

Comment ça marche ?

La boucle dite "magnétique"

Par le radio-club F6KRK

Si "magnétique" a été mis entre guillemets, c'est que l'expression est ambiguë. Avant de continuer la série sur les antennes actives avec une petite boucle, nous allons approfondir la notion de "boucle élémentaire".

Les antennes élémentaires

Le doublet élémentaire et la boucle élémentaire ont ceci en commun que l'on considère que leurs conducteurs sont parcourus sur toute leur longueur par un courant constant en amplitude et en phase. Ceci n'est obtenu en pratique que pour des aériens très petits devant la longueur d'onde (L ou $dia. < \lambda/100$).

La boucle élémentaire

Physiquement, l'aérien est constitué d'un fil unique enroulé dans un plan sous la forme d'une boucle circulaire. Mais pour faciliter l'analyse du fonctionnement on prendra une boucle carrée que l'on peut considérer comme la mise bout à bout de quatre doublets élémentaires parcourus par un même courant. On signalera le cas échéant les différences avec une boucle circulaire.

Analyse des champs

Nous verrons les champs produits à l'émission et en déduirons le comportement en réception ⁽¹⁾. Pour comprendre les vecteurs du champ électromagnétique on relira avec profit les "Comment ça marche" sur l'électromagnétisme et le rayonnement des antennes ^[1].

Champ H

La figure 1 montre les vecteurs du champ H produit par la circulation d'un courant i dans la boucle.

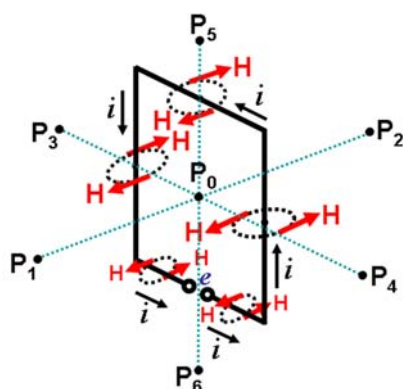


Figure 1.

Plaçons nous dans le plan de la boucle au point P_0 au centre de celle-ci et regardons les quatre doublets. Nous constatons que tous les vecteurs champ H sont dirigés dans le même sens et ils s'ajoutent. En tout point à l'intérieur de la boucle, il y a un champ H avec une distribution du flux qui dépend de la géométrie de celle-ci.

Écartons nous du point P_0 sur un axe perpendiculaire au plan pour arriver aux points P_1 ou P_2 . Au fur et à mesure que l'on s'éloigne du plan, les vecteurs H de deux dipôles opposés s'inclinent l'un vers l'autre et à une distance suffisante ($>100 \text{ dia.}$ de la boucle), ils sont dirigés en sens inverse et s'annulent.

Maintenant, écartons nous du point P_0 , mais dans le plan et à l'extérieur de la boucle (points P_3, P_4, P_5 et P_6). Nous constatons que les champs de deux dipôles opposés s'annulent également.

En conclusion, le champ H s'annule très rapidement à l'extérieur d'une boucle très petite devant λ et parcourue par un courant constant (boucle élémentaire).

Champ E

Il s'agit du champ électrique créé par la variation du champ magnétique (loi de Faraday) ⁽²⁾. Son vecteur est dirigé dans le même sens que le vecteur courant qui a fait naître le champ magnétique. Considérons la figure 2.

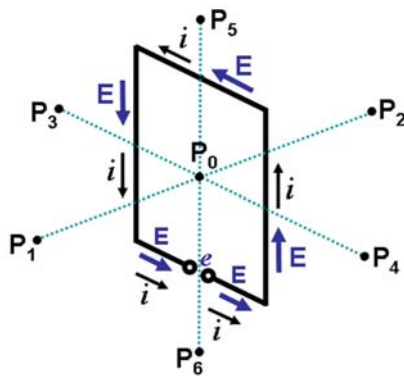


Figure 2.

Nous voyons que quelle que soit la position du point sur l'axe P_1, P_0, P_2 , les champs E produits par deux dipôles opposés s'annulent. Il en va de même pour les points P_3 à P_6 situés dans le plan.

En conclusion, avec une boucle très petite devant λ parcourue par un courant constant (boucle élémentaire), le champ E produit reste "collé" au conducteur et diminue très rapidement dès que l'on s'éloigne de celui-ci, même à l'intérieur de la boucle.

