

Antennes à ondes stationnaires

- ⇒ Les antennes à fils ouverts où le courant doit passer à zéro (dipôles, monopôles, etc.) peuvent être qualifiées d'antennes à ondes stationnaires ou d'antennes résonnantes ;
- ⇒ Le courant sur ces antennes peut s'écrire comme une somme d'ondes se déplaçant dans des directions opposées (ondes qui se déplacent vers l'extrémité du fil et se réfléchissent dans la direction opposée) ;
- ⇒ Le courant sur un dipôle de longueur l est donné par :

$$\begin{aligned} \vec{I}(z') &= I_o \sin \left[k \left(\frac{l}{2} - |z'| \right) \right] \vec{a}_z \quad \left(-\frac{l}{2} \leq z' \leq \frac{l}{2} \right) \\ &= \begin{cases} I_o \sin \left[k \left(\frac{l}{2} + z' \right) \right] \vec{a}_z & \left(-\frac{l}{2} \leq z' \leq 0 \right) \\ I_o \sin \left[k \left(\frac{l}{2} - z' \right) \right] \vec{a}_z & \left(0 \leq z' \leq \frac{l}{2} \right) \end{cases} \end{aligned}$$

Le courant sur la tige supérieure du dipôle peut s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned} I(z') &= I_o \sin \left[k \left(\frac{l}{2} - z' \right) \right] \\ &= \frac{I_o}{2j} \left[e^{jk \left(\frac{l}{2} - z' \right)} - e^{-jk \left(\frac{l}{2} - z' \right)} \right] \\ &= \frac{I_o}{2j} \left[\underbrace{e^{j \frac{kl}{2}} e^{-jkz'}}_{\text{Orienté vers les } z +} - \underbrace{e^{-j \frac{kl}{2}} e^{jkz'}}_{\text{Orienté vers les } z -} \right] \end{aligned}$$

Antennes à ondes progressives

- ⇒ Les antennes à ondes progressives sont caractérisées par des charges adaptées (pas de circuits ouverts) de sorte que le courant est défini en termes d'ondes se déplaçant dans une seule direction (une exponentielle complexe par opposition à un sinus ou un cosinus) ;
- ⇒ Comme le montre la figure (1), une antenne à ondes progressives peut être formée par une ligne de transmission à un seul fil (un seul fil au-dessus du sol) qui se termine par une charge adaptée (pas de réflexion) ;
- ⇒ Typiquement, la longueur de la ligne de transmission est de plusieurs longueurs d'onde.

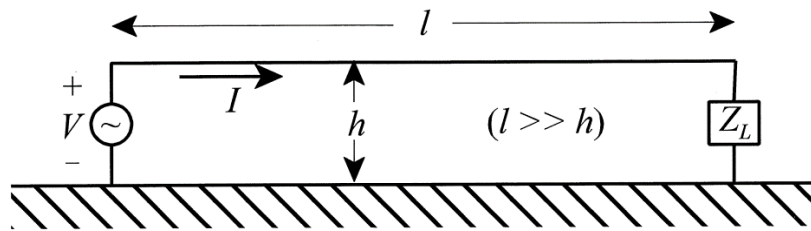


Figure.1. Antenne à ondes progressives formée par une ligne de transmission à un seul fil

- ⇒ L'antenne illustrée dans la figure (1), est communément appelée une antenne Beverage ou antenne d'onde ;
- ⇒ Selon la théorie des images, cette antenne peut être analysée comme une boucle rectangulaire ;
- ⇒ Les antennes à ondes progressives peuvent, en général, être classées comme :
 - 1) Une antenne à onde de surface ;
 - 2) Une antenne à onde de fuite.
- ⇒ Considérons un segment d'une antenne à ondes progressives (un fil de longueur l allongé le long de l'axe z) comme indiqué sur la figure (2) ;
- ⇒ Un courant d'onde progressive circule dans la direction des z +.

