

L'expérience de Heinrich HERTZ revisitée par Oscar Kilo
rev16/9/21

Rappel historique

- **1864 Maxwell** (1831-1879) publie un article(On a dynamical theory of the electromagnetic field) synthetisant sous la forme d'une série d'équations les découvertes de ses prédecesseurs :**Ampère**(1775-1836) **Oersted**(1777-1851) **Gauss**(1777-1836) **Faraday**(1791-1867) .Il entrevoit la possibilité d'existence d'ondes electomagnétiques (champ électrique et magnétique croisés) pouvant se propager à la vitesse de la lumière dans la matière ou dans le vide
- **1886 H.Hertz** (1857-1894) met en évidence expérimentalement l'existence de ces ondes en utilisant un émetteur et un récepteur de sa conception
- **1895** Première liaison radio par Marconi sur 1.5 mile
- **1901** Première liaison radio transatlantique
- **1919** Première station radio diffusion
-

Le montage d'émission de H. HERTZ

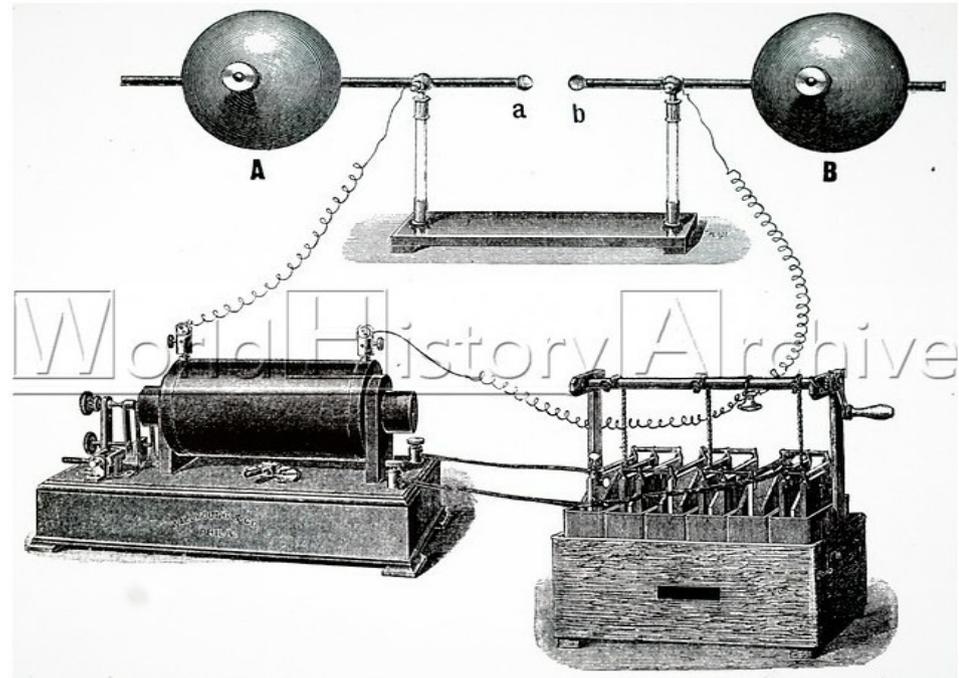


Illustration depicting Heinrich Hertz's experiment on electromagnetic waves: Hertz's oscillator. Terminals of an induction coil (bottom left) were connected to condenser A, B. Initial spark passing between metal balls at centre, A,B, formed a path for subsequent oscillations which were measured. Heinrich Hertz (1857-1894) a German physicist who conclusively proved the existence of the electromagnetic waves theorised by James Clerk Maxwell's electromagnetic theory of light Dated 20th century

- Un dipole longueur maxi env 1 metre , 2 boules aux extrémités , 1 eclateur au centre
- Alimenté en haute tension alternative par une bobine de Ruhmkorff elle meme alimenté pa une batterie

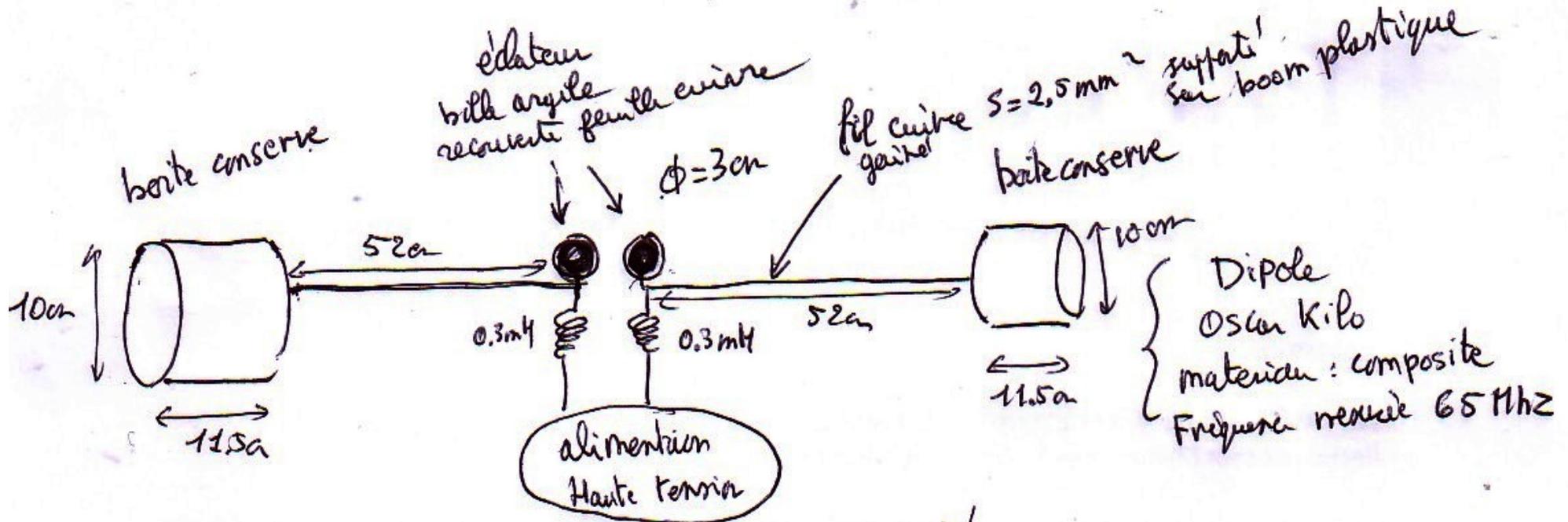
Antenne d'émission

- Hertz a utilisé différents types d'antennes de type doublet avec capacité en bout .
- Elles ont toutes disparues
- Des répliques ont été faites comme celles représentées .
- A noter qu'elles étaient utilisées en position horizontale
-
- **Pour les essais on décide de faire une réplique de la version avec boules terminale avec les moyens du bord**

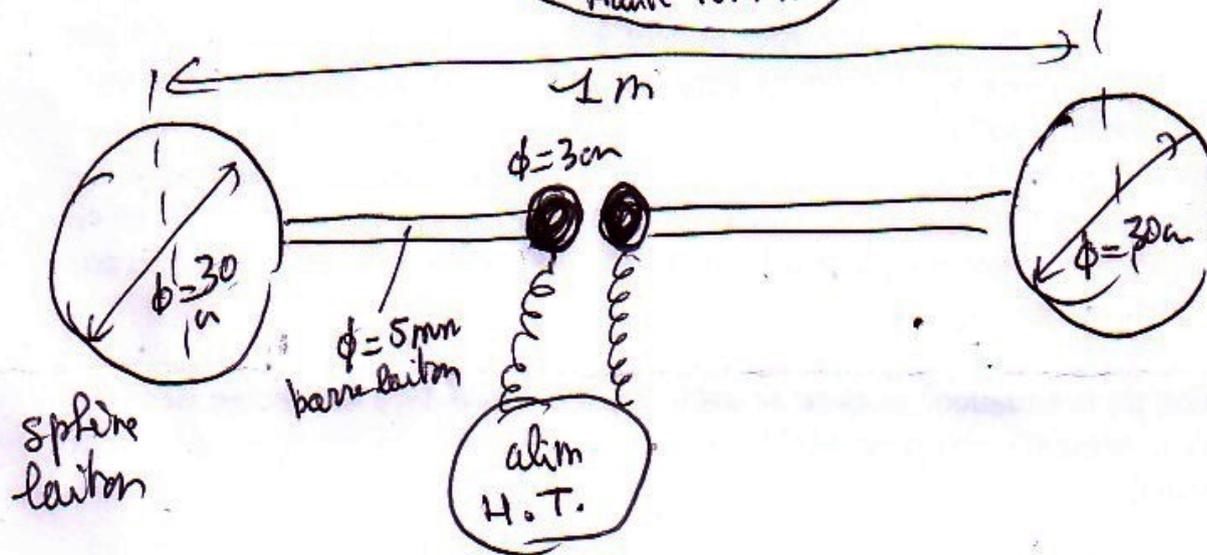


FIGURE 1. Two replicas of Hertz's antennas mounted on fiberglass carts: (a) an SLD-1 and (b) a PLD.

