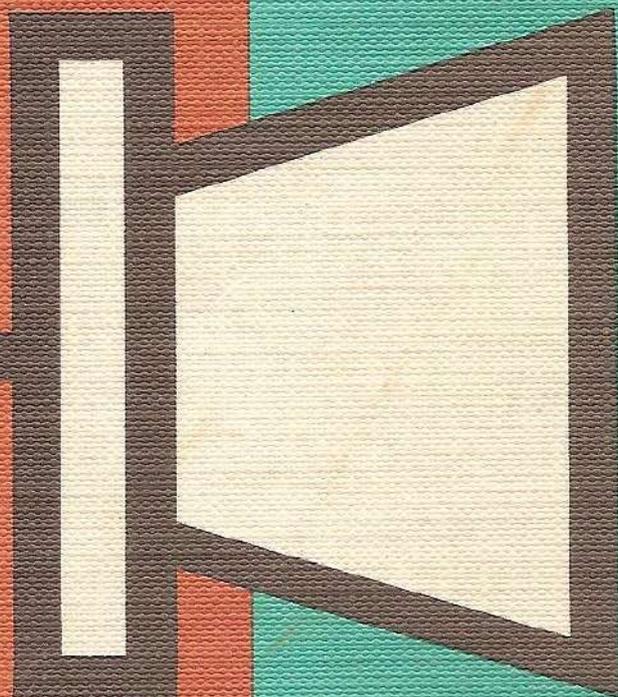
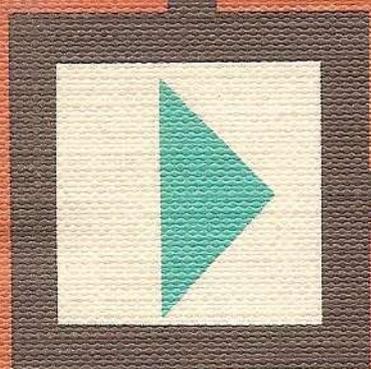
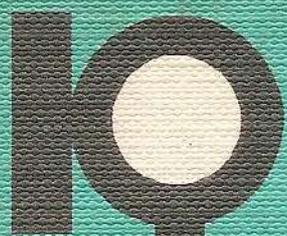


R. DESCHEPPER

pratique de la sonorisation



ÉDITIONS RADIO

POUR RESTER « A LA PAGE » lisez

TOUTE L'ELECTRONIQUE

Revue mensuelle de technique
expliquée et appliquée

Fondée en 1934

DIRECTEUR : E. AISBERG



Réputée dans le monde entier comme la principale revue technique française de radio, TOUTE L'ELECTRONIQUE tient ses lecteurs au courant de tous les progrès de l'électronique, des télécommunications et de la télévision. Rédigée par une élite de techniciens, elle s'adresse à tous les spécialistes de la radio.

Le numéro 3,30 F

TELEVISION



Magazine mensuel

fondé en 1939

DIRECTEUR : E. AISBERG



Théorie et pratique de la nouvelle technique de la transmission des images et ses développements les plus récents dans le monde. Réalisation des récepteurs de télévision et des appareils de mesure correspondants. Description des appareils industriels et des méthodes de leur dépannage. Tous les progrès de la télévision.

Le numéro 2,10 F

RADIO CONSTRUCTEUR

Revue mensuelle
de pratique radioélectrique
fondée en 1937

Rédacteur en chef : W. SOROKINE



C'est la revue des techniciens, dépanneurs et agents techniques. Dans chaque numéro, elle publie de nombreux montages de récepteurs, amplificateurs, appareils de mesure, émetteurs, etc., avec schémas, photographies et plans de câblage rendant leur réalisation aisée. Abondante documentation pratique et études de perfectionnement instructives.

Le numéro 2,10 F

ELECTRONIQUE INDUSTRIELLE



Revue mensuelle
de technique moderne
destinée aux promoteurs
et aux utilisateurs des
méthodes et appareils
électroniques.



Toutes les applications de l'électronique
à tous les domaines de l'industrie.

Le numéro 4,80 F

SOCIÉTÉ DES ÉDITIONS RADIO

9, rue Jacob - PARIS (6^e)

Téléphone : ODÉON 13-65

C.C.P. PARIS 1164-34

**pratique de la
SONORISATION**

OUVRAGES DU MEME AUTEUR

AUX EDITIONS RADIO :

Radio-Dépannage moderne.

Radio-Tubes (*en collaboration avec E. AISBERG et L. GAUDILLAT*).

Schémas de Récepteurs pour la Modulation de Fréquence.

Télé-Tubes.

CHEZ D'AUTRES EDITEURS :

Radio-Service.

Radio-Construction.

La Modernisation des Récepteurs.

Les Condensateurs.

Les Haut-Parleurs.

© Editions Radio 1964.

Tous droits de reproduction réservés pour tous pays. Microfilm et reproduction photographique, même partiels, interdits.

Imprimerie de Châtelaudren
Côtes-du-Nord

Imprimé en France 3^e trimestre 1964
Editeur n° 374 - Imprimeur n° 2822

R. DESCHEPPER

★

pratique de la SONORISATION

TOUTES LES NOTIONS DE
LA TECHNIQUE B. F. :

acoustique physique et physiologique ; bases de l'électro-magnétisme et de l'électronique ; haut-parleurs et chaînes d'amplification ; étude des sources de signaux B. F. : microphones, magnétophones, disque, cellule photo-électrique.

ETUDE DES INSTALLATIONS
SONORES POUR SALLES ET
PLEIN AIR, LEUR ENTRETIEN
ET LEUR DEPANNAGE.

★

ÉDITIONS RADIO
9, rue Jacob, Paris-6^e

SIGNES CONVENTIONNELS ET SYMBOLES

UTILISÉS DANS LES FIGURES

Microphone



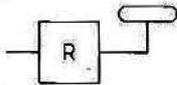
Lecteur de disque



Magnétophone



Radio (Luner)



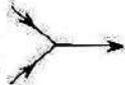
Transformateur en général



Atténuateur



Mélange ("mixage")



Réglage de tonalité



Filtre passe haut



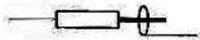
Filtre passe bas



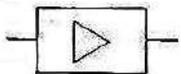
Filtre sélectif



Jack



Amplificateur en général



Haut-parleur



Générateur AF sinusoïdal



Générateur AF à signaux rectangulaires



Instrument de mesure en général



Indicateur de niveau (décibelmètre, modulomètre, vumètre)



Voltmètre électronique



Oscilloscope



Signal à fréquence acoustique sinusoïdal

A.F.

Signal à fréquence acoustique rectangulaire



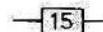
Tension d'alimentation anodique

HT

Tension continue (V)



Intensité (mA)



Tension alternative efficace



PRÉFACE

Dès l'origine de l'espèce humaine le *son* a joué un rôle capital. Porteur de messages en ordre principal, il a cependant graduellement trouvé un emploi moins austère.

Très tôt, l'homme s'est plu à créer des sons sans signification pratique mais simplement agréables à l'oreille.

A notre époque l'audition directe est complétée par le transport à distance du son et sa mise en conserve; et les techniques qui s'y rattachent ont acquis une importance considérable.

D'autre part, la musique a pris une place extraordinaire dans la vie courante. Distribuée à domicile par la radio et le disque, diffusée dans les lieux publics, elle nous accompagne en voiture et nous suit même à la promenade.

La technique de l'amplification des fréquences acoustiques, de leur enregistrement, de leur transmission et de leur reproduction est devenue un secteur important dans le grand domaine de la radio-électricité et de l'électronique.

Le nombre de personnes s'occupant de loin ou de près de ces questions, que ce soit à titre professionnel ou privé, grandit de jour en jour.

Toutes n'ont cependant pas eu la latitude d'acquérir les notions indispensables à l'utilisation rationnelle du matériel à leur disposition, à la claire compréhension de son fonctionnement ou au choix judicieux d'un appareillage approprié à un but déterminé.

Nous avons essayé, dans cet ouvrage, de donner, à leur intention, une vue d'ensemble de tout ce qui se rapporte au traitement électronique du son, entre la source qui lui a donné naissance et l'oreille de l'auditeur.

Les applications sont cependant devenues tellement nombreuses qu'il serait vain de prétendre exposer chacune d'elles dans le détail.

Certains sujets, comme le cinéma ou l'enregistrement sur disque, n'ont pu être qu'esquissés, car chacun justifierait à lui seul un volume important.

L'ouvrage est divisé en trois parties dont la *première* concerne les notions de base de l'électro-acoustique.

Nous y avons exposé, dans le premier chapitre, les lois physiques régissant les vibrations en général.

Le chapitre suivant est consacré à la nature physique du son, après quoi nous avons expliqué succinctement les propriétés physiologiques de l'oreille. Ceci nous a amené à tenter de définir ce qu'on nomme fort improprement la haute fidélité.

On y trouvera aussi quelques remarques concernant la musique et le problème de la stéréophonie.

Dans un autre chapitre, nous avons rappelé les lois du magnétisme et de l'électromagnétisme, et donné quelques indications au sujet des matériaux magnétiques qui jouent un rôle important dans la technique de la reproduction du son.

La *deuxième partie* du livre comprend la description des appareils utilisés pour capter le son, l'amplifier, le transmettre et le reproduire.

Ici, contrairement aux usages, nous avons commencé par la porte de sortie!

Le haut-parleur est en effet le maillon le plus imparfait de toute la chaîne de transmission et, en même temps, le plus complexe du point de vue de son fonctionnement.

Logiquement ce chapitre est suivi d'une étude sommaire des enceintes et autres dispositifs acoustiques qui en sont le complément indispensable.

Sauf dans certains cas particuliers, le haut-parleur est obligatoirement précédé d'un transformateur qui adapte son impédance propre à celle de l'étage de sortie de l'amplificateur.

Quelques pages sont donc consacrées à cette pièce essentielle.

Le lecteur ne trouvera pas dans ce livre de schémas détaillés d'amplificateurs existants. Les revues techniques les publient en grand nombre et permettent à chacun de se documenter à ce sujet. Par contre chaque fonction : amplification de tension, inversion de phase, amplification de puissance, contre-réaction, correction de ton, etc., a été étudiée séparément.

Le transistor prenant de plus en plus d'importance dans le domaine de la B. F., nous avons généralement décrit, après la plupart des montages à tubes, un montage à transistors correspondant.

Dans la même partie de l'ouvrage nous décrivons les sources de signaux B. F. : microphones, lecteurs de disques, magnétophones, cellule photo-électrique.

On trouvera peut-être que certaines indications diffèrent quelque peu de celles que l'on trouve ordinairement dans les ouvrages classiques ou la presse technique. Elles résultent cependant d'essais et d'observations faits par l'auteur et, si elles ne correspondent pas toujours aux idées reçues, c'est qu'entre une formule mathématique ou une mesure et l'appréciation par l'oreille humaine il existe une marge énorme. Après tout, en matière de son, il n'y a finalement que l'impression subjective qui compte.

La *troisième partie* de l'ouvrage est consacrée aux applications pratiques, aux problèmes relatifs à l'acoustique des salles et des espaces, à l'aménagement acoustique des lieux et à la répartition de la puissance entre un nombre plus ou moins grand de haut-parleurs.

Les méthodes de mesure en acoustique et en électronique font l'objet d'un chapitre qui comprend également quelques indications pour le dépannage.

L'ouvrage se termine par une série de formules et de tableaux numériques.

Si ce livre a pu être écrit, c'est en grande partie grâce à une abondante documentation aimablement mise à notre disposition par de nombreux correspondants.

Nous tenons à remercier spécialement à cet égard les firmes : *BOUYER, CABASSE, FREY, L. E. M., M. B. L. E., MELODIUM, PHILIPS, SIEMENS.*

R. D.

NOTIONS ESSENTIELLES

On n'utilise rationnellement un matériel que lorsqu'on en comprend clairement le fonctionnement.

C'est pourquoi nous avons cru nécessaire, dans cette première partie du livre, de rappeler aussi brièvement que possible les fondements de l'électro-acoustique.

Cette technique faisant appel à la fois à la mécanique vibratoire, à l'électromagnétisme et à l'électronique pure, il ne nous a pas paru inutile de consacrer un chapitre à chacune de ces disciplines avant d'entrer dans le vif du sujet.

VIBRATIONS ET OSCILLATIONS

Un corps matériel peut être animé de diverses sortes de mouvements : uniforme, accéléré ou périodique.

Le déplacement alternatif de part et d'autre d'une position de repos qui se produit quand le corps, écarté de celle-ci, y est ramené par une force interne ou externe, prend le nom d'*oscillation* ou de *vibration* selon qu'il est lent ou rapide sans que cette distinction soit en rien absolue.

Dans le cas d'un pendule la force agissant est la *pesanteur*.

La vibration d'une lame d'acier est due à l'*élasticité*. La force de rappel peut aussi être magnétique ou électromagnétique.

Les corps possèdent, en général, une tendance à reprendre leur forme ou leur volume primitifs quand disparaît la contrainte qui les a déformés.

La déformation peut être due à une compression, une extension ou aux deux à la fois. Quand on courbe une lame de métal, le côté concave est comprimé et le côté convexe étiré.

L'élasticité d'un corps donné varie avec la température et le traitement qu'il a subi.

Quand la déformation dépasse une certaine grandeur, le corps ne reprend pas exactement sa forme primitive : on a dépassé la *limite d'élasticité* et il subsiste une déformation permanente.

Les corps ont une *masse* qui s'oppose, par son *inertie*, à tout déplacement ou changement de mouvement en direction ou en vitesse. C'est pourquoi un corps, ramené par une force de rappel vers sa position initiale, dépasse celle-ci et poursuit son mouvement jusqu'au point où la force, agissant en sens opposé, le ramène à nouveau vers cette position. Il se produit ainsi un balancement de part et d'autre de celle-ci qui durerait indéfiniment si aucune force antagoniste n'intervenait pour le faire cesser.

La *fréquence* est le nombre de fois par seconde qu'un corps vibrant exécute un *cycle complet* de mouvement.

On exprime la fréquence en cycles/seconde (c/s) ou, mieux, en *hertz* (Hz) et ses multiples.

L'*élongation* est la distance entre deux points symétriques de part et d'autre du point de repos.

L'*amplitude* est l'élongation maximum.

Si rien ne les contrarie, les vibrations d'un corps ont une fréquence constante, quelle que soit leur amplitude, à condition qu'elle reste faible par rapport au mouvement maximum possible.

La *vélocité* est le chemin total parcouru par le corps oscillant dans l'unité de temps. Elle s'exprime en centimètres/seconde (cm/s). Un corps vibrant à 1000 Hz à une amplitude de 1 mm a donc une vélocité absolue d'un mètre.

On utilise souvent la notion de *vélocité efficace* :

$$V_{\text{eff}} = \frac{V}{\sqrt{2}} = \frac{V}{1,4}$$

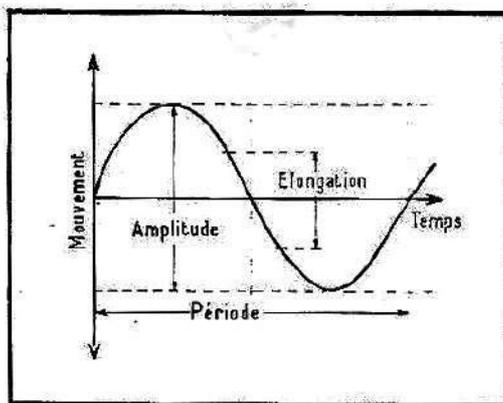
Tout corps élastique possède une *fréquence propre* ou *fréquence de résonance*. Elle est déterminée par le rapport entre la masse du corps et la force de rappel.

Quand la force de rappel est proportionnelle à l'élongation le mouvement est une fonction sinusoïdale. On le représente par une courbe nommée *sinusoïde* que nous retrouverons pour d'autres phénomènes (fig. 1).

C'est le cas des *oscillations libres*.

La nature du mouvement dépend toutefois du rapport qui existe à chaque instant entre la force de rappel et d'autres forces qui agissent sur le corps.

Fig. 1. — Le mouvement d'un corps vibrant peut être représenté par une sinusoïde tant que la force de rappel demeure proportionnelle à l'élongation.



C'est pourquoi il existe d'autres oscillations que celles à forme sinusoïdale.

En l'absence d'une *force d'entretien* l'amplitude de l'oscillation d'un corps va en décroissant et le retour à l'immobilité advient au bout d'un temps plus ou moins long.

Ce freinage ou *amortissement* est produit par des *frottements* entre le corps et un support matériel quelconque ou simplement l'air ambiant, ou encore par l'intervention d'une force autre que celle qui cause l'oscillation.

On rencontre trois cas :

1° Le frottement est plus fort que l'élasticité : le corps reprend *très lentement* la position de repos et ne la dépasse pas. Nous avons affaire à un *système aperiodique* qui ne peut osciller par lui-même ;

2° Le frottement a pratiquement la même importance que la force élastique : le corps reprend *rapidement* sa position d'équilibre mais ne la dépasse que de peu. C'est l'*amortissement critique*. Il n'y a pas d'oscillations ;

3° Le frottement est faible et le corps oscille librement pendant un certain temps.

On peut agir par divers moyens sur l'amortissement d'un système et ce fait est d'une grande importance pour la reproduction correcte des fréquences acoustiques.

Si l'on compense continuellement, par un apport d'énergie nouvelle, celle qui se perd, les oscillations persistent. Ce sont des *oscillations entretenues*.

Si on oblige un corps à vibrer à une fréquence différente de sa *fréquence propre*, on provoque des *vibrations forcées*. Dans ce cas l'énergie nécessaire pour entretenir le mouvement du corps est *beaucoup plus grande* que celle qui suffirait pour le faire vibrer à sa fréquence propre.

La membrane d'un haut-parleur devant vibrer à un nombre indéfini de fréquences, son régime normal est celui des oscillations forcées. L'air qui sert de support aux ondes acoustiques est également le siège d'oscillations forcées.

Les grandeurs définies plus haut sont reliées par quelques formules très simples :

$$A = \frac{V}{\omega}$$

où A est l'amplitude en centimètres, V la vitesse, $\omega = 2\pi f$ (f étant la fréquence).

On a aussi :

$$V = \frac{F}{r + \omega m + \frac{1}{\omega K}}$$

où F est la force qui entretient l'oscillation, force vibromotrice, r l'amortissement exprimé en dynes/seconde par centimètre, m la masse en grammes et K le coefficient d'élasticité en centimètres/dyne du corps.

La vitesse dépend de la masse et de la flexibilité du corps ou de la valeur d'une force de rappel quelconque quand l'amortissement est nul.

On peut donc écrire :

$$A = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{F}{\sqrt{r^2 + (\omega m - \frac{1}{\omega K})^2}}$$

D'autre part, la fréquence propre d'un corps vibrant est définie par le fait que pour cette fréquence

$$\omega m - \frac{1}{\omega K} = 0$$

on a alors :

$$A = \frac{F}{\omega r}$$

ou, en négligeant l'amortissement :

$$A = \frac{F}{\omega}$$

L'amplitude augmente donc *inversement* à la fréquence si la force de rappel est constante.

La fréquence de résonance peut être trouvée par la formule :

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{mK}}$$

Quand la fréquence imposée au mobile est plus grande que sa résonance on a :

$$\omega m > \frac{1}{\omega K}$$

L'influence de K tend alors à diminuer et nous pouvons à la rigueur admettre pour des fréquences beaucoup plus élevées que la fréquence propre :

$$A = \frac{F}{\omega^2 m}$$

C'est alors la masse qui détermine l'énergie à appliquer pour l'entretien des vibrations.

Quand la fréquence *imposée* est inférieure à la fréquence propre du système nous avons :

$$\omega m < \frac{1}{\omega K}$$

En pratique pour les fréquences très basses on peut écrire :

$$A = FK$$

Et, si K devient très petit, $A = F$ et l'amplitude est proportionnelle à la force exercée.

En résumé, si l'on couple d'une façon ou de l'autre un corps vibrant à un dispositif susceptible de lui fournir de l'énergie, on peut le faire vibrer à une fréquence autre que sa fréquence naturelle, c'est-à-dire en régime de vibrations forcées.

Nous avons dit que le mouvement vibratoire n'est pas toujours sinusoïdal. C'est même l'exception en ce qui concerne l'acoustique.

Il peut arriver que la force de rappel ne soit pas proportionnelle à l'élongation. Il est possible que différentes parties du corps vibrent indépendamment de la masse principale. Enfin des vibrations forcées peuvent être induites par un système non sinusoïdal. Le corps est dans ces divers cas le siège d'un mélange de vibrations.

En effet, quand la vibration n'est pas sinusoïdale, il se produit des vibrations supplémentaires dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale.

Ce sont les harmoniques qui, suivant leur rang, sont *paires* ou *impaires*.

A moins d'être isolées dans un vide absolu, les vibrations d'un corps se transmettent toujours au milieu voisin et tendent à se propager dans celui-ci. Les vibrations peuvent passer d'un milieu à l'autre et cheminer à travers plusieurs milieux différents.

La mise en mouvement d'un corps nécessitant un apport d'énergie, il est évident que le corps vibrant doit céder une partie de son énergie au milieu qu'il fait vibrer.

Cette énergie qu'il perd entraîne, fatalement, une diminution graduelle de l'amplitude en dehors de toute autre cause.

Les vibrations qui sont transmises à d'autres corps sont généralement, en ce qui concerne ceux-ci, des vibrations forcées. Il arrive toutefois que les vibrations sont transmises à un corps dont la fréquence naturelle est la même que celle de la vibration initiale.

Ce corps entre alors en *résonance* et vibre à une amplitude beaucoup plus grande, tout en empruntant moins d'énergie à la source vibratoire.

NATURE PHYSIQUE DU SON

Pour résoudre les problèmes se rattachant à l'amplification du son, il est nécessaire de posséder une claire notion de ce qu'est réellement celui-ci.

L'acoustique est le chapitre de la physique qui couvre l'étude des vibrations dont l'effet est perceptible par l'oreille humaine.

Leur fréquence s'étend approximativement de 16 à 20 000 Hz.

C'est là une délimitation purement conventionnelle.

Le mot *son* a deux significations selon qu'on se place au point de vue objectif ou subjectif : d'une part le phénomène mécanique et d'autre part l'effet ressenti.

Nous nous occuperons d'abord du premier.

Le mécanisme du son est schématiquement le suivant :

Une molécule reçoit une impulsion qui la déplace dans une certaine direction. Elle rencontre successivement d'autres molécules qu'elle pousse devant elle en formant ainsi une zone de compression.

Tout milieu, qu'il soit solide, liquide ou gazeux, possède une certaine élasticité. La région comprimée ne tarde donc pas à se détendre, mais, en raison de leur inertie, les molécules dépassent leur point de repos et à la compression succède une détente, tandis qu'une nouvelle zone de compression se forme plus loin.

Il s'établit ainsi une série d'oscillations *longitudinales* qui se propagent de proche en proche à une vitesse qui dépend de la nature du milieu.

Dans l'air calme elle est d'environ 340 mètres à la seconde (exactement 342 m à la température de 20° et sous une pression atmosphérique normale de 76 cm de mercure).

Il faut cependant noter qu'excepté le petit mouvement de part et d'autre de leur position initiale, les molécules ne sont pas entraînées par les ondes sonores.

Il n'y a aucune analogie entre le son et un courant d'air.

Si l'ébranlement moléculaire a lieu dans un milieu homogène les vibrations se propagent uniformément dans toutes les directions et les zones successives de compression et de dépression forment autant de sphères en expansion emboîtées les unes dans les autres.

Des perturbations de l'air se suivant à intervalles de temps égaux produisent évidemment des zones de pression et de dépression à distance constante.

Cette distance est la *longueur d'onde*.

D'autre part, en un point donné, on pourra relever des variations régulières de pression.

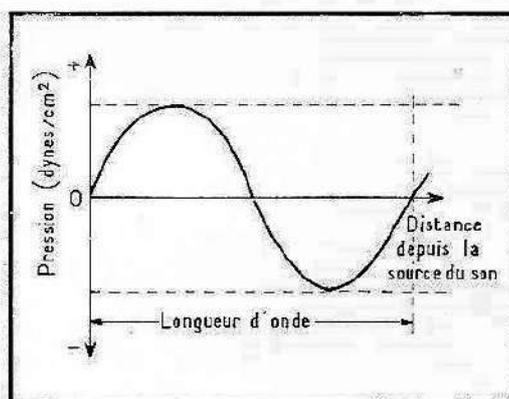
L'ébranlement des molécules implique la mise en œuvre d'une certaine énergie empruntée à la source : instrument de musique ou corps vibrant quelconque, et qui est, en quelque sorte, emportée par les ondes acoustiques.

Si la source est ponctuelle, ou peut être pratiquement considérée comme telle, et si elle est située loin de tout obstacle matériel comme des murs ou le sol, les ondes sphériques qui l'entourent présentent une surface proportionnelle au carré de leur rayon.

Il en résulte que l'énergie en chaque point est *inversement proportionnelle au carré de la distance*.

C'est du moins ce qui se passerait dans un milieu parfaitement élastique. Mais l'air possède une certaine viscosité, et sa mise en mouvement absorbe

Fig. 2. — Les variations de la pression d'air reproduisent la forme du signal qui les a provoquées.



une partie de l'énergie fournie par la source, de sorte que l'énergie disponible décroît plus vite que ne l'indiquerait le simple calcul.

Un son d'une intensité donnée a donc une portée nettement limitée.

Mais il y a plus : l'*amortissement* provoqué par la viscosité de l'air s'accroît avec la fréquence, de sorte qu'à intensité égale les sons aigus portent moins loin que les sons graves.

Quand une musique militaire s'approche, on entend *d'abord* la grosse caisse.

De ce qui précède on peut déduire les caractéristiques qui permettent de définir un son donné.

1. — La fréquence.

C'est le nombre de fois par seconde qu'un point fixe du milieu passe par un maximum et un minimum de pression.

Le rapport entre la fréquence f et la longueur d'onde λ est donné par la formule :

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{342}{f}$$

v étant la vitesse du son en mètres/seconde.

Les *longueurs d'onde* des fréquences perceptibles normalement par l'oreille humaine s'échelonnent entre 0,016 mètre (20 000 Hz) et 16 mètres environ (20 Hz).

2. — L'intensité.

C'est l'amplitude de la variation de pression de l'air. Elle correspond évidemment à l'amplitude du déplacement moléculaire. Elle s'exprime en *dynes par centimètre carré* ou encore en *microbars*.

1 μb = 1 dyne/cm² = environ 1 milligramme par cm².

D'autre part, l'énergie de l'onde sonore est proportionnelle au carré de l'amplitude.

Remarquons ici qu'il n'y a pas de rapport *simple* entre l'intensité physique, mesurable, du son et sa perception physiologique.

Cette question sera examinée plus loin.

Si l'on trace le diagramme des variations de pression en un point donné on obtiendra une courbe dont la figure 2 donne un exemple.

Nous retrouvons ici la sinusoïde dont il a été parlé précédemment.

Elle n'aura toutefois cette forme que si la vibration qui a donné naissance au son est elle-même sinusoïdale. De toutes façons la courbe des pressions sera le reflet de la vibration mécanique qui les a provoquées et les ondes conserveront la même forme tant qu'elles n'auront pas rencontré d'obstacle.

3. — Les harmoniques.

Les sons que nous percevons sont généralement formés d'un mélange de fréquences et la courbe représentative est très irrégulière.

On démontre mathématiquement (théorème de FOURIER) qu'un signal non sinusoïdal de forme quelconque peut être décomposé en un nombre plus ou moins grand de signaux sinusoïdaux.

Inversement un mélange de signaux sinusoïdaux émis simultanément produit un signal combiné de forme irrégulière (fig. 3).

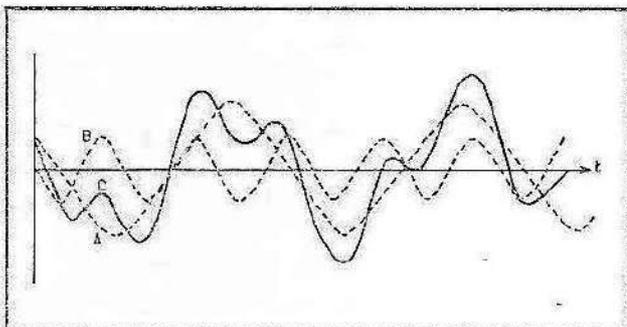


Fig. 3. — La superposition de deux vibrations sinusoïdales A et B produit un signal complexe figuré par la courbe C.

Un son complexe se décompose, comme n'importe quelle vibration non sinusoïdale, en une fréquence fondamentale et un certain nombre d'*harmoniques* qui correspondent à des multiples de cette fréquence.

Leur amplitude décroît rapidement à mesure que leur fréquence s'éloigne de la fréquence fondamentale et on ne se préoccupe généralement, dans l'étude d'un appareillage électro-acoustique, que des dix ou douze premiers.

Des signaux affectant la forme représentée par la figure 4 contiennent principalement des harmoniques paires, tandis que, si la déformation est symétrique, ce sont les harmoniques impaires qui prédominent (fig. 5).

Le nombre, le rang et l'amplitude relative des harmoniques contenues dans un son complexe créent ce qu'on nomme le *timbre* qui caractérise le son des divers instruments de musique et permet, par exemple, de distinguer une flûte d'un violon jouant la même note.

4. — Les transitoires.

Tout ce que l'on entend n'est pas formé uniquement d'ondes continues. Il se produit aussi des impulsions isolées comme un coup de grosse caisse, une détonation.

Ce n'est au fond qu'un cas limite qui demeure susceptible d'être résolu par le calcul de Fourier. L'impulsion unique peut en effet se décomposer en une série d'impulsions de forme sinusoïdale d'amplitude rapidement décroissante.

On peut de même considérer le *bruit*, quelle que soit son origine ou sa nature, comme formé d'un ensemble de signaux élémentaires plus ou moins nombreux.

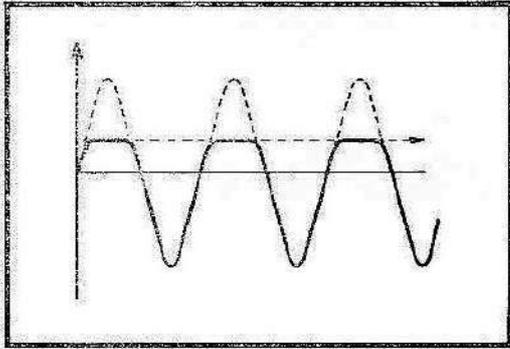


Fig. 4. — La déformation unilatérale d'un signal sinusoïdal donne naissance à des harmoniques paires.

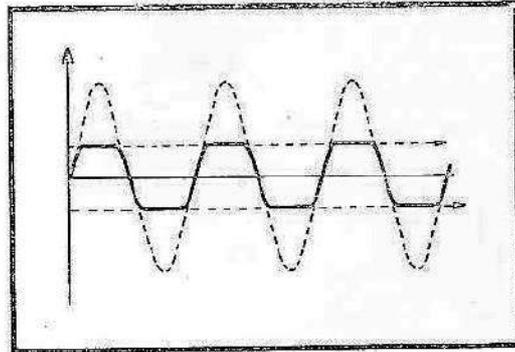


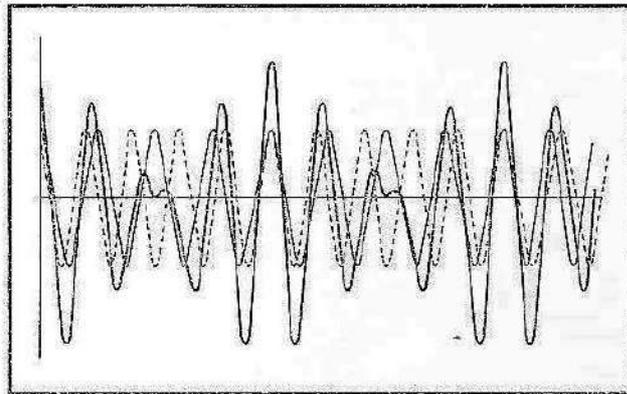
Fig. 5. — Un écartement des deux alternances engendre des harmoniques impaires.

Certains composants peuvent se situer en dehors de l'échelle des sons perceptibles isolément. Cependant il a été prouvé que leur reproduction est nécessaire à la reconstitution auditive parfaite du bruit initial.

De plus, les instruments de musique produisent certains bruits qui se superposent aux sons : par exemple le grincement des cordes d'un violon. Leur présence dans la reproduction augmente le réalisme de celle-ci.

La reproduction correcte des transitoires exige un amortissement convenable, à la fois électrique et mécanique, de l'ensemble de la chaîne d'ampli-

Fig. 6. — Deux ondes sonores de fréquence voisine produisent des battements.



fication, y compris le haut-parleur. C'est dire que toute résonance propre de l'une ou l'autre partie du système doit être radicalement supprimée.

D'autres causes peuvent nuire à la reproduction des transitoires, notamment un défaut de linéarité d'un des éléments de la chaîne, ce qui engendre des harmoniques et de l'intermodulation.

5. — Le battement.

Quand deux ondes sonores, dont les fréquences sont très voisines, sont transmises en même temps, il se passe un phénomène particulier : à certains moments les zones de pression coïncident et leurs effets s'ajoutent, toutes les

molécules se meuvent dans la même direction et l'amplitude du signal est égale à la somme des amplitudes des deux composants.

Mais, à d'autres moments, les molécules sont sollicitées par des forces opposées, et leur mouvement est réduit ou même annulé si les deux ondes ont la même amplitude.

On n'entend alors qu'un seul son, mais dont l'intensité varie périodiquement avec une rapidité plus ou moins grande.

C'est le phénomène du *battement*, dont la figure 6 montre clairement le mécanisme.

6. — La réflexion.

Nous avons considéré jusqu'ici le son comme s'étendant régulièrement et librement à partir de la source, ce qui est un cas exceptionnel.

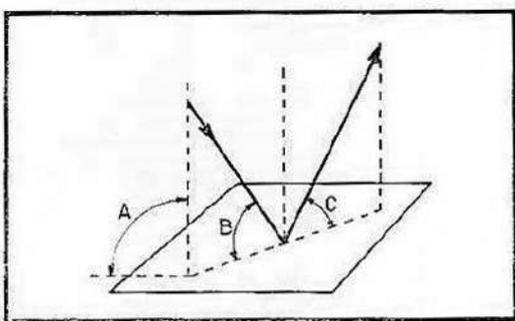


Fig. 7. — Le son se réfléchit sur une surface plane suivant un plan perpendiculaire à celle-ci. L'angle de réflexion C est égal à l'angle d'incidence B.

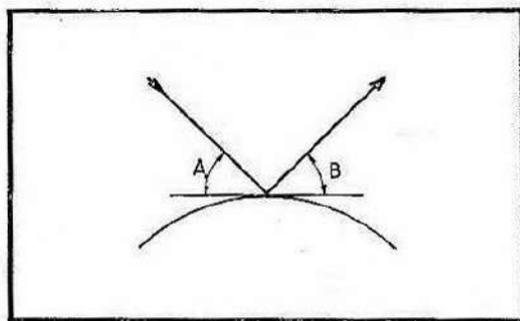


Fig. 8. — Sur une surface courbe, les angles doivent être considérés à partir de la tangente au point d'incidence.

Il est généralement engendré à proximité d'obstacles divers et le plus souvent près du sol.

Quand une onde sonore frappe la surface d'un corps dont la densité est plus grande que celle du milieu dans laquelle elle se propage, elle est, selon la nature de ce corps, partiellement réfléchi et partiellement absorbée.

Une paroi dure et compacte en pierre ou en béton réfléchit la presque totalité de l'énergie sonore.

Une matière poreuse ou flexible, comme un tissu, l'absorbe en grande partie.

Quand la paroi frappée est plane, l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence et les trajets des deux ondes sont situés dans le même plan (fig. 7).

Le son se comporte donc comme un rayon de lumière vis-à-vis d'un miroir.

Quand la surface frappée par le son est courbe, c'est l'angle formé avec la tangente au point d'incidence qu'il faut considérer (fig. 8).

Il en résulte qu'une surface convexe disperse le son réfléchi tandis qu'une surface concave le concentre (fig. 9).

7. — Influence des obstacles.

Une onde sonore qui rencontre un obstacle matériel peut se comporter de deux façons : si sa longueur est supérieure aux dimensions de l'objet, elle le contourne et sa propagation n'est que faiblement troublée.

Par contre, si la longueur d'onde est plus petite que la surface frappée, le son est partiellement réfléchi et peut produire des ondes stationnaires (*voir plus loin*).

De toutes façons, il se produit une discrimination de fréquence, de sorte que le contenu d'un son complexe n'est plus exactement le même après son passage sur l'obstacle.

Il est clair que les fréquences élevées sont principalement affectées par cet effet et que la présence, par exemple, de colonnes dans une salle

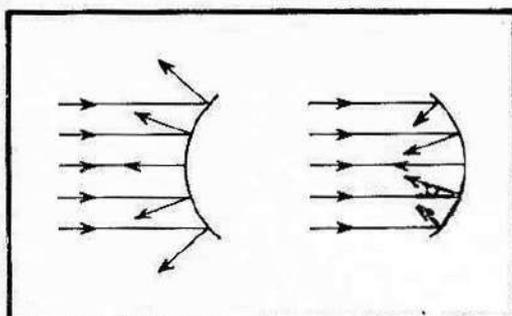
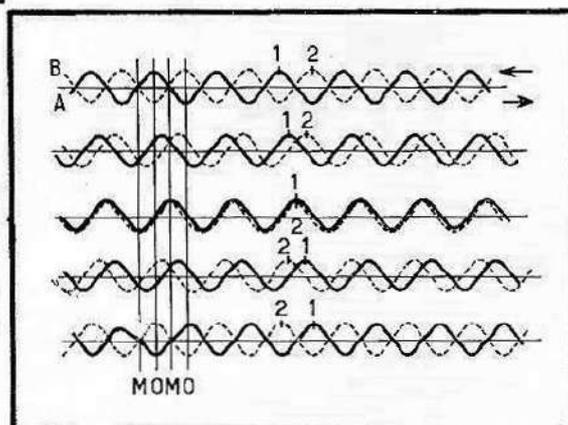


Fig. 9 (ci-contre). — Les ondes sonores sont dispersées ou concentrées suivant que la surface réfléchissante est convexe ou concave.

Fig. 10. — Deux ondes sonores de fréquence égale A et B qui se propagent en sens inverse produisent des ondes stationnaires. A tous les points marqués O, les pressions s'opposent constamment et la résultante est nulle. Aux points marqués M, les pressions s'ajoutent et la résultante est une oscillation sur place d'une amplitude plus grande.



peut altérer la tonalité des instruments de musique pour des auditeurs occupant certaines places.

Cette diffraction acoustique prend une grande importance quand l'obstacle est constitué par le corps d'un microphone.

En effet, si celui-ci capte le son dans un milieu perturbé, le signal B. F. qui en sort ne sera plus le reflet fidèle du son original.

C'est pour cette raison que l'on cherche à donner aux microphones à haute fidélité le volume le plus faible possible et une forme extérieure étudiée pour réduire au minimum la perturbation.

8. — Ondes stationnaires.

Il arrive que deux trains d'ondes de même fréquence, marchant en sens inverse, se rencontrent, soit qu'ils aient été émis par deux sources distinctes, soit qu'il s'agisse d'un même signal sonore qui revient après avoir frappé une ou plusieurs surfaces réfléchissantes.

Il se forme alors des *ondes stationnaires*, c'est-à-dire des zones où l'air est soumis à des mouvements de compression et de dépression *qui ne se déplacent pas*.

Ces zones sont situées à une distance l'une de l'autre égale à la *moitié de la longueur d'onde* des signaux qui les produisent.

Entre les *ventres* où le mouvement des molécules d'air est maximum se trouvent des *nœuds* où il est nul (fig. 10).

Ce phénomène est à la base du fonctionnement de nombreux instruments de musique.

Il est très gênant dans les salles de concert et on l'élimine autant que possible grâce à des artifices architecturaux.

9. — Les ondes planes.

Le son ne se propage pas uniquement sous forme d'ondes sphériques. Ce cas ne se présente qu'à l'air libre. Les choses changent lorsque la propagation s'effectue dans un espace clos. Le cas limite est un tuyau d'une longueur indéterminée. Si l'on y introduit, par une extrémité, un train d'ondes sonores, celles-ci se propagent presque sans perte d'énergie puisqu'elles conservent la même surface. Leur forme est plane et elles peuvent être assimilées à une succession de pistons.

C'est le principe des tuyaux acoustiques utilisés dès l'antiquité en guise de téléphone, et aussi celui de certains instruments de musique.

10. — La résonance.

Tout corps élastique possède une fréquence de résonance propre. A cette fréquence l'énergie nécessaire pour le faire vibrer est très faible par rapport à celle qu'il faut lui appliquer pour le faire vibrer à une fréquence différente.

L'air contenu dans une cavité se comporte comme un corps élastique. Si on lui transmet une vibration qui correspond à sa fréquence propre, il s'y produit des ondes stationnaires et la masse entière se met à vibrer. Des harmoniques, dont le nombre dépend de la forme de la cavité et de la nature de ses parois, s'ajoutent à la fréquence fondamentale.

11. — Effet Doppler.

Tout le monde a remarqué que le ton du sifflet de la locomotive change brusquement quand un train croise le vôtre. Et, à la réflexion, on en aura conclu que le son subit une modification selon que sa source s'approche ou s'éloigne de vous.

L'explication de cet effet est, dans le fond, très simple. Si l'on s'avance vers l'origine du son on va à la rencontre des ondes sonores, il est donc évident que dans un même intervalle de temps on en percevra un plus grand nombre que si l'on était immobile. La fréquence apparente sera donc plus grande et le son paraîtra plus aigu.

L'inverse se produit si on se déplace dans l'autre sens.

L'on a dans le premier cas :

$$f' = f \frac{V + v}{V}$$

et dans le second :

$$f' = f \frac{V - v}{V}$$

f est la fréquence réelle, f' la fréquence apparente, V la vitesse du son dans le milieu et v la vitesse de déplacement de l'observateur.

Si, d'autre part, l'observateur demeure immobile et si la source sonore s'avance vers lui, il remarquera un phénomène semblable, mais dont la cause est moins évidente.

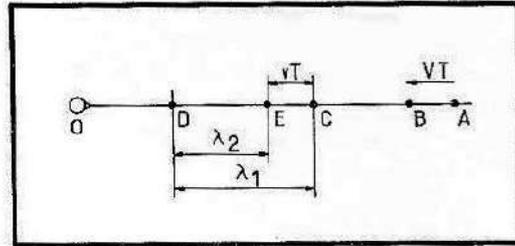
Ici il n'y a plus de déplacement des ondes *par rapport à l'observateur* et l'explication demande un peu plus d'attention.

Soit une source de son qui se déplace de la position A vers la position B (fig. 11).

Si elle était immobile, l'onde sonore émise occuperait, au bout d'une période T, la position C, et au bout de deux périodes, la position D.

La distance CD représente la distance que l'onde aurait parcourue durant la durée de la période, elle correspond évidemment à la longueur d'onde.

Fig. 11. — Pour l'observateur O le son d'une source qui s'avance vers lui paraît plus aigu.



Mais la source est en mouvement vers l'observateur, et, au bout d'une période, elle occupe la position B.

Si v est la vitesse de déplacement, la distance $AB = vT$; et l'onde au lieu d'être en C se trouve au point E.

La distance entre deux ondes successives est donc raccourcie et elles ne se trouvent plus qu'à $VT - vT$ l'une de l'autre (V étant la vitesse de propagation du son).

La nouvelle longueur d'onde sera donc :

$$\lambda_2 = \lambda_1 \frac{V - v}{V}$$

Par rapport à l'observateur tout se passe donc comme si la fréquence du son était plus grande.

Lorsque la source s'éloigne, les ondes sonores sont en quelque sorte étirées et le son paraît plus grave.

On a respectivement :

$$f' = f \frac{V}{V + v}$$

et :

$$f' = f \frac{V}{V - v}$$

Il faut noter que, selon que c'est l'observateur ou la source qui se déplace, le résultat n'est pas identique.

Quand l'observateur et la source se déplacent l'un et l'autre comme dans le cas de deux trains qui se croisent, la formule générale est :

$$f' = f \frac{V + v'}{V - v}$$

ou v' est la vitesse de la source et v celle de l'observateur, par rapport à l'air, ou vice-versa.

On peut se demander ce qui se passe si, la source et l'observateur restant à la même distance l'un de l'autre, c'est le milieu qui se déplace, c'est-à-dire *s'il y a du vent*.

Eh bien, la fréquence apparente ne change pas, et il suffit de réfléchir un moment pour s'en rendre compte.

Au départ l'onde sonore est étirée ou comprimée par rapport à la source suivant la direction du vent, et, à la réception, elle subit une déformation identique en sens contraire.

Le nombre de vibrations émises et reçues dans l'unité de temps reste rigoureusement le même.

Si le vent souffle vers l'observateur, la tranche d'air emportera d'autant moins d'ondes sonores qu'elle ira plus vite, de sorte que tout se passe comme si l'observateur se trouvait rapproché de la source. L'effet opposé se produit évidemment si le vent souffle dans l'autre direction.

En résumé, la fréquence demeure immuable et n'est pas modifiée par le mouvement du milieu.

PHYSIOLOGIE DE L'OUÏE

I. — Le son réel et le son subjectif.

Le mot *son* est généralement compris dans le sens de ce que l'on *entend*, c'est-à-dire de l'effet produit par l'excitation des nerfs de cet organe très compliqué qu'est l'oreille.

La sensibilité auditive varie considérablement avec la fréquence. Ainsi que nous l'avons dit plus haut, les fréquences audibles sont comprises entre les limites extrêmes de 16 Hz et 20 000 Hz, mais ces limites varient d'une personne à l'autre et se modifient au surplus avec l'âge. Des individus exceptionnels perçoivent clairement des vibrations au-delà de 16 000 Hz. Par contre, chez les personnes âgées, la limite supérieure peut descendre à quelques milliers de hertz sans que l'on puisse parler pour cela de surdité.

La sensibilité croît à partir de la limite inférieure, passe par un maximum dans la région de 1000 à 2000 Hz, puis décroît de nouveau.

Si l'on augmente progressivement l'intensité d'un son à partir d'une valeur extrêmement petite, on constate que l'oreille commence à percevoir quelque chose à partir d'une intensité bien déterminée qu'on nomme le *seuil d'audibilité*. Ce seuil varie énormément avec la fréquence. Il est, de plus, sujet à modification avec l'âge et l'état de santé des individus.

La courbe I de la figure 12 représente, exprimées en dynes par cm², les pressions acoustiques correspondant au seuil d'audibilité aux différentes fréquences, pour une personne normale. Ce sont évidemment des valeurs moyennes.

Si l'on augmente progressivement l'intensité sonore, on fera une autre constatation très importante : la perception de l'intensité n'est pas proportionnelle à l'énergie mise en jeu. En d'autres termes, si l'intensité physique du son est doublée, nous n'aurons pas une sensation auditive deux fois plus forte.

Pour obtenir celle-ci nous devrions augmenter bien davantage l'énergie sonore, et cela conformément à une loi, dite de Fechner, qui s'applique approximativement à toutes les sensations et qui s'exprime comme suit :

Entre deux sensations d'intensité différente S_1 et S_2 et les deux valeurs d'énergie qui les ont produites, il y a une relation telle que :

$$S_2 - S_1 = K \log \frac{P_2}{P_1}$$

Si S_1 est le seuil d'audibilité, il peut être considéré comme le 0 d'une échelle d'intensité, et alors :

$$S_2 = K \log \frac{P_2}{P_1}$$

De cette formule sont tirées les unités (phone, décibel) servant à exprimer les intensités de son.

Si nous continuons à augmenter l'intensité sonore, nous arriverons à un point où l'audition devient douloureuse et au-delà duquel aucune augmentation n'est plus perceptible : l'oreille est en quelque sorte *saturée*. De même que le seuil d'audibilité, cette limite est fort différente suivant la fréquence. Elle est indiquée par la courbe II de la figure 12.

On remarque que le point le plus haut de cette limite supérieure correspond à des fréquences voisines de celles pour lesquelles l'oreille est le plus sensible. Le plus grand écart se place dans les environs de 1000 Hz.

Les fréquences qui correspondent à la parole sont principalement situées entre 500 et 2000 Hz. Si nous mesurons, dans cette bande de fréquences, l'énergie nécessaire pour atteindre la limite supérieure d'audibilité, nous constaterons qu'elle est de l'ordre de *10 trillions de fois* celle qui correspond au seuil d'audibilité. On évite l'emploi, dans les calculs, de nombres aussi mal commodes en utilisant les unités spéciales mentionnées plus haut.

Si la reproduction parfaite de la musique nécessite théoriquement l'emploi de toutes les fréquences entre 16 et 20 000 Hz, dans la pratique on est généralement forcé de se contenter d'un spectre moins étendu. Si la gamme couverte est de 40 à 12 000 Hz, la reproduction peut encore être considérée comme très acceptable. Pour la parole seule, on peut se contenter d'une bande de fréquences bien moins large, ce qui permet certaines économies dans le matériel.

Ici nous devons attirer l'attention sur un effet subjectif particulier : c'est la faculté de reconstituer inconsciemment certaines fréquences que nous n'entendons pas réellement.

Si, par exemple, nous supprimons la fréquence fondamentale d'un son qui nous est familier en laissant subsister les harmoniques qui le caractérisent, cette disparition peut passer presque inaperçue parce que, par un processus subconscient, nous évoquons la fréquence manquante.

Cette sorte d'autosuggestion a lieu surtout pour les notes graves. Elle explique pourquoi la parole reste encore compréhensible lorsque toutes les fréquences en dessous de 1000 Hz sont supprimées. Par contre, si l'on coupe les fréquences comprises entre 1000 et 2000 Hz, la parole devient difficilement intelligible, bien que la plupart des fréquences fondamentales s'y trouvent encore.

Le domaine des fréquences fondamentales normales, c'est-à-dire celles utilisées par l'homme dans la parole et la musique, s'étend jusqu'aux environs de 6000 Hz. Au-delà, on trouve surtout des harmoniques dont la suppression altère le timbre des instruments, mais n'est pas immédiatement apparente à une oreille peu exercée. Le fait que beaucoup d'appareils de radio de qualité courante ne fournissent guère de réponse au-delà de cette limite, sans soulever de critiques, prouve que l'on s'accommode facilement d'une reproduction très incomplète.

2. — Le point de vue des musiciens.

L'association du mot son et de l'idée de musique remonte à la plus haute antiquité et, si la science de l'acoustique recouvre aujourd'hui tout le domaine des fréquences audibles, il n'en reste pas moins que c'est aux

musiciens que nous devons les premières études relatives aux ondes sonores.

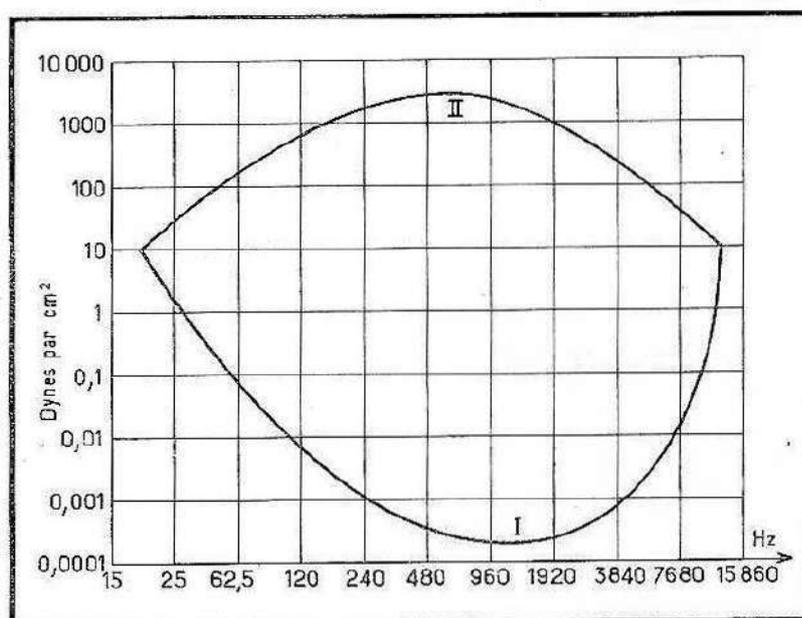
On ne s'étonnera donc pas si, pour exprimer les phénomènes acoustiques, ils usent d'un vocabulaire différent de celui des physiciens et d'ailleurs beaucoup plus ancien.

La musique occupant une place prépondérante dans l'ensemble de la matière acoustique utilisée dans les chaînes d'amplification sonores, il ne nous semble pas hors de propos d'en exposer les bases.

Production de vibrations sonores selon des règles définies, et qui ont d'ailleurs largement varié au cours des siècles, telle est la définition de la musique. Les règles ont pour but de créer des sons ou ensembles de sons susceptibles de produire chez l'auditeur une sensation allant du simple agrément à l'émotion profonde.

Quand le physicien parle de *fréquence*, d'*harmoniques*, d'*intensité*, le musicien, pour exprimer les mêmes choses, dira *hauteur*, *partiels*, *force sonore*.

Fig. 12. — Courbe Fletcher-Munson (simplifiée). I. Seuil d'audibilité. — II. Seuil de douleur.



Le spectre audible a été arbitrairement divisé par ce dernier en *intervalles* pour construire l'*échelle musicale*.

L'*intervalle* est la différence de *hauteur*, c'est-à-dire de *fréquence* entre deux *notes*. L'échelle est divisée en *octaves*, qui couvrent un intervalle de rapport 1 à 2 et qui comprend 7 notes.

Tout cela a été, au cours des âges, établi empiriquement en se basant sur le fait que l'oreille « aime » certains rapports de fréquence.

Par la suite, des notes supplémentaires, de fréquence intermédiaire, ont été ajoutées pour permettre de faire partir la gamme d'une note quelconque.

On a obtenu ainsi la *gamme tempérée avec des octaves à 12 intervalles ou demi-tons*.

Il va de soi que l'échelle musicale doit avoir un point de référence fixe correspondant à une fréquence bien définie.

C'est celle de la note *la* du milieu du clavier du piano (*la 3*).

Elle était jadis, par convention, fixée à 435 Hz, mais une conférence internationale réunie à Londres en 1953 en a porté la fréquence à 440 Hz.

Disons pour finir que le rapport entre la hauteur définie par les musiciens, et servant à l'accord des instruments, et la fréquence physique n'est pas rigoureux, parce que la première s'appuie sur un phénomène subjectif dû aux particularités de l'oreille et l'autre sur des mesures positives.

ALTÉRATIONS ET DISTORSIONS

Le son qui, converti en courant électrique de fréquence variable, traverse un système d'amplification ou de transmission, subit inéluctablement, le long de ce parcours, une altération plus ou moins grande, car il n'existe aucun système parfait.

Au surplus on modifie souvent volontairement la courbe de réponse d'un système pour des raisons que nous examinerons plus loin.

Quand les modifications apportées au signal sont dues à des effets qui dépendent de la nature même des moyens employés, il s'agit de *distorsions* et on peut en distinguer de plusieurs sortes.

I. — La distorsion non linéaire.

Un son pur peut se représenter par une courbe sinusoïdale. Il en est de même du courant provenant de sa transformation en énergie électrique. Un courant sinusoïdal appliqué à l'entrée d'un amplificateur parfait doit donner naissance, à la sortie de celui-ci, à un courant de forme identique et qui n'en diffère que par la grandeur.

Cela veut dire que les variations de tension ou d'intensité que l'on recueille à la sortie doivent être rigoureusement proportionnelles aux variations de tension ou d'intensité appliquées à l'entrée.

Si l'on représente graphiquement les variations d'une grandeur à la sortie en fonction des variations de la même grandeur à l'entrée, on doit donc obtenir une ligne droite (fig. 13).

Si, pour une raison quelconque, il n'en est pas ainsi, nous n'aurons plus un signal de forme identique à la sortie. Si le signal initial est sinusoïdal, le signal sortant ne le sera plus, et l'on sait qu'il y a, dans ce cas, formation d'harmoniques se superposant au son fondamental.

Cette distorsion peut aussi bien avoir une origine mécanique qu'électrique : un microphone peut par exemple avoir une membrane dont l'élasticité est plus grande dans un sens que dans l'autre, la bobine mobile d'un haut-parleur peut avoir un mouvement qui n'est pas symétrique par rapport à sa position d'équilibre. Mais la cause la plus fréquente de ce genre de distorsion est le fait qu'un ou plusieurs tubes de la chaîne d'amplification travaillent en dehors de la partie droite de leur caractéristique, soit parce que le signal appliqué à leur grille est trop grand, soit parce que le point de fonctionnement a été mal choisi ou s'est déplacé, ou encore parce que les caractéristiques du tube se sont modifiées avec l'âge.

2. — La distorsion linéaire.

Une deuxième forme de distorsion est celle qui affecte non plus la forme du signal, mais l'amplification relative des diverses fréquences et que, pour cette raison, on appelle quelquefois distorsion de fréquence, bien que cette expression puisse prêter à confusion.

Un système idéal devrait amplifier ou transmettre de manière uniforme toutes les fréquences comprises entre 16 et 25 000 Hz, de manière à « encadrer » largement le domaine acoustique. Mais il y a toujours des pertes et elles ne sont généralement pas indépendantes de la fréquence, car il n'est guère possible de construire des appareils dont le rendement reste rigoureusement constant d'un bout à l'autre de la gamme couverte. Il y a donc fatalement des fréquences moins bien transmises que d'autres, généralement les plus basses et les plus hautes (fig. 14).

La forme de la *courbe de réponse* doit cependant s'écarter aussi peu que possible d'une droite horizontale.

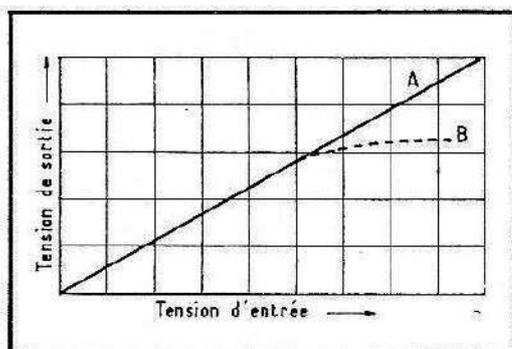
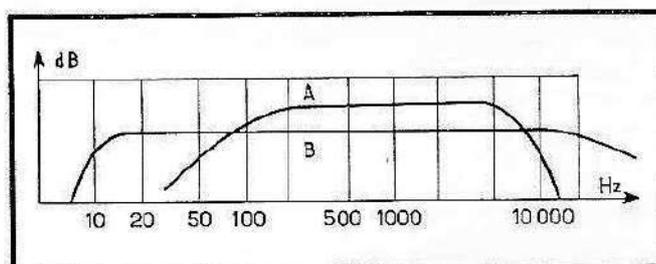


Fig. 13 (ci-contre). — A : caractéristique d'un système parfait. — B : une courbure de la caractéristique entraîne toujours une distorsion.

Fig. 14. — A : courbe de réponse en fréquence d'un amplificateur courant. — B : bande passante d'un amplificateur de haute qualité.



A partir de cette condition essentielle on peut introduire les modifications contrôlées qui sont nécessaires suivant les circonstances.

L'oreille est extrêmement sensible à la distorsion non linéaire et celle-ci doit être réduite à tout prix. Par contre, l'atténuation de certaines fréquences est fort bien tolérée, et c'est heureux pour la technique de l'amplification.

3. — L'intermodulation.

Un système d'amplification n'est pas destiné à transmettre des sons purs, c'est-à-dire des fréquences isolées, mais bien un mélange de fréquences diverses combinées de mille façons.

Il est indispensable que celles-ci se retrouvent à la sortie dans la même relation qu'à l'entrée.

Malheureusement il n'en est pas toujours ainsi et il existe une forme de distorsion qui est produite précisément par tout amplificateur qui n'a pas une réponse parfaitement linéaire.

Si deux fréquences différentes sont appliquées simultanément à l'entrée d'un dispositif dont la caractéristique est incurvée (cas d'un tube mal polarisé ou simplement lorsque le signal appliqué est trop grand) on retrouve, à la sortie, non seulement ces deux fréquences et leurs harmoniques, mais encore des fréquences supplémentaires causées par le battement produit entre elles. On y trouvera notamment un signal correspondant à la somme et un autre à la différence entre les deux signaux, soit :

$$f_1 + f_2 \text{ et } f_1 - f_2$$

Ces nouvelles fréquences peuvent, à leur tour, battre avec d'autres fréquences contenues dans le signal entrant.

Il en résulte une « coloration » du son qui peut altérer considérablement l'information auditive qu'il transmet.

4. — La distorsion de phase.

Entre le signal entrant dans un système amplificateur et le signal sortant, existe une relation de phase.

En d'autres termes, faisant abstraction de la différence d'amplitude, les deux signaux ne sont, en règle générale, pas rigoureusement superposables. Il se produit entre eux un décalage dans le temps.

Tant qu'il reste immuable d'un bout à l'autre de la bande de fréquences que le système peut transmettre, ce décalage ne présente pas d'inconvénient. Mais si certaines fréquences sont plus déplacées que d'autres, il existe ce qu'on nomme une *distorsion de phase*.

Ce genre de distorsion n'est guère perceptible par l'oreille mais présente de graves inconvénients pour la stabilité de la chaîne d'amplification.

Nous y reviendrons dans la deuxième partie du livre.

5. — Taux de distorsion.

Pour exprimer la grandeur de la distorsion non linéaire, on l'évalue en % de la fréquence fondamentale du signal de sortie. Pour en effectuer le calcul, on ne tient compte que des harmoniques 2 et 3, les suivantes étant beaucoup plus faibles.

La distorsion totale est donnée par la formule :

$$\% \text{ distorsion totale} = \sqrt{(\% \text{ harm. } 3)^2 + (\% \text{ harm. } 2)^2}$$

Comme l'harmonique 2 peut être en grande partie éliminée par des astuces techniques, c'est le taux d'harmonique 3 qui, en définitive, limite la puissance disponible et fournit un critère pour juger la qualité d'un système amplificateur.

Pour les installations de distribution de son utilisées principalement pour la voix (transmissions d'informations ou d'ordres), un taux de 10 % peut être, à la rigueur, admis.

Les récepteurs de radio de qualité courante ont souvent 5 % de distorsion, ce qui constitue le maximum tolérable.

On estime généralement que, pour l'amplification à haute fidélité, le taux ne doit en aucun cas dépasser 0,1 % à 1000 Hz.

6. — Le bruit de fond.

Ce n'est pas à proprement parler une distorsion, mais c'est un défaut majeur qui ne peut être toléré dans une installation soignée.

Les sources internes les plus importantes de bruit de fond sont l'alimentation qui produit du ronflement, l'émission cathodique des tubes et l'agitation thermique dans les résistances et les conducteurs qui sont la cause du souffle.

Une chaîne d'amplification à haute fidélité doit répondre sous ce rapport aux conditions suivantes : ronflement à pleine puissance — 70 à — 80 dB, taux de souffle inférieur à 0,1 de la tension de signal. En d'autres termes, ces bruits doivent être pratiquement inaudibles durant les passages les plus faibles ou les périodes de silence de la transmission.

Il faut ajouter à cela les bruits provenant de l'extérieur : bruit de surface des disques ou irrégularités de la bande magnétique, sans oublier les ronflements et autres parasites récoltés par induction dans les câbles reliant entre elles les différentes parties de l'installation.

LA NOTION DE HAUTE FIDÉLITÉ

Cette expression est un pléonasme.

Fidélité tout court exprime suffisamment l'idée que le son perçu à la reproduction est identique à celui recueilli au départ.

Or c'est là une pure utopie : identité signifie égalité en fréquences, en dynamique et aussi *en volume*. Il est certain que ce sont des conditions, peut-être réalisables techniquement, mais inutilisables à l'échelon domestique et qui ne pourraient trouver une application que dans une salle ayant des caractéristiques acoustiques définies.

Acceptons donc provisoirement d'accorder ce qualificatif à des chaînes d'amplification de grande classe et disons simplement que cela signifie aujourd'hui que la reproduction prétend donner l'illusion aussi complète que possible de la réalité.

I. — Réalisme et illusion.

Dans un chapitre précédent nous avons vu que les caractéristiques de l'oreille humaine sont telles que :

- 1° la sensation n'est pas proportionnelle à l'intensité du son ;
- 2° le seuil d'audibilité varie avec la fréquence.