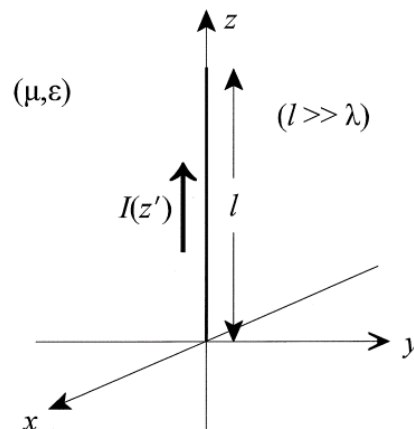


Figure.2. Segment d'une antenne à ondes progressives

Le courant I peut s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned}
 \vec{I}(z') &= I_o e^{-\gamma z'} \vec{a}_z \\
 &= I_o e^{-(\alpha + j\beta)z'} \vec{a}_z \\
 &= I_o e^{-\alpha z'} e^{-j\beta z'} \vec{a}_z
 \end{aligned}$$

Avec :

β : Constante de phase ;

α : Constante d'atténuation.

Si les pertes, pour cette l'antenne, sont négligeables (perte ohmique dans les conducteurs, perte due à une terre imparfaite, etc.), alors le courant peut s'écrire :

$$\vec{I}(z') = I_0 e^{-j\beta z'} \vec{a}_z$$

Le potentiel vectoriel de champ lointain est donné par :

$$\vec{A} \approx \mu \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \int_0^l \vec{I}(z') e^{jkz' \cos\theta} dz' = \mu I_0 \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \vec{a}_z \int_0^l e^{j(k\cos\theta - \beta)z'} dz'$$

$$\begin{aligned} \vec{A} &= -j\mu I_0 \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \vec{a}_z \left\{ \frac{e^{j(k\cos\theta - \beta)z'}}{k\cos\theta - \beta} \right\}_0^l \\ &= -j\mu I_0 \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \vec{a}_z \left\{ \frac{e^{j(k\cos\theta - \beta)l} - 1}{k\cos\theta - \beta} \right\} \\ &= -j\mu I_0 \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \vec{a}_z \left[\frac{e^{j\frac{1}{2}(k\cos\theta - \beta)l}}{k\cos\theta - \beta} \right] \left\{ e^{j\frac{1}{2}(k\cos\theta - \beta)l} - e^{-j\frac{1}{2}(k\cos\theta - \beta)l} \right\} \\ &= -j\mu I_0 \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \vec{a}_z \left[\frac{e^{j\frac{1}{2}(k\cos\theta - \beta)l}}{k\cos\theta - \beta} \right] \left\{ 2j \sin \left[\frac{l}{2}(k\cos\theta - \beta) \right] \right\} \\ &= \mu I_0 l \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \vec{a}_z e^{j\frac{l}{2}(k\cos\theta - \beta)} \frac{\sin \left[\frac{l}{2}(k\cos\theta - \beta) \right]}{\frac{l}{2}(k\cos\theta - \beta)} \end{aligned}$$

Si on pose $u = \frac{l}{2}(k\cos(\theta) - \beta)$, en utilisant le passage sphérique \Rightarrow cartésien ($\vec{a}_z = \cos\theta \vec{a}_r - \sin\theta \vec{a}_\theta$), alors :

$$\begin{aligned} \vec{A} &= \mu I_0 l \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \vec{a}_z e^{ju} \frac{\sin u}{u} \\ &= \mu I_0 l \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (\cos\theta \vec{a}_r - \sin\theta \vec{a}_\theta) e^{ju} \frac{\sin u}{u} \end{aligned}$$

Le champ électrique est donc donné par :

$$E_{\theta} \approx -j\omega A_{\theta} = j\omega\mu I_o l \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta e^{ju} \frac{\sin u}{u}$$

- ⇒ En général, la constante de phase d'une onde progressive sur un guide d'onde est différente de celle d'une onde non guidée ;
- ⇒ Cependant, pour la plupart des antennes à ondes progressives, la constante de phase peut être supposée être approximativement égale à celle de l'espace libre ;
- ⇒ Si nous supposons que la constante de phase de l'antenne à ondes progressives est la même que celle de l'espace libre ($\beta = k$), alors :

$$u = \frac{kl}{2}(\cos\theta - 1) \text{ Et :}$$

$$E_{\theta} = j\eta k I_o l \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} e^{j\frac{kl}{2}(\cos\theta - 1)} \sin\theta \frac{\sin\left[\frac{kl}{2}(\cos\theta - 1)\right]}{\frac{kl}{2}(\cos\theta - 1)}$$

$$= j\eta I_o \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} e^{j\frac{kl}{2}(\cos\theta - 1)} \sin\theta \frac{\sin\left[\frac{kl}{2}(\cos\theta - 1)\right]}{(\cos\theta - 1)}$$

Attention ! η est l'impédance du milieu et **non pas le rendement**.

