

Comprendre l'alimentation électrique de l'antenne

on4cy.yvan@gmail.com

1 - La ligne d'alimentation

1.1 - Introduction

1.2 - Les lignes équilibrées et déséquilibrées ou symétriques et asymétriques

1.3 - Les courants de mode différentiel

1.4 - Les courants de mode commun

1.4.1 - Dans l'antenne

1.4.2 - Dans les lignes plates à deux conducteurs parallèles

1.4.3 - Dans les lignes coaxiales à deux conducteurs concentriques

1.4.4 - Les antennes réelles

1.5 - Les effets indésirables du courant de mode commun

1.5.1 - L'élimination des problèmes

2 - Les antennes

2.1 - Les antennes symétriques

2.2 - Les antennes non symétriques

2.2.1 - L'alimentation par l'extrémité

2.2.2 - L'antenne demi-onde alimentée par l'extrémité

3 - Conclusion

Nous ne pouvons parler d'alimentation d'une antenne sans parler en premier lieu de la ligne d'alimentation.

1 - La ligne d'alimentation

1.1 - Introduction

Le but d'une ligne d'alimentation est à l'émission, de conduire à l'antenne la puissance de l'émetteur, et à la réception de conduire au récepteur la puissance reçue par l'antenne.

Comme chacun sait, l'alimentation d'une antenne se fait au moyen d'une ligne d'alimentation (feeder) constituée de 2 conducteurs [*] parallèles disposés à une faible distance l'un de l'autre.

Que la disposition physique de ces conducteurs soit dans un même plan (Twin) ou sous forme concentrique (coaxiale), la faible distance entre les conducteurs favorise un couplage électrique et magnétique, serré et réciproque entre les deux conducteurs.

L'objectif étant que les champs électrique et magnétique développés par le courant et la tension sur chacun des conducteurs, ***s'ils sont égaux en amplitude et en opposition de phase***, se neutralisent complètement à une faible distance de la ligne.

Ainsi la ligne d'alimentation ne rayonnera pas.

Dans le cas spécifique de la ligne coaxiale, à deux conducteurs parallèles et concentriques, le courant et la tension sur le conducteur central et sur la surface intérieure du blindage (effet de peau) vont générer les mêmes champs électrique et magnétique, mais cette fois ils seront confinés à l'intérieur de la ligne d'alimentation, si le blindage est suffisamment épais.

Ainsi, de par sa construction mécanique, aucun champ magnétique et électrique ne peut en principe « percer » le blindage et aucun rayonnement électromagnétique ne peut « sortir » à l'extérieur de la ligne coaxiale.

[*] Dans n'importe quel circuit électrique, si l'on désire transmettre de la puissance à une charge, il est obligatoire d'avoir un premier conducteur pour conduire le courant dans le sens générateur-charge et un second conducteur pour conduire le même courant dans le sens opposé, charge-générateur.

Si la charge à l'extrémité d'une ligne d'alimentation peut apparaître en parallèle sur les extrémités de la ligne, il n'en reste pas moins que la charge se trouve électriquement en série avec les deux conducteurs.

Cependant l'antenne ne constitue pas une charge unique partagée entre les deux conducteurs de la ligne d'alimentation. Chacun des deux éléments de l'antenne connectés à son conducteur respectif, représente une charge qui peut être différente et donc engendrer un courant différent dans les deux conducteurs de la ligne d'alimentation.

C'est ce cas de figure que nous allons principalement examiner.

1.2 - Les lignes équilibrées et déséquilibrées ou symétriques et asymétriques

Le plus souvent, l'équilibre n'est décrit que par le courant dans chaque conducteur d'une ligne d'alimentation. Cela est tout à fait insuffisant et peut nous induire en erreur.

Nous ne pouvons connaître l'équilibre sans connaître la tension, le courant et la phase.

Les lignes d'alimentation équilibrées et parfaitement déséquilibrées ont toutes deux des courants égaux et opposés entrant et sortant à chaque extrémité des conducteurs.

