Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 44 (1953)
Heft: 12: Centenaire de l'Ecole Polytechnique e l'Université de Lausanne

Artikel: Théorie du signal et de l'information et application aux télécommunications

Autor: Dessoulavy, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058083

Théorie du signal et de l'information et application aux télécommunications

Par *R. Dessoulavy*, Lausanne

621.391

Les relations fondamentales de la théorie du signal et de l'information sont exposées dans leurs grandes lignes. Une séparation du rendement «informationnel» global en rendements BF et HF permet une brève comparaison des principaux systèmes classiques de transmission. Suivent quelques considérations sur les possibilités de réduction de la bande passante nécessaire à la transmission d'un message téléphonique ou télégraphique.

Die Grundlagen der Signal- und der Nachrichtentheorie werden kurz erläutert. Durch die Einführung des NF- und HF-Wirkungsgrades der Übermittlung wird der Vergleich der klassischen Übertragungssysteme erleichtert. Anschliessend folgen einige Betrachtungen über die Möglichkeit einer Reduktion der für die Übertragung von Sprache oder Telegraphiezeichen nötigen Bandbreite.

1. Introduction

Nous nous proposons de donner un aperçu des travaux théoriques et de quelques applications pratiques effectués ces dernières années dans le domaine des télécommunications, tout spécialement de ceux concernant la *théorie du signal et de l'information.* Ces travaux, s'ils n'ont pas, jusqu'à présent, donné naissance à des nouveautés sensationnelles telles que le radar ou la bombe atomique, n'en sont pas moins importants et riches de perspectives. Ils sont à la base même de tout problème de télécommunication, qu'il s'agisse de télégraphie, téléphonie, télévision, télémesure, téléguidage, etc... et servo-mécanismes les plus divers. Leur application déborde même le cadre de la technique pure et semble pouvoir fournir des résultats intéressants en physiologie, psychopathologie, voire même en sociologie et en économie politique selon certains auteurs.

L'ampleur de cette science naissante a décidé l'un de ses principaux promoteurs, le savant mathématicien *Norbert Wiener* [1][1]), de la désigner par le mot d'étymologie grecque «*Cybernétique*», signifiant le pilote d'un navire. On l'interprétera comme étant la «Science des relations» ou «l'art de gouverner» selon la définition vieille de plus d'un siècle d'*André-Marie Ampère* [2]. En effet, selon le Prof. N. Wiener, la connaissance des lois régissant l'interaction des différents organes de commande et de contrôle d'une machine (en particulier les servo-mécanismes) doit nous permettre de mieux comprendre les relations existant entre les organes d'un être vivant, entre les individus d'une société ou entre plusieurs sociétés humaines, d'où possibilité de mieux «gouverner» les choses et les hommes. L'élément nécessaire et commun aux relations citées est *l'information.*

Laissant de côté le rôle éminent et des plus intéressants joué par l'information dans les groupements humains, nous exposerons les bases de la théorie du signal et de l'information et son application aux télécommunications.

Cette théorie apporte aux techniciens des télécommunications une base comparable à celle qu'offre la thermodynamique aux constructeurs de machines thermiques. De même que les premiers constructeurs de machines à vapeur ignoraient le rendement théorique maximum de leurs engins, nous avons établi pendant des décades des liaisons télégraphiques ou téléphoniques sans connaître la limite théorique de la quantité d'information qu'elles étaient susceptibles de transmettre.

En 1928 déjà, *Hartley* et *Nyquist* [3, 4 et 5] posèrent les premières pierres de la théorie de l'information en donnant entre autres une définition de la quantité d'information. Ces formules furent complétées vingt ans plus tard, en particulier par les travaux de *C. E. Shannon* [6 et 7] en tenant compte de l'effet limitateur du bruit dans la voie de transmission ainsi que de la structure statistique du message émis.

Grâce aux nombreux travaux publiés depuis lors sur ce sujet, parmi lesquels nous recommandons au lecteur l'intéressante «Réunion d'études» tenues sous la présidence de *Louis de Broglie* [8], on est à même actuellement de comparer entre eux les différents systèmes de transmission, de parler de leur «rendement», tout comme le thermodynamicien parle du rendement d'un moteur. Au lieu de comparer les énergies, comme dans le cas des moteurs, nous comparerons la quantité d'information qu'un système transmet effectivement avec celle qu'il serait susceptible de transmettre théoriquement par unité de temps et que l'on appelle la «capacité» de transmission de ce système.

Shannon [6 et 7] a établi un parallèle entre la quantité d'information d'un message et *l'entropie* d'un système, analogie découlant entre autres de la similitude des formules. Cette analogie n'est pas seulement formelle, étant donné que toute information, si minime soit-elle, requiert un certain transfert d'énergie. Se basant sur ce principe, *Brillouin* [9 et 10] a établi que l'énergie nécessaire à la transmission d'un élément d'information devait être en tous cas égale ou supérieure à la quantité kT (k = constante de Boltzmann, T = température absolue), ou, dans le cas de fréquences très élevées, à la quantité $h\nu$ (pour $T = 300\,°\mathrm{K}$, $\lambda \leq 0{,}05$ cm, h = constante de Planck, ν = fréquence). Ceci lui a permis d'établir le pont liant la quantité d'information transmise par un système à l'entropie physique S de ce système. Il a montré que lorsqu'un message est transmis ou emmagasiné par un système, l'entropie physique S de ce système passe à un niveau plus bas. Cette diminution ΔS de l'entropie est une mesure de la quantité maximum d'information transmise ou emmagasinée. C'est la raison pour laquelle Brillouin préfère comparer la quantité d'information avec une entropie négative, «negentropy», comme il l'appelle. D'où: information = entropie négative = $\Delta S = S_{max} - S$. Au fur et à mesure que le message se «dégrade», par suite des pertes, l'entropie physique S du système regagne petit à petit son niveau normal S_{max}, elle croît conformément au deuxième principe de la thermodynamique. Par contre, la quantité d'information diminue par suite de l'altération du message en cours de transmission, ce qui justifie le choix d'une entropie négative. Fort de ces données,

[1]) Voir bibliographie à la fin du texte.

Brillouin a apporté une contribution originale à la solution du problème des «démons» de *Maxwell*, problème hantant les esprits des physiciens pendant plus de 50 ans.

La théorie de l'information est donc étroitement liée à la physique, elle fait souvent usage, comme nous le verrons par la suite, du calcul des probabilités.

2. Message et information

Le but de tout système de communication est de transmettre le plus rapidement possible et par des moyens appropriés une certaine information de nature des plus diverses: texte, parole, image, etc... Qu'est-ce que l'information et comment la mesurer ?

Recherchons tout d'abord l'élément d'information qui nous paraît le plus simple: c'est sans doute la réponse «oui» ou «non» à une question, la présence ou l'absence d'un signal. Si je vois par exemple une lumière verte ou rouge à une croisée, je suis «informé» que le passage est libre ou n'est pas libre. La communication se résume, dans ce cas le plus simple, au choix opéré par l'expéditeur entre deux possibilités (passage libre ou bloqué) et transmis au moyen d'un message (la lampe verte ou rouge allumée) suivant un certain code connu du destinataire.

L'information sera moins élémentaire si le message transmis correspond à un choix entre plus de deux possibilités. Pour reprendre l'exemple précédent, une troisième lumière jaune m'informerait que la voie est bientôt libre.

D'une manière générale, un message reçu est un certain message entre un nombre fini M de messages possibles. Quelle est la loi liant la *quantité d'information* du message au nombre total M de possibilités ?

