

► Analyse spectrale radiofréquence

On se propose dans cette manipulation d'analyser les signaux et ondes électromagnétiques produits par divers dispositifs.

Les émissions d'ondes peuvent être :

- **volontaires** : signal d'un générateur, radiodiffusion FM, télévision numérique terrestre, téléphonie GSM
- **involontaires** : alimentation à découpage, ampoule à économie d'énergie, perceuse, four à micro ondes

La caractérisation de ces émissions involontaires parasites est importante et les normes de compatibilité électromagnétique (CEM) définissent des seuils d'émission à ne pas dépasser.

Activité 1 : spectres de signaux modulés

A l'aide d'un générateur RF, produire un signal de fréquence $f_0 = 4$ MHz et d'amplitude 0 dBm. Visualiser son oscillogramme et son spectre sur l'analyseur Tektronix 2712. Produit-il des harmoniques ? Caractériser ces harmoniques.



⇒ avec un GBF, moduler ce générateur RF **en amplitude** en lui appliquant un signal sinusoïdal de fréquence $F = 20$ kHz sur l'entrée de modulation extérieure. En jouant sur le niveau du GBF, régler la modulation à 100%.

Relever le spectre du signal AM en échelles linéaires. Comparer avec le spectre théorique et conclure.

⇒ passer en modulation **de fréquence** et observer l'évolution lorsqu'on augmente l'indice de modulation. Régler l'indice de modulation pour avoir **seulement 4** raies latérales de part et d'autre de la porteuse.

Relever le spectre de ce signal et en déduire l'encombrement spectral du signal modulé. Où retrouve-t-on la fréquence modulante F dans ce spectre ?

Activité 2 : spectres de signaux radio FM

Brancher une antenne sur l'analyseur de spectre et enregistrer le spectre de la bande FM de 88 à 108 MHz avec une échelle dBm.

Identifier quelques émetteurs puissants de la bande et donner en mV le niveau reçu pour France-Inter.

Centrer l'analyse sur un émetteur de la bande et faire 2 enregistrements pour montrer que l'encombrement spectral n'est pas constant dans le temps.

Quel est l'ordre de grandeur de l'encombrement d'un émetteur ?



Activité 3 : spectres de signaux de TV numérique

Evaluer la longueur d'onde des signaux captés. En déduire la longueur approximative d'une antenne quart-d'onde ($L=\lambda/4$) et ajuster l'antenne télescopique en conséquence.

Relever le spectre entre 715 et 745 MHz. Identifier les émissions de TV numérique terrestre émise par la tour du Belvédère de Mulhouse en précisant la composition des multiplex. L'émission allemande est-elle visible ?

Vérifier que la bande totale occupée par un multiplex est bien de 8 MHz environ. Sachant que l'émission utilise 6817 porteuses juxtaposées, évaluer l'écart entre 2 porteuses adjacentes.

Activité 4 : spectres de signaux GSM

Dans le standard GSM :

- le territoire est découpé en zone ou cellules de taille variable (de 100m en ville à 30 km en zone rurale)
- chaque cellule possède une station de base qui émet en permanence les informations de service (voie balise)
- la base transmet aussi à puissance plus faible les communications vers les mobiles présents dans la cellule
- la moitié basse de la bande est réservée à Orange, et la partie haute à SFR
- la base émet dans la bande 935-960 MHz et les mobiles émettent dans la bande 890-915 MHz

Evaluer la longueur d'onde des signaux captés. En déduire la longueur approximative d'une antenne quart-d'onde ($L=\lambda/4$) adaptée au GSM et ajuster l'antenne télescopique en conséquence.

Visualiser le spectre radio dans la bande GSM descendante qui va de 935 à 960 MHz (émissions des stations de base).

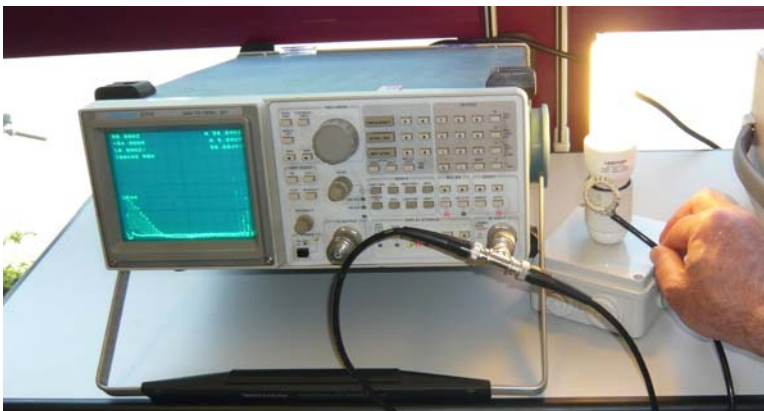
Sur le spectre relevé, identifier les fréquences utilisées par Orange et SFR dans la cellule où se trouve le lycée (ce sont les canaux reçus avec le meilleur niveau).

Visualiser le spectre d'une émission GSM en zoomant sur une émission balise et refaire un enregistrement. Mesurer l'encombrement spectral de l'émission à -10 dB et -20 dB. Sachant qu'un canal GSM fait 200 kHz de large, le spectre du signal émis tient-il dans le canal ?

Activité 5 : spectre d'une ampoule à économie d'énergie

Problème posé : on désire avoir une idée du rayonnement électromagnétique d'une ampoule fluocompacte pour voir s'il y a danger à proximité.

Les courants alternatifs liés au fonctionnement de l'oscillateur générant la HT vont produire une onde électromagnétique au voisinage de l'ampoule, et spécialement du culot.



Avec une antenne boucle, explorer l'espace au voisinage de l'ampoule et repérer l'endroit du culot où le rayonnement est le plus important.

