

Der gleiche Op konnte offenbar auch die notorischen Störer auf seiner Frequenz ausmachen, denn mehr als einmal schob er seine Transmitter Frequenz um einige kHz rauf oder runter, wodurch wir ihn wieder störungsfrei aufnehmen konnten, während der stupide Störer nur noch den leeren Äther heizte.

So kam ich mit meinen 100 Watt und der R5-Vertikalantenne mit nur einem Anruf zu einem neuen DXCC-Zähler.

Solche Tricks würde ich mir in den von Peter, HB9PL vorgeschlagenen Kursen über Betriebstechnik, vorstellen, die ich voll unterstütze.

Werner Berli, HB9US



INTERNATIONAL

AATIS-Ballonstart in München am 17. April

Der Arbeitskreis Amateurfunk und Telekommunikation in der Schule (AATIS) e.V. plant in Zusammenarbeit mit der Schulstation DK0TGG und dem Pluskurs Amateurfunk und Telekommunikation am Theresia-Gerhardinger-Gymnasium den Start eines Stratosphärenballons mit Amateurfunknutzlast in der Münchener Innenstadt, Nähe Viktualienmarkt am 17. April um 10 Uhr MEZ. Unterstützt wird dieses Vorhaben durch den DARC-Ortsverband München-Süd C18.

Die Nutzlast enthält meteorologische Sensoren für Luftdruck, relative Feuchte und Temperatur. Diese Telemetriedaten und die durch GPS ermittelte Position werden im AX.25-Protokoll (Packet Radio) mit 1.200 Baud auf der Frequenz 145.200 MHz abgestrahlt. Die Bake kann nicht connected werden. Zusätzlich werden alle Daten auf der gleichen Frequenz als Sprachansage der WX-Telemetrie und GPSPosition abgestrahlt.

Es ist mit Reichweiten bis zu 500 km zu rechnen. Rückmeldungen sind im PP-Convex auf dem Kanal 55 sehr erwünscht. Telemetriemitschnitte sollten an DF0AIS @ DB0ABZ zur Archivierung und späteren Auswertung gesandt werden. Die Formeln zur Auswertung der einzelnen Telemetrie Kanäle werden wenige Tage vor der Mission in der PR-Rubrik «schule» eingespielt. Als Software stehen die Programme «PR-Ballon» und «Die Ballon-Werkstatt» in der gleichen Rubrik oder auf der AATIS-CDROM zur Verfügung.

Die maximale Flughöhe des Ballons dürfte etwa 30 km betragen. Es ist mit einer Missionsdauer von etwa 3 Stunden zu rechnen, so dass die Bergung ab 13 Uhr erfolgen kann. Alle Funkamateure im Landegebiet werden um Unterstützung gebeten, damit die Nutzlast für weitere Missionen zur Verfügung steht. Die Bake sendet insgesamt etwa 6 Stunden. Die Nutzlast wird mit zwei Blitz-LEDs versehen, um die Bergung auch in der Dämmerung zu ermöglichen.

Wolfgang Lips, DL4OAD



TECHNIK

Redaktion: Dr. Peter Erni (HB9BWN), Römerstrasse 34, 5400 Baden
Packet: HB9BWN @ hb9aj Compu Serve: 100602, 1507

Introduction aux lignes de transmission et aux fibres optiques

Werner Tobler (HB9AKN), Chemin de Palud 4, 1800 Vevey

Table des matières

1. Introduction
 - 1.1 Définition
 - 1.2 Exemple pratique
2. Théorie fondamentale
 - 2.1 Généralités
 - 2.2 Diverses ondes
 - 2.3 Modes de fonctionnement de la ligne
 - 2.4 L'impédance caractéristique
 - 2.5 Différentes terminaisons de la ligne
 - 2.6 Pertes dans les lignes

3. Réalisation pratique des lignes
4. Mesures
 - 4.1 Problèmes pratiques
 - 4.2 Câbles coaxiaux
 - 4.2.1 Facteur de vitesse
 - 4.2.2 Impédance caractéristique
 - 4.2.3 Atténuation
 - 4.3 Lignes symétriques apériodiques
 - 4.4 Lignes symétriques accordées
5. Fibres optiques
6. Conclusions

Avant propos

Nous n'avons pas la prétention de faire ici la théorie complète des lignes de transmission, celle-ci remplit déjà beaucoup d'ouvrages. Certains se bornent à donner des recettes pratiques, un peu comme les livres de cuisine, en laissant complètement de côté l'aspect théorique. D'autres commencent par enseigner les notions théoriques fondamentales pour terminer par la résolution de problèmes spécifiques. L'avantage de la première façon de procéder réside dans le fait qu'elle permet d'installer rapidement un système qui donne plus ou moins satisfaction, sans pour autant en comprendre exactement le fonctionnement. D'autres ouvrages encore, partent d'une conception beaucoup plus large des systèmes résonnants, et étudient la physique vibratoire, englobant tous les systèmes, tels que tuyaux d'orgues, cordes vibrantes, antennes et autres, qu'ils soient mécaniques ou électriques, en écrivant pour tous ces systèmes les équations fondamentales. On arrive alors à d'instructives comparaisons d'équations entre les systèmes électriques et mécaniques, et on parvient à un degré de compréhension bien supérieur, en observant que souvent, à chaque système résonnant mécanique correspond son homologue électrique. De plus, on comprendra vraiment pourquoi tel ou tel système fonctionne mieux que tel autre. Notre but ici est de réaliser un équilibre entre le degré de compréhension, et l'utilisation efficace de cette compréhension.