antenne Oscar Kilo vs H.Hertz



Dipole
Oscar Kilo
matériau : composite
Fréquence prévue 65 MHz



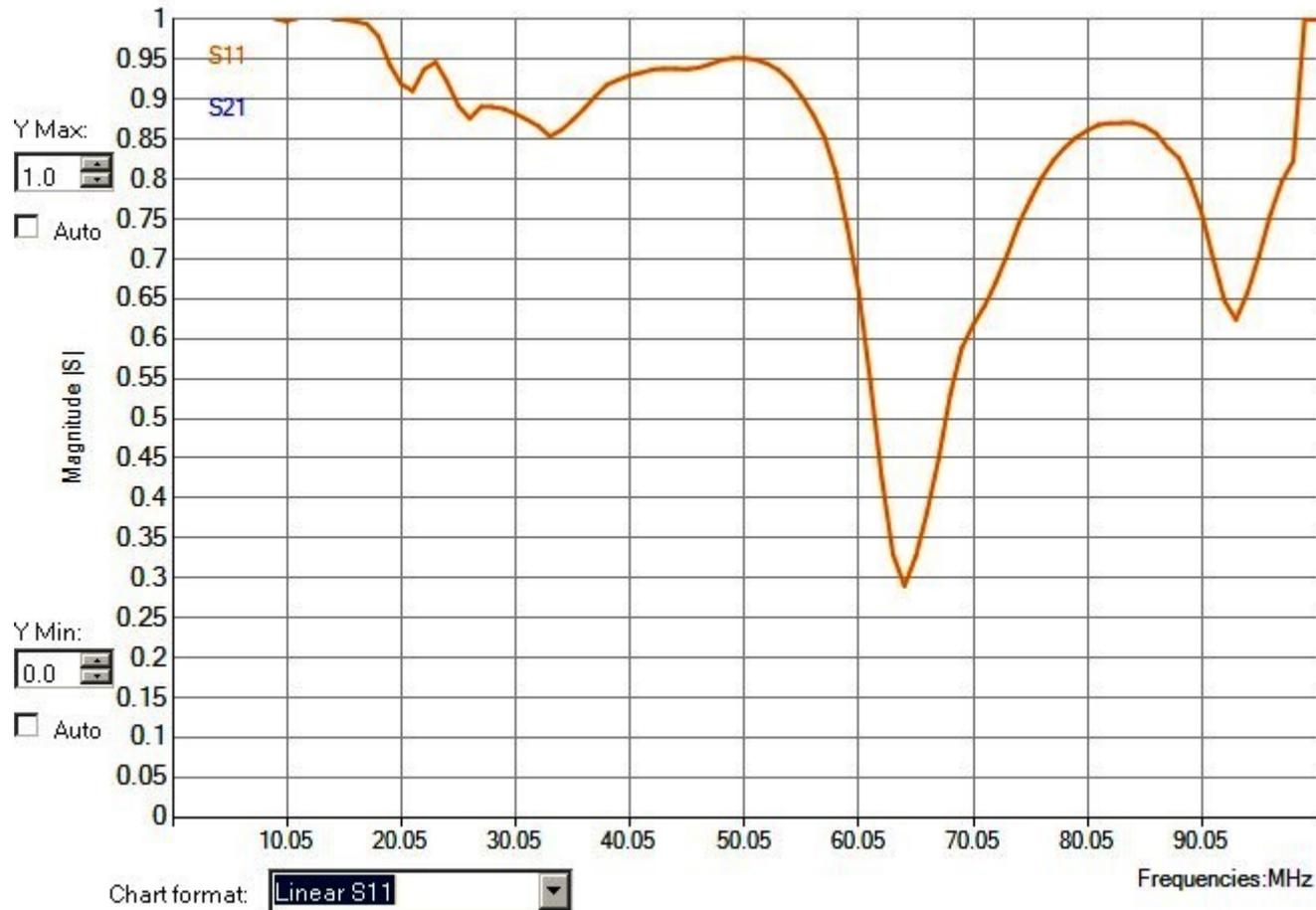
Dipole
H. Hertz
matériau = laiton
Fréq. calculée $\approx 58\text{MHz}$
(ref 1)

L'antenne d'émission réalisée



- 2 boites conserves soudées au bout de chaque brin.
- Fil cuivre gainé 2.5mm² supporté par boom plastique creux
- 2 eclateurs aux autres bouts : boules argile diam 3 cm recouvertes par feuille cuive autocollante .Ecartement 2 à 3 mm
- 2 selfs de choc au centre pour amener la haute tension .
- Longueur hors tout=1.28 m

Coube resonance antenne Oscar Kilo

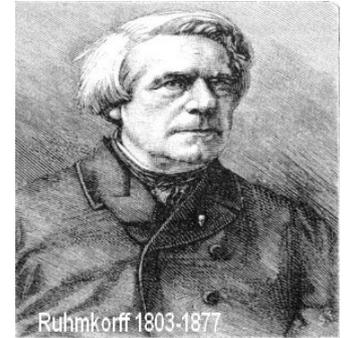


- Mesure avec nanoVna
- Résonance principale sur 65 mhz env (pour mémoire antenne Hertz résonnait sur 60 mhz)

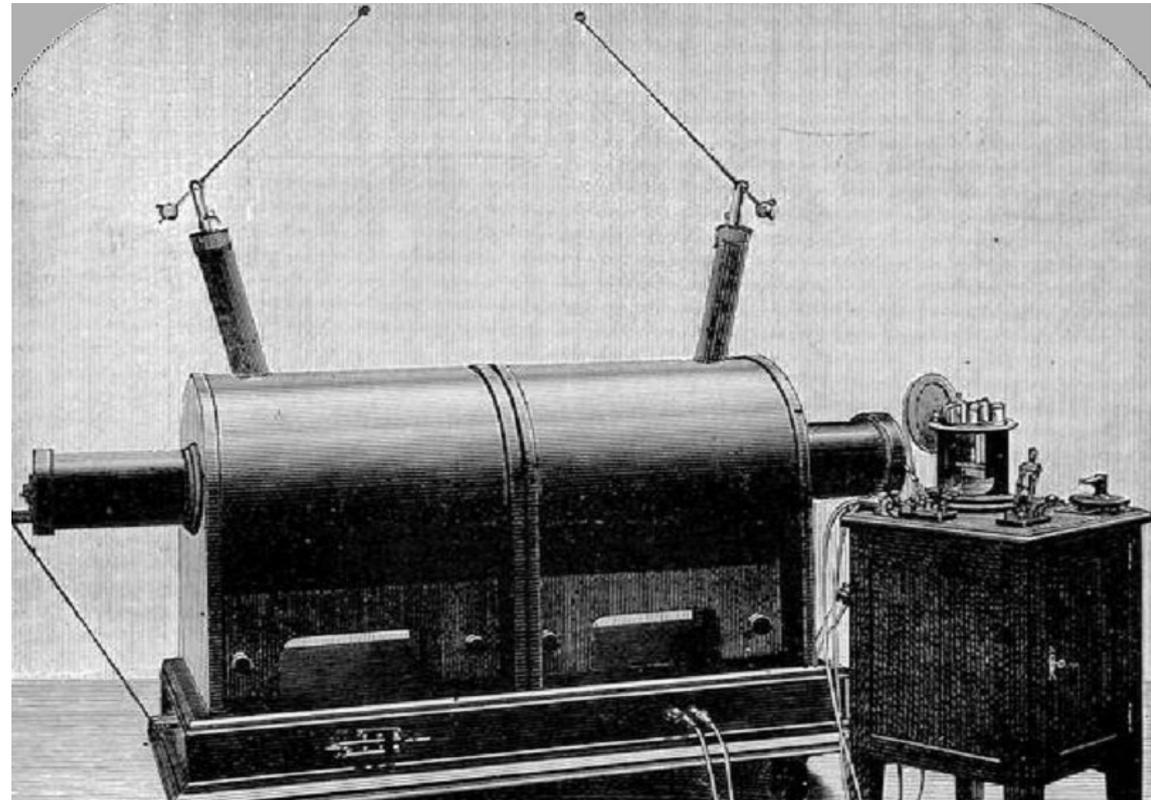
Alimentation de l'antenne



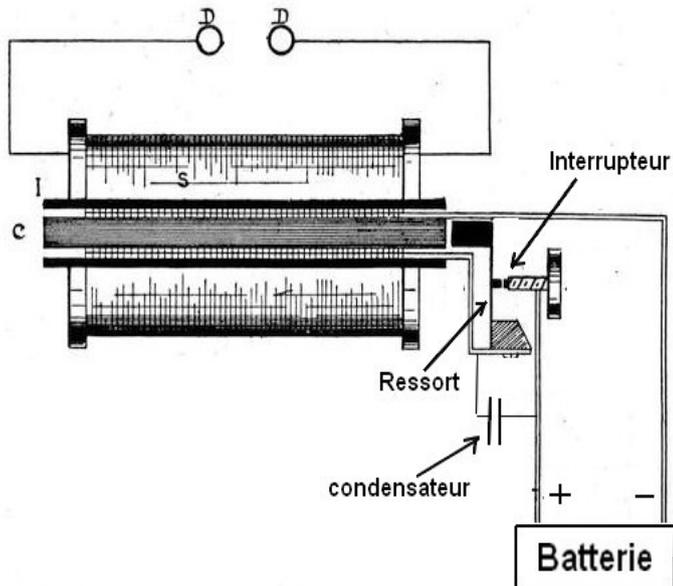
- Pour ses essais en 1886/1887 Hertz disposait d'une bobine Ruhmkorff gros modele capable de tirer des etincelles de 8 a 10 cm dans air.
- Pour ses essais il limitait la distance entre les 2 éclateurs à 8 mm .(soit env 24 000 volt)



- Largement utilisé de 1850 à 1910 comme source de très haute tension
- Commercialise par un franco allemand (Henrich Daniel Ruhmkorff 1803-1877)
- Alimenatation par batterie .Puissance alim jusque 700 watt
- Utilisé aussi pour alimenter les tubes de Crooks pour les premiers essais rayon X

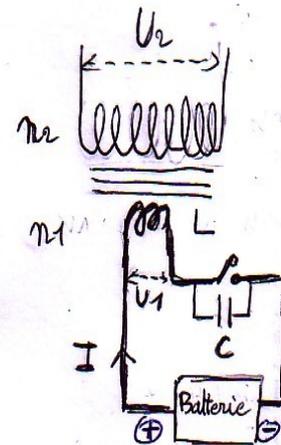


Bobine de Ruhmkorff : comment ça marche



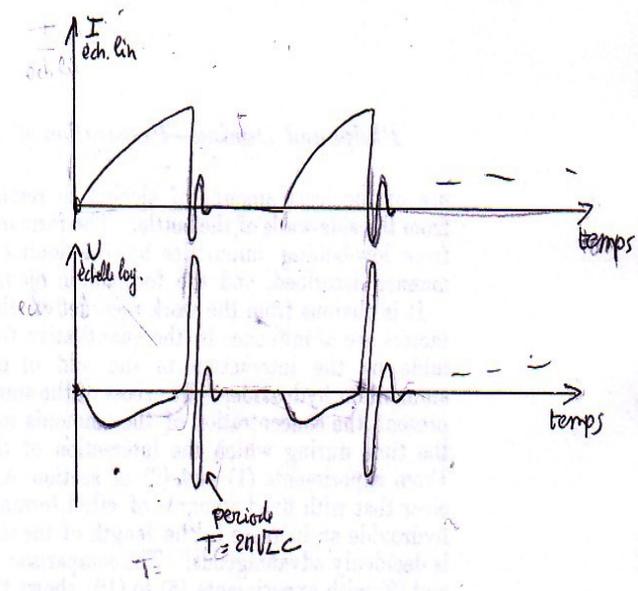
- Noyau magnetique non fermé pour demagnetisation rapide
- Primaire : gros fil peu de tours
- Secondaire : fil fin beaucoup de tours, cloisonnement pour eviter claquage
- Rupteur ajustable
- Condensateur fort isolement aux bornes du rupteur

