

Conception d'un wattmètre VHF et UHF

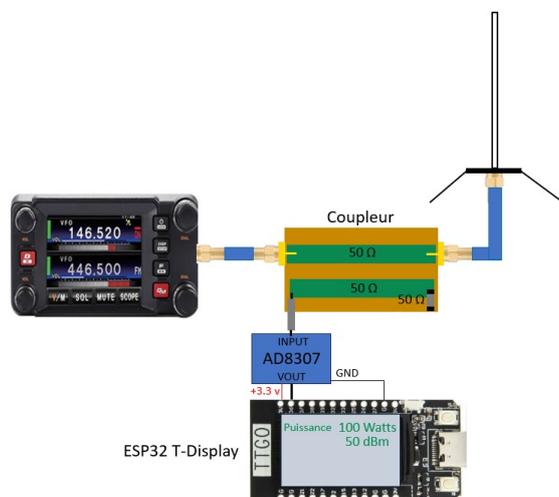


Figure 1. Wattmètre: Coupleur, sonde logarithmique de puissance (AD8307) et ESP32.

La mesure de la puissance de sortie d'un amplificateur radiofréquence nécessite d'insérer un coupleur entre la sortie et le câble coaxial qui alimente l'antenne. Celui-ci permet de transporter la puissance tout en dérivant une infime partie de la puissance vers une sonde de mesure sans que cela impacte le rapport d'ondes stationnaires (ROS) de la ligne de transmission de puissance.

Une sonde logarithmique du type AD8307 de chez Analog Device, possède une dynamique de mesure importante typiquement de -77 dB à +16 dBm. Sa grande sensibilité simplifie la réalisation de ce wattmètre.

Cet article propose de réaliser ce wattmètre depuis sa conception jusqu'à sa réalisation;

Sonde de mesure de puissance logarithmique

Il existe plusieurs modèles de sonde de puissance logarithmique (AD8307, AD8310, AD8318, AD8362...) qui peuvent être approvisionnés depuis les sites marchands habituels. L'impédance d'entrée est de 50 ohms et la bande de fréquence peut aller jusqu'à 10 GHz.

Le modèle AD8307 a été choisi pour sa disponibilité, son coût (< 6 €) et ses performances adaptées à ce projet.

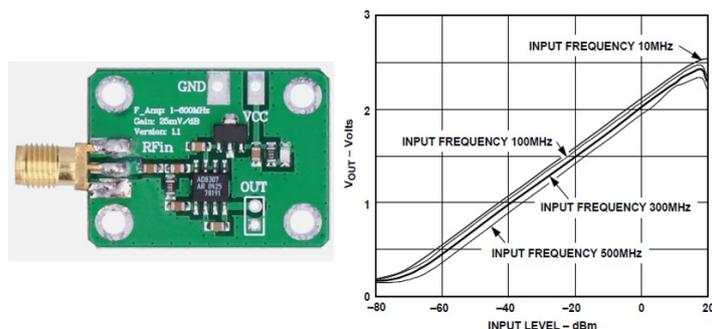


Figure 2. Sonde de puissance AD8307 et sa courbe de correspondance entre Vout et la puissance d'entrée.

Ces caractéristiques sont décrites ci-dessous:

- Gamme de fréquences: 0 Hz à 500 MHz,
- Gamme d puissance : -77 dBm à +16 dBm
- Sensibilité : +25 mV/dB,
- Dynamique : +87 dB
- Niveau de sortie du capteur: 0.25 v à 2.5 v
- Tension d'alimentation: +2.7 v à +55v.

La figure ci-dessus montre la tension de sortie fournie par la sonde (Vout) en fonction de la puissance d'entrée (INPUT). Elle a une très bonne linéarité et cela simplifiera l'algorithme de calcul de la puissance à mesurer. Pour plus de précision, la mesure pourra être pondérée en fonction de la fréquence de travail.

