

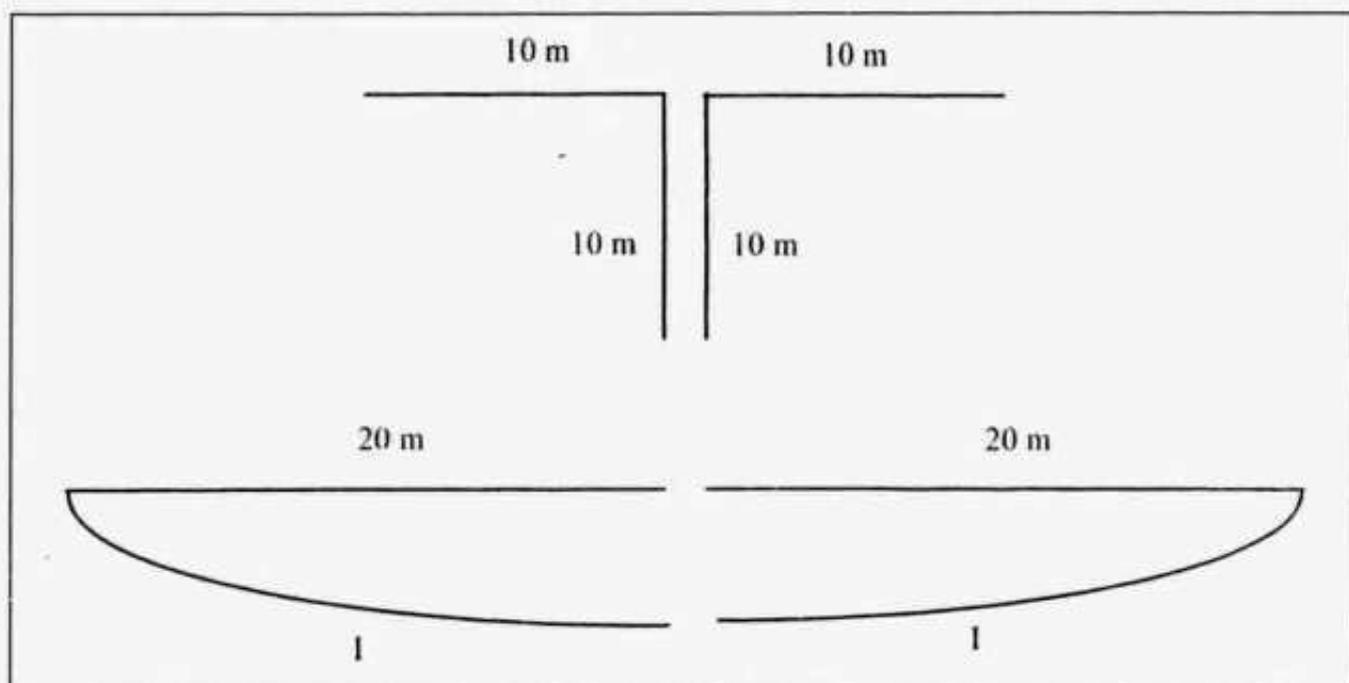
# Introduction aux lignes de transmission et aux fibres optiques (Part 2)

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

## 2.4 L'impédance caractéristique

L'impédance caractéristique  $Z_c$ , aussi appelée impédance itérative, est celle qui correspond au quotient  $Z_c=U/I$  tout au long d'une ligne infinie. Les explications données, concernant les différents modes de fonctionnement, indiquent qu'il est impératif que la ligne soit parcourue **par une onde progressive**, pour que la définition donnée ci-dessus ait un sens. En effet, c'est dans **ce cas seulement** que l'on pourra toujours faire le quotient  $U/I$  à n'importe quel endroit de la ligne, et obtenir ainsi toujours la même valeur  $Z_c$ . La notion d'impédance caractéristique **est donc étroitement liée** à la notion de mode de fonctionnement **en ondes progressives**. En effet, avec un régime d'ondes stationnaires établi, le courant et la tension varient en chaque point de la ligne et, par conséquent le quotient  $Z=U/I$  varie lui aussi selon l'endroit. On ne pourra donc, dans ce cas, parler d'impédance **qu'en un point de la ligne**. Il en est de même le long d'un dipôle sur lequel s'établit une onde stationnaire. Le quotient  $U/I$  est maximum au niveau des isolateurs (noeud de courant) et minimum au centre (ventre de courant). L'impédance passe ainsi d'une valeur de l'ordre de 2000 Ohms à une valeur de 75 Ohms au centre, avec toutes les valeurs intermédiaires.

