

électronique

n°47

PDF Page Organizer - Foxit Software

septembre 1992

23 FF/168 FB/7,80 FS
mensuel

elet

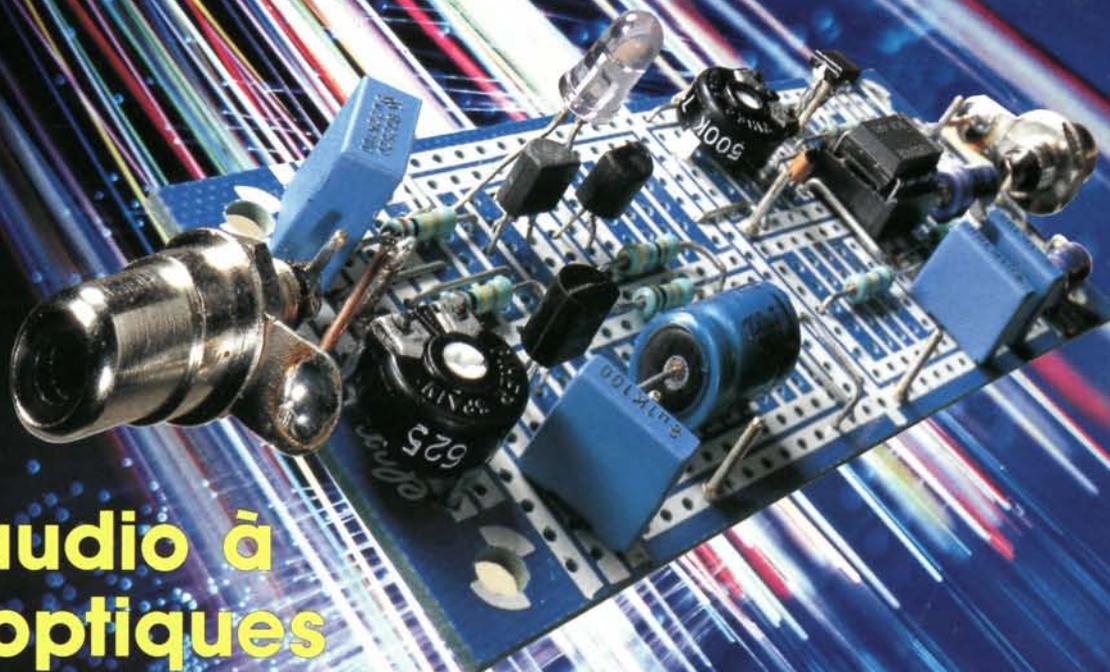
**le refroidissement
des semi-conducteurs**

**module de réception BLU
avec circuit imprimé**

**horloge pour
le scrabble ou le rami
avec circuit imprimé**

explorez l'électronique

**ligne audio à
fibres optiques**



M2510 - 47 - 23,00 F



SOMMAIRE ELEX N°47

6 ➤ *elexprime* : le courrier des lecteurs

56 ➤ mots croisés

56 ➤ petites annonces gratuites

I.N.I.T.I.A.T.I.O.N

4 ➤ Rési & Transi : bande dessinée

52 ➤ système K : le multivibrateur bistable
avec circuit imprimé

9 ➤ le refroidissement des semi-conducteurs
comment choisir un radiateur

14 ➤ la fibre optique

24 ➤ la modulation
les principes de la modulation
de fréquence et d'amplitude

R.É.A.L.I.S.A.T.I.O.N.S

20 ➤ une ligne audio sous verre

30 ➤ un module BLU pour récepteur OC
avec circuit imprimé

34 ➤ une horloge pour jeu de scrabble ou de rami
avec circuit imprimé

40 ➤ un interrupteur crépusculaire
avec circuit imprimé

44 ➤ un lecteur expérimental
de codes à barres

MON COUP DE CHAPEAU
Analogique antichoc alternatif

Articles très intéressants, ainsi que la moyenne de la revue. Peut-être un peu trop de gadgets mais ils sont bien expliqués, donc motivant.

MON COUP DE SAVATE
CAO "conception assistée par ordinateur"

Après lecture : rien compris en informatique. Il faudrait peut-être commencer par le début pour les ignorants comme moi.

Joël Guillemot



Le propos de l'article sur la conception assistée par ordinateur était plus de vous ouvrir des horizons que de vous initier à la micro-informatique. Beaucoup de revues spécialisées le font, certaines le font bien. Il n'était pas non plus de recopier le mode d'emploi du logiciel. Notre but est atteint si nous avons pu éveiller votre curiosité, si nous avons démystifié ces grands mots, ou si quelqu'un a pu trouver une utilisation intelligente à cette machine dont il s'est équipé sans trop savoir ce qu'il allait en faire. Si la micro-informatique vous tente, le dessin de circuit peut être une raison de passer à l'acte. Il vous faudra malgré tout apprendre, sans nous, comment manipuler la machine, les disquettes, les fichiers... LAYO FRANCE, qui diffuse le logiciel (programme) de dessin de circuits que nous avons présenté (ELEX n°42 mars 1991), annonce maintenant un logiciel de dessin de schémas, avec les « ponts » nécessaires entre le schéma théorique et le dessin du cuivre. Les versions de démonstration permettent de réaliser entièrement de petits projets, et d'apprendre comment travaillent les professionnels. Cela contrairement aux logiciels « d'amateurs », qui ne sont guère plus que des planches à dessin électroniques.

Dans le dernier numéro, j'ai bien reçu votre appel. Bien que les mots croisés ne soient pas indispensables à l'électronique, ça détend 5 minutes. La preuve : je viens de passer plus de deux heures pour concocter cette

grille. Elle n'est pas très géniale à mon avis, je ferai mieux la prochaine fois si vous remettez un petit SOS. PS : Pour mon convertisseur 12 V/220 V (voir elexprime du n°43) mea culpa. Maintenant il fonctionne très bien. Celui du n°23 n'est pas assez puissant pour un fer à souder et une lampe. SVP ne supprimez pas ELEXPRIME que je ne vois pas ce mois-ci (46).

Michel DE MARCHI
03700 BRUGHEAS



Merci d'avoir répondu à ce SOS que d'ailleurs nous renouvelons ici. Votre grille se trouve page 56. C'est un bon début, continuez et signalez vos définitions ! ELEXPRIME est de retour. Pour vous plaire...

Pouvez-vous me venir en aide ?

J'ai entrepris la réalisation du compresseur de micro Elex N° 39 décembre 91, mais ça ne fonctionne pas. N'y a-t-il pas une erreur ? un rectificatif ?

Une erreur de composants, C6-C13-C14 etc. sont des 2,2 µF énormes pour être implantés sur le C.I ? Peut-on s'en servir avec un micro courant de sono et une table de mixage ? [...]

M. François ROSSI
81400 CARNAUX



Il n'y a pas d'erreur sur la valeur des condensateurs, mais vous avez peut-être récupéré des composants dont la tension d'isolement est inutilement élevée pour cette application. Si vous avez renoncé à les implanter, ce peut être une raison suffisante pour que le montage ne fonctionne pas.

Les étages d'entrées sont prévus pour des microphones à électret. Si vous voulez utiliser des micros dynamiques, il faudra supprimer les résistances R1 et R20 qui servent à l'alimentation des électrets. Si vous voulez utiliser un signal déjà pré-amplifié, comme celui d'une sortie de table de mixage, il faut l'appliquer à l'une des entrées auxiliaires à « haut » niveau, A1 à A3 ou B1 à B3.

Bravo pour cette revue et mille excuses [...] Au risque de me faire "allumer", je tiens à vous préciser que j'enseigne l'électronique et que bon nombre de mes élèves lisent ELEX... Je vais donc commencer mon petit exposé.

1) Avis favorable

- Articles réalisés avec beaucoup de soins, de clarté et de précision.
- De très bonnes analogies
- Dessins superbement réalisés
- Très peu d'erreurs

2) Avis réservé

- Réponse aux lecteurs parfois très acides. Vous êtes même très durs quelquefois.
- Certains schémas utilisent trop de composants discrets.
- Pas assez de montages en liaison avec l'informatique (liaison circuit -> PC).

3) Pas d'avis défavorable

4) Idée :

Serait-il possible de créer des fiches cartonnées 21 x 29,7, que l'on pourrait ranger dans un classeur ELEX. ces fiches serviraient de pense-bête et seraient, en fait, le résumé d'un article paru dans ELEX. Par exemple, une fiche sur le transistor présenterait :

- les divers types (PNP et NPN)
- l'emploi du transistor (commutation et ampli)
- les formules de base
- les principaux montages (émetteur commun, collecteur commun...)
- les brochages courant
- le numéro d'ELEX dans lequel le transistor est plus précisément étudié;

Ces fiches seraient classées [...]

Je voulais souligner aussi l'intérêt que je porte aux personnalités qui ont contribué au développement et autres découvertes sur l'électricité et l'électronique. Un rapide historique et une photographie aideraient à mieux connaître les responsables de notre passe-temps favori. Par exemple, je n'ai jamais pu savoir qui est ou était Karnaugh. Pouvez-vous m'aider ? [...]

M. Alain TARAUD
44400 REZÉ



Puisqu'il semble que vous souhaitiez vous faire « allumer », vous ne couperez pas à un petit jeu de mots sur votre patronyme : pensez-vous que l'enseignement de l'électronique est la bonne filière pour un taraud ?

Votre idée de fiches est intéressante, mais le résultat serait plutôt un livre qu'un magazine. Dans le genre, Publitrion propose L'électronique ? Pas de panique ! Chaque chapitre est suivi d'un résumé, et le livre se termine sur un appendice qui reprend dans l'esprit de vos propositions les caractéristiques de quelques composants parmi les plus courants (transistors, zeners, LED...).

Quant aux inventeurs et précurseurs, ils nous intéressent aussi, comme le prouvent les quelques biographies résumées que nous avons déjà publiées. Malheureusement les sources sont rares et maigres : nous n'avons rien trouvé sur M. Karnaugh, ni dans le Robert ni dans l'Encyclopaedia Universalis. Nous lançons donc un appel à toutes les bonnes volontés.

L'utilisation de composants discrets dans les montages est un parti pris sur lequel vous devriez être d'accord avec nous. C'est en examinant le rôle de chaque composant qu'on comprend le mieux le fonctionnement de l'ensemble et le fonctionnement du circuit intégré qui remplit la même fonction. Quand vous aurez réfléchi et que vous serez d'accord, vous allez être enchanté par le montage que nous proposerons le mois prochain (ou le mois suivant si le beau temps persiste) : une alimentation à circuit intégré 723 (un vieux de la vieille) qui permet de remplacer n'importe quel régulateur de la série 78xx, mais aussi des modèles plus puissants (plusieurs ampères) et des modèles à faible différence de tension entrée-sortie.

Si nous gardons nos distances, dans ELEX au moins, vis-à-vis de la micro-informatique, c'est un autre parti pris. Il existe des revues spécialisées que nos lecteurs lisent avec profit, une fois armés des notions principales d'électronique. Tout ce que nous pouvons ajouter, c'est que les micro-ordinateurs ne sont jamais à l'aise quand ils se trouvent au contact du monde extérieur. Quelle que soit l'application envisagée, il faut impérativement séparer les alimentations et isoler les lignes d'entrée et de sortie par des relais ou des opto-coupleurs : les conditions de la vie réelle sont rarement celles du laboratoire.

* Mais non, papi, il ne s'agit pas de Sadi...



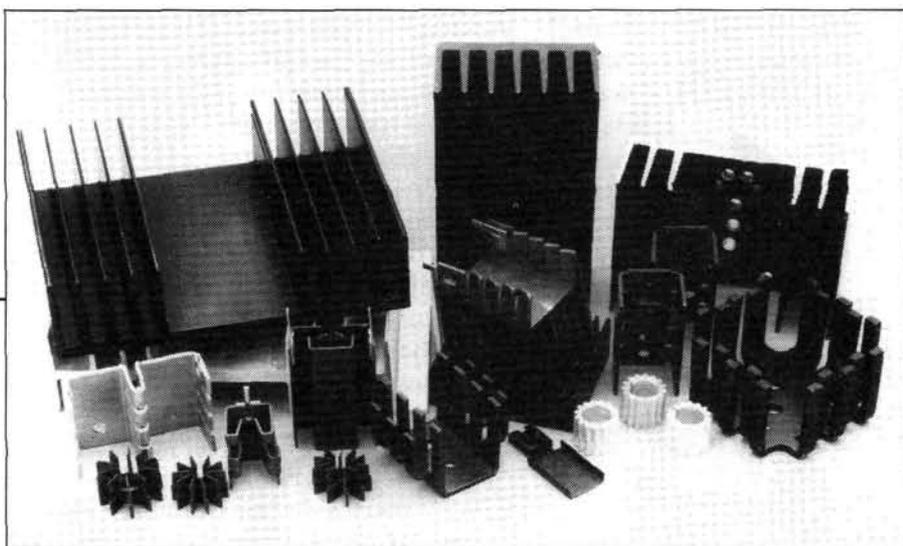
Dans beaucoup de montages électroniques, certains des composants peuvent s'échauffer plus ou moins fortement. C'est dans les alimentations et les amplificateurs que cet échauffement est le plus sensible. Pour éviter la surchauffe des composants qui produisent cette chaleur, on les monte souvent sur un radiateur, qui doit avoir des dimensions suffisantes pour évacuer tout l'excédent d'énergie. Des dimensions suffisantes, mais quelles dimensions précisément ? Nous allons essayer de répondre à cette question.

La plupart des composants électroniques dégagent de la chaleur quand ils sont traversés par un courant électrique. Ce n'est pas une catastrophe en soi, au moins tant que la température ne s'élève pas trop. Beaucoup de composants, surtout les semi-conducteurs, risquent de laisser leur vie en cas de surchauffe. C'est pour prévenir ce risque que les transistors de puissance et certains circuits intégrés sont prévus pour être montés sur un radiateur, lequel doit être capable d'évacuer rapidement la chaleur. Avant de nous pencher sur le fonctionnement des refroidisseurs, voyons ce qu'est la chaleur et comment elle se propage. Les sciences physiques en vigueur actuellement nous apprennent que toute matière est constituée de molécules que maintiennent ensemble des forces statiques. Si vous regardez le papier de ce magazine, vous pouvez supposer que les molécules qui le constituent sont rangées régulièrement côte

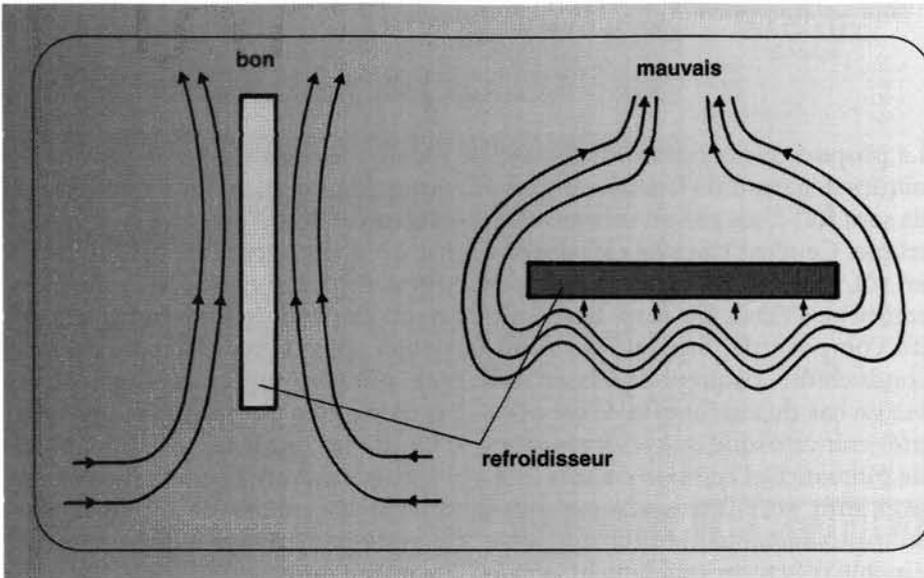
à côte ; rien n'est plus faux. Les molécules ne sont pas fixes, mais seulement à peu près fixes. On a établi qu'elles oscillent autour d'un point fixe. La vitesse des mouvements dépend de la température de l'objet ; plus la température est élevée, plus les molécules s'agitent. Si nous posons un doigt sur un objet chaud, les molécules de la peau s'agitent davantage, l'agitation est interprétée comme de la chaleur par le système nerveux.

L'espace dans lequel les molécules peuvent se mouvoir est limité par la présence des molécules voisines. L'agitation des molécules s'accompagne de chocs avec les voisines. Quand la molécule qui reçoit le choc a une vitesse inférieure à celle de la molécule qui produit le choc, une partie de l'énergie cinétique se transmet : la molécule la plus lente accélère, la plus rapide se ralentit. En d'autres termes, l'énergie se transmet d'une molécule à l'autre.

le refroidissement des semi-conducteurs



la loi d'Ohm de la chaleur



Le mouvement de convection est ralenti par un radiateur horizontal ; la surface supérieure se trouve en contact avec une masse d'air pratiquement immobile. Si vous ne savez pas dans quelle position votre montage fonctionnera, ou si vous êtes obligé d'installer le radiateur à l'horizontale, prévoyez une forte marge de sécurité.

Cette propagation de la chaleur est comparable à la circulation du courant électrique, c'est pourquoi nous parlerons de conduction thermique, comme nous parlons de conduction électrique. La propagation de la chaleur d'un point à un autre ne se produit que s'il existe une différence de température entre eux, de la même façon que le courant électrique ne naît que s'il y a une différence de potentiel. Plus la différence de température est importante, plus la quantité de chaleur transmise est importante, tout comme l'intensité du courant électrique est propor-

tionnelle à la différence de potentiel. Le transport d'un endroit à l'autre d'une quantité d'énergie donnée en un temps donné est considéré comme un courant de chaleur, il est exprimé en watts, ou joules par secondes (la quantité d'énergie s'exprime en joules, un joule en une seconde est un watt). Ce qu'on appelle intensité dans le cas du courant électrique (le nombre d'électrons qui se déplacent en une seconde) est remplacé pour la chaleur par la puissance (P_W).

Les similitudes entre le courant électrique et le courant thermique ne s'arrêtent pas là. La propagation de la chaleur est limitée par la résistance du matériau, comme celle du courant électrique par la résistance du conducteur. Tous les matériaux ne laissent pas aussi facilement leurs molécules se déplacer et propager leur énergie. La résistance que doit vaincre le courant de chaleur s'appelle résistance thermique (nous y reviendrons).

La chaleur peut se déplacer d'une autre façon : par convection. Dans la convection, les molécules d'air qui viennent au contact d'un objet chaud commencent à s'agiter, l'air devient plus chaud. Comme on peut le constater en regardant une montgolfière, l'air chaud s'élève au dessus de l'air froid. L'air réchauffé au contact de l'objet chaud s'élève et laisse la place à de l'air froid qui va, à son tour, recevoir de l'énergie et laisser sa place. C'est ainsi que naît un courant d'air ininterrompu qui transporte de l'énergie. Le courant ne s'arrêtera que lorsque l'objet aura

la même température de son environnement.

Le dernier mode de transport de la chaleur est le rayonnement (infrarouge). Un objet à haute température rayonne de l'énergie sous la forme d'oscillations électro-magnétiques (chaleur et éventuellement lumière visible, comme dans le cas d'une lampe à incandescence). Ce rayonnement réchauffe les objets environnants (l'air aussi) et refroidit l'objet qui le produit.

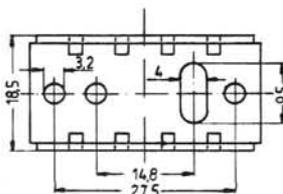
le radiateur

Le refroidissement des transistors et des circuits intégrés nous mettra en présence des trois modes de transport de la chaleur que nous avons vus : la conduction, la convection et le rayonnement. À l'intérieur du boîtier du semi-conducteur, la chaleur est transmise par conduction de la puce à la languette de refroidissement. C'est toujours par conduction que la chaleur se répartit uniformément dans toute la languette. C'est ensuite par convection que la languette transmet sa chaleur à l'environnement. Le courant d'air est plus vif si la languette est disposée verticalement, car les molécules d'air peuvent lécher toute la surface chaude (voir la figure 1). La surface de la languette est importante aussi. Plus la surface est importante, plus il y a de molécules d'air en contact avec le refroidisseur, meilleur est le refroidissement. C'est pour augmenter la surface de contact que beaucoup de radiateurs sont munis d'ailettes. Cette forme augmente fortement la sur-

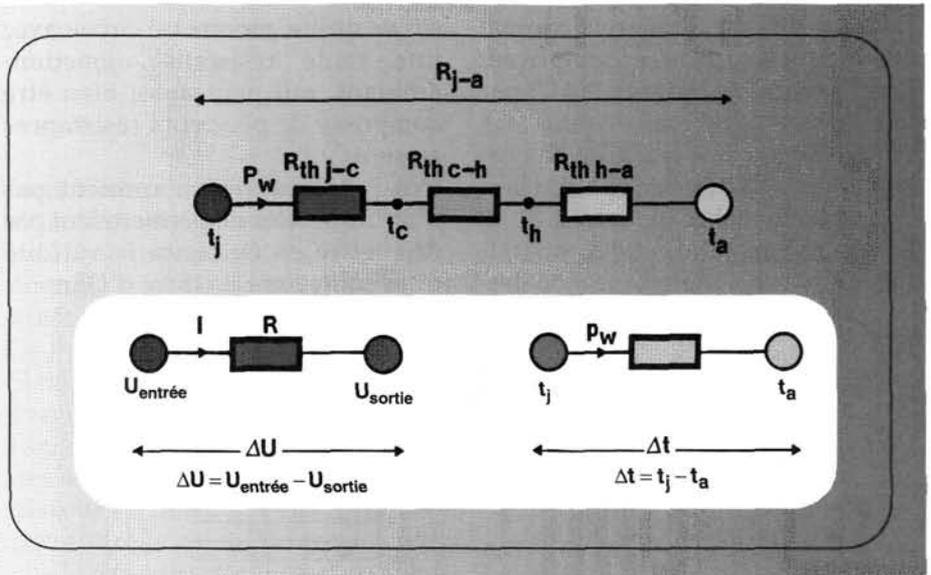
Le type ICK35, qui sert à notre exemple de calcul, peut servir aussi bien pour le boîtier TO220 des régulateurs des séries 78xx et 79xx que pour le boîtier TO126 de certains transistors de moyenne puissance.



