréquences basses, peuvent diminuer la valeur de C1. Par exemple 1 nF pour démarrer aux environs de 250 kHz avec alors 66 dB d'atténuation pour le 50 Hz, etc.

4 - L'atténuation exprimée en dB vaut :  $A_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \frac{P}{P_0} = 20 \cdot \log_{10} \frac{U}{U_0} \Rightarrow \frac{U}{U_0} = 10^{\frac{A_{dB}}{20}} = \sqrt{10^{\frac{A_{dB}}{10}}}$

5 - Pour pouvoir transmettre 300 W, la puissance dissipable par la résistance doit être de 2W.

$$P_R = \frac{U^2}{R} \approx \frac{P_{A\text{transmettre}} \cdot 50}{R}$$

FIGURE 2

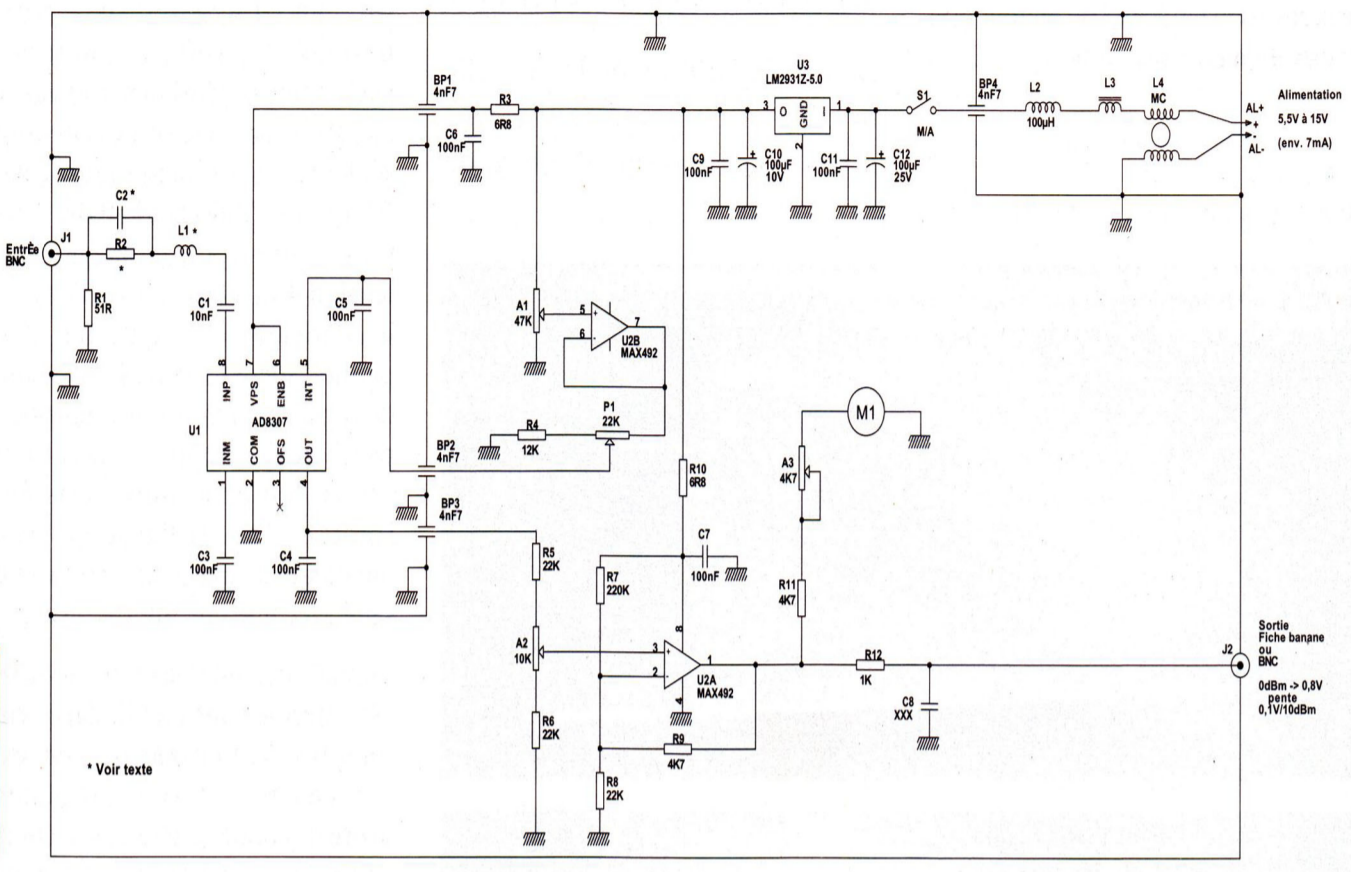


Schéma du milliwattmètre.

FIGURE 3

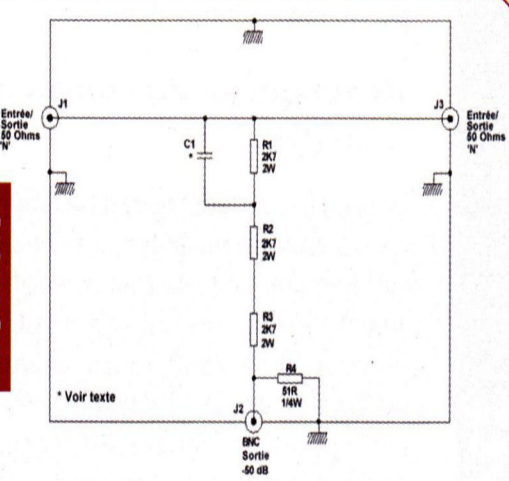


Schéma du coupleur -50dB.

Pour l'utilisation avec un oscilloscope (ce qui est finalement mon cas) il vaut mieux utiliser une BNC.

L'AD8307AR<sup>6</sup> est un circuit CMS<sup>7</sup> (à montage en surface) de 5 x 6 mm, qui demande quelques précautions. Il est monté sans circuit imprimé spécifique, les pattes « en l'air » sur un morceau de circuit imprimé vierge (la photo 3 montre ma version fina-

le, donc sans le réseau de compensation d'entrée R2, C2, L1). En collant l'AD8307 sur le circuit imprimé on facilite le montage, mais tout retour en arrière et délicat. Aussi, c'est le condensateur C1 de 10 nF que j'ai collé au circuit imprimé avec de la colle bi-composants (sans toucher les connexions avec la colle) pour éviter d'endommager le montage lors des changements répétés du réseau d'entrée.

La résistance R1 de 51 Ω doit être montée avec des connexions aussi courtes que possible. L'utilisation d'une résistance CMS (ou deux montées en parallèles) peut donner de meilleurs résultats. Le blindage est en laiton de quelques dixièmes de mm d'épaisseur. Il est constitué de deux morceaux : un de quelques millimètres de large est soudé sur le circuit imprimé, et un autre qui forme couvercle est enfiché légèrement à force par-dessus le premier.

