

L'ANTENNE "BEVERAGE"

Comment fonctionne-t-elle ?

Robert BERRANGER, F5NB

Physiquement, l'antenne "Beverage" est une antenne long fil à onde progressive disposée très proche du sol ($h < \lambda/100$). Ainsi elle acquiert des propriétés particulières, tant pour les ondes de surface (utilisation originelle) que pour les ondes d'espace (utilisation radioamateur).

Un peu d'histoire.

Cela se passait au début du vingtième siècle, au temps où la télégraphie sans fil cohabitait avec le télégraphe (avec fil). On avait remarqué que dans certains cas, un fil télégraphique constituait une excellente antenne pour une station radiophonique située dans son alignement, en contradiction apparente avec les lois de l'électromagnétisme appliquées aux antennes en espace libre. L'explication fut trouvée et Harold Beverage eut l'idée d'en faire une antenne de réception radiophonique ⁽¹⁾. L'intérêt du système réside dans sa directivité qui permet d'améliorer le rapport S/B, sa large bande électrique, et dans la facilité de sa mise en œuvre. Je rappelle qu'en ces temps là, les transmissions radio utilisaient des ondes kilométriques et une propagation par onde de surface (onde de sol). L'avènement des ondes courtes mit la "Beverage" en sommeil, mais elle fut remise en service par les radioamateurs DXers sur les bandes basses, car elle conserve sa directivité pour une onde d'espace.

Principe de fonctionnement (onde de surface).

Le fonctionnement de cette antenne est basé sur le fait que le vecteur champ électrique d'une onde électromagnétique polarisée verticalement n'est pas vertical au voisinage d'un sol mauvais conducteur, mais est incliné en avant dans la direction de propagation. Ceci est montré sur la figure 1.

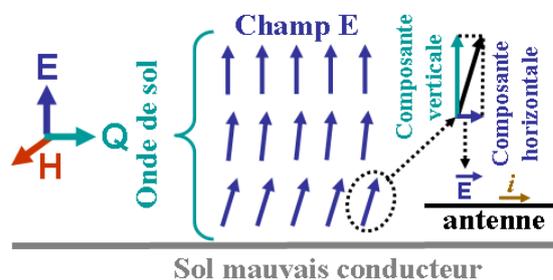


Figure 1.

La hauteur effective de l'antenne en polarisation verticale (en principe nulle pour une antenne horizontale) dépend de l'inclinaison du vecteur champ E, donc de la qualité du sol. Elle sera maximum pour un sol sec et quasi nulle pour l'eau de mer. *A priori*, elle devrait augmenter en disposant l'antenne très proche du sol, mais alors les pertes par pénétration du champ proche

créé par le courant induit dans l'antenne augmentent rapidement. Il y a donc une hauteur optimale relativement floue qui est de l'ordre de $\lambda/200$.

Directivité (onde de surface).

Le courant dans l'antenne sera maximum dans la direction du fil, aussi bien dans le plan H que dans le plan V. Ceci nous donne les diagrammes de rayonnement de la figure 2.

Beverage $L = \lambda$ (onde de sol)

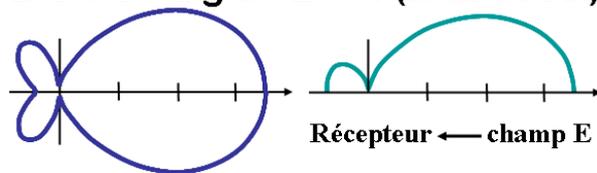


Diagramme Horizontal Diagramme Vertical Figure 2.

Noter que ces diagrammes ne sont pas fournis par les simulateurs habituels basés sur "NEC", car ceux-ci ne calculent que la **génération** d'une onde d'espace ⁽²⁾.

Conditions et limites de l'effet "Beverage"

L'effet ne se produit qu'en réception. Il sera maximum pour une onde polarisée verticalement et arrivant dans la direction de l'antenne, donc avec un vecteur de Poynting parallèle au sol. Dans ce cas, le champ E-M chemine le long du sol et ne s'y réfléchit pas (pas d'effet "antenne image" dans le sol).