Champ E_s (électrostatique)

Puisqu'à cause de la self-induction, la boucle présente une différence de potentiel, il y a donc production d'un champ électrostatique E_s . Avec une boucle carrée, ce champ est la composition des champs E_s des quatre dipôles électriques mis bout à bout, comme montré sur la figure 3.

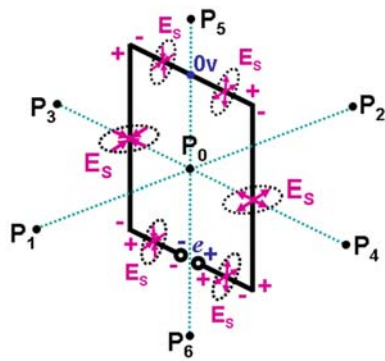


Figure 3.

Comme pour le champ E , on peut constater que le champ E_s est nul pour tous les points et qu'il reste "collé" au conducteur.

Boucle magnétique ?

A contrario, on peut définir une boucle comme étant "magnétique" si elle n'est absolument pas sensible aux champs électriques présents dans son environnement. Or une analyse fine des champs E et E_s avec la boucle carrée des figures 2 et 3 montre que ce n'est pas vrai pour tous les points de l'espace, les diagrammes électriques sont en forme de "trèfles à quatre feuilles" dans les deux plans. Pour avoir un diagramme nul, il faut que la boucle soit circulaire. S'en souvenir lorsqu'on se sert d'une boucle pour faire une mesure d'induction en champ proche. Par ailleurs on constate qu'une boucle magnétique ne rayonne pas (et donc ne reçoit pas).

Rayonnement

Pour qu'une boucle rayonne, il faut que le champ E généré ne soit pas nul dans au moins une direction (le champ E_s ne joue aucun rôle). Il faut donc que le système soit déséquilibré, ce qui ne se fera qu'avec des dimensions qui ne soient plus négligeables devant la longueur d'onde. On fera alors intervenir le retard des potentiels, postulat admis à l'origine du rayonnement. Considérons la figure 4.

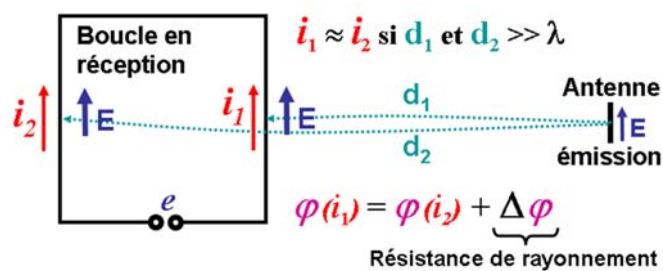


Figure 4.

Noter que l'on fait ici l'analyse en réception et avec le champ E car c'est plus simple. Mais on pourrait le faire en émission et/ou avec le champ H .

Les deux doublets horizontaux ont l'émission "dans les pointes" et ne captent rien. Si la source était déplacée de 90° dans le plan, les paires de dipôles seraient inversées. Et si la source était dans une position intermédiaire, tous les dipôles captent une partie du champ, selon leur orientation.

Si la boucle n'est pas chargée, l'énergie captée est re-rayonnée (moins les pertes dans le conducteur) et la boucle présente à ses bornes une f.é.m. e égale à sa hauteur effective multipliée par le champ E reçu ⁽³⁾.

Pour une direction perpendiculaire au plan de la boucle, les courants dans les doublets sont parfaitement égaux, de signes inversés deux à deux et en phase. Il n'y a donc ni rayonnement, ni réception.

Diagramme de rayonnement

En conséquence de notre analyse, on peut tracer le diagramme de rayonnement de la figure 5.

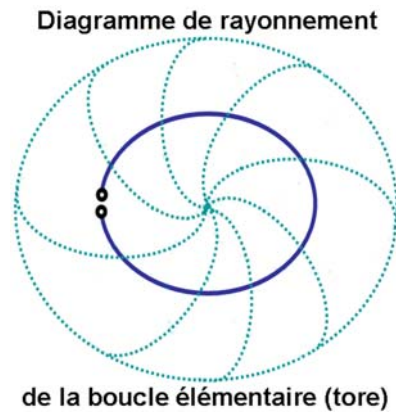


Figure 5.

