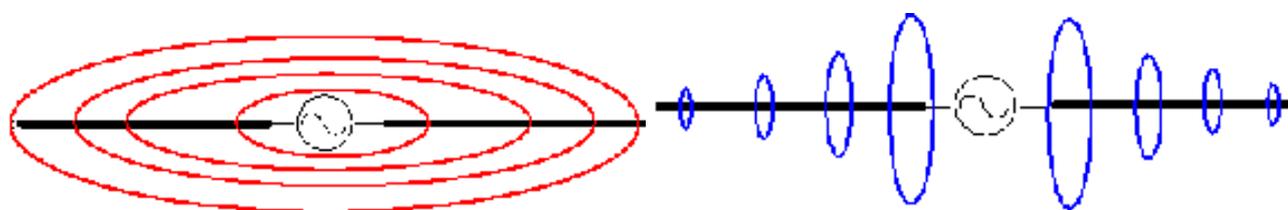


1° - Généralités sur le rayonnement d'une antenne

Une antenne alimentée par la HF produit un **champ électrique** et un **champ magnétique** qui se couplent pour former une **onde électromagnétique**. En schématisant cela donne ceci.



Champ électrique

Champ magnétique

Intuitivement on comprend bien que moins on perturbera ces champs par des obstacles, meilleur et plus homogène sera le rayonnement. Comme pour une source lumineuse, si vous l'obstruez partiellement vous voyez moins bien. Pour nos antennes, nous veillerons, si possible à les éloigner le plus possible de toute source de perturbation, arbres, structures métalliques, maison etc.

Un autre critère tout aussi important est la hauteur au dessus du sol. Celle-ci interagit sur le positionnement des lobes de radiation dans le plan vertical.



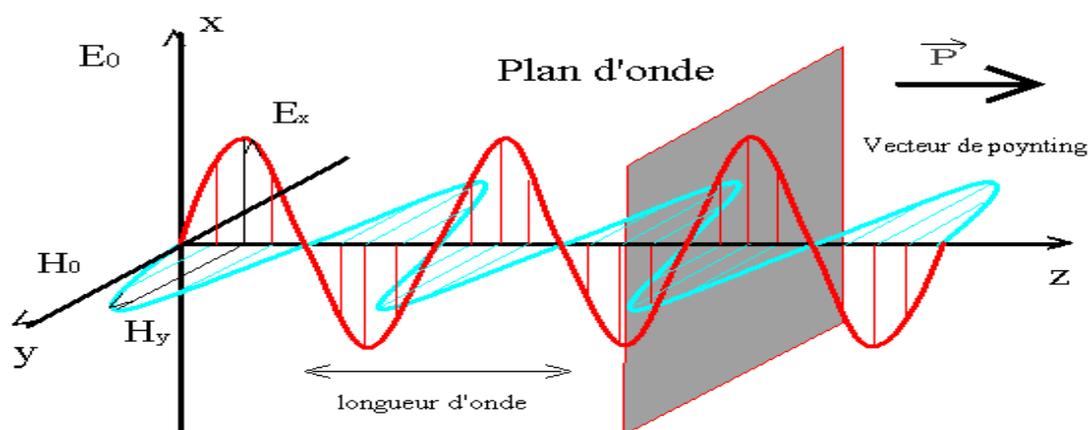
$h = \lambda/2$



$h = \lambda$

λ représente la longueur d'onde (en mètres)

Ces deux figures font apparaître cette fois dans le plan vertical les lobes de rayonnement. A gauche le dipôle est positionné à $\frac{1}{2} \lambda$ du sol. On observe un lobe principal dans lequel l'énergie est concentrée, l'élévation est comprise entre 40 et 45°. A droite le dipôle est hissé à 1λ du sol. On constate l'apparition de lobes secondaires, l'énergie s'est répartie dans les différents lobes et s'il y a moins d'énergie dans les lobes principaux, en revanche les secondaires sont plus bas, donc plus favorable au DX. Cela démontre combien la **hauteur de l'antenne par rapport au sol peut être déterminante**.



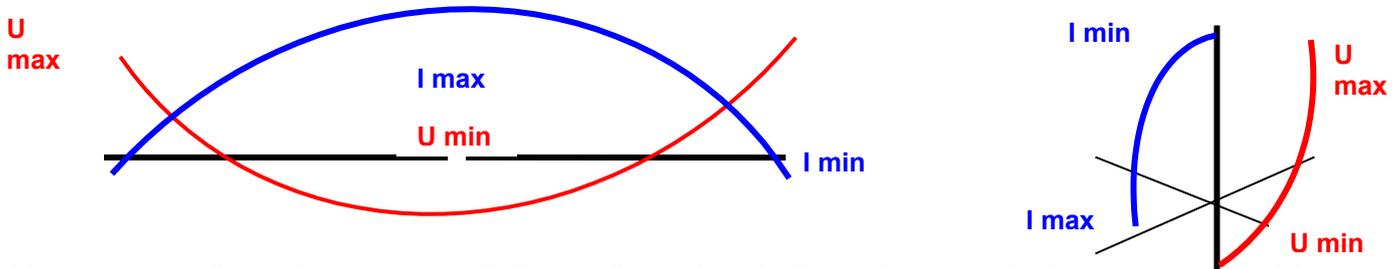
La polarisation d'un dipôle est celle du \rightarrow **champ électrique. Dans ce cas : horizontal**

Dans une antenne dipôle et GPA*, les champs électrique et magnétique sont déphasés de 90°

*GPA : ground-plane

2° - Répartition tension courant dans une antenne demi onde, (doublet ou GPA) :

L'antenne étant alimentée par un émetteur qui fournit la puissance, courant et tension y cohabitent.. Ce courant et cette tension se répartissent comme le montre le schéma ci-dessous. C'est facile à retenir.



L'antenne est alimentée au centre, si elle est dimensionnée à sa fréquence de résonnante, l'impédance y est purement résistive.

Quand nous approchons des extrémités, nous sommes en présence d'un circuit ouvert, aucun courant ne peut plus circuler ce qui signifie que l'impédance est très élevée.

Réciproquement pour la tension, au centre, là où l'impédance est basse la tension est minimum puis au fur et à mesure que l'on s'approche des extrémités elle augmente jusqu'au moment où elle est si élevée que tout se passe comme si le circuit était ouvert. A cet endroit la tension est donc maximum.

A retenir : le champ électrique d'une antenne engendre un champ magnétique avec un déphasage de 90° . Le champ électrique d'un dipôle est dans le même plan que le dipôle. La tension est minimum au centre et maximum aux extrémités du dipôle ; l'intensité est maximum au centre et minimum aux extrémités. Pour favoriser le DX il vaut mieux monter un dipôle au dessus de $\frac{1}{2} \lambda$ su sol et la dégager des obstacles.

3° - La polarisation des antennes

La polarisation d'une antenne est celle du champ électrique de l'onde qu'elle rayonne ou qu'elle reçoit de façon privilégiée, par exemple au travers de son lobe principal.

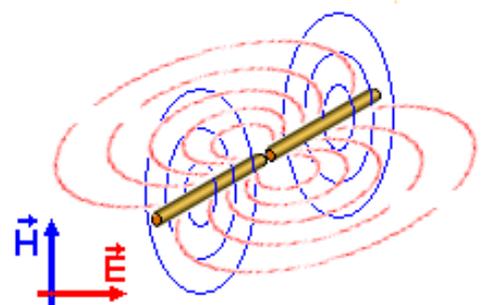
Théoriquement le vecteur champ électrique de l'onde rayonnée par l'antenne se trouve toujours dans le même plan, la polarisation est dite *linéaire*. Une polarisation linéaire peut être horizontale ou verticale.

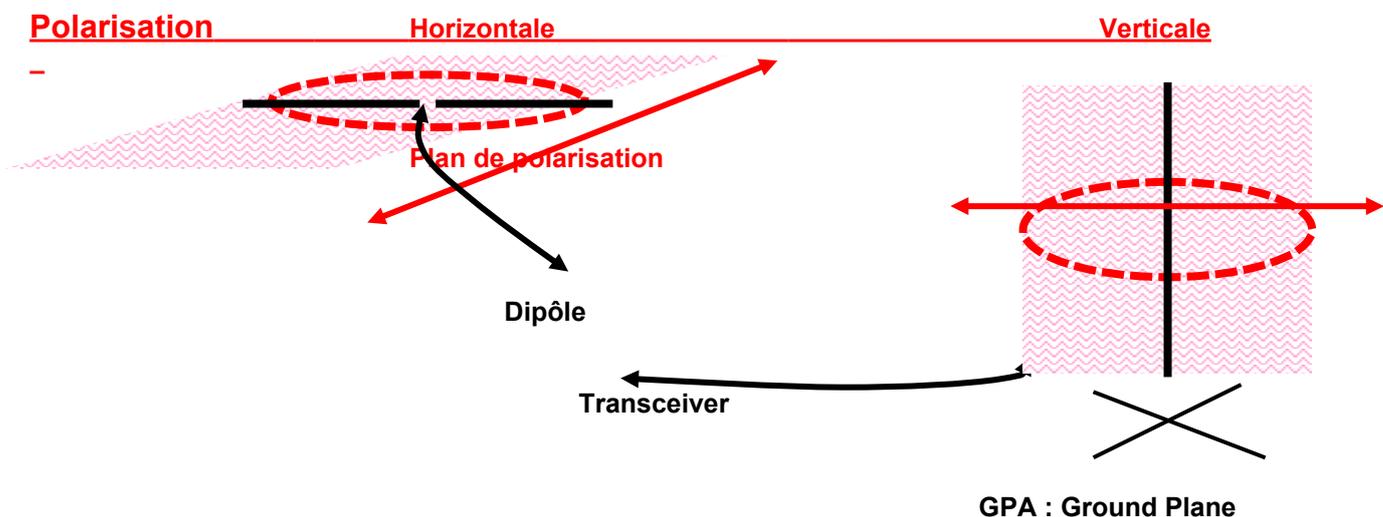
Sinon la polarisation de l'onde est *elliptique* avec le cas particulier de la polarisation *circulaire*.