## Communication "portable"

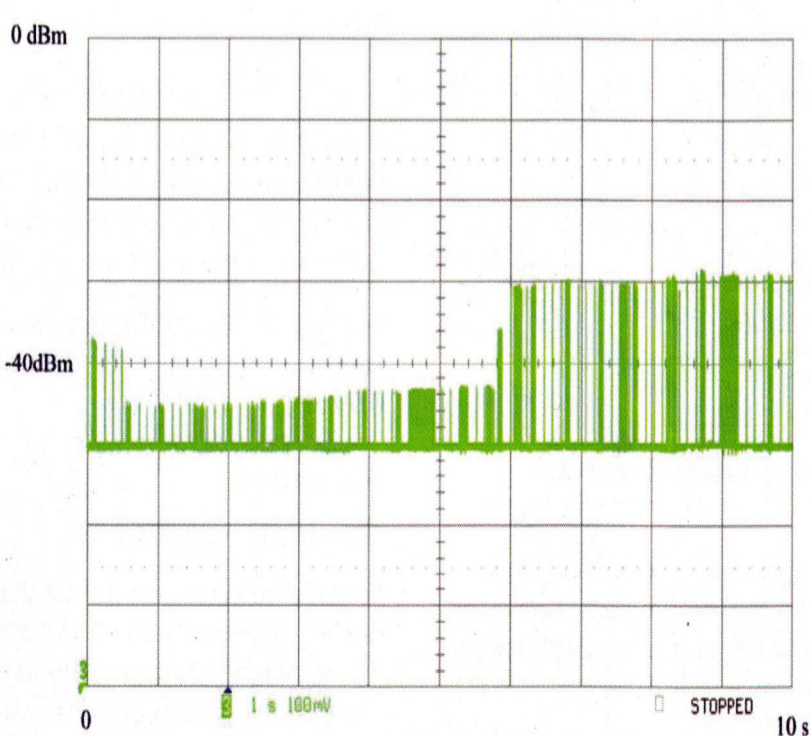


FIGURE 4

Niveau d'émission d'un téléphone portable cellulaire mesuré durant 10s en branchant la sortie du milliwattmètre sur un oscilloscope. Le bruit de fond avec la petite antenne branchée à l'entrée du milliwattmètre est de -50dBm.

6 - Bien que ne figurant pas dans leur dernier catalogue, l'AD8307AR est disponible chez RadioSpares sous la référence 397-2554 au prix de 24,38 € pièce (avril 2002). Le MAX492CPA y est également disponible sous la référence 182-2738 au prix de 4,44 €. Pour les condensateurs de traversée (bypass ou filtres de traversées de panneaux), dont la valeur de la capacité n'est pas très critique, il en existe de différente qualité. RadioSpares propose des 4,7 nF réf. 167-8430 au prix de 9,59 €, des 1 nF réf. 167-8474 à 5,97 €, Farnell propose des 10 nF réf. 106-774 à 4,56 € et des 1 nF sont disponibles chez Electronique Diffusion à Malakoff et chez Giga Tech pour environ 0,25 € pièce.

7 - Il existe aussi une version DIP, l'AD8307AN.

Le reste du montage ne nécessite pas de précautions particulières et a été réalisé sur de la plaquette pastillée (voir photo 4). Du ruban adhésif cuivré sert de plan de masse, mais n'est pas indispensable. Les potentiomètres ajustables utilisés sont des multitours, mais des modèles plus simples conviennent aussi.

Le filtre de « mode commun » des fils d'alimentation (L4) comporte 6 spires « deux fils en main » sur un tore ferrite de récupération de diamètre externe 15 mm, (L3) deux passages du fil du plus alimentation dans un petit tube de ferrite également de récupération de diamètre externe 3 ou 4 mm et (L2) une self « goutte » de 100  $\mu$ H.

## Montage du coupleur -50 dB

Comme le montre la photo 5, le coupleur a été monté dans un boîtier en aluminium de 60 x 111 x 31 mm (réf. Eddystone 27134 PSL ou équivalent<sup>8</sup>) avec des connecteurs N pour les entrées/sorties, et une BNC pour la sortie atténuée. Mais chacun pourra monter les connecteurs qu'il souhaite. La liaison entre les entrées/sorties est réalisée par un morceau de plaque de cuivre de 5/10 mm d'épaisseur (l'épaisseur n'a pas une grande importance) de dimensions 38 x 45 mm avec les coins coupés sur environ 6 x 6 mm. Pour des boîtiers de dimensions différentes mais de même épaisseur (31 mm avec le couvercle), il faut conserver la même largeur de plaque<sup>9</sup> et ajuster sa longueur à la largeur du boîtier moins 10 mm. Il faut un bon « vieux » fer à souder de 100 W pour effectuer les soudures sur la plaque de cuivre.

