



Le bruit électrique





- 1- Introduction à la notion de bruit
- 2- Les origines du bruit électrique
- 3- La tension de bruit
- 4- Loi de distribution en amplitude
- 5- Répartition des amplitudes d'un bruit
- 6- Exemple de mesure de bruit
- 7- Spectre d'un bruit
- 8- Les sources de bruit extérieures
- 9- Le rayonnement électromagnétique du soleil
- 10- Le bruit dans les composants
- 11- Densité spectrale d'un bruit
- 12- Exemple : bruit d'un AOp
- 13- Définition du rapport signal/bruit
- 14- Facteur de bruit d'un quadripôle
- 15- Exemples de facteurs de bruit
- 16- Quadripôles en cascade
- 17- Bruit dans un récepteur AM
- 18- Bruit dans un récepteur FM
- 19- Bruit dans l'analyseur de spectre RF
- 20- Mesure d'un rapport S/B à l'analyseur RF
- 21- Mesure du rapport S/B de France-Inter
- 22- Bruit blanc et courbe de réponse
- 23- Tests audio en bruit rose
- 24- Exemple de générateur de bruit rose analogique
- 25- Exemple de générateur de bruit blanc numérique
- 26- Application à la mesure de température





1- Définition du bruit électrique



Un signal est toujours affecté de petites fluctuations plus ou moins importantes, dont les origines peuvent être diverses, et sont appelées **bruit électrique**, **bruit de fond** ou tout simplement **bruit**. On peut citer comme exemples :

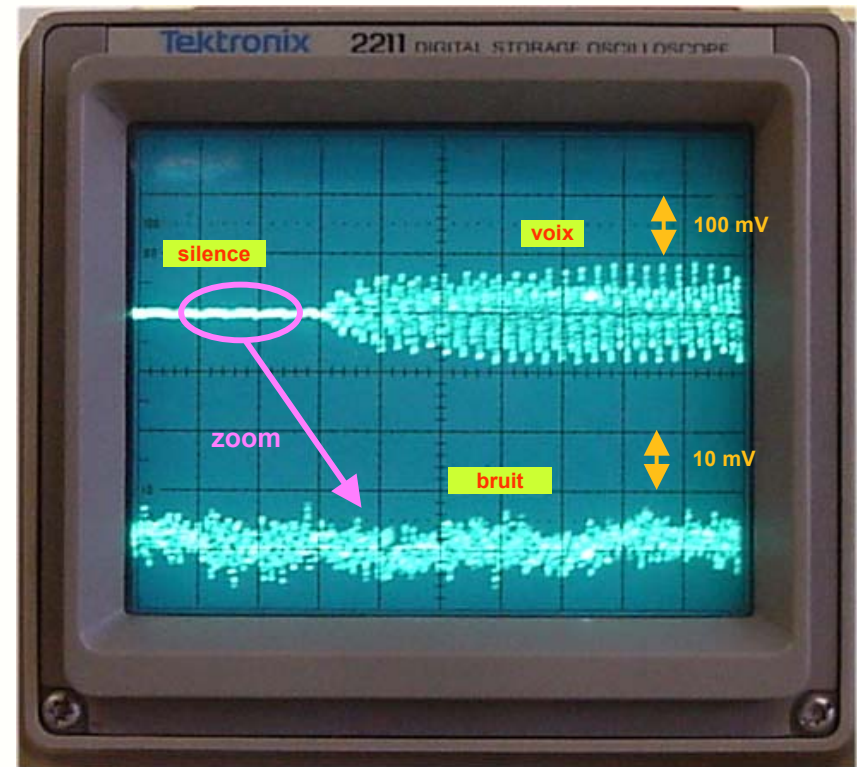
- le bruit de « friture » dans un récepteur radio entre deux stations
- le bruit de souffle à la sortie d'un amplificateur
- la « neige » sur l'écran d'un téléviseur qui n'est pas réglé sur une station

Un signal sans bruit n'existe pas : simplement le bruit est plus ou moins important et peut devenir invisible à l'oscilloscope ou inaudible si son niveau est très faible.

Exemple : signal audio en sortie d'un tuner FM

- en l'absence de signal vocal, la trace est fine
- si on augmente la sensibilité de l'oscilloscope, on voit que la tension de sortie du tuner est affectée de fluctuations aléatoires
- ces fluctuations correspondent au bruit électrique en sortie du récepteur
- elles se traduisent à l'oreille par un son de « souffle » ou de « chute d'eau » d'intensité variable selon la qualité du récepteur

Son : bruit dans la bande audio



Remarque : pour être concret, nous illustrerons souvent l'exposé par l'exemple du récepteur radio, mais les notions présentées s'appliquent évidemment à tous les systèmes électroniques.



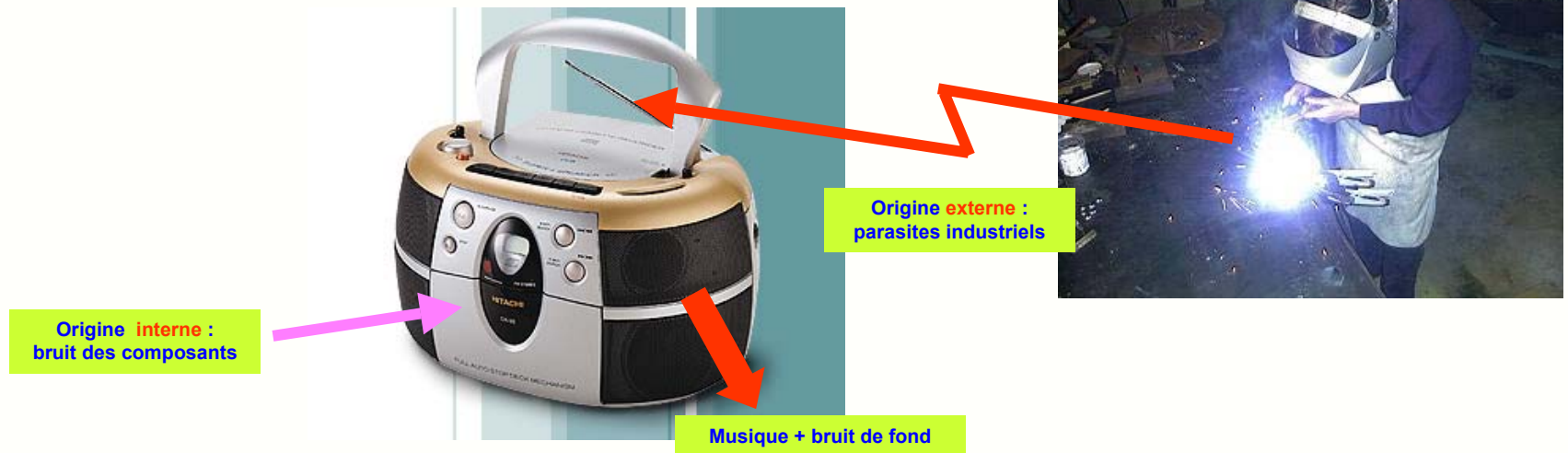
2- Les origines du bruit électrique



Le bruit qui affecte le signal en sortie d'une chaîne de traitement a **deux sources** bien distinctes :

⇒ **une origine extérieure** à la chaîne : c'est le bruit qui affecte déjà le signal à l'entrée de la chaîne et qui est amplifié et filtré avec le signal

- l'antenne du récepteur capte le signal de l'émetteur, mais aussi des parasites industriels et le bruit de fond cosmique de tous les astres qui rayonnent des ondes électromagnétiques.
- ces parasites ayant un spectre très étendu, on peut réduire leur importance en utilisant une antenne dirigée vers l'émetteur (comme en TV) et en réduisant la bande passante du système de réception



⇒ **une origine intérieure** : l'agitation thermique des électrons provoque des fluctuations aléatoires de la tension en tout point d'un circuit appelées **bruit thermique**

- outre ce bruit thermique, il existe d'autres catégories de bruits, toujours associés à la nature discontinue des porteurs de charges
- dans un récepteur, tous les étages (amplificateurs, mélangeurs ..) rajoutent leur bruit propre au bruit capté par l'antenne
- on peut diminuer ces bruits en choisissant des composants à faible bruit mais il est impossible de le supprimer



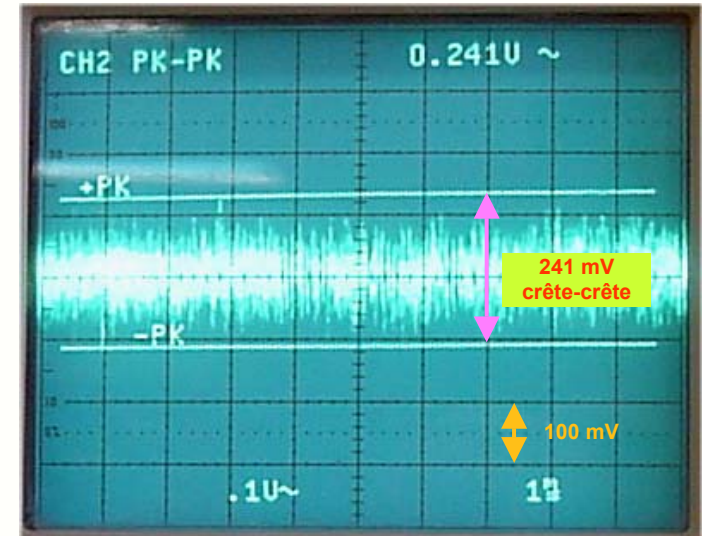
3- La tension de bruit



Le bruit apparaît naturellement suite à l'agitation thermique des électrons ou en liaison avec l'activité humaine, mais peut aussi être produit artificiellement par un générateur de bruit :



Générateur de bruit HP



Oscillogramme d'une tension de bruit

- les fluctuations étant aléatoires, $b(t)$ est aussi souvent positive que négative et sa **valeur moyenne est nulle** :

$$B_{moyen} = \overline{b(t)} = 0$$

- la **valeur crête ou crête-crête** est difficile à estimer car elle dépend du réglage de l'intensité du spot

- une bruit sera donc caractérisée par sa **valeur efficace** :

$$B_{eff} = \sqrt{\overline{b(t)^2}}$$

Remarque : elle est mesurée avec un voltmètre RMS et la mesure est souvent délicate car les tensions de bruit sont en règle générale très faibles et les voltmètres utilisé doivent avoir un bruit propre très faible et une bande passante large pour ne pas perturber la mesure.