ICK35
20 K/W
(TO220)



Les résistances thermiques en série s'ajoutent comme les résistances électriques : le flux de chaleur doit les traverser toutes pour passer de la source de chaleur jusqu'à l'air, comme le courant électrique doit circuler à travers toutes les résistances.



face d'échange sans augmenter exagérément l'encombrement. Le matériau qui sert à la fabrication des radiateurs est le plus souvent l'aluminium. Comparé au cuivre, il est presque aussi bon conducteur de la chaleur, tout en étant moins cher. La surface anodisée noir mat améliore un peu le rayonnement des infrarouges, beaucoup l'esthétique ; en fait la principale qualité de l'aluminium anodisé (noir ou jaune) est sa résistance aux atmosphères agressives.

résistance thermique

Comme nous le disions, la propagation de la chaleur se heurte à une certaine résistance, la résistance thermique, désignée par R_{th} . L'unité de résistance thermique est le degré Celsius par watt ($^{\circ}C/W$) ou le kelvin par watt (K/W). Le degré Celsius et le kelvin sont des unités identiques, au début de l'échelle près. L'échelle kelvin commence au *zéro absolu*, équivalent à $-273^{\circ}C$: la glace fondante est à $0^{\circ}C$, ou à 273 K. Dans nos calculs, seules interviennent des dif-

férences de température, il est donc indifférent que les températures soient exprimées en degrés Celsius ou en kelvin. Autant nous habituer à travailler avec des kelvin, qui sont l'unité officielle du système international (SI).

Pour un transistor monté sur un radiateur, la résistance thermique R_{th} est celle que rencontre le flux de chaleur depuis la « puce » de silicium jusqu'à l'air ambiant. Elle est constituée par la mise en série de plusieurs résistances thermiques : entre la pastille de silicium et la languette métallique, entre la languette et le radiateur, entre le radiateur et l'air (voir la **figure 2**). Les trois résistances sont désignées par les abréviations suivantes, qu'il vaut mieux utiliser sans les traduire, telles qu'on les trouve dans les notes des fabricants.

$R_{th j-c}$ désigne la résistance entre la jonction (j) et le boîtier (case en anglais).

$R_{th c-h}$ désigne la résistance entre le boîtier (c) et le radiateur (heatsink en anglais)

$R_{th h-a}$ désigne la résistance entre le radiateur (h) et l'air ambiant (a).

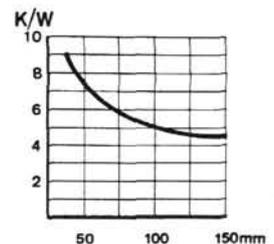
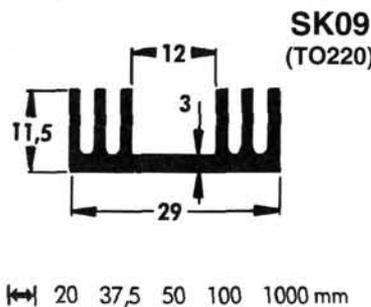
Nous pouvons trouver aussi d'autres résistances, comme celle de boîtiers qui ne comportent pas de languette de refroidissement : $R_{th j-a}$ désigne la résistance entre la jonction et l'air ambiant. La résistance thermique des semi-conducteurs fait partie des données présentes dans tous les recueils de caractéristiques. La seule qui nous intéresse est celle des composants de puissance. Par ailleurs les bons revendeurs de composants sont capables de vous indiquer la résistance thermique des radiateurs qu'ils vous fourguent.

la loi d'Ohm thermique

Nous avons constaté que les flux de chaleur pouvaient, par beaucoup de points, se comparer à des courants électriques. Nous savons que le courant électrique circule à travers une résistance quand il règne une différence de potentiel (U) à ses bornes. Nous pouvons calculer l'intensité de ce courant grâce à la loi d'Ohm.

$$I = U/R$$

Le radiateur SK09, qui a comme équivalent le ML35 chez d'autres fabricants, peut équiper la plupart des régulateurs de tension dans les applications courantes. La courbe caractéristique montre qu'il est inutile de l'utiliser dans des longueurs supérieures à 100 mm. On peut considérer que la résistance thermique de la longueur supplémentaire, du fait de la section relativement faible, empêche la chaleur de se propager au-delà des 100 mm.



Pour un flux de chaleur, la comparaison peut continuer, en remplaçant la différence de potentiel (ΔU) par une différence de température (Δt), l'intensité par une quantité de chaleur (P_W) et la résistance électrique (R) par la résistance thermique (R_{th}). La figure 3 résume cette comparaison. La partie « thermique », le des-

sin de droite, montre un circuit avec une seule résistance, jonction-ambient, qui peut aussi bien être composée de plusieurs résistances en série.

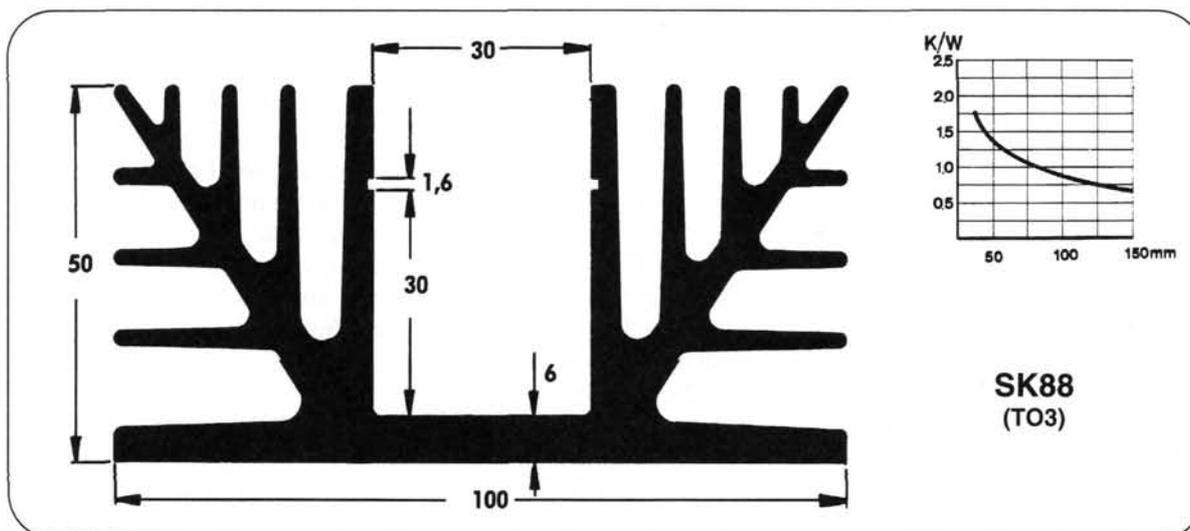
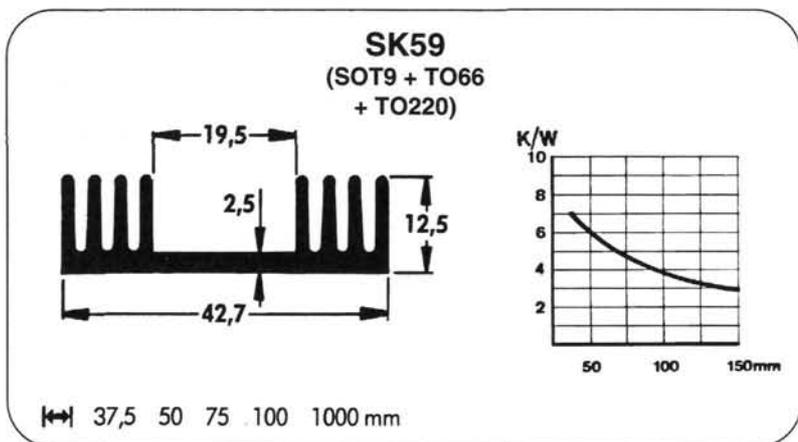
Ces comparaisons n'auraient pas d'utilité si elles ne permettaient pas de mettre en évidence la validité d'un équivalent de la loi d'Ohm :

$$P_W = \Delta t / R_{th}$$

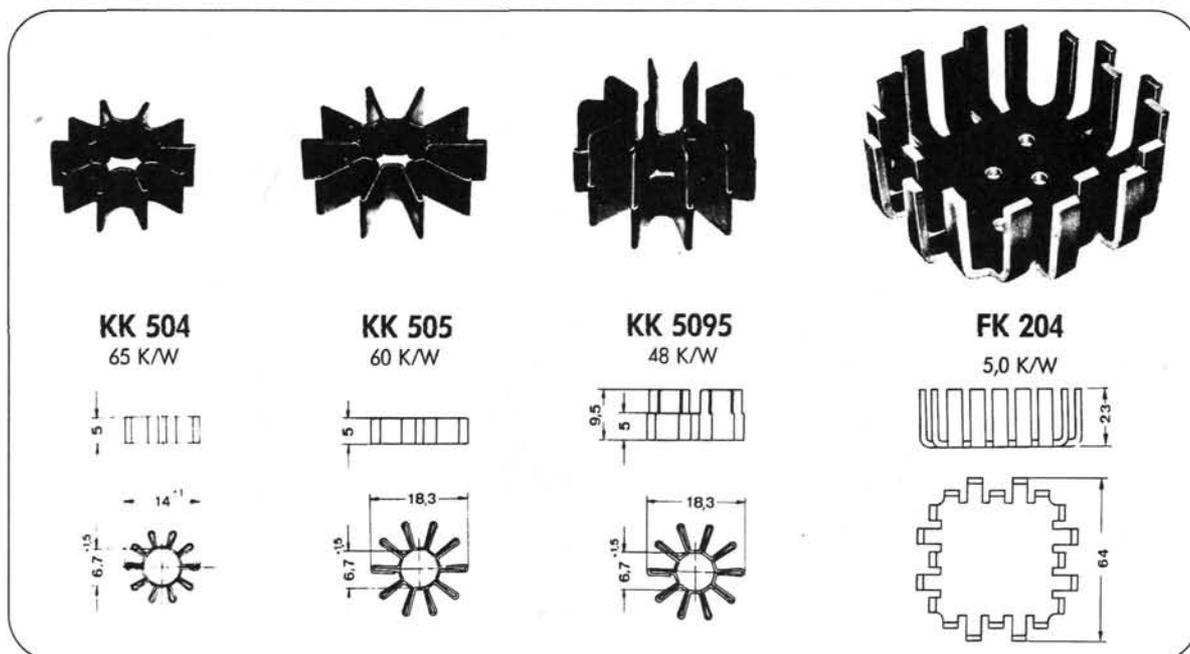
Cette loi est aussi importante pour décrire la circulation de la chaleur que la loi d'Ohm pour décrire le rapport entre les tensions et les courants. Elle permet d'effectuer tous les calculs nécessaires à la détermination des dimensions des radiateurs.

exemple pratique

Rien ne remplace un exemple pratique. Prenons (nous le rendrons puisque rien ne peut le remplacer) celui d'un régulateur de tension de type 7812 en boîtier TO220 (figure 4). Le recueil de caractéristiques donne comme courant maximal 1 A, comme température de jonction maximale 125°C, et deux résistances thermiques : 4 K/W entre la jonction et le boîtier ($R_{th j-c}$), 50 K/W entre la jonction et l'air ambiant ($R_{th j-a}$).



Les résistances thermiques ne décroissent, au-delà d'une certaine longueur, que si la section est suffisante. C'est pour la même raison que les ailettes sont plus minces aux extrémités : plus on s'éloigne de la source de chaleur (le composant) moins il y a d'énergie à transporter. On peut comparer la distribution des épaisseurs à celle des sections de câbles dans une installation électrique. Après les papillons, des étoiles et une tulipe. Ce dernier modèle est destiné à des boîtiers TO3 peu sollicités. Les étoiles s'adaptent aux boîtiers TO5, lesquels n'ont jamais de forte puissance à dissiper.



Nous supposons que la tension d'entrée est de 22 V, que le régulateur doit donc « évacuer » 10 V. Premier calcul : le régulateur n'a pas de radiateur, combien pouvons-nous lui demander de courant dans ces conditions ? Calculons la puissance qu'il peut dissiper sans atteindre la limite de température de la jonction. Supposons que la température ambiante est de 25°C, ce qui est raisonnable, avec le temps qu'il fait (il en irait autrement si le régulateur devait être installé dans un coffret fermé ou dans une voiture abandonnée au soleil).

$$P = \frac{t_j - t_a}{R_{th\ j-a}}$$

$$P = \frac{125 - 25}{50} = \frac{100}{50} = 2W$$

La puissance est le produit de l'intensité par la tension, la tension est connue, elle est égale à 10 V. Le courant est de :

$$I = P/U = 2/10 = 200\text{ mA.}$$

Sans radiateur, le régulateur pourra donc débiter 200 mA si la tension d'entrée est de 22 V. Pour utiliser complètement ses capacités, c'est-à-dire un courant de 1 A, il faut soit réduire la tension d'alimentation, soit augmenter les possibilités de refroidissement. Si nous abaissons la tension d'entrée jusqu'au minimum autorisé de 14,6 V (selon le data-bouc), le calcul donne un courant maximal de 0,77 A. Il n'est pas raisonnable de travailler dans ces conditions car la moindre baisse de tension du côté entrée sera transmise inévitablement à la sortie. De plus, nous n'avons toujours pas à notre disposition l'intensité nominale. Il faut donc installer un radiateur.

Commençons par un modèle ICK-35, assez courant (figure 5), avec une résistance thermique de 20 K/W. Re commençons les calculs avec une tension d'entrée de 22 V :

$$P_W = \frac{t_j - t_a}{R_{th\ j-c} + R_{th\ c-h} + R_{th\ h-a}}$$

$$P_W = \frac{t_j - t_a}{R_{th\ tot}}$$

Posons $R_{th\ c-h} = 1\text{ K/W}$, la résistance thermique totale est de 25 K/W et nous obtenons :

$$P_W = \frac{100}{25} = 4\text{ W}$$

La différence de tension entre l'entrée et la sortie est toujours de 10 V, donc l'intensité maximale est de :

$$I = P/U = 4/10 = 400\text{ mA}$$

Si nous ramenons la tension d'entrée à son minimum (14,6 V), la dissipation de 2,6 W rentre dans la limite des 4 W que nous permet le refroidisseur choisi. Vous pouvez reprendre le calcul pour constater que le refroidissement est encore suffisant pour une tension d'entrée de 16 V.

Prenons le problème dans l'autre sens pour le dernier exemple : la tension d'entrée est fixée à 22 V, le courant doit être de 1 A, quel radiateur faut-il prévoir ? La puissance P_W à dissiper est de 10 V × 1 A = 10 W. La résistance thermique totale doit être de :

$$R_{th\ j-a} = \frac{t_j - t_a}{P_W} = \frac{100}{10} = 10\text{ K/W}$$

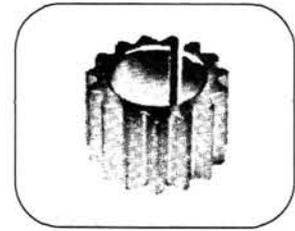
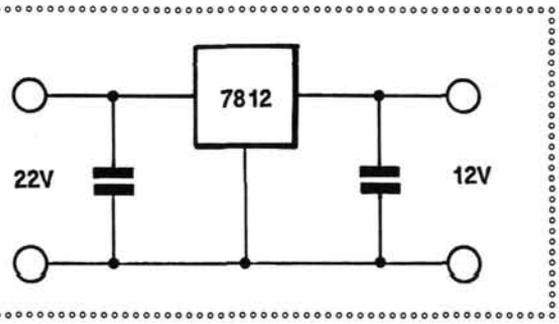
Comme toutes les résistances thermiques sont fixées, nous ne pouvons que faire une soustraction pour connaître celle du refroidisseur :

$$R_{th\ h-a} = R_{th\ j-a} - R_{th\ j-c} - R_{th\ c-h}$$

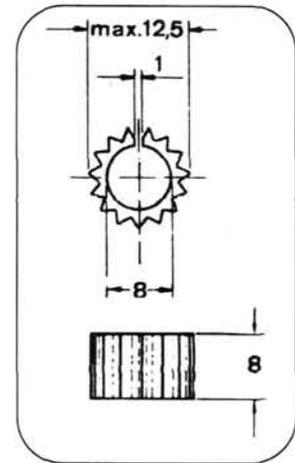
$$R_{th\ h-a} = 14 - 4 - 1 = 5\text{ K/W}$$

Si nous choisissons un profil SK 09, sa longueur devra être de 100 mm au moins (voir la courbe donnée par le fabricant). Si nous préférons le profil SK59, une longueur de 70 mm sera suffisante.

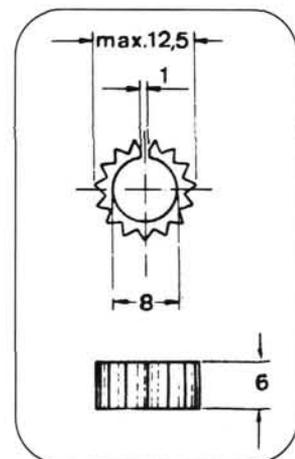
À vous maintenant de faire quelques calculs pratiques, en gardant à l'esprit que la température ambiante peut s'élever bien au-dessus des 25°C pris comme exemple. Si vous prévoyez votre radiateur trop petit, vous ne faites pas courir de risque au régulateur, qui limite lui-même sa dissipation à une valeur tolérable. S'il s'agit d'un amplificateur, au contraire, vous avez intérêt à prévoir une marge de sécurité.



SK58
55 K/W



SK56
63 K/W



télécommunications optiques

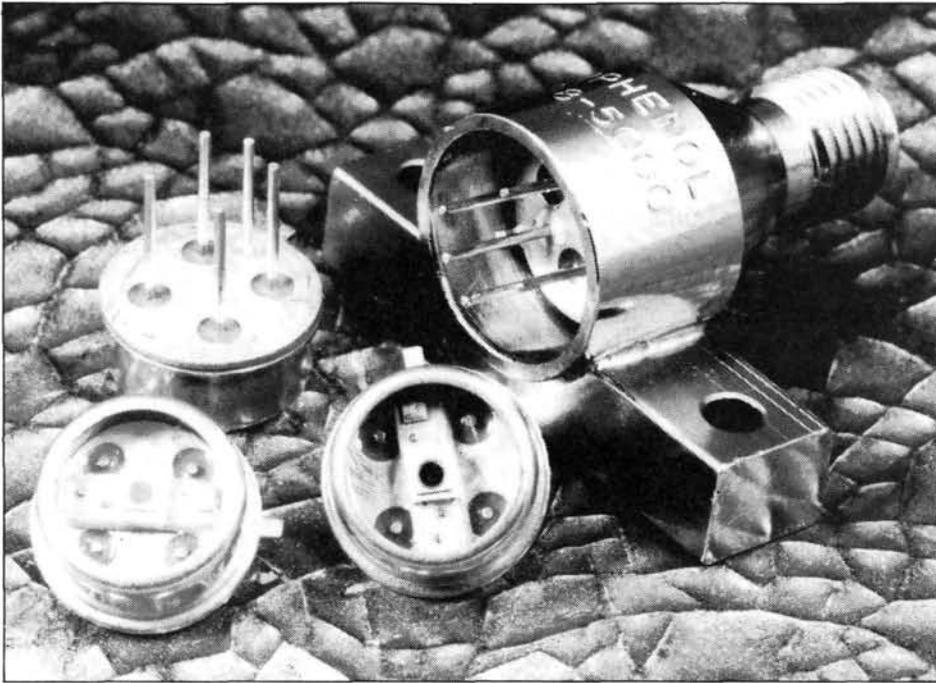
La société moderne ne se conçoit pas sans le téléphone qui, bien qu'il ait grandi depuis, ressemble encore beaucoup à ce qu'il était lorsque Graham Bell le mit au monde, en 1876. Un microphone et un écouteur sont toujours reliés par des fils de cuivre à un écouteur et à un microphone. L'énergie acoustique est transformée en un signal électrique par l'émetteur, signal qui parvient, par l'intermédiaire des fils, au récepteur où il est à nouveau traduit en énergie acoustique. L'introduction de fibres optiques n'a pas changé beaucoup de choses au principe... Le verre, matériau dont elles sont faites, serait-il devenu conducteur ? Il l'a toujours été, de la lumière en tout cas. Le verre ne peut évidemment pas servir de moyen de transport à des signaux électriques, mais son comportement vis-à-vis de la lumière est intéressant, il la transmet et c'est heureux, puisque s'il l'arrêtait, nos intérieurs seraient aussi sombres la nuit que le jour. C'est de cette banale propriété que font usage les fibres optiques : à une extrémité de la fibre optique l'énergie acoustique est traduite en un signal optique, à l'autre a lieu la restitution du son.

son porté par les photons

L'idée d'utiliser la lumière pour transporter des informations sonores est presque aussi vieille que le téléphone "électrique". Elle a de plus germé dans le même cerveau. En 1880, Bell réussit à faire porter la voix humaine par un faisceau lumineux (figure 1), vers un récepteur situé à quelque distance. La pièce centrale de l'émetteur était un miroir sur lequel était concentré un faisceau de lumière solaire. Le miroir, placé à l'extrémité d'une sorte de tuyau acoustique, était mû (ébranlé) par les vibrations sonores transmises par ce tuyau. Ceci n'était bien sûr pas sans

(*) Rayonnement électromagnétique auquel l'œil est sensible. La "lumière" qui circule dans les fibres optiques n'est cependant pas toujours visible.

