

Antenne ? Vous avez dit "antenne" ?

Robert BERRANGER, F5NB

Le rapport entre le radioamateur et ses antennes est complexe et relève parfois plus de la croyance que de la technique... Cet article a pour but de clarifier la situation et d'aider à faire le tri entre ce qui rayonne et ce qui ne rayonne pas ou peu. Et on verra que l'antenne n'est pas toujours là où on l'attend.

Qu'est-ce qu'une antenne ?

Vaste question ! Donnez-moi mille pages pour traiter le sujet... Je vais quand même essayer d'y répondre simplement.

Une antenne est un transducteur qui transforme un phénomène électrique (un **certain mouvement** de charges) en un phénomène électromagnétique (**propagation** d'un champ électromagnétique). J'ai souligné "certain mouvement" et "propagation" car ce sont les points clés de la définition. En effet il existe d'autres transducteurs (bobines classiques, transformateurs, par exemple) qui effectuent la même transduction mais ne sont pas des antennes pour autant.

D'une manière générale, la force électromagnétique, qui est l'une des quatre forces fondamentales de la physique, accompagne tout déplacement d'un électron. Si ce déplacement est uniforme (courant continu), il produit un champ électro-magnétique simple. Ici "électro" est mis pour signifier que le champ magnétique est produit électriquement et n'est pas naturel (comme avec la magnétite par exemple). Si ce déplacement est alternatif (s'il subit des accélérations et des décélérations) alors il produit un champ électromagnétique (alternatif). Le phénomène est réversible. Si un conducteur est placé dans un champ électromagnétique alternatif, il est sujet à un déplacement de charges (courant) alternatif. Cette réversibilité est à l'origine de la self-induction. Elle est le résultat de la réaction du circuit sur lui-même et obéit à la célèbre loi : tout déplacement de charge entre les deux pôles d'un circuit conducteur provoque un champ électromagnétique qui induit dans le circuit une opposition à ce déplacement provoquant une f.é.m. aux bornes du circuit (voir annexe C). Le rapport entre cette f.é.m. et le courant a la dimension d'une résistance : c'est la réactance inductive. Elle est caractérisée par un déphasage de 90° entre la f.é.m. et le courant qui l'a fait naître. Ainsi le circuit ne consomme pas d'énergie s'il n'y a pas de pertes par effet joule. Par ailleurs, le dipôle électrique ainsi constitué présentant une d.d.p. égale à la f.é.m. produit un champ électrique électrostatique.

Il existe un autre champ électrique indissociable du champ magnétique dans le champ électromagnétique. Ce champ électrique ne résulte pas d'une d.d.p. ou d'une f.é.m., mais du potentiel vecteur du champ magnétique (voir annexe D). Par ailleurs il est en phase avec le champ magnétique puisque les deux sont liés au courant alors que le champ électrostatique lié à la d.d.p. développée aux bornes du dipôle est en quadrature (déphasé de 90°) avec le champ magnétique. Il y a donc deux champs électriques, l'un indissociable et en phase avec le champ magnétique (champ électromagnétique) et un champ électrostatique séparé et en quadrature avec le champ magnétique. Ceci est très important pour comprendre le phénomène du rayonnement.

Donc nous avons produit un champ électromagnétique et un champ électrostatique avec notre transducteur, mais nous n'avons pas une antenne pour autant. En effet, la valeur du champ électrique diminue pour partie comme le cube et pour une autre partie comme le carré de la distance et celle du champ magnétique diminue comme le carré de la distance. Les champs deviennent rapidement négligeables (non mesurables) avec la distance et le circuit ne subit théoriquement aucune autre perte que celle par effet Joule. On dit que le champ électromagnétique produit est réactif (en se référant à son comportement électrique).

Pour l'étude de l'électromagnétisme d'une bobine (sans pertes), nous supposons que le courant la traversant est toujours constant, quelle que soit la longueur du fil. Ceci colle bien avec l'expérimentation tant que les dimensions de la bobine sont très petites devant la longueur d'onde. Mais si une bobine cylindrique a une longueur non négligeable devant la longueur d'onde, alors elle subit des pertes inexplicables par les formules classiques.

Cette propriété n'a pas été découverte par l'expérimentation, mais elle a été prédite par le calcul. C'est James Clerk Maxwell qui, suite aux travaux de Faraday, a découvert la non réciprocity mathématique du phénomène électromagnétique en utilisant les formules classiques. Il a alors usé d'un artifice mathématique qu'il a appelé "courant de déplacement" et qui permet d'expliquer (mathématiquement) la perte d'énergie (par rayonnement).