- ⇒ Compte tenu du champ lointain du segment d'ondes progressives, on peut déterminer la densité de puissance rayonnée moyenne dans le temps selon la définition du vecteur de Poynting tel que :

$$\vec{p} = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H}^* = \frac{|E_{\theta}|^2}{2\eta} \vec{a}_r$$

$$= \eta \frac{|I_o|^2}{8\pi^2 r^2} \frac{\sin^2\theta}{(\cos\theta - 1)^2} \sin^2\left[\frac{kl}{2}(\cos\theta - 1)\right] \vec{a}_r$$

$$= \eta \frac{|I_o|^2}{8\pi^2 r^2} \cot^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin^2\left[\frac{kl}{2}(\cos\theta - 1)\right] \vec{a}_r$$

- ⇒ La puissance rayonnée totale par le segment d'ondes progressives est donnée comme suit :

$$P_{rad} = \int_0^{4\pi} P d\Omega$$

$$= \frac{\eta}{4\pi} |I_o|^2 \left[1.415 + \ln\left(\frac{kl}{\pi}\right) - C_i(2kl) + \frac{\sin(2kl)}{2kl} \right]$$

⇒ La résistance de rayonnement est donnée par :

$$R_r = \frac{2P_{rad}}{|I_o|^2} = \frac{\eta}{2\pi} \left[1.415 + \ln\left(\frac{kl}{\pi}\right) - C_i(2kl) + \frac{\sin(2kl)}{2kl} \right]$$

⇒ La résistance de rayonnement de l'antenne à onde progressive idéale (VSWR = 1) est purement réelle, tout comme l'impédance d'entrée d'une ligne de transmission adaptée est purement réelle ;

⇒ L'intensité de rayonnement de l'antenne à ondes progressives est donnée par :

$$P(\theta, \varphi) = r^2 p = \eta \frac{|I_o|^2}{8\pi^2} \cot^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin^2\left[\frac{kl}{2}(\cos\theta - 1)\right]$$

⇒ La FCR peut s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned} FCR(\theta, \varphi) &= \cot^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin^2\left[\frac{kl}{2}(\cos\theta - 1)\right] \\ &= \cot^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin^2\left[\frac{\pi l}{\lambda}(\cos\theta - 1)\right] \end{aligned}$$

La figure (3) montre le DR de l'antenne segment, à ondes progressives, pour différentes valeurs de l .

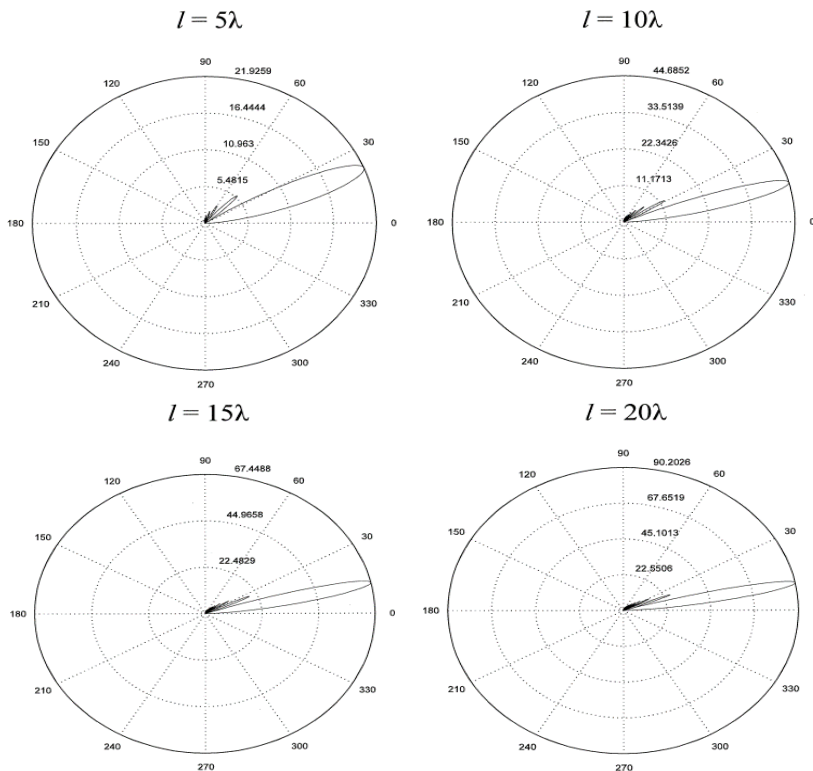


Figure.3. DR de l'antenne segment, à ondes progressives, pour différentes valeurs de l .