- Tension max obtenu dépend vitesse de démagnétisation du noyau
- Oscillations amorties à la rupture
- Rupteur organe critique ,nombreuse techno possible pour couper gros courant sans trop usure
- Signal complexe



$$U_1 = L \frac{dI}{dt} \quad U_2 \approx U_1 \times \frac{n_2}{n_1}$$

$$E_{\text{spark}} = \frac{1}{2} L I^2$$



Alimentation de l'antenne



ruhmkorff coil

Toutes les caté

Catégorie

Tout

PME, artisans et agriculteurs

Bobines et filtres

Autres articles d'équipement électrique et d'essai

Plus ▾

Instruments de musique

Pièces et accessoires pour amplificateur

Matériel audio et vidéo

Toutes les annonces

Enchères

Achat immédiat

État ▾

584 résultats pour **ruhmkorff coil**

♥ Enregistrer cette recherche

Ruhmkorff c'est cher



Ruhmkorff Coil Max Kohl bobine de Ruhmkorff
D'occasion

4 500,00 EUR

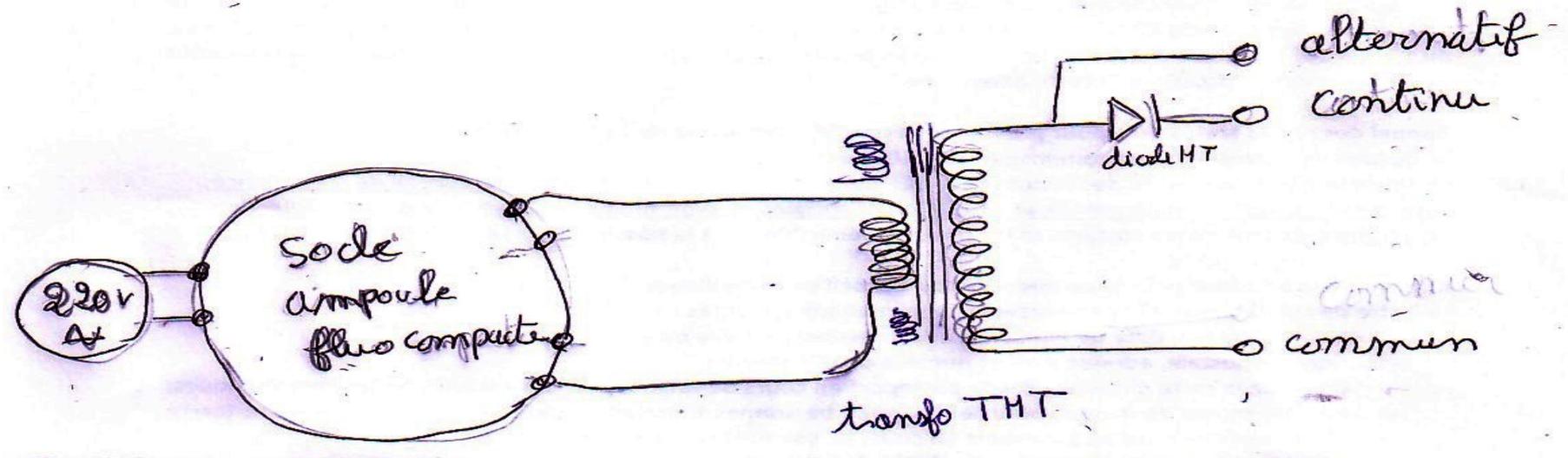
ou Faire une offre

Livraison gratuite

Suivi par 10 personnes

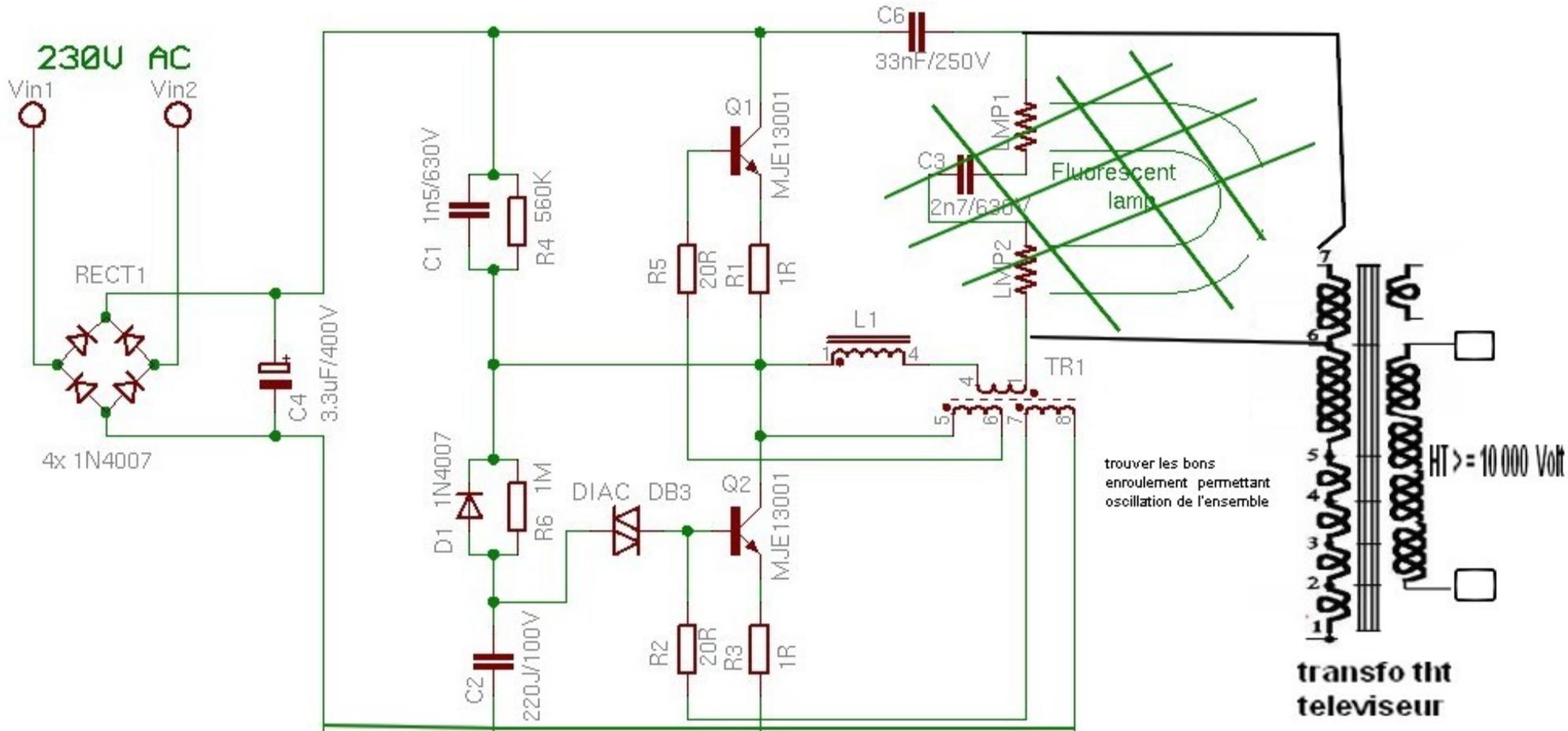
-
- Une bobine Ruhmkorff c'est pas donné !
- Il faut trouver une alternative TOP BUDGET

Alimentation Low Cost Oscar Kilo



- Il faut fournir au moins 10 000 volt sous quelques mA
- On opte pour un socle de lampe fluocompacte qui alimente un transfo ligne canibalisé sur un téléviseur à lampe. On a ainsi la possibilité de disposer d'une tension alternative (freq env 20 khz) ou continue (montage déjà utilisé pour un générateur d'ozone).

ALIM THT 10 Kvolts : Le schéma



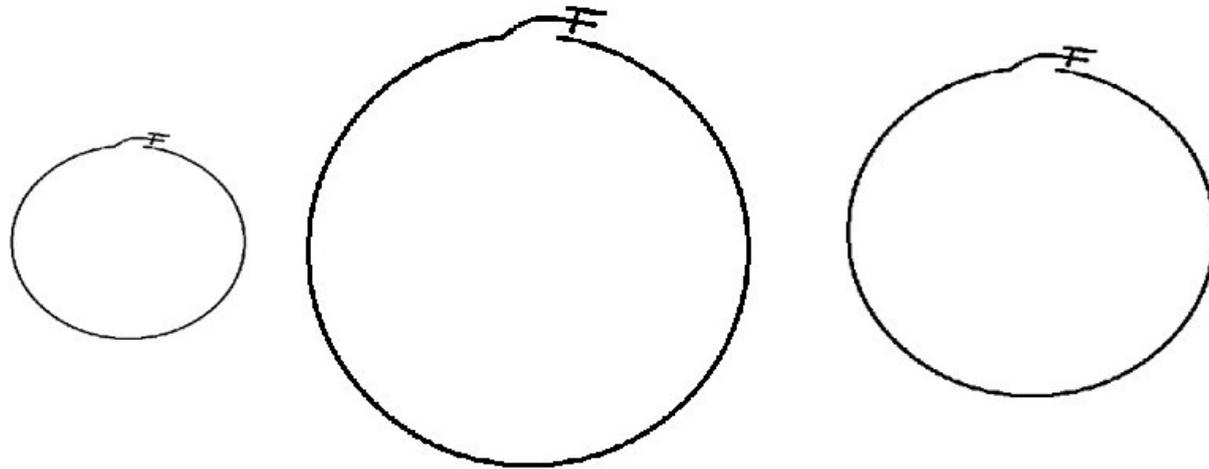
- On recupere l'electronique d'une lampe fluocompacte , on enleve le tube fluorescent et on branche au primaire d'un transfo tht ex televiseur
- Il faut trouver l'enroulement permettant à l'ensemble d'osciller convenablement .(Frequence oscillation env 20 kHz)

L'alimentation réelle version continue



- Consommation au secteur 220 env 10 watt en alimentant l'antenne , env 2 watt à vide
- Tension env 10 000 volt (mesurée base longueur étincelle et breakdown voltage de 3KiloVolt/mm pour l'air)
- Pour la version alternative idem mais pas de diode THT

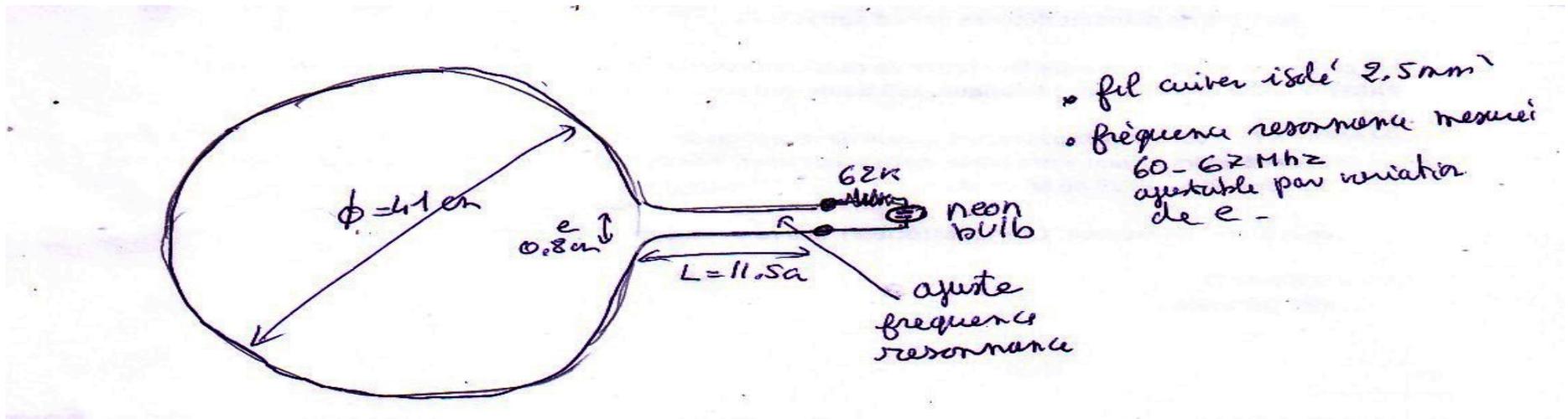
La RECEPTION: resonateur Hertz



- Cercles métalliques de différents diamètres ouverts avec vis micrométrique
- Présence d'une onde matérialisée par étincelle apparaissant sur le micromètre
- Hertz en avait toute une gamme suivant la configuration de son antenne