Mais pour le calcul du rayonnement des antennes filaires, on n'utilise pas les équations de Maxwell, mais celles d'un autre mathématicien génial, Ludwig Lorenz. Ce dernier a imaginé un autre artifice mathématique qui est basé sur le "retard des potentiels". En l'occurrence, il s'agit du potentiel vecteur du champ magnétique (voir annexes D et E). Ce retard, du à la vitesse de propagation finie des potentiels, que l'on applique pour des éléments du circuit éloignés les uns des autres, a pour conséquence que le déphasage entre courant et tension n'est plus tout à fait de 90° . Cela veut dire qu'une résistance vient s'ajouter à la réactance. Cette résistance est la résistance de rayonnement. En la multipliant par le carré du courant, on obtient la puissance rayonnée. Celle-ci correspond au champ électromagnétique actif qui n'existe seul que loin du circuit.

On conçoit que si un circuit est très petit par rapport à la longueur d'onde, la résistance de rayonnement est négligeable. Si on allonge le circuit, la résistance de rayonnement augmente comme le carré de l'allongement jusqu'à la dimension d'une longueur d'onde, puis elle ondule ensuite autour d'une valeur moyenne. En conséquence, plus un circuit est petit devant la longueur d'onde et plus il faudra qu'il soit parcouru par un courant important pour rayonner la même puissance. On va alors rencontrer un problème concernant la source qui doit fournir ce courant important avec un bon rendement, problème d'autant plus ardu que ces petits circuits sont naturellement réactifs et que la compensation de leur réactance entraîne des pertes par effet joule importantes, bien plus que les pertes par rayonnement. Finalement, notre antenne très courte se transforme en calorifère.

Voir sur la figure 1 (dessin d'artiste) une "image" des champs près d'une antenne, image construite avec ces petits lutins invisibles que sont les photons (voir également l'annexe A).

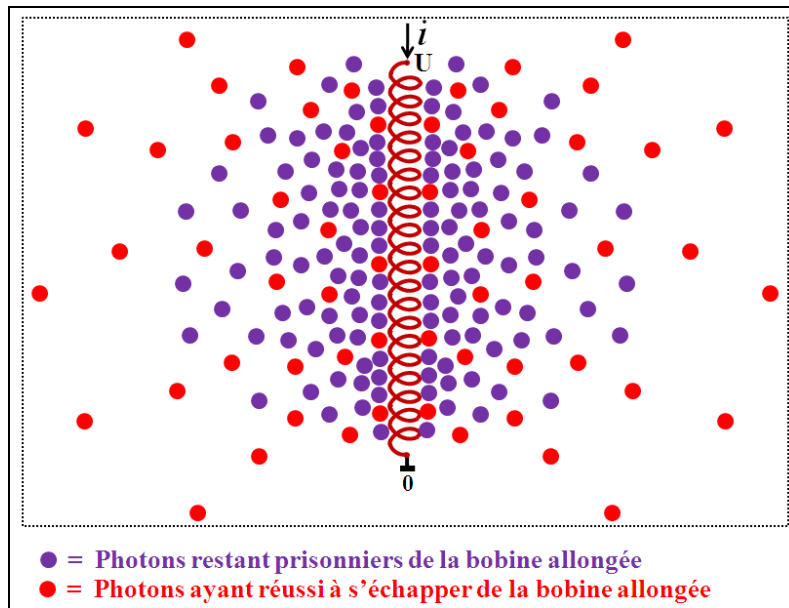


Figure 1 : Le champ E-M près et loin d'une antenne

Les photons en violet correspondent au champ E-M réactif et leur nombre diminue très vite avec la distance pour devenir rapidement négligeable. Les photons en rouge correspondent au champ E-M actif propagé et leur nombre ne varie pas en fonction de la distance ⁽¹⁾. Noter qu'ils ne se créent pas à une certaine distance de l'antenne comme certains voudraient nous le faire croire, en particulier "l'inventeur" des "champs croisés". Ils sont créés au même endroit que les photons violets (à la surface des conducteurs) mais on n'en tient pas toujours compte quand on fait le calcul du champ réactif, de même que l'on néglige les "restes" de champ réactif quand on calcule le champ rayonné, calcul qui n'est valable qu'au-delà d'une distance minimum de l'antenne.

Concrètement, qu'est-ce qu'une antenne ?

On ne peut pas répondre à cette question. Il faut parler de "système antenne". Un système antenne est un système conçu pour avoir des pertes par rayonnement suffisantes pour permettre une certaine liaison radioélectrique. On voit alors que la dénomination "antenne" n'est pas liée à son aspect physique, mais au but de son utilisation. Ainsi, le cadre métallique d'une bicyclette peut constituer une "excellente" antenne pour certaines fréquences, si l'on arrive à l'alimenter correctement à ces fréquences.

Où est située l'antenne ?

On trouve dans le commerce et dans la littérature des tas de dispositifs appelés "antenne". Mais quand on les utilise, est-on sûr que ces dispositifs constituent "vraiment" l'antenne ? En effet ils font partie du "système antenne" et ce ne sont pas toujours eux qui rayonnent le plus.

Où commence et où finit le système antenne ?