Comment déterminer la polarisation d'une antenne ?

Comme c'est le champ électrique qui détermine la polarisation de l'onde, il est généralement possible de déterminer la polarisation d'une antenne en observant la façon dont le champ électrique est produit. Sur le dipôle ci-contre on voit que le champ électrique (**en rouge**) se développe dans 2 plans se coupant horizontalement sur l'axe du dipôle, comme le dipôle horizontal lui-même.

La plupart du temps, il suffit de repérer le point d'alimentation de l'antenne et de voir si on ne serait pas en présence d'un dipôle (antenne yagi) ou d'un demi dipôle (ground-plane).





Détail de la polarisation de quelques antennes

La figure ci-contre symbolise quelques antennes à polarisations horizontale et verticale

Polarisation horizontale

- (a) - cubical quad ou boucle horizontale
- (b) - dipôle horizontal, doublet, Lévy-centered, long-fil horizontal

- (c) - lazy H ou antenne rideau

- (d) - delta loop

- (e) - yagi horizontale

Polarisation verticale

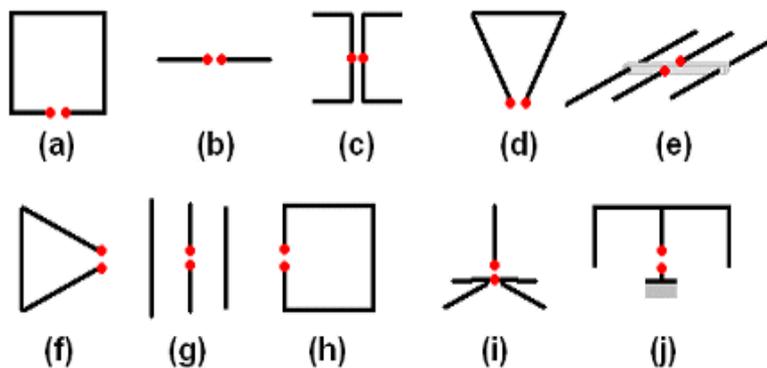
- (f) - delta loop

- (g) - yagi verticale

- (h) - boucle verticale ou élément de quad

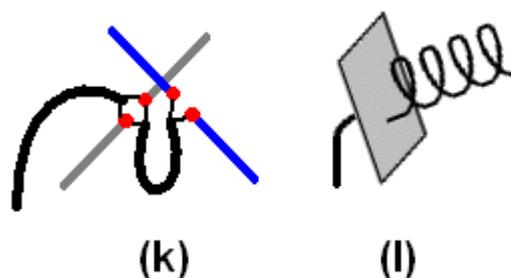
- (i) - ground-plane, antenne verticale

- (j) - bobtail curtain



Antennes à polarisation elliptique

L'antenne turnstile (k) est composée de deux yagis croisées alimentées par une ligne de déphasage a une polarisation elliptique ou circulaire tandis que l'antenne hélice (l) est bien connue pour sa polarisation circulaire.



A retenir :

Une antenne Horizontale comme un dipôle induit un champ électrique Horizontal, une antenne Verticale comme une GPA un champ électrique Vertical. C'est la polarisation de l'antenne.

Les champs électrique et magnétique sont déphasés de 90°.

La polarisation d'une antenne boucle verticale est déterminée par son point d'alimentation. La polarisation d'une antenne boucle horizontale est toujours horizontale.

Au point d'alimentation d'une GPA l'intensité est maximum, la tension minimum, au point haut de la GPA, c'est l'inverse : l'intensité est minimum, la tension maximum.

Une parabole est en polarisation elliptique appelée aussi polarisation circulaire, (droite ou gauche selon la source utilisée).

4° - Gain d'une antenne (généralités)

Antenne isotrope

L'antenne isotrope est un modèle théorique qui sert de référence pour le calcul du gain des antennes. On la représente comme un point dans l'espace, vide absolu, qui rayonnerait de la même façon dans toutes les directions. Son gain exprimé en décibel est de 0dBi (gain par rapport à l'isotrope). Dans la pratique, ce qui nous intéresse, c'est le gain exprimé en dBd (gain par rapport au dipôle) car le gain isotopique est uniquement théorique.

Lorsque vous consultez une documentation commerciale, **si le gain est exprimé en dB soyez certain que c'est le gain en dBi**. Lorsqu'on vous annonce 6 dB de gain à votre antenne, il faut retirer 2,15dB pour connaître le gain réel utile de votre antenne soit $6\text{dB} - 2,15\text{dB} = 3,85\text{dBd}$

Antenne dipôle (doublet ou antenne $1/2 \lambda$)

Le gain du dipôle est de 2,15dBi.

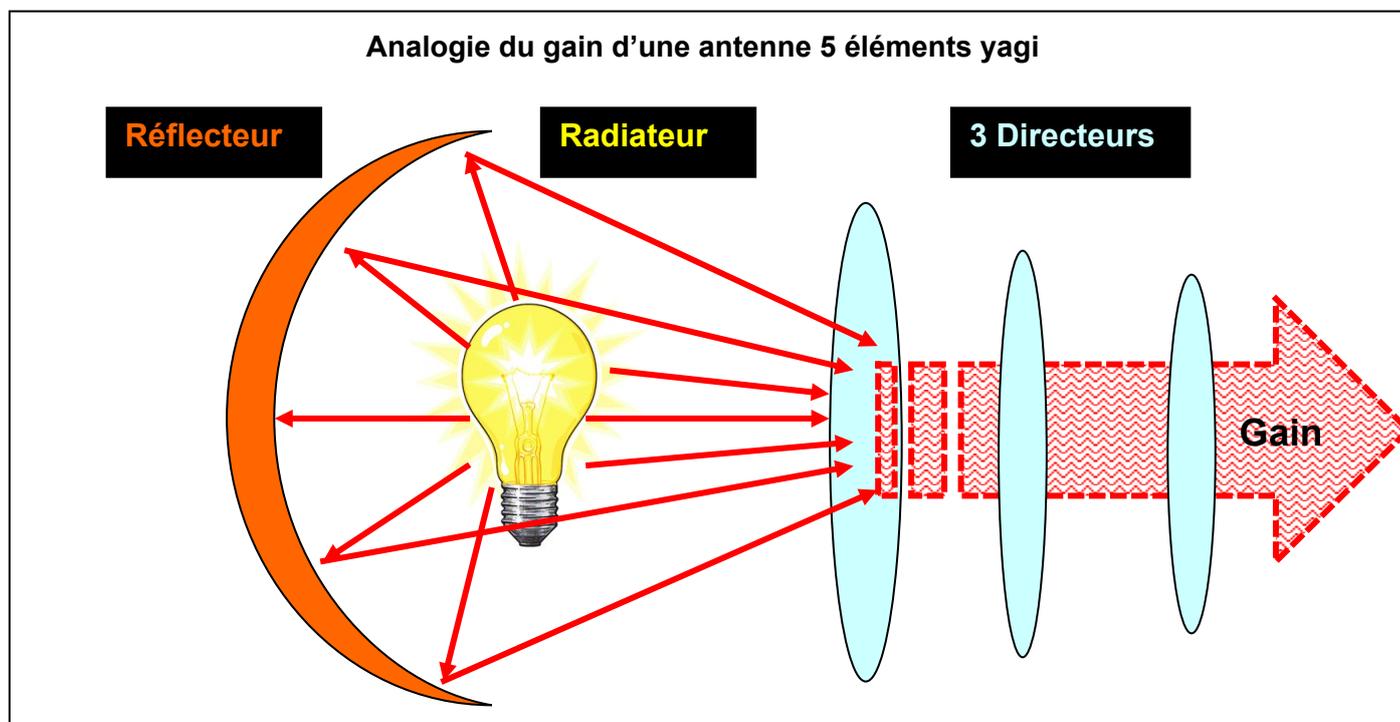
Antenne GPA (antenne verticale $1/4 \lambda$, radians $1/4 \lambda$)

Son gain est de plus 1,15dBi, soit -1dB / dipôle

Analogie du gain d'une antenne 5 éléments yagi

Imaginons une lampe à incandescence de 100W. Elle éclaire dans toutes les directions.

A 100m, elle n'est qu'un halo blafard. Si nous plaçons un réflecteur d'un côté de l'ampoule et 3 lentilles de Fresnel au côté opposé, la lampe rayonnera son énergie lumineuse avec beaucoup plus d'intensité dans une direction. Pointée dans la bonne direction elle éclaire parfaitement à 100m et reste bien visible sur une très grande distance. (*Certains phares puissants éclairent à plus 10km par temps clair*).



A retenir : (plus d'informations dans l'annexe fin du document)

Le rayonnement favorise certaines directions au détriment des autres. Il est exprimé en dB. 1 dBd (1 dB par rapport à un dipôle) correspond à + 2,15dBi (dB par rapport à l'isotrope). Si votre antenne est donnée pour un gain de 5,15dB, c'est en fait un gain réel de 3dBd, qui correspond au doublement de la puissance de l'émetteur.

Un gain de 8,15 dBi correspond à un gain de 6dBd, la puissance de l'émetteur est quadruplée.

5° - Puissance isotrope, PIRE, PAR

5.1 - Puissance isotrope. La puissance isotrope est la puissance rayonnée par l'antenne de même nom, l'antenne isotrope. C'est une antenne tout à fait théorique qui n'existe pas et ne peut être réalisée car c'est une antenne qui rayonne d'une manière rigoureusement identique dans toutes les directions. Elle est située

dans le vide absolu pour ne pas être influencée par d'autres éléments plus ou moins proches. C'est un modèle théorique qui sert de référence aux calculs d'antennes et de bilan de liaison.