Pour la résistance chutrice, mon choix s'est porté vers 3 vieilles résistances de 2,7 k $\Omega$  2 W au carbone (donc peu selfique) montées en série, soit 8100  $\Omega$ , ce qui correspond à une erreur théorique de moins de 3 % en tension et moins de 6 % en puissance (0,25 dB). Il est possible de placer une résistance de 33 k $\Omega$  en parallèle sur l'une des résistances pour ajuster le rapport.

Pour obtenir une bonne courbe de réponse en fréquence (mesurée avec le milliwattmètre et un générateur wobulé), une capacité constituée de deux morceaux de fil isolé (fil de câblage mono-brin) torsadés en « queue de cochon » sur environ 2 cm a été mise en place côté plaque de cuivre, et les deux fils recouvrent un peu celle-ci.

La résistance de 51  $\Omega$  doit être soudée au plus près du connecteur, aussi bien côté âme que côté masse. C'est pour cette raison qu'un petit morceau de plaque de laiton de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur a été fixé sous le connecteur, et la résistance y est soudée.

## Réglages - calibration

C'est là que se trouve la plus grande difficulté, car il est souhaitable de disposer d'un appareil de mesure ou d'un générateur qui puisse servir d'étalon, et ce type de matériel est relativement coûteux. Si vous ne disposez pas d'un matériel approprié, le mieux est de faire cette opération chez un OM bien équipé. Il en existe beaucoup qui se feront un plaisir de vous aider. Il suffit généralement de demander.

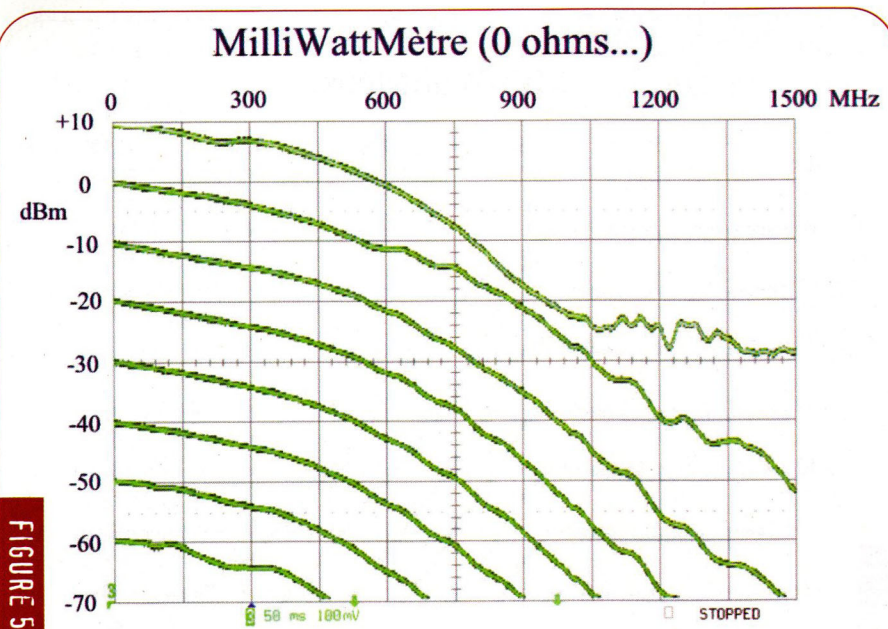


FIGURE 5

Courbe de réponse du milliwattmètre, pour différents niveaux d'entrée, sans réseau de correction à l'entrée. Les réponses en fréquences ne sont pas plates, mais relativement homogènes (ou parallèles), surtout en dessous de 0 dBm.