Spécification du coupleur

Il comporte deux lignes de transmission de 50 ohms. La ligne PT transporte la puissance vers l'antenne et elle est faiblement couplée avec la ligne de mesure PM.

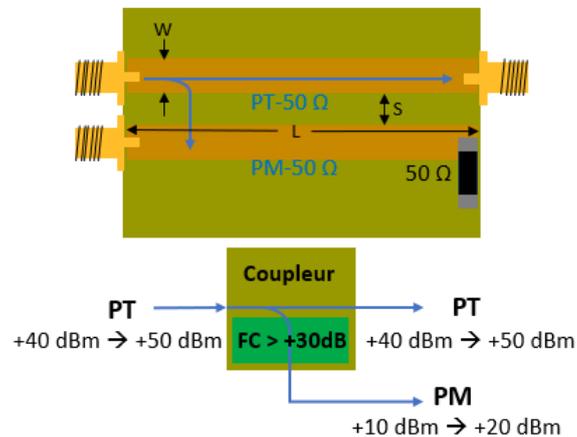


Figure 3. Coupleur directionnel à deux lignes de transmission 50 ohms.

La caractéristique la plus importante pour un coupleur directif est son facteur de couplage FC qui est défini comme étant le rapport entre la puissance PT et PM exprimé en dB:

$$FC(dB) = 10 \times \log_{10} \left(\frac{PT}{PM} \right)$$

La puissance mesurée à la sortie du coupleur est donc égale à:

$$PM(dBm) = PT(dBm) - FC(dB)$$

Pour une puissance PT de +50 dBm et un couplage FC de +30 dB, la puissance PM prélevée est de +20 dBm.

Typiquement, les coupleurs traditionnels ont un FC compris entre +6 dB et +30 dB. Plus FC est grand et moins la puissance prélevée pour la mesure est importante. Cela signifie aussi que le ROS de ligne PT sera faiblement impacté par la ligne PM. C'est tout l'intérêt des sondes logarithmiques intégrées de pouvoir fonctionner avec peu de puissance (-77 dBm). Elles autorisent donc des facteurs de couplage plus grands.

La gamme de puissance à mesurer de notre projet s'étend de 10 watts (40 dBm) à 100 watts (50dBm). La mesure s'effectue dans les deux bandes de fréquences:

- VHF: 144 MHz à 146 MHz,
- UHF: 430 MHz à 440 MHz.

La dynamique de la mesure est donc de:

$$\text{dynamique (dB) de l' étage de sortie} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{100}{10} \right) = 50 \text{ dBm} - 40 \text{ dBm} = 10 \text{ dB}$$

La sonde AD8307 accepte sur son entrée une puissance comprise entre +16 dBm et -77 dBm. La puissance maximale à mesurer est de 100 watts soit +50 dBm. Le facteur de couplage est fixé à +30 dB minimum. Un facteur FC plus grand rendrait la sonde sensible aux rayonnements environnants. Avec un FC de +30 dB, la sonde recevra donc une puissance de:

- $P_{Max} = +50 \text{ dBm} - 30 \text{ dB} = +20 \text{ dBm}$
- $P_{min} = +40 \text{ dBm} - 30 \text{ dB} = +10 \text{ dBm}$

La puissance maximale admissible par la sonde étant de +17 dBm, il serait donc nécessaire d'insérer entre le coupleur et la sonde un atténuateur de:

- $A \leq +17 \text{ dBm} - 20 \text{ dBm} \leq -3 \text{ dB}$

Pour garantir une marge de fonctionnement, A est fixé à -20 dB. Dans ces conditions la sonde verra à son entrée (-30 dB -20 dB=-50 dB):

- $P_{Max} = +50 \text{ dBm} - (30 \text{ dB} + 20 \text{ dB}) = +0 \text{ dBm}$
- $P_{min} = +40 \text{ dBm} - 50 \text{ dB} = -10 \text{ dBm}$

La figure ci-dessous synthétise l'ensemble de données de conception.