Enregistrer le spectre du rayonnement entre 0 et 200 kHz et estimer la fréquence de fonctionnement de l'oscillateur.

Relever le spectre au point où le rayonnement est maximal dans une plage de fréquence plus large pour mettre en évidence le rayonnement global de l'ampoule.

Si la bobine de mesure comporte N spires, la tension induite dans la bobine par un champ magnétique sinusoïdal d'amplitude B_0 s'écrit :

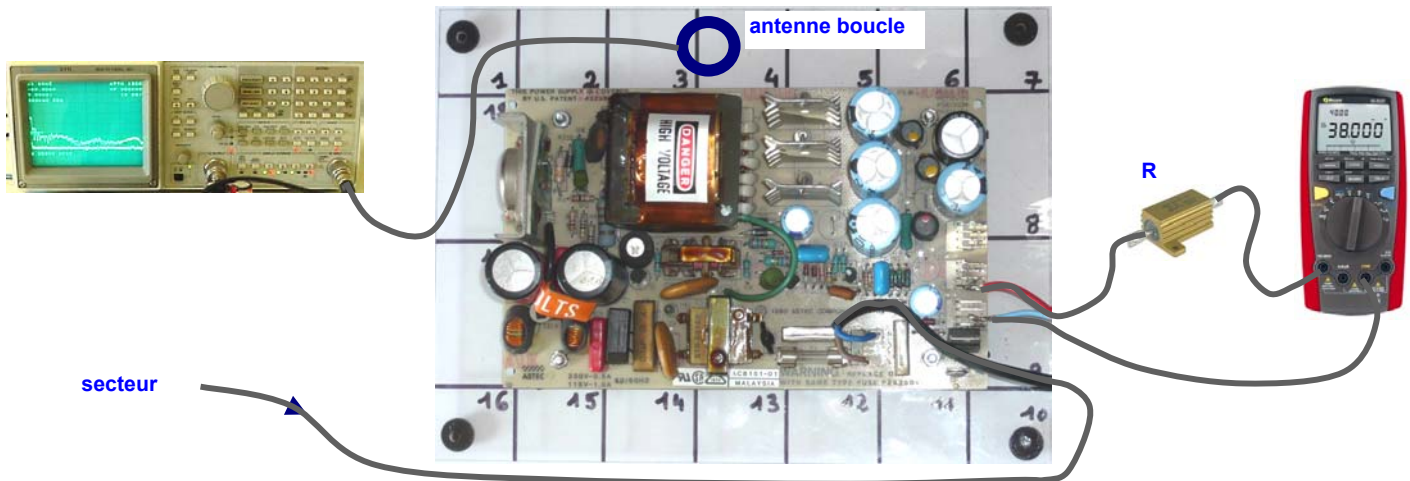
$$v(t) = -\frac{d\varphi(t)}{dt} = -N \frac{d}{dt} [B_0 \cos(\omega t)] = NB_0 \omega \sin(\omega t) \quad \text{soit} \quad V = NB_0 \omega = 2\pi N f B_0$$

Evaluer à l'oscilloscope la valeur crête de la tension induite dans la bobine de mesure à l'endroit où le champ est maximal et en déduire une estimation du champ magnétique B_0 . Où se situe le rayonnement de cette ampoule par rapport à la recommandation de l'OMS ? Que devient ce champ si on s'éloigne de l'ampoule ?

Activité 6 : spectre d'une alimentation à découpage (émission rayonnée)

Problème posé : on veut utiliser une alimentation à découpage 5V pour alimenter une carte électronique consommant un courant important, supérieur à 1A. La carte étant sensible aux perturbations électromagnétiques, on recherche le placement idéal de la carte dans le boîtier, par rapport à l'alimentation.

Relier l'alimentation à sa charge en insérant un ampèremètre pour mesurer l'intensité du courant débité. **Certains composants étant portés à des potentiels élevés (400V) on prendra soin de ne pas y toucher !**



Avec l'antenne boucle, explorer l'espace au voisinage de l'alimentation à découpage et relever le spectre au point où son rayonnement est le plus intense, dans les conditions suivantes :

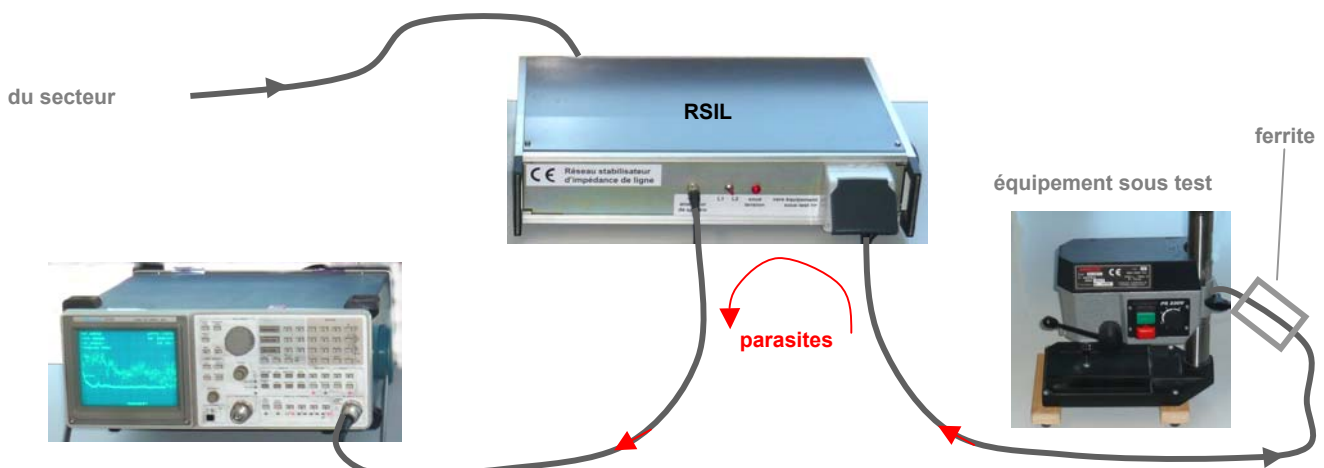
- alimentation chargée par $R=3,9 \Omega$, spectre entre 0 et 100 MHz, échelle d'amplitudes linéaire, RBW = 300 kHz
- idem mais entre 0 et 2 MHz
- idem mais pour l'alimentation à vide