⇒ A partir de la figure (3), on remarque ce qui suit :

- Lorsque la longueur l du segment d'ondes progressives augmente, le lobe principal devient légèrement plus pointu tandis que l'angle du lobe principal se déplace légèrement vers l'axe de l'antenne ;
- Cette antenne a toujours un zéro à $\theta = 0^\circ$;
- Pour $l \gg \lambda$, on remarque la présence de plus de lobes secondaires et de valeurs nulles. L'angle du lobe principal peut être approximé comme suit (la fonction sinus dans la fonction FCR normalisée varie beaucoup plus rapidement que la fonction cotangente):

$$\sin \left[\frac{\pi l}{\lambda} (\cos \theta - 1) \right]_{\theta=\theta_m} = \pm 1$$

$$\frac{\pi l}{\lambda} (\cos \theta_m - 1) = (2m + 1) \frac{\pi}{2} \quad m = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$$

$$\cos \theta_m = \frac{\lambda}{2l} (2m + 1) + 1 \quad m = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$$

$$\theta_m = \cos^{-1} \left[1 + \frac{\lambda}{2l} (2m + 1) \right] \quad m = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$$

⇒ L'angle θ_{max} , définissant l'emplacement du lobe principal, correspond à $m = -1$. Il est donné par :

$$\theta_{max} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{\lambda}{2l} \right)$$

⇒ Si nous tenons également compte de la fonction cotangente dans la détermination de l'angle du lobe principal, une approximation plus précise de l'angle correspondant à ce dernier, est donnée comme suit :

$$\theta_{max} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{0.371\lambda}{l} \right)$$

⇒ Pour les segments de fil de longueur respectivement 5λ , 10λ , 15λ et 20λ , on trouve ce qui suit :

$$l = 5\lambda \quad \theta_{\max} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{0.371}{5} \right) = 22.2^\circ \text{ (25.8}^\circ\text{)}$$

$$l = 10\lambda \quad \theta_{\max} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{0.371}{10} \right) = 15.7^\circ \text{ (18.2}^\circ\text{)}$$

$$l = 15\lambda \quad \theta_{\max} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{0.371}{15} \right) = 12.8^\circ \text{ (14.8}^\circ\text{)}$$

$$l = 20\lambda \quad \theta_{\max} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{0.371}{20} \right) = 11.1^\circ \text{ (12.8}^\circ\text{)}$$

La directivité est donnée par :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi P(\theta, \varphi)}{P_{rad}} = \frac{2 \cot^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \sin^2 \left[\frac{kl}{2} (\cos\theta - 1) \right]}{1.415 + \ln \left(\frac{kl}{\pi} \right) - C_i(2kl) + \frac{\sin(2kl)}{2kl}}$$

Antenne Beverage

- ⇒ Une antenne à onde progressive réelle doit inclure une charge adaptée afin de s'assurer qu'aucune onde progressive inverse ne peut exister sur la ligne ;
- ⇒ La configuration la plus courante, pour l'antenne à ondes progressives, est l'antenne Beverage ;
- ⇒ Grâce à la théorie des images, le fonctionnement de la ligne de transmission à un fil peut être défini par le modèle de ligne de transmission à deux fils équivalent ;
- ⇒ Pour un segment d'antenne (de rayon a et de hauteur h) à ondes progressives, situé horizontalement au-dessus d'un plan de masse, la charge R est son impédance caractéristique ;
- ⇒ La théorie des images peut être utilisée pour déterminer les caractéristiques de performance globales de l'antenne à ondes progressives.