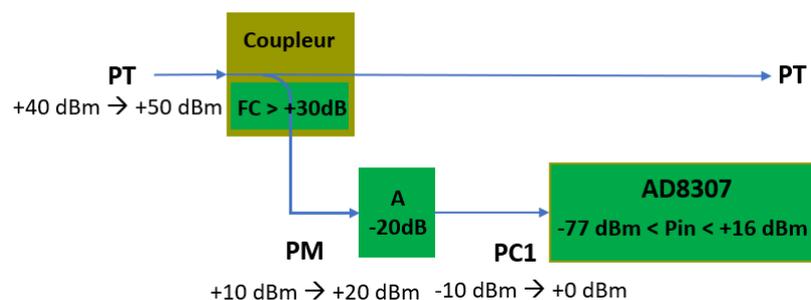


Figure 4. L'atténuateur A permet d'adapter la mesure au niveau d'entrée de la sonde.

Conception du coupleur

QUCS Studio⁽¹⁾ est un outil de simulation radiofréquence gratuit et maintenu régulièrement. Il possède une boîte à outils d'aide à la conception dont une calculatrice de ligne de transmission et une autre pour le calcul des atténuateurs.

Coupleur à base de deux lignes de transmission 50 ohms

L'outil de calcul de lignes de transmission couplées de QUCS, "Transmission Line Calculation", montré ci-dessous permet de dimensionner ce coupleur constitué de deux lignes de 50 ohms couplées. Après quelques itérations, chaque ligne aura une longueur de 4 cm (L), une largeur de 3.2 mm (W) et un espacement de 4 mm (S). Le matériau est de l'époxy et la constante diélectrique est de 4.5 et son épaisseur de 1.6 mm.

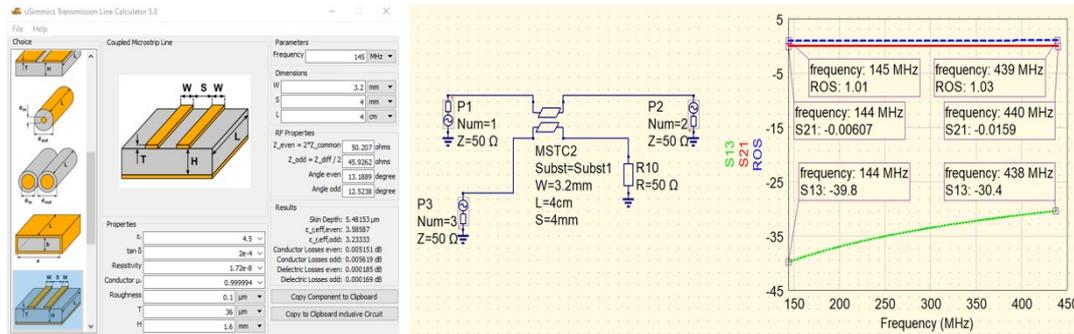


Figure 5. Dimensionnement du coupleur pour atteindre la spécification.

La figure ci-dessus montre les dimensions des deux lignes et leur espacement ajustées pour obtenir un couplage $>$ à -30 dB à 440 MHz. Dans ces conditions, le couplage est de -39.8 dB à 144 MHz. Le ROS est maintenu proche de 1 ($<$ 1.03) avec une perte d'insertion proche de 0 dB.

Atténuateur - 20 dB

L'outil "Attenuator Synthesis" de QUCS permet de dimensionner l'atténuateur en T dont les impédances d'entrée et de sortie sont égales à 50 ohms. La figure ci-dessous montre les valeurs des résistances pour obtenir -20 dB. La puissance appliquée à la sonde de mesure respecte les règles de conception vue précédemment.

