

Les LIGNES et les ANGES

Robert BERRANGER F5NB

Quel titre bizarre, me direz-vous. Que viennent faire les anges dans l'électromagnétisme ? Ils ne sont pas très loin, selon Jérôme Isaac Friedman⁽¹⁾. Dans cet article, nous allons voir que l'homme ne doit pas se prendre pour un ange, même s'il croit à leur existence. Rassurez vous, cela restera d'un niveau technique très abordable, car j'ai simplifié au maximum.

Préliminaire.

Nous travaillions dans une grande entreprise de télécommunications militaires. Nos bureaux étaient contigus et nous étions souvent sur les mêmes affaires. Il était Ingénieur Expert Antennes (HF et VHF) et moi, j'étais Ingénieur Expert Radio (émetteurs/récepteurs).

- **Moi** : *Pour moi, je considère la ligne plus l'antenne comme une charge plus ou moins réactive, ce qui me permet de tester mes émetteurs avec des charges constituées de circuits RLC.*

- **Lui** : *Erreur ! Un circuit réactif ne consomme pas de puissance, car le courant et la tension sont en quadrature, mais dans une ligne, c'est différent. Il y circule deux puissances actives, avec tension et courant en phase, l'une à l'aller et l'autre en retour. La puissance rayonnée est égale à la différence entre la puissance aller à l'antenne (puissance directe) et la puissance retour à l'émetteur (puissance réfléchie).*

Il était catégorique, et moi interloqué. J'ai vu rapidement que nous ne vivions pas dans le même monde, et donc qu'une confrontation d'idées n'aurait aucune chance d'aboutir dans l'immédiat. Je m'en sortis par une pirouette :

- **Moi** : *Cela revient au même pour l'ampli, donc, peu importe...*

Il accepta l'argument, sans en relever l'incohérence avec ce qu'il avait dit.

Les deux mondes de l'électromagnétisme.

Il y a le monde des humains, et celui des anges. Mais le monde des humains est gouverné par le monde des anges, à moins que ce ne soit l'inverse.

Q : *Soyez moins ésotérique si vous voulez que je comprenne.*

R : *OK.*

Nous dirons que le monde des humains est celui qui mesure un courant, une tension et un travail. C'est un monde concret, où l'on voit le résultat d'un phénomène électrique par la déviation d'une aiguille, l'échauffement d'un élément, un travail effectué, etc...

Le monde des anges est un monde abstrait (qui n'a jamais vu un ange autrement qu'en songe ?) mais qui ne nous empêche pas d'en discuter le sexe. En électromagnétisme, les anges, ce sont les champs. Personne n'en a vu. Donc, comme pour les anges, on utilise une représentation symbolique, en l'occurrence, un vecteur (une flèche orientée dans l'espace). Comme pour les anges, il y en a plusieurs sortes, avec les champs électriques, les champs magnétiques, et le champ électromagnétique qui est une combinaison de deux champs.

Attention, je n'ai pas dit que les champs n'existaient pas. En fait, leur existence n'a aucune importance, puisque leur utilisation conduit à des résultats conformes à l'expérimentation⁽²⁾.

Q : *Y a-t-il un lien entre les deux mondes ?*

R : *Oui, sinon, le monde des champs ne nous servirait à rien. Ce lien est constitué d'un milieu physique bon conducteur de l'électricité, comme le cuivre, le fer, l'aluminium⁽³⁾, etc...*

Q : *Par exemple, une antenne ?*

R : *Oui. Mais aussi, une ligne, une plaque métallique, et globalement tout objet métallique.*

Q : *Et le sol ?*

R : *Ne commencez pas à compliquer les choses. Le sol, solide comme liquide, est un milieu semi-conducteur, plutôt conducteur, qu'isolant. Son comportement en présence de champs électromagnétiques est complexe. Nous en reparlerons.*

Les champs électromagnétiques propagés

Q : *Qu'est-ce qu'un champ ?*

R : *Pour moi, je dirais que c'est un ange mathématique que l'on a doté de certaines propriétés et qui permet d'expliquer et de quantifier des phénomènes physiques avec une bonne approximation.*

On peut aussi le définir comme la description d'une action qui s'effectue à distance⁽⁴⁾.

Les champs sont exprimés sous forme de vecteurs.

Nous en considérerons deux :

- Le champ H qui est un champ magnétique
- Le champ E qui est un champ électrique

Ces deux champs sont associés dans la propagation d'une onde électromagnétique plane avec certaines propriétés :

- Les vecteurs des champs E et H sont situés sur un même plan, perpendiculairement à la direction de propagation, et sont perpendiculaires entre eux.
- L'énergie associée à chacun des vecteurs est identique.
- Le rapport entre l'amplitude des deux vecteurs est une constante qui ne dépend que du milieu de propagation. Il est assimilable à une résistance. Dans le vide (et pratiquement dans l'air sec), celui-ci est de 377. On dit alors que l'impédance du vide est de 377Ω .

La puissance transportée est égale au flux du vecteur de Poynting qui s'exprime par la relation :

$$\vec{P} = \vec{E} \wedge \vec{H}$$

Q : *Un champ peut-il modifier sa direction (se réfléchir), sans changer de nature ?*

R : *Non. Il ne peut le faire que par l'intermédiaire d'un conducteur, généralement une plaque métallique d'une certaine surface.*

Q : *Et dans l'ionosphère ?*

R : *Décidément, vous aimez compliquer les choses.*

Effectivement, il peut modifier sa direction en traversant un milieu semi-conducteur, comme le plasma (atomes chauffés et ionisés) qui constitue l'ionosphère. Il n'y a pas de véritable réflexion comme avec un conducteur, mais un changement de direction résultant du ralentissement de sa vitesse de propagation⁽⁵⁾, en combinaison avec le champ magnétique terrestre. Alors, une onde envoyée depuis le sol qui pénètre dans l'ionosphère voit sa trajectoire s'incurver puis revenir vers le sol comme si l'onde s'était réfléchi à une hauteur bien supérieure (hauteur virtuelle)⁽⁶⁾. Naturellement, quand les bonnes conditions sont réunies.

