Propagation des ondes kilométriques, expérimentations (T.I.P.E. 2014-2015 de Yohan)

Sommaire

1/ Rappel des expérimentations précédentes relatives aux ondes métriques et décamétriques

2/ Objet de cette partie (ondes kilométriques)

3/Objet de cette partie (ondes kilométriques)
3 – a – Émetteurs dont on va écouter les signaux au lycée de Valenciennes
3 – b – Cheminement des ondes de l'émetteur jusqu'à Valenciennes, évaluation des champs électriques au niveau de l'antenne de réception
3 – c – Évaluation de la puissance délivrée par l'antenne de réception à l'entrée du récepteur

4/ Appareil de mesure (S-mètre) de la force du signal reçu à l'entrée d'un récepteur

5/ Étalonnage du S-mètre

6/ Observation des niveaux de signaux de certains émetteurs reçus à Valenciennes

7/ Discussion des résultats et conclusion

&&&&&&&&&&&&

<u>Annexe 1</u> :
module du champ électrique (onde de sol) en fonction de la fréquence et de la distance
<u>Annexe 2</u> :
module du champ électrique (onde ionosphérique) en fonction de la fréquence et de la distance
<u>Annexe 3</u> :
rappels sur la notion de décibel (dB, dBW, dBmW ou dBm, dBV, dBµV, etc.)

<u>1/ Rappel des expérimentations précédentes relatives aux ondes métriques et décamétriques</u> :
En ce qui concerne les ondes métriques (bande FM), on s'est intéressé à la propagation par guide d'onde (de bas en haut d'une tour hertzienne) et à celle en espace libre à portée optique (quelques dizaines de kilomètres..
En ce qui concerne les ondes décamétriques, on s'est intéressé à :
- l'émission depuis la France d'une onde hertzienne à travers l'ionosphère vers l'Amérique du Nord
- la mesure de sa réception éventuelle là-bas (où, quel niveau de champ électromagnétique)
- l'observation simultanée de l'état de l'ionosphère et de ses facteurs (soleil, champ géomagnétique)
- l'utilisation de stations radio (émettrice en France, réceptrices aux USA)
- l'utilisation temps réel d'observatoires (USA, Australie, Allemagne, Belgique, satellite SOHO)
- la recherche d'une modélisation de l'ionosphère
- la recherche de l'optimum pour assurer la liaison (fréquence, heure, etc.)

<u>2/ Objet de cette partie (ondes kilométriques)</u> :
Elle regroupe les opérations suivantes :
- tester les modèles ionosphériques mais, cette fois, à la réception à Valenciennes
- pour cela utiliser des émetteurs dont on connaît les caractéristiques (fréquence, puissance, localisation, antenne)

- étudier le cheminement des ondes entre émetteurs et Valenciennes
- calculer les niveaux théoriques donnés par les modèles de propagation ionosphériques
- utiliser un récepteur très sensible de 150 kHz à 30 MHz pour la réception à Valenciennes
- l'étalonner à l'aide des matériels du lycée Wallon (générateur HF, oscilloscope, etc.)
- mesurer les niveaux de champ reçus à Valenciennes
- comparer champs constatés et champs théoriques
- analyser les écarts entre résultats théoriques et résultats expérimentaux

3/Détails de cette partie :

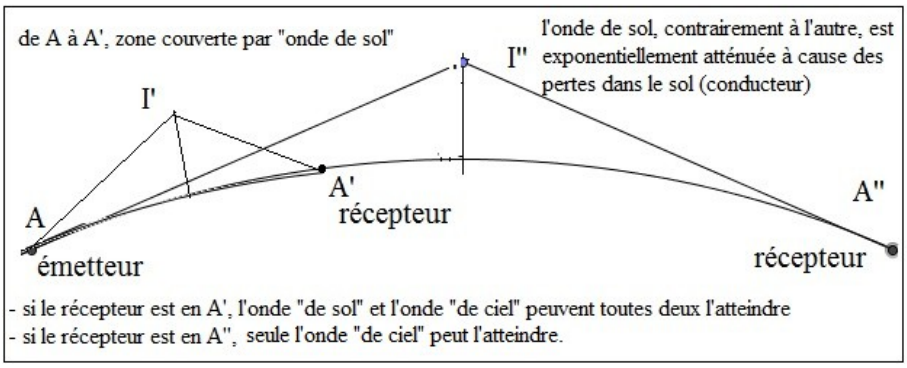
3 – a – Émetteurs dont on va écouter les signaux au lycée de Valenciennes :
On va se concentrer sur des émetteurs de radiodiffusion :
- assez lointains pour que leurs ondes cheminent via l'ionosphère (au moins partiellement)
- assez puissants pour que leurs signaux reçus à Valenciennes soient « forts et clairs » même avec une antenne de réception aux performances modestes (quelques mètres d'un fil tendu en salle)