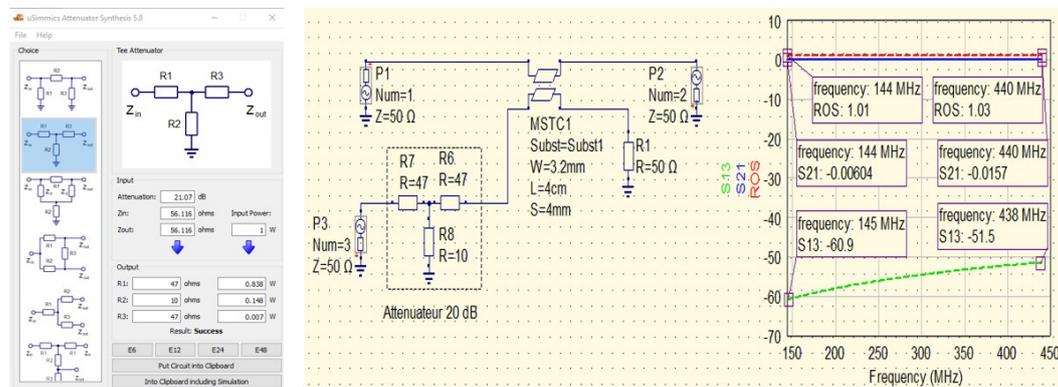


Figure 6. Montage et caractéristiques de la sonde R7=R6 = 47 ohms, R8=10 ohms.

Pour une puissance maximale de 50 dBm, la sonde verra à son entrée:

- 440 MHz \rightarrow 50 dBm - 51.5 = **-2.5 dBm** $<$ +16 dBm
- 146 MHz \rightarrow 50 dBm - 60.9 = **-9.1 dBm** $<$ +16 dBm et $>$ -77 dBm

Pour une puissance de +40 dBm, la puissance mesurée sera de:

- 440 MHz \rightarrow +40 dBm - 51.5 = **-12.5 dBm**
- 146 MHz \rightarrow +40 dBm - 60.9 dBm = **-19.1 dBm**

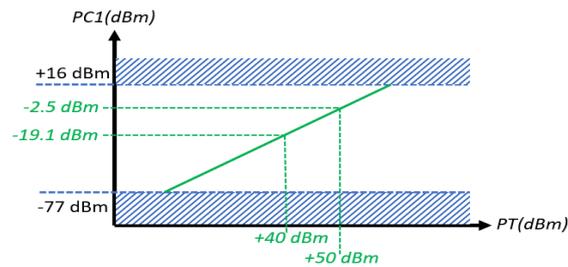


Figure 7. Pour couvrir de 10 à 100 watts, la sonde utilise +16.6 dB (19.1 dBm -2.5 dBm).

La figure ci-dessus montre que la sonde n'utilise qu'une partie de sa caractéristique. Il est possible d'étendre la gamme de mesure de la puissance PT.

Réalisation du coupleur

Le coupleur est réalisé à partir d'une plaque époxy de constante diélectrique égale à 4.5 et d'épaisseur de 1.6 mm. La réalisation est faite de cette manière:

- Une découpe de deux bandes de 3.2mm de large et de 4 cm de longueur,
- Celles-ci sont collées sur un morceau de plaque cuivrée de 40 mm x 25 mm,
- Une résistance de 51 ohms est soudée sur l'extrémité de droite de la ligne de mesure,
- Trois connexions SMA sont soudées pour permettre la mesure.



Figure 8. Réalisation du coupleur directif.

Mesure avec un nanoVNA

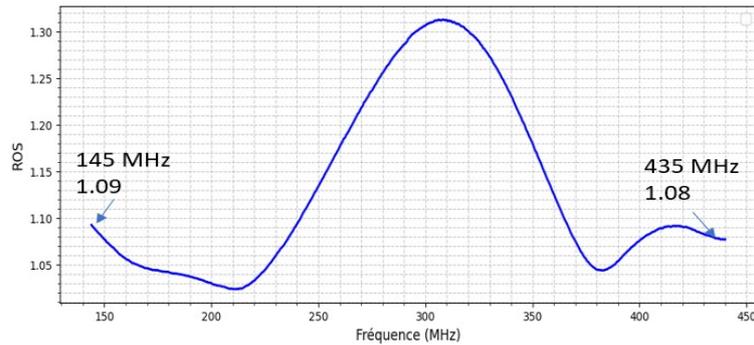
La figure ci-dessous montre la configuration de mesure constituée d'un nanoVNA muni de son extension et qui permet de mesurer le coupleur comportant trois ports. Avec un nanoVNA classique il faudrait la mesure des ports P2 et P3 en deux fois.