Toutes les lignes d'alimentation à deux conducteurs coaxiaux ou parallèles, fonctionnant correctement transportent des courants égaux et ***de phase exactement opposée*** dans les deux conducteurs.

Le seul élément qui détermine le type d'équilibre est le champ électrique dans l'espace entourant la ligne, autrement dit la tension de chaque conducteur par rapport à la «terre» ou à l'espace autour de la ligne.

Quelles sont les critères qui différencient les lignes d'alimentation fonctionnant correctement ?

1. Les lignes coaxiales et symétriques ont toutes deux des ***courants égaux et opposés*** dans chaque conducteur.

2. Les lignes coaxiales parfaitement déséquilibrées, ont un ***champ électrique*** (tension) ***nul*** à peu de distance dans l'espace autour de la ligne ou d'autres objets.

3. Les lignes symétriques parfaitement équilibrées ont des ***champs électriques égaux et opposés*** dans l'espace autour de la ligne ou se couplant à la «terre». Ces champs, pour tous les cas pratiques, disparaissent à une distance de plusieurs espacements conducteurs de la ligne d'alimentation.

1.3 - Les courants de mode différentiel

Définition : Les courants circulant ***en présence*** de courants de retour étroitement espacés, égaux et de phase opposée sont appelés courants de mode différentiel.

Ce sont les courants concernés par le transport de la puissance à l'antenne.

1.4 - Les courants de mode commun

Définition : Les courants circulant ***en l'absence*** de courants de retour étroitement espacés, égaux et de phase opposée sont appelés courants de mode commun.

1.4.1 - Dans l'antenne

Dans toute antenne, les courants de mode commun ***dans le ou les éléments de l'antenne sont responsables du rayonnement souhaité.*** De ce point de vue, ***nous ne pouvons pas avoir de communications radio sans mode commun dans l'antenne.***

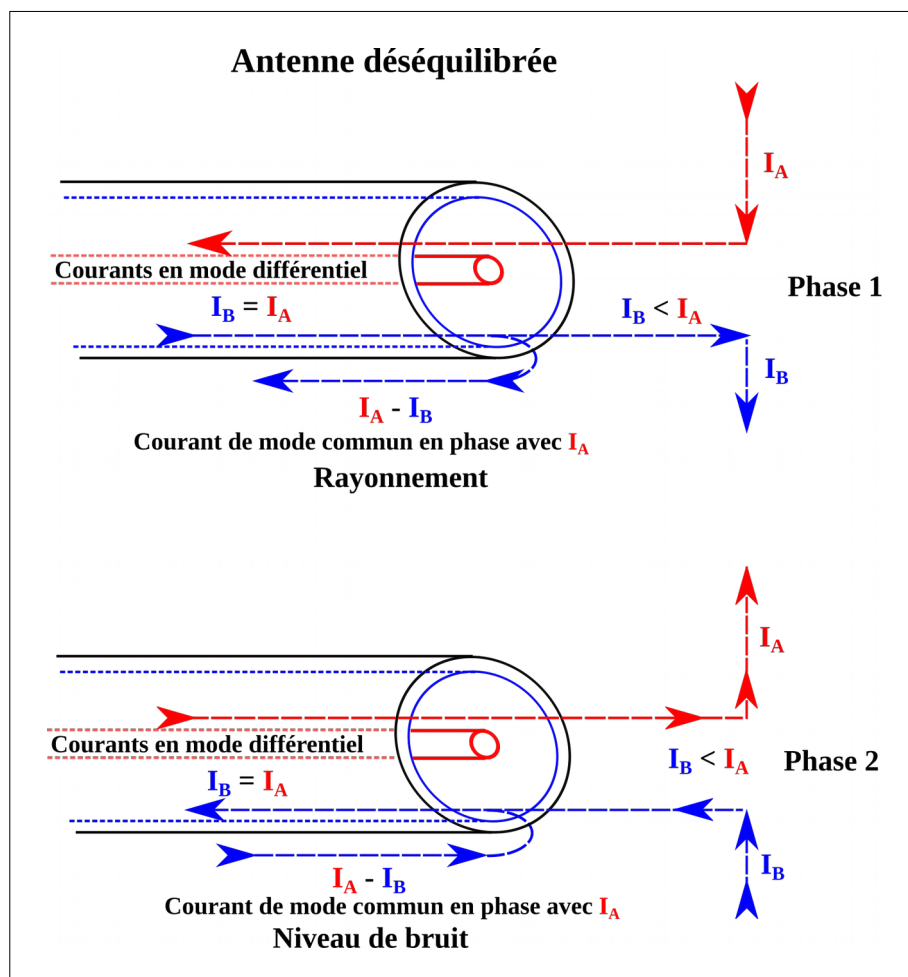
Chaque antenne a un courant de mode commun quelque part, sinon elle ne rayonnera pas.