Nous reprenons donc le vieil adage cher au regretté Eugène Aisberg, «Pratique sans théorie est aveugle, théorie sans pratique est stérile», adage valable particulièrement dans le domaine de la construction électronique. C'est le grand mérite de l'ouvrage de Jean Quinet cité dans la bibliographie, d'avoir bien posé la théorie fondamentale des lignes, ainsi que les équations, avant de parler des réalisations pratiques. Beaucoup de choses deviendront alors évidentes sans même l'avoir expérimenté pratiquement, bien sûr, on peut toujours faire rouler une roue carrée, mais cela fonctionne moins bien! Dans ce cas bien concret cela saute aux yeux, mais lorsqu'il s'agit de lignes, ce n'est pas si évident. Seules l'analyse et des mesures, ainsi que des essais permettront d'arriver à des conclusions.

Mais la théorie a cependant ses limites, et devient rapidement très compliquée sur le plan mathématique notamment, dès que nous sortons des configurations types et simples. Il existe bien sûr des logiciels spécialisés pour telle ou telle configuration. Il ne reste alors plus qu'à entrer les paramètres, sans posséder la moindre parcelle de connaissances du

sujet. Ces logiciels, d'une part ne sont pas très courants, et d'autre part ne correspondent pas forcément à la configuration désirée. Ils peuvent être d'une extrême utilité pour les systèmes complexes qui nécessiteraient un temps considérable de calculs par la méthode classique. Pour nous autres, amateurs, de tels logiciels nous privent du plaisir de la compréhension et d'effectuer quelques calculs.

Ainsi, après quelques calculs d'évaluation, généralement assez simples, on est bien obligé de passer de toute façon à l'expérimentation pratique, avec tous ses impondérables. C'est ainsi que figure, entre autres, dans l'ouvrage précité une réalisation personnelle d'antenne multiéléments Yagi (une dizaine d'éléments) réalisée par F3LG dont le développement théorique aurait nécessité de gros moyens mathématiques et informatiques qui existent actuellement, mais à notre connaissance, dans des laboratoires très spécialisés.

Notre ambition est ici plus modeste. D'une part nous nous limiterons aux seules lignes de transmission, sans être exhaustifs, sans parler des antennes elle-mêmes qui seront peut-être vues ultérieurement. Nous rappellerons les notions théoriques vraiment indispensables, car nous avons souvent remarqué au cours de discussions ou QSO's que pour beaucoup de jeunes amateurs, une ligne de transmission se limite à un morceau de câble coaxial de 50 Ohms d'impédance caractéristique et c'est tout. Cette vision très restreinte des choses nous a incité à écrire cet article qui, nous l'espérons apportera des réponses à bien des questions et élargira l'horizon des jeunes amateurs.

On ne saurait parler des lignes de transmissions classiques sans parler des fibres optiques qui sont aussi des lignes mais d'un type très particulier et utilisables dans une toute autre gamme de fréquences. Ces fibres ont permis un développement absolument extraordinaire des télécommunications. Grâce à l'amabilité de la firme Cabloptic de Cortaillod que j'ai eu la chance de visiter, je pourrai fournir une certaine quantité d'informations les concernant.

Symboles utilisés

- A: atténuation (db)
- Va: vitesse de propagation de l'onde dans l'air (km/sec)
- V: vitesse de propagation de l'onde sur la ligne (km/sec)
- v: facteur de vitesse
- F: fréquence (kHz)
- F1: fréquence d'accord de la ligne quart d'onde (kHz)
- ϵ : constante diélectrique de la ligne

L: longueur géométrique de la ligne (mètre)
 λ : longueur d'onde (mètre)
 S: rapport d'ondes stationnaires ROS
 r: coefficient de réflexion
 U: Tension électrique (volts)
 U1: Tension HF de sortie de l'émetteur (volts)
 U2: Tension HF appliquée à l'antenne fictive
 I: Courant électrique (ampères)
 Zc: impédance caractéristique (ohms)
 Z: impédance en un point de la ligne (ohms)
 Z1: 1ère impédance à adapter (ohms)
 Z2: 2ème impédance à adapter (ohms)
 Z0: impédance caractéristique de la ligne quart d'onde (ohms)

