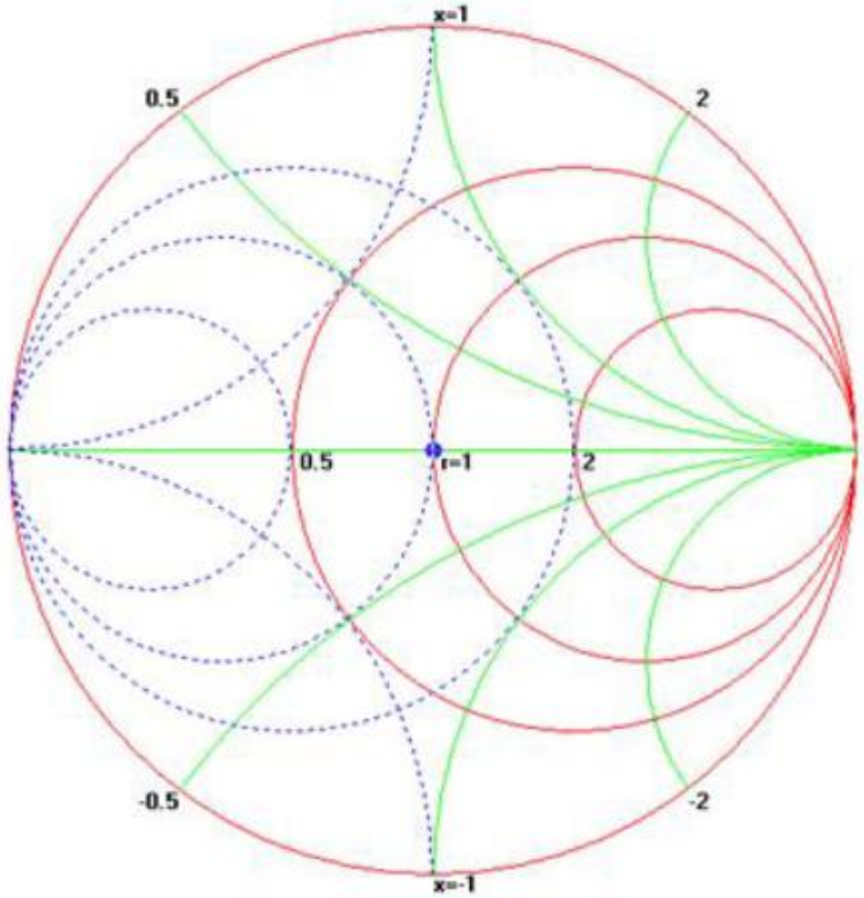
Chapitre trois : L'abaque de Smith

L'abaque de Smith est un outil sophistiqué pour résoudre les problèmes de ligne de transmission. Une des plus simples applications est la détermination de l'impédance au point d'alimentation d'une antenne, basée sur la mesure de l'impédance à l'entrée d'un tronçon de longueur quelconque de la ligne de transmission. En utilisant l'abaque de Smith, la mesure de l'impédance peut être faite avec l'antenne au sommet du pylône et il n'est pas nécessaire de couper la ligne en un nombre exact de demi-longueurs d'onde. L'abaque de Smith peut être utilisé dans beaucoup d'autres cas comme les réseaux d'adaptation d'impédance. Ces réseaux peuvent prendre les formes en L ou en Pi.



Nommé après que son inventeur, Phillip H. Smith, l'abaque de Smith, l'ait initialement décrit dans la revue "Electronics" de janvier 1939. L'abaque de Smith peut être obtenu dans beaucoup de librairies universitaires

Il est établit que l'impédance d'entrée ou l'impédance vue au travers une longueur de ligne de transmission varie avec : le TOS (SWR), la longueur de la ligne et l'impédance caractéristique de la ligne. Le TOS, lui, dépend de la charge qui termine la ligne. De complexes relations mathématiques doivent être utilisées pour calculer les différentes valeurs d'impédance, de courant et tension, et de TOS qui existent dans une ligne spécifique. Les solutions peuvent être trouvées avec un ordinateur et des logiciels adéquats, mais aussi, en utilisant l'abaque de Smith. A moins d'utiliser un ordinateur, une connaissance de base de L'abaque de Smith amènera une meilleure compréhension des problèmes posés. Ainsi on obtiendra une solution plus simple ou plus rapide. Si l'impédance terminale de la ligne est connue, il est très facile de déterminer l'impédance d'entrée de la ligne pour n'importe quelle longueur de ligne. A l'inverse, avec une longueur de ligne donnée et en connaissant (ou en mesurant) l'impédance d'entrée de la ligne, il est simple de déterminer l'impédance de charge en utilisant l'abaque de Smith (particulièrement intéressant pour déterminer l'impédance d'une antenne).

Malgré son apparence complexe, l'abaque de Smith n'est d'autre qu'un graphique spécialisé. On doit considérer qu'il dispose de coordonnées circulaires au lieu de coordonnées rectangulaires. Le système de coordonnées consiste en deux familles de cercle, famille des résistances et famille des réactances.

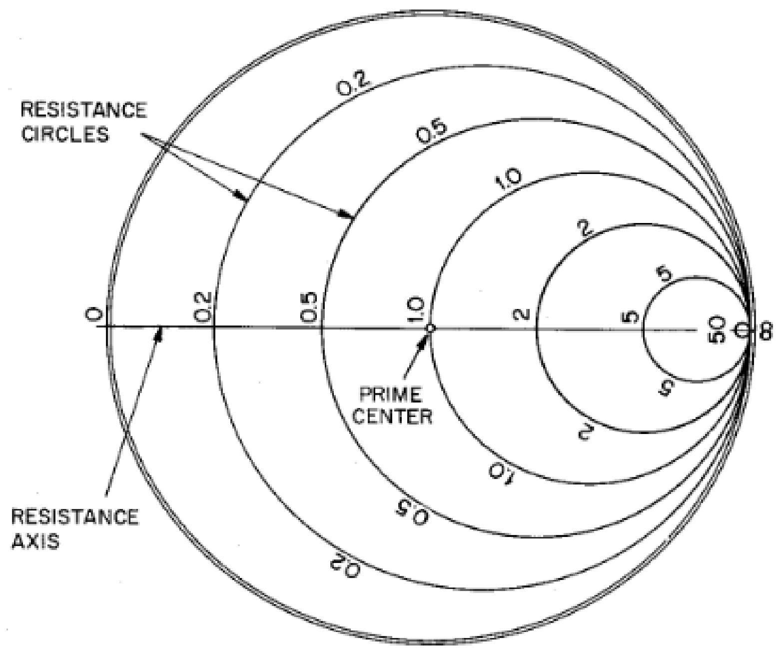


Fig. 1 Cercles résistance de l'abaque de Smith

Les cercles ***résistance*** sont centrés sur l'axe Résistance (la seule ligne droite de l'abaque), et sont tangents au cercle le plus extérieur à droite du graphe. A chaque cercle est assignée une valeur de résistance qui indique à quel endroit ce cercle traverse l'axe des résistances. Tous les points le long de cercle ont la même valeur de résistance. Les valeurs de résistance varient de zéro (à gauche de l'axe) à l'infini (à droite) et cette valeur de résistance représente le coefficient par rapport à la valeur de résistance attribuée au centre du graphe indiqué (1.0).

Ce point central est appelé centre principal. Ainsi si on attribue la valeur 100 ohms au « prime center », alors 200ohms sera le cercle 2.0 et 50 ohms le cercle 0.5. Si c'est la valeur 50 ohms qui est attribué au centre principal, le cercle 2.0 représente alors 100 ohms et le cercle 0.5 représente 25 ohms et ainsi de suite. Ce processus s'appelle la ***normalisation***. La conversion inverse est aisée. Pour obtenir la valeur de « Résistance », il faut multiplier la valeur attribué au cercle par la valeur attribuée au centre principal. Cette technique permet d'utiliser le même abaque avec n'importe quelle valeur d'impédance.

Maintenant regardons les cercles « ***réactance*** » qui apparaissent comme des lignes courbes car seulement des segments de cercle ne peuvent être tracés sur l'abaque.