Prenons le cas d'un télégramme composé d'une suite de mots. Il nous semble normal que l'information totale du télégramme soit égale à la somme des informations partielles que nous fournit chaque mot, elle devra donc être proportionnelle au nombre total de symboles N, c'est-à-dire à la longueur ou à la durée t du télégramme. Pour que cette propriété soit satisfaite, on exprime la quantité d'information H par le logarithme du nombre total de possibilités M. Le bien-fondé de cette manière de faire est illustré par l'exemple suivant: Si chaque seconde j'écris un chiffre tiré au sort compris entre 0 et 9, au bout de t secondes j'aurai choisi un nombre à $N = t$ décimales, soit un certain nombre entre 10^N nombres possibles. D'où: $M = 10^N$ et $t = N = {}^{10}\log M$. Pour que l'information soit proportionnelle au temps t, elle devra donc l'être au ${}^{10}\log M$.

Il est normal de choisir comme unité d'information l'élément d'information le plus élémentaire et pour lequel $M = 2$. On l'appelle «bit», abréviation pour «binary digit», l'élément de comptage en système binaire. Comme ${}^{2}\log (M = 2) = 1$ bit, on aura d'une manière plus générale:

$H = {}^{2}\log M =$ quantité d'information exprimée en bits, (1)

où

M nombre de messages possibles

Dans l'exemple cité, le nombre obtenu est un message composé d'une suite de N symboles (chiffres). Chaque symbole résulte du choix fait entre $n = 10$ symboles (chiffres) différents tous équiprobables. Donc chaque symbole a une même probabilité $p = {}^{1}/n$ d'être choisi.

Le nombre de messages possibles est de $M = 10^N = n^N$, et la quantité d'information du message, exprimée en bits, est de:

$$H = {}^{2}\log M = N\,{}^{2}\log n = -N\,{}^{2}\log p \qquad (2)$$

où

N nombre total de symboles du message

n nombre de symboles différents tous de même probabilité $p = {}^{1}/n$

On définit la *densité d'information h*, ou entropie du message la quantité d'information moyenne donnée par un symbole du message.

$$h = \frac{H}{N} = -\,{}^{2}\log p \quad \text{bits/symbole} \qquad (3)$$

La quantité $-k \ln p = h \cdot k \cdot \ln 2$ donne l'*entropie* physique du message, ou l'entropie négative selon Brillouin ($k =$ constante de Boltzmann).

Définissons encore la *vitesse d'information R*, c'est la quantité d'information transmise par unité de temps:

$$R = \frac{H}{t} \text{ bits/s} \qquad (4)$$

D'une manière générale un télégramme ne comporte pas toutes les lettres de l'alphabet dans la même proportion; par exemple, le *e* est rencontré beaucoup plus souvent que le *x*. En tenant compte des différentes probabilités p_i de chacun des n différents symboles (lettres) formant le message (télégramme), on obtient pour la quantité d'information:

$$H = -N \sum_{1}^{n} p_i\,{}^{2}\log p_i \qquad (5)$$

$$h = -\sum_{1}^{n} p_i\,{}^{2}\log p_i \qquad (6)$$

où

p_i probabilité de chacun des n différents symboles. On a naturellement:

$$\sum_{1}^{n} p_i = 1$$

Appliquant la formule (6) au cas d'un télégramme formé de mots usuels, on obtient une densité d'information d'environ 4 bits par lettre.

Si toutes les lettres avaient la même probabilité d'être rencontrées, on aurait: $h = {}^{2}\log 26 = 4{,}7$ bits par lettre.

Nous voyons donc que l'introduction de la probabilité p_i de chaque symbole (au cas où ces probabilités ne sont pas toutes égales) diminue la quantité d'information par symbole. Ceci est naturel, car de ce fait nous restreignons le nombre total M de combinaisons possibles pour former le message.

Poursuivant l'analyse du télégramme, on constate que la succession des lettres n'est pas quelconque. Il est par exemple exclu de rencontrer dans un mot français la succession des lettres *xz* alors que *qu* ou *ph* sont assez fréquentes. Tenant compte de la probabilité qu'une lettre ou un groupe de lettres soit suivi par une autre lettre, Shannon a montré qu'un mot anglais d'une longueur moyenne de 5 lettres ne contenait plus qu'une quantité d'information d'environ 2,6 bits par lettre.

Appliquant le même raisonnement à la succession des mots du télégramme, laquelle n'est pas désordonnée, Shannon attribue à la langue anglaise écrite normalement, et non pas en style dit télégraphique, une quantité d'information d'environ 1 bit par lettre.

Quelles sont les conclusions que l'on peut tirer de ce résultat ? Il indique entre autres qu'il serait possible de remplacer l'alphabet actuel à 26 lettres par un alphabet à seulement 2 lettres (= 1 bit), par exemple *a* et *b*, et de construire avec ces deux lettres une nouvelle langue permettant d'énoncer nos idées courantes sous forme de b.a.ba... de même longueur que nos phrases actuelles.

On peut concevoir une machine capable de coder les messages suivant cette nouvelle langue en tenant compte de toutes les probabilités énoncées plus haut. Il suffirait alors pour transmettre l'information en moyenne d'un signe élémentaire par lettre (1 bit), alors que les systèmes actuels en nécessitent au minimum 5 (téléscripteurs: 32 symboles représentés chacun par une succession de 5 signes, $^2\log 32 =$ 5 bits par symbole). Mais une telle machine introduirait naturellement un certain retard dans la transmission du message, puisqu'elle devrait pouvoir comparer les lettres et les mots entre eux. D'autre part, la transmission de messages sans suite probable des éléments (par exemple suite de chiffres), ou sortant quelque peu de l'ordinaire nécessiterait quand même un nombre aussi grand de signes que les systèmes utilisés actuellement. La complexité d'une telle machine et les inconvénients cités font que personne ne s'est intéressé à sa réalisation. Mentionnons d'autre part que, si la moindre erreur se glissait dans le message idéal élaboré par cette machine, on aurait peut-être grand peine à la constater et d'autant plus à la rectifier: la simple suppression d'un signe dans le message idéal pourrait changer complètement le sens du message sans le rendre forcément incompréhensible, alors que dans les systèmes classiques de transmission, cette même faute ne provoquera en général qu'une fausse lettre dans un mot, faute facilement décelable par le destinataire, lequel n'aura pas de peine à la rectifier.

Une deuxième possibilité serait de garder les 26 lettres de notre alphabet et d'établir une langue condensée dont les phrases seraient environ 4 à 5 fois plus courtes que nos phrases actuelles ($M = n^N = 26^1 = 2^{4,7}$).

Inutile de dire que ces langues imaginées plus haut ne verront jamais le jour. Nous voulions simplement montrer par ces comparaisons que les langues actuelles expriment d'une manière beaucoup trop riche et trop longue nos idées. On dit qu'elles ont une forte «redondance» pour utiliser le terme de Shannon (redondancy). Est-ce un inconvénient ? Du point de vue strictement économique, peut-être, mais cette surabondance d'éléments informateurs en facilite l'emploi, permettant de comprendre un message, même s'il est partiellement tronqué. Cette richesse est également la source de toute poésie.

Rappelons que les premiers utilisateurs du télégraphe s'étaient déjà rendu compte de la surabondance de la langue actuelle et ont de tout temps cherché à diminuer le nombre d'éléments formant le message en l'exprimant de la manière la plus concise possible, en style dit «télégraphique». Dans de nombreux codes, par exemple celui du commerce, toute une phrase est remplacée par un seul mot de 5 lettres.

Ayant déterminé la *quantité d'information* d'un message formé de symboles discrets, on peut se demander quelle est celle *d'un message continu*, par exemple d'une phrase parlée. Intuitivement nous dirons qu'elle est plus grande que celle de la phrase écrite, puisqu'en plus du sens des mots, l'intonation et les inflexions de la voix nous permettent de reconnaître la personne qui parle, éventuellement de discerner son humeur ou ses réactions. Sans doute, dépend-elle de la qualité de reproduction.