1.4.2 - Dans les lignes plates à deux conducteurs parallèles

Le courant de mode commun circule simultanément sur les deux conducteurs. Dans ces lignes, des intensités déséquilibrées du courant prouvent l'existence du mode commun. Par contre, des courants équilibrés ne prouvent pas que le système est exempt de mode commun.

En fait, même si nous n'entendons pratiquement jamais parler de cela, **les tensions doivent également être équilibrées dans une ligne non blindée à deux conducteurs**, si nous voulons une ligne équilibrée. Chaque conducteur doit être équilibré non seulement avec des courants égaux et de sens opposé, mais aussi avec des tensions égales et opposées par rapport à l'environnement qui l'entoure. Sans équilibre de tension, **un champ électrique local** très fort peut être produit, même lorsque les courants sont équilibrés. Ce n'est pas une supposition, cela peut être facilement démontré. De plus, un déséquilibre de tension en un point quelconque signifie presque toujours qu'un autre endroit le long de la ligne est déséquilibré.

1.4.3 - Dans les lignes coaxiales à deux conducteurs concentriques



Une ligne coaxiale standard présente l'extérieur du blindage, l'intérieur du blindage et le conducteur central comme **trois conducteurs électriquement séparés ou isolés (effet de peau)**.

Seules les extrémités relient les couches de conduction intérieure et extérieure du blindage.

Le comportement de la ligne coaxiale, de par l'effet de peau et **le couplage mutuel** de la paroi intérieure du blindage au conducteur central, tire tout le courant différentiel de l'émetteur et de l'antenne vers la zone intérieure du blindage. Une caractéristique unique du courant RF est qu'il

s'éloigne toujours du champ magnétique le plus dense. C'est le même phénomène qui provoque l'effet de peau.

Avec un blindage suffisamment épais, le courant de mode commun ne peut circuler qu'**exclusivement sur la surface extérieure du blindage**. Il est impossible de forcer des courants de mode commun à l'intérieur d'un blindage de plus de plusieurs épaisseurs de peau.

La profondeur de peau du blindage sert à **isoler** la paroi intérieure du blindage de la paroi extérieure du même blindage.

Tout ce qui se trouve à l'intérieur du câble doit être en mode différentiel !

En effet, les lois de l'électricité (loi de Lenz) exigent que le conducteur central et l'intérieur du blindage transportent **toujours des courants RF égaux et opposés**.

Tout courant supplémentaire, au-delà de la soustraction des courants du centre et de la surface intérieure du blindage, se déplacera sur l'extérieur du blindage.

Ainsi les lignes coaxiales (asymétriques) alimentant des charges **moins que parfaitement asymétriques** sont sujettes au mode commun.

Pour fonctionner **sans rayonnement, l'extérieur du blindage ne doit pas présenter de différence de potentiel RF le long de sa longueur**. Nous ne pouvons pas avoir de gradient de potentiel (champs électriques) sur sa longueur, sinon la surface conductrice extérieure conduira des courants de mode commun et **rayonnera**. Cela signifie généralement que **les deux extrémités du câble doivent avoir zéro volt** par rapport à la terre ou à l'environnement dans lequel le câble fonctionne.