Pas toujours facile à déterminer. Supposons que l'émetteur (la source) soit blindé et ne puisse pas rayonner. Idem pour une boîte d'accord blindée connectée à la sortie de l'émetteur.

Relions le générateur ainsi constitué à un aérien à travers une ligne d'alimentation (feeder). Pour être sûr que la HF ne transite qu'à l'intérieur du feeder, il faut qu'à sa sortie la charge (l'aérien) soit équilibrée. La meilleure manière de l'obtenir est d'y insérer un transformateur symétriseur en courant ou "balun". Quand on n'est pas sûr de la symétrie du courant dans

l'aérien connecté à l'extrémité du feeder, alors tous les fils reliés à la masse de l'émetteur peuvent faire partie du système antenne (2). Ce ne sont pas les victimes des retours de HF qui me contrediront. En supposant l'emploi d'un balun, ce qu'il y a au bout du feeder constitue le système antenne dont ce que l'on appelle communément "l'antenne" fait partie. Mais ce n'est pas elle qui rayonne forcément le plus. Nous allons examiner certains cas rencontrés par le radioamateur.

D'abord un rappel sur les deux familles électriques des antennes filaires.

La première comprend les dipôles. Le principe consiste à couper un conducteur unique à l'endroit de l'alimentation. Si c'est au milieu (center fed), les courants sont en principe toujours équilibrés (3). Dans ce cas, le système antenne se réduit à l'antenne et son comportement est prévisible. Si l'alimentation est décentrée, les courants ne sont équilibrés que si le dipôle est à la résonance ou si l'on a intercalé un balun.

La seconde comprend les monopôles et les choses se compliquent. La sortie de l'émetteur est un dipôle et la sortie du feeder aussi. On ne peut pas y connecter uniquement un monopôle. Pour y faire circuler un courant il faut refermer le circuit (4). La solution consiste à utiliser un contrepois comme deuxième pôle. Un contrepois idéal est un système électrique qui permet au courant du monopôle de se refermer par un champ électrostatique et dont les résistances de pertes et de rayonnement sont nulles. Si le contrepois rayonne, il fait partie de l'antenne qui devient un dipôle généralement asymétrique. En ce qui concerne le rayonnement, c'est là que réside la différence entre l'antenne "officielle" (que l'on nous vend ou que l'on a étudiée) et le "système antenne" (que l'on a construit).

Voici deux exemples concernant une antenne verticale classique multi-bandes, très utilisée par les radioamateurs (monopôle quart d'onde) :

1- Montage de l'antenne au sol.

Dans ce cas, le sol constitue un (mauvais) contrepois. Pour diminuer les pertes, on dispose, soit une multitude de radiaux enterrés, soit un grillage métallique (mieux). Il est difficile d'obtenir en HF une résistance de pertes inférieure à 10 Ω , à comparer à la résistance de rayonnement de l'ordre de 30 Ω (quart d'onde). S'ajoutent les pertes dues à la pénétration du champ réactif dans le sol. Obtenir un gain de -4 dBd est une performance (5).

2- Montage de l'antenne dégagée sur un bâtiment.

Dans ce cas, on ajoute en guise de contrepois un radian quart d'onde par bande, plus ou moins horizontal. Si le radian ne rayonnait pas, il présenterait une impédance quasi nulle et alors on pourrait espérer un gain aux alentours de 0 dBd selon les pertes dans les deux monopôles et la qualité de réflexion du sol. Mais rien n'empêche le radian de rayonner et alors nous avons un tout autre système : un dipôle replié à angle droit. L'un des pôles rayonne avec une polarisation V et l'autre avec une polarisation H. Comme le sol a un meilleur coefficient de réflexion pour la polarisation H, et comme le brin vertical (l'antenne que l'on nous a vendue) a plus de pertes dues aux trappes, le champ E-M rayonné en polarisation H est environ quatre fois plus élevé que le champ rayonné en polarisation V. Mais ce gain n'est obtenu qu'avec la directivité d'un doublet. Dans la direction du maximum, on arrive à ce paradoxe que les liaisons DX sont surtout dues au radian, l'antenne "officielle" n'ayant qu'un rôle de (mauvais) contrepois (6).

Si l'on ne veut pas que le radian rayonne, il faut le disposer horizontalement et le doubler avec un deuxième radian identique dirigé dans la direction opposée (7). Alors seul le brin vertical rayonnera circulairement en polarisation V en espérant un gain de -1 dBd.

On voit avec ces deux exemples qu'une antenne "officielle" peut conduire à deux systèmes antennaires aux performances très différentes. Nous allons voir maintenant un autre exemple avec des antennes courtes "miracle" du type "E-H" et "Isotron".