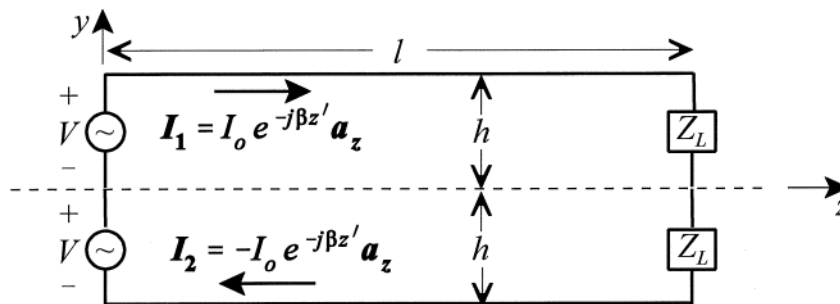


Figure.4. Antenne horizontale à ondes progressives

- ⇒ La source, la charge et le courant de fil horizontal sont chacun imagés autour de l'emplacement du plan de masse, comme indiqué sur la figure (4) ;
- ⇒ Si les contributions de champ lointain des courants verticaux sont négligées, la FCR est donc donnée par :

$$FCR(\theta, \varphi) = 2 \left| \cot\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left[\pi \frac{l}{\lambda} (\cos\theta - 1)\right] \sin\left(2\pi \frac{h}{\lambda} \sin\theta \sin\varphi\right) \right|$$

La figure (5), montre le DR de cette antenne.

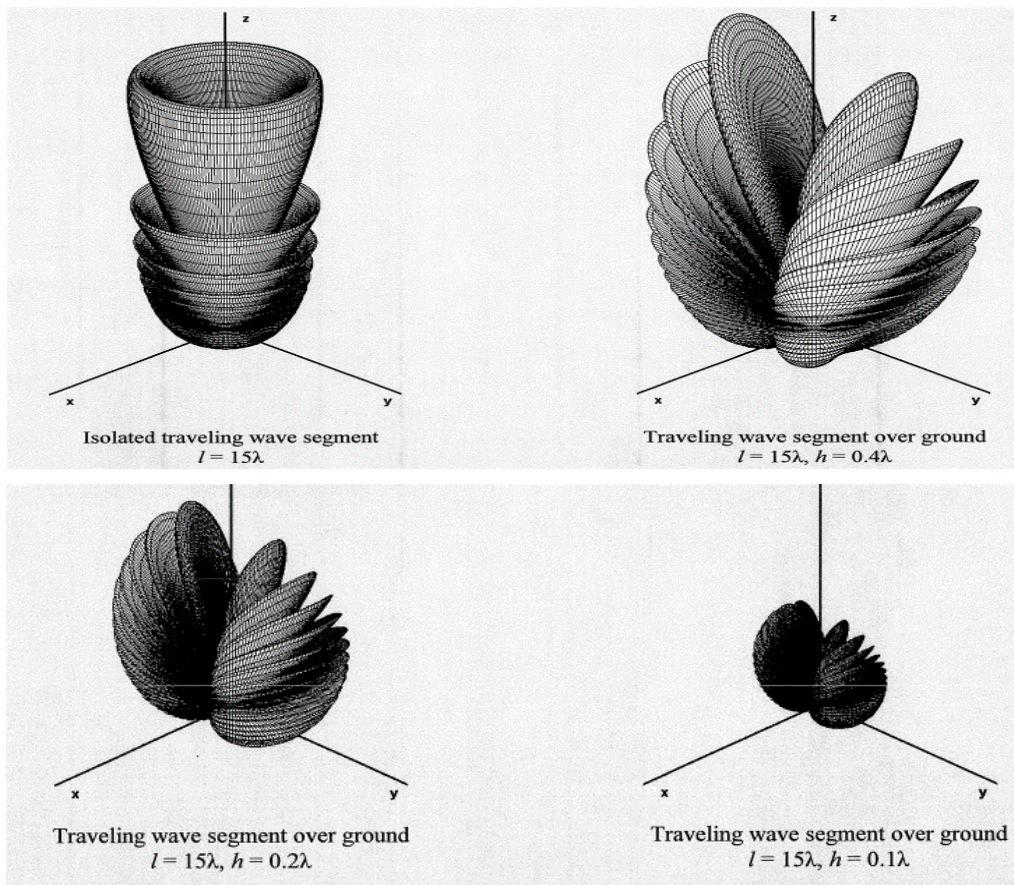


Figure.5. Diagramme de Rayonnement d'une antenne à ondes progressives au-dessus du sol

Antenne à ondes progressives en « V »

- ⇒ Comme nous l'avons vu précédemment, le lobe principal d'un segment d'ondes progressives s'est avéré incliné d'un angle par rapport à l'axe du fil ;
- ⇒ Les antennes à ondes progressives sont donc formées de plusieurs segments d'ondes progressives ;

- ⇒ Ces segments d'ondes progressives peuvent être orientés de sorte que les lobes principaux des fils composants se combinent pour améliorer la directivité de l'ensemble de l'antenne ;
- ⇒ Une antenne à onde progressive en « V » est un exemple ;
- ⇒ Elle est formée par la connexion de deux segments d'ondes progressives comme le montre la figure (6).