Le diagramme de rayonnement de l'antenne isotrope est une sphère et son gain est égal à 1. Le gain d'une antenne quelconque est exprimé par rapport à l'antenne isotrope. Il est exprimé en dBi. Par exemple, le gain d'une antenne dipôle est de 2.15 dBi.

Par comparaison avec un luminaire, l'antenne isotrope serait une ampoule nue, alors qu'une antenne présentant un gain pourrait être la même ampoule munie d'un réflecteur et/ou d'une ou plusieurs lentilles optiques, ainsi que nous venons de le voir. (Dessin haut de la page).

5.2 - Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)

a) **Rappel : le dBm** (voir tableau en fin de document)

Par définition le dBm est une unité de puissance. 1mW correspond à 0 dBm

Quand on passe de 1mW à 2mW, le gain est +3dB (on double la puissance)
donc +3dBm correspond à une puissance de 2mW

Quand on passe de 2mW à 4mW, on double la puissance, le gain est +3dB
donc +6dBm correspond à une puissance de 4mW

1mW	10mW	100mW	1W	10W	100W
	+10dB	+10dB	+10dB	+10dB	+10dB

On convient que :
10 dBm est correspond à une puissance de 10mW
20 dBm est correspond à une puissance de 100mW
30 dBm est correspond à une puissance de 1W
40 dBm est correspond à une puissance de 10W
50 dBm est correspond à une puissance de 100W

b) PIRE : Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente (EIRP)

Pour comprendre cette notion de PIRE, reprenons l'exemple de l'ampoule, qui rayonne sa lumière de façon uniforme dans toutes les directions (rayonnement isotrope). On peut avec une alimentation de tension variable modifier la puissance qu'elle consomme et ainsi modifier sa puissance lumineuse.

Plaçons nous à quelques mètres dans l'axe d'une lampe torche allumée, et mesurons la puissance lumineuse reçue.

Remplaçons la lampe torche par l'ampoule isotrope et modifions sa puissance jusqu'à obtenir le même résultat qu'avec la lampe torche. La puissance émise alors par la lampe isotrope est appelée PIRE.

Pour une antenne :

La Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente est déterminée dans la direction où la puissance rayonnée par l'antenne est maximale. C'est la puissance qu'il faudrait appliquer à une antenne isotrope pour obtenir le même niveau de rayonnement dans cette direction.

PIRE = puissance de sortie de l'émetteur + Pertes dans le câble + Gain de l'antenne (en dBi)

Par exemple :

Puissance de sortie : 100W

Perte dans le câble : -3dB (correspond à une division de la puissance par 2 soit -50W)

Il reste à l'entrée de l'antenne : 50W

Gain de l'antenne +6dBi (multiplication par 4 de la puissance reçue)

PIRE : 200W

Le même calcul peut être fait en dBm

Puissance de sortie : 100W = 50 dBm

Perte dans le câble : -3dB (correspond à une division de la puissance par 2)

Il reste à l'entrée de l'antenne : 47dBm

Gain de l'antenne +6dBi (multiplication par 4 de la puissance reçue)

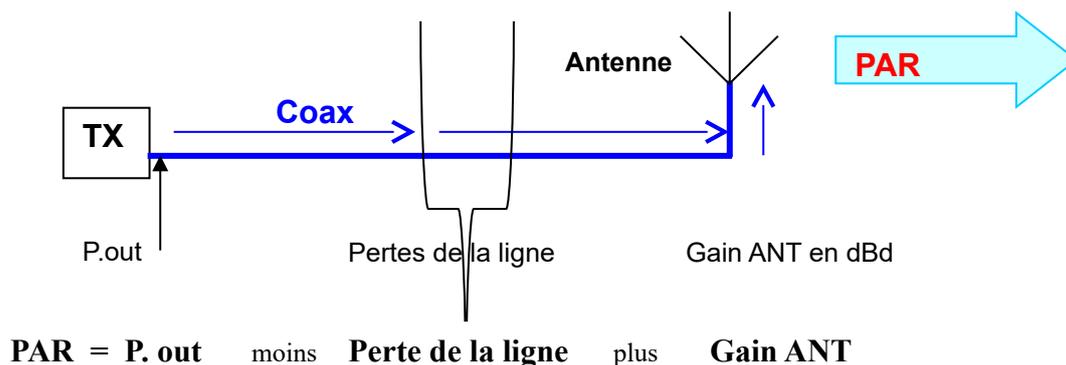
PIRE :

47 dBm +3dBm (multiplication par 2 de la puissance) = 50dBm

50 dBm + 3dBm = (multiplication par 2 de la puissance) = 53dBm

53 dBm correspondent bien à 200W

5.3 - Puissance apparente rayonnée (PAR) :



Exemple de calcul

• Tx : 144 MHz P.out = 50 W

• Ligne de transmission : 25 m de coaxial (perte -12dB/100m)

• Antenne : gain 12 dBd

Calcul des pertes dans le coaxial :

pour 100 m → -12dB

pour 25m : -3dB (division par 2 de la puissance)

Au bout de la ligne de transmission la puissance = 50 W : 2 = 25W

Gain de l'antenne en dBd : 12 dBd (multiplication par 16 de la puissance).

Le puissance à l'antenne est une P.A.R. = 25 x 16 = 400W

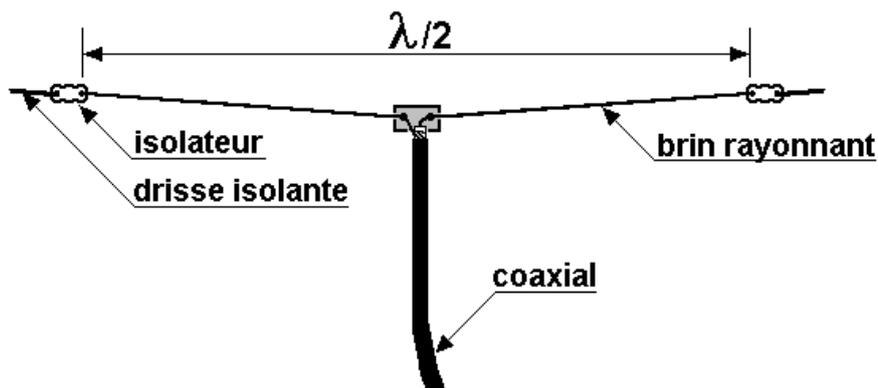
La puissance apparente rayonnée est une mesure théorique standardisée d'énergie des ondes radioélectriques émises par une antenne exprimée en décibels. Elle résulte de la différence entre les gains et les pertes du système de transmission. La PAR prend en compte la puissance de sortie de l'émetteur, les pertes dues aux lignes, y compris les connecteurs et autres « T » de raccordement, le gain et la directivité de l'antenne. La PAR est estimée en référence à une émission produite par une antenne dipôle idéale (dont le gain est généralement exprimée en dBd). Il est communément admis que la $PAR = PIRE - 2.15$, du fait de l'écart de gain entre l'antenne dipôle idéale dans l'air et l'antenne isotrope idéale dans le vide absolu.

A retenir

PIRE = Puissance de sortie + pertes dans la ligne de transmission + gain de l'antenne en dBi

PAR = Puissance de sortie + pertes dans la ligne de transmission + gain de l'antenne en dBd

6° - L'antenne doublet ou dipôle.



Le dipôle $\frac{1}{2} \lambda$, communément appelé "doublet", a une longueur théorique égale à la moitié de la longueur d'onde du signal à émettre ou à recevoir. Sa Résistance de rayonnement «Rr» au point d'alimentation est appelée impédance « Z » est de 72Ω.

La formule théorique de calcul

de la longueur du doublet pour la bande des 40m avec F : 7,1MHz est la suivante :

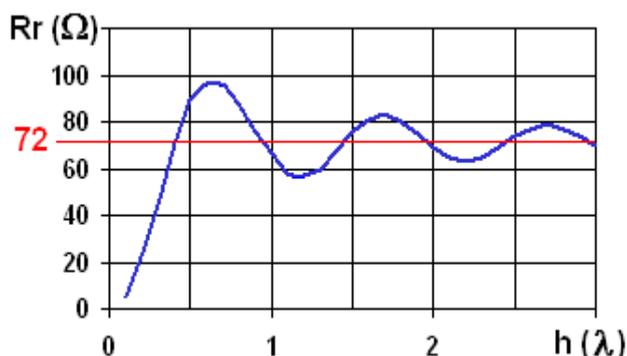
$$L = \frac{150}{F} = 21,12\text{m soit } 2 \times 10\text{m}56$$

En pratique, pour tenir compte de l'effet d'extrémité, et du type de fil utilisé, cuivre nu, fil d'aluminium, fil électrique souple gainé, on adopte une longueur physique de quelques pourcents inférieurs à la longueur théorique.

Quelque soit le fil utilisé, il faut tenir compte d'une réduction de longueur de 3% pour les effets d'extrémités du doublet, avec du fil de cuivre nu, cela donne une longueur de 20m70 ou $2 \times 10\text{m}35$. Avec du fil gainé souple, afin de tenir compte du coefficient de vélocité dans le fil, nous retranchons 2% de plus. Au total, nous retiendrons 5% de moins, soit 20m06 ou $2 \times 10\text{m}03$.

L'antenne alimentée au centre à une impédance de 72Ω. On utilise un coaxial de 75Ω dont l'âme est raccordée sur un $\frac{1}{4} \lambda$ du dipôle, la masse sur l'autre $\frac{1}{4} \lambda$. Les puristes considèrent qu'il est nécessaire de placer un balun symétriseur entre le coaxial et le dipôle. (Voir balun d'impédance page xx).