Figure 9. Montage de mesures ROS, S21 et S31.

Mesure du ROS du PORT 1

La mesure montre, dans les deux bandes de fréquences, une bonne corrélation avec la simulation:

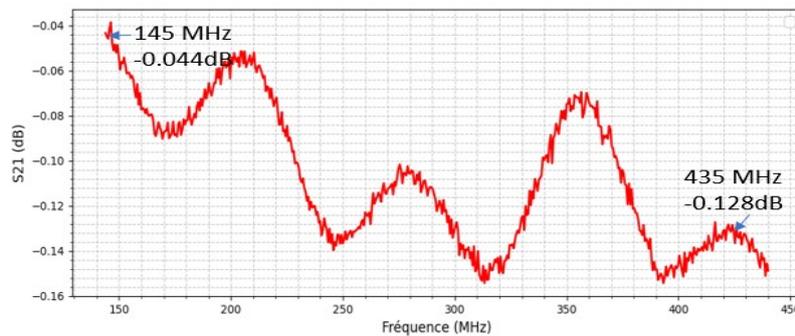


144-146 MHz: Mesure < 1.09, simulation < 1.01
 430-440 MHz: Mesure < 1.08, simulation < 1.0

Figure 10. ROS mesuré sur le PORT 1.

Mesure de la perte d'insertion, S21

La mesure corréle la simulation dans les deux bandes de fréquences.



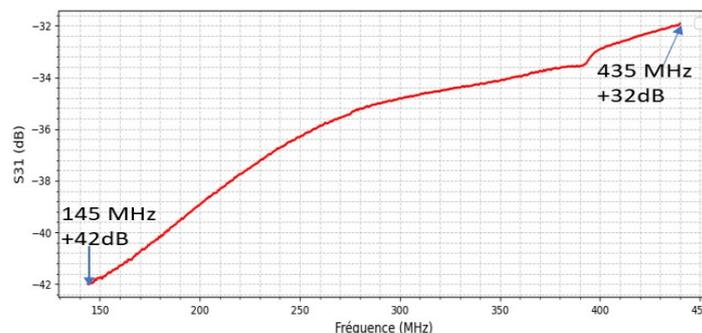
144-146 MHz: Mesure < -0.044, simulation < -0.006
 430-440 MHz: Mesure < -0.15, simulation < -0.016

Figure 11. Perte d'insertion.

Les différences s'expliquent par le modèle de simulation qui ne comporte que les éléments du premier ordre. Les connecteurs SMA, qui ne sont pas pris en compte, contribuent à augmenter la perte d'insertion. De manière pragmatique la perte est faible.

Le coefficient couplage, S13

Il y a une bonne corrélation et les différences restent inférieures à 3 dB.



144-146 MHz: Mesure < +42 dB, simulation < +39.8 dB
 430-440 MHz: Mesure < +32 dB, simulation < +30.4 dB

Figure 12. Couplage entre la ligne de transmission et la ligne de mesure.

Ajout d'un atténuateur -20 dB

L'atténuateur de -20 dB est connecté au PORT 3 pour adapter à la gamme de mesure à la sonde AD8307. La mesure rejoint la simulation avec une erreur inférieure à 3 dB.