Cette description correspond aux stations de la gamme dite des grandes ondes ou GO[1] qui peuvent être reçus dans le Nord de la France ; on va en retenir 2 très connues, qui sont la plus haute et la plus basse en fréquence sur la bande :
162 kHz France Inter, dans le centre de la France, à Allouis, près de Vierzon
234 kHz RTL au Luxembourg, donc près de la frontière Nord-Est de la France.

On connaît leur puissance et leur situation géographique (donc leur distance à Valenciennes) :

Nom de l'émetteur	longueur d'onde en m	fréquence en kHz	puissance en kW	latitude en degrés	longitude en degrés	distance de Valenciennes
France Inter	1852	162	2000	47,16 Nord	2,20 Est	365 km
RTL	1282	234	2000	49,73 Nord	6,32 Est	211 km

3 – b – Cheminement des ondes de l'émetteur jusqu'à Valenciennes, évaluation des champs électriques au niveau de l'antenne de réception :
Ces ondes se propagent simultanément de 2 façons :
- par diffraction sphérique le long du sol (surtout à courte et moyenne distance de l'émetteur car l'absorption par le sol est importante ; on parle alors d'une « onde de sol »),
- par réflexion ionosphérique sur les couches les plus basses, couches D et E (surtout à des distances trans-horizon ; on parle alors d'une « onde de ciel »)



Les modèles physiques de propagation, qui prennent en compte les caractéristiques électriques du sol (conductivité, permittivité diélectrique), conduisent alors à des équations très compliquées, qu'on ramène dans la pratique soit à des abaques (cf. annexe 1), soit à des formules empiriques basées sur des

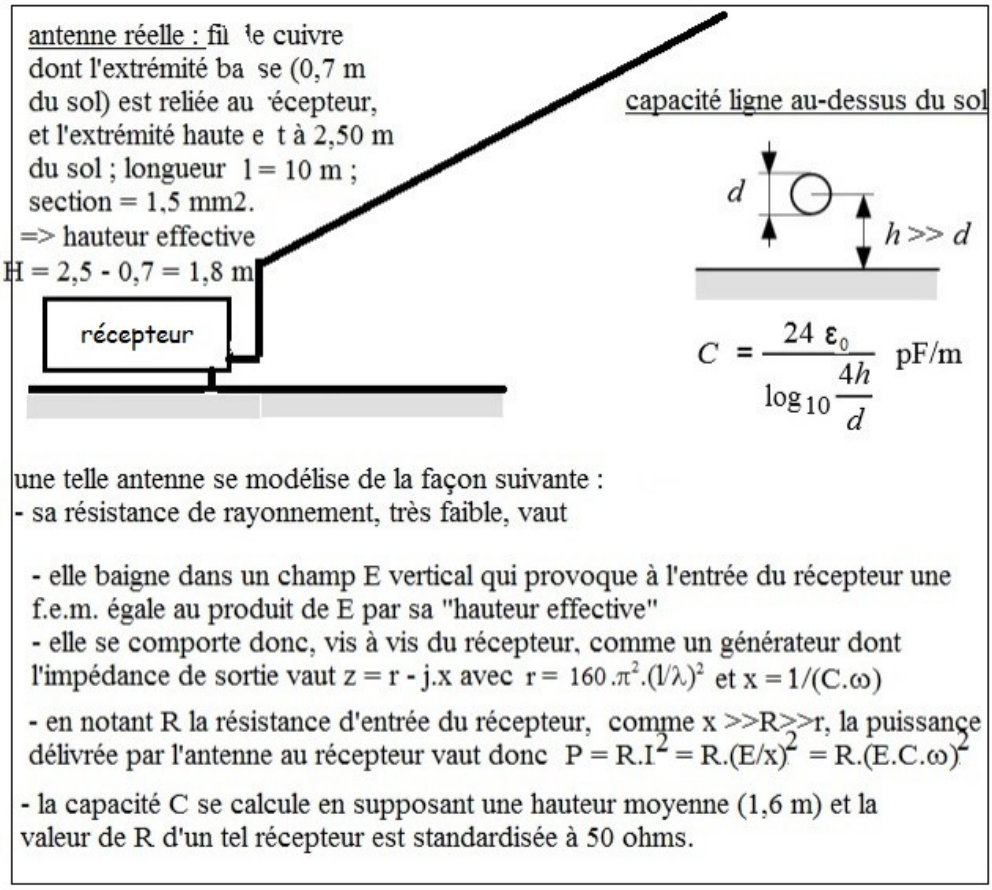
1 GO ou « grandes ondes », de 150 à 300 kHz.