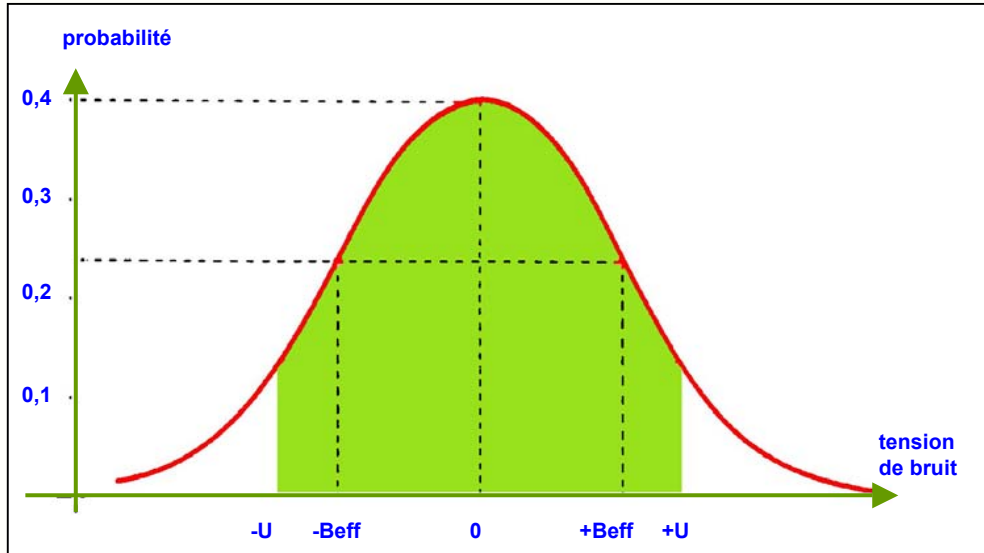


4- Loi de distribution en amplitude



La tension de bruit $b(t)$ a une allure désordonnée, il est donc impossible de prévoir la valeur qu'aura $b(t)$ à un instant t donné :

- la tension $b(t)$ a souvent une valeur nulle ou très faible, mais beaucoup plus rarement une valeur élevée
- la probabilité de voir la tension $b(t)$ comprise dans une certaine fourchette autour d'une valeur fixée U_0 décroît si U_0 augmente
- pour la grande majorité des bruits, la courbe de probabilité est une courbe **gaussienne**



- la courbe donne la probabilité que $b(t)$ soit égale à une valeur donnée à un instant donné
- par exemple, la probabilité pour que $b(t) = 0$ à un instant t donné est de $p = 40\%$

- la probabilité que $b(t)$ soit comprise entre deux valeurs $-U$ et $+U$ est égale à l'aire sous la courbe
- par exemple, la probabilité pour que $b(t)$ soit dans l'intervalle $-Beff, +Beff$ est de 68%
- la probabilité pour que la tension de bruit $b(t)$ soit dans l'intervalle $-3Beff, +3Beff$ est de 99%

Cette dernière remarque nous permet de dire que la tension de bruit ne dépasse presque jamais la valeur $+3 \cdot Beff$ et on utilise souvent dans la pratique la tension de bruit crête-crête définie par :

tension de bruit crête-crête :

$$B_{cc} \approx 6 \cdot B_{eff}$$

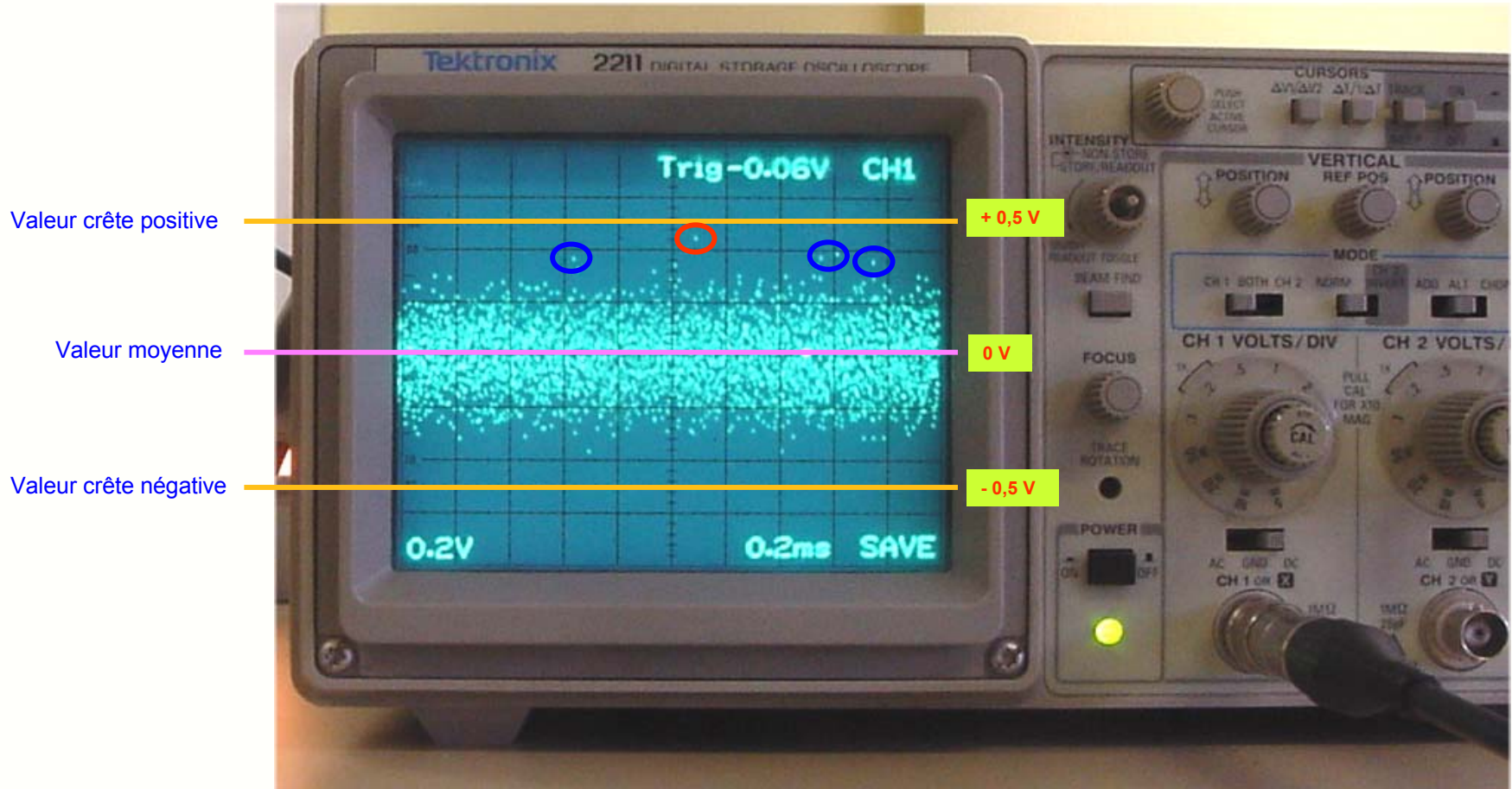
Exemple : un signal continu de 30 mV et affecté de 2 mVeff de bruit fluctuera entre les valeurs $30 - 3U_{eff}$ et $30 + 3U_{eff}$ soit 24 mV et 36 mV avec une probabilité inférieure à 1 % de dépasser ces valeurs.



5- Répartition des amplitudes d'un bruit



L'échantillonnage par un oscilloscope à mémoire d'une tension de bruit $b(t)$ de valeur crête-crête $B_{cc} = 1\text{ V}$ permet de bien voir la diminution de la probabilité d'apparition d'une amplitude donnée si on s'éloigne de la valeur moyenne nulle du bruit :



Remarques :

- le nombre d'échantillons sur l'écran diminue à mesure qu'on s'éloigne de la valeur moyenne 0V
- on trouve de très nombreux échantillons dans la tranche 0-0,05V
- il y a seulement 4 échantillons dans la bande 0,35-0,4V et un seul échantillon dans la tranche 0,4-0,45 V

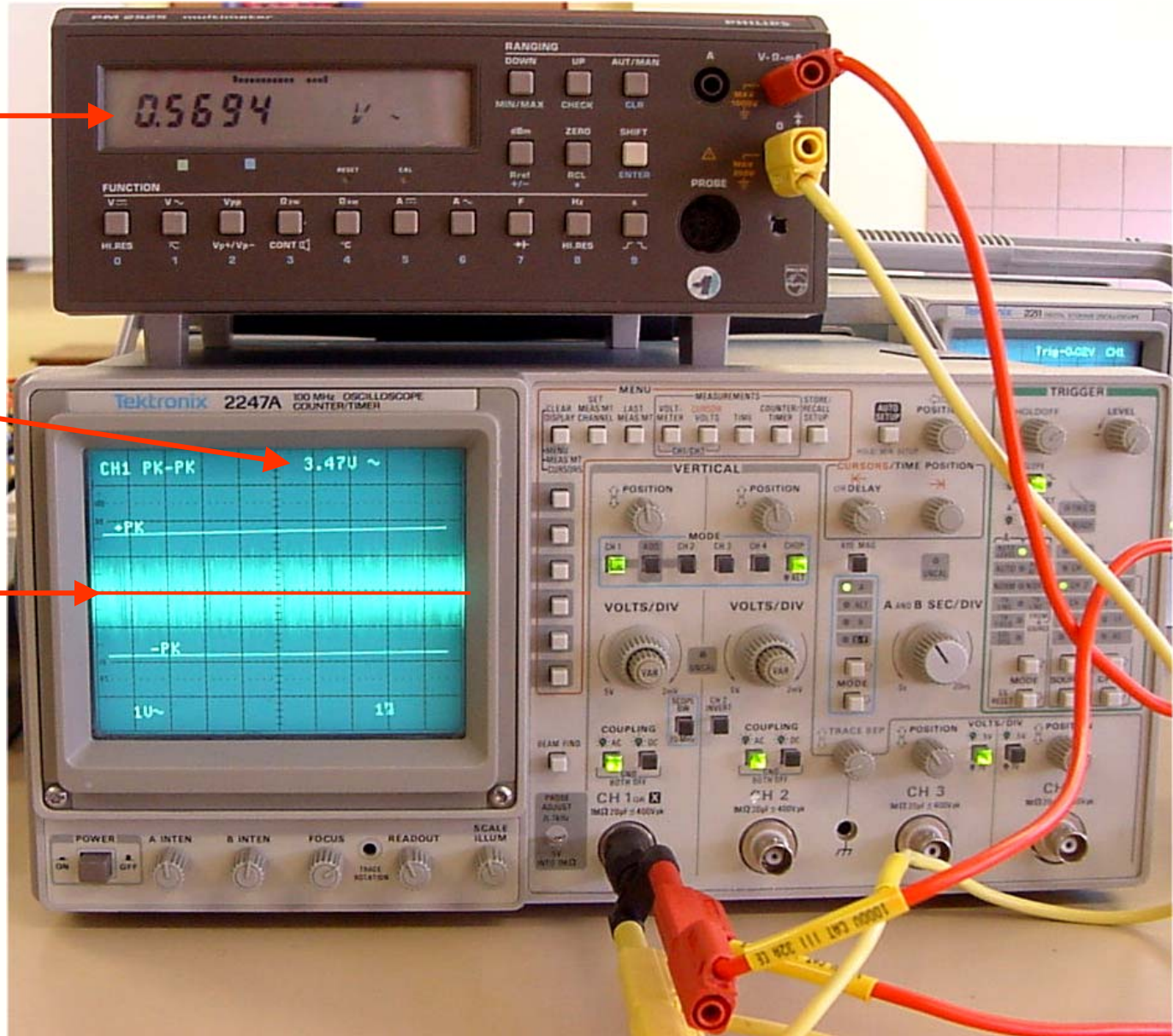


6- Exemple de mesure de bruit



Valeur efficace :

$$B_{eff} = \sqrt{\overline{b(t)^2}} \approx 0,57V$$



Valeur crête-crête :

$$B_{cc} \approx 3,47V$$

Valeur moyenne :

