

Câbles et guides d'ondes.

Lorsqu'il s'agit de transporter des informations sous forme électrique d'un point à un autre on utilise des supports conducteurs comme la très classique paire téléphonique. Sur un tel support, les signaux (bande de base ou porteuses modulées) transitent sous forme de tensions électriques alternatives entre deux conducteurs comme par exemple des fils métalliques parallèles.

Evidemment, un signal injecté à une extrémité de la ligne n'est pas instantanément disponible à l'autre extrémité car l'énergie mise en jeu met un certain temps pour parcourir la ligne: il y a propagation. La vitesse de déplacement de l'information le long de la ligne est toujours inférieure à la vitesse maximale possible qui est celle d'une onde électromagnétique dans l'espace libre comme par exemple une onde radio ou la lumière (300000 km/s). Le quotient de la vitesse sur la ligne par la vitesse de la lumière est appelé **célérité** de la ligne.

Le débit d'information étant directement lié à la bande passante utilisée, on ne peut transmettre sur une ligne de forts débits qu'en « montant en fréquence ». On ne transmet malheureusement pas impunément de hautes fréquences sur des fils électriques. En effet, ceux-ci étant naturellement affligés d'une résistance propre répartie (en Ω/m) ainsi que d'une capacité entre les deux brins métalliques (en pF/m), ils se comportent comme un filtre passe-bas. De plus l'énergie électromagnétique qui transite le long de la ligne n'étant pas enfermée dans un tube conducteur (écran ou blindage), elle peut rayonner vers l'extérieur (effet d'antenne) et le fera d'autant mieux que la fréquence en jeu est plus élevée.

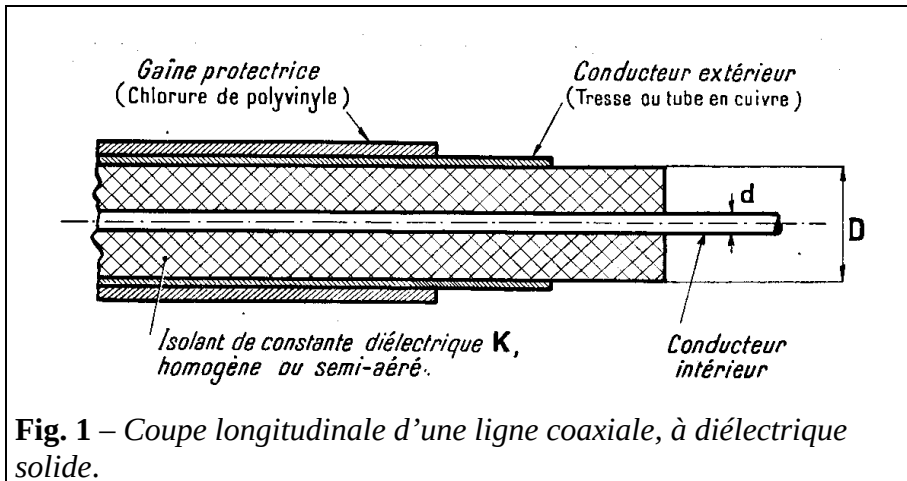
Lorsqu'il s'agit de transmettre des signaux à des fréquences très élevées (de 1 à plus de 300 GHz ...) sur une ligne dont on veut minimiser les pertes, on fait classiquement appel à des guides d'ondes qui ne sont autres que des tuyaux conducteurs dans lesquels une onde électromagnétique captive transite avec une célérité qui dépend des caractéristiques du guide et de la fréquence.

L'énergie du signal est principalement localisée dans l'espace creux du guide et non pas dans le conducteur métallique qui forme la paroi. En effet, aux fréquences élevées apparaît ce qu'on appelle l'effet de peau (skin effect, en anglais) : les courants électriques ne peuvent plus exister dans l'épaisseur des conducteurs mais se localisent uniquement à la surface de ceux-ci sur une épaisseur qui dépend de la fréquence et de la conductivité du matériau (voir épaisseur de peau dans l'annexe technique). A l'intérieur du guide, le champ électromagnétique (champ électrique et champ magnétique nécessairement associés et couplés aux fréquences élevées) obéit à des répartitions particulières ou modes. Dans un guide creux rectangulaire classique, par exemple, aucun mode ne peut se propager en-dessous d'une fréquence particulièrement appelée fréquence de coupure du guide. Lorsqu'on élève la fréquence, un, puis plusieurs modes apparaissent dont les célérités sont différentes et variables en fréquence.