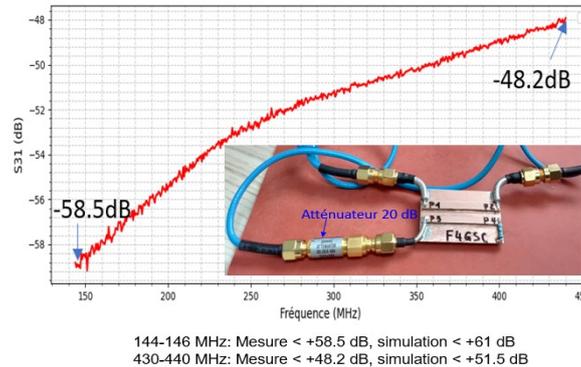


Figure 13. Facteur de couplage avec l'atténuateur.

Réalisation du wattmètre complet

Le wattmètre est monté sur un plaque cuivrée et l'ESP32 sur une plaquette d'essai. L'AD8307 doit être maintenu à 2 cm du coupleur afin d'éviter des couplages des champs par un rayonnement direct de l'entrée du capteur. Il faut cependant maintenir la connexion à 50 ohms aussi un petit câble coaxial semi-rigide assure la liaison entre les deux dispositifs.

Calibrage du convertisseur analogique/numérique (ADC)

Il est nécessaire de calibrer l'ADC car le convertisseur possède des erreurs de gain et de décalage. L'excursion de la tension d'entrée doit être comprise entre 0.25 v et 2.5 v (Vout). Pour cela il faut connecter une tension comprise entre 0 v et +3.3 v sur l'entrée de l'ADC (broche 36). Celle-ci peut être issue d'une alimentation continue réglable ou d'un potentiomètre de 1 kohm. Un programme permet alors de lire le résultat de la conversion sur la console l'IDE.

```
#define AD8307 36
void setup()
{
  // - Initialise la vitesse du port COM à
  // - 115200 bauds.
  Serial.begin(115200);
  // - Broche 36 (ADC) en entrée.
  pinMode(AD8307, INPUT) ;
  // - Résolution de l'ADC à 12-bits
  // - 0 → 4095.
  analogReadResolution(12);
}

void loop()
{
  // - Lecture de l'ADC et format en volt.
  // - Envoi de la valeur sur la console de
  // - l'IDE Arduino.
  Serial.println(analogRead(AD8307)*3.3/4096);
  delay(1000);
}
```

La figure ci-dessous (gauche) montre l'erreur de gain et de décalage entre les valeurs de tension appliquées sur l'entrée de l'ADC et la tension convertie. Par exemple, pour 1 volt appliqué l'ADC mesure 0.85 volt.

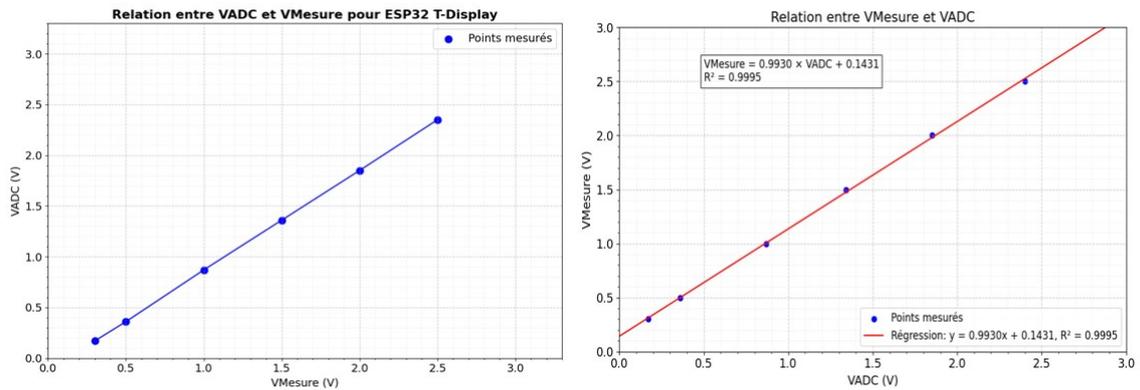


Figure 14. Équation permettant de corriger l'erreur de gain et de décalage de l'ADC.