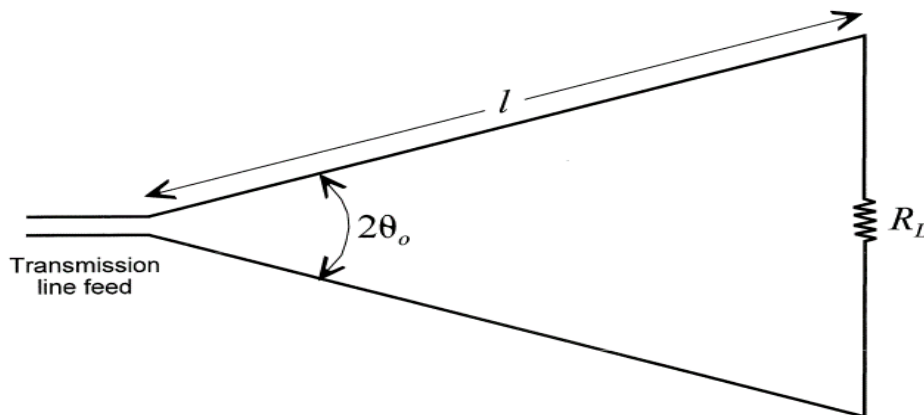


Figure.6. Antenne à ondes progressives en « V » dans l'espace libre

- ⇒ Comme le montre la figure (6), l'antenne en V à ondes progressives est assez similaire à l'antenne Beverage (un fil horizontal long au-dessus du sol), sauf que les deux fils rayonnants ne sont pas parallèles.
- ⇒ Comme nous l'avons montré plus haut, l'angle du lobe principal d'un segment d'ondes progressives, par rapport à l'axe du fil (θ_{max}), s'est avéré dépendre de la longueur du fil ;
- ⇒ Compte tenu de la longueur des fils dans l'antenne à ondes progressives en V, l'angle $2\theta_0$ peut être choisi de sorte que les faisceaux principaux des deux fils inclinés se combinent pour former une antenne avec une directivité accrue par rapport à celle d'un seul fil.

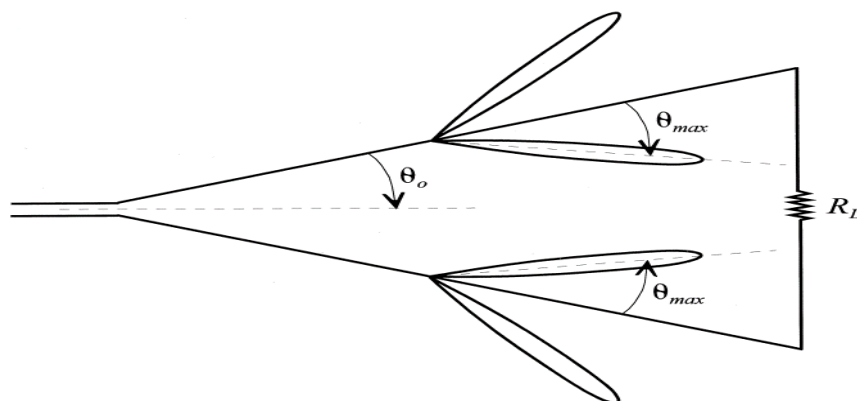


Figure.7. Caractéristiques du Diagramme de rayonnement d'une antenne V.