Si nous traçons les courbes de la variation de la pression acoustique $p(t)$ au cours de l'énoncé d'un message oral quelconque de durée T, il nous semble à première vue qu'il se présente une infinité de possibilités de tracer cette courbe, ce qui signifierait que la quantité d'information contenue dans la phrase dite est infinie. Des limitations naturelles font qu'il n'en est pas ainsi.

Premièrement, les fréquences émises par notre voix et perçues par l'oreille sont limitées au domaine des fréquences dites audibles.

Deuxièmement, l'amplitude sonore p n'est déterminée qu'avec une exactitude Δp dépendant de l'agitation brownienne des molécules d'air ou du niveau du bruit ambiant. L'oreille elle-même ne saurait discerner des variations d'intensité au-dessous d'une certaine limite.

Troisièmement, l'amplitude de la pression acoustique est limitée d'une part par le seuil d'audibilité de l'oreille ou par le bruit ambiant, d'autre part par la puissance maximum de la voix ou par le seuil de douleur de l'oreille.

Ces différents facteurs ont pour effet de limiter le nombre de courbes possibles $p(t)$, de durée T, correspondant chacune à un message différent, autrement dit de rendre finie la quantité d'information transmise oralement pendant la durée T.

La quantité d'information d'un message à variation continue sera étudiée parallèlement à celle de la capacité d'une voie. Avant de l'entreprendre, définissons d'une manière plus précise les différents éléments d'un système de communication.

3. Définition d'un système de communication et d'une voie

La portée d'un message direct, oral ou visuel, étant limitée, le but du système de communication est généralement d'augmenter cette portée en faisant subir au message les transformations successives schématisées à la fig. 1.

Le *message* émis par l'*expéditeur* est transformé par l'*émetteur* en un *signal,* lequel emprunte un système de transmission quelconque que nous appellerons pour simplifier: *voie* (en anglais: channel). Le *récepteur* a pour fonction de transformer le signal reçu en un message, lequel devra se rapprocher le plus possible du message initial pour informer correctement le *destinataire.*

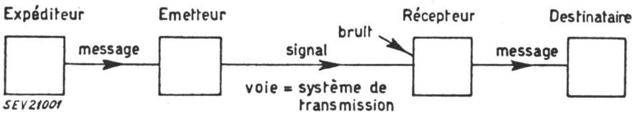


Fig. 1
Représentation schématique d'un système de télécommunication

Les termes «émetteur» et «récepteur» sont pris dans un sens très large et englobent tous les dispositifs nécessaires à la transformation désirée.

4. Capacité d'une voie

De même que l'information contenue dans un message oral est limitée, celle d'un message provenant de la réception d'un signal transmis sur un système quelconque est également finie. Les raisons de cette limitation sont d'une part la restriction du spectre du signal reçu à une certaine bande de fréquences, d'autre part le rapport signal/bruit du système de transmission considéré.

Dans le cas de la transmission par fils ou par ondes, les fréquences ne sont généralement transmises que jusqu'à une certaine fréquence maximum F ou limitées à la bande de fréquences de la voie. Le bruit thermique et d'autre origine, inhérent à tout système de transmission, et se superposant au signal à l'entrée du récepteur, fait que le signal reçu est toujours entaché d'une certaine incertitude quant à sa valeur exacte. Le niveau maximum du signal reçu par le récepteur est limité par la puissance maximum de l'émetteur. Cherchons dans ces conditions quelle sera la vitesse d'information maximum capable d'être transmise sur cette voie. La démonstration qui suit, loin d'être rigoureuse, permettra de se faire une idée des causes de la limitation de l'information.

Posons-nous tout d'abord une première question: Combien de niveaux différents le récepteur peut-il distinguer avec certitude par une mesure instantanée de la tension reçue? Si nous désignons par U_b l'amplitude maximum du bruit superposé au signal, la tension instantanée reçue sera indéterminée à $\pm U_b$. Donc, pour que deux tensions instantanées soient discernables avec certitude, il faut que leur écart soit plus grand ou au plus égal à la somme des erreurs de chacune d'elles, soit supérieur ou égal à $2U_b$. Si le signal reçu peut varier entre deux amplitudes limites $+U$ et $-U$, soit dans un domaine de hauteur $2U$, on pourra discerner avec certitude tout au plus $n = 2U/2U_b$ niveaux distincts, chacun d'entre eux correspondant à une tranche de hauteur $2U_b$ selon la représentation de la fig. 2. Les tensions étant proportionnelles aux racines carrées des puissances, on peut écrire: $n = U/U_b = \sqrt{P/B}$, P étant la puissance du signal d'amplitude U, et B celle du bruit. La présence du bruit B dans le signal de puissance totale P ramène donc la signification de la valeur instantanée d'une fonction continue au cas vu précédemment du choix à opérer entre n symboles (niveaux) distincts.

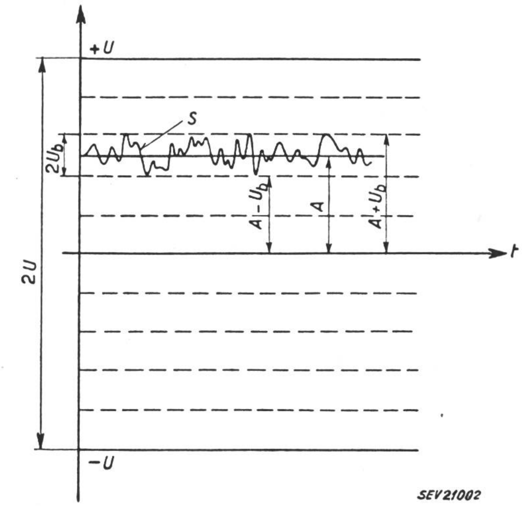


Fig. 2
Incertitude de la valeur instantanée du signal due au bruit
S signal continu avec bruit
A amplitude du signal continu sans bruit
$A + U_b$ amplitude maximum du signal avec bruit
$A - U_b$ amplitude minimum du signal avec bruit
U_b amplitude maximum du bruit de puissance B
U amplitude maximum du signal avec bruit de puissance totale P
$n = \frac{2U}{2U_b} = \sqrt{\frac{P}{B}}$ nombre de niveaux discernables par une mesure de la valeur instantanée du signal

La deuxième question est de savoir avec quelle rapidité le récepteur pourra distinguer un niveau d'un autre. Si nous faisons varier brusquement le niveau à l'émission d'une valeur à une autre, le problème se ramène à celui de la transmission d'une fonction unité. Ayant admis que la voie ne transmet pas les fréquences supérieures à F, on peut l'assimiler à un filtre passe-bas. La réponse d'un tel filtre à une fonction unité est représentée à la fig. 3. Elle est caractérisée par un certain retard τ d'autant plus grand que le flanc du filtre est raide, et par un temps de montée égal à $T/2 = 1/2F$. Pour que le récepteur puisse distinguer une suite de niveaux successifs, correspondant à une suite de fonctions unités à l'émission, il faudra que le temps séparant chaque changement de niveau soit supérieur ou égal à $T/2$. En une seconde il sera donc possible de distinguer tout au plus $N = 2F$ signaux différents se succédant à des intervalles de $T/2$. La vitesse d'information R sera, d'après les définitions du chapitre 2, tout au plus égale à:

$$R = \frac{N\,{}^2\!\log n}{T} \tag{7}$$

Pour $T = 1$ s on obtient $R = 2F\,{}^2\!\log\sqrt{P/B} = F\,{}^2\!\log P/B$ bits/s.