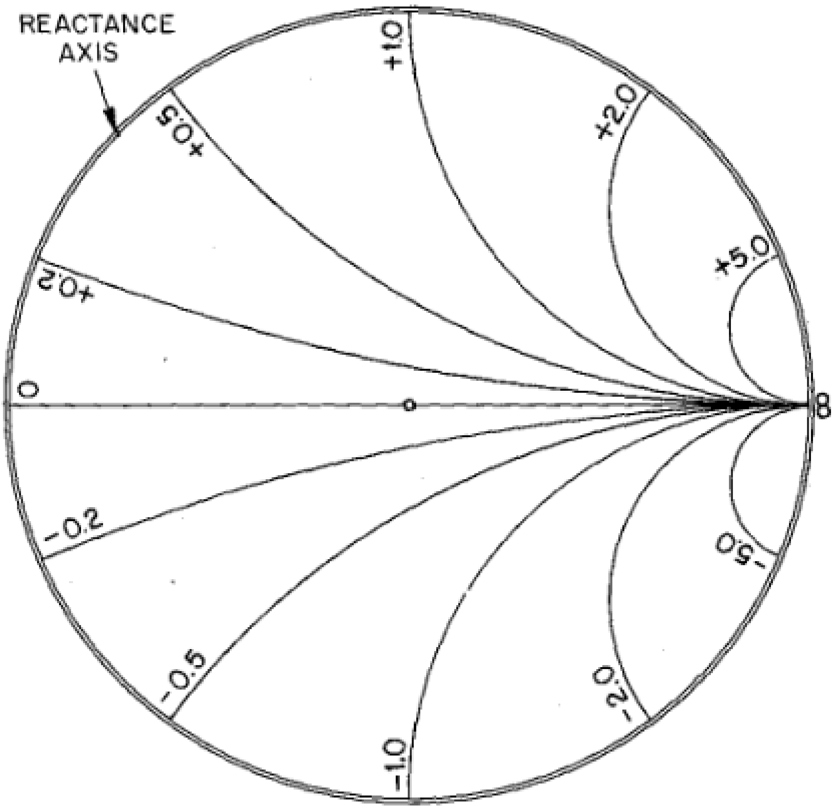


Fig. 2 Cercles réactance (arc) de l'abaque de Smith

Ces cercles sont tangents à l'axe des résistances qui lui-même est un élément de cercle des réactances (avec rayon infini). Les centres de ces cercles se déplacent sur une ligne tangente à la droite de l'abaque, vers le haut ou vers le bas. Le cercle extérieur de l'abaque est l'axe des réactances. Il est attribué à chaque cercle de réactance, la valeur de l'axe de réactances à l'endroit le la rencontre. Tous les points le long d'un segment ont la même valeur de réactance. Comme pour les résistances, les valeurs attribuées à chaque cercle de réactance sont normalisées par rapport à la valeur attribuée au centre principal. Les valeurs du haut sont positives (inductives) et les valeurs du bas sont négatives (capacitives).

Lorsque les cercles « résistance » et les cercles « réactance » sont combinés, on obtient l'abaque de Smith (fig1). Une impédance complexe R+jX peut être pointée sur l'abaque.

Pointage d'une Impédance :

Supposons que nous ayons une impédance composée par une résistance de 50Ω et une réactance de 100Ω (Z=50+j100).

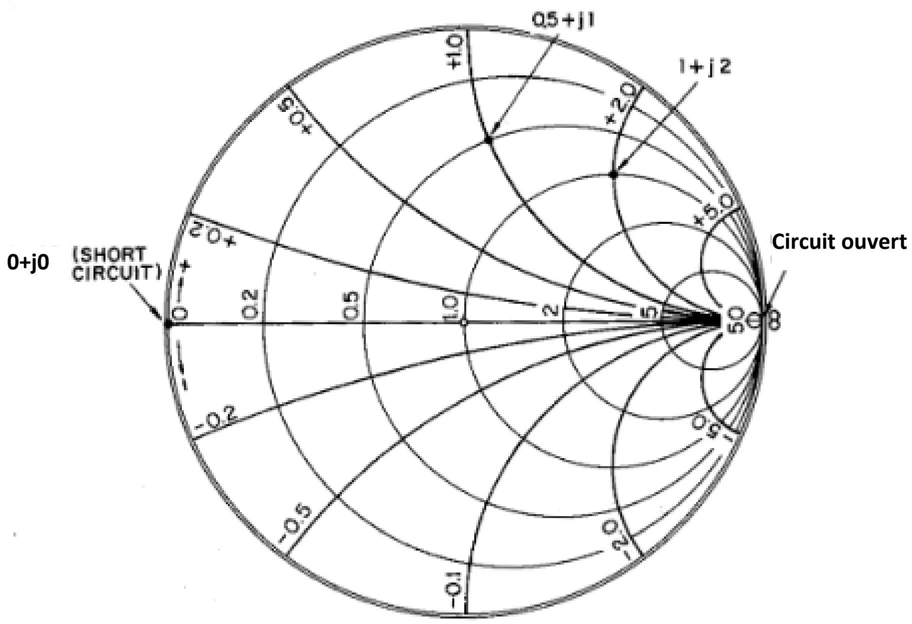


Fig. 3 Système complet de coordonnées de l'abaque de Smith. Par simplicité seuls quelques segments sont dessinés.

- Attribuons 100Ω au prime center, la normalisation sera:

  Z_{100} = 0.5 +j1.0

- Si nous attribuons 50Ω centre principal, la normalisation donne

  Z_{50} = 1 + j2

Ces deux exemples montrent que la même impédance peut être pointée à des endroits différents sur l'abaque en fonction de la valeur attribué au prime center.

Mais attention, deux points différents ne peuvent pas représenter la même impédance au même moment. Il est d'usage lorsqu'on travaille sur les lignes de transmission d'attribuer au prime center l'impédance caractéristique le la ligne en étude. Cette valeur devra toujours être enregistrée pour qu'il n'y ait pas de confusion ensuite.

Le centre principal est un point à signification particulière. Comme c'est indiqué, il est d'usage d'attribuer la valeur Z0 à ce point (50Ω pour une ligne 50Ω). Ceci signifie que le centre représente 50 +j0, une résistance pure égale à l'impédance caractéristique de la ligne. Si ceci était une charge sur la ligne, nous savons, par la théorie des lignes, que cela représente une adaptation parfaite sans puissance réfléchie, avec TOS (SWR) = 1.0/1. Donc le prime center représente aussi le cercle du TOS= 1/1 (avec rayon = 0). Les cercles TOS sont décrits plus loin.

Court-circuit et circuit ouvert :

Deux cas particulier de pointage d'impédance demandent attention. Ce sont court circuit et circuit ouvert. A vrai court circuit, c'est 0 résistance et 0 réactance : 0+0j. Cette impédance est pointée sur la gauche du diagramme. A l'opposé, un circuit ouvert a une résistance infinie et il est pointé à droite du diagramme à l'intersection de l'axe des résistances et celui des réactances. Ces deux cas spéciaux sont utilisés quelquefois dans les accords par stub et sont décris plus loin.

Cercles TOS (SWR) :

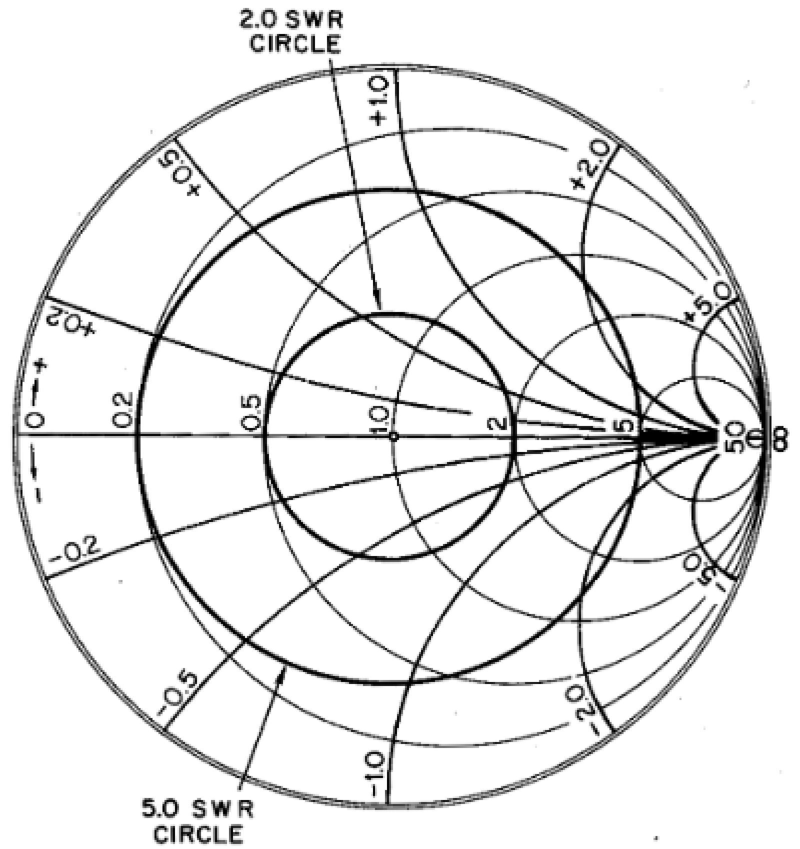


Fig 4 Les cercles TOS constants sont ajoutés sur l'abaque

Faisant partie de la troisième famille de cercle, non imprimé sur le diagramme, mais qui sont ajouté lors de la résolution des problèmes, ce sont les cercles TOS. Ils sont centrés sur le prime center et ils appariassent comme des cercles concentriques sur l'axe des réactances. Pendant les calculs, un ou plusieurs de ces cercles peuvent être ajoutés avec un compas. Chaque cercle représente une valeur de TOS et chaque point du cercle représente la même valeur de TOS. La valeur du TOS pour un cercle donné peut être déterminée directement sur l'abaque en lisant la valeur de la résistance là où le cercle croise l'axe des résistances à droite du prime center. En lisant sur la gauche c'est l'inverse du TOS que l'on lit.