De ce qui précède découle l'intérêt évident d'une ligne électrique qui cumulerait les avantages du bifilaire - pas de fréquence de coupure basse, fonctionnement jusqu'au continu - et du guide d'ondes fonctionnant aux fréquences élevées. Un tel support est nécessairement constitué de deux conducteurs (pour s'assimiler à un bifilaire aux fréquences basses) et se présenter comme un tube (pour confiner l'onde électromagnétique aux fréquences élevées).

Le câble coaxial répond parfaitement à cette définition puisqu'il est constitué d'un conducteur extérieur cylindrique creux et d'un conducteur intérieur coaxial ou âme, séparés par un espace totalement ou partiellement rempli par un isolant ou diélectrique. Aux fréquences basses, le tube extérieur et l'âme jouent le rôle des deux brins du bifilaire et l'énergie transite dans les conducteurs. Les grandeurs électriques les plus appropriées pour décrire le signal sont la tension et le courant. Aux fréquences élevées, au contraire, le coaxial se comporte comme un guide d'ondes creux contenant un brin central. L'énergie transite sous forme d'une onde électromagnétique dans le diélectrique qui est alors le milieu de propagation. Les grandeurs électriques les plus appropriées pour décrire le comportement de l'onde sont dans ce cas les champs électriques et magnétiques. Lorsque la fréquence varie, on passe progressivement du cas « basse fréquence » au cas « hyper fréquences »: le courant par exemple, présent aux fréquences basses dans toute l'épaisseur des conducteurs est confiné progressivement lorsque la fréquence croît, du fait de l'effet de peau, à la surface des conducteurs sur une épaisseur microscopique. L'énergie se localise alors entre le conducteur extérieur qui sert de blindage et l'âme, dans l'épaisseur du diélectrique. On passe donc progressivement et continûment du cas du bifilaire à celui de guide d'ondes sans qu'il y ait de fréquence de coupure.

Constitution du câble coaxial.



La ligne coaxiale est constituée par deux conducteurs concentriques, le conducteur intérieur de diamètre extérieur D étant centré dans le conducteur extérieur de diamètre intérieur d au moyen d'un isolant homogène (polyéthylène, Téflon) ou semi-aéré (perles en polystyrène ou en stéatite, disques en céramique ou en stéatite vitrifiée) de constante diélectrique K . L'ensemble est généralement protégé par une gaine en chlorure de polyvinyle (figure 1).

Ce type de ligne n'est pas affecté par les agents atmosphériques; il est insensible aux influences extérieures, les pertes par rayonnement sont inexistantes grâce au conducteur extérieur qui constitue un écran efficace.

La ligne coaxiale est couramment utilisée jusqu'à 3000 MHz environ ($\lambda = 10$ cm); elle permet de réaliser des impédances caractéristiques comprises entre 35 et 250 Ω .

Par construction, ce type de ligne est dissymétrique, donc non équilibré par rapport à la terre.

On distingue les lignes coaxiales souples (les plus courantes) et les lignes coaxiales semi-rigides.

Lignes coaxiales souples. - Le conducteur extérieur est constitué par une gaine tressée en cuivre : le conducteur intérieur en cuivre est massif ou divisé. L'isolant est homogène ou semi-aéré.

Lignes coaxiales semi-rigides. - Dans une ligne coaxiale, l'affaiblissement total par unité de longueur de l'énergie transportée par la ligne est occasionné :

- par les pertes dans les conducteurs;
- par les pertes dans le diélectrique.