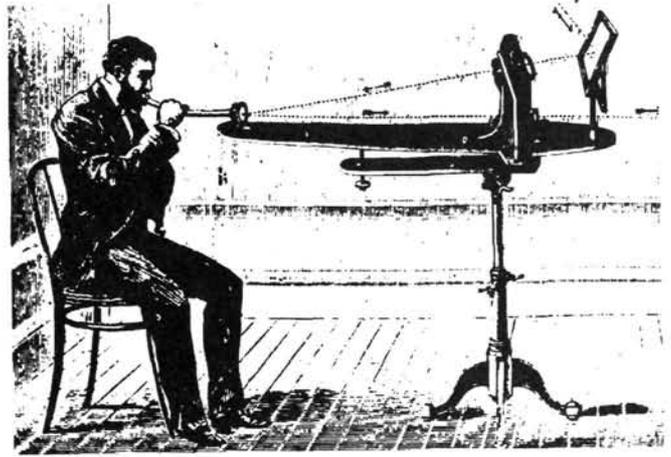
(1) L'explication du phénomène date de 1905 (Einstein), il fallait donc bien qu'il soit connu avant.



fibres optiques

Pour communiquer à distance, nos ancêtres n'avaient rien trouvé de mieux que de se faire de grands signes : signaux de fumée de l'autre côté de l'Atlantique ou télégraphe aérien de Chappe et grands bras animés mécaniquement de ce côté-ci. Puis vint le téléphone et l'on n'eut plus besoin de lumière pour faire passer les messages... Jusqu'à ce que... Nous nous proposons de vous éclairer brièvement sur ce retour en force des radiations électromagnétiques de très petite longueur d'onde (ELEX n° 44, page 12, entre micro-ondes et nano-ondes) sur les voies de la communication.*

Figure 1 - L'idée de faire porter la voix (et toutes sortes d'informations) par la lumière ne date pas d'aujourd'hui : Graham Bell avait déjà prouvé avec son photophone que quelque chose de cet ordre était réalisable.



conséquence pour le faisceau réfléchi (figure 1) dont les radiations intermittentes arrivaient sur une surface photoconductrice. Celle-ci voyait sa conductibilité électrique varier en fonction de la lumière reçue¹. Il suffisait alors de la placer dans un circuit électrique, en série avec un téléphone, où elle provoquait des variations de courant, traduites en sons par l'écouteur.

Le photophone de Bell (de la famille des radiophones) avait une portée de 213 m. Il eut cependant peu de succès. Seules certaines armées utilisèrent, jusqu'à la seconde guerre mondiale, des émetteurs-récepteurs optiques, application directe de sa découverte. Leur portée maximale était d'environ 14 km. Que le photophone ne fonctionne pas bien si le milieu de propagation est l'atmosphère n'est guère étonnant : qu'on pense aux obstacles que représentent par exemple le brouillard et la pluie. Même si l'invention des lasers permit aux communications optiques de faire des pas de géant, il devint vite urgent de trouver un conducteur capable d'en transporter les signaux sans trop de déformation et d'atténuation sur de plus longues distances. La mise au point de guides de lumière faciles d'emploi et aussi (voire plus) fiables que les conducteurs métalliques a ouvert, depuis 1972, une ère nouvelle aux télécommunications.

communications par fibres optiques

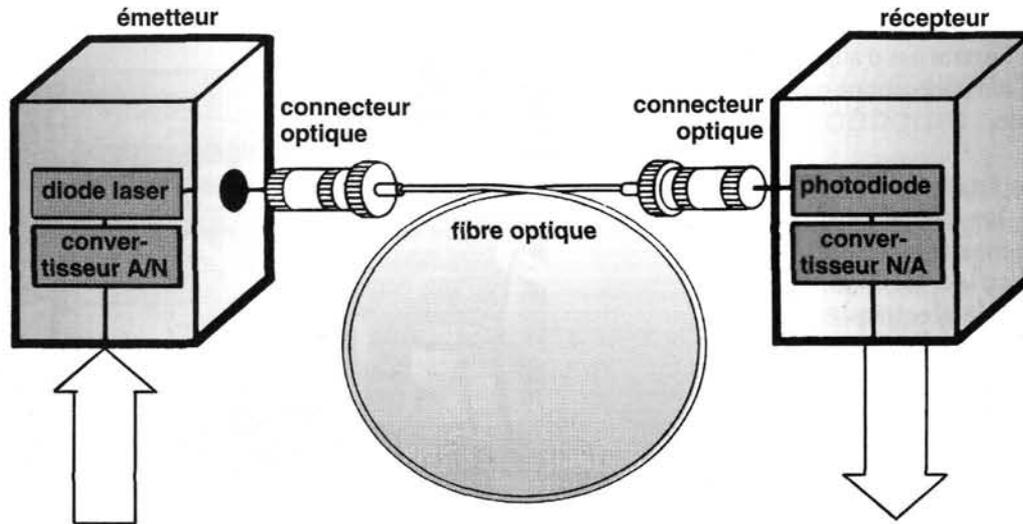
Il est clair que les transmissions par fibres optiques n'utilisent plus le procédé mis au point par Bell des tremblements d'un miroir occasionnés par les vibrations sonores, et la lumière solaire comme support de communication. Les sources de lumière en usage actuellement sont beaucoup mieux adaptées à ces fins,

et plus faciles d'emploi. Nous voulons parler des diodes laser (voir ELEX numéro 29, page 12), sortes de LED qui, compte tenu de leur faible encombrement, produisent une grande quantité de lumière, qui plus est en faisceaux de très petit diamètre. Ces faisceaux ne transportent cependant encore aucune information², il ne sont pas encore modulés. Pour moduler la lumière émise, on peut se servir de modulateurs externes utilisant des effets électro-optiques³ ou acoustico-optiques (comme dans l'expérience de Bell), ou moduler le courant que reçoit l'émetteur. Il va de soi que les informations transmises le seront mieux si elles sont épelées. Voilà qui est trop simple pour ne pas nécessiter des explications. Si l'on décompose ce que l'on dit en plus petites unités : « Il a dit unités, grand-père, u, n, i, t, é, s, pas nullité », on peut, quelquefois, se faire mieux comprendre. Pour passer des informations sur un rayon de lumière, c'est aussi plus facile si on les numérise. L'information sonore est traduite en variations de tension aux bornes d'un microphone, ce que tout lecteur d'ELEX connaît. Cette tension variable est une grandeur analogique, qui varie continûment, comme le relief d'un pays. Pour représenter un relief, on peut le numériser, en prenant par exemple des repères à 0 m, puis à 50 m d'altitude jusqu'à 4800 et quelques mètres pour l'Europe et en attribuant à tous les points ayant une altitude com-

prise entre 0 et 50 m une couleur, une autre couleur à tous les points compris entre 50 et 100 m etc. Un vu-mètre à LED, mettons en cinq l'une à côté de l'autre, peut donner une autre idée de ce que nous voulons dire : si une LED allumée a pour valeur 1 et une LED éteinte une valeur 0, lorsque la musique donne à plein et qu'elles sont toutes allumées, vous pouvez "lire" 11111, si l'appareil joue avec moins de puissance, vous aurez 11000. Chaque nombre composé de 0 et de 1, de 00000 à 11111 correspond à une puissance ou à un intervalle de puissances. Ce système est assez fruste puisqu'il ne donne ici que six nombres. On procède de manière analogue, quoiqu'un peu plus précise, avec la tension aux bornes du microphone. Un dispositif la mesure, la compare simultanément par exemple à plusieurs tensions de référence et, périodiquement, communique ses résultats numérisés (succession de 0 et de 1 à la sortie de ses comparateurs, pour poursuivre notre exemple) au système chargé de les exploiter. Ce que nous venons de décrire est un dispositif de Conversion Analogique Digital, pardon, Numérique (ADC, *analog-digital converter*). Si les mesures sont suffisamment rapprochées dans le temps, le résultat est une succession de nombres qui donnent une représentation assez fidèle du signal analogique de départ. Si ces nombres sont constitués de sept chiffres (0 ou 1),

(2) Ou une information très rudimentaire, un peu comme les yeux de Socrate après sa mort : « Socrate es-tu mort ? Si oui, cligne des yeux. »

(3) Effet Kerr par exemple qui permet d'enregistrer le son des films sonores : les propriétés optiques de certains diélectriques (=isolants) sont modifiées lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique. L'intensité de la lumière (constante à l'entrée) après la traversée d'un tel milieu, suit les variations (les modulations) du champ électrique. Une cellule de Kerr est donc une sorte de condensateur qui peut laisser passer la lumière à travers son diélectrique. L'intensité de la lumière qui en sort est fonction de la tension à ses bornes.



par exemple, on dit que l'information est "codée sur sept bits" et chaque nombre correspond à une tension.

Cette succession de 0 et de 1 (succession de bits), manifestés par la présence ou l'absence d'une tension, permet de commander de façon très simple la diode laser. Celle-ci va clignoter, s'éteindre pour les 0 et s'allumer pour les 1. La lumière clignotante se déplace dans la fibre optique jusqu'au récepteur situé à l'autre extrémité, où un détecteur photosensible (photodiode, par exemple) permet de reconstituer le signal électrique numérique, qu'un convertisseur numérique-analogique (DAC⁴) restitue, presque identique au signal audio de départ, dans un circuit contenant un écouteur (fig.2).

La figure 3 donne une idée de la façon dont les choses se passent entre analogique et numérique. À des intervalles rapprochés (symbolisés par la distance entre les marches), le signal analogique (ligne courbe a) est mesuré (échantillonné, en b) et son niveau traduit en un nombre (c). Pour la clarté du dessin, les nombres sont représentés (sept petits carrés, soient sept bits par nombre) dans la projection du niveau (marche de l'escalier) auquel ils correspondent. En fait, tous les petits carrés symbolisant les 0 et les 1 devraient se succéder sur une seule file. Ces bits électriques commandent ainsi la diode laser qui les traduit en bits lumineux. Ils éclairent ensuite une diode photoconductrice dans le circuit de laquelle se trouve

Figure 2 - Au départ, le signal électrique qui transporte l'information commande une diode émettrice de lumière. L'information, devenue lumineuse, circule dans un conducteur optique et atteint une photodiode qui la restitue électriquement. Comme une information est mieux transmise si elle est "épelée", les signaux analogiques sont d'abord numérisés, traduits en une succession de 0 et 1, absence ou présence de tension, absence ou présence de lumière.

un convertisseur numérique-analogique, produisant à partir d'eux le signal en marches d'escalier (d). Après filtrage, ce signal analogique un peu anguleux s'arrondit en une réplique de l'original (a).

pourquoi numérique ?

Ce que nous avons déjà suggéré doit vous permettre de donner un début de réponse à cette question. Il y a d'autres façons d'utiliser la lumière pour transporter des informations, comme nous le verrons dans un montage proposé dans ce même numéro (voir aussi la note 3). Le problème, quand l'information module directement l'intensité lumineuse du

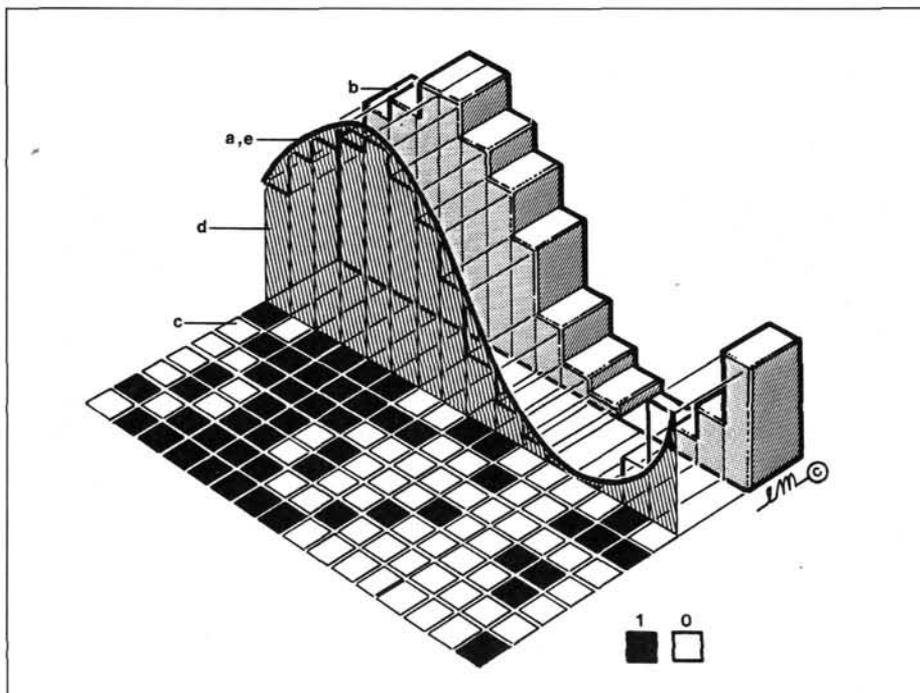
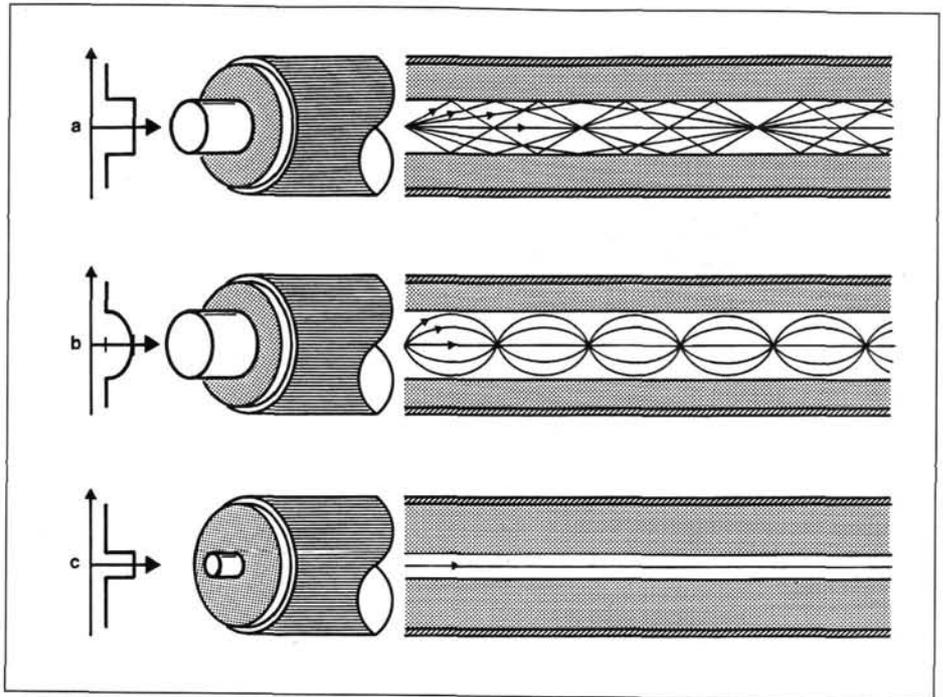


Figure 3 - Représentation graphique de la numérisation d'un signal analogique (trait sinucieux). La première mesure donne 0100001 (à gauche) et la dernière correspond à 1000010. Le signal restitué à la réception a une forme anguleuse que des filtres permettent d'arrondir.

Figure 4 - Il existe trois types de fibres. Dans les fibres b et c (multimode à gradient d'indice, et monomode) les rayons lumineux partis simultanément d'une extrémité arrivent simultanément à l'autre. Dans les fibres de type a (fibre multimode à saut d'indice), les rayons qui suivent l'axe de la fibre arrivent avant les rayons qui se réfléchissent sur les parois. Le signal à l'arrivée est plus long qu'au départ, défaut qui s'aggrave avec la distance.



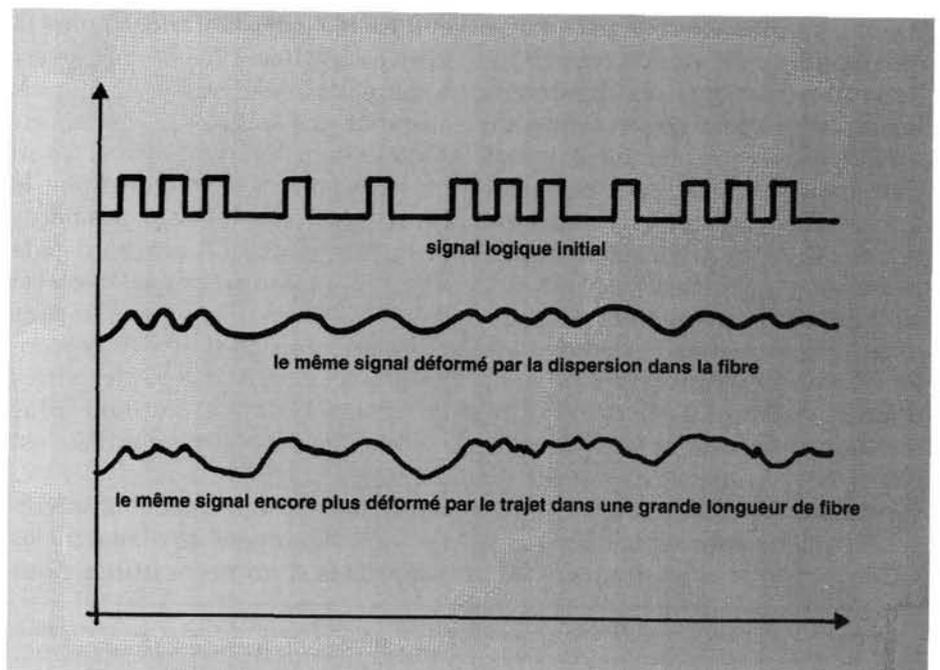
faisceau, est qu'elle ne tient pas la distance. Pourquoi ? Pour le savoir, il nous faut regarder la façon dont la lumière se déplace dans une fibre optique.

La lumière peut prendre différents chemins pour traverser un guide de lumière, comme on le voit sur la figure 4a. Il n'est pas difficile de comprendre qu'un rayon réfléchi de nombreuses fois parcourt un chemin plus long que celui qui traverse la fibre en suivant son grand axe, en ligne droite. Si le chemin parcouru est plus long, la traversée dure naturellement plus longtemps et le rayon qui se déplace en se réfléchissant sur les parois sort du guide après le rayon qui a pris le chemin le plus court. S'il ne s'agissait que de s'éclairer, ça n'aurait bien sûr aucune conséquence, mais il s'agit d'informations. Le retard a pour effet de les étirer. Pour une information numérisée dont le 1 dure 1 ms au départ, avec une différence de trajet pour les différents rayons de 1 μ s, le 1 à la sortie de la fibre optique s'est étendu à 1,001 ms (les rayons directs arrivent 1 ms après le départ et les rayons en zig zag avec 1 μ s de retard, l'objectif est donc éclairé pen-

dant 1,001 ms). Plus la distance parcourue est longue, plus le retard augmente et plus l'information s'étire. Pour des données aussi simples que 0 et 1, le mal n'est pas bien grand tant que la lumière arrive à destination. Si le signal à transmettre est analogique, il n'en va plus de même, ses déformations, augmentant avec la distance, le rendent rapidement inintelligible.

On parle pour ces déformations de dispersion. Une trop grande dispersion peut aussi déformer un message numérisé au point de le rendre incompréhensible, si les bits se succèdent à une cadence élevée, lorsque leur débit est très important (figure 5). Pour éviter ce genre de problème, des fibres optiques dans lesquelles le temps de propagation de tous les rayons est le même ont

Figure 5 - Si les différents rayons lumineux, directs ou réfléchis, qui transitent par une fibre optique ne la parcourent pas dans le même temps, le signal qu'ils transportent subit des déformations. On prévient cet effet, dit de dispersion, en utilisant, si la distance à franchir le rend nécessaire, des fibres spéciales (voir 4b).



(5) Lorsque vous faites un "dégradé" sur un dessin, vous obtenez un "gradient linéaire" de couleur, un affaiblissement graduel, continu de la couleur, comme dit Le Petit Robert.

(6) L'indice de réfraction d'un milieu est égal au rapport de la vitesse de la lumière dans le vide à la vitesse de la lumière dans ce milieu. Il est donc toujours supérieur ou égal à 1 (très peu supérieur dans le cas de l'air qui peut ainsi servir de référence).

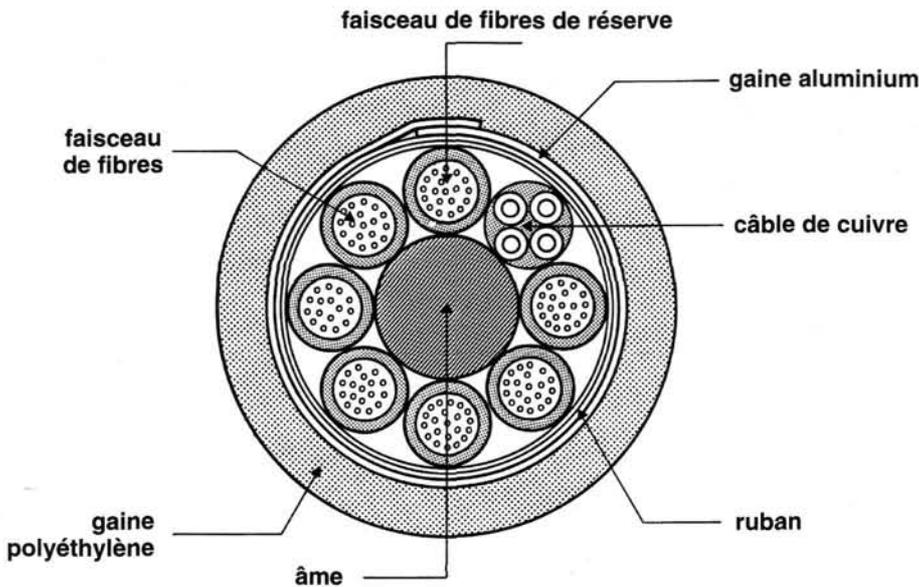


Figure 6 - Vue en coupe d'un câble optique tel qu'en posent les TELECOM. Il comporte évidemment plus d'une fibre et même le câble électrique encore nécessaire pour l'alimentation des répéteurs.