Rapports entre les champs et la matière.

Après Gauss, Ampère et Faraday, James C. Maxwell a fédéré et complété leurs principes dans un ensemble de quatre équations dites « équations de Maxwell ». Elles énoncent les lois qui relient les champs avec des grandeurs scalaires comme la tension et le courant. Maxwell avait prédit une propagation des champs sous certaines conditions qui se sont révélées impossibles à remplir et c'est Lorenz, un autre mathématicien, qui est à l'origine de l'explication du rayonnement tel qu'on le connaît, en tenant compte du retard des potentiels, tout en restant conforme aux équations de Maxwell.

Q : Je suppose que le champ H est lié au courant, et le champ E à la tension ?

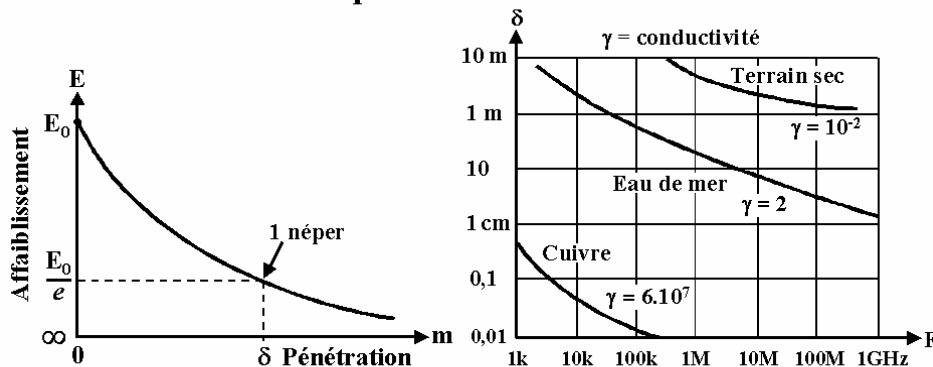
R : C'est vrai pour le champ H qui provient de l'induction magnétique générée par la circulation du courant dans un conducteur, mais ce n'est pas vrai pour le champ E . Le champ qui est généré par la tension est un champ électrostatique V qui n'est pas rayonné. Le champ E rayonné provient du potentiel vecteur de l'induction magnétique. Il est donc généré, lui aussi, par le courant. Ceci explique que le rapport entre les deux champs soit une constante. Noter que cela s'applique à un courant variable avec le temps, et que l'on prend un courant sinusoïdal périodique pour déterminer les lois qui le relient aux champs rayonnés.

Propagation des champs (onde plane) dans les milieux semi-conducteurs.

Si le milieu est parfaitement isolant (conductivité = 0), l'onde le traverse sans changer, ni sa vitesse, ni sa direction et sans affaiblissement.

Si le milieu a une conductivité différente de zéro, l'onde le pénètre sur une profondeur inversement proportionnelle à la conductivité et à la fréquence⁽⁷⁾. L'affaiblissement de l'onde se fait selon une loi exponentielle. Ceci est résumé sur la figure 1.

Pénétration des champs dans un milieu semi-conducteur



Pénétration dans le cuivre ($\gamma = 6.10^7$)

FREQ	50 Hz	10 kHz	1 MHz	100 MHz	10 GHz
δ	9 mm	0,6 mm	0,06 mm	6 microns	600 nm

Figure 1

Si la conductivité du milieu est infinie (conducteur parfait), la pénétration est nulle, l'onde se réfléchit d'une manière parfaite.

Interactions entre une onde plane et un conducteur.

Lorsqu'une onde électromagnétique plane rencontre un conducteur, elle provoque une circulation⁽⁸⁾ de courant dans une direction qui dépend de l'orientation du conducteur par rapport à la direction d'arrivée de l'onde (le courant est nul si l'onde arrive dans le même sens qu'un conducteur filaire).

Si le courant ne se referme pas sur une charge, il ne provoque qu'un champ électromagnétique re-rayonné avec une énergie égale à l'énergie reçue. Sinon, si la charge est adaptée, la puissance récupérée est égale à la moitié de l'énergie reçue, l'autre moitié étant re-rayonnée. Tout ceci, moins les pertes, évidemment.

Nous avons vu qu'une onde plane pénètre d'autant moins dans un milieu que sa conductivité est élevée. En conséquence, dans les métaux, le courant HF « circule » dans une épaisseur proche de la surface. C'est « l'effet de peau ».

Champs réactifs et champs actifs.

Si le conducteur est contenu dans un volume de dimensions très faibles (bobine), nous disons que l'on a un circuit fermé. Les densités de tension et de courant sont considérées comme uniformes le long du fil. Le champ magnétique qu'il produit n'a une action que sur lui-même. C'est un champ réactif, et il n'y a pas d'énergie consommée.

Si le conducteur est un fil déployé, de dimension non négligeable devant la longueur d'onde, la réaction du circuit sur lui-même est un peu différente. En effet, du fait de la vitesse finie de la propagation des champs, l'action du champ produit par le segment A sur les autres segments a des effets différents selon l'éloignement de ces segments par rapport à A. Le champ électromagnétique global contient alors deux composantes, le champ H et le champ E, tous deux résultant de la circulation du courant, et dont l'énergie ne s'atténue pas avec la distance. C'est comme s'ils se « détachaient » du conducteur. Ces champs détachés sont dits « actifs » et constituent l'onde électromagnétique rayonnée.