LA RECEPTION : Resonateur Oscar Kilo



- Boucle en fil cuivre isole , frequence de resonance ajustee avec nanovna pour 65 mhz env en jouant sur ecartement ligne .
- visualisation de la tension par mini neon en serie avec resistance de 62 k
- La sensibilite s'est averee faible

Un recepteur plus sensible



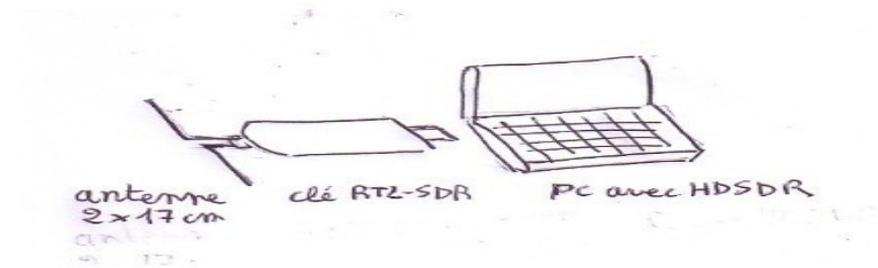
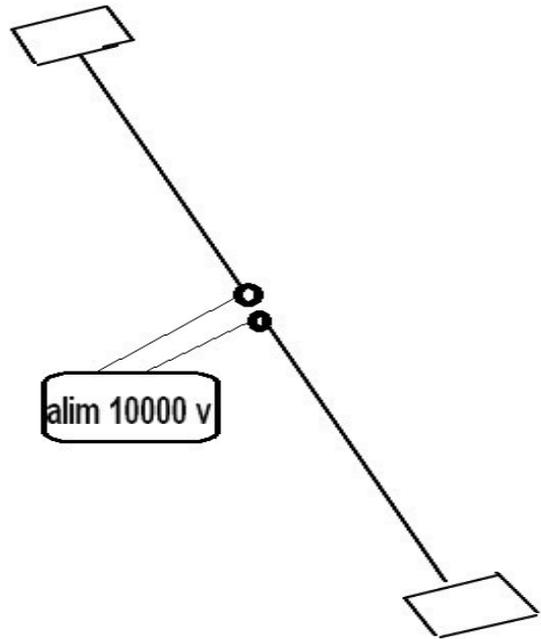
- Utilise un dongle SDR de base (20 euros) branche sur un PC portable .
- Antenne reception courte (dipole 2* 17 cm) directement sur le dongle SDR
- Réception avec le logiciel HDSDR (disponible sur www.hdsdr.de)

La reception: dongle SDR+PC+HDSDR



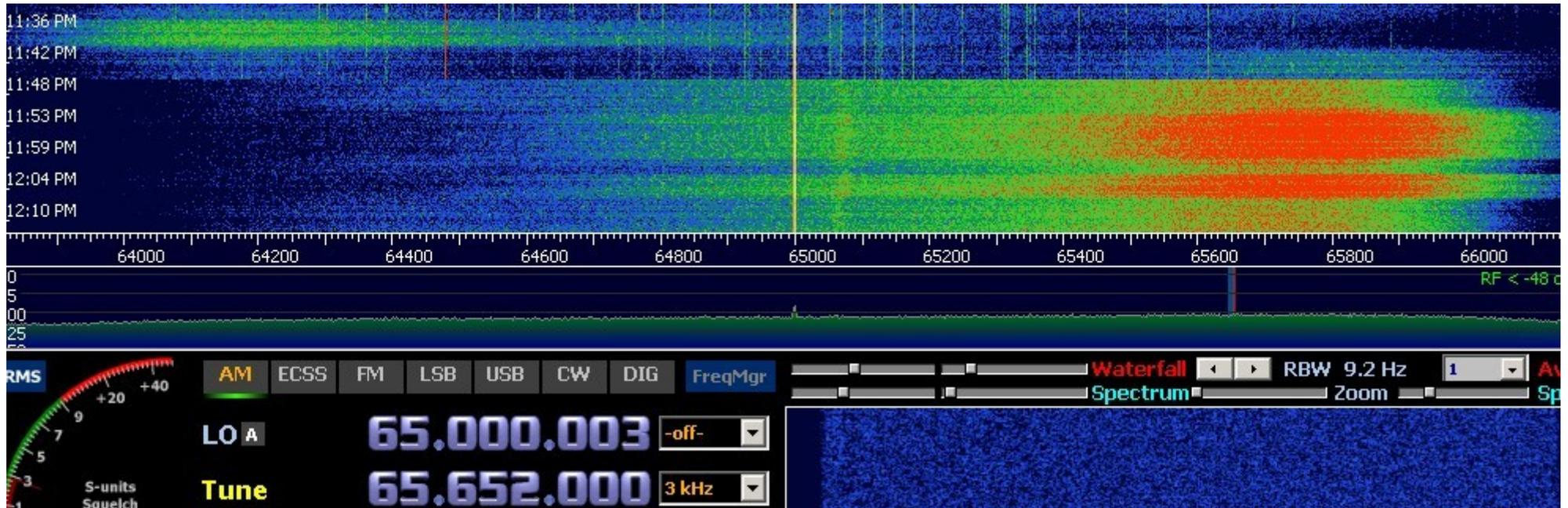
- La station de réception en action avec visu de HDSDR
-

SCHEMA GENERAL



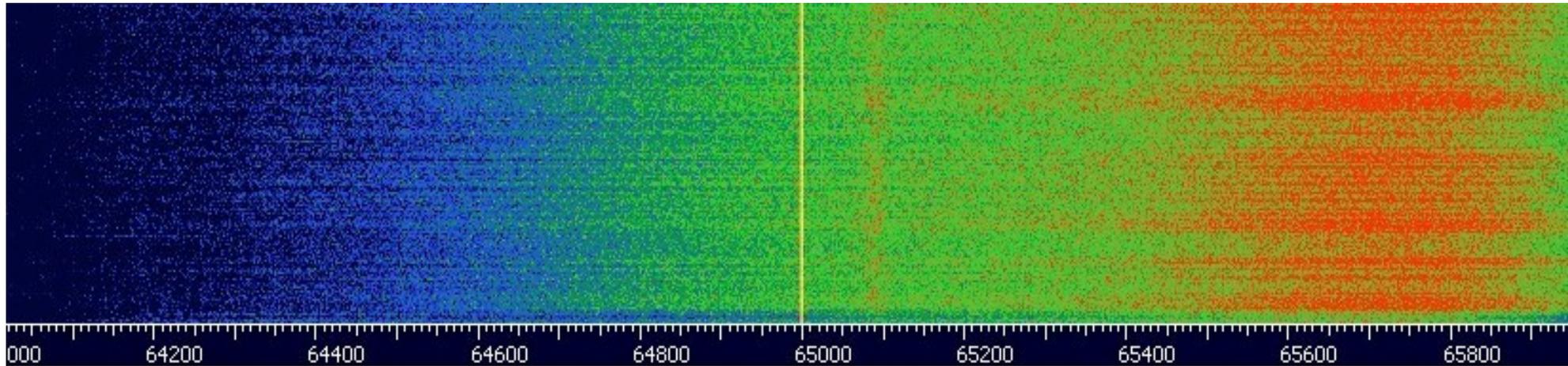
- Antenne alimentée sous 10000 v env dans local env 12 m²
- Récepteur SDR a 3 mètres

Premiere analyse du signal recu



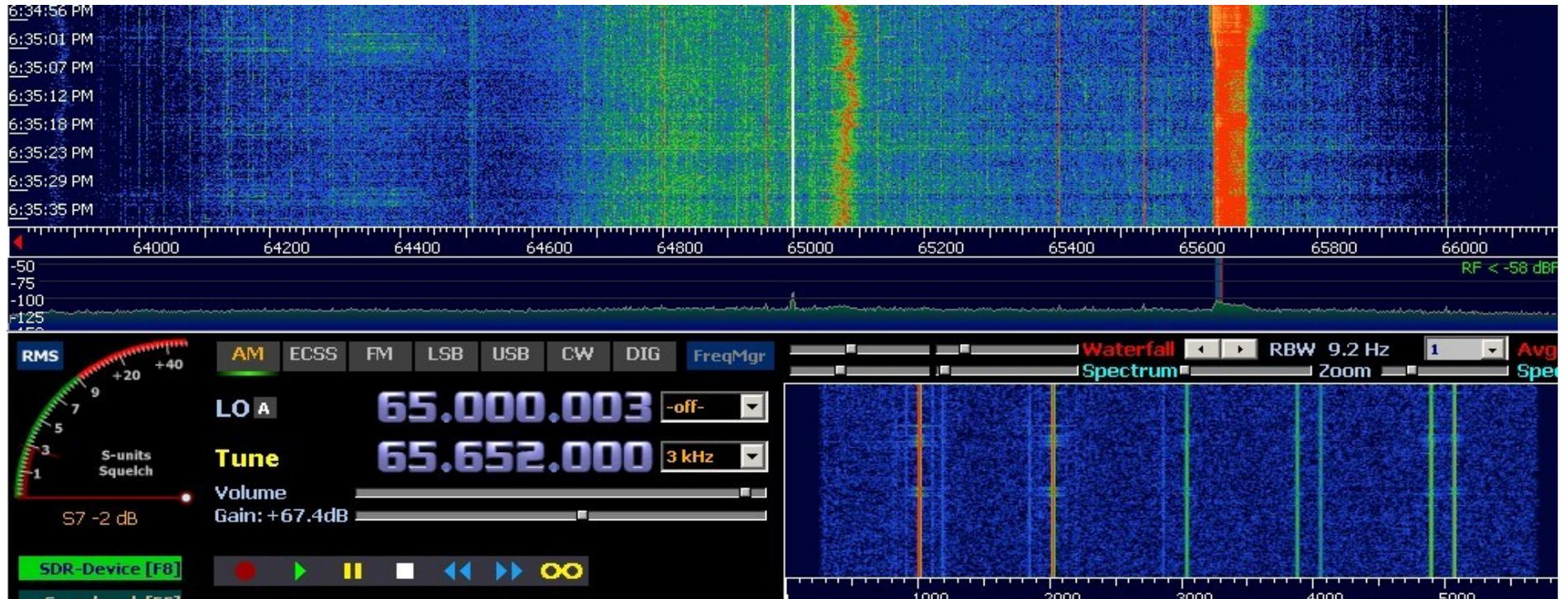
- Balayage manuel entre 60 et 80 mhz avec HDSDR
- On trouve un Signal centré sur 65.700 Mhz
- Bande passante très large (env 400 Khz)
- Variation amplitude du signal moyen en fonction du temps lié au déplacement de l'operateur (ondes stationnaires dans le local chambre 12 m2)
-