Il est cependant clair, que la ligne, de part ses dimensions géométriques, possède une impédance caractéristique que l'on peut déterminer par calculs (voir l'expression algébrique). **Mais, dans ce mode de fonctionnement, ce calcul n'a aucun sens.** Nous le répétons, la notion d'impédance caractéristique n'a de sens qu'à l'égard d'un régime de fonctionnement à ondes **progressives**. Si l'on fait une comparaison avec le domaine de la voiture, cela reviendrait à parler d'un moteur pesant 50 kilos alors qu'en **utilisation normale**, c'est surtout la puissance réelle à l'axe qui est déterminante pour les performances. Les 50 kilos sont certes bien réels et influenceront le rapport poids/puissance du véhicule mais ne seront pas une donnée essentielle. Ainsi, parler d'une ligne accordée de 600 Ohms prête à confusion puisque ces 600 Ohms ne seront présents qu'en certains points de la ligne, là précisément où le quotient  $U/I$  vaut 600 Ohms. Ce chiffre de 600 Ohms nous renseignera toutefois sur l'aspect géométrique de la ligne en nous faisant évaluer la valeur de l'écartement entre les deux conducteurs. Au sujet de l'écartement, pour une ligne accordée utilisée en émission, il ne faudra pas descendre à une valeur inférieure à 4 cm, les pertes devenant trop importantes. On pourra augmenter cette valeur jusqu'à 20 cm, voir 30 cm et n'avoir



**Figure 3:** Antenne horizontale de réception et régime d'ondes stationnaires fondamental (80 mètres)

presque pas à retoucher la longueur de la ligne pour conserver l'accord. On aura ainsi le minimum de pertes, puisque l'isolation entre les deux conducteurs sera très grande. On voit donc par ces exemples, et les mesures de résonance le confirment, que l'écartement entre les deux fils peut varier dans d'assez grandes proportions sans grandes conséquences notables. Avec une ligne bifilaire accordée, il n'est donc plus question d'adapter l'impédance de la ligne au système rayonnant, comme déjà dit, puisque la ligne fait partie intégrante de la longueur totale de fil sur laquelle on a logé un régime d'ondes stationnaires.

**En réception seulement**, on pourra utiliser une ligne accordée à très faible espacement (pratiquement du câble bifilaire plat 220 volts convient très bien) ou encore du câble plat TV 300 Ohms et le fonctionnement sera parfait. On aurait évidemment beaucoup trop de pertes **en émission** avec une telle ligne accordée. Nous espérons ainsi avoir apporté des éclaircissements sur ce sujet tellement mal compris.

Dans le chapitre «Mesures» nous déterminerons l'impédance caractéristique d'un câble quelconque.

Un exemple pratique fera mieux comprendre les deux modes de fonctionnement.

Dans cet exemple nous négligeons le facteur de vitesse  $v$  du fil afin de simplifier le raisonnement.

### Problème (voir Fig. 3)

Soit une antenne horizontale de réception de  $2 \times 10$  mètres alimentée en son centre par une ligne de transmission symétrique bifilaire de 10 mètres de longueur, d'impédance caractéristique de 75 Ohms. On a donc une ligne assez comparable à un câble plat courant fort 220 volts. La ligne travaille-t-elle en ondes progressives ou en ondes stationnaires?

Utilisons notre grid-dip pour déceler les fréquences de résonance. La plus basse fréquence sera située dans la bande 80 mètres. De toute évidence nous aurons un ventre de courant à la base de la ligne, donc une impédance basse en ce point. La demie partie horizontale additionnée à un côté de la ligne est le siège d'une onde stationnaire d'un quart d'onde avec obligatoirement un noeud de courant au niveau de l'isolateur.