recommandations de la CCIR[2] (cf. annexe 2).
On peut donc en déduire, pour chaque émetteur, la valeur des modules des 2 champs électriques (onde de sol et onde de ciel). Ces 2 champs « arrivent à destination » avec un déphasage qui peut aller de 0 à 180° (c'est à dire du doublement ou de l'effacement pour deux signaux de même module) variable suivant l'état de l'ionosphère traversée (variation qui peut être très rapide : ce qu'on appelle le fading) ; les récepteurs actuels sont équipés d'un système dit de C.A.G. (contrôle automatique de gain) qui a pour objet de lisser ces variations. On fera donc les calculs en prenant la moyenne des modules des deux champs (onde de ciel et onde de sol).Ces abaques et ces formules conduisent aux niveaux de champ électriques suivants pour nos 2 émetteurs, exprimés en dBµV/m, puis en µV/m, puis en V/m :

France Inter : E (en dBµV/m) = 73 dBµV/m => E (en µV/m) = $10^{73/20}$ = 4467 µV/m = 0,004467 V/m
RTL : E (en dBµV/m) = 75 dBµV/m => E (en µV/m) = $10^{75/20}$ = 5623 µV/m = 0,005623 V/m

3 – c – Évaluation de la puissance délivrée par l'antenne de réception à l'entrée du récepteur :

L'antenne étant très courte par rapport aux longueurs d'onde utilisées, le modèle suivant peut être adopté :



Ce qui précède conduit aux valeurs suivantes :

- les fréquences (et, donc, les longueurs d'ondes) étant très voisines, on prendra les mêmes pour les 2 émetteurs : Θ= 1500 m => f = 200 kHz => $\omega = 2.\pi.f = 1{,}256.10^6$ rad/s
- $r = 160.3{,}14^2.(10/1500)^2 = 0{,}07\ \Omega$
- $C = 24.(8{,}854.10^{-12})/\log(4.1{,}6/(1{,}4.10^{-3})) = 58$ pF
- $x = 1/(C.\omega) = 1/(58.1{,}256.10^{-6}) = 10^6/73 = 13713\ \Omega$
- $P = R.E^2/x^2 \Rightarrow (P/E^2) = R/x^2 = 50/13713^2 = 0{,}27.10^{-6}$ Watts/(V/m)²

D'où la puissance délivrée par l'antenne de réception pour chaque émetteur :

2 *CCIR*, « Comité Consultatif International des Radiocommunications » ((appelé ainsi jusqu'en 1993) : service de l'ONU qui traite les questions techniques et d'exploitation au sein de l'UIT (Union Internationale des Télécommunications).

Nom de l'émetteur	E (champ électrique) exprimé en µV/m	Puissance reçue exprimée en pW	Puissance reçue exprimée en dBmW
France Inter	4467	5,39	-83
RTL	5623	8,54	-81

On a donc, à ce stade, évalué les niveaux de puissance reçue par le récepteur que donnent la théorie et les modèles de propagation ; il reste à les comparer avec les niveaux réellement mesurés en laboratoire à Valenciennes et, pour cela, d'abord décrire l'appareil de mesure (récepteur et son S-mètre) puis l'étalonner.