Il est souvent nécessaire de placer un balun d'intensité, appelé « chock balun » (Voir description du chock balun page xx)



Le diagramme de rayonnement du dipôle dépend de la hauteur de l'antenne par rapport au sol : placé à $0,5\lambda$ au dessus d'un sol bon conducteur, l'antenne rayonne principalement dans 2 lobes faisant un angle de 40° par rapport à l'horizontale (voir page 1 §1). La plus grande partie de l'énergie est rayonnée dans un plan perpendiculaire au conducteur. Le champ électrique est fortement atténué aux extrémités du doublet. Le fonctionnement de l'antenne dépend étroitement de son dégagement et de la conductibilité du sol. En décamétrique le doublet est une bonne antenne monobande bidirectionnelle favorable au trafic à moyenne distance mais il peut être utilisé pour le DX si sa hauteur au dessus du sol dépasse $0,75\lambda$. Le dipôle $\frac{1}{2} \lambda$ peut être utilisé sur la bande de fréquence triple de celle pour laquelle il a été calculé, mais son impédance au point d'alimentation est alors d'une centaine d'ohms (au lieu de 75 ohms). Un système d'adaptation d'impédance est alors nécessaire au niveau du TX (boîte d'accord).

La Résistance de rayonnement Rr (ou l'impédance Z) d'un doublet varie en fonction de la hauteur au sol. Elle est très faible près du sol, puis augmente avec la hauteur, à partir de $0,5 \lambda$, elle est aux alentours de 72 Ω.

A retenir : Le doublet est une antenne demi-onde ($\frac{1}{2} \lambda$). Placé à $\frac{1}{2} \lambda$ du sol, l'impédance théorique (isolé dans l'espace) retenue est 72 Ω. On admet que son impédance varie en fonction de son environnement et vaut environ 75 Ω. Il a alors un angle de radiation d'environ 40° .

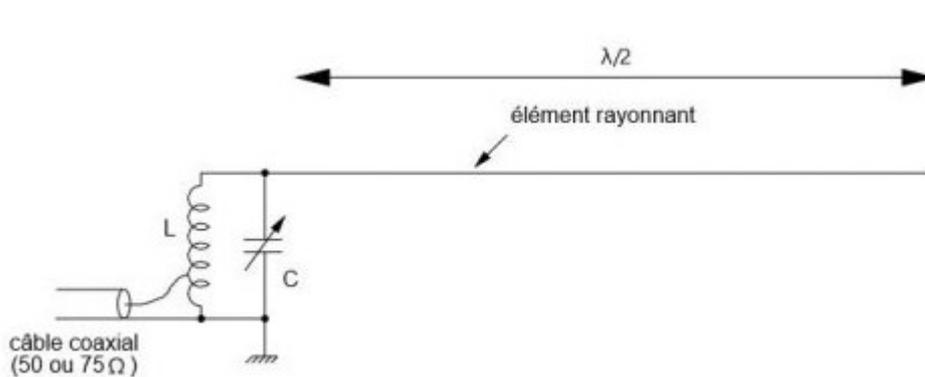
Placé horizontalement, il est bidirectionnel dans le sens perpendiculaire au fil, avec une forte atténuation dans le prolongement des fils.

Un doublet placé verticalement, devient omnidirectionnel et sa polarisation est verticale.

La formule théorique du calcul de la longueur du doublet est la suivante : $L = \frac{150}{F}$

La formule pratique du calcul de la longueur doublet est la suivante $L = \frac{145}{F}$

En V inversé, formant un angle de 120° , l'impédance du dipôle est alors de 50Ω . Si l'angle est de 90° l'impédance est 36Ω .



L'antenne demi-onde peut être alimentée par son extrémité

Le fil de longueur $\lambda/2$ est alimenté par son extrémité. L'impédance est très élevée (de 1000 à 3000Ω) une adaptation d'impédance est nécessaire pour connecter un coaxial de 50Ω . Cette adaptation peut être réalisée avec un circuit LC parallèle ou une boîte de couplage.

7° - Antenne trombone, ou dipôle replié

Le dipôle replié est principalement utilisé sur VHF et UHF pour les antennes yagi. Un de ses avantages est une bande passante plus large que celle du dipôle classique. Le diagramme de rayonnement est pratiquement celui du dipôle. Si les deux tubes sont de même diamètre, l'impédance au point d'alimentation est de l'ordre de $4 \times 75\Omega$, soit environ 300Ω . Par contre si les deux tubes sont de diamètres différents, l'impédance peut varier entre 2 et 12 fois 75Ω , elle dépend aussi de l'écartement entre les deux conducteurs.. Cette propriété est utilisée pour ramener l'impédance d'une antenne yagi de plusieurs éléments à celle de l'impédance caractéristique d'un câble coaxial (75Ω en général).

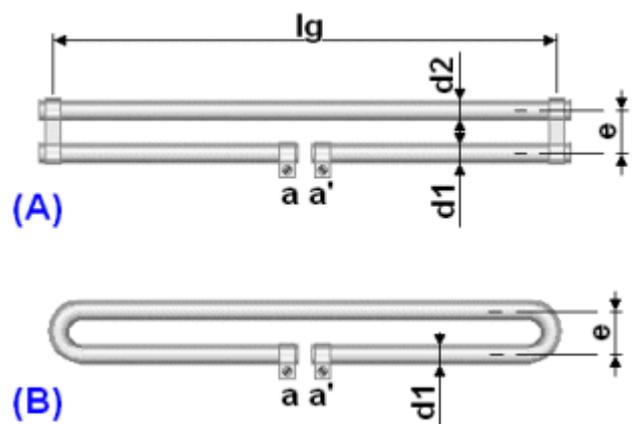
Long = $143/f$ avec f en MHz et long en m

L'écartement « e » d'axe à axe entre les deux tubes étant de l'ordre de $\lambda/40$.

« e » = $750/f$ avec f en MHz et « e » en cm

L'écartement entre les points a et a' de raccordement de la ligne d'alimentation est d'environ 1 cm.

Contrairement à un dipôle 75Ω le **trombone** a une **impédance** de 300Ω lorsqu'il est utilisé seul.



A retenir :

Le trombone, issu du doublet est une antenne demi-onde, $\frac{1}{2}\lambda$.

Il est essentiellement utilisé en VHF et UHF.

Un trombone utilisé seul aura une impédance de 300Ω à condition que les 2 tubes soient du même diamètre.

Sa polarisation suit la même règle que le dipôle. Un trombone avec un réflecteur et plusieurs directeurs voit son impédance baisser jusque 50Ω .

8° - Antenne verticale - Le 1/4 d'onde « full size » : ou GPA

8.1 - L'antenne GPA

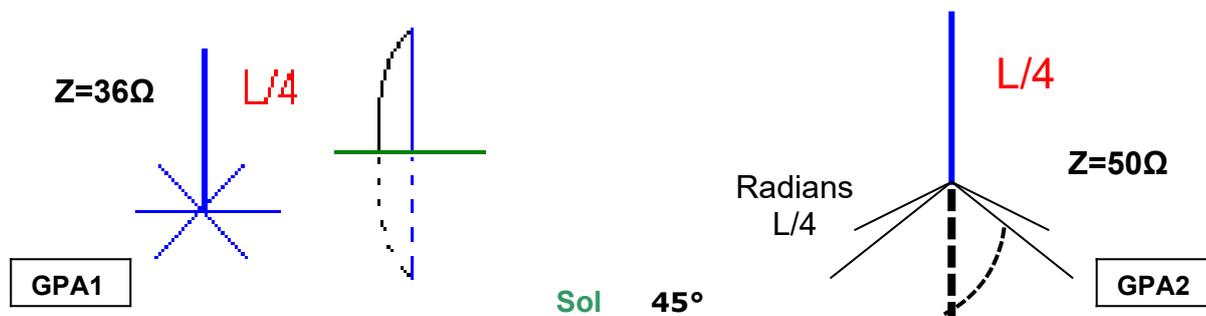
La qualité du sol naturel influe grandement dans le rendement (ou efficacité) d'une antenne verticale. Même si l'antenne verticale est appelée antenne $\frac{1}{4} \lambda$, il s'agit en réalité d'une antenne $\frac{1}{2} \lambda$ constituée d'un brin rayonnant de longueur $\frac{1}{4} \lambda$ associé à un plan de sol également de $\frac{1}{4} \lambda$.

Afin que l'antenne rayonne le maximum d'énergie, le plan de sol doit avoir une excellente conductivité. Lorsque le sol naturel est faible ou moyennement conducteur, il va falloir créer un plan de sol artificiel avec un minimum de 4 radians afin d'améliorer ce plan de sol naturel.

Le plan de sol, naturel ou artificiel est indispensable pour qu'il y ait réaction afin de parvenir à $\frac{1}{2} \lambda$.

Le gain d'une GPA est de -1dB par rapport au gain du dipôle, soit 1,15dBi, ou -1dBd.

La GPA a une impédance très basse au pied qui est le point d'alimentation (36Ω) et très élevée en tête.

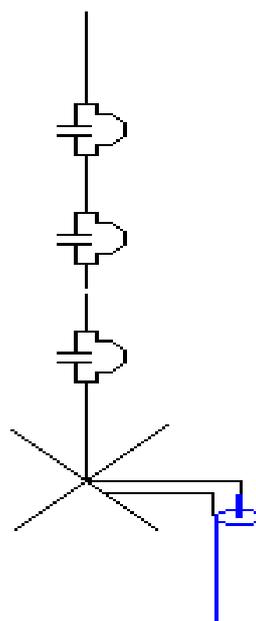


L'alimentation doit se faire par l'intermédiaire d'un système d'adaptation à une ligne 50Ω pour la GPA1.

Les propriétés du sol sont extrêmement importantes pour les performances de l'antenne car la partie réfléchi par le sol doit l'être (réfléchi) et pas absorbée. C'est pourquoi un plan de masse artificiel s'avérera souvent plus rentable bien que mécaniquement plus pénible à installer. Le plan de sol artificiel est au minimum de 4 radians horizontaux (souvent beaucoup ou plus) de longueur $\lambda / 4$.