Considérons qu'un défaut de charge entraine un TOS = 3.0, Si temporairement nous ignorons les pertes en ligne.

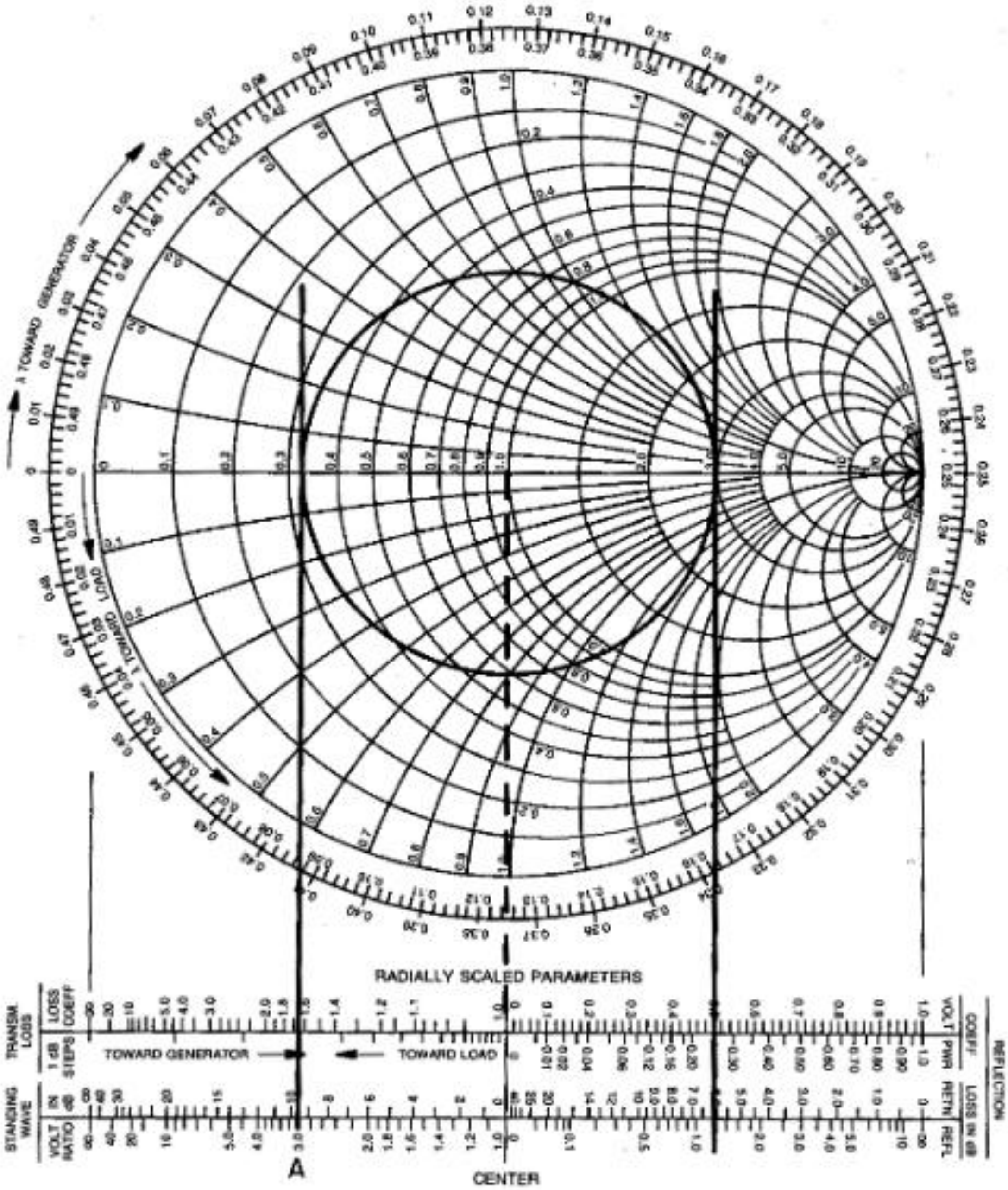


Fig.5 Exemple décrit dans le document.

Il est admis que le TOS reste constant sur l'entière longueur de la ligne. Ceci est représenté par le cercle de rayon 3.0 sur l'axe des résistances. La représentation sur l'abaque indique que toutes les impédances rencontrées le longs de la ligne seront sur le cercle de rayon 3.0. Les impédances seront lues sur l'abaque en suivant le cercle TOS en fonction de la longueur de ligne considérée. Ceci nous amène à l'utilisation de l'échelle des longueurs d'onde. Cette échelle est calibrée en fraction de longueur d'onde le long de la ligne. Deux échelles partent de zéro à gauche de l'abaque. Une échelle, dans le sens antihoraire, démarre du générateur, ou de l'entrée de la ligne et progresse vers la charge. L'autre échelle part de la charge et progresse vers le générateur dans le sens horaire. Le tour complet de l'abaque représente une demi-longueur d'onde. Un tour de l'abaque correspond à une progression d'une demi-longueur d'onde sur la ligne du fait que les impédances sont les mêmes toutes les demi-longueurs d'onde sur une ligne. L'abaque peut ainsi être utilisé pour n'importe quelle longueur de ligne en soustrayant un nombre entier de demi-longueurs d'onde.

Comme le montre la fig 5, un moyen de transférer le rayon du cercle TOS est le tracé de ligne tangente au cercle TOS sur l'axe externe. Un autre moyen est de le reporter avec un compas.

Il faut noter, que comme réalisé sur la fig 5, La valeur initiale de TOS= 3.0 lue au départ sur l'axe des résistances, se lit en utilisant la projection sur l'axe TOS, de l'extérieur du cercle TOS.

Résolution de problèmes avec l'abaque de Smith :

Supposons que nous ayons une ligne 50 Ω d'impédance caractéristique d'une longueur électrique de 0.3λ. Cette ligne est terminée par une impédance ayant une composante résistive de 25Ω et d'une réactance inductive de 25Ω (25+j25). Quelle l'impédance à l'entrée de la ligne ?

L'impédance caractéristique de la ligne étant 50Ω, nous affectons cette valeur au prime center (normalisation /50Ω). Puisque la ligne n'est pas terminée par son impédance caractéristique, nous savons que la ligne est le siège d'ondes stationnaires et donc que l'impédance d'entrée de la ligne ne sera plus 50Ω.

Procédons comme suit :

- Normalisons les éléments en les divisant par 50 ; soit Z_c = 0.5 +j0.5
- Pointons Zc sur l'abaque
- Traçons un cercle de TOS constant passant par ce point

- Transférons le rayon de cercle TOS sur l'échelle externe avec un compas. Ce qui donne un rayon de 2.62. Ce qui indique que notre ligne fonctionne avec un TOS de 2.62/1. Ce point est converti en décibel sur l'échelle attenante (soit 8.4 dB). Ceci indique que le rapport entre la tension maximum et la tension minimum, le long de la ligne est de 8,4 dB, (20 log de TOS).