En augmentant la longueur de l'antenne, le courant augmentera tant que le champ E qu'il produira autour de l'antenne sera en phase avec le champ E capté. La figure 3 nous montre l'origine du déphasage.

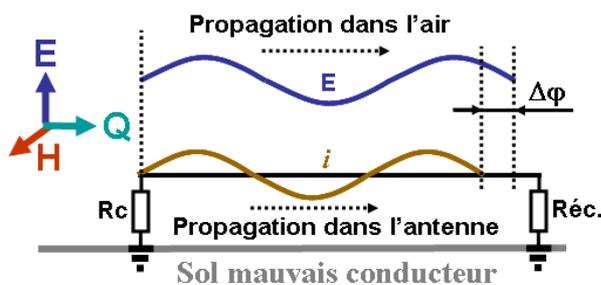


Figure 3.

Quand $\Delta\phi$ dépasse 90° , l'allongement de l'antenne réduit le courant dans la charge. Cette limite sera d'autant plus vite atteinte que le coefficient de vélocité de l'antenne sera faible. Il baisse en gagnant le fil et en diminuant sa hauteur au dessus du sol. Par ailleurs, les pertes augmentent plus vite que la longueur de l'antenne en particulier dans la résistance de retour constituée par un sol mauvais conducteur ⁽³⁾. Ceci fait qu'au-delà d'une longueur d'onde, l'augmentation de la longueur de l'antenne n'améliore plus significativement la sensibilité et finit par la diminuer.

Principe de fonctionnement (onde d'espace).

Dans ce mode de fonctionnement, l'antenne est réversible, ce qui va permettre de l'étudier en émission avec l'aide d'un simulateur. Attention à ne pas prendre n'importe lequel. Il faut qu'il

intègre la possibilité de modéliser un sol réel, ce que ne font pas en général les simulateurs gratuits utilisés par les radioamateurs. Le mien propose la méthode "Sommerfeld-Norton". Je rappelle que l'effet "Beverage" se manifeste pour la réception d'une onde polarisée **verticalement** avec une antenne polarisée **horizontalement**. En émission, une telle antenne n'émet qu'une onde polarisée horizontalement. Donc si la Beverage a une réponse pour une onde d'espace polarisée verticalement, cela ne peut être que très faiblement par les parties verticales de l'antenne qui sont très courtes si elle est proche du sol. Pour comprendre les diagrammes obtenus, il va falloir faire un peu de géométrie dans l'espace. Nous simulerons d'abord un dipôle pleine onde en espace libre, alimenté au centre. Examinons les diagrammes de rayonnement sur la figure 4.

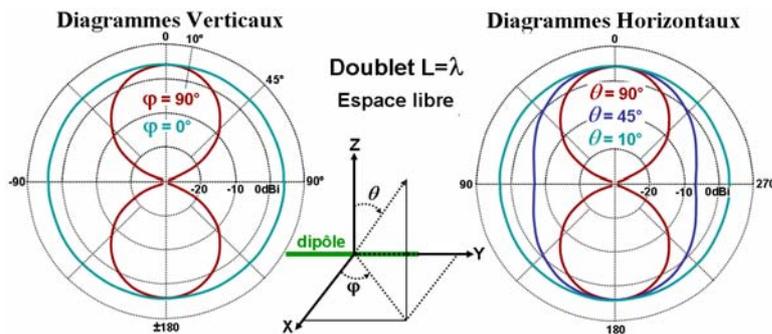


Figure 4.

Le dipôle est disposé selon l'axe **Y**. Les diagrammes délimitent un volume en forme de tore de révolution autour de l'axe de l'antenne. Considérons une polarisation **H** (axe **Y** parallèle au sol). Alors, si pour un angle de site de 0° ($\theta=90^\circ$), le rayonnement est bien nul dans la direction du dipôle, ce n'est plus vrai pour un angle de site de 45° , et pour un angle de site de 80° ($\theta=10^\circ$), le diagramme horizontal est quasiment circulaire ⁽⁴⁾. Pour comprendre ceci, imaginez que par le point du diagramme vertical correspondant à un angle de site de 80° , vous coupez le tore horizontalement. La surface du tore à la séparation serait bien un ovale très proche du cercle.