Avec un très bon plan de sol, la GPA atteint un gain de 2,15dBi, soit 0dBd, et son rendement atteint 120% au bord de la mer ou avec 128 radians en plan de sol. Plus la qualité du plan est bonne (zone humide, bord de mer, nombre de radians) meilleur est le rendement de l'antenne. Le courant et la tension dans une GPA obéissent aux mêmes lois physique que dans un dipôle. Au bas de la GPA au point d'alimentation, le courant est maximum et la tension minimum, à l'extrémité haute de l'antenne c'est l'inverse.

8.2 - Antenne verticale à trappes :



Rendement moyen 30%

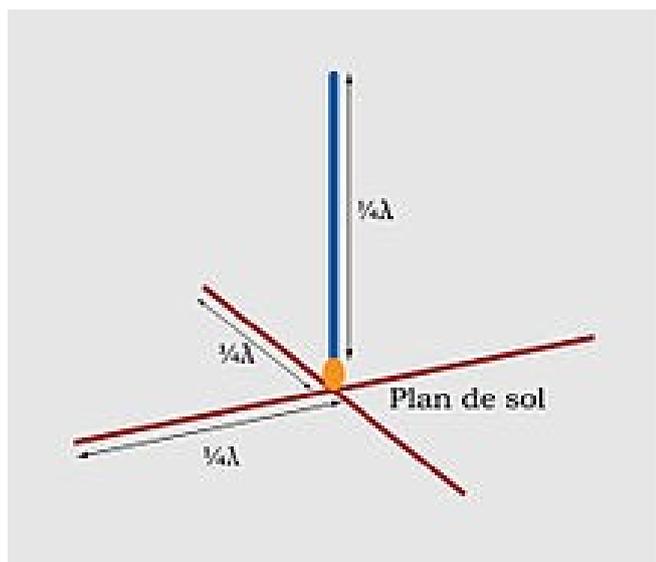
Comme sur les yagis ou beams multibandes, les trappes sont des pièges à pertes mais on ne fait pas toujours ce que l'on veut et quand on dispose de peu de place pour installer ses antennes, l'installation d'une

verticale multi bandes peut être la solution. Les trappes servent à isoler la partie d'élément rayonnant qui se trouve au-dessus elles.

On pourrait imaginer pour le schéma donné ci-dessus que la trappe du bas est accordée sur 28 MHz, la seconde sur 21 MHz, la troisième sur 14 MHz et que l'antenne permet le fonctionnement sur le 7 MHz. Retenez que le rendement de ce type d'antenne est très faible, dès lors que l'on insère des dispositifs tels que des trappes en série dans le brin rayonnant.

Cette règle s'applique également sur les yagis ou beams multi-bandes à trappes.

Dans l'exemple ci-dessus, nous aurons à peine 25% de rendement sur 7MHz. Le rendement d'une antenne est le rapport entre la puissance transmise à l'antenne et celle qu'elle restitue sous forme de rayonnement. Le reste est transformé en chaleur dans l'antenne et le plan de sol. Même si les notions de rendement et de gain d'une antenne sont complémentaires, mais il ne faut confondre rendement de l'antenne, son éventuel gain et la disposition des lobes de rayonnement.



GPA avec 4 radians, rendement : 45%



GPA avec 128 radians, rendement de 120%.

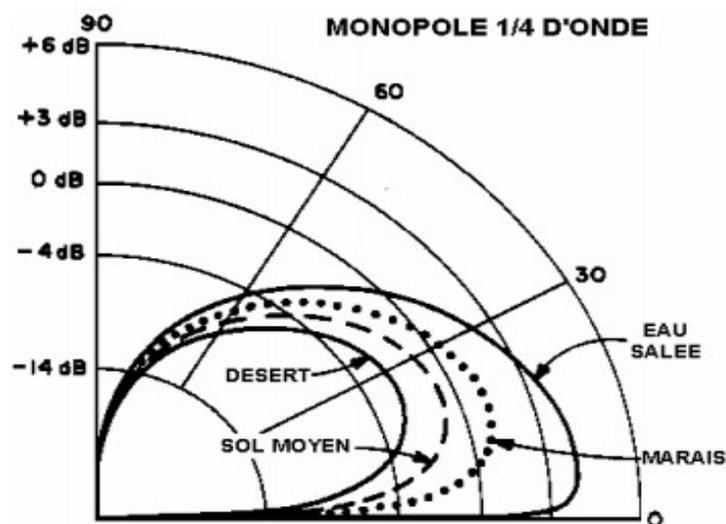


Diagramme de rayonnement d'une antenne 1/4 d'onde en fonction de la qualité du sol

A retenir : La GPA est une verticale $1/4 \lambda$, son l'angle de rayonnement maximal est très bas ce qui est propice au trafic à longue distance, le DX.

Elle est utilisée en décimétrique, sur VHF et UHF.

Son impédance (Z) au point d'alimentation est de 36Ω .

C'est la moitié de l'impédance du doublet $1/2 \lambda$ alimenté au centre du dipôle.

La GPA est omnidirectionnelle et la bande couverte dépend entre autre du diamètre du tube rayonnant.

Son champ électrique est vertical, donc sa polarisation est verticale.

9° - Propriété des différents sols (source : F5ZV)

Le tableau qui suit est donné à titre purement indicatif car il n'est guère facile d'estimer sans mesure réelle les caractéristiques d'un sol. En outre elles peuvent varier fortement en fonction de l'humidité du sol, de la végétation... Le gel et la sécheresse dégradent très nettement la qualité du sol et l'efficacité des antennes qui les surmontent.

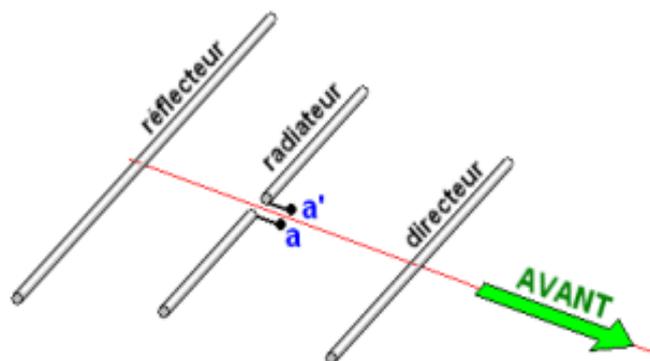
Catégorie de terrain	Conductivité σ (mS/m)	Permittivité relative ϵ_r	qualité
glace polaire	0,1	1	très mauvaise
milieu urbain et zones industrielles	1	5	mauvaise
terrain sablonneux et aride, montagne	2	10	médiocre
landes et collines boisées	5	13	bonne
pâturages et prairies	10	14	bonne
zones humides, marais	30	25	très bonne
étendue d'eau douce	1	80	très bonne
eau de mer	4640	81	excellente

10° - L'antenne yagi

L'antenne yagi est une antenne directive dont le gain est supérieur à celui du dipôle dans la direction avant et inférieur dans la direction arrière.

Elle se compose de :

- un dipôle demi-onde, alimenté en son milieu, c'est l'élément **radiateur**
 - un (ou plusieurs) élément **réflecteur**, non alimenté
 - un (ou plusieurs) élément **directeur**, non alimenté
- Les éléments non alimentés sont qualifiés d'éléments "**parasites**".



10.1 - Principe de fonctionnement

Les éléments parasites sont le siège d'un courant HF et vont rayonner, comme le dipôle. Si les éléments sont placés parallèlement l'un à l'autre et à une distance qui est de l'ordre de $l/10$ de longueur d'onde, les champs électromagnétiques vont se perturber mutuellement. Le diagramme de rayonnement du dipôle va être déformé et deux cas peuvent se produire :

- l'élément parasite est plus court que le radiateur : le lobe principal de rayonnement du dipôle sera renforcé dans la direction radiateur \rightarrow élément parasite. L'élément parasite est **directeur**.
- l'élément parasite est plus long que le radiateur : le lobe principal de rayonnement du dipôle sera renforcé dans la direction élément parasite \rightarrow radiateur. L'élément parasite est **réflecteur**.

Les performances de l'antenne dépendent du nombre d'éléments parasites, de la longueur et du diamètre de chacun des éléments et de l'espacement entre éléments.

Pour augmenter le gain avant de l'antenne, il suffit d'ajouter des éléments directeurs.

Cette pratique a toutefois des limites :

- mécaniques car la longueur de l'antenne peut poser des problèmes de réalisation
- électriques car le gain n'est pas proportionnel au nombre d'éléments et plafonne assez rapidement.

Le **rapport avant-arrière** est déterminé principalement par le ou les éléments réflecteurs

La bande passante de l'antenne yagi est assez étroite mais elle couvre sans problème la totalité d'une bande amateur. L'impédance au point d'alimentation est généralement de 50 ou 75 ohms. L'adaptation

d'impédance étant assurée soit avec un dipôle replié (folded dipole), un gamma-match (ou système équivalent) ou encore un balun transformateur d'impédance.

La directivité de l'antenne yagi est en étroite relation avec son gain. Une yagi 7 éléments avec un gain de 12dBi a un angle d'ouverture en polarisation horizontale de l'ordre de 40 degrés à -3dB.

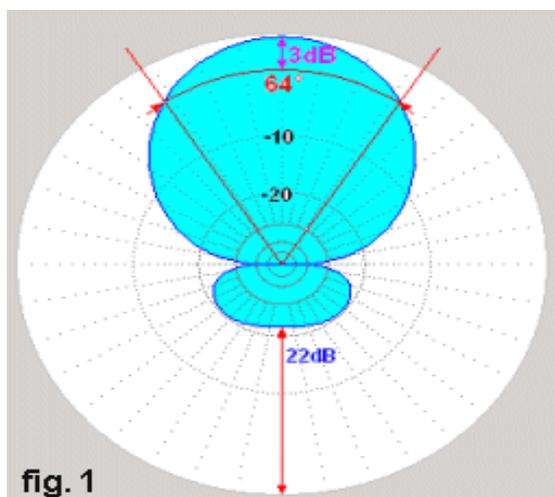
La polarisation d'une yagi ordinaire est celle du dipôle qui joue le rôle de radiateur.