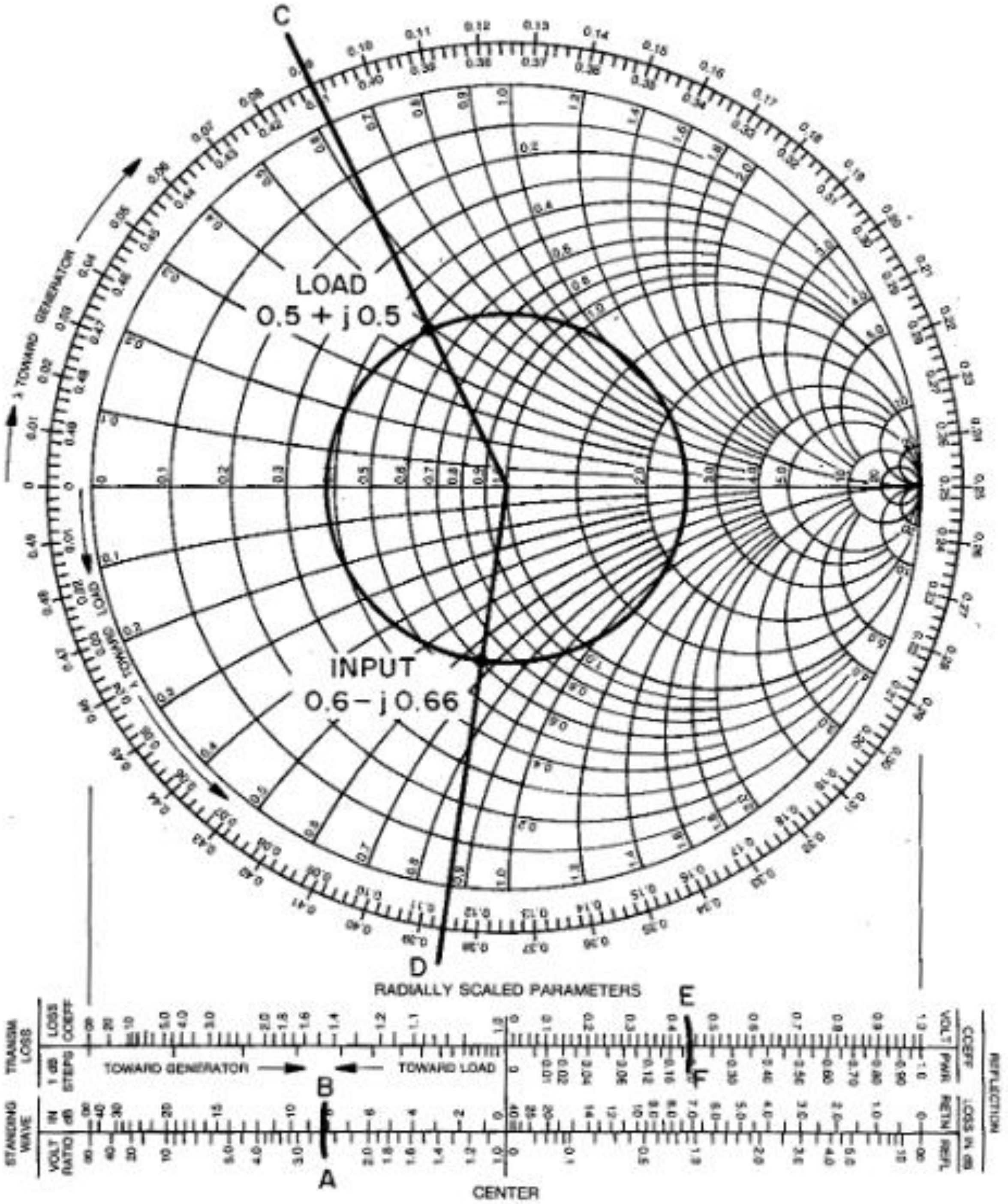


Fig. 6 Exemple décrit dans le document

Ensuite avec une règle, traçons une ligne passant par le prime center et par le point 0.5+j0.5 (impédance pointée). Pour croiser l'échelle des longueurs d'onde. Puisque nous sommes partis de la charge nous utilisons le sens vers le générateur. A ce point C, lisons la valeur sur l'échelle des λ (soit 0.088λ).

- Pour obtenir l'impédance d'entrée de la ligne, nous cherchons simplement à quel endroit sur le cercle TOS nous serons 0.3λ plus loin. Il faut additionner 0.3λ à la valeur initiale soit 0.088+0.3 =0.388λ. Le point trouvé est D. En traçant une nouvelle droite entre ce point et le prime center. A l'intersection avec le cercle TOS on lit la valeur 0.6-j0.66 qui représente l'impédance normalisée à l'entrée de la ligne.
- Pour revenir à l'impédance réelle (valeur réelle non normalisée) nous multiplions par 50 soit 30-j33 c'est-à-dire équivalent à une résistance de 30 ohms et une réactance capacitive de 33 ohms. C'est cette impédance complexe que le transceiver devra accorder. C'est aussi cette impédance qui sera mesurée à l'entrée de la ligne.

Il est possible de trouvé sur l'abaque d'autres éléments caractéristiques des lignes de transmission.

Par exemple : le coefficient de réflexion en tension à la fois en amplitude et en phase pour une charge donnée. L'angle de phase est lu en dessous de la ligne radiale passant par l'impédance pointée, à l'intersection avec l'échelle des angles de réflexion. Cela ne figure pas sur la figure ci-dessus, mais une échelle existe sur les abaques de Smith. Dans notre exemple on peut lire 116.6 degrés. Ceci indique avec quel angle la tension incidente, à la charge, devient tension réfléchie. Il faudra noter que les angles dans la moitié inférieure ou réactance capacitive sont des angles négatifs. Un angle négatif indique que la tension réfléchie est en retard sur la tension incidente.

L'amplitude du coefficient de réflexion en tension est lue sur l'échelle du coefficient de tension, on peut voir approximativement 0.45 en E pour cet exemple. Ce qui veut dire que 45% de la tension incidente est réfléchie.

Juste à coté de cette échelle, sur l'axe calibration en puissance (F) le coefficient de réflexion en puissance est de 0.2 c'est-à-dire 20% de la puissance incidente est réfléchie. La puissance réfléchie est proportionnelle au carré de la tension réfléchie.

Coordonnées Admittance :

Il est souvent intéressant de convertir une donnée impédance en valeur d'admittance (conductance/résistance et susceptance/réactance). Le travail avec admittance simplifie les calculs lorsque des impédances sont montées en parallèle comme les accords par stub. Les valeurs de conductances sont additionnées comme les valeurs de susceptance dans une combinaison en parallèle. Cette admittance peut ensuite être convertie en donnée impédance.

Sur l'abaque de Smith, la conversion est très simple. L'admittance équivalente d'une impédance pointée sur l'abaque est diamétralement opposée à l'impédance. En d'autres mots, il suffit de prolonger la ligne passant par l'impédance et le prime center. Le point admittance sera symétrique par rapport au centre, donc sur le même cercle TOS. Ainsi on peut lire sur l'abaque 0.76 +j 0.84. Dans la conversion, il faut se souvenir qu'une réactance capacitive est négative mais la susceptance capacitive est positive. Ce qui correspond bien à l'identification sur l'abaque. Pour finir, la valeur de l'admittance en Siemens est divisée par la valeur 50 de normalisation. Pour l'exemple ici :

Y = 0.76/50 +j0.84/50 soit 0.0152 + j0.0168 siemens.

Naturellement la transformation admittance vers impédance est aussi simple.

En normalisant à 50 Ω l'impédance mesurée devient 1,4 + j 0,5. Et on pointe cette valeur sur l'abaque. Ensuite il faut tracer le cercle de TOS constant. En transférant le rayon de ce cercle TOS sur l'échelle TOS externe, on trouve TOS= 1,7. Nous traçons ensuite un rayon du prime center vers le cercle externe et passant par le point « impédance » (point B). Nous lisons la valeur de référence de 0.195 sur l'échelle « ***vers la charge*** ». On se souvient que l'on part du générateur vers l'antenne (la charge). Pour localiser l'impédance d'antenne sur le cercle TOS, on ajoute la valeur 2.35 λ à 0,195 soit 2,545. Mais pour localiser cette valeur qui dépasse les 0,5 λ, sur le cercle TOS, il faut retrancher un nombre entier de demi longueur d'onde pour obtenir un résultat positif : soit 2,545 – 2,5 = 0,045. Toujours sur le cercle interne « ***vers la charge*** » nous trouvons le point C.

Le tracé du rayon passant par ce point et joignant le prime center passe sur le cercle TOS à 0.62 + j0, 19. En multipliant par les 50 Ω de normalisation nous trouvons une impédance d'antenne de 31 – j 9,5 Ω soit une résistance de 31Ω et une réactance capacitive de 9,5 Ω.

Le problème peut aussi être entré sur l'abaque d'une autre manière. Supposons que nous ayons une antenne "groundplane" alimentée à la base et en résonance mais plus courte que le 1/4λ. Toutefois on suppose qu'on dispose d'un détecteur de TOS dans la ligne qui indique 1,7/1. La longueur de la ligne est de 0,95 λ. Nous voulons à la fois connaître l'impédance de l'antenne et celle à l'entrée de la ligne.

Dans les informations disponibles nous n'avons pas d'impédance à entrer sur l'abaque. Nous pouvons malgré tout tracer le cercle TOS 1,7/1.

Nous savons aussi, par la définition de la résonance, que l'antenne présentera une charge purement résistive à la ligne, sans composante réactive. Donc l'impédance d'antenne tombe sur l'axe résistance. Nous avons ainsi deux solutions : 0,59 + j0 et 1,7 + j0. En multipliant par 50 Ω de normalisation, on trouve deux réponses : 29,5 Ω et 85 Ω. En considérant les fondamentaux sur l'antenne $\frac{1}{4}$ λ, on sait que l'impédance d'un $\frac{1}{4}$ λ est sensiblement de 36 Ω. Nous pouvons donc écarter la solution 85 Ω au profit de la valeur 29,5 Ω.

Pour trouver l'impédance à l'entrée de la ligne, nous soustrayons 0,5 λ à 0,95 λ (longueur de la ligne) soit 0,45 λ à suivre sur l'échelle « ***vers le générateur*** ». Le point de départ est bien sûr 0. L'impédance de la ligne est égale à 0.62 – j0, 20 soit 31,5 Ω – j 10Ω.