$$B_{moyen} = \overline{b(t)} = 0$$

Remarque : on retrouve bien la relation

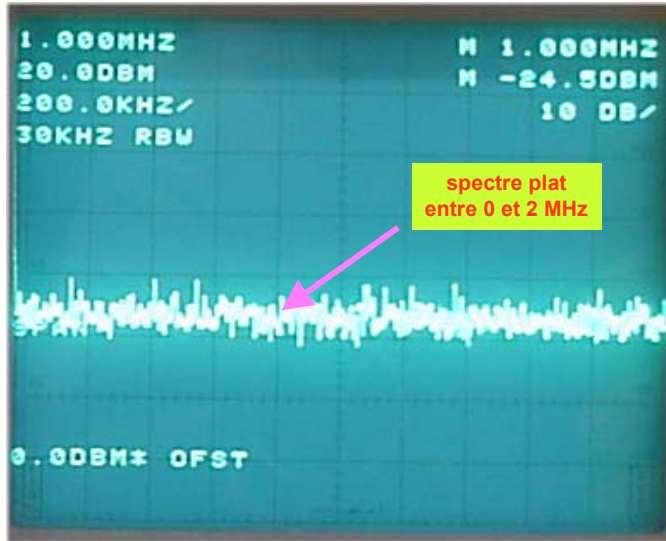
$$B_{cc} \approx 6 \cdot B_{eff}$$



7- Spectre d'un bruit



Le caractère aléatoire du bruit explique que sa composition spectrale va du continu jusqu'à des fréquences très élevées :



spectre plat entre 0 et 2 MHz

Spectre d'une tension de bruit entre 0 et 2 MHz



Spectre du bruit produit par le générateur HP

- un tel bruit est appelé **bruit blanc** par analogie avec la lumière blanche qui est aussi un mélange de toutes les fréquences.
- cette définition du bruit blanc est un peu théorique car le spectre finit toujours par décroître aux fréquences élevées
- on parlera donc de bruit blanc chaque fois que le **spectre est constant** dans la gamme de fréquences utiles
- en audiofréquence par exemple, un bruit ayant un spectre constant dans la gamme 10Hz-20kHz sera qualifié de blanc

Remarque : la forme du spectre du bruit produit par le générateur HP est en $\sin(X)/X$, ce qui laisse penser qu'il est produit à partir d'une séquence pseudo-aléatoire comme cela est expliqué à la fin de l'exposé.

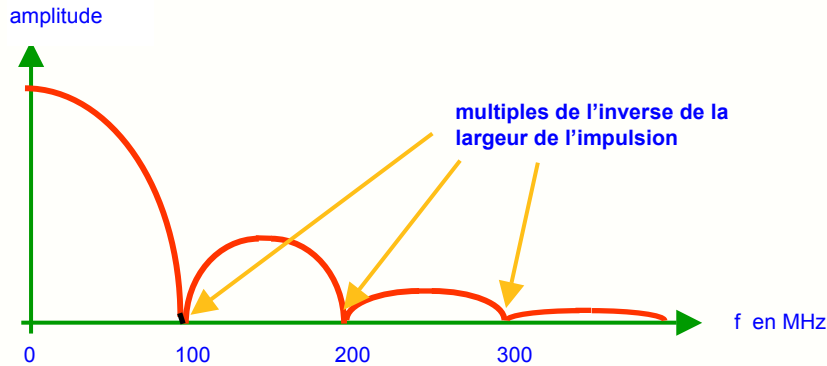
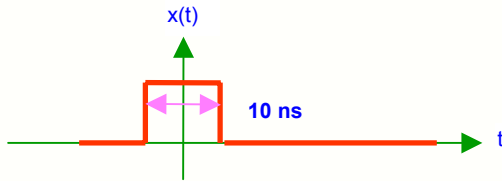


8- Les sources de bruit extérieures

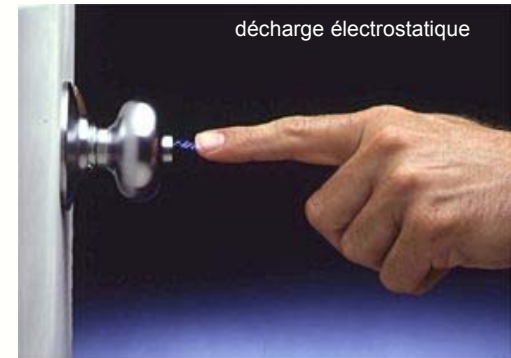


Un récepteur est toujours relié à une antenne qui capte tous les bruits présents dans son environnement :

- le **bruit généré par l'homme** : le fonctionnement de tous les engins électriques (réfrigérateur, aspirateur, brosse à dents électrique, mobylette, interrupteur ...) est accompagné d'**étincelles très brèves** à l'origine d'un bruit radioélectrique à large bande. Le grand nombre de ces étincelles crée un bruit de fond sensible surtout en environnement urbain ou industriel.
- le **bruit atmosphérique** : créé surtout par les **éclairs**, décharges impulsionnelles très puissantes, qui accompagnent les très nombreux orages existant en permanence sur la terre



Spectre d'une impulsion de largeur 10 ns



- le **bruit galactique** : les objets célestes (soleil, étoiles ...) qui nous entourent rayonnent bien-sûr de la lumière mais également sur un très large spectre radioélectrique et produisent du bruit dans la gamme des ondes radio, TV, TVsat ...

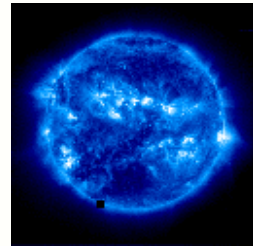
9- Le rayonnement électromagnétique du soleil



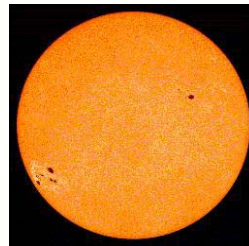
Le Soleil est la principale source de bruit électromagnétique de notre environnement :

- grâce à sa température extérieure d'environ $T = 6000 \text{ K}$, il éclaire, réchauffe et maintient la vie sur notre planète Terre
- son spectre d'émission couvre une très large gamme de fréquences qui va des UV jusqu'aux ondes radio

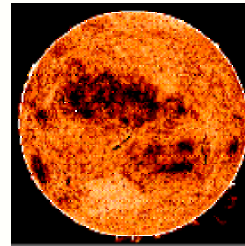
Images du Soleil à diverses fréquences du spectre électromagnétique :



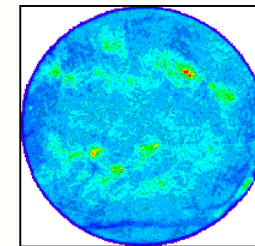
en UV



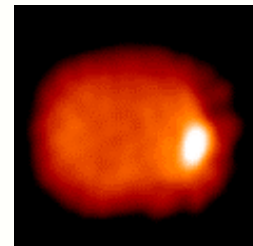
dans le visible



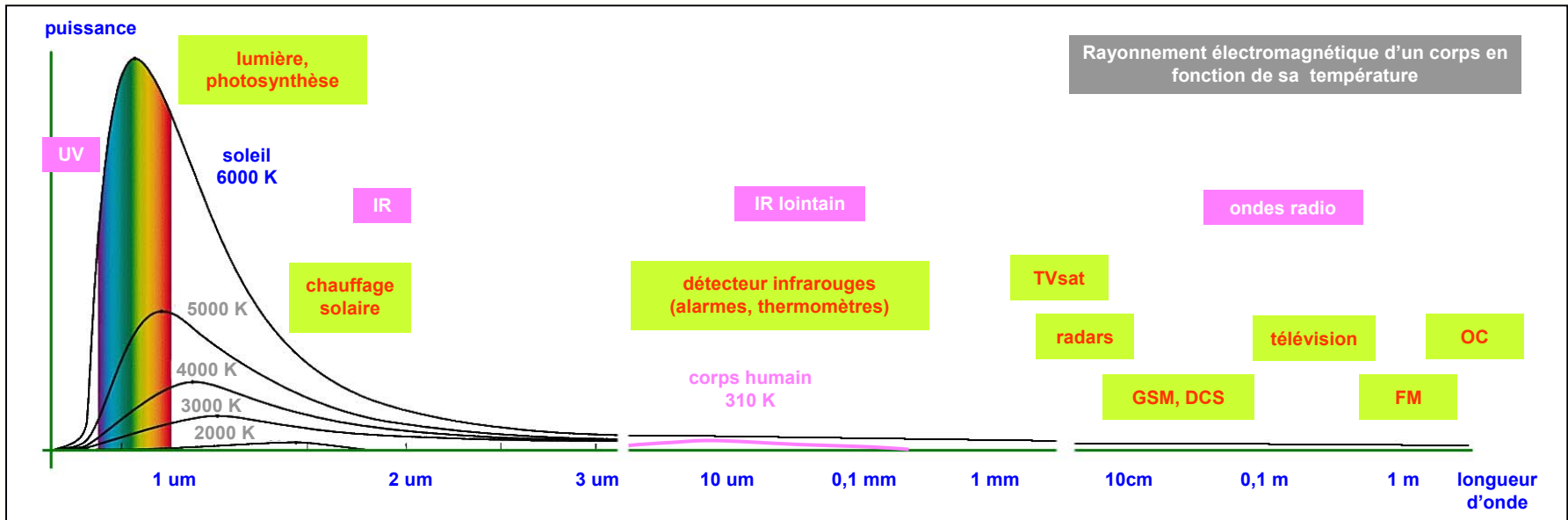
en IR



à 5 GHz



à 330 MHz



Remarque : le rayonnement du soleil dans la gamme des ondes radios, bien que beaucoup plus faible que dans le visible, reste néanmoins sensible et peut perturber la réception lorsque le soleil passe dans l'axe de l'antenne (en TV satellite par exemple).



10- Le bruit dans les composants



A cause de l'agitation thermique des électrons, de petites fluctuations de tensions et de courants apparaissent dans toutes les résistances et toutes les jonctions (diodes, transistors, circuit intégrés) :

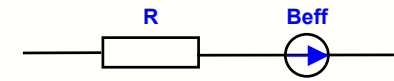
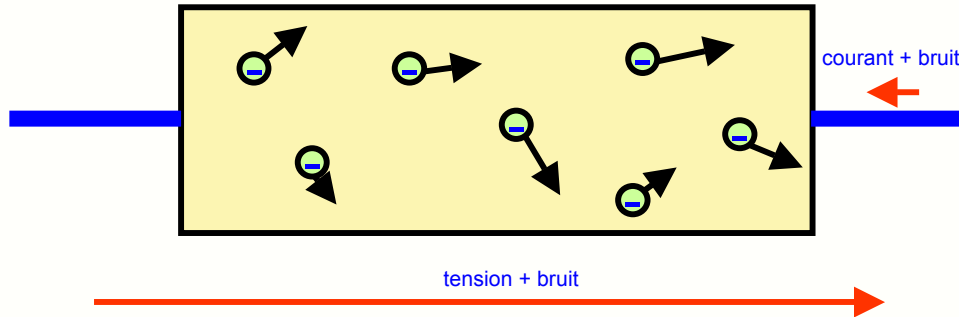


Schéma équivalent d'une résistance

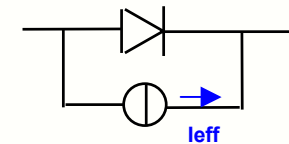


Schéma équivalent d'une diode

- tension de bruit aux bornes d'une résistance R :

$$B_{eff} = \sqrt{4kTRB_0}$$

- k : constante de Boltzmann $k=1,4 \cdot 10^{-23}$
- T = t + 273 : température absolue en Kelvin
- B₀ bande de fréquence utile

Exemple : une résistance de R = 100 kohms à la température ambiante de 20 degrés (T = 273 +20 = 293 K) produit un bruit blanc de valeur efficace B_{eff} = 40 uV dans une bande B₀ = 1 MHz

- courant de bruit de grenaille dans une jonction :

$$I_{eff} = \sqrt{2qIB_0}$$

- q : charge de l'électron $q=1,6 \cdot 10^{-19}$
- I : courant continu dans la jonction
- B₀ bande de fréquence utile

Exemple : pour une diode traversée par un courant de I = 1mA, la valeur efficace du bruit en courant vaut I_{eff} = 18 nA pour B₀ = 1 MHz.