Ces antennes sont très courtes devant la longueur d'onde ($<\lambda/50$). Elles ont donc de très faibles résistances de rayonnement et sont très réactives. Alors le système d'adaptation aura comparativement beaucoup de pertes. Pour ces dimensions, on peut espérer un gain compris entre -30 et -20 dBi. Et le gain maxi est obtenu avec une très faible bande passante et des tensions dans le système très élevées ⁽⁸⁾. Or pour certaines façons d'installer ces antennes, on obtient un meilleur résultat que celui prévu par la théorie. Cela veut dire que l'on a des systèmes antennaires différents de ceux que l'on nous a vendus (et pas que la théorie est fautive).

Ce qui met la puce à l'oreille, c'est le conseil du fabricant d'utiliser pour son alimentation une longueur de coaxial particulière. Effectivement, l'antenne avec son adaptation présente au câble coaxial une dissymétrie importante, provoquant un sérieux "courant de gaine". Alors le câble coaxial se transforme en une antenne qui a un faible gain, certes, mais beaucoup plus important que celui de l'antenne E-H.

Pour l'antenne Isotron, même résultat, bien qu'elle ait par principe moins de pertes que l'antenne EH. Par ailleurs, pour sa taille et si elle est bien construite, l'antenne Isotron utilise au mieux le principe réel et démontré du rayonnement alors que l'antenne EH est basée sur un principe complètement farfelu ⁽⁹⁾.



Où est l'antenne ? (photo F2MM prise lors d'un voyage dans le sud de l'Italie)

Nous terminerons en examinant certains systèmes antennaires hyperfréquences et en cherchant où se situe l'antenne "physique".

- a) L'antenne parabolique classique pour la réception TVSAT : L'antenne se trouve dans le LNB.
- b) Antenne parabolique montée sur un pylône avec un cornet comme source, prolongé par un guide d'onde qui descend dans un local technique : L'antenne se trouve dans le local technique à l'entrée du guide d'onde.
- c) La même antenne, alimentée par un coaxial à travers un guide de transition : L'antenne se trouve dans le guide de transition.
- d) Un four à micro-ondes : L'antenne se trouve dans le magnétron.

L'antenne parabolique est l'exemple type de la confusion des genres. La parabole n'est qu'un simple réflecteur qui a une action sur le champ électromagnétique propagé et n'a rien à voir avec le rôle de transducteur d'une antenne. Imaginer que l'on nous vende le même système antennaire pour la bande des 80m. Alors en plus du pylône d'une vingtaine de mètres (monopôle quart d'onde) on nous livrerait le réflecteur de 410 hectares (!) qui va avec ⁽¹⁰⁾.

Avant de conclure, noter que je n'ai pas traité le problème des antennes "involontaires" qui existent dans le câblage des composants. Pour des circuits hyper, ces antennes se révèlent souvent lorsqu'on ferme le boîtier, ce qui provoque des instabilités (le couvercle devient un réflecteur pour les champs rayonnés et les dirige là où l'on n'en veut pas). La parade consiste à coller sur le couvercle une mousse dissipatrice pour le rayonnement.

Il y a aussi toutes les antennes involontaires qu'une armée de spécialistes de la compatibilité électromagnétique (CEM) essaie de supprimer pour éviter que les alimentations à découpage, les PC et les éclairages économiseurs d'énergie ne perturbent la réception.

Enfin, il y a les antennes "invisibles". Tout le monde a pu remarquer que depuis les années 90, nos téléphones portables n'avaient plus d'excroissance qui trahissait la présence d'une antenne. Pour l'utilisateur ordinaire, cela signifie tout simplement qu'il n'y a plus d'antenne et donc qu'il n'y a aucun danger à coller son portable à l'oreille, ce qui n'est pas le cas, même à distance, pour les "énormes" antennes des pylônes relais (cherchez l'erreur) ⁽¹¹⁾.

Conclusion.

Cet article avait pour but de montrer que lorsqu'on parle d'antenne, il faut savoir de quoi l'on parle. C'est pourquoi techniquement je parle toujours de système antennaire. Celui-ci peut être une antenne simple, un réseau d'antennes (YAGI, Turnstile, etc.), une antenne avec réflecteur (parabole, panneau, sol, etc.), ou une antenne cachée. Mon ambition était de clarifier les choses. J'espère y être parvenu.

Annexes pour les OM qui voudraient approfondir le sujet

Dans ces annexes, je n'ai rien de moins que la prétention d'expliquer simplement pourquoi un tore bobiné de 1 μH garde ses photons pour lui alors qu'un doublet de 1 μH envoie une partie vers les confins de l'Univers. Mais tant pis, je me jette à l'eau avec l'espoir de ne pas me noyer, et au pire, boire la tasse. J'ai confiance grâce à ma bouée de sauvetage, en l'occurrence Jean-Pierre F6FQX ^[5].

Annexe A : Relations électrons - photons.

Les électrons.