été mises au point. Les types de fibres et de propagations sont représentés sur la figure 4. La plus simple est bien sûr la fibre dite monomode dans laquelle le rayon lumineux n'a, comme son nom l'indique, qu'un mode de propagation, rectiligne. Le très petit diamètre de son cœur de verre ($5\ \mu\text{m}$) pose cependant des problèmes de connexion, il est en effet difficile de viser juste. En 4b, nous avons une fibre dite multimode (de propagation) à gradient d'indice⁵ dont le diamètre est dix fois plus grand. Dans cette fibre, les rayons se propagent plus vite à la périphérie qu'au centre : l'indice de réfraction⁶ de la fibre diminue régulièrement lorsqu'on s'éloigne de son centre, de sorte que les rayons lumineux y sont continuellement déviés. Qu'ils prennent le chemin des écoliers ou la voie directe, tous les rayons arrivent en même temps à destination. Ces deux sortes de fibres permettent donc des débits d'information beaucoup plus élevés que les fibres dites à saut d'indice (4a, formées de deux verres d'indices différents, le manteau et le cœur). Les techniques de fabrication sont aujourd'hui au point et les prix relativement abordables. Le verre garde cependant sa fragilité. Un

emballage approprié protégeant mécaniquement les fibres semble avoir résolu ce problème comme tendent à le prouver les nombreux câbles (figure 6) déjà posés dans le monde.

atténuation

À côté de la dispersion, un autre facteur vient entraver la progression des informations, l'atténuation. Le verre ne conduit pas la lumière sans en absorber un peu. Pour s'en rendre compte, il suffit de prendre une vitre et d'en regarder la tranche : plus la vitre est grande, plus la tranche est sombre. La lumière est d'autant plus absorbée que la distance à parcourir dans le verre est importante. Comme elle se propage en ligne droite, le rayon que l'on voit sur un des bords de la vitre vient de l'autre bord. Si la distance parcourue par le rayon est courte, il arrive à la parcourir sans que l'atténuation soit trop perceptible. Ceci n'empêche pas les vitres de rester visibles, d'autant plus visibles que leur qualité est médiocre.

Sur quoi repose la qualité d'un verre ? Son homogénéité d'abord : les propriétés d'un verre utilisé pour

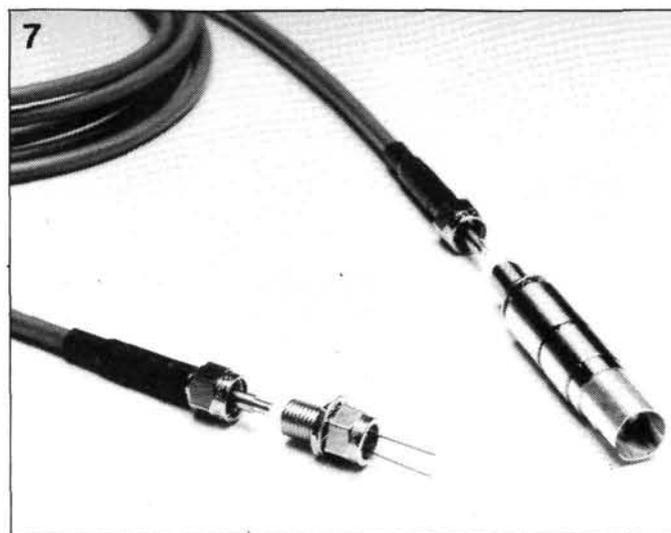
véhiculer des informations doivent être autant que possible les mêmes en tous points, faute de quoi on assiste à des phénomènes de diffusion ou de dispersion. On assiste ensuite à des phénomènes d'absorption de la lumière par des impuretés dont la concentration peut être très faible. On réussit aujourd'hui à fabriquer des fibres de verre de quelques kilomètres aussi transparentes que des vitres de quelques millimètres d'épaisseur⁷. Le problème maintenant est de les raccorder. La façon la plus simple, qui n'est bien évidemment pas la meilleure, consiste à utiliser des connecteurs spéciaux (figure 7) qui ajustent mécaniquement leurs extrémités de façon à réduire au maximum les pertes. Une autre méthode, dont les résultats sont meilleurs, consiste à les souder. Cette méthode n'est pas seulement difficile à mettre en œuvre à cause du très petit diamètre des fibres, mais parce que la soudure risque de modifier leurs propriétés optiques. Malgré la qualité des verres obtenus et celle des connexions, des pertes subsistent. Pour les compenser on dispose sur les lignes des amplificateurs (répéteurs) tous les 25 km. C'est bien sûr un inconvénient. Il ne faut cependant pas oublier que les lignes électriques souffrent aussi de phénomènes d'atténuation, les fils ont une impédance (pas seulement une résistance) qui provoque des chutes de tension. Pour couvrir de longues distances, le signal qui s'affaiblit doit être périodiquement régénéré, et les répéteurs existent là aussi. Si on compare les lignes cuivre aux lignes optiques, il semble que dans ce domaine, les transmissions optiques s'en sortent à leur avantage et ce n'est pas leur seul point fort. Poursuivons la comparaison.

(7) Mentionnons pour mémoire leurs usages médicaux qui permettent des explorations et des interventions très fines : l'œil peut grâce à leurs propriétés pénétrer dans l'organisme avec un minimum d'effraction.

Les lignes téléphoniques traditionnelles fonctionnent depuis belle lurette à la satisfaction générale. Nous en voulons pour preuve le fait que les humoristes semblent depuis quelques années ne plus s'y intéresser. Alors pourquoi changer et en quoi ces recherches permettent-elles de sensibles améliorations ?

Pour commencer, la matière première de la fabrication du verre est le sable (ordinaire) beaucoup moins cher et beaucoup moins rare que le cuivre. Les câbles de fibres optiques sont aussi beaucoup plus légers que leurs homologues métalliques, c'est une des qualités qui les fait apprécier en aéronautique. Cependant même si leur légèreté était secondaire, les liaisons optiques, insensibles à la plupart des parasites, garderaient la préférence des constructeurs d'avion. Elles n'engendrent ni champs magnétiques ni champs électriques et sont insensibles à ceux qu'elles peuvent rencontrer. Les variations de température ne les affectent pas et leur inertie chimique est très grande. Comme elles ne transportent pas de courants, on peut les utiliser dans les milieux où les normes de sécurité sont les plus draconiennes. Les lignes de transmission peuvent se côtoyer sans interférer : inutile de tendre l'oreille, si la transmission est optique, vous n'entendrez jamais sur votre ligne ce que disent les personnes qui communiquent sur une ligne parallèle. Ceci permet de réduire au minimum la distance entre les "fils". Il n'existe pas non plus, en dehors des nœuds de communication, des répéteurs et des extrémités, où les signaux sont à nouveaux électriques, de possibilités d'écoute : la ligne elle-même est inviolable et les informations qu'elle transporte ne transpirent pas. Un de leurs plus grands avantages cependant est qu'elles permettent, par unité de temps, le transport de beaucoup plus d'informations que leurs homologues électriques. Elles peuvent ainsi, concurrentiellement aux transmissions par satellites, convoyer,

Figure 7 - Pour connecter les fibres optiques l'une à l'autre et avec les diodes émettrices et réceptrices, on dispose de raccords spéciaux qui garantissent un minimum d'atténuation en centrant correctement les différents éléments et en les maintenant bien serrés. Vous voyez ici les extrémités du câble optique ainsi que la diode laser et la photodiode.



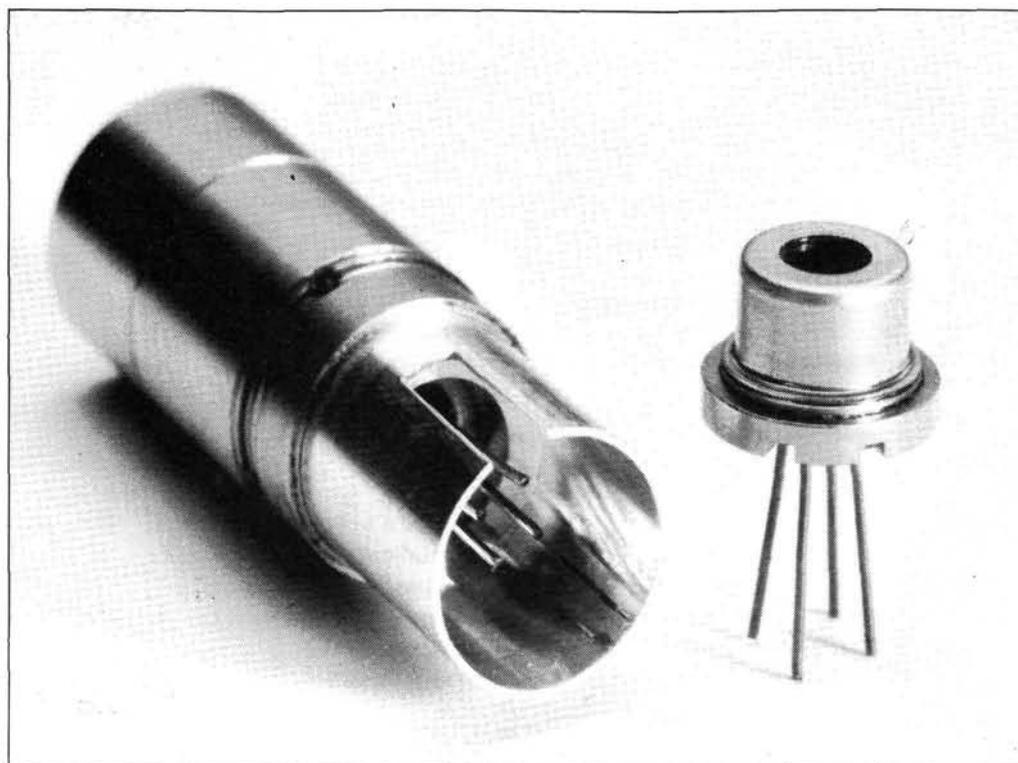
outre un grand nombre de nos importants dialogues téléphoniques, des données informatiques à vitesse très élevée ou des signaux vidéo qui nécessitent, vous devez vous en douter, beaucoup de 0 et de 1 pour être numérisés.

perspectives

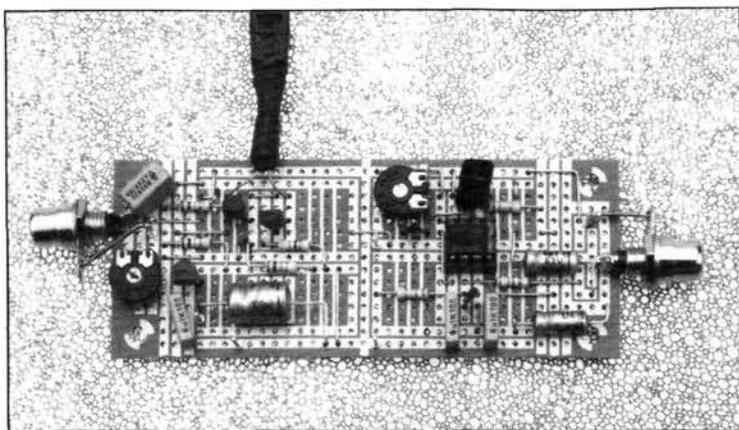
L'optique est amenée à concurrencer l'électronique dans de nombreux domaines. Au cours des prochaines décennies, les fibres optiques remplaceront progressivement les câbles électriques sur tout le réseau téléphonique, mais ce n'est pas tout : pour augmenter la vitesse et la capacité de calcul de leurs machines, les

fabricants d'ordinateurs en ont changé l'architecture. Elles traitent les informations non plus les unes à la suite des autres, mais en parallèle. Ceci pose aussi des problèmes de transmission que l'optique permet de résoudre plus efficacement : absence d'interactions parasites entre les "courants de photons" et circulation des données à la vitesse de la lumière. On ne s'est d'ailleurs pas arrêté là et le projet de remplacer les électrons par des photons à tous les stades du calcul fait son chemin⁸. Les homologues optiques des transistors existent déjà, et des ordinateurs fonctionnant en tout optique sont à l'étude. La "photonique", c'est peut-être pour bientôt.

87693



⁽⁸⁾La Recherche, novembre 1988, page 1374 et suivantes.



ligne audio

sous verre

Ailleurs, dans ce même numéro, sont dévoilés quelques aspects théoriques des transmissions par fibre optique. Le circuit présenté ici permet de passer directement à la pratique. Un petit nombre de composants, parmi lesquels une LED, une photodiode, un double amplificateur opérationnel et quelques mètres de guide de lumière vous permettront d'élaborer votre propre installation de communications optiques.

Bien que l'objectif du circuit ne soit qu'une approche expérimentale des transmissions par fibre optique, ses performances sont très acceptables : distorsion <0,1%, rapport signal/bruit >80 dB. Son entrée accepte des signaux de niveau « ligne ». Des signaux d'un niveau inférieur peuvent bien sûr lui être injectés (microphone) mais le rapport signal/bruit diminuera avec le signal jusqu'aux environs de 10 dB. Ce rapport dépend aussi de la longueur de la fibre optique utilisée, qui ne devra pas excéder 10 à 15 m pour que la qualité de la transmission reste bonne.

Avant d'attaquer la description du circuit, quelques remarques concernant les méthodes de modulation. Un signal audio, comme celui que nous nous proposons de transmettre, est de nature analogique. Son transport nécessite une onde porteuse, ici la

lumière. Trois formes de modulation sont alors possibles, trois façons pour le signal audio de basse fréquence d'influencer l'onde porteuse. Dans un ordre décroissant de qualité et de complexité⁽¹⁾, nous avons :

1. - **Modulation par impulsions codées** (PCM, *Pulse Code Modulation*), technique utilisée par exemple pour les enregistrements audio-numériques dont les lecteurs laser permettent la lecture (ELEX numéro 29). Ce procédé

nécessite des conversions très rapides d'analogique à numérique (ou *digital* en anglais) et de numérique à analogique, sans parler de phototransistors à temps de réponse très court. C'est, comme vous pouvez le lire dans ce même numéro, la méthode utilisée généralement pour les transmissions optiques. Elle dépasse, techniquement et financièrement, les limites fixées pour l'instant à une revue comme celle-ci.

⁽¹⁾Ceci permet aussi de donner un début de réponse à la question pataphysique : « Pourquoi faire simple quand on peut faire compliqué ? »

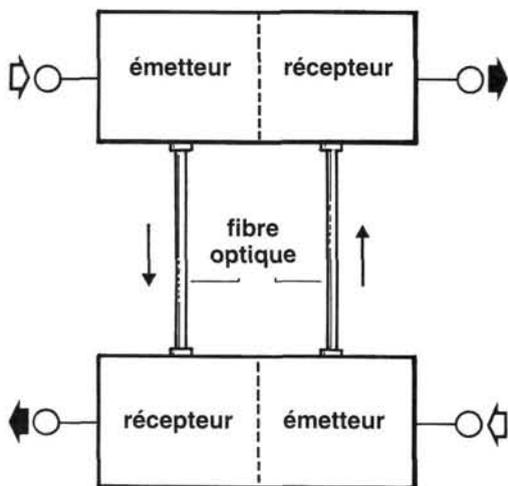
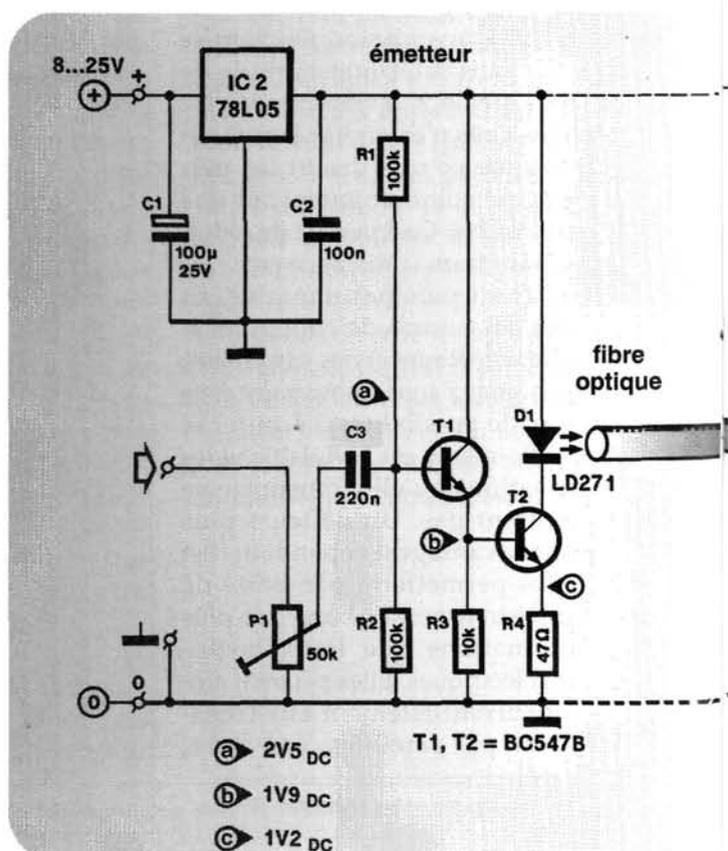


Figure 1 - Pour une communication sur deux voies, deux « combinés » sont évidemment nécessaires.



2. – **Modulation de fréquence**, c'est la FM : son insensibilité aux variations d'amplitude la protège d'un grand nombre de perturbations et la rend particulièrement propre aux transmissions par fibres optiques. Elle demande certes un peu plus d'électronique que le procédé suivant, mais pas excessivement. C'est la technique adoptée pour un montage décrit dans un numéro précédent (octobre 91, page 18) qui peut en principe être adapté au présent exercice. Voyons les modifications de détail à lui apporter, pour les lecteurs qui voudraient l'utiliser ici : une seule LED émettrice est nécessaire (court-circuitez les autres) et remplacez R12 par 180 Ω, c'est tout. Vous constaterez que le guide de lumière laisse passer le signal beaucoup mieux que ne le fait l'air et sur une plus longue distance.

3. – **Modulation d'amplitude (AM)**, c'est la technique utilisée pour cette prise de contact avec les fibres optiques. Elle permet de fabriquer un circuit simple et peu gourmand en courant. La distorsion et le rapport signal/bruit sont certes ici moins bons qu'en modulation de fréquence, des choix judicieux permettent cependant de les maintenir dans des limites acceptables. Répétons-le : malgré

d'honnêtes performances, il s'agit surtout d'un circuit d'expérimentation. Voyons-en les détails.

Le circuit comprend un émetteur et un récepteur. Il est possible d'établir la communication dans les deux sens, comme on le voit sur la **figure 1**. Il suffit pour cela de doubler le circuit de la **figure 2**. Pour un système à une seule voie, on sépare l'émetteur du récepteur en découpant la platine suivant le pointillé (**figure 3**). Le fonctionnement de l'appareil est très simple : la sortie de l'émetteur est une LED dont le rayonnement varie en intensité avec l'amplitude du signal présent à l'entrée. Avec une longueur d'onde de 950 nm, D1 émet dans le proche infrarouge (800 nm pour le rouge visible) pour lequel la photodiode D2 du récepteur a une sensibilité maximum. Un transistor, monté en source de courant, commande D1. Une telle source est bien sûr nécessaire, puisque l'intensité du rayonnement de la LED est directement proportionnelle à celle du courant qui la traverse. Le transistor T1, monté en collecteur commun (émetteur suiveur), complète cet étage de sortie en lui donnant une impédance d'entrée suffisante. Le point de fonctionnement de T2 est choisi de telle façon que le courant qui traverse D1

elex-abc

modulation par impulsions codées (PCM)

On dit qu'il n'y a pas à proprement parler ici d'onde porteuse : une absence d'émission d'une certaine durée correspond à un 0 et une émission d'une même durée correspond à un 1. Le signal à transmettre est donc numérisé, codé par un convertisseur analogique-numérique contenu dans l'émetteur, en une succession de 0 et de 1. S'il est codé sur sept bits (un bit est une information élémentaire, 0 ou 1) par exemple, à chaque ensemble de sept bits successifs correspond une tension à la sortie du décodeur (convertisseur) numérique-analogique, contenu dans le récepteur qui reconstitue ainsi le signal analogique de départ (où l'opération inverse avait été réalisée).

modulation de fréquence

On module en fréquence lorsqu'on fait varier la fréquence de l'onde porteuse (HF, de Haute Fréquence) au rythme du signal à transmettre. La fréquence du signal à transmettre est évidemment basse (c'est le signal BF, signal de Basse Fréquence) comparée à celle de l'onde modulée qui varie ainsi sur un (relativement) petit intervalle, son excursion. Le rapport de la moitié de l'excursion à la fréquence du signal modulateur est appelé indice de modulation.

modulation d'amplitude

L'amplitude des variations d'une grandeur électrique est son écart maximum par rapport à une valeur moyenne. Si l'on ajoute à une onde porteuse de haute fréquence un signal de basse fréquence (modulateur), l'amplitude du signal résultant, signal modulé, est égale à la somme des amplitudes des deux signaux. On dit que la porteuse est modulée en amplitude par le signal BF. L'onde porteuse avant modulation est rigoureusement périodique ce qui n'est évidemment pas le cas du signal modulateur dont l'amplitude varie au rythme de la parole ou de la musique.