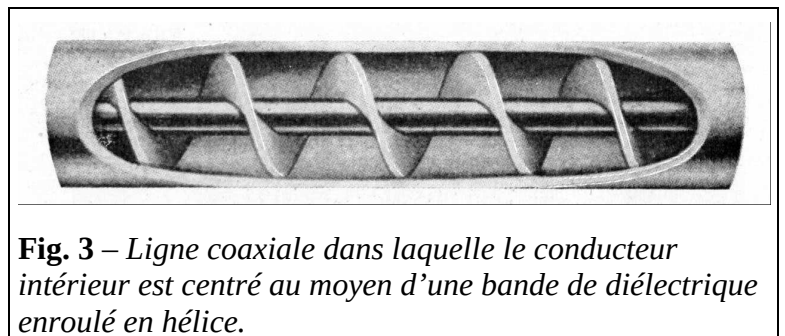
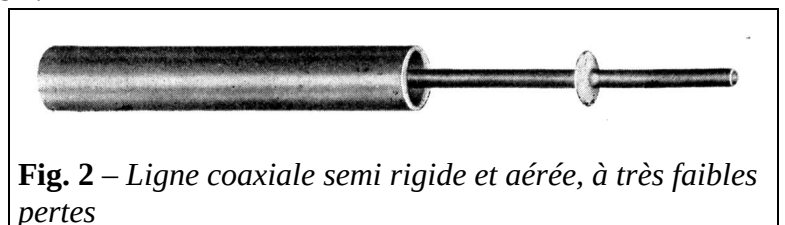
Jusqu'à 300 MHz environ ($\lambda = 100$ cm), les pertes diélectriques ne contribuent pratiquement pas à l'affaiblissement total mais à mesure que la fréquence croît, elles tendent à devenir du même ordre de grandeur que les pertes dans les conducteurs, aussi a-t-on cherché à réaliser des lignes ne comportant que le minimum de diélectrique. Parallèlement, afin de réduire aussi les pertes dans les conducteurs, on a réalisé ceux-ci en cuivre massif, d'où les lignes coaxiales dites « semi-rigides ».

Le conducteur extérieur est constitué par un tube en cuivre recuit spécial. Le conducteur intérieur en même cuivre est un fil de gros diamètre (6 à 8 mm par exemple) ou un tube, centré dans le conducteur extérieur par des disques en stéatite ou en céramique vitrifiée ($K = 6,1$ à $6,25$), voire en Téflon ($K = 2,1$), régulièrement espacés (fig. 2).

Ce type de ligne est utilisé dans les installations radio-électriques permanentes. Il ne peut être courbé qu'une fois; son rayon de courbure minimum est toujours précisé par le fabricant.

On notera que le fait d'utiliser des perles creuses ou des disques régulièrement espacés occasionne, à partir d'une certaine fréquence, des pertes d'énergie par réflexion (diélectrique non homogène), aussi le fabricant précise-t-il la fréquence maximum à laquelle la ligne peut être utilisée.

Dans certaines lignes coaxiales enfin, le conducteur intérieur est centré au moyen d'un filou d'une bande de polyéthylène, de polystyrène ou de Téflon enroulé en hélice (fig. 3).



Les propriétés du câble coaxial.

Du fait de la symétrie radiale du coaxial, les potentiels électriques, champs électriques et magnétiques possèdent également la même symétrie de révolution. On montre que quelle que soit la fréquence de l'onde, le champ électrique qui lui est associé est radial alors que le champ magnétique associé est « orthoradial », c'est-à-dire annulaire (voir figure 2). Une telle onde électromagnétique est appelée le mode TEM (Transverse ElectroMagnétique).

Ce mode TEM possède l'intéressante propriété de n'avoir pas de fréquence de coupure basse et d'avoir une vitesse de propagation indépendante de la fréquence, du moins pour les fréquences pour lesquelles l'épaisseur de peau est négligeable devant le diamètre de l'âme, c'est-à-dire au-dessus de quelques mégahertz. On dit que c'est un mode non dispersif. Cette propriété est intéressante car elle évite d'avoir, au bout d'une certaine distance de propagation le long du câble, un retard entre des signaux associés mais transmis à des fréquences différentes.