11 - Densité spectrale d'un bruit



Comme le bruit dépend de la bande B_0 , il est plus pratique de le caractériser à une fréquence f_0 donnée par sa **densité spectrale D** qui est la tension de bruit qu'on aurait dans une bande de $B_0 = 1 \text{ Hz}$ autour de f_0 :

densité spectrale $D = \frac{B_{eff}}{\sqrt{B_0}}$ exprimée en $V/\sqrt{\text{Hz}}$

Exemple : résistance de valeur $R = 100 \text{ k}\Omega$ à température ambiante

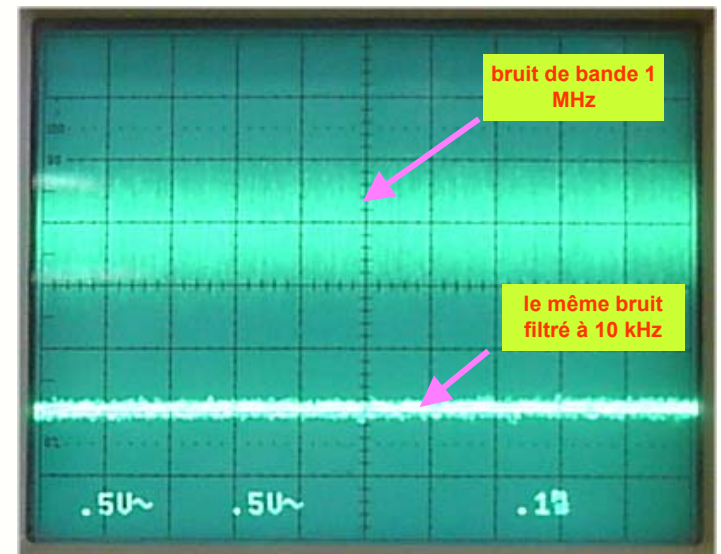
- densité spectrale de bruit : $D = \sqrt{4kTR} = 40 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- bruit thermique dans une bande de $B_0 = 1 \text{ MHz}$: $B_{eff} = D\sqrt{B_0} = 40 \mu\text{V}$

La valeur efficace d'un bruit de densité spectrale D donnée dépend donc de la bande B_0 , ce qui entraîne un certain nombre de conséquences pratiques qu'il ne faut pas perdre de vue :

- on peut diminuer une tension de bruit en filtrant le signal
- pour minimiser le bruit, on travaillera avec un bande passante juste égale à la largeur du spectre du signal
- dans un récepteur, c'est le filtre de fréquence intermédiaire qui est le plus étroit et qui va donc limiter le niveau du bruit en sortie
- quand on mesure un bruit, la bande passante de l'appareil de mesure peut le filtrer et donc modifier sa valeur : c'est pourquoi la mesure d'un bruit est délicate

Exemple : bruit de bande $B_0 = 1 \text{ MHz}$ filtré par un passe-bas coupant à 10 kHz

- bruit non filtré de valeur crête-crête $B_{cc} = 1,5 \text{ V}$, soit $B_{eff} = 0,25 \text{ V}$
- densité spectrale : $D = 0,25 \text{ mV}$
- valeur efficace du bruit filtré : $B'_{eff} = 0,025 \text{ V}$
- valeur crête-crête : $B'_{cc} = 0,15 \text{ V}$





12- Exemple du bruit d'un amplificateur opérationnel



Outre les bruits thermique et de grenaille, il y a dans les composants réels comme les AOps d'autres types de bruits :

- le bruit de **génération-recombinaison** lié à la création de paires électrons-trous se manifeste à des fréquences inférieures à quelques kHz
- le bruit en $1/f$ ou « flicker » décroît avec la fréquence et apparaît dans les semi-conducteurs et dans les résistances au carbone. Il est supérieur au bruit thermique en-dessous de quelques dizaines de Hz pour les meilleures technologies actuelles.

Le fabricant spécifie son composant en donnant les densités spectrales de bruit de 2 sources de bruit placées à l'entrée qui remplacent la totalité des sources de bruit liées aux résistances et aux jonctions internes au composant :

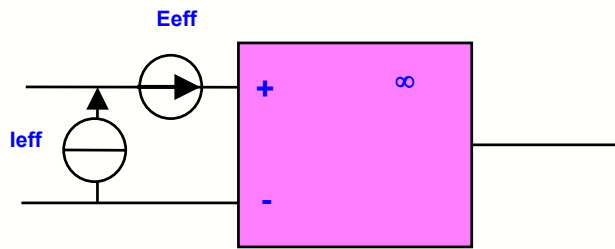
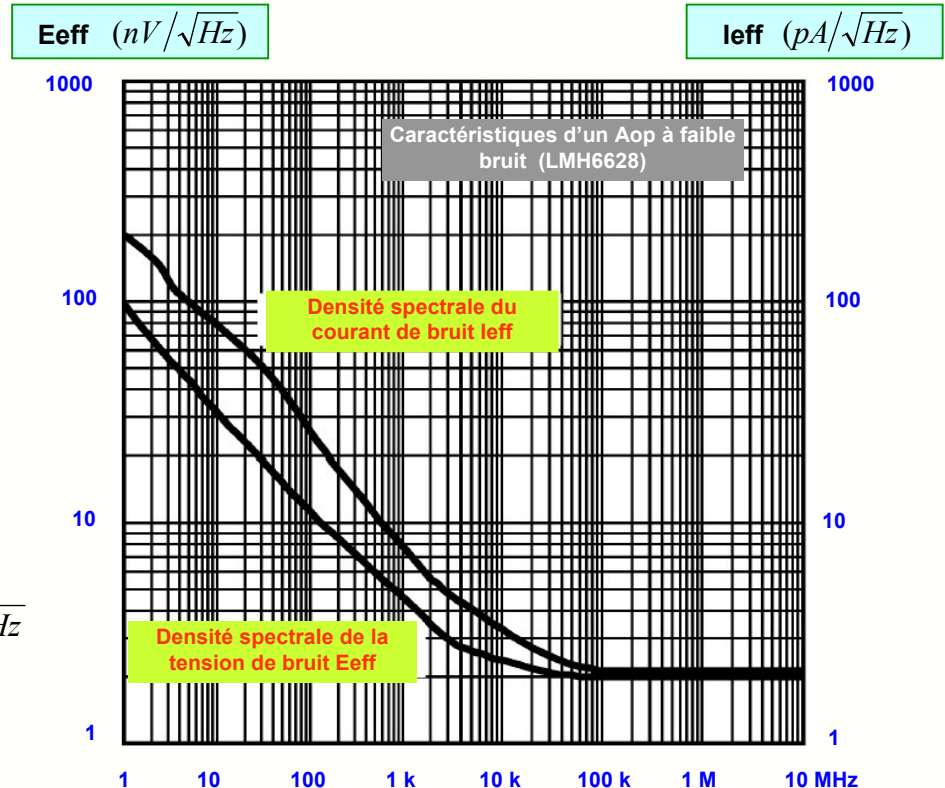


Schéma équivalent de bruit d'un AOp



Remarques :

▪ un Aop courant comme le 741 est caractérisé par une densité spectrale de bruit au delà de 1 kHz de $E_{eff} = 20nV/\sqrt{Hz}$

▪ pour des applications sensibles au niveau du bruit, on utilisera un Aop comme le LMH6628 qui est caractérisé par un bruit plus faible de l'ordre de $E_{eff} = 2nV/\sqrt{Hz}$



13- Définition du rapport signal-bruit



Pour caractériser l'importance du bruit qui affecte un signal, on définit le **rapport signal-bruit** :



- le signal a une valeur efficace S
- le bruit a une valeur efficace B

Le **rapport signal-bruit** est le rapport des puissances (ou des tensions) de signal et de bruit :

$$(S/B)_{dB} = 10 \log \left(\frac{\text{puissance du signal}}{\text{puissance du bruit}} \right) = 10 \log \left(\frac{S^2/R}{B^2/R} \right) = 20 \log(S/B)$$

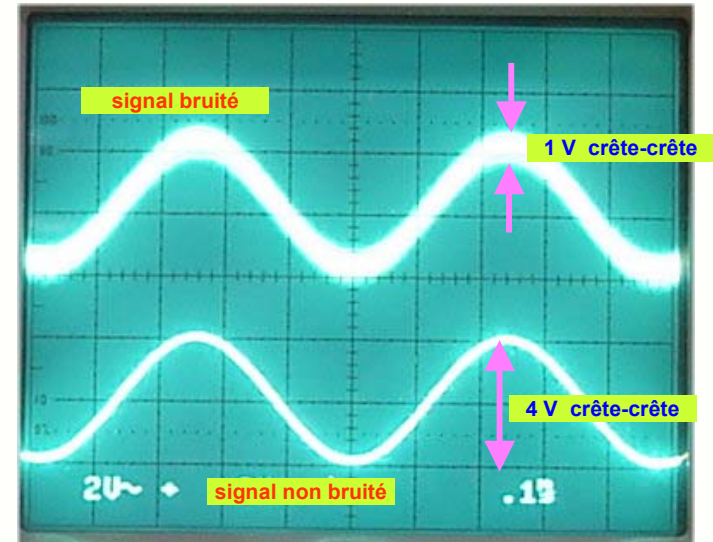
Exemple : signal sinusoïdal affecté de bruit

- le **signal** a une valeur crête-crête de 4V
- il a donc une valeur efficace **S = 1,41 V**
- le **bruit** a une valeur crête-crête d'environ 1V
- sa valeur efficace est donc **B = 1V/√2 = 0,71 V**

$$(S/B)_{dB} = 20 \log(1,41/0,71) = 18,4 \text{ dB}$$

Remarque : le rapport S/B n'est pas toujours exprimé en dB

Dans cet exemple, on aurait : **S/B = 1,41/0,71 = 2**





14- Facteur de bruit d'un quadripôle



Chaque quadripôle (amplificateur, mélangeur ...) rajoute son bruit propre et dégrade donc le rapport S/B :



- le rapport signal/bruit à l'entrée vaut S_e/B_e
- le rapport signal/bruit à la sortie vaut S_s/B_s

- le **facteur de bruit F** du quadripôle caractérise cette dégradation et se définit par :

$$F = \frac{S_e/B_e}{S_s/B_s}$$

Le quadripôle rajoutant son bruit propre, le facteur de bruit est toujours supérieur à 1.