Nous avons une forme de tore, comme pour le doublet (électrique), mais avec le nul dans la direction du champ H au lieu de celle du champ E avec le doublet ⁽⁴⁾. C'est pourquoi la boucle élémentaire est parfois appelée "doublet magnétique". Mais il y a une différence fondamentale : lorsque la longueur d'un doublet augmente, il conserve un nul dans sa direction, alors que lorsque le diamètre de la boucle augmente, le nul disparaît peu à peu. En effet, quand le diamètre augmente, on ne peut plus considérer un courant et une phase constants dans la boucle et il n'y a plus compensation dans une direction perpendiculaire à son plan. Mieux même, quand une boucle carrée (alimentée au centre d'un côté) atteint pour son côté une longueur égale à $\lambda/4$ (quad), le maximum de rayonnement a lieu dans une direction perpendiculaire à son plan et il y a un nul dans celui-ci.

Question : Pour quelles dimensions d'une boucle carrée en espace libre le rayonnement est-il quasi isotrope (champs égaux dans toutes les directions) ⁽⁵⁾ ?

Polarisation

Par définition, la polarisation est l'angle que fait le vecteur E par rapport à un plan de référence (le sol pour les antennes). Pour un angle de 0° (vecteur E // au sol), la polarisation est horizontale et elle est verticale pour un angle de 90° .

Pour une petite boucle, le vecteur E étant situé dans le plan de la boucle, sa polarisation est la direction de son plan par rapport au sol : H pour une boucle horizontale et V pour une boucle verticale.

Influences du sol

Grosso modo elles sont les mêmes que pour un doublet classique avec comme différence le fait que le diagramme est omnidirectionnel pour une polar H et en "huit" pour une polar V, à l'inverse du doublet. Par ailleurs, lorsqu'on place une boucle V près du sol, il n'y a pas besoin d'un contrepoids ou d'un plan de sol artificiel comme avec un monopôle. Pour diminuer les pertes par pénétration du champ réactif dans le sol, on peut disposer une boucle carrée en losange avec l'alimentation par la pointe près du sol. Pour une boucle H, il est nécessaire de la

disposer suffisamment haut au dessus du sol pour abaisser l'angle de tir vertical, comme pour les doublets.

Les petites boucles sont surtout utilisées en **réception par onde de sol** (polar V) pour les bandes inférieures à la HF (< 3 MHz) ⁽⁶⁾.

Conclusion

La différenciation entre "doublet électrique" et "boucle magnétique" est uniquement valable en champs proches (mesures d'inductions). Pour les champs lointains (propagés), le doublet et la boucle sont simplement deux antennes de géométries différentes. Elles sont toutes deux sensibles aux champs E et H, ce qui est normal, puisque ces champs sont indissociablement liés dans une onde électromagnétique.

Dans le prochain "Comment ça marche" nous continuerons la série des antennes actives avec une petite boucle.

La Rubrique "Comment ça marche ?" est une activité collective du radio-club F6KRK (<http://www.f6krk.org>). Pour une correspondance technique concernant cette rubrique : "f5nb@ref-union.org".

Bibliographie.

[1] Revoir les "Comment ça marche ?" concernés dans les précédents Radio-REF. Ils sont également consultables et téléchargeables sur le site de F6KRK : "www.blog.f6krk.org", catégories "Articles membres" puis "Bulletins et Gazettes" puis "Comment ça marche ?".

Relire également l'article "Mesure du champ électromagnétique" publié dans Radio-REF de décembre 2012 et consultable sur le blog de F6KRK, dans la catégorie "Articles membres" puis "F5NB".

Notes.

- 1) *La boucle étant un circuit passif, son fonctionnement est réversible.*
- 2) *Ce phénomène est appelé "self-induction" et se quantifie par un coefficient exprimé en Henrys.*
- 3) *Pour les détails, revoir le "Comment ça marche" sur la hauteur effective d'une antenne^[1].*
- 4) *Diagramme tout à fait théorique, puisque c'est le diagramme de rayonnement d'une boucle élémentaire qui ... ne rayonne pas.*
- 5) *Réponse : La longueur d'un côté doit être égale à peu près à $\lambda/8$.*
- 6) *En HF, on l'utilise quand on n'a pas la place pour déployer un plus grand aérien et alors il faut s'accommoder du mauvais rendement en émission (d'autant qu'elle n'est en général pas dégagée).*