1. Introduction:

1.1 Définition

Les lignes de transmission servent à conduire l'énergie de haute fréquence de l'endroit de production, l'émetteur ou un générateur HF quelconque, à l'endroit d'utilisation. Cet endroit d'utilisation peut être constitué d'une simple résistance qui transformera alors l'énergie électrique en énergie calorifique, ou d'une antenne, qui transformera l'énergie électrique en énergie électromagnétique. Inversement, à la réception, les lignes permettront d'acheminer l'énergie captée par l'antenne vers le lieu d'utilisation, par exemple un récepteur. Cette définition qui paraît logique n'est en réalité pas complète car elle ne correspond qu'à un cas particulier de fonctionnement de la ligne, dont nous parlerons plus loin. Pour être complet, ajoutons que cela peut-être l'organe de liaison comme dit ci-dessus, avec, en plus, comme autre possibilité de fonctionnement de la ligne, qu'elle soit comprise elle-même dans un ensemble résonnant, constituant un tout. Dans un tel cas, elle ne conduit donc pas l'énergie d'un endroit à un autre, mais fait partie d'un ensemble résonnant. Un régime d'ondes stationnaires s'établira alors sur cet ensemble ligne antenne, dont la ligne sera directement ou indirectement reliée à l'équipement utilisateur ou producteur d'ondes. Le lecteur ne manquera pas de se souvenir de cette importante distinction dans l'exposé qui va suivre. Nous ne nous occuperons donc, dans cet article, que de la partie comprise entre la prise de sortie de l'émetteur ou du récepteur et l'élément de conversion d'énergie, soit l'antenne. Nous avons souvent constaté que l'énorme variété des matériels disponibles ainsi que les différentes normes plongent souvent l'amateur et même le professionnel dans l'embarras. Devant cette plétore d'offres, nous nous efforcerons d'apporter une assistance à l'amateur afin qu'il soit moins emprunté lors du choix et de l'achat de son matériel. En effet, le professionnel peut toujours compter sur l'assi-

stance d'un représentant qui lui fournira tous les renseignements dont il a besoin. D'ailleurs, le professionnel, par peur de l'aventure, s'en tiendra le plus souvent au même fournisseur dont il connaît les normes et les personnes auprès desquelles il pourra obtenir de l'assistance. Il évitera ainsi bien des ennuis et des mauvais achats sans parler des pertes de temps. Il faut quelquefois plus de temps pour trouver le bon numéro de référence dans le catalogue, lors de l'achat d'un câble, que pour installer la ligne. Le simple examen des catalogues et le choix de la bonne référence de l'article, nécessaire pour passer une commande, constitue souvent un casse tête, que l'on peut éviter par simple coup de fil à son représentant.

Le contexte est évidemment totalement différent pour l'amateur qui ne doit la plupart du temps, compter que sur lui-même. En effet, le plus souvent, il arrive dans un lieu de vente où sont stockés des matériels de provenances fort diverses, telles que surplus, fin de stocks, etc. Le revendeur ne possède la plupart du temps pas beaucoup de connaissances techniques.

Dame, on ne peut tout de même pas demander à un récupérateur de savoir ce qu'est une impédance caractéristique d'un câble, et encore moins les pertes en db par mètres de celui-ci, à une certaine fréquence. Le plus souvent, poser une telle question paraît incongru dans un tel contexte, et celui qui la posera mettra souvent le vendeur dans l'embarras. Celui-ci, pour ne pas perdre la face, citera des chiffres qui ne seront pas forcément vérifiés par l'expérimentation, et encore moins par les spécifications réelles du câble. La première qualité à posséder sera donc la méfiance à l'égard de ces chiffres que l'on nous cite pour nous rassurer. De plus, les prix pratiqués, généralement bas, ne permettent pas de fournir en plus tous les renseignements que l'on doit posséder, pour une bonne utilisation de ce matériel. Faut-il pour autant renoncer à ces achats hors concurrence? Non point, ce matériel n'a aucune raison d'être d'une qualité inférieure, simplement, il faudra remédier soi-même au manque d'informations le concernant.

1.2 Un exemple tiré de la pratique

Nous devons installer une antenne pour le Natel C dans un alpage de montagne, endroit mal desservi, entouré de chaînes de montagnes. La petite antenne verticale installée sur le portable lui-même, permettait généralement d'obtenir la liaison, selon l'endroit d'utilisation, mais avec quelques tatonnements, le relais n'étant pas en vision directe. Liaison très précaire d'ailleurs, puisque la moindre variation

dans l'inclinaison et la position de l'antenne du combiné pouvait l'interrompre ou empêcher de l'établir. Il fallut d'abord déterminer l'endroit le plus favorable pour l'établissement de la liaison. Cet endroit se trouvait sur un promontoire situé à quelques centaines de mètres de la ferme d'alpage, située elle-même dans une cuvette afin d'être mieux protégée des intempéries. Sur ces fréquences très élevées, (de 800 à 900 MHz) il est très difficile dans ces conditions d'obtenir un fonctionnement garanti, car en plus des problèmes évoqués, la propagation ainsi que les réflexions multiples varient passablement et dépendent notamment du brouillard et des conditions météorologiques. D'autre part, il n'est pas très agréable de devoir quelquefois sortir de la ferme sous la pluie, pour faire un téléphone urgent, en recherchant chaque fois la bonne orientation de l'antenne. La solution la plus simple consistait alors à monter une antenne fixe orientée une fois pour toute dans la bonne direction, branchée en permanence au radiotéléphone placé à un endroit fixe à l'intérieur de la ferme. On disposera ainsi d'un véritable téléphone permettant aussi d'être appelé à n'importe quel instant.