Il en résulte que, pour une intensité du son reproduit inférieure à l'original, ce qui est forcément le cas général pour l'usage domestique et très

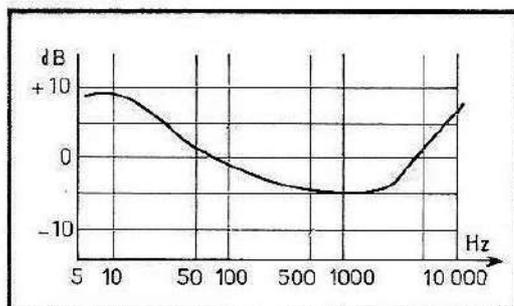


Fig. 15. — Quand le son n'est pas reproduit au même niveau que l'original, la caractéristique du système doit suivre la courbe Fletcher-Munson.

souvent aussi le cas pour d'autres applications, la caractéristique de fréquence de la chaîne d'amplification ne peut être droite.

Elle doit recevoir des corrections en rapport avec la courbe de Fletcher-Munson, c'est-à-dire un relèvement des fréquences supérieures et inférieures par rapport à une bande qui va d'environ 1000 à 3000 Hz (fig. 15).

D'autre part un ensemble à haute fidélité doit pouvoir transmettre à l'air toutes les fréquences captées à la source.

La reproduction parfaite de la musique exigerait, comme nous l'avons dit plus haut, que la bande passante globale de la chaîne, haut-parleur compris, s'étende sans discontinuité de 16 à 20 000 Hz et même au-delà.

A cette seule condition le timbre des instruments sera intégralement respecté.

L'installation doit être également capable de traduire, sans distorsion, les importantes variations du niveau sonore, c'est-à-dire la *dynamique*.

Enfin, comme les caractéristiques de l'oreille humaine varient considérablement d'un individu à l'autre, les dispositifs correcteurs doivent être *réglables* pour permettre d'introduire des modifications dans la courbe de réponse et l'adapter ainsi aux particularités auditives de chacun ou à ses goûts personnels.

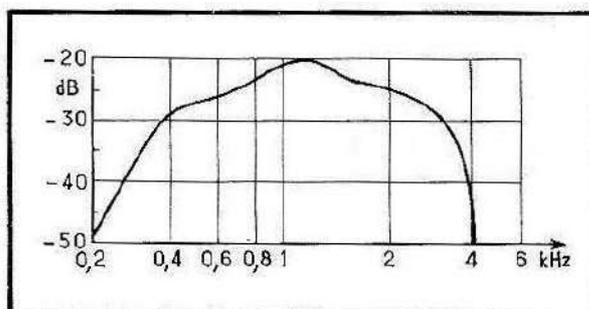
On a d'ailleurs dit à ce propos que chacun portait en soi sa propre haute fidélité.

Mais ce n'est pas tout : la reproduction est aussi modifiée par les caractéristiques acoustiques du lieu d'écoute, ce qui nécessite une nouvelle correction. Nous voilà loin de la fidélité physique à l'état pur...

2. — Le problème des transitoires.

Nous avons déjà dit que la musique et les autres informations à transmettre ne se composent pas de sons continus mais comprennent souvent des groupes isolés d'impulsions brèves, de contenu variable, qui forment le bruit.

Fig. 16. — Courbe représentative de la transmission téléphonique. Elle permet l'intelligibilité mais ne restitue pas la personnalité.



La bonne reproduction de ces transitoires est également indispensable pour la reproduction correcte du jeu de certains instruments et même de la voix, notamment en ce qui concerne certaines consonnes.

C'est ici que la distorsion de phase, qui normalement n'est pas audible, peut jouer des tours.

Si l'ensemble des fréquences composantes n'est pas transmis en bloc, si certaines d'entre elles subissent un déphasage par rapport aux autres, la reproduction aura perdu une de ses qualités essentielles du point de vue de la véracité : l'*attaque*.

3. — La matière sonore.

Dans l'étude et la construction de l'appareillage à fréquence acoustique il y a lieu de tenir compte du genre de son à amplifier ou à transmettre et de la qualité requise.

Si l'on se borne à la voix seule, de grandes économies de matériel sont possibles tout en conservant, ou même en améliorant, l'intelligibilité.

En effet, le spectre de fréquences peut être beaucoup moins étendu que s'il s'agissait de musique. Environ 90 % des fréquences nécessaires à une bonne compréhension sont situées entre 600 et 4000 Hz.

Ce rétrécissement de la bande passante permet de réduire de près de 70 % la puissance finale par rapport à celle qui serait nécessaire pour transmettre la bande complète des fréquences audibles (fig. 16).

De plus, il est à noter que la suppression des fréquences inférieures à 400 Hz élimine une bonne partie des bruits d'ambiance et contribue ainsi à rendre la parole plus claire.

La bonne compréhension de la parole ne veut cependant pas dire que la personnalité de celle-ci soit respectée.

En effet, pour conserver le timbre naturel d'une voix, il semble nécessaire de transmettre une bande de fréquences allant de 200 à 8000 ou 10 000 Hz.

La figure 17 indique les limites vers le haut et vers le bas des fréquences qu'on peut sacrifier.

La figure 18 montre d'autre part la proportion relative des fréquences entre 60 et 8000 Hz au cours d'une conversation normale.

Pour la transmission de la musique le problème est bien plus compliqué.

Des essais ont été effectués pour déterminer de combien la bande de fréquences transmise pouvait être amputée avant que l'on perçoive une diminution de la qualité de reproduction.

La figure 19 montre le résultat d'une série d'expériences portant sur un grand nombre de personnes. Les résultats ont été étonnamment constants.

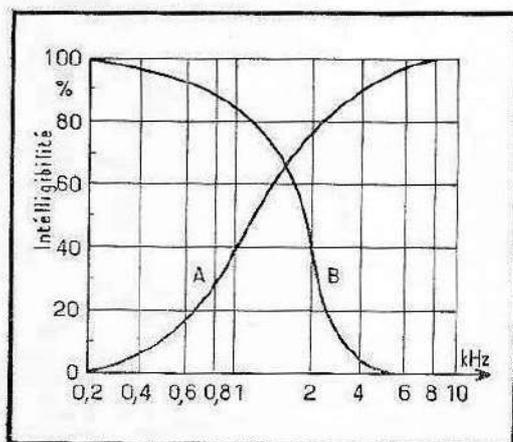


Fig. 17. — Variation de l'intelligibilité avec la bande passante. A : par suppression progressive des fréquences supérieures. — B : par suppression progressive des fréquences inférieures (selon Fletcher).

Fig. 18. — Niveau sonore moyen, selon la fréquence, au cours d'une conversation. A : voix masculine. — B : voix féminine (d'après Sivian et Fletcher).

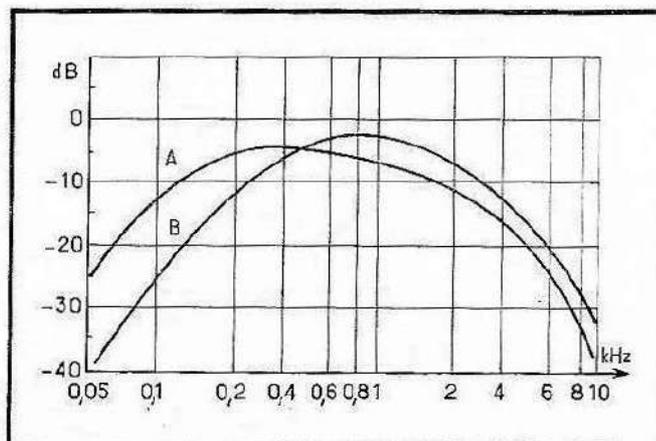


Fig. 19. — Variation subjective de la qualité d'une reproduction musicale en fonction des fréquences supprimées. A : suppression progressive des fréquences inférieures. — B : suppression progressive des fréquences supérieures (d'après Snow).

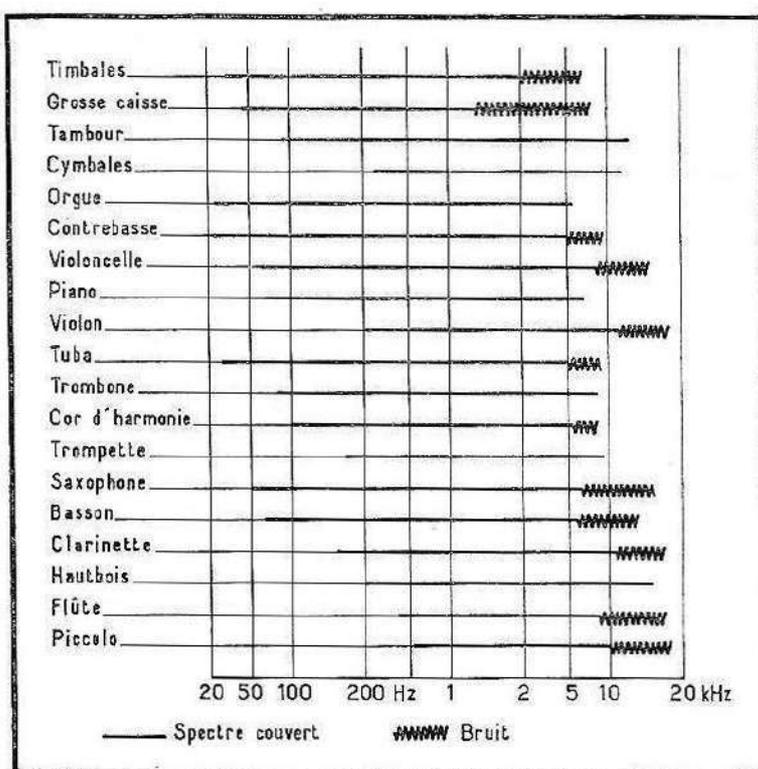
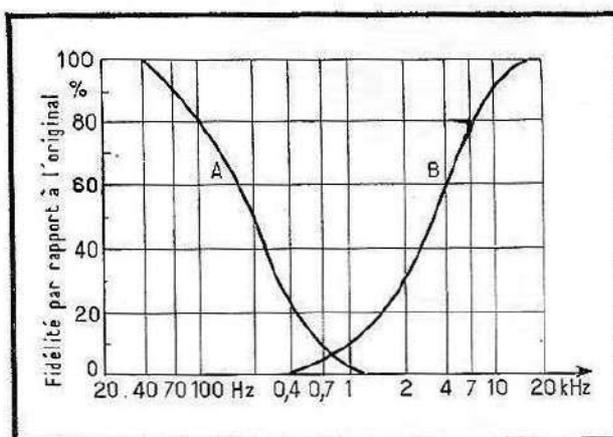


Fig. 20. — Spectres de fréquence et bruits correspondants des principaux instruments de musique.

Ils ont permis de constater que la sensation de réalisme diminue très rapidement à mesure qu'on coupe progressivement les fréquences au-dessus de 100 Hz et en dessous de 10 kHz.

On a trouvé expérimentalement que, si pour l'une ou l'autre raison on est forcé de limiter la largeur de la bande transmise, il est nécessaire de maintenir un équilibre entre les deux bouts : si l'on atténue les fréquences du haut de la gamme, il est nécessaire de les atténuer également dans le bas.

Le produit des deux fréquences extrêmes de la bande transmise doit être approximativement égal à 640 000.

La racine carrée de ce produit ou la moyenne géométrique des deux fréquences est approximativement 800 Hz.

Un système qui reproduit plus d'octaves *en dessous* de 800 Hz qu'au-dessus donne un son sourd.

De même si l'on transmet plus d'octaves *au-dessus* de 800 Hz qu'en dessous, le son paraît grêle et nasillard.

Cette règle suppose que le niveau du son reste constant dans l'ensemble

de la gamme transmise et qu'il y a une atténuation rapide à chaque extrémité de celle-ci.

La figure 20 montre le spectre de fréquences d'une série d'instruments de musique.

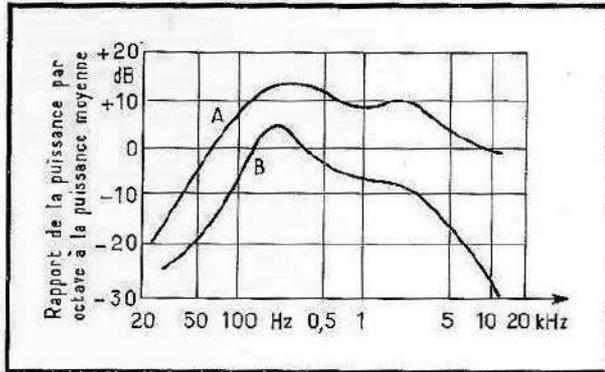


Fig. 21. — Variation, avec la fréquence, de la puissance acoustique d'un orchestre. A : maxima durant des intervalles de $1/8^e$ de seconde. — B : moyenne d'ensemble (d'après Fletcher).

Les bruits qui accompagnent le son de divers instruments sont indiqués en lignes brisées. L'élimination des fréquences correspondant à ceux-ci est nettement perçue par une oreille normale.

Toutefois cette élimination n'implique pas forcément une détérioration de l'agrément d'écoute de la plupart des instruments. Le réalisme est toutefois fort atténué.

La figure 21 montre la variation, avec la fréquence, de l'énergie acoustique totale d'un orchestre de 75 musiciens durant les intervalles d' $1/8$ de seconde (d'après Fletcher).

Si, pour la parole, l'écart en intensité de son au cours d'une conversation ne dépasse pas 20 dB, pour un orchestre il s'élève à près de 90 dB.

Tant à l'enregistrement qu'à la transmission et à la reproduction il faut donc tenir compte de ce que la musique orchestrale contient des accroissements de puissance momentanés (coups de grosse caisse, etc.) dont la crête peut atteindre *un million de fois* la puissance acoustique moyenne. Cette énorme augmentation n'est toutefois pas ressentie dans la même proportion (loi de Fechner), mais tout l'appareillage doit être conçu de manière à « digérer » sans surcharge ces passages.

Cela aboutit, dans les installations qui se veulent à haute fidélité, à utiliser notamment un étage final beaucoup plus puissant qu'il ne paraîtrait nécessaire à première vue.

Voici d'ailleurs à titre indicatif la puissance acoustique attribuée à un certain nombre d'instruments de musique jouant « fortissimo » (*) :

	<i>watts acoustiques</i>
Orchestre complet	70
Grosse caisse	25
Orgue	13
Tambour	12
Cymbales	10
Trombone	6
Piano à queue	0,4
Trompette	0,3
Saxophone	0,3
Violoncelle	0,16
Flûte	0,06
Clarinette	0,05
Triangle	0,05

(*) Document N. B. C.

4. — La dynamique.

Il ne suffit pas de terminer la chaîne d'amplification à haute fidélité par un étage final pouvant délivrer de nombreux watts modulés pour pouvoir respecter la *dynamique*, c'est-à-dire l'écart entre le pianissimo et le fortissimo d'un orchestre (*voir ci-dessus*).

Comme nous venons de le dire, cet écart est énorme.

C'est pourquoi, au départ, que ce soit en radiodiffusion ou pour l'enregistrement, on est obligé de *compresser la dynamique*.

Sans cette précaution, lors de la reproduction, ou bien les étages amplificateurs seraient surchargés par les passages les plus bruyants, ou bien le son descendrait, dans les passages les plus faibles, en dessous du niveau du bruit de fond et serait en grande partie masqué par celui-ci.

Pour cette raison on est obligé de prévoir dans les installations d'amplification directe un système limiteur évitant toute surcharge.

5. — La stéréophonie.

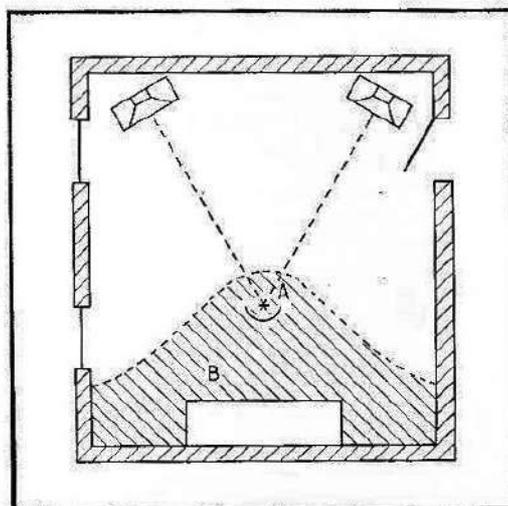
Encore un mot piège!

Disons tout de suite qu'il n'y a aucun rapport entre la haute fidélité telle que nous venons de la décrire et la stéréophonie.

On peut faire de l'excellente stéréophonie avec une détestable reproduction.

Nous avons deux oreilles, et cette dualité nous permet, dans une certaine mesure, de situer par rapport à nous l'origine d'un bruit.

Fig. 22. — Disposition d'une pièce pour l'écoute stéréophonique. A : emplacement idéal de l'auditeur. — B : zone dans laquelle l'effet stéréophonique peut être ressenti.



Ce renseignement nous est fourni par une légère différence dans l'intensité du son perçu par chacune d'elles.

Il y a aussi le fait que, si le son ne parvient pas d'un point situé exactement en face de l'observateur, le trajet pour parvenir à chaque oreille n'a pas tout à fait la même longueur et il s'ensuit un déphasage à certaines fréquences.

La stéréophonie a pour but de nous donner une illusion de répartition sonore dans l'espace, grâce à l'emploi de deux microphones pour capter le son et de deux chaînes de reproduction.

Elle n'a évidemment d'intérêt que pour la reproduction d'un orchestre, d'une formation musicale assez importante ou, éventuellement, d'une pièce de théâtre.

Le fait d'utiliser deux ensembles de reproduction distincts, depuis le microphone jusqu'au haut-parleur, en passant par une matérialisation sous forme de disque ou de bande magnétique, ou par un canal de radiodiffusion, ne confère en lui-même aucune amélioration à la fidélité.

L'effet stéréophonique ne peut toutefois être ressenti que grâce à certaines dispositions particulières.

Il est notamment indispensable que l'auditeur soit placé dans une certaine position par rapport aux haut-parleurs, et ces derniers doivent être placés à une distance suffisante l'un de l'autre et, de plus, convenablement orientés.

La figure 22 indique la disposition idéale.

Une nécessité impérative est que chaque canal présente les mêmes caractéristiques de transmission, mais avec éventuellement des possibilités de correction séparées.

Il est évident que, selon le cas, les sons à prédominance grave peuvent venir de droite et les sons aigus de gauche, ou inversement.

De plus, dans la transmission ou l'enregistrement d'un grand orchestre, les microphones utilisés ne sont pas à ce point directifs que chacun ne puisse capter que le son d'une partie des instruments. Chaque canal contient donc la totalité des sons provenant de l'ensemble de l'orchestre, mais avec une prédominance marquée pour les instruments placés de l'un ou de l'autre côté. Ce rapport doit être rigoureusement respecté dans la retransmission si l'on veut obtenir pleinement l'illusion de présence.

Il faut noter que les auditeurs se trouvant dans la zone d'écoute stéréophonique indiquée dans la figure 22 sont censés se trouver dans la salle de concert dans une position bien déterminée et qui, selon les dispositions prises pour la captation du son, est située plus ou moins près du chef d'orchestre, c'est-à-dire aux premiers rangs des fauteuils.

Le nombre d'auditeurs qui peuvent jouir de ce privilège est évidemment limité, et pour ceux qui se trouvent autrement placés, la répartition spatiale du son est très différente.

La stéréophonie a donc quelque chose d'artificiel en ce qu'elle ne restitue que l'image sonore recueillie dans une zone restreinte d'une salle de concert.

Il est cependant incontestable qu'elle augmente le réalisme de la reproduction lorsqu'il s'agit d'un grand ensemble orchestral ou vocal.

Dans les autres cas la stéréophonie ne peut rien apporter de valable.

L'écoute réellement stéréophonique n'est donc réalisable que dans des conditions et pour une matière sonore bien déterminée.

Cependant on peut obtenir un effet assez comparable à partir d'une source monophonique en utilisant deux voies aboutissant à deux haut-parleurs ou groupes de haut-parleurs placés comme dans une installation stéréophonique et en affectant chaque voie d'une correction légèrement différente, par exemple prédominance de l'aigu d'un côté et des graves de l'autre.

Ce trucage ou pseudo-stéréophonie permet une écoute très agréable, sinon rigoureusement fidèle, des ensembles orchestraux.

UNITÉS DE MESURES ACOUSTIQUES

« *Je ne comprends clairement, disait l'illustre physicien FARADAY, que ce que je puis mesurer.* »

En effet, tout travail, dans quelque domaine que ce soit, exige la connaissance exacte de l'une ou l'autre grandeur, et pour mesurer celle-ci, il faut une unité appropriée à sa nature.

Nous savons qu'il n'y a pas de relation simple entre l'intensité *physique* du son et l'évaluation *physiologique* de celui-ci. L'unité qui sert à mesurer la première ne permet donc pas d'exprimer l'intensité de la *sensation* auditive.

Il faut pour cela une unité adaptée à la loi de FECHNER.

Il s'agit en effet de mesurer des différences dans l'intensité *ressentie* (« loudness » en anglais, « Lautstärke » en allemand, « громкость » en russe). Or, à des différences égales ne correspondent pas des intensités physiques égales. L'unité ne pourra de ce fait avoir une valeur absolue.

Un exemple fera comprendre cette question :

L'intensité physique du son s'exprime, comme nous l'avons vu, par la pression instantanée de l'air sur une surface donnée ; en principe 1 cm².

Soit une intensité sonore de 10 dynes/cm² que nous portons à 100 dynes/cm² en l'augmentant de 90 dynes/cm², puis à 1000 dynes/cm² en l'augmentant cette fois de 900 dynes/cm²; nous constaterons que nous aurons à peu près la même *sensation d'augmentation dans les deux cas*. L'unité servant à mesurer l'augmentation *subjective* ne pourra donc avoir qu'une valeur relative. De même que les degrés thermométriques n'ont de sens que si l'on définit le zéro de l'échelle, les unités logarithmiques n'ont de valeur que par rapport à un zéro conventionnel.

Deux unités sont utilisées dans la technique du son : le *phone*, qui sert uniquement pour l'acoustique, et le *décibel* (dB) qui est d'un usage général pour tout ce qui concerne l'amplification du son.

La base de ces deux unités est :

$$S = 10 \log \frac{N_1}{N_0}$$

où N_0 est le niveau de départ et N_1 l'intensité du son après modification.

De sorte que si

	$N_1 = N_0$	$S = 0$
si	$\frac{N_1}{N_0} = 10$	$S = 10$
si	$\frac{N_1}{N_0} = 100$	$S = 20$
si	$\frac{N_1}{N_0} = 1000$	$S = 30$

et ainsi de suite.

Le zéro, fixé par une convention internationale en 1937, est de 10^{-16} watt/cm².

Cette intrusion d'une unité électrique dans le domaine acoustique s'explique comme suit : si le son provient d'un haut-parleur, une certaine quantité d'énergie électrique est consommée pour le produire. Si on divise celle-ci par le rendement du haut-parleur, on obtient l'équivalent en énergie électrique de la puissance sonore émise, et il est parfaitement légitime d'utiliser la même unité de mesure pour les deux.

Quant à la nécessité d'exprimer la puissance par rapport à une certaine surface, elle se justifie par le fait que ce qui nous intéresse n'est pas la puissance totale, mais bien celle qui agit sur notre oreille. La quantité d'énergie émise agit sur tout le volume d'air du local, tandis que la réception se fait en un point déterminé et n'utilise qu'une infime partie de l'énergie totale. On doit donc spécifier l'étendue de la surface qui, placée en cet endroit, absorbe l'énergie sonore.

Si au lieu de *watts* nous utilisons, dans le calcul, le rapport des *pressions* exprimées en *dynes par cm²* ou en *millibars*, la formule devient :

$$S = 20 \log \frac{P_1}{P_0}$$

et le zéro est 0,0002 millibar.

Le tableau ci-dessous donne une idée du niveau de son produit par diverses sources :

SOURCE DU SON	dB au-dessus de 10^{-16} watt/cm ²	$\mu\text{W/cm}^2$	μbar
Seuil d'audibilité (1000 Hz)	0	0,0001	0,0002
Bruit très léger	4	0,00025	0,0003
Bruissement de feuilles	10	0,001	0,0006
Murmure à voix basse	20	0,01	0,002
Auditoire calme	30	0,1	0,006
Conversation normale	40	1	0,02
Orateur au microphone	50	10	0,06
Rue animée	60	100	0,2
Orchestre complet	70	1000	0,6
Motocyclette	80	10 000	2
Sirène	90	100 000	6,4
Avion	100	10^6	20
Atelier de chaudronnerie	110	10^7	64
Seuil de douleur	120	10^8	200
	130	10^9	640

Le zéro normalisé pour le phone correspond au seuil d'audibilité à la fréquence de 1000 Hz. Ce zéro est utilisé également pour le décibel, lorsqu'il s'agit de mesures *acoustiques*, mais le décibel est utilisé d'une manière générale pour définir l'amplification ou l'atténuation de tous les appareils électriques servant à la transmission du son. Il faut alors un autre zéro qui corresponde non plus à une intensité sonore mais à une puissance électrique déterminée, et on a :

$$a = 10 \log \frac{W_1}{W_2}$$

Remarquons qu'on est libre de fixer ce zéro au niveau que l'on veut et de compter les décibels au-dessus ou en dessous, mais à condition d'indiquer chaque fois de quel zéro il s'agit. Cependant, on utilise généralement dans la technique de l'amplification une puissance de *0,006 watt* (6 milliwatts).

C'est une valeur qui est généralement sous-entendue dans la littérature technique quand aucune autre n'est indiquée.

L'emploi du décibel rend le calcul de l'amplification d'une simplicité enfantine : il suffit en effet d'additionner les gains en décibels de chaque unité et de soustraire de cette somme les décibels représentant les pertes (ou atténuations), pour avoir l'amplification totale de l'installation.

Considérons une installation comprenant un microphone, un pré-amplificateur, un dispositif de commande de tonalité et mélangeur, un amplificateur et un haut-parleur. Comme, suivant la règle, la puissance fournie par le microphone est considérablement inférieure à 0,006 watt, il est attribué à celle-ci une valeur en décibels précédée du signe —. Le mélangeur et le système de commande de tonalité produisent une *perte* dans l'amplification ainsi que les transformateurs et la ligne reliant l'amplificateur au haut-parleur.

Le bilan s'établit suivant le tableau ci-dessous :

ÉLÉMENT DE L'INSTALLATION	NIVEAU dB	GAIN dB	PERTE dB
Microphone	— 45	—	—
Préamplificateur	— 27	18	—
Ligne	— 28	—	1
Mélangeur	— 30	—	2
Commande tonalité	— 34	—	4
Amplificateur	+ 36	70	—
Transformateurs d'adaptation et ligne	+ 35	—	1
TOTAUX		88 — 8	8
GAIN TOTAL		80	

On remarquera que l'amplificateur proprement dit est « à cheval sur le zéro », parce que la puissance à l'entrée est inférieure à 0,006 watt.

Nous arrivons maintenant à une autre particularité importante que les lecteurs attentifs auront remarquée : la formule de base du décibel indique que celui-ci définit le *rapport* entre deux grandeurs. Il est évident qu'il ne peut s'agir que de *grandeurs de la même espèce*. En pratique, ce sont le plus souvent des puissances que l'on compare, car le rôle de tout dispositif d'amplification est de recevoir à l'entrée une certaine énergie et de fournir à la sortie une énergie plus grande.

On peut cependant désirer utiliser, pour évaluer le gain, le rapport entre deux tensions (en volts) ou deux intensités (en ampères). Très souvent, les fabricants de pick-up ou de microphones indiquent la tension de sortie de ces appareils et parfois ne donnent que ce renseignement. D'autre part, dans les étages d'amplification, le signal sonore passe d'un tube à l'autre sous forme de variations de tension alternative aux grilles et aux anodes.

On peut traduire en décibels des différences de tension et des différences d'intensité, mais à la condition absolue que *l'impédance d'entrée et l'impédance de sortie soient rigoureusement égales*. Or :

$$W = I^2 Z = \frac{V^2}{Z}$$

c'est-à-dire que, pour une impédance donnée Z , la puissance W est proportionnelle *au carré* de la tension ou du courant et, comme il suffit de multiplier le logarithme d'un nombre par deux pour l'élever au carré, nous pouvons calculer des gains de tension ou d'intensité au moyen des formules suivantes :

$$a = 20 \log \frac{V_2}{V_1}$$

$$a = 20 \log \frac{I_2}{I_1}$$

Ces formules sont utiles aussi quand on désire exprimer en décibels des différences de tension, intensité ou puissance provoquées, dans un circuit donné, par une modification de l'un ou l'autre facteur, le plus souvent la fréquence.

Les *courbes de réponse* ainsi obtenues sont plus conformes à l'effet physiologique résultant que si on portait directement en ordonnées les tensions, intensités ou puissances mesurées. On relève de cette manière les courbes aussi bien pour un amplificateur complet que pour un organe séparé comme, par exemple, un transformateur B. F.

On peut désirer, connaissant le gain total en décibels d'une installation, trouver la puissance en watts modulés fournie au haut-parleur. Il suffit, pour cela, de connaître le nombre de décibels au-dessus de 0,006 watt. La puissance finale peut alors être directement calculée au moyen d'une table des logarithmes ou, plus simplement, à l'aide du tableau suivant :

dB	watts	dB	watts	dB	watts	dB	watts	dB	watts
1	0,0075	11	0,075	21	0,75	31	7,5	41	75
2	0,0095	12	0,095	22	0,95	32	9,5	42	95
3	0,0119	13	0,119	23	1,19	33	11,9	43	119
4	0,0151	14	0,151	24	1,51	34	15,1	44	151
5	0,0189	15	0,189	25	1,89	35	18,9	45	189
6	0,0239	16	0,239	26	2,39	36	23,9	46	239
7	0,03	17	0,3	27	3	37	30	47	300
8	0,0378	18	0,378	28	3,78	38	37,8	48	378
9	0,0476	19	0,476	29	4,76	39	47,6	49	476
10	0,06	20	0,6	30	6	40	60	50	600

Dans la technique des transmissions, et principalement en téléphonie, on fait usage d'une unité différente : le *neper*.

Celui-ci est basé sur les logarithmes népériens au lieu des logarithmes décimaux.

Le logarithme népérien (dont la base est $e = 2,718$) correspond, rappelons-le, pour un nombre donné, au logarithme décimal multiplié par 2,3.

En fait le *décibel* est approximativement égal à 1,151 *décineper*, et 1 *décineper* à 0,868 *décibel*.

Une conversion de l'une à l'autre unité est donc possible sans trop de difficultés.

Une autre expression utilisée en acoustique est la *sonorie* qui sert à exprimer l'intensité *ressentie*. On dit une *sonorie* de tant de phones comme on dirait une température de tant de degrés, sous-entendu au-dessus du zéro choisi, en l'espèce le seuil d'audibilité.

Lors de la prise de son pour la transmission ou l'enregistrement, un moyen de contrôle du niveau est indispensable pour éviter de surcharger les tubes dans la chaîne d'amplification. Les instruments de mesure sont généralement étalonnés en décibels mais peuvent également, selon la technique américaine, porter une échelle en unités *Vu* (volume unit). C'est une graduation purement conventionnelle : elle correspond au nombre de décibels au-dessus ou en dessous du niveau standardisé de 1 milliwatt dans une impédance de 600 ohms.

Nous y reviendrons dans un chapitre consacré aux appareils et moyens de mesure.

MAGNÉTISME ET ÉLECTROMAGNÉTISME

Le *magnétisme* est un phénomène lié à la constitution intime de la matière et qui peut se manifester de plusieurs façons.

Un *aimant* est un morceau de métal ou d'une composition à base d'oxydes qui a subi un traitement particulier lui conférant le pouvoir d'attirer ou de repousser des corps de nature analogue.

On observe que l'effet magnétique n'est pas réparti de manière uniforme dans le corps aimanté : il se localise en deux régions plus ou moins éloignées l'une de l'autre et qu'on nomme *pôles*.

On observe qu'en rapprochant deux aimants, ils s'attirent ou se repoussent selon les pôles qui se font face; on en conclut que l'aimantation a un certain *sens*.

Les appellations nord et sud ont été conservées aux pôles d'un aimant par tradition. La première manifestation connue du magnétisme était, en effet, le comportement de l'aiguille aimantée de la boussole.

Si l'on s'avise de couper en deux un barreau aimanté on n'obtient pas deux demi-aimants ne comportant chacun qu'un seul pôle, mais deux aimants complets. On pourrait poursuivre l'opération à l'infini que l'on trouverait toujours des aimants de plus en plus petits, mais toujours complets et munis de leurs deux pôles. A l'inverse, en joignant bout à bout deux aimants par leurs pôles opposés, on obtient un aimant unique (fig. 23).

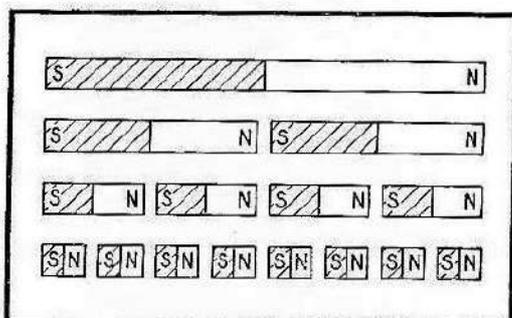


Fig. 23. — En coupant un aimant on obtient toujours deux autres aimants complets.

La zone où s'exerce l'effet magnétique porte le nom de *champ*. On considère qu'il est formé par des *lignes de force* qui sortent par le pôle nord et rentrent par le pôle sud, traversent l'aimant et referment ainsi le circuit.

Hâtons-nous de dire que c'est là une simple vue de l'esprit destinée à faciliter certains raisonnements.

Les lignes de force n'ont aucune existence réelle et la nature exacte du champ magnétique est inconnue.

La force d'attraction ou de répulsion entre deux pôles d'aimant est proportionnelle au carré de leur distance, et proportionnelle à leurs *masses magnétiques* ou quantité de magnétisme qu'ils renferment.

Le *flux magnétique* est l'intensité du champ multipliée par sa section. En d'autres termes, c'est l'intensité du champ multipliée par la surface d'un trou dans un écran qui serait placé perpendiculairement au champ et par où passerait une partie des lignes de force (fig. 24).

Si l'on introduit un morceau de substance magnétique dans un champ passant dans l'air ou le vide, les lignes de force s'y concentrent et le flux

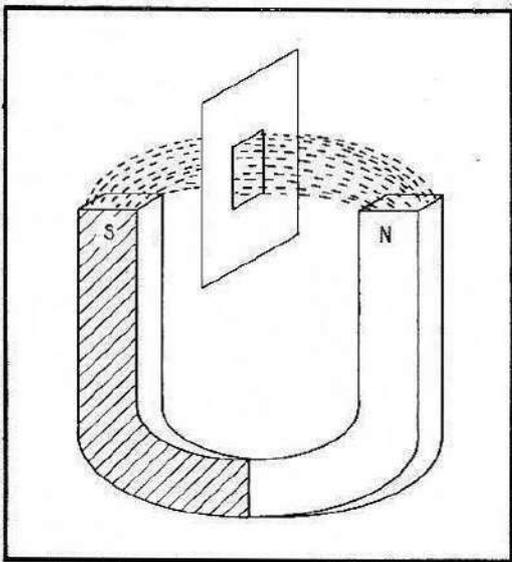


Fig. 24. — Le flux magnétique est l'intensité du champ multipliée par sa section.

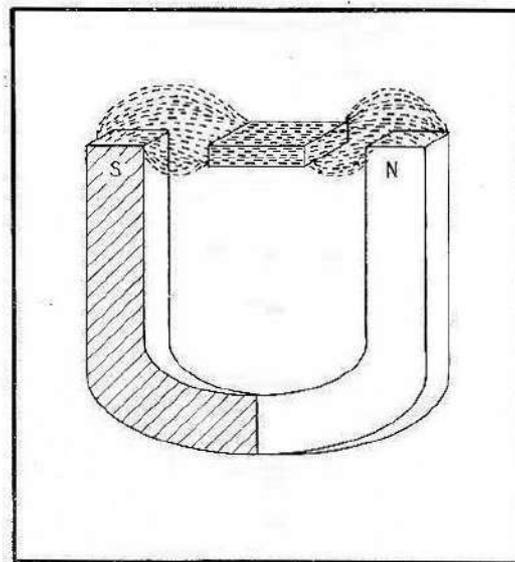


Fig. 25. — Le champ magnétique se concentre en traversant un morceau de métal magnétique.

qui le traverse est considérablement plus dense que celui qui se propage à l'extérieur (fig. 25).

Ce renforcement du champ s'appelle *induction magnétique*. Il convient de ne pas confondre ce phénomène avec l'induction *électromagnétique* qui est une chose complètement différente.

L'augmentation de flux est déterminée, pour un métal donné, par sa *perméabilité*. Cette propriété n'est cependant pas constante : elle varie avec l'intensité du champ inducteur et est également influencée par la température.

Le chemin parcouru par le flux constitue le *circuit magnétique*, lequel peut être fermé ou ouvert. Dans ce dernier cas une partie du flux passe dans l'air.

Tout comme un conducteur vis-à-vis d'un courant électrique, un circuit magnétique offre au passage du flux une certaine résistance qui dépend à la fois de la nature du métal traversé, de la longueur du trajet et de la constitution du circuit. Cet effet s'appelle la *réductance*.

Les phénomènes magnétiques ne dépendent pas d'une propriété limitée à certains corps : un *courant électrique* engendre également un champ magnétique.

On peut résumer comme suit les lois de l'*électromagnétisme* :

1° L'intensité du champ magnétique résultant du passage d'un courant dans un conducteur quelconque est proportionnelle à l'intensité de ce courant;

2° Un courant prend naissance dans tout conducteur situé dans un champ magnétique :

a) chaque fois que survient une modification dans l'intensité de celui-ci;

b) si l'on déplace le conducteur transversalement par rapport aux lignes de force;

3° Un conducteur situé dans un champ magnétique et traversé par un courant subit une force qui tend à le déplacer dans une direction perpendiculaire à la fois au sens du courant et aux lignes de force et dont la grandeur est donnée par la loi de LAPLACE :

$$f = \frac{H l I}{10}$$

dans laquelle f est en dynes, H l'intensité du champ magnétique en œersteds, l la longueur en cm de la partie du conducteur située dans le champ, I le courant en ampères;

4° Une variation du champ magnétique produit le même effet;

5° Il résulte de ce qui précède que toute variation du courant traversant un conducteur fait naître dans celui-ci un courant en sens opposé qui annule partiellement la variation du courant initial.

Ce phénomène s'appelle *self-induction* (L);

6° Un conducteur parcouru par un courant peut être assimilé à un aimant et produit donc les mêmes effets que celui-ci sur un conducteur voisin, c'est l'*induction* (à ne pas confondre avec l'induction magnétique dont nous avons parlé plus haut).

En enroulant sur lui-même un conducteur, le champ magnétique produit par le courant se trouve renforcé à l'intérieur de la boucle et dispersé à l'extérieur. Il se forme ainsi deux pôles dont le nom dépend du sens du courant (fig. 26).

Un conducteur enroulé plusieurs fois sur lui-même prend le nom de *solénoïde*. L'intensité du champ magnétique dépend alors à la fois du nombre de spires et de l'intensité du courant (fig. 27).

Quelques définitions.

La *masse magnétique* d'un pôle d'aimant est définie par son action sur une masse magnétique voisine de *valeur connue*. L'unité est la masse magnétique qui, placée à 1 cm d'une masse de même grandeur, l'attire ou la repousse avec une force de 1 dyne. Cette unité n'a pas de nom.

Le champ magnétique correspondant a une intensité de 1 *œrsted* (ou 1 gauss d'après certains auteurs) et est désigné dans les formules par le symbole H .

Le *maxwell* est l'unité de *flux magnétique*, son symbole est la lettre grecque Φ .

On a :

$$\Phi = H s$$

s étant la surface en cm^2 de la section du champ dans l'air ou le vide.

On rencontre aussi parfois, dans la littérature commerciale se rapportant aux haut-parleurs, une unité appelée *weber* (1 weber = 10^8 maxwells) sur laquelle nous reviendrons plus loin.

L'induction magnétique est symbolisée, dans les calculs, par la lettre B et son unité est le *gauss*.

La perméabilité a pour symbole μ :

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Quant à la réluctance R , elle est reliée aux valeurs précédentes par la formule :

$$R = \frac{l}{\mu s}$$

où l est la longueur du circuit magnétique et s sa section en cm^2 .

La réluctance totale d'un circuit magnétique est la somme des réluctances de chacune de ses parties.

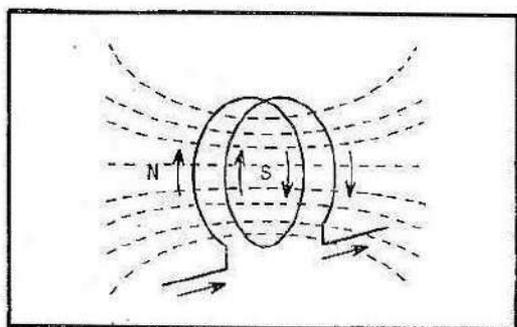


Fig. 26. — Un conducteur enroulé sur lui-même et traversé par un courant équivaut à un aimant.

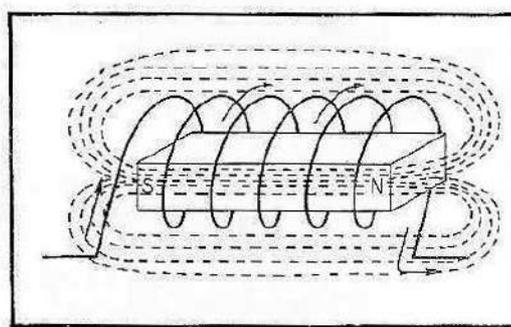


Fig. 27. — En introduisant un noyau magnétique dans un solénoïde, on renforce considérablement le champ magnétique.

Une bobine destinée à fournir un champ magnétique est caractérisée par le nombre d'*ampère-tours* par centimètre.

En négligeant le champ extérieur, qui est faible pour un solénoïde long par rapport à son diamètre, on a :

$$H = \frac{4 \pi n I}{10} = 1,256 n I$$

H est le champ intérieur, n le nombre de spires par centimètre et I l'intensité du courant en ampères.

Le flux est d'autre part :

$$\Phi = 1,256 n I s$$

où s est la section du solénoïde en cm^2 .

Si l'on introduit dans un solénoïde un noyau en matériau magnétique, la formule devient :

$$\Phi = 1,256 n I s \mu$$

ou μ est la perméabilité du matériau.

La présence du noyau augmente donc le flux, toutes autres choses restant égales.

La *force électromotrice* qui résulte du mouvement d'un conducteur dans un champ magnétique est proportionnelle à la *vitesse de déplacement*.

Une variation du flux $d\Phi$ durant un temps dt produit une force électromotrice :

$$e = \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8}$$

et le courant correspondant est :

$$I = \frac{d\phi 10^{-8}}{dt R}$$

R est la résistance du circuit en *ohms*.

Dans le cas de deux enroulements *couplés*, la variation du courant dans l'un d'eux produit dans l'autre une force électromotrice :

$$e = M \frac{dI}{dt}$$

M est le *coefficient d'induction mutuelle* qui dépend du flux passant d'une bobine à l'autre et de la perméabilité du milieu dans lequel il passe.

Inductance et impédance.

Un courant alternatif de fréquence *f* passant dans une bobine rencontre une résistance inductive (*inductance*) qui est théoriquement :

$$X_L = L 2 \pi f = L \omega \text{ ohms}$$

L étant la *self-induction*.

Une bobine réelle présente cependant une résistance ohmique R et d'autres causes de pertes.

Sa résistance réelle est :

$$Z_L = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \text{ ohms}$$

L'*impédance* Z, qui est une valeur pratique, directement mesurable, dépend à la fois de la self-induction et de la fréquence.

La self-induction d'une bobine sans noyau est donnée par la formule :

$$L = \frac{4 \pi n^2 s}{l} 10^{-9}$$

dans laquelle *n* est le nombre de spires, *s* la surface de la section de la bobine et *l* sa longueur.

Cette formule est purement théorique. Dans la pratique on en utilise une autre qui tient compte de la présence d'un noyau :

$$L = 4 \pi n^2 \mu 10^{-9}$$

La perméabilité μ est la valeur moyenne de l'ensemble traversé par le flux ($\mu = 1$ pour l'air).

L'unité de self-induction est le *henry* qui correspond à :

$$e = L \frac{dI}{dt} = 1 \text{ volt}$$

pour $I = 1$ ampère

ou encore à un flux de 10^8 maxwells = 1 weber pour 1 ampère.

Un condensateur arrête un courant continu mais permet le passage d'un courant alternatif auquel il présente une *réactance capacitive* :

$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

Mais les condensateurs ne sont jamais parfaits et il faut également tenir compte d'une certaine résistance passive, d'où :

$$Z_c = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$$

C est la capacité en farads.

Dans les circuits électroniques, bobines et condensateurs sont souvent associés. Comme ils agissent en sens inverse par rapport à la fréquence, il existe toujours une situation pour laquelle

$$L \omega = \frac{1}{C \omega}$$

C'est la *fréquence de résonance*.

Suivant que le condensateur et la bobine sont en parallèle ou en série, l'impédance globale est, à cette fréquence particulière, maximum ou minimum, les valeurs atteintes étant limitées par les pertes dans ces composants.

Remarques au sujet des unités magnétiques.

Il convient d'abord de signaler qu'il règne une grande confusion dans l'attribution des noms aux unités magnétiques. Ils ont en effet servi à désigner des choses différentes suivant l'époque et les pays.

L'*œrsted* désignait autrefois l'unité de réluctance et le *gauss* celle de l'intensité du champ magnétique.

Dans beaucoup d'ouvrages étrangers, cette désignation subsiste, notamment chez les auteurs américains.

Aujourd'hui le *gauss* est l'unité d'induction magnétique et l'*œrsted* l'a remplacé comme unité d'intensité du champ magnétique.

Quant à la réluctance, son unité n'a plus de nom.

Disons enfin que certains auteurs anglais utilisent aussi, pour définir le champ magnétique, une unité appelée *ligne* (sous-entendu de force) et de plus ne précisent pas toujours si le nombre indiqué correspond à des cm^2 ou à des pouces².

Ces notions sont nécessaires, comme nous le verrons plus loin, pour déterminer le choix d'un haut-parleur d'après les caractéristiques figurant au catalogue du fabricant.

Signalons pour finir qu'il existe encore une unité qui intervient dans les calculs d'aimants : c'est le *gilbert*.

Il correspond à une autre grandeur qui est la *force magnétomotrice* et est définie comme étant la force électromotrice nécessaire pour obtenir un flux de 1 maxwell à travers une réluctance de 1 unité.

Mais ce n'est pas tout : il a été fait usage dans ce qui précède des unités classiques encore largement employées, mais qui seront graduellement remplacées par des unités adoptées par une convention électronique internationale.

Il faut savoir que les unités magnétiques classiques sont basées sur un système de références qui ne « colle » pas au système utilisé en électricité. On a donc cherché un système qui permet de relier entre elles toutes les grandeurs tant mécaniques qu'électriques : c'est le *système GIORGI* ou

M. K. S. A., qui tend à remplacer le système C. G. S. et dont le tableau ci-dessous donne les concordances avec les unités anciennes :

GRANDEURS	UNITÉS classiques	UNITÉS M. K. S. A.	ÉQUIVALENCE
Champ magnétique	oersted	ampère-tours/m	env. $\frac{1}{80}$ oersted
Induction magnétique .	gauss	tesla (T), weber/m ² (ou Wb/m ²)	10 ⁴ gauss
Flux magnétique	maxwell	weber	10 ⁸ maxwells
Perméabilité du vide ..	1	$4\pi \cdot 10^{-7}$	
Force magnétique	gilbert	ampère-tours (At)	

Les matériaux magnétiques.

Les matériaux magnétiques utilisés en électronique peuvent être divisés en deux catégories qu'on pourrait qualifier de « durs » et de « mous ».

Les premiers se distinguent par la propriété de conserver leur aimantation.

Les seconds, par contre, perdent en grande partie leur aimantation lorsque disparaît le champ inducteur.

Si l'on place une pièce en matière magnétique dans un champ dont on augmente graduellement l'intensité, on observera que l'induction croît d'abord régulièrement, puis de plus en plus lentement, pour arriver finalement à une

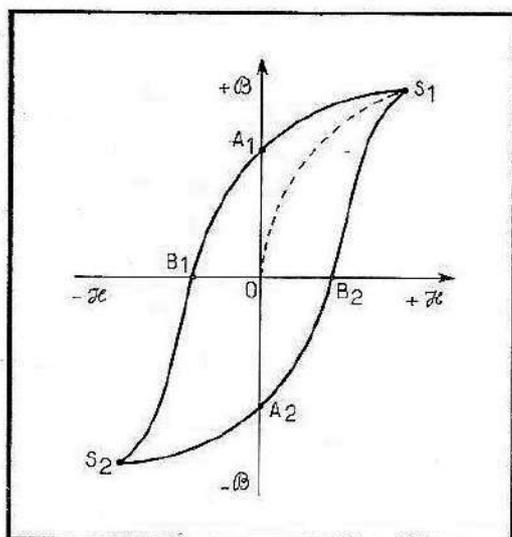


Fig. 28. — Courbe représentant le « cycle d'hystérésis » d'un matériau magnétique. Elle diffère considérablement d'une substance à l'autre.

valeur au-delà de laquelle l'augmentation d'intensité du champ n'a plus aucun effet. C'est le point de *saturation*.

En diminuant l'intensité du champ inducteur, on constate que la démagnétisation ne se fait pas exactement suivant la même progression, si bien que, lorsque le champ est revenu à zéro, la pièce a conservé une certaine aimantation dite *rémanente*.

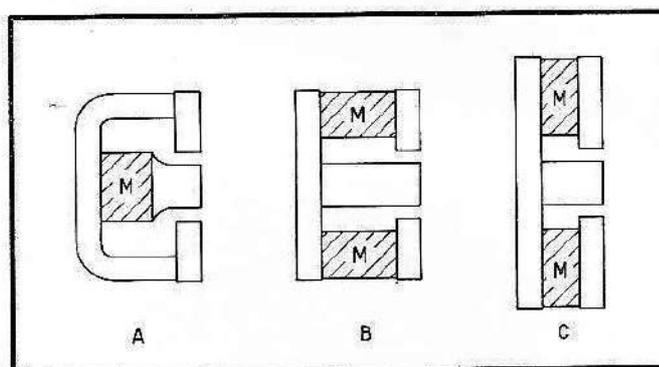
Pour la faire disparaître complètement, il est nécessaire d'appliquer à la pièce un autre champ magnétique en sens inverse du premier.

Si l'on augmente graduellement ce nouveau champ, la pièce s'aimante en sens opposé à son aimantation primitive et on rencontre un nouveau point de saturation.

L'intensité magnétique nécessaire pour effacer complètement le magnétisme d'une pièce magnétisée s'appelle le *champ coercitif* ou *force coercitive*. On voit que si l'on soumet une pièce en matière magnétique à l'effet d'un champ alternatif, on fait passer l'induction par un cycle fermé qui est le *cycle d'hystérésis* (fig. 28).

On constate qu'une matière magnétique possède deux propriétés entièrement distinctes : l'aimantation rémanente et le champ coercitif. Il n'y a plus de relation constante entre les deux et leur rapport diffère beaucoup d'une matière magnétique à l'autre.

Fig. 29. — Formes usuelles des circuits magnétiques de haut-parleurs. A : petits haut-parleurs courants. — B : modèles professionnels de grande puissance. — C : aimant en ferrite.



Un aimant permanent demande un champ coercitif aussi élevé que possible, tandis que les matières devant subir l'effet de champs magnétiques alternatifs, comme par exemple les noyaux de transformateurs, devront posséder un champ coercitif très faible.

Aimants permanents.

Les aimants permanents modernes se distinguent par un champ coercitif très intense et une aimantation rémanente relativement modeste.

Un aimant tend à se désaimanter de lui-même sous l'influence de son propre champ magnétique. Il faut donc, pour résister à cet effet, un champ coercitif énergique. Le meilleur compromis est celui où le produit BH (induction d'aimantation rémanente par un champ coercitif) est plus élevé.

Les aimants permanents pour haut-parleurs sont constitués par des alliages d'aluminium, de nickel et de cobalt (*Alnico*) auquel est souvent ajouté du titane (*Ticonal*).

On leur applique généralement un traitement thermique spécial : la trempe magnétique, qui provoque une orientation particulière des molécules (aciers *anisotropiques*) et de ce fait permet d'obtenir une magnétisation plus intense dans une direction privilégiée, en même temps qu'une rémanence et un champ coercitif renforcés.

On utilise aussi parfois une matière magnétique de nature céramique (*Ferroxdure*) qui se distingue par un champ coercitif extrêmement élevé.

Le circuit magnétique du haut-parleur est toujours complété par des pièces polaires en fer doux ou en alliage ayant un point de saturation aussi élevé que possible.

On ne pourrait le constituer par l'aimant lui-même, car les alliages utilisés sont extrêmement durs et difficiles à travailler et on ne peut leur donner que des formes géométriques très simples : cylindres, troncs de cône ou cubes.

La figure 29 montre les dispositions principales utilisées aujourd'hui.

Le type A est employé dans les modèles courants pour petites puissances; le modèle B est celui généralement utilisé dans les haut-parleurs professionnels; le type C est le modèle correspondant à l'emploi d'une matière magnétique céramique; son application est limitée jusqu'à présent à des haut-parleurs de faible puissance.

La forme du circuit magnétique est étudiée pour que la réluctance soit réduite au minimum ainsi que le champ magnétique dispersé à l'extérieur et qui est, par suite, perdu pour l'entrefer.

Circuits et noyaux magnétiques.

La deuxième classe de matériaux magnétiques comprend des alliages dont, au contraire des précédents, la force coercitive est très faible.

Selon l'emploi qu'on veut en faire, on peut les classer en deux catégories : ceux qui doivent être soumis à une magnétisation continue, comme c'est le cas pour les pièces polaires du circuit magnétique d'un aimant permanent, et ceux qui doivent être soumis à une magnétisation alternative.

Dans le premier cas, la qualité essentielle qu'on demande au matériau est d'avoir une saturation qui n'est atteinte que pour une induction très élevée, tout en ayant une perméabilité aussi grande que possible.

Le fer pur électrolytique répond assez bien à ces conditions. Mais, comme c'est un matériau assez coûteux, on utilise généralement pour les haut-parleurs un acier extra-doux qu'on trouve aisément dans le commerce.

Le cas est beaucoup plus compliqué quand il s'agit du noyau d'un transformateur ou d'une bobine de filtrage. La présence de ce noyau se justifie par le fait, que nous avons exposé plus haut, qu'il augmente considérablement la self-induction pour un même nombre de tours de fil.

Ici la caractéristique requise est une faible force coercitive jointe à une grande perméabilité. Il est clair que l'énergie utilisée pour produire puis effacer la magnétisation est irrémédiablement perdue. C'est la *perte par hystérésis*.

Il est indispensable aussi que la saturation ne soit atteinte que pour un flux très important.

Malheureusement certaines de ces conditions sont contradictoires : une grande perméabilité va ordinairement de pair avec une induction de saturation assez faible.

Il faut ajouter qu'un noyau magnétique, traversé par un flux magnétique alternatif, est le siège de courants induits dans sa masse ou *courants de FOUCAULT*. Ceux-ci absorbent également une partie de l'énergie utile et créent donc une nouvelle perte.

On limite les courants de FOUCAULT en divisant le noyau en un nombre aussi grand que possible d'éléments isolés électriquement (mais non magnétiquement) entre eux.

Cela consiste, dans la technique de la B. F., à constituer le noyau au moyen de tôles disposées de telle façon que leur plan coupe le trajet que suivraient des courants parasites.

Ces tôles doivent évidemment être isolées entre elles pour les arrêter. Dans la pratique courante, on se contente souvent, pour assurer cet isolement, de la couche d'oxyde qui en recouvre naturellement la surface et qui présente une résistance suffisante.

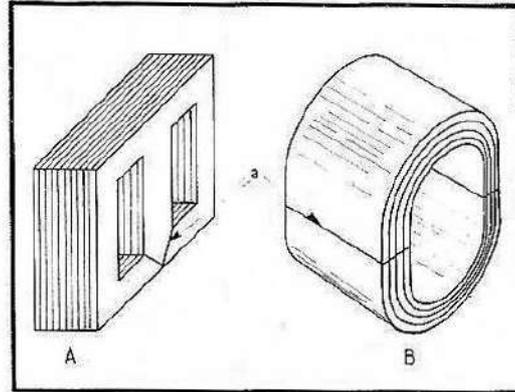
Les meilleures tôles contiennent du silicium et éventuellement du nickel.

Une grande amélioration dans les qualités magnétiques des tôles pour transformateurs est apportée par un laminage à froid accompagné d'un étirage

et suivi d'un traitement thermique spécial. Il en résulte, comme c'est le cas pour les aciers anisotropiques, une direction privilégiée d'aimantation qui se trouve dans le sens de l'étirage. Les pertes par hystérésis sont en même temps réduites.

Il va de soi que ce matériau ne peut être découpé sous la forme habituelle des tôles de transformateur, car dans ce cas le flux induit ne suivrait pas la direction privilégiée. Il est donc livré sous forme de bandes dont on fait des noyaux en forme de C ou de double C (fig. 30).

Fig. 30. — Noyau de transformateurs. A : en tôle magnétique ordinaire. — B : en tôle à grains orientés (noyau en C).



Les pertes dans le noyau dépendent de la fréquence, comme il est facile de le déduire des lois du magnétisme exposées plus haut.

Il s'ensuit que, pour s'opposer efficacement aux courants de FOUCAULT, il faut utiliser des tôles d'autant plus fines et plus nombreuses que la fréquence en jeu est plus élevée.

A la limite, quand il s'agit de fréquences au-delà de la bande sonore et à fortiori en H. F., de nouveaux matériaux doivent être utilisés. C'est le domaine des *ferrites*, qui sont des poudres de matière magnétique enrobées dans une résine synthétique.

Leur résistance aux courants de FOUCAULT est énorme et la perméabilité très élevée.

Les ferrites jouent un grand rôle dans les applications industrielles et scientifiques de l'électronique.

Nous aurons l'occasion d'en reparler.

THÉORIE DU CONDENSATEUR

Le condensateur électrique jouant un grand rôle dans le fonctionnement des appareils électro-acoustiques, il est nécessaire d'en connaître, au moins sommairement, les propriétés.

Un corps portant une charge électrique, c'est-à-dire un excès ou un manque d'électrons (charge négative ou positive), placé dans le voisinage d'un autre corps, peut faire apparaître dans celui-ci une charge de polarité opposée (fig. 31).

L'action à distance s'explique par l'existence d'un *champ électrostatique* s'étendant autour du corps électrisé et qui peut être mis en évidence par une force d'attraction ou de répulsion entre corps chargés, suivant que leur polarité est différente ou la même.

Pour un corps donné la charge qui peut être emmagasinée n'est pas infinie. S'il est isolé, il vient un moment où, la tension augmentant avec la charge, celle-ci se perd dans l'espace.

La *capacité* d'un conducteur est le rapport entre la charge et le potentiel auquel il est soumis.

$$C = \frac{Q}{V}$$

C est une constante pour un conducteur isolé, mais est modifié par le voisinage d'un autre conducteur; Q est la charge en *coulombs*.

Un *condensateur* est un ensemble formé de deux conducteurs rapprochés, lesquels sont appelés *armatures* (fig. 32).

La capacité est donnée par la formule :

$$C = \frac{S}{4d}$$

S est la surface en cm² des parties d'électrode qui se font face, et d est la distance entre elles en cm.

Cette formule n'est valable que pour des condensateurs formés par deux surfaces planes parallèles séparées par de l'air ou le vide. Il est nécessaire, d'autre part, que la distance entre les surfaces soit très petite par rapport à leur grandeur, parce que ce n'est qu'à cette condition que la presque totalité du champ électrostatique s'y trouve concentrée.

La capacité ainsi calculée est exprimée en *centimètres*. C'est une unité du système C. G. S. qui, évidemment, peut occasionner des confusions avec l'unité de longueur. Elle n'est plus utilisée aujourd'hui, mais on la trouve encore dans la littérature technique allemande.

L'unité *pratique* de capacité est le *farad*.

$$1 \text{ farad} = \frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ volt}}$$

Cette unité étant beaucoup trop grande pour l'emploi en électronique, on n'en utilise qu'une très petite fraction : le millionième ou microfarad (μF), ou même le millionième de ce dernier, le micromicrofarad ($\mu\mu\text{F}$) ou picofarad (pF).

La relation avec l'unité C. G. S. est :

$$1 \text{ cm} = 1,1 \text{ pF}$$

La différence de 10 % peut généralement être négligée dans la pratique courante.

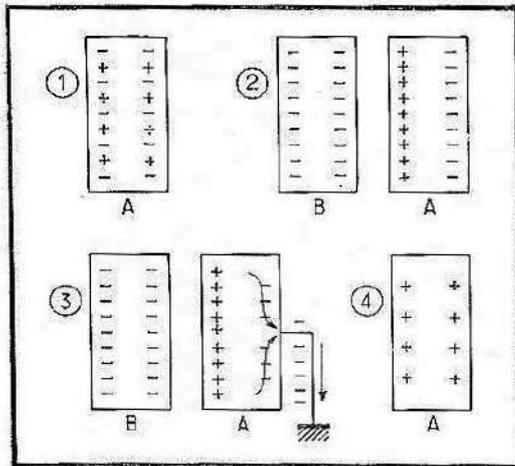


Fig. 31. — 1. A est un corps neutre. — 2. L'approche d'un corps B électrisé négativement modifie la répartition des charges en A. — 3. Les électrons, repoussés par B, s'écoulent dans la terre. — 4. Le corps A reste chargé positivement.

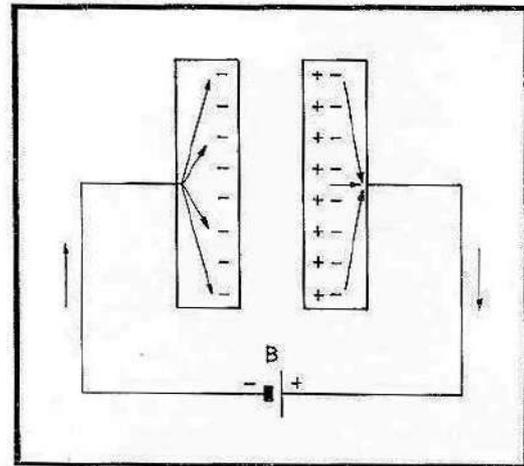


Fig. 32. — Représentation schématique d'un condensateur. B est une source quelconque fournissant une différence de potentiel.

La quantité d'énergie qu'un condensateur peut emmagasiner augmente avec la tension qui est appliquée. Celle-ci n'est limitée que par le fait qu'à partir d'un certain niveau, qui dépend de la distance entre les électrodes et de la nature de l'isolant qui les sépare, le condensateur se décharge spontanément.

La charge passe d'une électrode à l'autre sous la forme d'une étincelle.

Si, au lieu du vide, c'est une matière, liquide ou solide, qui se trouve entre les électrodes, la capacité est considérablement modifiée. Pour un condensateur mince à faces parallèles, elle devient :

$$C = \varepsilon \frac{S}{4 \pi d}$$

ε est la *constante diélectrique* de la substance séparant les armatures. La substance elle-même prend le nom de *diélectrique*.

Il est évident que le diélectrique doit être un corps non conducteur, faute de quoi le condensateur se déchargerait à travers celui-ci.

La constante diélectrique est le nombre de fois que la capacité se trouve augmentée lorsque l'espace entre les électrodes se trouve *entièrement* rempli par la substance considérée par rapport au même condensateur lorsque les armatures sont séparées par le vide.

La constante diélectrique de l'air sec est cependant si faible qu'on peut la tenir pour négligeable et la considérer comme égale à l'unité.

Les diélectriques ne sont jamais des isolants parfaits. Un certain *courant de fuite* se manifeste toujours qui, à la longue, décharge le condensateur.