En fonctionnement normal, la surface extérieure du blindage est à zéro volt par rapport à la «terre» (ou au châssis).

1.4.4 - Les antennes réelles

Avec les antennes réelles, le point de connexion de l'antenne au blindage coaxial n'est presque jamais à un potentiel électrique nul par rapport à l'environnement autour du blindage ou à des endroits plus éloignés le long du câble. Étant une extrémité à tension nulle moins qu'idéale, **les blindages ont presque toujours un courant de mode commun**, même s'il s'agit d'un petit pourcentage du courant différentiel (mode normal de ligne de transmission).

La Ground-Plane (voir schéma en 2.1.1)

Par exemple, les quatre radiales d'une antenne « Ground-Plane », quelle que soit la configuration ou l'accord, ne sont jamais réellement au même potentiel électrique que l'environnement autour de l'antenne ou que le potentiel du blindage plus bas le long de la ligne d'alimentation. En expérimentant avec une antenne Ground-Plane, nous constatons que le point d'alimentation est principalement mais pas parfaitement déséquilibré. **Le blindage n'est donc pas connecté à un point électrique zéro volt**. Un courant significatif peut et excite souvent l'extérieur du blindage d'une alimentation d'antenne « ground-plane, avec un courant extérieur de blindage de 20% ou plus du courant initial à l'antenne sous certaines longueurs et mise à la terre de la ligne d'alimentation!

Le dipôle

Un dipôle alimenté par coaxial, ou une verticale avec une seule radiale, est bien pire encore pour l'équilibre de la tension. Du fait que les deux moitiés de l'antenne ont des impédances de mode commun finies et presque égales, les deux côtés du point d'alimentation veulent avoir des tensions presque égales entre elles vis-à-vis de l'environnement autour du point d'alimentation. Si nous pouvions par magie faire apparaître une terre ponctuelle parfaite et unique au point d'alimentation, les deux brins de ces antennes auraient des tensions très similaires par rapport à ce point de référence.

Bien sûr, nous ne pouvons pas faire apparaître ce point de référence parfait. Dans un dipôle normal à alimentation centrale « push-pull », les courants de déplacement circulent en grande partie (mais pas totalement) d'un côté à l'autre du dipôle. Cela établit le champ électrique et permet au courant de circuler vers l'extérieur dans les fils « ouverts » suspendus dans l'espace. mais la ligne d'alimentation apporte une connexion de « terre » ou de référence au point d'alimentation.

L'impédance du troisième chemin, la surface extérieure du blindage (l'impédance indésirable du chemin de mode commun) ***varie en fonction de la longueur et du tracé de la ligne d'alimentation, de l'environnement traversé par la ligne d'alimentation et de la manière dont cette ligne d'alimentation est mise à la terre.*** Bien que cela puisse affecter le SWR et que le courant circulant suivant ce chemin soit affecté par le SWR, ***un SWR élevé ne provoque pas, et un SWR faible n'empêche pas, le courant de mode commun ou la RF indésirable dans la station.***

1.5 - Les effets indésirables du courant de mode commun

Les courants de mode commun provoquent le couplage entre conducteurs situés dans un environnement proche ainsi qu'***un rayonnement électromagnétique.*** Les courants de mode commun dégradent généralement le rayonnement électromagnétique de l'antenne et la réception souhaitée.

A l'intérieur de la station ou le long de la ligne d'alimentation de l'antenne, les courants de mode commun sont responsables de l'entrée de bruits indésirables, d'interférences radioélectriques et de diverses autres nuisances.

Les courants de mode commun apportent efficacement le rayonnement de l'antenne le long de la ligne d'alimentation et de la structure métallique du support d'antenne.

Les courants de mode commun peuvent également se propager via les lignes d'alimentation électrique de la maison.