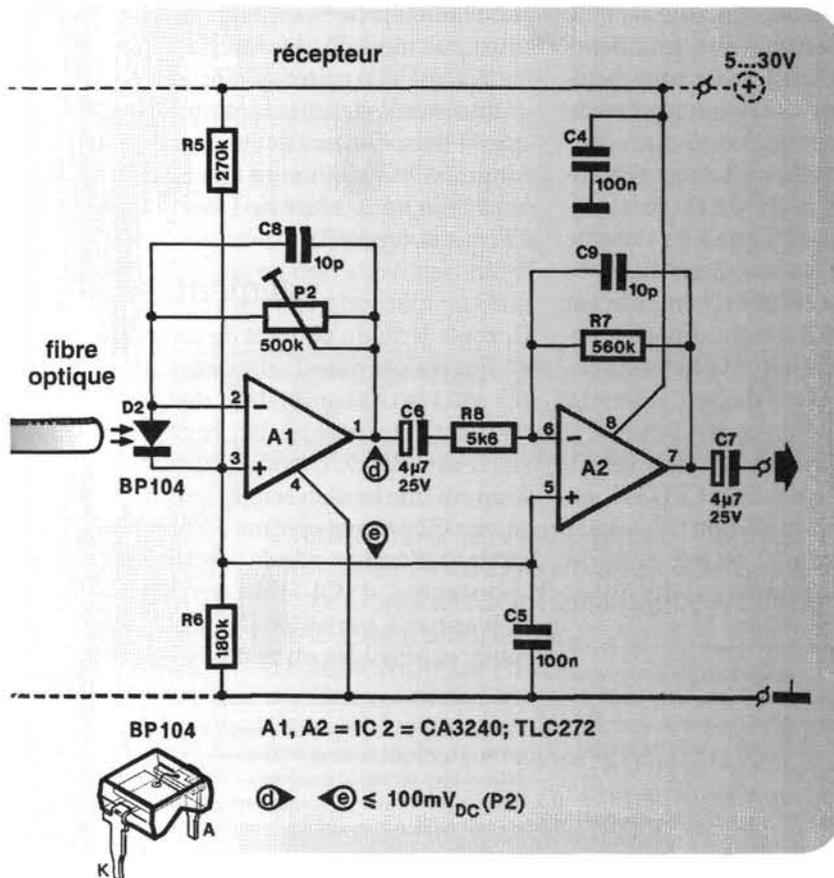
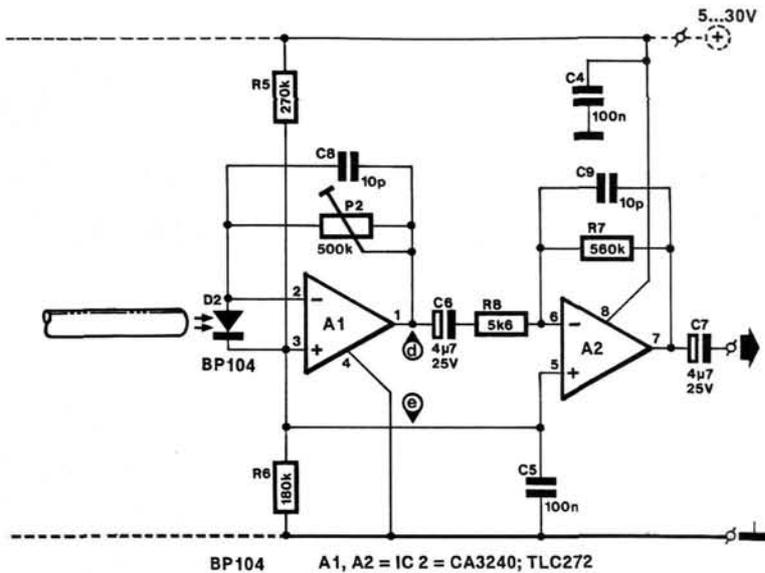


Figure 2 - Il est difficile de faire plus simple. Les potentiels des points a, b, c sont des tensions mesurées par rapport à la masse au repos, en l'absence du signal. Le potentiomètre P2, permet de régler le potentiel à la sortie de A1 par rapport à la "masse artificielle" (potentiel qui règne sur l'entrée non inverseuse), toujours en l'absence de signal, après la mise sous tension de l'émetteur.



par le guide de lumière (voir au paragraphe suivant comment procéder). Le signal en sortie de A1, débarrassé de sa composante continue par C6, est à nouveau amplifié sélectivement par A2 (environ 100 fois).

réglages

On adapte pour commencer, la sensibilité du circuit au niveau du signal entrant. Les signaux de niveau « ligne » (bornes *cinch*) sont donc atténués par le diviseur de tension P1 (curseur à la moitié ou au quart de sa course). Si c'est un microphone qui est raccordé à l'entrée, ou la sortie magnétophone d'un amplificateur (prise DIN⁽³⁾), le signal est injecté tel quel à travers C3, avec P1 au minimum (curseur tourné au maximum dans le sens des aiguilles d'une montre, sur la figure 3). S'il y a le choix entre sortie *DIN* et sortie *cinch*, on préférera la seconde qui donne un meilleur rapport signal/bruit.

Le réglage du récepteur n'intervient qu'après l'établissement de la liaison optique avec l'émetteur. Il se fait au moyen de P2 dont le curseur est positionné en fonction de la tension continue mesurée entre les points d et e (figure 2). Cette tension, lorsque le faisceau en provenance de l'émetteur n'est pas modulé, ne doit pas dépasser 100 mV. Le gain de l'amplificateur d'entrée doit être d'autant plus grand que la liaison avec l'émetteur est plus longue. On l'augmente en ramenant le curseur vers la broche 1 de A1 (vers C8, sur la figure 3).

alimentation

Compte tenu du courant de repos élevé qui circule dans la diode émettrice (25 mA) la consommation de l'émetteur est importante. Un régulateur (IC1, un 78L05, L pour 100 mA) lui fournira une tension stable. Le condensateur C2 permet comme à l'accoutumée, d'éviter les oscillations spontanées d'IC1, tout en filtrant d'éventuels parasites de haute fréquence, nuisibles au reste du circuit.

(LD271) au repos soit de 25 mA. Trois potentiels statiques, potentiels présents en l'absence de signal à l'entrée, mesurés aux points a, b et c sont indiqués sur la figure 2. Cette polarisation des transistors permet aux variations d'amplitude du signal injecté d'être transmises sans déformations : elle est suffisamment élevée pour que les alternances négatives du signal ne bloquent pas les transistors et suffisamment basse pour leur éviter la saturation lors des alternances positives. Le potentiomètre P1, monté en diviseur de tension, permet d'atténuer au besoin les signaux de trop grande amplitude (signaux de niveau « ligne », de quelques centaines de millivolts). Pour les signaux plus faibles, provenant d'un microphone ou de la sortie d'enregistrement d'un amplificateur par exemple, on doit évidemment régler P1 au minimum, ou s'en passer. Comme d'habitude, le condensateur de découplage C3 élimine une éventuelle composante continue. Notons enfin que la distorsion dépend beaucoup de l'amplitude du signal et augmente considérablement dès qu'elle dépasse 100 mV. Si la distorsion est inférieure à 0,1% pour un signal de 50 mV, elle passe à 0,25% pour un signal de 100 mV et atteint 1% si l'amplitude dépasse 200 mV. Il ne faut pas non plus que le signal soit trop faible puisque nous avons vu que le rapport signal/bruit diminuait avec son amplitude. L'intensité du rayonnement de la diode varie donc maintenant en fonction de l'amplitude du signal injecté à travers C3 dans l'émetteur, voyons comment le récepteur réagit.

Le récepteur est composé d'un ensemble amplificateur-photodiode (D2-A1), suivi d'un étage d'amplification des basses fréquences (A2). Un diviseur de tension (R5/R6) permet de fabriquer une masse artificielle et de se passer ainsi d'une alimentation symétrique. La photodiode est câblée d'une manière choquante, en court-circuit aux entrées de A1. On utilise ainsi une partie de sa caractéristique où la relation entre le courant qu'elle laisse passer et la lumière qu'elle reçoit est pratiquement linéaire : le courant augmente (ou diminue) en proportion directe de l'intensité lumineuse et le coefficient qui relie ces deux grandeurs est constant. Il en résulte une différence de tension entre les entrées de l'amplificateur opérationnel que celui-ci va tenter de réduire. La conséquence est que plus la diode est éclairée, plus la tension qui règne à la sortie de l'amplificateur baisse. Pour éviter la saturation⁽²⁾ de celui-ci, son gain est limité par P2. Ce potentiomètre permet de régler le point de fonctionnement du circuit (qui dépend aussi du point de fonctionnement de l'émetteur, c'est-à-dire de la quantité de lumière produite par la LED D1, en l'absence de modulation). Le taux d'amplification de A1 est fixé de façon à compenser l'atténuation du signal

(2) Un amplificateur est saturé lorsque sa sortie ne rend plus compte des variations de son entrée. Par exemple, un amplificateur alimenté entre 0 et 15 V dont le gain est de 100 est saturé dès que le signal entrant approche 15/100 V ou 0 V. Si le signal présent à l'entrée varie hors de l'intervalle 0 V, 15/100 V, la sortie ne répond plus : elle reste bloquée aux environs de 0 V ou de 15 V.

(3) À ce propos, la prise *DIN* (entrée d'enregistrement et sortie de lecture) d'un magnétophone délivre bien un signal de niveau « ligne » en sortie mais son entrée (correspondant à la sortie magnétophone d'un amplificateur) est très sensible.

liste des composants

R1, R2 = 100 k Ω
 R3 = 10 k Ω
 R4 = 47 Ω
 R5 = 270 k Ω
 R6 = 180 k Ω
 R7 = 560 k Ω
 R8 = 5,6 k Ω
 P1 = 50 k Ω , ajustable
 P2 = 500 k Ω , ajustable

C1 = 100 μ F/25 V
 C2, C4, C5 = 100 nF
 C3 = 220 nF
 C6, C7 = 4,7 μ F/25 V
 C8, C9 = 10 pF

T1, T2 = BC 547B
 D1 = LD 271
 D2 = BP 104
 IC1 = 78L05
 IC2 = CA 3240 ou TLC 272
 (double amplificateur opérationnel CMOS)

platine d'expérimentation
de format 1

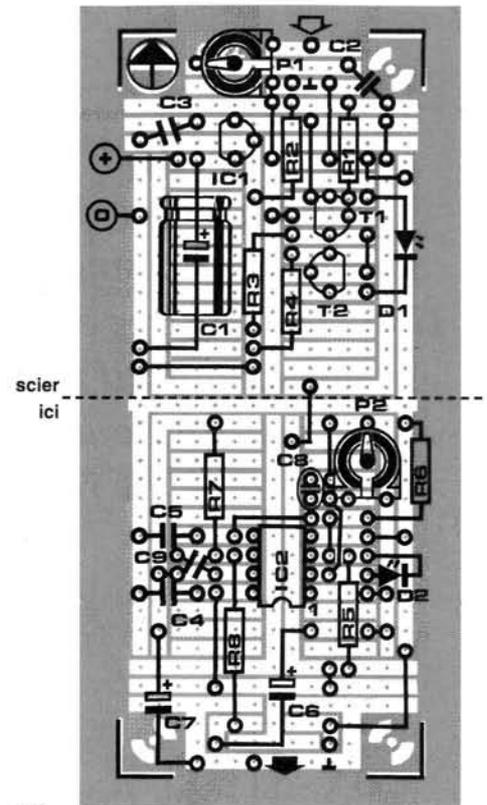


Figure 3 - Pour une liaison simple, l'émetteur et le récepteur sont séparés suivant le pointillé. Pour deux stations complètes, émission et réception à chaque extrémité, chaque « combiné » est composé d'une platine entière.

L'alimentation du régulateur peut être prélevée sur l'appareil qui délivre le signal ou confiée à un bloc-secteur. Celui-ci doit mettre à sa disposition une tension continue d'au moins 8 V, faute de quoi la régulation ne pourra pas être assurée.

Le récepteur pour sa part est très arrangeant puisqu'il ne consomme qu'1 mA sous une tension comprise entre 5 et 30 V. Vous avez encore le choix ici pour l'alimenter, entre un prélèvement sur l'appareil auquel il est relié, et une pile de 9 V. Cette dernière solution ne vaut certainement pas pour la construction de deux unités comprenant chacune un émetteur-récepteur. Dans ce cas, chaque ensemble est composé d'une platine qu'il n'y a alors pas lieu de scier, comme nous l'avons déjà dit plus haut. La pile est par contre indispensable, pour des raisons de sécurité, si l'installation est placée dans une salle de bains par exemple.

liaison optique

La fibre optique que nous avons choisie n'est pas une « silice/silice » en « verre véritable » mais une fibre plastique dont le prix est raisonnable. Pratiquement tous les revendeurs la tiennent en stock et son travail reste relativement facile. Pour les raccords avec la LED émettrice et le phototransistor nous avons utilisé des manchons de gaine thermorétractable : le « bricolage » reste donc possible dans ce domaine (à condition de ne pas chauffer au chalumeau). Il existe cependant des solutions moins « expérimentales » et qui plus est très abordables. Dans

tous les cas, la diode émettrice doit être compatible avec le photorécepteur et, le cas échéant, avec les clips ou les connecteurs. Vous éviterez d'autre part une atténuation trop importante au départ et à l'arrivée en coupant la fibre proprement et bien perpendiculairement à son grand axe, et en polissant les surfaces de coupe (finition au grain de 600).

(4) « Je t'en supplie, baisse un peu l'abat-jour, il y a de la friture sur la ligne. »

Comme le signal est modulé en amplitude, il est très sensible aux parasites apportés par la lumière ambiante. Les lampes à incandescence en particulier, qui chauffent plus qu'elles n'éclairent et produisent donc un important rayonnement infrarouge, feront entendre leur voix. Pour une bonne réception, un abat-jour ne suffit pas⁽⁴⁾, il est essentiel que les diodes, émettrice et réceptrice, et la fibre soient isolées optiquement (fibre gainée et manchons aux extrémités).

87688

MAGNETIC-FRANCE

Circuits intégrés, Analogiques, Régulateurs intégrés, Interfaces, Micro-Processeurs, Mémoires RAM Dynamiques Statiques, EPROM et EEPROM, Quartz, Bobinage, Semi-Conducteurs Transforiques, Filtres, Ligne à retard, Leds, Supports de CI, Ponts, Opto-Electronique, etc.
Et de nombreux KITS.

Bon à découper pour recevoir le catalogue général
 Nom
 Adresse
 Envoi : Franco 35 F - Vendu également au magasin

11, Place de la Nation, 75011 PARIS **43793988**
 Téléx 216 328 F - Ouvert de 9 h 30 à 12 h et de 14 h à 19 h
 Fermé le Lundi.

Nous avons déjà rencontré la notion de modulation dans un grand nombre de montages ; chaque fois, faute de place, nous n'avons pu donner des procédés mis en œuvre que des descriptions sommaires et incomplètes. Le petit article qui suit ne sera pas exhaustif non plus puisqu'il faut de volumineux traités pour venir à bout de chaque type de modulation. Notre but est de fixer les idées sans trop entrer dans les détails.

la modulation dans les ondes des informations

C'est d'abord au sujet de la transmission de signaux sans fil que nous avons rencontré la notion de modulation. Il s'agit dans ce cas de modifier le signal de sortie d'un émetteur de façon à y incorporer un autre signal, que nous appellerons de l'information. Le signal de sortie de l'émetteur est une onde, c'est-à-dire une oscillation sinusoïdale caractérisée par une fréquence et une amplitude. La logique veut que les seules altérations possibles du signal portent soit sur l'amplitude, soit sur la fréquence. Nous nous en tiendrons à ces deux types essentiels

de modulation, en laissant aux gros ouvrages spécialisés la distinction entre les nombreux types dérivés.

la porteuse

Pour transmettre de la parole, de la musique, des données informatiques, en un mot ce que nous appelons « de l'information », c'est comme pour le pain, il faut une **porteuse**. On dit couramment porteuse pour **onde porteuse**. Si l'onde porteuse peut se propager dans l'espace, c'est une onde électromagnétique, qui peut provenir aussi

bien d'une source de lumière que d'une source de tension électrique à une fréquence suffisamment élevée. Nous avons donné des indications plus détaillées sur les ondes en général dans *elx* n°39 de mai 1991, page 12. L'article *ligne audio sous verre* de ce numéro propose une réalisation expérimentale dans laquelle la lumière est modulée en amplitude. Cet article-ci se limitera à la modulation des ondes électromagnétiques, lumière exclue. La tension alternative appliquée à l'antenne est produite par l'émetteur. Cet appareil n'est rien d'autre en fait qu'un générateur de tension alternative de puissance suffisante. La tension alternative produite est sinusoïdale, elle est caractérisée par sa fréquence et son amplitude et complètement décrite par la formule suivante :

$$U_{hf} = U_{\max} \sin(2\pi ft)$$

Dans cette formule, U_{hf} désigne la valeur de la tension à l'instant t , U_{\max} l'amplitude maximale, t le temps, π le rapport de la circonférence d'un cercle à son diamètre (3,14159). Si nous dessinons la courbe de cette tension en fonction du temps, nous obtenons quelque chose qui ressemble à la **figure 1**.

La formule fait référence à deux variables, l'amplitude maximale U_{\max} et la fréquence f . C'est en agissant sur l'une ou l'autre de ces deux variables qu'on imprime une modulation à la tension.

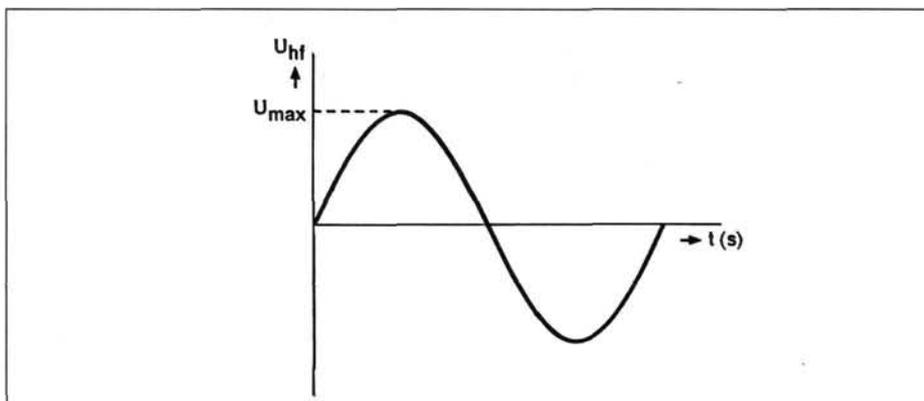


Figure 1 - L'onde produite par un émetteur est de forme sinusoïdale. L'amplitude maximale est désignée par U_{\max} .

la modulation d'amplitude

La modulation d'amplitude résulte, comme son nom l'indique, d'une altération de l'amplitude maximale U_{max} . Le procédé le plus simple consiste à arrêter et à remettre en service l'émetteur. À l'arrêt, l'amplitude est nulle, en marche elle est maximale. L'inconvénient de ce mode de modulation est que le code transmis ne peut prendre que deux valeurs, 0 ou 1. Il ne convient que pour le morse, les télex ou la transmission de données informatiques. Pour les informations analogiques, comme la musique ou la parole, cette méthode est inutilisable. Pour transmettre ce genre de signaux, il faut que l'amplitude maximale de l'onde porteuse soit modifiée proportionnellement à celle du signal. Si nous modulons l'émetteur avec un signal sinusoïdal, les variations de U_{max} doivent être sinusoïdales aussi. Cet effet est souvent obtenu en faisant varier la tension d'alimentation de l'étage de sortie : cette tension n'est-elle pas l'un des facteurs déterminant le gain ? La fabrication d'une source de tension dépendan-

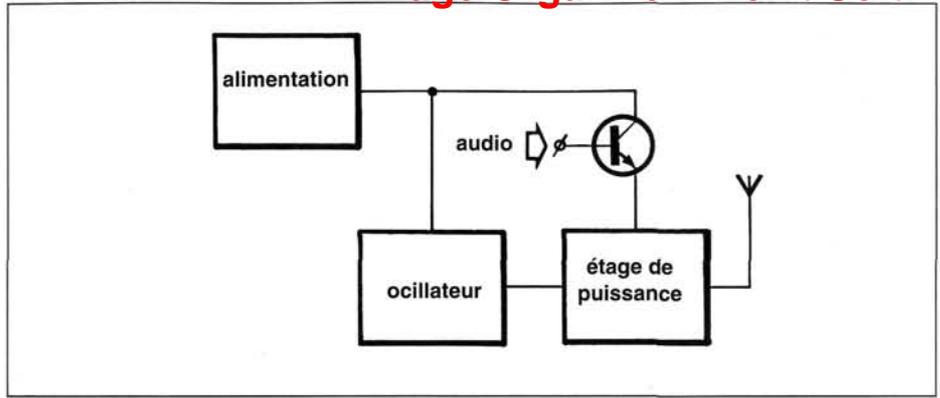


Figure 2 - Un transistor monté en série dans le circuit d'alimentation de l'étage de sortie est le procédé le plus simple pour moduler un émetteur en amplitude.