Une analyse plus rigoureuse conduit à un résultat de forme semblable s'énonçant comme suit: *La vitesse d'information R d'un signal continu,* de puissance moyenne P, dont le spectre occupe une certaine largeur de bande $\Delta f = F$, et caractérisé par un bruit de puissance moyenne B, est tout au plus égale à une valeur maximum R_{max}.

$$R \leqq F\,{}^{2}\!\log P/B = R_{max} \tag{8}$$

La valeur R_{max} ne peut être atteinte que lorsque le signal a la même structure incohérente que le bruit (spectre continu constant).

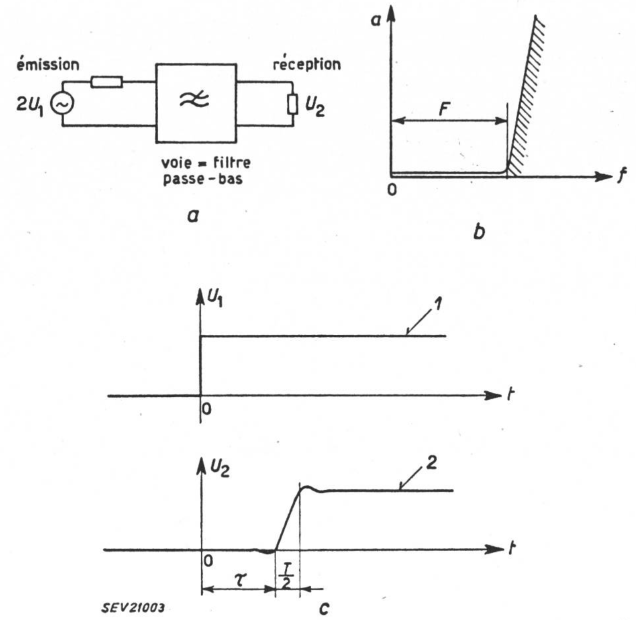


Fig. 3
Déformation d'une fonction unité au passage d'un filtre passe-bas
a schéma du système de télécommunication
b atténuation *a* du filtre passe-bas en fonction de la fréquence *f*
c réponse du filtre à une fonction unité
$\frac{1}{2}$ fonction unité émise; *2* signal reçu
$F = \frac{1}{T}$ fréquence limite
τ temps de retard
$\frac{T}{2} = \frac{1}{2F}$ temps de montée

La *capacité C d'une voie* est définie par la plus grande vitesse d'information susceptible d'être transmise par cette voie. Connaissant la vitesse d'information R_{max} du signal continu dont le spectre est limité par la largeur de bande $\Delta f = F$ de la voie, on obtient tout naturellement:

$$C = R_{max} = F\,{}^{2}\!\log P/B \tag{9}$$

Si nous désignons par S la puissance du signal reçu (bruit exclu), et par B celle du bruit à l'entrée du récepteur, le signal total reçu sera de puissance $P = S + B$, d'où:

$$C = F\,{}^{2}\!\log (1 + S/B) \tag{10}$$

5. Relation fondamentale entre la vitesse d'information *R* du message et la capacité *C* de la voie

Cette relation dite de *Tuller-Shannon* et Wiener est d'une importance capitale. Généralisant la définition de la capacité d'une voie, on pourrait l'exprimer comme suit:

Une voie de capacité C peut théoriquement transmettre un message ayant une vitesse d'information R plus petite ou égale à C, quelle que soit la nature du message et celle de la voie.

On peut l'exprimer mathématiquement par:

$$R_{message} \leqq C_{voie} \tag{11}$$

Appliquant cette formule au cas d'un message constitué par un signal basse fréquence (BF), que l'on désire transmettre avec un rapport signal/bruit donné par l'intermédiaire d'un signal haute fréquence (HF), on peut en déduire quelles seront les caractéristiques nécessaires de la voie HF. Posons les valeurs respectives de R et de C d'après les équations (8) et (10):

$$R \leqq R_0 = F_0\,{}^{2}\!\log P_0/B_0 \tag{12}$$

où

R vitesse d'information du message
R_0 vitesse d'information maximum du signal BF = capacité de la voie BF
F_0 largeur de bande du signal BF
P_0/B_0 rapport $\frac{\text{puissance}}{\text{bruit}}$ du signal BF

$$C = F\,{}^{2}\!\log (1 + S/B) \tag{13}$$

où

C capacité de la voie HF
F largeur de bande de la voie HF
S/B rapport $\frac{\text{puissance du signal HF reçu}}{\text{bruit reçu par le récepteur}}$

La relation (11) s'écrira:

$$\begin{array}{ccccc} \text{message} & & \text{signal BF} & & \text{signal HF} \\ R & \leqq & R_0 & \leqq & C \\ R & \leqq & F_0\,{}^{2}\!\log P_0/B_0 & \leqq & F\,{}^{2}\!\log (1 + S/B) \end{array} \tag{14}$$

Dans le cas optimum théorique, pour lequel $R_0 = C$, cette équation exprime la balance du compte «information» en bits/s pour le signal BF reçu et pour le signal HF intermédiaire. Cette égalité ne spécifie nullement des conditions limitant le choix de la largeur de bande HF ($= F$) par rapport à la largeur de bande BF ($= F_0$). De telles conditions sont uniquement imposées par le système de modulation utilisé, par exemple en modulation d'amplitude $F \geqq 2F_0$.

La formule $C = F\,{}^{2}\!\log (1 + S/B)$ montre l'interchangeabilité de la largeur de bande F et du rapport signal/bruit S/B. Pour une capacité C donnée, nous pouvons soit diminuer F et augmenter en conséquence S/B, soit au contraire augmenter la bande passante F, ce qui permettra une diminution du rapport S/B (rappelons cependant que B croît en général proportionnellement à F).

Théoriquement, rien ne s'oppose à ce que l'on puisse transmettre un signal BF de largeur F_0 par une voie HF de largeur F inférieure à F_0, mais ceci aux dépens du rapport signal/bruit. La réalisation d'un tel système nécessite un codage approprié du signal BF. Toutefois, il est bon de remarquer que la diminution de la bande passante se paye relativement cher: pour une diminution de moitié de la bande HF, il faudra environ doubler le rapport S/B exprimé en dB. Si, par exemple, $S/B = 40$ dB, ce qui donne un souffle déjà audible dans une communication radiotéléphonique en modulation d'amplitude, une diminution de la bande passante de moitié nécessiterait un rapport S/B d'environ 80 dB, autrement dit, un signal d'entrée au récepteur environ 5000 fois plus puissant (le bruit B a diminué de moitié, d'où 5000 = 10 000/2). Ce procédé semble donc ne pas présenter d'intérêt pratique pour la radiotéléphonie. Nous donnerons au chapitre 8 un exemple de son application à la transmission télégraphique.

6. Rendement

En établissant le rapport des quantités R_0 et C, on peut juger de l'efficacité du système utilisé. Si la vitesse d'information BF maximum est beaucoup plus petite que la capacité de la voie HF, il est clair que l'utilisation de la voie HF n'est pas efficace. Appelons ce rapport:

$\eta_{HF} = R_0/C$ = rendement HF ou coefficient d'utilisation de la voie HF (15)

Le message lui-même ayant généralement une vitesse d'information R plus petite que la vitesse maximum R_0 du signal BF, on peut encore définir:

$\eta_{BF} = R/R_0$ = rendement BF ou coefficient d'utilisation de la voie BF (16)

$\eta = \eta_{BF} \cdot \eta_{HF} = R/C$ = rendement du système de communication (17)

7. Le rendement des systèmes classiques de transmission

Ayant défini le rendement, on se demandera tout naturellement s'il existe un système accusant un rendement de 100 %.