L'emplacement et l'orientation la meilleure déterminée pour l'antenne en émission, il restait à vérifier que la tension développée par celle-ci en réception, était encore suffisante pour un bon fonctionnement du radiotéléphone lors de la réception d'un appel. En effet, la ligne apporte rapidement des pertes à ces fréquences. Ces pertes, tolérables en émission, ne le seront peut-être plus en réception, car la tension appliquée à la prise du combiné, devra naturellement correspondre au moins au seuil minimal requis. Ce seuil est très variable d'un équipement à l'autre et est la plupart du temps inconnu de l'utilisateur. Cette donnée ne figure pratiquement jamais dans le manuel d'utilisation et constitue donc la première inconnue. Inversement à l'émission, la puissance rayonnée devra être suffisante pour actionner le relais en tenant compte encore des pertes du câble, du gain et rendement de l'antenne etc. La puissance d'émission est elle, généralement connue. Ainsi, certaines données sont connues, d'autres pas, il nous reste donc l'expérimentation. Un premier câble réputé excellent pour ces fréquences, d'une longueur de l'ordre de 10 mètres apportait une atténuation trop grande. La même longueur avec un câble spécial de faible pertes et fiches F permettait un fonctionnement en émission seulement, mais empêchait toute réception d'appel. Finalement, quatre mètres de ce même câble était la limite à ne pas dépasser pour obtenir un fonctionnement normal complet. Il fallut donc retrouver un nouvel emplacement de

l'antenne, donnant les mêmes possibilités mais avec quatre mètres de câble seulement.

Quels étaient les paramètres importants dans cet essai?

- A) L'impédance caractéristique du câble.
- B) Les pertes en db par 100 mètres de celui-ci et à quelle fréquence.
- C) Le type d'antenne utilisé et son gain.
- D) L'emplacement et l'orientation de l'antenne, ainsi que la polarisation de l'onde.
- E) Les problèmes de connectique

Dans le cas particulier, j'ignorais tout des caractéristiques d'atténuation des deux câbles utilisés. Je savais seulement que le deuxième était meilleur que le premier, uniquement en me basant sur la comparaison des diamètres respectifs et des constructions. Pour le deuxième câble, la construction était à gaine normale tressée entourée d'un feuillard très fin d'aluminium formant une gaine supplémentaire. A noter également l'âme du câble qui est constituée de cuivre dur de 1 mm de diamètre et non d'un câble torsadé multibrins. Ce câble est parfaitement adapté au montage de fiches F, mais ne saurait convenir pour d'autres types de fiches. Quant à l'antenne utilisée, (chez nous de type Yagi 5 éléments), elle sera notre dernière ressource si on ne peut diminuer encore la longueur du câble. Il est néanmoins possible d'utiliser un amplificateur à double voie permettant de remonter le niveau tant à l'émission qu'à la réception. Ces dispositifs existent mais l'emploi d'une antenne plus performante est moins onéreux.

Problèmes de connectique

Cela serait un oubli que de passer sous silence les problèmes rencontrés dans ce domaine. J'avais sur le combiné la norme SMA, convertie en BNC, reconvertie en norme F. Encore faut-il trouver les adaptateurs nécessaires. Ces problèmes de connectique sont le pain quotidien de l'électronicien tant amateur que professionnel, et cela ne va pas vers une simplification bien au contraire. En effet, les Natels D utilisent à leur tour une norme différente pour leur prise d'antenne. De plus, certains câbles imposent obligatoirement un certain type de fiches ainsi que les pinces nécessaires pour les sertir. Mon deuxième câble, m'imposait obligatoirement des fiches F. Rappelons que la classique fiche «PL» dite série UHF ne convient que jusqu'à une fréquence de 200 MHz. Ma récompense a été de constater que mon système fonctionne, alors que le Natel D d'un promeneur ne passait pas.

Cette narration a pour but de montrer qu'il n'est pas toujours aisé, même si l'on connaît assez bien la question, de résoudre un problème de ligne de transmission. Le but de cet article est de fournir à l'amateur les connaissances vraiment nécessaires afin de pouvoir résoudre le mieux possible ce genre de problèmes avec de petits moyens, et le minimum de pertes de temps. De plus, nous le savons, beaucoup d'amateurs hésitent de se lancer dans l'expérimentation, de peur de perdre le relatif bon fonctionnement présumé de leur système ligne antenne. Il existe beaucoup de superstition et des récits fabuleux sont contés le soir dans les chaumières. Après quelques essais, ces amateurs constateront peut-être que leur fameuse installation n'était pas si bonne que cela, et ils se demanderont pourquoi ils ne l'ont pas améliorée plus tôt.