4/ <u>Appareil de mesure (S-mètre) de la force du signal reçu à l'entrée du récepteur</u> :
Il s'agit du S-mètre (abréviation de *Signal Strength Meter*) du récepteur de trafic. Cet appareil donne une indication de la force du signal à l'entrée du récepteur sous forme de points S (historiquement, aux débuts de la radio, dans les années 1920, on se contentait d'une échelle d'impressions auditives, allant de S1 (à peine audible) à S9 (très fort). De nos jours, les constructeurs s'efforcent de respecter une échelle plus précise mais qui n'est malheureusement pas normalisée, surtout pour les fréquences basses comme celles qui nous intéressent ici (inférieures à 300 kHz).
D'où la nécessité d'étalonner le S-mètre à l'aide d'un générateur HF (le RIGOL 1012 du lycée Wallon) et d'atténuateurs de 0 à 100 dB (nécessaires compte tenu des faibles niveaux des signaux en provenance des émetteurs entendus).
Le récepteur de radio est le suivant :

Le banc d'étalonnage est le suivant :

Le générateur est réglé sur un signal sinusoïdal à la fréquence de chaque émetteur (162 et 234 kHz) d'amplitude U_{pp} = 4 mV => $U_{crète}$ = 2 mV => $U_{efficace}$ = 2 x √2/2 = 1,414 mV.

Ce générateur étant conçu pour débiter sur une charge de 50 ohms, la puissance délivrée est
$P = (1{,}414 \times 10^{-3})^2 / 50 = 4.10^{-8}$ W $= 4.10^{-5}$ mW
=> si on exprime cette puissance en dBmW , 10xlog (4.10-5) = – 44 dBmW
=> en intercalant des atténuateurs entre générateur et récepteur, par exemple de 20 à 60 dB on connaît avec précision la puissance injectée (en constatant que l'observation est la même pour les 2 fréquences, ce qui est logique puisqu'elles sont proches l'une de l'autre) :

atténuateur	0dB	10 dB	20 dB	30 dB	40 dB	50 dB	60 dB
puissance(mW)	4.10^{-5}	4.10^{-6}	4.10^{-7}	4.10^{-8}	4.10^{-9}	4.10^{-10}	4.10^{-11}
soit, en dBmW	-44 dBmW	-54 dBmW	-64 dBmW	-74 dBmW	-84 dBmW	-94 dBmW	-104 dBmW
S lue (S-mètre)	non testé*	non testé*	S8	S6	S4	S0	S0

*pour des raisons de protection du récepteur (risque de détérioration de son étage d'entréeen cas de signaux trop forts)

On constate donc qu'aux fréquences considérées, l'échelle du S-mètre est linéaire entre S4 et S8 (en raison de 5 dB par point S), mais qu'elle ne l'est plus à des niveaux de signaux plus faibles. Et, comme pour tout appareil de mesure qu'on veut étalonner, il faut se préoccuper du degré d'incertitude : d'après les graduations on peut l'estimer à +/- un demi-point S, c'est-à-dire +/- 2,5 dBmW.

On va maintenant comparer, pour chacun des 2 émetteurs (RTL et France Inter), le niveau théorique (obtenu par le calcul) et le niveau observé de leurs signaux reçus à Valenciennes.

6/ Observation des niveaux de signaux de certains émetteurs (RTL et France Inter) reçus à Valenciennes :

Elle est faite à partir de l'écoute des 2 stations en lisant les valeurs données par sur le S-mètre après étalonnage. Qu'observe-t-on ? :

- pour les 2 stations, le niveau observé au S-mètre est identique et égal à S4, donc, d'après l'étalonnage précédent, correspond à
- 4.10^{-9} mW, soit (si on l'exprime en dBmW) -84 dBmW
- compte tenu de l'incertitude de la lecture, cela signifie que les signaux de ces émetteurs sont reçus entre (-84-2,5) = -86,5 dBmW et (-84+2,5) = -81,5 dBmW
- intervalle qu'on peut arrondir à (-86 dBmW) et (-82 dBmW)
- or, le calcul théorique donnait (-81 dBmW) pour RTL et (-83 dBmW) pour France Inter

7/ Discussion des résultats et conclusion :

On constate donc que le signal de France Inter se situe bien dans la fourchette, alors que celui de RTL est légèrement (1 dB) en-dessous.
Cet écart s'explique peut-être par des différences d'ionisation de la haute atmosphère sur le parcours entre l'Est de la France et Valenciennes par rapport à l'ionisation entre le centre de la France et Valenciennes ?
Quoi qu'il en soit, l'écart est minime et peu significatif.
Le modèle théorique rend donc plutôt bien compte de la réalité des niveaux observés.

