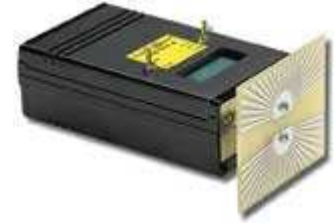


# Le polluomètre

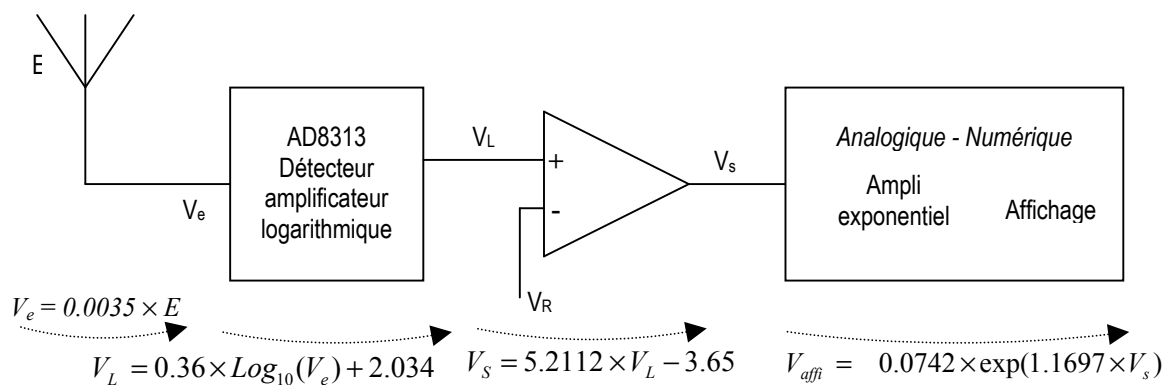
C'est un appareil permettant de mesurer les champs électriques ambiants, dans la gamme de fréquence de 1 à 3 GHz. Il est décrit dans la revue Electronique n°11 de avril 2000. Il est commercialisé, en kit, par la société Comelec, CD 908, 13720 Belcodène.



Il comprend un étage capteur, miniaturisé (composants CMS) associé à l'antenne ; cet étage reçoit la HF et sort une tension proportionnelle au logarithme de la valeur de la tension de l'enveloppe du signal (détecteur amplificateur logarithmique).

Le signal est ensuite transmis à un amplificateur opérationnel dont l'entrée négative reçoit une tension continue, réglable (seul réglage dans le dispositif).

Enfin le signal entre dans un dispositif analogique-numérique assurant une amplification exponentielle (pour corriger l'amplification logarithmique initiale) et l'affichage.



## Premier stade : relation entre le champ électrique E et la tension d'entrée $V_e$ .

Les constructeurs s'arrangent pour que leurs matériels aient une réponse la plus linéaire possible ; nous considérons que le concepteur de ce matériel a bien conçu son dispositif ; nous supposons donc que dans le domaine des mesures effectuées,  $V_e = G \times E$

La valeur numérique  $G = 0.0035$  est estimée à la suite de l'étalonnage : connaissant le champ électrique (fourni par des appareils étalons), la valeur de 0.0035 permet d'afficher la valeur correcte de ce champ en bout de chaîne.

## Second stade : l'amplificateur logarithmique : Relation entre E et $V_L$

Les caractéristiques du circuit AD8313 sont fournies dans la notice technique (Analog Device AD8313 Logarithmic Detector/Controller, de 0.1 à 2.5 GHz, 70 dB) ; les réponses sont légèrement différentes selon les fréquences ; dans la plage linéaire, elles peuvent être approximées par la formule

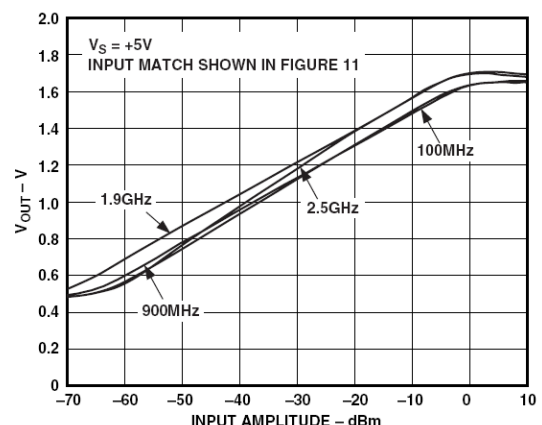
$$V_L = 0.018 \times P_{e(dBm)} + 1.8$$

Pour être plus précis : à 1.9 GHz :