Ici, il s'agit des électrons libres à la périphérie des atomes des "conducteurs". En présence d'une différence de potentiel (d.d.p.) ils circulent du pôle moins vers le pôle plus en faisant du "saute atome". Cette circulation s'appelle "courant continu électrique". Celle-ci est assez lente (quelques cm/sec tout au plus). Si la d.d.p. est alternative, le courant s'inverse au rythme de la période. Plus celle-ci est courte (plus la fréquence est élevée) et plus leur distance de déplacement est faible. En HF, on peut dire qu'ils "vibrent sur place".

Alors avec une d.d.p. alternative, le courant ne concerne pas une circulation d'électrons, mais la circulation d'une agitation ordonnée d'électrons. Cette circulation se fait à une vitesse très élevée : celle de la lumière.

Concernant l'énergie, en continu ce sont les électrons qui la transportent. En alternatif, ce sont les photons.

Les photons

On sait depuis Einstein (Nobel 1921 à ce titre) que l'énergie du rayonnement électromagnétique ne peut prendre que des valeurs multiples d'une quantité élémentaire appelée « quantum d'énergie ». Ces quanta (pluriel de quantum) se comportent tantôt comme des ondes (diffraction, interférence, ubiquité) tantôt comme des particules (pas de diffraction

ni d'interférence, ni localisation). Dans ce dernier cas, on les appelle des photons. C'est le fondement de la physique dite "quantique".

Relations électrons - photons

Elles sont, on ne peut plus simple :

Un électron qui s'agite crée et émet des photons tant que l'agitation a lieu (exemple : une antenne à l'émission).

Quand un photon touche un électron, celui-ci s'agite en absorbant le photon (exemple : une antenne à la réception).

Annexe B : Self-induction

Prenons une source de tension alternative et connectons-y une boucle en fil conducteur. Si la source était continue, rien n'empêcherait de circuler dans le fil le courant maximum qu'elle pourrait fournir (courant de C/C). Mais avec une source alternative, le courant va être d'autant plus limité que la fréquence est élevée ou que la boucle est grande (ou un grand nombre de petites boucles confinées en série). Cela est dû au phénomène de self-induction. Pour expliquer ce phénomène, le plus simple est de revenir au bon vieux temps de Maxwell en ne faisant pas intervenir les photons ni la relativité. On utilisera donc les champs.

Quand on connecte une boucle conductrice aux bornes d'une source de courant continu, on crée une induction magnétique autour du fil dont l'amplitude est proportionnelle au courant. Ce champ inductif diminue comme le carré de la distance à partir du fil. Si le conducteur est parfait, la tension développée aux bornes du fil est nulle : pas de champ électrostatique en régime établi.

Quand on connecte une boucle conductrice aux bornes d'une source de courant alternatif, on crée un flux d'induction magnétique alternatif en phase avec le courant qui a pour effet d'induire aux bornes du fil une f.é.m. : $e = - d\Phi / dt$ (loi de Faraday). Cette loi indique que la tension est liée à la variation de l'induction magnétique donc en quadrature de phase avec elle et le courant qui lui a donné naissance. En conséquence le circuit ne consomme pas d'énergie en régime établi. Le rapport entre la f.é.m. et le courant a la dimension d'une résistance que l'on appelle "réactance" car tension et courant sont en quadrature de phase. La valeur de cette réactance dépend de la géométrie et de la longueur du fil conducteur qui déterminent un coefficient de self-induction "**L**" en Henrys. La réactance inductive **XL** est liée à **L** par la relation bien connue : $XL = 2\pi.F.L$ (la f.é.m. est d'autant plus grande que la variation du flux est rapide, donc que la fréquence **F** est élevée).

La f.é.m. développée aux bornes du fil est à l'origine d'un champ électrostatique lié à l'induction magnétique par la relation : $\text{rot } \mathbf{E} = -(\delta\mathbf{B} / \delta t)$ dans laquelle l'induction **B** est égale à $\mu\mu_0.H$ avec **H** = champ magnétique.

Nous avons alors produit un champ magnétique et un champ électrostatique dont les vecteurs sont en quadrature spatialement et leurs amplitudes en quadrature de phase. L'amplitude de ces champs diminue comme le carré de la distance pour le champ magnétique et comme le cube et le carré pour le champ électrostatique, ils restent comme "collés" au conducteur.

Et les photons ?

Les photons sont des "grains" d'énergie. Ils sont créés par le "courant" alternatif pendant la période de démarrage du processus de self-induction. Ils circulent (à la vitesse de la lumière) autour du fil conducteur en suivant les lignes de force du champ magnétique et leur densité décroît comme le carré de la distance par rapport au fil. Au démarrage le circuit se charge en énergie depuis la source puis la conserve et ne lui en demande plus, hormis les pertes par effet Joule occasionnées par les collisions entre les électrons (car il "circule" toujours un courant dans le fil). Quand on "coupera" l'alimentation, les pertes consommeront l'énergie stockée dans le circuit en annihilant les photons.