En déduire :

- le domaine de fréquence dans lequel l'alimentation rayonne
- la fréquence f_1 du découpage lorsque l'alimentation est à vide
- la fréquence f_2 du découpage lorsque l'alimentation débite un courant $I > 1A$
- la ou les zones à éviter pour l'implantation de la carte électronique, et la ou les zones optimales

Activité 7 : parasites véhiculées par le cordon secteur d'une perceuse (émission conduite)

Problème posé : visualiser les perturbations radioélectriques véhiculées par le cordon secteur d'une perceuse. Ce cordon constitue, pour les parasites HF, une ligne de propagation par laquelle ils peuvent sortir d'un équipement. On veut aussi vérifier si l'installation d'une ferrite diminue le niveau de ces perturbations.



Alimenter la perceuse à tester par l'intermédiaire du réseau RSIL (voir **Annexe 3**) et relever le spectre entre 0 et 100 MHz lorsque la perceuse est en fonctionnement.

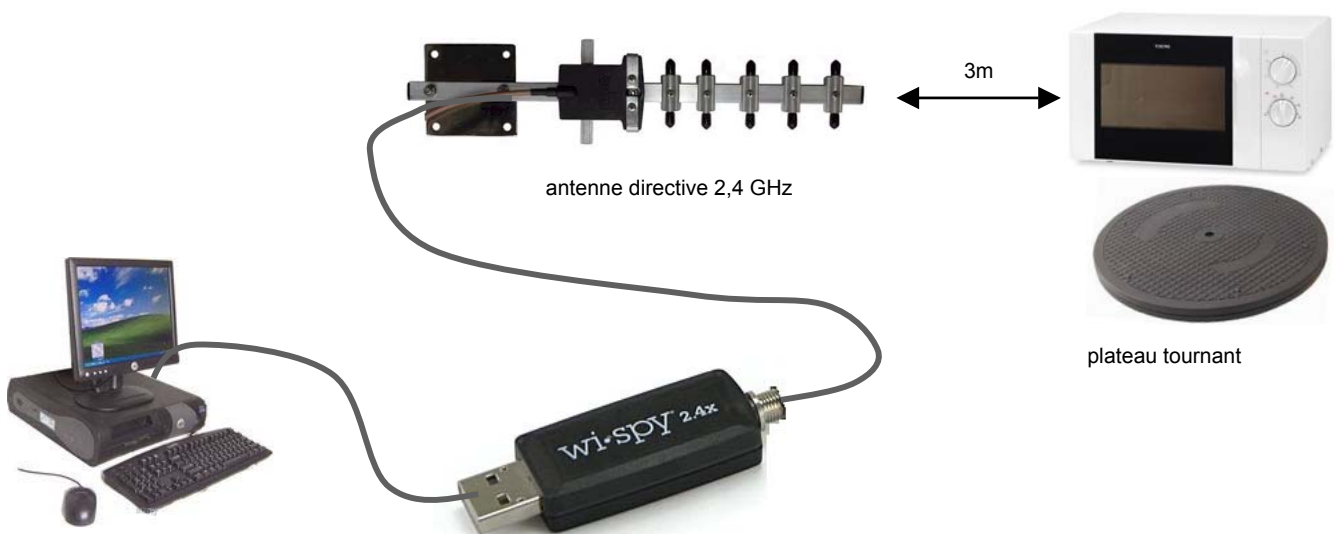
Placer sur le spectre les limites définies par les gabarits officiels concernant les produits de classe A et B (on prendra ceux pour la mesure « valeur quasi-crête »).

Mettre en place la ferrite sur le câble à la sortie de la perceuse et relever un nouveau spectre. La ferrite diminue-t-elle le niveau des parasites véhiculés par le cordon secteur ? Dans quelle gamme de fréquences ?

Expliquer en tenant compte du fait que « mettre une ferrite sur un câble » revient à « introduire une inductance en série dans le cordon ». Pourquoi vaut-il mieux mettre la ferrite directement à la sortie du câble ? voire à l'intérieur du boîtier ?

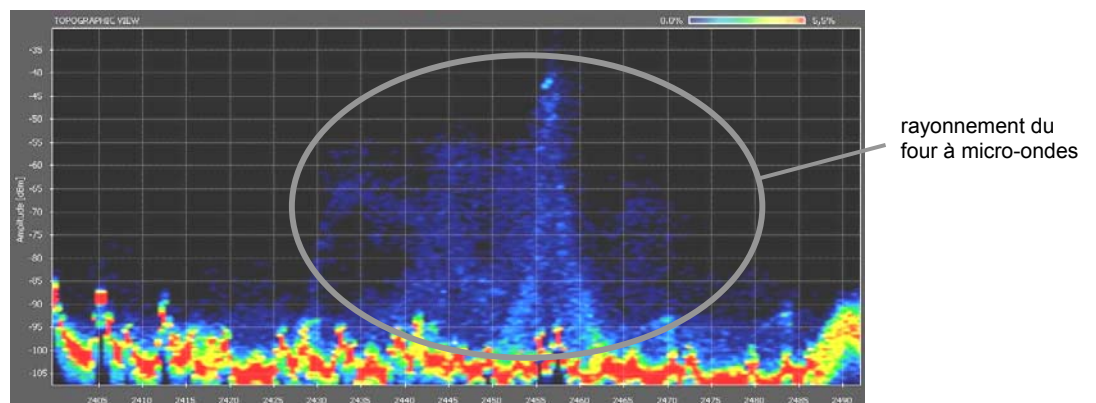
Activité 8 : spectre d'un four à micro ondes

Avec l'analyseur Wi-Spy associé à une antenne directive 2,4 GHz relever le spectre du signal émis par un four à micro-ondes en fonctionnement.