Sur 40 m, le tout peut fonctionner classiquement en dipôle alimenté au centre par la ligne

symétrique 75 Ohms fonctionnant en ondes progressives. On pourrait tout aussi bien obtenir un fonctionnement en demi onde sur une moitié seulement de l'antenne plus la ligne, avec cette fois un noeud d'intensité aux deux extrémités de l'ensemble ligne antenne (voir dessin). Nous aurions donc une haute impédance à la base de la ligne et non pas 75 Ohms. Quel mode de fonctionnement s'établira donc sur cette bande? Pour le savoir, il faut mesurer la valeur de l'impédance à la base de la ligne sur cette bande. Si celle-ci vaut 75 Ohms, on fonctionne en dipôle avec une ligne apériodique en ondes progressives. Avec une haute impédance mesurée, on fonctionne en ligne accordée à ondes stationnaires.

Pour toutes les autres anciennes bandes, on aura un noeud de courant aux deux extrémités, donc une haute impédance à l'entrée de la ligne. Seul le mode de fonctionnement sur 40 m est incertain.

En émission avec un tel dispositif, le comportement sera bon sur 40 m, ce qui tend à prouver que, sur cette bande, on fonctionne en ondes progressives. Le fonctionnement sera mauvais sur toutes les autres bandes, les pertes sur la ligne de transmission étant trop grandes en régime d'ondes stationnaires.

L'impédance caractéristique  $Z_c$  est aussi appelée **impédance itérative**, du fait qu'il faut brancher cette valeur de résistance  $R$  à l'extrémité de la ligne ou du quadripôle qui la représente, pour retrouver cette même valeur  $R$  à l'entrée de la ligne ou du quadripôle. On peut **réitérer** ce procédé autant de fois que l'on veut en ajoutant autant de quadripôles identiques que l'on veut. Ainsi donc, la valeur de  $Z_c$  est indépendante de la longueur géométrique de la ligne. On peut donc couper celle-ci à la longueur désirée (ceci pour un fonctionnement apériodique à ondes progressives comme déjà dit). Bien entendu, on aura toujours intérêt à faire celle-ci la plus courte possible afin de minimiser les pertes qui elles sont toujours présentes et dépendent entre autres de la longueur de la ligne. Ces pertes sont exprimées en db par 100 mètres pour une certaine fréquence (voir à ce sujet la documentation Suhner). En d'autres termes, une ligne infinie supposée sans pertes, peut être remplacée par une résistance de valeur égale à l'impédance caractéristique de la ligne.

Pour que la ligne d'impédance caractéristique  $Z_c$  présente cette même valeur d'impédance à l'entrée, il est impératif que la ligne ait une terminaison de valeur  $R=Z_c$ . **La ligne est dite adaptée**. Pour toutes autres valeurs de la

terminaison, la valeur présentée à l'entrée ne sera plus  $Z_c=R$ .

Cette valeur  $Z_c$  dépend des caractéristiques mécaniques donc physiques de la ligne et une expression algébrique permet de calculer  $Z_c$  pour les différents paramètres mesurables directement sur la ligne.

Expression pour la ligne coaxiale asymétrique:

$$Z_c = 138 \cdot \log \frac{D}{d} \text{ avec:}$$

D: diamètre extérieur sur gaine [mm]  
d: diamètre de l'ame [mm]

Expression pour la ligne bifilaire symétrique:

$$Z_c = 276 \cdot \log \frac{2 \cdot a}{d} \text{ avec:}$$

a: distance entre fils [mm]  
d: diamètre du fil [mm]

Voyez aussi les différents tableaux vous évitant de faire les calculs (Fig. 4, Fig. 5).