Le système pouvant présenter le meilleur rendement HF est celui de la *transmission par bande latérale unique.* En effet, cette transmission correspond à une simple transposition du spectre de fréquence du signal (et du bruit) de basse fréquence en haute fréquence, ou inversément, selon le schéma de la fig. 4*a*. Supposant que la modulation permettant d'effectuer cette transposition de fréquences n'introduit pas de bruits parasites, ce qui est pratiquement le cas avec un bon récepteur, on obtient un rendement HF de 100 %, car on a:

$$F = F_0 \text{ et } \frac{S+B}{B} = \frac{P_0}{B_0} \text{ d'où:}$$

$$\eta_{HF} = \frac{R_0}{C} = 1 \text{ soit } 100\ \%$$

Le rendement BF dépend de la nature du message constituant le signal BF. S'il s'agit d'une conversation téléphonique, on compte en moyenne qu'un abonné ne parle que pendant la moitié du temps, l'autre moitié étant réservée à son interlocuteur. Effectivement il ne parlera que pendant environ le quart du temps, si l'on tient compte des pauses entrecoupant le dialogue et séparant chaque mot. La puissance moyenne de la voix est généralement bien en dessous du niveau maximum (environ —10 à —30 dB), de sorte que le rapport P_0/B_0, par exemple de 60 dB pour la puissance maximum, tombe effectivement à une valeur de 30 à 50 dB. Il en résulte un rendement BF de tout au plus:

$$\eta_{BF} = \frac{1}{4} \cdot \frac{30 \text{ à } 50 \text{ dB}}{60 \text{ dB}} = \frac{1}{8} \text{ à } \frac{5}{24} \text{ soit env. } 12 \text{ à } 21\ \%$$

Ces valeurs ne tiennent aucunement compte des propriétés statistiques de la voix et du langage, de sorte qu'en réalité le rendement BF est encore plus faible. Comment remédier à cette mauvaise utilisation?

Une *compression* du signal BF à l'émission, suivie d'une *expansion* à la réception permet de réduire la puissance maximum de 10 à 20 dB, mais il n'en reste pas moins que la liaison reste inutilisée pendant les trois quarts du temps.

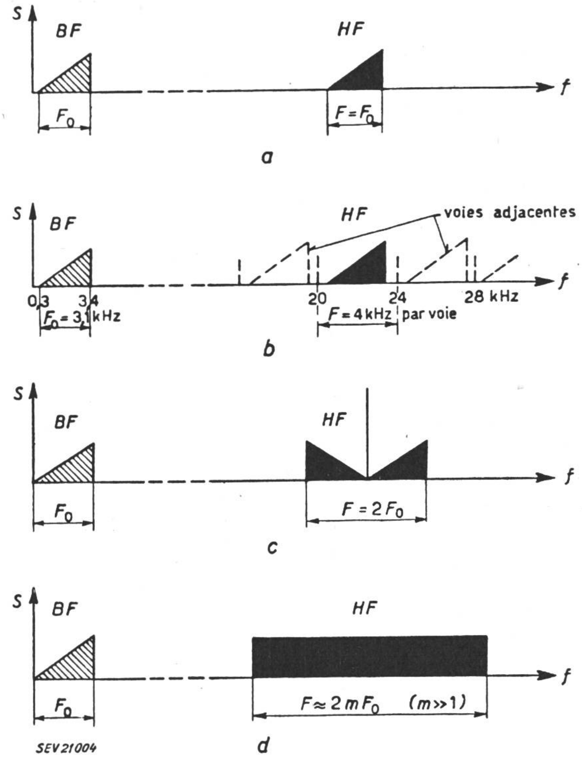


Fig. 4

Représentation schématique des largeurs de bande de différents systèmes de transmission

a transmission par bande latérale unique
b transmission par juxtaposition des voies dans l'échelle des fréquences: systèmes à courants porteurs
c transmission par modulation d'amplitude (AM)
d transmission par modulation de fréquence (FM)
S spectre
f fréquence
BF basse fréquence
HF haute fréquence
F largeur de bande de la voie *HF*
F_0 largeur de bande du signal *BF*

Dans les *systèmes à courants porteurs*, où plusieurs voies sont juxtaposées sur l'échelle des fréquences selon le schéma de la fig. 4*b*, on améliore considérablement le rendement BF en tenant compte de l'effet statistique résultant de la superposition des différentes conversations téléphoniques. D'après les résultats publiés par *Holbrook* et *Dixon* [11], la superposition de 10, 100 ou 1000 conversations téléphoniques normales ne nécessite qu'environ 4, 8 ou 40 fois la puissance requise pour une seule conversation, d'où une utilisation beaucoup plus rationnelle de la voie. Le rendement HF de ces systèmes est inférieur à 100 % du fait qu'il est nécessaire d'introduire une marge de fréquences entre les voies pour assurer leur séparation (filtrage) sans moyens prohibitifs. La largeur de bande BF des voies est généralement de 3400 — 300 = 3100 Hz. Chaque voie occupant une largeur de bande de 4000 Hz, le rendement HF sera égal au rapport des largeurs de bande, soit:

$$\eta_{HF} = \frac{3100 \text{ Hz}}{4000 \text{ Hz}} = 0{,}78 \quad \text{soit } 78\ \%$$

La simple *modulation d'amplitude* avec transmission des deux bandes latérales (voir fig. 4*c*) est moins favorable que la transmission d'une seule bande latérale. Du fait que la largeur de bande HF nécessaire est doublée ($F = 2F_0$) et que le rapport signal/bruit BF reste pratiquement le même que le rapport signal/bruit HF, on obtient:

$$\eta_{HF} \approx F_0/F = 0{,}5 \quad \text{soit } 50\ \%$$

La *modulation de fréquence* (FM) (voir fig. 4*d*) augmente encore plus la bande HF nécessaire (pour $m \gg 1$, $F \approx 2mF_0$) mais trouve une compensation partielle dans l'amélioration du rapport signal/bruit BF par rapport à la modulation d'amplitude ($P_0/B_0 \approx 3\ m^2\ S/B$ pour $S > B$). Le rendement HF est plus faible qu'en modulation d'amplitude. Par exemple, pour $m = 10$ et $S/B = 100$ (20 dB), on obtient $P_0/B_0 = 30000$ (45 dB) et $F = 20\ F_0$, ce qui donne un rendement HF de seulement 10 % $\left(\eta_{HF} = \frac{1}{20} \cdot \frac{45}{20} \approx 0{,}1\right)$. Avec une telle largeur de bande, si le rendement était de 100 %, on serait en droit d'attendre théoriquement un rapport signal/bruit BF de 400 dB (soit $P_0/B_0 = 10^{40}$).

Parmi les systèmes à modulation par impulsions, la *modulation codée* (PCM) est la plus favorable, car elle ne nécessite que 8 dB de plus que la valeur théorique pour le rapport S/B.

Nous constatons donc que les systèmes à courants porteurs offrent actuellement le meilleur rendement global sans nécessiter pour cela des installations particulièrement compliquées. Leur utilisation est toutefois pratiquement limitée à la transmission directe sur lignes. L'introduction récente de câbles coaxiaux permet de transmettre simultanément jusqu'à près de 1000 conversations sur le même câble. Au lieu de transmettre le signal HF délivré par l'installation à courants porteurs directement sur une ligne, on peut également s'en servir pour moduler en fréquence un émetteur à ondes très courtes. Le rendement BF devient alors celui relativement bon du système porteur, mais le rendement HF de la voie modulée en fréquence reste toujours aussi bas.

La modulation codée semble être susceptible de trouver un champ d'applications intéressant pour les transmissions téléphoniques à grande distance, son principal avantage résidant dans la constance du niveau BF et du rapport signal/bruit BF, indépendamment du nombre de stations relais utilisées, donc indépendamment de la longueur de la liaison. Sa complexité et sa nouveauté l'ont empêchée jusqu'ici de dépasser le stade expérimental.