Propagation des champs le long d'un conducteur.

Dans un conducteur nous avons vu qu'un champ électromagnétique engendrait un courant et qu'un courant engendrait un champ électromagnétique. Pour la propagation, nous pouvons donc partir des champs (réception) ou du courant (émission), sans différence comportementale.

Prenons un segment infinitésimal d'un fil. Débrouillons nous pour lui fournir une excitation électrique (f.e.m.) qui l'incite à déplacer des charges électriques (électrons) d'une manière ordonnée, variable dans le temps. Ce déplacement engendre un courant. Il va générer un champ B. Ce champ lui-même va induire un courant dans le segment voisin pendant que le premier segment continuera d'être soumis à l'excitation du générateur. Celui-ci « pousse » en quelque sorte le courant dans le fil, et les électrons vont s'agiter successivement dans les autres segments. C'est ce que l'on appelle « l'effet dominos ».

Ainsi, le champ magnétique B va se propager le long du fil que nous considérerons pour l'instant comme de longueur infinie (ainsi que le champ électrostatique V qui ne joue pas de rôle dans la propagation).

Application aux lignes radioélectriques.

Q : *Quelle est la différence entre une ligne et une antenne ?*

R : *Une ligne ne rayonne pas, à l'inverse d'une antenne⁽⁹⁾, c'est à dire qu'elle ne génère pas des champs H et E lointains.*

La ligne la plus simple est constituée de deux fils faiblement espacés devant la longueur d'onde. Si nous excitons une ligne à l'aide d'un générateur de f.e.m. (signal CW), des champs vont se propager le long des deux fils, comme décrit ci-dessus. Les champs associés aux deux fils vont se combiner et rester liés à la ligne (champs réactifs), principalement concentrés entre les fils, au-delà, ils s'annulent rapidement. Nous disons que les champs sont « guidés » par les fils. Par ailleurs, des courants vont « circuler » le long des fils, et entre ceux-ci va se développer un potentiel différentiel, dont la valeur est liée à l'énergie transportée par la ligne. Au départ c'est la f.e.m. du générateur qui détermine le courant initial. Ensuite la tension est liée au courant de propagation selon le principe de la conservation d'énergie.

En conséquence, la propagation d'un signal HF dans une ligne utilise deux concepts, étroitement imbriqués :

- Le premier implique une excitation d'électrons. Cette excitation est proportionnelle au nombre d'électrons mobiles (courant) et à leur énergie (tension). Courant et tension peuvent se mesurer avec un ampèremètre et un voltmètre.
- Le second implique un champ électromagnétique que l'on ne sait pas mesurer directement.

La mesure du courant peut se faire de deux manières :

- Soit en utilisant une sonde de tension et une sonde de courant.
- Soit en utilisant une sonde mixte constituée d'un morceau de fil inséré entre les deux fils de la ligne. Nous parlons de « ligne couplée ».

Q : *La deuxième semble plus simple que la première ?*

R : *Plus simple à fabriquer pour un ROS-mètre, peut-être.*

En contrepartie, les facteurs d'atténuation de la sonde sont variables avec la fréquence, et la sensibilité est limitée par la longueur de la ligne couplée qui doit être très courte devant la longueur d'onde. C'est pourquoi les ROS-mètres simples à lignes couplées se rencontrent surtout en VHF et au dessus.

Des sondes de tension et de courant sont relativement faciles à mettre en œuvre pour avoir une bonne précision et une bande passante très large avec un ROS-mètre HF. Les analyseurs de réseaux (analyseurs vectoriels) utilisent des sondes à résistances ayant une bande passante s'étendant du continu aux hyperfréquences. Il est vrai que leurs pertes d'insertion (6 dB) ne les destinent pas aux émetteurs.

Comportement des lignes filaires (en simplifiant toujours beaucoup).

Prenons une ligne que nous supposons sans pertes.

Si la ligne est infinie, ou tant que le signal ne sera pas arrivé à son extrémité :

- La tension et le courant (sinusoïdaux) ont leur maximum au même endroit de la ligne (en phase).
- Le courant consommé par la ligne, et par suite la puissance fournie par le générateur, est une constante dépendant de l'impédance caractéristique de la ligne (comme si elle était remplacée par une résistance). L'impédance caractéristique de la ligne est fonction de sa géométrie (diamètre des fils et écartement).
- Les champs propagés le long du fil ont des caractéristiques constantes, et sont proportionnels à la puissance absorbée par la ligne. Nous disons que nous avons affaire à une onde progressive. Dans ce cas seulement, pour la caractériser, nous pourrions l'observer en un point quelconque de la ligne (avec des yeux d'ange).

Si nous appliquons un signal à une ligne de longueur finie et chargée sur son impédance caractéristique :

- Il y a un premier temps où la ligne se remplit, comme si elle était de longueur infinie.
- Une fois le signal arrivé à la charge, il est dissipé par celle-ci, et la ligne devient un simple instrument de transport d'énergie entre la source et la charge, sans en modifier la nature. Elle est parcourue par une onde électromagnétique progressive permanente.
- Si nous interrompons le signal en déconnectant la source, l'énergie contenue dans la ligne va se dissiper dans la charge pendant le même temps qu'il lui a fallu pour se charger.

Quand une ligne sans pertes est connectée sur une charge égale à son impédance caractéristique, elle n'apporte qu'un effet de retard sur le signal.

Maintenant, nous allons voir une situation limite en examinant le comportement d'une ligne non chargée de longueur finie (ligne ouverte). C'est alors que les choses se compliquent.