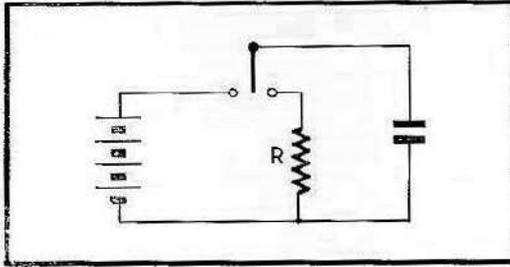


Fig. 33. — Un condensateur mis en contact avec une source ne se charge pas instantanément. Sa décharge à travers une résistance R dépend à la fois de sa capacité et de la valeur de cette résistance.

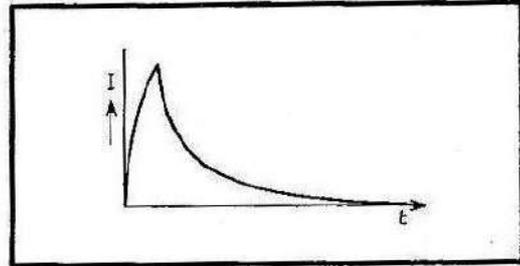


Fig. 34. — Caractéristique du courant de charge et de décharge d'un condensateur.

Si l'on met un condensateur en contact avec une source de tension (fig. 33), on constate qu'il ne prend pas instantanément la charge. Ce fait est dû à ce que le diélectrique se comporte plus ou moins comme une éponge qui absorbe graduellement l'énergie électrique.

Si l'on connecte une résistance aux bornes d'un condensateur chargé il ne se décharge pas instantanément, mais en un temps plus ou moins long qui dépend du rapport entre sa capacité et la valeur de la résistance. Plus C et R sont grands, plus la décharge est lente. Celle-ci diminue suivant une loi exponentielle, c'est-à-dire d'abord rapidement, puis de plus en plus lentement. Ce fait s'explique par la loi d'Ohm :

$$I = \frac{V}{R}$$

R reste en effet constant, tandis que V décroît en même temps que la charge et, par conséquent, I aussi. Il en résulte que la *vitesse d'écoulement* de la charge diminue graduellement (fig. 34).

Le produit RC est une quantité qu'on appelle la *constante de temps* du circuit. Si R est en ohms et C en farads elle représente le temps en secondes que met la charge pour tomber à

$$\frac{1}{e} = \frac{1}{2,718} = \pm 37 \%$$

de sa valeur initiale. Le nombre e que nous trouvons ici est la base des logarithmes népériens.

Remarquons que la constante de temps est identique lorsqu'on charge le condensateur, à condition que la tension qu'on y applique demeure constante. C'est, dans ce cas, le temps nécessaire pour que la charge atteigne 68 % de sa valeur maximum.

La constante de temps joue un rôle très important dans la technique de l'amplification. R représente en effet l'ensemble du circuit associé au

condensateur. Il est évident que si la constante de temps est plus grande que la durée d'une période du signal qui doit traverser le système, il se comportera autrement que si c'est l'inverse qui se produit. Un circuit RC a donc un pouvoir de discrimination. Nous en trouverons de nombreuses applications dans les filtres et les couplages entre les tubes.

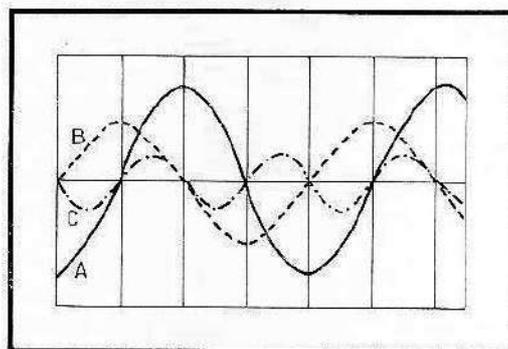
Un condensateur présente un obstacle absolu au courant continu, car une fois la charge effectuée, il ne peut plus circuler. Par contre, si on y applique une tension alternative, le condensateur commencera à se charger, puis se déchargera pour se recharger en sens inverse. Cet effet se répète à chaque alternance, de sorte qu'on peut considérer qu'un courant alternatif circule constamment dans le circuit et tout se passe comme si le condensateur le laissait passer.

Suivant la fréquence du courant, le nombre de charges et de décharges dans l'unité de temps est plus ou moins grand. Il s'ensuit que le courant fictif traversant le condensateur est *proportionnel à la fréquence* pour une tension donnée.

Le courant est également *proportionnel à la capacité* du condensateur, car pour une fréquence donnée, la quantité d'électricité nécessaire pour le charger augmente avec sa capacité.

Finalement le courant est *proportionnel à la tension*, puisque la charge dépend de celle-ci.

Fig. 35. — A : tension. — B : intensité. — C : énergie dissipée.
La tension et l'intensité sont déphasées de 90° par rapport l'une à l'autre. L'énergie étant restituée à chaque alternance, sa valeur moyenne est nulle.



Un condensateur, intercalé dans un circuit, se comporte donc, pour une fréquence donnée, comme une résistance. Il y a cependant une différence importante : une résistance absorbe de l'énergie qui est transformée en chaleur et, par conséquent, perdue, tandis qu'un condensateur idéal, sans pertes, n'en absorbe pas. Le courant qui le traverse est dit *déwatté*.

Un condensateur parfait et complètement déchargé n'offre aucune résistance lorsqu'on y applique une tension : il équivaut à un court-circuit. La tension tombe à zéro et l'intensité du courant a la valeur du débit maximum de la source.

Au cours de la charge le courant diminue et la tension augmente. Elle atteint son maximum quand la charge est complète, tandis que le courant tombe à zéro. La tension est donc *en retard* sur le courant. Ce retard est théoriquement d'un quart de période, soit 90°. Dans ces conditions l'énergie dissipée est nulle.

Cet état de choses est indiqué clairement par les courbes de la figure 35.

L'effet produit par l'insertion d'un condensateur dans un circuit parcouru par un courant alternatif s'appelle *réactance capacitive*. Elle s'exprime en ohms et se calcule au moyen de la formule :

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{\omega C}$$

C est en farads et ω est une notion mathématique appelée *pulsation*.

Dans la réalité, un condensateur présente toujours des pertes et on peut le représenter par la figure 36 dans laquelle R_1 symbolise la perte dans le diélectrique et R_2 le courant de fuite.

On utilise principalement, dans la technique de l'amplification, deux sortes de condensateurs : ceux dont la capacité est comprise entre quelques pF et $0,5 \mu\text{F}$ et ceux dont la capacité va de, mettons $8 \mu\text{F}$ jusqu'à $100 \mu\text{F}$ et plus.

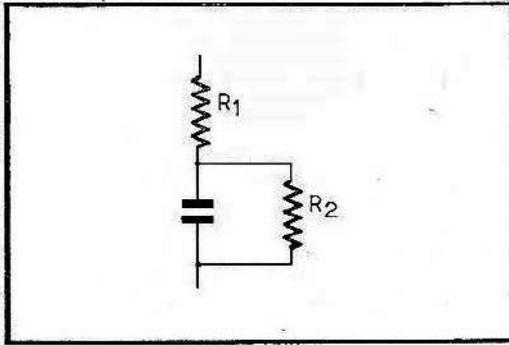


Fig. 36. — Représentation schématique d'un condensateur réel. R_1 est la perte dans le diélectrique et R_2 représente le courant de fuite.

Les diélectriques utilisés dans les premiers sont extrêmement variés : céramique ou mica pour les faibles valeurs, papier paraffiné ou matière synthétique pour les valeurs moyennes. Quant aux condensateurs de grande capacité, ils sont du type électrolytique et le diélectrique est totalement différent. C'est un liquide qui est immobilisé dans une pâte de cellulose.

Ces condensateurs se distinguent des autres par le fait qu'ils sont polarisés et qu'on ne peut leur appliquer une tension continue que dans le sens prescrit. Dans le sens opposé ils constituent virtuellement un court-circuit.

On ne peut évidemment leur appliquer une tension alternative, à moins de superposer à celle-ci une tension continue dépassant largement le niveau de crête. Les condensateurs électrolytiques ont un très mauvais rendement : les pertes dans le diélectrique sont importantes et ils présentent normalement un courant de fuite qui augmente avec l'âge. Leur principal intérêt est de posséder une capacité énorme sous un faible volume.

LA PIÉZO-ÉLECTRICITÉ

Lorsqu'on impose aux cristaux de certains corps une contrainte mécanique, il apparaît des charges électriques de signes opposés aux extrémités d'un axe perpendiculaire à la direction de la force qui y est appliquée.

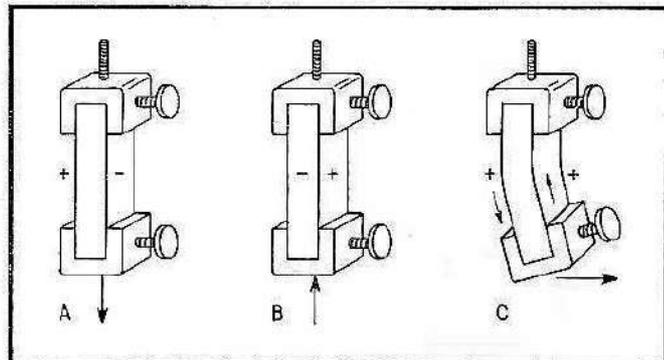
Les charges sont proportionnelles à cette force.

Cet effet ne se produit pas uniformément en tous les points du cristal, mais suivant certaines directions privilégiées. Pour l'utiliser on taille une lame dans sa masse selon une orientation définie.

Si cette lame est fixée par un bout et qu'on exerce une traction sur l'autre (fig. 37 a), on constate que les faces opposées s'électrisent et qu'il existe par conséquent une différence de potentiel entre elles.

Si, au lieu de tirer sur la lame, on y applique une pression (fig. 37 b), le même phénomène se produit, mais la polarité des charges est inversée.

Fig. 37. — Déformation d'un cristal piézo-électrique. La traction A et la compression B font naître sur les faces des charges de polarité opposée. La flexion C produit des charges de même signe.



Il en résulte que si le mouvement imposé à la lame est vibratoire, il existera entre les faces une tension alternative.

Le phénomène piézo-électrique est réversible : si l'on applique une différence de potentiel entre les faces de la lame on constate que, selon la polarité, elle se contractera ou s'allongera légèrement.

La piézo-électricité peut donc être utilisée à deux fins : produire une tension à partir d'un mouvement mécanique ou, inversement, produire un mouvement à partir d'une tension.

La première possibilité est utilisée dans certains microphones et lecteurs de disque; la seconde, dans des graveurs de disques et, plus rarement, dans des haut-parleurs ou des écouteurs.

Dans la pratique on n'utilise guère le mouvement rectiligne que nous venons de décrire : il est plus commode, pour des raisons mécaniques, de plier la lame ou de la tordre. Le résultat est le même.

Il y a toutefois lieu de remarquer que si l'on plie une lame homogène, la face convexe est étirée tandis que la face concave subit une compression. Or tension et compression étant appliquées simultanément à deux faces opposées produisent des charges de même signe (fig. 37 c) et, par conséquent, une différence de potentiel théoriquement nulle.

Qu'à cela ne tienne! Au lieu d'une lame homogène on utilisera deux lames accolées et inversées. Les faces de cette lame *bimorphe* sont métallisées et on y recueille une tension utilisable.

Les cristaux de quartz possèdent des propriétés piézo-électriques mais ne sont pas utilisés en électro-acoustique. Parmi les corps chimiques dont les cristaux possèdent au plus haut degré cette propriété se trouve le tartrate double de sodium et de potassium, connu sous le nom de sel de Seignette. Il est très soluble dans l'eau, fond à 80° et commence d'ailleurs à se décomposer vers 55°.

Malgré ces propriétés physiques peu engageantes et qui nécessitent des précautions particulières, on l'utilise cependant très couramment dans les applications de la piézo-électricité à l'acoustique, parce qu'il permet d'obtenir facilement des tensions relativement élevées : par exemple jusqu'à 2 V dans un lecteur de disques, et 0,05 V dans un microphone.

Le sel de Seignette tend cependant à être graduellement remplacé par des céramiques piézo-électriques; elles fournissent, pour une même action mécanique, une tension moins élevée, mais sont exemptes des défauts signalés plus haut.

On remarquera que la cellule piézo-électrique se présente comme un condensateur dont la lame cristalline forme le diélectrique.

En fait, cette capacité joue un rôle important dans la courbe de réponse de tous les appareils basés sur la piézo-électricité. Elle se trouve en effet en parallèle sur le circuit d'utilisation.

Les applications des cellules piézo-électriques seront examinées dans la deuxième partie du livre.

L'ESSENTIEL DE L'ÉLECTRONIQUE

I. — Les tubes.

Nous n'insisterons pas en détail sur les tubes électroniques. Il existe à ce sujet de nombreux ouvrages spéciaux à qui nous renvoyons les lecteurs désireux de s'initier davantage à ce sujet (*).

Nous nous bornerons donc ici à l'essentiel qu'il faut connaître pour comprendre le fonctionnement des systèmes amplificateurs de son.

Tous les corps matériels sont composés d'atomes qui comprennent un noyau effroyablement compliqué, et dont il n'y a pas lieu de s'occuper ici, et un certain nombre d'électrons. De ce nombre dépend, pour une bonne part, les propriétés physiques et chimiques des corps.

Les électrons sont porteurs d'une charge électrique négative et le noyau est positif. Les atomes ne sont pas des édifices stables : dans des circonstances déterminées ils peuvent perdre quelques-uns de leurs électrons.

Un fil métallique porté à l'incandescence émet des électrons. Si aucune action extérieure n'intervient, ils forment une sorte de nuage autour de lui.

Toutefois, en disposant à proximité une plaque métallique portée à un potentiel positif, les électrons y sont attirés et il s'établit un courant d'électrons depuis le fil jusqu'à la plaque.

Ce phénomène ne peut cependant se produire que dans le vide ou dans un milieu gazeux très raréfié.

Un fil de métal émet relativement peu d'électrons. Certains oxydes de « terres rares » (barium, strontium) ont un pouvoir émissif beaucoup plus grand et la température nécessaire pour provoquer le phénomène est notablement plus basse.

L'électrode émissive, nommée *cathode*, est donc toujours constituée par une couche d'oxydes qui fournit les électrons, et le filament, qui est ordinairement un fil de tungstène, ne sert qu'à son chauffage.

La couche émissive peut être appliquée directement sur le filament ou au contraire, et c'est le cas le plus fréquent, sur un tube entourant l'élément chauffant et isolé de celui-ci.

Le tube le plus simple est la *diode*, qui ne comporte qu'une *cathode* et une *anode*.

Le courant électronique ne pouvant y circuler qu'à sens unique, un tube de ce type sert ordinairement à redresser le courant alternatif.

(*) Par exemple *Technique et Applications des Tubes électroniques*, par H.-J. REICH, aux Editions Radio.

La figure 38 montre ce qui se passe quand on applique progressivement une tension positive à l'anode. Le courant part de zéro et augmente graduellement jusqu'à une certaine valeur au-delà de laquelle il cesse de croître. A ce point, la totalité des électrons que peut émettre la cathode est absorbée. On note, dans la caractéristique, deux régions courbes. La partie AB est due à ce qu'une partie des électrons demeure à proximité de la cathode et forme un obstacle nommé *charge spatiale* qui s'oppose au courant anodique. A partir d'une certaine tension ce nuage d'électrons se dissipe et le débit devient proportionnel à la tension.

De C à D on s'approche du point de saturation; au-delà de D, la caractéristique devient horizontale : l'augmentation de tension n'a plus d'effet.

La figure 39 montre l'allure du courant quand on applique à l'anode une tension alternative.

Il sort de la diode un courant de direction constante mais saccadé : c'est ce qu'on nomme un courant *pulsé*.

En interposant entre la cathode et l'anode une électrode nommée *grille* (dont la forme peut d'ailleurs différer de ce qu'on entend généralement par là) on peut modifier le courant électronique. Quand cette grille est portée à une tension négative, elle repousse en tout ou en partie les électrons et, en

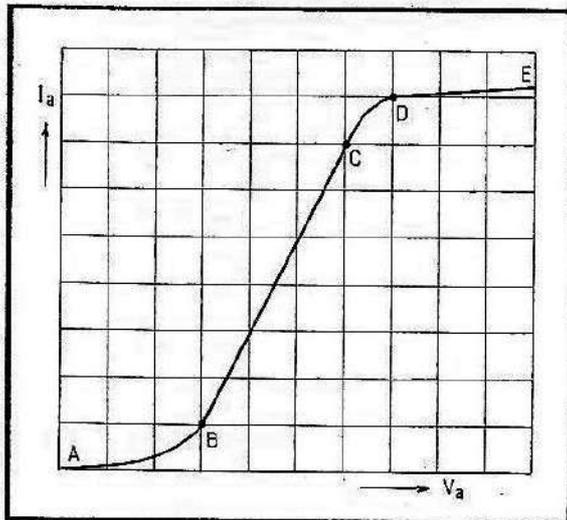
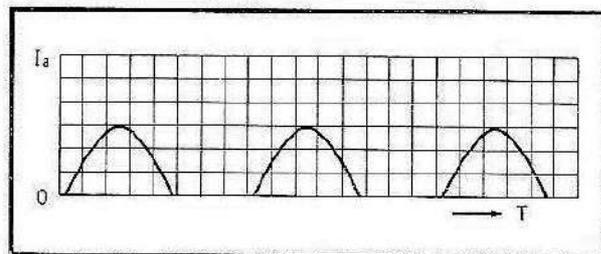


Fig. 38. — Caractéristique I_a/V_a d'une diode.

Fig. 39. — Nature du courant ayant traversé une diode.



variant cette tension négative, on fait varier en même temps le courant anodique. Le tube se comporte à la façon d'un robinet.

L'action de la grille diffère selon sa construction et la position respective des diverses électrodes. La tension négative nécessaire pour annuler complètement le courant anodique peut se situer, suivant le type de tube, entre -1 V et -50 V. Nous ne parlons ici évidemment que des tubes utilisés normalement dans la technique de l'amplification B. F.

L'action de la grille sur le courant anodique est représentée par la courbe de la figure 40, nommée caractéristique V_g/I_a . Elle n'est valable que pour une tension d'anode constante.

Nous attirons spécialement l'attention sur ce dernier point parce que, comme il sera expliqué plus loin, lorsque le tube fonctionne dans un amplificateur, la tension d'anode *ne demeure jamais constante*.

La courbe V_g/I_a ne représente donc pas les *conditions de travail* du tube. C'est pourquoi on l'appelle la *caractéristique statique*.

Or on peut modifier le courant d'anode de deux façons : en variant la tension d'anode ou en variant la tension de grille. En fonctionnement ces deux actions ont lieu simultanément.

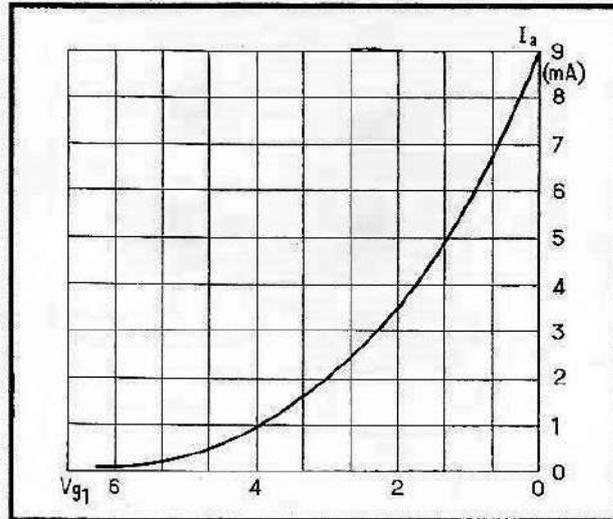


Fig. 40. — Caractéristique I_a/V_g d'une triode.

Pour qu'un tube produise un effet utile, il doit y avoir dans le circuit parcouru par le courant anodique un dispositif destiné à recueillir de l'énergie, c'est-à-dire une *impédance*.

Ce mot implique l'idée d'un obstacle qui s'oppose à la circulation libre du courant et en extrait de l'énergie sous une forme utilisable, tout comme un barrage placé en travers d'un cours d'eau permet d'obtenir la *différence de niveau* nécessaire pour assurer le fonctionnement d'une turbine hydraulique.

L'impédance d'utilisation peut être une simple résistance en série avec l'anode.

Si nous faisons varier la polarisation de grille, la tension appliquée à l'anode variera également, car la chute de tension dans la résistance dépend de l'intensité du courant.

Une augmentation de la tension négative de grille fera diminuer le courant d'anode, mais si ce courant diminue, la chute de tension dans la résistance diminue également et, par suite, la tension appliquée à l'anode *augmente*. Comme cette augmentation a pour conséquence une augmentation du courant d'anode, on voit que les deux effets s'opposent et qu'il s'établit pour chaque tension de grille un *état d'équilibre*.

Cependant, la courbe statique ne rend pas du tout compte de la situation. Pour arriver à déterminer les vraies conditions de fonctionnement du tube, il faut combiner la courbe de la figure 38 avec celle de la figure 40.

Il suffit pour cela de tracer une série de courbes représentant le courant en fonction de la tension d'anode, et ce *pour chaque tension de grille*.

On obtient ainsi une famille de courbes suivant la figure 41 qui se rapporte à un élément de tube ECC82.

Comme nous le verrons plus loin, on peut, au moyen de ce réseau, déterminer toutes les conditions de fonctionnement d'un tube : notamment la valeur de l'impédance de travail à utiliser pour avoir le meilleur rendement, la puissance maximum que l'on peut obtenir sans distorsion, etc.

Nous avons vu que, si l'on rend la grille plus négative par rapport à la

cathode, la tension appliquée à l'anode augmente lorsqu'une résistance est insérée dans le circuit, de sorte que, pour réduire le courant d'anode d'une certaine quantité, on doit augmenter *encore plus* la tension négative. Tout se passe *comme si la grille avait moins d'action*.

Si l'on place une seconde grille entre la première et l'anode et que l'on porte cette grille supplémentaire à un potentiel positif, il se passe des choses remarquables. La grille supplémentaire (appelée « grille-écran » pour des raisons que nous verrons plus loin) attire à elle une partie des électrons, mais comme sa surface est faible par rapport à celle de l'anode, la majeure partie de ceux-ci parviennent néanmoins à destination.

Cependant la grille-écran exerce une action accélératrice sur ces électrons et agit à la manière d'une anode par rapport à la cathode. De plus, comme elle est interposée entre l'anode et la cathode, elle forme entre ces deux éléments un *écran électrostatique*, et l'action *directe* de l'anode sur les électrons, à leur sortie de la cathode, est fortement réduite. Il s'ensuit que l'intensité du courant d'anode dépend très peu de la tension appliquée à cette dernière, mais beaucoup plus de la tension appliquée à l'écran.

Les variations de tension de l'anode n'entraînent donc que peu de variations dans le courant anodique.

Il en résulte que, dans un tube à grille-écran, l'action de la grille de commande est beaucoup moins diminuée, dans les conditions normales d'utilisation, que dans le cas d'une triode. Un tube de ce type possède donc un pouvoir amplificateur supérieur.

Le tube décrit ci-dessus est une *tétrode*, mais ce type est rarement utilisé, car il présente un grave inconvénient : lorsque les électrons atteignent l'anode avec une vitesse suffisante, leur collision avec les atomes du métal dont est constituée celle-ci met en liberté d'autres électrons qui forment ce que l'on nomme l'*émission secondaire*.

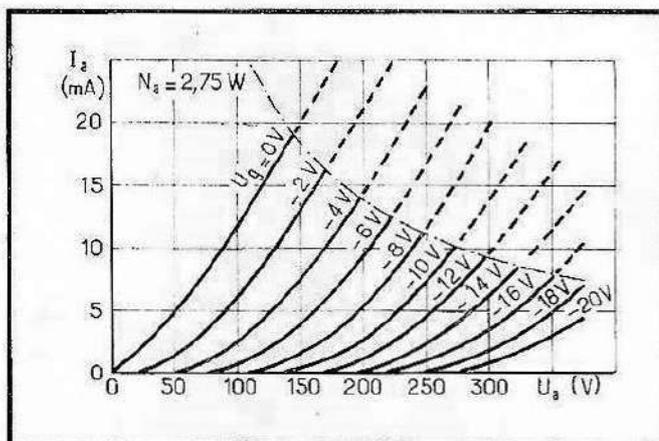


Fig. 41. — Courbes I_a/V_a d'une triode.

Dans une triode, ces électrons retournent immédiatement à l'anode dont ils sont issus et ne causent aucune perturbation dans le fonctionnement du tube.

Il en serait de même dans une tétrode tant que la tension de la grille-écran demeure fortement inférieure à celle de l'anode. Mais lorsque ces deux tensions se rapprochent, ce qui arrive au cours du fonctionnement, les électrons secondaires sont *captés par l'écran* et modifient tout à fait la caractéristique du tube. Cela se voit sur la partie AB de la courbe de la figure 42.

La caractéristique entre ces points *est renversée* : le courant *augmente* au lieu de diminuer quand la tension diminue. C'est là un phénomène de *résistance négative* qui a pour effet de faire naître des oscillations dans le tube (effet dynatron).

Pour l'éviter, on intercale entre l'écran et l'anode une troisième grille que l'on appelle *grille de suppression* (ou *suppresseur*).

Cette grille est portée à une tension légèrement négative (ou plus simplement reliée à la cathode) et *repousse vers l'anode les électrons secondaires*. Les tensions relatives de grille-écran et d'anode peuvent alors varier dans de larges limites, et la courbe caractéristique du tube devient celle de la figure 43.

La tension maximum que l'on peut appliquer à la grille-écran n'est plus limitée que par le courant maximum que le tube peut supporter.

On appelle *pentode* un tube de ce type.

Il existe une autre manière de supprimer l'émission secondaire. Par une disposition particulière de la grille-écran on peut en quelque sorte freiner les électrons dans l'espace compris entre celle-ci et l'anode, si bien que lorsque la tension d'anode s'abaisse, les électrons n'ont plus qu'une vitesse presque nulle.

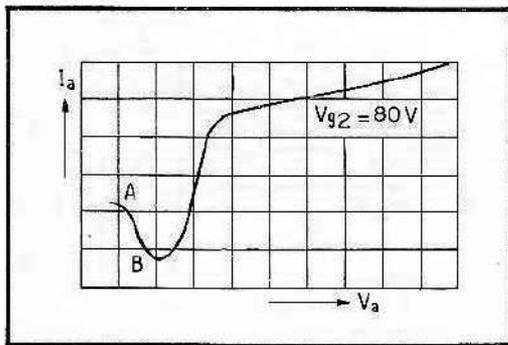


Fig. 42. — Caractéristique I_a/V_a d'une tétrode.

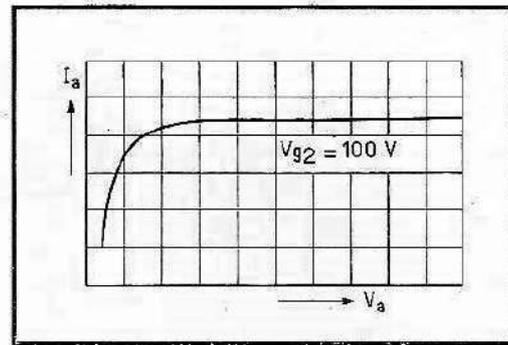


Fig. 43. — Caractéristique I_a/V_a d'une pentode (entre certaines limites).

Dans ces conditions, l'émission secondaire cesse presque complètement et les électrons ralentis forment une seconde charge spatiale aux abords de l'anode et remplissent le rôle d'une grille de suppression.

Ce type de tube à « électrons dirigés » ou à « faisceaux électroniques » (*beam power* en anglais) se présente surtout sous forme de tubes de puissance destinés à l'étage final des amplificateurs.

Il existe encore d'autres tubes caractérisés par des électrodes plus nombreuses : *hexode* (six grilles), *heptode* (sept grilles) ; ils répondent à des buts spéciaux et n'ont que peu d'emplois en amplification B. F.

En revanche, un grand nombre de tubes en usage dans cette technique contiennent deux triodes ou une triode associée à un tube d'une autre catégorie.

On choisit le tube convenant le mieux pour chaque fonction en se basant sur un certain nombre de caractéristiques publiées par les fabricants, ainsi que dans certains ouvrages spéciaux (*).

Les données principales sont la *pente* (S), la *polarisation de grille* (V_g), la *résistance interne* (ρ), le *coefficient d'amplification* (μ), la *tension anodique* pour laquelle les données précédentes sont valables. Il y a lieu évidemment de connaître en plus la tension et l'intensité de chauffage.

La *pente* est le rapport entre une variation de la tension de grille et la variation de l'intensité du courant anodique qui en résulte :

$$S = \frac{d I_a}{d V_g}$$

(*) Par exemple *Radio Tubes*, édité par les Editions Radio.

Le *coefficient d'amplification* est le rapport entre la variation de tension d'anode et la variation de la tension de grille qui produisent la même variation de courant anodique :

$$\mu = \frac{dV_a}{dV_g}$$

Notons que ce facteur n'a pas de rapport direct avec le *gain* que l'on peut obtenir du tube en fonctionnement normal.

La *résistance interne* est le rapport entre une variation de la tension d'anode et la variation correspondante du courant traversant le tube :

$$\rho = \frac{dV_a}{dI_a}$$

Ces trois grandeurs sont reliées entre elles comme suit :

$$S = \frac{\mu}{\rho} \quad \mu = S\rho \quad \text{et} \quad \rho = \frac{\mu}{S}$$

de sorte que lorsqu'on en connaît deux on peut trouver la troisième.

On doit encore tenir compte de la *microphonie* due à la vibration mécanique des électrodes provoquée de l'extérieur et du *souffle* dû à l'irrégularité de l'émission électronique.

Des tubes dans lesquels ces défauts ont été, grâce à une construction spéciale, réduits au minimum doivent être choisis pour les premiers étages d'une chaîne d'amplification.

Les tubes à « grille-cadre » ont été spécialement créés pour cet emploi.

La polarisation de la grille de commande d'un tube peut être obtenue de plusieurs façons. La plus courante consiste à insérer une résistance entre la cathode et la masse qui correspond au zéro de la tension d'alimentation. La cathode est alors portée à une tension positive qui dépend à la fois de la valeur de la résistance et du courant qui y circule.

Comme, dans ce cas, la grille est au potentiel de masse, il est évident qu'elle est négative par rapport à la cathode.

La valeur de la résistance est à déterminer suivant les caractéristiques du tube et la façon dont il est utilisé.

On peut aussi, dans certains cas, relier la grille à la masse à travers une résistance de valeur très élevée, 10 M Ω , par exemple.

La polarisation est produite cette fois par le signal alternatif appliqué à la grille : les alternances positives « sucent » en quelque sorte des électrons qui, n'ayant pas le temps de s'écouler par la résistance, s'accumulent sur la grille en la rendant négative.

Ce moyen ne peut s'employer que si le signal est relativement faible et pour des tubes qui ne demandent qu'une polarisation d'un ou deux volts.

Pour les tubes de puissance on utilise, selon le cas, une polarisation par la cathode ou une tension négative empruntée à une source indépendante.

Quatre types de tubes sont utilisés dans la technique du son :

A) Tubes de faible puissance à chauffage direct par batteries ou courant continu d'alimentation; *usage* : préamplificateurs de microphone et appareils portatifs.

Ils sont en voie de disparition et sont remplacés de plus en plus par les transistors.

B) Tubes de faible puissance à chauffage indirect; *usage* : dans tous les

étages intermédiaires des amplificateurs (les pentodes dans les premiers étages seulement, les triodes partout ailleurs).

C) Tubes de puissance à chauffage indirect (généralement du type pentode ou tétrode); *usage* : étage final.

D) Diodes : tubes redresseurs pour l'alimentation en tension anodique des amplificateurs.

2. — Les semiconducteurs.

Certaines substances ne sont ni « bon conducteur » d'électricité, ni « isolant » parfait. Parmi elles se trouvent le *germanium* et le *silicium*, aujourd'hui utilisés pour réaliser des *diodes* et des *transistors*.

Ces derniers sont des éléments solides qui peuvent assurer, dans maints cas, des rôles dévolus ordinairement aux tubes électroniques, et notamment la fonction d'amplificateur.

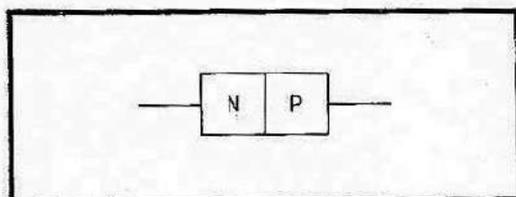


Fig. 44. — Diode semiconductrice à jonctions.

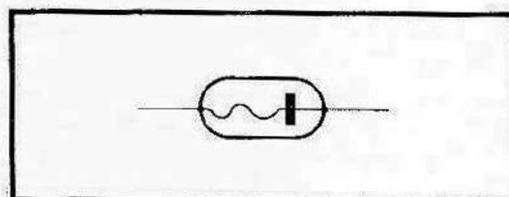


Fig. 45. — Diode à pointes.

Le fonctionnement diffère cependant de celui d'un tube et les caractéristiques ne sont pas exactement comparables.

Le germanium contient toujours quelques impuretés, et suivant la nature chimique de celles-ci, il s'y trouve un excès d'électrons libres ou un excès de *charges positives* (appelées « lacunes » ou « trous », pour symboliser le manque d'électrons).

Ces deux variétés ont été nommées type N et type P, pour rappeler leur polarité.

Si, par un procédé spécial de fabrication, on assemble intimement deux petits blocs de type différent, on obtient une diode qui se comporte approximativement comme une diode électronique, tout en étant le siège de phénomènes internes plus compliqués (fig. 44).

Ce dispositif présente toutefois des inconvénients qui le rendent impropre à certains emplois. La capacité entre les deux blocs est relativement importante et, contrairement à une diode à vide, le courant inverse n'est pas nul.

Les diodes utilisées dans les circuits H. F. ou B. F. sont d'un type qui rappelle le détecteur à galène des premiers âges de la radio : on y trouve une pastille de germanium type N sur laquelle s'appuie une pointe métallique. Le tout est renfermé dans une ampoule en verre (fig. 45).

De même que d'une diode électronique on a fait une triode en y ajoutant une grille, en partant de la diode semiconductrice on a réalisé le *transistor*, qui est quelque chose d'équivalent.

C'est une sorte de sandwich comprenant deux blocs de germanium ou de silicium de *même type*, séparés par une couche de *l'autre type* (fig. 46). Un transistor peut donc être du type *n-p-n* ou *p-n-p*. Ce dernier est le plus utilisé pour l'amplification B. F.

Un transistor possède trois entrées appelées respectivement *émetteur*, *base* et *collecteur*, et qui correspondent respectivement à la cathode, la grille et l'anode d'une triode.

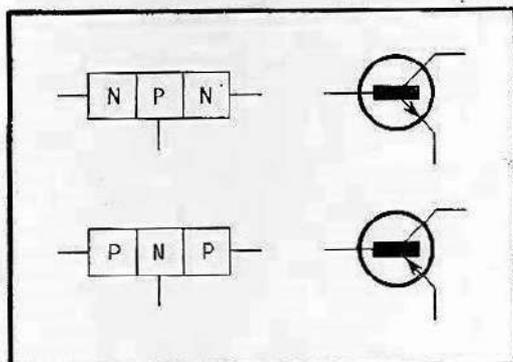


Fig. 46. — Représentation schématique et symboles du transistor à jonction.

A la différence du tube électronique, c'est une variation de *courant* et non de tension qui commande le débit du transistor et la résistance d'entrée est inférieure à la résistance de sortie.

De plus, le transistor ne peut pas se définir, comme le tube, par les deux ou trois paramètres, qui permettent de choisir ce dernier en connaissance de cause. Ses caractéristiques fonctionnelles ne sont pas immédiatement apparentes et doivent être déduites d'au moins quatre paramètres qui s'influencent réciproquement.

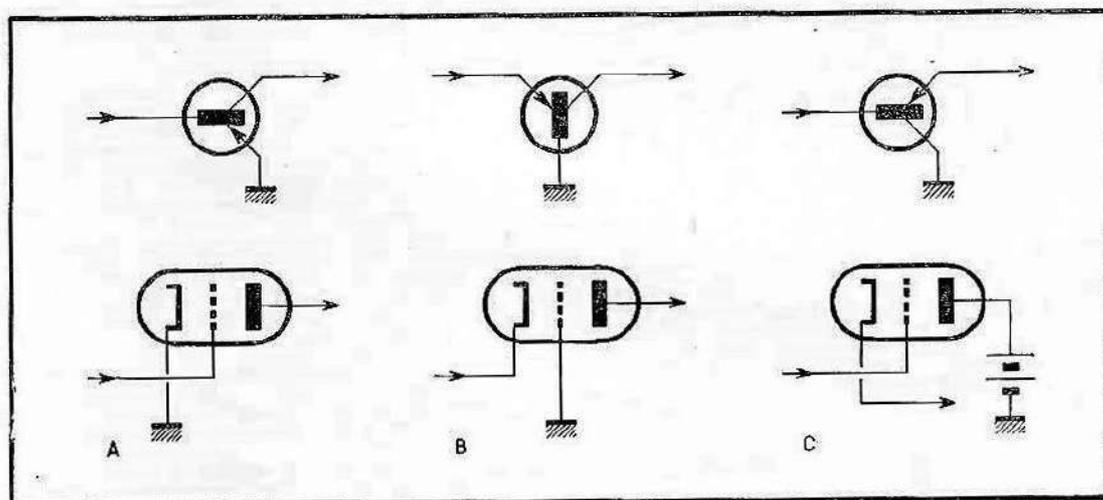


Fig. 47. — Les trois montages classiques du transistor correspondent (très approximativement) à trois montages classiques de triode.

Nous renvoyons le lecteur qui désirerait approfondir cette question à l'un ou l'autre ouvrage spécialisé (*).

Par rapport aux tubes électroniques le transistor présente certains inconvénients.

Il est notamment très sensible à la température ambiante. En effet, une élévation de celle-ci provoque, à tension constante, une augmentation du

(*) Notamment : *le Transistor, mais c'est très simple*, de E. AISBERG, et *Technique et Application des Transistors*, par H. SCHREIBER, aux Editions Radio.

courant passant par la jonction $p-n$, et par suite une diminution du gain effectif. A la limite, le transistor peut se trouver définitivement détérioré.

Une température de $+ 60^{\circ}$ paraît, sous ce rapport, un maximum à ne jamais dépasser.

On compense l'effet de la température par certaines astuces de montage sur lesquelles nous reviendrons dans un autre chapitre.

La figure 47 montre les trois montages possibles d'un transistor et les montages correspondants d'une triode.

Il existe actuellement d'innombrables types de transistors dont la majorité est destinée à des usages industriels.

Pour l'amplification B. F. on est limité à deux catégories : les modèles de faible ou moyenne puissance pour les étages intermédiaires, et les modèles de forte puissance pour les étages de sortie.

Il ne fait aucun doute que le transistor est destiné à remplacer progressivement le tube électronique dans la plupart des emplois afférents à l'amplification du son.

LE MATÉRIEL

LE HAUT-PARLEUR

Au bout de la chaîne d'amplification on se trouve en présence d'un courant électrique à fréquence acoustique qu'il s'agit de transformer en ondes sonores.

Le rôle du haut-parleur est d'effectuer cette *conversion d'énergie électrique en mouvements de l'air*, c'est-à-dire en *énergie mécanique*.

A part une exception dont nous parlerons plus loin, tous les procédés connus pour réaliser cette transformation sont basés sur l'emploi d'un appareil *électromécanique*, c'est-à-dire comportant des pièces solides en mouvement. C'est là d'ailleurs que gît la faiblesse du système, car une partie de l'énergie électrique ne sert qu'à vaincre la résistance passive opposée par les pièces mobiles à cause de leur inertie et des frottements internes qui se produisent lors de leur flexion.

Un haut-parleur peut se concevoir comme la réunion de deux parties distinctes : une *membrane* prenant appui sur l'air et servant à mettre celui-ci en mouvement, et d'autre part un *moteur* électromagnétique qui fournit la force motrice nécessaire.

Nous examinerons en premier lieu la fonction purement acoustique du haut-parleur.

I. — Le haut-parleur considéré comme un piston.

Pour simplifier nous supposerons, pour le moment, que le haut-parleur fonctionne à l'air libre, en faisant abstraction des particularités acoustiques de l'ambiance.

Pour simplifier davantage encore, nous admettrons que la transmission des vibrations acoustiques à l'air se fait au moyen d'un simple disque que, pour les besoins de la cause, nous supposerons parfaitement rigide.

Lorsque ce disque se déplace perpendiculairement à sa surface il comprime l'air devant lui, tandis que, sur la face opposée, il se produit une dépression.

Mais l'air comprimé tendra évidemment à passer par-dessus le bord du disque pour combler cette dépression (fig. 48).

Dans le cas d'un déplacement très lent, la différence de pression d'air entre l'avant et l'arrière du disque demeurera faible. A mesure toutefois que la vitesse de déplacement s'accroît, l'écoulement de l'air par-dessus le bord du disque est de plus en plus limité à cause de son inertie et de sa viscosité,

et lorsque le déplacement devient très rapide, un volume d'air considérable est entraîné.

Si le mouvement du piston est *alternatif*, il transmet presque complètement son énergie à l'air à partir d'une certaine fréquence.

Il existe entre la longueur d'onde, le diamètre du disque et l'énergie transmise à l'air un rapport qu'on trouve dans la formule :

$$W = \frac{A^2 S^3 \omega^6}{27 \times 341^3 \times \pi^2}$$

où A est l'amplitude du déplacement, S la surface du piston et 341^3 la vitesse du son en cm/sec; $\omega = 2\pi f = 6,28 f$.

On observera que l'énergie transmise à l'air est proportionnelle à la 6^e puissance de la fréquence.

Elle est également proportionnelle au carré de l'amplitude et au cube de la surface.

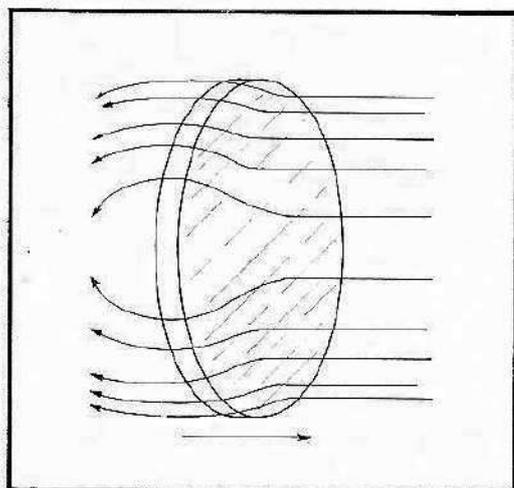


Fig. 48. — L'air comprimé par la face avant du disque passe par-dessus son bord pour combler la dépression qui se forme à l'arrière.

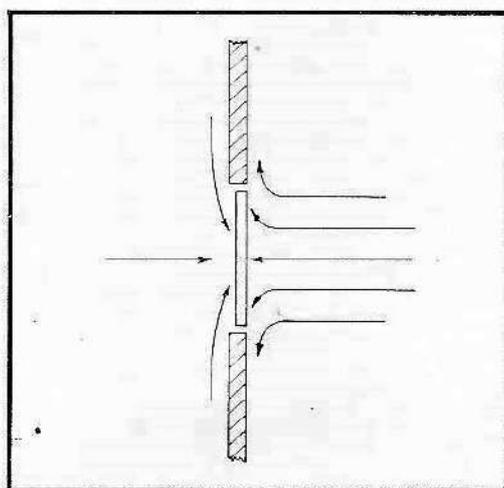


Fig. 49. — Un écran empêche l'air de passer d'une face à l'autre du disque.

On voit que, pour transmettre, par ce moyen, des fréquences très basses à l'air, il faudrait un disque d'un diamètre énorme ou bien une amplitude de déplacement également considérable. Ce sont là des conditions presque irréalisables du point de vue mécanique.

La situation change si, pour empêcher l'air de passer d'un côté à l'autre du disque, on en prolonge les bords par un écran fixe (fig. 49).

A vrai dire on ne fait ainsi que reculer le moment où ce passage aura lieu, à moins que l'écran ne se prolonge indéfiniment.

Une autre formule indique les conditions de fonctionnement dans ce cas :

$$W = \frac{A^2 S^2 \omega^4}{4 \pi 410}$$

On voit que l'amplitude garde la même importance, mais celle de la fréquence et de la surface du disque a considérablement diminué.

Si nous exprimons en watts la *puissance acoustique*, ce que nous pouvons

légitimement faire, comme il a été expliqué dans un chapitre précédent, la formule ci-dessous peut être appliquée pour en calculer la grandeur :

$$W = Zv^2$$

où v est la vélocité.

Z , qui est le symbole de l'impédance électrique, est utilisé ici pour représenter la résistance offerte par l'air qui se comporte comme une *impédance mécanique* et que nous pouvons, par analogie, exprimer en ohms, faute d'une autre unité.

Continuant à poursuivre notre parallèle avec un circuit électrique nous pouvons écrire :

$$Z = \sqrt{r^2 + (\omega m)^2}$$

où m est la masse en vibration et r la résistance qui, notons-le, est ici la composante utile.

Si la longueur d'onde de la fréquence rayonnée est plus grande que la circonférence du piston ($2\pi R$), la résistance de rayonnement est approximativement proportionnelle au carré de la fréquence. Pour des longueurs d'onde plus petites que cette dimension, la résistance augmente rapidement.

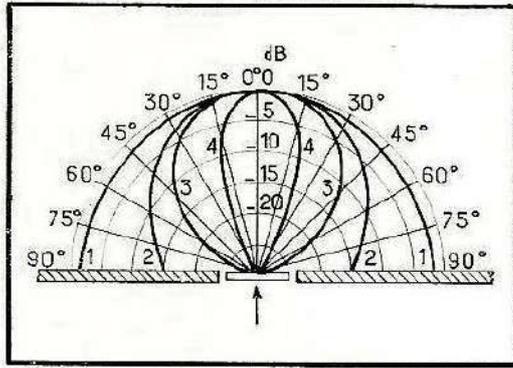


Fig. 50. — A mesure que la fréquence augmente, les ondes sonores se concentrent en une zone de plus en plus étroite.

Pour une même puissance rayonnée l'amplitude varie inversement à la surface du piston et, à amplitude constante, elle est proportionnelle au carré de la surface.

De tout ce qui précède on peut conclure qu'un piston donné ne peut assurer le même rendement à toutes les fréquences.

Un piston encastré dans un écran infini rayonne son énergie dans une demi-sphère sur chaque face.

Ceci ne vaut toutefois que pour des fréquences basses.

A partir d'une certaine fréquence, qui varie avec le diamètre du piston, les ondes sonores se concentrent en un secteur de plus en plus étroit (fig. 50).

En même temps l'énergie rayonnée diminue et par conséquent le rendement baisse.

Un auditeur placé en dehors de l'axe du piston entend donc mal les fréquences élevées.

Pour les reproduire convenablement il faudrait un très petit piston. Par contre, pour rayonner les fréquences inférieures il faudrait un piston de grand diamètre. Pour vaincre cette contradiction on utilise divers subterfuges dont nous parlerons plus loin.

2. — La mécanique du haut-parleur.

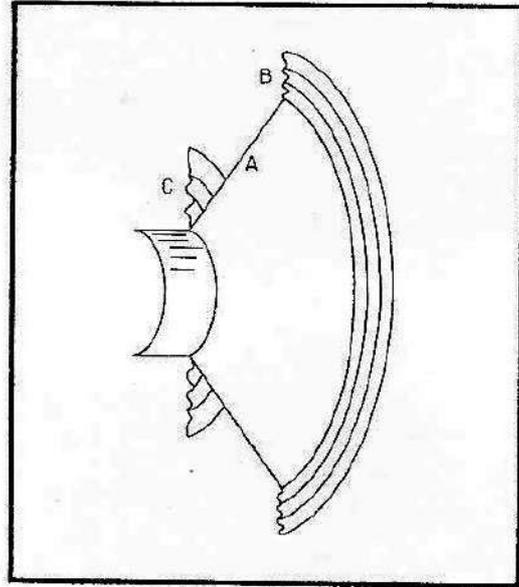
Un haut-parleur réel, de modèle classique, peut être représenté schématiquement, du point de vue mécanique, par la figure 51.

La partie A est un cône tronqué qui prend appui sur l'air et constitue le piston proprement dit.

Il est suspendu en deux endroits : par le bord extérieur et par le sommet. L'ensemble possède une fréquence vibratoire propre, déterminée par l'élasticité des éléments de suspension B et C et la masse globale en mouvement.

La rigidité du cône est cependant loin d'être absolue et, de plus, les éléments de suspension ont eux aussi une fréquence de résonance propre.

Fig. 51. — Partie mécanique d'un haut-parleur. A : tronc de cône généralement en produit cellulosique. B : suspension extérieure. C : suspension intérieure.



Il en résulte que, malheureusement, l'ensemble ne se meut pas d'une pièce comme le piston théorique, sauf aux fréquences très basses, et encore...

A partir d'une fréquence de quelques centaines de Hz, le cône devient le siège de plusieurs zones de vibration.

La force appliquée à son sommet ne se transmet pas instantanément au bord supérieur : le cône fléchit autour du point d'attaque et cette déformation se propage avec une vitesse supérieure à celle du son dans l'air jusqu'au bord extérieur.

A ce stade le cône se comporte à la façon d'une ficelle qu'on agite en la tenant par un bout (fig. 52).

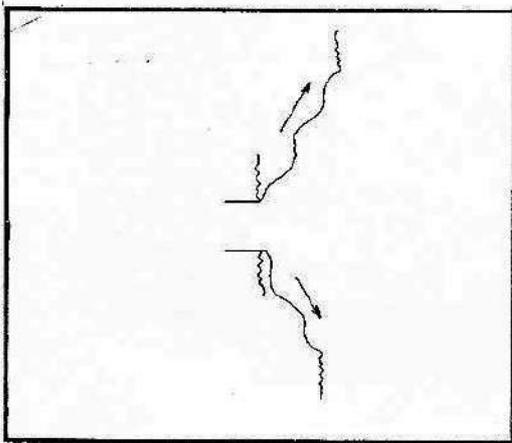


Fig. 52 a. — A certaines fréquences, des ondulations se propagent suivant la génératrice du cône.

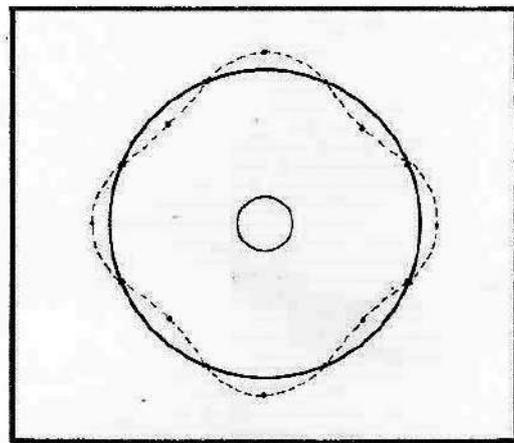


Fig. 52 b. — Il peut se produire, en outre, une déformation « en parapluie » à certaines fréquences basses.

Quand cette onde mécanique atteint le bord du cône, elle est réfléchiée et il se produit des ondes mécaniques stationnaires.

La fréquence de ces perturbations dépend des dimensions du cône, de leur amplitude et des caractéristiques de la matière dont il est fait.

Au-delà d'une certaine fréquence, le cône, par suite de son inertie, cesse de vibrer en entier, et le son transmis à l'air provient principalement d'une zone de plus en plus petite entourant le sommet.

Ce n'est là qu'une vue très simplifiée de ce qui se passe réellement, car il se superpose à ces effets des vibrations secondaires favorisées par le manque d'homogénéité de la matière dont le cône est constitué.

En plus, on peut mettre en évidence expérimentalement des ondulations qui déforment le cône latéralement et produisent des sons de fréquence inférieure à celui qui est transmis et qu'on nomme *sous-harmoniques*. Elles produisent une coloration particulière du son à certaines fréquences.

Le cône est suspendu, avons-nous dit, au sommet et à sa base.

Il porte aussi une bobine. Cet ensemble n'est pas du tout homogène et la flexibilité de chacune de ses parties est différente, d'où les réactions compliquées que nous venons de décrire.

La reproduction correcte des fréquences très basses exige un déplacement important du piston. Pour y satisfaire, la suspension devrait donc être très souple. Mais elle doit aussi être suffisamment rigide latéralement pour que la bobine demeure convenablement guidée dans l'entrefer de l'aimant.

Les fréquences élevées exigent, par contre, que tout l'équipage mobile soit très léger.

D'autre part, la force de rappel de la suspension doit rester, en régime normal, proportionnelle à l'élongation dans toute l'étendue du déplacement du cône.

Enfin la fréquence de résonance de l'ensemble doit, si possible, être inférieure à la fréquence la plus basse qu'on veut reproduire, et celle des pièces constituantes doit se placer en dehors des fréquences audibles.

Tout cela est contradictoire et l'on ne peut obtenir une solution satisfaisante qu'avec de très larges compromis.

Dans la construction actuelle des haut-parleurs on ne trouve plus guère que deux systèmes de suspension arrière : une pièce en bakélite découpée de diverses façons pour la rendre plus souple et qu'on nomme *spider*, et un disque ondulé en tissu plastifié. Ce dernier système a l'avantage de la souplesse et de la légèreté, mais est moins rigide latéralement.

3. — Les caractéristiques électriques.

Le moteur d'un haut-parleur (fig. 53) comprend un circuit magnétique constitué par un aimant permanent et des pièces polaires en métal à haute perméabilité. Il se referme sur un entrefer circulaire dans lequel est située la bobine fixée au sommet du cône et qui constitue le circuit électrique proprement dit. Le passage d'un courant dans la bobine provoque son déplacement dans une direction qui dépend du sens de ce courant.

Revenons sur la loi de LAPLACE, concrétisée par la formule :

$$F = \frac{H l I}{10}$$

dans laquelle, rappelons-le, F est la force, exprimée en dynes, l la longueur

du fil contenu dans le champ, H l'intensité du champ en œrsted et I le courant en ampères.

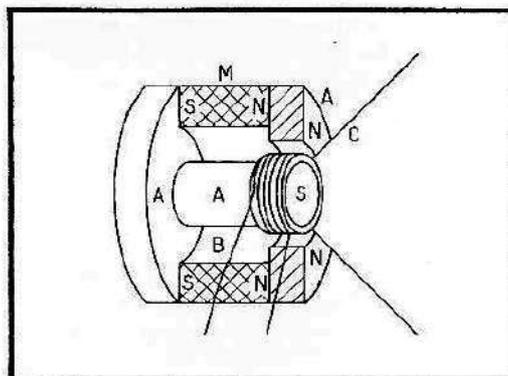
La force dépend donc à la fois du courant, du champ magnétique et de la longueur du fil embrassé par celui-ci.

On voit que, toutes choses étant égales, la force appliquée au cône est proportionnelle à la densité du champ magnétique.

C'est celui-ci, en définitive, qui détermine le *rendement* du haut-parleur. C'est-à-dire, en fin de compte, le volume d'air mis en branle pour un courant donné.

L'entrefer est donc le centre nerveux du haut-parleur.

Fig. 53. — Coupe d'un haut-parleur moderne. A : pièces polaires. — B : bobine mobile. — C : cône. M : aimant annulaire.



La densité du flux magnétique qui le traverse dépend à la fois de la « force » de l'aimant, de la bonne « conductibilité » des pièces polaires et des dimensions géométriques de l'entrefer lui-même.

Les deux premières conditions sont résolues par le constructeur sous l'angle du prix de revient.

La troisième est le résultat d'un large compromis.

On augmente le champ en rapprochant les pôles, c'est-à-dire en réalisant l'entrefer le plus étroit possible. Mais on est vite limité dans cette direction par la nécessité de ménager à la bobine mobile un passage suffisant.

On pourrait aussi concentrer le champ en utilisant des pièces polaires minces, mais on augmenterait aussi la réluctance ainsi que la portion du champ dispersée à l'extérieur de l'entrefer et donc perdue. Finalement on peut agir sur le diamètre de l'entrefer.

Dans les premiers haut-parleurs électrodynamiques, le champ magnétique était obtenu à l'aide d'un électro-aimant. Le circuit magnétique comprenait une bobine dans laquelle on faisait circuler un courant continu plus ou moins intense. Ce système, qui présentait l'inconvénient de consommer inutilement de l'énergie électrique et entraînait, de plus, des complications dans l'installation, n'est plus utilisé aujourd'hui. Il permettait cependant d'obtenir, sans trop de difficulté, des champs magnétiques très intenses.

Un circuit magnétique à aimant permanent est nettement plus coûteux à établir, mais offre l'avantage de la simplicité.

Il y a un autre aspect du problème encore plus important, c'est la *constance du champ* agissant sur la bobine. Si, au cours de son excursion, une partie des spires sort de l'entrefer, la bobine ne baigne plus dans un champ homogène et son mouvement n'est alors plus directement proportionnel à la valeur instantanée du courant qui la traverse.

C'est une cause de distorsion.

On peut y pallier de deux façons : en employant une bobine plus longue ou, au contraire, plus courte que l'entrefer.

Dans le premier cas il y aura bien un nombre constant de spires engagées

dans le champ, mais la bobine sera plus lourde qu'il ne le faudrait et les spires inactives augmenteront inutilement la résistance ohmique (fig. 54).

La solution normale est donc l'emploi d'une bobine courte et un entrefer dont la longueur dépend de l'amplitude de mouvement que l'on prévoit.

Dans l'ensemble, les haut-parleurs disponibles se classent, sous le rapport de l'entrefer, en deux catégories : les modèles courants admettant une puissance maximum de l'ordre de 5 watts avec un entrefer d'un diamètre de 15 à 20 mm, et les modèles à grande puissance et professionnels où l'on trouve généralement des entrefers d'un diamètre de 35 à 60 mm et plus.

La bobine mobile possède de la self-induction et, par conséquent, offre une certaine impédance au passage d'un courant alternatif.

La valeur de celle-ci, indiquée dans le catalogue du fabricant, correspond à des mesures faites dans des conditions déterminées et à une fréquence qui peut être de 400, 800 ou 1000 Hz, selon le cas.

On se base sur cette valeur pour coupler correctement le haut-parleur à l'étage final.

La bobine, le cône et la suspension forment un ensemble qui a une fréquence de vibration propre. Or, quand la bobine se déplace à travers le champ magnétique, il se produit un courant induit dirigé en *sens opposé* à celui qui a produit le mouvement et qui tend à freiner ce dernier.

De ce fait l'impédance augmente, et ce d'autant plus fortement que le déplacement est plus libre.

Comme il faut beaucoup moins d'énergie pour entretenir un mouvement vibratoire à sa fréquence de résonance que lorsqu'il s'agit d'oscillations forcées, l'impédance atteint alors une valeur maximum et l'amplitude du mouvement s'accroît considérablement.

L'impédance du haut-parleur n'est donc aucunement constante.

Cependant on peut négliger les variations dues à des causes autres que la résonance. L'effet nuisible de celle-ci peut être combattu par des dispositifs électriques ou acoustiques destinés à amortir le mouvement.

4. — Le problème de l'amortissement.

Rappelons que le retour d'un corps vibrant à l'immobilité s'effectue plus ou moins rapidement suivant le rapport entre l'énergie absorbée pour l'arrêter et celle qui entretient le mouvement.

Quand ce rapport est égal à l'unité on a l'*amortissement critique*, c'est l'état qu'il est le plus désirable d'obtenir pour l'équipage mobile d'un haut-parleur, parce qu'il correspond à la meilleure reproduction possible.

Le mécanisme de l'amortissement d'un appareil électromagnétique est facile à comprendre si l'on veut se rappeler que les machines de ce type sont *réversibles*.

Si l'on fait passer un courant dans la bobine mobile, elle se trouve soumise à la force de LAPLACE et se met en mouvement perpendiculairement aux lignes de force magnétique de l'entrefer. Inversement, en la déplaçant on y fait naître un courant induit. Comme elle possède de l'inertie elle ne s'arrête pas instantanément lorsque cesse le courant qui a provoqué son déplacement, le haut-parleur devient à ce moment un *générateur*.

A circuit ouvert, le mouvement est libre, mais si la bobine est branchée sur un circuit extérieur, le courant, provoqué par le mouvement, fera apparaître un champ magnétique dirigé en sens opposé à l'autre et il en résultera un *freinage*.

L'intensité de ce courant dépend à la fois de la vitesse du mouvement, de la densité du champ magnétique dans l'entrefer et de la résistance du circuit.

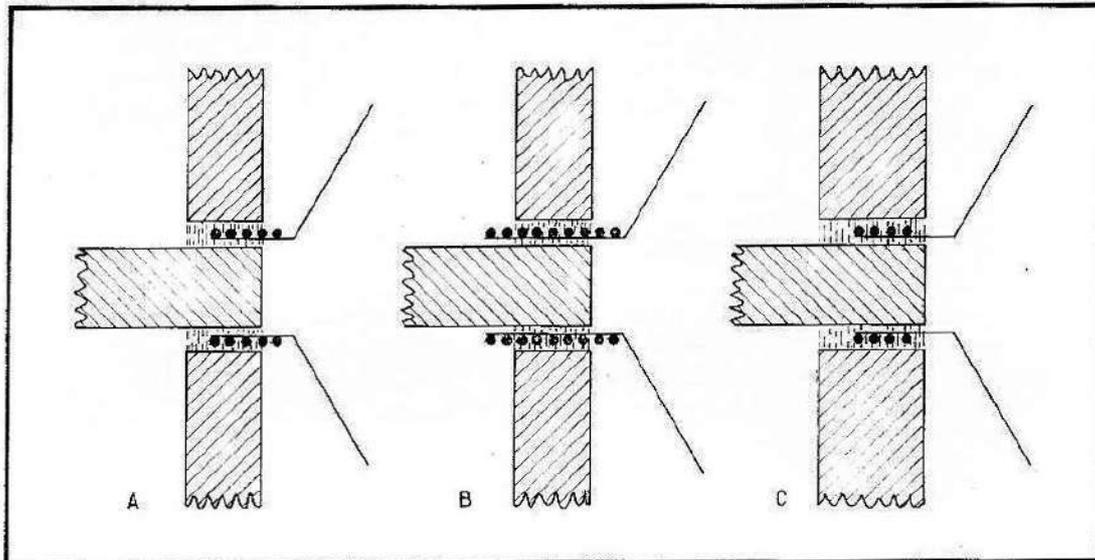
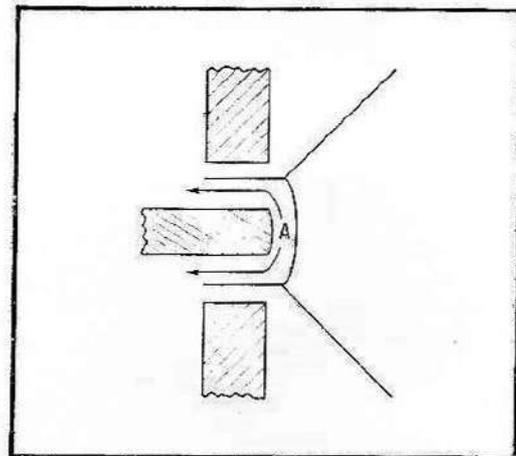


Fig. 54. — A : Bobine courte, entrefer court : le nombre de spires embrassées par le champ magnétique n'est pas constant.
 B : Bobine longue, entrefer court : le nombre de spires que le flux traverse reste constant, mais le rendement est mauvais.
 C : Bobine courte, entrefer long : la meilleure solution mais qui demande un aimant plus puissant pour obtenir la même densité de flux qu'en A et B.

Celle-ci dépend en fin de compte des caractéristiques de l'amplificateur. C'est un sujet sur lequel nous reviendrons dans un autre chapitre. Disons simplement que cette résistance peut être fortement diminuée par l'emploi de la contre-réaction. Ce qui améliore l'amortissement.

D'autre part, nous voyons que, toutes autres choses restant égales, l'amortissement sera d'autant plus énergique que le champ magnétique, que nous retrouvons de nouveau ici, sera plus intense.

Fig. 55. — L'air contenu dans la cavité A forme un coussin qui amortit le mouvement de la bobine.