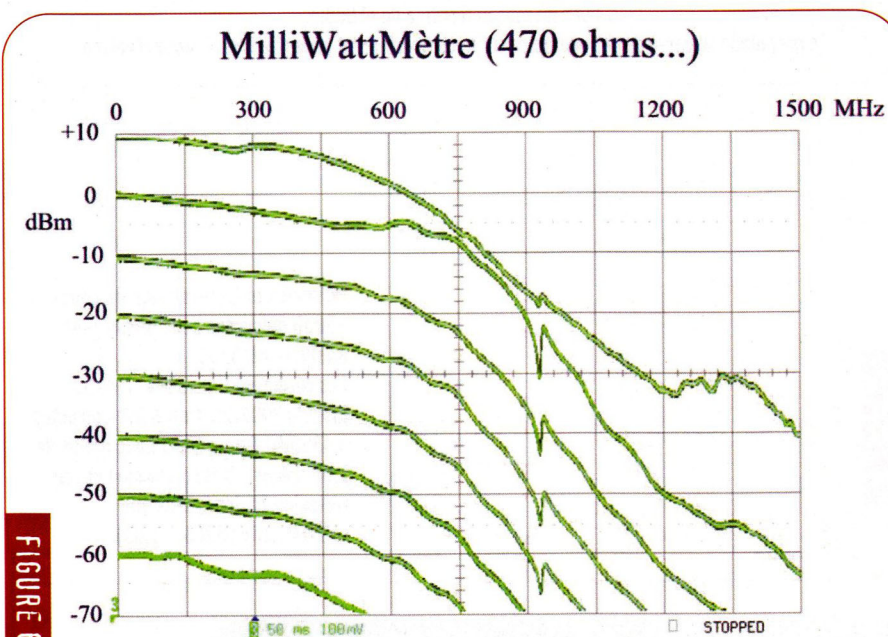


FIGURE 6

Courbe de réponse du milliwattmètre, pour différents niveaux d'entrée, avec le réseau de correction R2, C2, L1 = 470 ohms//15pF +1 spire à l'entrée. Ce réseau est celui préconisé dans l'article du QST, mais les résultats obtenus ne correspondent pas à ceux attendus.

8 - Disponible, par exemple, chez Radiospares ou Farnell.

9 - La largeur de 38 mm correspond au bond rapport :  $\frac{\text{Self}}{\text{Capacité par rapport à la masse}}$  pour la distance entre le fond et le couvercle du boîtier pour une ligne 50  $\Omega$  placée sensiblement au milieu.

Réglez le zéro du galvanomètre avant de mettre le milliwattmètre sous tension.

Puis commencez par régler A2 pour obtenir une pente de 0,1 V/10 dB. Pour cela, injectez un signal sinusoïdal de fréquence comprise entre 100 kHz et 30 MHz et de niveau inférieur à 1 V<sub>eff</sub> à l'entrée et branchez un voltmètre (si possible numérique) à la sortie. Relevez la tension (continue), puis atténuez le signal d'entrée le plus possible et calculez la pente. Exemple : Vous disposez d'un générateur 1 MHz et de quelques atténuateurs 50 Ω : 20 dB et 6 dB (utilisez en le maximum, sans dépasser 70 dB). La première mesure donne 0,62 V ; avec les 26 dB vous trouvez 0,32 V ; soit une différence de 0,62 - 0,32 = 0,3 V. La pente est trop importante puisque vous devriez trouver 0,26 V de différence. Retirez les atténuateurs et réglez A2 pour lire 0,62 x 0,26/0,3 = 0,54 V. Puis recommencez jusqu'à obtenir le résultat souhaité.

Une fois la sensibilité réglée en « relatif », il faut l'ajuster en « absolue ». Pour cela, assurez-vous que le potentiomètre P1 est en buté côté amplificateur opérationnel (tension max sur le curseur de P1 = tension de sortie minimum du milliwattmètre), injectez un signal de niveau connu (si possible proche de 0 dBm) et réglez A1 pour lire la bonne valeur. Profitez-en pour ajuster A3 de manière à lire la même valeur sur le galvanomètre.

Enfin, augmentez la fréquence du signal, et pour quelques valeurs remarquables (100, 200... MHz, et/ou 145, 435 MHz, selon vos goûts) corrigez la lecture du signal de sortie avec P1 et faites des repères pour ces fréquences (voir photo 1) pour les positions correspondantes de P1.