Refaisons la simulation de notre dipôle en espace libre avec une alimentation au quart de sa longueur. Nous obtenons un long fil d'une longueur de lambda. La figure 5 montre les nouveaux diagrammes.

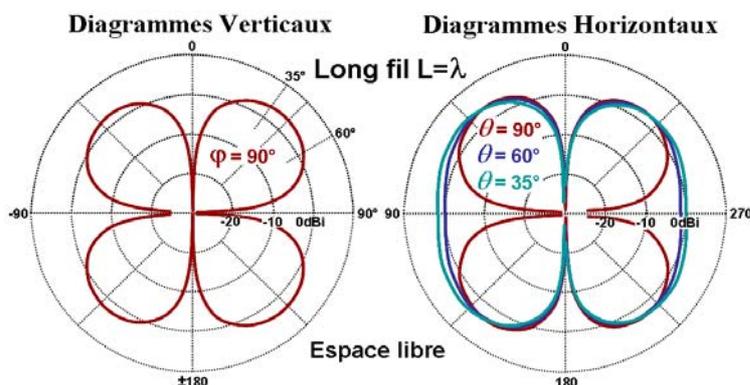


Figure 5.

Les diagrammes ne délimitent plus un tore, mais deux cônes creux, de révolution autour de l'antenne (axe **Y**), et symétriques par rapport à l'axe **X** (l'échelle Log élargit les courbes).

Le résultat important de cette simulation est que les diagrammes de rayonnement correspondent **exactement** à ceux de la Beverage pour une onde d'espace. Prenons le diagramme vertical. Supprimons la partie inférieure (dans le sol) et la partie gauche (onde

progressive) et nous retrouvons le diagramme d'une Beverage de même longueur, au gain près. Concernant le diagramme horizontal, supprimons également la partie gauche pour tenir compte de l'onde progressive, et nous retrouvons dans la plage de site qui nous intéresse un lobe unique dans l'axe du fil.

Nous sommes maintenant prêts pour simuler notre long fil proche du sol et alimenté selon Harold Beverage. Les caractéristiques du système sont indiquées sur la figure 6.

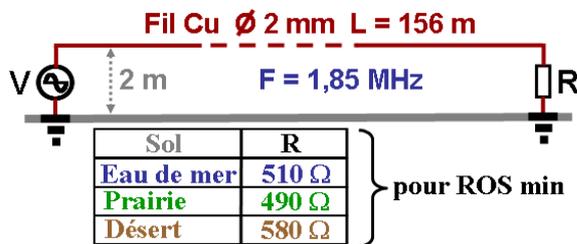


Figure 6.

Le générateur V est une source de tension ($R_i=0$)⁽⁵⁾. Les résistances de charge ont été ajustées pour un minimum de ROS dans l'antenne (l'impédance caractéristique du système dépend de la nature du sol). Nous avons sur la figure 7 les diagrammes de rayonnement et les gains pour trois sols différents.

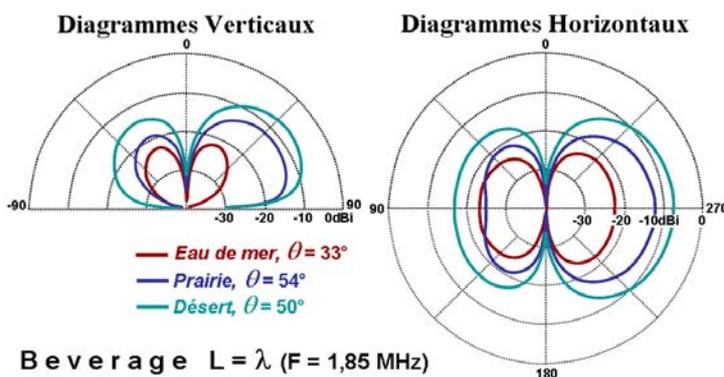


Figure 7.