$$V_L = 0.0184 \times P_{e(dBm)} + 1.857$$

à 2.5 GHz :

$$V_L = 0.02 \times P_{e(dBm)} + 1.783$$



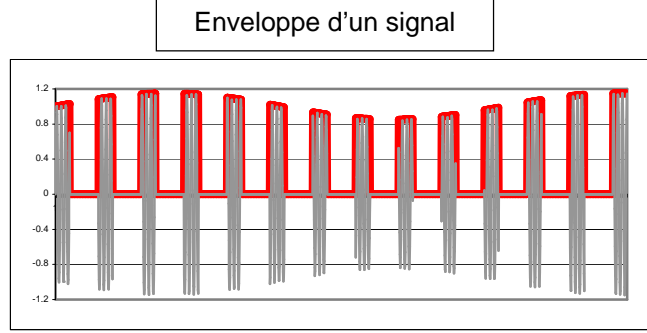
TPC 1.  $V_{OUT}$  vs. Input Amplitude

Nous en resterons à la formule générale.

Le signal étudié est un signal haute fréquence (dans le cas présent, de 0.1 à 2.5 GHz)

Le circuit détecteur reçoit ce signal HF et en déduit l'enveloppe (trait épais).

Le circuit AD8313 donne le niveau de cette enveloppe à chaque instant ; dans notre cas cette enveloppe forme un signal souvent audible.



Problème : la variable d'entrée de l'amplificateur logarithmique est une puissance exprimée en dBm, alors que le signal d'entrée est exprimé en volts ( $V_e$ )

#### Rappels sur le dBm

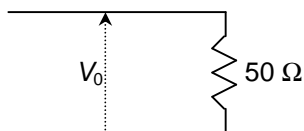
Trois méthodes sont possible pour comparer des puissances :

- La différence : le four électrique consomme 1000 w de plus que le sèche linge.
- Le rapport : le four consomme deux fois plus que le sèche linge.
- Les bels : le four consomme 0.3 bels de plus que le sèche linge ( $\text{Log}_{10}(\frac{\text{four}}{\text{sèche linge}})$ ).

En fait, on utilise des dixièmes de bels : un four consomme 3 décibels de plus qu'un sèche linge.

Pour trouver ce nombre de décibels :  $10 \times \text{Log}_{10}(\frac{\text{Puissance four}}{\text{Puissance sèche linge}})$

Pour les ondes, plutôt que d'utiliser le sèche linge comme référence, on utilise le milli-watt. Plus précisément un milli-watt qui se consomme sur une résistance de 50  $\Omega$  ; on ne parle plus alors de « décibels », mais de puissance en dBm.



$$\text{Puissance en dBm} = 10 \times \log_{10} \frac{P}{P_0}$$

avec  $P_0 = 1$  milli watt

A la sortie d'une antenne, on récupère un signal. Ce signal sera, en principe, envoyé sur une résistance de 50  $\Omega$ . Ce signal sera exprimé :

- par sa puissance en dBm,
- ou par sa tension (efficace) aux bornes d'une résistance de 50  $\Omega$ .

Pour passer de la puissance en dBm à la tension aux bornes d'une résistance de 50  $\Omega$  :

- Etape 1 : Correspondance entre  $P_0$  et  $V_0$  :

Un milli watt correspond à 0.2236 volt aux bornes d'une résistance de 50  $\Omega$ , car :

$$P_0 = \frac{V_0^2}{R} = \frac{V_0^2}{50} = 0,001 \text{ Watt} \quad \text{soit } V_0^2 = 50 \times 0,001 = 0,05, \quad \text{donc } V_0 = 0,2236 \text{ V}$$

- Etape 2 : On en déduit la correspondance entre Puissance et tension (toutes les fonctions « log » sont en base 10)

$$\begin{aligned} P_{dBm} &= 10 \times \log\left(\frac{P}{P_0}\right) = 10 \times \log\left(\frac{V^2}{V_0^2}\right) = 20 \times \log\left(\frac{V}{V_0}\right) \\ &= 20 \times \log(V) - 20 \times \log(V_0) = 20 \times \log(V) - 20 \times \log(0,2236) \\ P_{dBm} &= 20 \times \log(V) + 13.01 \end{aligned}$$