D'autres modes de propagation peuvent éventuellement exister à des fréquences très élevées, qui n'ont plus la symétrie radiale, possèdent une fréquence de coupure et sont dispersifs. En principes de tels modes pourraient perturber le mode TEM mais dans la pratique ils n'existent que si l'on injecte dans le câble une onde ne possédant pas la symétrie radiale ou, si quelque part le long du câble, du fait d'une asymétrie de celui-ci (rayon de courbure trop petit, écrasement, lésion du conducteur extérieur par exemple) le mode TEM cède de l'énergie à un mode supérieur. Il en résulte que si l'on veille à la bonne géométrie du câble, on peut l'utiliser même à des fréquences où pourraient exister des modes autres que TEM.

Une autre propriété intéressante du câble coaxial est qu'il est théoriquement insensible aux perturbations électriques extérieures car l'onde est totalement enfermée dans le tube que constitue le conducteur extérieur. On devrait de ce fait pouvoir placer des coaxiaux côte à côte, même s'ils véhiculent des signaux forts, sans qu'il y ait de brouillage ou diaphonie. Dans la réalité la qualité du conducteur extérieur et sa plus ou moins bonne continuité limitent souvent l'immunité du câble aux parasites extérieurs.

Comme toute ligne de propagation électrique qui se respecte, notre coaxial possède une impédance caractéristique. Rappelons que c'est l'impédance dynamique (ou itérative si on le modélise comme un suite de quadripôle passifs symétriques en cascade) que montre à une de ses extrémités un tronçon de câble, quelle que soit sa longueur, si l'autre extrémité est chargée par une impédance de même valeur). Là encore notre coaxial se distingue car son impédance caractéristique est indépendante de la fréquence dès que l'épaisseur de peau est négligeable devant le diamètre de l'âme.

On peut pour un câble coaxial comme pour toute ligne, modéliser la ligne par une succession d'inductances série représentant la self parasite de cette ligne et des capacités parallèles rendant compte de l'influence entre les conducteurs. Dans le cas du coaxial, du fait de l'effet de guide d'onde, on ne peut pas conclure qu'il y a un effet de filtre passe-bas car il faut prendre en compte le phénomène de propagation qui fait que les éléments L et C cascades ne sont pas localisés au même endroit sur la ligne et que donc les signaux qui les traversent ne sont pas en phase. Le calcul montre qu'en réalité un effet de compensation se produit et que la réponse en fréquence est plate.

En résumé, une bonne description du coaxial est obtenue lorsque l'on connaît son impédance caractéristique et la célérité (coefficient de vitesse) plus, éventuellement, la valeur de l'inductance et de la capacité réparties. L'impédance caractéristique des câbles les plus courants est de 50 ou 75 ohms et la célérité se situe entre 0,6 et 0,9.

Les paramètres du câble réel.

Les propriétés que nous venons de décrire n'appartiennent de fait qu'à un câble « idéal » dont les conducteurs seraient parfaits, le diélectrique sans pertes et la géométrie irréprochable. Les câbles réels se rapprochent néanmoins beaucoup du modèle décrit plus haut. Une des premières limitation concerne les

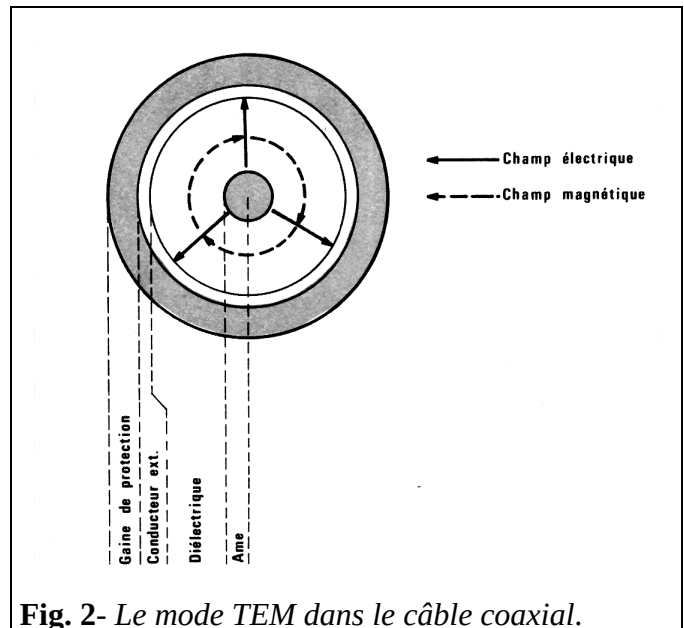


Fig. 2- Le mode TEM dans le câble coaxial.