- certains parlent de bruit en excès (**Excess Noise Ration** des anglo-saxons) défini par :

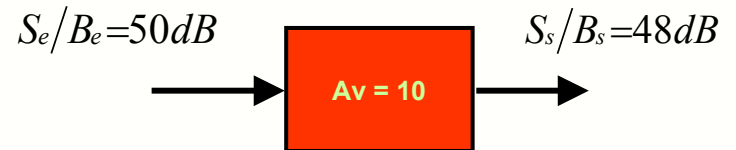
$$ENR = F - 1$$

- la **figure de bruit** (**Noise Figure** des anglo-saxons) correspond au facteur de bruit exprimé en dB :

$$NF_{dB} = (S_e/B_e)_{dB} - (S_s/B_s)_{dB}$$

Exemple : facteur de bruit d'un amplificateur

- le signal sinusoïdal mesuré à l'entrée vaut $S_e = 50 \text{ mV}$
- le rapport S/B à l'entrée vaut $S_e/B_e = 50 \text{ dB} = 316$
- l'amplificateur rajoute un bruit propre $B_p = 0,4 \text{ mV}$
- le bruit à l'entrée s'écrit : $B_e = 50 \text{ mV}/316 = 0,16 \text{ mV}$
- le bruit total en sortie vaut : $B_s = 10 \cdot B_e + B_p = 1,6 + 0,4 = 2 \text{ mV}$
- le rapport S/B en sortie vaut : $S_s/B_s = 10 \cdot 50/2 = 250 = 48 \text{ dB}$



$$F = 316/250 = 1,264 \quad ENR = F - 1 = 0,264 \quad NF = 50 - 48 = 2 \text{ dB}$$



15- Exemple de facteurs de bruit

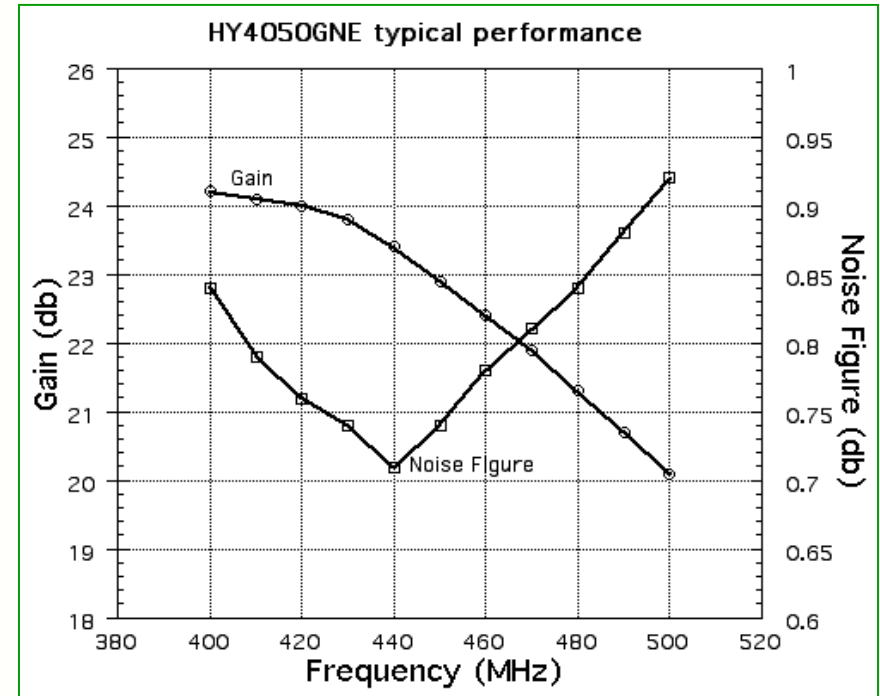


⇒ **amplificateur** fonctionnant dans la gamme 400 - 500 MHz :



Un bon amplificateur est caractérisé par :

- une amplification importante (ici supérieure à $G = 20$ dB)
- un facteur de bruit le plus faible possible (inférieur à $NF = 0,95$ dB)



⇒ **convertisseur** de réception pour TV satellite :

- cette tête de réception pour télévision satellite de fabrication Syntec est caractérisée par une figure de bruit $NF = 0,5$ dB
- le développement de la TV par satellite a vu baisser de façon sensible ce paramètre qui valait encore 3 ou 4 dB il y a quelques années.
- la diminution du facteur de bruit est intéressante car elle permet de diminuer le diamètre de la parabole





16- Quadripôles en cascade



Soit une chaîne de trois amplificateurs A1, A2 et A3 en cascade dont la tension d'entrée est notée S :



Chaque amplificateur amplifie le signal appliquée à son entrée et rajoute son bruit propre B1, B2 ou B3 :

$$S_1 = A_1 \cdot S + B_1$$

$$S_2 = A_1 \cdot A_2 \cdot S + A_2 \cdot B_1 + B_2$$

$$S_3 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot S + A_2 \cdot A_3 \cdot B_1 + A_3 \cdot B_2 + B_3$$

Ce résultat montre que le bruit du premier étage sera amplifié par tous les étages suivants et doit donc être le plus faible possible.

On s'efforce donc dans tous les cas de **minimiser le bruit propre du premier étage** d'une chaîne de traitement du signal :

- dans un récepteur, c'est **l'amplificateur RF d'entrée**, qui reçoit les signaux de faible amplitude de l'antenne, qui doit être à faible bruit
- dans un ampli basse fréquence, ce sont les **préamplificateurs** qui seront soignés au point de vue du bruit

Le **facteur de bruit de la chaîne** s'exprime par :

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{A_1} + \frac{F_3 - 1}{A_1 \cdot A_2} + \dots \approx F_1$$

dès que A1 est supérieure à 10

Conclusion : si l'amplification du premier étage est suffisante, le facteur de bruit d'une chaîne de traitement (récepteur, amplificateur ...) est pratiquement celui du premier étage qui doit donc toujours être « à faible bruit ».

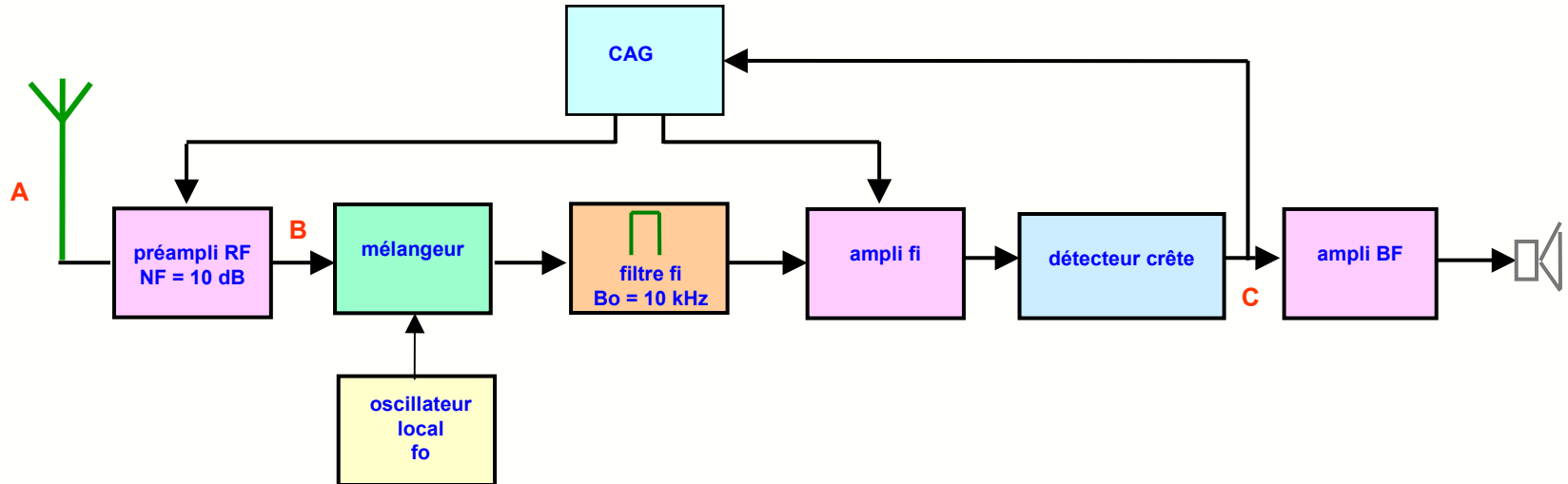


17- Bruit dans un récepteur AM



Pour calculer le bruit en sortie d'un récepteur AM à changement de fréquence, on admet pour simplifier que :

- l'environnement électromagnétique est calme et le seul bruit à l'entrée est le **bruit thermique de l'antenne 50 ohms**
- l'amplification du préampli RF est suffisante pour que les bruits thermiques des étages suivants soient négligeables
- le signal reçu a une amplitude de $S_{eff} = 0,01 \text{ mV}$



Les bruits de l'antenne et de l'ampli RF étant filtrés par le filtre fi, on calcule tous ces bruits à spectre très large dans la bande B_o :

▪ bruit thermique de l'antenne :
$$B_{eff} = \sqrt{4kTRB_o} = \sqrt{4.1,4 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 50 \cdot 10^4} = 92 \text{ nV}$$

▪ le rapport signal-bruit à l'entrée (A) vaut :
$$(S/B)_A = 20 \log(10/0,092) = 40,7 \text{ dB}$$

▪ il est dégradé en sortie du préampli RF (B) :
$$(S/B)_B = (S/B)_A - NF = 40,7 - 10 = 30,7 \text{ dB}$$

▪ il est amélioré d'un facteur 2 par le démodulateur (C) :
$$(S/B)_C = (S/B)_B + 6 \text{ dB} = 36,7 \text{ dB}$$

Remarque : on comprend bien que le filtre fi assurant la sélectivité du récepteur joue aussi un rôle important vis-à-vis du bruit

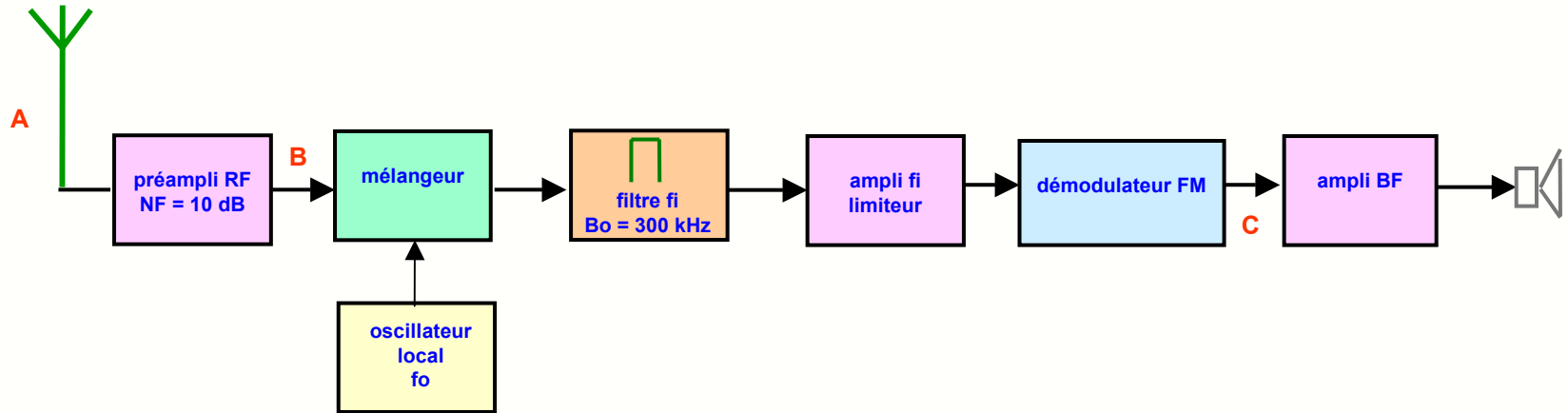


18- Bruit dans un récepteur FM



Pour calculer le bruit en sortie d'un récepteur FM à changement de fréquence, on admet pour simplifier que :