Les diagrammes horizontaux sont repris sur la figure 8 avec la valeur du champ électrique (échelle linéaire). De plus, les diagrammes V étant très ouverts, il a été pris une élévation unique de 20° ($\theta=70^\circ$), cet angle correspondant à une propagation DX.

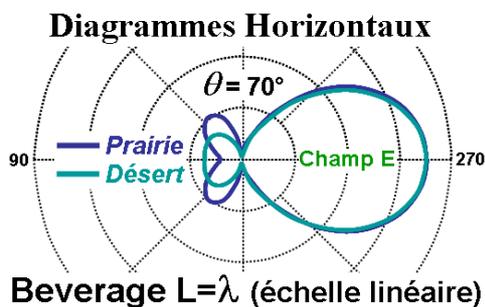


Figure 8.

Noter que le diagramme ne figure pas pour l'eau de mer car à cette échelle, il est minuscule. Nous obtenons des diagrammes similaires à ceux que nous trouvons habituellement dans la littérature. Pour un angle de tir de 20° , les diagrammes et les gains sont identiques pour un bon et un mauvais sol. Le rapport AV/AR est un peu dégradé par le rayonnement des parties verticales. Il nous reste à trouver pourquoi nous obtenons avec l'antenne au ras du sol un rendement honorable et des diagrammes semblables à ceux en espace libre.

Origine du gain en onde d'espace.

Pour comprendre le mécanisme, voyons ce qui se passe quand une onde électromagnétique rencontre un milieu semi conducteur comme le sol. Je vais résumer ici ce qui est développé par ailleurs en détail dans la rubrique "Comment ça marche ?" de F6KRK ⁽⁶⁾.

Si l'onde arrive tangentiellement au sol, elle n'y pénètre pas et elle chemine le long de celui-ci. C'est le cas des ondes de surface (ondes de sol) qui sont en polarisation Verticale ⁽⁷⁾. Si une onde arrive avec un certain angle, une partie de l'onde est réfléchi (rayon réfléchi) et une autre partie est absorbée par le sol (rayon diffracté). Le rapport entre la partie réfléchi et la totalité est appelé "coefficient de réflexion". Pour les ondes en polarisation H (qui nous intéressent ici), la réflexion s'accompagne d'une rotation de phase de 180° avec un sol parfait. Sinon la phase augmente, selon la fréquence, l'angle de réflexion, et la qualité du sol. Celle-ci est caractérisée par la permittivité relative (ϵ_r) du sol et sa conductivité (γ). Voir sur la figure 9 la variation du coefficient de réflexion dans la bande HF pour l'eau de mer et un sol sec.

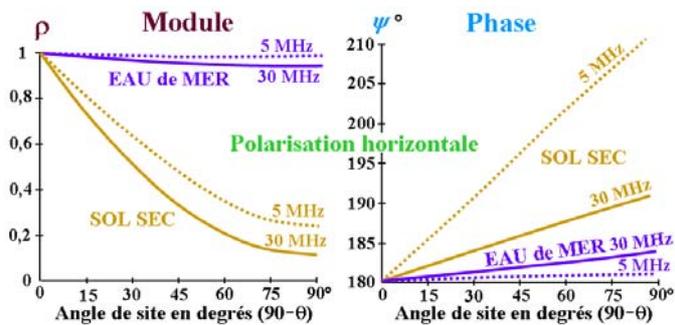


Figure 9.

Je n'ai pas les valeurs pour la bande 160m, mais on peut extrapoler à partir des courbes 5MHz. Nous voyons que l'eau de mer peut être considérée comme un sol parfait pour la bande HF, d'autant mieux que la fréquence diminue. Il n'en va pas de même pour un sol sec où le coefficient de réflexion est très faible pour un angle incident nul ($\theta=0$), angle à considérer avec la Beverage du fait de la proximité du sol. Et même si le module s'améliore quand la fréquence diminue, la phase se détériore. Mais ne nous désolons pas, car c'est grâce à ces imperfections du sol que la Beverage va **rayonner un peu** (et donc recevoir). Pour le comprendre, faisons appel à la théorie des images et observons sur la figure 10 le système électromagnétique de la Beverage.