Nous procéderons comme de coutume en commençant par bien poser les bases théoriques, en examinant leurs implications immédiates et de quelle façon on peut les appliquer le mieux possible dans la pratique. Nous nous efforcerons de rester simple et le moins ennuyeux possible, étant conscient que la théorie peut être rébarbative pour certains.

2. Théorie fondamentale

2.1 Généralités

Les lignes de transmission font partie de la théorie générale des lignes et des antennes, théorie très vaste et ici nous nous limiterons aux seules notions vraiment utiles et indispensables, pour travailler le plus efficacement possible, en pleine connaissance de cause. Nous ne ferons donc pas un cours complet de la théorie des lignes, mais une sorte de condensé de notions de première importance. Nous encourageons vivement l'amateur de se référer à la bibliographie et de se constituer une bonne documentation et un bagage de connaissances, pour faire suite à cet exposé, qui ne constitue qu'une introduction. Hélas, certains ouvrages cités, ne sont peut-être plus sur le marché, non pas qu'ils soient dépassés, (on ne refait pas les règles de la physique vibratoire tous les jours) mais plutôt que le risque financier inhérent à toute nouvelle publication ou réédition, ne peut être assumé, en cette période difficile. Le lecteur voudra donc bien nous excuser de lui fournir des titres et éditeurs peut-être disparus. De plus, je m'efforcerai de ne jamais perdre de vue l'aspect pratique des choses.

Il existe fondamentalement deux types de lignes de transmission:

- A) Les lignes asymétriques de type coaxial.
- B) Les lignes symétriques de type bifilaire.

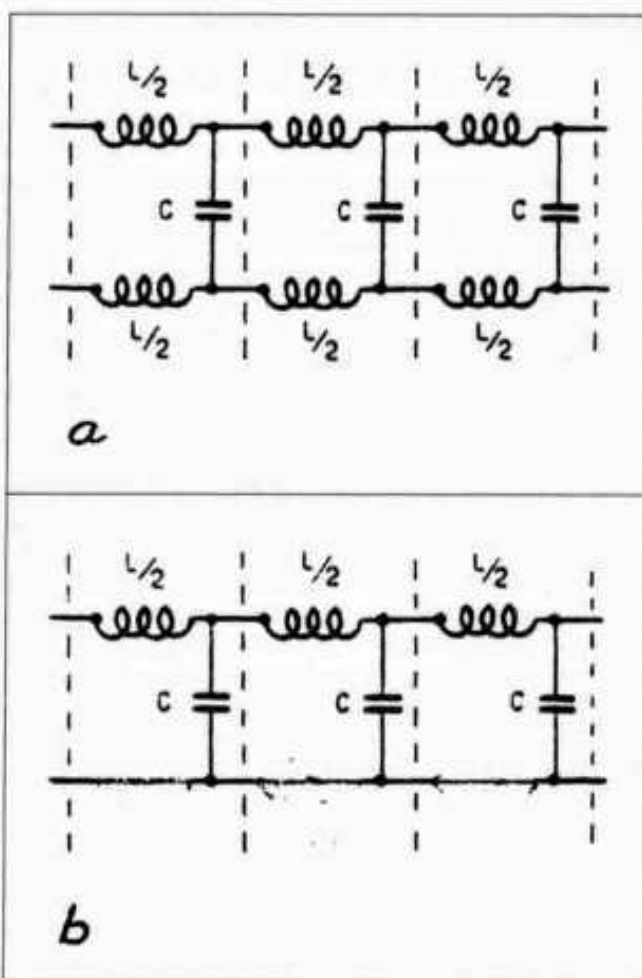


Figure 1: Dans une ligne à deux conducteurs, chaque «trçon unité» présente à la fois une self-induction L et une capacité C

- a) Quadripôle symétrique
- b) Quadripôle asymétrique

Ces deux types de ligne peuvent être représentés par un quadripôle qui indique de lui-même s'il est du type symétrique ou asymétrique, de part la combinaison des éléments qui le constituent. Un quadripôle constitue donc un tronçon de ligne réduit à sa plus simple expression. La ligne totale ou réelle ne sera donc qu'une succession de quadripôles identiques mis bouts à bouts. Par souci de simplification, nous n'avons pas représenté la résistance ohmique de la ligne qui devrait figurer en série et qui apporte des pertes. Cette résistance est l'opposition purement ohmique au courant de haute fréquence présentée par les deux conducteurs. Cette résistance doit être **la plus petite possible**. Rappelons que cette valeur de résistance est supérieure à celle que l'on mesurerait à l'aide d'un ohmmètre. De même, nous n'avons pas représenté la résistance se trouvant en parallèle qui elle, donnera lieu à des pertes dues à l'isolation qui n'est pas parfaite. Celle-ci doit être **la plus**

grande possible puisqu'elle représente la résistance d'isolement entre les conducteurs. Quadripôle symétrique (voir figure 1a)
Quadripôle asymétrique (voir figure 1b)
Remarque: Il existe des dispositifs translateurs appelés «Balun» ou symétriseur permettant la connexion d'une ligne symétrique à une ligne asymétrique ou inversement.