Annexe C : Courant de conduction, courant de déplacement

Nous avons vu que le courant était dû à un échange d'électrons entre atomes voisins. Quand on a affaire à une boucle conductrice continue entre les deux pôles de la source, pas de problème. Mais si la boucle est interrompue par une capacité on sait que le courant continu ne circule plus alors qu'il y "circule" toujours un courant alternatif. C'est comme si le courant "traversait" la capacité. Or on sait que dans l'espace séparant les électrodes il n'y a aucun électron mobile. De fait, le déplacement des électrons se fait dans les armatures. Quand l'une est en déficit d'électrons, l'autre est en excès. L'énergie transite à travers le condensateur par l'induction électrostatique créée entre les armatures. Maxwell a appelé ce courant qui semble passer dans le condensateur "courant de déplacement" (dans les armatures). Le courant dans la boucle est alors la somme du courant de conduction et du courant de déplacement et il faut prendre en compte les deux pour le calcul du champ électromagnétique. Mais aux fréquences radio ($<100\text{GHz}$) la contribution du courant de déplacement au rayonnement électromagnétique est négligeable par rapport à celle due au courant de conduction (quand un condensateur semble rayonner, ce sont les armatures et les connexions à la source qui rayonnent grâce à un courant de conduction).

Annexe D : Potentiel vecteur du champ magnétique

C'est peut-être la notion la plus difficile à appréhender. C'est pourtant la plus importante pour expliquer le processus du rayonnement.

Nous avons vu que l'induction magnétique produite par le fil est "à flux conservatif" (aucun photon ne s'échappe). C'est parce qu'il existe un potentiel électrique dirigé dans le sens du courant qui empêche le flux magnétique de diverger. Ce potentiel est appelé "potentiel vecteur du champ magnétique" (noté " \mathbf{A} ") La direction de son vecteur est la même que celle du courant, et les deux sont en phase. Le potentiel vecteur \mathbf{A} est à l'origine d'un deuxième champ électrique en phase avec le champ magnétique. Voir la figure 2 qui montre l'articulation des trois vecteurs liés au champ EM près du conducteur.

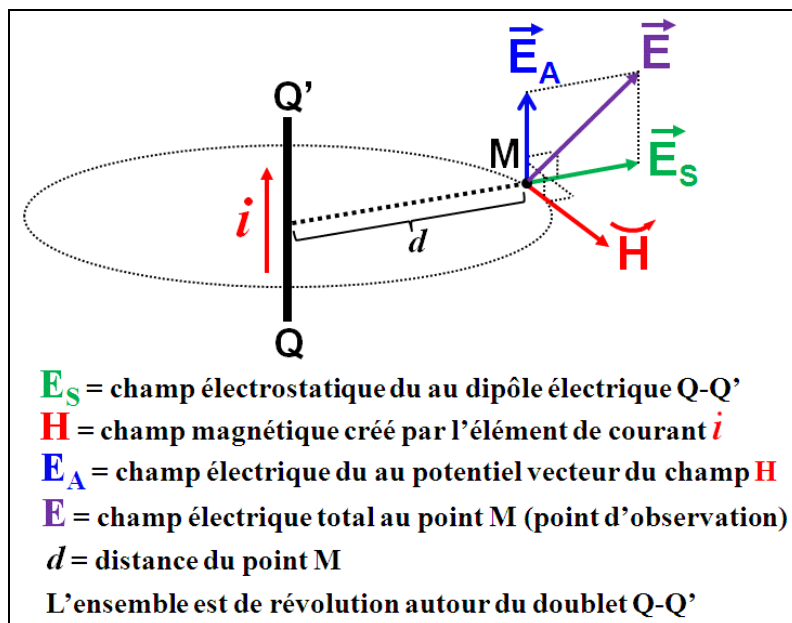


Figure 2 : Les champs produits par le doublet élémentaire

Comme montré sur cette figure, nous avons donc trois champs produits par la circulation de charges dans un conducteur :

- un champ électrostatique \mathbf{E}_s
- un champ magnétique \mathbf{H}
- un champ électrique \mathbf{E}_A

Près du conducteur, le champ électrique \mathbf{E} est la combinaison du champ électrostatique \mathbf{E}_s et du champ \mathbf{E}_A . Leurs vecteurs étant en quadrature entre eux (et avec le champ \mathbf{H}) et leurs amplitudes dépendant des caractéristiques électriques du circuit (impédance caractéristique) la direction du vecteur \mathbf{E} avec celle du champ \mathbf{H} peut être très variable ainsi que leur rapport en amplitudes.

Annexe E : Le retard des potentiels

Tout ce que nous venons de voir ci-dessus se révèle conforme à l'expérimentation quand le circuit reste confiné dans un volume aux dimensions très faibles devant la longueur d'onde. Ainsi tout segment du conducteur a le même effet sur tous les autres segments.