Augmenter la puissance de 1 dBm =	augmenter la puissance de 25.89% augmenter la tension à l'entrée de 12.2%
Augmenter la puissance de 10 dBm =	multiplier la puissance par 10
Augmenter la puissance de 20 dBm =	multiplier la tension par 10
Conversion dBm en mw	Puissance en mw = 10 puissance (Nb de dBm / 10)
Conversion dBm en Tension	Ve = racine carrée de (Nb de dBm x 50 / 1000)

Voici quelques résultats :

Puissance entrée (dBm)	Puissance entrée (milli watts)	Tension entrée (volts)
1	1.2589	0.2508
0	1	0.2236
-1	0.7943	0.1992
-2	0.6309	0.1776
-3	0.5011	0.1583
-4	0.3981	0.1410
-5	0.3162	0.1257
-6	0.2511	0.1120
-7	0.1995	0.0998
-8	0.1584	0.0890
-9	0.1258	0.0793
-10	0.1	0.0707
-11	0.0794	0.0630
-12	0.0630	0.0561

La formule de transfert du circuit AD8313 (vue plus haut)

$$V_L = 0.018 \times P_{e(dBm)} + 1.8$$

devient alors :

$$V_L = 0.36 \times \log(V_e) + 2.034$$

### Troisième stade : Amplificateur opérationnel ; relations entre $V_L$ et $V_S$

4 séries de mesures ont été faites, avec 4 valeurs différentes de  $V_R$  (mesuré au point milieu du potentiomètre) ( $V_R$  est mesuré sur la patte 7 du circuit IC3)

La formule générale qui découle de ces mesures est :

$$V_S = [5.6242 - 0.4976 \times V_R] \times [V_L - 0.834 \times V_R - 0.0081]$$

Dans notre cas, après calibrage,  $V_R = 0.83 V_s$ , ce qui donne :

$$V_S = 5.2112 \times V_L - 3.65$$

### Quatrième stade : relations entre $V_S$ et Tension affichée

Ce module est géré par un microcontrôleur qui assure 3 fonctions :

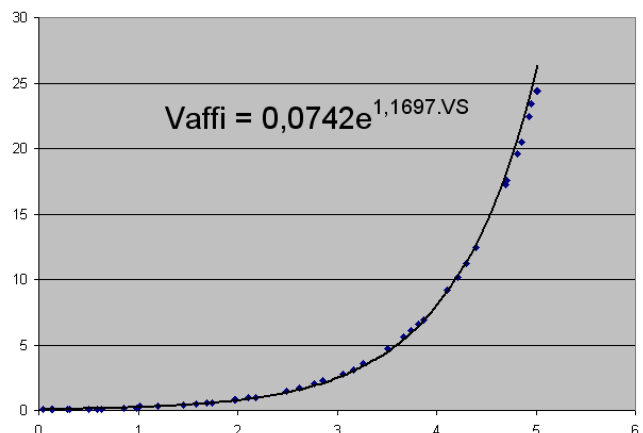
- la conversion analogique digitale,
- la conversion Logarithme → Exponentielle,
- et l'affichage.

Nous avons pris une quarantaine de points de mesure, en faisant varier la tension  $V_s$

Les résultats sont résumés sur le graphique :

La formule approchée est :

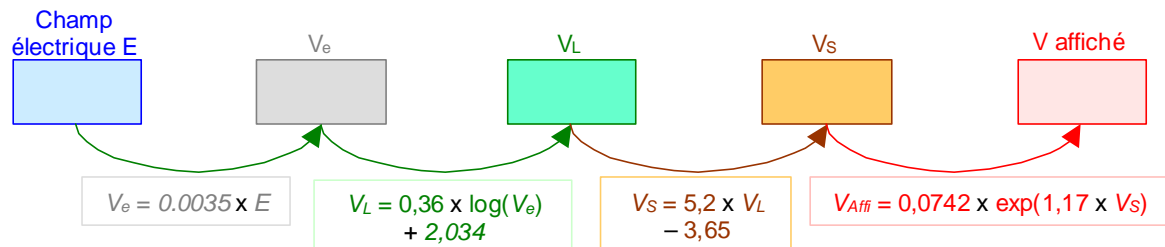
$$V_{affi} = 0.0742 \times \exp(1.1697 \times V_s)$$