Dans quelle bande de fréquence un four à micro-ondes rayonne-t-il ? Emet-il une sinusoïde pure ? une sinusoïde modulée ? autre ?

Relever le niveau global rayonné en fonction de l'angle dans un plan horizontal.



Annexe 1 : canaux de la TNT en Alsace

- modulation **OFDM8k** : 6817 porteuses modulées en 64QAM
- largeur du canal 8 MHz
- débit numérique : 24 Mbits/s



Emetteur du Belvédère
Altitude au pied : 345 m
Hauteur du pylône : 194 m

Multiplex	Fréquence	Canal	Composition
R1	730 MHz	53	France 2, France 3, France 5, ARTE, La Chaîne Parlementaire, Alsace 20
R2	522 MHz	27	Direct 8, France 4, Gulli, Virgin17, I>TV, BFM TV
R3	738 MHz	54	Canal+*, TPS Star*, Canal J*, Planète*, Canal+ Sport*, Canal+ Cinéma*
R4	602 MHz	37	M6, W9, NT1, Paris Première*, ARTE HD
R5	498 MHz	24	TF1 HD, France 2 HD, M6 HD (mise en service prévue le 28/09/2010)
R6	474 MHz	21	TF1, NRJ12, TMC, LCI*, Eurosport

* chaînes cryptées/clair

⇒ **émetteurs suisses** (polarisation verticale) :

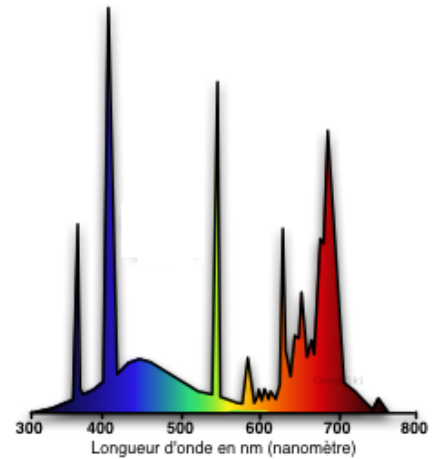
- **canal 31 (554 MHz)** : TSR1, SF1, SF2 et TSI
- **canal 58 (770 MHz)** : TSR1et 2, SF+ et TSI

⇒ **émetteurs allemands** (polarisation horizontale) :

- **canal 33 (570 MHz)** : ZDF, 3sat, KI.KA/ZDFdokukanal, ZDFinfokanal
- **canal 39 (618 MHz)** : SWR Fernsehen BW, Bayerisches Fernsehen, hr-fernsehen, WDR Fernsehen
- **canal 52 (722 MHz)** : Das Erste, ARTE, Phœnix, EinsPlus

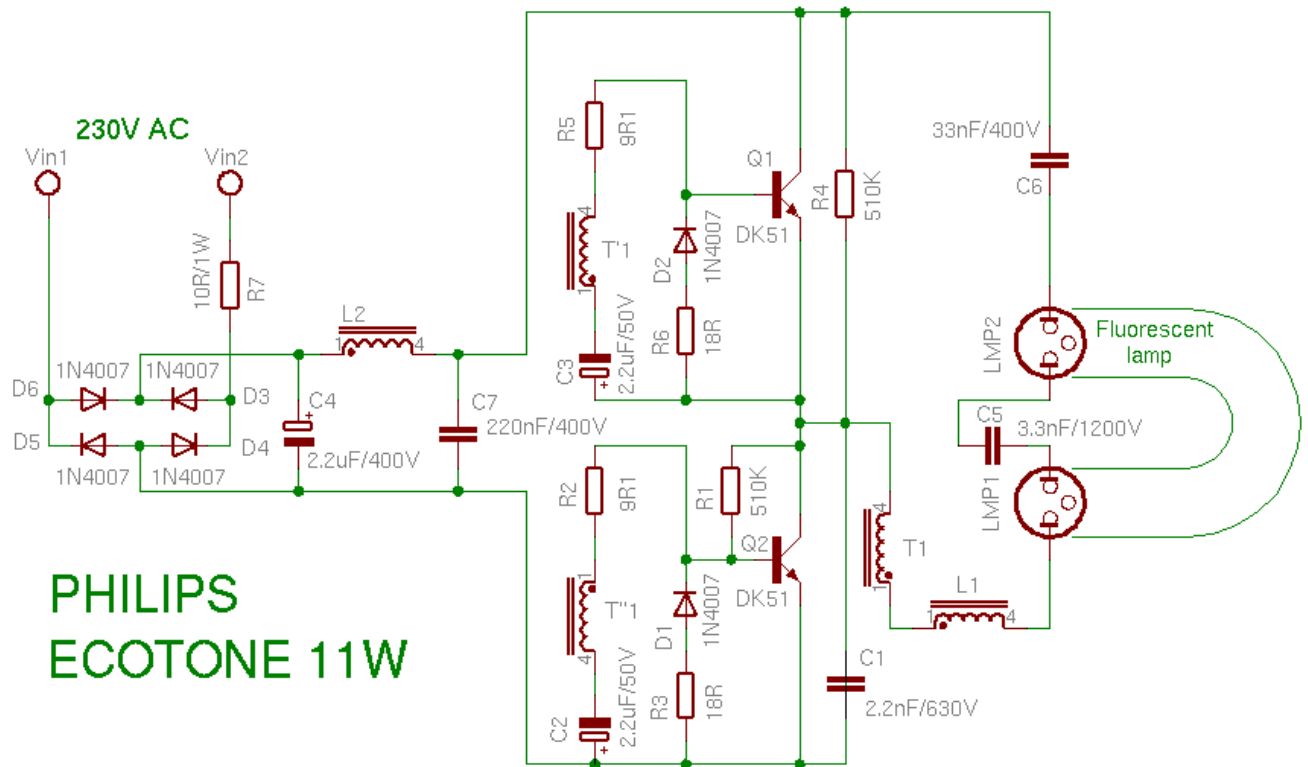


Annexe 2 : les ampoules à basse consommation



Principe de fonctionnement :