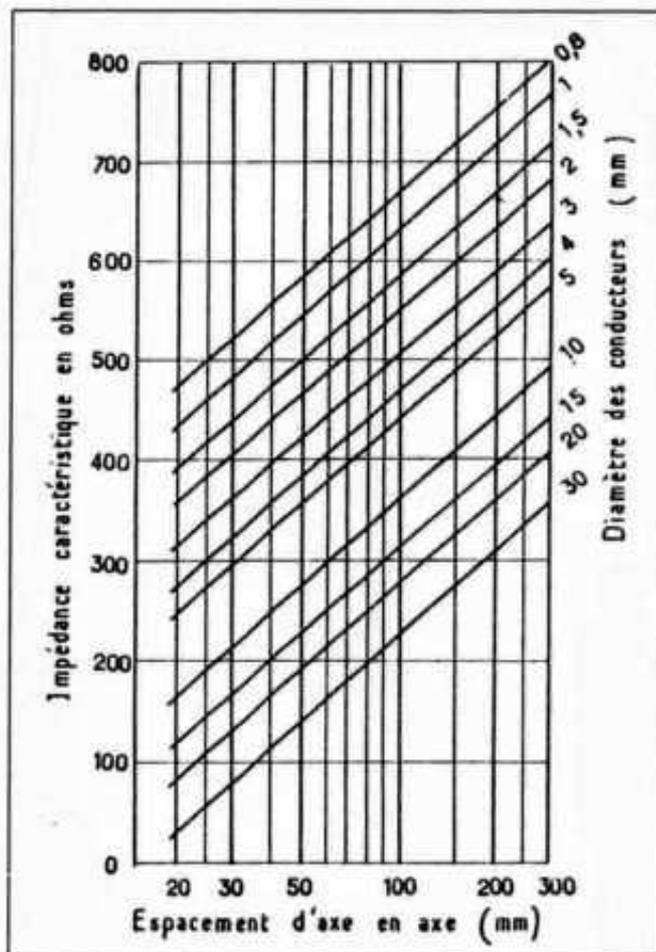


Figure 4: Impédance caractéristique des lignes à deux conducteurs

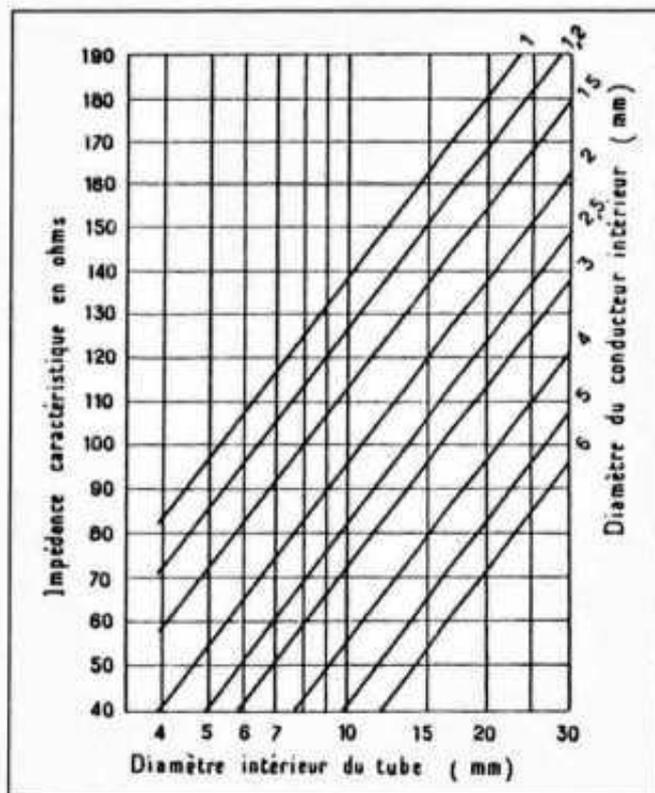


Figure 5: Impédance caractéristique des lignes coaxiales

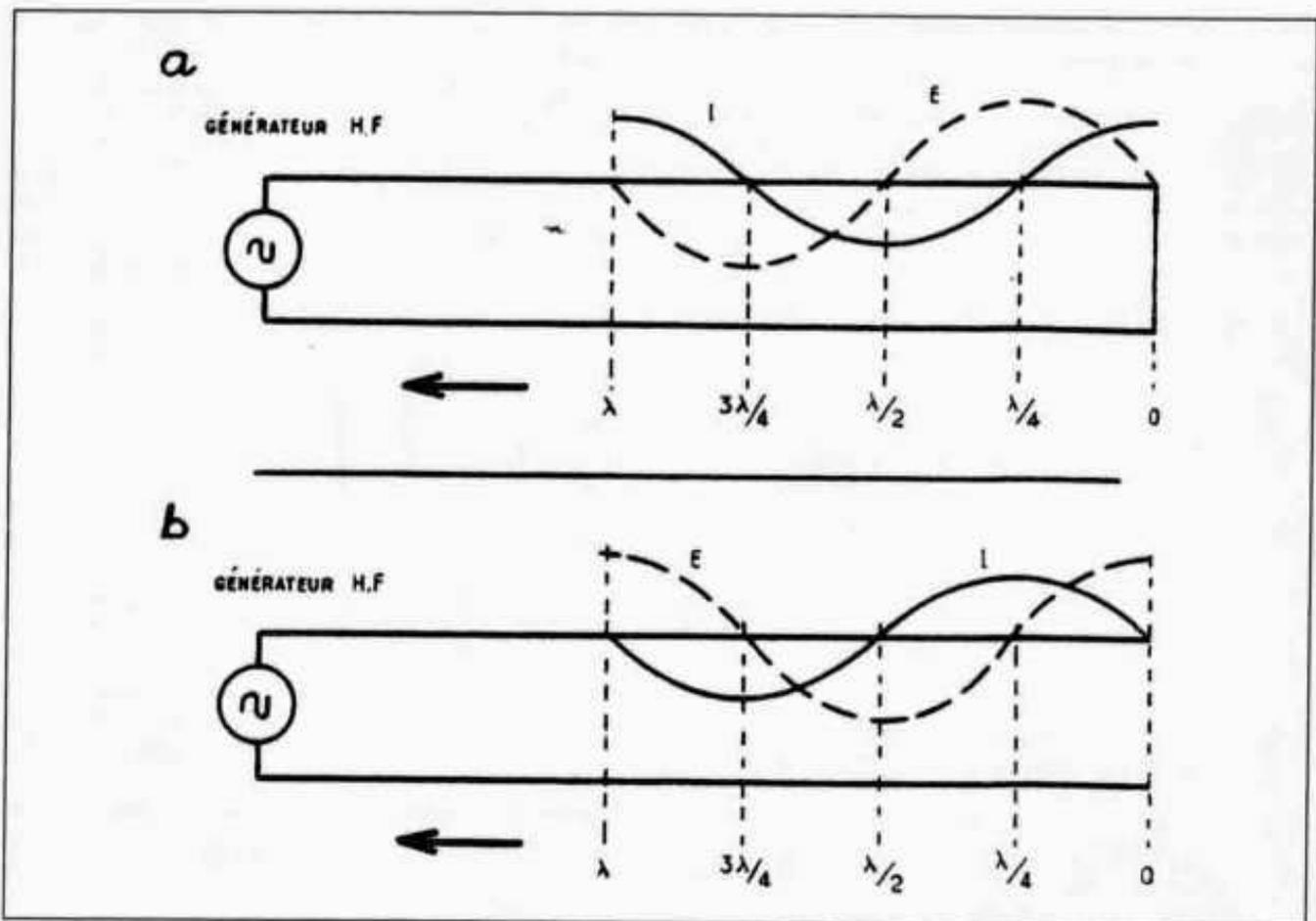
## 2.5 Différentes terminaisons de la ligne accordée

### Préambule

Nous n'avons jusqu'à maintenant considéré, pour la ligne progressive, que le cas d'une terminaison résistive correspondant à l'impédance caractéristique de celle-ci, et pour la ligne accordée à ondes stationnaires, nous n'avons pas précisé la nature de cette terminaison, et en étions resté à des généralités. Nous allons brancher différentes terminaisons pour les deux cas, et étudier la nature de l'impédance à l'entrée de la ligne, celle sur laquelle débitera l'émetteur.

#### 2.5.1. Ligne ouverte (ou terminée sur une résistance infinie)

Dans ce cas, il se placera obligatoirement un noeud d'intensité (et un ventre de tension) à l'endroit de l'ouverture de celle-ci. De la même façon, il y a toujours un noeud d'intensité sur un isolateur placé en extrémité du brin rayonnant d'une antenne. La nature de l'impédance sur laquelle débite le générateur dépendra de la longueur géométrique de la ligne ainsi que de la fréquence utilisée. Voir la représentation du régime d'ondes stationnaires (Fig. 6).



**Figure 6:**

- a) L'établissement d'ondes stationnaires sur une ligne fermée par un court-circuit  
 b) L'établissement d'ondes stationnaires sur une ligne ouverte

On distingue les valeurs remarquables suivantes de l'impédance d'entrée de la ligne.