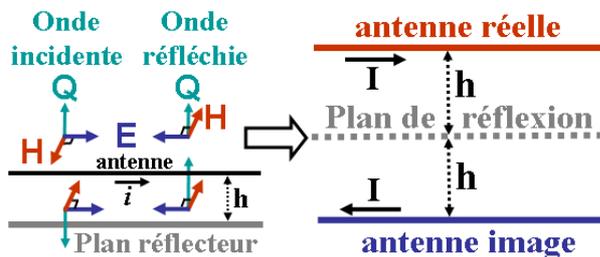


Figure 10.

A gauche, nous avons les vecteurs de Poynting correspondant aux directions de propagation supérieure et inférieure. Le plan réflecteur a pour effet d'inverser le vecteur E et pas le vecteur H . Ainsi le vecteur de Poynting (Q) rebrousse chemin. Si h est très faible, on peut négliger le temps de propagation aller et retour et alors nous voyons que les vecteurs E et H de l'onde directe et de l'onde réfléchi sont en opposition de phase. Si les énergies directe et réfléchi

sont égales (réflexion totale), elles s'annulent. Si l'antenne est refermée sur une charge, toute l'énergie va dans la charge. Nous avons obtenu une ligne parfaite.

Il y a deux manières de faire rayonner l'antenne. L'une consiste à l'éloigner du sol ce qui amène un déphasage entre les ondes directes et réfléchies qui ne se compensent plus. Le rayonnement provoque l'apparition d'une résistance de pertes dans l'antenne. Par ailleurs son diagramme de rayonnement se modifie car le déphasage varie selon l'angle de départ. Le système acquiert de la directivité, ce qui augmente encore le gain (jusqu'à 6 dB). L'autre manière, celle utilisée par la Beverage, consiste à diminuer l'énergie réfléchi grâce à un sol ayant un faible coefficient de réflexion. Comme l'antenne est très proche du sol, l'angle de réflexion est constamment égal à zéro et les diagrammes de rayonnements ne sont pas modifiés par la proximité du sol ⁽⁸⁾.

Donc, plus le sol aura un mauvais coefficient de réflexion, ou ajoutera du déphasage, et plus l'antenne rayonnera, c'est-à-dire que sa résistance de rayonnement augmentera.

Tout serait parfait s'il n'y avait les pertes. Celles-ci sont dues principalement au champ réactif, beaucoup plus important que le champ actif. Le champ réactif décroissant en $1/d^3$, est très élevé aux alentours immédiats de l'antenne. En présence du sol, il y pénètre et s'y dissipe, ce qui amène des pertes par effet Joule.

En émission, il faut ajouter le mauvais rendement dû à la petitesse de la résistance de rayonnement par rapport à l'impédance de charge à l'extrémité de la ligne.

À la réception, le système peut être modélisé comme une source de f.é.m. qui débite dans la résistance de charge R en série avec l'impédance d'entrée du récepteur (identiques en principe). La f.é.m. est égale au champ E multiplié par la hauteur effective de l'antenne ⁽⁹⁾. Il est égal au champ reçu moins le champ réfléchi par le sol. Avec un sol parfait, il est nul. En absence de réflexion (espace libre), il est égal au champ reçu.

Donc globalement, la Beverage aura un faible rendement à l'émission et une faible sensibilité à la réception, comme on peut le voir sur la fig.7. Mais pour les bandes basses (160 et 80m), la sensibilité n'est pas un problème car le bruit de bande est très important. Une bonne manière de le diminuer est d'avoir une antenne directive, et pour cela, la Beverage a un atout. Développons cet aspect en introduisant la notion de hauteur efficace optimale ⁽¹⁰⁾.

Hauteur efficace optimale.

Nous avons sur la figure 11 la modélisation électrique d'une antenne Beverage à la réception.