Reception sans aucun mouvement dans la pièce



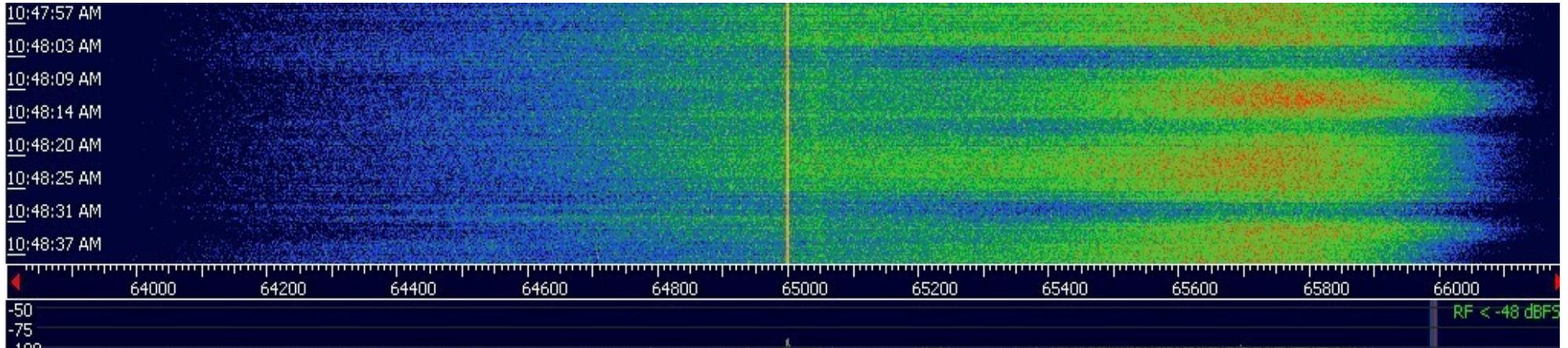
- Réception signal sans bouger : on note une variation amplitude aléatoire liée à l'instabilité de l'étincelle dans l'éclateur (signalé par Hertz qui devait nettoyer périodique les boules de son éclateur)

Essai témoin émetteur onde entretenue

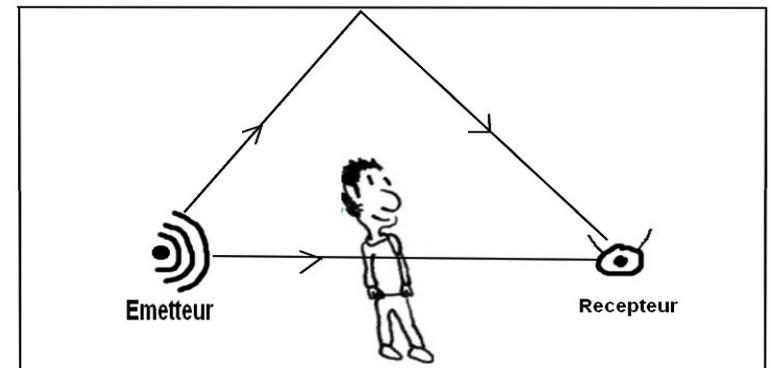


- Réception d'un grid dip operant sur fréquence proche modulé en amplitude par signal carré env 900 hz
- Bande passant beaucoup plus faible malgré les harmoniques

Essai d'interférence dans un local fermé de 12m²

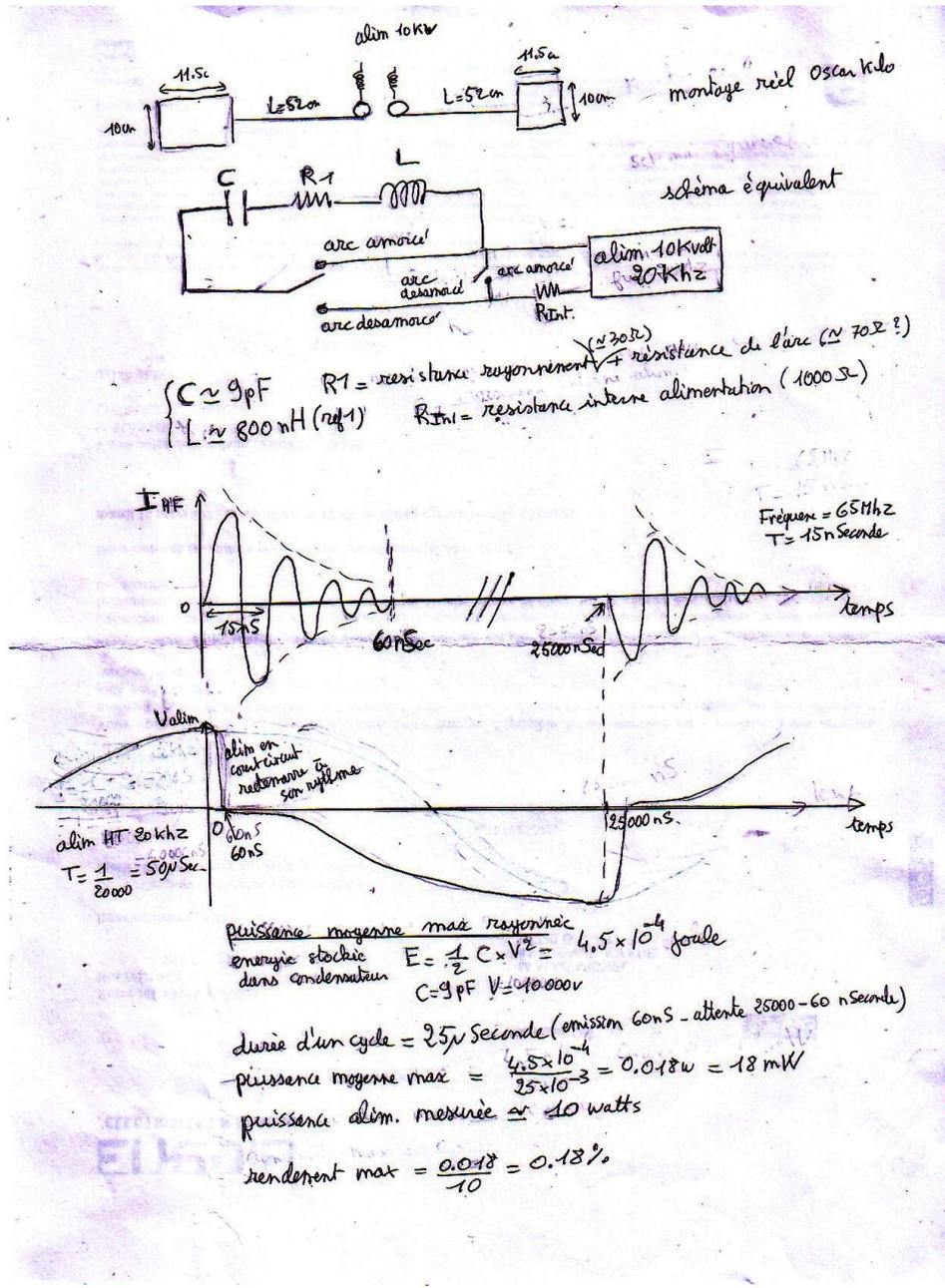


- Le récepteur et l'émetteur sont fixes
- L'opérateur se déplace à différents endroits préfixés et y reste quelques secondes avant de gagner les suivants
- Le signal reçu est fortement modulé en amplitude par interférence entre les signaux directs et réfléchis
- Dans un espace non clos et plus simple (e.g. Emetteur devant un mur), en notant position géométrique de chaque point fixe on peut mesurer la longueur d'onde moyenne du signal. Connaissant la fréquence on peut mesurer la vitesse de l'onde comme le fit Hertz



Gros plan sur le mode de fonctionnement de l'émetteur à étincelle Oscar Kilo

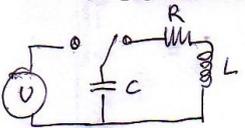
- Constatation: emetteur Oscar Kilo a une puissance faible vs emetteur Hertz : Impossible de détecter champ RF avec résonateur boucle pas assez sensible
- Principale raison :Hertz alimentait avec grosse bobine Rhumkorff capable de generer tension beaucoup plus importante et aussi Capacité + grande pour l'antenne Hertz (diam 30cm vs 10 cm pour Oscar Kilo).
- Emetteur Oscar Kilo :étincelle 3 mm =>env 9000 v ,emetteur Hertz étincelle de env 8 mm soit 24 000 V (a noter que sa bobine de Rumkorff pouvait tirer des étincelles de 8 a 10 cm soit 240 000 v (base 3 kV/mm dans air)
- Dans les 2 cas il y a envoi d'une onde amortie durant au maximum 4 périodes (ref 1)(soit 60 nano seconde) suivie d'une attente pendant 25 microseconde dans le cas Oscar Kilo un peu plus dans le cas Hertz
- Le rendement d'émission est catastrophique , voir cicontre :en négligeant , faute de donnée la puissance perdue par effet joule dans l'arc la puissance HF maxi est de 18 mW pour une puissance alimentation mesurée de 10 watt
- Pas etonnant que le resonateur Oscar Kilo Ne détecte rien



Simulation émetteur Oscar Kilo

- La décharge d'un condensateur au travers d'une inductance et d'une résistance en série est un grand classique .
- La principale inconnue dans les cas Hertz ou Oscar Kilo est la résistance de l'arc
- L'intérêt de la simulation est de balayer une zone plausible de résistance et de voir l'incidence sur l'amortissement du signal
- Grâce au langage Python et ses bibliothèques c'est du gâteau

Simulation oscillateur Hertz en mode décharge



loi des nœuds : $L \frac{di}{dt} + R \cdot i + U_c = 0$
 $i = C \times \frac{dU_c}{dt}$

$$\begin{cases} Q = CV \\ \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt} \\ i = C \frac{dV}{dt} \end{cases}$$

$L C \frac{d^2 U_c}{dt^2} + R C \frac{dU_c}{dt} + U_c = 0$

$x = U_c \quad L C \frac{d^2 x}{dt^2} + R C \frac{dx}{dt} + x = 0$

pour intégrer via scipy on nomme de 2 équos. diff. 1^{er} ordre (il ne faut pas oublier que ce type d'équ. diff.)