Premier cas :

Le signal CW a une durée bien inférieure au temps de propagation dans la ligne.

Dès l'application du signal, nous avons l'amorce d'une onde progressive, sauf qu'elle a une durée finie, puisque le signal a une durée finie (enveloppe impulsionnelle).

Pendant un certain temps, nous avons une onde avec un début et une fin qui progresse vers l'extrémité de la ligne. Quand le signal arrive au bout, il ne peut continuer, et la seule solution est de revenir en arrière. Pendant un temps égal à sa durée d'émission, il se combine avec lui-même. Puis ne subsiste que le signal de retour (miroir du signal aller) vers la source.

Après, nous prendrons deux cas limites. Soit le signal se dissipe dans la résistance interne de la source, si celle-ci est égale à l'impédance caractéristique de la ligne, soit on a déconnecté la source entre temps, et le signal se réfléchit en début de ligne pour repartir vers un nouveau cycle, et ce, indéfiniment. En pratique, la ligne a des pertes, et le signal se dissipe rapidement. Le phénomène de réflexion s'explique aussi bien en examinant les charges que les champs. Il s'effectue, dans ce cas-ci, avec une inversion de phase de la tension, et une continuité de phase du courant (en prenant une référence extérieure au système).

En conclusion, nous avons eu une puissance « réelle », avec courant et tension en phase, qui s'est propagée dans le sens source → charge et une autre, tout aussi réelle qui s'est propagée dans le sens charge → source. En prenant comme hypothèse (généralement non vérifiée avec un émetteur), que l'impédance de source est égale à l'impédance caractéristique, la puissance de retour s'est entièrement dissipée dans la source et a arrêté le processus. La puissance aller est dite « directe » et la puissance retour « réfléchie ». La puissance transmise est égale à la puissance directe moins la puissance réfléchie. Comme ici, elles sont égales, la puissance transmise est zéro, ce qui se conçoit puisqu'il n'y a pas de charge. On aurait eu le même comportement avec une ligne court-circuitée, sauf qu'il se serait produit une inversion de phase du courant au lieu de la tension.

Noter que si la source n'est pas adaptée, le processus continue avec un certain nombre d'allers et retours en s'amortissant au fur et à mesure. La somme des puissances aller dans la ligne est alors plus importante que celle fournie par la source, ce qui semble absurde. Nous voyons là l'ambiguïté du calcul de la puissance. La seule puissance réelle est celle qui est dissipée dans la source, et elle est bien la même que celle qui a été fournie. La puissance directe est alors une puissance virtuelle. Donc, la formule puissance transmise = puissance directe – puissance réfléchie n'est vérifiée avec un signal impulsionnel que si la source est adaptée à la ligne.

Deuxième cas.

Le signal CW est permanent et invariable. Nous avons affaire à un signal stationnaire. Au début, tout se passe comme pour un signal impulsionnel. Arrivé au bout de la ligne, il subit une réflexion et revient vers la source. Mais, la ligne n'est pas vide, car la source continue à la remplir. Il y a donc un « télescopage » entre deux forces, l'une qui constitue l'onde aller, et l'autre, l'onde retour. J'ai bien dit deux forces, c'est-à-dire deux phénomènes physiques immatériels, comme pour les champs, dont on ne peut mesurer que l'action qu'elles provoquent. Dans notre cas, les forces sont synchrones, car résultant de l'action d'une f.e.m. **sinusoïdale stationnaire**. En conséquence, la force résultant de leur combinaison sera invariable pour un point de la ligne, mais changera tout au long de la ligne selon la distance de ce point par rapport au point de réflexion (l'extrémité). La modification des caractéristiques de cette force décrit une onde stationnaire. Attention, comme les forces l'ayant créée, la force résultante restera une force sinusoïdale.

Faisons le point lorsque l'onde de retour atteint la source :

- Une onde stationnaire s'est formée avec la combinaison de l'onde aller et de l'onde retour, parce que l'onde aller était encore présente lors du retour.
- Le temps écoulé est égal à deux fois le temps de propagation le long de la ligne.
- L'énergie emmagasinée dans la ligne est égale à deux fois l'énergie qui aurait été emmagasinée avec une onde progressive.
- Seule l'énergie emmagasinée par la ligne a été fournie par la source.

Q : *Et après ?*

R : *Après ? Les opinions divergent, selon que l'on prend le point de vue des anges ou celui des humains.*

Opinion angélique : « L'énergie véhiculée par l'onde de retour est dissipée dans la source qui continue par ailleurs à fournir l'énergie véhiculée par l'onde aller ».

Opinion humaine : « L'énergie contenue dans la ligne augmente avec le temps, tant que la source a la capacité d'en fournir plus que d'en consommer (ne sature pas) ».