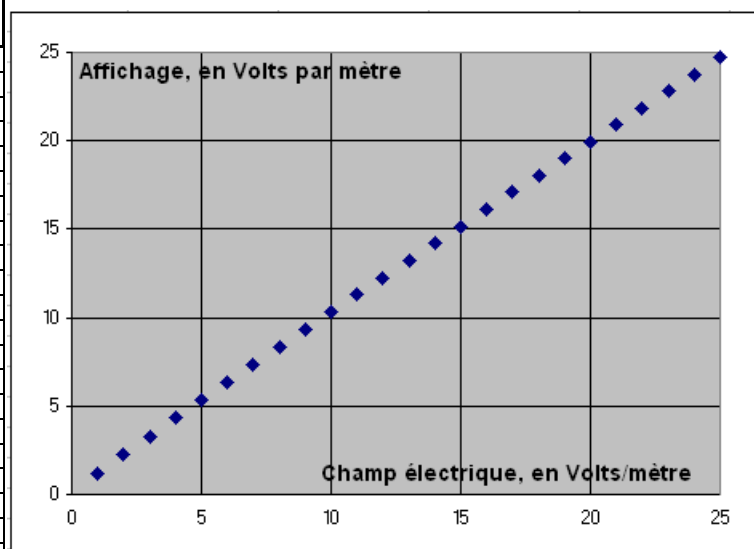
Notons que le microcontrôleur effectue quelques mesures par seconde ; en conséquence il convient à l'affichage des tensions de signaux stables, ou variant lentement ; il ne convient pas à la mesure de signaux travaillant par rafale.

Cette incapacité à afficher les caractéristiques de signaux en rafale est uniquement due à ce dernier étage. Pour récupérer les informations sur des signaux pulsés, il suffit d'aller les chercher dans le signal  $V_s$ .

## Chaîne globale



E Volts/m	Ve Volts	VL Volts	Vs Volts	affi Volts
1	0.004	1.150	2.342	1.149
2	0.007	1.258	2.907	2.224
3	0.011	1.322	3.237	3.273
4	0.014	1.367	3.472	4.305
5	0.018	1.401	3.653	5.325
6	0.021	1.430	3.802	6.336
7	0.025	1.454	3.928	7.338
8	0.028	1.475	4.036	8.334
9	0.032	1.493	4.132	9.324
10	0.035	1.510	4.218	10.309
11	0.039	1.525	4.296	11.290
12	0.042	1.538	4.367	12.266
13	0.046	1.551	4.432	13.238
14	0.049	1.562	4.492	14.207
15	0.053	1.573	4.549	15.172
16	0.056	1.583	4.601	16.135
17	0.06	1.593	4.651	17.094
18	0.063	1.602	4.697	18.051
19	0.067	1.610	4.741	19.006
20	0.07	1.618	4.783	19.958
21	0.074	1.626	4.823	20.908
22	0.077	1.633	4.861	21.856
23	0.081	1.640	4.897	22.801
24	0.084	1.647	4.931	23.745
25	0.088	1.653	4.965	24.687



## Étalonnage.

L'article de la revue Electronique (citée au début de ce document) propose, pour étalonner l'appareil, de régler le zéro en rase campagne, loin de toute forme de signal. Nous n'avons pas réussi ainsi : la moindre erreur lors de cet étalonnage conduit à des valeurs lourdement exagérées. Nous avons pu utiliser la chambre anéchoïde du laboratoire Telice, de l'IEMN : le réglage est plus facile avec un champ important et bien connu. Nous avons constaté alors qu'un étalonnage dans ces gammes de fréquences apporte beaucoup de modestie et de prudence ; on sait que l'ordre de grandeur est bon, c'est déjà précieux : nous savons que les nombres trouvés sont corrects à  $\pm 10\%$ . Nous avons cependant constaté que l'étalonnage paraît stable sur une durée de deux ans (mêmes résultats dans les mêmes conditions).

### Modification de plan.

Dans le montage actuel, il fallait une tension voisine de 1.24 volts à l'entrée (-) de l'amplificateur opérationnel IC2, pour rattraper la tension du signal fourni par le capteur IC1. Il a fallu ajouter une résistance de 1K $\Omega$  entre le potentiomètre et la masse ; nous avons également baissé R1 à 6 K $\Omega$ . Origine de cette dérive inconnue (erreur de conception ou mauvais câblage du kit ?).