Nous avons examiné rapidement différents systèmes du point de vue de leur rendement «informationnel», il va de soi qu'un tel jugement est très unilatéral et que pour émettre une opinion sur un système quelconque, il faut tenir compte de beaucoup d'autres facteurs, tels leur sensibilité aux perturbations extérieures, leur sûreté de fonctionnement, leur souplesse d'exploitation, leur prix de revient, etc.

Il est peut-être décevant de constater que les types de modulation les plus courants actuellement (AM et FM) ont un rendement HF si pauvre, et l'on peut se demander s'ils seront détrônés un jour par des systèmes plus efficaces. L'avenir le dira, mais il est fort probable que si de tels systèmes sont développés, ils ne seront appliqués qu'à certains cas spéciaux pouvant justifier leur inévitable complexité.

8. Diminution de la bande de fréquences

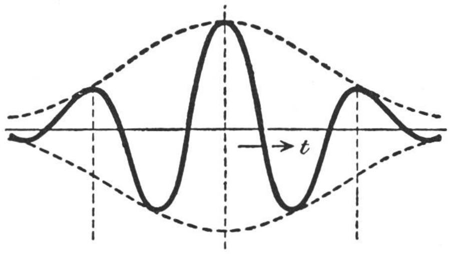
Le rapide développement des liaisons hertziennes: radiodiffusion, télévision, aides à la navigation maritime et aérienne, liaisons radiotélégraphiques et téléphoniques, etc., a provoqué une telle «congestion» des ondes de toute longueur, que les organes de contrôle internationaux ont été obligés d'assigner à chacun et pour chaque application une bande de fréquences bien délimitée. La plus stricte économie de largeur de bande HF est à l'ordre du jour. C'est une des raisons pour lesquelles de nombreux chercheurs essayent par des moyens divers de diminuer la largeur de bande HF de nos systèmes classiques de transmission. La théorie de l'information montre en effet que cela n'est pas une utopie et quelle est l'amélioration que l'on est en droit d'espérer.

Les premiers essais à modulation de fréquence n'avaient pas d'autre but que de diminuer la largeur de bande HF, avant que l'on se soit aperçu qu'au contraire elle était plus grande ou égale à celle nécessitée par la modulation d'amplitude.

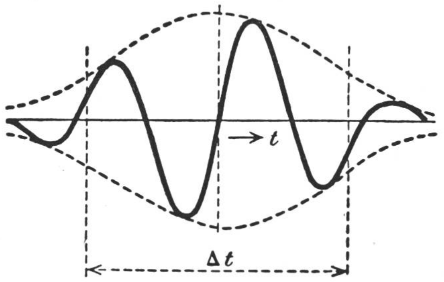
Une *augmentation du rendement BF*, que l'on pourrait qualifier d'«adaptation» du message à la voie BF à disposition, conduit soit à une amélioration du rapport signal/bruit (cas des systèmes à courants porteurs), soit à une réduction de la bande passante.

C'est à ce résultat qu'arrive le «*Vocoder*» développé par *Dudley* [12, 13]. Cet appareil ingénieux fait non seulement appel aux propriétés statistiques de la parole, mais également aux imperfections de l'oreille, laquelle a beaucoup de peine à discerner les variations de phase contrairement aux variations d'amplitude de différentes fréquences. Le «vocoder» condense la parole par des filtrages et codages appropriés dans une bande de 275 Hz de largeur, soit moins du dixième de la largeur de bande nécessaire pour une bonne reproduction. L'intelligibilité n'est pratiquement pas affectée par cette opération. Une telle transformation n'est possible que parce que notre voix présente une certaine «redondance», c'est-à-dire que l'information est exprimée avec surabondance par une succession d'éléments informateurs ayant souvent la même signification, donc en partie superflus. En parlant lentement, nous augmentons encore plus la redondance, d'où l'intelligibilité du message, en parlant plus rapidement, au contraire, nous les diminuons, ce qui exige de l'auditeur une attention plus soutenue pour capter la même quantité d'information.

Partant d'un principe différent, celui de l'effet Doppler, *D. Gabor* [14, 15] a également réalisé un appareil expérimental permettant d'effectuer une notable compression de fréquences. La limite théorique de la bande nécessaire serait de 375 Hz pour une voix d'homme et de 260 Hz pour une voix de femme.



Signal élémentaire, type « cosinus »



Signal élémentaire, type « sinus »

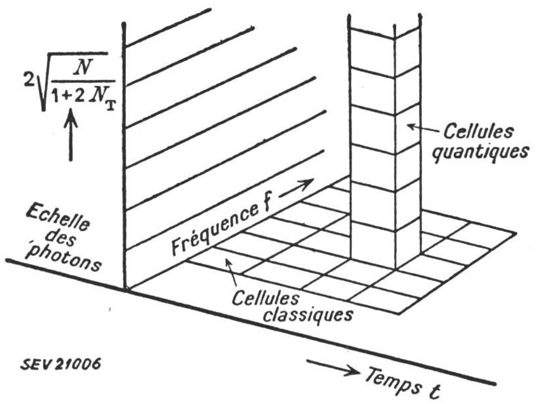
SEV21005

Fig. 5

Signaux en cloche modulés

D'après Dennis Gabor [8, page 117]

On doit également à Gabor [16] une contribution originale à la théorie de l'information. La décomposition d'un signal quelconque en signaux élementaires en forme de cloche (fig. 5) lui permet de dessiner un plan de l'information (fig. 6) ayant comme coordonnées le temps t et la fréquence ν.



SEV21006

Fig. 6

Représentation complète d'un signal quelconque dans le plan d'information

La 3e dimension est une fonction du nombre quantique N

D'après Dennis Gabor [8, page 124]

Ce plan est divisé en cellules élémentaires d'aire unité ($\Delta t \cdot \Delta \nu = 1$). En attribuant à chacune de ces cellules une certaine capacité d'information déterminée par le rapport signal/bruit (nombre fini de cellules quantiques dans la verticale), on retrouve les mêmes formules que celles exposées précédemment sur la capacité d'une voie.

Les deux réalisations de Dudley et Gabor diminuent la bande de fréquences par l'amélioration du rendement BF; la machine imaginée au chapitre 2 également. Qu'en est-il de la diminution de la bande aux dépens du rapport signal/bruit ? L'équation (10), $C = F\,{}^2\log(1 + S/B)$, nous dit qu'elle nécessite une augmentation considérable du rapport S/B. L'exemple primitif qui suit nous le montrera et permettra également de nous rendre compte de la «redondance» d'une transmission télégraphique utilisant le code Morse.

Les 3 premiers exemples (a, b et c) de la fig. 7 montrent comment il est possible, au moyen d'un codage systématique, de réduire le nombre de signaux d'un message donné, ce qui permet de le transmettre pendant le même temps par une voie de largeur de bande plus étroite. La quantité d'information transmise dans ces trois cas reste la même. Le message c ayant 3 fois moins de signaux élémentaires que le message a, il pourra être transmis par une bande 3 fois plus étroite. En compensation, il présente 8 niveaux distincts au lieu de 2 pour le message a, d'où augmentation correspondante du rapport signal/bruit minimum pour une réception correcte du message.

Nous constatons à la fig. 7b que le niveau 3 n'est jamais atteint. Cela provient d'une propriété du code Morse dans lequel les symboles (points ou traits) se suivent toujours à un nombre pair d'intervalles (2, 4, 6 ou 8). On peut donc se dispenser de prévoir le niveau 3 dans l'émission du message b, ce qui réduit la quantité d'information (et la capacité nécessaire de la voie) de 48 à 38 bits.