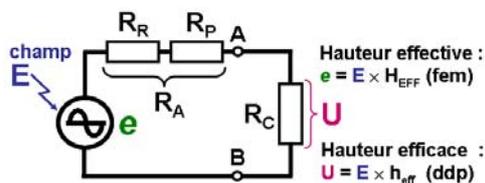


Figure 11.

R_R est la résistance de rayonnement. R_P est la résistance de pertes, elle comprend également la résistance de charge R . R_C est la résistance d'entrée du récepteur. Je n'ai pas fait figurer les réactances car nous sommes en onde progressive. Pour le rendement, il faut considérer R_P en série avec R_C . Nous voyons que si R_R (résistance de rayonnement) est faible, la puissance électrique récupérée est faible également. Elle serait maximum avec $R_C=R_R$ et $R_P=0$, mais l'obligation d'avoir une onde progressive impose R et R_C .

Maintenant, voyons pourquoi la sensibilité n'est pas critique pour les antennes bandes basses. Examinons la figure 12.

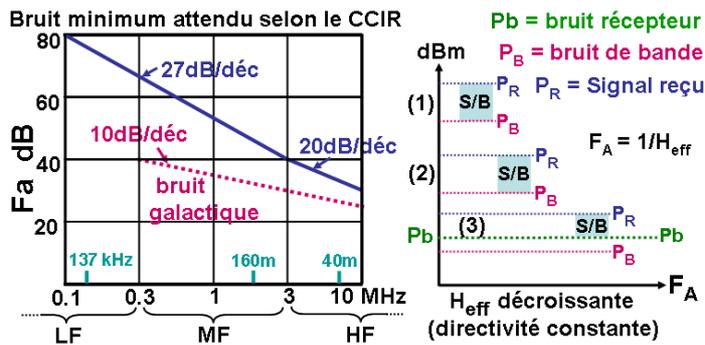


Figure 12.

A gauche, nous avons une courbe montrant le bruit de bande minimum attendu dans nos campagnes françaises. Il est exprimé sous forme de facteur de bruit F_a , d'une manière analogue au facteur de bruit thermique (F_b). Le bruit de bande comprend les bruits industriels et atmosphériques (moyennés). Nous voyons que pour le 160m, il est déjà important.

A droite nous avons trois situations correspondant à trois hauteurs efficaces décroissantes. En (1), le bruit de bande est bien au dessus du bruit du récepteur et c'est lui qui détermine le rapport S/B. La valeur requise pour une réception utile est figurée en bleu clair. En (2), le bruit de bande et le signal reçu ont diminué de concert, mais aucun problème pour conserver le rapport S/B minimum. En (3), ce n'est plus vrai car le bruit de bande est passé sous le bruit du récepteur, réduisant le rapport S/B.

La hauteur efficace optimale est la hauteur efficace minimum qui permet de conserver le rapport S/B nécessaire, soit pour nous une H_{eff} intermédiaire entre le cas (2) et le cas (3). Au dessus de cette H_{eff} optimale, l'augmentation des signaux peut avoir pour effet d'occasionner de la transmodulation dans le récepteur, voire le saturer avec un brouilleur puissant ⁽¹¹⁾.

Donc la faible sensibilité de la Beverage n'est pas un problème. Si l'on en manque un peu avec un récepteur HF standard ($F_b \approx 12$ dB), il suffit d'insérer à son entrée un préamplificateur à faible bruit et fort niveau ⁽¹²⁾.

Pour une antenne fouet, on arrêterait là, mais avec la Beverage, cela se complique un peu. En effet, elle est directive et nous allons voir la répercussion sur la H_{eff} optimale.

Conséquences de la directivité de la Beverage.