Détermination de la longueur de la ligne :

Dans les exemples précédents les longueurs de ligne sont données en longueurs d'onde (λ). La longueur électrique d'une ligne dépend de sa longueur physique, de la fréquence du signal et de la vélocité de propagation de la ligne. Une méthode directe pour évaluer la longueur électrique de la ligne est de mesurer la longueur physique et de calculer sa longueur électrique à partir de la formule suivante : $N = \frac{Lf}{300vF}$ avec :

- N nombre de longueur d'onde de la ligne
- L longueur physique de la ligne en mètre
- f fréquence en Mégahertz
- vF facteur de vélocité de propagation de la ligne

Considérations sur les pertes en ligne et l'abaque de Smith:

Les exemples présentés plus haut ignorent le problème des pertes en ligne. Assez souvent, il n'est pas nécessaire de prendre en compte ce problème dans les calculs. Les quelques différences obtenues sont souvent imperceptibles sur l'abaque. Toutefois, lorsque les pertes en ligne deviennent importantes, telle que lignes à fortes pertes, très longues lignes ou en UHF et VHF, l'influence des pertes n'est plus négligeable en utilisant l'abaque. Ceci implique seulement une étape supplémentaire dans les procédures vues auparavant.

Si dans une ligne sans perte le TOS reste constant tout le long de la ligne, ce n'est plus le cas dans une ligne avec pertes. Le TOS décroit au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la charge. Pour présenter réellement ce phénomène sur l'abaque de Smith, au lieu de dessiner le cercle "TOS constant", nous devons dessiner une spirale "rentrante" dans le sens horaire (charge vers générateur) comme c'est montré sur la figure 7.

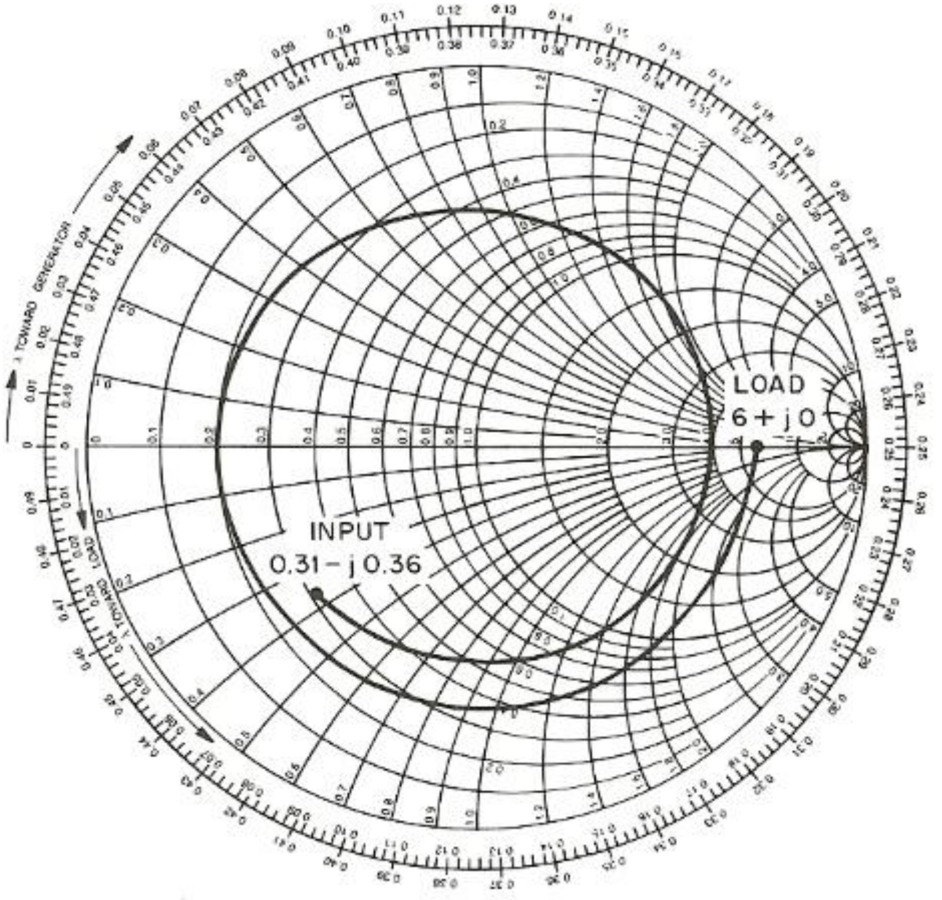


Fig 7: Cette spirale est le "cercle actuel" de TOS, lorsque les pertes en ligne sont prises en compte. Ce cas précis est basé sur une ligne de 16 pieds (4,87 m) de RG174, alimentant une antenne résonnante sur 300Ω/28MHz (coax 50Ω, facteur de vélocité 0,66; atténuation = 6,2db/100pieds). Le TOS à la charge est de 6:/1 tandis qu'à l'entrée de la ligne, il est de 3,6/1. Lorsqu'on veut prendre en compte l'atténuation, nous traçons deux cercles de TOS constant, à la place de la spirale. Un cercle est tracé pour le TOS à la Charge, un autre est tracé pour le TOS à l'entrée de la ligne.

La manière dont la spirale se rapproche du centre principal depuis la charge est liée à l'atténuation de ligne. Plutôt que dessiner une spirale, il est plus simple d'utiliser l'échelle externe Pertes de transmission échelle 1dB-steps. Cette échelle peut être vue sur la figure ci-dessus. Cette échelle est une échelle relative, elle n'est pas graduée.

Si nous partons à l'extrémité gauche de cette échelle externe, et que nous allons dans le sens "vers le générateur" (toward generator), au premier point A le TOS est environ 9/1, au point B, le TOS est de 4,5/1 et en C le TOS est de 3,0/1 et ainsi de suite jusqu'à la dernière graduation (la 15ème) où le TOS est environ 1,05/1. Ceci signifie qu'une ligne terminée par un court-circuit ou un circuit ouvert (TOS infini) et ayant une atténuation de 15db pourrait afficher un TOS de seulement 1,05 à l'entrée. Il faut noter que les graduations "dB step" (près de l'extrémité droite de l'abaque) sont très rapprochées, et qu'une atténuation en ligne de 1 ou 2 dB a très peu d'effet sur le TOS. Mais près de l'extrémité gauche, correspondant à des TOS élevés, 1 ou 2dB de pertes a un effet considérable sur le TOS.

Utilisation d'un second cercle TOS

Dans la résolution des problèmes qui tiennent compte des pertes en lignes, il est seulement nécessaire de modifier le rayon du cercle de TOS d'une valeur indiquée sur l'échelle "Transmission-loss 1-dB step". Ceci est réalisé en dessinant un second cercle TOS, soit plus petit soit plus grand que le premier suivant que vous travaillez vers la charge (toward load) ou vers le générateur (toward generator).