Annexe 1 : module du champ électrique (onde de sol) en fonction de la fréquence et de la distance

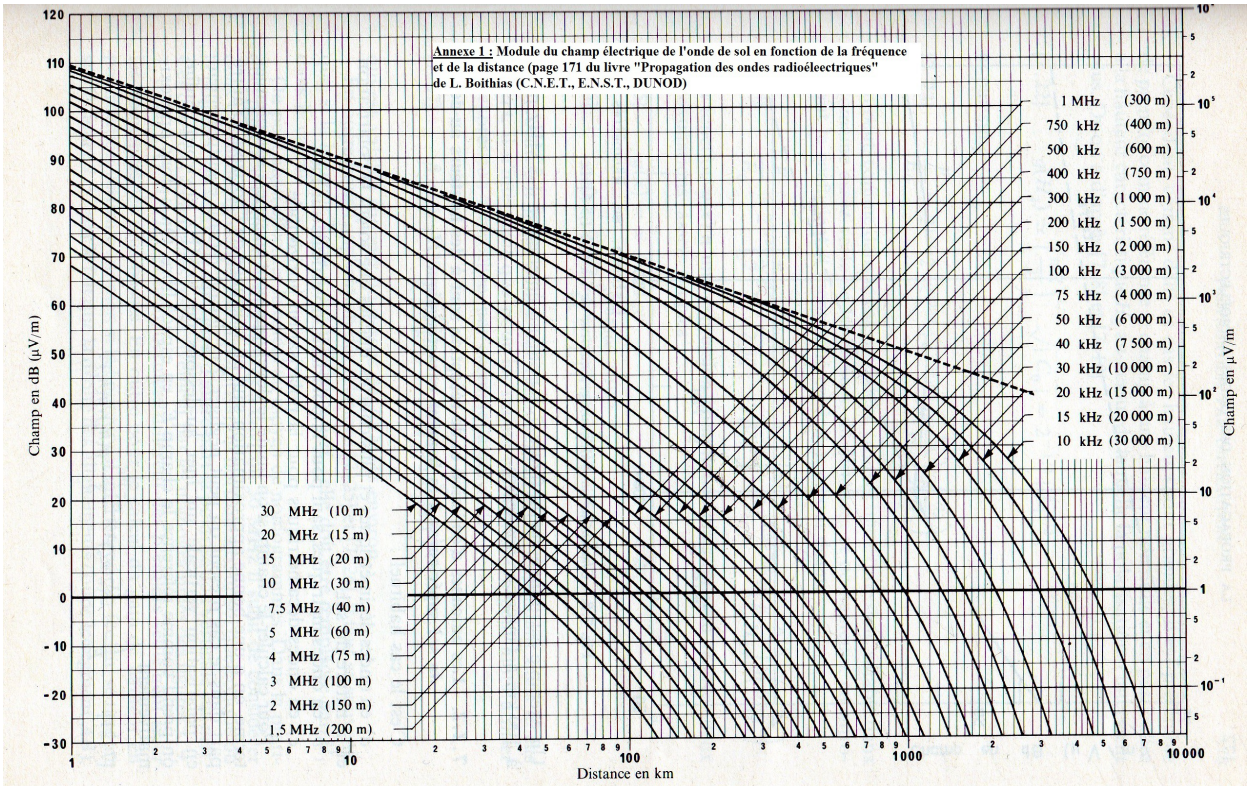


Fig. 7.7. *Courbes de propagation de l'onde de sol : Terre,* $\sigma = 10^{-4}$ S/m, $\varepsilon = 4$. --------- *Inverse de la distance.*

Annexe 2 :
module du champ électrique (onde ionosphérique) en fonction de la fréquence et de la distance

Annexe 2 : Module du champ électrique de l'onde de ciel en fonction de la distance et de la fréquence (pages 238 et 239 du livre de L. Boithias (Propagation des ondes radioélectriques (C.N.E.T., E.N.S.T., DUNOD)

9.4.5. Propagation ionosphérique pour les fréquences inférieures à 1 500 kHz

Tout ce qui précède s'applique presque exclusivement aux fréquences supérieures à environ 1 500 kHz, pour lesquelles la propagation se fait principalement par la région F dont les variations sont assez irrégulières et nécessitent des prévisions délicates. Aux fréquences inférieures, la propagation se fait surtout par les régions inférieures dont les caractéristiques sont liées beaucoup plus à la position du soleil qu'à son activité. En outre l'absorption joue un rôle plus important.