## Remerciements

Mes plus vifs remerciements à Wes, W7ZOI et à Bob, W7PUA pour leur article et les fructueuses discussions que nous avons eues via Internet ; à Michel, F1CLQ, car c'est lui qui m'a d'abord poussé à entreprendre cette réalisation, puis n'a pas cessé de m'aider et de m'encourager et à Jean Mouis, F1GCZ, pour la saisie sur ordinateur des schémas.

## Bibliographie

- (1) Simple RF-Power Measurement, QST de juin 2001 pages 38-43.
- (2) AD8307 data sheet, Analog Devices.
- (3) Analog Dialogue, Volume 33, Number 3, March 1999.

(4) LM2931 data sheet, National Semiconductor.

(5) MAX492 data sheet, Maxim.

(6) An Advanced VHF Wattmeter, QEX de mai-juin 2002 pages 3-8.

## Adresses utiles

Analog Devices, [www.analog.com](http://www.analog.com)

Electronique Diffusion à Malakoff,

01.46.57.68.33,

[www.electronique-diffusion.fr/](http://www.electronique-diffusion.fr/)

Farnell,

[www.farnell.com/France/index.html](http://www.farnell.com/France/index.html)

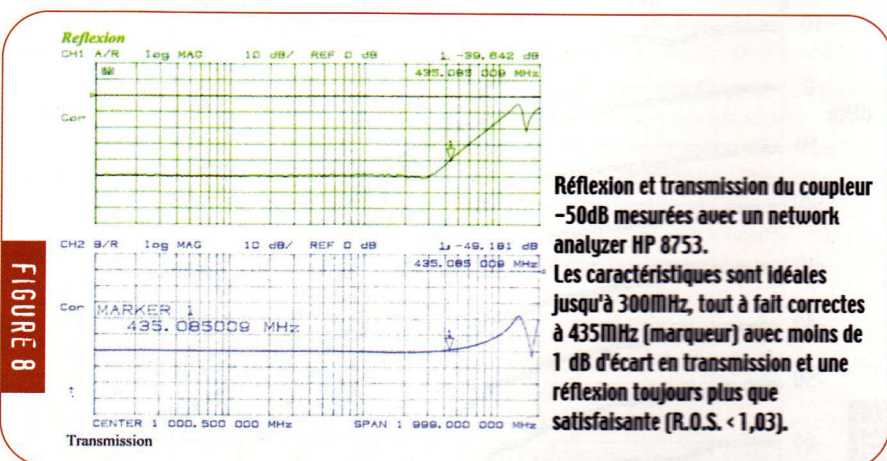
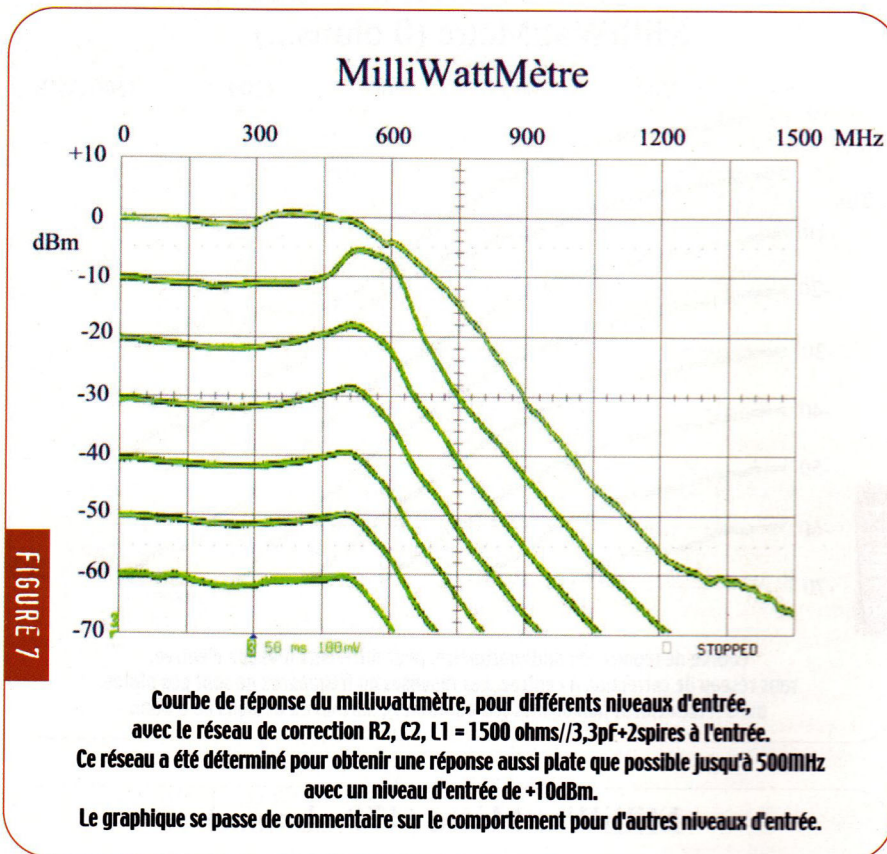
Giga Tech, [www.giga-tech.de/](http://www.giga-tech.de/)