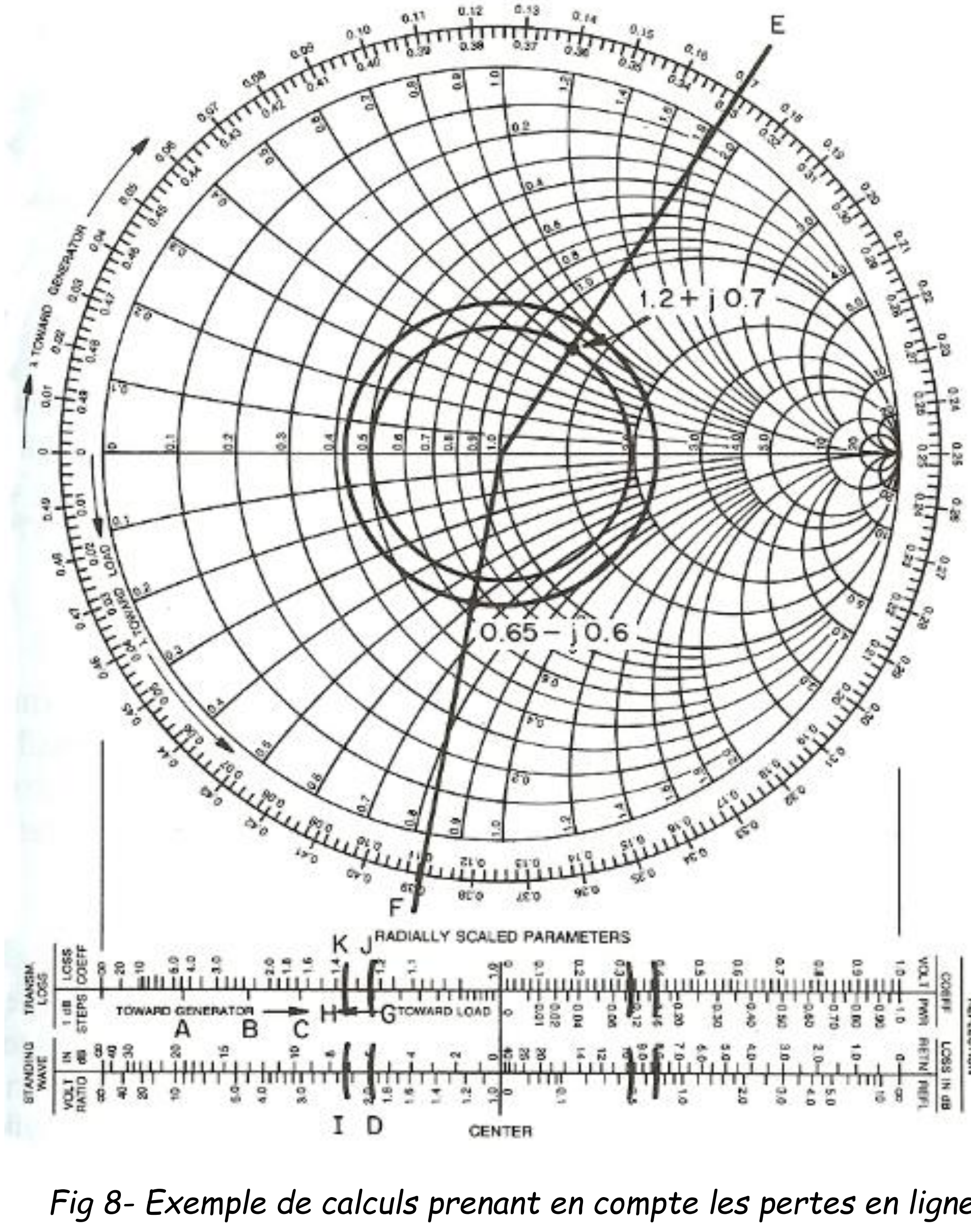


Fig 8- Exemple de calculs prenant en compte les pertes en lignes

Par exemple, supposons que nous avons une ligne 50 ohms qui a 0,282 λ de longueur, avec 1 dB d'atténuation inhérente. L'impédance d'entrée de la ligne est mesurée à 60 + j35 ohms. Nous désirons connaître le TOS à l'entrée et à la charge ainsi que l'impédance de charge. Comme ci-dessus, nous normalisons l'impédance 60+j35 Ω, nous portons le point sur l'abaque et nous dessinons un cercle TOS constant ainsi qu'un rayon passant par le point "impédance". Dans ce cas l'impédance normalisée est 1,2 +j0,7. Sur la Fig. 9 le TOS à l'entrée de la ligne est lu à 1,9 (en D), et le rayon traverse l'échelle "Toward load" à 0,328 (en E). A la valeur 0,328 nous ajoutons la longueur de ligne, 0,282 et nous arrivons à la valeur de 0,610. Pour pointer ce point sur l'échelle "Toward load", nous retirons d'abord 0,500 et nous pointons 0.110 (en F); puis nous dessinons un rayon de ce point vers le centre principal de l'abaque.

Pour prendre en compte, les pertes en lignes, il faut reporter le rayon du cercle TOS vers l'échelle externe 1-dB Steps. Ce rayon traverse l'échelle externe en G, le cinquième repère décibel depuis la gauche. La perte en ligne étant donnée à 1 dB, nous traçons un nouveau rayon (en H), un repère plus à gauche (toward load) sur la même échelle.5 ce sera le quatrième repère à partir de la gauche de l'échelle). Maintenant nous reportons ce nouveau rayon sur l'abaque principal et nous traçons un nouveau cercle TOS à partir de ce rayon. Ce nouveau cercle TOS représente le TOS à la charge, et il a comme valeur 2,3 sur l'échelle externe Voltage Ratio. A l'intersection de ce nouveau cercle et de la ligne radiale de la charge, nous lisons 0,65 +j0,6. Ceci est l'impédance normalisée. En multipliant par 50, nous obtenons l'impédance de la charge 32,5 +j 30 ohms. Le TOS, dans cet exemple, croit de 1,9 à l'entrée de la ligne vers 2,3 (en I) à la charge, en ayant pris en compte 1dB de perte en ligne.

Dans l'exemple ci-dessus, les valeurs sont choisies pour tomber sur, ou très près, des graduations sur l'échelle 1-dB. Maintenant c'est un problème simple d'interpoler entre ces graduations lorsqu'on fait une correction de rayon. Quand c'est nécessaire, la distance relative entre ces graduations pour chaque pas décibel pourrait être conservée en comptant le nombre de graduations.

Près de l'échelle 1-dB se trouve l'échelle Loss coefficient (coefficient de pertes). Cette échelle donne un coefficient par lequel les pertes en ligne doivent être multipliées pour tenir compte des ondes stationnaires lorsqu'elles sont présentent. Ces pertes supplémentaires n'affectent pas les calculs de TOS ou d'impédance; c'est simplement les pertes additionnelles dues au diélectrique et au cuivre du fait que la ligne transporte un courant moyen plus important et doit supporter une tension plus grande en présence d'ondes stationnaires. Dans l'exemple donné, Fig. 8, le coefficient de perte à l'entrée est de 1,21 (en J) et de 1,39 (en K) à la charge. Avec une bonne approximation, le coefficient de perte peut être moyenné sur la longueur de la ligne prise en compte; dans ce cas la moyenne est 1,3. Ceci veut dire que les pertes totales en ligne sont 1,3 fois la perte de la ligne (1dB) soit 1,3dB.

Résumé de la procédure sur l'abaque de Smith

Pour résumer brièvement, des calculs faits sur l'abaque de Smith, il est possible de lister quatre étapes de bases, et toutefois pas nécessairement dans l'ordre listé.

1. Normaliser et pointer l'impédance d'entrée ou de charge, puis construire un cercle de TOS constant.
2. Appliquer la longueur de la ligne à l'échelle des longueurs d'onde
3. Déterminer l'atténuation ou les pertes, si besoin, au moyen d'un second cercle TOS.
4. Lire l'impédance de charge ou d'entrée, puis convertir l'impédance en ohms.

L'abaque de Smith peut être utilisé pour divers types de problème autres que ceux montrés dans les exemples. La transformation d'impédance par une longueur de ligne (pour transformer une forte impédance avec éventuellement une forte valeur réactive en une impédance purement résistive) n'est pas citée. L'abaque peut être aussi utilisé pour déterminer des longueurs pour stub d'accord ouvert ou en court-circuit, décris plus loin dans ce chapitre. En fait, dans toutes les applications où la ligne n'est pas parfaitement accordée, l'abaque est une solution.

Atténuation et Impédance caractéristique, Z_0, à partir des mesures d'impédance:

Si un pont d'impédance est nécessaire pour faire des mesures précises en présence de fortes valeurs de TOS, l'atténuation, l'impédance caractéristique et le facteur de vélocité de n'importe quelle longueur de ligne coaxiale peuvent être déterminés.

Les ponts d'impédance et les ponts de bruit, fabrication maison, offrirons rarement le degré de précision attendu lors de leur utilisation, mais quelquefois des ponts de laboratoire peuvent être trouvée dans des surplus industriels pour un prix raisonnable. Il peut, aussi, être possible pour un amateur d'emprunter pour un week-end ou deux un pont de laboratoire. Faire les mesures n'est pas très difficile, mais les procédures ne sont pas forcément connues par la plupart des radioamateurs. Pour chaque fréquence en test, deux mesures sont nécessaires pour déterminer l'impédance de la ligne. Juste une seule mesure n'est nécessaire pour déterminer l'atténuation de la ligne et le facteur de vélocité. Exemple: nous avons une longueur de 100 pieds (≈30 mètres) d'un câble inconnu avec diélectrique "mousse" et nous désirons connaître ses caractéristiques. Nous faisons nos mesures à 7,15 MHz.

La procédure est la suivante:

1) Laisser la ligne circuit ouvert. Le meilleur circuit ouvert est celui qui minimise la capacité entre l'âme et la tresse. Si le câble dispose d'une pries PL-259, dévissez la bague externe et glissez sur le câble de quelques pouces (plusieurs centimètres). Si le câble est dénudé, repliez la tresse le long du câble, loin de l'âme du câble coaxial.

2) Mesurez et enregistrez l'impédance à l'extrémité "entrée" de la ligne. Si le pont mesure les admittances, convertissez les valeurs mesurées en résistance et réactance. Enregistrez ces valeurs comme R_{oc} +j X_{oc} .Dans notre exemple, nous trouvons 85 +j179 Ω. (Si le terme réactance est capacitif, enregistrez en négatif).

3) Maintenant fermons la ligne par un court-circuit. Si un connecteur existe au bout de la ligne, il est possible d'utiliser un court morceau de conducteur soudé entre l'âme et l'extérieur. Si le câble n'a pas de connecteur, il faut dénuder le câble sur quelques centimètres, puis torsader l'âme et la tresse. Un petit clip ou une pince crocodile peut être serré à l'extrémité.

4) A nouveau, mesurez l'impédance à l'extrémité "entrée" de la ligne et enregistrez comme R_{sc} + j X . Ici nous trouvons maintenant 4,8 - j11,2 Ω. Les mesures sont terminées, maintenant prenons la calculatrice.