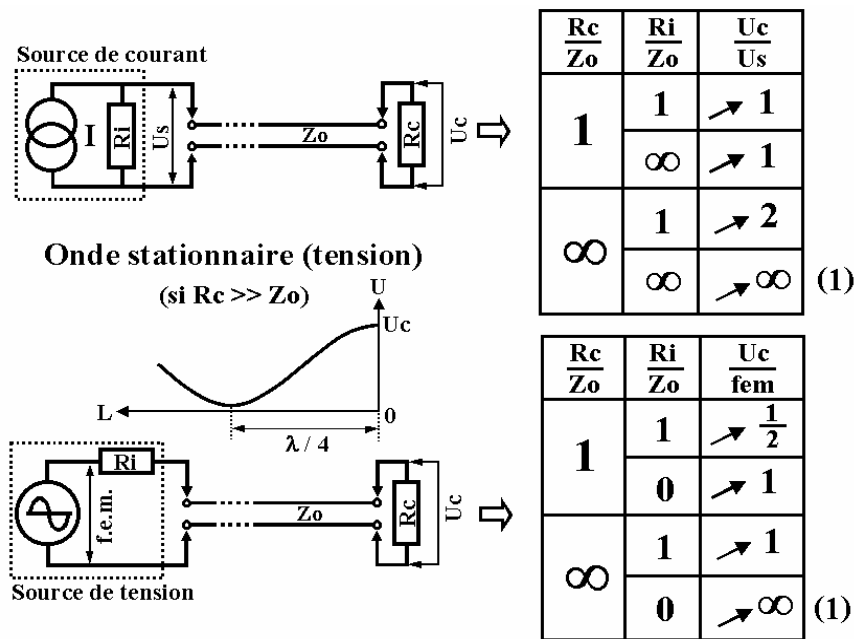
Les opinions se rejoignent lorsque la source a une impédance (réelle) interne égale à celle de la ligne. Si cette condition peut être satisfaite avec une antenne comme source, elle ne l'est pratiquement jamais avec un émetteur pour des raisons basement matérielles, comme l'obtention d'un rendement maximum.

Prenons un émetteur dont le comportement est celui d'une source de courant. C'est par exemple ce que nous obtenons avec un tube ou un transistor à effet de champ, en connectant la ligne comme charge d'anode ou de drain. L'impédance interne peut atteindre des milliers d'ohms.

Donc, avec un tel émetteur, quand l'onde retour l'atteint, la ligne se comporte comme si elle était ouverte. Il y a donc réflexion, et combinaison de l'onde en retour du retour, avec l'onde aller issue de l'émetteur qui continue. Si l'émetteur ne sature pas à cause de l'augmentation de tension résultante, après un autre aller et retour, l'énergie stockée dans la ligne aura encore doublé. Et cela durera jusqu'à ce que l'émetteur sature. En conséquence, l'énergie stockée dans la ligne et la durée du processus de stockage dépendront de l'impédance de la source (et naturellement de la longueur de la ligne). En pratique, l'impédance de la source n'est pas infinie, et elle consommera une partie de la puissance réfléchie. Si nous limitons le courant de la source à la valeur du courant réfléchi, nous obtiendrons un équilibre du système, l'empêchant de saturer. Nous avons alors :

- Une énergie aller d'autant plus faible que l'impédance de la source est élevée.
- Une énergie retour égale à l'énergie aller et dissipée par la source
- Une énergie stockée dans la ligne d'autant plus grande par rapport à l'énergie « baladeuse » que l'impédance de source est élevée.

Or, si nous calculons la puissance aller (puissance directe) avec un ROS-mètre, nous trouvons une puissance égale à l'énergie qui serait stockée dans la ligne si la source était adaptée. De même pour la puissance réfléchie. Le désaccord provient de ce que les notions de puissance directe et de puissance réfléchie ne s'appliquent que pour une source adaptée à la ligne. Nous aurions une explication plus universelle si nous considérions la puissance stockée dans la ligne comme une puissance réactive (alors la mesure se fait en VA, et non en watts). En conséquence de ce raisonnement, nous avons sur la figure 2 un tableau donnant la valeur de la tension en sortie de ligne suivant l'adaptation et la désadaptation totale, à la fois de la charge et de la source.



(1) tension limitée par les pertes dans la ligne

Figure 2

Nous voyons que lorsque la source et la charge sont complètement désadaptées (ligne ouverte), la tension à la sortie tend vers l'infini, ce qui est constaté en pratique.

Prenons un autre exemple qui met en défaut cette notion de puissance directe et de puissance réfléchie.

Soit un émetteur prévu pour débiter sur une impédance nominale de 50Ω .

Soit une antenne ayant une impédance pure de 50Ω .

Relions les deux avec une ligne demie onde⁽¹⁰⁾, d'impédance 75Ω .

Tout le monde est d'accord pour dire que l'émetteur débite dans une résistance pure de 50Ω , et qu'il n'y a aucune puissance réfléchie.

Tout le monde est d'accord aussi pour dire que la ligne est le siège d'une onde stationnaire de rapport 1,5 (et on peut le mesurer facilement).

Peut-on dire maintenant que la ligne est parcourue par deux puissances, l'une directe (100%) et l'autre réfléchie (4%), en décomposant la puissance directe en une puissance transmise à la charge (96%) et une puissance réfléchie dans la source ? On pourrait, à la rigueur le dire si la source avait une impédance interne de 50Ω , mais cela n'est sûrement pas le cas, et de toute façon, le ROS est indépendant de l'impédance de la source, ce qui est facile à vérifier.

Alors, pourrait-on dire que la ligne contient une énergie « réelle » (96%) correspondant à la puissance transmise par une onde progressive, et une énergie « réactive » (4%) stationnaire,

qui maintient l'équilibre de l'onde stationnaire, ces énergies ayant été emmagasinées pendant la période transitoire du début ?

Je répondrais oui, car c'est ma conviction. Elle a le mérite de ne jamais être mise en défaut. Par ailleurs, on peut observer un comportement identique en remplaçant notre ligne faite de constantes réparties par un circuit L-C (constantes localisées), dont le comportement est, à l'unanimité, réactif (voir annexe B).

Conclusion.

Lorsque l'on a affaire à un signal stationnaire (phase et amplitude invariables dans le temps), on peut dire qu'il peut y avoir de la puissance réfléchie quand il n'y a pas d'ondes stationnaires, et que s'il y a des ondes stationnaires, il n'y a pas de puissance réfléchie.

Nous avons donc trois phases (charge désadaptée) :

- phase transitoire de mise en route pendant laquelle se forment les ondes stationnaires → puissance réfléchie.