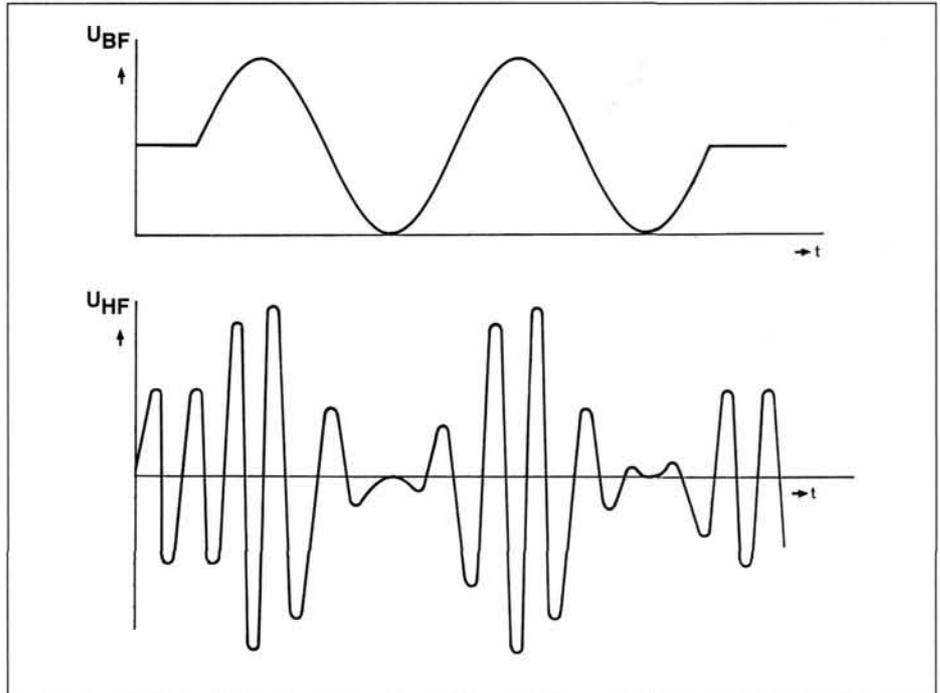


Figure 3 - L'amplitude de la tension de sortie suit fidèlement la forme de la tension à basse fréquence.

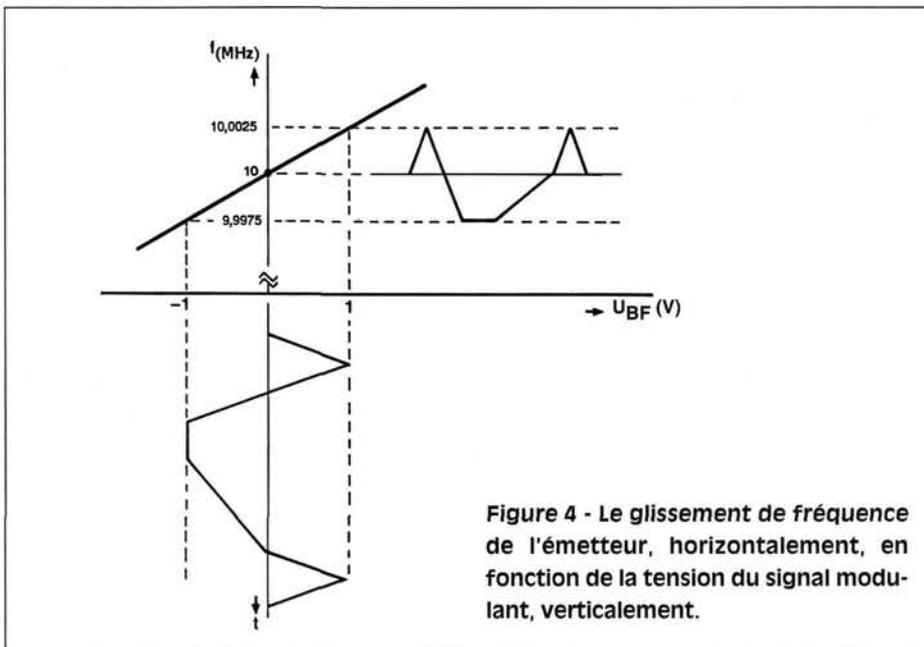


Figure 4 - Le glissement de fréquence de l'émetteur, horizontalement, en fonction de la tension du signal modulant, verticalement.

te d'un signal audio semble difficile, mais elle est simple en réalité. Il suffit pour cela de disposer un transistor en série dans la ligne d'alimentation du transistor de l'étage final, et de le piloter au moyen du signal audio (voir la figure 2). L'espace collecteur-émetteur est rendu plus ou moins conducteur par la tension à basse fréquence, ce qui fait varier la tension d'alimentation de l'étage de sortie.

Le signal produit par ce genre de montage est visible sur la figure 3. L'amplitude de la tension de sortie est proportionnelle à la tension du signal à basse fréquence.

La démodulation d'un signal modulé en amplitude est l'affaire

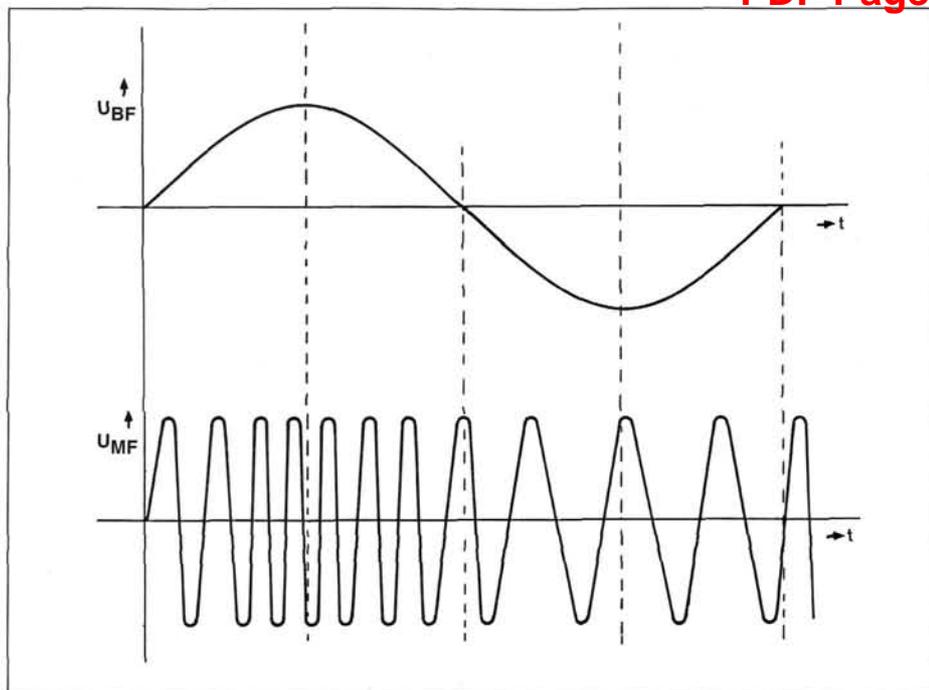


Figure 5 - En haut le signal à basse fréquence, en bas une représentation simplifiée de l'onde modulée en fréquence. Le rapport entre les deux longueurs d'onde n'est pas réaliste, mais il permet d'illustrer le principe.

la modulation de fréquence

répondre, nous supposons que l'émetteur est doté, comme les récepteurs, d'un condensateur variable pour la détermination de la fréquence de l'oscillateur. Une diode à capacité variable est connectée en parallèle sur ce condensateur ; il s'agit d'une diode spéciale (figure 6) qui se comporte comme un condensateur de capacité variable en fonction de la tension appliquée à ses électrodes. Si cette diode reçoit le signal à basse fréquence, sa capacité varie, ce qui modifie la capacité de l'assemblage condensateur-diode et par conséquent la fréquence d'accord de l'oscillateur.

d'un détecteur, qui se résume le plus souvent à une simple diode. En modulation de fréquence, l'amplitude reste constante et c'est la fréquence qui varie en fonction du signal modulant. Prenons un exemple pour essayer de comprendre le principe.

Supposons que la fréquence de l'émetteur est de 10 MHz, qu'il est modulé par une tension sinusoïdale de fréquence 1 kHz et de 1 V d'amplitude maximale. Dans ce cas la fréquence de l'émetteur doit varier autour de 10 MHz, les variations seront de forme sinusoïdale à une fréquence de 1 kHz. Les limites de cette variation doivent être fixées : par exemple la fréquence sera de 10,0025 MHz pour une tension de 1 V du signal modulant, et

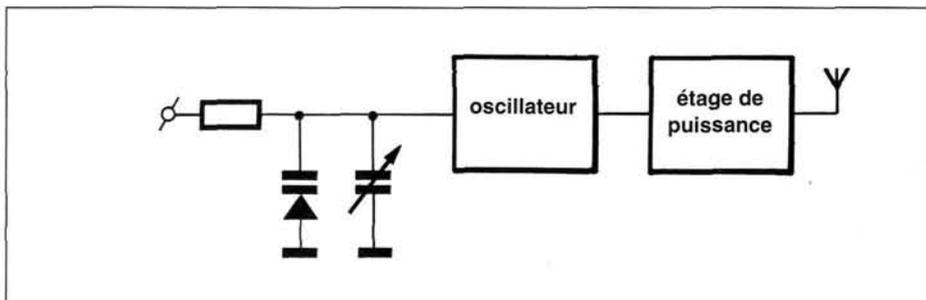
de 9,9975 MHz pour une tension de -1 V. La figure 4 représente sous forme graphique la correspondance entre une valeur de la tension du signal modulant et la fréquence de l'émetteur.

Un oscilloscope de caractéristiques convenables* permettrait de voir deux courbes comme celles de la figure 5. L'influence de la tension modulante sur la fréquence est fortement exagérée pour rendre le principe plus évident. En réalité la fréquence de la porteuse est environ dix mille fois supérieure à celle du signal modulant (100 MHz pour 10 kHz), et la variation de fréquence est très faible en valeur relative. Comme pour la modulation d'amplitude, la question qui se pose est : « Comment ? » Pour y

La modulation de fréquence connaît une variante dite modulation de phase. Elles se ressemblent comme deux sœurs, la variation de fréquence est remplacée par une variation de phase. En fait, des variations de fréquence résultent des variations de phase, tout comme des variations de phase résultent des variations de fréquence. Pour le récepteur, il n'y a pas de différence entre la modulation de phase et la modulation de fréquence : le démodulateur ne reconnaît les différences de fréquence que par les différences de phase. La modulation de phase est utilisée principalement dans des émetteurs pilotés par quartz, parce qu'il est difficile de faire varier leur fréquence dans des proportions suffisantes. En effet, la fréquence d'un oscillateur à quartz est déterminée par les caractéristiques physiques du cristal, plus que par les conditions électriques du circuit. Nous ne nous étendrons pas sur les procédés de modulation de phase, tous plus compliqués que ceux que nous venons de voir.

La modulation de phase et la modulation de fréquence permettent de

Figure 6 - La modulation de fréquence est obtenue par la mise en parallèle d'une diode à capacité variable sur le circuit oscillant.



*En anglais : *suitable* (private joke, hello Jan).

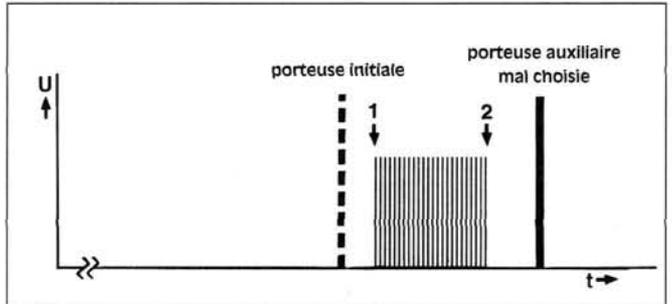
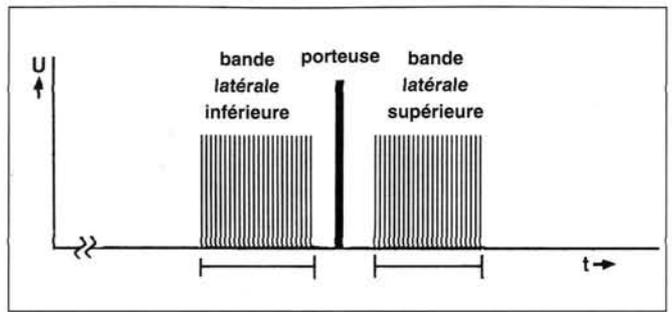
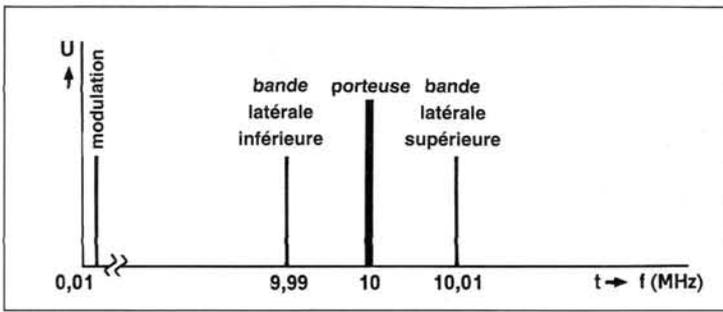


Figure 7 - La modulation produit deux bandes de fréquences supplémentaires, dites bandes latérales.

Figure 8 - Dans le procédé de modulation d'amplitude aussi, le spectre des fréquences occupées s'élargit, de part et d'autre de la porteuse, d'une bande latérale.

Figure 9 - Dans une réception en BLU, le signal audio qui résulte du mélange avec une porteuse auxiliaire mal choisie subit une sorte d'effet de miroir.

transmettre toutes les sortes de signaux. S'il s'agit d'informations logiques codées par deux états seulement, comme les signaux de télex, de morse ou numériques, on ne parle plus de modulation de fréquence (FM) mais de « codage par glissement de fréquence » ou FSK (*Frequency Shift Keying*). Dans ce mode de modulation, la fréquence varie, mais elle ne peut prendre que deux valeurs. La fréquence émise dépend de la valeur instantanée du signal à transmettre. Par exemple, pour une valeur zéro du signal numérique, la fréquence est de 10 MHz, pour une valeur un, la fréquence est de 10,01MHz.

modulation et mélange

Les procédés de modulation n'agissent pas seulement sur la fréquence ou l'amplitude du signal de sortie de l'émetteur, il se produit aussi un mélange de fréquences. Le mélange de fréquences est un phénomène physique exploité par ailleurs dans les récepteurs, le **battement** : si on superpose deux signaux de fréquence différente, on produit un certain nombre d'autres signaux de plus faible amplitude. Leur fréquence est particulière : l'un d'eux a une fréquence égale à la somme des deux fréquences originales, un autre a une fréquence égale à la différence entre les deux. Prenons un exemple chiffré : supposons que nous mélangeons un signal à 10 MHz avec un signal à 12 MHz. Nous en obtenons deux autres d'amplitude appréciable :

l'un de fréquence 2 MHz, l'autre de fréquence 22 MHz. Ce phénomène physique n'est pas limité aux ondes électromagnétiques, vous pouvez produire des battements avec deux instruments de musique imparfaitement accordés sur lesquels vous jouez la même note. Avec une oreille un peu exercée, vous entendez un son grave, qu'on appelle le battement, de fréquence égale à la différence entre celles des deux notes. En principe, la somme des deux fréquences est audible aussi, mais comme son amplitude est très faible, notre cerveau la prend en compte comme un des harmoniques qui contribuent à former le timbre de l'une des notes (le timbre de l'instrument est caractérisé entre autres par la quantité d'harmoniques qu'il contient). Les battements se produisent aussi pour des différences importantes entre les fréquences : vous entendez un son à 100 Hz et un autre à 900 Hz si l'un des instruments joue à 400 Hz et l'autre à 500 Hz.

Revenons à notre émetteur : si nous le modulons en amplitude ou en fréquence, nous superposons deux signaux et nous donnons naissance à des fréquences de battement. La conséquence est que le signal de sortie ne comportera pas une fréquence, mais quatre : la porteuse, le signal modulant, leur somme et leur différence. Chiffres : une porteuse à 10 MHz modulée en amplitude par un signal à 10 kHz. Le signal de sortie comporte les fréquences suivantes : 10 kHz, 10 MHz, 9,99 MHz

et 10,01 MHz. Le spectre du signal de sortie est représenté par la **figure 7**. Cette représentation est théorique, car la composante à 10 kHz n'est pas transmise par les étages de puissance à haute fréquence. La représentation du spectre produit par la modulation de fréquence est beaucoup plus compliquée car dans ce cas la porteuse se déplace, et avec elle les bandes latérales. En fait c'est toute la plage qui glisse à la fréquence du signal audio.

bande latérale unique

La modulation en bande latérale unique (BLU ou *SSB pour Single Side Band*) est une variante de la modulation d'amplitude. Nous avons vu que la modulation d'amplitude produit des bandes de fréquence latérales, représentées à droite et à gauche de la porteuse sur la **figure 7**. Il s'agit bien de bandes et non de fréquences isolées car le signal modulant ne contient pas une fréquence unique. Le spectre d'une porteuse modulée en amplitude par de la parole ou de la musique est représenté par la **figure 8**. Si nous regardons ce spectre attentivement, nous constatons que toute l'information du signal audio est contenue dans les bandes latérales et que la porteuse est inutile. Cela peut sembler en contradiction avec la nécessité d'une porteuse, énoncée plus haut. En fait, les bandes latérales se situent dans la même plage de fréquences que la porteuse, donc elles sont capables de produire les

champs électromagnétiques nécessaires à la propagation ; elles sont en quelque sorte leur propre porteuse. Si on essuie ses lunettes après cette constatation émouvante et qu'on regarde mieux, on s'aperçoit que les bandes latérales elles-mêmes sont redondantes : elles portent toutes les deux la même information. Si nous supprimons la porteuse inutile et une des bandes latérales, nous diminuons l'occupation du spectre des fréquences et nous laissons de la place pour un plus grand nombre d'émetteurs. Allons plus loin : l'émission de la porteuse et de la bande latérale demandaient de l'énergie que nous pouvons économiser maintenant. Le but n'est pas tant d'économiser de l'énergie que d'augmenter la portée de l'émetteur sans augmenter sa puissance. Un étage de puissance de 100 W pour la BLU est forcément moins lourd et moins cher que l'étage de 400 W nécessaire pour obtenir la même portée en modulation d'amplitude.

pour permettre au détecteur de reconstituer le signal à basse fréquence. La fréquence de l'oscillateur local peut être supérieure ou inférieure à la fréquence reçue. Si c'est le mauvais choix qui est fait, le signal audio subit une sorte d'effet de miroir, les fréquences hautes sont rendues par des basses et inversement. La figure 9 montre ce qui risque de se passer : on a émis la bande supérieure, sans la porteuse représentée en pointillés gras. La fréquence de la porteuse auxiliaire a été choisie, à tort, supérieure à celle de la bande reçue. La ligne repérée 1 correspond à des fréquences proches de la porteuse, donc aux plus basses du signal audio ; la ligne 2 représente les fréquences les plus éloignées de la porteuse originale, donc les plus hautes du signal audio. Leur position est inversée par rapport à la porteuse auxiliaire et la ligne 1 sera restituée comme une fréquence haute puisqu'elle est éloignée de la porteuse.

la modulation

L'émetteur en BLU est un peu plus compliqué que l'émetteur en MA de la figure 2, mais il s'agit du traitement de petits signaux et non de signaux de puissance. L'organe essentiel est un mélangeur équilibré. Ce circuit mélange le signal modulant et la porteuse en n'en produisant que les bandes latérales (inférieure et supérieure). La porteuse et le signal audio sont supprimés par des filtres. Le spectre du signal produit par le mélangeur équilibré ressemble à celui de la figure 8, soustraction faite de la porteuse. Un filtre à bande très étroite le débarrasse ensuite de l'une des deux bandes latérales ; n'importe laquelle puisque les deux portent la même information. Du côté du récepteur, il importe cependant de savoir laquelle des bandes latérales a été transmise. La détection d'un signal en BLU suppose que le signal soit mélangé avec une porteuse produite localement,

les autres types de modulation

Quoi qu'on vous en dise, il n'existe que deux sortes de modulation, deux façons d'altérer une onde porteuse : en agissant sur sa fréquence ou en agissant sur son amplitude. Toutes les formes de modulation dérivent de l'une de ces deux-là. Par exemple, le système dit PCM, pour *Pulse Code Modulation*, n'est pas un type de modulation mais un type de codage. Le signal à transmettre est d'abord codé sous la forme d'impulsions, puis le train d'impulsions sert à moduler la porteuse en amplitude ou en fréquence. Ne vous laissez donc pas égarer par les appellations mystérieuses qui pourraient laisser supposer qu'il existe d'autres caractéristiques d'une tension sinusoïdale que son amplitude et sa fréquence.