$$\begin{cases} p = \frac{dx}{dt} \\ L C \frac{dp}{dt} + R C p + x = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} p = \frac{dx}{dt} \\ \frac{dp}{dt} = -\frac{x}{LC} - \frac{R}{L} p \end{cases} \Rightarrow \frac{dp}{dt} = -x \omega^2 - p \times \frac{R}{L}$$

on a - Atténuation = $At = \frac{R}{L \omega}$ $\Rightarrow \frac{R}{L} = At \times \omega$
 (vitesse de $Q = \frac{L \omega}{R}$) $= \frac{1}{R \omega}$

$$\begin{cases} T = 2\pi \sqrt{LC} \\ T = \frac{2\pi}{\omega} \end{cases} \Rightarrow \frac{2\pi}{\omega} = \sqrt{LC} \times 2\pi$$

$$\frac{1}{\omega^2} = LC$$

à entrer dans ODEint :

calcul atténuation $At = \frac{R}{L \omega}$ pour différentes valeurs de R

avec $f = 60 \text{ kHz} \Rightarrow \omega = 2\pi \times f = 3.77 \times 10^5 \text{ Hz} \Rightarrow L \omega = 746 \times 10^{-9} > 3.77 \times 10^5 = 2760 \Omega$
 $L = 746 \times 10^{-9} \text{ H (nat 1)}$
 (746 nH)

Résistance : $30 \Omega + \epsilon + x$
 (résistance des fils + résistance de l'arc)

At	0,03	0,18	0,36	0,72	1,4
R	100 Ω	500	1000	2000	4000
L ω	2760 Ω	2760	2760	2760	2760

on simule avec Hertz 1.py en utilisant le schéma équation différentiel et bibliothèque affichage

Le script Python de simulation

```
from scipy . integrate import odeint
import numpy as N
from matplotlib import pyplot as plt

# p=dx/dt  dp/dt=-x*w*w -at*w*p
# systeme dierentiel a integrer
def dy(y, t, at, w0):
    """
    The right-hand side of the damped oscillator ODE
    """
    x, p = y[0], y[1]
    dx = p
    dp = - at * p - w0**2 * x
    return [dx, dp]

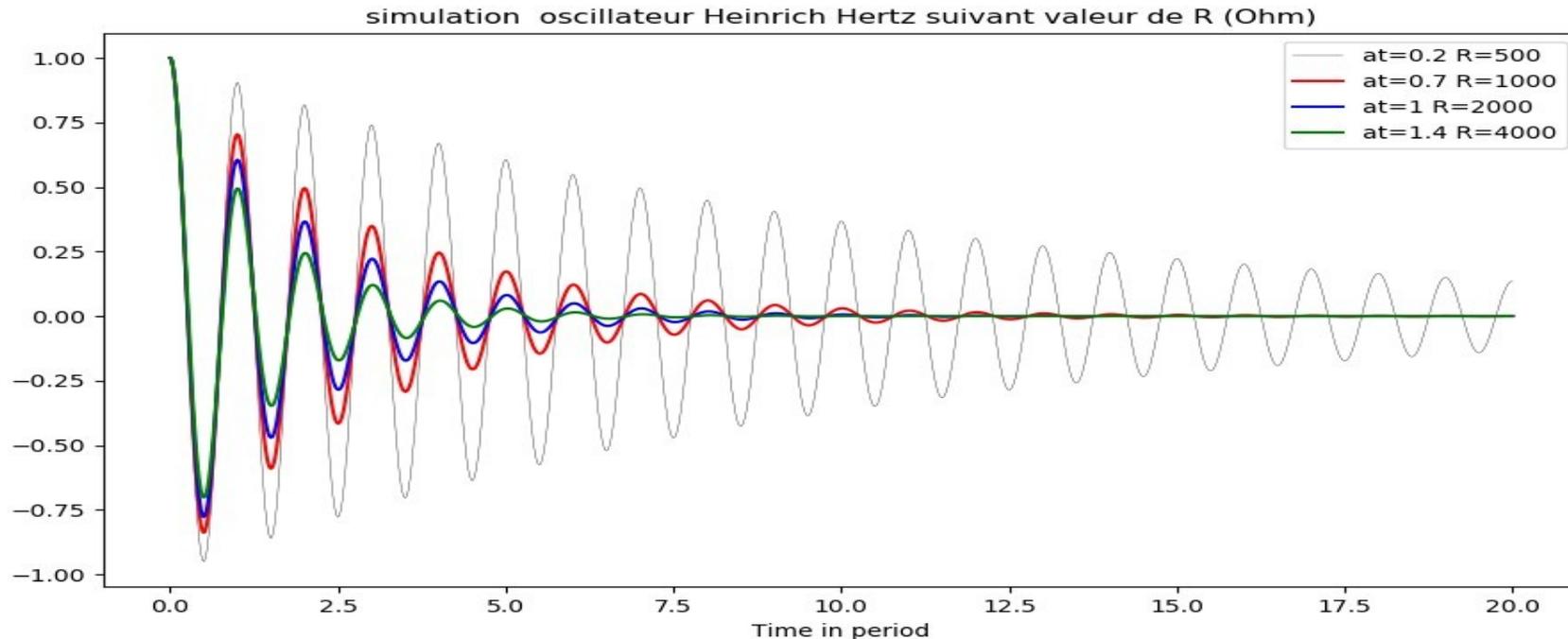
# initial state:
y0 = [1.0, 0.0]

# time coodinate to solve the ODE for
t = N.linspace(0, 20, 1000)
w0 = 2*N.pi*1.0

#solve the ODE problem for three different values of the damping ratio
y1 = odeint(dy, y0, t, args=(0.2, w0)) #
y2 = odeint(dy, y0, t, args=(0.7, w0)) #
y3 = odeint(dy, y0, t, args=(1, w0)) #
y4 = odeint(dy, y0, t, args=(1.4, w0)) #

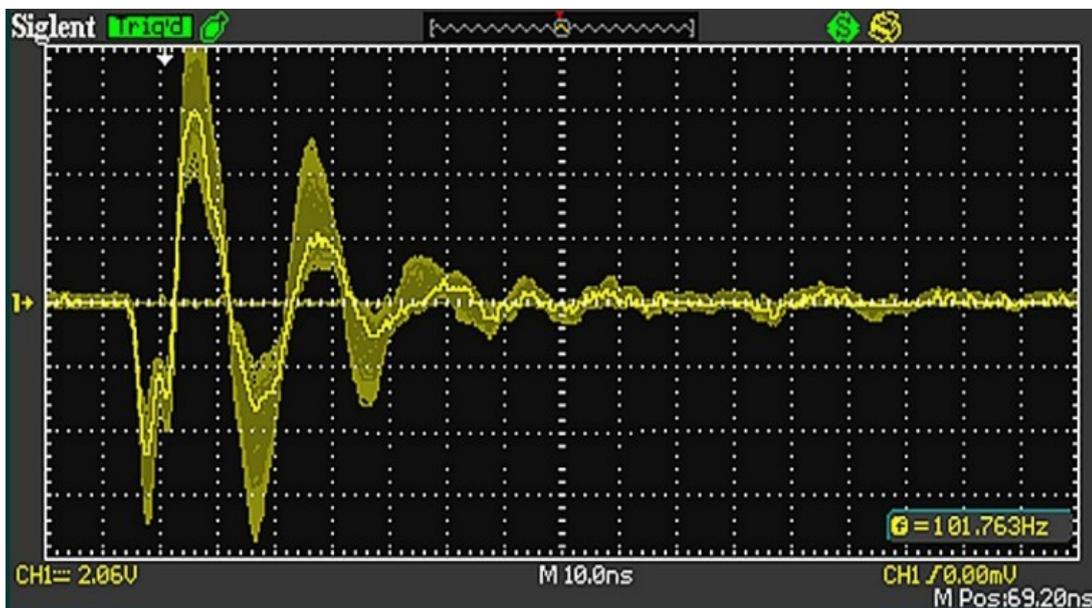
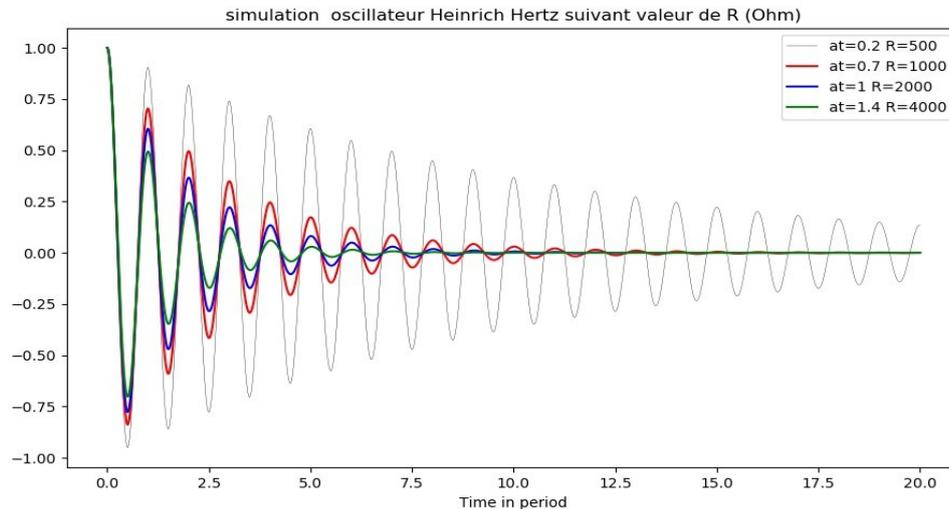
fig, ax = plt.subplots()
ax.plot(t, y1[:,0], 'k', label="at=0.2 R=500 ", linewidth=0.25)
ax.plot(t, y2[:,0], 'r', label="at=0.7 R=1000" )
ax.plot(t, y3[:,0], 'b', label="at=1 R=2000")
ax.plot(t, y4[:,0], 'g', label="at=1.4 R=4000")
plt.xlabel("Time in period")
plt.title("simulation  oscillateur Heinrich Hertz suivant valeur de R (Ohm)")
ax.legend()
plt.show()
```

Resultat simulation



- On sort tension aux bornes du condensateur (en valeur normalisée à $t=0$ $U=10000v$)
- Les principales inconnues : la resistance de l'arc , a partir de quel tension l'arc s'éteint
- On balaie la zone de resistance R entre 500 et 4000 ohm
- Le signal utile ne dure que pendant 4 a 10 periodes au max (1 periode à 65 mhz= 15 nano secondes)

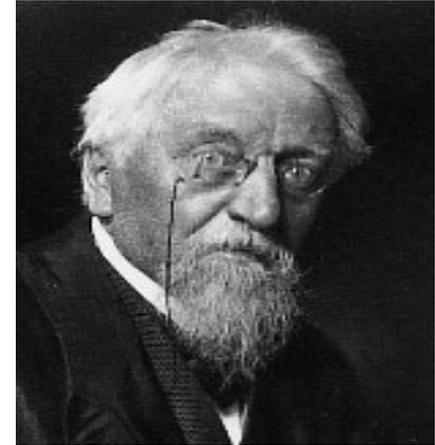
Comparaison simulation/mesure réelle



- Un Om bien équipé a pu mesurer avec un oscillo rapide le signal généré par une réplique de l'antenne Hertz .(ref 1)
- Mesure pas facile a faire chaque train onde étant différent des autres
-
-
- On ne voit au max que 4 à 5 periodes completes
- Sur ces bases resistance arc + resistances annexes estimées à 4000 ohms