Dans le domaine radio amateur, on rencontre l'antenne yagi depuis les bandes décadiques les plus basses jusqu'à 3 GHz.

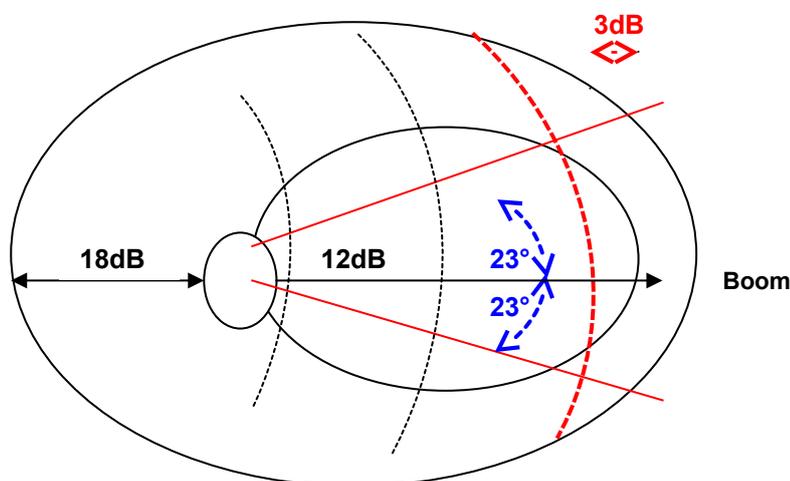
- bande 80 m : exceptionnellement rotative, on trouve néanmoins de nombreuses 2 à 3 éléments filaires.
- bande 40 m : des yagi 2 ou 3 éléments "full sized" (non raccourcies) ne sont pas rares
- bandes 20 à 10 m : la "beam" à 3 ou 4 éléments est très courante, c'est l'antenne standard des DX'eurs.
- bandes 6 m à 13cm : c'est le domaine de prédilection de l'antenne yagi.

10.2 - Exemple du diagramme de rayonnement d'une antenne yagi :

Forme de l'angle d'ouverture Horizontal
Ici, nous avons 2 x 32° d'ouverture à -3db



Forme de l'angle d'ouverture Vertical,
ici, nous avons 2 x 23° d'ouverture à -3dB



A retenir :

L'antenne yagi est directive dans le sens Réf → Rad → Dir

Comme pour le doublet, sa polarisation est fonction du positionnement de l'élément alimenté, le Radiateur.

Plus il y a d'éléments, plus l'impédance baisse. Il est essentiellement utilisé en VHF et UHF.

Un trombone utilisé seul à une impédance de 300 Ω.

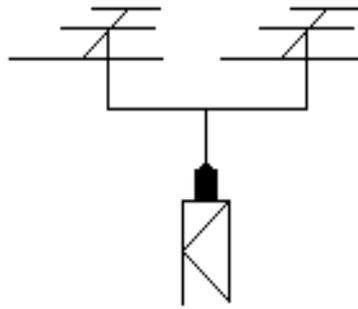
Sa polarisation suit la même règle que le simple dipôle.

Un trombone avec un réflecteur et plusieurs directeurs voit son impédance baisser jusque 75 Ω voir 50 Ω.

En observant la figure 1 ci-dessus, on peut voir que la différence entre l'amplitude du lobe avant et celui du lobe arrière est de 22dB. On dit que le rapport avant/arrière est -22 dB

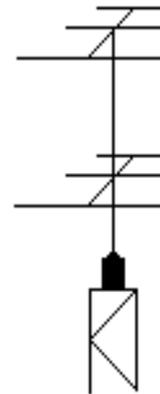
11° - Couplage d'antennes

Couplage horizontal



Le couplage de 2 antennes (ou plus) augmente le gain du système d'antennes.

Couplage vertical



Si l'on couple 2 ou plusieurs antennes sur le plan horizontal, l'angle d'ouverture est plus faible que celui d'une seule antenne.

Si on couple 2 antennes sur un plan vertical, on conserve l'angle d'ouverture d'une seule antenne

Pour 2 antennes, on augmente le gain théorique de 3 dB

Pour 3 antennes, on augmente le gain théorique de 4,77dB

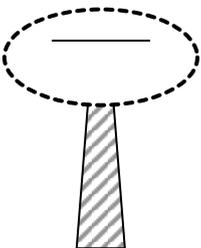
Pour 4 antennes, on augmente le gain théorique de 6 dB

11.1 - Empilement vertical pour des Yagis identiques

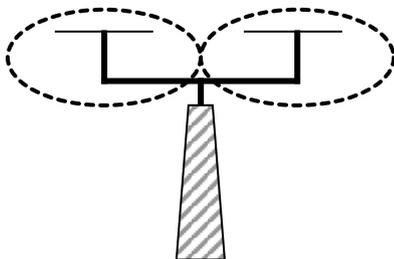
L'empilement d'antennes yagis identiques dépend de la zone de capture d'une antenne.

Zone de capture qui définit l'espacement entre le groupement d'antennes

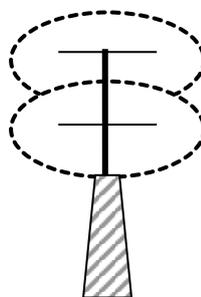
1 antenne



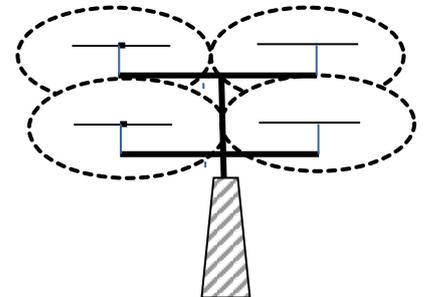
2 antennes horizontales



2 antennes verticales



4 antennes
2 horizontales, 2 verticales



Remarques importantes.

1. Un empilement plus rapproché ou plus éloigné entraîne une perte de gain importante et une forte destruction des lobes de rayonnement.
2. Pour les exemples de calcul ci-dessous, nous prendrons le cas d'antennes « TONNA » 9 éléments, avec un **angle d'ouverture horizontale de $2 \times 19^\circ$** , et un **angle d'élévation verticale de $2 \times 23^\circ$** .
3. La fréquence choisie est centrée pour le gamme de fréquence BLU (144.200 kHz)

Annexes pour information

1- Formule pour le couplage de 2 antennes horizontales (voir schéma ci-dessus)

$$L = \frac{\lambda}{2 \times \sin(\frac{\phi}{2})}$$

L Longueur de l'espacement en mètres

λ Longueur d'onde en mètres

ϕ Angle d'ouverture horizontale en degrés

Rappel $\lambda = \frac{V}{F}$

V 300 000

F Fréquence en kHz

Exemple de calcul avec " ϕ " l'angle d'ouverture horizontale (azimut) de 2 x 19°

$$\lambda = \frac{V}{F} = \frac{300\ 000}{144\ 200} = 2\text{m}08$$

Donc : 2 x 19° = 38°

$$\text{Ce qui fait } L = \frac{\lambda}{2 \times \sin(\frac{\phi}{2})} = \frac{2.08}{2 \times \sin \frac{38}{2}} = \frac{2.08}{2 \times \sin 19} = \frac{2.08}{2 \times 0.3256}$$

$$\text{et } \frac{2.08}{0.6512} \approx 3\text{m}20 \rightarrow \text{espacement "H" entre les 2 antennes}$$

2- Formule pour le couplage de 2 antennes empilées (voir §.11 page 11)

Nota : les calculs sont identiques au §10.2, page précédente, (groupement horizontal) sauf que l'on prend en compte l'angle d'ouverture verticale.

Ce montage est plus facile à pointer en direction d'une station, car l'angle d'ouverture horizontale est très légèrement plus large qu'une seule antenne

On pourra privilégier ce montage en portable.

Exemple de calcul avec " ϕ " angle d'ouverture verticale (élévation) de 2 x 23°

$$\lambda = \frac{V}{F} = \frac{300\ 000}{144\ 200} = 2\text{m}08$$

$$\text{Ce qui fait } L = \frac{\lambda}{2 \times \sin(\frac{\phi}{2})} = \frac{2.08}{2 \times \sin \frac{46}{2}} = \frac{2.08}{2 \times \sin 23} = \frac{2.08}{2 \times 0.3907}$$

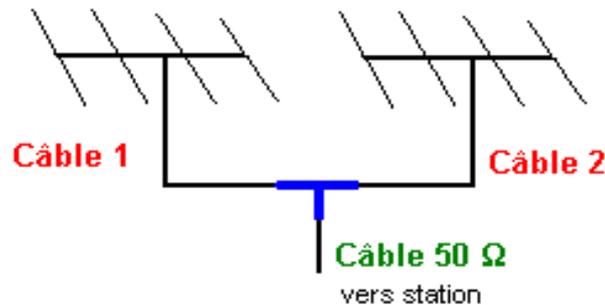
$$\text{et } \frac{2.08}{0.7814} \approx 2\text{m}63 \rightarrow \text{espacement "V" entre les 2 antennes}$$

3- Un coupleur souple

a) - Exemple :

- Les deux antennes à coupler sont des antennes 50 Ω
- Le transceiver possède une impédance de sortie de 50 Ω
- Le câble de descente est un câble 50 Ω

Nous allons relier en parallèle deux antennes de 50 Ω ce qui nous donnera une impédance équivalente de 25 Ω, notre groupement d'antennes ne peut pas fonctionner. Pour le faire fonctionner nous allons exploiter les propriétés du coaxial comme transformateur d'impédance. $\frac{1}{4} \lambda$.



b) - Suite du raisonnement :

Au « T » de connexion, nous voulons obtenir 50 Ω, et à cet endroit nous connectons deux charges en parallèle. Si ces deux charges en // doivent faire 50 Ω, il faut que chacune d'elle fasse 100 Ω ($100 // 100 = 50$). Donc au point de raccordement du « T », nous devons voir 100 Ω

A l'autre extrémité, coté antenne, nous avons 50 Ω

Il faut donc que notre ligne $\frac{1}{4} \lambda$ (ou ses multiples impairs) transforme cette impédance. Nous savons que l'impédance caractéristique du $\frac{1}{4} \lambda$ doit être égale à :

$$Z_0 = \sqrt{Z_1 Z_2}$$

Z_0 = impédance caractéristique du $\frac{1}{4} \lambda$

Z_1 = impédance de l'antenne

Z_2 = impédance au point de raccordement

Calculons : $Z_0 = \text{racine}(50 \times 100) = 70,7 \Omega \rightarrow$ On considérera que du câble 75 Ω conviendra parfaitement.

$$Z \text{ Câble 1} = Z \text{ Câble 2} = 75 \Omega$$

c) - Calcul de la longueur des bretelles de couplage ?