87706

EURO-COMPOSANTS

4, route Nationale - B.P. 13
08110 BLAGNY
tél. 24 27 93 42 - fax 24 27 93 50

KITS
COMPOSANTS
CAPTEURS
MESURE
OUTILLAGE
ACCESSOIRES

Spécialistes de la vente par correspondance
Liste de nos promotions sur simple demande
CATALOGUE 1992 CONTRE 40 F

ST QUENTIN RADIO

6, rue de St Quentin
75010 PARIS
Tél. : (1) 40 37 70 74
Fax : (1) 40 37 70 91

COMPOSANTS ACTIFS - PASSIFS

Catalogue 30 F par correspondance
15 F au comptoir



Votre spécialiste en composants,
appareil de mesure, outillage, accessoires,
kits, librairie technique

HB Composants

7 bis, Rue du Dr Morere
91120 PALAISEAU
Tél. : 69 31 20 37 - Fax : 60 14 44 65
Horaires : du Lundi au Samedi de 10 h à 13 h
et de 14 h 30 à 19 h

BERIC 1992

TELECOPIER-NOUS 24 h/24 ou (1) 46.57.27.40

(1) 46-57-68-33

REVUE-NOUS BERIC - BP4 92241 MALAKOFF CEDEX

43 Rue Victor Hugo 92240 MALAKOFF

Open 7 days a week
de mardi à vendredi
de 10h00 à 19h00
Samedi
de 10h00 à 13h30
Mardi à 13h30

sévère mais juste

Au rami comme au scrabble, certains joueurs s'éternisent tandis que leurs partenaires s'impatientent. Un arbitre impartial serait bien utile pour garder son intérêt au jeu.



minuterie de rami

C'est pas une vie que la vie qu'on vit ! Quand un collaborateur d'ELEX rentre chez lui après une longue journée passée au clavier ou avec un fer à souder, il a envie de tout autre chose que d'électronique : un bon livre, une petite bière, ou n'importe quoi. Malheureusement, il est sollicité à propos de tout et de rien. Que la partie de rami s'éternise parce que certains joueurs ne savent pas se décider, on lui demande une minuterie ; quoi de plus normal, puisqu'il fait dans l'électronique ? Encore une soirée passée à griffonner quelques bouts de schéma et à bricoler quelques montages d'essai. Le résultat est assez intéressant pour mettre fin aux protestations pendant le jeu et pour donner naissance à un article dans le magazine.

le schéma

Commençons par voir ce que le montage doit faire : produire un signal sonore après un délai réglable de 30, 60 ou 120 secondes, dont le décompte sera indiqué par une LED, sans toutefois le moindre gaspillage d'énergie car l'alimentation se fera par piles ; le mode d'emploi restera

forcément très simple. Le résultat, représenté par le schéma de la **figure 1**, est-il conforme à ces exigences ? S'il semble un peu plus compliqué que ce que laisse attendre la description qui précède, c'est parce que les gens de notre laboratoire ont une tendance au perfectionnisme assez difficile à combattre. Attaquons par le haut à gauche et voyons où nous emmènent les techniciens fous...

Les portes NAND N1 et N2 forment une bascule RS (*Reset-Set*). Elles font partie d'un circuit intégré de type 4093, qui contient quatre NAND à *trigger de Schmit*. Si le 4093 est un circuit CMOS, c'est pour minimiser la consommation du montage. La touche S2 permet de mettre (*Set*) la bascule à 1, sortie 3 au niveau haut, sortie 4 au niveau bas ; la touche S2 remet la bascule dans l'état opposé (*Reset*). Les résistances R1 et R2 rappellent les entrées au niveau haut tant qu'aucune touche n'est actionnée. Le condensateur C1 effectue une remise à zéro à la mise sous tension : comme il est déchargé, il applique un niveau bas à l'entrée « stop ». Il lui faut un certain temps (quelques millisecondes) pour se charger à travers R2 et « relâcher » la touche.

Nous pouvons donc être sûrs que le circuit sera toujours remis à zéro à la mise sous tension.

La troisième porte, N3, fonctionne en oscillateur. C'est un montage classique, mise à part la présence de R3 et D2. Le principe est simple : lorsque la sortie (broche 10) est à 1, le condensateur C2 se charge à travers le potentiomètre P1. Il arrive un moment où la tension de C2 dépasse le seuil de commutation de l'entrée (broche 9) ; à ce moment, comme les deux entrées sont au niveau haut (nous supposons que la bascule RS est à 1), la sortie passe à l'état bas. Le condensateur se décharge maintenant à travers P1, bien sûr, mais aussi à travers R3 et D1, qui est polarisée en sens passant. La tension de C2 décroît, rapidement parce que la valeur de R3 est faible, jusqu'à devenir inférieure au seuil de commutation bas. La sortie bascule, le condensateur recommence à se charger, et ainsi de suite. Ils nous ont réinventé l'oscillateur. Normalement, le multivibrateur astable délivre un signal de sortie symétrique, dont les temps d'impulsion et de pause sont égaux. Celui-ci fait exception à la règle, du fait de la présence de D1

interrupteur crépusculaire

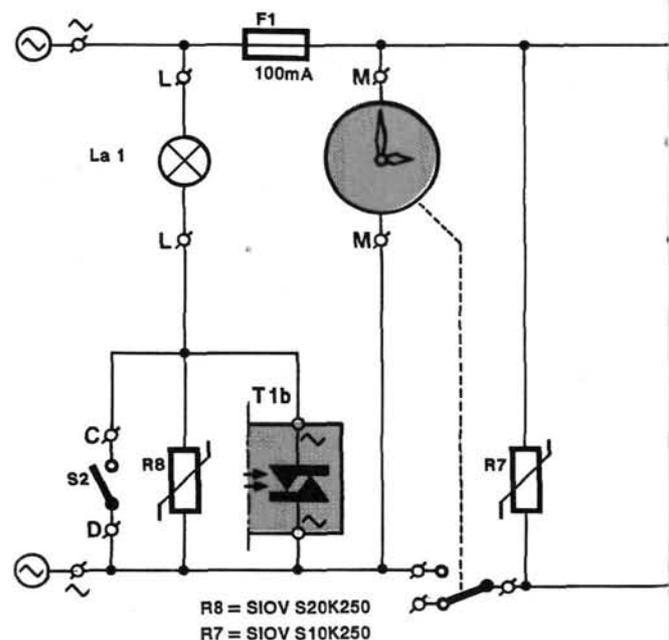
un simulateur de présence
mécano-opto-électronique

Pour peu qu'on veuille bien considérer les circuits électroniques ou la mécanique comme quelque chose de vivant (sinon pourquoi insulterait-on un ordinateur qui ne fait pas ce qu'on en attend, pourquoi donnerait-on des coups de pied à une voiture qui ne veut pas démarrer ?), ce montage est un exemple de symbiose.

Tout comme dans les exemples de symbiose naturelle, il y a ici deux dispositifs de nature différente qui cohabitent et collaborent : un peu d'électronique et une minuterie électro-mécanique. Le résultat est un interrupteur crépusculaire aux propriétés particulières.

Les propriétés particulières de cet interrupteur crépusculaire tiennent à sa construction et à son fonctionnement : quand la nuit arrive, l'électronique allume automatiquement la lumière extérieure, ensuite de quoi la minuterie mécanique l'éteint au bout d'un certain temps. Quelle est l'utilité de ce système ? Simple : en allumant la lumière, intérieure ou extérieure, quand la nuit tombe, puis en l'éteignant à l'heure d'aller se coucher, il laisse croire que quelqu'un est dans la maison. Un observateur extérieur plus ou moins bien intentionné, mais pas complètement débile, ne s'aventurerait pas à cambrioler une maison occupée. Vous pouvez donc profiter en paix de vos vacances ou de votre soirée à l'extérieur.

Figure 1 - Le circuit n'est en fait qu'une extension astucieuse d'une minuterie électro-mécanique. La résistance particulière repérée « LDR » est une résistance dont la valeur varie en fonction de la lumière qu'elle reçoit (Light Dependent Resistor) ; c'est cette photo-résistance qui renseigne le reste du circuit sur l'intensité de l'éclairage ambiant.



bascule RS pour éviter les clignotements aux alentours de la condition de basculement du comparateur. Toutes ces fonctions sont remplies par le 555, dans un boîtier à huit broches. Sans lui, nous aurions dû faire appel à un comparateur, à une bascule, et à un étage de puissance séparés.

Le maintien de la broche 2 au niveau bas pendant un certain temps maintient la sortie (broche 3) au niveau haut, ce qui empêche la LED de l'opto-triac de commander l'allumage de la lampe. La situation ne change pas aussi longtemps que la LDR (R5) reçoit assez de lumière. La faible résistance de la LDR éclairée maintient l'entrée du comparateur à un niveau inférieur aux deux tiers de la tension d'alimentation. Tout change dès que l'éclairage de la LDR passe en-dessous d'un seuil fixé par le potentiomètre P1. La tension de la broche 6 passe alors à une valeur supérieure aux deux tiers de la tension d'alimentation, ce qui provoque le basculement du comparateur et la mise à 1 de la bascule RS. Le résultat final est l'allumage de la lampe, puisque la sortie passe au niveau bas et qu'un courant traverse la LED de l'opto-triac.

Comme la bascule RS est mise à 1, la lampe reste alimentée quelles que soient les variations de l'éclairage ambiant. Elle ne s'éteindra qu'au bout du temps programmé par la minuterie : le contact s'ouvrira et coupera l'alimentation du transformateur, celle du circuit intégré, celle de la LED, donc celle de la lampe. Le moteur de la minuterie, connecté directement au secteur, continue de tourner et le processus se répètera demain, à la tombée de la nuit pour l'allumage, à l'heure programmée pour l'extinction.

les autres composants

Comme le principe de fonctionnement repose sur la minuterie, la LDR et l'opto-triac, nous avons laissé de côté les autres composants, qui jouent un rôle accessoire*. C'est à leur tour de venir sous les feux de la rampe. Si les deux résistances R8 et R9 ont droit à une représentation particulière, c'est parce qu'elles ont des caractéristiques particulières. Il s'agit de **varistances**, ou *Voltage Dependent Resistors*, dont la valeur dépend de la tension. Leur

résistance, très forte normalement, tombe à une valeur très faible dès que la tension à leurs bornes dépasse une valeur donnée. Les types S10K250 et S20K250 (fabriqués par Siemens) sont prévus pour une tension nominale de 250 V efficaces. Toute pointe de tension supérieure à la valeur crête de cette tension efficace met la varistance pratiquement en court-circuit. Le temps de réponse est extrêmement court, ce qui empêche la pointe de tension de provoquer des dégâts plus loin dans le circuit. Le rôle des varistances dans le montage est de protéger le triac des pointes de tension que véhicule le secteur, surtout lors des commutations de charges importantes ou inductives, ou encore de charges inductives importantes. Le nombre qui suit le S chez Siemens indique le diamètre de la pastille d'oxyde de zinc qui constitue la varistance. Plus ce diamètre est grand, plus le composant peut dissiper d'énergie ; c'est pourquoi R7, qui n'a guère à supprimer que les pointes de commutation du transformateur Tr1 de 1,5 VA, est plus petite que R8.

Ce petit transformateur, Tr1, est chargé d'alimenter l'électronique sous une tension simplement filtrée de 9 V environ. Il est alimenté par le contact de la minuterie. La tension du secondaire double est redressée par les diodes D1 et D2, puis filtrée par C3. Les condensateurs C1 et C2 bloquent les parasites que produit la commutation des diodes.

La LED D5 que nous trouvons ensuite sert simplement à indiquer que le montage est sous tension, elle permet de voir d'un coup d'oeil si le contact de la minuterie est fermé ou ouvert. Le diviseur de tension constitué par R1, la LDR R5 et le potentiomètre P1 permet de déterminer la sensibilité du montage à la lumière, autrement dit le niveau d'éclairage qui sera considéré comme crépuscule par l'automate. Le potentiomètre P1 permet de décider si la lampe s'allumera pour un niveau d'éclairage relativement important ou seulement quand il fera déjà noir. Le réglage doit être fait en fonction de l'exposition du capteur à la lumière ; plus la résistance de P1 est faible, plus il fera noir quand la lampe s'allumera.

LISTE DES COMPOSANTS

- R1 = 4,7 kΩ
- R2 = 470 kΩ
- R3 = 1 MΩ
- R4 = 470 Ω
- R5 = LDR
- R6 = 47 Ω
- R7 = VDR S10K250
- R8 = VDR S20K250
- R9 = 560 Ω
- P1 = 25 kΩ, variable

- C1, C2 = 10 nF
- C3 = 470 μF/16 V
- C4, C5 = 10 μF/16 V
- C6 = 22 nF

- D1, D2 = 1N4001 à 1N4007
- D3, D4 = 1N4148
- D5 = LED
- IC1 = NE555
- T1 = opto-triac SHARP S202DS4
- S1 = poussoir à fermeture
- S2 = interrupteur secteur unipolaire
- Tr1 = transformateur 2 × 6 V 1,5 VA
- F1 = fusible 100 mA avec porte-fusible

bornes à vis pour circuit imprimé
minuterie à 1 contact à fermeture

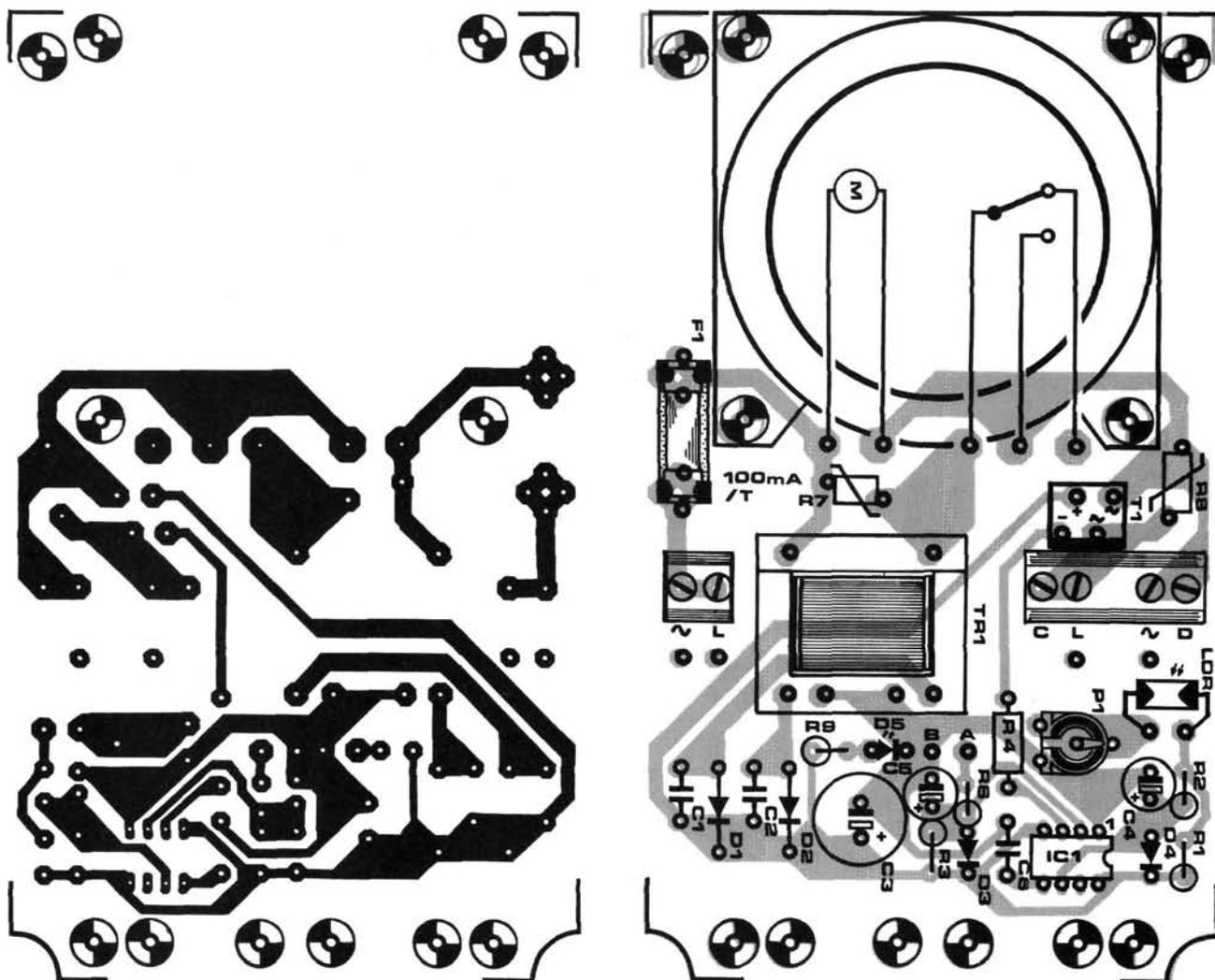
elex-abc

varistance

La varistance, désignée aussi par VDR (*Voltage Dependent Resistor*), peut se comparer à une diode zener, à cette différence près qu'elle a les mêmes propriétés dans les deux sens. Elle peut donc être utilisée pour « nettoyer » des tensions alternatives. Au moment de l'entrée en conduction, c'est dans les fils d'alimentation que se produit la chute de tension. Comme la résistance est faible, les intensités atteignent pendant une fraction de seconde un certain nombre de kilo-ampères.

La tension de seuil est beaucoup moins précise que celle de la diode zener, ce qui interdit d'utiliser la varistance pour réguler une tension. Il existe des varistances de toutes tensions, à partir d'une dizaine de volts, et de différentes puissances, en fonction de la taille de la pastille.

*Il n'y a pas de petits rôles, il n'y a que de petits appointements. Le premier lecteur qui nous communique le nom de l'auteur gagne notre considération.



construction et installation

La résistance R2 constitue avec C4 un circuit de retard. Ce réseau évite que le montage réagisse à des variations brèves de l'éclairage, comme le passage en rase-mottes d'une compagnie de perdreaux ou d'un chat volant. La diode D4, comme D3, évite que les condensateurs appliquent aux entrées du circuit intégré une tension supérieure à la tension d'alimentation, au moment de la déconnexion du transformateur par la minuterie.

Les derniers composants à examiner sont le poussoir S1 et l'interrupteur S2. L'interrupteur permet d'allumer la lampe indépendamment de la minuterie et de l'éclairage ambiant. Le poussoir, au contraire, permet d'éteindre avant que la minuterie coupe le courant, par exemple après qu'une averse d'orage ait suffisamment fait baisser l'éclairage ambiant ou à votre retour du cinéma.

Il va sans dire que la réalisation et l'installation demandent le plus grand soin. Cela va encore mieux en le disant, surtout pour un montage qui est relié au secteur. Prenez toutes les mesures de sécurité nécessaires, plus quelques autres.

La platine à circuit imprimé de la figure 2 est assez grande pour laisser entre les pistes soumises à la tension du secteur les distances d'isolement indispensables. Comme la minuterie sera montée aussi sur la platine, vous n'aurez pas à faire courir de fils dangereux sur de grandes longueurs et l'ensemble sera assez compact pour être enfermé dans un coffret isolant. Le câblage des composants ne pose pas de problème si vous respectez les polarités. Le coffret laisse sortir deux cordons à deux fils, l'un pour l'entrée, l'autre pour la sortie de la tension du secteur. Les photos ne montrent pas le cadran de la minuterie, tout simplement parce que le réglage est fait une fois pour toutes et qu'il ne nous a pas

paru utile de pratiquer une découpe dans le couvercle du coffret. Vous pouvez être d'un autre avis et monter la minuterie à l'extérieur, ou découper le coffret. Mais dans ce cas veillez à isoler toutes les parties reliées au secteur et établissez les liaisons avec du fil de résistance mécanique suffisante. Il n'y a pas de choix possible pour la touche, l'interrupteur, ni la LDR : tous doivent être accessibles de l'extérieur. L'interrupteur S2 demande un isolement soigné puisqu'il est soumis au 220 V. La LDR sera exposée à la lumière par un trou dans le coffret, si possible fermé aux doigts par une chute de plexiglas. Naturellement, le réglage du potentiomètre doit se faire hors tension. Toujours pour votre sécurité, il faut fixer la platine dans un coffret isolant, sans vis métalliques qui dépassent. Si les vis traversent, il vaut mieux qu'elles soient en nylon. Les cordons secteur seront munis d'un dispositif anti-traction, comme un noeud par exemple.

886026

Le système K



le multivibrateur bistable

pourquoi ?

Une bascule RS réalisée en composants discrets, garantie sans aucun circuit intégré. Comme nous l'avons annoncé dans l'épisode précédent, nous nous intéressons aujourd'hui à la bascule bistable. À l'heure actuelle, cette fonction est presque toujours remplie par des circuits intégrés, des portes NON-OU (NOR) ou NON-ET (NAND). Tout comme pour la bascule astable, nous cherchons à mieux comprendre la fonction en réalisant une bascule discrète, c'est-à-dire construite avec des transistors au lieu de circuits intégrés.

À quoi peut servir une bascule bistable ? Il n'y a pas loin à chercher pour trouver des applications : voyez par exemple le bouton de sonnette. Normalement la sonnette ne retentit que pendant que le bouton est actionné. Si l'habitant des lieux est absent, il ne peut pas savoir à son retour qu'un visiteur s'est présenté. Comme c'est quelqu'un de malin, rien de plus simple pour lui que de mettre au point le dispositif suivant : dès qu'une pression, même brève, s'exerce sur le bouton, la sonnette reste alimentée. À partir de ce moment, les actions du visiteur sur le bouton restent sans effet. Il peut tambouriner tout son soûl sur le bouton, la sonnerie ne s'arrête pas.

L'habitant des lieux est le seul à pouvoir, de l'intérieur, appuyer brièvement sur un deuxième bouton qui ramène la sonnette au silence. Rien de compliqué non plus pour remplacer la pollution sonore par un voyant lumineux plus discret. Notre bricoleur est certes quelqu'un d'astucieux, mais il est à plaindre : il ne connaît rien aux semi-conducteurs, et il va bricoler son montage avec un relais. Voyons comment fonctionne cette bascule à relais, représentée en **figure 1**.

Une pression sur le bouton alimente la bobine du relais et la sonnette prise en parallèle. Le « truc » est de câbler le contact du relais en parallèle sur le poussoir S1. Après une pression sur le bouton, peu importe que le doigt reste ou non, le relais s'alimente lui-même par son contact. On parle de relais auto-entretenu. La seule façon de changer l'état du montage est d'ouvrir le circuit de la bobine par une pression sur le poussoir à ouverture S2. Comme le courant ne circule plus à travers

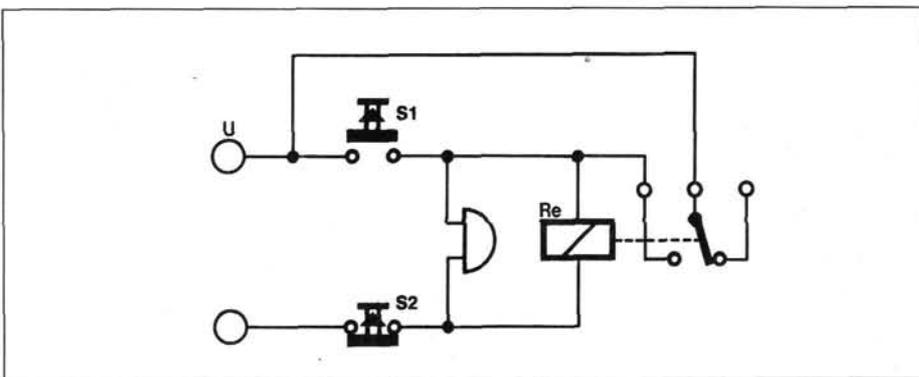


Figure 1 - Un relais permet de construire un circuit auto-entretenu simple : le contact est câblé en parallèle sur le poussoir. Lors du relâchement de S1, l'ensemble reste alimenté par le contact du relais, en position travail.