- la tension du secteur est redressée et filtrée (325V=)
- elle est transformée en un signal carré (aux bornes de R_4) de fréquence $f > 30$ kHz
- le circuit L_1 , C_5 et C_6 est un circuit résonant \Rightarrow une tension élevée apparaît aux bornes de C_5
- cette HT amorce la décharge dans le tube dont la résistance devient faible, C_5 est court-circuitée
- la décharge produit des UV grâce au mercure contenu dans le tube
- ces UV excitent la luminescence de la poudre à base de phosphore qui recouvre la paroi du tube



Avantages :

- consommation 4 à 5 fois moins qu'une lampe à incandescence
- durée de vie 6 fois supérieure (6000 heures pour 1000 heures)

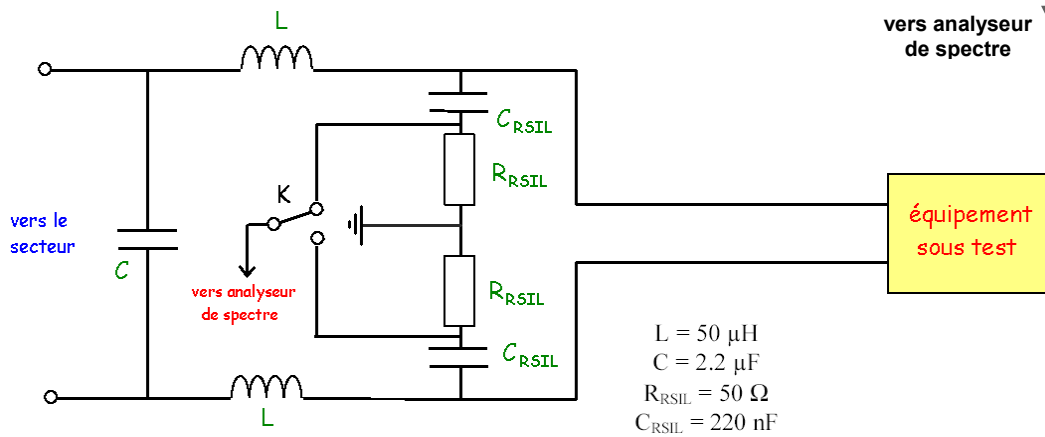
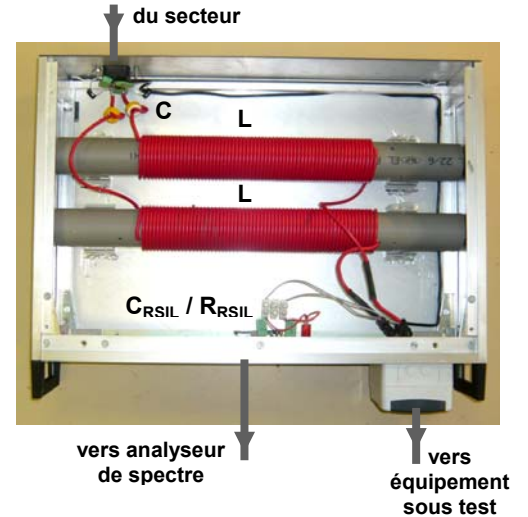
Inconvénients :

- risque de pollution à cause du mercure, très toxique (nécessité du recyclage)
- spectre de raies et pas spectre continu (couleurs parfois faussées)
- pollution électromagnétique entre 50 Hz et quelques centaines de kHz...mais qu'en est-il réellement ?

\Rightarrow **Recommandation de l'OMS** : champ $E < 1$ V/m ou champ $B < 3$ nT dans le domaine des radiofréquences

Annexe 3 : le réseau RSIL

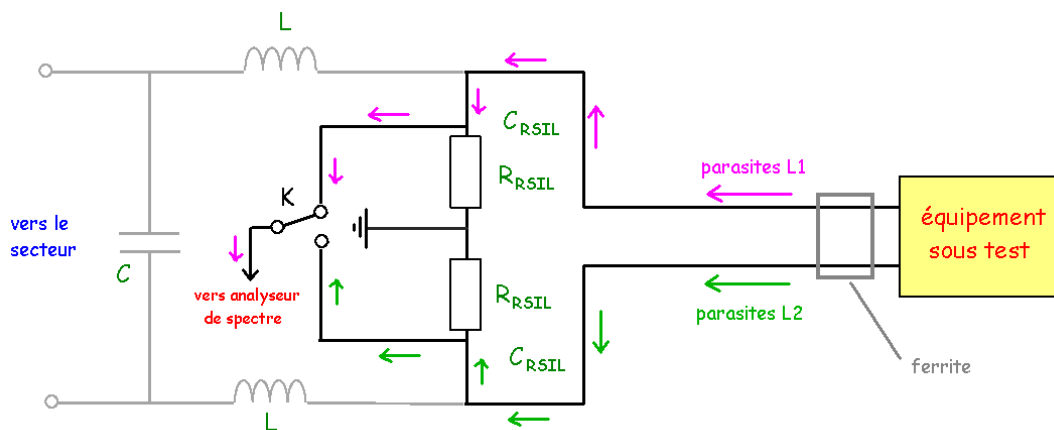
Pour visualiser les parasites émis par l'équipement sous test, celui-ci est relié au secteur par l'intermédiaire d'un Réseau Stabilisateur d'Impédance de Ligne ou RSIL :