2.2 Diverses ondes

2.2.1 Ondes progressives

On appelle **onde progressive** toute onde qui se propage sur une ligne d'une façon uniforme et unidirectionnelle du lieu de production en direction du lieu d'utilisation de l'énergie qu'elle contient. En un endroit quelconque de la ligne, un observateur verrait le courant et la tension en phase et croissant pour atteindre une valeur maximale de crête, décroissant pour passer par une valeur minimale, recroissant et ainsi de suite **sans inversion du sens de propagation du courant ou de la tension**. L'observateur verra ainsi passer le train d'ondes toujours de gauche à droite ou bien de droite à gauche. Dans ce cas, correspondant à la définition de l'onde progressive, il n'y a donc pas d'ondes réfléchies en sens inverse de celles observées ci-dessus. De plus, si on fait abstraction des pertes, les différentes valeurs instantanées relevées **seront indépendantes** de l'endroit où s'effectue la mesure, et identiques jusqu'à l'infini. Ce mode de fonctionnement est dit adapté, et **il est impératif** pour l'obtenir que la ligne soit terminée par une résistance ohmique pure dont la valeur R soit égale à l'impédance caractéristique du câble (voir plus loin la signification de l'impédance caractéristique). On a bien dans ce cas transport d'énergie d'un endroit à un autre par l'intermédiaire de l'onde progressive, et cette énergie sera utilisée à l'endroit de destination.

Analogie mécanique:

Prenez une corde par une extrémité, toute la corde étant déroulée sur le sol devant vous, et transmettez lui une impulsion d'énergie. L'onde va se propager progressivement sur le sol le long de la corde, dans un seul sens jusqu'à son extinction complète, c'est à dire jusqu'à épuisement complet de l'énergie qu'elle contient. Cette onde initiale est appelée **onde incidente**.

2.2.2 Ondes stationnaires

On appelle **onde réfléchie** toute onde revenant en sens inverse de l'onde incidente dont elle contient une fraction plus ou moins grande d'énergie, selon le degré de réflexion. La réflexion d'énergie peut être partielle ou totale selon la quantité d'énergie absorbée par l'ob-

stacle. Elle revient donc en direction du générateur d'ondes incidentes dont elle est issue.

Analogie mécanique:

Prenez la même corde mais cette fois attachez en une extrémité à un mur. Transmettez l'onde incidente qui va se propager jusqu'à l'obstacle, (le mur), être réfléchi et revenir avec inversion de phase en sens opposé au point de départ.

On appelle **onde stationnaire**, l'onde résultante de l'action de l'onde incidente et de l'onde réfléchi. Elle est dite stationnaire parce qu'elle ne progresse ni dans un sens ni dans l'autre. Seule l'amplitude de crête instantanée varie avec le temps. A des instants bien précis, cette amplitude est absolument nulle ou maximale avec toutes les valeurs intermédiaires. De plus, la valeur de crête maximale mesurée dépendra de l'endroit choisi pour faire la mesure. Aucun transport d'énergie n'est effectué d'un point à un autre à l'aide d'une onde stationnaire, l'énergie contenue dans l'onde étant utilisée sur place et convertie en énergie acoustique pour les systèmes mécaniques, et en énergie électromagnétique pour les systèmes électriques.

Analogie mécanique

Vibration d'une corde de piano, diapason, tuyau d'orgue. Dans l'exemple ci dessus, on obtient une onde stationnaire en continuant d'alimenter la corde en ondes incidentes. Au sujet du diapason, une expérience de physique toute simple et très instructive permet d'expliquer et de mieux comprendre l'importance du contrepoids, dans son équivalent électrique soit l'antenne quart d'onde (Marconi) et toutes ses dérivées.

Faites osciller le diapason que vous tenez à bout de bras. Vous percevez certes le son à 1000 Hz mais sans excès. Appliquez le support du diapason que vous tenez à la main sur une masse rigide quelconque, soit le couvercle d'un piano, un rayon etc, le son a beaucoup augmenté en intensité. C'est exactement ce qui se passe avec une antenne verticale dont le contrepoids (ou les radars) sont insuffisants (l'équivalent du diapason tenu à la main) ou avec un bon contrepoids. Ainsi, on comprend immédiatement l'importance d'un bon contrepoids pour une antenne verticale quart d'onde uniquement en considérant l'analogie mécanique du diapason qui joue parfaitement.

Remarque: En réalité, le diapason n'est pas le siège d'une vibration quart d'onde, mais d'une vibration en demie onde sur la totalité de la longueur de la fourchette le constituant.

Nous avons donc deux quarts d'onde en phase de chaque côté de la fourchette. La mise au contrepois du point milieu agit donc simultanément sur les deux quarts d'onde. Cela ne change rien au raisonnement.

2.2.2.1 Ventres et noeuds

En un endroit quelconque de la ligne sur laquelle s'est établi des ondes stationnaires, le courant partant de 0, croîtra pour atteindre une valeur maximale reviendra à 0 changera de sens croîtra pour atteindre une valeur maximale inversée et ainsi de suite. On remarquera que les valeurs maximales instantanées atteintes **dépendront de l'endroit de mesure**. L'endroit où se trouve la plus grande valeur instantanée atteinte se nomme «**ventre**» et l'endroit de valeur toujours nulle à n'importe quel instant, se nomme «**noeud**». De plus, courant et tension sont déphasés de 90 degrés.