Comme radioamateurs, nous pensons que l'impédance caractéristique de la ligne est purement résistive, mais elle peut (elle doit) avoir une petite composante capacitive. Donc l'impédance caractéristique de la ligne est Z_o = R_o +jX_o . L'équation de base pour calculer l'impédance caractéristique est:

$Z_o = \sqrt{(Z_{oc}.Z_{sc})}$ (Equation 2)

ou

$Z_{oc} = R_{oc} + jX_{oc}$

$Z_{sc} = R_{sc} + jX_{sc}$

de l'équation 2 il est possible d'obtenir l'équation de travail:

$Zo = \sqrt{((R_{oc}R_{sc} - X_{oc}X_{sc}) + j(R_{oc}X_{sc} + R_{sc}X_{oc}))}$ (Équation 3)

L'expression sous le radical est de la forme R +j X. En reportant les valeurs de notre exemple dans l'équation 3 , le terme R devient 85x4,8 - 179x(-11,2) = 2412,8, et le terme en X devient 85x(-11,2) + 4,8x 179 = -92,8. Jusque là nous avions déterminé que $Zo = \sqrt{(2412,8 - j92,8)}$ La quantité sous le radical est dans une forme rectangulaire. Extraire la racine carrée d'une expression complexe est simple si elle est dans une forme polaire, amplitude d'un vecteur et son angle. L'amplitude du vecteur est simplement la racine carrée de la somme des carrés qui dans ce cas est: $\sqrt{(2412,8^2 + 92,8^2)} = \sqrt{2414,58}$.

La tangente de l'angle du vecteur que nous cherchons est la valeur de la réactance divisée par la résistance. Pour notre exemple: arctan -92,8/2412,8 = arctan -0,03846. L'angle trouvé est donc -2,20°. En conclusion nous avons trouvé que $Zo = \sqrt{(2414,58\underline{/-2,20°})}$. Extraire la racine carrée est maintenant simplement la racine carrée de l'amplitude du vecteur et la racine carrée de l'angle c'est la moitié de l'angle. (L'angle est mathématiquement traité comme un exposant). Notre résultat dans notre exemple est $Zo = 49,1\underline{/-1,1°}$. Le petit angle négatif peut être ignoré et maintenant nous savons que nous avons un câble d'impédance caractéristique nominale de 50Ω. (Des variations de 6 à 8% par rapport à la valeur nominale sont courantes. Si l'angle négatif est grand ou si l'angle est positif refaites vos calculs voire refaites vos mesures. Vous pouvez avoir une idée de la valeur de vos mesures en normalisant les mesures et en les pointant sur l'abaque de Smith comme montré sur la fig 10, pour cet exemple. Idéalement les deux points doivent être diamétralement opposés, mais dans la pratique, ils ne sont pas tout à fait à 180° et pas tout à fait à équidistance du centre principal. Des mesures avec grand soin devraient mener à l'idéal. Des variations significatives par rapport à l'idéal indiquent des mesures négligées, voire un pont de mesure hors d'état de bon fonctionnement.

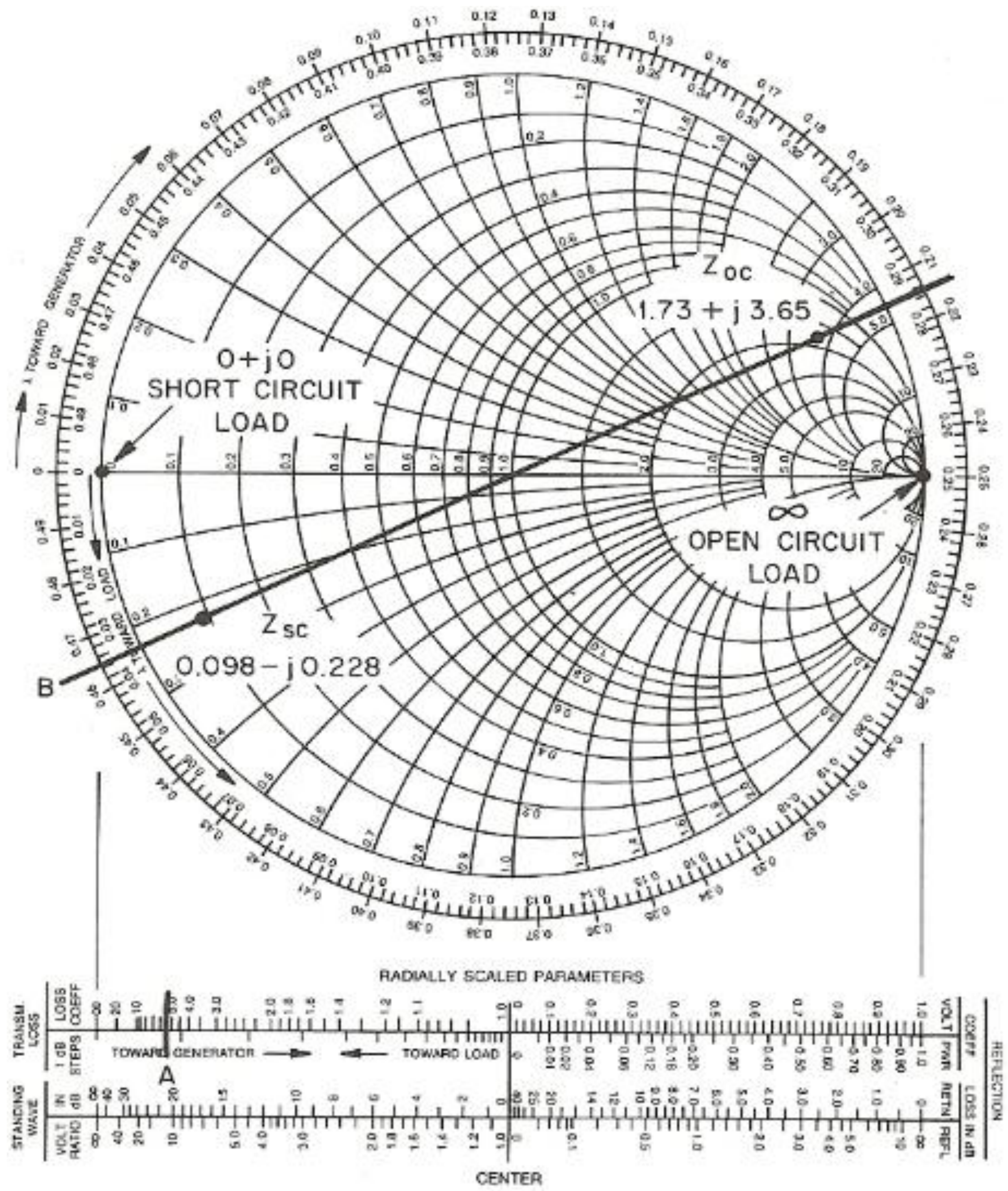


Fig. 9 Détermination des pertes et du facteur de vélocité avec l'abaque de Smith, à partir des mesures la ligne terminée soit par un circuit ouvert, soit par un court circuit.

Détermination de l'atténuation de la ligne:

La mesure en court-circuit peut être utilisée pour déterminer l'atténuation de la ligne. Cette manière est plus efficace, car un bon court-circuit est facile à réaliser, tandis un bon circuit ouvert l'est beaucoup moins. (Il est impossible de s'affranchir de la capacité entre les conducteurs et cette capacité est un chemin pour les courants à la fréquence HF de mesure). Utilisons l'abaque de Smith et- son échelle externe "1-dB steps" pour trouver l'atténuation. Premièrement, normalisons l'impédance en court-circuit pour calculer Zo et pointons ce point sur l'abaque. Voir Fig 10. Pour notre exemple l'impédance normalisée est 4,8/49,1 - j 11,2/49,1 soit 0,098

-j 0,228. Après avoir pointé ce point, transférons ce rayon sur l'échelle "1-dB steps". C'est le point A sur la fig 10.

Souvenez vous de la discussion précédente que le point pour pointer un court-circuit est 0+j0 à l'extrémité gauche de l'axe des résistances. Sur l'échelle "1-dB steps" c'est aussi à l'extrémité gauche. L'atténuation totale de la ligne est représenté par le nombre de graduation de l'extrémité gauche de l'échelle et le point juste précédemment pointé. Pour cet exemple c'est 0,8 dB. Quelques estimations sont nécessaires pour l'interpolation entre les graduations sur cette échelle.

Détermination du facteur de vélocité:

Le facteur de vélocité est déterminé en utilisant l'échelle loguer d'onde "toward generator" (vers le générateur) de l'abaque. Avec une règle, dessinez une ligne droite entre le centre principal et le point représentant la lecture de l'impédance en court-circuit, et ce jusqu'à l'intersection avec l'échelle des longueurs d'ondes. Sur la fig 10 , ce point est marqué B. Il faut considérer que lors de la mesure le court-circuit est la charge de la ligne. Imaginons une spirale progressant dans le sens horaire de puis 0+j0 vers notre point repéré. L'échelle longueur d'onde, en B, indiques que la longueur de la ligne est 0,464 λ. En réarrangeant l'équation 1 donnée plus haut, nous arrivons à l'équation permettant de calculer le facteur de vélocité. vF = L f/300 N où

vF = facteur de vélocité

L = longueur de la ligne en mètre

f = fréquence en MHz

N = nombre de longueurs d'onde électrique de la ligne

En insérant les valeurs de notre exemple dans l'équation 4, le résultat donne: VF = 100 x 7,15/(984 x 0,464) = 1,566 ou encore 156,6%. Or naturellement, c'est un nombre impossible; le facteur de vélocité ne peut être supérieur à 100%. Mais rappelons-nous que l'abaque de Smith peut être utilisé pour des longueurs supérieures à 1/2 λ. Dans ces conditions cette valeur de 0,464 λ peut être aussi 0,964 λ, 1,464 λ, 1,964 λ et ainsi de suite. Si nous utilisons la valeur 0,964 dans l'équation 4 le facteur de vélocité calculé devient 0,753 ou 75,3%. En essayant des valeurs croissantes de longueur d'onde, on trouve un facteur de vélocité de 49,6% puis 37,0%. Du fait que le diélectrique du câble en essais soit constitué de mousse polyuréthane, la valeur 75,3% est la valeur la plus probable. Ceci correspond a une longueur électrique de 0,964 λ. Donc, nous avons déterminé, à partir des mesures puis des calculs que notre câble coaxial inconnu a une impédance de 50 Ω, une atténuation de 0,8 dB pour 100 pieds (30 m) à 7,17 MHz ainsi qu'un facteur de vélocité de 75,3%.