Rôle des composants :

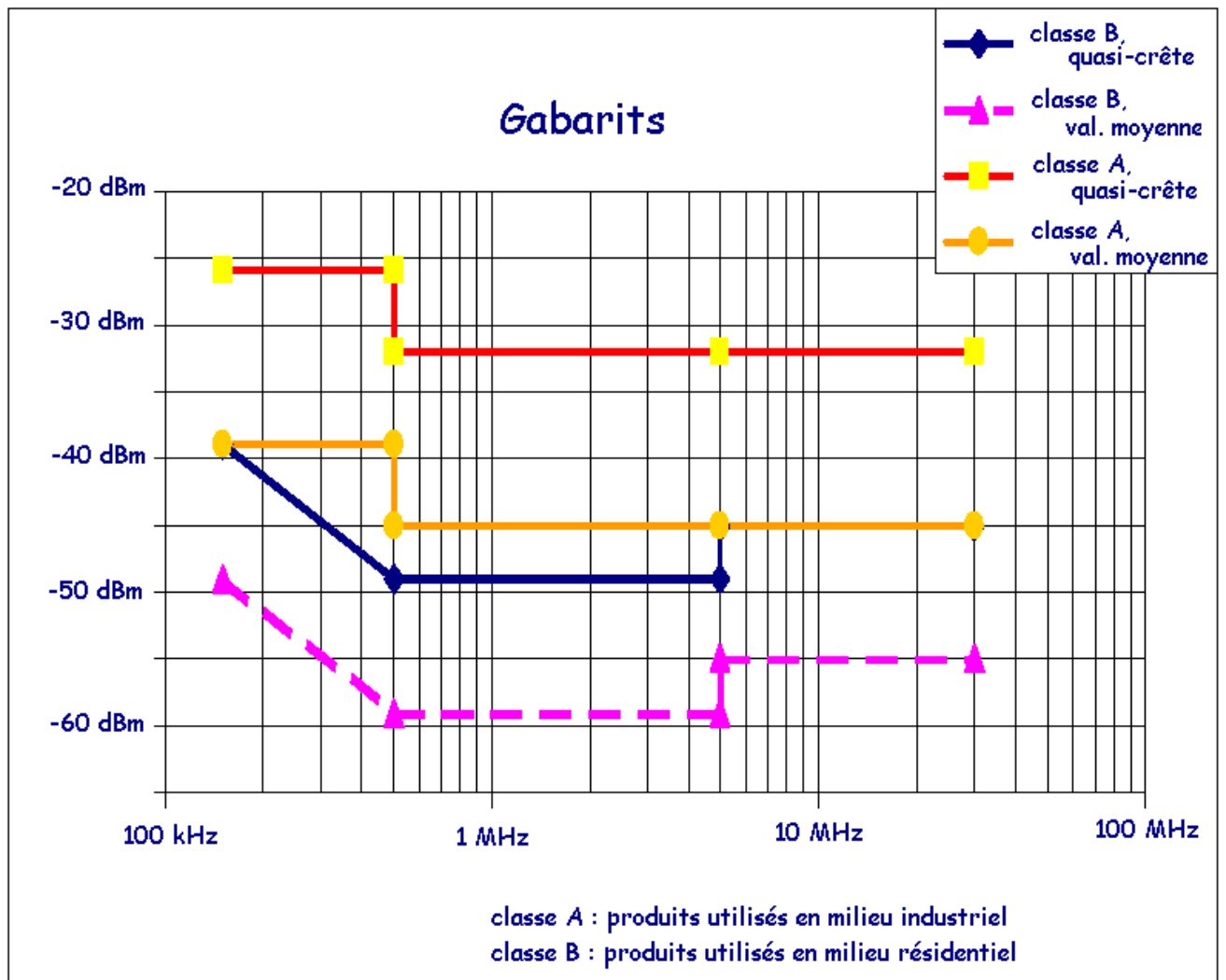
- le condensateur C est un court-circuit pour les éventuels parasites venant par le réseau 230 V
- les bobines L présentent des impédances négligeables pour le 50 Hz, mais élevées pour les parasites HF
- les condensateurs C_{RSIL} présentent des impédances élevées pour le 50 Hz, mais faibles pour les parasites HF

Les parasites émis par l'équipement sous test voient donc le circuit suivant :



Ils peuvent donc être amenés vers l'analyseur de spectre, tout en alimentant l'équipement sous 220V et en l'isolant des parasites du secteur.

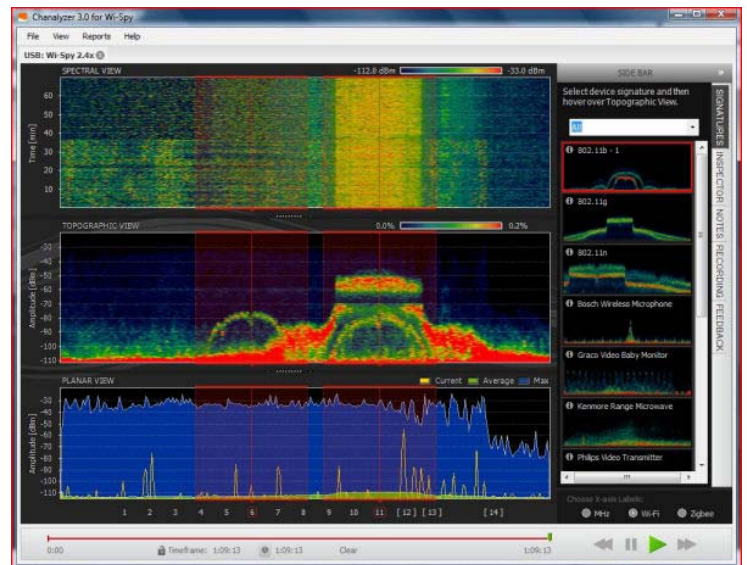
Annexe 4 : gabarits en émission conduite



Annexe 5 : analyseur Wi-Spy

Wi-Spy 2.4x est un analyseur de spectre spécialisé pour la bande des 2,4 GHz développé par [Metageek](#) et composé d'un logiciel ainsi que d'un adaptateur USB.