conducteurs. Il va sans dire que l'atténuation que subit inévitablement le signal dans sa propagation dans le câble provient, partiellement du moins, des pertes ohmiques dans les conducteurs. Aux fréquences basses, l'épaisseur de peau est grande et donc la section efficace de métal traversée par le courant est importante. Aux fréquences élevées celle-ci diminue par effet de peau et les pertes ohmiques ne peuvent que s'accroître. L'épaisseur de peau ne dépendant que de la nature du métal et de la fréquence, on réduit les pertes en augmentant le périmètre des conducteurs ce qui accroît la section efficace, ce qui revient donc à choisir des câbles de grand diamètre.

Il est évidemment essentiel d'utiliser des métaux de bonne conductivité.

Si aucun paramètre économique n'était à prendre en considération, on choisirait l'argent (conductivité $\sigma = 0,62 \mu\Omega \text{ cm}^{-1}$). Du fait de son prix élevé, on lui préfère le cuivre ($\sigma = 0,58 \mu\Omega \text{ cm}^{-1}$) ou l'aluminium chez certains câblers ($\sigma = 0,38 \mu\Omega \text{ cm}^{-1}$) avec une âme cuivrée (quand l'épaisseur de peau est faible le courant ne passe plus que dans le cuivre) (voir figure 2).

Une deuxième limitation des performances des câbles est due à la qualité des diélectriques. Lorsque deux conducteurs sont en interaction à travers un diélectrique qui les sépare (effet de capacité dans un condensateur) le diélectrique favorise plus ou moins l'interaction sans, en principe, consommer d'énergie. Pour quantifier cet effet on utilise la **notion de permittivité diélectrique** notée « ϵ ». Dans les condensateurs par exemple, on choisit des diélectriques de permittivité élevée pour obtenir de grandes capacités. Les diélectriques réels sont hélas affligés de pertes parasites décrites par la tangente de perte δ .

L'air sec étant de ce point de vue un diélectrique presque parfait, on essaie pour les câbles performants à faibles pertes de remplacer une partie du diélectrique solide par de l'air, soit en ménageant des cavités (câbles « aérés »), soit en utilisant un diélectrique « cellulaire » contenant des bulles.

L'ensemble de ces effets se traduit par des atténuations de l'onde qui se propage dans le câble. L'atténuation (mesurée en **dB/100 m**), due à la tangente de perte, est proportionnelle à la fréquence et celle due à la résistivité, à la racine carrée de la fréquence. Globalement les pertes augmentent avec la fréquence et dépendent donc du diamètre du câble, de la nature du diélectrique et du taux de remplissage de l'intervalle conducteur extérieur / âme par ce diélectrique. La figure 3 donne à titre d'exemple les pertes en fréquence de plusieurs câbles réels. Rajoutons enfin que pour les câbles à faibles performances où l'on économise le cuivre, le conducteur extérieur n'est qu'une tresse lâche dont le taux de recouvrement est faible, ce qui provoque de surcroît des pertes par rayonnement (figure 4).