On peut aussi améliorer l'amortissement par construction : si, en plus de l'enroulement moteur, on munit la bobine mobile d'un enroulement en *court-circuit* ou si, plus simplement, on utilise comme support des spires un tube métallique, le courant qui y prendra naissance agira pour freiner le mouvement de la bobine.

Un autre moyen d'obtenir l'amortissement consiste à utiliser la compression du volume d'air enclos entre la base du cône, qui est fermé, et le noyau central. On réalise ainsi un *frein à air* assez efficace (fig. 55).

Pour bénéfique que soit l'ensemble de ces moyens, ils ne suffisent cependant pas pour obtenir un amortissement convenable du haut-parleur à sa fréquence de résonance.

C'est là le rôle des dispositifs acoustiques extérieurs auxquels est consacré le chapitre suivant.

5. — Le rendement des haut-parleurs.

Le rapport entre la puissance acoustique transmise à l'air et la puissance électrique appliquée à la bobine mobile constitue le rendement, et il faut avouer que celui-ci est très faible.

En effet, on peut le calculer au moyen de la formule :

$$N = \frac{1}{1 + \left(\frac{R \omega^2 m^2}{B^2 l^2 R_r} \right)}$$

où R est la résistance ohmique de la bobine, l la longueur du fil dans l'entrefer, R_r la résistance de rayonnement du cône, B le champ magnétique et m la masse en mouvement.

Le facteur $\left(\frac{R \omega^2 m^2}{B^2 l^2 R_r} \right)$ est malheureusement inférieur à l'unité, de

sorte que, par la force des choses, le rendement ne peut être que médiocre.

Il se situe entre environ 2 % pour les petits haut-parleurs domestiques et 10 à 15 % pour les modèles de qualité professionnelle. Ceci pour le type à large membrane. Les haut-parleurs à compression, munis d'un pavillon exponentiel, peuvent exceptionnellement atteindre le double, mais c'est là la limite dans l'état actuel de la technique.

Il faut encore considérer que le rendement varie énormément avec la fréquence. On se réfère ordinairement à une fréquence de 400 Hz ou, parfois, 1000 Hz, ce qui ne permet évidemment pas de prévoir ce qui se passera aux deux extrémités de la bande acoustique.

Le rendement dépend en ordre principal du flux magnétique total disponible, comme l'indique la formule, c'est-à-dire du poids de l'aimant qui est le facteur dominant dans le coût du haut-parleur.

Toutefois la différence de prix entre deux haut-parleurs de même dimension mais de rendement différent peut être inférieure à la différence de prix entre les amplificateurs nécessaires pour obtenir le même volume sonore de chacun d'eux. On doit tenir compte de ce fait dans l'étude d'une installation.

6. — Défauts des haut-parleurs.

INTERMODULATION.

Lorsque deux signaux de fréquence différente sont introduits simultanément dans un système qui présente quelque part une dissymétrie, il apparaît des fréquences supplémentaires qui correspondent à la somme et à la différence des fréquences initiales. Dans le cas du haut-parleur le défaut se présente lorsque la force de rappel n'est pas la même dans chaque sens et également lors d'une forte surcharge.

SOUS-HARMONIQUES.

Elles résultent du plissement du cône en cours de fonctionnement, comme il a été expliqué plus haut. Ici aussi la tendance est fortement encouragée par un signal trop puissant pour les possibilités du haut-parleur.

VIBRATIONS PARASITES.

Certaines parties du cône ou de la suspension sont susceptibles de vibrer séparément à leur fréquence de résonance particulière. Ces vibrations locales peuvent être déclenchées par des vibrations de fréquence très différente. Elles altèrent le son en lui donnant une « coloration » particulière.

LES TRANSITOIRES.

Leur reproduction correcte postule que le mouvement du cône puisse se conformer exactement à la forme du signal, c'est-à-dire se mouvoir ou s'arrêter instantanément, ce qui est mécaniquement impossible. Quand cesse l'impulsion, le cône, par suite de son inertie, continue à osciller durant un temps déterminé.

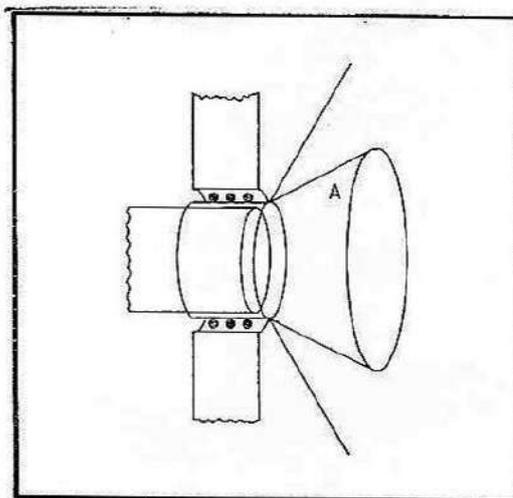


Fig. 56. — Le cône supplémentaire A favorise la reproduction des fréquences élevées.

D'autre part une impulsion brève excite la résonance propre du haut-parleur, et c'est la fréquence correspondante que l'on entend plutôt que le signal à transmettre.

L'EFFET DOPPLER.

Nous en avons parlé au chapitre II.

Si le cône se déplace à grande amplitude en reproduisant un son grave et si en même temps il reçoit un signal à fréquence élevée, il devient, pour un auditeur placé devant lui, une source qui s'approche et s'éloigne. Le son aigu lui paraîtra, par conséquent, modulé à la fréquence du son grave.

COUVERTURE DU SPECTRE ACOUSTIQUE.

Il est excessivement difficile, sinon impossible, de concevoir un haut-parleur couvrant, avec un rendement sensiblement égal, toute l'étendue des fréquences audibles.

En plus, les défauts signalés ci-dessus ne peuvent se corriger complètement qu'en limitant la bande de fréquences à reproduire.

C'est pourquoi une reproduction de qualité supérieure requiert le partage des fréquences entre deux ou plusieurs haut-parleurs : un modèle lourd à rendement élevé et un haut-parleur ou groupe de haut-parleurs prenant en charge les fréquences supérieures à, mettons, 5000 à 6000 Hz. Nous y reviendrons.

DISPOSITIFS CORRECTEURS.

Afin d'égaliser autant que possible l'impédance de la bobine mobile sur toute l'étendue de la bande sonore, certains haut-parleurs sont munis d'une armature en cuivre coiffant le noyau central. Il y naît des courants induits qui provoquent une diminution de l'impédance aux fréquences élevées.

L'amélioration du rendement aux fréquences élevées peut être obtenue à l'aide d'un petit cône supplémentaire fixé à la bobine mobile. La surface vibrante est ainsi augmentée dans la partie haute du spectre acoustique. La répartition spatiale de ces fréquences est également améliorée (fig. 56).

On a d'autre part cherché, dans certains modèles, à mieux distribuer l'énergie sonore dans l'espace au moyen d'un cône rigide fixé sur le noyau central et qui agit comme un réflecteur aux fréquences élevées (fig. 57).

7. — Choix d'un haut-parleur.

Les données fournies par les fabricants sont souvent incomplètes et aussi parfois basées sur des grandeurs différentes.

Nous avons déjà indiqué les errements des Anglo-Saxons en ce qui concerne l'emploi des unités magnétiques.

Généralement on trouve l'intensité de champ dans l'entrefer exprimée en *gauss*, mais ce qui compte c'est l'énergie magnétique totale, et si certains constructeurs indiquent le flux total en *maxwells*, d'autres ne mentionnent que le poids de l'aimant, ce qui est une indication utile, mais insuffisante; d'autres enfin expriment l'énergie magnétique en *ergs*, ce qui rend la comparaison difficile.

La puissance maximum qu'un haut-parleur peut supporter dépend évidemment de sa construction.

Il faut cependant distinguer celle qui peut lui être appliquée en régime permanent et celle qu'il peut à la rigueur encaisser sans *distorsion*.

La puissance normale d'emploi indiquée par les fabricants est le plus souvent mesurée à 400, voire à 1000 Hz et n'implique en rien ce que le haut-parleur fera à 40 ou 50 Hz.

Un haut-parleur qui « digère » parfaitement 10 watts à 400 Hz ne pourra souvent pas accepter, sans distorsion notable, plus de 0,5 watt à 40 Hz.

La reproduction correcte des fréquences très basses est *coûteuse*.

En page 82, se trouve un tableau facilitant le choix du type de haut-parleur.

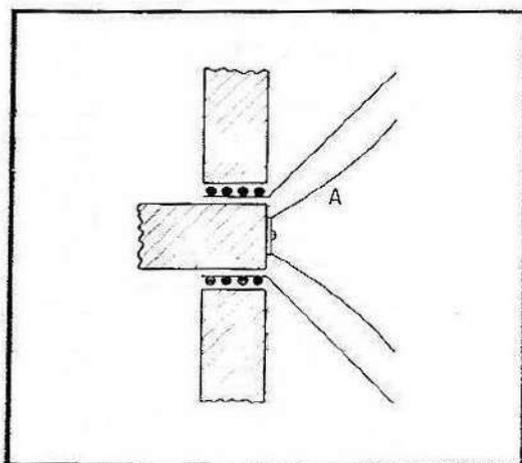


Fig. 57. — Le cône fixe A améliore la répartition dans l'espace des fréquences élevées (élargissement du diagramme polaire).

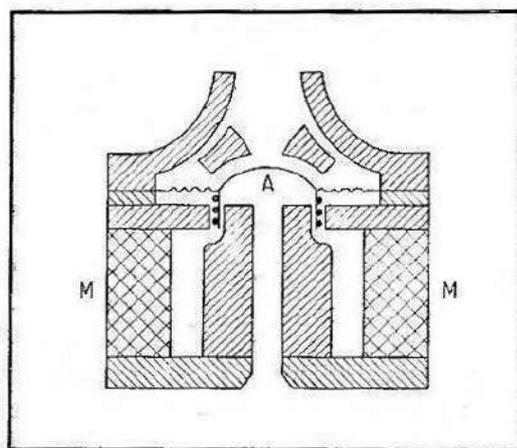


Fig. 58. — Coupe schématisique d'un moteur de haut-parleur à compression. A : membrane en duralumin. — M : aimant annulaire.

8. — Haut-parleurs spéciaux.

Parallèlement aux haut-parleurs électrodynamiques classiques à large membrane, il existe un certain nombre de systèmes reproducteurs dont la construction est différente ou qui sont basés sur un autre principe et mieux adaptés à certains usages particuliers.

On distingue notamment ceux qui sont spécialement conditionnés pour la reproduction des fréquences élevées et utilisés conjointement avec un ou plusieurs haut-parleurs d'un autre type.

On les appelle « tweeter » en jargon anglo-saxon.

Des haut-parleurs électrodynamiques de dimensions réduites peuvent être affectés à cet usage, mais d'autres systèmes se prêtent aussi à cet emploi.

L'emploi d'un tweeter nécessite en principe l'insertion, dans le circuit qui l'alimente, d'un filtre séparateur pour éviter qu'il ne soit surchargé par les signaux de fréquences inférieures à la bande passante pour laquelle il a été conçu, ce qui aurait pour résultat probable de le détériorer.

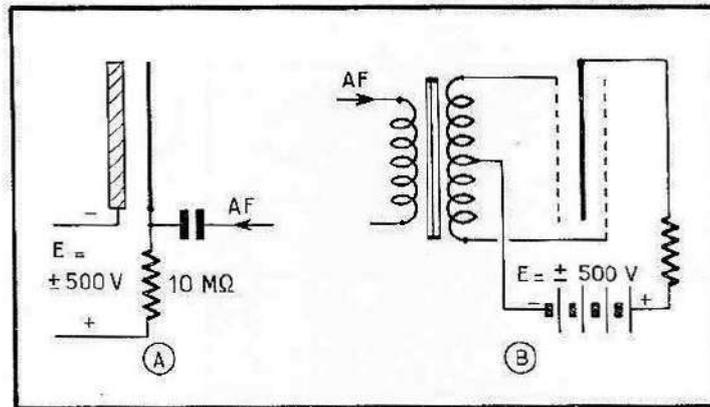


Fig. 59. — Schéma de haut-parleurs électrostatiques. En A, à simple effet. — En B, équilibré.

SYSTEME A COMPRESSION.

L'organe mobile du haut-parleur à compression est une mince membrane en duralumin dont l'inertie est minime et qui peut, de ce fait, suivre fidèlement des impulsions à très haute fréquence.

Cette membrane est enfermée dans une cavité presque close, et ici ce n'est plus la surface active qui importe, mais la *pression* exercée sur le volume d'air en contact avec elle.

La figure 58 montre schématiquement la construction d'un haut-parleur à compression.

Pour coupler un organe mobile d'aussi faible surface à l'air ambiant un pavillon est indispensable, comme il sera expliqué au chapitre suivant.

Les haut-parleurs de ce type ont un rendement exceptionnellement élevé qui peut atteindre 40 %. On les utilise principalement à deux fins : d'une part pour reproduire les fréquences élevées en association avec un haut-parleur normal chargé du registre grave, et, d'autre part, pour des sonorisations de plein air ou des transmissions d'ordres et d'informations.

LE HAUT-PARLEUR ELECTROSTATIQUE.

Lorsqu'on charge un condensateur, les armatures s'attirent sous l'effet du champ électrostatique. Si l'une d'elles est mobile ou flexible, elle se déplacera ou se déformera. Ce phénomène peut être utilisé pour reproduire le son.

La figure 59 a montre schématiquement le principe du haut-parleur électrostatique.

Une membrane conductrice est tendue devant une plaque fixe dont elle est électriquement isolée.

On applique au condensateur ainsi formé une tension continue par l'intermédiaire d'une résistance de valeur élevée (de l'ordre de $10\text{ M}\Omega$).

Si l'on superpose à cette tension un signal alternatif, les variations de la charge qui en résultent feront vibrer la membrane à la fréquence de ce signal.

Comme toutefois la capacité d'un condensateur et, par suite, la charge qu'il peut prendre sous une tension donnée dépendent de la distance entre les armatures, la force qui agit sur la membrane varie avec l'amplitude du déplacement. C'est une cause de distorsion et la raison pour laquelle la membrane ne peut effectuer que des mouvements de très faible amplitude.

Outre ce système à simple effet il existe des haut-parleurs électrostatiques du type équilibré dans lesquels l'armature mobile est placée en sandwich entre deux armatures fixes (fig. 59 b).

Le haut-parleur électrostatique convient surtout pour la reproduction des fréquences levées et il s'ensuit qu'on l'utilise généralement en combinaison avec un ou plusieurs haut-parleurs ordinaires.

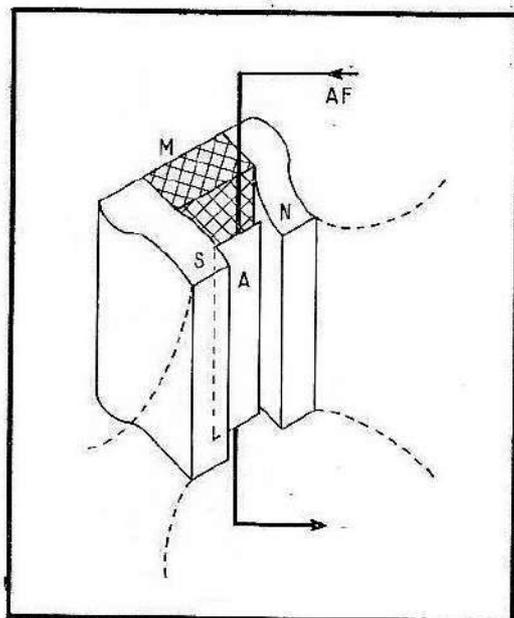


Fig. 60. — Haut-parleur à ruban.

A : lame vibrante.

M : aimant en ferrite.

On construit cependant des haut-parleurs électrostatiques destinés à couvrir tout le spectre sonore. Étant donné la très faible amplitude de déplacement de la surface active on est alors obligé de donner à celle-ci des dimensions considérables : de l'ordre du mètre carré.

Le rendement est faible.

L'impédance du haut-parleur électrostatique est excessivement élevée, aussi la liaison avec l'étage final doit-elle s'effectuer d'une manière particulière (voir chap. X).

Il présente d'autre part l'inconvénient de nécessiter une tension d'excitation de plusieurs centaines, voire de milliers de volts, ce qui complique un peu son installation.

LE HAUT-PARLEUR A RUBAN.

Il s'agit ici d'un haut-parleur électrodynamique d'une construction particulière. Il se compose d'un circuit magnétique comportant un très large

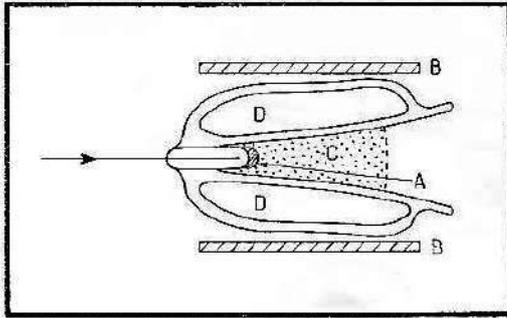
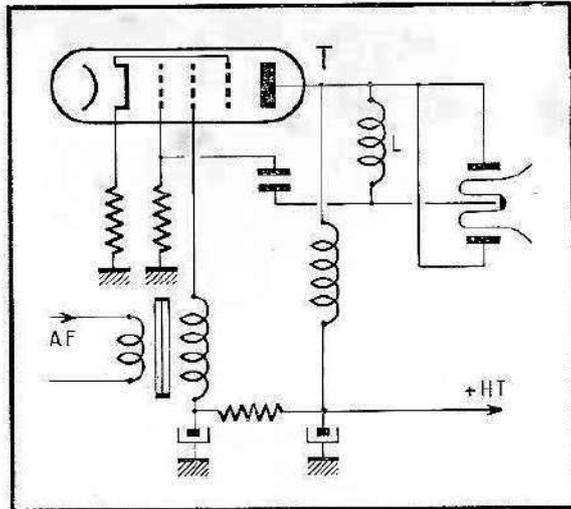


Fig. 62. — La cellule de l'ionophone forme avec la bobine L un circuit oscillant. Le tube oscillateur est modulé par le signal acoustique par l'intermédiaire d'un transformateur.

Fig. 61 (ci-contre). — Cellule active de l'ionophone. A : pastille émettrice. — B : armature extérieure. — C : plasma ionisé. — D : enceinte vide d'air.



entrefer dans lequel est tendu, ou plutôt flotte, un mince ruban métallique qui est l'organe mobile (fig. 60).

Ce ruban est traversé par le courant à fréquence acoustique et vibre au rythme de celui-ci.

Cet appareil ne peut être utilisé que pour la reproduction des fréquences élevées. Son rendement est très mauvais, à cause à la fois de la faible surface agissante et de la grande largeur de l'entrefer. Par contre, il est exempt de la plupart des défauts qu'on peut reprocher aux autres systèmes. Grâce à la très faible inertie du ruban, la reproduction des transitoires est exceptionnellement fidèle. Le haut-parleur à ruban est normalement muni d'un court pavillon.

L'IONOPHONE.

Voici théoriquement le haut-parleur idéal, car il ne comprend aucune partie mobile solide!

Le principe de base est un condensateur à air auquel on applique une tension H. F. extrêmement élevée (de l'ordre de 10 kV) à une fréquence de plusieurs MHz, ce qui provoque une émission d'ions (particules positives) à partir des armatures. En modulant la tension H. F., on provoque une agitation des ions qui se transmet aux molécules d'air.

La membrane motrice est donc remplacée ici par un nuage d'ions dont la masse totale est insignifiante par rapport à la partie mobile d'un haut-parleur (fig. 61).

La surface active est cependant très petite, de sorte que l'ionophone, tout comme le haut-parleur à compression, exige l'emploi d'un pavillon pour la transmission du son à l'air ambiant.

L'ionophone, dont la version américaine porte le nom de *Ionovac*, est constitué par une « cellule ionique » et un oscillateur H. F. pouvant être modulé par l'intermédiaire d'un transformateur-élevateur (fig. 62).

Le rôle du haut-parleur ionique est jusqu'à présent limité à la reproduction des fréquences de plus de 2000 Hz. C'est un « tweeter » de luxe.

CHOIX DU TYPE DE HAUT-PARLEUR

Lieu	Ambiance	Matiere sonore	Puissance au point de diffusion (W)	Puissance par unite (W)	Effet directif requis	Type de haut-parleur	Frequence de resonance (Hz)	Frequence de coupure (Hz)	Repartition des Haut-parleurs	Genre d'enceinte	Observations
stade	bruyante	parole	100	10	grand	à compression	—	300	groupés	pavillon court	
			20	5	moyen	à rayonnement direct	100	—	dispersés	coffret	également colonne
foire	bruyante	parole et musique	10	10	faible	à compression	—	150	dispersés	pavillon réentrant	
			1	1	spécial	rayon. direct	150	100	distribués	colonne	
édifices religieux	silencieux	parole	2	2	moyen	rayon. direct	60	—	distribués	colonne	
			1	1	spécial	rayon. direct	150	100	distribués	colonne	
salle de conférences	silencieux	parole	2	2	moyen	rayon. direct	60	—	distribués	colonne	
			5	5	moyen	rayon. direct	60	—	distribués	colonne	également enceinte
spectacle	silencieux	parole et musique	5	5	moyen	rayon. direct	60	—	distribués	colonne	
			50	10	léger	rayon. direct + pression	30	1000 (tweeter) 7000	groupés	enceinte + pav. cloisonné	
cinéma	silencieux	parole et musique	50	10	léger	rayon. direct + pression	30	1000 (tweeter) 7000	groupés	enceinte + pav. cloisonné	
			15	15	null	rayon. direct + tweeter	25	1200 (tweeter)	assemblés	enceinte	
foyer	silencieux	parole et musique	15	15	null	rayon. direct + tweeter	25	1200 (tweeter)	assemblés	enceinte	

ENCEINTES ACOUSTIQUES ET PAVILLONS

Le piston constitué par le cône du haut-parleur a une surface beaucoup trop faible pour assurer la reproduction des fréquences basses sans un dispositif extérieur assurant la séparation entre les ondes sonores formées sur chaque surface et qui, comme nous l'avons expliqué au chapitre 9, sont en phase opposée.

Un simple écran plat, à moins d'être infini, n'assure nullement une reproduction uniforme de toutes les fréquences.

Quelle que soit sa grandeur, à partir du moment où la longueur d'onde est plus grande que *deux fois* la distance entre le cône et le bord, le rendement tombe rapidement, car les pressions acoustiques qui existent de part et d'autre de l'écran tendent à s'annuler.

La reproduction des fréquences supérieures présente également des particularités : si la longueur d'onde correspond à *la moitié* de la distance en question, les pressions existant des deux côtés *sont en phase* et se renforcent mutuellement. C'est comme si l'écran avait une fréquence de résonance propre.

Le même phénomène se produit chaque fois que la longueur d'onde est une fraction entière de la distance du cône au bord, mais diminue à mesure que la fréquence augmente.

Pour simplifier le raisonnement nous avons supposé que l'écran était circulaire. Un écran rectangulaire donne lieu aux mêmes phénomènes, mais comme il y a une infinité de chemins de longueur différente du cône au bord, les effets sont moins perceptibles.

En se basant sur ce qui vient d'être dit on conclut que, pour la reproduction correcte d'un signal à 40 Hz, il faudrait un écran d'au moins 3,50 m de côté.

Un écran d'un mètre carré atténue à partir de 100 Hz, et, si l'on réduit cette dimension à 50 cm, la coupure se fait à partir de 250 Hz.

Un écran plat ne satisfait donc pas aux conditions indispensables à une reproduction de qualité. De plus il ne contribue pas à l'amortissement de l'équipage mobile lorsque celui-ci oscille à sa fréquence de résonance.

L'enceinte acoustique moderne se présente sous plusieurs formes dont chacune a ses avantages et ses inconvénients, ses défenseurs et ses adversaires.

En fait, la plupart des formules proposées aboutissent à des résultats comparables du point de vue subjectif.

L'enceinte close.

Ce n'est pas l'équivalent d'un écran infini, quoi qu'on puisse penser à première vue.

Nous avons vu qu'un volume d'air enfermé dans une cavité se comporte comme tout corps élastique et possède une fréquence de résonance.

D'autre part, il est évident que le haut-parleur doit fournir une énergie supplémentaire pour comprimer l'air à l'intérieur de l'enceinte.

L'élasticité de cette masse d'air, se combinant avec celle de la suspension, modifie la résonance propre du haut-parleur.

De plus, des ondes stationnaires apparaissent à l'intérieur de l'enceinte et peuvent donner naissance à d'autres résonances qui dépendent des dimensions et de la forme de la caisse.

Celle qui se rapproche le plus possible du cube serait la plus favorable sous ce rapport.

Ces effets conduisent à un mauvais rendement aux fréquences basses, d'où la nécessité, pour améliorer celui-ci, d'utiliser un volume aussi grand que possible.

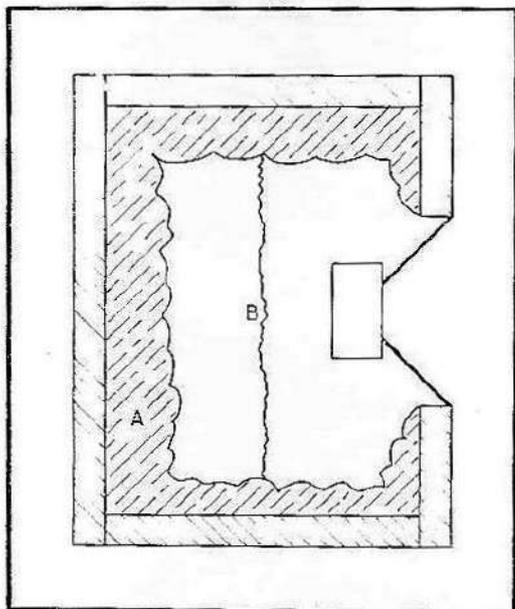


Fig. 63. — Une enceinte totalement close doit être complètement capitonnée (A). Il est recommandé, en outre, d'y placer une cloison en étoffe ou autre matière absorbante (B).

L'enceinte close n'offre donc aucun gain d'espace par rapport aux autres dispositifs classiques.

Pour supprimer les ondes stationnaires il est indispensable de revêtir l'intérieur de matières absorbantes ou même de le cloisonner au moyen de tentures ou de panneaux perforés (fig. 63).

L'enceinte antirésonnante ou « bass-reflex ».

Il n'y a guère de dispositifs acoustiques qui aient suscité une plus abondante littérature que le « bass-reflex ».

Sa forme classique est une caisse dont la face avant présente deux ouvertures : l'une occupée par le haut-parleur et l'autre libre (fig. 64).

Cette disposition paraît à première vue paradoxale, mais, en fait, cet « évent » forme, à certaines fréquences, un haut-parleur virtuel qui rayonne l'énergie produite par la face arrière du cône du haut-parleur et qui, sans cela, serait perdue.

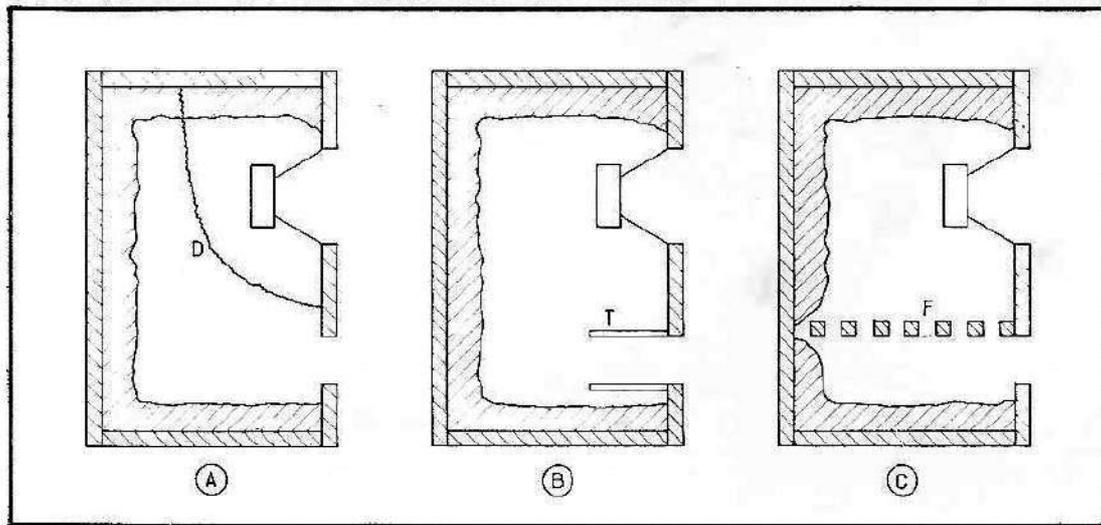


Fig. 64. — Différentes formules d'enceintes à évent (« bass reflex »). En A, amortissement à l'aide d'une draperie (D). — En B, prolonger l'évent par un tube T abaisse la résonance propre de l'enceinte. — En C, un filtre acoustique F permet d'accorder l'enceinte aux caractéristiques du haut-parleur.

L'explication est la suivante : soit une enceinte dans laquelle on a placé deux haut-parleurs dont *un seul* est raccordé à l'amplificateur. Le cône du second est toutefois couplé à la face arrière du premier par l'air contenu dans l'enceinte. Aux fréquences très basses, quand celui-ci se déplace *vers l'arrière*, il comprime cet air qui repousse alors vers l'avant le cône libre de l'autre haut-parleur.

Le mouvement des deux cônes est donc en sens opposé et les ondes acoustiques qu'ils produisent s'annulent mutuellement.

Mais tout change à partir d'une certaine fréquence : la pression interne de l'enceinte ne s'établit pas en bloc dans tout le volume d'air, de sorte que celle qui agit sur le cône libre est décalée de 180° par rapport à celle que produit le cône actif.

En même temps la raideur de la masse d'air mise en mouvement s'oppose au mouvement de ce dernier et on constate que la plus grande partie de l'énergie sonore est rayonnée par le cône libre.

Cet état de choses qu'on appelle *antirésonance* se produit lorsque la combinaison formée par la masse du cône libre et le volume d'air enfermé entre en résonance.

Quand la fréquence augmente, le déphasage se modifie progressivement et, à un certain moment, les deux haut-parleurs vibrent en phase et c'est comme s'il y avait deux éléments actifs.

Dans la réalité, il n'y a évidemment pas de deuxième haut-parleur : c'est la tranche d'air encadrée par le trou qui vibre et transmet l'énergie sonore à l'extérieur.

L'analyse mathématique du comportement d'un système « bass-reflex » est très compliquée et peut être trouvée, pour ceux que la chose intéresse, dans divers ouvrages cités dans la bibliographie.

Les données pratiques qu'on en tire sont les suivantes : les dimensions d'une enceinte antirésonnante sont conditionnées par les caractéristiques du haut-parleur et par la fréquence la plus basse qu'on veut reproduire convenablement. Ces dimensions ne sont cependant pas très critiques et, comme nous le verrons plus loin, il y a des accommodements possibles.

La formule ci-dessous est donnée par divers auteurs pour le calcul de la fréquence d'antirésonance :

$$f = \sqrt{\frac{r}{V}} \times 10^4$$

r est le rayon de l'ouverture et V le volume intérieur en cm^3 .

Une fréquence de 63 Hz, par exemple, est fournie par une enceinte de 125.000 cm^3 percée d'un évent de 5 cm de rayon ou $31,4 \text{ cm}^2$ de surface.

D'autres auteurs préconisent les volumes moyens suivants pour des haut-parleurs de dimensions courantes :

DIAMÈTRE DE LA PARTIE ACTIVE du cône en cm	VOLUME INTÉRIEUR EN CM^3
20	120 000
25	140 000
30	170 000
35	230 000

Ce sont des dimensions minima, un volume plus grand ne nuira jamais.

On admet que la surface de l'évent doit être égale à la partie *active* du cône du haut-parleur.

Mais cette question est controversée et, en tout cas, la grandeur de l'orifice dépend du volume de l'enceinte pour un haut-parleur donné.

La forme de l'évent et sa position par rapport au haut-parleur ne semblent pas avoir une grande influence.

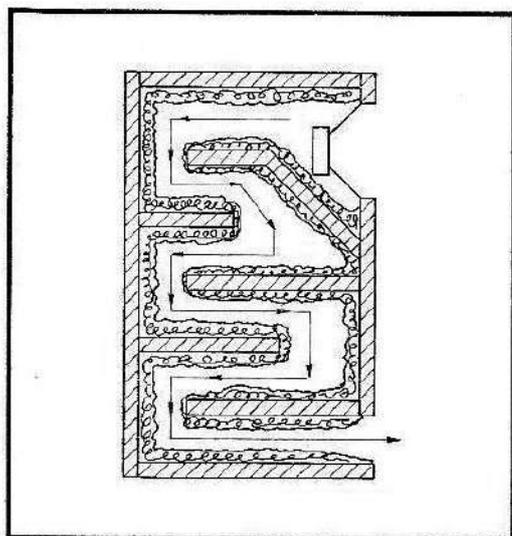


Fig. 65. — Modèle classique de labyrinthe acoustique.

Dans certains modèles l'évent est prolongé vers l'intérieur par un tube. Ce dernier a pour effet d'abaisser la fréquence de résonance.

Tout comme l'enceinte close le « bass-reflex » doit être intérieurement capitonné pour supprimer les modes de vibrations parasites.

On peut aussi adapter aux caractéristiques d'un haut-parleur déterminé au moyen d'un filtre acoustique intérieur (fig. 64 c) qui peut être constitué par une plaque en matière insonore perforée d'un nombre plus ou moins grand de trous, d'un panneau de feutre ou d'une draperie en étoffe épaisse.

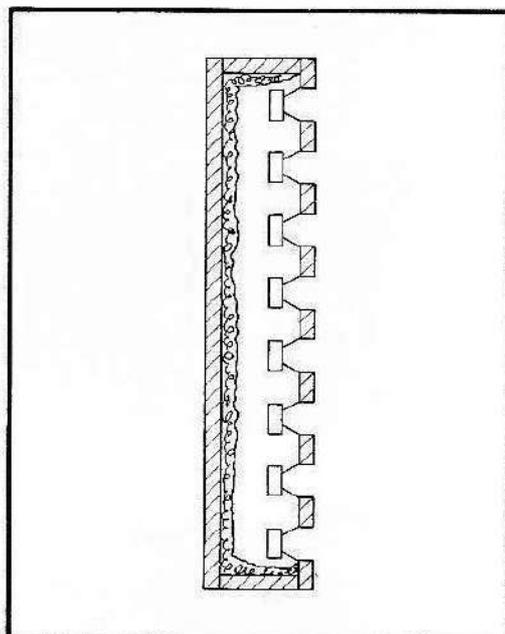
Ne quittons pas ce sujet sans signaler une forme particulière d'enceinte antirésonnante dénommée « conque ». Elle est constituée par une sphère en staff et contient un cloisonnement intérieur délimitant des cavités qui absorbent les fréquences parasites.

Le matériau étant par lui-même insonore, aucun tapissage intérieur n'est nécessaire.

Le labyrinthe acoustique.

Une autre façon de charger le haut-parleur à sa fréquence de résonance est de lui adjoindre une ligne de transmission acoustique sous forme d'un tuyau ouvert dont la longueur est égale au quart de la longueur d'onde correspondante.

Fig. 66 a. — Une colonne sonore comprend un certain nombre de haut-parleurs disposés verticalement.



Comme la forme d'un tel objet serait incompatible avec un usage courant, on le replie plusieurs fois sur lui-même (fig. 65).

En donnant une longueur adéquate au conduit, on obtient un temps de propagation tel que l'onde se présente à la sortie en opposition de phase avec celle qui est rayonnée par la face avant du cône.

Cela paraît très simple en théorie, mais en réalité l'adaptation n'est valable que pour une bande étroite de fréquences en dehors de laquelle se produisent des modes de vibrations parasites.

On est donc amené à matelasser abondamment l'intérieur du conduit, ce qui modifie d'ailleurs profondément son comportement qui, dès lors, se rapproche plutôt de celui du pot d'échappement d'un moteur d'automobile.

Il n'est probablement aucun système acoustique qui ait donné lieu à autant de variantes.

Certaines de celles-ci se situent à mi-chemin entre le « bass-reflex » et le labyrinthe accordé.

La colonne sonore.

Elle est formée par une rangée verticale de haut-parleurs de faible ou moyen diamètre (de 18 à 25 cm) fixés dans une enceinte oblongue dont l'intérieur est revêtu de matières absorbantes.

Fig. 66 b. — Quelques formes usuelles de colonnes sonores.

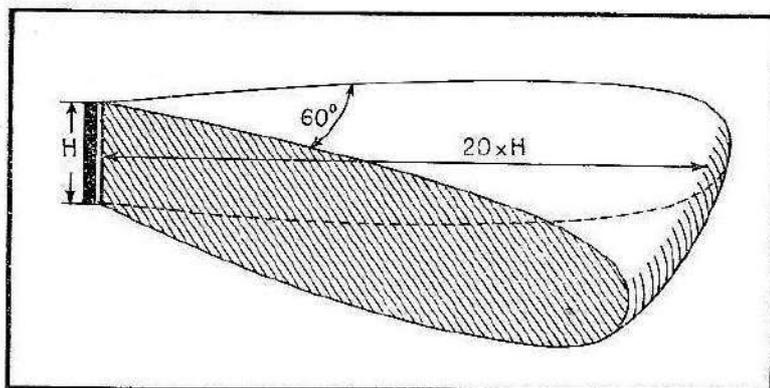
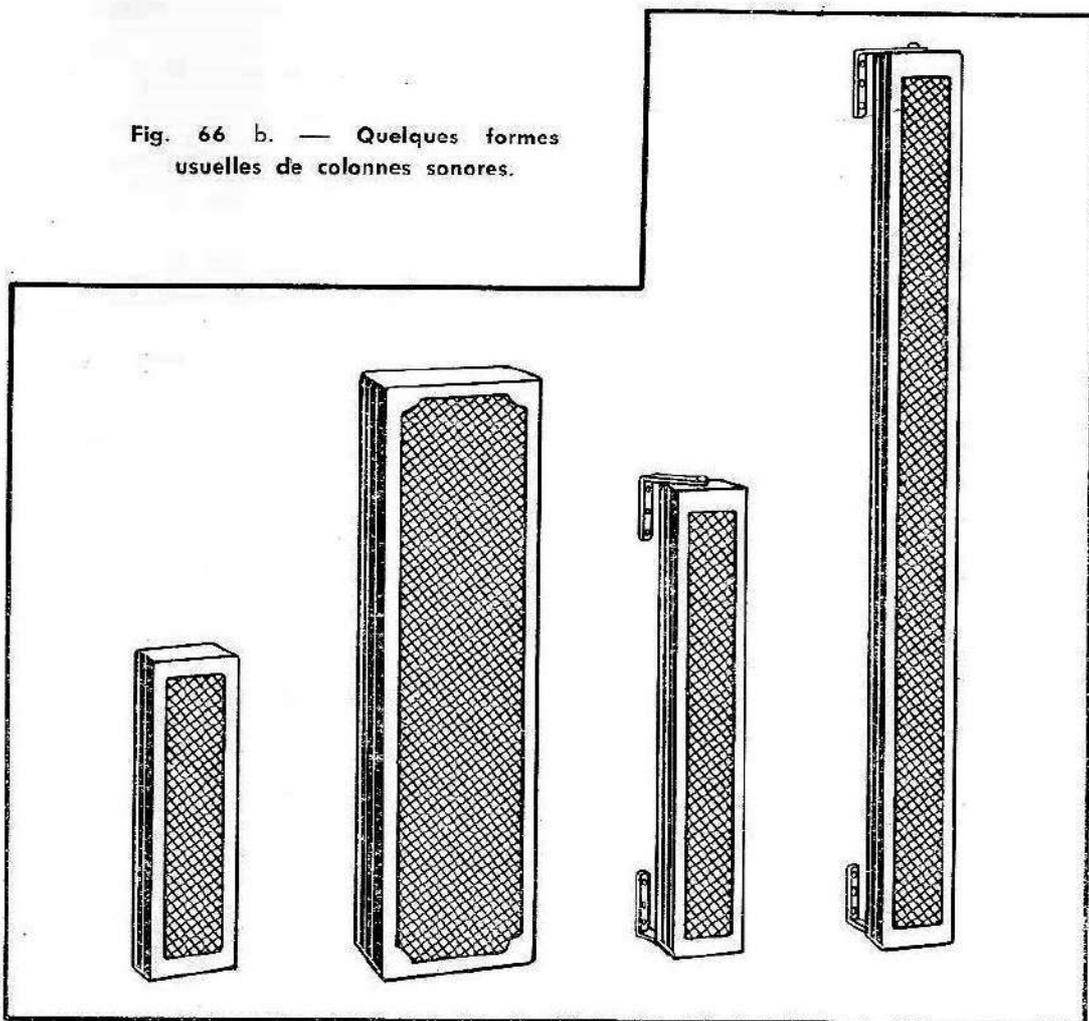


Fig. 66 c. — Une colonne sonore possède un diagramme de rayonnement de forme très particulière.

Les haut-parleurs travaillent en phase et, par conséquent, tous les cônes se meuvent dans la même direction. L'effet est le même que s'il n'y avait qu'une membrane unique de même superficie mais de forme très allongée (fig. 66 a, b, c).

La caractéristique principale de ce dispositif est un effet directif très prononcé sur lequel nous reviendrons dans la troisième partie du livre.

L'expression « colonne sonore » peut prêter à confusion, car elle est parfois utilisée pour désigner une forme particulière de labyrinthe acoustique.

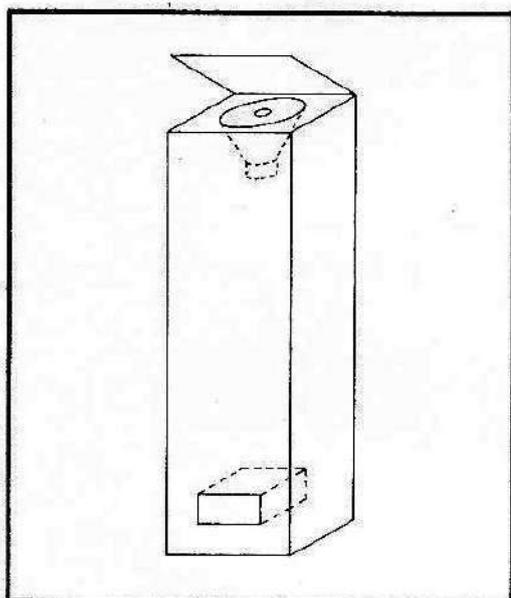


Fig. 67. — Enceinte acoustique de forme particulière appelée parfois colonne sonore.

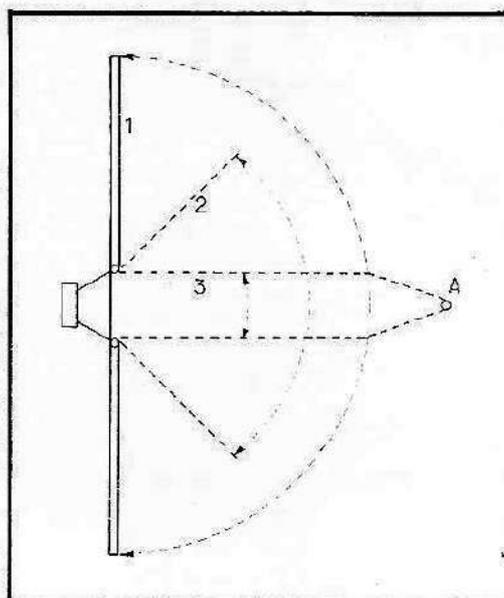


Fig. 68. — Si l'on pouvait replier un écran plat comme un parapluie, le rayonnement se ferait successivement : 1) dans une hémisphère ; 2) dans un angle solide de plus en plus petit ; 3) à la limite dans un tube sous forme d'ondes planes. — Pour l'auditeur placé en A, l'intensité sonore deviendrait de plus en plus grande.

Il s'agit d'une enceinte très étroite et haute (fig. 67) portant le haut-parleur à son sommet et qui a été préconisée, eu égard à son faible encombrement latéral, pour les installations stéréophoniques.

Le pavillon.

Imaginons un écran conditionné de manière qu'on puisse le replier à la façon d'un parapluie.

Quand il est déployé, c'est-à-dire plan, la face avant du haut-parleur qui y est monté émet des ondes hémisphériques (fig. 68-1).

Mais, à mesure qu'on referme le « parapluie », l'angle solide dans lequel le haut-parleur rayonne embrasse une portion de sphère de plus en plus petite.

L'énergie sonore est, par suite, de plus en plus concentrée. A la limite le son se propage dans un tube sous forme d'ondes planes (fig. 68-3).

Dans toutes les situations intermédiaires l'onde sonore va en se distendant depuis l'entrée jusqu'à la bouche : la pression diminue, la vitesse augmente.

L'énergie totale reste la même, mais sa forme change.

L'effet peut être comparé à l'action d'un transformateur électrique : au primaire une forte tension et peu d'intensité, au secondaire peu de tension et grande intensité (fig. 69).

On peut aussi considérer le pavillon comme une sorte de loupe qui agrandirait virtuellement la membrane du haut-parleur. La bouche du pavillon peut en effet être considérée comme l'organe vibrant qui transmet le son à l'air ambiant.

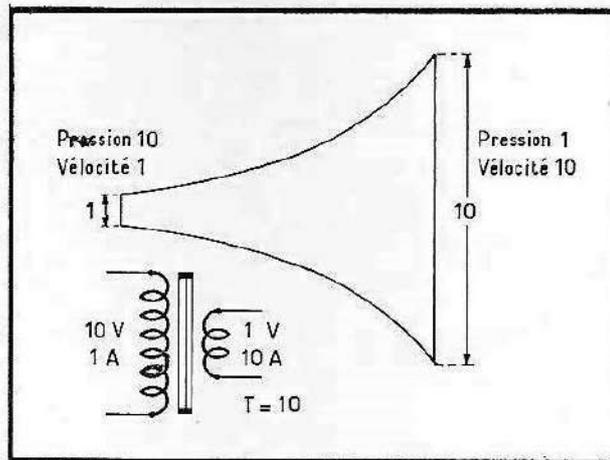
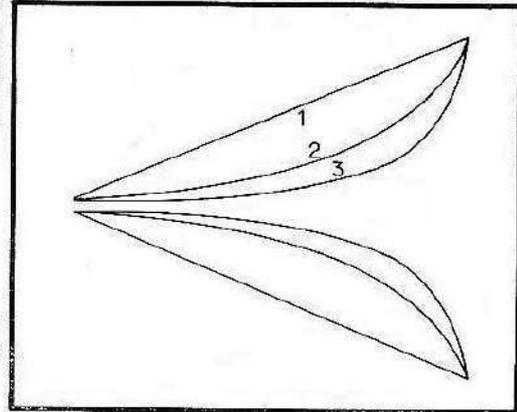


Fig. 69. — L'action d'un pavillon peut être comparée à celle d'un transformateur.

Fig. 70. — Profils de pavillons. 1 : conique. — 2 : exponentiel. — 3 : hyperbolique.



Une autre particularité du pavillon est qu'en dessous d'une certaine fréquence dite *de coupure*, déterminée par sa forme et ses dimensions, le rendement tombe brusquement à un niveau insignifiant.

Enfin une troisième propriété du pavillon, qui découle de son principe même, est son effet directif très prononcé, d'où son intérêt pour les sonorisations en plein air.

Reprenons notre image précédente et considérons un auditeur placé au point A (fig. 68). Devant l'écran plat, l'énergie sonore captée par son oreille provient d'une très faible portion de la surface totale de l'onde. Mais à mesure que l'angle se referme l'énergie se concentre en une surface de plus en plus petite et l'intensité sonore ressentie par l'auditeur augmente.

L'impédance acoustique présentée à la membrane du haut-parleur s'accroît en même temps.

Le rendement dépend du rapport entre la longueur d'onde et la surface de la bouche du pavillon. On estime que, dans le cas d'une bouche circulaire, *le diamètre doit être au moins égal au tiers de la plus grande longueur d'onde à reproduire.*

Nous avons, pour simplifier, considéré jusqu'ici le pavillon comme un tronc de cône ou de pyramide.

Le rendement d'un pavillon de cette forme baisse progressivement avec la fréquence.

Pour maintenir une reproduction du son plus uniforme jusqu'au voisinage de la fréquence de coupure, la section du pavillon doit croître suivant une progression particulière qui détermine son profil longitudinal.

Suivant la formule d'expansion adoptée, la forme du pavillon sera conique, exponentielle ou hyperbolique (fig. 70).

Le profil exponentiel assure le rendement le plus uniforme à toutes les fréquences supérieures à la fréquence de coupure.

Le profil hyperbolique favorise les fréquences basses mais tend à introduire de la distorsion de phase (fig. 71).

La loi d'accroissement de la section du pavillon exponentiel est donnée par la formule :

$$S = S_0 e^{mx}$$

A une distance x de l'embouchure, la surface de la section S est égale à la surface de la section d'entrée S_0 multipliée par un facteur qui comprend une constante m et le nombre e dont la valeur approchée est 2,7.

La fréquence de coupure dépend de la longueur du pavillon et de la section de la gorge.

Fig. 71. — Courbe de réponse de trois pavillons de profil différent.
1 : conique. — 2 : exponentiel. —
3 : hyperbolique.

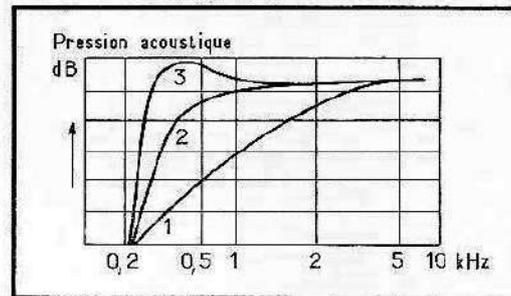


Fig. 72. — Longueur relative de trois pavillons exponentiels dont la fréquence de coupure est respectivement : A : 250 Hz. — B : 120 Hz.
C : 70 Hz.

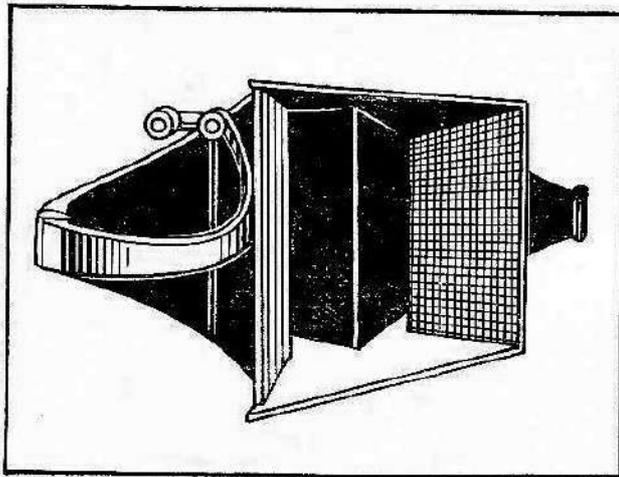
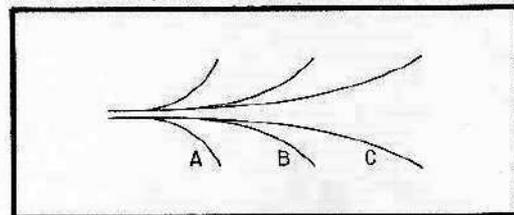


Fig. 73. — Grand pavillon replié du type utilisé parfois dans les cinémas (fréquence de coupure, environ 40 Hz).

La figure 72 montre les proportions qu'auraient trois pavillons dont la fréquence de coupure est différente.

A titre d'exemple un pavillon exponentiel pouvant assurer la reproduction d'une fréquence de l'ordre de 75 Hz en partant d'une section d'entrée de 625 mm^2 devrait avoir une longueur approximative de 4 m et un diamètre de bouche d'à peu près 1,60 m.

De pareilles dimensions étant fort malcommodes, on y remédie en repliant le pavillon sur lui-même (fig. 73) ou en le constituant par des sections emboîtées l'une dans l'autre (fig. 74 a, b, c).

Pour l'usage domestique on utilise parfois des pavillons repliés de construction compliquée et qui, sauf pour les dispositions internes spéciales, se rapprochent du labyrinthe acoustique.

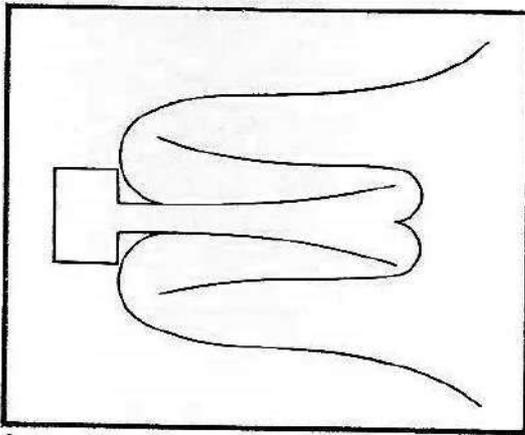


Fig. 74 a. — Coupe d'un pavillon exponentiel du type « réentrant ».

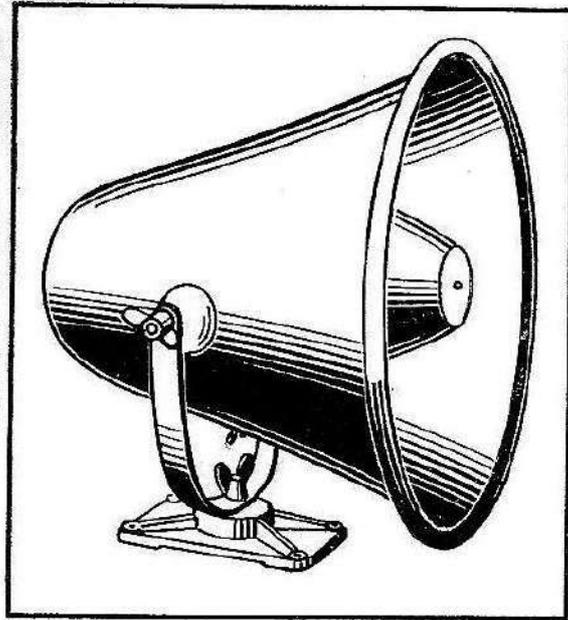


Fig. 74 b. — Forme habituelle du haut-parleur à pavillon de ce type.

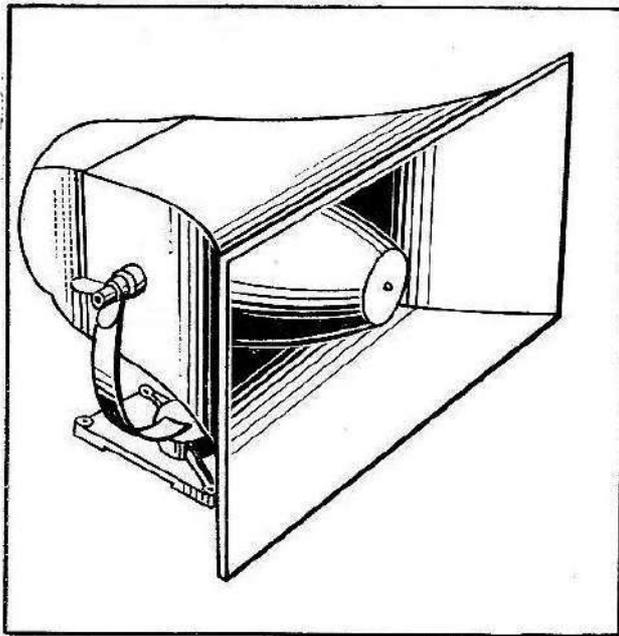


Fig. 74 c. — Pavillon à section rectangulaire convenant particulièrement pour les camions publicitaires.

Le plus célèbre est le « Klipschorn », lancé il y a bon nombre d'années par un spécialiste américain (*).

Pour assurer une reproduction acceptable des très basses fréquences sans devoir donner à l'enceinte des dimensions prohibitives, l'astuce consiste à la placer dans une encoignure. Le trièdre formé par les murs et le parquet constitue alors une prolongation du pavillon.

Le résultat dépend évidemment de la disposition des lieux, les meubles, tapis ou revêtements pouvant considérablement modifier les propriétés acoustiques du pseudo-pavillon.

La nécessité de recourir à des dispositifs très encombrants limite l'emploi du pavillon pour la reproduction des fréquences basses. Par contre, le rendement élevé qu'il permet d'obtenir grâce à un couplage favorable entre la membrane vibrante et l'air l'ont fait adopter pour des usages spéciaux. En

(*) Voir bibliographie et également description dans *Haut-parleurs*, par G. A. BRIGGS, aux Editions Radio.

Fig. 74 d. — Batterie de haut-parleurs à pavillon « réentrant » pour diffusion à grande puissance en plein air : disposition souvent utilisée sur les stades et champs de course.

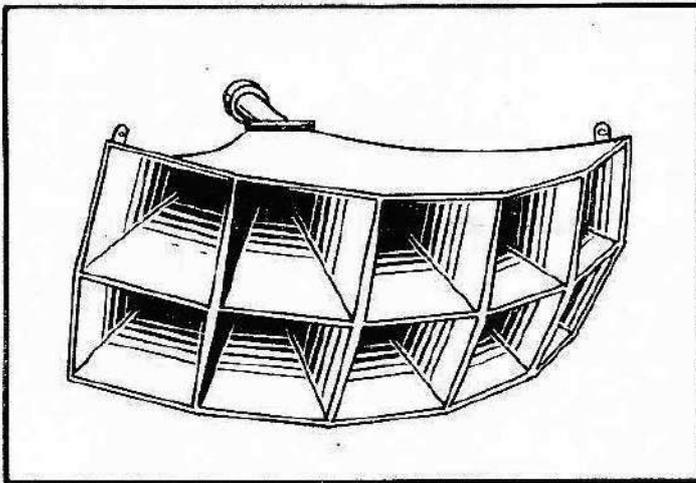
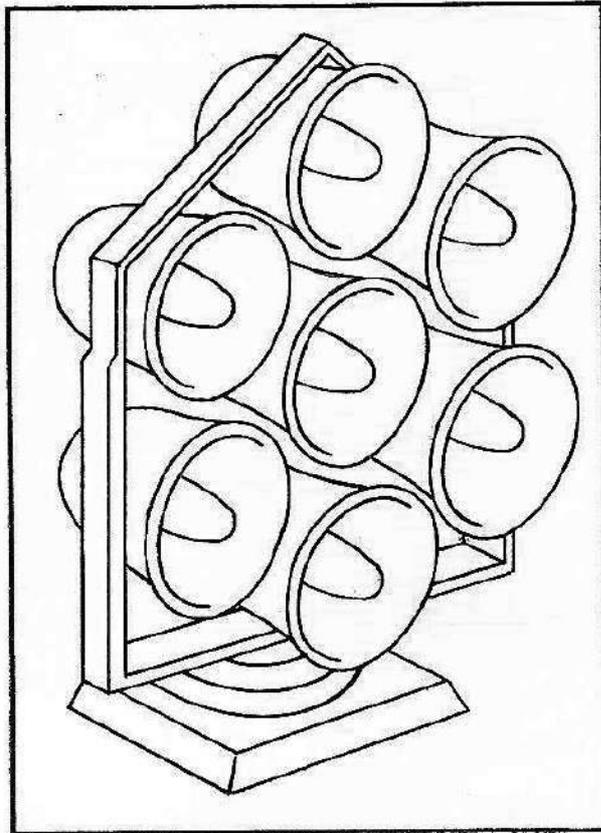


Fig. 75. — Un pavillon cloisonné assure une distribution plus large du champ sonore. La forme de ce pavillon est fréquemment utilisée dans les cinémas pour la reproduction des fréquences élevées.

particulier un moteur à compression suivi d'un pavillon très court, dont la fréquence de coupure se situe vers les 500 ou 600 Hz ou même plus haut, constitue un « tweeter » très apprécié.

Pour remédier à l'effet directif trop prononcé on utilise souvent, dans ce cas, un pavillon cloisonné (fig. 75).

Les haut-parleurs en groupe.

Nous avons déjà dit qu'il est excessivement difficile de construire un haut-parleur dont la surface de rayonnement soit suffisante pour reproduire les fréquences inférieures sans devoir lui imprimer une amplitude de mouvement incompatible avec ses caractéristiques mécaniques et qui, en même

temps, reproduirait correctement les fréquences supérieures de la gamme acoustique.

Les astuces de construction permettant d'arriver approximativement à ce résultat ne sont valables que pour un niveau sonore très modeste.

C'est pourquoi, dès l'instant où l'on veut obtenir les meilleurs résultats sur toute l'étendue du spectre audible, il convient de le partager entre plusieurs haut-parleurs aux caractéristiques spécialisées.

La combinaison la plus simple consiste à employer un haut-parleur pour graves (« woofer ») en association avec un « tweeter » pour les aigus.

Le premier aura, par exemple, une fréquence de résonance aux environs de 35 Hz et son rendement baissera progressivement à partir de 4000 ou 5000 Hz. Le « tweeter » aura une courbe de réponse qui monte à partir de 1000 Hz et demeure horizontale de 2000 à 16 000 Hz.

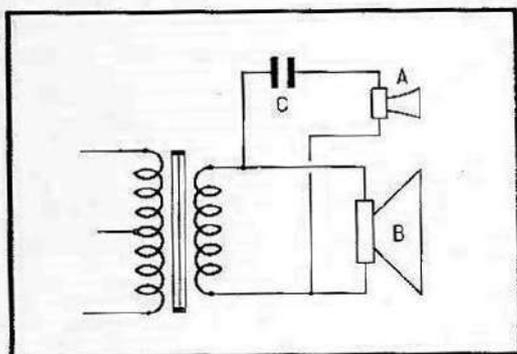


Fig. 76. — Séparation des fréquences entre le haut-parleur pour graves B et le tweeter A, au moyen du condensateur C.

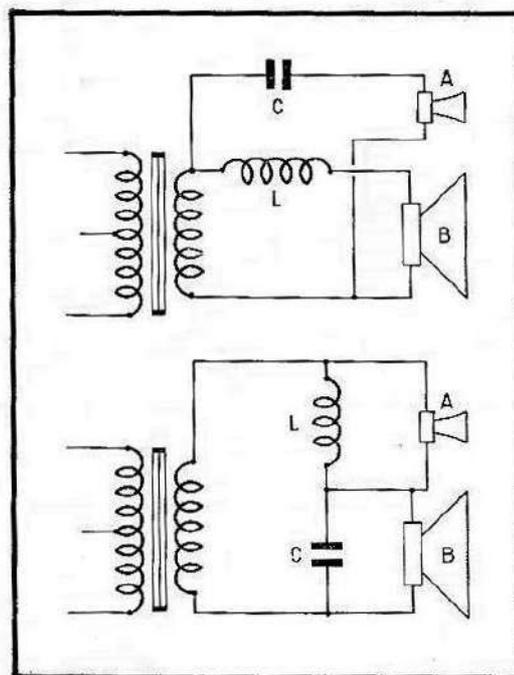
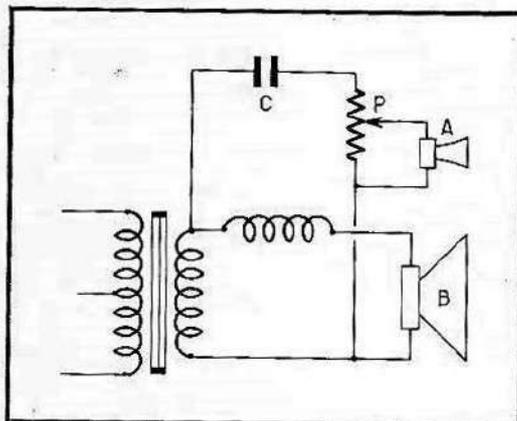


Fig. 77. — En complétant le circuit par une bobine, on assure une meilleure répartition des fréquences entre les deux haut-parleurs.

Fig. 78. — Un potentiomètre permet de doser la puissance appliquée au tweeter.

D'autres caractéristiques complémentaires peuvent aussi bien être utilisées. Ce qui importe, c'est que le recouvrement des deux courbes de réponse se fasse de manière à assurer une reproduction uniforme de toute la gamme sans trou ni enflure à certaines fréquences.

Un « tweeter » n'est pas conditionné pour reproduire des signaux d'une fréquence inférieure à plusieurs centaines de Hz.

Au surplus, les signaux à fréquence très basse, et nécessairement de grande amplitude, seraient susceptibles de l'endommager.