Les bretelles doivent donc constituer des $\frac{1}{4} \lambda$ à la fréquence considérée ou des multiples impairs de $\frac{1}{4} \lambda$ (un multiple pair est un $\frac{1}{2} \lambda$ et ne se comporte pas en transformateur, il reporte à la sortie l'impédance présente à l'entrée). Si nous désirons coupler deux antennes pour une gamme de fréquence comme le 144 MHz, nous calculerons comme suit :

1) - Détermination de la longueur d'onde à 144,200 MHz - $\Omega = 300/f$ $F = 300/144.2 = 2,080\text{m}$

2) - Détermination du $\frac{1}{4} \lambda \rightarrow 2,080 : 4 = 0,52\text{m}$

3) - Prise en compte du coefficient de vélocité du câble (nous prendrons 0,66 pour cet exemple)

Longueur physique $\rightarrow \frac{1}{4} \lambda \times 0,66$

Longueur physique $\rightarrow 0,52 \times 0,66 = 0,343 \text{ m}$

Il reste à calculer la longueur nécessaire au couplage en veillant à utiliser un nombre impair de $\frac{1}{4} \lambda$.

Attention, les longueurs se comptent en incluant la dimension des fiches, depuis le centre du « T »

Utilisez pour le couplage du câble 75 Ω de bonne qualité (voir très bonne) car tout câble a des pertes, autant ne pas perdre le gain du couplage dans les lignes.

Pour résumer :

Il est possible de coupler plusieurs antennes identiques en respectant l'espacement de la zone de capture des antennes. Le gain est le même en couplage Horizontal ou Vertical.

La formule de base est :

$$L = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\Phi}{2}}$$

L Longueur de l'espacement en mètres

λ Longueur d'onde en mètres

Φ Angle d'ouverture horizontale en degrés

Rappel $\lambda = \frac{V}{F}$

V 300 000

F Fréquence en kHz

Considérons 2 ANT identiques de 9 éléments chacune avec un Gain « G » de 11dBd :

G : 2 ANT → G = 10 log 2 (2 nombre d'antennes couplées) → 11 + 3 = 14dBd

G : 3 ANT → G = 10 log 3 (3 nombre d'antennes couplées) → 11 + 4,77 = 15,77dBd

G : 4 ANT → G = 10 log 4 (4 nombre d'antennes couplées) → 11 + 6 = 17 dBd

Soit 2 ANT identiques d'impédance Z = 50Ω chacune.

$$Z_0 = \sqrt{Z_1 Z_2}$$

Z₀ = impédance caractéristique de la « bretelle » du ¼ λ (adaptateur d'impédance)

Z₁ = impédance de l'antenne

Z₂ = impédance au point de raccordement

Calculons : Z₀ = racine (50 x 100) = 70,7 Ω → On considérera que du câble 75 Ω conviendra parfaitement.

$$Z \text{ Câble 1} = Z \text{ Câble 2} = 75 \Omega$$

La longueur des bretelles d'adaptation d'impédance sera de ¼ λ ou multiple impair (¾ λ par exemple). Cette longueur sera multipliée par le coefficient de vitesse « V », (appelé aussi Vitesse de propagation) du coaxial choisi pour les bretelles.

« V » est généralement compris entre 0,66 et 090.

4 - Rapport de puissance selon leradioscope.fr

Gain exprimé en décibel (dB)	-20dB	-10dB	-6dB	-3dB	0dB	3dB	6dB	10dB	20dB
Rapport de puissance sortie / entrée	1/100	1/10	1/4	1/2	identique	X 2	X 4	X 10	X 100

5 - Gain suivant le nombre d'éléments (*Origine F5ZV*)

gain en dBi	Gain utile en dBd	nombre d'éléments	longueur idéal du boom (λ)	Comparaison du gain d'une Quad par rapport à une Yagi, les 2 antennes à la même hauteur
6	3,85	2	0,4	
8	4,85	3	0,7	
9	6,85	4	1,1	Quad 2 éléments : 7,2 dBd
10	7,85	5	1,4	
11	8,85	6	1,8	Quad 3 éléments : 9,3 dBd
12	9,85	7	2,1	
13	10,85	8	2,5	
13	10,85	9	2,8	
14	11,85	10	3,2	
14	11,85	12	3,9	
15	12,85	14	4,6	
15	12,85	16	5,3	
16	13,85	18	6,0	
16	13,85	20	6,7	
17	14,85	22	7,4	
17	14,85	24	8,1	

6 - Les **dBm** sont une autre façon d'exprimer **une puissance**.

0 dBm correspond à une puissance de 1mW

Valeur en dBm	Valeur en Watt
0 dBm	1mW
3 dBm	2mW
10 dBm	10mW
13 dBm	20mW
17 dBm	50mW
20 dBm	100mW
23 dBm	200mW
27 dBm	500mW
30 dBm	1Watt
33 dBm	2Watt
40 dBm	10Watt
50 dBm	100Watt
-10dBm	0.1mW ou 100 μ W
-20dBm	0.01mW ou 10 μ W
-30dBm	0.001mW ou 1 μ W

7- Plus d'info sur PIRE et PAR sur : [https://www.google.com/url?](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiR7rDsi4ntAhUNhRoKHSdHCQ0QfJADegQIARAC&url=https%3A%2F%2Farmi.r-e-f.org%2Fpdf%2Fpar.pdf&usq=AOvVaw0pLePYnNMvW0eT4t53RAFr)

[sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiR7rDsi4ntAhUNhRoKHSdHCQ0QfJADegQIARAC&url=https%3A%2F%2Farmi.r-e-f.org%2Fpdf%2Fpar.pdf&usq=AOvVaw0pLePYnNMvW0eT4t53RAFr](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiR7rDsi4ntAhUNhRoKHSdHCQ0QfJADegQIARAC&url=https%3A%2F%2Farmi.r-e-f.org%2Fpdf%2Fpar.pdf&usq=AOvVaw0pLePYnNMvW0eT4t53RAFr)

a) Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)

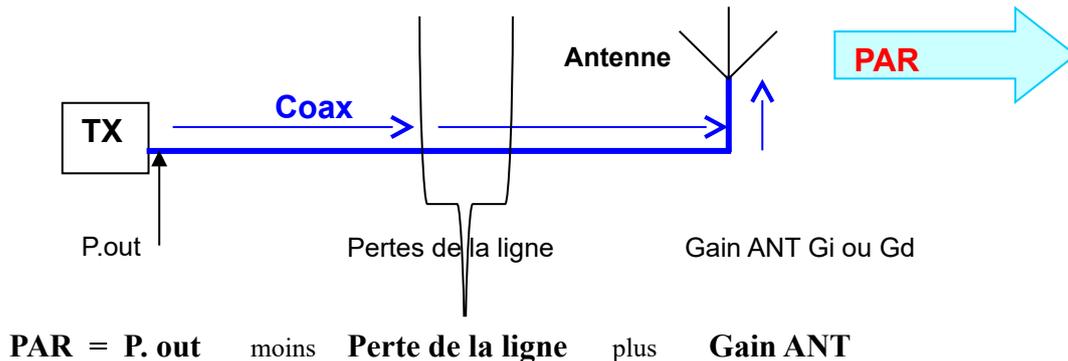
La Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente est déterminée dans la direction où la puissance rayonnée par l'antenne est maximale. C'est la puissance qu'il faudrait appliquer à une antenne isotrope pour obtenir le même niveau de rayonnement dans cette direction.

PIRE [dBm] = Puissance électrique appliquée à l'antenne [dBm] + Gain de l'antenne [dBi]

Exemple : on applique 100 watts à un dipôle => PIRE (dBm) = 50 + 2,15 = 52,15 dBm

Pour une installation incluant le câble de liaison : PIRE [dBm] = Puissance de transmission [dBm] – Pertes dans les câbles et connecteurs [dB] + Gain de l'antenne [dBi]

b) Puissance apparente rayonnée (PAR) :



Exemple de calcul

- Tx : 144 MHz P.out = 50 W
- Ligne de transmission : 25 m de coax KX4
- Antenne : 9 éléments Tonna

Calcul des pertes dans le coaxial : 9,5 dB pour 100 m à 200 MHz

A 144MHz pour 100 m $\rightarrow 9,5 \times \sqrt{144/200} = 8\text{dB}$ (d'atténuation)
pour 25 m $\rightarrow 8 / 4 = 2\text{dB}$ (d'atténuation)

Soit en rapport $10^{(-2/10)} = 0,63$

Au bout de la ligne de transmission la puissance = 50 W x 0,63 = 31,55 W

Gain de l'antenne en Gd :

Données constructeur : gain iso (Gi) = 13,1 dBi soit 13,1 - 2,15 = 11 dBd gain dBd (Gd)

Soit en rapport $10^{(11/10)} = 12,6$

Le puissance à l'antenne est une P.A.R. = 31,55 x 12,6 = 398 W

La puissance apparente rayonnée est une mesure théorique standardisée d'énergie des ondes radioélectriques émises par une antenne exprimée en décibels. Elle résulte de la différence entre les gains et les pertes du système de transmission. La PAR prend en compte la puissance de sortie de l'émetteur, les pertes dues aux lignes, y compris les connecteurs et autres « T » de raccordement, le gain et la directivité de l'antenne. La PAR est estimée en référence à une émission produite par une antenne dipôle idéale (dont le gain est généralement exprimée en dBd). Il est communément admis que la PAR = PIRE - 2,15, du fait de l'écart de gain entre l'antenne dipôle idéale dans l'air et l'antenne isotrope idéale dans le vide absolu.