Comme nous le verrons plus loin, l'emplacement de ces ventres et noeuds dépend de beaucoup de facteurs.

2.3 Modes de fonctionnement de la ligne

Il existe fondamentalement deux modes de fonctionnement des lignes:

A) Les lignes à ondes progressives ou apériodiques (donc non accordées).

B) Les lignes à ondes stationnaires ou accordées.

2.3.1 Fonctionnement en ondes progressives

Dans ce cas, abstraction faite des diverses pertes apportées, qui elles, dépendent essentiellement de la fréquence, de la longueur et des caractéristiques électriques de la ligne, **la longueur géométrique de celle-ci, pour ce mode de fonctionnement, est indifférente** et peut théoriquement se prolonger à l'infini. Il suffit d'installer des amplificateurs qui compenseront les pertes dans la ligne, afin de maintenir constante l'amplitude de l'onde progressive. On peut transformer une ligne infinie en une ligne finie en coupant celle-ci et en terminant la portion contenant le générateur par une résistance dont la valeur est égale à l'impédance caractéristique de celle-ci (voir plus loin l'impédance caractéristique). On sait bien que dans la pratique (voir l'exemple du début), on a toujours intérêt à faire la ligne la plus courte possible. On peut ainsi la couper à la longueur nécessaire, la plupart du temps celle imposée par la disposition des lieux. La présence d'ondes stationnaires est dans ce cas **indésirable** car elle occasionne des pertes, et correspond à une mauvaise adaptation de la ligne à l'élément rayonnant. Une telle ligne est dite apériodique, c'est à dire **non accordée**.

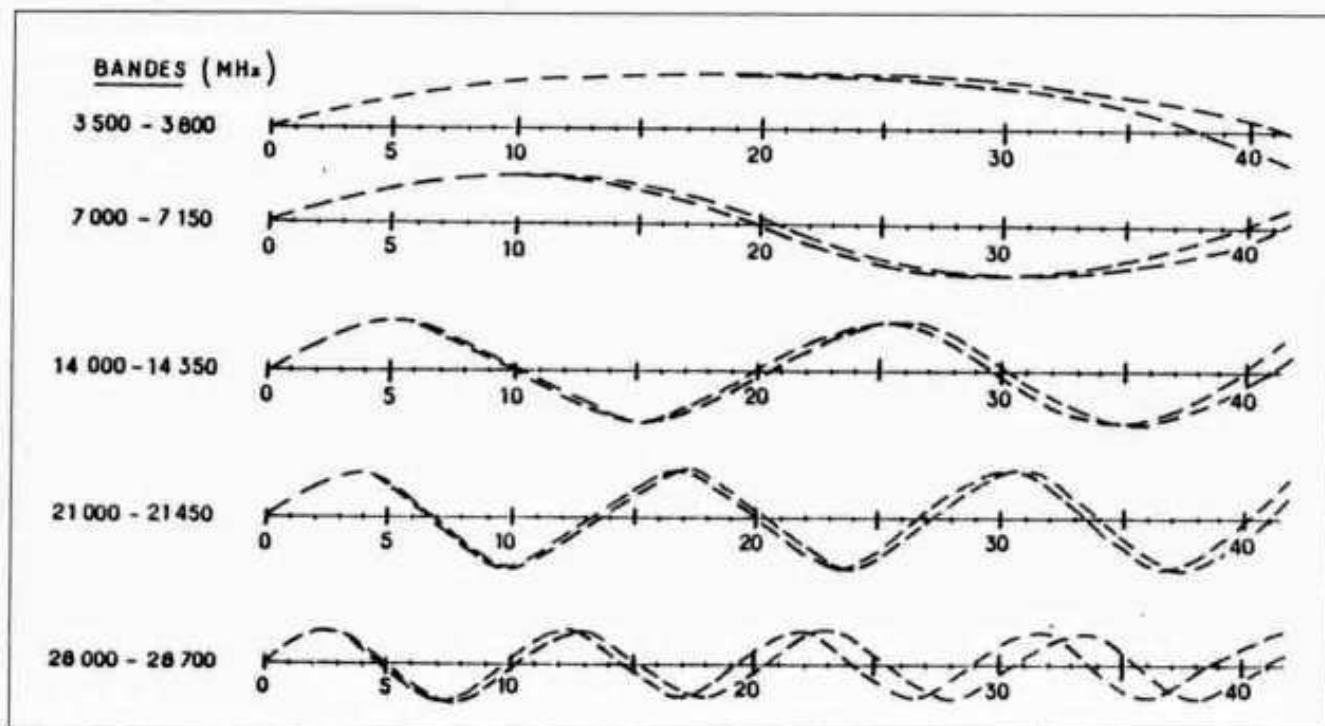


Figure 2: Répartition des ondes stationnaires sur une antenne ou une ligne de transmission, pour les bandes amateurs 3,5 à 28 MHz, compte tenu de la correction selon la formule $L = 143/F$.