Le message Morse a n'est pas écrit de la manière la plus simple possible. Tous les signes marqués R sont apparemment superflus. On pourrait s'en passer pour distinguer un symbole (trait ou point) d'un autre. C'est ce que nous avons fait au message de la fig. 7d, lequel est raccourci d'environ 20 % et nécessiterait donc une bande passante 20 % plus faible. L'allongement voulu des traits et espaces du code Morse est une forme de «redondance», laquelle permet une discrimination plus aisée et plus sûre des symboles entre eux. Elle augmente les chances que le message soit reçu correctement.

Le message de la fig. 7e utilise un code dérivé de l'alphabet Morse et peut être transmis par 3 niveaux avec encore moins d'éléments que le message b. Cette façon de procéder trouve une application dans la télégraphie avec courants inversés (· = courant positif, — = courant négatif, espace = pas de courant).

A titre comparatif, nous avons reproduit encore le même message transmis par un téléscripteur du type *Murray* ou *Baudot*. Ces systèmes nécessitent une voie de capacité minimum (5 bits/lettre au lieu de 8 bits/lettre pour le Morse), mais exigent une synchronisation parfaite des dispositifs émetteurs et récepteurs.

9. Résumé et conclusion

Nous avons esquissé dans ses grandes lignes et d'une manière très simplifiée la théorie du signal et de l'information aboutissant aux relations fondamentales liant la vitesse d'information et la capacité

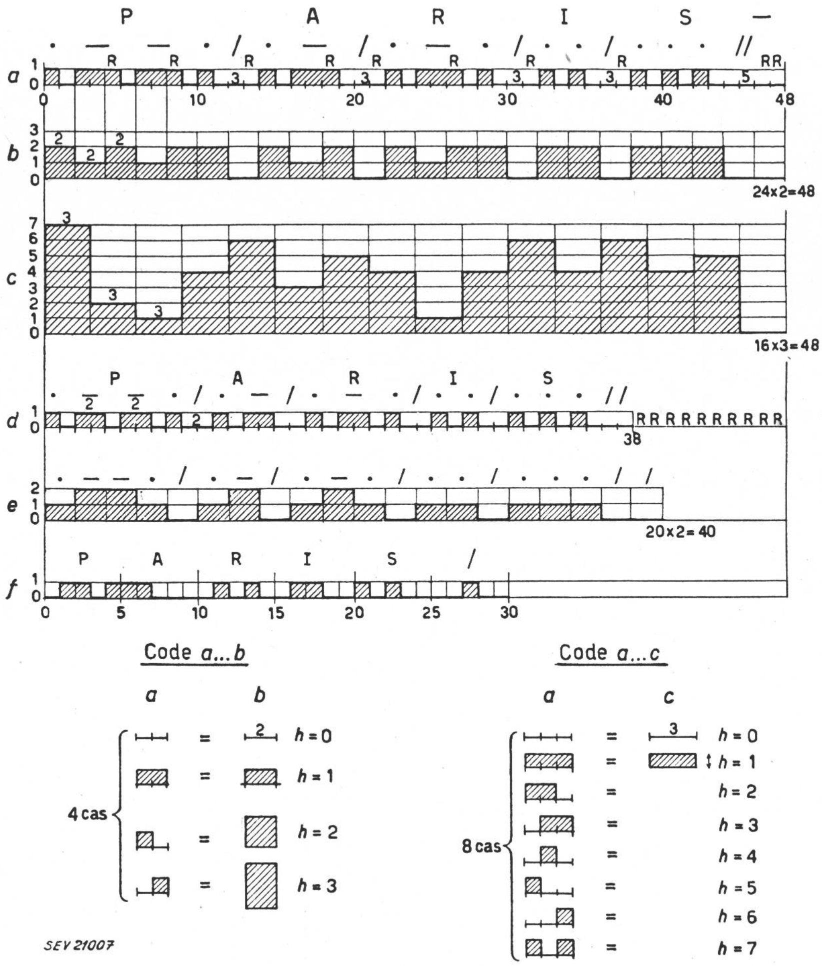


Fig. 7

Diminution de la largeur de bande nécessaire pour la transmission d'un message télégraphique

Message transmis: P A R I S —, soit 5 lettres + 1 séparation. Nous admettons la largeur de bande nécessaire comme étant inversément proportionnelle au nombre de signaux élémentaires formant le message.

a) Code Morse normal

Message transmis par 48 signaux élémentaires de niveau 0 ou 1 (2 niveaux)
Largeur de bande relative = 1 (par définition)
Quantité d'information = 48 $^2\log 2$ = 48 bits (8 bits/lettre)
Les signaux marqués *R* ne sont pas indispensables à la compréhension du message, ils lui donnent une certaine «redondance»

b) Transmission par ½ largeur de bande

Le message *a* a été transcrit selon le code *a*—*b* pour remplacer une suite de deux signaux par un seul pouvant avoir 4 niveaux différents (0, 1, 2 et 3)
Nombre de signaux élémentaires = 24
Largeur de bande relative = 24/48 = ½ (par rapport à *a*)
Quantité d'information: 24 $^2\log 4$ = 48 bits (8 bits/lettre) pour les 4 niveaux
ou: 24 $^2\log 3$ = 38 bits (6,3 bits/lettre) pour les 3 niveaux

c) Transmission par ⅓ de largeur de bande

Le message *a* a été transcrit selon le code *a*—*c* pour remplacer une suite de 3 signaux par un seul signal pouvant avoir 8 niveaux différents (0, 1, ... 7)
Nombre de signaux élémentaires = 16
Largeur de bande relative = 16/48 = ⅓
Quantité d'information = 16 $^2\log 8$ = 48 bits (8 bits/lettre)

d) Code Morse raccourci

Les signaux superflus marqués *R* dans le message *a* ont été supprimés
Nombre de signaux élémentaires = 38 (2 niveaux)
Largeur de bande relative = 38/48 ≈ 0,8
Quantité d'information = 38 $^2\log 2$ = 38 bits (6,3 bits/lettre)

e) Code Morse à 3 niveaux

— = niveau 2, • = niveau 1, séparation = niveau 0
Nombre de signaux élémentaires = 20 (3 niveaux)
Largeur de bande relative = 20/48 = 0,42
Quantité d'information = 20 $^2\log 3$ = 32 bits (5,3 bits/lettre)

f) Code Murray (téléscripteurs)

Chaque lettre est composée d'une suite de 5 signaux
30 signaux élémentaires (2 niveaux)
Largeur de bande relative = 30/48 = 0,63
Quantité d'information = 30 $^2\log 2$ = 30 bits (5 bits/lettre)

de la voie. A l'aide de ces nouvelles notions il est possible d'étudier les différents systèmes de communication du point de vue «informationnel»; on en déduit le rendement ou l'efficacité du système étudié. L'examen de plusieurs systèmes classiques de transmission fait ressortir le bon rendement global des systèmes à courants porteurs et le rendement plutôt médiocre des systèmes classiques de liaisons hertziennes en AM et FM. Il semble à première vue qu'une solution alléchante s'offre aux liaisons radiotéléphoniques multiples dans l'utilisation simultanée des deux procédés offrant le meilleur rendement: soit un système à courants porteurs de bon rendement et de grande souplesse d'exploitation modulant un émetteur à modulation par impulsions codées (PCM), lequel présente de nombreux avantages. L'examen de cette solution et des difficultés de réalisation qu'elle présente sortirait du cadre de cet exposé.

Les solutions originales proposées pour «condenser» la bande passante d'une conversation téléphonique sont encore trop compliquées pour être utilisées à grande échelle.

Nous espérons que ces quelques lignes auront quelque peu familiarisé le lecteur avec les problèmes soulevés par la théorie du signal et de l'information et montré le rôle éminent qu'elle est appelée à jouer dans la technique des télécommunications.

Bibliographie

[1] *Wiener, Norbert:* Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine. New York: Wiley; Paris: Hermann 1948.

[2] *A. A.:* Sur le mot «Cybernétique». Onde électr. t. 31(1951), nº 290, mai, p. 257.