- l'environnement électromagnétique est calme et le seul bruit à l'entrée est le **bruit thermique de l'antenne 50 ohms**
- l'amplification du préampli RF est suffisante pour que les bruits thermiques des étages suivants soient négligeables
- le signal reçu a une amplitude de $S_{eff} = 0,01 \text{ mV}$ et l'indice de modulation est de $m = 5$



Les bruits de l'antenne et de l'ampli RF étant filtrés par le filtre fi, on calcule ces bruits dans la bande Bo qui est plus large qu'en AM :

▪ bruit thermique de l'antenne :
$$B_{eff} = \sqrt{4kTRB_o} = \sqrt{4 \cdot 1,4 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 50 \cdot 3 \cdot 10^5} = 500 \text{ nV}$$

▪ le rapport signal-bruit à l'entrée (A) vaut :
$$(S/B)_A = 20 \log(10/0,5) = 26 \text{ dB}$$

▪ il est dégradé en sortie du préampli RF (B) :
$$(S/B)_B = (S/B)_A - NF = 26 - 10 = 16 \text{ dB}$$

▪ il est amélioré par le démodulateur (C) :
$$(S/B)_C = (S/B)_B + 20 \log(3 \cdot m^2) = 16 + 37,5 = 53,5 \text{ dB}$$

Remarques :

- bien que le filtre fi soit plus large qu'en radiodiffusion AM, le rapport S/B est meilleur grâce à l'amélioration apportée par la démodulation FM
- en réalité, la qualité est encore meilleure que celle calculée à cause de l'action du limiteur qui supprime une partie du bruit par écrêtage

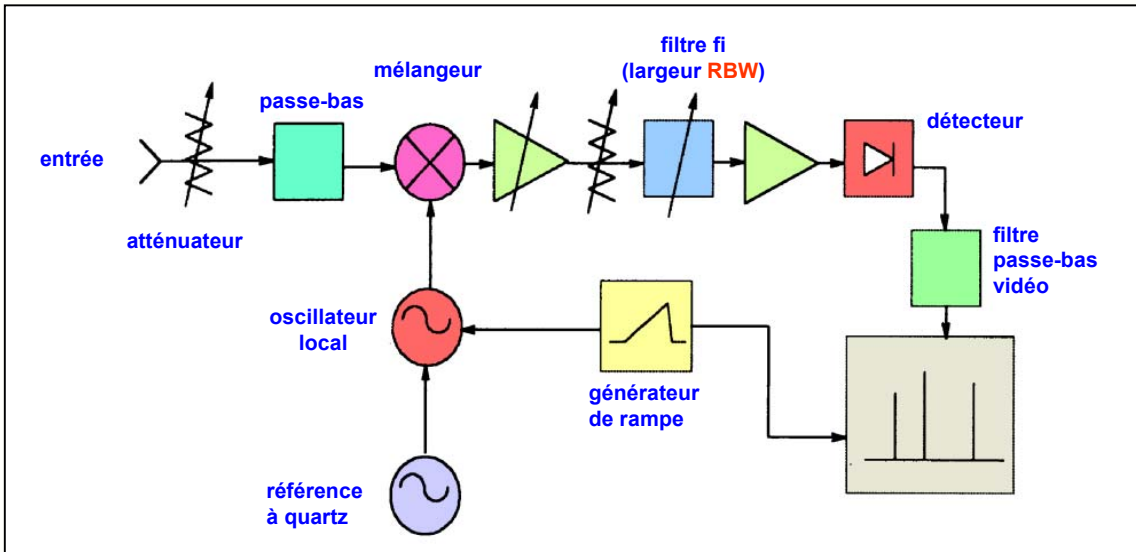


19- Bruit dans l'analyseur de spectre RF



Le structure d'un analyseur RF à changement de fréquence est très proche de celle d'un récepteur :

- le bruit de l'étage d'entrée (mélangeur et premier ampli fi) est prédominant et correspond au « plancher de bruit » de l'analyseur
- le niveau de bruit affiché en un point de l'écran est celui du bruit à l'entrée et du bruit propre filtrés par le filtre fi
- la largeur RBW (Resolution Band Width) peut être choisie par l'utilisateur en fonction du signal à visualiser



Spectre du bruit produit par le générateur HP

En l'absence de signal :

- le plancher de bruit est à -45 dBm pour une largeur RBW = 300 kHz
- la tension de bruit correspondante est de $B_{eff} = 1,26 \text{ mV}$
- la densité spectrale du bruit de l'analyseur vaut :

$$D = \frac{B_{eff}}{\sqrt{RBW}} = 2,3 \mu V / \sqrt{Hz}$$

En présence de signal :

- en BF, le niveau de bruit du générateur est de -10dBm, soit 70,8 mV
- la densité spectrale de bruit du générateur vaut :

$$D = \frac{B_{eff}}{\sqrt{RBW}} = 130 \mu V / \sqrt{Hz}$$



20- Mesure d'un rapport S/B avec l'analyseur RF



On visualise sur l'écran de l'analyseur de spectre un signal sinusoïdal de fréquence 50 kHz perturbé par du bruit :

- dans la bande 0-100 kHz, on peut remarquer que le bruit perturbateur est blanc (spectre uniforme)
- le niveau du bruit est au-dessus du plancher de bruit de l'analyseur, il s'agit donc bien d'un bruit injecté à l'entrée de l'analyseur

Mesure du signal :

- le niveau du signal correspond à l'amplitude de la raie et vaut :

$$S_{eff} = 0 \text{ dBm} = 224 \text{ mV}$$

Mesure du bruit :

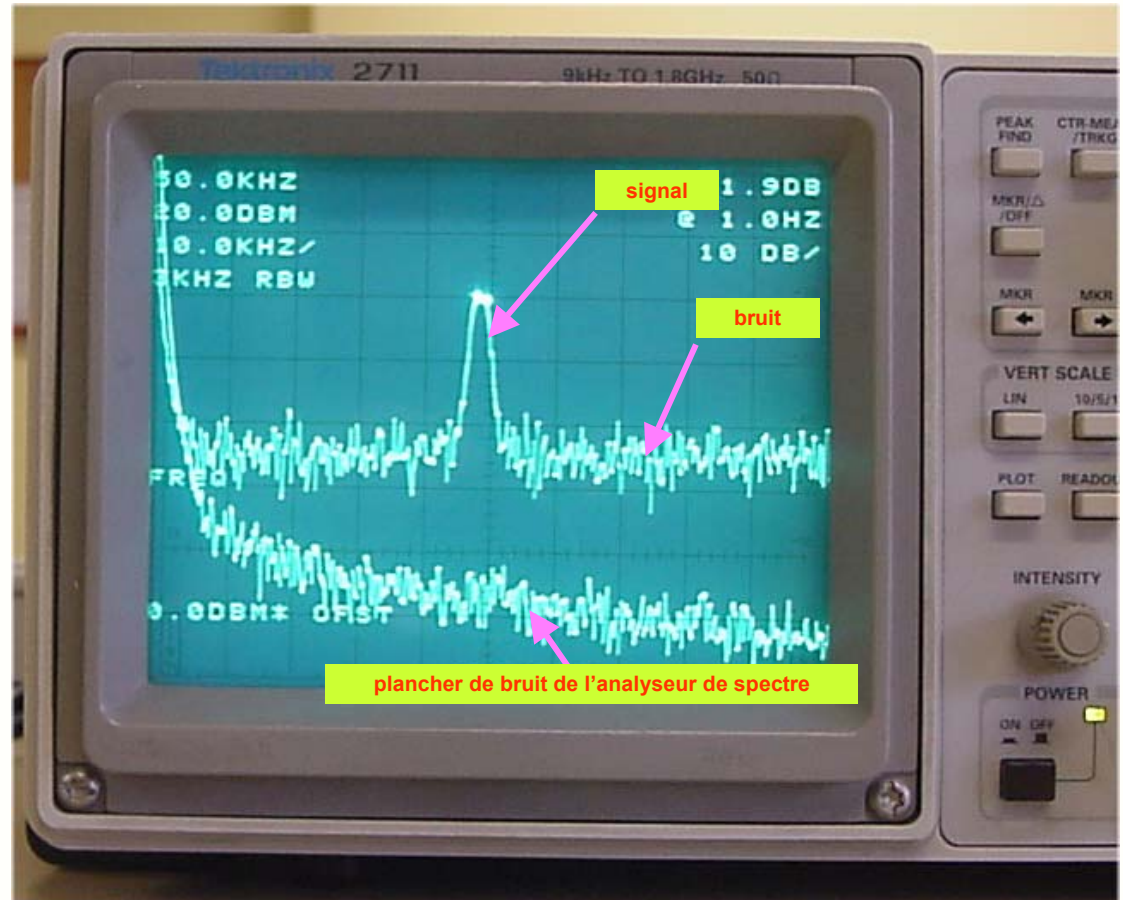
- le niveau de bruit est de -25 dBm
- ce niveau correspond à une tension de 12,6 mV
- la largeur du filtre fi est RBW = 3 kHz
- la densité spectrale de bruit vaut :

$$D = \frac{B_{eff}}{\sqrt{RBW}} = 230 \mu\text{V} / \sqrt{\text{Hz}}$$

Rapport S/B dans une bande de 10 kHz :

- le niveau de bruit vaut : $B_{eff} = 23 \text{ mV}$
- le signal a un niveau de $S_{eff} = 224 \text{ mV}$
- le rapport S/B vaut donc :

$$\frac{S_{eff}}{B_{eff}} = \frac{224}{23} = 9,7 = 19,8 \text{ dB}$$





21 - Mesure du rapport S/B de France-Inter



On visualise sur l'écran de l'analyseur de spectre à l'aide d'une antenne une partie de la bande FM centrée sur France-Inter à 95,7 MHz :

Mesure du signal :

- le niveau du signal correspond à l'amplitude de la raie et vaut :

$$S_{eff} = -55dBm = 398\mu V$$

Mesure du bruit :

- le niveau de bruit mesuré est de : $B_{eff} = -93dBm = 5\mu V$ (RBW = 30 kHz)

soit $B_{eff} = 5\mu V \sqrt{\frac{300}{30}} = 15,8\mu V$ dans une bande de $B_0 = 300$ kHz

Rapport S/B à l'entrée du tuner :

$$\frac{S_{eff}}{B_{eff}} = \frac{398}{15,8} = 25,2 = 28dB$$



Remarques importantes :

- cette mesure est probablement **fausse**, car le plancher de bruit est sans doute celui de l'analyseur et ne correspond pas au bruit capté
- dans une mesure de bruit à l'analyseur de spectre, il faut toujours s'assurer qu'on mesure bien le bruit injecté à l'entrée car le plancher de bruit dépend à la fois du **bruit propre de l'analyseur et du bruit injecté à l'entrée**
- une manière simple de s'en assurer est de débrancher l'antenne : si le plancher de bruit ne bouge pas, c'est qu'on vient de mesurer le bruit propre de l'analyseur
- on peut minimiser le bruit de l'analyseur de spectre en respectant certaines contraintes simples au niveau des réglages : **atténuateur d'entrée réglé au minimum** et **largeur du filtre d'analyse RBW minimale**
- ces remarques illustrent les difficultés pratiques rencontrées lors des mesures de bruit et de rapport S/B



22- Bruit blanc et courbe de réponse



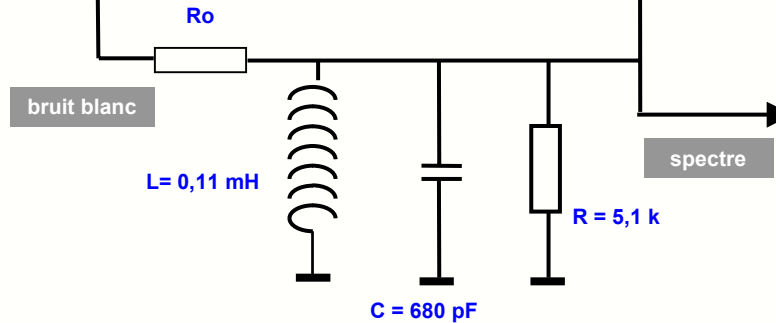
Dans un système de traitement du signal le bruit est toujours un phénomène gênant qu'on tente de minimiser, mais on peut aussi faire des mesures intéressantes avec un générateur de bruit.