Si de la RF se couple en entrée, au départ de l'antenne en émission, elle se couple également en sortie vers l'antenne en réception. Ce qui peut augmenter le bruit et les interférences avec les signaux souhaités lors de la réception. ***Les problèmes se produisent dans les deux sens.***

Généralement nous ne désirons pas que nos lignes d'alimentation agissent notablement comme des antennes, et réciproquement nous ne voulons certainement pas que les bruits électriques dans le câblage électrique de la maison ou dans l'environnement immédiat infiltrent l'antenne.

L'idée est de garder les niveaux significatifs ou gênants du courant de mode commun de nos antennes en dehors des équipements sensibles, et ***de réduire le bruit et les signaux indésirables retournant à l'antenne, où ils peuvent supplanter les signaux souhaités en réception.***

En conséquence de quoi il doit donc y avoir ***une isolation suffisante*** entre le mode commun désiré à l'antenne et le mode commun indésirable dans l'environnement proche et le long de la ligne d'alimentation, de manière à rendre ***imperceptibles*** les effets néfastes. Le mot-clé est imperceptible, car zéro ou une spécification universelle arbitraire n'est pas réaliste.

1.5.1 - L'élimination des problèmes

Les courants de mode commun sont généralement mieux traités à leur origine c'est-à-dire aussi près que possible de leur source sans pour autant compromettre l'efficacité du système d'antenne.

La conception, l'agencement et le câblage de l'antenne en premier. La suppression en dernier!

Un bon câblage de la station et à une bonne disposition des lignes de transmission réduisent les problèmes de mode commun et la vulnérabilité aux dommages causés par la foudre. En effet, la plupart des dommages provoqués par la foudre le sont par le courant de mode commun, ce qui fait que la protection contre la foudre et l'immunité RFI vont de paire.

Dans la plupart des cas, une combinaison de mise à la terre accompagnée d'une très modeste impédance de mode commun est préférable. Dans de nombreux cas, on peut avoir une isolation élevée seulement avec la seule mise à la terre, mais la mise à la terre et le câblage doivent être appropriés!

Les remèdes

Il existe deux façons de réduire considérablement le mode commun.

Comme solution, considérée généralement la meilleure en HF, nous pouvons installer un bon balun (symétrique-asymétrique) de courant ou une inductance de blocage (Choke Balun) de mode commun **à la position appropriée** le long de la ligne d'alimentation. L'inductance de blocage de mode commun modifie l'impédance de mode commun de la ligne d'alimentation.

Lorsque le blindage présente une différence de potentiel sur sa longueur, nous pouvons réduire considérablement les courants extérieurs en faisant en sorte que l'extérieur du blindage coaxial présente une impédance élevée au point d'alimentation de l'antenne (impédance de mode commun). Nous pouvons le faire en sélectionnant une longueur appropriée de câble, en ajoutant des manchons en matériaux magnétiques en ferrite ou en enroulant le câble sous la forme d'une bobine avec ou sans noyau pour former une inductance de blocage.

La profondeur de la peau empêche l'intérieur du câble de « voir » ce qui se fait à l'extérieur.

En VHF ou même en HF supérieure, en fonctionnement en bande unique ou harmoniques impaires, avec une ligne d'alimentation espacée d'autres conducteurs, nous pouvons simplement mettre à la terre le blindage de la ligne d'alimentation à environ $1/4 \lambda$ (ou $3/4 \lambda$) du point d'équilibre approximatif.

Ces remèdes ne constituent généralement pas une solution universelle.

Le remède le plus efficace et le travail requis dépendent **des spécificités de l'installation**. Pour comprendre le fonctionnement d'un suppresseur de mode commun, choke balun, ainsi que l'impédance requise, nous devons avoir compris la notion d'équilibre vue ci-avant. Nous devons en outre avoir une compréhension raisonnée de l'analyse des circuits et des limites d'impédance des composants impliqués aux fréquences radio, et une certaine idée de la façon dont les composants se couplent à distance.

2 - Les antennes

2.1 - Les antennes symétriques

Les dipôles ou demi-ondes alimentés au centre sont des antennes intrinsèquement équilibrées.