[3] *Hartley, R. V. L.:* Transmission of Information. Bell. Syst. techn. J. t. 7(1928), nº 3, juillet, p. 535...563.

[4] *Nyquist, H.:* Certain Factors Affecting Telegraph Speed. Bell. Syst. techn. J. t. 3(1924), nº 2, avril, p. 324...346.

[5] *Nyquist, H.:* Certain Topics in Telegraph Transmission Theory. Trans". Amer. Inst. Electr. Engr". t. 47(1928), nº 2, avril, p. 617...644.

[6] *Shannon, Claude E.:* A Mathematical Theory of Communication. Bell. Syst. techn. J. t. 27(1948), nº 3, juillet, p. 379...423; nº 4, octobre, p. 623...656.

[7] *Shannon, Claude E.* et *Warren Weaver:* The Mathematical Theory of Communication. Urbana: University of Illinois Press 1949.

[8] *La Cybernétique:* Théorie du signal et de l'information. Réunions d'études et de mises au point tenues sous la présidence de *Louis de Broglie,* avec le concours de *Julien Loeb, Robert Fortet, M. D. Indjoudjian, André Blanc-Lapierre, P. Aigrain, J. Oswald, Dennis Gabor, Jean Ville, Pierre Chavasse, Serge Colombo, Yvon Delbord, Jean Icole, Pierre Marcou* et *Edouard Picault.* Paris: Editions de la revue d'optique théorique et instrumentale 1951.

[9] *Brillouin, L.:* Maxwell's Demon Cannot Operate: Information and Entropy I. J. appl. Phys. t. 22(1951), nº 3, mars, p. 334...337; Physical Entropy and Information II. p. 338...343.

[10] *Brillouin, L.:* Information Theory and Most Efficient Codings for Communication or Memory Devices. J. appl. Phys. t. 22(1951), nº 9, septembre, p. 1108...1111.

[11] *Holbrook, B. D.* et *J. T. Dixon:* Load Rating Theory for Multi-Channel Amplifiers. Bell. Syst. techn. J. t. 18(1939), nº 4, octobre, p. 624...644.
[12] *Dudley, Homer:* Remaking Speech. J. Acoust. Soc. Amer. t. 11(1939/40), nº 2, octobre, p. 169...177.
[13] *Potter, Ralph Kimbal, George A. Kopp* et *Harriet C. Green:* Visible Speech. New York: Nostrand 1947.
[14] *Gabor, Dennis:* Theory of Communication. J. Instn. Electr. Engr"., Part. III, t. 93(1946), nº 26, novembre, p. 429...457.
[15] *Gabor, Dennis:* New Possibilities in Speech Transmission. J. Instn. Electr. Engr"., Part. III, t. 94(1947), nº 32, novembre, p. 369...390.
[16] *Gabor, Dennis:* Recherches sur quelques problèmes de télécommunications et d'acoustique. Onde électr. t. 28 (1948), nº 260, novembre, p. 433...439.

Adresse de l'auteur:
Roger Dessoulavy, Ing., Professeur à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne, 45, avenue Vulliemin, Lausanne.

Nouveaux matériaux isolants pour la technique des câbles

Par *R. Goldschmidt,* Lausanne

621.211.9

De nouveaux matériaux isolants — spécialement le polyéthylène abrégé polythène (PT) et le chlorure de polyvinyle (PVC) — se sont largement introduits dans la technique de la fabrication des câbles et ont permis de résoudre d'intéressants problèmes techniques.

In der Technik der Kabelfabrikation haben sich neue Isolierstoffe, besonders das Polyäthylen, abgekürzt Polythen (PT), und das Polyvinylchlorid (PVC) weitgehend eingeführt. Dank ihnen konnten interessante technische Probleme gelöst werden.

1. Introduction

«Technique» ne s'entend plus sans «électrotechnique» et l'électrotechnique ne peut pas se concevoir sans l'élément le plus important de transmission, le câble. Passons brièvement en revue le développement que les nouveaux matériaux isolants ont permis d'accomplir dans ce domaine. Les câbles sont des conducteurs de courant électrique, isolés, qui, soit individuellement soit torsadés en groupes, sont entourés d'un manteau servant de protection physique, chimique et mécanique. Les câbles sont posés dans le sol, tirés dans des caniveaux et des tubes, fixés dans des puits, immergés dans des rivières, lacs et mers ou montés le long des murs ou sur des poteaux.

Les câbles servent à la transmission de signaux ou au transport d'énergie électrique. On distingue ainsi entre câbles pour courant faible et câbles pour courant fort avec les subdivisions câbles téléphoniques et haute fréquence, respectivement câbles à basse et haute tension.

L'industrie des câbles forme dans tous les pays industrialisés un secteur important de l'activité industrielle. Ses débuts ont été inspirés par les méthodes de fabrication appliquées dans l'industrie des textiles. Il y a plus d'un siècle que différents inventeurs ont proposé d'entourer des fils métalliques avec des matières isolantes, de les poser ainsi dans le sol et de les utiliser pour le transport du courant électrique. En principe, rien n'a été changé à cette idée. Comme matériel conducteur on utilise presque exclusivement le cuivre qui réunit de bonnes qualités électriques et mécaniques avec un prix abordable. Il n'a été remplacé par l'aluminium qu'en période de pénurie du cuivre. La matière isolante était et est encore essentiellement le papier. Il est utilisé séché et aussi peu serré que possible pour les câbles téléphoniques, imprégné d'huile ou de compound pour les câbles à courant fort. A côté du papier, le caoutchouc et la guttapercha, la soie et le coton ou l'émail à base d'huile ont été et sont utilisés comme matières isolantes. Comme manteau protecteur, on met normalement un tube de plomb protégé contre la corrosion par une couche de jute ou par un autre textile, imprégné de bitume. Une armure en ruban de fer asphalté ou en fils profilés zingués sert de protection mécanique.

Si le principe de la construction des câbles est donc resté essentiellement le même, le développement technique, soit quantitatif soit qualitatif a été très important. Machines et installations ont été considérablement agrandies et améliorées, les modes de contrôle des matières premières et des produits finis perfectionnés, la précision et la régularité de la fabrication sensiblement accrues. Mais en général on doit dire que l'industrie des câbles est une industrie conservatrice. C'est seulement depuis une dizaine d'années qu'une transformation importante s'accomplit. On doit chercher l'origine de ce changement dans les possibilités créées par les nouveaux matériaux artificiels, essentiellement les matières plastiques. On avait déjà, à plusieurs reprises, essayé d'utiliser des matières artificielles dans la technique des câbles, tout spécialement des câbles sous-marins. Ainsi la Guttagentzsch et la Paragutta (utilisée pour le câble Key West–Havanna) ont remplacé la Guttapercha. Mais soit leur prix trop élevé, soit leurs caractéristiques trop spéciales ont empêché leur utilisation sur une large échelle. Mais aujourd'hui une très importante industrie chimique produit en masse des matières artificielles remplissant des conditions techniques et économiques intéressantes.

Dans cet aperçu, les qualités de ces matériaux vont être résumées en tenant compte des exigences que pose la construction de différents types de câbles. Des exemples de câbles exécutés montreront les réalisations que la technique des câbles a pu accomplir ces dernières années.

2. Les qualités diélectriques de la matière

Les matières isolantes sont caractérisées par les qualités diélectriques suivantes:

Résistance d'isolement
Constante diélectrique
Angle de pertes diélectriques
Rigidité diélectrique

La première de ces qualités est mesurée avec du courant continu, les autres normalement avec du courant alternatif. Toutes ces qualités dépendent fortement de la température. La cause en est essentiellement le changement de la viscosité de ces matériaux avec la température. Les matières isolantes sont normalement des corps amorphes. La liaison