- phase stationnaire durant laquelle les ondes restent stationnaires → pas de puissance réfléchie.

- phase transitoire d'arrêt, avec disparition des ondes stationnaires → puissance réfléchie de nouveau.

Les durées des phases transitoires de mise en route et d'arrêt dépendent, non seulement de la désadaptation de la charge, mais aussi de la source (et de la longueur de la ligne).

Les caractéristiques de la phase stationnaire ne dépendent que de la désadaptation de la charge (le ROS est indépendant de la source).

A chaque fois que l'on dispose de grandeurs scalaires (mesurables), ne pas faire intervenir le langage des anges en utilisant Maxwell⁽¹¹⁾. Le garder pour les cas où l'on ne peut pas faire autrement. Mais alors, avoir conscience que l'on a un langage d'ange, c'est-à-dire sans signification terrestre⁽¹²⁾.

Donc, mon expert antennes parlait le langage des anges. Cela n'avait aucune conséquence pour lui, car son quotidien ne comportait que des champs électromagnétiques et des antennes, considérées comme des sources parfaites. Le mien était constitué d'émetteurs bien imparfaits. On me demandait de faire bouger un S-mètre à l'autre bout de la planète avec un minimum d'énergie prise à l'alimentation. Cela m'obligeait à connaître **exactement** l'effet obtenu quand je connectais à mon émetteur les lignes et les antennes de mon collègue.

F5NB.

Annexe A.

Signal stationnaire ?

Un signal sinusoïdal permanent, non modulé, ni en phase, ni en amplitude, est un signal stationnaire. C'est un tel signal que nous utilisons (tune) pour mesurer le ROS et faire notre adaptation entre le système antennaire et l'émetteur.

Q : *Mais avec la BLU, on ne peut pas parler de signal stationnaire. Qu'en est-il alors des ondes stationnaires ?*

R : *Les signaux BLU, et NBFM, peuvent être considérés comme des signaux pseudo-stationnaires, assimilables à des signaux stationnaires.*

Quand un signal est modulé, la stationnarité est relative à la largeur de bande de son occupation spectrale.

On peut considérer que l'on a affaire à un signal stationnaire si :

- Pour une ligne, sa longueur électrique est notablement inférieure à la longueur d'onde de la fréquence de modulation.
- Pour une antenne, sa bande passante est notablement supérieure à la bande de modulation.

Ainsi, avec un signal BLU de 3 kHz de largeur de bande (longueur d'onde 100 km), on peut considérer avoir un fonctionnement en régime stationnaire pour une ligne ne dépassant pas 1 km de long. De même pour une antenne ayant plus de 75 kHz de largeur de bande.

En conséquence, pour des antennes très courtes et des fréquences de travail basses (<10 MHz), on doit mettre l'adaptation au ras de l'antenne, pour faire travailler la ligne en régime progressif (système antenne adapté à la ligne).

Si le signal de modulation occupe une grande bande de fréquence, les critères ci-dessus ne peuvent plus être satisfaits. Alors, la ligne, et/ou l'antenne, fonctionne(nt) en permanence en régime transitoire. Il n'y a plus d'ondes stationnaires, et il y a de la puissance réfléchie.

Une telle situation se rencontre avec des modulations à étalement de spectre, et pose de vrais problèmes d'adaptation entre l'émetteur et le système antenne. Sans entrer dans les détails, qui sont extrêmement complexes, je peux dire qu'en étalement de spectre VHF (30-88 MHz), il y a sept ans, on n'avait pas encore trouvé mieux que d'amortir l'antenne pour éviter à l'émetteur de dissiper trop de puissance (la puissance est moins chère à dissiper dans une résistance que dans un transistor).

Annexe B.

Q : *Peut-on expliquer la propagation dans une ligne en n'utilisant que les champs ?*

R : *Non, et un exemple vous le montrera facilement.*

Prenons une ligne chargée par son impédance caractéristique. Elle est parcourue par une onde progressive, et toute la puissance fournie par le générateur est consommée par la charge. Maintenant, coupons la ligne et éloignons très légèrement les morceaux (un centième de millimètre). Nous constatons :

- Qu'il n'y a plus d'énergie fournie à la charge.
- Que les deux morceaux de lignes se comportent comme deux lignes distinctes.

La propriété des champs étant d'agir à distance, ce n'est normalement pas une micro fraction de longueur d'onde d'air qui devrait les arrêter. Or, pour que la propagation ne soit pas interrompue, il faut intercaler entre les deux morceaux un transformateur.

Q : *Pourtant, la ligne reste bien interrompue physiquement, puisqu'il n'existe aucun contact électrique entre primaire et secondaire ?*

R : *Oui, mais vous remarquerez que les deux bouts de ligne se referment par les enroulements du transfo. Donc, nous avons des courants fermés, et nous pouvons appliquer les équations de Maxwell correspondantes. J'ajouterai que le transfo doit avoir certaines caractéristiques physiques pour être considéré comme parfait.*

Q : *Mais Maxwell n'a-t-il pas inventé le courant de déplacement pour tourner le problème du courant de conduction interrompu ?*

R : *Si. Alors il faudrait shunter les deux coupures avec deux **gros** condensateurs pour obtenir des courants de déplacement qui ne perturbent pas les courants de conduction, car seuls ces derniers génèrent un champ électromagnétique.*

Q : Pour moi, c'est du Chinois...

R : Pour en comprendre un peu plus, relisez les livres et les articles mentionnés dans la bibliographie. Mes articles sont en principe accessibles à tous.