Un dispositif séparateur est donc nécessaire.

On peut se contenter d'un simple condensateur (fig. 76).

Il est cependant préférable d'ajouter au système une bobine d'arrêt

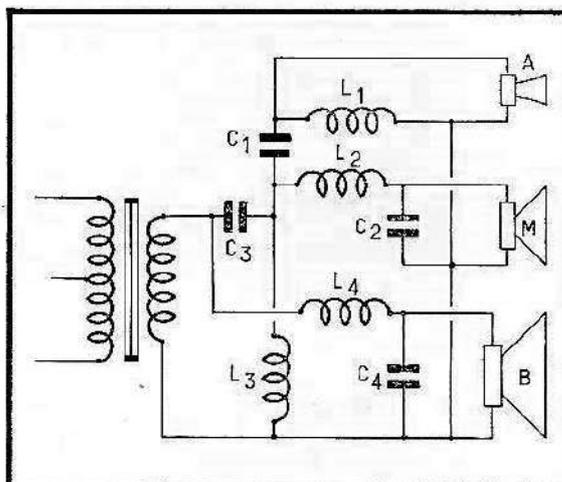
(fig. 77), car les fréquences élevées peuvent exciter certaines résonances locales dans le haut-parleur pour graves.

On complète souvent l'installation par un potentiomètre permettant de doser la puissance appliquée au « tweeter » (fig. 78).

Comme il est assez difficile d'assurer un recouvrement précis et régulier des deux portions du spectre, on utilise fréquemment un haut-parleur supplémentaire pour le médium, ce qui permet de limiter plus étroitement la bande passante de chacun des éléments. Le réseau de séparation est de ce fait plus compliqué (fig. 79).

L'emploi de plusieurs haut-parleurs groupés dans une même enceinte peut avoir un autre but que l'extension de la gamme des fréquences à reproduire.

Fig. 79. — Le réseau de séparation, dans le cas de l'emploi de trois haut-parleurs, est plus compliqué : 4 bobines et 4 condensateurs sont nécessaires.



Le prix des haut-parleurs augmente plus rapidement que la puissance maximum admissible et, de toute manière, il y a une limite à celle-ci.

Il est donc indiqué de répartir cette puissance entre deux ou plusieurs haut-parleurs dès l'instant où l'on veut obtenir un niveau sonore élevé. Cette question est surtout importante pour la reproduction des fréquences basses, parce que c'est là que les plus fortes puissances sont mises en jeu.

Le problème n'est cependant pas aussi simple qu'il y paraît à première vue.

Prenons le cas de deux haut-parleurs montés sur un écran commun. Lorsqu'ils sont placés côte à côte, on peut, du point de vue rayonnement, les considérer comme une source de son unique, à condition bien entendu qu'ils vibrent en phase, c'est-à-dire que les membranes se meuvent au même instant dans la même direction.

S'il en était autrement, les ondes émises tendraient à s'annuler mutuellement, du moins pour les longueurs plus grandes que la distance entre les centres de rayonnement.

Les conditions changent si les haut-parleurs sont placés à une certaine distance l'un de l'autre.

Cette disposition entraîne, à certaines fréquences, un déphasage entre les deux rayonnements et la reproduction n'est plus uniforme sur toute l'étendue du spectre sonore.

En connectant en parallèle deux haut-parleurs dont les fréquences de résonance sont sensiblement différentes, on obtient une certaine uniformisation de la courbe de réponse.

On sait qu'à la fréquence de résonance l'impédance d'un haut-parleur augmente considérablement, cependant s'il est shunté par un autre haut-

parleur dont l'impédance à cette fréquence est différente, cette augmentation est sensiblement atténuée.

Il y a ici une certaine analogie avec ce que l'on constate en couplant de manière plus ou moins serrée deux circuits oscillants.

La courbe représentative de l'impédance ne présentera plus une pointe unique, mais deux bosses moins accentuées (fig. 80).

Cette astuce, fort en honneur aux premiers âges du haut-parleur électrodynamique, a perdu de son intérêt depuis qu'on a appris à utiliser judicieusement la contre-réaction pour amortir les haut-parleurs et que s'est

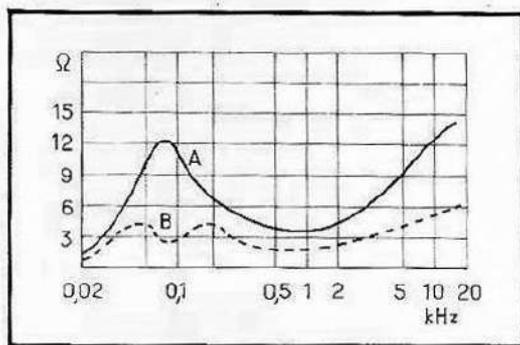
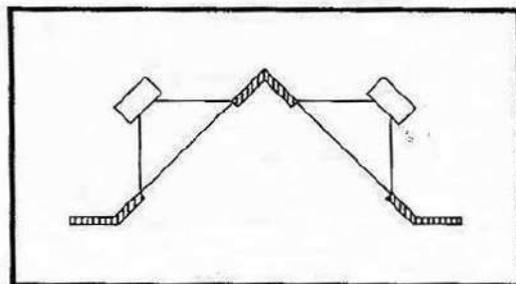


Fig. 80. — Courbe A : variation avec la fréquence de l'impédance d'un haut-parleur. En couplant en parallèle deux haut-parleurs dont la fréquence de résonance est différente on régularise la courbe (qui devient la courbe B).

Fig. 81. — L'espace entre deux haut-parleurs placés sous un certain angle forme une amorce de pavillon qui augmente l'impédance acoustique « vue » par les membranes.



généralisé l'emploi d'enceintes antirésonnantes et autres dispositifs ayant des propriétés équivalentes.

Signalons encore une disposition particulière que montre la figure 81.

Deux parleurs pour graves sont ici placés sous un certain angle l'un par rapport à l'autre.

Le dièdre ainsi formé constitue une amorce de pavillon qui renforce utilement la charge acoustique des diaphragmes.

LES TRANSFORMATEURS B F

I. — Le transformateur de sortie.

Excepté divers modèles spéciaux, les haut-parleurs électrodynamiques présentent une impédance propre comprise entre deux et une quinzaine d'ohms.

Elle est mesurée à une fréquence qui peut être de 400, 800 ou 1000 Hz, suivant les constructeurs, le haut-parleur étant placé dans les conditions normales de fonctionnement, c'est-à-dire chargé acoustiquement.

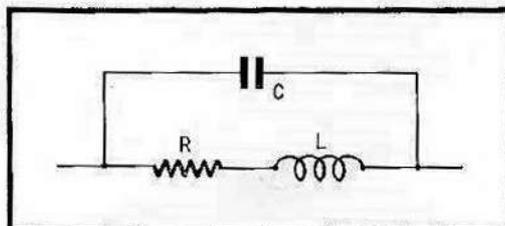
D'autre part, l'impédance de charge optimum de l'étage final d'un amplificateur est, le plus souvent, de plusieurs milliers d'ohms.

Le rapport entre les deux impédances est donc très grand et il est, de ce fait, indispensable d'utiliser un transformateur pour obtenir une adaptation correcte.

Un transformateur B.F. est essentiellement constitué par un circuit magnétique muni de deux enroulements.

Les propriétés des bobines à noyau magnétique ont été expliquées au chapitre VII. Rappelons que l'impédance diffère d'une simple résistance ohmique en ce qu'elle comprend divers facteurs qui varient avec la fréquence du courant qui traverse la bobine et qu'en conséquence sa valeur globale varie aussi avec la fréquence.

Fig. 82 a. — Une bobine à fer comprend une capacité répartie C, une résistance ohmique R et une self-induction L.



Comme, toutefois, tous ces facteurs ne varient pas dans le même sens, la variation totale est moindre que celle de certains d'entre eux.

On peut représenter un circuit inductif par la figure 82 a dans laquelle R est la résistance ohmique du fil, L la self-induction et C la capacité répartie entre les spires.

Si la fréquence est nulle (courant continu), R seul compte. A mesure que la fréquence augmente, L réagit de plus en plus, tandis que C offre de moins en moins de résistance.

Dans le cas qui nous occupe, C est petit comparé à L, qui est le facteur dominant, de sorte que l'impédance *augmente* avec la fréquence.

La résistance R reste constante, mais constitue une perte qui diminue l'effet de la self-induction L .

Celle-ci dépend du nombre de tours de fil et des caractéristiques du noyau magnétique (volume et propriétés du matériau).

La résistance ohmique étant supposée nulle, la réactance inductive est exprimée par la formule :

$$X_L = 2\pi \times f \times L = \omega L$$

et l'impédance par la formule :

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

qui tient compte de la résistance ohmique.

L'impédance qu'on peut mesurer aux bornes d'un des enroulements d'un transformateur varie selon l'impédance du circuit relié à l'autre. Elle est donc différente de la valeur à vide.

Dans les transformateurs de sortie, le nombre de tours de l'enroulement primaire, qui correspond à une impédance élevée, est beaucoup plus grand que celui de l'enroulement secondaire. On a donc :

$$Z_1 = Z_2 \times T^2$$

T est le rapport entre le nombre de tours des deux enroulements.

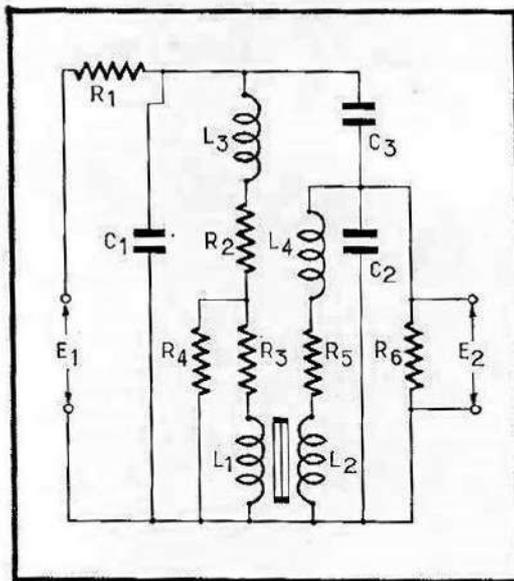


Fig. 82 b. — Un transformateur peut se représenter par un réseau complexe dans lequel :

- C_1 : capacité répartie du primaire L ;
- C_2 : capacité entre les deux enroulements ;
- L_1 : self-induction du primaire ;
- L_2 : self-induction du secondaire ;
- L_3 : induction de fuite du primaire ;
- L_4 : induction de fuite du secondaire ;
- R_1 : résistance interne de l'étage de sortie ;
- R_2 : résistance ohmique du primaire ;
- R_3 : pertes par hystérésis ;
- R_4 : pertes dans le fer (courants de Foucault) ;
- R_5 : résistance ohmique du secondaire ;
- R_6 : impédance du haut-parleur.

Inversement on peut trouver le rapport T si l'on connaît la valeur des deux impédances :

$$T = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$$

Le nombre de tours lui-même dépend d'une série de facteurs.

Le transformateur doit, en effet, conserver un rendement convenable sur toute l'étendue de la gamme de fréquences qu'on veut amplifier.

Il est, en particulier, nécessaire que la self-induction soit telle que l'adaptation à l'étage de sortie demeure correcte à la fréquence la plus basse que l'on désire reproduire.

Ce qu'on vient de dire se rapporte à un transformateur idéal.

Un transformateur réel, qu'on peut représenter par la figure 82 b, est affecté de diverses pertes qui en diminuent le rendement.

PERTES DANS LE NOYAU.

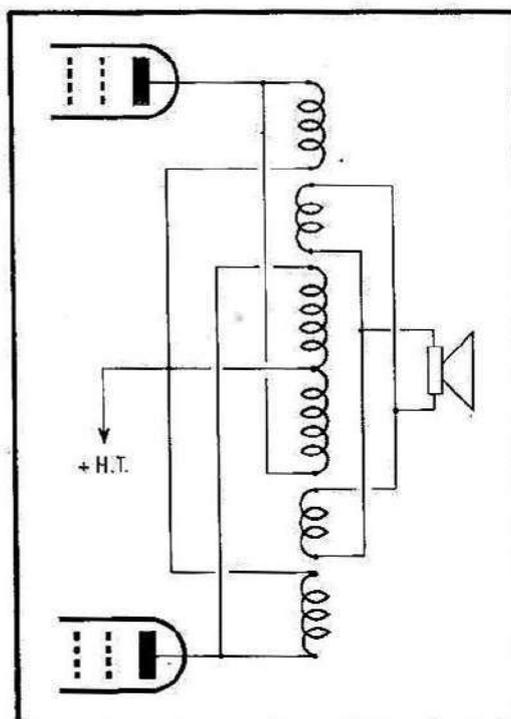
On distingue :

a) le courant magnétisant qui est consommé pour produire le flux magnétique. Il est de toute façon perdu, puisque ce flux doit être reconstitué à chaque alternance;

b) les courants de FOUCAULT;

c) la perte par hystérésis, due à l'aimantation rémanente.

Fig. 83. — On diminue les pertes dans un transformateur de sortie en divisant les enroulements en plusieurs sections.



Ces pertes peuvent être minimisées par l'emploi d'un matériau magnétique de bonne qualité et en quantité suffisante. Les tôles à grains orientés dont nous avons parlé sont particulièrement recommandées.

Il est nécessaire en outre de se tenir loin de la saturation. En d'autres termes, l'induction magnétique doit rester modérée.

PERTES DANS LE CUIVRE.

Il s'agit de la résistance ohmique du fil servant aux enroulements qui cause une chute de tension dans le circuit et par conséquent une diminution du courant inducteur.

PERTES PAR DISPERSION ET CAPACITE REPARTIE.

Tout le champ magnétique induit ne passe pas dans le noyau : une partie est dispersée et diminue de ce fait le couplage effectif entre primaire et secondaire.

D'autre part, la capacité entre spires et entre celles-ci et le noyau peut avoir un effet sur les fréquences élevées.

On remédie à ces pertes par des artifices de bobinage, notamment en divisant les enroulements en sections alternées serrées les unes contre les autres et connectées en série ou en parallèle (fig. 83).

Le transformateur de sortie est *un transformateur de puissance* et doit être calculé en conséquence. Il ne suffit pas de connaître l'impédance, il faut encore que le transformateur soit prévu pour la puissance modulée maximum qu'il devra supporter.

On utilise couramment la formule suivante pour calculer la section du noyau :

$$S \text{ (en cm}^2\text{)} = \sqrt{\frac{W_{\max} \times G \times 10^6}{f \times B \times D}}$$

W_{\max} = puissance maximum;

G = rapport en poids cuivre/fer (généralement 1,5);

f = fréquence la plus basse à reproduire (30 Hz pour les bons transformateurs);

B = induction magnétique (généralement 10 000 G);

D = densité de courant en A/mm² de section de fil (normalement 1,5).

Pour évaluation rapide, on peut utiliser la formule simplifiée :

$$S \text{ (en cm}^2\text{)} = 2,5 \sqrt{W_{\max}}$$

Cette formule ne convient toutefois que pour des puissances modestes.

Le tableau ci-dessous donne la section du noyau recommandée pour les transformateurs de qualité professionnelle :

W_{\max}	cm ²
3 à 4	4
10	7,5
15	10
25 à 30	16
50	25
100	40

Ces valeurs peuvent être diminuées d'environ 20 % lorsqu'on utilise des tôles à grains orientés (fig. 84).

Ajoutons encore que ces dimensions supposent l'emploi de tôles magnétiques de bonne qualité commerciale, dont les pertes ne dépassent pas deux watts au kilogramme.

On choisira de préférence une dimension de tôle telle que la section du noyau soit carrée, car c'est ainsi que l'on obtient, à nombre de tours égal, la plus petite longueur de fil, ce qui réduit les pertes dans le cuivre.

Ayant choisi la section du noyau, on calcule le nombre de tours par volt :

$$n_v = \frac{10^8 \sqrt{2}}{\omega \times B \times S}$$

La tension totale s'obtient par la formule :

$$V = \sqrt{W_m \times Z}$$

Enfin on trouve l'épaisseur du fil à utiliser par la formule :

$$d = \frac{1,27 \times I}{D}$$

I est l'intensité *en ampères* qu'on trouve par :

$$I = \sqrt{\frac{W_m}{Z}}$$

Les transformateurs vendus dans le commerce sont toujours livrés avec l'indication de l'impédance du primaire. Cette valeur est exacte en supposant le secondaire shunté par un circuit de travail (bobine mobile de haut-parleur ou ligne de transmission) ayant l'impédance prévue.

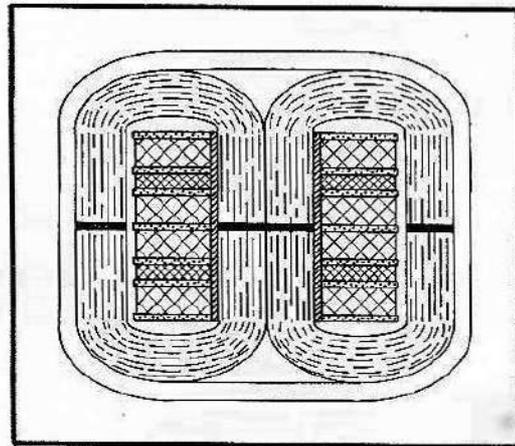


Fig. 84. — L'emploi de tôles à grains orientés permet une réduction de la section du noyau et diminue les pertes dans le fer.

Si la charge branchée aux bornes du secondaire n'a pas la valeur pour laquelle le transformateur a été calculé, l'impédance du primaire est également modifiée.

Exemple. — Un transformateur dont le primaire est indiqué comme ayant 3500 Ω et le secondaire est prévu pour une bobine mobile de 10 Ω . Nous y couplons une bobine mobile de 6 Ω ; quelle sera l'impédance nouvelle que le transformateur présentera à l'anode du tube ?

Soit :

$$10 \times T^2 = 3500 \Omega$$

donc :

$$T^2 = \frac{3500}{10} = 350$$

et

$$6 \times 350 = 2100 \Omega$$

Cette valeur correspond à une fréquence déterminée. A partir d'une certaine fréquence plus élevée; le transformateur sera adapté au tube parce que l'impédance croît avec la fréquence, mais il y aura une diminution de puissance dans les notes graves. Le son reproduit semblera grêle.

D'autre part, qu'arriverait-il si nous appliquions à ce transformateur une bobine mobile de 15 Ω ? L'impédance monterait à 5250 Ω . Elle n'arrivera bien entendu jamais à dépasser l'impédance propre du primaire à vide.

Dans les calculs qui précèdent on a supposé que le transformateur n'avait aucune perte. En réalité, il n'en est jamais ainsi, mais lorsqu'il s'agit de transformateurs de qualité professionnelle, on peut ne pas en tenir compte pour déterminer les conditions d'emploi.

Cependant les pertes peuvent atteindre 30 % dans les transformateurs commerciaux de qualité courante.

Jusqu'ici nous avons admis que le transformateur ne devait recevoir que du courant alternatif pur. Il n'en est pas ainsi, puisqu'il est normalement traversé en plus par le courant anodique de l'étage final. Dans le cas d'un tube unique, ce courant détermine une magnétisation permanente du noyau qui diminue sa perméabilité.

Pour réduire cet inconvénient on peut prévoir une section plus forte pour le noyau ou, encore, y ménager un entrefer, ce qui complique d'ailleurs les calculs.

Lorsque l'étage final est monté en push-pull, le défaut est en grande partie corrigé, car les courants d'anode provenant des deux tubes circulant en sens opposé, leur effet magnétisant tend à s'annuler.

Néanmoins il subsiste toujours des parties du noyau plus ou moins magnétisées. Au surplus, cet avantage disparaît lors du fonctionnement en classe B, car, dans ce cas, le courant anodique circule *alternativement* dans chaque moitié du primaire et le transformateur doit être plus largement calculé que pour les autres montages.

Il nous reste à expliquer pourquoi l'isolement entre spires doit être plus soigné qu'il n'apparaît à première vue. C'est que la tension de pointe instantanée susceptible d'apparaître aux bornes du transformateur dépasse considérablement celle de l'alimentation. Pour une tension, par exemple, de 250 volts, des tensions de pointe de l'ordre de 400 volts peuvent se produire à l'anode d'un tube de sortie.

Rappelons que toute variation d'intensité du courant circulant dans un bobinage produit un courant induit de sens opposé par l'effet de la self-induction.

Pendant le fonctionnement d'un tube, la tension instantanée appliquée à l'anode oscille de part et d'autre d'une valeur moyenne voisine de la tension d'alimentation. Si l'on suppose que l'impédance du transformateur est de 5000 ohms, un tube final délivrant 5 watts modulés provoquera, en faisant abstraction des pertes, une tension alternative de :

$$V_{\text{eff}} = \sqrt{5000 \times 5} = 158.1$$

soit une tension de pointe de 224,5 volts.

Si la tension continue appliquée à l'anode est de 250 volts, la tension effective variera pendant le fonctionnement entre 25,5 et 474,5 volts.

Tout élément connecté au circuit anodique devra donc être capable de supporter cette dernière tension.

Le secondaire des transformateurs de sortie est normalement pourvu de prises permettant l'adaptation à des haut-parleurs divers ou bien à une ligne de transmission. Il peut aussi être formé de sections pouvant être mises en parallèle ou en série, ce qui évite les bouts morts et assure un meilleur couplage.

Quand, au lieu de tubes électroniques, on utilise, pour l'étage final, des transistors, le transformateur de sortie présente des caractéristiques très différentes.

Comme nous l'avons vu, le transistor est un amplificateur de courant qui fonctionne à très basse tension (de 6 à 18 volts pour les modèles de puissance). Le primaire du transformateur doit être prévu pour le passage de courant de très forte intensité : de l'ordre de plusieurs ampères aux pointes de modulation.

D'autre part, le rapport de transformation est très faible : par exemple $2,5 + 2,5$ à 1 pour une bobine mobile de 2,5 ohms.

Les règles pour le calcul du noyau exposées plus haut s'appliquent également ici.

2. — Les transformateurs de liaison.

Une chaîne d'amplification comprend, depuis la source de courant B. F. jusqu'au haut-parleur, diverses parties qui constituent fréquemment des éléments distincts placés à une certaine distance l'un de l'autre et reliés par câble.

Comme l'impédance de sortie d'une partie de l'appareillage n'est pas forcément adaptée à celle de l'entrée de l'élément suivant, un transformateur est souvent utilisé pour réaliser l'adaptation.

C'est notamment le cas pour les microphones électrodynamiques et à ruban et pour certaines têtes de lecture magnétiques à très basse impédance.

Au début de la chaîne la puissance en jeu est très faible, de sorte que le transformateur peut être de dimensions réduites et construit tout autrement qu'un transformateur de sortie. On peut notamment utiliser ici un noyau en acier à très haute perméabilité, malgré qu'il soit facilement saturable, ou même en ferrite. On peut ainsi obtenir une self-induction élevée avec un nombre de spires relativement réduit, ce qui diminue les pertes dans le cuivre.

Cependant les transformateurs de liaison étant généralement suivis d'une amplification considérable, il est nécessaire de les blinder très soigneusement. Les champs magnétiques ambiants engendrés par les circuits d'alimentation ou autres sont en effet susceptibles d'y induire des signaux qui provoqueraient du ronflement et du bruit de fond.

La liaison entre étages B. F. n'est plus assurée de nos jours au moyen de transformateurs.

Le couplage par résistance-capacité est à tous points de vue préférable.

On utilise cependant encore ce système dans les amplificateurs à transistors. Il s'agit alors de transformateurs d'intensité très différents de ceux utilisés jadis pour les tubes. Le secondaire, au lieu d'être shunté par l'espace grille-cathode, qui équivaut pratiquement à un circuit ouvert, est relié à un dispositif dont l'impédance d'entrée est très basse et qui consomme du courant. Un cas analogue se présente pour l'attaque de certains tubes de puissance fonctionnant en classe B.

On trouve encore d'autres transformateurs dans la technique de l'amplification B. F. : ce sont ceux qu'on utilise dans un réseau de distribution de courant B. F. alimentant un nombre plus ou moins grand de haut-parleurs.

Leurs caractéristiques générales les rapprochent des transformateurs de sortie.

Nous en reparlerons dans la troisième partie du livre.

L'AMPLIFICATION B F

I. — L'amplification de tension.

La transmission d'un signal peut s'effectuer sous forme :

- a) d'une variation de tension;
- b) d'une variation d'intensité;
- c) d'une variation à la fois de la tension et de l'intensité (combinaison de a et b).

Un tube électronique fonctionne par l'action des *tensions* appliquées à sa grille de commande.

Ce sont donc des *variations de tension* que nous devons obtenir partout où l'énergie doit être appliquée à un tube, c'est-à-dire dans tous les *étages* d'amplification intermédiaires entre la source initiale des signaux et l'étage de sortie qui actionne directement le haut-parleur.

Dans l'amplification par transistors nous devons tenir compte à la fois de la tension et de l'intensité.

A) PAR TUBES.

Le problème se ramène à obtenir dans le circuit d'anode d'un tube une variation de tension supérieure, mais *rigoureusement proportionnelle* à celle qui est appliquée à sa grille, et à la transmettre par un dispositif de *couplage* approprié à la grille du tube suivant.

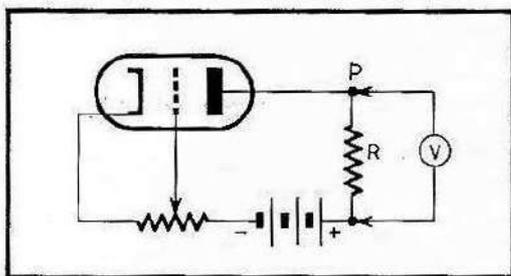


Fig. 85. — La tension aux bornes de R dépend de la tension négative de grille et varie avec celle-ci.

Considérons la figure 85.

Nous savons que si nous rendons la grille moins négative, le courant anodique augmente. Cet accroissement d'intensité dans la résistance R augmente la chute de tension dans celle-ci, et il s'ensuit, par conséquent, un *abaissement de la tension* effectivement appliquée à l'anode.

La tension au point P dépendra donc de la tension de la grille, et tout changement de tension de celle-ci aura pour effet un changement de tension au point P.

Admettons que les caractéristiques (données par le fabricant) du tube soient les suivantes :

V_a (max)	=	250 V
I_a	=	8 mA
V_g	=	-8 V
μ	=	20
R_i	=	10 000 Ω
S	=	2 mA/V

Pour une polarisation de la grille de -8 V et en l'absence de la résistance R , nous aurions un débit de 8 mA et la pleine tension de 250 V serait appliquée à l'anode.

Si nous intercalons entre celle-ci et l'alimentation une résistance R de 50 000 Ω , valeur choisie arbitrairement, nous constaterons que la tension tombe aux environs de 165 V et que le débit est ramené à 1,75 mA.

Ces indications, trouvées expérimentalement, auraient d'ailleurs pu être déduites de la famille de courbes V_a/I_a se rapportant à ce tube (fig. 86).

Si l'on ramène la polarisation négative de la grille de -8 à -4 V, on constatera que le débit est devenu 2,5 mA, tandis que la tension au point P est tombée à 125 V.

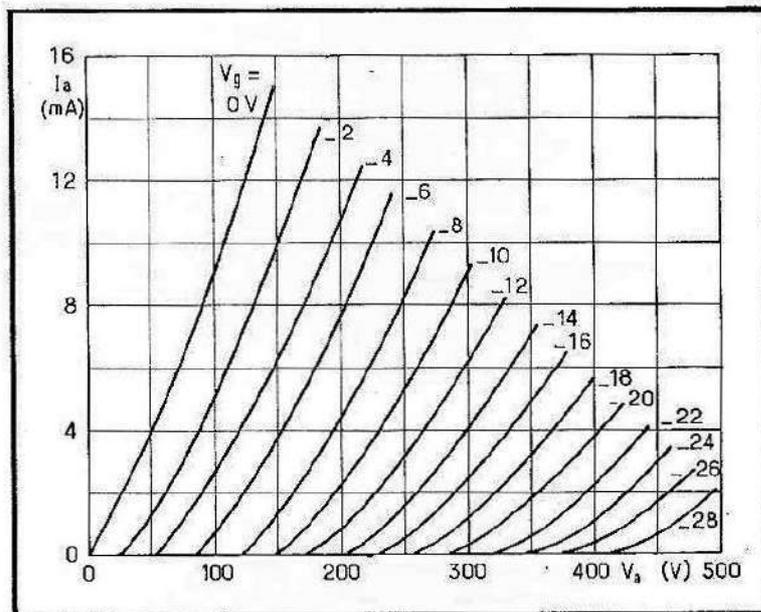


Fig. 86. — Caractéristiques I_a/V_a d'une triode.

Une différence de tension de 4 V à la grille a provoqué une différence de tension de $165 - 125 = 40$ V à l'anode. Par conséquent, le gain en tension est de 10.

Remarquons que le coefficient d'amplification donné par le constructeur (et d'ailleurs indiqué par la caractéristique statique du tube) est de 20. Rappelons que le gain que l'on peut obtenir d'un tube est toujours inférieur au coefficient d'amplification théorique.

Pour mieux nous représenter le fonctionnement du tube en amplificateur de tension, nous pouvons redessiner autrement le schéma de la figure 85. En effet, au point de vue de son fonctionnement, un tube peut être assimilé à une résistance variable.

Dans la figure 87, nous la représentons donc par R_i en série avec une résistance fixe R_s . Le tout est placé aux bornes d'une source de courant (batterie, par ex.). R_2 est la résistance d'anode R de la figure 85.

Admettons que nous puissions faire varier R_1 de 0 à l'infini. Il est évident que lorsque $R_1 = 0$, la tension entre le point A et le point B est également 0, puisque ce dernier point est en contact direct avec le pôle négatif de la batterie. Par contre, lorsque la valeur de R_1 devient infinie, la tension au point B est égale à la pleine tension de la batterie, car, dans ce cas, aucun courant ne circule dans le circuit et, par suite, il ne peut y avoir de chute de tension.

Avec ce système, on pourrait donc faire varier la tension du point B de 0 à celle de la source.

Toutefois, si R_1 est remplacé par un tube, la variation de tension possible du point B est beaucoup plus limitée. En effet, d'une part la résistance offerte par le tube n'est jamais égale à zéro, et d'autre part, on ne peut pousser la polarisation au point d'annuler le courant d'anode, car, bien avant d'y

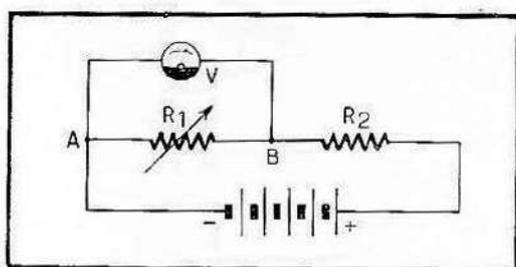


Fig. 87. — On peut, pour le raisonnement, assimiler le tube à une résistance variable R_1 .

arriver, la caractéristique cesse d'être rectiligne. On ne peut, en réalité, utiliser qu'une partie limitée de celle-ci si l'on veut conserver un taux de distorsion acceptable.

Nous devons donc, de nouveau, modifier le schéma (fig. 88 a). Représentons par R_2 la résistance minimum du tube en dessous de laquelle on ne peut pas descendre : nous voyons tout de suite que R_2 et R_3 forment ensemble un potentiomètre et que le point B ne recevra jamais qu'une partie de la tension développée aux bornes de l'ensemble.

Supposons que $R_3 = 10\ 000$ et $R_2 = 50\ 000\ \Omega$ et que $R_1 = 0$, conditions qui correspondent à un tube où la tension négative de grille serait nulle (ce qui ne devrait jamais se produire en pratique). Nous voyons que le point B sera encore à une tension égale à $1/6^e$ de la tension totale et non à 0. D'autre part, pour $R_1 =$ (polarisation maximum), ce qui serait un autre cas limite, le point B atteindra bien la tension d'alimentation maximum au repos, c'est-à-dire avec une tension de grille fixe, mais en fonctionnement d'autres facteurs interviennent, qui limitent la tension.

Comme le tube, dans le cas de signaux acoustiques, n'amplifie pas une tension continue, mais bien des tensions alternatives, nous rendrons plus clair encore ce qui se passe en schématisant le système suivant la figure 88 b. Le tube est ici représenté par un *alternateur* aux bornes duquel se trouve le potentiomètre formé par les résistances R_1 et R_3 . Il est évident que la tension alternative du point B ne sera qu'une fraction de la tension alternative totale.

On voit aussi que cette fraction sera d'autant plus grande que la valeur de R_2 sera plus élevée par rapport à R_1 .

On en déduit que le rendement sera d'autant meilleur ou, si l'on veut, que l'on approchera d'autant plus du coefficient d'amplification théorique du tube, que R_2 sera plus résistant. Mais on est également limité dans cette voie, car une résistance élevée diminue trop la tension anodique effective et, par suite, l'amplitude du signal que le tube peut accepter, à moins d'augmenter exagérément la tension d'alimentation.

Ce que nous avons dit jusqu'à présent peut se résumer dans la formule :

$$\text{amplification effective} = \mu \frac{R_a}{R_a + R_i} = S \frac{R_i \times R_a}{R_i + R_a}$$

R_a = résistance de charge

R_i = résistance interne

μ = coefficient d'amplification

S = pente.

Enfin, la courbe de la figure 89 représente l'amplification de tension d'un tube par rapport à la valeur de la résistance de charge. Cette courbe correspond au tube imaginaire étudié plus haut et montre qu'il n'y a aucun avantage

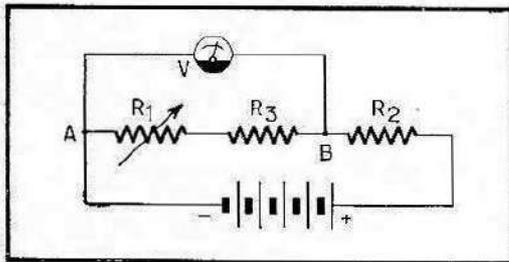


Fig. 88 a. — La résistance interne du tube ne peut jamais être nulle. R_3 représente sa valeur minimale.

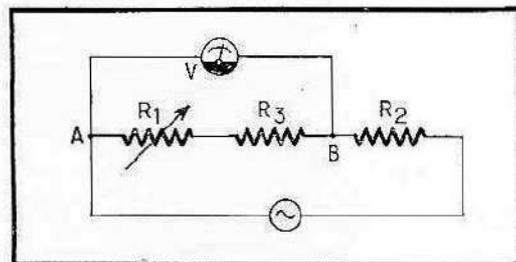


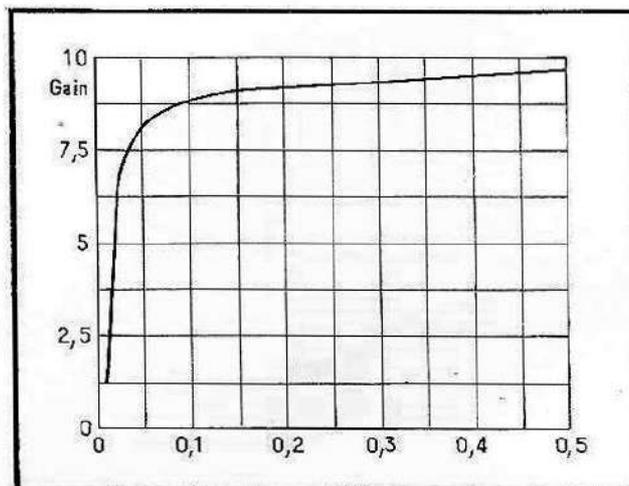
Fig. 88 b. — Circuit équivalent d'un tube amplifiant un signal alternatif.

à dépasser une certaine valeur pour cette résistance. A partir de 50 000 Ω environ, le *gain* n'augmente que fort lentement.

Dans les applications qui nous concernent, le rôle du tube est d'amplifier des tensions alternatives de *fréquences diverses*.

Un condensateur électrique arrête le courant continu mais permet le passage du courant alternatif. On peut en ce cas, pour la commodité du raisonnement, l'assimiler à une *résistance*.

Fig. 89. — L'amplification croît avec la valeur de la résistance d'anode jusqu'à une certaine valeur au-delà de laquelle le gain n'augmente que d'une manière insignifiante.



Toutefois, celle-ci ne se comporte pas comme une résistance ordinaire : elle *varie avec la fréquence*. Pour cette raison, on emploie le nom plus général de *réactance*. La valeur de celle-ci dépend à la fois de la capacité et de la fréquence.

Entre les diverses électrodes d'un tube existe toujours une certaine capacité, si minime soit-elle.

La plus importante de ces capacités, au point de vue des effets qui en résultent, se trouve entre l'anode et la grille de commande.

Elle forme entre ces deux éléments *un couplage* qui permet à une partie de la tension alternative présente à l'anode de retourner à la grille en *phase opposée* au signal initial. C'est l'*effet Miller*.

Il s'agit d'un phénomène de contre-réaction. Toutefois, comme la capacité qui sert de passage est fort petite, seules les fréquences très élevées sont atténuées. Mais notons que l'« effet Miller » est d'autant plus important que le coefficient d'amplification du tube est plus élevé.

Ayant obtenu des signaux amplifiés à l'anode d'un premier tube, nous devons les appliquer à la grille du tube suivant.

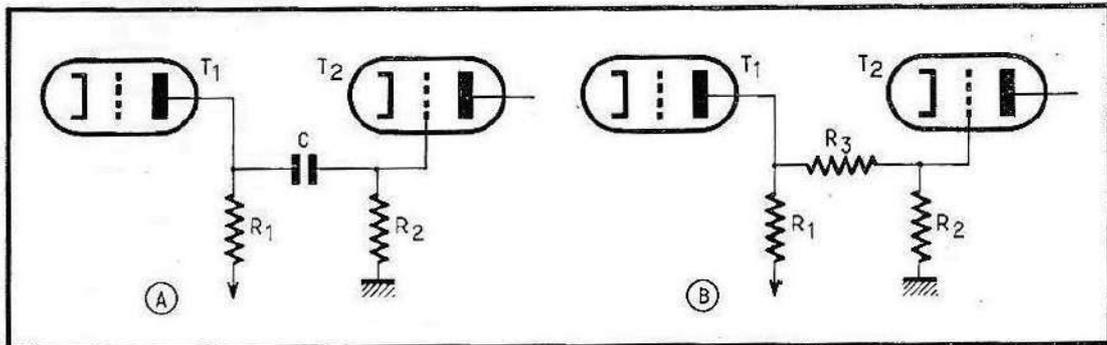


Fig. 90. — En a, schéma classique d'un couplage par résistance-capacité.

En b, C/R₂ forme un diviseur de tension qui, pour une fréquence donnée, peut être figurée par R₃. L'ensemble R₃/R₂ se trouvant en parallèle sur R₁ diminue la valeur de cette résistance.

Etant donné la différence de tension entre l'anode d'un tube et la grille du tube suivant, la solution la plus courante est l'interposition d'un condensateur (fig. 90). R₂ est la résistance destinée à fixer le potentiel continu de la grille du tube suivant.

Remarquons que l'ensemble de C et de R₂ forme un diviseur de tension (C pouvant être, pour le raisonnement, remplacé par une résistance R₃).

Il s'ensuit qu'une partie seulement de la tension développée à l'anode parviendra à la grille.

De plus, cet ensemble est en parallèle avec la résistance d'anode.

La résistance de charge réelle du tube est donc :

$$R_a = \frac{R_i + R_e + R_2}{R_1 \times (R_e + R_2)}$$

Il faut donc prendre C suffisamment grand pour que son impédance soit faible en regard de R₂.

La figure 91 représente les circuits équivalents d'un étage d'amplification à résistance-capacité aux fréquences moyennes, basses et hautes.

Le condensateur de couplage C peut être négligé aux fréquences moyennes et élevées si sa capacité a été bien choisie.

Aux fréquences élevées, l'effet Miller peut se faire sentir ainsi que celui des diverses capacités parasites.

L'impédance d'une capacité de 0,1 μF est de 55 000 Ω environ à la fréquence de 30 Hz. Si la résistance de grille est de 1 MΩ ou même de 0,5 MΩ, le rapport est satisfaisant.

Avec une résistance de grille de $0,25 \text{ M}\Omega$, le rendement est encore acceptable, si l'on tient compte du peu de sensibilité de l'oreille vis-à-vis d'un changement d'intensité de l'ordre de 20 % seulement.

Une capacité de $0,05 \mu\text{F}$ suffit si l'on accepte une atténuation des fréquences inférieures à 50 Hz.

On a vu que l'ensemble $C + R_2$ est en parallèle sur R_1 .

Si l'on veut que la valeur de l'impédance de charge ne soit pas trop diminuée par ce shunt, il faut, ou bien que R_2 soit très élevé, ou bien que R_1 soit faible par rapport à CR_2 .

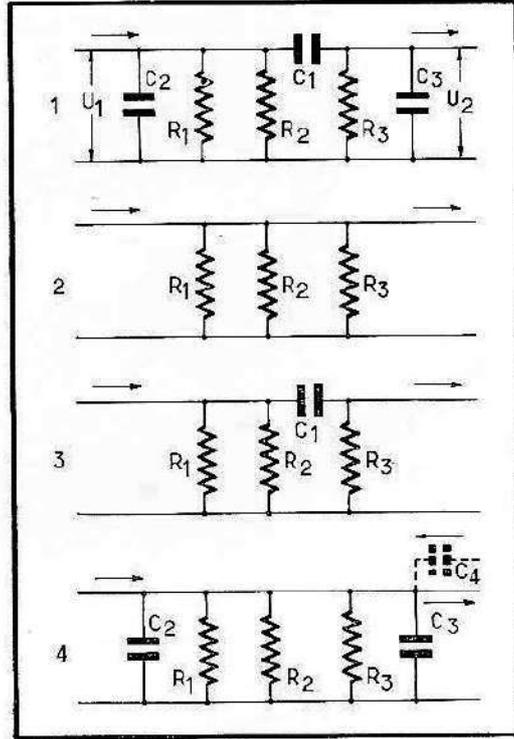
Fig. 91. — Circuits équivalents d'un couplage par résistance-capacité.

En 1, R_1 , C_2 résistance interne et capacité anode-cathode du tube précédent ;
 R_2 résistance d'anode ;
 R_3 résistance de grille de tube suivant ;
 C_1 condensateur de couplage ;
 C_3 capacité d'entrée du tube suivant.

En 2, circuit simplifié représentant le fonctionnement aux fréquences moyennes. La capacité C_1 ayant été judicieusement choisie peut être considérée comme inexistante.

En 3, fonctionnement aux fréquences basses, l'influence de C_1 se fait sentir.

En 4, fonctionnement à l'extrémité supérieure de la bande passante. C_4 représente l'effet Miller qui tend, ainsi que C_2 et C_3 , à diminuer le gain.



Avec $R_1 = 50\,000 \Omega$, $C = 0,1 \mu\text{F}$ et $R_2 = 500\,000 \Omega$, la résistance totale de charge est encore de $45\,000 \Omega$, ce qui est acceptable.

Suivant l'étage où se trouve le tube, les signaux alternatifs appliqués à sa grille ont une amplitude plus ou moins grande.

Par ailleurs, les tensions alternatives du circuit d'anode doivent avoir une amplitude suffisante dans l'avant-dernier étage pour utiliser toute l'étendue de la caractéristique de l'étage final.

Le plus grand signal que la grille d'un tube puisse admettre est fonction, d'abord de ses caractéristiques, ensuite de la tension appliquée à l'anode.

Notre tube imaginaire, qui correspond approximativement à un élément de 12AU7 (ECC82), permettrait l'application d'un signal de $3 V_{\text{eff}}$ à la grille. Le signal sortant serait d'environ $40 V_{\text{eff}}$, soit un gain approximatif de 13.

La distorsion, dans ces conditions, serait de 3 % environ. Un taux beaucoup trop élevé pour un étage intermédiaire. Si le signal entrant est plus faible on peut utiliser un tube donnant un gain plus élevé, par exemple un élément de tube 12AX7 (ECC83) dont les caractéristiques sont :

$$\begin{aligned} V_a &= 250 \text{ V} \\ V_g &= -2 \text{ V} \\ R_i &= 62,5 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu &= 100 \\ I_a &= 1,2 \\ S &= 1,6 \text{ mA/V} \end{aligned}$$

Avec une résistance d'anode de $0,22 \text{ M}\Omega$, l'amplification de tension est de l'ordre de 60, soit environ six fois ce que l'on obtenait du tube précédent.

Mais, attention! le signal maximum admissible à la grille, sans distorsion appréciable, n'est que de $0,1 \text{ V}_{\text{eff}}$ environ. La tension alternative recueillie à l'anode est dans ces conditions d'environ 6 V.

EMPLOI D'UNE PENTODE.

Ce type de tube présente, par rapport à la triode, une différence en ce que la présence d'une électrode, portée à une tension fixe, réduit considérablement l'effet de la tension sur le courant d'anode.

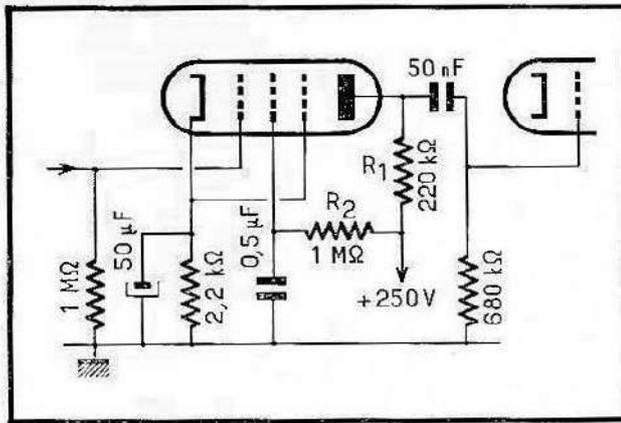


Fig. 92. — Montage classique d'une pentode en amplificatrice B. F.

Celui-ci reste donc presque constant, quelle que soit la tension appliquée. La troisième grille des pentodes ne joue qu'un rôle passif et n'intervient pas dans l'amplification.

Les caractéristiques ci-dessous sont celles du tube EF86 conçu pour l'amplification B. F. et fort utilisé pour cet emploi :

V_a	$=$	250	V	I_a	$=$	3	mA
V_{g3}	$=$	0		I_{g2}	$=$	0,6	mA
V_{g2}	$=$	140	V	S	$=$	2	mA/V
V_{g1}	$=$	-2	V	ρ	$=$	2,5	$\text{M}\Omega$

La figure 92 montre un exemple d'emploi de ce tube. Avec les valeurs indiquées l'amplification de tension atteint 180. Mais la tension recueillie à la sortie doit être limitée à 10 V environ pour conserver un taux de distorsion acceptable. Le signal d'entrée est, dans ces conditions, réduit à 55 mV.

La tension appliquée à la grille-écran, et qui dépend de la valeur de la résistance R_s , détermine le gain que l'on peut obtenir, mais influence également la grandeur du signal que l'on peut appliquer à la grille de contrôle.

La figure 93 montre le rapport entre la valeur du signal entrant, le signal sortant et le taux de distorsion pour le montage de la figure 92.

Les pentodes sont utilisées de préférence pour le premier étage de la chaîne d'amplification et dans les pré-amplificateurs.

Dans certains cas, généralement dans le but de simplifier l'approvisionnement en tubes, on utilise des pentodes montées en triode. Il suffit pour cela de réunir la grille-écran à l'anode (fig. 94). Les caractéristiques du tube donné comme exemple plus haut deviennent alors très approximativement :

V_a	$=$	250	V	R_i	$=$	15	$\text{k}\Omega$
V_{g1}	$=$	-5	V	S	$=$	2,8	mA/V
I_a	$=$	4	mA				

La liaison par résistance-capacité n'est pas exempte de défauts. Il est difficile de lui donner une constante de temps permettant la transmission uniforme de toutes les fréquences du spectre sonore. Elle introduit un certain déphasage aux fréquences élevées, ce qui peut créer des difficultés pour la stabilité de l'amplificateur lorsque la boucle de contre-réaction englobe plusieurs étages.

Enfin, étant donné la grande différence de tension entre l'anode d'un tube et la grille du tube suivant et le fait que cette dernière est reliée à la masse par une résistance de valeur élevée, le moindre courant de fuite à travers le condensateur va porter cette grille à une tension positive.

Il est cependant possible de réaliser un couplage direct entre l'anode d'un tube et la grille du tube suivant. Il suffit pour cela que la tension d'anode soit légèrement inférieure à la tension, par rapport à la masse, de la cathode de ce tube. Ce cas se présente lorsque la résistance de cathode est très élevée, comme c'est le cas dans certains montages décrits plus loin (fig. 95). Ce mode de liaison permet la transmission de toutes les fréquences et même l'amplification d'une tension continue.

B) PAR TRANSISTORS.

Nous avons vu qu'un transistor pouvait être plus ou moins assimilé à une triode et utilisé de trois façons (fig. 96). Dans l'amplification B. F. c'est le montage A à émetteur commun qui est employé le plus souvent.

L'amplification par transistors n'est pas une simple amplification de tension comme dans le cas des tubes. Il y a ici, à chaque étage, une certaine consommation de puissance, car l'impédance d'entrée du transistor est relativement faible et le circuit est traversé par un courant important.

Le couplage entre les étages peut se faire par transformateurs, par résistance-capacité ou par une liaison directe.

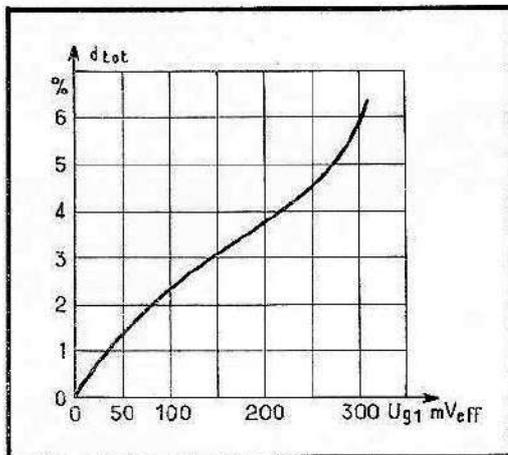
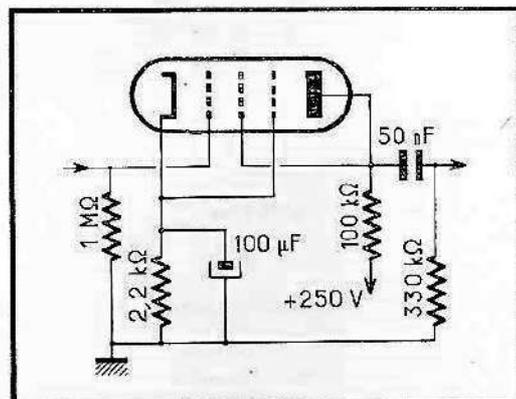


Fig. 93. — Rapport du taux de distorsion et de la tension du signal d'entrée.

Fig. 94. — Montage d'une pentode en triode.



Le premier moyen assure le gain maximum. Le transformateur permet en effet une adaptation plus correcte, entre l'impédance de sortie d'un transistor et l'impédance d'entrée du suivant, que le circuit RC.

Malgré cet avantage on n'utilise généralement les transformateurs que là où une très haute fidélité n'est pas requise. Des transformateurs de liaison capables d'assurer une transmission régulière de toute la bande acoustique seraient à la fois très coûteux et très encombrants. Leur emploi ferait disparaître une des raisons de la supériorité du transistor sur le tube.

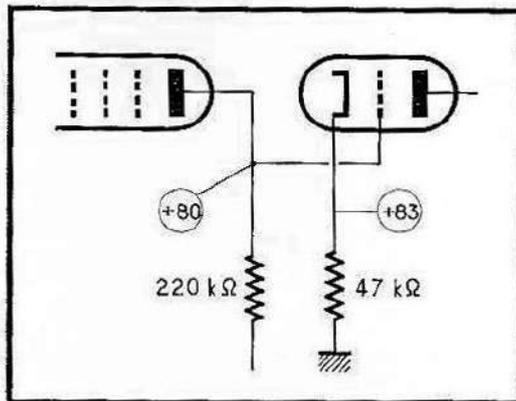


Fig. 95. — Une liaison directe est possible quand la tension de cathode du tube commandé est plus élevée que celle de l'anode du tube précédent.

La liaison par résistance-capacité est le mode de couplage le plus pratique et c'est celui que l'on trouve dans la plupart des amplificateurs actuels (fig. 97).

La valeur des résistances est fort différente de celle qu'on trouve dans les amplificateurs à tubes en raison de la faible impédance des transistors. D'autre part le condensateur de couplage doit avoir, pour cette même raison, une très grande capacité. C'est généralement un condensateur électrolytique.

La liaison directe est également utilisable avec les transistors et la figure 98 en montre un exemple.

Une des faiblesses du transistor est d'être très sensible, non seulement à la température ambiante, mais aussi à celle engendrée par son propre fonctionnement. Ce qui oblige à compliquer le circuit d'un étage amplificateur en y ajoutant un système de compensation.

Il est à noter que celui-ci, qui comprend simplement une résistance supplémentaire ainsi que, parfois, un condensateur (fig. 99), se confond souvent avec un circuit de contre-réaction dont il sera parlé dans un autre chapitre.

On peut obtenir une régulation thermique plus efficace en ajoutant au circuit une thermistance (fig. 100).

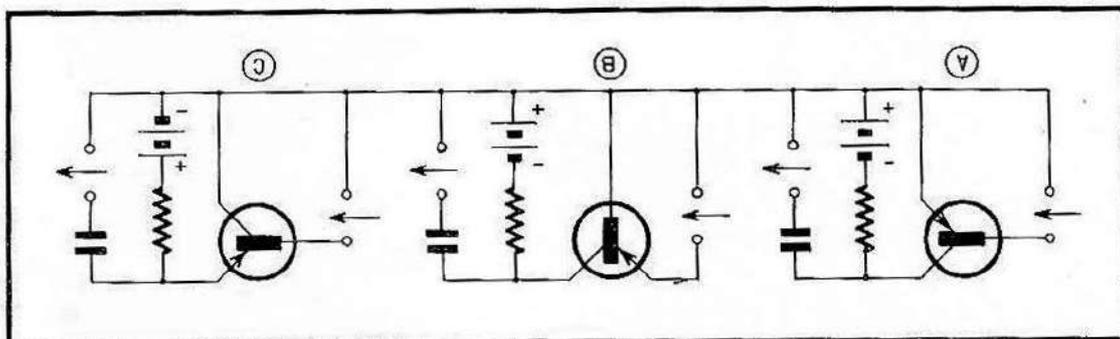


Fig. 96. — En a, montage à émetteur commun le plus souvent utilisé pour l'amplification B. F. — En b, montage à base commune employé surtout en H. F. — En c, montage à collecteur commun.

2. — L'inversion de phase.

Pour commander les grilles d'un étage final en push-pull il est nécessaire de disposer de deux signaux déphasés de 180° l'un par rapport à l'autre.

Dans les amplificateurs primitifs d'il y a une trentaine d'années, ce déphasage était souvent obtenu à l'aide d'un transformateur de couplage dont le secondaire comportait une prise médiane.

Ce système est complètement abandonné, sauf deux exceptions : les amplificateurs de très grande puissance dont l'étage final fonctionne en classe B et, dans certains cas, la commande d'un étage final à transistors (fig. 101).

Normalement l'étage d'inversion de phase comprend des liaisons par résistance-capacité et l'on utilise le fait que le signal sortant d'un tube est en opposition de phase avec le signal entrant (fig. 102).

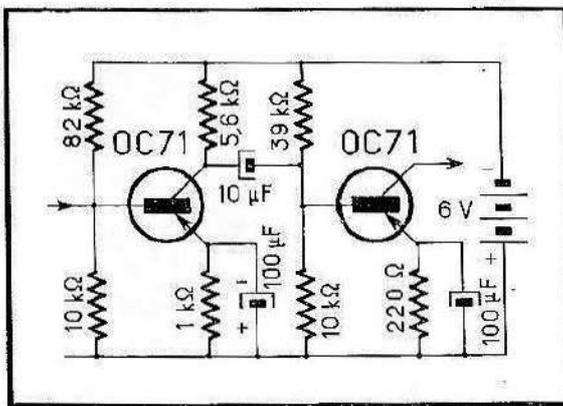


Fig. 97. — Amplification B. F. à couplage RC.

Fig. 98 (ci-contre). — Etage B. F. à liaison directe.

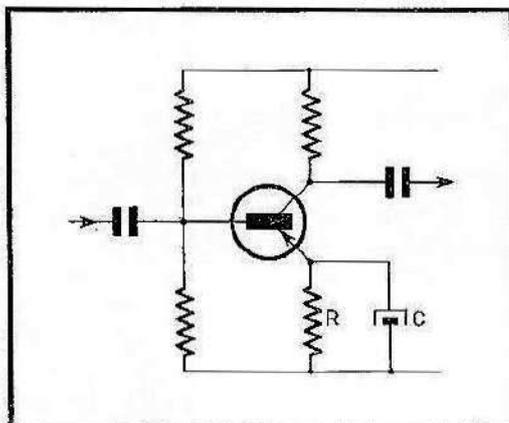
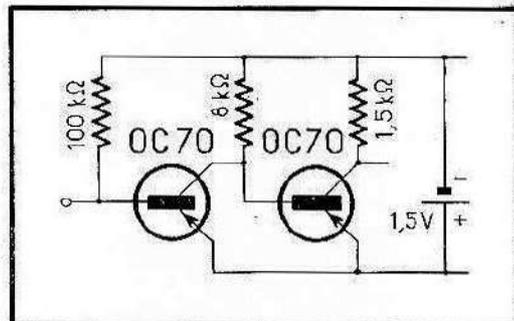


Fig. 99. — Montage avec compensation thermique.

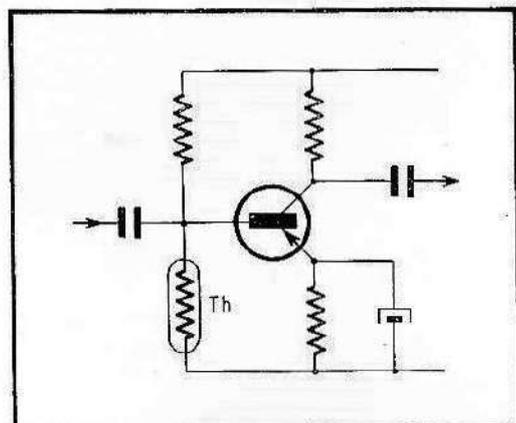


Fig. 100. — Une thermistance assure une régulation plus efficace.

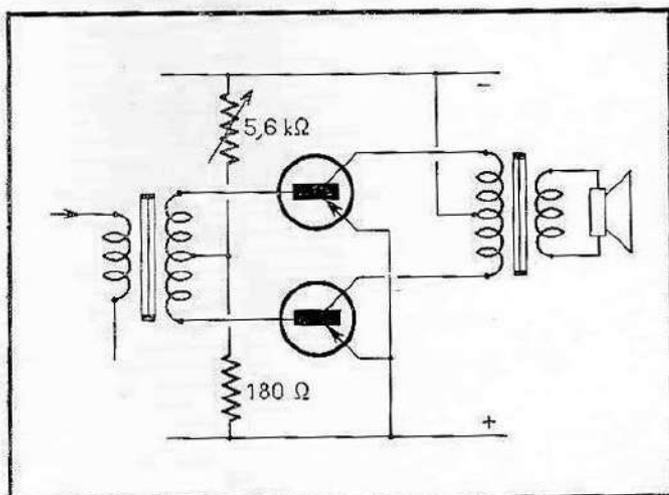
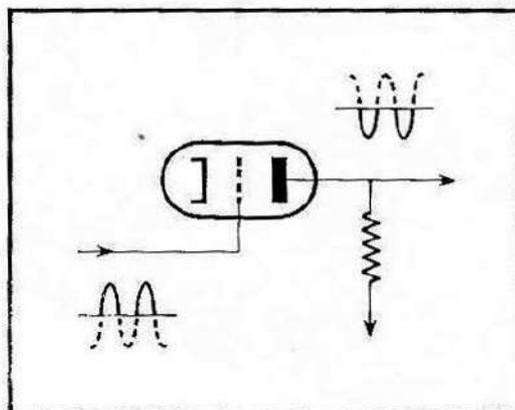


Fig. 101. — Etage final à transistors commandé par transformateur.

Fig. 102. — Le signal sortant d'un tube est en opposition de phase avec le signal entrant.



En effet, lorsque la grille devient plus négative le courant anodique diminue, la chute de tension dans la résistance diminue également et, par conséquent, la tension appliquée à l'anode augmente.

Il suffit donc, en principe, d'intercaler un tube supplémentaire avant l'un des deux tubes de sortie (fig. 103).

Il faudrait évidemment, pour que ces derniers reçoivent des signaux de même amplitude, que ce tube supplémentaire n'amplifie pas le signal.

Pour obtenir un résultat équivalent, il suffit de ne lui fournir qu'une fraction seulement du signal issu du tube précédent.

On peut, à cet effet, relier la grille à un diviseur de tension (fig. 104).

Si, par exemple, le gain du tube A est de 10, on lui fournira 1/10 de la tension du signal fourni par le tube B.

Pour cela on prendra :

$$R_2 = \frac{R_1}{9}$$

soit, par exemple, $R_1 = 450\,000\ \Omega$ et $R_2 = 50\,000\ \Omega$.

Comme A et B fonctionnent en phase opposée, il n'y a aucun inconvénient à relier leurs cathodes à une résistance commune R_3 qui n'a pas besoin d'être shuntée par un condensateur car, théoriquement, il ne doit s'y produire aucune chute de tension alternative.

La figure 105 montre une variante de ce système qui a parfois été utilisée.

Fig. 103. — Inversion de phase au moyen d'un tube supplémentaire. Ce montage suppose l'emploi d'un tube T à gain nul.

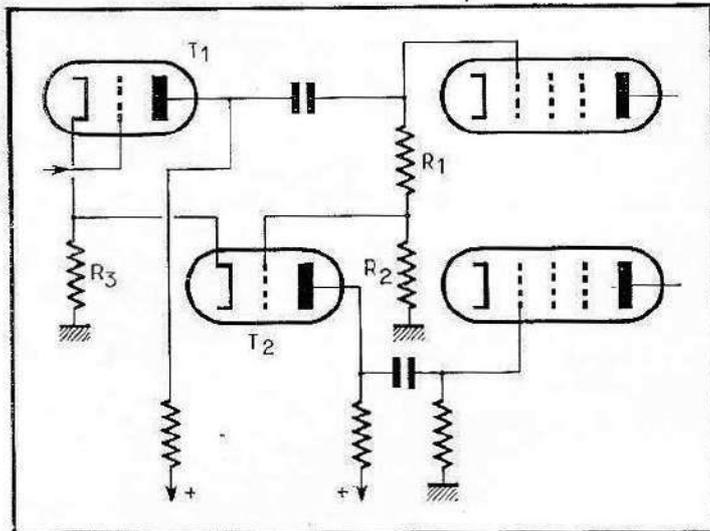
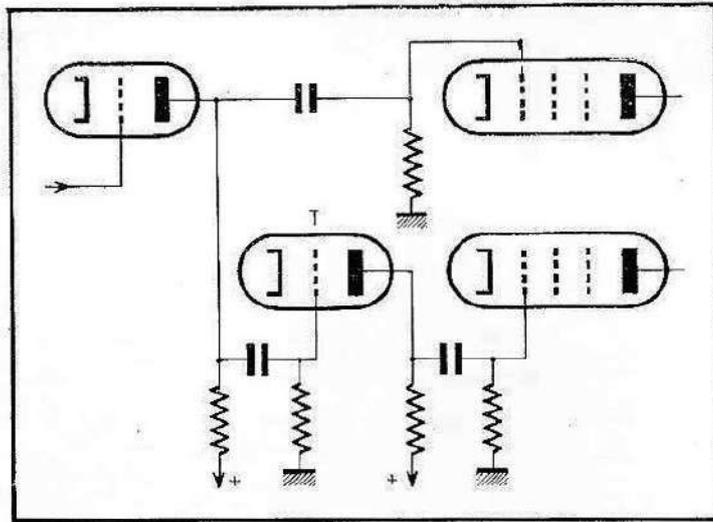
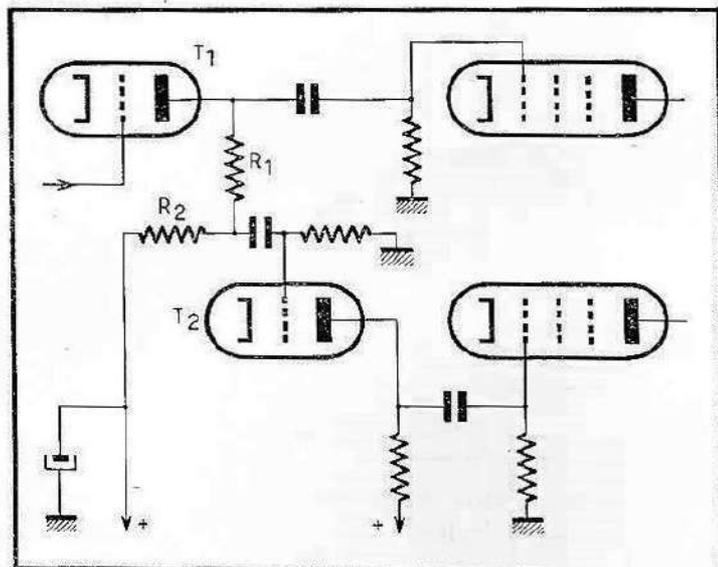


Fig. 104. — Le diviseur de tension $R_1 R_2$ fournit au tube T_2 une fraction du signal sortant de T_1 .