PARE [dBm] = Puissance de transmission [dBm] - Pertes dans les câbles et connecteurs [dB] + Gain de l'antenne [dBd]

Calcul en dBm

- Par définition 0 dBm = 1 mW
- Dans l'exemple : 50 W soit 50000 mW
- Conversion Watts vers dBm : $P_{out} = 10 \log (50000/1) = + 47 \text{ dBm}$
- Puissance en sortie de l'émetteur = + 47 dBm
- Pertes dans le coax = - 2 dB
- Gain de l'antenne = + 11 dB
- PAR = + 56 dBm

**Conversion + 56 dBm en
Watts : $10^{(56/10)} = 398 \text{ W}$**

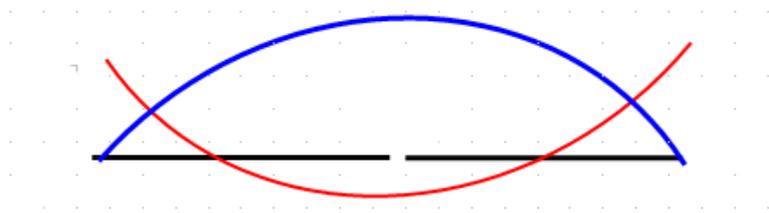
Questionnaire n°25 - Antennes

Question 1

1.a Une antenne demi-onde alimentée par de la HF ne produit qu'un champ électrique
Vrai ? Faux

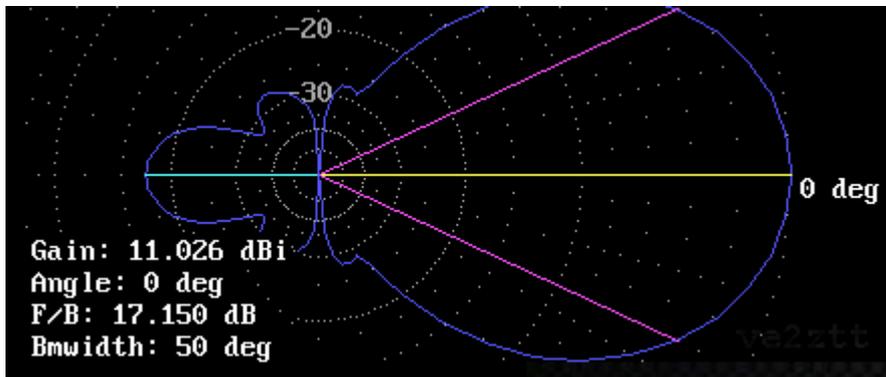
1.b La polarisation d'un dipôle est celle du champ électrique
Vrai ? Faux

1.c La répartition de l'intensité dans un dipôle est dans le schéma ci-dessous représentée en bleu.
Vrai ? Faux



1.d Une ground-plane est une antenne horizontale
Vrai ? Faux

1.e



C'est le diagramme de rayonnement d'une antenne demi-onde
Vrai ? Faux ?

1.f La longueur d'un dipôle demi-onde est 10m. Elle a été calculée pour fonctionner sur la bande des 28MHz
Vrai ? Faux ?

1.g La longueur d'une antenne demi-onde accordée sur 7,050 MHz vaut :
a: entre 20,5m et 21,5m b : entre 10,25m et 10,75m
Vrai ? Faux ?

1.h : Placé à une demi-onde du sol, l'impédance d'un dipôle demi-onde résonnant sur la fréquence sur laquelle il a été accordé vaut 72Ω
Vrai ? Faux ?

1.i Une ground-plane est une antenne horizontale

Vrai ? Faux ?

1.j Une antenne isotrope rayonne son énergie dans une direction particulière

Vrai ? Faux ?

1.k : $1\text{dBd} = 2,15\text{ dBi}$

Vrai ? Faux ?

1.l : Si le gain d'une antenne est 6dBd , elle multiplie la puissance reçue par 4

Vrai ? Faux ?

1.m : 1mW correspond à 0 dBm

Vrai ? Faux ?

1.n : La puissance émise par un émetteur est 200W , le feeder (ligne de transmission) est supposé sans perte et l'antenne a un gain de 3dBd , la PIRE est 400W

Vrai ? Faux ?

1.o : La puissance émise par un émetteur est 200W , le coaxial est supposé sans perte et l'antenne a un gain de 6dBi la PIRE est 400W

Vrai ? Faux ?

1.p : La puissance émise par un émetteur est 200W , la perte dans le coaxial est -3dB et l'antenne a un gain de 3dBd , la PIRE est 200W

Vrai ? Faux

1.q : La puissance émise par un émetteur est 200W , le coaxial a -3dB de perte et l'antenne a un gain de 6dBi la PIRE est 400W

Vrai ? Faux ?

1-r - La polarisation d'un dipôle est toujours la même qu'il soit placé horizontalement ou verticalement VRAI ou FAUX

1-s - Si on veut favoriser le DX, il vaut mieux placer son dipôle à une longueur d'onde du sol plutôt qu'à une demi longueur d'onde - VRAI ou FAUX

1-y - Dans une antenne ground-plane, le maximum d'intensité est situé tout en haut de l'antenne VRAI ou FAUX

1-z - Dans une antenne ground-plane, le minimum de tension est au point de raccordement du coaxial VRAI ou FAUX

Question 2

2.a : l'impédance d'une antenne trombone lorsqu'il est utilisé seul est de l'ordre de 150Ω .

Vrai ? Faux ?

2.b Si on ajoute à un trombone d'impédance 300 ohms des éléments parasites, on peut abaisser l'impédance au point d'attaque à 50Ω

Vrai ? Faux ?

2.c Une ground-plane favorise les liaisons DX car son angle de départ par rapport au sol est faible

Vrai ? Faux ?

2.d La ground-plane est une antenne directionnelle directionnelle

Vrai ? Faux ?

2.e : La qualité du sol est très important pour le rayonnement des antennes

Vrai ? Faux ?

2.f Le rayonnement d'une antenne yagi se fait dans le sens réflecteur – radiateur – directeur

Vrai ? Faux ?

2.j Le rapport avant/arrière s'exprime en dB

Vrai ? Faux ?

2.k Il faut coupler 4 antennes identiques pour espérer avoir un gain de 6dB à ajouter au gain d'une seule antenne.

Vrai ? Faux ?

2.l Si je couple 3 antennes identiques, je peux espérer un gain supplémentaire d'environ 4,5 dB par rapport à une seule antenne.

Vrai ? Faux ?

2.m $1\text{dBi} = 2,15\text{ dBd}$

Vrai ? Faux ?

2.n : le diagramme de rayonnement de l'antenne isotrope est une sphère

Vrai ? Faux ?

Questionnaire n° 25 _ correction

Question 1 :

1.a : FAUX

Une antenne demi-onde alimentée par de la HF produit un champ électrique et un champ magnétique

1.b : VRAI

1.c : VRAI, l'intensité est nulle aux extrémités et maximum au centre

1.d : FAUX , **verticale**

1.e : FAUX, le dipôle a un rayonnement symétrique de part et d'autre de l'antenne.

1.f : FAUX, sur 28 Mhz, la longueur d'onde est $145/F = 145/28 = 10,71m$

Le dipôle demi-onde va donc mesurer $10,71/2 = 5,35m$ et pas 10m

1.g : VRAI : $145/7,05 = 20,56m$

1.h : VRAI

1.i : FAUX, une ground-plane (GPA) est une antenne **verticale**

1.j : FAUX, dans toutes les directions

1.k : VRAI

1.l : VRAI 6dBd, c'est 6dB d'amplification, donc une multiplication par 4 de la puissance reçue par rapport.

1.m : VRAI

1.n : VRAI :

Puissance émise : 200W, gain 3dB (multiplication de la puissance par 2)

PAR : 400W

1.o FAUX

Puissance émise : 200W, gain 6dB (multiplication de la puissance par 4)

PIRE : 800W

1.p : VRAI : $-3dB + 3dB = 0dB$, il n'y a pas d'amplification

1.q : VRAI

$-3dB + 6dB = 3dB$ (multiplication par 2 de la puissance)

1.r : FAUX. La polarisation est verticale pour une antenne dipôle verticale et horizontale pour un dipôle horizontal.

1.s : VRAI

1.y : FAUX

1.z : VRAI

Question 2

2.a : FAUX, 300Ω

2.b : VRAI

2.c : VRAI

2.d : FAUX

2.e : VRAI, essentiellement

2.f : VRAI

2.j : VRAI

2.k : VRAI

Deux antennes identiques +3dB à ajouter au gain d'une antenne

Trois antennes identiques +4,7dB à ajouter au gain d'une antenne

Quatre antennes identiques +6dB à ajouter au gain d'une antenne

2.l : VRAI

2.m : FAUX : $1\text{ dBd} = 2,15\text{ dBi}$

2.n : VRAI