- ⇒ Une analyse complète révèle qu'en choisissant $\theta_o = 0.8\theta_{max}$, la directivité totale de l'antenne à ondes progressives en V est environ le double de celle d'un seul conducteur.
- ⇒ Notez que le diagramme global de l'antenne en V est essentiellement unidirectionnel étant donné que les conducteurs sont adaptés ;
- ⇒ De ce fait, les antennes à ondes progressives ont l'avantage d'avoir des diagrammes essentiellement unidirectionnels par rapport aux diagrammes de la plupart des antennes résonnantes ;
- ⇒ Des formules empiriques pour l'angle d'antenne en V ($2\theta_o$), qui maximise la directivité de l'antenne, sont données comme suit :

$$2\theta_o = -149.3 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^3 + 603.4 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 - 809.5 \left(\frac{l}{\lambda}\right) + 443.6 \quad 0.5 \leq l/\lambda \leq 1.5$$

$$2\theta_o = 13.39 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 - 78.27 \left(\frac{l}{\lambda}\right) + 169.77 \quad 1.5 \leq l/\lambda \leq 3.0$$

- ⇒ La directivité est donnée par :

$$D_o = 2.94 \left(\frac{l}{\lambda}\right) + 1.15 \quad 0.5 \leq l/\lambda \leq 3.0$$

Antenne en « V » réelle

- ⇒ Une mise en œuvre pratique de l'antenne à ondes progressives en V placée au-dessus d'un plan de masse est illustrée sur la figure (8) ;

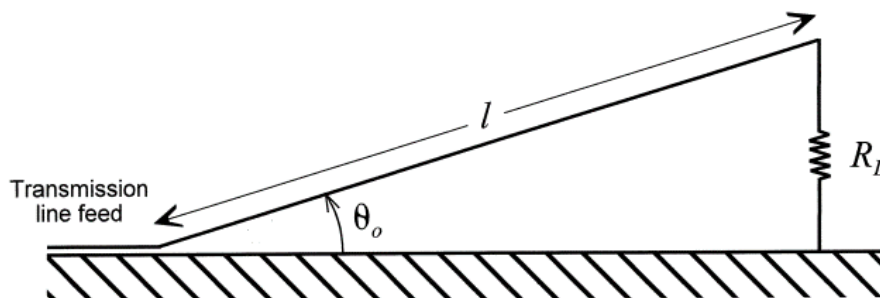


Figure.8. Mise en œuvre pratique de l'antenne en V

- ⇒ Cette configuration est une modification de l'antenne Beverage ;
- ⇒ En utilisant la théorie des images, la configuration résultante est celle de l'antenne à ondes progressives en V dans l'espace libre ;
- ⇒ Notez que la résistance de la charge adaptée, pour la configuration de ligne à un fil sur terre (R_L) est la moitié de celle associée à la ligne à deux fils équivalente ($2R_L$) ;
- ⇒ Le principe des images, pour cette antenne, est montré dans la figure (9) ;

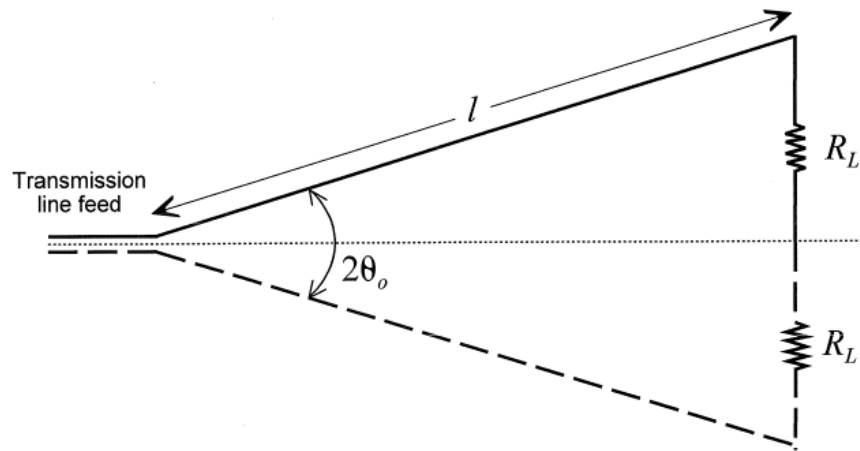


Figure.9. Théorie de l'image pour une antenne en V à onde progressive sur un plan de masse

Antenne losange

- ⇒ La géométrie d'une antenne rhombique (losange) peut être décrite comme la connexion de deux antennes à ondes progressives en V à leurs extrémités ouvertes ;
- ⇒ Comme le montre la figure (10), l'alimentation de l'antenne est placée à une extrémité du losange et la charge adaptée est placée à l'extrémité opposée ;
- ⇒ Comme pour toutes les antennes à ondes progressives, nous supposons que les réflexions de la charge sont négligeables ;
- ⇒ Typiquement, les quatre conducteurs de l'antenne rhombique sont supposés avoir la même longueur ;