Le bruit de bande est considéré comme isotrope. En conséquence une antenne directive a pour effet de diminuer la puissance du bruit reçu. Le facteur de réduction est égal à la directivité (gain iso) plus 3 dB pour la mono direction. Pour la Beverage on prend le gain iso en espace libre et cela nous donne une réduction de bruit de 7 dB (4+3), ce qui augmente d'autant le rapport S/B ou la sensibilité du système. En conséquence cela augmente de la même valeur la hauteur effective optimale. Essayons de chiffrer tout cela à 1,85 MHz pour notre antenne avec un angle de site de 20°. Le gain est de l'ordre de -15 dBi. Le F_a attendu est de $45 - 7 = 38$ dB. A l'entrée du récepteur, le F_a est ramené à $38 - 15 = 23$ dB. Nous sommes 11 dB au dessus du bruit du récepteur. Celui-ci ne dégrade le rapport S/B que de 0,4 dB. Pas besoin de mettre un préampli. Mais le bruit de bande considéré est un bruit moyen avec des variations de plus ou moins une dizaine de dB. Donc pour les périodes calmes, prévoir un préampli d'une douzaine de dB avec un F_b de 2 dB maxi.

Mais nous n'avons raisonné que pour une onde d'espace. Or la Beverage est schizophrène, elle est sensible à la fois à une onde d'espace polarisée H et à une onde de sol polarisée V. Et pour cette dernière, il va falloir tenir compte du bruit industriel de surface qui est justement à polarisation dominante V. Et là, le gain de la Beverage peut être plus élevé qu'en onde d'espace. Nous serons gênés tant que ce bruit industriel de surface surpassera (à l'entrée du

récepteur) le bruit par onde d'espace. Moralité : éviter de pointer une Beverage en direction d'une grande ville à moins d'une trentaine de kilomètres de celle-ci.

Optimisation de la Beverage.

Tout s'améliore en augmentant la longueur de l'antenne, en la gainant, et en la remontant un peu au dessus du sol, à une hauteur où la fabrication des supports reste encore facile. Pour l'onde d'espace, le fait d'augmenter la hauteur augmente le rendement. L'augmentation de la longueur augmente la directivité (gain) et abaisse le lobe de rayonnement. Le gainage n'a d'autre effet que d'augmenter la longueur électrique par rapport à la longueur physique. Pour l'onde de sol, le gainage et l'augmentation de la longueur ont pour effet d'augmenter le déphasage, jusqu'à diminuer le gain. Tout cela n'est pas critique et avec une longueur de la Beverage de deux lambdas à une hauteur de $\lambda/100$ à $\lambda/50$, on a un bon compromis. Pour la bande 160m, avec un coefficient de vélocité de 0,9, cela fait quand même une antenne de 288m de long à une hauteur de 3m (!). Si on en dispose trois à 120° (difficile d'envisager une rotation), cela demande un espace de 10 hectares. Pas faciles à trouver dans un lotissement de banlieue. Donc si vous voulez être le roi du DX sur les bandes basses, il ne vous reste plus qu'à élever des chèvres sur le plateau du Larzac et installer vos Beverages dans une prairie devant le QRA.

Conséquences pour l'émission.

Que vient faire l'émission dans cette affaire de réception ? C'est très simple. Si vous améliorez votre réception pour être bien meilleur que la moyenne des autres OM, cela ne suffit pas si vous n'augmentez pas aussi votre PIRE à l'émission pour être également au dessus de la moyenne. Sinon, aux conditions limites, vous entendrez bien votre correspondant, mais lui ne vous entendra pas. Vous ne pourriez trafiquer dans ces conditions qu'avec des OM qui auraient en réception une aussi bonne installation que vous ⁽¹³⁾.

Conclusions.

Ces dernières décennies, le paysage radioamateur s'est modifié pour les amateurs de DX. Si l'on considère que le but du DXer est de contacter un maximum de pays très éloignés, il n'y a plus de problème technique. En effet, pratiquement tout le monde peut s'acheter un bon transceiver HF et installer des antennes performantes (YAGI). L'art du DXer se restreint alors à être sur la bonne bande au bon moment et à faire entendre sa voix parmi tous les autres OM qui ont eu la même idée que lui. Mais il y a encore une partie d'irréductibles qui aiment mettre "les mains dans le cambouis". Ils vont donc aller dans des domaines où l'art est plus difficile, donc délaissé par les majoritaires et les pourvoyeurs marchands de leur matériel. Il s'agit des hyperfréquences et des bandes basses qui nous intéressent ici.