9.4.5.1. *Fréquences comprises entre* 150 *et* 1 500 kHz

La propagation de ces fréquences se fait principalement par la région E. L'absorption à la traversée de la région D est très importante pendant le jour

Des formules semi-empiriques sont utilisées pour calculer le champ créé par un émetteur. En particulier le CCIR propose la formule suivante

[9.64] $$E = 80{,}2 - 10 \log d - 0{,}001\,8\, f^{0{,}26}\, d + \Delta H + \Delta I,$$

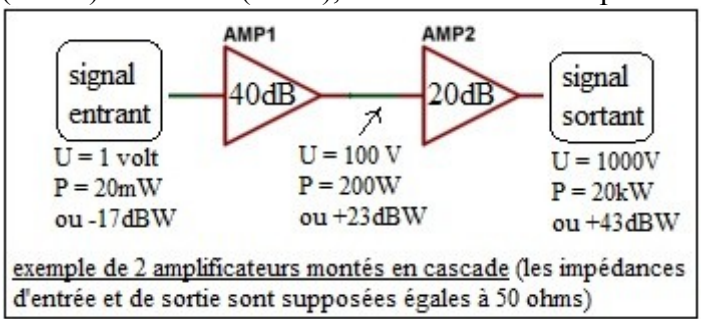
- E est le champ médian à minuit, exprimé en décibels par rapport à 1 μV/m, créé par un émetteur dont le champ à 1 km sur un sol infiniment conducteur serait 3.10^5 μV/m (force cymomotrice égale à 300 V),
- d est la distance en km
- f est la fréquence en kilohertz entre 150 et 1 500 kHz,
- ΔH est une correction pour tenir compte de l'heure locale au milieu du trajet. Le champ est réduit d'environ 10 dB à 19 h et à 5 h, par rapport à sa valeur à minuit,
- ΔI est une correction pour tenir compte de l'inclinaison magnétique au point milieu du trajet. Cette correction est importante (et négative) seulement pour les distances supérieures à 1 500 km et les inclinaisons supérieures à 62°.

En outre, on doit tenir compte d'une certaine répartition des valeurs du champ autour de la valeur médiane ainsi calculée. Les variations de l'activité solaire ont une influence faible qui ne dépasse pas quelques décibels.

Annexe 3 : **rappels sur la notion de décibel (dB, dBW, dBmW ou dBm, dBV, dBµV, etc.)**

Les décibels servent toujours à mesurer des rapports de puissance entre elles :

- par exemple entre puissances de sortie et d'entrée de l'ampli 1 du schéma ci-dessous, qui transforme 20 mW (entrée) en 200 W (sortie), soit un facteur d'amplification de 10^4, donc de 40dB.
- par exemple entre puissances de sortie et d'entrée de l'ampli 2 du schéma ci-dessous, qui transforme 200W (entrée) en 20 kW (sortie), soit un facteur d'amplification de 10^2, donc de 20dB.



exemple de 2 amplificateurs montés en cascade (les impédances d'entrée et de sortie sont supposées égales à 50 ohms)

- par exemple entre puissances de sortie et d'entrée de l'ampli résultant de la mise en cascade des amplis 1 et 2 du schéma , qui transforme 20mW (entrée) en 20 kW (sortie), soit un facteur d'amplification de 10^6, donc de 60dB.
- dans le cas d'atténuateurs, au lieu de 40dB et de 20dB, on aurait affaire à des dB négatifs (exemple : un atténuateur 1 de -40dB en cascade avec un atténuateur 2 de -20dB conduirait à un atténuateur résultant de -60dB.
- par extension, quand on rapporte une puissance donnée à une puissance de référence de 1W, on parlera de dBW pour mesurer cette puissance donnée : dans le schéma, au lieu de 200W, on peut dire 23dBW = 10*log(200) ; au lieu de 20mW, on peut dire -17dBW = 10.log(0,02)
- si la puissance de référence est le mW, de même, on parlera de dBmW (écrit souvent dBm)
- enfin, quand on parle de tensions, on utilise la notion analogue de dBV (ou de dBmV, ou de dBµV), mais il ne faut alors pas oublier 2 choses importantes
- *à une puissance correspond une tension au carré,*
- *les impédances interviennent pour relier tension à puissance car* $P=U^2/Z$
- d'où la formule (amplification en dB) = 10.log(Psortie/Pentrée) = 20.log(Usortie/Uentrée) qui n'a de sens que si on s'exprime à impédance constante (par exemple, 50⁄ sur le schéma).