Mais quand les dimensions du circuit ont des dimensions non négligeables devant la longueur d'onde, apparaissent des pertes supérieures aux pertes par effet joule : ce sont des pertes par rayonnement. Maxwell avec son courant de déplacement donne une méthode mathématique pour quantifier ces pertes, mais pas facile à utiliser car les "équations de Maxwell" sont définies dans un monde à quatre dimensions (x, y, z, t) et elles sont impossibles à résoudre par la méthode classique adaptée à un monde à trois dimensions. Il faut utiliser un objet mathématique particulier : le tenseur qui est ici un quadrivecteur. Ludwig Lorenz a proposé une autre méthode bien adaptée aux antennes filaires, qui simplifie beaucoup les calculs et que nous allons développer.

En simplifiant, on admet que dans un système antennaire, l'action du courant d'un segment sur un autre segment à une certaine distance du premier s'effectue par l'intermédiaire du potentiel vecteur du champ magnétique avec un retard qui correspond au temps de propagation du potentiel entre les deux éléments (dans l'air, à la vitesse de celle de la lumière dans le vide).

On n'a alors pas besoin du courant de déplacement. L'introduction du retard des potentiels dans les formules classiques permet de déterminer les pertes par rayonnement et en les ramenant au courant, de calculer une résistance de rayonnement.

En appliquant le retard des potentiels dans les calculs, une partie du champ \mathbf{H} et une partie du champ \mathbf{E}_A diminuent proportionnellement avec la distance. Quand on intègre la totalité du flux correspondant traversant la surface d'une sphère passant par le point d'observation (le récepteur) elle est constante, quelle que soit la distance d . Elle correspond à l'énergie perdue par rayonnement.

En s'éloignant du doublet, la composante \mathbf{E}_s du champ \mathbf{E} disparaît progressivement pour ne laisser la place qu'au champ \mathbf{E}_A . Ainsi le vecteur \mathbf{E} s'aligne progressivement sur la direction du vecteur courant. Alors il est en quadrature sur le même plan que le vecteur \mathbf{H} et en phase avec lui. Il n'y a plus de champ réactif et le champ E-M se propage sous forme d'onde plane. Par ailleurs, le rapport entre l'amplitude du champ \mathbf{E} en V/m et du champ \mathbf{H} en A/m est devenu une constante qui ne dépend que du milieu (377 dans l'air).

Annexe F : Un résumé des formules de l'électromagnétisme

Quelques définitions :

\mathbf{D} = induction électrique = $\epsilon\epsilon_0\mathbf{E}$.

\mathbf{E} = champ électrique

$\epsilon_0 = 10^{-9} / 36\pi$ (permittivité du vide).
 \mathbf{B} = induction magnétique = $\mu\mu_0\mathbf{H}$.
 \mathbf{H} = champ magnétique
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (perméabilité du vide).
 ρ = densité de charges électriques.
 V = potentiel scalaire (d.d.p.)
 \mathbf{A} = potentiel vecteur du champ magnétique
 \mathbf{j} = densité du courant de conduction
 \mathbf{j}' = courant de déplacement
 γ = conductivité électrique

Nous avons dans le tableau 1 les relations entre tous ces paramètres.

Champ électrique	Champ magnétique	Courant
$\vec{D} = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E}$ $\boxed{\text{div } \vec{D} = \rho}$ (2) (Loi de Gauss) $\boxed{\text{rot } \vec{E} = -\frac{\delta \vec{B}}{\delta t}}$ (1) (Loi de Faraday) $\vec{E} = -\underbrace{\text{grad } V}_{\mathbf{E}_s} - \underbrace{\frac{\delta \vec{A}}{\delta t}}_{\mathbf{E}_A}$	$\vec{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H}$ $\boxed{\text{div } \vec{B} = 0}$ (4) (flux conservatif) $\boxed{\text{rot } \vec{H} = \mathbf{j} + \mathbf{j}'}$ (3) (Loi d'Ampère modifiée par Maxwell) $\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$	\mathbf{j} = courant de conduction $\mathbf{j} = \gamma \cdot \vec{E}$ (cas simples) $\mathbf{j}' = \frac{\delta \vec{D}}{\delta t}$ (courant de déplacement)

(1), (2), (3) et (4) = équations de Maxwell

Tableau 1 : Principales relations de l'électromagnétisme

Nous avons sur la figure 3 les formules de calcul des champs en tenant compte du retard des potentiels.