Fig. 105. — Variante du montage précédent ; $R_1 R_2$ forment le diviseur de tension.



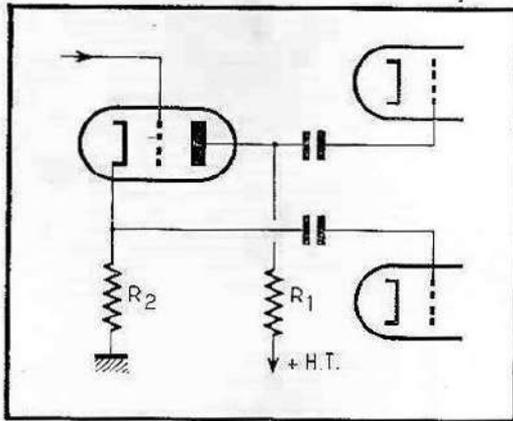


Fig. 106. — L'inverseur cathodyne. Les tensions aux bornes de R_1 et R_2 sont en phase opposée.

Ce type de montage n'est pas sans défaut. Il introduit une liaison RC supplémentaire vers le second tube de sortie. Il n'est donc pas symétrique. La constante de temps des deux liaisons n'est pas la même et, à certaines fréquences, les tensions appliquées aux deux grilles ne sont pas exactement décalées de 180° .

L'inverseur cathodyne ne présente pas le même inconvénient. Il est basé sur le fait que les tensions alternatives qu'on peut recueillir à la cathode et à l'anode d'un même tube sont en phase opposée.

Considérons un tube dont la cathode est reliée au côté négatif de la source d'alimentation par une résistance R_2 de valeur relativement élevée, ce qui la porte à une tension positive, tandis que l'anode est alimentée à travers une résistance R_1 (fig. 106).

Si le courant traversant le tube diminue, la chute de tension aux bornes des deux résistances diminuera également, ce qui aura pour effet de faire baisser la tension positive de la cathode et d'augmenter celle de l'anode. Si l'on donne à R_1 et R_2 la même valeur, la variation de tension sera évidemment la même aux deux électrodes.

La polarisation de la grille de commande peut être obtenue de deux façons : au moyen d'une prise sur la résistance de cathode (fig. 107) ou en la reliant à un diviseur de tension branché entre le côté positif de l'alimentation et la masse (fig. 108).

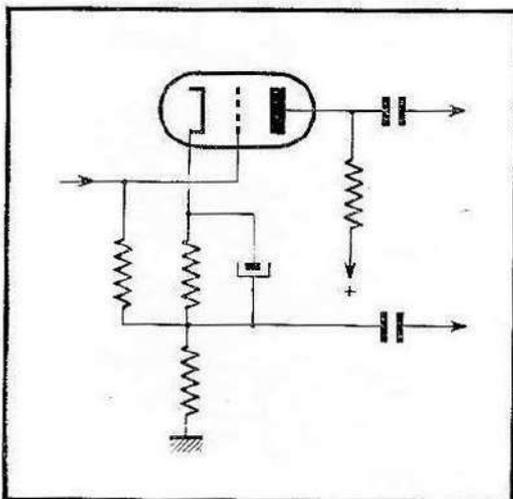


Fig. 107. — Une prise sur la résistance de cathode fournit la tension de grille.

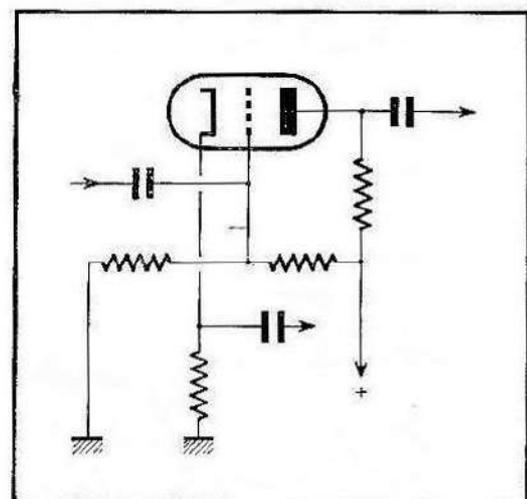


Fig. 108. — La tension de grille est obtenue à partir d'un diviseur de tension branché sur l'alimentation H. T.

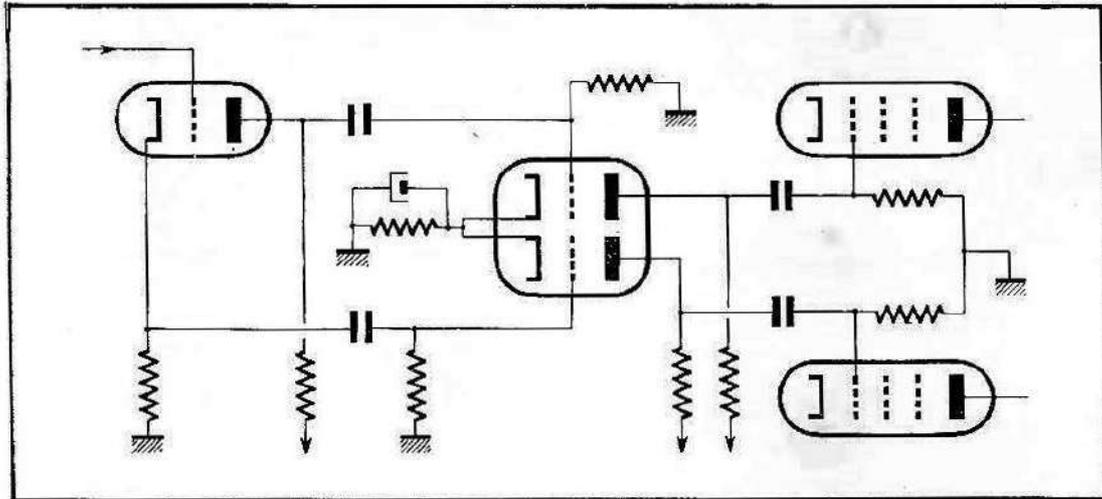


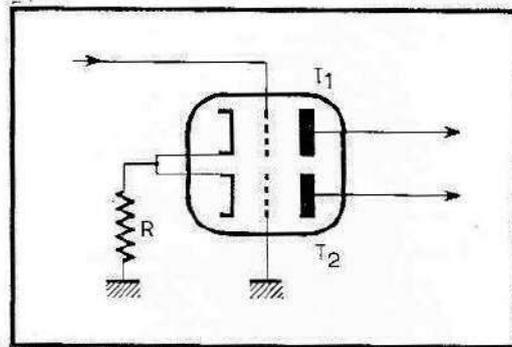
Fig. 109. — Quand l'inverseur cathodyne ne peut fournir un signal suffisant on le fait suivre d'un étage B. F. supplémentaire.

Il est à noter que le tube inverseur est soumis à une forte contre-réaction d'intensité par l'effet de la résistance de cathode, et que, d'autre part, le signal de sortie est partagé entre l'anode et la cathode. Il en résulte que le gain fourni est pratiquement nul.

Il est des cas où un tube ainsi monté ne peut fournir des signaux suffisants pour « gonfler à bloc » les tubes de sortie. On le fait alors suivre d'un étage d'amplification supplémentaire (fig. 109).

La symétrie du cathodyne n'est pas, comme on pourrait le croire, parfaite. En effet, s'il y a égalité entre les deux sorties du point de vue des tensions continues, il n'en est pas de même pour les tensions alternatives.

Fig. 110. — Inverseur à couplage cathodique. L'élément T_1 est commandé par la grille, et l'élément T_2 par la cathode, la grille étant mise à la masse. En choisissant pour R une valeur appropriée, les deux signaux sortants ont la même tension.



L'impédance est beaucoup plus basse du côté de la cathode que du côté de l'anode et il en résulte un certain déséquilibre aux fréquences élevées. Ce n'est toutefois pas grave et ce type d'inverseur de phase est largement utilisé.

Le gain d'un cathodyne est, comme nous venons de l'expliquer, pratiquement nul. Tel n'est pas le cas de l'inverseur à couplage cathodique (fig. 110).

Deux tubes ont leurs cathodes réunies à la masse par une résistance commune non shuntée. La grille du deuxième tube est mise à la masse. Dans ces conditions le signal appliqué à la grille du premier tube fera apparaître une tension alternative simultanément sur les deux cathodes et par suite à l'anode du deuxième tube. Les signaux prélevés aux deux anodes seront évidemment en phase opposée.

Nous retrouvons ici un tube en plus intercalé dans l'une des deux branches du circuit. Mais il n'y a pas de constante de temps supplémentaire.

La valeur de la résistance de cathode dépend des caractéristiques des tubes.

La polarisation des grilles peut être obtenue comme dans le montage précédent (fig. 111 a et b). La grille du deuxième tube est mise au potentiel masse, en ce qui concerne la tension alternative, à travers un condensateur de forte capacité, ce qui permet d'y appliquer une tension continue appropriée. Ce système est actuellement d'un emploi très courant.

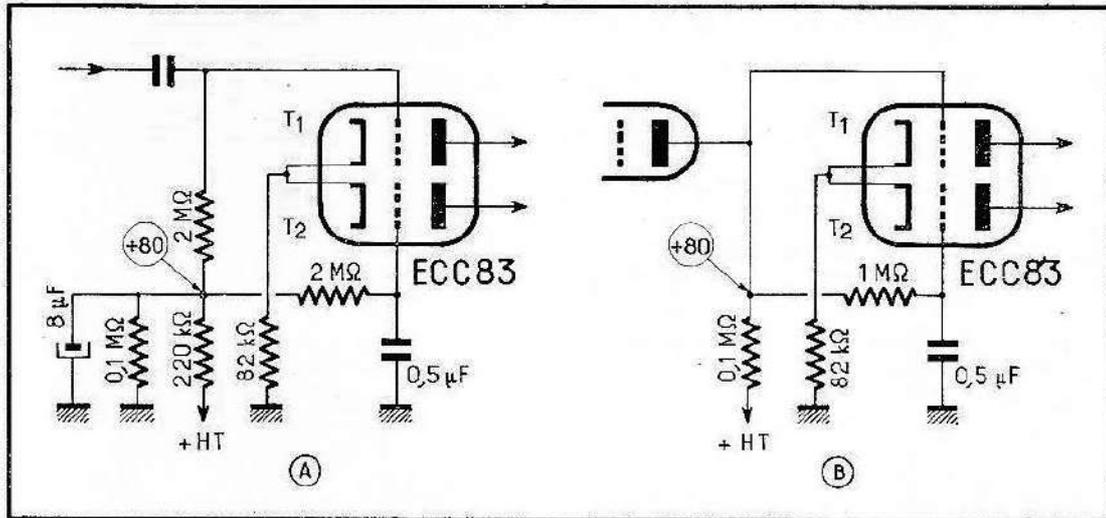


Fig. 111. — Schémas complets d'inverseurs à couplage cathodique montrant deux manières d'obtenir la polarisation de grille de T_1 .

On trouve dans certains amplificateurs un montage qui rappelle le premier cité plus haut mais qui, cependant, en diffère par la méthode d'attaque du tube inverseur (fig. 112). La grille de celui-ci est en effet reliée au point de jonction des deux résistances de grille R_1 et R_2 de l'étage suivant, ce point étant lui-même mis à la masse par la résistance R_3 .

En fonctionnement, le tube T_2 reçoit une fraction du signal délivré par T_1 et qui dépend du rapport R_1/R_2 . Toutefois une contre-réaction appliquée à la grille par l'intermédiaire de la résistance R_3 réduit à l'unité l'amplification, de

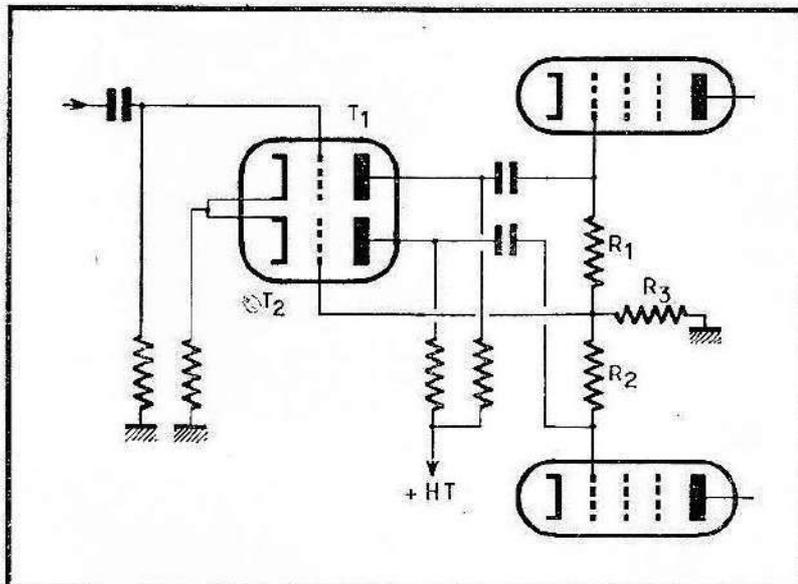


Fig. 112. — Inversion de phase par tube intermédiaire T_2 commandé par T_1 avec contre-réaction anode/grille par R_2 . Le gain de T_2 est réduit à l'unité.

sorte que les signaux sortant de T_1 et de T_2 sont pratiquement égaux. De plus la contre-réaction réduit considérablement le taux de distorsion, déjà très faible, introduit par le tube inverseur.

Il est à noter que la résistance R_3 est souvent supprimée.

Le schéma devient alors celui de la figure 113. Il s'établit un équilibre entre le signal entrant et le signal sortant de T_2 qui assure l'égalité des signaux.

Ce montage porte, dans la littérature anglo-saxonne, le nom de *paraphase*.

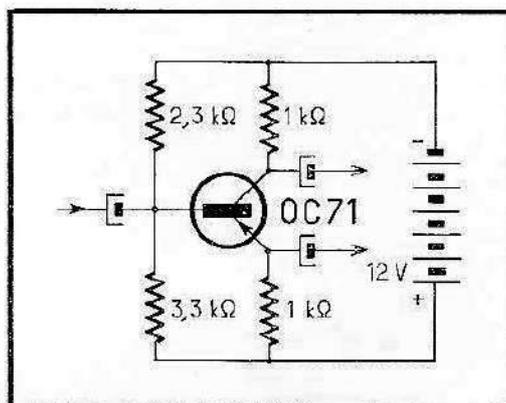
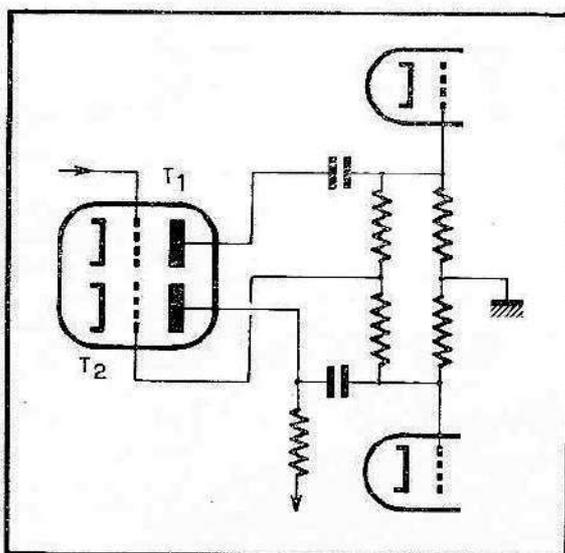


Fig. 114. — Montage d'un transistor en inverseur de phase.

Fig. 113 (ci-contre). — Variante du montage précédent appelé paraphase.

Il existe de ces divers systèmes de très nombreuses variantes dont les auteurs ont cherché avant tout à obtenir une parfaite symétrie à toutes les fréquences. La discussion de leurs mérites sortirait du cadre de cet ouvrage.

Nous ne pouvons à ce sujet que renvoyer les lecteurs aux nombreuses études parues dans les revues spécialisées et aux ouvrages cités dans la bibliographie.

Quoiqu'il ne soit pas indispensable que le tube inverseur ait les mêmes caractéristiques que celui qui le commande, on utilise généralement, pour tous ces montages, des doubles triodes du type ECC82, ECC83, 12AX7, 12AU7, etc.

A quelques différences près, les mêmes genres de montage sont utilisés dans les amplificateurs à transistors. La figure 114 montre un inverseur de phase qui est l'équivalent du cathodyne.

3. — L'amplification de puissance.

L'étage final d'un amplificateur a pour rôle de fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement du haut-parleur. Les tubes utilisés sont donc différents de ceux servant à l'amplification de tension pour laquelle l'énergie requise est minime.

Ils se caractérisent par un débit important et demandent ordinairement une tension anodique élevée.

Ce courant anodique provoque un échauffement des électrodes qui limite la puissance disponible. La dissipation maximum admissible est d'ailleurs toujours indiquée par le fabricant du tube. Les tensions aux différentes électrodes doivent être ajustées en conséquence.

En fonctionnement, le tube est traversé à la fois par un courant continu et un courant alternatif. Au point de vue acoustique ce dernier est seul utile. Le rendement du tube est la différence entre le courant continu de repos et le courant alternatif. Celui des tubes à plusieurs grilles, du type pentode ou tétrode, est supérieur à celui des triodes, c'est pourquoi celles-ci sont moins souvent utilisées de nos jours dans les étages de sortie.

La puissance utile maximum qu'on peut tirer d'un tube correspond à une impédance de charge de valeur déterminée. Cette valeur est également donnée en même temps que les autres paramètres par le fabricant.

Prenons comme premier exemple une triode ; c'est le cas le plus simple.

La figure 115 représente le courant traversant le tube pour diverses tensions d'anode et diverses tensions de grille. En supposant que la dissipation maximum soit de 15 watts (250 V. 60 mA), on détermine une frontière, indiquée par une ligne pointillée, qui ne peut être dépassée *au repos*. On doit ensuite fixer le *point de fonctionnement* du tube, c'est-à-dire lui appliquer une tension de grille telle que la dissipation reste normale et que la relation I_a/V_g reste *constante* pour des variations de V_g aussi grandes que possible de part et d'autre de ce point.

Un point B où la tension négative de grille est -75 V environ pour un courant anodique de 43 mA et une tension d'anode de 350 V est dans les limites imposées au point de vue dissipation. Mais une tension négative supplémentaire de -15 V à la grille suffit à annuler presque complètement le courant d'anode tandis que l'on dispose, sur la caractéristique de grille, d'un parcours de plus de 60 V dans l'autre sens.

On choisira donc un point de fonctionnement A qui correspond à -45 V, valeur qui est d'ailleurs indiquée par le fabricant. Ce point est celui où le maximum de tension alternative peut être appliqué à la grille sans entrer dans une région courbe de la caractéristique. Cette règle est absolue si l'on utilise un tube de puissance unique. Mais on emploie généralement, dans un amplificateur, deux tubes de puissance montés en push-pull. Ce qui permet, comme nous le verrons plus loin, de modifier considérablement le point de fonctionnement et d'augmenter ainsi la puissance modulée fournie par chaque tube.

Revenons à la figure 115. Par le point A traçons une ligne CD qui représente l'impédance de travail placée dans le circuit d'anode. Nous pouvons, pour le raisonnement qui va suivre, tracer cette ligne sous n'importe quel angle pour autant qu'elle ne coupe pas la frontière délimitant la zone interdite où la dissipation dépasse le maximum permis. Cette ligne représente les conditions dans lesquelles va se trouver le tube au point de vue tension et intensité pendant une phase du signal appliqué à la grille.

Il est entendu que les tensions en question sont celles se trouvant réellement présentes à l'anode et que celle de la source qui alimente le tube est forcément diminuée de la chute de tension dans le primaire du transformateur de sortie. On remarquera que la ligne aboutit d'un côté à un point qui correspond à une tension de 400 V qui est la tension de l'anode au moment où le courant anodique est égal à zéro.

A son autre bout, la ligne coupe la courbe $V_g = 0$ en un point qui correspond à un courant d'anode de 120 mA environ. Si on prolongeait cette ligne plus loin on entrerait dans une zone où la grille est positive, ce qui sort des conditions envisagées dans notre cas. Quoi qu'il en soit, la tension d'anode est tombée à 100 V environ en ce point.

De part et d'autre du point A la ligne de charge coupe une série de courbes. On remarquera que ces points d'intersection sont régulièrement espacés entre le point A et le point C ; par contre, entre le point A et le point B ils sont de plus en plus serrés à partir de la tension de grille -90 V.

Nous entrons ici dans une autre zone interdite où il se produirait de la distorsion dans le signal acoustique.

Le signal alternatif appliqué à la grille devant avoir la même amplitude de part et d'autre du point de fonctionnement, nous voyons que le plus grand signal que l'on peut appliquer au tube est limité par les tensions extrêmes de -10 et -90 V.

Le nombre de watts modulés développés par le tube pour un signal de grille de cette amplitude se déduit fort simplement de la formule :

$$W_0 = \frac{(I_{a \max} - I_{a \min}) \times (V_{a \max} - V_{a \min})}{8}$$

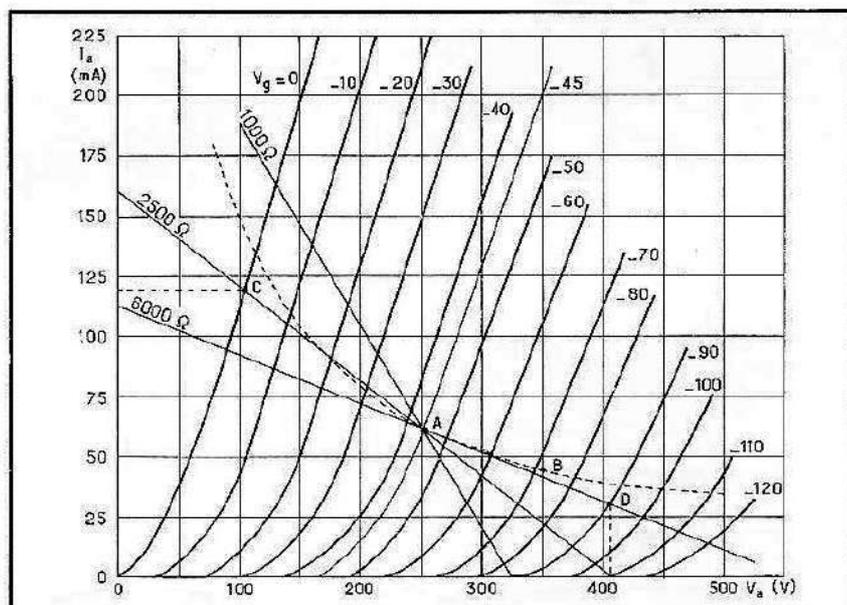
I_a est ici exprimé en ampères.

Appliqué à notre exemple cela donne :

$$\frac{(0,12 - 0,01) \times (375 - 105)}{8} = \frac{0,11 \times 270}{8} = 3,7 \text{ watts}$$

Si toutes les courbes I_a/V_g étaient rigoureusement équidistantes, le signal sortant serait, sauf grandeur, rigoureusement identique au signal appliqué à la grille d'entrée. Il n'en est malheureusement pas ainsi, car dans aucun tube les courbes ne présentent cette régularité.

Fig. 115. — Famille de caractéristiques I_a/V_a d'une triode de puissance.



Il en résulte que, quelle que soit l'amplitude du signal entrant, il y aura toujours une certaine distorsion avec production d'harmoniques qui, dans le cas examiné ici, sont principalement de rang pair.

On peut facilement calculer le pourcentage de ces harmoniques au moyen de la formule :

$$\% \text{ 2}^{\circ} \text{ harmonique} = \frac{\frac{I_{a \max} + I_{a \min}}{2} - I_a}{I_{a \max} - I_{a \min}} \times 100$$

Si nous appliquons cette formule au tube que nous venons d'étudier nous aurons :

$$\frac{\frac{0,12 + 0,01}{2} - 0,06}{0,12 - 0,01} \times 100 = 4,5 \%$$

On admet que l'oreille tolère jusqu'à 5 % de distorsion de seconde harmonique, malgré que celle-ci commence à être perceptible à partir de 2 %. La reproduction, dans les conditions indiquées plus haut, sera donc acceptable sans prétendre à une absolue fidélité. Elle correspond à celle de la plupart des postes de radio courants.

Nous avons trouvé que sur les 15 watts dissipés on pouvait en moduler au maximum 3,7, soit 25 % environ, avec 4,5 % d'harmoniques, mais nous ne connaissons pas encore la valeur de l'impédance de travail qui nous a permis d'obtenir ce résultat.

A quelle valeur correspond la ligne CD ?

Une formule très simple va nous la donner : la ligne coupe l'axe des tensions en un point qui correspond à 400 V et l'axe des intensités en un point qui correspond à 160 mA. On a donc :

$$\frac{400 \text{ volts}}{0,16 \text{ ampères}} = 2500 \Omega$$

Nous avons tracé notre ligne d'impédance un peu au hasard et rien ne prouve qu'elle représente la meilleure valeur.

Recommençons les opérations en traçant une ligne qui correspond à 1000 ohms. Elle est beaucoup moins inclinée et les valeurs limites seront de 325 V et 172 mA pour $V_g = 0$ V. On remarque immédiatement que le point d'intersection qui correspond à 0 V_g est beaucoup plus éloigné du point de fonctionnement que dans l'exemple précédent et la tension qui correspond à un débit anodique nul est plus rapprochée. En appliquant les formules précédentes, on trouve :

$$\frac{(0,172 - 0) \times (325 - 140)}{8} = 4 \text{ watts}$$

Mais, par contre, le contenu en deuxième harmonique est devenu :

$$\frac{\frac{(0,172 + 0)}{2} - 0,06}{(0,172 - 0)} \times 100 = 15 \%$$

Nous aurons donc une distorsion inacceptable. La puissance *maximum* est plus grande, mais la puissance *utilisable* est réduite.

Cherchons maintenant dans le sens opposé et admettons que l'on veuille utiliser une impédance de charge de 6000 ohms.

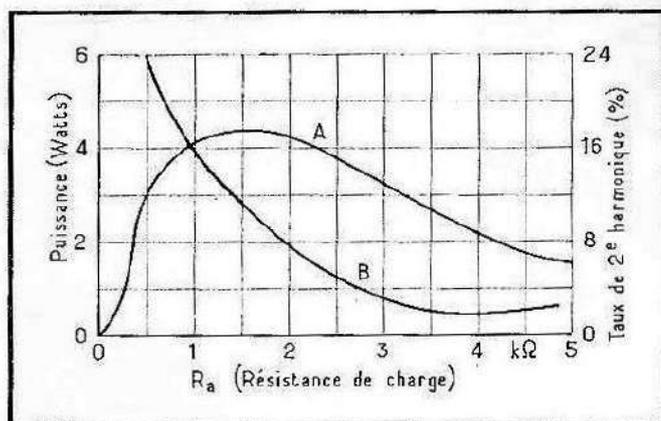


Fig. 116. — Rapport entre la valeur de l'impédance de charge, la puissance et le taux de distorsion.

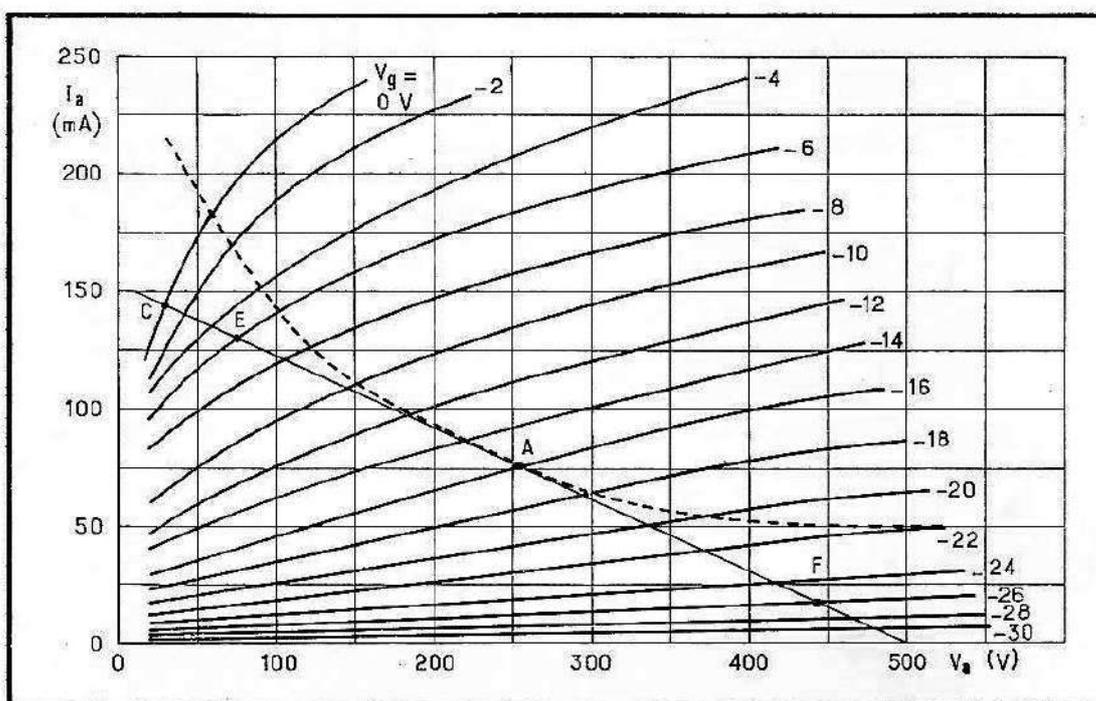


Fig. 117. — Famille de caractéristiques I_a/V_a d'une pentode de puissance.

La ligne correspondante se rapproche de l'horizontale, les variations d'intensité sont moindres, mais les variations de tension beaucoup plus grandes.

En application de la formule précédente on trouve :

$$\frac{(0,090 - 0,035) \times (420 - 90)}{8} = 2,1 \text{ watts}$$

La puissance maximum est donc sérieusement diminuée pour un même signal de grille, mais le taux de deuxième harmonique n'est plus que de 3,3 %.

En résumé, on trouve que le meilleur rapport puissance/distorsion est obtenu en utilisant une impédance de charge équivalente à 2 ou 2,5 fois la résistance interne du tube.

Dans le cas envisagé on utilisera 2500 ohms.

La relation entre la puissance utile et le taux de distorsion est donnée par la figure 116 où la courbe A donne la puissance obtenue pour un même signal de grille et diverses valeurs de la résistance de charge, et la courbe B le taux de deuxième harmonique correspondant.

Ainsi que nous l'avons dit plus haut, l'étage final des amplificateurs modernes de puissance moyenne est presque toujours composé de pentodes ou de tétrodes.

On sait que les caractéristiques de ce genre de tube sont fort différentes de celles d'une triode.

La figure 117 montre les courbes correspondantes.

La méthode de détermination de l'impédance de charge est la même, mais on constate, en faisant quelques essais, que la valeur de celle-ci est beaucoup plus critique. Les courbes ne sont équidistantes que dans une zone peu étendue ; du côté de $V_g = 0$ elles se rapprochent sensiblement, il en est

de même du côté $I_a = 0$. Nous ne pourrions donc pas utiliser une excursion de grille s'étendant jusqu'à 0 V et le signal de commande maximum sera limité par deux valeurs, par exemple -6 et -26, pour un point de fonctionnement situé à -16 V.

La formule permettant de calculer la puissance maximum pour un taux de distorsion acceptable est, de ce fait, beaucoup plus compliquée, car elle doit tenir compte des zones interdites.

Si nous appelons I_{a1} et I_{a2} les frontières utilisables de la variation de tension de grille, nous aurons pour la puissance maximum :

$$W_0 = \frac{[I_{a \max} - I_{a \min} - 1,41 (I_{a1} - I_{a2})]^2 \times R_a}{32}$$

R_a est l'impédance de travail que nous avons choisie arbitrairement et dont nous trouvons la valeur en ohms au moyen de la formule :

$$R_a = \frac{V_{a \max} - V_{a \min}}{I_{a \max} - I_{a \min}}$$

La question du taux de distorsion est également plus compliquée, par suite du fait que, à cause de la courbure particulière de leur caractéristique, les tubes du type pentode produisent des harmoniques paires et impaires.

Il y a donc lieu de tenir compte à la fois du taux de deuxième harmonique et du taux de troisième harmonique.

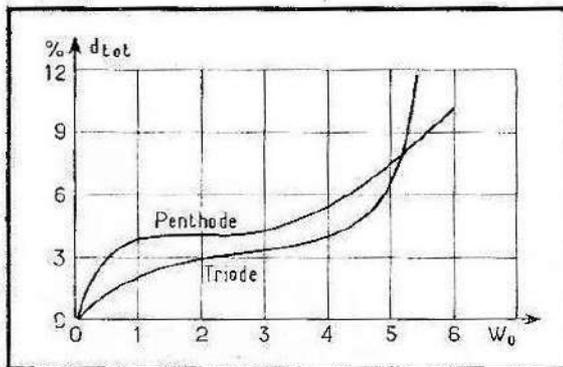


Fig. 118. — Rapport entre le taux de distorsion et la puissance pour une triode et une pentode.

On calcule l'une et l'autre séparément aux moyens des formules :

$$\% \text{ 2}^\circ \text{ harmonique} = \frac{I_{a \max} + I_{a \min} - 2 I_a}{I_{a \max} - I_{a \min} + 1,41 (I_{a1} - I_{a2})} \times 100$$

$$\% \text{ 3}^\circ \text{ harmonique} = \frac{I_{a \max} - I_{a \min} - 1,41 (I_{a1} - I_{a2})}{I_{a \max} - I_{a \min} + 1,41 (I_{a1} - I_{a2})} \times 100$$

Le contenu total est de :

$$\% \text{ tot} = \sqrt{(\% \text{ 2}^\circ \text{ harm})^2 + (\% \text{ 3}^\circ \text{ harm})^2}$$

La conclusion pratique de ce qui précède est que l'on a beaucoup moins de latitude dans le choix de l'impédance de charge dans le cas d'une pentode que dans le cas d'une triode et que, de toute façon, le taux d'harmoniques est plus élevé.

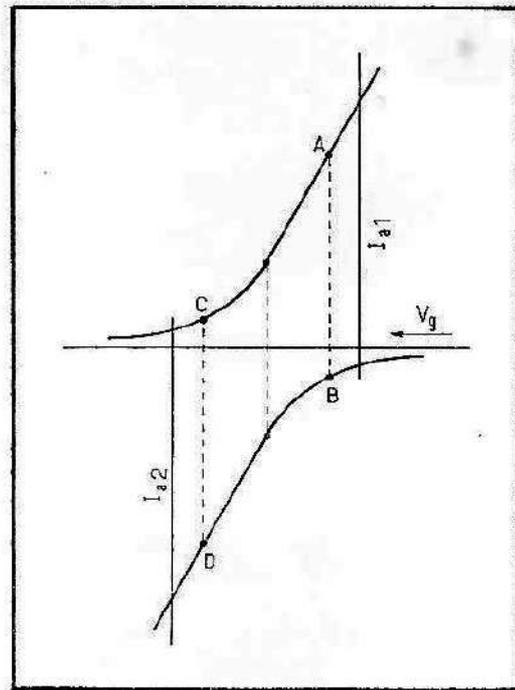
Dans une triode le taux d'harmoniques augmente très peu avec la tension du signal appliqué à la grille jusqu'au moment où l'on approche de la puissance maximum. A partir de ce point la distorsion augmente rapidement.

La pentode, d'autre part, produit un taux d'harmoniques relativement élevé, même à faible puissance, et la distorsion augmente progressivement avec celle-ci. La figure 118 permet de comparer sous ce rapport une triode et une pentode.

MONTAGE EN PUSH-PULL.

Sauf dans les amplificateurs de très faible puissance et dans les récepteurs de radio de qualité courante, on n'utilise jamais un tube final unique,

Fig. 119. — Un montage symétrique de deux tubes permet d'annuler en grande partie les harmoniques.



mais un étage de sortie formé de deux tubes montés en push-pull, c'est-à-dire en opposition.

Si nous appliquons aux grilles des deux tubes un signal de façon telle que l'une devient plus négative tandis que l'autre le devient moins, *le courant anodique total ne variera pas.*

En outre, les harmoniques paires seront en grande partie annulées, de sorte que, pour un même régime de fonctionnement, le taux de distorsion global sera moindre.

La figure 119 indique comment se produit l'annulation, au moins partielle, des harmoniques. A est la courbe caractéristique du premier tube et B celle du second. On voit que lorsque la tension de grille d'un des tubes atteint une partie courbe de la caractéristique, la tension de grille de l'autre est placée dans une région droite.

Il en résulte une caractéristique d'ensemble symétrique, le courant AB étant égal au courant CD.

Pour rendre la figure ci-dessus plus claire, nous avons utilisé la caractéristique statique des tubes, c'est-à-dire celle que l'on obtient sans impédance insérée dans le circuit anodique, mais l'effet est le même dans les conditions normales de travail.

Dans le cas examiné, les tubes sont utilisés dans les mêmes conditions

qu'un tube de sortie unique, c'est-à-dire avec le point de fonctionnement des grilles situé au milieu de la caractéristique V_g/I_a .

Il en résulte qu'en première analyse l'impédance de sortie devrait avoir une valeur double de celle qui convient à un tube unique, c'est-à-dire, dans le cas envisagé en premier lieu, 5000 ohms d'anode à anode.

La puissance utilisable que l'on obtient de cette manière, à distorsion égale, est cependant plus du double de celle obtenue à partir d'un tube unique, car on peut pénétrer légèrement dans la région courbe de la caractéristique sans pour cela dépasser le taux de distorsion admissible. Inversement, à puissance égale le taux de distorsion est moindre.

Il y a lieu de remarquer que le signal appliqué à l'entrée de l'étage final push-pull doit avoir une *amplitude double* de celui qu'on applique à un tube unique du même type, car le signal doit être partagé entre les deux grilles. Un étage en push-pull est donc moins *sensible* que ce tube unique et nécessite une amplification de tension préalable plus forte.

On peut encore exprimer autrement la chose en disant que la pente apparente de l'ensemble est moindre que celle d'un seul des tubes.

Nous avons admis jusqu'ici que l'amplitude du signal ne devait à aucun moment déborder la partie rectiligne de la caractéristique de grille. Dans le montage en push-pull on peut cependant dépasser quelque peu cette limite.

D'autre part, la tension de grille ne doit jamais atteindre 0, car dès avant ce point il apparaît un courant de grille qui entraîne une déformation du signal entrant.

Les conditions définies ci-dessus correspondent au fonctionnement en *classe A*. Les amplificateurs sont, en effet, classifiés suivant le mode de fonctionnement des tubes de l'étage final.

Avant de passer aux autres classes il y a lieu de noter que, sans se départir des conditions de fonctionnement en classe A, on peut cependant tirer une puissance plus forte d'un étage push-pull. On y arrive en augmentant légèrement la tension négative des grilles tout en réduisant la valeur de l'impédance de travail. On a pu voir par l'examen des figures que la plus grande puissance modulée utilisable était obtenue pour une valeur de résistance d'anode inférieure à celle qui correspond au minimum de distorsion. Le taux d'harmoniques est dans ce cas plus élevé, mais comme il s'agit surtout d'harmoniques paires, elles sont pratiquement annulées.

D'autre part, en augmentant la polarisation négative de grille on peut, sans dépasser la dissipation maximum admissible du tube, augmenter la tension d'anode. Un nouveau gain de puissance est obtenu de cette manière. On peut par exemple porter une tension négative de grille à -60 V et la tension d'anode à 300 V. Mais dans ces conditions le fonctionnement n'est plus strictement en classe A. Ce montage, dit en classe AB, ne diffère de la classe A que par une polarisation plus forte qui à son tour admet une tension d'anode plus élevée. Il faut remarquer que, dans ce cas, une des particularités du montage push-pull disparaît : le courant anodique n'est plus constant, il augmente avec le signal appliqué aux grilles, car le point de fonctionnement n'est plus au centre de la caractéristique du tube. Ainsi, le courant d'anode augmente dans un des tubes plus vite qu'il ne diminue dans l'autre.

Ce n'est toutefois pas très grave et n'entraîne pas de grandes complications dans l'alimentation, mais on doit tenir compte du fait que si la polarisation des grilles est obtenue au moyen d'une résistance insérée entre les cathodes et la masse, la polarisation ne restera pas constante. Une augmentation du signal appliqué aux grilles aura, en effet, pour conséquence une augmentation du courant anodique qui à son tour produira une augmentation de la polarisation négative, et, en fin de compte, un déplacement du point de fonctionnement. La puissance maximum de l'amplificateur sera de ce fait diminuée. C'est pour cette raison que, dans certains amplificateurs, on rend la tension de polarisation des grilles indépendante du courant anodique en

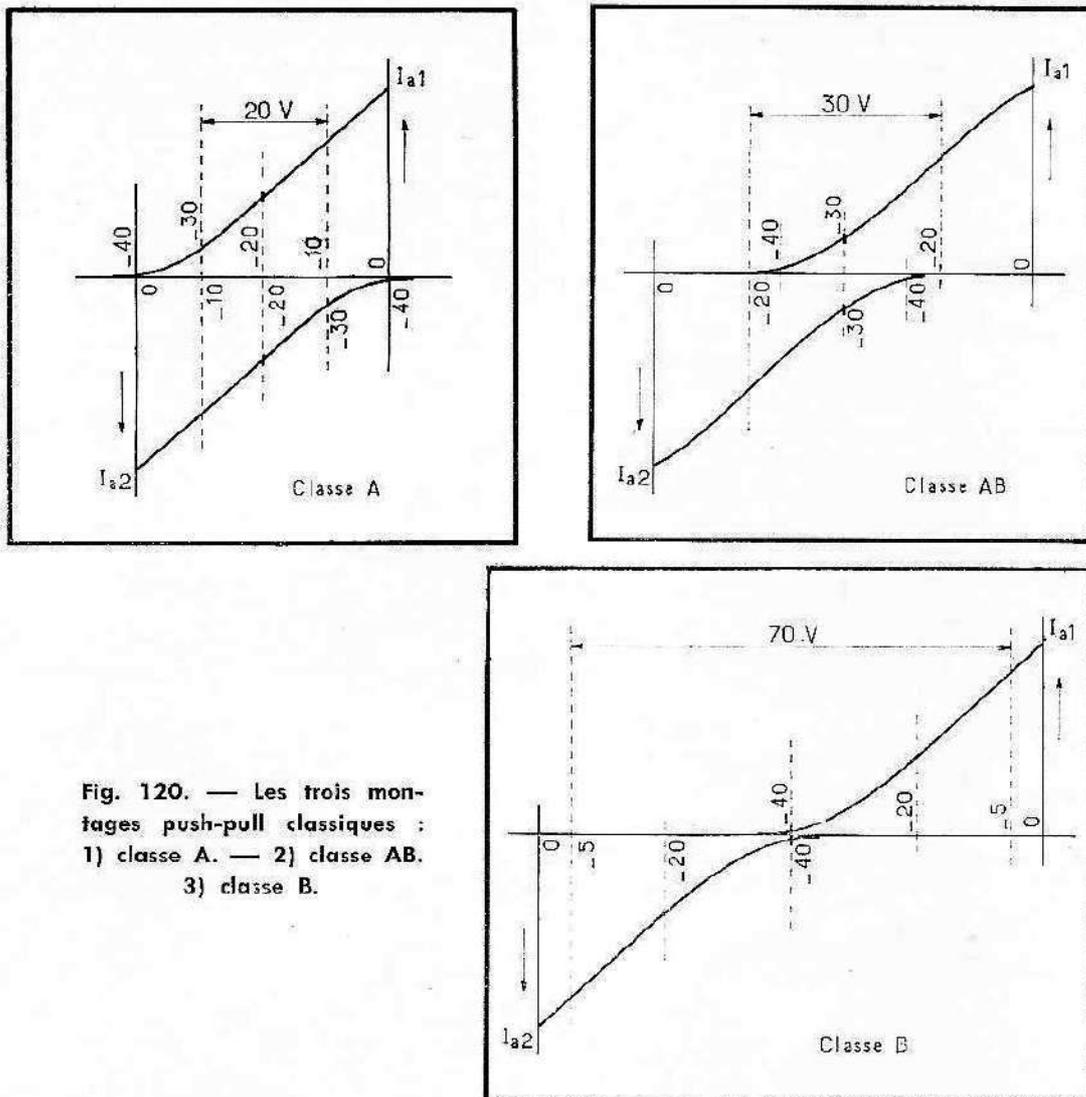


Fig. 120. — Les trois montages push-pull classiques :
 1) classe A. — 2) classe AB.
 3) classe B.

la produisant au moyen d'une alimentation séparée. Les amplificateurs de la classe AB sont eux-mêmes divisés en deux catégories. Ceux de la classe AB 1 se caractérisent par le fait que le signal appliqué au tube de sortie est réglé de façon à ne jamais provoquer de courant de grille. L'excursion reste limitée à la partie négative de la caractéristique. Dans les amplificateurs de classe AB 2 on admet un certain courant de grille en permettant au signal de pousser la grille jusqu'à 0 V.

Ces conditions de fonctionnement ne sont cependant admissibles qu'à la condition que le circuit de grille ne présente pas une résistance ohmique trop élevée, faute de quoi il s'y produit une chute de tension qui modifie la tension réellement appliquée à la grille par le signal et provoque une déformation de celui-ci.

Les amplificateurs de la classe B sont caractérisés par le fait que la polarisation de grille est fixée au voisinage du point pour lequel le courant d'anode est presque réduit à 0. Les fluctuations du courant anodique sont très fortes et l'alimentation doit être prévue en conséquence. Ce système est principalement utilisé dans les amplificateurs de très grande puissance et là où il est nécessaire d'économiser le courant anodique, c'est aussi celui qui convient le mieux pour les amplificateurs à transistors.

La figure 120 permet de comparer les caractéristiques des amplificateurs de la classe A, AB et B.

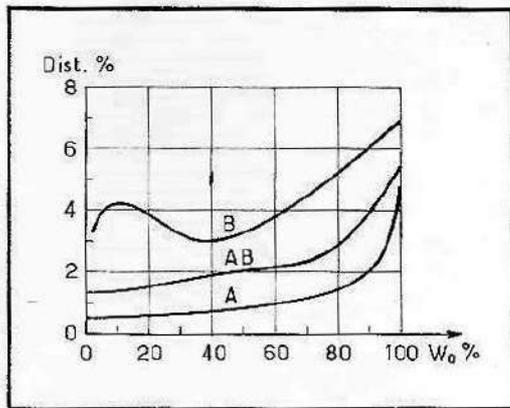
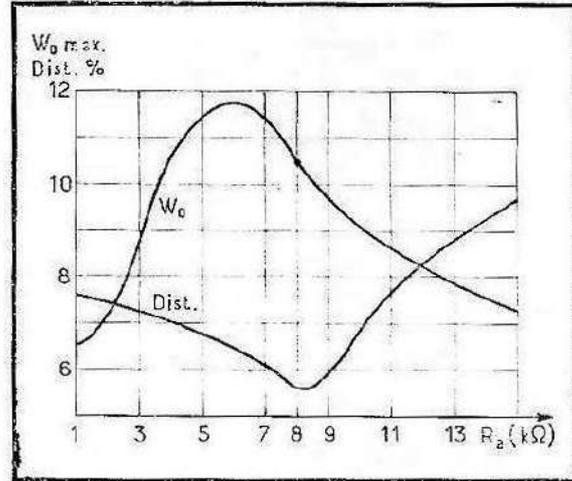


Fig. 121 (ci-dessus). — Rapport entre le taux de distorsion et le pourcentage de la puissance maximale pour les trois montages.

Fig. 122 (ci-dessous). — Puissance maximale utilisable et taux d'harmoniques en fonction de l'impédance de charge pour un couple de tubes EL84.



Il est à noter qu'en classe AB et B le rapport entre le taux d'harmoniques et la puissance modulée n'est pas constant et que, même à très faible puissance, il subsiste une distorsion appréciable.

De plus, en classe B le minimum de distorsion correspond à une puissance déterminée (fig. 121).

Ces défauts peuvent cependant être fortement atténués, comme on le verra plus loin, par l'emploi de la contre-réaction.

La figure 122 montre la puissance maximum utilisable et le taux d'harmoniques en fonction de l'impédance de charge pour un étage comprenant deux tubes EL84.

Les courbes correspondantes tracées pour la plupart des pentodes ont la même allure générale.

Nous avons montré plus haut que le choix de l'impédance de charge était plus critique pour une pentode que pour une triode et qu'en outre le taux d'harmoniques était plus élevé.

Fig. 123 (ci-dessous). — Le montage ultra-linéaire diminue, à puissance égale, le taux de distorsion.

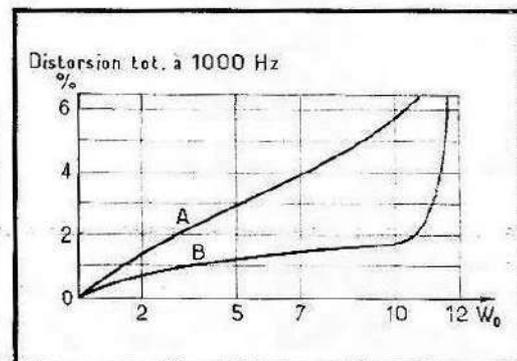
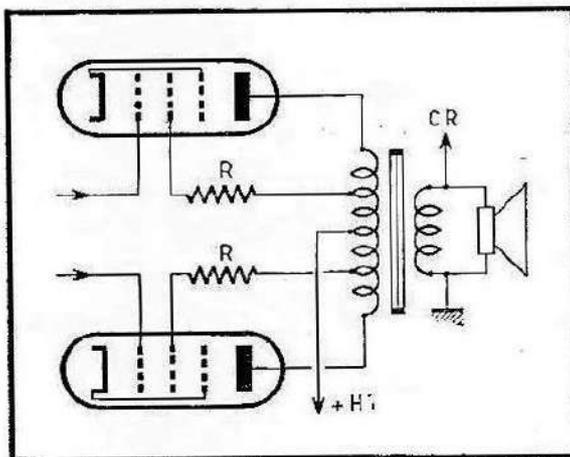
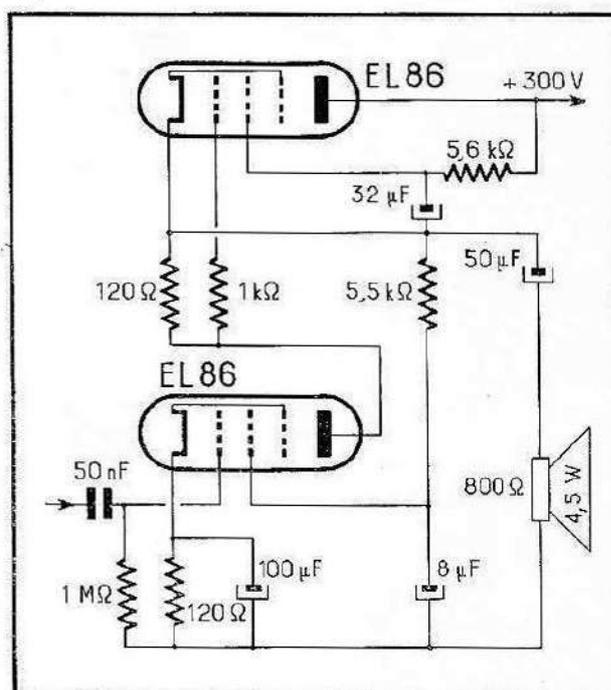


Fig. 124 (ci-dessus). — Rapport entre la puissance et le taux de distorsion pour un montage ordinaire A et un montage ultra-linéaire B.

Fig. 125. — Etage de sortie push-pull-série sans transformateur. Il nécessite un haut-parleur à impédance élevée.



Pour améliorer les caractéristiques des pentodes de puissance on utilise de manière courante un montage appelé « ultra-linéaire » (fig. 123).

Dans celui-ci les grilles-écran sont reliées à des prises sur le transformateur de sortie et non directement à l'alimentation H. T. Par ce fait, elles jouent un rôle actif. Il se produit une contre-réaction interne et le fonctionnement des tubes se rapproche, dans une certaine mesure, de celui d'une triode.

La position des prises est cependant assez critique et dépend des caractéristiques des pentodes utilisées.

Des oscillations parasites peuvent apparaître si le transformateur n'a pas été conçu avec tout le soin désirable. Un transformateur pour montage ultra-linéaire est obligatoirement une pièce coûteuse.

La figure 124 montre la différence, dans le taux de distorsion, entre un montage ordinaire et un montage ultra-linéaire pour un couple de tubes EL84 sans contre-réaction.

On a souvent essayé de se dispenser d'un transformateur de sortie en utilisant, d'une part, un haut-parleur dont la bobine mobile possède une impédance suffisamment élevée, et, d'autre part, un montage dont l'impédance de sortie soit suffisamment basse.

La figure 125 montre un tel montage pour lequel il existe des tubes spéciaux (EL86, 7754).

Il n'est utilisé que pour de faibles puissances.

EMPLOI DES TRANSISTORS.

Les caractéristiques des transistors de puissance diffèrent considérablement de celles des tubes, notamment sous le rapport de l'impédance de sortie.

On peut utiliser un transistor unique en classe A (fig. 126), mais il est plus avantageux de faire fonctionner un étage push-pull en classe B (fig. 127). Il y a plusieurs raisons à cela. D'abord le rendement est meilleur. En classe A il est d'environ 40 %, tandis qu'en classe B il peut atteindre près de 80 %.

Notons que ces taux sont supérieurs à ce que l'on peut obtenir avec des tubes.

D'autre part, en classe B le courant de repos est quasi nul, ce qui est très avantageux s'il s'agit d'un appareil portatif alimenté par batteries.

Il y a encore une autre raison qui milite en faveur de la classe B, c'est le fait que le comportement du transistor varie considérablement avec la température. Il est donc évident qu'il est nécessaire d'éviter toute cause d'échauffement, et, en particulier, de maintenir le courant moyen aussi faible que possible.

De toute façon, le transistor de puissance doit être refroidi.

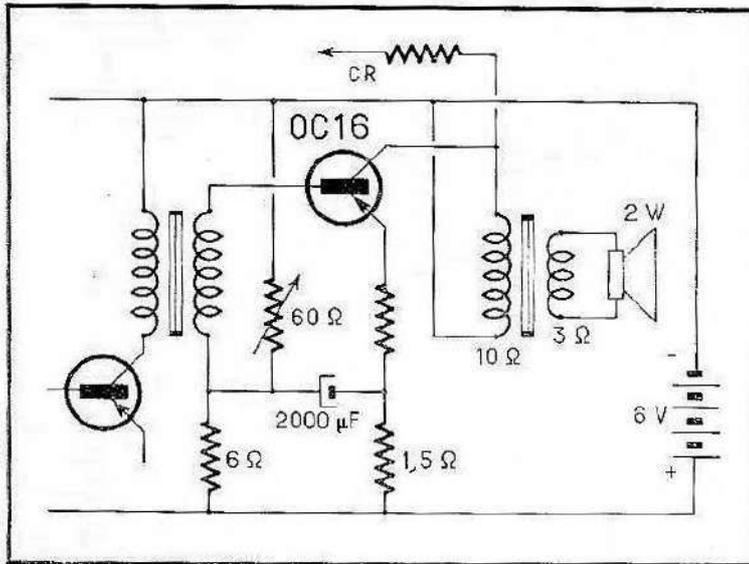
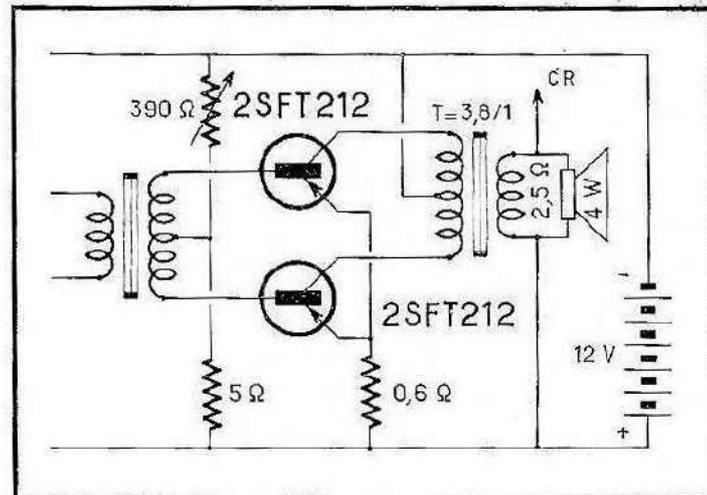


Fig. 126. — Etage de sortie à transistor unique classe A.

Fig. 127. — Etage push-pull à transistors classe B.



Les types de faible puissance peuvent simplement être fixés à un panneau en métal épais et bon conducteur (fig. 128) qui absorbe les calories (« heat sink » en anglo-saxon, ce qui se traduit littéralement par « égout à chaleur »).

Ce moyen est toutefois insuffisant pour refroidir certains types de transistors. On doit alors le compléter par un radiateur à ailettes dont la figure 129 montre un exemple.

Ajoutons cette recommandation d'ordre pratique : le contact entre le boîtier du transistor et le panneau refroidisseur doit être *parfait*. La surface sur laquelle il doit s'appliquer doit donc être débarrassée de toute trace de malpropreté ou d'oxyde, et polie.

Les figures 130 et 131 montrent deux étages de sortie par transistors, l'un avec transformateur et l'autre, moins classique, sans transformateur.

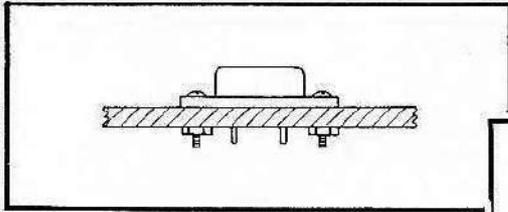


Fig. 128 (ci-contre). — Un transistor de puissance doit être refroidi.

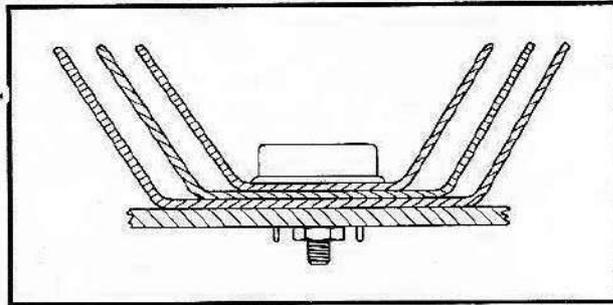


Fig. 129 (ci-contre). — Un radiateur à ailettes est souvent nécessaire pour activer le refroidissement.

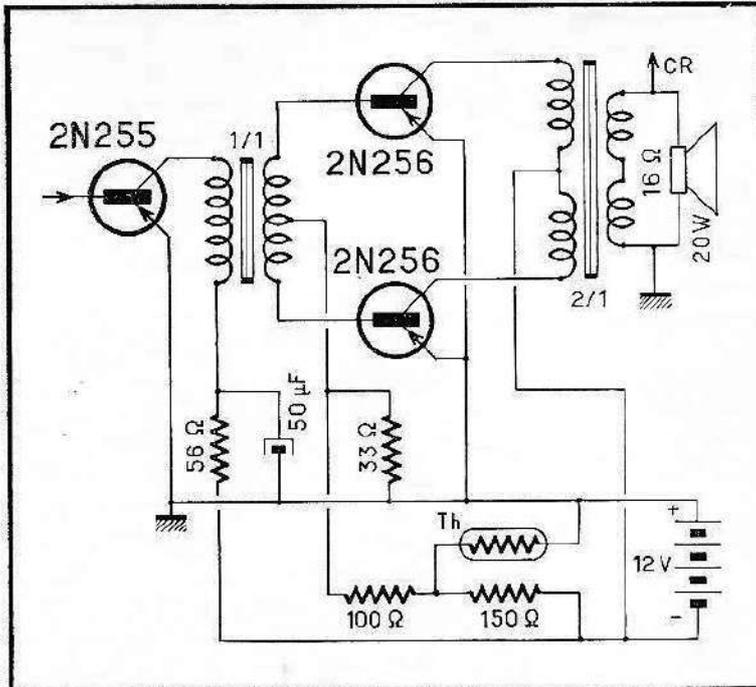
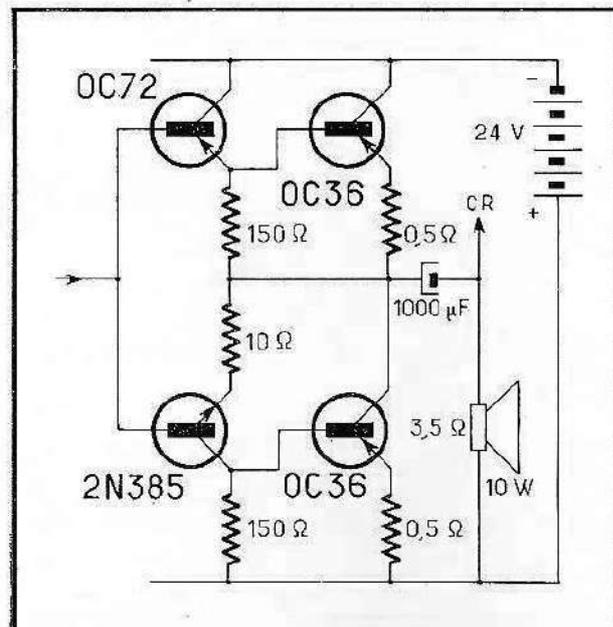


Fig. 130. — Etage de sortie classe B à liaison par transformateur.

Fig. 131. — Etage de sortie classe B sans transformateur.



4. — La contre-réaction.

Si l'on prélève une fraction du signal sortant d'un amplificateur et si on le réintroduit dans un étage précédent en s'arrangeant pour qu'il soit en phase opposée avec le signal qui passe en cet endroit, on provoque certes une diminution du gain de l'amplificateur, mais on constate, entre autres choses, que les harmoniques dues aux caractéristiques non linéaires des tubes sont proportionnellement plus atténuées que les fréquences fondamentales. On peut, par ce moyen, améliorer considérablement la fidélité de la reproduction.

En fait, on ne construit plus guère d'amplificateurs sans contre-réaction.

L'explication simplifiée de cette action est la suivante (fig. 132). Considérons un amplificateur dans lequel l'un ou l'autre élément produit une déformation du signal. Appliquons un signal parfaitement sinusoïdal aux bornes d'entrée (courbe 1). En l'absence de contre-réaction, nous recueillerons à la sortie un signal qui n'est pas la reproduction exacte, à une échelle agrandie, du signal primitif.

Supposons qu'il ait la forme indiquée par la courbe 2 : il n'est plus régulièrement sinusoïdal et présente une excroissance A.

Admettons aussi que ce signal apparaisse à la sortie de l'amplificateur sous forme d'une tension variable.

Prélevons une partie de celle-ci et ramenons-la à l'entrée de telle façon qu'elle soit inversée par rapport à la tension du signal entrant.

Le signal ainsi réinjecté présente évidemment la même déformation que le signal sortant. Il se combine avec le signal primitif pour former un nouveau signal (courbe 3, ligne épaisse) dans lequel se retrouve la déformation, mais *inversée* par rapport à celle de la courbe 2.