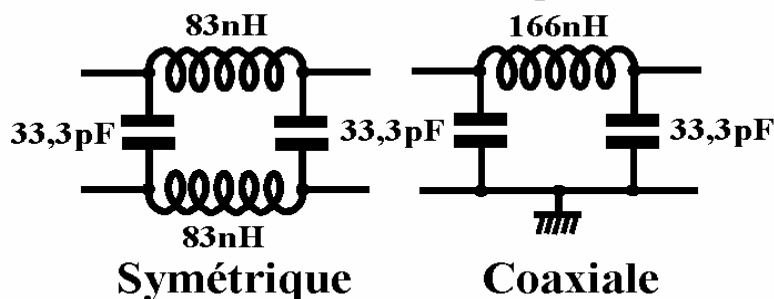
Quoi qu'il en soit, cette discussion montre que dans une ligne filaire, on ne peut pas se passer des notions de courant et de tension⁽¹³⁾.

Q : Peut-on se passer des champs ?

R : La réponse sera nuancée.

Si l'on est sûr d'avoir affaire à une ligne pure, c'est-à-dire qu'elle ne rayonne pas du tout, alors, on peut se passer des champs. On peut déterminer complètement le comportement d'une ligne en la considérant composée d'éléments à constantes réparties, avec des valeurs linéiques (par unité de longueur), de résistance, de perditance, de self et de capacité. C'est le modèle des télégraphistes, et les calculs qui lui sont associés sont appelés « équations des télégraphistes ». Nous avons sur la figure 3 la modélisation simple d'une ligne 50 Ω (sans pertes) par tronçons de 1 m.

Tronçons de 1m d'une ligne 50 Ω



Simulation d'une ligne de 4 mètres de long

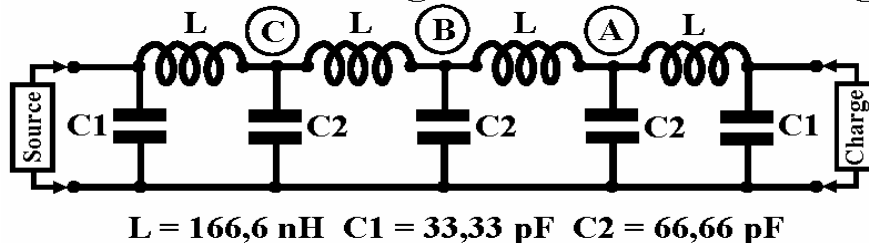


Figure 3

Si nous entrons ce modèle dans un simulateur comme Spice, et si nous chargeons la ligne par une impédance quelconque, les mesures (tension, courant et phase), faites par le simulateur à certaines distances de la charge (points A, B, C, etc...), seront exactement les mêmes que celles que nous ferions avec un voltmètre et un ampèremètre. C'est-à-dire que s'il y a des ondes stationnaires, les nœuds et les ventres seront exactement à leur place, et la valeur du ROS sera la même. Vous pouvez faire l'expérience en prenant neuf tronçons (9 cellules de 1 m) par quart d'onde (plus il y en a, meilleure est la simulation), soit une fréquence de 8,333 MHz. Avec une quarantaine de cellules, vous pourrez voir le comportement d'une ligne de longueur légèrement supérieure à une longueur d'onde.

Noter qu'il suffit d'insérer dans la ligne une seule résistance (très faible) pour faire une mesure de ROS. On peut aussi comparer courants et tensions aux ventres et aux nœuds.

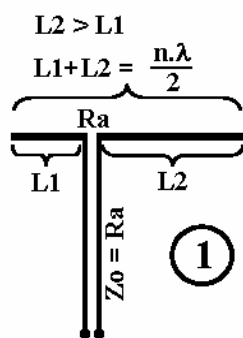
Cette façon de considérer une ligne comme un circuit réactif est universellement employée, en particulier pour l'abaque de Smith. Elle est vérifiée en pratique, puisque l'on peut réaliser une adaptation aussi bien avec des morceaux de lignes particuliers, qu'avec des circuits L-C.

Si la ligne rayonne, nous avons une antenne. On ne peut plus se passer des champs. Mais pour les calculer, on considère l'antenne comme une ligne à pertes régulièrement réparties, avec un comportement réactif.

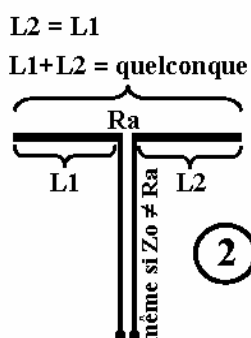
Cette méthode n'est qu'une approximation, valable pour calculer les champs lointains. Pour les champs proches, il existe d'autres méthodes, mais aucune n'apporte une certitude absolue⁽¹⁴⁾.

Noter que cette difficulté se retrouve dans les simulateurs utilisant la méthode des moments (NEC et dérivés), lorsque le système antennaire comporte une ligne qui rayonne partiellement. Prenons un exemple avec une antenne dipôle alimentée d'une manière asymétrique avec une ligne symétrique. Examinons la figure 4.

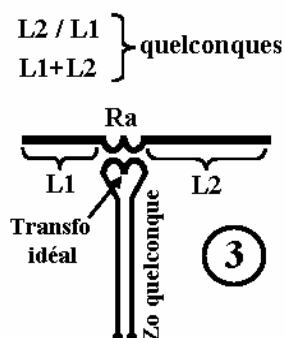
Pas de rayonnement de la ligne si :



Exemple :
Zeppelin (cas limite)
Antenne $L = \lambda$
alimentée au quart



Exemples :
LEVY
G5RV (cas particulier de la Lévy).