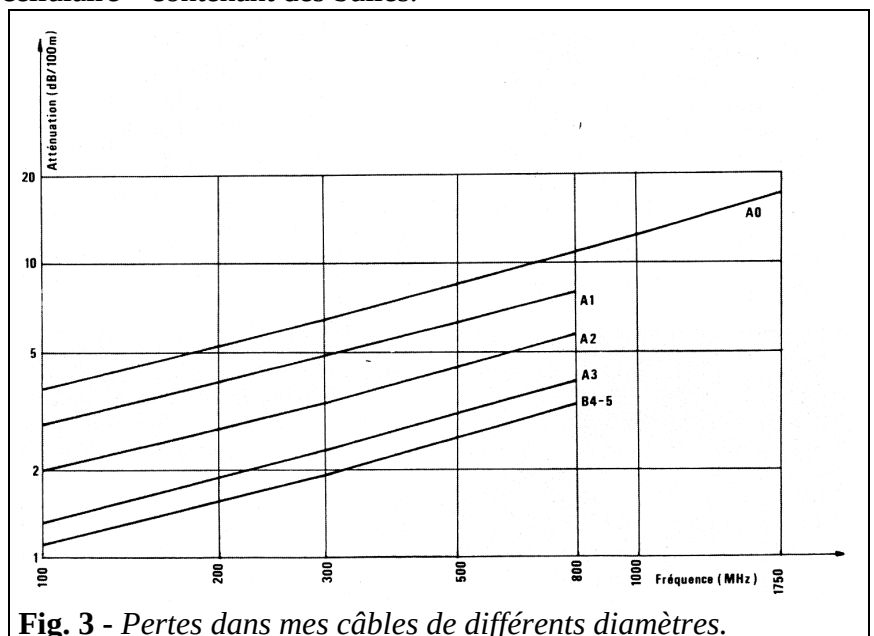


Fig. 3 - Pertes dans mes câbles de différents diamètres.

D'autres défauts des câbles réels sont évidemment imputables aux irrégularités géométriques. Celles-ci peuvent exister d'origine sur les câbles mais sont la plupart du temps le résultat de manipulations: courbure trop prononcée lors de la pose, torsions et tractions trop énergiques. Cela se traduit en général par des modifications locales de l'impédance caractéristique, ce qui provoque des désadaptations électriques se traduisant par des pertes accrues, des échos (des réflexions) et des irrégularités de la courbe de pertes en fonction de la fréquence.

Tout l'art du câblage consiste alors, pour un cas donné, à minimiser les effets indésirables dont nous venons de parler tout en conservant un prix de marché.

Les domaines d'application et la technologie du coaxial

Les câbles coaxiaux sont intéressants chaque fois qu'il s'agit de transporter un fort débit d'information, c'est-à-dire une large bande passante sur une ligne de transmission tout en limitant les pertes de transmission et

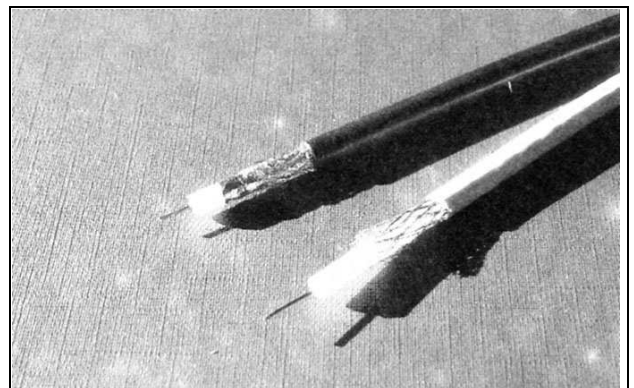


Fig. 4 – Câble à tresse et câble à tresse et feuillard

les rayonnements parasites. Aux fréquences les plus basses, téléphone sur la ligne d'abonné ou parfois bande de base vidéo, on lui préfère le bifilaire, nettement moins coûteux. A l'autre extrémité de l'échelle des fréquences, on est obligé, pour les applications micro-ondes où les pertes doivent rester très faibles, d'avoir recours à des guides d'ondes creux.

Les câbles coaxiaux sont très largement utilisés pour la transmission de multiplex téléphoniques où l'on regroupe sur un même câble un grand nombre de lignes multiplexées en fréquence. Le coaxial est également un excellent support pour la transmission de données à fort débit, encore que c'est dans ce domaine que la fibre optique fait aujourd'hui la percée la plus significative.