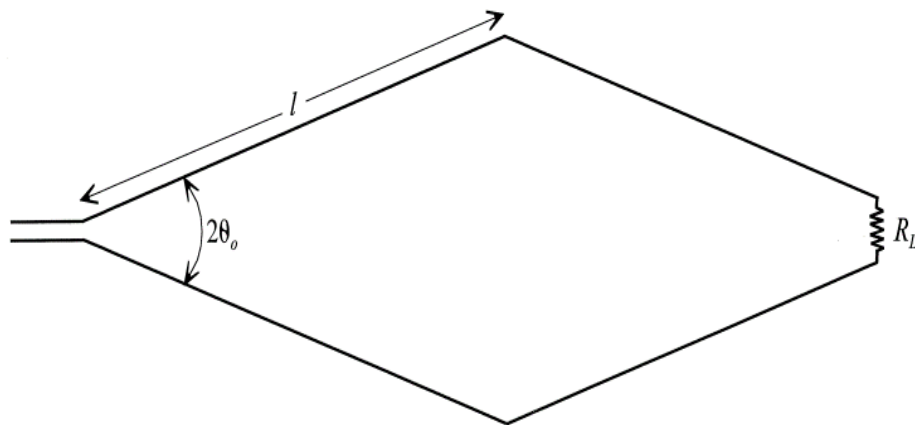


Figure.10. Antenne rhombique

- ⇒ En utilisant la théorie des images, une antenne rhombique peut également être réalisée en utilisant une antenne en V inversée, placée sur un plan de masse ;
- ⇒ La résistance de la charge est la moitié de celle requise pour l'antenne rhombique isolée comme le montre la figure (11).

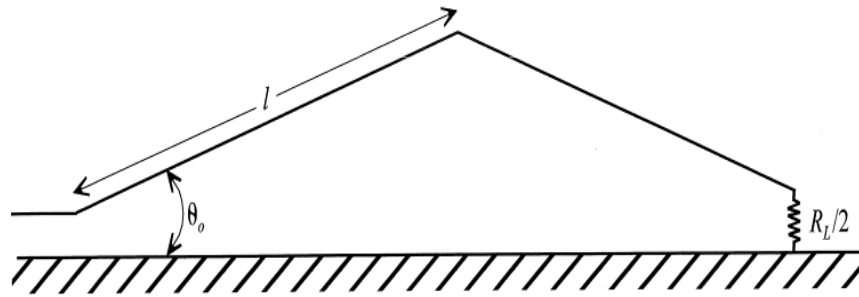


Figure.11. Antenne en V inversé, placée sur un plan de masse

- ⇒ Comme le montre la figure (12), pour produire un seul lobe principal de l'antenne, le long de l'axe de l'antenne rhombique, les conducteurs individuels de l'antenne rhombique doivent être alignés de telle sorte que les lobes des composants numérotés 2, 3, 6 et 7 soient alignés (en tenant compte des effets de séparation spatiale). Les paires de faisceaux (1,4) et (5,8) se combinent pour former des lobes latéraux importants mais à un niveau inférieur à celui du lobe principal.

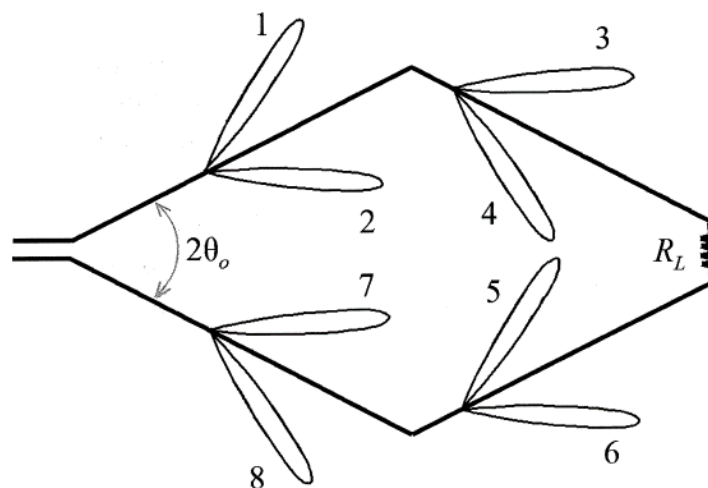


Figure.12. Principe de rayonnement de l'antenne rhombique