- A) Avec un quart d'onde déroulé à partir du noeud d'intensité à l'ouverture, l'impédance d'entrée est résistive, de faible valeur, l'équivalent d'un circuit oscillant série à la résonance. Nous aurons la même situation pour tous les multiples impairs de quarts d'onde.
- B) Avec une demie onde déroulée à partir du noeud d'intensité à l'ouverture, l'impédance d'entrée est résistive, de grande valeur, l'équivalent d'un circuit oscillant parallèle à la résonance. Nous avons la même situation pour tous les multiples pairs de quarts d'onde.

**Remarque:**

Les situations A) et B) ci dessus font apparaître qu'il faudra disposer obligatoirement d'un coupleur à la sortie du transceiver qui comporte lui, dans l'immense majorité des cas une sortie asymétrique 50 Ohms.

Pour le cas A), la ligne ayant une basse impédance d'entrée, acceptera en ce point un

circuit accordé série comprenant deux capacités identiques en série dans chaque fil afin de maintenir la symétrie.

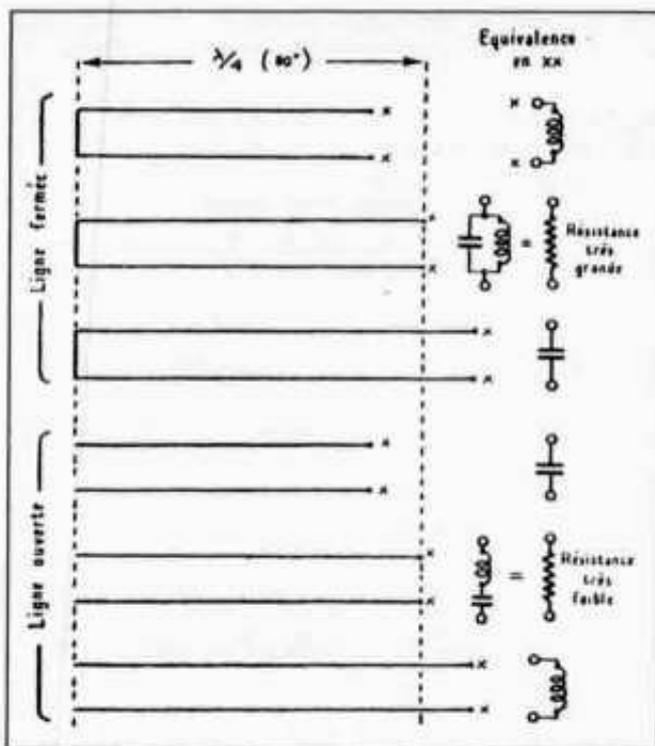
Pour le cas B), la ligne ayant une haute impédance d'entrée, acceptera un circuit accordé parallèle.

Pour la composition complète des coupleurs, voyez les ouvrages spécialisés.

Pour toutes les valeurs intermédiaires de longueurs de lignes, on obtiendra des valeurs complexes d'impédance de nature capacitive ou inductive selon que la ligne sera trop courte ou trop longue par rapport à la fréquence d'excitation de celle-ci. Voyez le tableau récapitulatif suivant (Fig. 7).

**Remarque:**

On passe très facilement de la ligne ouverte à l'antenne Lévy appelée également Center feed ou Doppel Zeppelin ou encore tout simplement ligne ouverte, en ouvrant celle-ci symétriquement, à angle droit de chaque côté, la seule restriction étant que la partie déployée horizontale ainsi obtenue, soit au moins égale à un quart d'onde. Peu importe ensuite à quel endroit s'effectue le pliage à angle droit, le tout



**Figure 7:** Selon qu'elle est ouverte ou fermée, à longueur exacte, un peu trop longue ou trop courte, une ligne  $\lambda$  équivaut aux éléments représentés sur cette figure.

restant rigoureusement symétrique. On remarque que la ligne maintenue parallèle est raisonnable mais sans sortie d'énergie, devient rayonnante dans sa partie repliée horizontalement. **La ligne et l'antenne ne font qu'un.** L'énergie prisonnière dans la ligne tant que celle-ci est maintenue parallèle, peut enfin se convertir en énergie électromagnétique dans la partie déployée. Dans l'exemple pratique précédent, on aurait pu tout aussi bien diminuer la longueur de la

ligne de moitié, voir plus, et augmenter d'autant la partie déployée, la longueur totale restant identique.