Il est très difficile d'utiliser cette procédure pour de courte longueur de câble. La raison est que le TOS à l'entrée de la ligne est beaucoup trop important pour permettre des mesures avec précision avec la plupart de ponts de mesures. Dans l'exemple ci-dessus le TOS à l'entrée de la ligne est d'environ 12/1.

La procédure décrite ci-dessus, peut aussi être utilisée pour déterminer les caractéristiques d'une ligne équilibrée. Toutefois, la plupart des ponts de mesure sont des instruments non équilibrés et la procédure pour faire des mesures précises sur une ligne équilibrée est assez compliquée avec un pont non équilibré.

Lignes comme éléments de circuit

L'utilisation de tronçons de ligne, utilisés comme composants est présenté dans le chapitre 24. Par exemple, il est possible de remplacer self ou condensateur d'un circuit classique par un tronçon de ligne de transmission. Alors que dans les circuits classiques, ce besoin est rare, dans les systèmes d'antenne c'est très souvent utilisé pour accorder ou faire résonner des éléments à la place de composants discrets. Probablement, l'utilisation la plus courante est le résonateur dit "épingle à cheveux" où un court tronçon de ligne en fil rigide nu, remplace une self discrète.

L'équivalent de la self discrète ou du condensateur peut être déterminé à l'aide de l'abaque de Smith. Les pertes en ligne peuvent être prises en compte, si nécessaire, comme expliqué plus loin. (Voir fig 11). Rappelez vous que la moitié supérieure de l'abaque est utilisé pour les impédances contenant une réactance inductives, alors que la moitié du bas est utilisé pour les impédances contenant une partie capacitive. Par exemple, un tronçon de ligne 600Ω de longueur 3/16λ (0,1875λ) et court-circuité à une extrémité est représentée par l1, dessiné comme un arc à l'extérieur de l'abaque.

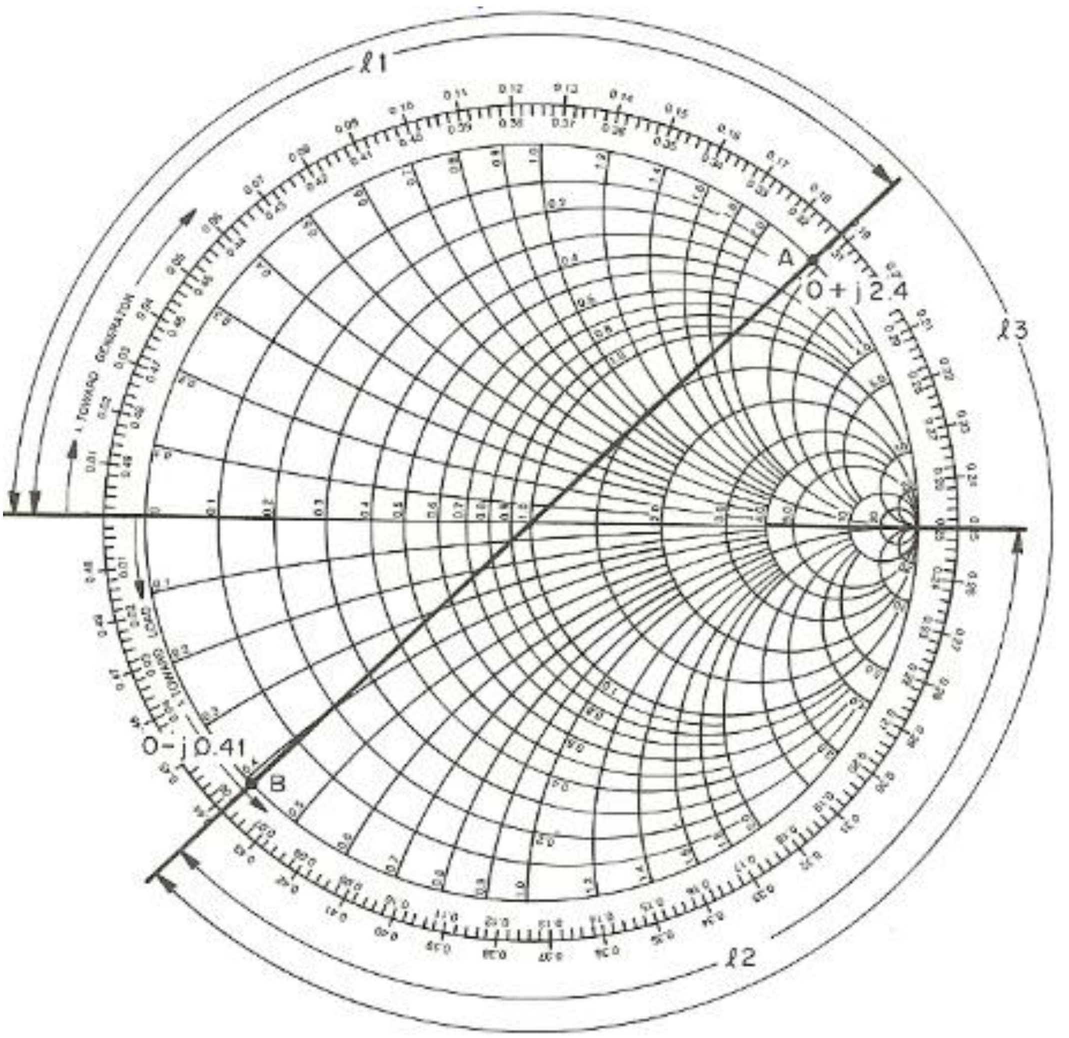


Fig.10 Détermination de l'impédance d'un tronçon de ligne ouverte ou en court-circuit, sans tenir compte des pertes

La "charge" est un court-circuit, 0 +j 0, et l'échelle des longueurs d'onde "vers le générateur" (Toward generator) est utilisé pour afficher la longueur de la ligne. Au point A, Fig. 11, on peut lire l'impédance normalisée le la ligne, 0 +j 2,4. La réactance est donc inductive et égale à 600 x 1,4 = 1440Ω. Le même élément de ligne, terminé par un circuit ouvert (impédance ∞, le point à la droite de l'abaque), est représenté par l2 sur la Fig.11. En B, l'impédance d'entrée de la ligne vaut 0 -j 0,41; dans ce cas la réactance est capacitive et vaut 600 x 0,41 = 246 Ω. (Les pertes en ligne s ne sont pas prises en compte dans ce cas). A partir de la Fig.11, il est simple de voir que si l1 est augmenté de 1/4 λ, la longueur totale est représentée par l3, l'impédance d'entrée de la ligne sera identique à celle obtenue avec l2 seule. Dans le cas de l2, la ligne est en court-circuit alors que pour l3, la ligne est terminée par un circuit ouvert. L'ajout d'un tronçon de ligne de 1/4 λ, pour obtenir l3, produit une action de transformation d'impédance.

Les impédances, inductive et capacitive, déterminées ci-dessus peuvent être trouvées en substituant ces valeurs dans les équations reliant inductance, capacitance et réactance en utilisant soit divers abaques ou calculateurs adaptés. La fréquence correspondante à la longueur de la ligne, en degrés doit être utilisée, bien entendu. Dans l'exemple, si la fréquence est 14 MHz, l'inductance et la capacitance dans les deux cas seront de 16,4 µH et 46,2 pF, respectivement. Notez que lorsque la longueur de ligne est 45°, (0,125λ), la réactance est, dans tous les cas, égale à l'impédance caractéristique de la ligne. En utilisant l'abaque de Smith, il doit toujours rester présent à l'esprit; que la longueur électrique d'une section de ligne dépend de la fréquence et de la vélocité du câble, aussi bien que de sa longueur physique.

Pour des longueurs de ligne qui sont des multiples exacts de 1/4λ, la ligne a des propriétés de circuits résonnants. Pour des longueurs de ligne où l'impédance d'entrée passe par zéro à la gauche de l'abaque de Smith, la ligne agit comme un circuit résonnant série. Pour les longueurs où la réactance passe théoriquement de "plus l'infini" à "moins l'infini" à la droite de l'abaque de Smith, la ligne réagit comme un circuit résonnant parallèle.