L'art du DXer sur ces bandes basses va consister à peaufiner l'adaptation de ses antennes à la propagation et à prédire celle-ci à partir des données géophysiques qu'il a à sa disposition. Le tout assaisonné d'une bonne dose de patience, ou de chance.

Les principaux handicaps que l'OM va rencontrer sont constitués par le coût de son installation d'antenne et par l'espace nécessaire pour la déployer. Dans ce contexte, la Beverage a un excellent rapport qualité/prix (amélioration du rapport S/B et une très grande bande passante ⁽¹⁴⁾), mais demande beaucoup d'espace. Donc réservée aux ruraux.

Bibliographie

Mon livre de chevet est un cours d'électricité générale de l'ENST, peu accessible au radioamateur. Par contre il lira avec profit les articles "Comment ça marche?" publiés dans Radio-REF. Ceux sur la hauteur effective et la hauteur efficace sont déjà publiés et ceux sur la formation du diagramme de rayonnement sont en cours. Après leur publication, ils sont tous consultables et téléchargeables sur le site "<http://blog.f6krk.org>", catégorie "Bulletins / Gazettes" puis "Comment ça marche ?". Il y a aussi mes articles sur les antennes ("Articles membres" puis "F5NB").

Pour la fabrication d'une Beverage, la bible s'appelle "Low Band DXing", le livre de ON4UN publié par l'ARRL. Dans l'édition de 1987, sa description du fonctionnement de la Beverage est un peu confuse et ambiguë, mais cela n'enlève rien au reste.

Notes.

- (1) *L'antenne "Beverage" fut utilisée aux Etats-Unis pour l'écoute des émissions radiophoniques européennes. Une seule antenne suffisait pour recevoir toutes les stations.*
- (2) *Le mien a théoriquement une possibilité de produire des diagrammes pour une onde de surface (en réception), mais quand je le lui demande, il se plante lamentablement.*
- (3) *D'une manière imagée, on peut dire que le courant supplémentaire diminuant avec l'augmentation de la longueur finit par se perdre en route avant d'arriver au récepteur.*
- (4) *Avez-vous remarqué qu'avec une antenne Yagi 3él. sur la bande des 20m, en réflexion ionosphérique pour des distances inférieures à 500 km, il n'y a plus de directivité H ?*
- (5) *En réception il est préférable d'avoir une impédance d'entrée adaptée au système. Cette impédance variant avec la nature du sol, il est nécessaire de la mesurer lors de la construction pour adjoindre un système d'adaptation adéquat.*
- (6) *Série d'articles sur la formation du diagramme de rayonnement.*
- (7) *On ne sait produire des ondes de sol qu'avec une antenne verticale au sol.*
- (8) *Sauf que le rayonnement dans le sol est rapidement dissipé en chaleur.*
- (9) *Voir le "Comment ça marche" sur la hauteur effective.*
- (10) *On relira avec profit le "Comment ça marche" sur la hauteur efficace.*
- (11) *Si on écoute la bande des 40m à la tombée de la nuit avec une bonne antenne d'émission, il est nécessaire de mettre en entrée réception une atténuation pouvant aller jusqu'à 30 dB pour supprimer les "oiseaux" (fonction de la qualité du récepteur).*
- (12) *Pas celui qui est dans le récepteur. Il faut le fabriquer soi-même et le faire précéder par un filtre de bande efficace, par ailleurs nécessaire même sans préampli car la Beverage "ratisse large".*
- (13) *Allez en Terre Adélie et pour avoir des liaisons équilibrées, il vous faudra une puissance d'émission plus de dix fois supérieure à celle de vos correspondants dans des pays "civilisés" (expérience personnelle).*
- (14) *Une Beverage optimisée pour le 160m fonctionne encore très bien pour le 80m (onde d'espace). Mais il ne faut pas se leurrer, sa grande bande passante résulte de son très faible rendement (maxi quelques pourcents). C'est pourquoi la Beverage n'est pas utilisée en émission.*