### Saisie d'un signal dynamique

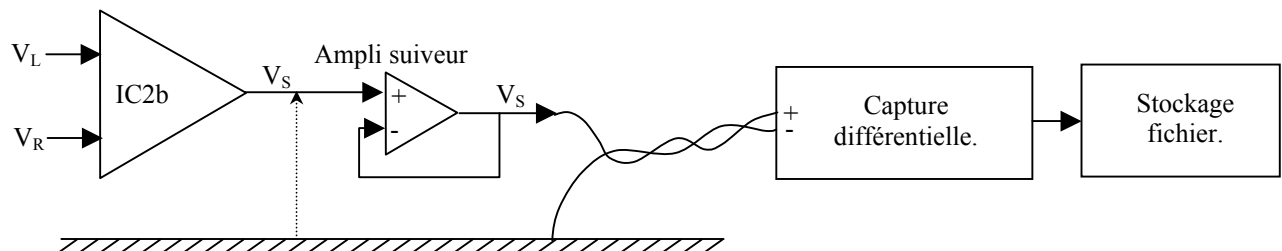
Le contrôleur numérique en bout de chaîne de traitement limite l'usage du polluomètre à la mesure de signaux stables. Or beaucoup de signaux sont pulsés. On souhaite utiliser le dispositif pour enregistrer les signaux fonctionnant en rafale.

La tension  $V_s$  contient toute l'information de l'enveloppe de l'onde étudiée.

- Le premier problème est d'enregistrer cette tension ; il a fallu utiliser une carte professionnelle (dans le cas présent, un dispositif National Instrument). Dans un premier temps la carte son (LINE) d'un ordinateur semblait convenir, mais les cartes son que nous avons testées éliminent les composantes continues ; le signal étant en logarithme, le résultat perd toute signification.
- Le second problème est de convertir les valeurs logarithmiques mesurées en valeurs réelles, exprimées en volts/mètre.

### Enregistrement du signal.

Le signal  $V_s$  est envoyé à un amplificateur suiveur, pour éviter de perturber les signaux internes du polluomètre. Le banc de conversion National Instrument enregistre immédiatement les mesures exprimées en volts. Nous avons demandé une fréquence d'échantillonnage de 44 100 Hz, pour pouvoir éventuellement restituer le signal équivalent sonore.



### Passage des résultats numériques enregistrés, aux grandeurs physiques.

Chaque échantillon de l'enregistrement contient la tension  $V_s$  à l'instant de l'échantillonnage, tension exprimée en volts.

Le lien entre le champ électrique  $E$ , exprimé en volts/mètre, et cette tension  $V_s$  est donné ci-dessous :

- Départ : champ  $E$
- Tension  $V_e = 0.0035 E$
- (pour information : Energie en mW =  $20 V_e^2$ )
- (pour information : Energie en dBm =  $13.01 + 20 \text{Log}(V_e)$ )
- $V_L$  (Tension log en sortie du circuit AD8313) :  $V_L = 0.36 \text{Log}(V_e) + 2.0342 = 0.36 \text{Log}(E) + 1.15$
- $V_s$  (Tension envoyée vers le contrôleur numérique) :  $V_s = 5.2112 V_L - 3.65 = 1.876 \text{Log}(E) + 2.343$

$$\text{On en déduit que : } E = 10^{\frac{V_s - 2.343}{1.876}}$$

Les logiciels développés pour les traitements sonores permettent de restituer ces informations de manière beaucoup plus suggestives, pour l'œil et pour l'oreille ! D'où l'intérêt d'échantillonner à 44 100 Hz

### **Conclusion.**

Le polluomètre est un appareil exceptionnel : très haute qualité, fidèle et bon marché.

Il donne une très bonne image de l'enveloppe des signaux transmis dans la gamme de fréquences utilisée dans entre quelques centaines de MHz et 2.5 GHz.

Son réglage est sommaire, mais ne semble pas dériver dans le temps (stabilité vérifiée sur deux années)

Il a été fabriqué pour mesurer des ondes stables, mais peut être détourné pour mesurer des signaux par rafale.

Pour avoir mieux, il faut des dispositifs excessivement coûteux, et les spécialistes s'accordent pour dire que les mesures fournies par ces appareils haut de gamme peuvent avoir des tolérances jusqu'au volt/mètre.

Le polluomètre permet à un amateur averti d'avoir des informations très précises sur les champs émis par les pylônes d'antennes téléphoniques, les téléphones portables (DECT ou cellulaires), la Wifi, les fours à micro-onde), toutes ces petites choses modernes dont on se tue à nous répéter qu'ils ne présentent aucun danger.