### 2.5.2 Ligne quart d'onde et transformateur d'impédance quart d'onde (Fig. 8a, Fig. 8b)

Considérons le cas déjà vu de la ligne ouverte A) Fig. 6b avec un seul quart d'onde déroulé. L'impédance au niveau du couplage est faible comme déjà dit. Par contre, l'impédance au niveau de l'ouverture est très élevée. Nous disposons ainsi, tout au long de la ligne, de toutes les valeurs d'impédance intermédiaires. On pourra alors utiliser la ligne en transformateur d'impédance, en se branchant sur celle-ci, à l'endroit présentant l'impédance requise.

La ligne ayant été préalablement accordée en quart d'onde, peut-être ensuite capable d'adapter deux impédances différentes placées à ses extrémités, à condition qu'elle possède elle-même une impédance caractéristique bien déterminée. Nous avons l'expression suivante:

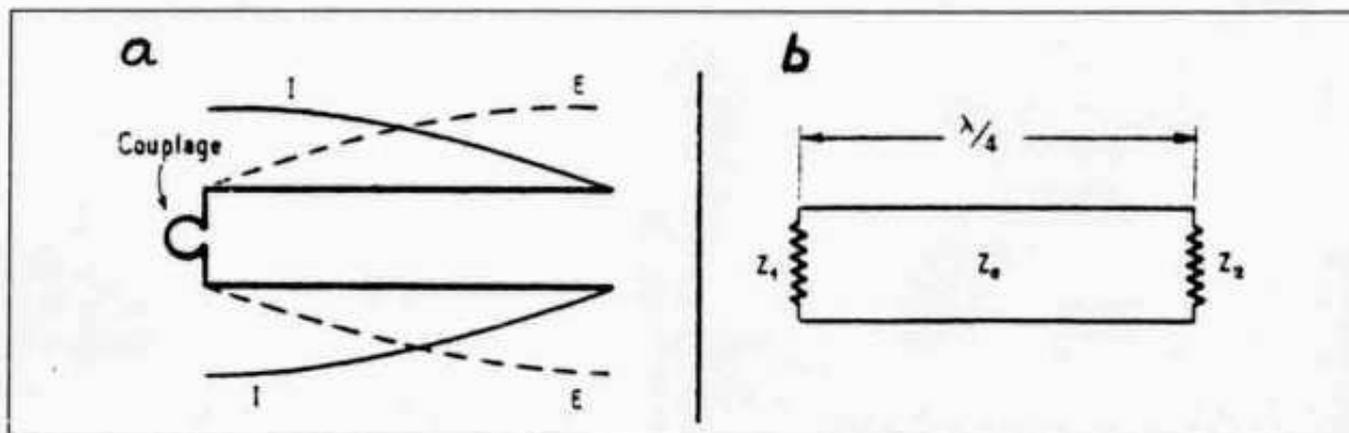
$$Z_0 = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2} \text{ (voir Fig. 8b)}$$

- Avec:  $Z_0$ : Impédance caractéristique de la ligne.  
 $Z_1$ : Première impédance à adapter.  
 $Z_2$ : Deuxième impédance à adapter.

On peut dire ainsi que l'impédance  $Z_1$  «voit» l'impédance  $Z_2$  égale à elle-même et réciproquement.

Exemple: Soit à adapter une impédance de 33 Ohms à une impédance de 75 Ohms

On aura:  $Z_0 = \sqrt{33 \cdot 75} = 50 \text{ Ohms}$



**Figure 8:**

- a) Comment se présente une ligne accordée en quart d'onde  
 b) Une ligne quart d'onde se comporte en transformateur d'impédance, avec les relations  $Z_0 = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2}$

Il suffira donc d'utiliser une ligne quart d'onde d'impédance caractéristique  $Z_0$  de 50 Ohms pour réaliser l'adaptation.

Autre propriété: Reprenons la figure 6a et branchons un court-circuit à une extrémité soit  $Z_1=0$  on aura  $Z_2=00$  (infini) ceci quelquesoit l'impédance caractéristique  $Z_0$  de la ligne. Nous utiliserons cette remarquable propriété dans le chapitre «Mesures» pour déterminer le facteur de vitesse  $v$  de la ligne.