Exemple : visualisation d'une courbe de réponse

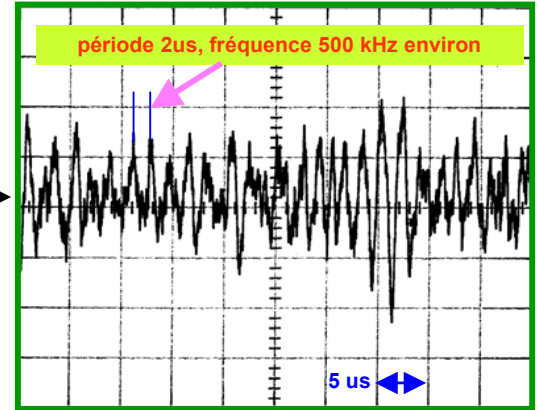


Valeurs théoriques :

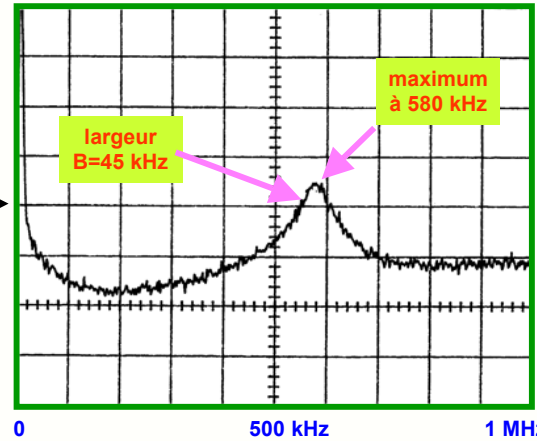
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 582\text{kHz}$$

$$B = \frac{1}{2\pi RC} = 45,8\text{kHz}$$


oscillogramme



spectre



Si on envoie un bruit blanc contenant toutes les fréquences sur l'entrée d'un système (amplificateur, filtre, enceinte acoustique ...) :

- certaines de ces fréquences vont être favorisées, d'autres atténuées
- le **spectre du signal en sortie du filtre reproduit donc la courbe de réponse du système**
- une source de bruit blanc associée à un analyseur de spectre permettent ainsi de visualiser la **transmittance** du système

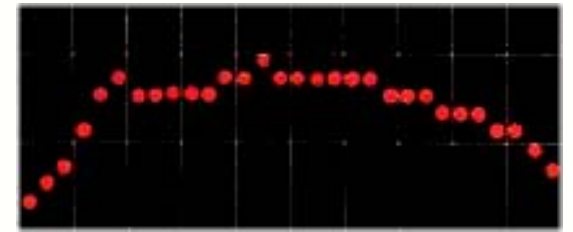
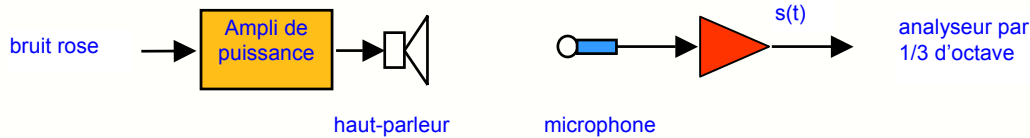
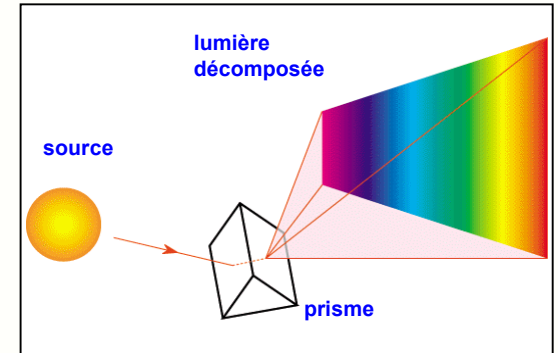


23- Tests audio en bruit rose



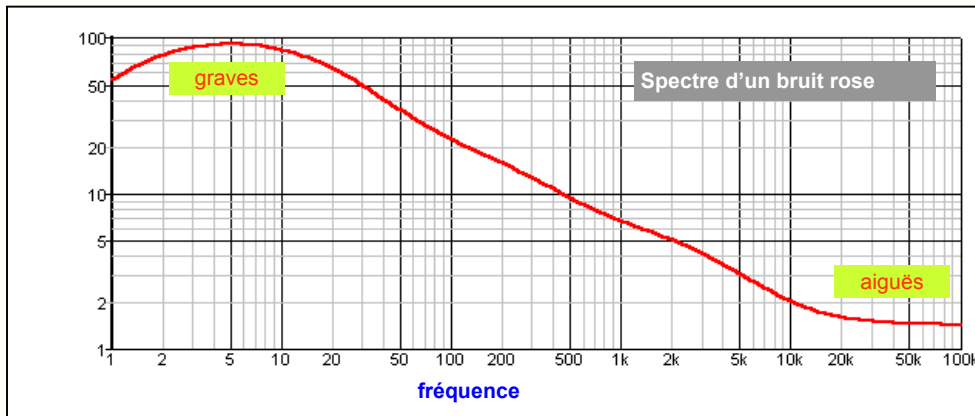
Pour la visualisation de courbes de réponse en audio, on utilise souvent une **source de bruit rose** associée à un analyseur de spectre simplifié constitué d'une batterie de filtres passe-bande :

- la lumière blanche est composée de radiations de longueur d'onde entre 400 et 800 nm
- si on privilégie les grandes longueurs d'onde (fréquences basses) la lumière devient rouge et bleue dans le cas inverse
- de la même façon, un bruit peut être coloré et on parle de **bruit rose** lorsqu'il contient davantage de fréquences basses,
- les bruits roses sont utilisés pour les **tests audio** (amplis, enceintes) car ils ont une puissance par octave ou par tiers d'octave constante



graves

aiguës



L'analyseur 1/3 d'octave est constitué de :

- 30 filtres passe-bande entre 20 Hz et 20 kHz suivis d'un indicateur de niveau
- il y a 3 filtres par octave soit de 20 à 25 Hz, puis de 25 à 31,5Hz ... et enfin de 16255 à 20480 Hz
- la largeur de ces filtres augmentant avec la fréquence, il faut donc utiliser un bruit rose pour équilibrer la réponse du système

Son : bruit blanc

Son : bruit rose

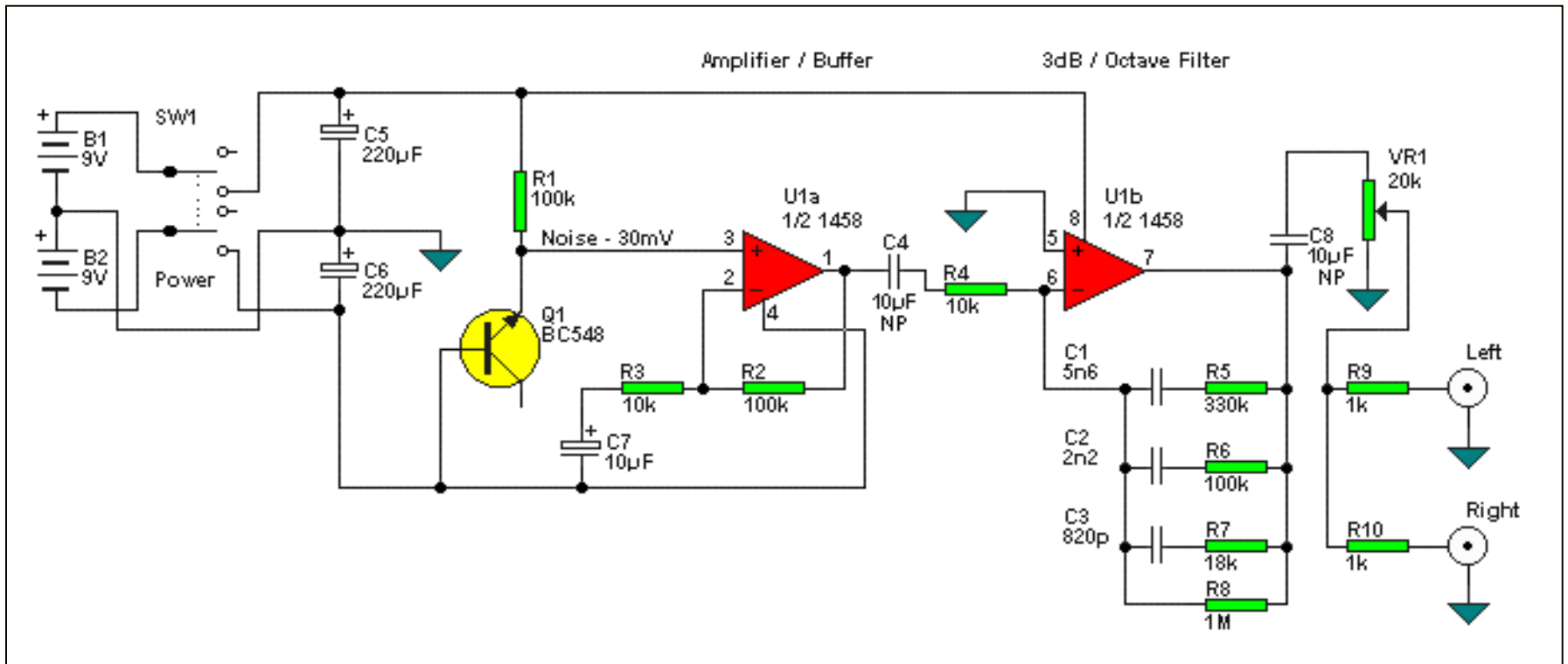


24- Exemple de générateur de bruit rose analogique



Un bruit rose est en général produit par filtrage d'un bruit blanc :

- dans ce montage la source de bruit thermique est la [jonction base-émetteur](#) d'un transistor BC548 polarisée en inverse
- le bruit ainsi produit est amplifié, puis filtré par un passe-bas particulier qui a une pente de -10dB/décade