Pour corriger cette erreur de gain et de décalage, l'IA⁽²⁾ est utilisée pour générer la courbe de correction de la tension convertie par l'ADC (figure de droite).

Le programme comprend une action de lecture de l'ADC et de correction:

```
//- Lecture de l'ADC et conversion en volt
VADC=analogRead(AD8307) * 3.3/4096;

//- Correction de la valeur lue pour correspondre à la tension mesurée.
VMesure=0.9930*VADC+0.1431;
```

La courbe de droite ci-dessus, donne VMesure corrigée en fonction de la lecture de l'ADC.

Programme du wattmètre

Le programme est fourni en annexe 1. Toutes les librairies sont à inclure via le gestionnaire de librairies de l'IDE Arduino. Ce programme effectue la lecture de l'ADC et l'affichage de la puissance en dBm et en watt sur l'écran de l'ESP32.

Vérification

Le prototype est montré sur la figure ci-dessous. Le coupleur est connecté par un petit câble 50 ohms au capteur de puissance sur lequel à été inséré l'atténuateur de +20 dB constitué des trois résistances CMS insérées directement sur le PCB de la sonde. La sortie du capteur est connectée sur l'entrée analogique/numérique (broche 36) de l'ESP32. Le coupleur est connecté à une charge 50 ohms.

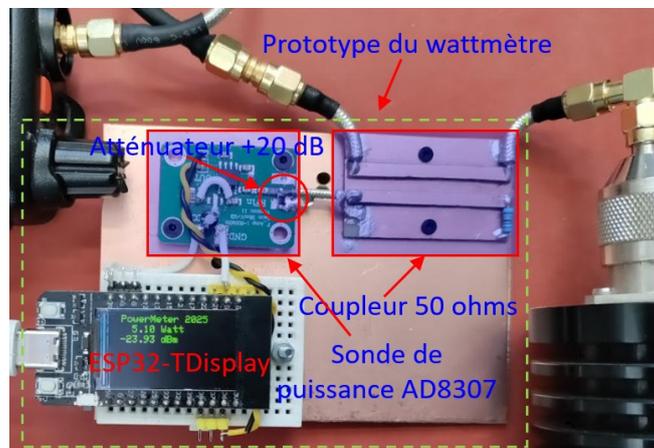


Figure 15. Prototype du wattmètre constitué du coupleur et de la sonde de puissance AD8307.

Le premier test est réalisé avec un Yeasu FT-4X qui sort 5 watts. La puissance est affichée sur l'écran de l'ESP32 en watt (5.1 watts) et en dBm (-23.93 dbm) pour la puissance appliquée à l'entrée de l'AD8307.

Un deuxième test est réalisé à 145 MHz et à 435 MHz avec un équipement FTM400D. Il est connecté à un wattmètre de la station (CN-801) et à notre wattmètre. La tension VOUT est mesurée avec un voltmètre puis est reportée dans une feuille Excel pour déterminer la puissance PT. Le FTM400D délivre trois puissances mesurées par le wattmètre de la station qui sont reportées ci-après:

- 145 MHz: 3.5 watts / 35.44 dBm, 14.5 watts/ 41.61 dBm et 40 watts / 46 dBm,
- 435 MHz: 4 watts / 36 dBm, 15 watts/41.76 dBm et 30 watts / 44.76 dBm.

A 145 MHz le facteur de couplage est de +58.5 dB et à 435 MHz Fc est égal à +48.2 dB. Pour déterminer la puissance à partir de la mesure:

$$P_{Calculée} = P_{Mesure} + \text{Facteur de couplage}$$

Exemple: P_{Mesure}=-23 dBm, FC=+58.5, P_{Calculée}=+58.5 dB -23 dBm= +35.5 dBm.