Inversément, en maintenant une extrémité de la ligne ouverte, donc théoriquement infinie, (en pratique très grande) on obtiendra une impédance nulle à l'autre extrémité pour la fréquence sur laquelle la ligne vibre en quart d'onde.

Pour toutes les valeurs intermédiaires de longueur et d'adaptation, la nature de l'impédance d'entrée de la ligne est résumée dans le tableau (Fig. 7).

### 2.5.3. Ligne en court-circuit (ou terminée sur une résistance nulle)

Dans ce cas, il se placera obligatoirement un ventre d'intensité au niveau du court-circuit. Il y aura donc à cet endroit un noeud de tension. La nature de l'impédance sur laquelle débite le générateur dépendra de la longueur géométrique de la ligne ainsi que de la fréquence utilisée. Voir la représentation du régime d'ondes stationnaires (Fig. 6a).

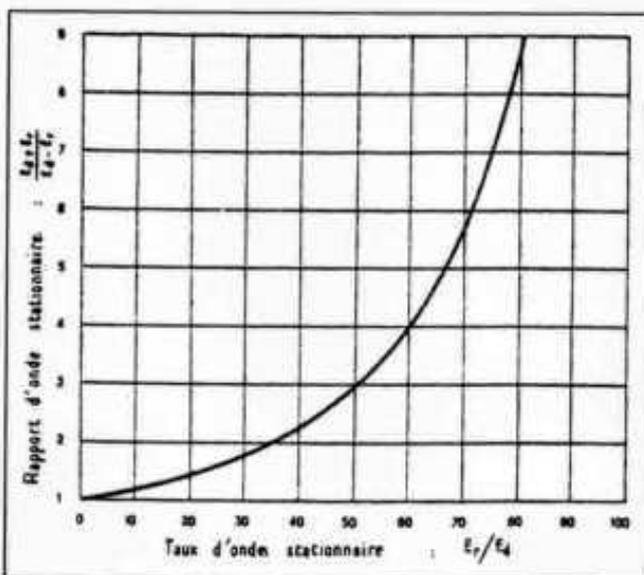


Figure 9: Correspondance entre le taux et le rapport d'onde stationnaire

On distingue les valeurs remarquables suivantes de l'impédance d'entrée de la ligne.

- A) Avec un quart d'onde déroulé à partir du ventre d'intensité au court-circuit, l'impédance d'entrée est résistive et de grande valeur, l'équivalent d'un circuit oscillant parallèle à la résonance. Nous aurons la même situation pour tous les multiples impairs de quarts d'onde.
- B) Avec une demie onde déroulée à partir du ventre d'intensité au court-circuit, l'impédance d'entrée est résistive et de faible valeur, l'équivalent d'un circuit oscillant série à la résonance. Nous aurons la même situation pour tous les multiples pairs de demies onde.

### 2.5.4 Différentes terminaisons de la ligne aperiodique

Nous avons une situation remarquable, celle correspondant à la ligne terminée sur une résistance de valeur égale à celle de l'impédance caractéristique de la ligne  $Z_c$ .

La valeur d'impédance présente à l'entrée sera elle aussi purement résistive et égale à  $Z_c$ . Pour toutes les valeurs différentes de  $Z_c$ , nous aurons le **coefficient de réflexion  $r$  suivant**:

$$r = \frac{V_r}{V_i} = \frac{I_r}{I_i} = \frac{Z_r - Z_c}{Z_r + Z_c}$$

avec:  $V_r$ : Tension réfléchie  
 $V_i$ : Tension incidente  
 $I_r$ : Courant réfléchi  
 $I_i$ : Courant incident

$Z_r$ : Impédance branchée  
 $Z_c$ : Impédance caractéristique de la ligne.

Il existe une relation entre le coefficient de réflexion  $r$ , compris entre 0 et 1, et le rapport d'ondes stationnaires  $S$  (ROS):

$$S = \frac{1+r}{1-r} = \frac{Z_r}{Z_c}$$

Nous avons d'autre part la relation  $r = \frac{S-1}{S+1}$

La relation entre le coefficient de réflexion  $r$  et le taux d'ondes stationnaires (TOS) est immédiate soit de 0 à 100% pour  $r$  allant de 0 à 1.

On peut donc tracer la courbe de  $(ROS) = f(TOS)$  que nous publions (Fig. 9).

Continuation à suivre