Notre coaxial est aussi, l'électronicien le sait bien, l'élément principal des câbles de raccordement utilisés au laboratoire pour les oscilloscopes, générateurs et autres fréquencemètres. Il apparaît également, dans les installations domestiques de télévision, comme raccordement entre l'antenne et le téléviseur.

Suivant les applications, les types de services et l'environnement, les câbles sont soumis à des contraintes mécaniques et électriques variées. Lors de la pose du câble, les bobines ou tourets sont déroulés et celui-ci est soit tiré dans des gaines - câbles souterrains - soit accroché à des poteaux - câbles aériens - ce qui occasionne évidemment de multiples tractions, torsions et flexions pouvant endommager le conducteur extérieur, modifier les caractéristiques du diélectrique par écrasement ou étirement ou casser l'âme. Un soin tout particulier est donc apporté à la robustesse mécanique et à la qualité de la gaine extérieure de protection.

Lorsqu'il est posé en souterrain, le câble n'est soumis qu'à une amplitude thermique journalière faible car le sol a une forte inertie et sa température ne varie que lentement. Par contre, les câbles aériens doivent supporter de grands écarts de température et le rayonnement ultraviolet du soleil (qui peut dégrader la gaine de protection). Leur vieillissement doit donc être bien connu et maîtrisé ainsi que la résistance à la fatigue mécanique. L'étanchéité de la gaine de protection est indispensable car l'humidité corrode les conducteurs en cuivre et altère le diélectrique (pertes électriques importantes).

Les critères électriques sont sévères eux aussi et tout particulièrement les pertes, c'est-à-dire l'atténuation du signal le long de la ligne. Pour un diamètre de câble donné, la qualité du diélectrique et son taux de remplissage (voir plus loin) conditionnent ce paramètre. La régularité des caractéristiques du câble garantit quant à elle le respect de l'impédance caractéristique et donc l'absence d'échos, d'ondes stationnaires et de dispersions. Citons enfin l'épaisseur et la continuité du conducteur extérieur qui assure une bonne isolation du signal vis à vis des champs électriques extérieurs perturbateurs: autres câbles (éventuellement haute tension) émissions radio et télévision, etc. La qualité de ce même conducteur extérieur conditionne la perte de signal par rayonnement vers l'extérieur.

La multiplicité des conditions d'utilisation et des contraintes explique la diversité des produits disponibles sur le marché et la variété des technologies.

Examinons paramètre par paramètre les diverses solutions possibles.

Le **diamètre**, comme nous l'avons vu plus haut, conditionne directement les pertes du fait de l'effet de peau.

Suivant l'utilisation : raccordement de micro, télévision, vidéo, réseaux câblés, etc., les diamètres de câble s'étagent entre moins de deux millimètres et le diamètre d'une pièce de cinq francs (gros câbles comme sur la figure 5). Les rigidités mécaniques, les poids et bien sûr les prix s'étagent évidemment sensiblement dans le même sens.

Les **conducteurs** interviennent de par leurs composition et présentation. Le métal le plus couramment employé est le cuivre à cause de sa bonne conductivité. Il présente également l'avantage de n'être pas trop rigide. Les câbles en aluminium sont plus légers mais également plus raides surtout lorsqu'il fait froid, ce qui rend leur pose plus difficile en hiver. L'âme est en général un cylindre plein mais peut également être composée de plusieurs brins tressés ce qui la rend plus souple. Le conducteur extérieur est en général, pour les câbles bon marché, une tresse qui ne recouvre pas totalement le diélectrique, ce qui économise du cuivre (cher) et augmente la flexibilité du câble mais provoque des pertes par rayonnement souvent importantes (figure 4)