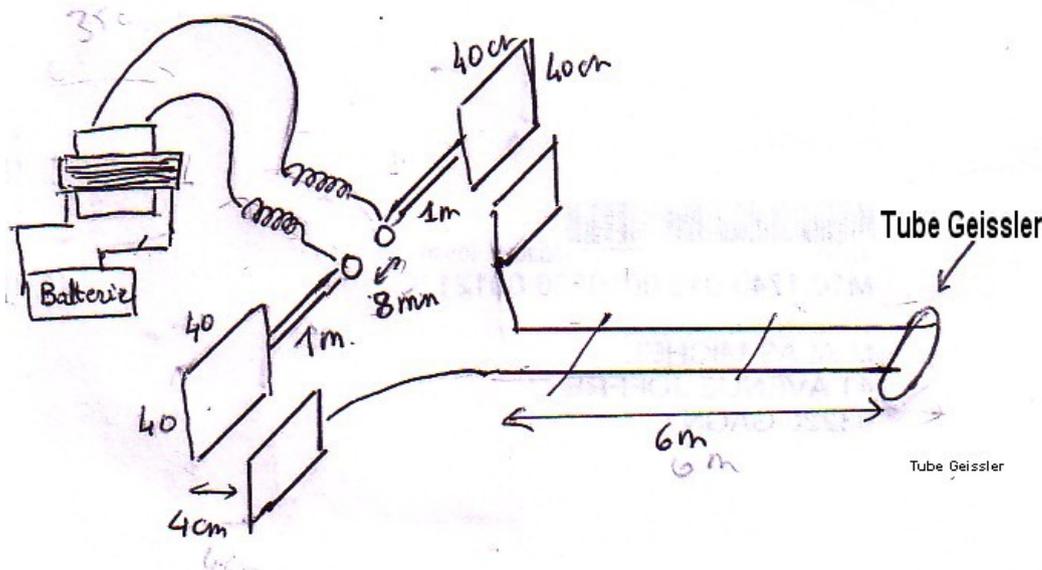
Les essais de H.Hertz et des autres

- Hertz avait établi l'existence d'onde radio électrique se propageant dans l'espace a une tres grande vitesse qui aurait du etre selon Maxwell egale a la vitesse de la lumière déjà connu à l'époque .
- Hertz durant ses essais avait mesuré assez précisément la longueur d'onde de l'onde emise par son dipole mais s'était trompé dans le calcul de la fréquence .A son époque pas de compteurIl ne pouvait se baser que sur la frequence du systeme condensateur/inductance de son dipole ($T=2\pi\sqrt{LC}$) .En plus il fit une erreur sur le calcul de la capacite de son dipole . De sorte qu'il trouva une vitesse d'enviiron 200 000 km/sec
- Suite a sa publicatin en 1888 nombreux experimentaeur se sont lancés : Edouard Sarasin ,Oliver Lodge
- Un est encore bien connu des radio amateurs : Ernst Lecher qui etudiat la propagation des ondess sur des conducteurs et trouva sa vitesse sensiblement egale à la vitesse de la luière
- Sa methode de mesure est toujours utilise dans le monde radio amateur pour déterminer sans appareil de mesure la fréquence d'un émetteur radio
- Les radiesthesistes utilisent aussi une antenne Lecher ,version moderne plus sélective de la baguette de coudrier



- **Ernst LECHER (1856-1926)**

Les essais de Ernst LECHER(1890)



Bobine Rumkorff alimentée par batterie alimente un dipole de Hertz

Alimentation 25 000 volt (eclateur 8 mm distance)

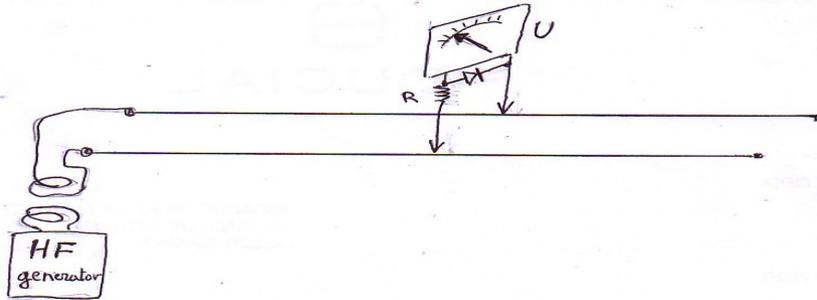
2 plaques placées a 4 cm capte l'onde générée et l'envoi sur ligne bifilaire

Court circuit en position variable

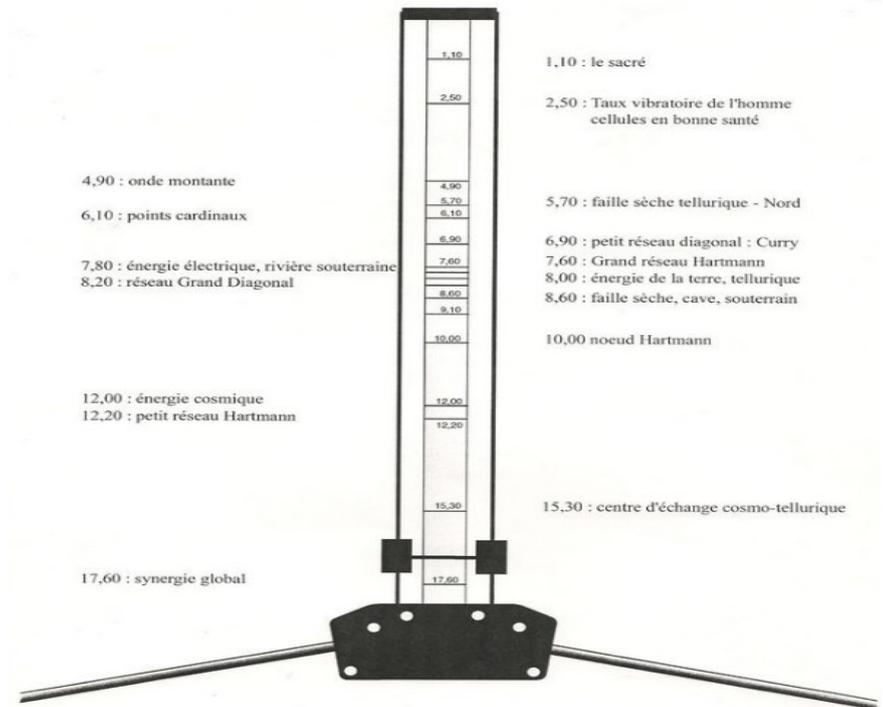
- Reprend dispositif de Hertz modifié par Sarasin
- Ligne a 2 fils paralleles avec court circuit variable en position
- Tube geissler terminal .Luminosite depend position court circuit (tube rempli par melange azote+vapeur therebentine le tout sous basse pression)
- En mesurant distance entre 2 positions max (ou min) => mesure la demi longueur d'onde.
- Calcul de la fréquence base par Lecher en appliquant $T=2\pi\sqrt{LC}$ pour dipole Hertz
- Trouve la valeur vitesse propag. le long fils (quasi egale à vitesse lumière)
- Principal pb : interaction entre dipole d'emission et ligne mesure ==> variation fréquence suivant position c.c.

Quelques retombées actuelles des expériences de Lecher

- L'outil du radio amateur fauché
- Mesure de la fréquence d'un émetteur radio (ou si l'on connaît la fréquence mesure de la vitesse de la lumière)



- **Antenne Lecher pour radiesthésiste averti .**
- En ajustant position du court circuit, l'antenne tenue comme un baguette de coudrier permet de détecter différents événements (modèle à 185 euros port compris formation possible par vidéo payante sur le web)



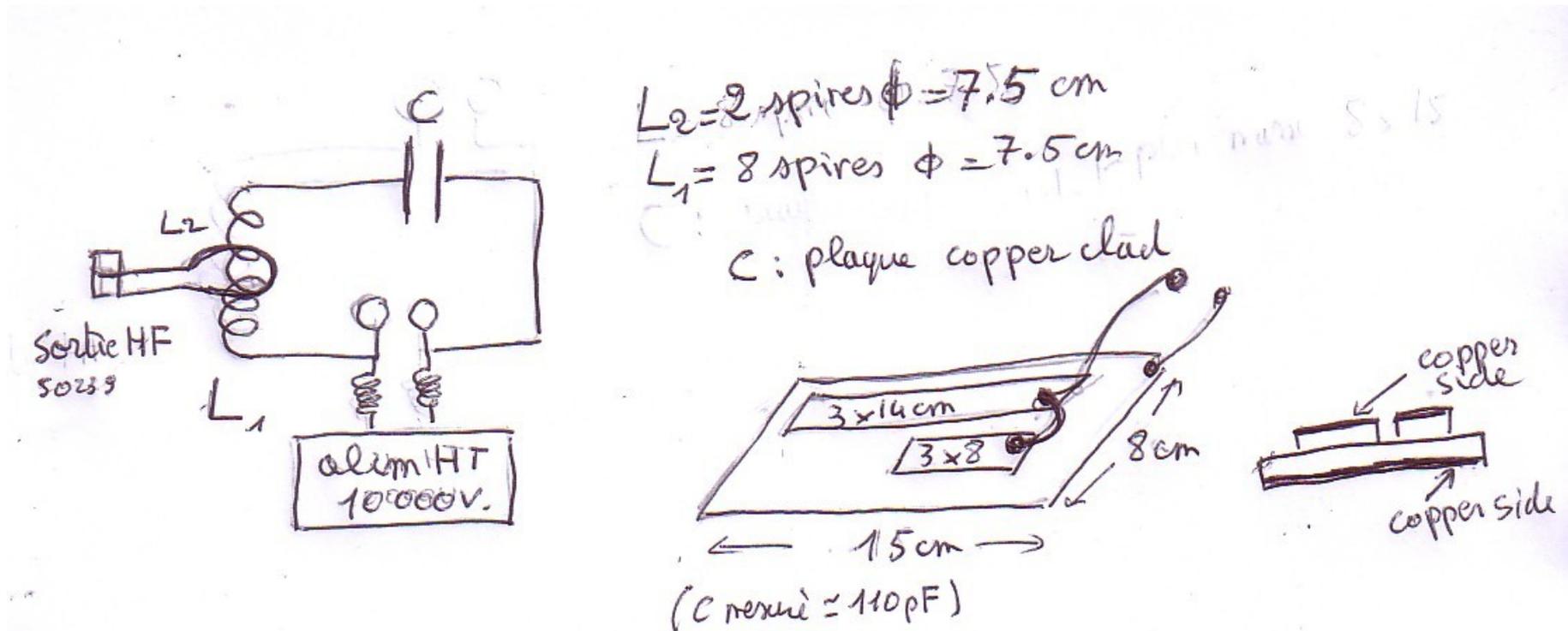
Antenne de Lecher

Les retombées de l'expérience de Hertz

Emetteur decamétrique licence H.Hertz

- Le principe d'émission utilisé par Hertz (émission d'un train d'ondes amorties) permet de couvrir un large intervalle de fréquences . Hertz en réduisant les dimensions du dipole put experimenter sur la bande 400 mhz , d'autres experimantateurs purent meme generer du 2. GHZ .
- Le principe fut repris pour les premières utilisations commerciales des ondes radio électriques (Marconi et les autres) en opérant sur des fréquences basses .Ce principe fut totalement abandonné dès que l'on sut generer des ondes radio- fréquences entretenues qui presentaient beaucoup d'avantages et moins d'inconvénients
-
- On peut l'utiliser pour réaliser un émetteur opérant sur les bandes décamétriques avec un nombre ridiculement réduit de composants comme nous allons le voir :