Ce signal modifié traverse l'amplificateur et arrive au point où prend naissance la déformation. Nous nous trouvons alors en présence de deux déformations de sens opposé et qui tendent à s'annuler réciproquement. Il en résulte un signal sortant moins déformé (courbe 4, ligne épaisse).

On ne peut, par ce moyen, supprimer totalement la distorsion, mais on peut la réduire à un niveau tel qu'elle devienne imperceptible.

La contre-réaction ayant pour effet, en y superposant une tension inverse, de réduire l'amplitude du signal entrant, il est évident que, pour

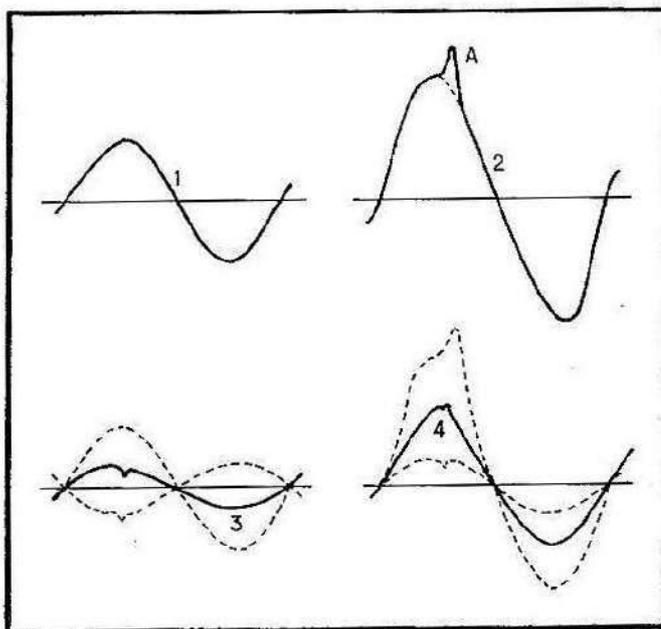


Fig. 132. — La déformation d'un signal est atténuée par la contre-réaction au prix d'une diminution de l'amplification.

retrouver à la sortie un signal de même amplitude que s'il n'y avait pas de contre-réaction, il faudra augmenter le signal d'entrée.

En d'autres termes, l'amplification a diminué.

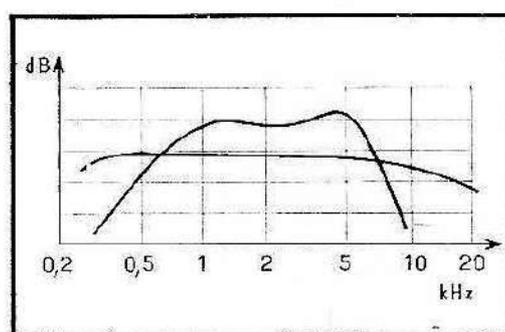
Pour que la contre-réaction puisse pleinement agir, il faut que le signal recueilli à la sortie ait conservé une relation de phase correcte vis-à-vis du signal d'entrée. En effet, si le signal que l'on réintroduit n'est pas décalé exactement de 180° par rapport au signal initial, le creux dans la caractéristique ne se trouvera pas exactement opposé à la saillie qu'il s'agit de niveler.

L'effet de la contre-réaction sera alors moins sensible.

Théoriquement le signal recueilli à l'anode d'un tube est exactement déphasé de 180° par rapport à celui qui est appliqué à la grille, mais en réalité il y a un décalage dû au temps de transit des électrons à travers le tube.

Il est négligeable aux fréquences acoustiques, et normalement, on peut ne pas en tenir compte dans les étages B. F. à résistance-capacité.

Fig. 133. — La contre-réaction régularise également la courbe de réponse.



Cependant aux deux extrémités de la bande de fréquences transmise par un amplificateur il se produit toujours un certain déphasage dû à la constante de temps des éléments de couplage.

En outre, si le transformateur de sortie est inclus dans la boucle de contre-réaction il est susceptible d'introduire un déphasage supplémentaire dans les fréquences supérieures, à cause de diverses pertes.

Ce déphasage se produit souvent à des fréquences supersoniques et peut ne pas produire d'effet audible, tout en modifiant gravement le comportement de l'amplificateur.

Pour prévenir toute instabilité dans le fonctionnement de celui-ci on doit insérer dans l'ensemble des étages englobés par la contre-réaction des circuits de correction qui seront décrits plus loin.

Nous n'avons parlé jusqu'à présent que d'un seul effet de la contre-réaction : la réduction de la distorsion linéaire et de l'intermodulation.

Elle en produit deux autres :

1° L'EGALISATION DE LA COURBE DE REPOSE DE L'AMPLIFICATEUR.

Si, pour certaines fréquences, le taux d'amplification tend à s'élever, la contre-réaction fournira une tension inverse plus forte et la bosse dans la caractéristique sera nivelée et inversement. L'effet bienfaisant se marque surtout aux extrémités de la courbe, comme l'indique la figure 133.

2° UNE MODIFICATION DE L'IMPEDANCE APPARENTE DE L'AMPLIFICATEUR.

C'est celle que « voit » le haut-parleur qui y est branché.

Ceci est très important pour une bonne reproduction des transitoires. On a vu, en effet, au chapitre consacré au haut-parleur, qu'il était désirable que celui-ci soit amorti par la présence d'une résistance extérieure de faible

valeur, pour étouffer sa résonance propre qui risquerait de « colorer » la reproduction.

Le facteur qui correspond à l'amortissement critique d'un haut-parleur dépend de ses caractéristiques mécaniques et électriques : notamment la raideur de la suspension, le poids de l'équipage mobile et l'intensité de champ magnétique dans l'entrefer. Il est ordinairement compris entre 5 et 10, ce qui signifie que l'impédance de sortie de l'amplificateur « vue » par le haut-parleur doit être comprise entre le cinquième et le dixième de son impédance propre. Elle peut être définie comme le rapport entre la tension E appliquée aux bornes de sortie par une source extérieure et le courant résultant I mesuré dans le circuit d'utilisation. Les bornes d'entrée sont supposées court-circuitées (fig. 134).

En fait, l'impédance de sortie Z_o d'un amplificateur sans contre-réaction est, sauf cas particulier, égale à la résistance interne R_i de l'étage de sortie.

Cette résistance se trouve en parallèle avec le haut-parleur et son transformateur.

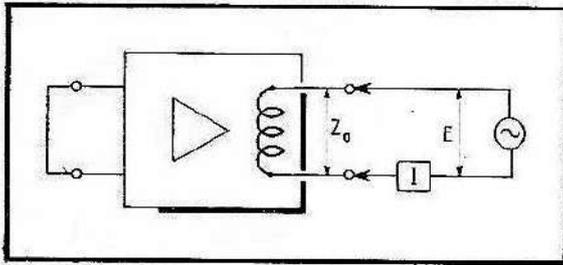


Fig. 134. — L'impédance de sortie d'un amplificateur est celle que « voit » le haut-parleur considéré comme un générateur.

Le facteur d'amortissement peut donc être admis comme étant :

$$d = \frac{R_a}{R_i} = \frac{T^2 \times R_L}{R_i}$$

R_L est l'impédance de la bobine mobile et T le rapport du transformateur.

L'impédance de sortie Z_o d'un étage push-pull est égale à deux fois la résistance interne d'un des tubes. S'il est formé de deux pentodes, sa résistance interne est excessivement élevée et l'amortissement naturel qu'il peut offrir est insignifiant. En fait, l'étage équivaut à un circuit ouvert.

En appliquant une contre-réaction à ce seul étage on a :

$$Z_o = \frac{R_i}{1 - \beta \mu}$$

β est la fraction de la tension qui est renvoyée à l'entrée de l'étage et μ le facteur d'amplification de celui-ci.

L'amplification effective diminue d'autre part dans le rapport :

$$\frac{1}{1 - \beta K}$$

K étant le gain de l'étage sans contre-réaction.

Cependant on étend généralement la contre-réaction à plus d'un étage. La valeur de l'impédance de sortie devient dans ce cas :

$$Z_o = \frac{R_i}{1 - K_o \mu}$$

K_0 est le gain total des étages précédant l'étage final et compris dans la boucle de contre-réaction, celle-ci n'étant pas en fonction.

Le facteur d'amortissement prend la valeur :

$$d_r = \frac{R_a}{Z_0}$$

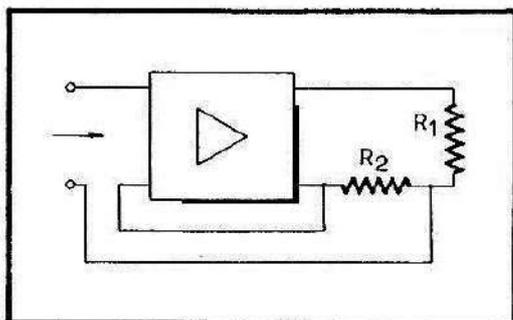


Fig. 135. — Contre-réaction d'intensité : la tension aux bornes de R_2 est proportionnelle à l'intensité du courant. L'impédance de sortie est augmentée.

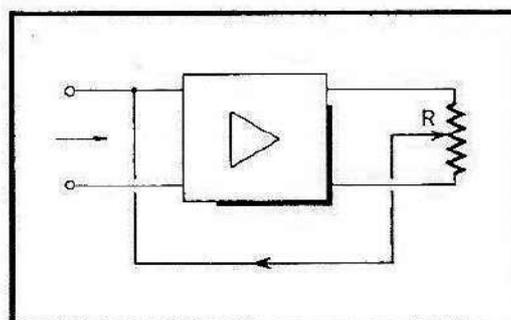


Fig. 136. — Contre-réaction de tension : une partie de la tension aux bornes de l'impédance de charge R est répartie à l'entrée de l'amplificateur. L'impédance de sortie est diminuée.

L'amplification totale est toutefois réduite d'un certain taux :

$$F = 1 - \beta K_r$$

où K_r est le gain de tous les étages compris dans la boucle de contre-réaction.

On peut calculer le facteur d'amortissement par la formule :

$$d_r = F (d + 1) - 1$$

en se basant uniquement sur la diminution d'amplification résultant de la contre-réaction, sans tenir compte des impédances.

Exemple. — Un amplificateur dans lequel le facteur d'amortissement naturel est 2, auquel on applique une contre-réaction qui réduit le gain de 20 dB, donne un facteur d'amortissement $d_r = 29$, F étant égal à 10, ce qui correspond à 20 dB.

Il convient de noter que nous n'avons envisagé qu'une contre-réaction portant uniformément sur toutes les fréquences audibles.

On peut également, dans le but de modifier la courbe de réponse d'un amplificateur, utiliser une contre-réaction *sélective*, agissant plus fort sur certaines fréquences que sur d'autres. Pour obtenir cet effet il suffit d'intercaler des filtres appropriés dans le circuit de contre-réaction.

Cette méthode est fréquemment utilisée pour obtenir une courbe de réponse spéciale, notamment dans l'enregistrement magnétique et pour la gravure des disques.

On distingue deux manières d'obtenir le signal de contre-réaction : par une variation *d'intensité* ou par une variation de *tension*.

Les figures 135 et 136 sont explicatives à ce sujet.

Si la contre-réaction de tension, la seule dont il a été question jusqu'ici, diminue la résistance interne apparente de l'amplificateur, la contre-réaction d'intensité, au contraire, *l'augmente*.

On a proposé parfois de combiner les deux sortes de contre-réaction en les rendant ajustables pour mieux adapter l'impédance de sortie de l'amplificateur à certains ensembles haut-parleur/enceinte. L'intérêt de ce dispositif paraît discutable du point de vue professionnel.

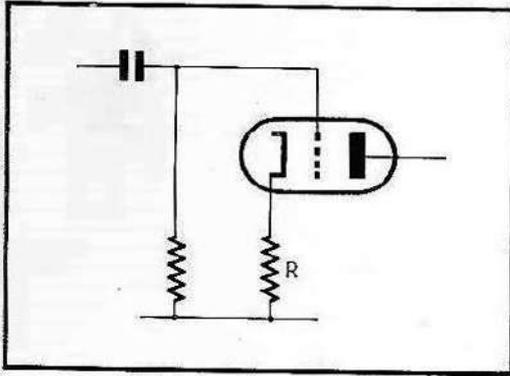


Fig. 138 (ci-contre). — Grâce à la résistance R_f , le tube final est soumis à une contre-réaction de tension, mais la charge d'anode R_2 du tube précédent est diminuée.

Fig. 137 (ci-contre). — Une résistance placée dans le circuit de cathode produit une contre-réaction d'intensité.

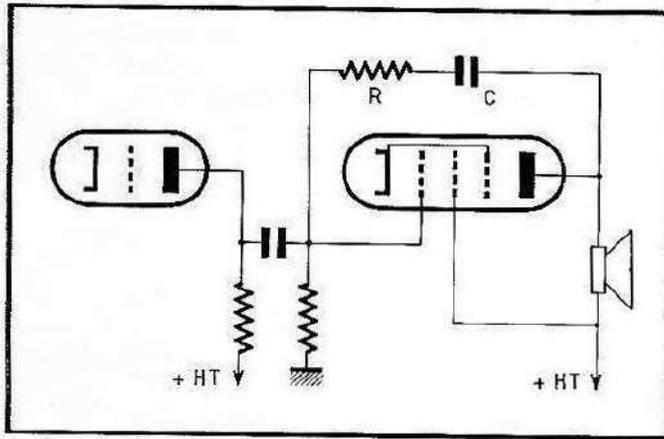
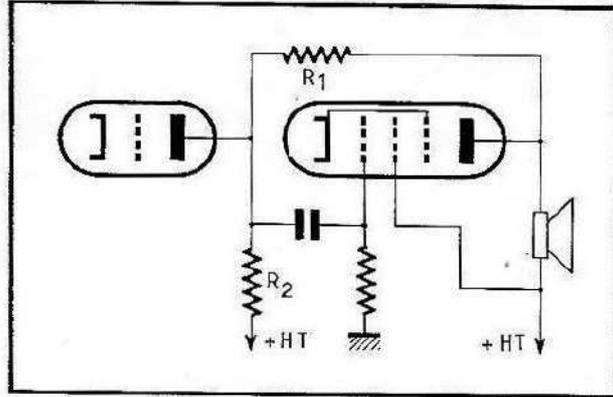
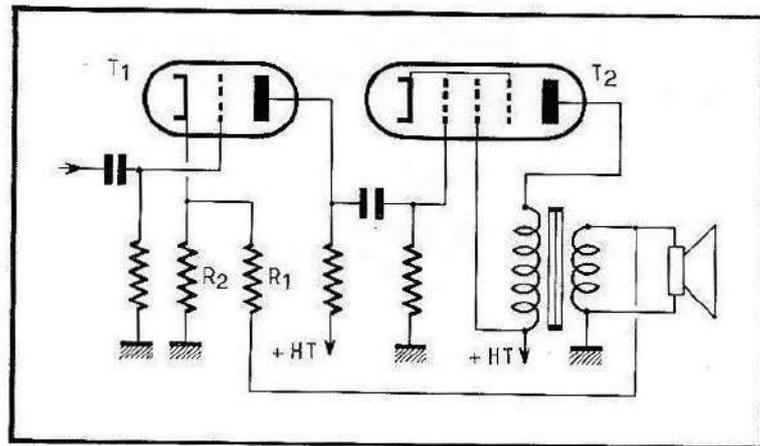


Fig. 139. — La tension de contre-réaction peut être directement reportée sur la grille du tube. Le condensateur C produit cependant une discrimination de fréquence.

Fig. 140. — La tension de contre-réaction est ici reportée à l'étage précédent. Il est à noter que T_1 reçoit en même temps une contre-réaction d'intensité.



Dans la pratique, une contre-réaction d'intensité peut être réalisée en omettant de shunter la résistance de cathode servant à la polarisation d'un tube. Ce moyen très simple peut être avantageusement appliqué aux premiers étages de l'amplificateur (fig. 137).

Les figures 138 à 141 montrent différents dispositifs de contre-réaction.

Il est dangereux d'inclure un trop grand nombre d'étages dans une même boucle de contre-réaction à cause du risque d'instabilité provoqué par le déphasage entre signal entrant et signal sortant. La boucle principale n'enferme généralement pas plus de trois étages.

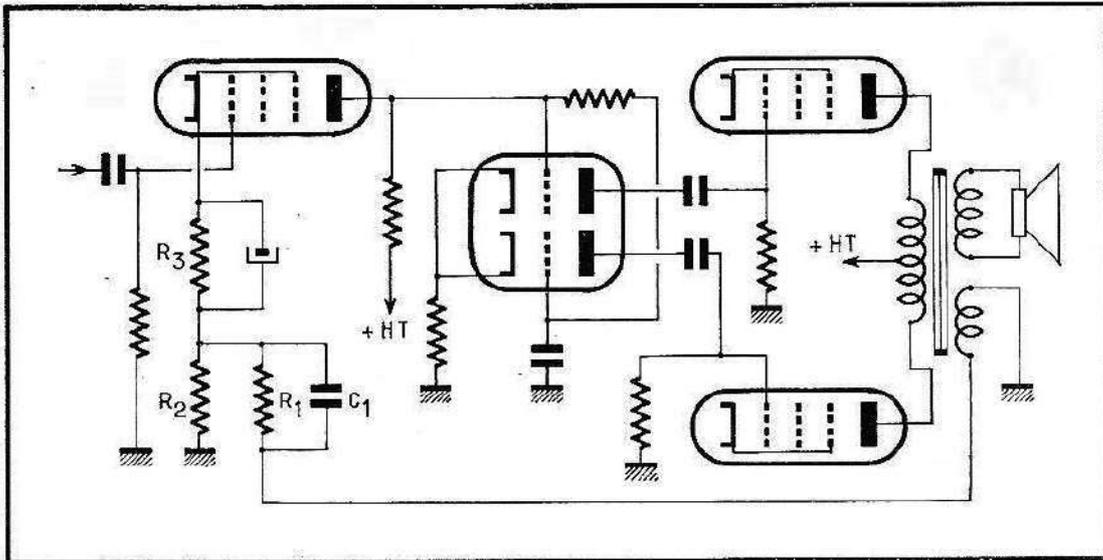


Fig. 141 a. — La boucle de contre-réaction englobe trois étages. La tension est fournie par un enroulement distinct du transformateur de sortie. Le filtre $R_1 C_1$ compense le déphasage à très haute fréquence.

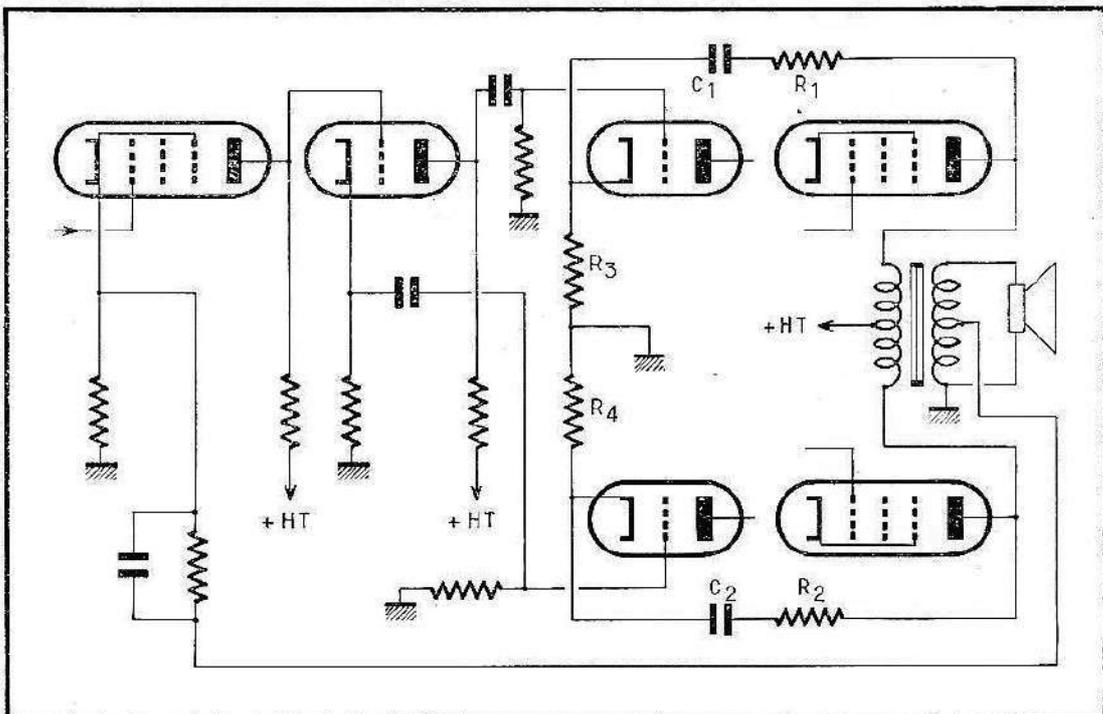


Fig. 141 b. — La boucle de contre-réaction embrasse quatre étages. Elle est complétée par une contre-réaction individuelle sur chacun des tubes des deux derniers étages. Une prise sur le secondaire du transformateur de sortie fournit la tension de contre-réaction à la boucle principale.

Une contre-réaction séparée peut être appliquée aux étages précédents (fig. 142). Comme les déphasages se produisent surtout aux extrémités de la bande passante, les dispositifs de correction auxquels nous avons fait allusion plus haut sont généralement des filtres RC qui produisent une atténuation des fréquences situées au-delà du spectre audible ou provoquent sur celles-ci un déphasage en sens opposé (fig. 143).

5. — Les préamplificateurs.

Les dispositifs de commutation et de contrôle de ton d'une installation d'amplification doivent évidemment se trouver à portée de main de l'opérateur.

D'autre part, il n'est pas indiqué d'utiliser des câbles trop longs là où le signal est encore très faible.

Il s'ensuit qu'un ensemble amplificateur est généralement partagé entre plusieurs éléments (fig. 144 et 145).

Les microphones électrodynamiques et, plus encore, les microphones électrostatiques ne donnent qu'une très faible tension. Il est donc nécessaire de les faire suivre d'un premier étage amplificateur qui est souvent incorporé dans le boîtier même. L'alimentation de ce préamplificateur est grandement facilitée par l'emploi de transistors (fig. 146).

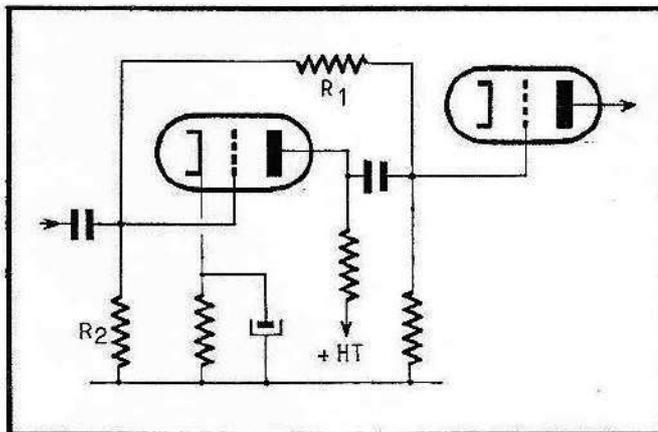


Fig. 142 (ci-dessus). — Une contre-réaction individuelle peut être appliquée aux tubes d'un préamplificateur.

Fig. 143 (ci-dessous). — Des filtres sont nécessaires dans l'une ou l'autre partie d'un amplificateur pour pallier l'instabilité due au déphasage des fréquences élevées.

Les valeurs suivantes sont indiquées par divers auteurs : elles dépendent des caractéristiques générales de l'amplificateur :

R_1 : 15 k Ω . R_2 : 680 k Ω . R_3 : 5 M Ω . R_4 : 100 Ω . R_5 : 8,2 k Ω .
 R_6 : 0,5 M Ω . C_1 : 470 pF. C_2 : 20 μ F.
 C_3 : 0,5 μ F. C_4 : 50 nF. C_5 : 220 pF.
 C_6 : 50 nF.

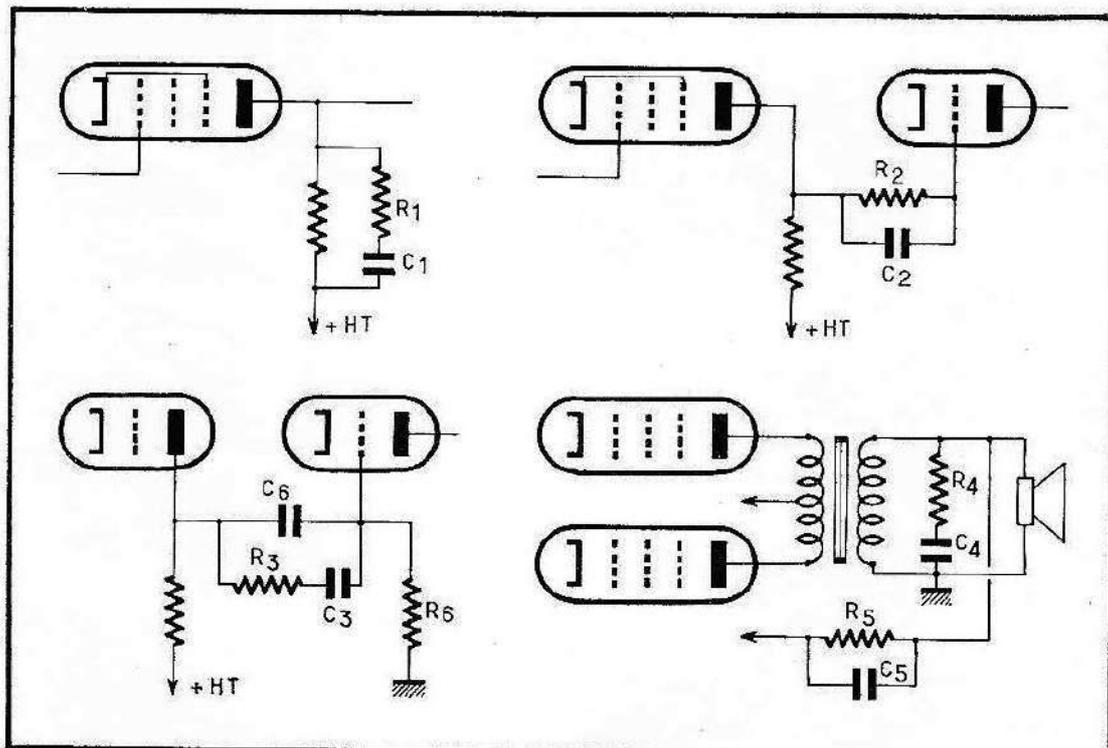


Fig. 144. — Chaîne d'amplification type reliée à plusieurs sources. A : alimentation indépendante pour le préamplificateur 1 du microphone électrostatique. — 2 : préamplificateur général avec correction de ton. — 3 : amplificateur principal qui fournit l'alimentation au préamplificateur 2. R : tuner de radio.

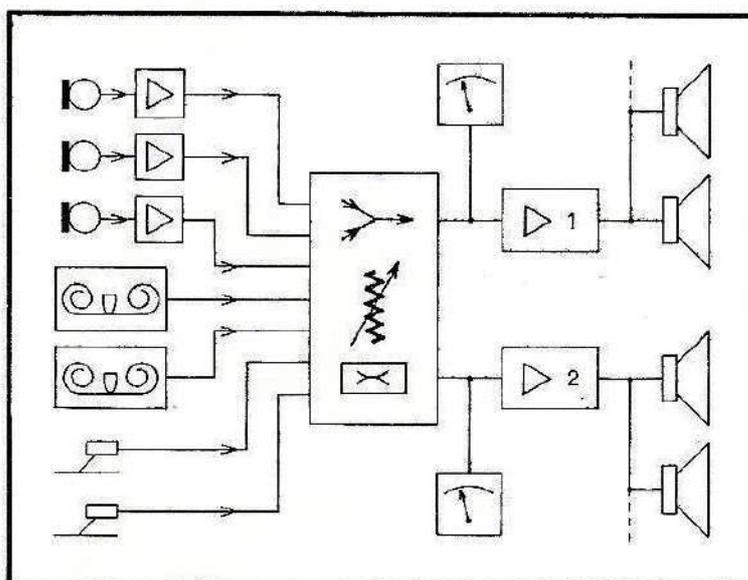
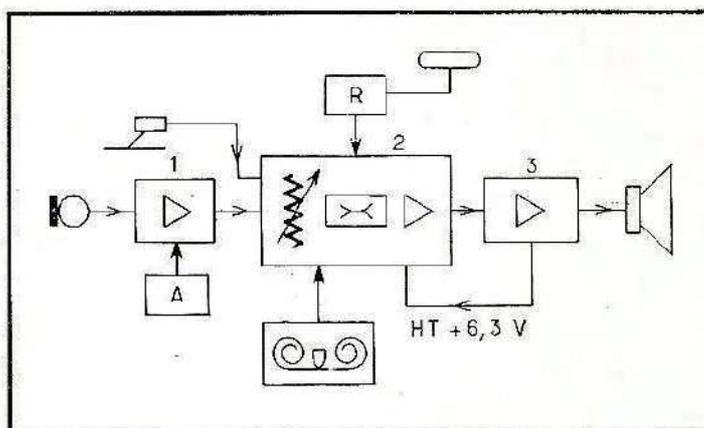
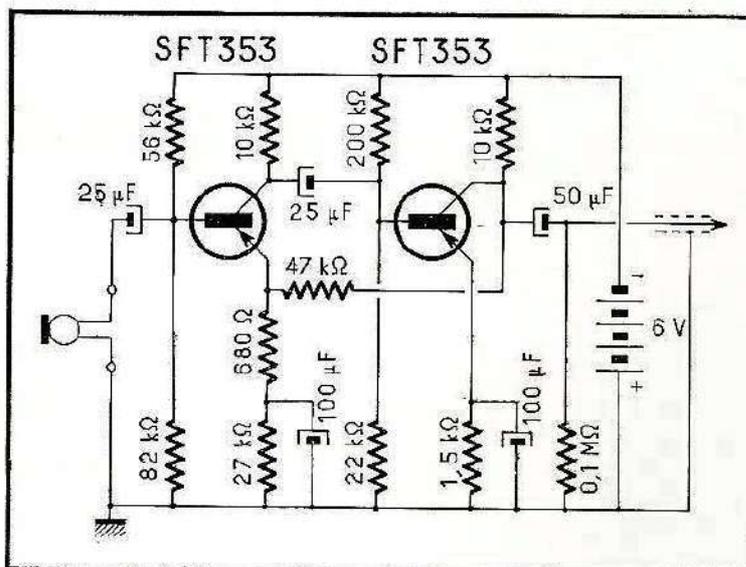


Fig. 145. — Installation de distribution de son professionnelle avec nombreuses sources, pupitre de régie et deux réseaux de haut-parleurs alimentés par les amplificateurs de puissance 1 et 2. Chaque canal est contrôlé par un Vu-mètre.

Fig. 146. — Préamplificateur à transistors pour microphone électrostatique.



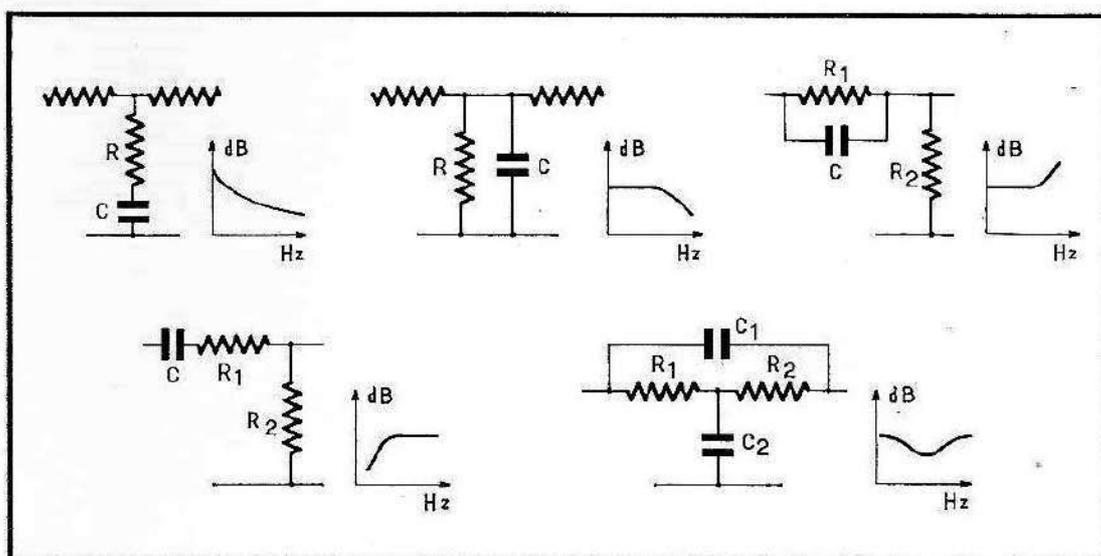


Fig. 147. — Filtres correcteurs de ton et courbes de réponse correspondantes. Le point d'abaissement ou de relèvement de la courbe est déterminé par les rapports entre R et C , entre R_1 et R_2 et entre C_1 et C_2 .

Les lecteurs de disques magnétiques sont quelquefois associés à un préamplificateur comportant une correction fixe, et qui est monté sur la platine. On trouve à sa sortie un signal d'un niveau approximativement égal à celui que fournit un lecteur piézo-électrique.

Un autre but de ce genre de préamplificateur est de fournir une impédance de sortie relativement basse, ce qui évite les pertes par capacité dans le câble qui transmet le signal au reste de l'installation.

Une sortie sur cathode est la règle, et les tubes sont parfois chauffés par du courant continu, de manière à éviter le risque de ronflement.

Le préamplificateur de tête possède toujours son alimentation autonome. Il ne serait pas indiqué en effet de l'alimenter à partir de l'amplificateur principal.

Entre la source, dont le signal est déjà amplifié ou non, et l'amplificateur de puissance, on intercale le plus souvent un préamplificateur dans lequel s'effectuent les diverses commutations et le contrôle général de ton. Des exemples sont donnés plus loin.

L'alimentation de ce dernier peut être autonome ou fournie par l'amplificateur de puissance.

La sortie s'effectue normalement à basse impédance, de sorte que la longueur du câble reliant le préamplificateur à la section suivante de la chaîne n'est pas critique.

6. — La correction de ton.

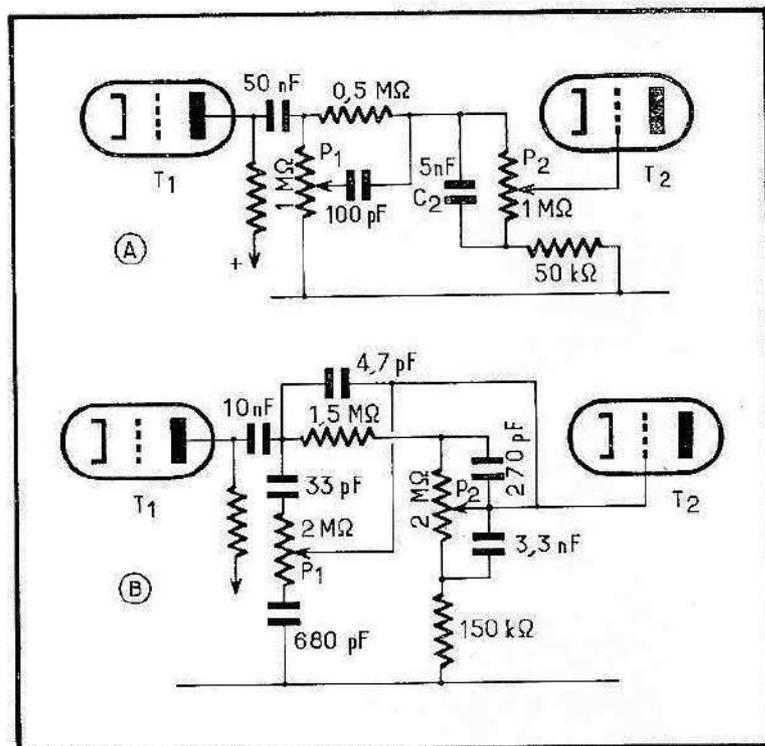
Une chaîne d'amplification dont la caractéristique de fréquence est parfaitement uniforme ne permet pas d'obtenir en toutes circonstances la meilleure reproduction : dans la pratique on doit donc pouvoir en modifier la courbe de réponse.

Il ne faudrait toutefois pas en conclure qu'un amplificateur de qualité médiocre peut, au prix de quelques astuces, donner les mêmes résultats qu'un appareil dont la réponse est parfaitement linéaire. Il faut toujours partir d'un amplificateur aussi proche que possible de la perfection.

Les modifications de la courbe de réponse sont imposées par la nécessité de :

- 1° remédier aux particularités de la source de signaux B. F.;
- 2° obtenir une caractéristique générale inverse de celle ayant servi pour l'enregistrement sur disque ou sur bande magnétique;
- 3° adapter la reproduction aux caractéristiques de l'oreille (courbe Fletcher-Munson);
- 4° adapter le son aux particularités du local d'écoute;
- 5° régler la largeur de la bande passante selon la nature de l'information à transmettre, ce qui permet de réaliser une économie de puissance;
- 6° faire disparaître certains parasites et fréquences indésirables;
- 7° obtenir éventuellement certains effets spéciaux.

Fig. 148. — En a, R_1 et C_2 contrôlent les aigus, R_1 , R_2 et C_2 les graves. — En b, montage assurant un contrôle plus régulier des fréquences.



Une source de signaux B. F. possède souvent une courbe de réponse particulière, soit en raison de son principe même, soit parce qu'on la lui a donnée pour l'une ou l'autre raison.

Il est donc nécessaire de la faire suivre d'un circuit possédant des caractéristiques inverses.

Il est à noter que ce circuit peut être inséré à n'importe quel étage de la chaîne, à condition de ne pas être inclus dans la boucle de contre-réaction. Il est cependant d'usage de le situer au début de la chaîne d'amplification. On doit pouvoir, en général, utiliser plusieurs sources de signaux : microphone, lecteur de disques, magnétophone, etc., ayant des caractéristiques différentes, et il est évidemment nécessaire, dans ce cas, d'effectuer en même temps que leur commutation celle du correcteur de ton fixe qui leur est propre.

La correction s'obtient généralement au moyen de résistances et de condensateurs, c'est-à-dire de filtres RC. Ceux-ci prennent ordinairement l'une des formes indiquées dans la figure 147.

D'autre part, pour satisfaire aux nécessités 3, 4, 5 et 7, il faut évidemment que la courbe de réponse générale puisse être modifiée à volonté.

On utilise à cet effet un deuxième réseau de correction dont au moins deux des éléments sont variables. Comme il est plus commode, pour des raisons mécaniques, de modifier une résistance que la capacité d'un condensateur, on utilise généralement des montages comme ceux de la figure 148.

La figure 149 a représente un correcteur de ton type Baxendall à contre-réaction sélective.

Ces dispositifs permettent de relever ou abaisser indépendamment chaque extrémité de la bande passante, ce qui est indispensable pour répondre à toutes les situations (fig. 149 b).

On notera que, pour arriver à ce résultat, on est obligé d'abaisser préalablement le niveau général du signal.

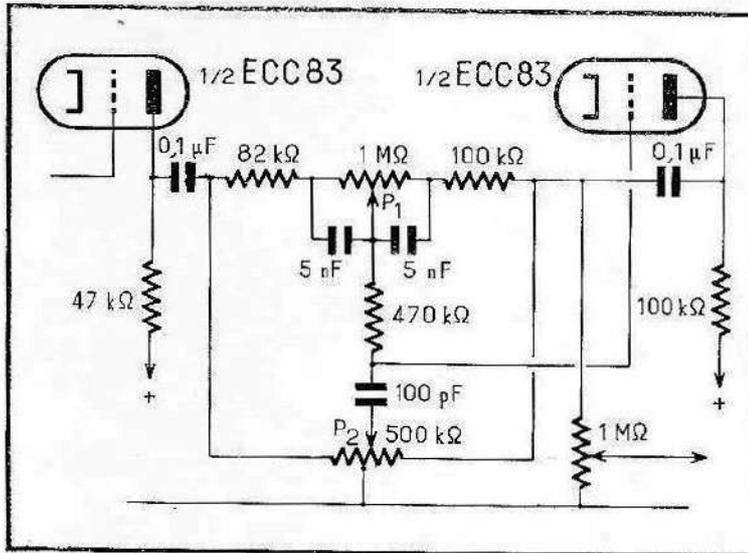
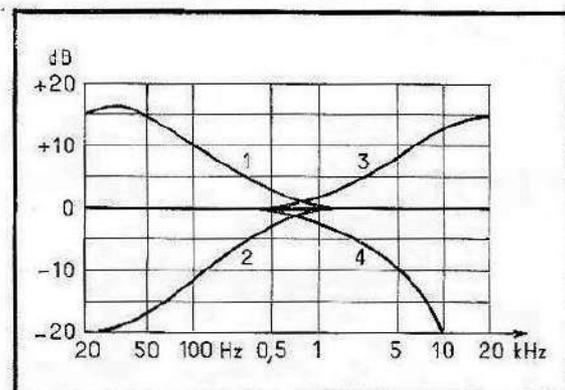


Fig. 149 a. — Le correcteur de ton Baxendall à contre-réaction sélective.

Fig. 149 b. — Courbes de réponse fournies par un contrôle de ton bien équilibré. 1 et 2 : contrôle des basses (P_1). — 3 et 4 : contrôle des aiguës (P_2).



Les relèvements se produisent non en *amplifiant* plus fort certaines fréquences, mais en *diminuant*, en ce qui les concerne, l'*affaiblissement*.

Il résulte de cela qu'un contrôle de ton comme celui dont nous venons de parler doit être précédé ou suivi d'au moins un étage d'amplification supplémentaire avant l'étage de sortie.

7. — La commande du volume sonore.

Il est nécessaire de pouvoir agir sur le gain d'une chaîne d'amplification afin de réduire, si nécessaire, l'intensité sonore, mais aussi pour adapter l'amplification à un signal d'entrée donné.

On doit à cet effet insérer quelque part dans la chaîne un dispositif réglable qui permet de réduire le signal passant en cet endroit.

D'autre part, il est logique d'introduire les signaux dans le système amplificateur en des places différentes suivant leur amplitude, ce qui assure déjà un premier nivellement.

Il est toutefois indispensable de disposer d'un moyen de réglage général.

L'endroit où celui-ci doit être placé n'est pas indifférent. Il faut d'une part éviter de surcharger les tubes des étages qui le précèdent et d'autre part maintenir un rapport signal/bruit de fond favorable.

Le bruit de fond est proportionnel au nombre d'étages et est produit principalement par les tubes. Si l'amplification est suffisante on arrive à rendre audible l'irrégularité de l'émission électronique (effet « grenaille »). Sans compter l'effet microphonique.

Il s'ajoute à cela l'agitation thermique dans les conducteurs et l'irrégularité du courant dans les résistances, due au manque d'homogénéité de celles-ci.

La somme de ces effets est un bruit de souffle caractéristique qu'il importe de réduire au minimum.

On en conclut que le réglage doit s'effectuer en un endroit où l'amplification subséquente n'est pas trop forte. Cependant, si on plaçait le dispositif de réglage trop près de l'étage final le tube qui le précède pourrait se trouver surchargé.

On peut prendre comme règle que la commande de volume doit se trouver à l'endroit où le signal suffisant pour produire le maximum de puissance correspond à un niveau que le tube qui suit peut accepter sans dépasser le taux de distorsion admissible.

Cela revient à dire qu'on doit l'introduire deux ou trois étages avant l'étage final, mais pas plus loin.

La place tout indiquée se trouve entre l'amplificateur principal et le pré-amplificateur correcteur. Dans la pratique il se trouvera à la sortie de celui-ci (fig. 150).

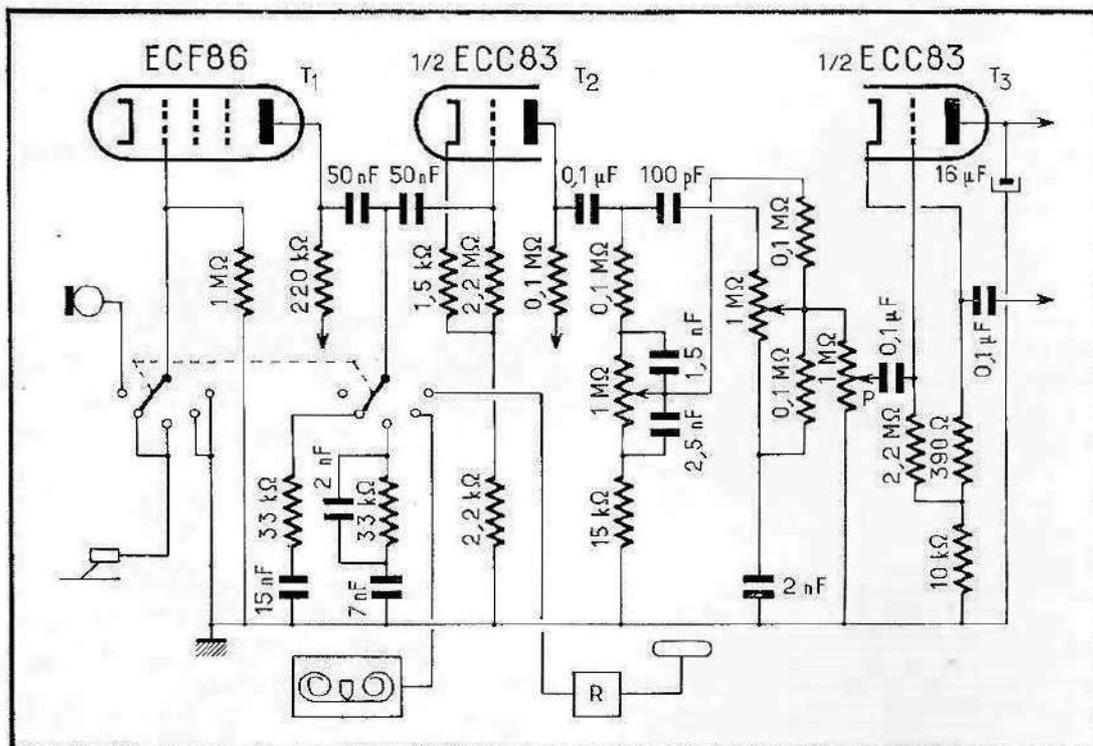


Fig. 150. — Schéma complet d'un préamplificateur-correcteur. P est la commande de volume sonore.

Il est évident d'autre part que le réglage de niveau ne peut absolument pas se trouver inclus dans la boucle de contre-réaction.

Quand la chaîne est raccordée à des sources diverses fournissant des signaux de niveau très différent il peut être nécessaire d'utiliser plusieurs dispositifs de réglage de volume dont un sert de commande principale (fig. 151).

Le réglage de volume doit répondre à plusieurs conditions dont la première est de n'introduire aucune distorsion. Celle-ci est difficile à réaliser et la plupart des systèmes produisent une certaine discrimination de fréquence, au moins sur certains points du réglage.

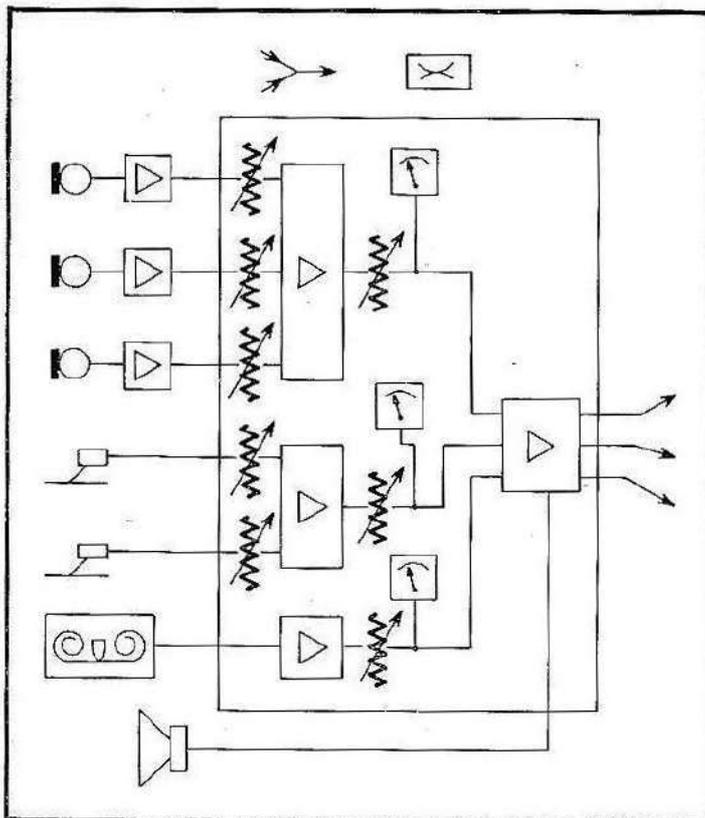


Fig. 151. — Installation professionnelle comportant de nombreuses sources avec réglages individuels de leurs niveaux, table de mélange, et contrôle des niveaux sortants.

Une autre condition est d'ordre physiologique : pour que le réglage soit progressif il faut que la variation du volume sonore soit uniformément répartie sur toute son étendue. En d'autres mots, qu'à un même angle de rotation du bouton corresponde, en tous les points du parcours, une même augmentation, non pas physique, mais *subjective* du son.

Le système le plus simple est un diviseur de tension ou potentiomètre réglable. Il est ordinairement placé dans le circuit de grille d'un tube (P dans la figure 150), endroit où il n'est traversé par aucun courant continu appréciable; il ne doit donc pas être prévu pour dissiper de l'énergie.

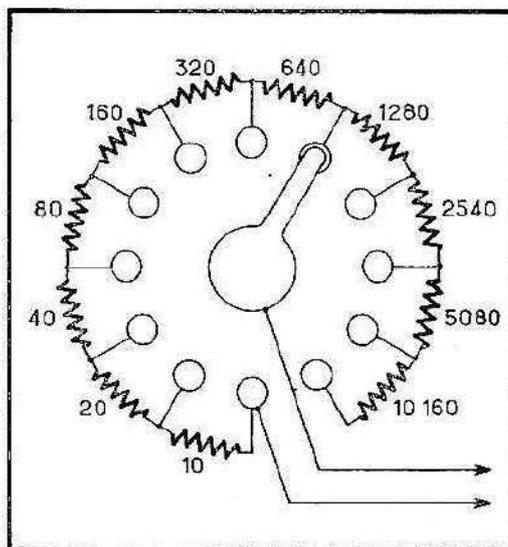
Pour répondre à la nécessité physiologique indiquée plus haut, l'élément résistif, qui est ordinairement constitué par une bande de matière isolante recouverte d'une couche de carbone, doit être fabriqué de telle manière que la résistance *par unité de longueur* varie d'un bout à l'autre : faible au début, elle doit croître suivant une progression logarithmique. Un potentiomètre ainsi conçu, et parfaitement exécuté, pourrait être étalonné en décibels.

La fabrication industrielle en quantité massive exige de larges tolérances et on se contente en général de diviser la résistance en un certain nombre de zones, chacune d'une résistance déterminée. Le résultat obtenu est suffisant dans la pratique.

Les potentiomètres destinés à être insérés dans le circuit de grille d'un tube ont ordinairement une valeur comprise entre 0,5 et 1 M Ω .

Des potentiomètres conçus de manière à pouvoir être étalonnés selon une unité de niveau acoustique (dB, phone ou Vu) sont utilisés dans certaines parties des installations professionnelles, mais leur construction est différente.

Fig. 152. — Potentiomètre à plots gradué en décibels.



Généralement le contact se fait par des plots et le réglage s'opère par bonds qui correspondent ordinairement à un gain ou une atténuation de 2 dB. Entre chaque plot se trouve une résistance soigneusement étalonnée (fig. 152).

Cependant un réglage de volume sonore ne s'effectue pas toujours en agissant sur un circuit interne d'un amplificateur ou d'un préamplificateur.

Une installation peut comprendre des éléments se trouvant à une certaine distance l'un de l'autre et reliés par des lignes à basse impédance.

D'autre part, si l'installation alimente un réseau complexe de haut-parleurs ou d'appareils secondaires, il peut être nécessaire de doser le signal reçu par chacun d'eux.

On doit dans ce cas intercaler des systèmes de réglage, à la façon de robinets, sur les lignes.

Un simple potentiomètre ne convient pas pour cet usage car la ligne, sauf dans le cas de marche à pleine puissance, ne serait pas équilibrée et elle pourrait introduire du côté masse des bruits (ronflements, parasites, etc.) récoltés par induction (fig. 153 a).

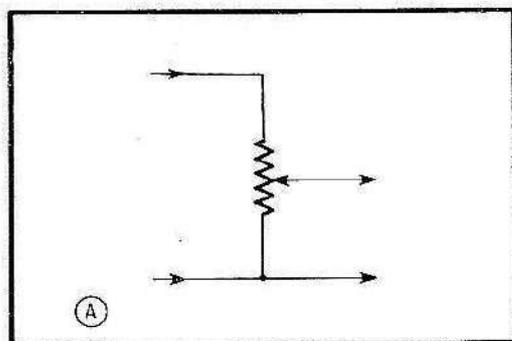


Fig. 153 a. — Un simple potentiomètre modifie l'impédance d'une ligne de transmission.

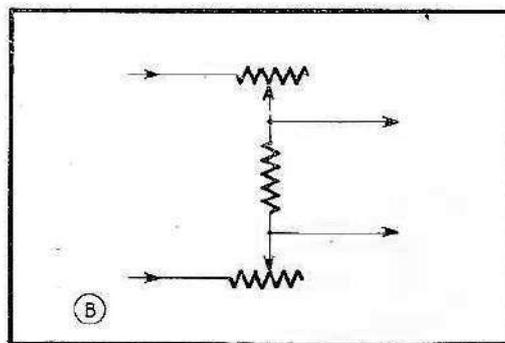


Fig. 153 b. — Atténuateur équilibré. L'impédance de la ligne n'est cependant pas constante.

Le dispositif de la figure 153 b est équilibré, et l'atténuation est répartie sur les deux conducteurs. Il présente cependant le défaut de modifier l'impédance présentée par la ligne à l'entrée de l'appareil qui suit.

Les *atténuateurs* utilisés dans les installations de distribution de son sont généralement à *impédance constante* et ne présentent donc pas cet inconvénient.

La figure 154 a montre un atténuateur en T.

Cette disposition comprend trois résistances variables. Si R_1 et R_3 sont réduits à une valeur faible tandis que R_2 est grand, il est évident que la chute de tension dans cette dernière résistance sera faible et que presque toute l'énergie passera dans la ligne.

Si, par contre, on diminue R_2 et que l'on augmente en même temps, et de la même valeur, R_1 et R_3 , la ligne demeurera en équilibre, et si nous gardons la relation

$$R_1 + R_2 = R_3 + R_2 = Z$$

l'impédance restera constante.

L'atténuateur en T est réalisé dans la pratique suivant la disposition que montre la figure 154 b.

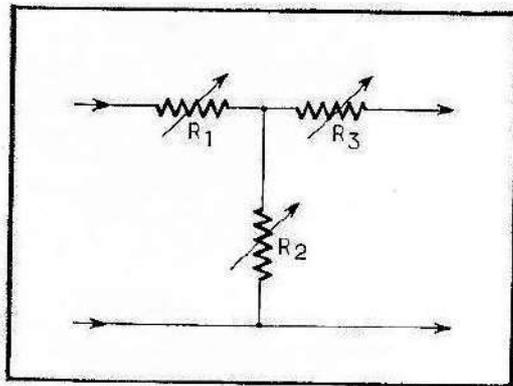


Fig. 154 a. — Atténuateur en T. L'impédance de la ligne reste relativement constante mais la ligne n'est pas équilibrée.

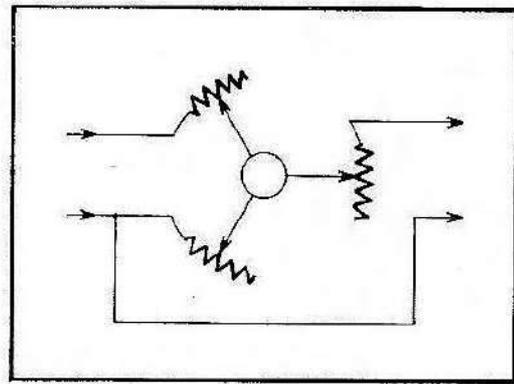


Fig. 154 b. — Forme pratique d'un atténuateur en T.

Les résistances sont du type bobiné et le contact se fait le plus souvent par plots.

Le calcul d'un atténuateur en T se fait comme suit : soit Z l'impédance de la source du signal, R_s la valeur des résistances en série (R_1 et R_3 de la figure 154 a et R_p celle de la résistance en parallèle R_2 ; on aura :

$$R_s = Z \frac{n - 1}{n + 1}$$

où n est le coefficient d'atténuation en dB ou en rapport signal entrant/signal sortant,
et :

$$R_p = Z \frac{2n}{n - 1}$$

Le calcul se fait plot par plot.

Une autre formule d'atténuateur est celle dont la figure 155 donne le schéma. C'est l'atténuateur en double T qui maintient à la ligne un équilibre plus rigoureux que le type précédent.

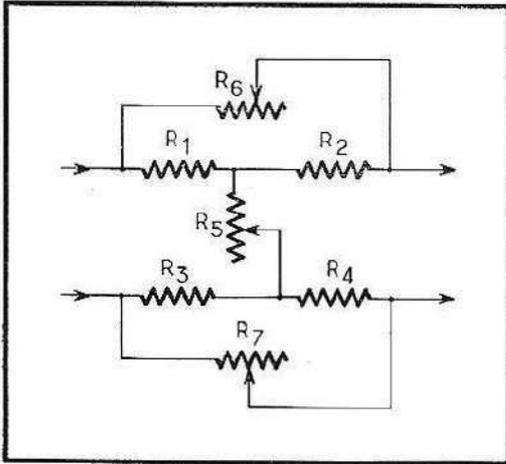


Fig. 155. — Atténuateur en double T ponté à impédance constante.

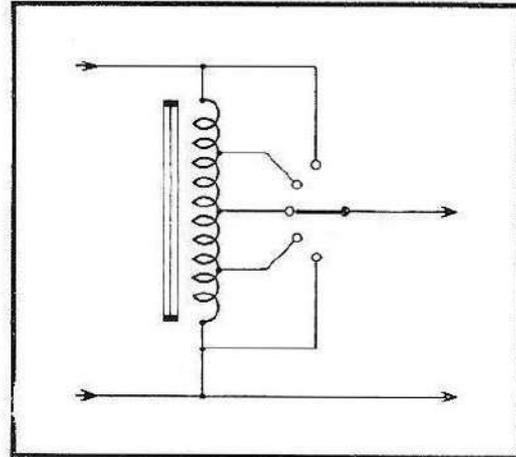


Fig. 156. — Un autotransformateur à prises ne résout pas entièrement le problème de l'impédance.

Un simple potentiomètre ne convient pas non plus pour régler indépendamment la puissance appliquée à chacun des haut-parleurs d'une distribution complexe (hôtels, grands immeubles, radiodistribution, etc.).

A pleine puissance l'impédance du haut-parleur est shuntée par la résistance du potentiomètre, ce qui diminue l'impédance totale, et, dans toutes les autres positions du curseur, une partie de la résistance est en série avec l'impédance qui est donc augmentée.

Comme l'impédance du haut-parleur varie avec la fréquence, l'atténuation n'est pas rigoureusement la même pour toutes les fréquences.

Un atténuateur en T ne corrige pas parfaitement ce défaut. En réalité il n'y a pas de solution parfaite. La plus rationnelle serait l'emploi d'un autotransformateur à prises (fig. 156). Ce dispositif assure une variation de puissance dans le haut-parleur sans discrimination de fréquence, mais il ne corrige pas la variation de l'impédance de la ligne.

On utilise parfois pour cet usage un atténuateur en T ponté qui ne comporte que deux résistances variables (fig. 157).

Cependant on s'en tient souvent à un atténuateur en L dont la figure 158 donne le schéma.

On peut calculer la valeur de R_1 et R_2 au moyen des formules suivantes :

$$R_1 = Z \frac{n - 1}{n}$$

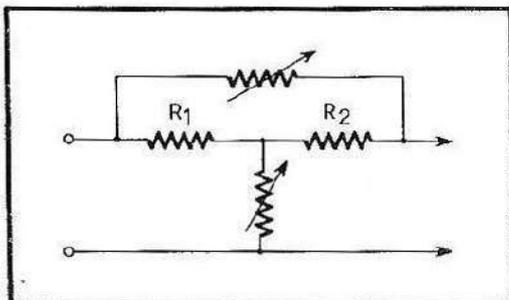


Fig. 157. — Atténuateur en T ponté à deux résistances variables.

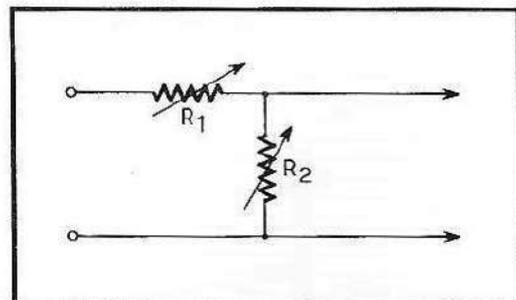


Fig. 158. — Atténuateur en L normal.

Z est la résistance d'entrée, en principe égale à l'impédance du haut-parleur.

$$R_2 = Z \frac{n}{n - 1}$$

Ce dispositif peut être encore simplifié en rendant fixe la résistance de série R_1 . On a alors le schéma de la figure 159 dans lequel

$$R_1 = 5 Z \text{ et } R_2 = 0,75 Z$$

Il y a lieu de remarquer qu'en pleine puissance 20 % de celle-ci est dissipée dans R_1 et que l'impédance varie malgré tout avec le réglage. Cepen-

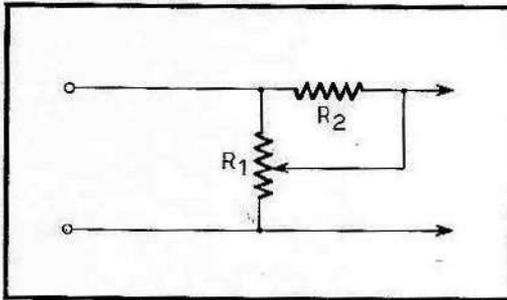


Fig. 159. — Atténuateur en L simplifié.

dant ce système, qui permet d'utiliser des composants de fabrication courante, est satisfaisant dans les cas où chaque haut-parleur ne reçoit qu'une faible puissance.

8. — Le mélange ("mixage").

Au problème du réglage du volume sonore se lie celui du mélange de sons provenant de diverses sources. L'exécution d'un programme oblige souvent à passer graduellement d'une source à l'autre, à superposer plusieurs signaux, à réaliser des « fondus », à introduire des « effets » ou des fonds sonores.

Dans les installations importantes de distribution de son, et notamment dans les studios de radiodiffusion, de télévision ou de cinéma, les divers signaux B. F. aboutissent à un pupitre de commande permettant toutes les commutations possibles entre les signaux entrants, leur répartition en divers canaux et le contrôle de leurs niveaux.

L'utilisation d'un simple inverseur pour commander deux sources est hors de question, car il faudrait que les deux signaux aient exactement la même amplitude et, de plus, la manœuvre se traduirait par un claquement inadmissible. Pour éviter cet inconvénient on devrait agir simultanément sur le réglage de volume, ce qui provoquerait un temps de silence tout aussi inacceptable.

Le passage doit donc pouvoir se faire *graduellement* et, de plus, on doit pouvoir *mélanger* en toute proportion les sons venant de plusieurs sources.

Les figures 160 à 163 montrent divers systèmes de commutation ou de mélange.

Le système de la figure 160 est très simple mais ne permet pas le mélange. Celui de la figure 161 autorise le mélange mais présente l'inconvénient que, sauf sur les positions extrêmes, le réseau connectant les sources à l'amplificateur n'a aucun point directement relié à la masse, ce qui est de nature à causer des difficultés pour assurer une protection efficace contre les interférences par induction.