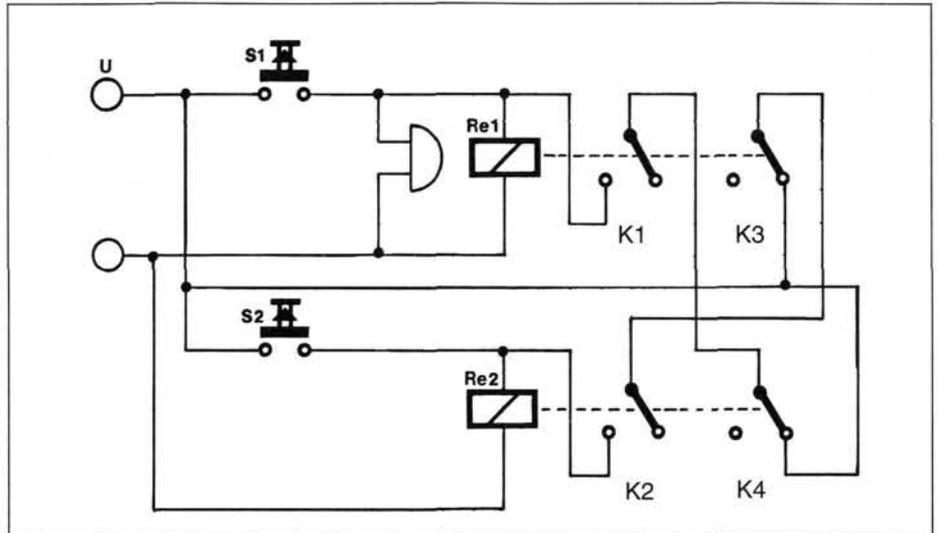
Figure 2 - Les deux parties de ce montage sont exactement équivalentes, à la sonnette près. Une pression sur un des poussoirs actionne le relais correspondant et relâche l'autre.

cause fugitive, effet permanent

la bobine, le contact est relâché. Une pression supplémentaire sur S2, ou dix, ou cent, ne peut rien changer, il faudra une pression sur S1 pour remettre en fonction la sonnette et les relais. La remarque la plus importante sur ce montage est qu'une action brève, sur S1 ou S2, suffit à changer durablement l'état du circuit.

doigts et niveaux logiques

Les poussoirs de la figure 1 sont actionnés au doigt. Le doigt de l'électronique est le courant. Nous allons donc remplacer les interrupteurs et les doigts par des transistors, qui sont capables de faire circuler du courant à la demande. Nous les avons déjà comparés à des interrupteurs dans le dernier épisode : au lieu de la pression d'un doigt, c'est un courant de base qui les rend conducteurs. Ce courant circule si la tension a atteint une valeur minimale que nous appelons le niveau logique 1. Toujours dans le schéma de la figure 1, il existe deux sortes de contacts : l'un, ouvert au repos, est dit à fermeture ; l'autre, fermé au repos, est dit à ouverture. Les électromécaniciens et automaticiens ont l'habitude de ces contacts O ou F, toujours disponibles sur les relais et les auxiliaires d'automatisme. Les électroniciens, quant à eux, préfèrent ne travailler qu'avec des contacts identiques, à fermeture. Si nous devons réaliser le circuit de la figure 1 sans poussoir à ouverture, la fonction de S2 devrait être remplie par des contacts de relais supplémentaires. Le schéma serait celui de la figure 2. Les deux poussoirs sont à fermeture, mais le relais est maintenant flanqué d'un deuxième, et tous les deux sont à deux contacts inverseurs (K1 et K3, K2 et K4). Si on fait abstraction des contacts K3 et K4 supplémentaires, il ne s'agit que d'une répétition du montage de la figure 1. En fait, chacun des relais a un de ses contacts pris en série dans le circuit de la bobine de l'autre,

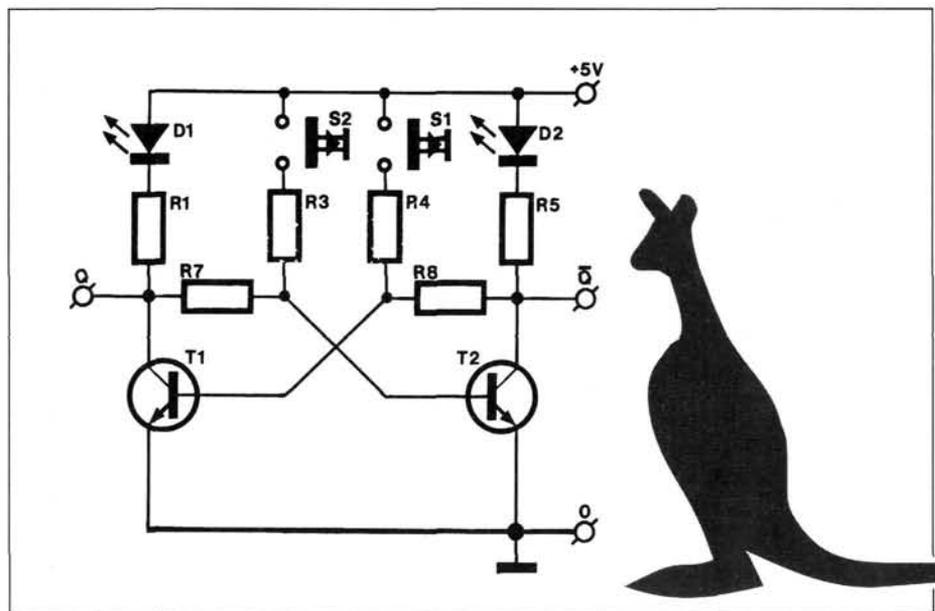


comment ?

ce qui leur interdit d'être actionnés tous les deux en même temps, puisque chaque fois qu'un relais est actionné, il désactive l'autre. Ce couplage croisé ressemble à celui des transistors du multivibrateur astable du dernier épisode. Rien d'étonnant à ce que le montage à transistors qui remplacera ces deux relais prenne l'aspect que nous lui voyons sur la figure 3. Le schéma ne comporte pour l'instant que les composants strictement nécessaires au fonctionnement en bascule bistable. Nous verrons qu'il en faut encore d'autres. Cette bascule peut être mise à un, ce qu'en anglais on appelle *set*, ou remise à zéro, *reset*. Elle s'appelle donc bascule RS, et ce sont les lettres R et S qui désignent les entrées.

Le transistor, dans ces montages de bascules, est toujours utilisé comme un commutateur, qui remplace les contacts de relais. Le contact est fermé, c'est-à-dire que le courant passe par l'espace collecteur-émetteur, quand une tension de 0,7 V au minimum est appliquée à la base. Dans cet état, si le courant de collecteur n'est pas excessif, on peut considérer que la tension de collecteur est nulle. Dans l'état bloqué, la tension de collecteur est égale, à un poil près, à la tension d'alimentation. Voilà donc défini le rôle de T1 et T2 : ce sont deux interrupteurs. La tension de chaque collecteur est appliquée par une résistance (R7 et R8) à la base du transistor opposé. Supposons T1 conducteur. La tension de son collecteur est basse, trop basse pour faire conduire T2. Comme ce transistor-ci

Figure 3 - Version simplifiée d'une bascule RS à transistors. La platine proposée correspond à cette version minimale quand aucun des ponts en fil n'est mis en place.



est bloqué, la tension de son collecteur, même déduction faite du seuil de tension de la LED, est suffisamment haute pour faire conduire T1. Nous avons donc bien fait de supposer T1 conducteur, car il l'est. Pour changer cet état de choses provisoirement immuable, nous appuyons sur S2 : la base de T2 est portée au potentiel de l'alimentation par R3. La tension de collecteur de T2, qui conduit à présent, s'effondre, de sorte que T1 se bloque. Une fois T1 bloqué, la tension de son collecteur augmente suffisamment pour faire conduire T2, même si nous relâchons S2. Le circuit a basculé : c'est le deuxième transistor qui se substitue à l'action manuelle pour bloquer T1. Les niveaux logiques sur les collecteurs des transistors sont inversés ; ils resteront dans cet état jusqu'à ce qu'une

pression sur S2 les inverse à nouveau. Comme le montage est parfaitement symétrique, l'appellation R ou S des entrées est indifférente. Dans la pratique, on n'utilise le plus souvent qu'une des deux sorties symétriques ; on repère alors les entrées comme suit : celle qui provoque la mise à 1 de la sortie utilisée est dite *Set*, celle qui la remet à zéro est dite *Reset*. Dans les recueils de caractéristiques, les entrées sont désignées par SET et RESET. La barre qui coiffe les symboles (lisez "set-barre") indique que l'entrée est active au niveau bas. La première application de la bascule RS, mémoriser des états logiques fugitifs, n'est pas la seule. Pour mettre en pratique une autre application, nous allons compléter le

schéma, c'est-à-dire mettre en service les composants qui étaient restés isolés jusqu'ici. Les deux entrées vont être réunies pour n'en faire qu'une. Le montage fonctionne maintenant comme l'interrupteur d'une lampe de chevet : la première pression allume la lampe, la deuxième l'éteint, et ainsi de suite. La figure 4 montre l'état de la lampe au fur et à mesure que se succèdent les pressions sur le bouton : les mouvements du bouton sont deux fois plus nombreux que les changements d'état de la lampe. Si nous considérons la cause et l'effet comme des signaux périodiques, la division par deux de la fréquence est évidente. Cette division de fréquence est possible aussi avec notre bascule bistable.

de la bascule RS au diviseur de fréquence

Figure 4 - Un interrupteur de lampe de chevet utilisé comme diviseur de fréquence. L'installation des ponts en fil donne les mêmes propriétés à notre platine d'essais.

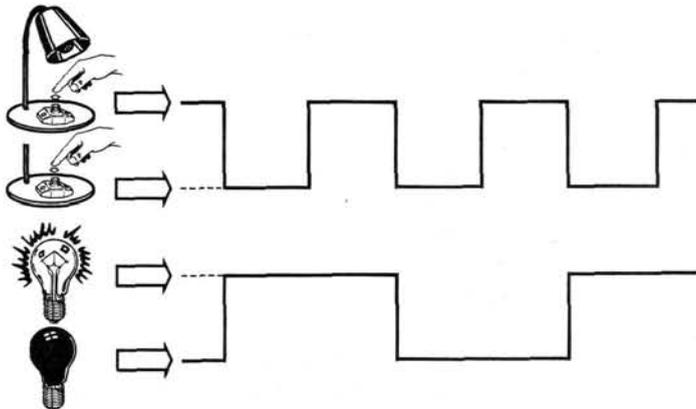


Figure 5 - La transformation, théorique, du multivibrateur bistable en diviseur par 2. La sortie active ferme un interrupteur qui conduira le signal d'entrée à la base du transistor opposé.

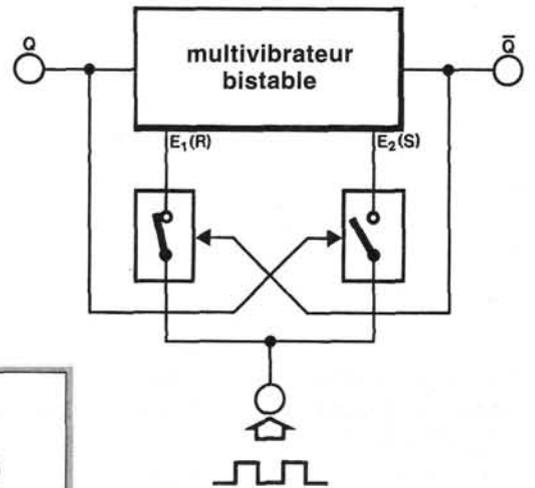
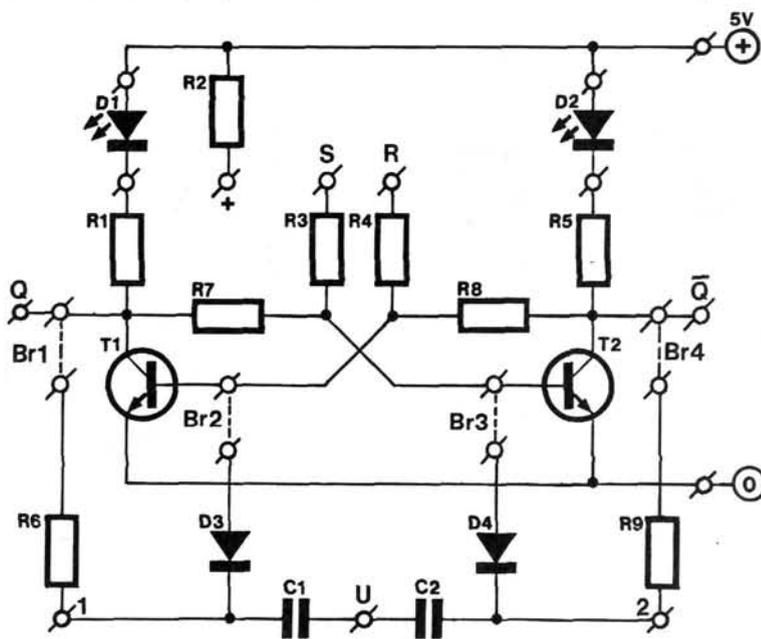


Figure 6 - Le circuit complet, avec la conversion du bistable en diviseur par 2.



liste des composants

- R1, R5 = 220 Ω
- R2, R6, R9 = 4,7 kΩ
- R3, R4, R7, R8 = 10 kΩ
- C1, C2 = 1 nF
- D1 = LED rouge
- D2 = LED verte
- D3, D4 = 1N4148

fiches bananes et picots à souder

Il suffirait pour cela d'ajouter un inverseur, commandé par les sorties, qui changerait à chaque fois l'entrée vers laquelle est dirigée l'impulsion suivante (figure 5). Nous avons adopté une solution plus simple (figure 6) : les diodes connectées aux bases des transistors sont orientées de telle façon qu'elles ne peuvent conduire du courant que vers la masse. Une impulsion négative sur la cathode peut faire basculer le circuit puisqu'elle bloque le transistor correspondant. Cette impulsion négative est sans effet sur celui des transistors qui est déjà bloqué. Une impulsion positive sur les cathodes est sans effet aucun puisque la diode ne laisse pas passer de courant dans ce sens-là. Les résistances entre les collecteurs et les cathodes (R6 et R9) servent à fixer le potentiel des diodes en l'absence de signal d'entrée.

Pour comprendre le fonctionnement, nous allons faire une supposition, comme dans le cas précédent. Nous considérons T1 conducteur, sa tension de collecteur est nulle, ou assez basse pour être considérée comme un niveau logique bas, transmis à la cathode de D3 par R6. L'anode voit une tension de 0,6 à 0,7 V, correspondant au seuil de la jonction base-émetteur. La diode D3, polarisée ainsi, est donc conductrice. L'autre transistor, T2, est bloqué ; sa tension de collecteur est à peine inférieure à la tension d'alimentation.

La cathode de D4 est portée par R9 au même potentiel que le collecteur de T2 tandis que son anode est portée au potentiel de la masse par R7 : la diode D4 est donc bloquée.

Le front descendant d'une impulsion d'entrée appliquée au point U sera transformé par les condensateurs C1 et C2 en une courte impulsion de tension inférieure à celle de la masse. Cette impulsion de tension négative est appliquée aux deux cathodes. Puisque D4 est bloquée, l'impulsion n'a pas d'effet sur elle. Par contre, comme D3 est polarisée en sens passant, et que nous appliquons une tension négative à sa cathode, l'impulsion sera transmise à la base de T1. La tension de la base sera « tirée » en-dessous du seuil de 0,6 V, T1 va se bloquer et le circuit basculera. Comme le circuit a basculé, les rôles de T1 et T2 sont inversés. La prochaine impulsion provoquée par un front descendant à l'entrée bloquera T2 et fera entrer T1 en conduction. Les diodes font que les fronts montants, ou impulsions positives, restent sans effet sur le circuit.

Il ne resterait pas grand chose de toute cette théorie si elle ne s'appuyait pas sur un peu de pratique. Pour expérimenter avec votre platine câblée conformément à la figure 7, commencez par l'enficher sur la platine de base équipée de l'alimentation 5 V décrite dans le n°39 de décembre 1991. Lais-

sez de côté pour l'instant tous les ponts en fil. L'une des deux LED s'allume, rien ne permet de prévoir laquelle. Vous pouvez maintenant faire basculer le montage, c'est-à-dire allumer l'autre LED, en raccordant brièvement à la masse l'une des entrées (R ou S). Quand vous aurez mis en évidence ce fonctionnement, vous pourrez connecter les ponts en fil et un interrupteur à l'entrée U pour faire fonctionner la bascule en diviseur de fréquence. La source de signaux sera par exemple la platine à multivibrateur astable du mois dernier : vous obtiendrez sur la platine de division un clignotement de fréquence deux fois plus basse que celle du multivibrateur astable.

Appliquez à l'entrée le signal à 100 Hz que délivre accessoirement l'alimentation 5 V. Le clignotement des LED est trop rapide pour être visible mais vous le rendrez audible en connectant à une sortie l'un ou l'autre amplificateur muni d'un haut-parleur (comme celui du n°38 de novembre). Vous pourrez entendre un son à 50 Hz en sortie, à 100 Hz en entrée.

Le prochain épisode nous permettra de montrer comment combiner entre elles quelques-unes des platines du système K, pour construire des circuits plus compliqués.

86724

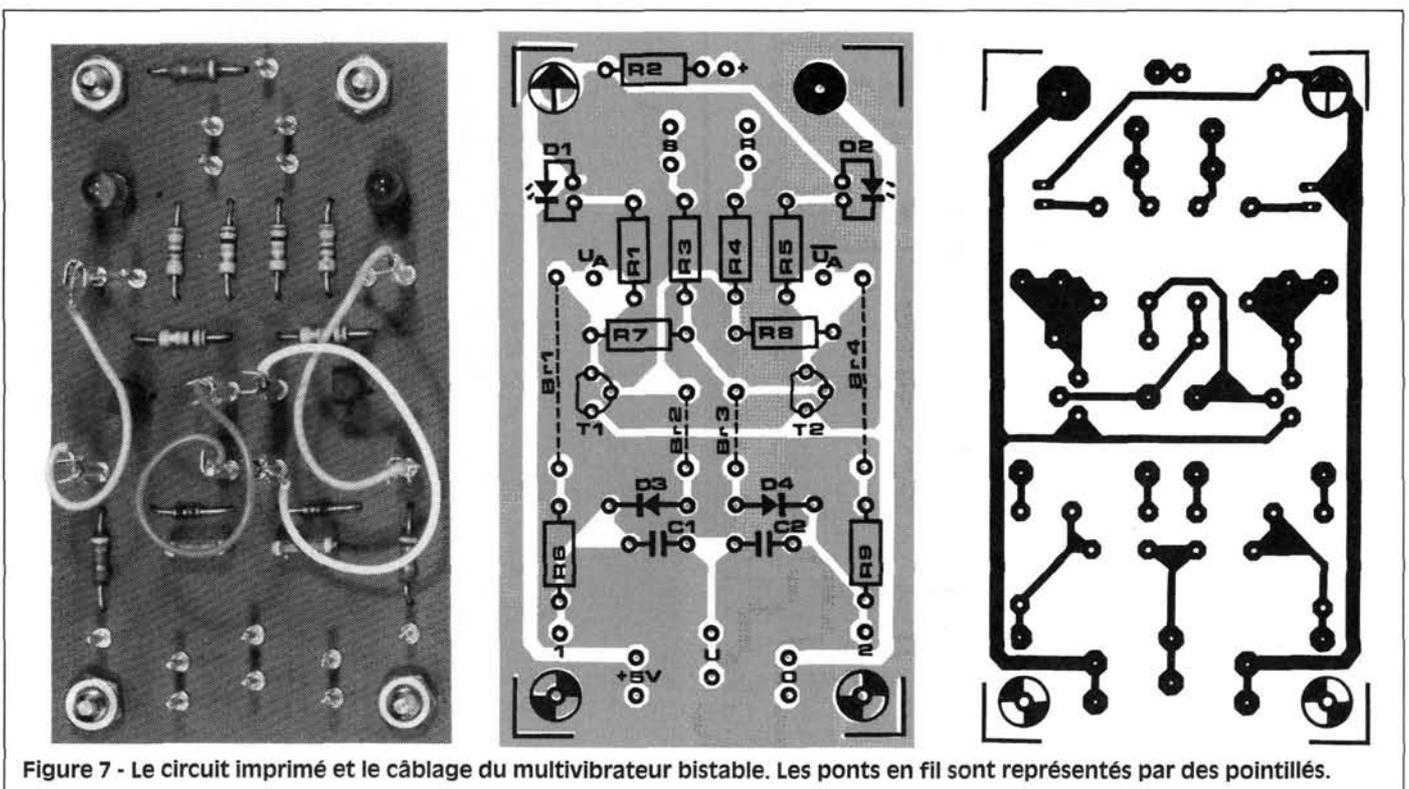


Figure 7 - Le circuit imprimé et le câblage du multivibrateur bistable. Les ponts en fil sont représentés par des pointillés.