Exemple : ?
Pratiquement impossible à obtenir, sauf cas particuliers

SIMULATEUR :

Ligne déclarée : cas ③ supposé (transfo 1/1)

Ligne construite : considérée comme une antenne
= calculs champs lointains, or ligne = champs proches

Figure 4

Nous avons deux possibilités :

- Déclarer la ligne comme une ligne parfaite.
Alors, elle allongera électriquement la longueur de l'antenne de sa propre longueur.
- Construire la ligne avec deux fils parallèles.
Alors, elle allongera l'antenne de **deux fois** sa longueur.

Naturellement, la simulation donnera des résultats différents selon les cas, et la vérité mesurée sera entre les deux.

Mais dans le cas d'un dipôle vraiment symétrique, ou si la ligne est séparée de l'antenne par un transformateur, la ligne peut être considérée comme idéale⁽¹⁵⁾.

Bibliographie.

- « Cours de radioélectricité générale » tome 1 « circuits fermés, rayonnement, antennes ». Cours de l'ENST par R. RIGAL et Y. PLACE (Eyrolles).
- « Anges et antennes » et autres articles intéressants, F6FQX, <http://f6fqx.chez-alice.fr/>.
- « Les quatre formules magiques du Pr Maxwell », F6FQX, Radio-REF mars 1991.
- « Ondes guidées et transfert d'énergie », F6FQX, Radio-REF février 1990 (avec quelques réserves exprimées dans l'article ci-après).
- « Echange de puissance entre un générateur et une charge », F5JQO et F5NB, Radio-REF septembre 2003.
- « Rendement des amplis HF », F5NB, Radio-REF février 2005.
- « Fonctionnement du ROSmètre », F5NB, Radio-REF mars 2003.
- « ROSmètre, thème et variations », F5NB, Radio-REF décembre 2003.
- « Lignes électriques, un problème d'irrigation ? », F5NB, Radio-REF mai 2004.

Notes.

- (1) *J.I. Friedman était un célèbre physicien de la fin du 20^{ème} siècle qui a obtenu le prix Nobel de Physique en 1990. Il faisait allusion aux anges dans son cours sur l'électromagnétisme. Voir à ce sujet le site de F6FQX et y lire son article « Anges et antennes ».*
- (2) *Peut-être qu'un jour un grand physicien trouvera la vraie nature des champs qui perdront alors leur statut d'anges pour devenir humains.*
- (3) *Mais aussi l'homme. Ce qui occasionne beaucoup de débats actuellement, à cause du rapprochement intime entre l'homme et les champs avec les téléphones portables.*
- (4) *On pourrait ajouter cette autre définition tout aussi précise de F6FQX : « Un champ magnétique est un champ où l'on trouve du magnétisme, comme un champ de patates est un champ où l'on trouve des patates ». C'est l'avantage des anges, tout le monde peut avoir sa définition.*
- (5) *Le même phénomène est observable sur un rayon lumineux qui passe dans de l'air très chaud. C'est ce qui provoque les mirages observables l'été sur route chaude : les rayons venant du ciel sont incurvés par l'air chaud du sol et remontent, donnant l'impression d'une réflexion sur une flaque.*
- (6) *Avec une émission à la verticale vers l'ionosphère, la vitesse de l'onde ralentit jusqu'à zéro, puis s'inverse. L'onde se comporte comme une balle qu'on lancerait à la verticale. Sauf que sous certaines conditions, l'onde ne revient pas, elle traverse l'ionosphère. Mais elle a perdu un temps qui n'est pas toujours négligeable, et dans les systèmes de positionnement par satellites, on doit en tenir compte. A tel point qu'on utilise des récepteurs GPS spéciaux bien placés pour déterminer des profils d'ionosphère (en conjonction avec des magnétomètres et des sondeurs ionosphériques).*
- (7) *Quand la fréquence augmente, un milieu semi-conducteur se comporte de moins en moins en conducteur et de plus en plus en isolant. N-B : Les matériaux semi-conducteurs comme le silicium sont des milieux semi-conducteurs particuliers.*
- (8) *En continu, le courant correspond à une circulation d'électrons, même si elle est lente. En alternatif, les électrons oscillent sur place, avec des déplacements d'autant plus faibles que la fréquence est élevée, et la circulation du courant correspond à la propagation de cette oscillation. Dans les deux cas, la mesure du courant se fait en « comptant » le nombre d'électrons qui s'agitent.*
- (9) *Bien qu'en pratique, on a souvent des lignes qui rayonnent et des antennes qui ne rayonnent pas autant que l'on voudrait.*
- (10) *Avec une onde progressive, tous les électrons de la ligne ont un comportement semblable : même énergie et même mobilité. Avec une onde stationnaire, les électrons de la ligne ont des comportements différents selon leur position dans la ligne. Leur*

comportement est périodique suivant la longueur de la ligne, avec une période toutes les demies longueurs d'ondes. Autrement dit, si nous avons une ligne de longueur électrique $\lambda/2$, les électrons situés aux deux extrémités auront exactement le même comportement (même tension, même courant et même déphasage).

(11) *Langage d'ange : puissance = flux du vecteur de Poynting. Langage humain : $P = U \times I \times \cos(\varphi)$.*

(12) *Lu sous la plume d'un ingénieur télécom : « Le ROSmètre est un appareil qui prend un échantillon de l'onde directe et le compare avec un échantillon de l'onde réfléchi ». Comme dirait F6FQX, « ne pas confondre le numéro de téléphone avec l'abonné ».*

(13) *Avec certains modes de propagation dans un guide d'onde, une très faible coupure du guide entraînerait quelques pertes, mais n'interromprait pas la propagation. Donc, la comparaison entre une ligne filaire et un guide d'onde doit se faire en prenant beaucoup de précautions.*

(14) *D'où la difficulté d'estimer la puissance absorbée par la tête d'un usager de la radiotéléphonie portable.*

(15) *Un article est en préparation sur ce sujet.*