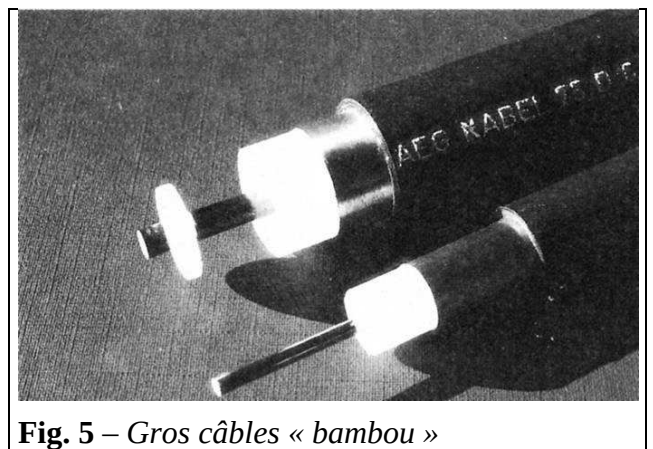


Fig. 5 – Gros câbles « bambou »

Pour obtenir un recouvrement total tout en préservant la flexibilité on fait appel à des câbles «tresse et feuillard» (figure 4) où la tresse est doublée à l'intérieur par une mince feuille de cuivre roulée sur le diélectrique. Dans les réseaux câblés, par exemple, les câbles de transport qui requièrent des pertes faibles nécessitent des conducteurs extérieurs plus performants. Lorsque le câble, une fois posé, n'est plus soumis à des fatigues mécaniques (câbles souterrains), on utilise souvent des conducteurs extérieurs roulés (figure 6).

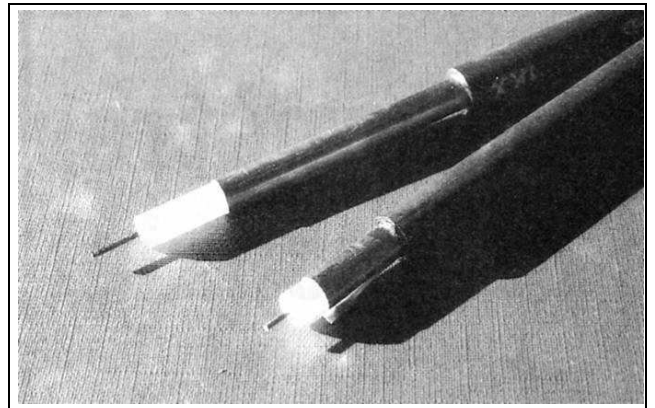


Fig. 6 – Câbles en conducteurs extérieurs roulés et soudés.

Le **diélectrique** intervient de part l'homogénéité de sa permittivité et la valeur de sa tangente de perte. Le matériau le plus employé est le polyéthylène mais on rencontre également le PTFE. (polytétrafluorure d'éthylène ou encore Teflon TM). Afin de diminuer la tangente de perte on essaie de remplacer une partie du diélectrique solide par de l'air, comme dans les câbles «mousse» que certains types de mauvaise qualité vendus dans le passé ont rendus impopulaires auprès des professionnels. Il existe néanmoins aujourd'hui des diélectriques dits « cellulaires » de bonne qualité contenant une certaine proportion de bulles gazeuses. Une autre approche est illustrée par les câbles « bambou » (figure 5) ou semi-aérés dans lesquels le diélectrique est constitué d'un tube extérieur contenant de proche en proche des disques percés, de même matériau, soutenant l'âme.

La **gaine de protection**, souvent en polyéthylène haute densité ou en polychlorure de vinyl (PVC), est parfois renforcée de fibres de verre. Elle peut également contenir suivant les cas, des écrans électriques supplémentaires pouvant avoir une fonction mécanique, ou même dans le cas des câbles aériens dits «autoporteurs», un filin d'acier .

Pour terminer cet article, rappelons que le câble coaxial est nécessairement associé à des connecteurs également coaxiaux dont la qualité conditionne étroitement les performances de l'ensemble. Un connecteur de type donné s'associe à un câble de type donné. Une qualité supplémentaire du câble est donc de permettre une pose aisée du connecteur.

Le câble coaxial, omniprésent en électronique hautes fréquences, très largement utilisé en téléphonie, radio-télévision, transmission de données, est un des éléments techniques principaux des réseaux câblés. Nous avons vu ici que son apparente simplicité est trompeuse et qu'une bonne connaissance de ses caractéristiques conditionne grandement le succès dans son utilisation.