Une antenne relativement équilibrée introduira très peu de mode commun sur une ligne d'alimentation symétrique, même si l'antenne n'est pas parfaite. Des problèmes peuvent être créés par la disposition de l'antenne ou de la ligne d'alimentation, mais cela nécessite généralement une erreur assez importante de construction ou d'installation. La plupart des problèmes d'équilibre, lors de l'utilisation de lignes d'alimentation symétriques sur des dipôles ou doublets, sont générés au niveau du coupleur ou du balun.

Se reporter au point **1.4.4 « Les antennes réelles »** pour l'analyse d'une demi-onde alimentée au centre par une ligne coaxiale.

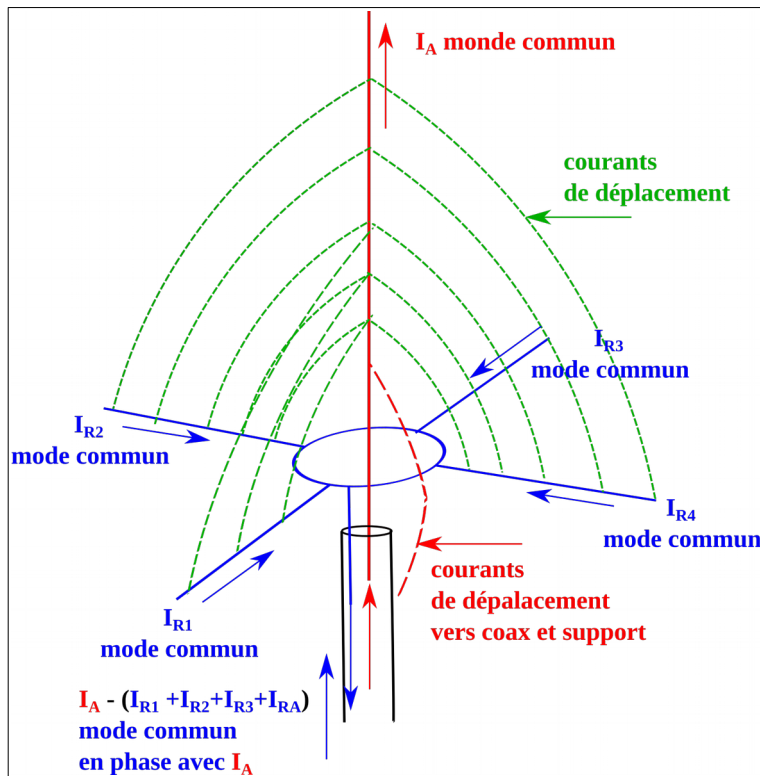
2.2 - Les antennes non symétriques

La verticale quart d'onde, la plus connue, et les antennes filaires à alimentation décentrée (OCFD), et les antennes à alimentation d'extrémité (EFHW) sont très souvent la cause de problèmes importants de mode commun.

Pour ces deux dernières, plus la ligne d'alimentation est déportée du centre, plus important est le problème de mode commun sur la ligne d'alimentation. Cela signifie que les doublets alimentés au

centre sont les moins problématiques, les antennes à alimentation décentrées se situent dans l'intervalle et les antennes alimentées par l'extrémité sont les pires problèmes possibles de mode commun. En effet, les antennes alimentées en extrémité sont en mode 100% commun au point d'alimentation!

2.2.1 - L'alimentation par l'extrémité



Peut-elle se faire sans « terre » ni contrepoids ?

La règle est la suivante et ne peut pas être enfreinte.

Le courant circulant dans l'extrémité de l'antenne doit être égal, à cette extrémité, à la même quantité de courant circulant dans une « terre » ou un contrepoids d'un certain type, de manière à fournir un équilibre des courants pour la ligne d'alimentation.