2.3.2 Fonctionnement en ondes stationnaires

Dans ce cas, au contraire la longueur géométrique de la ligne **est un paramètre très important** car c'est sur cette longueur, partie intégrante de la longueur totale disponible, que s'établira le régime d'ondes stationnaires à une certaine fréquence. Il n'est donc pas possible, sans éléments de correction, de lui donner une longueur quelconque, pour ce mode de fonctionnement, puisque cette même longueur additionnée à ce qui lui fait suite doit contenir le régime d'ondes stationnaires que l'on veut établir à une certaine fréquence. Selon la disposition des lieux, il ne sera pas toujours aisé de déployer la ligne de transmission accordée dans sa totalité, et dans certains cas, il peut même être nécessaire de l'enrouler sur un grand diamètre afin de la conserver intégralement dans toute sa longueur géométrique nécessaire. Nous avons observé cette disposition chez le regretté Philippe HB9K. Il n'y a donc pas ici d'impédances à adapter, puisque, rappelons le, la ligne et la suite ne font qu'un.

La présence d'ondes stationnaires dans la ligne est ici tout à fait normale et ne doit pas être considérée comme une anomalie. Une telle ligne est dite **accordée**.

Nous empruntons à l'excellent ouvrage du regretté F3LG la représentation des différentes ondes stationnaires apparaissant sur une longueur de ligne donnée et la nature de l'impédance en extrémité de celle-ci (voir figure 2).

2.3.3 Vitesse de propagation V dans une ligne V, facteur de vitesse v

Une ligne isolée à l'air, suffisamment espacée, comme c'est généralement le cas en émission, est réalisée en maintenant les deux fils parallèles à l'aide d'isolateurs, la vitesse de propagation est ici pratiquement égale à celle de la lumière. En réalité, il faudra faire intervenir un facteur de vitesse de 0,95 pour déterminer sa longueur géométrique, afin d'accorder la ligne.

Nous avons la relation suivante:

$\lambda = V_a / F$ avec:

λ : longueur d'onde en mètre

V_a : vitesse de propagation dans l'air (300000 km/sec)

F : Fréquence en kHz

La nouvelle vitesse de propagation V sera:

$V = v \cdot V_a$

Pour un ruban plat 300 Ohms, le facteur de vitesse sera de 0,82, de 0,66 pour un câble coaxial. Si les deux fils sont trop rapprochés, la capacité entre eux augmente et diminue la vitesse de propagation de l'onde sur la ligne.

Le facteur de vitesse vaut:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \text{ avec:}$$

ϵ : la constante diélectrique de l'isolant

La nouvelle vitesse de propagation sera, en admettant une constante diélectrique de par exemple $\epsilon = 2,5$: $V = 300000 \cdot 0,63 = 189000$ kilomètres par seconde.

La longueur de ligne correspondant à une onde entière sera:

$L = 189000 / F$ F étant la fréquence exprimée en kilohertz / L étant en mètre.

Exemple: Pour $F = 3700$ kHz

$L = 189000 / 3700 = 51,08$ mètres

Au lieu de 51,08 mètres correspondant à une ligne avec un écartement d'au moins 4 cm pour laquelle l'effet décrit ci-dessus est négligeable.

Dans le chapitre «Mesures», nous déterminerons le facteur de vitesse v d'une ligne incon nue d'une façon très simple.

Remarque:

Seule l'onde stationnaire permet à l'énergie contenue de s'extraire de celle-ci, en faisant abstraction des pertes diverses par effet Joule ou autres, qui représentent également une sortie d'énergie, mais pas sous la forme désirée. Il faut pourtant ne pas oublier que, dans le cas d'une ligne symétrique bifilaire qui est le siège d'ondes stationnaires, l'énergie rayonnée par la ligne est nulle du fait de l'opposition de phase des ondes qui la parcourent sur les deux fils. Dans ce cas, à part les diverses pertes, aucune énergie ne sort de la ligne.

Le fonctionnement de la **ligne monofilaire** est différent et nous pouvons distinguer deux cas:

A) Fonctionnement en ondes progressives

La ligne ne rayonne théoriquement pas d'énergie, si l'adaptation est parfaite (ligne monofilaire d'une antenne Conrad Windom). L'impédance caractéristique d'une telle ligne est de l'ordre de 600 Ohms.

B) Fonctionnement en ondes stationnaires

La ligne dans ce cas, participe à l'établissement du régime d'ondes stationnaires et rayonnera au même titre que l'antenne elle même. Le rayonnement de la ligne monofilaire ne sera **pas annulé** par un autre conducteur placé à proximité avec une onde en opposition de phase, comme précédemment dans la remarque. Nous avons ce cas avec l'antenne Hertz alimentée en courant ou en tension, ainsi qu'avec l'antenne Fuchs ou l'antenne long fil.

Remarque: Dans toutes les explications qui vont suivre, nous ferons l'hypothèse d'une ligne sans pertes.

Continuation à suivre