Il a été développé pour aider à l'installation de réseaux sans fil dans cette bande et permet de vérifier la présence de canaux déjà utilisés et/ou de brouillages.



Caractéristiques:

- interface : USB
- antenne : connecteur RP-SMA externe
- bande couverte : 2,400 à 2,495 GHz
- résolution : à choisir entre 26 kHz et 3 MHz
- largeur du filtre d'analyse : entre 58 kHz et 650 kHz
- gamme de niveaux : de -100 dBm à -6.5 dBm
- précision : $\pm 0,5$ dBm

Le logiciel Chanalyzer montre les données fournies par Wi-Spy en plusieurs formats graphiques pour une analyse facile.

Analyse spectrale radiofréquence : réponses

Rédacteur :

Binôme :

Date :

Activité 1 : spectres de signaux modulés

⇒ **Spectre d'une porteuse pure** : > voir courbe n°

- harmonique n° niveau dBm, soit μV
- harmonique n° niveau dBm, soit μV
- harmonique n° niveau dBm, soit μV
- harmonique n° niveau dBm, soit μV
- harmonique n° niveau dBm, soit μV

Taux de distorsion du générateur RF : $D = \dots\dots\dots$

Commentaires :
.....

⇒ **Spectre d'une porteuse modulée AM** : > voir courbe n°

Commentaires :
.....

⇒ **Spectre d'une porteuse modulée FM** : > voir courbe n°

Commentaires :
.....

Activité 2 : spectres de signaux radio FM

⇒ **Spectre de la bande FM** : > voir courbe n°

⇒ **Spectre d'un émetteur FM (instant t_1)** : > voir courbe n°

⇒ **Spectre d'un émetteur FM (instant t_2)** : > voir courbe n°

Encombrement spectral d'un émetteur : $B \approx \dots\dots\dots$

Commentaires :
.....

Activité 3 : spectres de signaux de TV numérique

⇒ **Spectre d'une partie de la bande UHF** : > voir courbe n°

Bande occupée par un multiplex : B =

Ecart entre deux porteuses du multiplex : E =

Commentaires :

Activité 4 : spectres de signaux GSM

⇒ **Spectre d'une partie de la bande GSM descendante** : > voir courbe n°

Dans la cellule du lycée :

- voie balise Orange : f =
- voie balise SFR : f =

⇒ **Spectre d'une émission GSM (voie balise)**: > voir courbe n°

Encombrement spectral d'un émetteur : B_{-10dB} ≈ B_{-20dB} ≈

L'émission tient dans le canal : non oui

Commentaires :

Activité 5 : spectre d'une ampoule à économie d'énergie

Localisation du rayonnement maximal (marquer d'une croix) :



⇒ **Spectre du rayonnement de l'ampoule (de 0 à 200 kHz)** > voir courbe n°

L'oscillateur fonctionne à : f ≈

⇒ **Spectre du rayonnement de l'ampoule (de 0 à MHz)** > voir courbe n°

⇒ **Oscillogramme du signal rayonné par l'ampoule** > voir courbe n°

Intensité du champ magnétique : B₀ =

Par rapport aux recommandations de l'OMS, ce champ est : en-dessous au-dessus

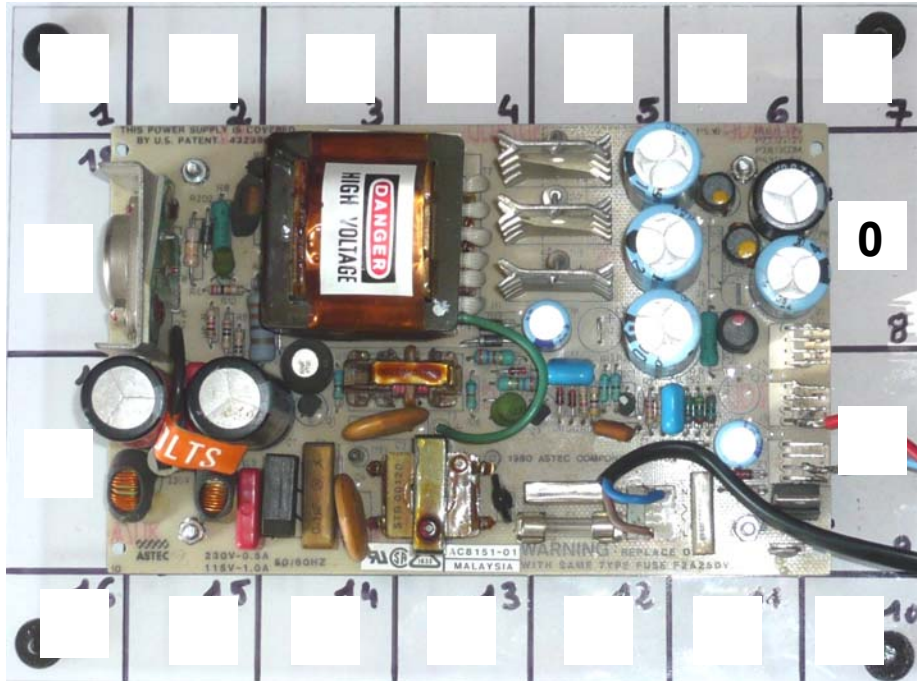
Commentaires :