Une antenne alimentée par l'extrémité doit être dotée d'un élément, ou contrepoids pour contrebalancer-équilibrer, fixé au point d'alimentation ***qui transporte le même courant de mode commun à l'extérieur du point d'alimentation que le courant de mode commun circulant dans l'antenne !***

Le contrepoids peut être accidentel et non physiquement évident, comme par exemple ***l'extérieur du blindage du câble d'alimentation coaxial***, des courants parallèles sur une ligne d'alimentation symétrique ou des courants sur un mât ou un support métallique. Cela reste vrai quel que soit le nombre d'inductances de blocage en série, de dispositifs ou de systèmes d'isolement ou de dispositifs de suppression de mode commun installés au point d'alimentation. Ce courant devrait être appelé ***courant de mode commun et il provoque toujours un rayonnement proche***, et parfois même lointain.

La fonction de contrepoids peut être assurée par les courants circulant sur un système de radiales installé intentionnellement, mais ***même un contrepoids intentionnel entraîne une division des courants entre le contrepoids intentionnel et des chemins accidentels, comme la ligne d'alimentation (Loi des nœuds de Kirchhoff)***. Les courants se divisent en fonction de la « facilité » qu'offre chaque chemin, c'est-à-dire des impédances des différents chemins au point d'alimentation de l'antenne. ***Sans un contrepoids de dimension raisonnable au point d'alimentation***, même si nous ajoutons des chokes balun de mode commun au point d'alimentation, ou utilisons un transformateur ou un réseau d'isolement au point d'alimentation, ***la tension aux bornes du dispositif d'isolement augmentera jusqu'à obtenir au final le même courant que celui qui circule dans l'extrémité de l'antenne***. Même sans une connexion électrique directe, ***les courants de déplacement (courants provoqués le champ électrique entre l'antenne et un autre conducteur proche comme le blindage de la ligne d'alimentation) provoqueront le même courant de mode commun sur la ligne d'alimentation***, ou peut-être vers un autre chemin indésirable, au point d'alimentation de l'antenne !

Cela signifie que nous ne pouvons pas forcer l'alimentation dans une seule charge terminale. **Il doit y avoir un chemin de retour d'un certain type vers la source**, même s'il n'est pas évident.

Avec toute forme d'antenne alimentée par l'extrémité, le mât, la ligne d'alimentation **doivent transporter le mode commun de retour** et, dans une certaine mesure, **rayonneront**.

Seul un contrepoids intentionnel au point d'alimentation, en conjonction avec une isolation adéquate entre le dispositif d'alimentation et la jonction contrepoids-antenne, peut réduire considérablement le mode commun sur la ligne d'alimentation.

2.2.2 - L'antenne demi-onde alimentée par l'extrémité

L'impédance d'extrémité d'une antenne demi-onde, même à la résonance exacte, ($jX = 0$), n'est jamais infinie. L'impédance d'extrémité passe par un maximum relativement important lorsqu'une antenne est approximativement résonnante en demi-onde, mais la partie dissipative et/ou rayonnante de cette impédance est limitée à **quelques milliers d'ohms maximum**, même pour des conducteurs très fins ayant principalement une isolation à l'air à faible perte. La présence de diélectriques à pertes ou l'utilisation d'un conducteur plus épais réduit encore l'impédance.

L'impédance n'étant pas infinie, **des tensions et des courants finis sont nécessaires** pour appliquer de la puissance à l'antenne ou en extraire de l'énergie.

Comme l'impédance d'extrémité de l'antenne est une valeur finie, parfois même inférieure à ce que l'on pourrait s'attendre, **un courant significatif doit être forcé dans l'extrémité de l'antenne.**

De plus, sans impédances de charge égales sur chaque conducteur de la ligne d'alimentation, comme le ferait un dipôle symétrique, il devient impossible d'avoir un équilibre parfait de la tension et du courant au niveau des bornes d'alimentation.

L'antenne alimentée par l'extrémité est énormément non symétrique, ou déséquilibrée.

3 - Conclusion

L'adaptation de l'impédance de l'antenne à l'impédance de la ligne d'alimentation ne nous met pas forcément à l'abri de petites « surprises » comme évoquées ci-dessus.

73s

Yvan-on4cy