Schéma émetteur 7 Mhz Oscar Kilo



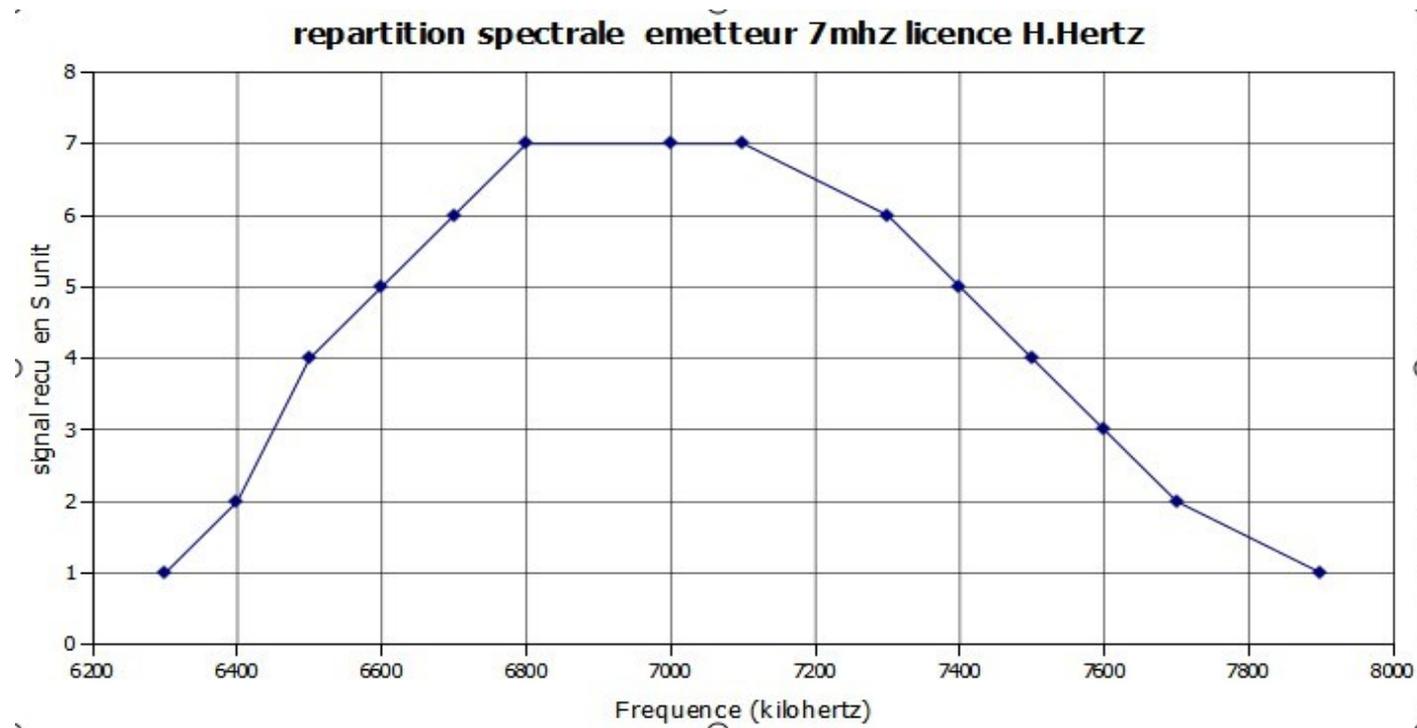
- Condensateur a base de copper clad (voir figure) Capacite mesurée env 100 pf
- Bobine fil cuivre gaine 1.5mm² diamètre 7.5 cm spires jointives
- Éclateur 2 boules recouvertes feuille cuivre diamètre 3 cm , ecartement 1.5 mm
- Alimentation par l'alimentation précédente pouvant donner 10 000 v courant continu
- Mesure puissance HF sur boucle 2 spires avec résistance de charge 50 ohm
- Mesure fréquence répétition de l' arc par sonomètre avec FFT (frequence mesurée 9 khz)

L'emetteur 7 mhz réalisé



- **Émetteur 100% récup**

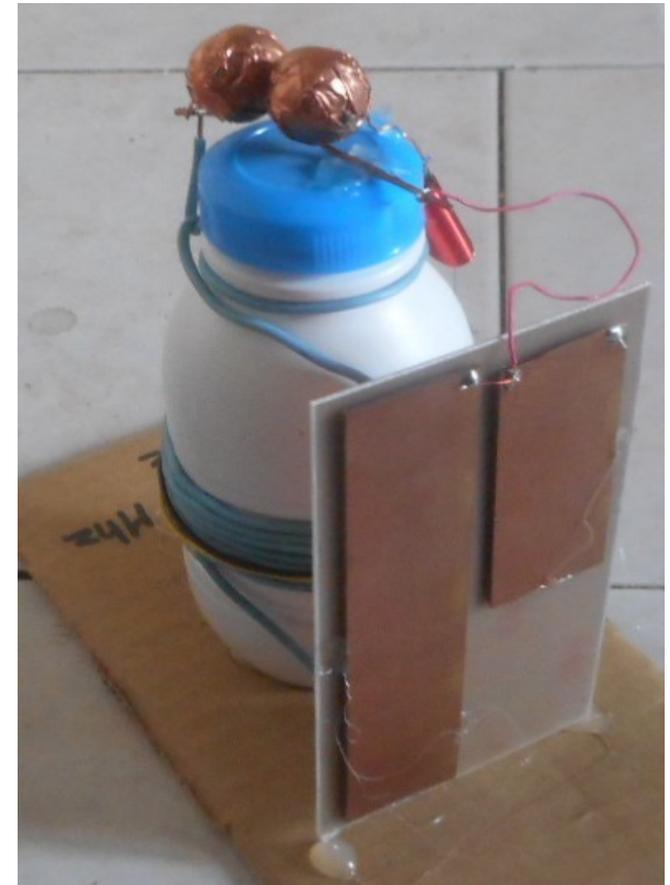
Le spectre émission émetteur 7 mhz



- Réception signal avec un FT840 placé a 10 mètres .Antenne 3 cm sur le Ft840 ,pas d'antenne sur l'émetteur (resistance charge 50 ohm) .Unité du signal reçu: S unit = 6dB lu sur le S metre du transceiver
- Émetteur sans antenne ,eclateurs à 1.5 mm (tension env 4500 v)
- Puissance alimentation 6 watt mesuré
- On observe une Bande passant à +/-6db=600 khz
- Pas besoin de condensateur variable pour operer sur le segment amateur !

Analyse du fonctionnement émetteur 7 mhz

- Mode de fonctionnement notablement différent avec émetteur 7 mhz/ émetteur 65 mhz Avec la même alim la fréquence de répétition de l'arc est plus faible (mesurée 9 khz en mode 7 mhz pour estimé 20 khz en mode 65 mhz (raison l'alim est trop limitée et n'arrive pas à charger le condensateur de 100 pf du circuit oscillant ,20 000 fois par seconde)
- **Vérification cohérence des mesures**
- Eclateur réglé à 1.5 mm ==> $U=4500\text{ v}$,capacité mesurée du condensateur=100pf ,fréquence arc 9 khz .Energie pour charger 100pf : $E=1/2*C*V*V==>1$ millijoule par charge==>pour 9000 charges/seconde==> env 10 watt : mesure 6 watt alim ==> Ok on est dans ordre grandeur
- **Puissance émetteur**
- Puissance alim mesurée= 6 watt , puissance HF sur 7mhz mesurée sur résistance 50 ohm 1 volt==>**20 mw**
- Puissance moyenne faible et mauvais rendement mais puissance en pointe bien plus considérable :
- **Calcul puissance de crête** :hypothèse de calcul émission pendant 10 périodes (1 période à 7 mhz=142 nano seconde) et attente pendant 111 μ seconde soit 111000 nanoseconde (base fréquence répétition 9 khz) ==> puissance crête=20mw *110 000/142=**15492 mW**



Pour en savoir plus sur l'expérience H.Hertz

ref 1: IEEE Antennas & propagation magazine august 2018 p.218: Revisiting Heinrich Hertz 1888 laboratory (Ted Simpson)

re 2 IEEE Antenna & propagation magazine april 2003 vol 45 N°2 (Tapan K. Sarkar)

re 3 :communication H.Hertz 1889 sur les oscillations electriques Archives des Sciences physiques et naturelles 21 pp 281-309 :
explication en francais par H.Hertz de ses experiences <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k299091h/f284.image>

- * correspondance H.Poincare et H. Hertz http://henripoincarepapers.univ-lorraine.fr/corresphp/index.php?s=hertz&submit_search=Recherche
- * article original de Hertz mars 1887 H. Hertz (1887) *Über sehr schnelle elektrische Schwingungen*. Annalen der Physik und Chemie 31, pp. 421-448.
- * lettre de H.Poincare a H.Hertz contestant le calcul de la frequence de l'oscillateur <http://henripoincarepapers.univ-lorraine.fr/chp/text/hertz10.html>.
- * communication de H.Poincare à l'académie des sciences sur l'erreur de calcul frequence
H. Poincaré (1890) Contribution à la théorie des expériences de M. Hertz. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences de Paris 111, pp. 322-326.
- * cours de H.Poincare sur les oscillation electriques https://ia802709.us.archive.org/0/items/lesoscillation00poin/lesoscillation00poin_bw.pdf
- * comment fonctionne resonateur de H.Hertz: <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00240531/document>
- * mesure propagation des ondes sur fil conducteur :Sarasin Edouard . Archives des sciences physique et naturelles Geneve 23 p 113 fevrier'1890)
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k2990938/f123.item>
- * traduction article de E.Lecher avril 1890 <https://waveguide.blog/lecher-lines-translation-original-paper-ernst-lecher/>
- * Tout savoir sur construction Bobine Ruhmkorff :<http://www.gutenberg.org/files/54221/54221-h/54221-h.htm>



73 de F1 OK