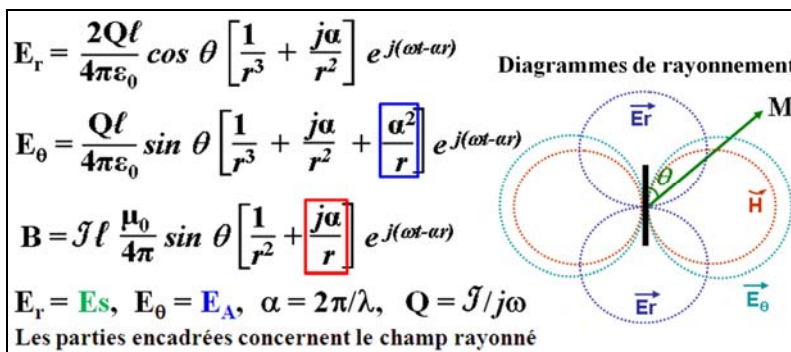


Figure 3 : Effet de l'application du retard des potentiels

Et pour finir, voici les formules de calcul du champ rayonné pour un doublet parcouru par un courant uniforme :

$$W_{r(\text{watts})} = \underbrace{80\pi^2 \left(\frac{\ell}{\lambda}\right)^2}_{\text{Résistance de rayonnement}} \times I_{\text{eff}}^2$$

$$E_{(V/m)} = 60\pi \frac{I_{(\text{Amp})}}{r_{(m)}} \left(\frac{\ell}{\lambda}\right) \sin \theta$$

ℓ et λ : mêmes unités.

Ces formules ne sont valables que pour le doublet élémentaire. Pour les antennes doublets en général, il convient de faire intervenir le courant moyen ⁽¹²⁾ et l'augmentation de directivité par rapport au doublet élémentaire ^[4].

Bibliographie

- [1] "Comment ça marche" de septembre 2011 : "l'Electromagnétisme", novembre 2011 : "Rayonnement de l'antenne" et de mai 2011 : "Hauteur effective d'une antenne".
 [2] "Pourquoi les antennes EH fonctionnent comme n'importe quelles autres antennes", R-REF de février 2006.
 [3] "Le rayonnement des antennes courtes", R-REF de juin 2005.
 [4] "En présence de courant, l'antenne fait de la résistance", R-REF d'octobre 2008.
 Ces articles personnels sont également téléchargeables depuis le blog de F6KRK : "<http://blog.f6krk.org/>" catégories "articles membres" (F5NB) et "Comment ça marche ?".
 [5] F6FQX : "Les quatre formules magiques du professeur Maxwell", R-REF de mars 1991, "Marie, Chang et les photons", R-REF de novembre 1989, "Dans le photon tout est bon" et autres articles sur l'électromagnétisme sur son site : "<http://f6fqx.chez-alice.fr/> "
 [6] Manuels de cours d'écoles d'ingénieurs "Télécom".

Notes :

- (1) *Quand on compte ceux qui traversent une surface sphérique ayant pour rayon la distance entre l'antenne et le point d'observation (le récepteur).*
- (2) *Cela peut comprendre la gaine du câble coaxial, le fil de mise à la terre de l'alimentation, mais aussi les câbles HP, casque, micro, modem, ainsi qu'une liaison avec un ordinateur, etc.*
- (3) *En supposant qu'il n'y ait aucune influence asymétrique de l'environnement.*
- (4) *Si l'on branche un monopôle au point "chaud" de la sortie d'un émetteur et que cela semble fonctionner, c'est que le courant se referme sur le point froid (la masse) par l'intermédiaire des autres fils connectés à la masse de l'émetteur qui peuvent rayonner également.*
- (5) *Il faut ajouter que ces antennes sont rarement dégagées, ce qui ne facilite pas le DX.*
- (6) *Donc l'orientation du radian n'est pas neutre.*
- (7) *Principe de l'antenne "ground-plane".*
- (8) *Si la bande passante est bonne et les tensions raisonnables pour une puissance standard (100W), cela signifie beaucoup de pertes, donc un faible gain.*
- (9) *Et fonctionne comme toutes les autres antennes, selon le principe du retard des potentiels.*
- (10) *Ce réflecteur idéal n'amènerait pas beaucoup de gain dans ce contexte, tout juste 3 dBd dus au fait que le monopôle ne rayonnerait que dans une moitié de sphère. Mais on a vu que si l'on n'a pas besoin de livrer le réflecteur avec le monopôle, car on utilise le terrain du lieu d'émission, ce gain est diminué par les pertes dans le sol dues à sa résistivité qui opère sur le champ réactif, beaucoup plus important que le champ*

actif. Les choses s'améliorent si le monopôle est demi-onde. Mais alors se pose le problème de l'adaptation avec les pertes associées.

- (11) *Mon collègue ingénieur expert antennes avait collé sur la porte de son bureau une image montrant l'un de ces nouveaux portables "sans antenne" avec cette légende : "An antenna ? What for ?". F6FQX cite aussi sa voisine, préoccupée par les effets des ondes sur sa santé, qui lui a dit "Je me sens mieux depuis que ma box d'internet n'a plus d'antenne. La WI-FI, c'est quand même bien : pas d'antenne, pas de rayonnement, pas de maladie !".*
- (12) *Faire intervenir le courant moyen consiste à remplacer la longueur du doublet par sa hauteur effective^[1].*