Puissance émission à 145 MHz (dBm)	+35.44	+41.61	+46
Mesure (dBm)	-23	-16.6	-13
Puissance calculée (dBm)	+35.5	+41.9	+45.5

Puissance émission à 435 MHz (dBm)	+36	+41.76	+44.76
Mesure (dBm)	-13.5	-7.4	-3.6
Puissance calculée (dBm)	+34.7	+40.8	+44.6

A partir de la connaissance du facteur de couplage, le calcul de la puissance émise corolle la puissance mesurée et l'erreur est inférieur à 4 %.

Conclusions et perspectives

La réalisation de ce coupleur rudimentaire se révèle être performante. La fonction de couplage d'abord simuler puis corrélér par la mesure avec un nanoVNA permettra d'écrire un algorithme dans l'environnement Arduino pour d'afficher la valeur de la puissance en watt et en dBm. L'utilisation de la sonde de puissance logarithmique autorise une fonction de couplage supérieure à +30 dB et contribue à réduire la perte d'insertion. Dans un prochain article, la réalisation du wattmètre complet sera présentée.

Note: ⁽¹⁾ <https://qucsstudio.de>, son nouveau nom est uSimmics et la version stable actuelle est 5.8.

⁽²⁾ Claude Sonnet 3.5, <https://claudio.ai>

Annexe 1- Programme du prototype du wattmètre

```
#-- 25/03/2025: Version V1.0 - F4GSC
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
//--- Display OLED --- 1.14 pouces / 135x240 / ST7789
#include <Adafruit_ST7789.h>
```

```

#define TFT_MOSI 19
#define TFT_SCLK 18
#define TFT_CS 5
#define TFT_DC 16
#define TFT_RST 23
#define TFT_BL 4
Adafruit_ST7789 tft = Adafruit_ST7789(TFT_CS, TFT_DC, TFT_MOSI, TFT_SCLK, TFT_RST);
#define OLED_RESET -1
//--AD8307
#define AD8307 36
#define Pmin -77 // dBm
#define PMax 16 // dBm
#define Voutmin 0.25 // volt
#define VoutMax 2.5 // Volt
#define FCMIn145MHz 58.5 //dBm
#define FCMIn430MHz 48.2 //dbm
float b=Voutmin -((Voutmin-VoutMax)*Pmin/(Pmin-PMax));
float a=(Voutmin-VoutMax)/(Pmin-PMax);

float mesurePuissance()
{
  //-- 0.5 w --> 27 dBm, 2.5 w --> 34 dBm, 5 w --> 37 dBm
  float puissance=0,Watt, mesure,temp;
  //-- Moyennage de la mesure
  mesure=0;
  for (int k=0;k<64;k++)
  {
    temp=analogRead(AD8307)*3.3/4096;
    mesure+=temp;
    delay(1);
  }
  mesure=mesure/64;
  //-- Correction de la mesure de l'ADC
  mesure=(mesure+0.1434)/1.0065;
  //-- Calcul de la puissance en dBm
  puissance= FCMIn145MHz + (mesure-b)/a;
  //-- Calcul de la puissance en watt
  float exposant = puissance / 10.0;
  Watt=pow(10, exposant) * 0.001;
  tft.fillRect(10,20, 200, 18, ST77XX_BLACK);
  tft.setCursor(34,20);tft.print(Watt);tft.print(" Watt");
  tft.fillRect(10,40, 200, 18, ST77XX_BLACK);
  tft.setCursor(10,40);tft.print(puissance-61);tft.print(" dBm");
  return (Watt);
}

void setup()
{
  //-- Afficheur OLED
  tft.init(135, 240); tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
  tft.setRotation(1); tft.setTextSize(2); tft.setTextColor(ST77XX_GREEN);
  tft.print(" PowerMeter 2025");
  //-- Configuration des broches d'entrée et de sortie
  pinMode(TFT_BL, OUTPUT); digitalWrite(TFT_BL, HIGH);
  pinMode(AD8307, INPUT) ; analogReadResolution(12);
}

void loop()
{
  mesurePuissance(); delay(1000);
}

```