Activité 6 : spectre d'une alimentation à découpage (émission rayonnée)

Courant débité par l'alimentation 5V chargée par $R=3,9 \Omega$:

- théorique $I = \dots\dots\dots$ A
- mesuré $I = \dots\dots\dots$ A

Zones où le rayonnement de l'alimentation est élevé (repérées par **X**) et faible ou nul (repérées par **0**) :



- ⇒ Spectre du rayonnement de l'alimentation chargée (de 0 à 100 MHz) > voir courbe n°
- ⇒ Spectre du rayonnement de l'alimentation chargée (de 0 à 2 MHz) > voir courbe n°
- ⇒ Spectre du rayonnement de l'alimentation à vide (de 0 à 2 MHz) > voir courbe n°

L'alimentation à découpage produit un rayonnement parasite de à

- à vide, le découpage se fait à $f_1 = \dots\dots\dots$ kHz
- en charge, le découpage se fait à $f_2 = \dots\dots\dots$ kHz

Pour l'implantation d'une carte électronique à proximité :

- zone(s) à éviter :
- zone(s) conseillées :

Commentaires :

.....

Activité 7 : parasites véhiculées par la cordon secteur d'une perceuse (émission conduite)

⇒ Spectre du rayonnement de la perceuse (de 0 à 100 MHz) > voir courbe n°

Par rapport aux recommandations de la norme de Compatibilité Electromagnétique, ce champ est :

- pour un équipement de classe A : en-dessous au-dessus
- pour un équipement de classe B : en-dessous au-dessus

⇒ **Spectre du rayonnement de la perceuse (de 0 à 100 MHz) avec ferrite** > voir courbe n°

La présence de la ferrite diminue le niveau des parasites : oui non

Les parasites sont diminués : à toutes les fréquences dans la gamme à MHz

Commentaires :

.....

Activité 8 : spectre d'un four à micro ondes

⇒ **Spectre du rayonnement d'un four à micro-ondes** > voir courbe n°

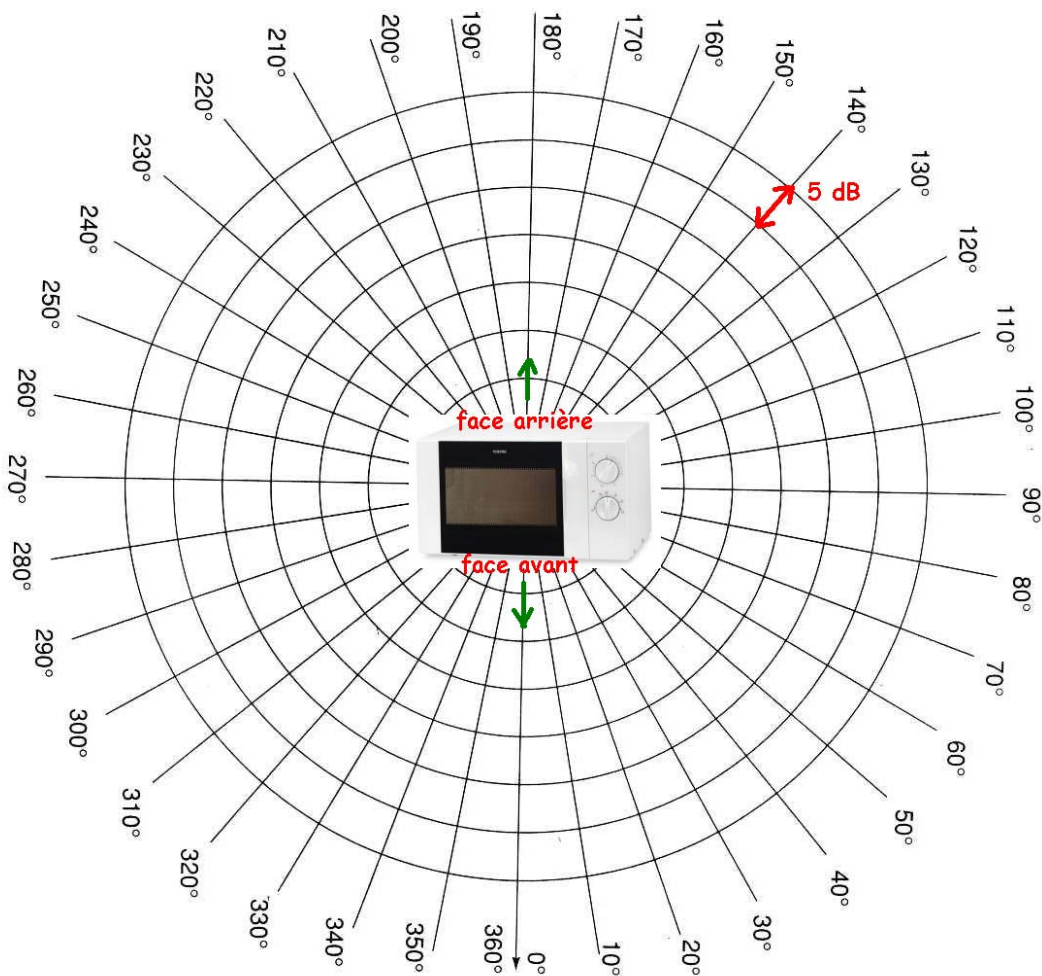
Le four à micro-ondes rayonne dans la bande : à MHz

Il émet : une porteuse pure une porteuse modulée autre

Commentaires :

.....

Niveau de rayonnement en fonction de l'angle :



Commentaires :

.....