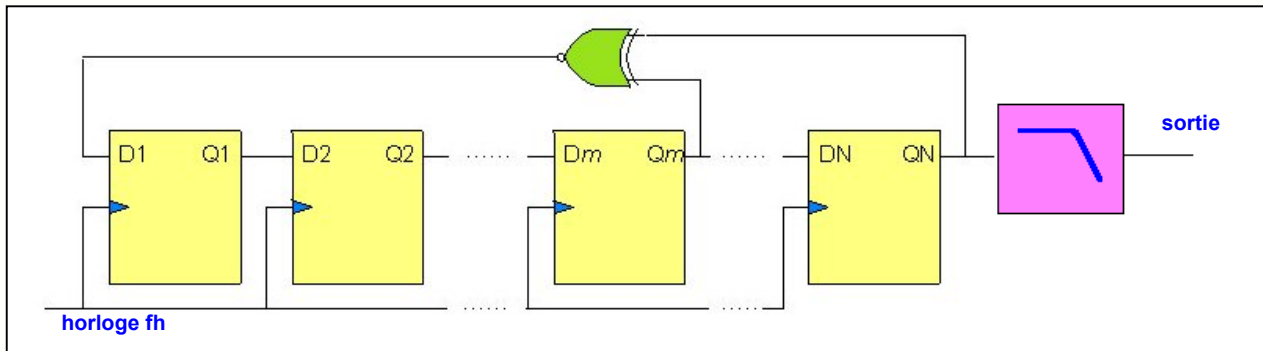


25- Exemple de générateur de bruit blanc numérique



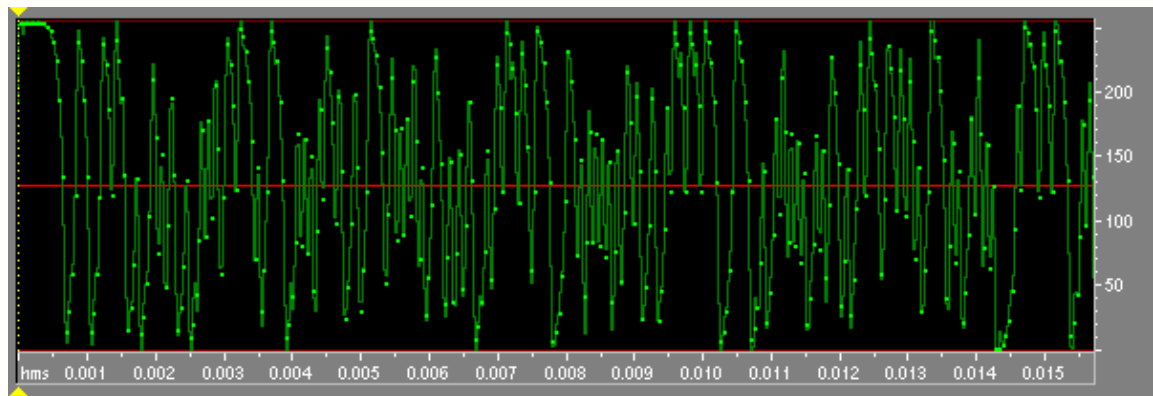
Une technique souvent utilisée pour produire un bruit est de fabriquer une séquence binaire pseudo-aléatoire de « 1 » et de « 0 » :

- un registre à décalage est composé de N bascules mises en cascade
- la sortie de la dernière bascule est "multipliée" (ou-exclusif) par la sortie de la m-ième bascule
- le résultat de cette multiplication logique est réinjecté à l'entrée de la première bascule
- la séquence binaire est filtrée par un passe-bas pour obtenir un signal pseudo-aléatoire
- c'est avec cette technique que le générateur HP utilisé pour les démonstrations génère le bruit



- Exemple :**
- $N = 15$ et $m = 4$ ou 7
 - horloge $f_h = 22 \text{ kHz}$
 - la périodicité de la séquence de sortie est de $32767 \cdot T_h = 1,5 \text{ s}$
 - le spectre est un spectre de raies espacées de $1/1,5 = 0,66 \text{ Hz}$
 - l'enveloppe est en $\sin(X)/X$

- Remarques :**
- avec $N = 7$ la périodicité est de $127 \cdot T_h$, le fondamental de 173 Hz s'entend bien
 - avec $N = 10$ la périodicité est de $1023 \cdot T_h$, le fondamental de $21,5 \text{ Hz}$ s'entend encore
 - avec $N = 15$ la périodicité est de $32767 \cdot T_h$, le fondamental de $0,66 \text{ Hz}$ ne s'entend plus



Son : bruit créé avec $N = 7$

Son : bruit créé avec $N = 10$

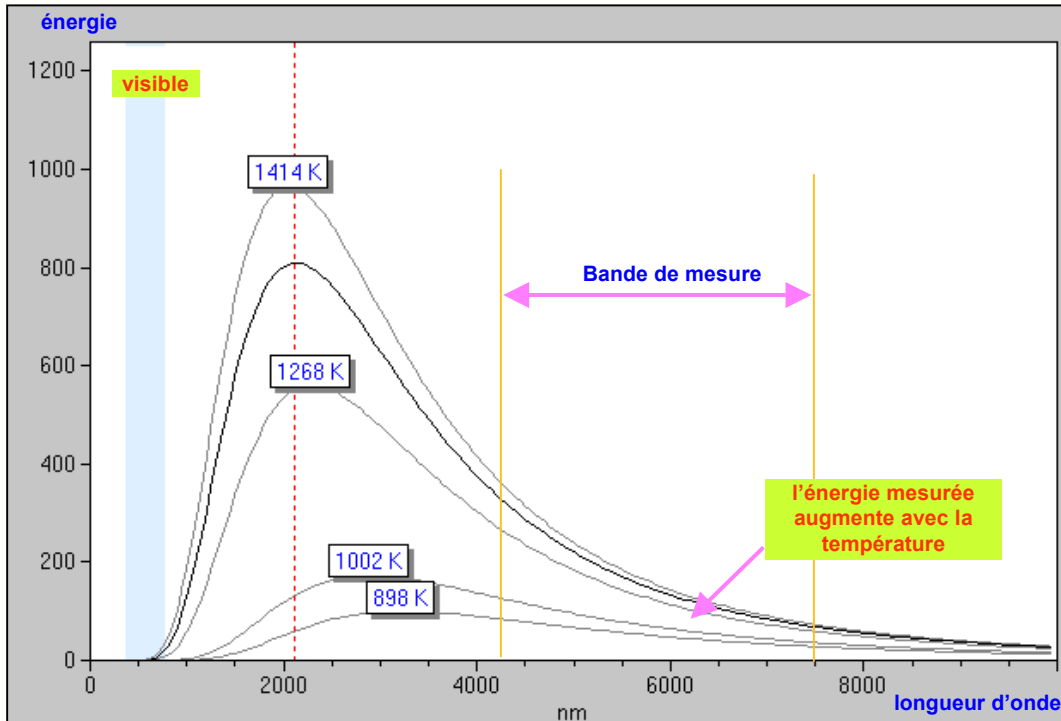
Son : bruit créé avec $N = 15$

26- Application à la mesure de température



Les thermomètres sans contact utilisent le rayonnement infrarouge pour mesurer sans contact la température de surface d'objets :

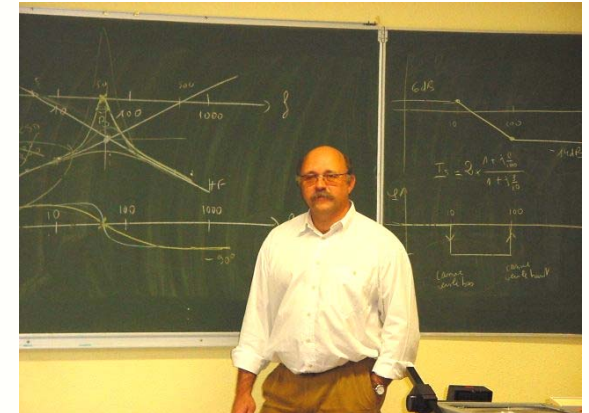
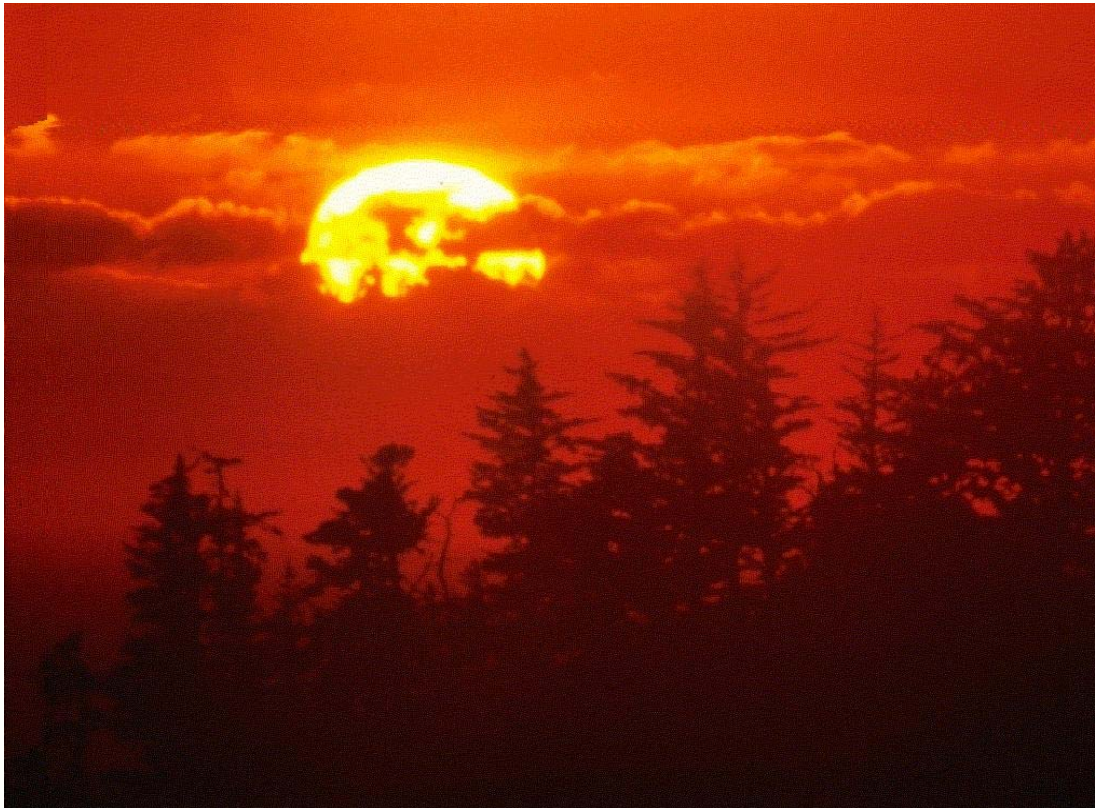
- tout corps ayant une température supérieure au zéro absolu (-273°C) rayonne de l'énergie due au mouvement des électrons
- ce **bruit thermique électromagnétique** augmente avec la température du corps et son spectre est large avec un maximum dans l'infrarouge, voire dans le visible pour des températures très élevées (soleil, ampoule électrique ...)
- le capteur d'un thermomètre infrarouge détecte ce rayonnement dans une certaine bande de fréquences et un convertisseur les transforme en signaux électriques, qui sont alors retransmis sur un indicateur numérique
- la difficulté de cette mesure provient du fait que l'énergie émise dépend aussi de **l'état de surface** du corps émetteur



Applet : rayonnement d'un corps en fonction de sa température



Coucher de la plus belle des sources de bruit ...



FIN