National Instrument,

[www.national.com/](http://www.national.com/)

Radiospares, 0 825 034 034,

[www.radiospares.fr/](http://www.radiospares.fr/)



## NOMENCLATURE coupleur - 50dB

**Boîtier :**

boîtier en aluminium de 60 x 111 x 31 mm, réf. Eddystone 27134 PSL ou équivalent

**J1 :** N

**J2 :** BNC

**J3 :** N

**R1 :** 2,7 kΩ, 2 W (non bobinée, voir texte)

**R2 :** 2,7 kΩ, 2 W (non bobinée, voir texte)

**R3 :** 2,7 kΩ, 2 W (non bobinée, voir texte)

**R4 :** 51 Ω, 1/4 W

## NOMENCLATURE milliwattmètre

- A1** : ajustable 47 k $\Omega$
  - A2** : ajustable 10 k $\Omega$
  - A3** : ajustable 4,7 k $\Omega$
  - Boîtier** : aluminium de 150 x 120 x 53 mm
  - BP1** : 4,7 nF (1 à 10 nF)
  - BP2** : 4,7 nF (1 à 10 nF)
  - BP3** : 4,7 nF (1 à 10 nF)
  - BP4** : 4,7 nF (1 à 10 nF)
  - C1** : 10 nF céramique
  - C2** : voir texte
  - C3** : 100 nF céramique
  - C4** : 100 nF céramique  
(ou moins, voir texte)
  - C5** : 100 nF céramique
  - C6** : 100 nF céramique
  - C7** : 100 nF céramique
  - C8** : non monté
  - C9** : 100 nF céramique
  - C10** : 100  $\mu$ F 10 U
  - C11** : 100 nF céramique
  - C12** : 100  $\mu$ F 25 U
  - J1** : connecteur BNC
  - J2** : douilles bananes ou BNC
  - L1** : voir texte
  - L2** : 100  $\mu$ H « goutte »
  - L3** : 2 spires sur un petit tore ferrite  
d'environ 4 mm de diamètre
  - L4** : 6 spires « deux fils en main » sur tore  
ferrite diamètre externe 15 mm
  - M1** : galvanomètre 100  $\mu$ A PE, 2675  $\Omega$   
(ou voir texte)
  - P1** : potentiomètre 22 k $\Omega$
  - R1** : 51  $\Omega$
  - R2** : voir texte
  - R3** : 6,8  $\Omega$
  - R4** : 12 k $\Omega$
  - R5** : 22 k $\Omega$
  - R6** : 22 k $\Omega$
  - R7** : 220 k $\Omega$
  - R8** : 22 k $\Omega$
  - R9** : 4,7 k $\Omega$
  - R10** : 6,8  $\Omega$
  - R11** : 4,7 k $\Omega$
  - R12** : 1 k $\Omega$
  - U1** : AD8307AR
  - U2** : MAX492CPA
  - U3** : LM2931-5 ou régulateur 5 U
- Toutes les résistances sont des 5%, 1/4 W.