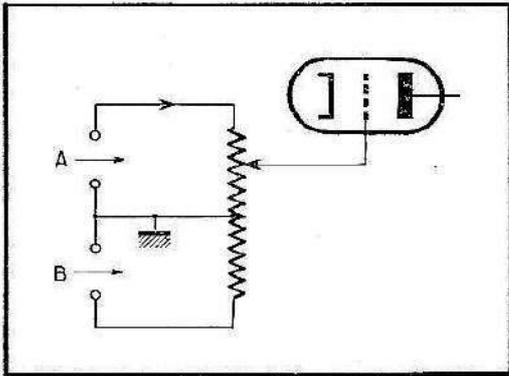


Fig. 160. — Cette disposition, parfois utilisée, permet un passage progressif d'une source à une autre mais non le mélange.

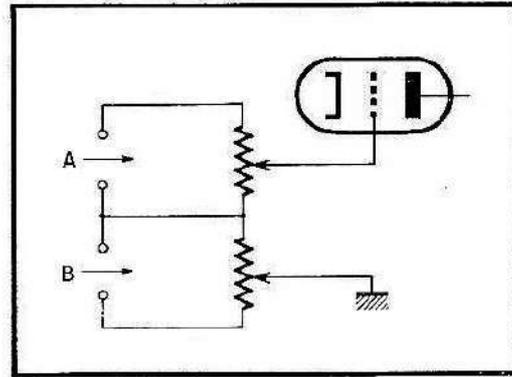


Fig. 161. — L'emploi de deux potentiomètres en série permet le mélange mais risque de produire du ronflement.

Dans le montage de la figure 162 il est fait usage d'atténuateurs en H qui sont une version simplifiée du point de vue mécanique de l'atténuateur en T. Ici les sources peuvent avoir une impédance différente.

Le dispositif de la figure 163 est le plus utilisé. Il est composé d'atténuateurs en T dont un nombre relativement élevé peut être mis en parallèle.

On peut plus facilement assurer l'indépendance complète des sources par rapport l'une à l'autre en effectuant les mélanges par voie électronique (fig. 164).

Ici chaque source est reliée, à travers un atténuateur, à la grille d'un tube amplificateur et tous les circuits d'anode sont ramenés à une sortie commune.

Une forte contre-réaction peut être appliquée aux tubes de manière à ramener le gain à l'unité tout en diminuant l'impédance de sortie.

La distribution du son entre diverses voies peut se faire au moyen d'un dispositif inverse, comme celui de la figure 165.

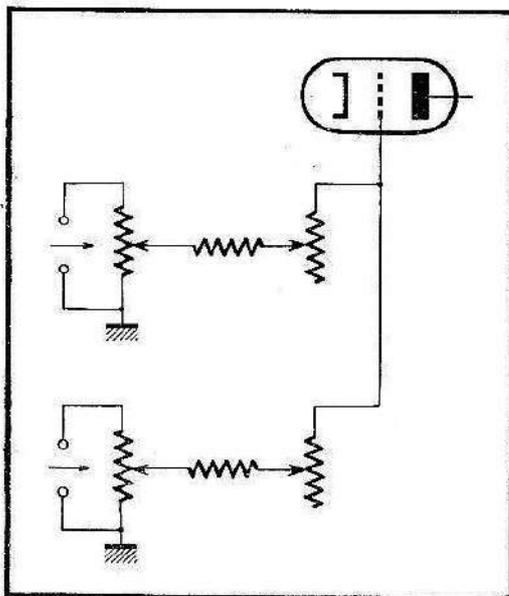


Fig. 162. — Deux atténuateurs en H permettent de mélanger des sons provenant de sources dont l'impédance est différente.

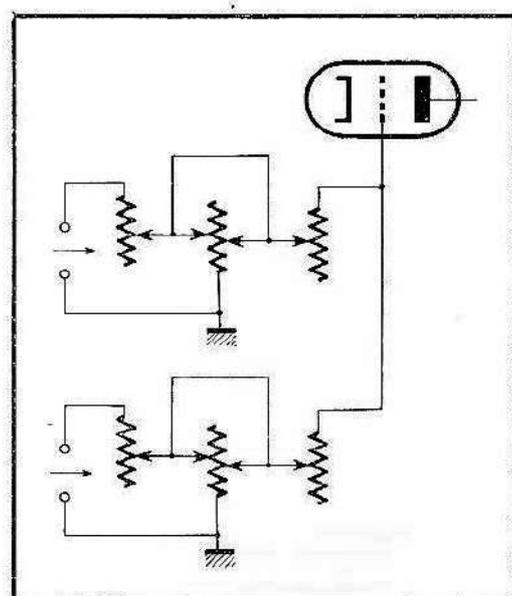


Fig. 163. — Des atténuateurs en T, en nombre indéterminé, peuvent être mis en parallèle. Ils permettent le mélange à partir de sources de caractéristiques diverses.

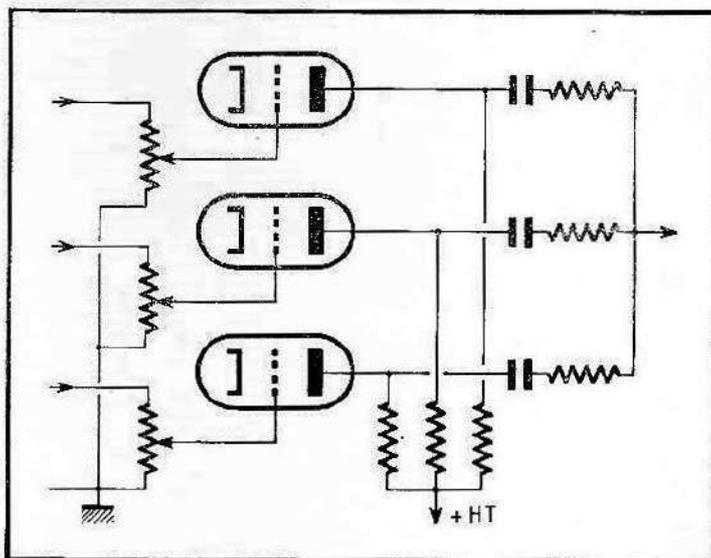
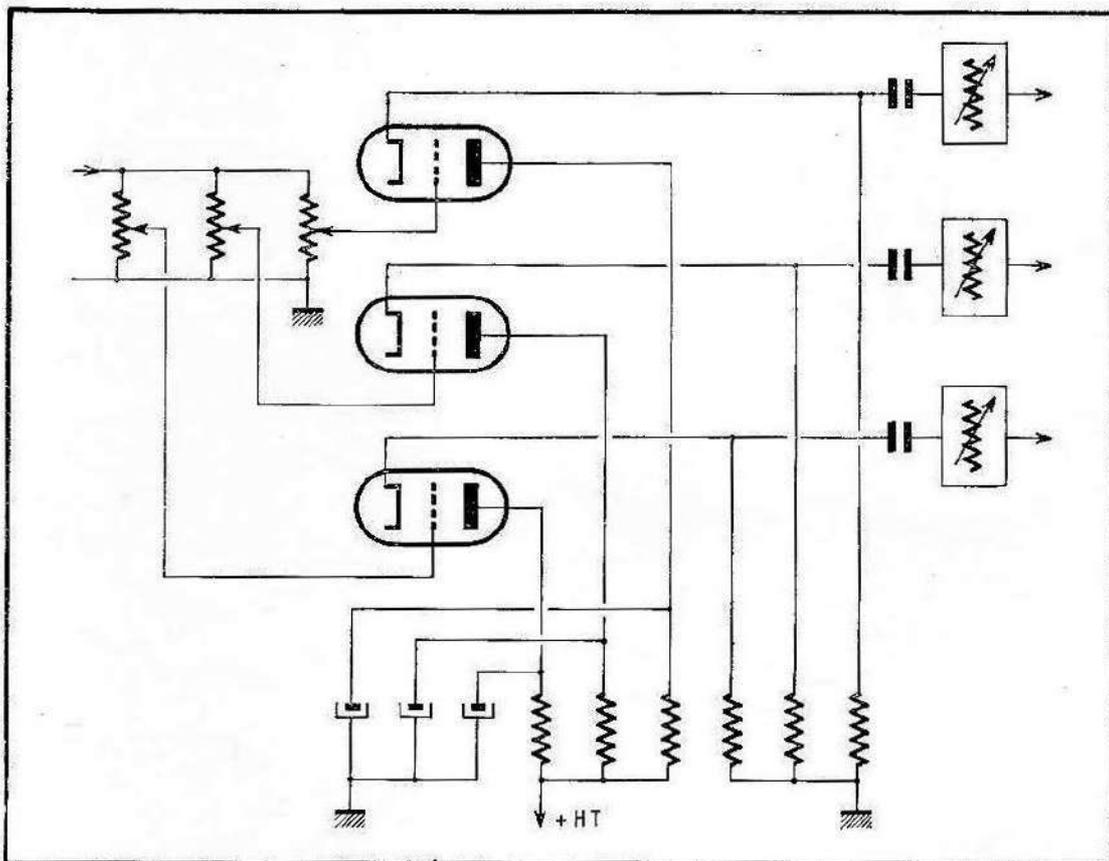


Fig. 164 (ci-contre). — Le mélange des signaux se fait plus facilement par voie électronique.

Fig. 165 (ci-dessous). — La distribution d'un signal entre plusieurs canaux peut également se faire électroniquement.



9. — Le réglage de contraste.

L'écart entre les niveaux de son recueillis par les microphones à des instants successifs est énorme et souvent tel qu'il est impossible de le reproduire dans toute son étendue.

Si l'on règle le gain de l'installation de telle façon que le niveau maximum frise la limite de distorsion, les minima peuvent descendre en dessous

de la valeur nécessaire pour couvrir le bruit de fond ou la rumeur d'ambiance.

D'autre part, la technique de l'enregistrement, que ce soit sur disque ou sur bande magnétique, exige que l'écart entre maxima et minima soit sévèrement contrôlé. La modulation d'un émetteur de radiodiffusion impose des limites analogues.

La dynamique d'un orchestre peut atteindre près de 80 dB (fig. 166), on doit donc nécessairement « comprimer » cet écart en le réduisant, selon le cas, à 30 ou même 20 dB.

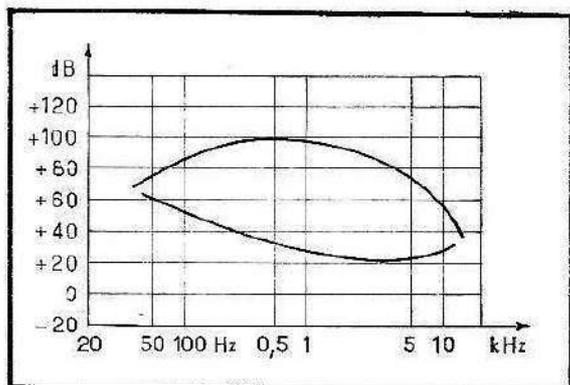
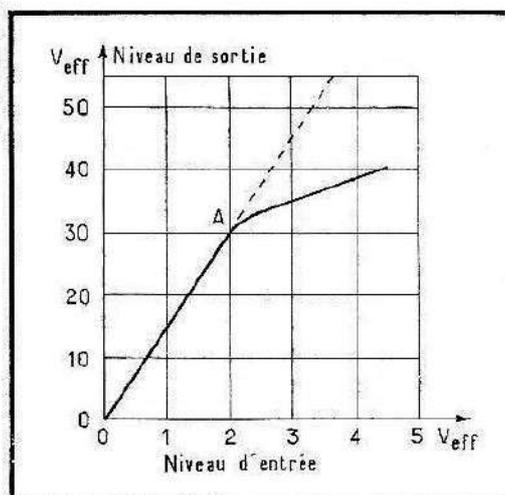


Fig. 166. — Contenu sonore d'un orchestre durant une période indéterminée. L'écart entre les pianissimi et les fortissimi peut atteindre 80 dB.

Fig. 167. — Caractéristique d'un dispositif limiteur. Au-delà du point A le gain devient voisin de l'unité.



Un ingénieur du son expérimenté peut, à la rigueur, effectuer manuellement ce contrôle, mais même si, connaissant la matière transmise, il peut prévoir les fortissimi et suivre en quelque sorte leur croissance, il risque cependant d'être parfois surpris. La chaîne d'amplification est alors surchargée et il en résulte une distorsion audible.

On utilise généralement dans les studios de radiodiffusion ou d'enregistrement un limiteur automatique de gain.

Ce dispositif ne doit cependant entrer en fonction que lorsque l'intensité sonore dépasse un seuil bien déterminé. De plus son action doit être telle que l'amplification revienne à sa valeur primitive dans le minimum de temps après la fin du passage à atténuer.

La figure 167 montre la caractéristique que doit prendre un « compresseur ».

Le limiteur est constitué par un amplificateur dont le gain demeure fixe pour les signaux de niveau normal. Quand ce niveau est dépassé le gain est *instantanément* réduit.

Il n'en demeure pas moins que, comme l'appareil provoque une diminution brusque de l'amplification et que le temps de retour ne peut être instantané, son action sur une succession rapide de transitoires ou sur un passage fortissimo contenant de grandes variations d'amplitude peut provoquer des fluctuations indésirables.

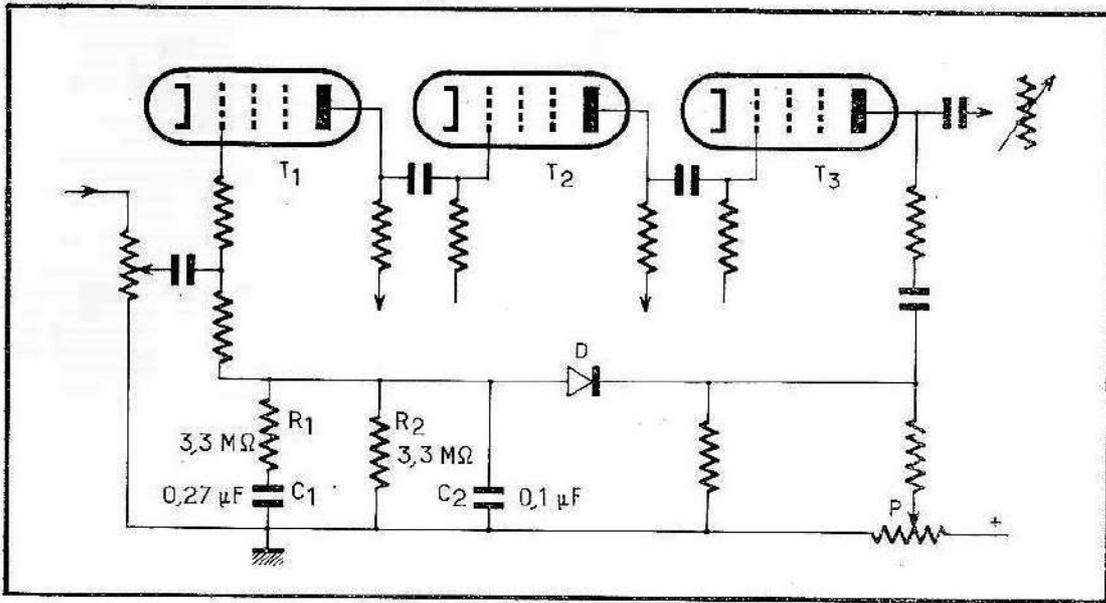


Fig. 168. — Principe du limiteur de contraste. Le signal issu de T_3 est redressé par la diode D et fournit une tension négative à la grille de T_1 , ce qui en modifie la pente. Le potentiomètre P permet de fixer le niveau à partir duquel la compression s'effectue. Les constantes de temps $R_1 C_1$ et $R_2 C_2$ déterminent le délai d'entrée en action et le temps de retour.

L'ajustement du niveau d'entrée en action doit donc être très soigneusement réglé (fig. 168).

Un autre cas où un contrôle de niveau est nécessaire est celui d'un local dans lequel se trouvent à la fois le microphone et les haut-parleurs : par exemple dans une église ou une salle de conférences.

On a beau prendre toutes les précautions pour que le microphone ne puisse pas « entendre » le son émis par les haut-parleurs, notamment par l'emploi d'appareils à effet directif disposés de manière judicieuse, on risque quand même des accrochages, et si, pendant un discours, un orateur s'approche ou s'éloigne du microphone, lance des phrases d'une voix forte ou baisse le ton jusqu'au murmure, la parole sera tantôt assourdissante, tantôt incompréhensible.

Un limiteur de contraste est donc également très utile pour ce genre d'installation.

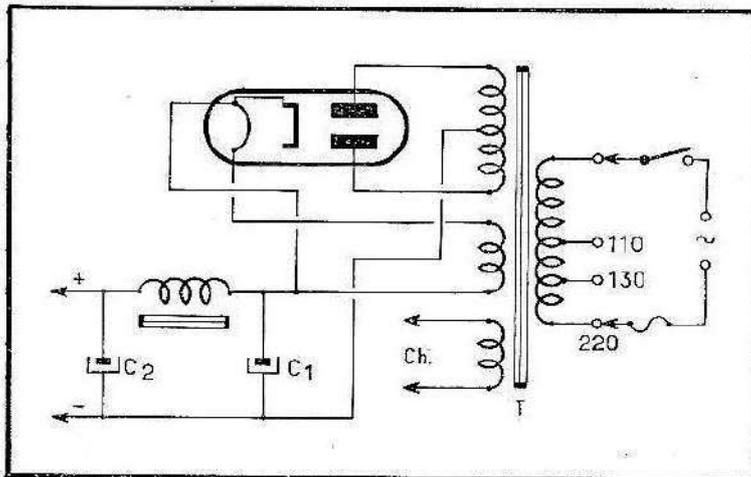


Fig. 169. — Schéma classique d'une alimentation par courant alternatif et tube redresseur.

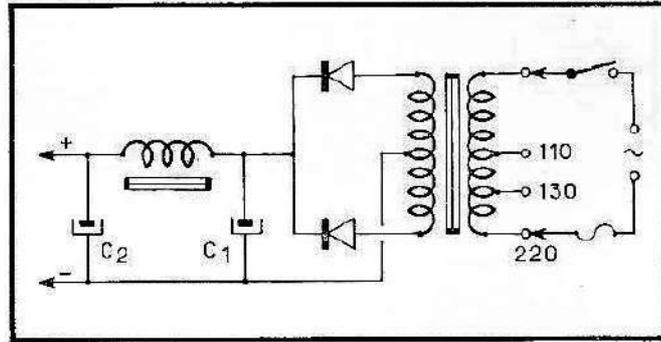
10. — Alimentation et problèmes de découplage.

A) AMPLIFICATEURS A TUBES.

L'alimentation des appareils à tubes se fait normalement à partir du secteur alternatif.

La disposition la plus couramment utilisée est schématisée par la figure 169.

Fig. 170. — Le tube redresseur peut être remplacé par des diodes au silicium ou des cellules à l'oxyde de cuivre ou au sélénium.



Le transformateur T comprend un primaire à plusieurs prises, permettant de l'utiliser sur diverses tensions de secteur, et un certain nombre de secondaires.

Les appareils d'origine américaine n'ont cependant, sauf exception, qu'un primaire adapté à la tension, standardisée aux U. S. A., de 115 V. Ils sont, en outre, prévus pour une fréquence de 60 Hz et, de ce fait, susceptibles de s'échauffer anormalement.

Un des secondaires fournit la haute tension à redresser pour alimenter les anodes et les autres la tension de chauffage des tubes. Il y a parfois un enroulement supplémentaire qui fournit, après redressement, une tension négative pour la polarisation des tubes de puissance.

Le redressement du courant à haute tension peut se faire soit par tube redresseur, soit par éléments semiconducteurs (fig. 170).

On peut, comme dans les figures 169 et 170, redresser les deux phases ou bien (fig. 171), n'en redresser qu'une seule.

Le premier système est le plus employé. Le deuxième est réservé à des appareils de faible puissance comme les préamplificateurs, ou pour fournir une tension négative de polarisation.

Les figures 172 à 174 montrent des systèmes qui permettent d'obtenir une tension redressée beaucoup plus élevée que la tension alternative qui leur est appliquée.

La construction du transformateur est ainsi simplifiée et plus économique.

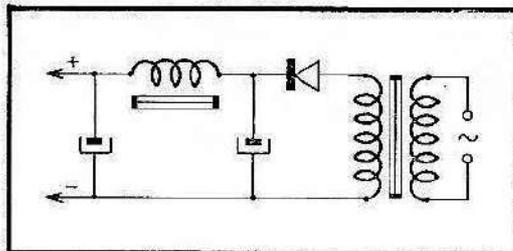


Fig. 171. — Redresseur monophasé utilisé pour les circuits à faible intensité.

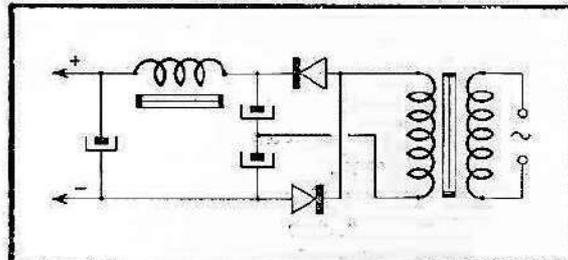


Fig. 172. — Circuit doubleur de tension (doubleur de Latour).

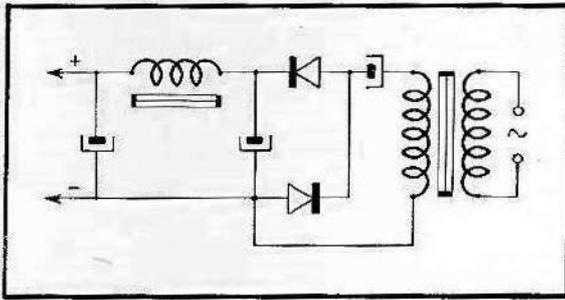


Fig. 173. — Doubleur de tension, deuxième version (doubleur de Schenkel).

Fig. 174 a. — Montage quadrupleur.

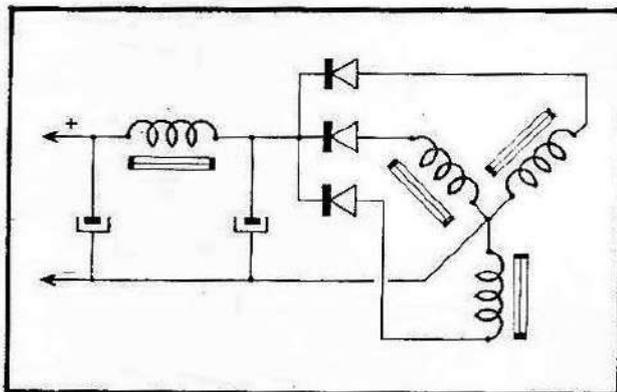
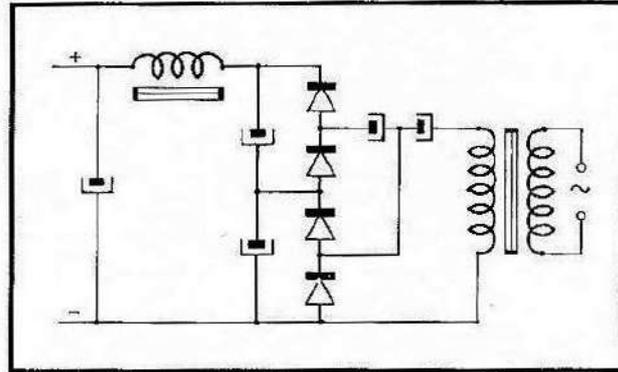


Fig. 174 b. — Redresseur triphasé.

Le courant redressé ne présente pas une tension constante mais est composé d'une série d'ondulations sans changement de signe (fig. 175). Selon que l'on redresse une ou deux phases la fréquence des ondulations est de 50 ou 100 Hz.

Pour obtenir un courant continu pur, l'élément redresseur doit être suivi d'un filtre du type « passe-bas ».

Il en existe deux types principaux utilisés dans les alimentations : le filtre en L et le filtre en π (fig. 176 a).

Ils comprennent une bobine à fer et un ou deux condensateurs de forte capacité.

Lorsque le courant est faible et qu'une chute de tension est sans grande importance, la bobine peut être remplacée par une résistance.

Le degré de filtrage nécessaire dépend de l'amplification qui suit l'étage où il est appliqué.

Un étage final en push-pull permet de tolérer jusqu'à 2 % de résidu alternatif, tandis que pour les étages précédents l'ondulation ne peut dépasser 0,1 % du signal B. F. passant en cet endroit.

Lorsque la haute tension nécessaire dépasse les quelque 400 V que supportent les électrolytiques courants, on en utilise deux en série. Il est

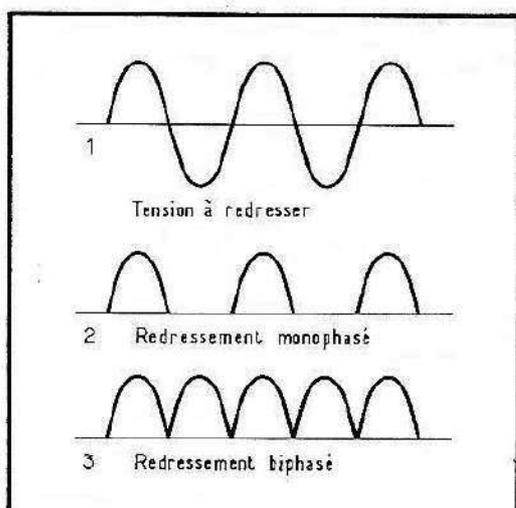


Fig. 175. — Le courant redressé n'est pas continu.

Fig. 177. — Le courant de fuite de deux condensateurs électrolytiques n'étant jamais le même, il est nécessaire de les shunter par des résistances pour égaliser la tension appliquée à chacun d'eux.

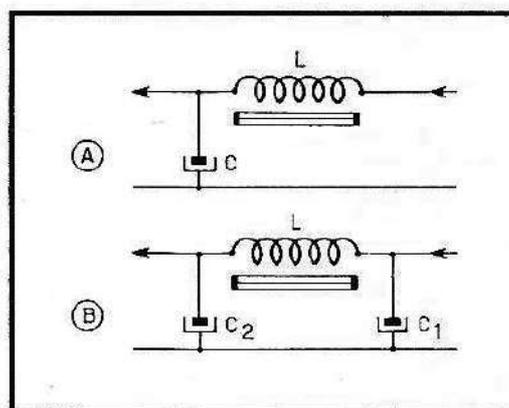


Fig. 176. — En a, filtre en L. — En b, filtre en π .

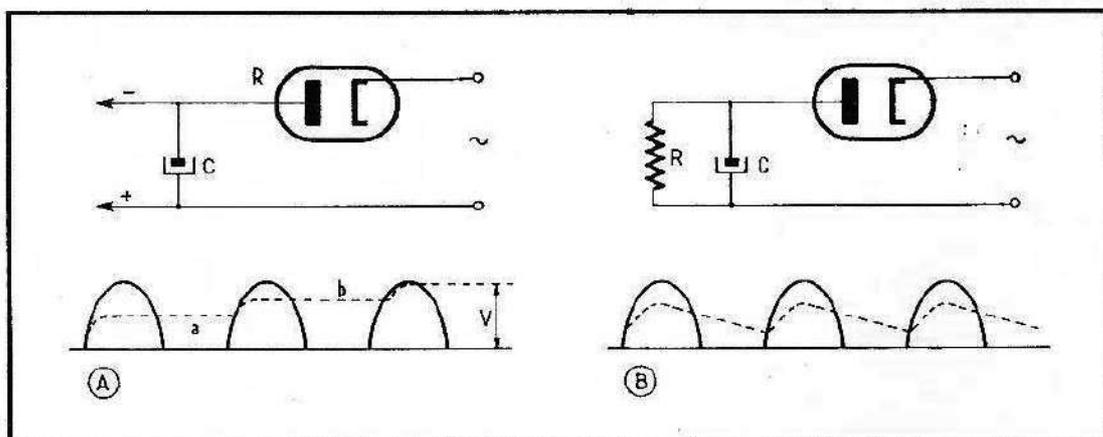
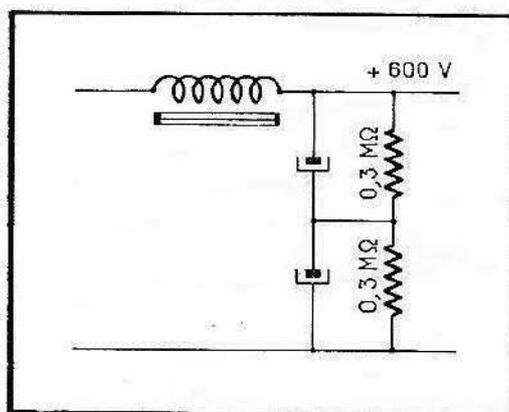


Fig. 178. — La tension aux bornes du condensateur C dépend du courant consommé. — En a, circuit ouvert, il atteint progressivement la valeur de crête. — En b, R représente la consommation de l'appareil. Le condensateur se décharge d'autant plus entre chaque impulsion que R est plus faible.

nécessaire dans ces conditions de les shunter par des résistances de valeur élevée, afin d'égaliser la tension appliquée à chacun d'eux (fig. 177).

La valeur de ces résistances doit être notablement inférieure à la résistance interne des condensateurs. $0,3 \text{ M}\Omega$ est un ordre de grandeur courant.

Le condensateur suivant immédiatement le tube redresseur forme un réservoir qui régularise le courant redressé. La tension à ses bornes dépend toutefois de l'intensité de ce courant (fig. 178). Or, dans un amplificateur où

l'étage final fonctionne en régime AB ou B, le courant anodique augmente ou diminue selon la puissance modulée en jeu. D'autre part, ces systèmes d'amplification ne fonctionnent dans de bonnes conditions que si la tension demeure aussi constante que possible.

Si l'on omet le condensateur d'entrée on constate :

- 1° que la tension redressée est moins élevée;
- 2° qu'elle demeure relativement constante malgré une variation importante du débit.

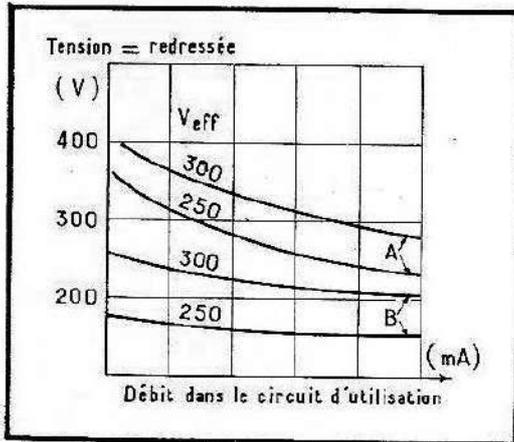


Fig. 179. — A : tension redressée avec filtre en π (entrée par condensateur). — B : tension redressée avec filtre en L (entrée par bobine à fer).

La comparaison entre les deux formes de filtre est montrée par la figure 179.

L'efficacité du filtre est le rapport entre la tension d'ondulation à l'entrée et celle qu'on peut mesurer à la sortie. Pour le calculer on considère le courant redressé comme un courant continu sur lequel est superposé un courant alternatif.

Du point de vue de cette composante alternative qu'il s'agit d'éliminer, on peut considérer L et C_2 comme formant un diviseur de tension.

Prenons par exemple une bobine de 10 Hz et un condensateur de 10 μ F.

Pour 100 Hz, les impédances sont approximativement les suivantes : $L = 6300 \Omega$ et $C = 150 \Omega$.

La tension d'ondulation à la sortie sera environ quarante fois plus petite que la tension à l'entrée.

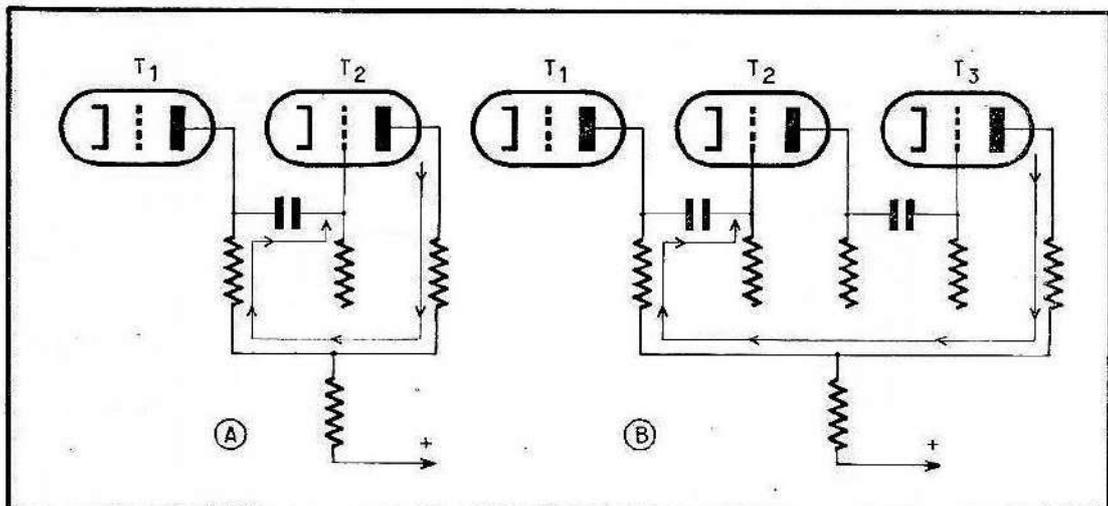


Fig. 180. — En a, l'absence de découplage produit un effet de contre-réaction. — En b, le circuit tend à osciller par suite du couplage entre T_3 et la grille de T_2 .

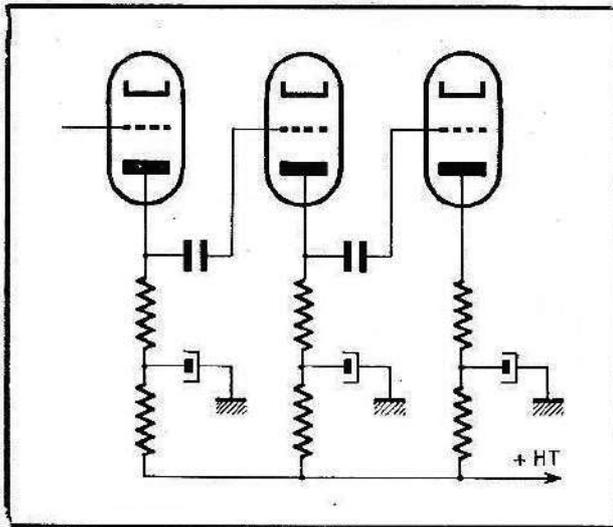
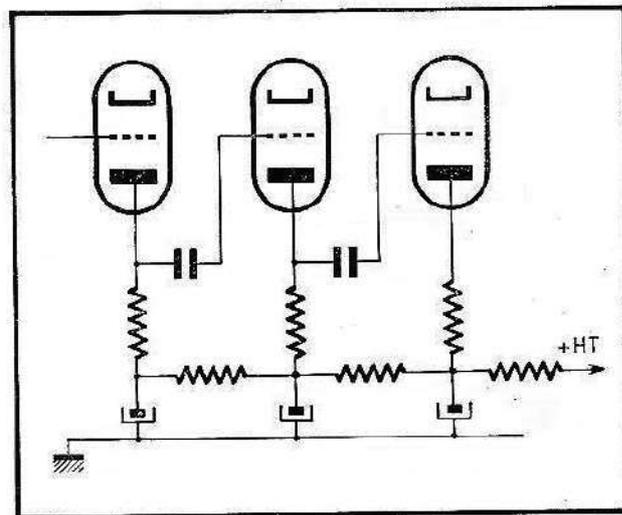


Fig. 181 a. — Filtrage individuel pour chaque étage.

Fig. 181 b. — Filtrage progressif et proportionnel au nombre d'étages.



Il n'en subsistera donc que 2,5 %, soit 0,5 V pour 20 V.
Si le redressement ne se fait que sur une seule alternance la fréquence d'ondulation est 50 Hz et, en utilisant les mêmes éléments, on a :

$$L = 3150 \Omega \text{ environ, et } C = 300 \Omega$$

L'efficacité tombe donc de 40 à 12.

Le condensateur C_2 (fig. 176 b) joue un double rôle : il complète le filtrage et sert de passage aux restes de courant B. F. provenant de l'étage final.

Nous avons vu que, dans un amplificateur, le signal est inversé d'étage en étage. Or, à défaut d'un réseau de *découplage* dans l'alimentation, il se produit une instabilité pouvant aller jusqu'à l'oscillation lente appelée par les Anglo-Saxons « motor boating » (traduisez : bruit de bateau à moteur, ou, si vous préférez, « le chaland qui passe »).

Deux étages *successifs* réunis à une même source présentant une impédance appréciable sont soumis à une contre-réaction.

Deux étages *alternatifs* reliés à une impédance commune réagissent positivement l'un sur l'autre, formant un *oscillateur* dont la fréquence dépend de la constante de temps des circuits intéressés (fig. 180).

On doit donc séparer les étages du côté de l'alimentation par des circuits dont la constante de temps est aussi longue que possible (fig. 181 a) et qui, au surplus, complètent le filtrage (fig. 181 b).

La tension de polarisation de la grille d'un tube peut, ainsi qu'il a été dit au chapitre X, s'obtenir en insérant une résistance de valeur appropriée entre la cathode et le côté négatif de l'alimentation qui est généralement mis à la masse.

Cette résistance crée une contre-réaction de courant qui diminue l'amplification fournie par le tube. Pour conserver à l'étage un gain suffisant on shunte la résistance par un condensateur. L'ensemble constitue alors un filtre et, pour que l'effet de contre-réaction disparaisse aux fréquences les plus basses, il faut que ce condensateur ait une capacité suffisante (fig. 182).

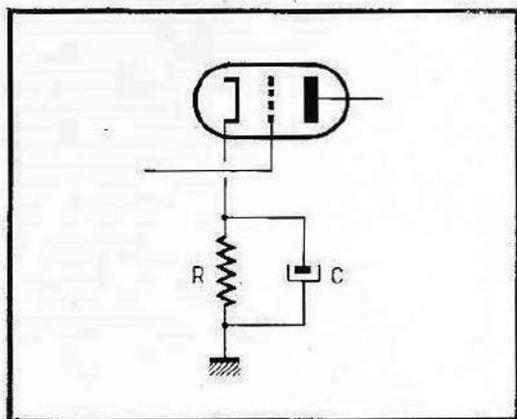


Fig. 182. — Le condensateur de découplage de la résistance de cathode doit avoir une capacité suffisante pour supprimer l'effet de contre-réaction aux fréquences les plus basses.

C'est ainsi que pour obtenir une efficacité de 95 % à 50 Hz avec une résistance de polarisation de 1000 Ω il faut une capacité de découplage d'au moins 10 μF . La constante de temps du système est alors de 0,01 seconde.

Dans la pratique, vu la faible différence de prix et le fait que la capacité d'un condensateur électrolytique tend à diminuer avec l'âge, on utilisera une capacité de 25 ou même de 50 μF .

Pour l'étage final, on a le choix entre la polarisation par résistance de cathode et l'utilisation d'une tension négative obtenue à partir de l'alimentation.

Pour peu que l'on s'écarte de la classe A, le courant anodique varie avec le signal B. F. et par suite la chute de tension dans la résistance de cathode, ce qui modifie le point de fonctionnement. C'est pourquoi le premier système ne se trouve généralement que dans les amplificateurs de faible puissance.

La figure 183 montre comment on peut obtenir une tension négative à partir d'une résistance insérée dans le circuit d'alimentation.

Un filtrage est nécessaire pour éviter la transmission aux grilles d'une fraction de la tension d'ondulation.

On utilise parfois la bobine assurant le filtrage général pour créer la chute de tension nécessaire (fig. 184).

On préfère souvent utiliser, dans les amplificateurs professionnels, un système qui rend la tension de polarisation indépendante du courant anodique (fig. 185). Le redresseur supplémentaire est le plus souvent une diode au silicium.

Une indépendance encore plus complète, et qui d'ailleurs est indispensable lorsqu'on utilise un étage final en classe B, est obtenue par l'emploi d'un secondaire distinct pour fournir la tension de polarisation (fig. 186).

B) AMPLIFICATEURS A TRANSISTORS.

Les amplificateurs à transistors ont primitivement été considérés avant tout comme des appareils portables alimentés par batteries.

Actuellement l'emploi des transistors s'est étendu aux amplificateurs de puissance, et il est normal d'alimenter ceux-ci à partir du secteur alternatif.

Fig. 183. — La chute de tension dans R_1 fournit une tension négative qu'il est nécessaire de filtrer au moyen de R_2 et C avant de l'appliquer aux grilles des tubes de sortie.

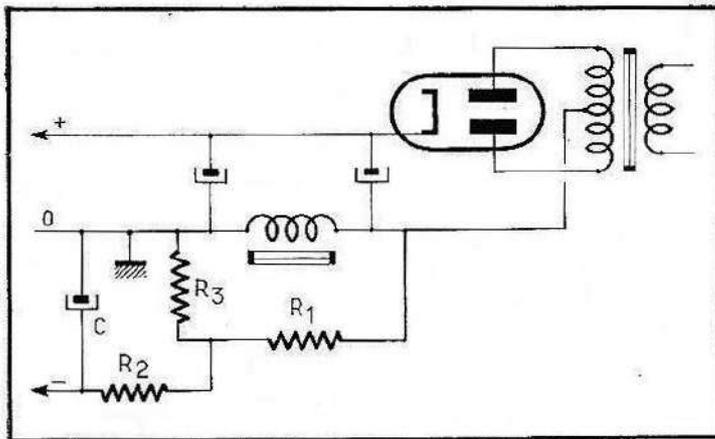
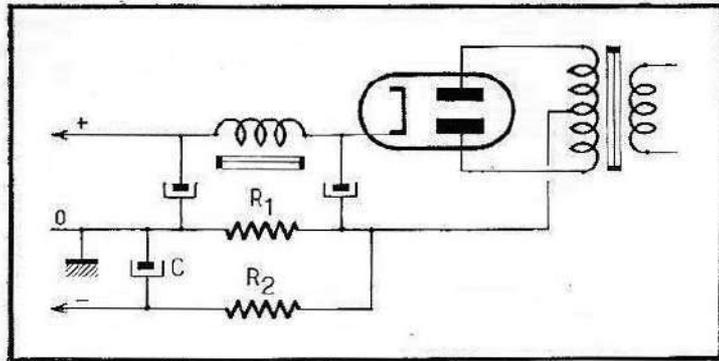


Fig. 184. — La chute de tension dans la bobine de filtrage peut être utilisée pour fournir une tension négative.

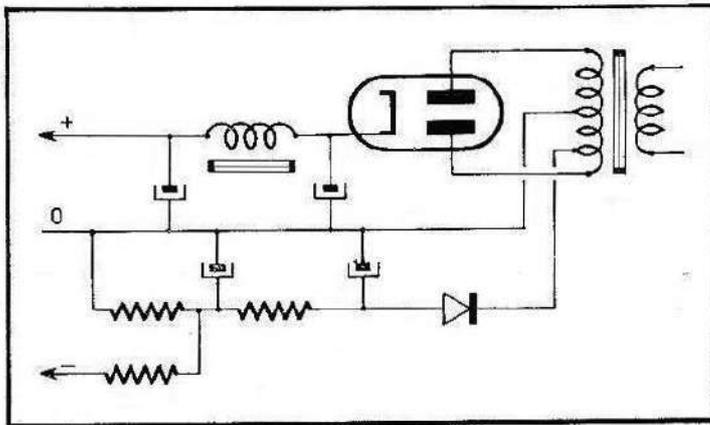
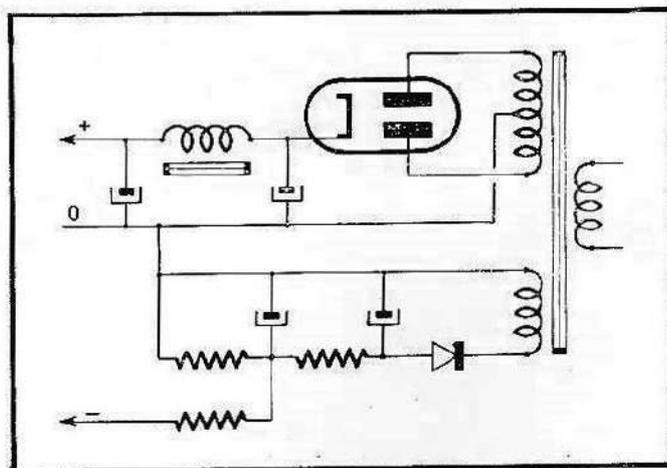


Fig. 185. — Un redresseur séparé rend la tension négative de polarisation indépendante du courant d'alimentation.

Fig. 186. — Un secondaire distinct permet une indépendance encore plus complète de la tension négative vis-à-vis du courant d'alimentation.



Le circuit d'alimentation est simplifié par le fait qu'il n'y a pas de courant de chauffage, mais il faut considérer que l'étage de puissance fonctionne en classe B et que, d'autre part, le transistor est un amplificateur de courant. Le système d'alimentation doit donc fournir des ampères au lieu de milliampères, avec d'importantes variations de débit. Par contre, la tension continue est modeste.

Pour ces raisons, le redressement se fait toujours au moyen de diodes au silicium montées en pont, selon le schéma de la figure 187.

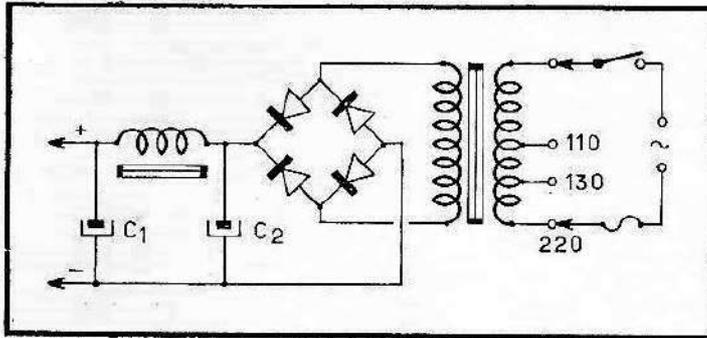


Fig. 187. — L'alimentation d'un amplificateur à transistors exige un gros débit sous une faible tension. L'emploi de diodes au silicium montées en pont est la meilleure solution. C_1 et C_2 ont une capacité de $500 \mu\text{F}$.

Il est, au surplus, nécessaire d'utiliser des condensateurs de filtrage de très grande capacité ($200 \mu\text{F}$ et plus) et une stabilisation par tubes au néon lorsque la tension est suffisante pour leur emploi.

II. — La stabilisation de tension.

Il est nécessaire, dans certains cas, de maintenir une tension d'alimentation constante, malgré les fluctuations d'intensité dans le circuit d'utilisation ou les variations de la tension du secteur.

Une tension peut être régularisée au moyen d'un dispositif électronique comme celui dont la figure 188 montre le principe.

Un tube de puissance T_1 est intercalé en série dans le circuit de filtrage. Sa grille de commande est connectée à l'anode d'un tube T_2 . La grille de ce dernier est reliée, à travers un diviseur de tension, au côté cathode de T_1 .

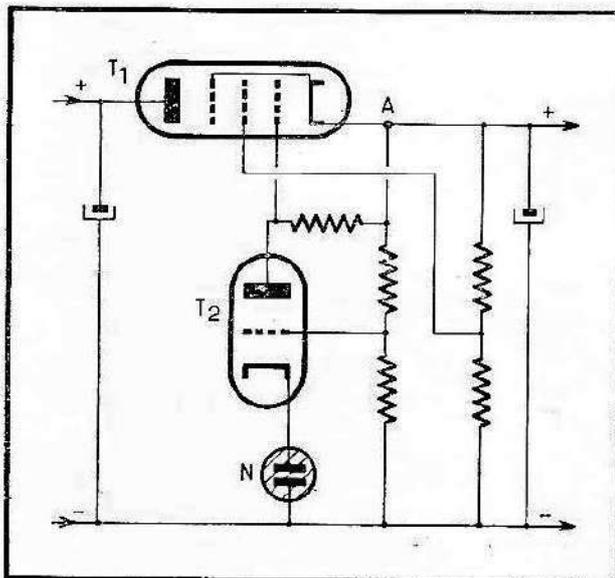
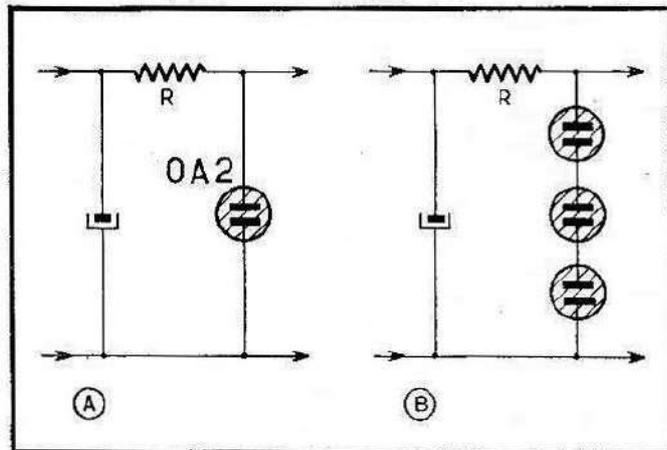


Fig. 188. — Système de régulation de la tension anodique par tubes. N est un tube au néon.

Fig. 189. — Les tubes au néon permettent de stabiliser, dans certaines limites, une tension d'alimentation. En a, tension faible. — En b, tension élevée.



Si, parce que le débit augmente, la tension baisse au point A, cette variation est amplifiée par le tube T_2 et transmise à la grille de T_1 de telle façon que la chute de tension dans ce tube diminue, ce qui rétablit la situation. Dans certaines réalisations les tubes sont remplacés par des transistors.

Une autre manière d'assurer une stabilisation est l'emploi d'un tube au néon en dérivation sur la sortie du circuit de filtrage (fig. 189).

La chute de tension à travers un tube au néon varie relativement peu avec le débit, de sorte que les variations de tension sont, dans de certaines limites, absorbées.

Ce fait contribue en outre à améliorer le filtrage en résorbant les restes de la tension d'ondulation.

L'emploi d'un tube au néon est très utile pour compléter le filtrage de la tension anodique appliquée aux tubes des préamplificateurs et, en général, à ceux qui doivent être suivis d'une amplification considérable.

Un troisième système de stabilisation est celui qu'on obtient par saturation magnétique (fig. 190) d'un noyau de transformateur.

Le principe est le suivant : un transformateur normal T_1 est placé en série avec un transformateur T_2 dont le noyau est proche de la saturation quand on y applique la tension d'entrée qu'on désire stabiliser.

Tant que la tension d'entrée conserve sa valeur nominale, T_2 fournit une

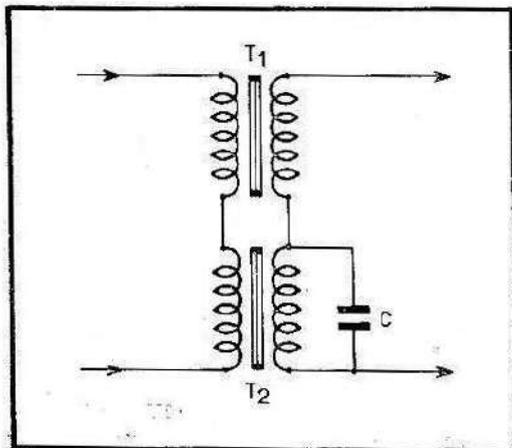


Fig. 190. — Principe d'une stabilisation par fer saturé. C améliore la forme du courant stabilisé.

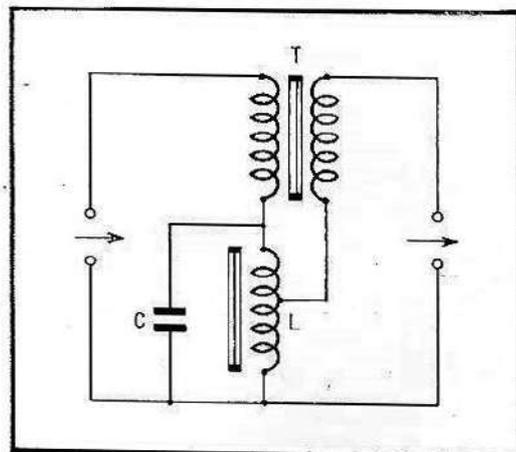


Fig. 191. — Principe d'une stabilisation par circuit résonnant L/C.

part importante de la tension de sortie. Mais lorsque la tension d'entrée augmente ou diminue, le degré de saturation de T_2 varie et le rapport des tensions entre les secondaires se modifie de telle manière que leur somme demeure constante.

Dans les régulateurs de tension basés sur ce système qu'on trouve actuellement sur le marché, la tension de sortie se maintient à $\pm 1\%$ de la valeur nominale pour une variation de la tension du secteur de l'ordre de $\pm 15\%$.

Fig. 192. — En A, des courants vagabonds circulent souvent dans un châssis. Ils peuvent créer une différence de potentiel alternative entre les points a et b. — En B, le remède est l'emploi d'une prise de masse unique pour tous les circuits d'un même tube.

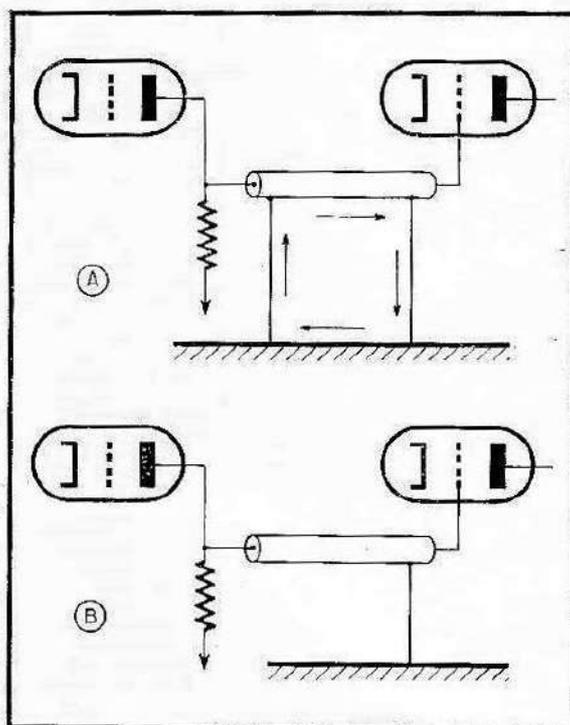
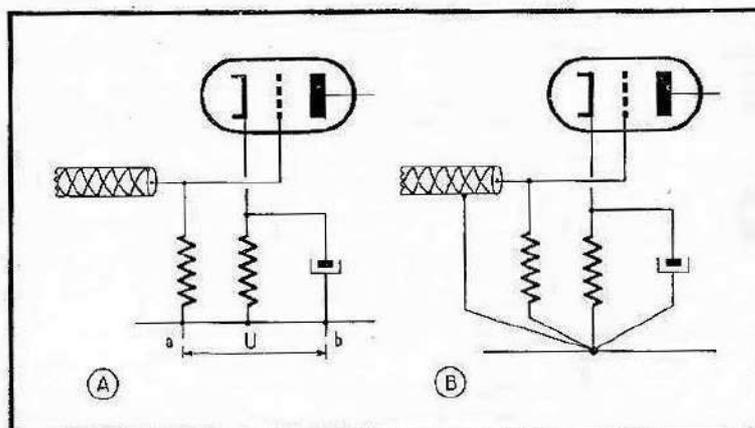


Fig. 193. — En A, des ronflements peuvent être induits dans une faradisation reliée en deux points au châssis. — En B, la solution : un seul point à la masse pour les circuits faradisés.

Un autre système de stabilisation magnétique fait usage d'un circuit approximativement accordé sur la fréquence du secteur (fig. 191).

Le transformateur T est normal, mais le noyau de la bobine L est partiellement saturé.

Lorsque la tension du secteur tombe en dessous de sa valeur nominale le courant à travers L diminue et l'impédance du circuit LC augmente, ce qui tend à rétablir la tension primitive à la sortie.

Inversement, si la tension du secteur augmente, la saturation plus grande du noyau de L diminue la réactance du circuit et, par suite, la tension de sortie.

12. — L'importante question des masses.

Le réseau d'alimentation est parcouru à la fois par le courant continu d'alimentation et par une partie du signal B. F.

L'un des pôles, généralement le négatif, est relié à la masse générale du châssis, lequel sert souvent de conducteur.

Il est bon que l'utilisateur sache que cette disposition cache bien des pièges et que, en cas de réparation, des modifications quelconques, paraissant même insignifiantes, peuvent avoir pour résultat l'apparition d'un bruit de fond important.

Quel que soit le métal dont est fait le châssis, sa résistivité n'est jamais nulle. Il existe donc entre chaque point une résistance ohmique, très faible sans doute, mais suffisante pour créer parfois un couplage indésirable entre les circuits qui y sont rattachés.

D'autre part, un transformateur d'alimentation n'est jamais parfait au point de ne produire aucun champ magnétique extérieur. Quand il est fixé sur un châssis en tôle il disperse des lignes de force dans celui-ci et y fait naître des courants de FOUCAULT.

Fig. 194. — Un câble faradisé réunit deux éléments d'une chaîne (pré-amplificateur et amplificateur par exemple).

La solution A (en haut) comporte une connexion séparée pour réunir les masses.

La solution B (en bas), où l'on utilise la gaine comme connexion de masse, est souvent préférable.

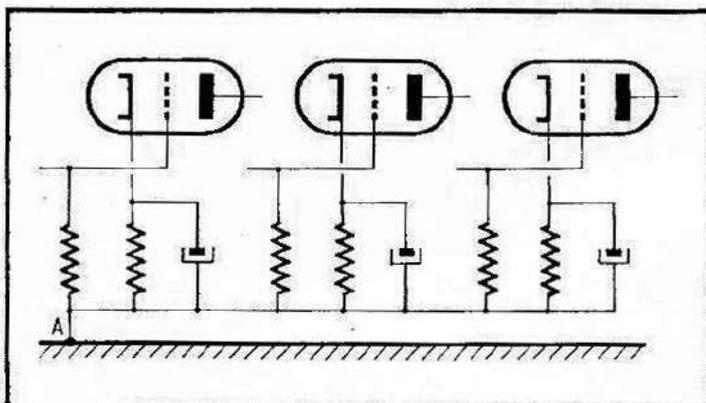
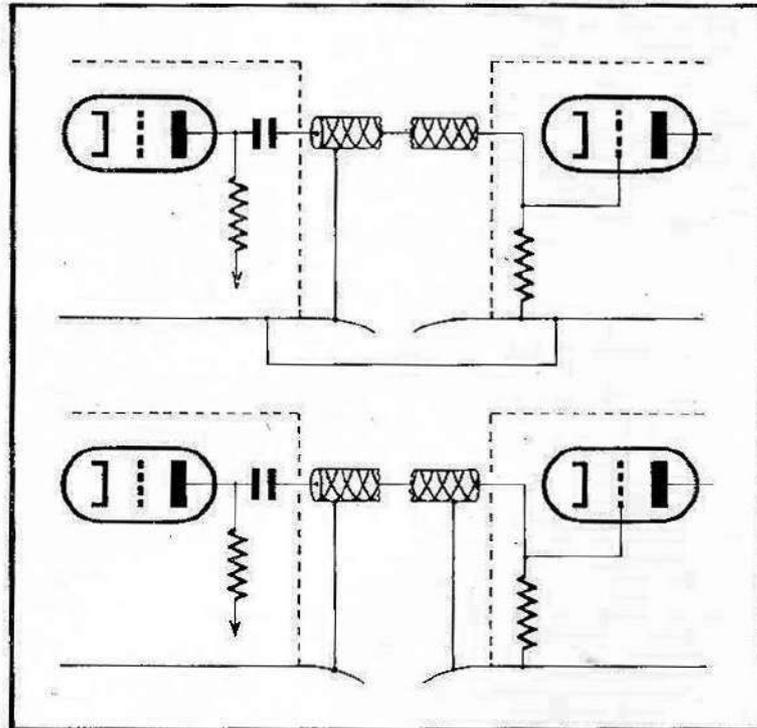


Fig. 195. — Certains constructeurs utilisent un fil de masse général relié en un seul point au châssis.

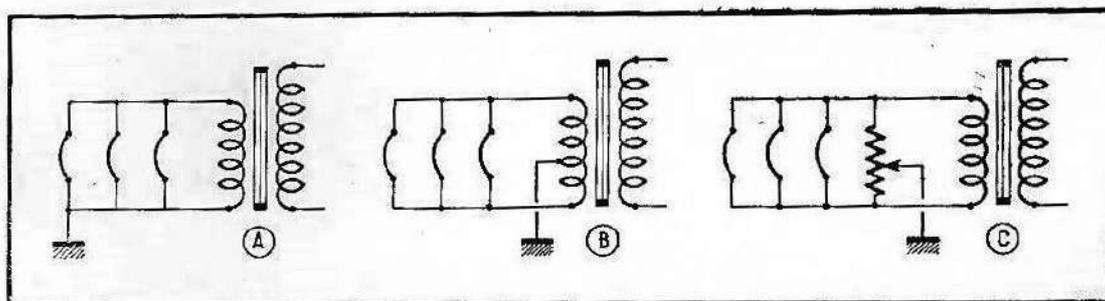


Fig. 196. — Trois moyens de mettre le circuit de chauffage à la masse : A et B risquent de provoquer un bruit de secteur, C est à préférer pour les amplificateurs à étages multiples.

On ne peut donc jamais considérer qu'un châssis est dans son ensemble strictement au potentiel zéro.

Il en est de même de la faradisation des connexions « chaudes ».

Les figures 192 à 194 montrent des exemples de dispositions pouvant créer des ronflements ou bruits de secteur d'autant plus insupportables que l'amplification subséquente est plus grande.

Pour pallier les effets nocifs des courants vagabonds dont un châssis est le siège on utilise parfois une masse générale constituée par un gros fil de cuivre qui n'est connecté au châssis qu'en un seul endroit (fig. 195).

Le circuit de chauffage des tubes pose un problème particulier.

Entre le filament et la gaine qui l'entoure et forme la cathode, il existe une capacité non négligeable. De plus, l'isolement n'est jamais absolument parfait et il ne supporte d'ailleurs qu'une tension modérée.

Il en résulte que s'il existe une différence de potentiel importante entre cathode et filament, une fuite peut se produire, amenant une tension alternative sur la cathode. La fuite peut devenir permanente et mettre le tube hors d'usage.

Pour fixer le potentiel du circuit de chauffage, on peut mettre un des pôles à la masse (fig. 196 a) ou utiliser à cet effet une prise médiane sur l'enroulement (fig. 196 b).

Le premier système a l'inconvénient d'appliquer la pleine tension de chauffage à l'espace filament-cathode.

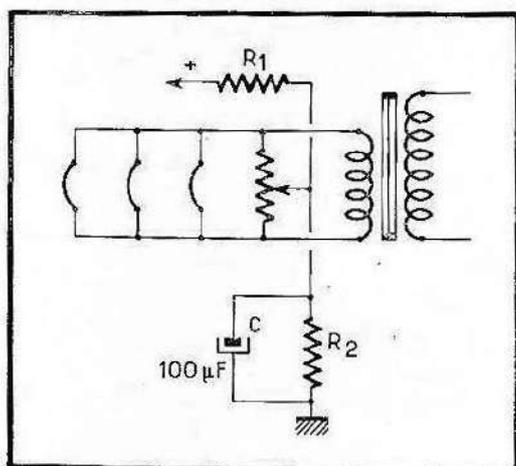


Fig. 197. — L'ensemble du réseau de chauffage est porté à une tension positive par rapport à la masse, ce qui diminue le risque de fuite filament-cathode.

Quant au second, il y a lieu de noter que la prise sur l'enroulement de chauffage ne constitue jamais un point vraiment neutre. Pour équilibrer le réseau de chauffage il est toujours conseillé d'utiliser un potentiomètre réglable (fig. 196 c).

D'autre part, lorsque la cathode est soumise, par rapport à la masse, à une tension continue élevée, comme c'est le cas dans un cathodyne, on peut éviter le danger d'une fuite filament-cathode en portant le circuit de chauffage à une tension positive correspondante (fig. 197).

Le condensateur C assure la mise à la masse du circuit de chauffage du point de vue alternatif.

LES MICROPHONES

La fonction d'un microphone est de transformer les vibrations acoustiques de l'air en un courant électrique de forme identique.

Il doit, de plus, conserver un rendement uniforme sur toute l'étendue de la bande de fréquences à transmettre.

On peut classer les microphones de diverses manières : selon le principe utilisé, d'après leurs caractéristiques directionnelles, ou encore suivant la façon dont l'énergie acoustique leur est appliquée.

Tous les microphones comportent un organe mobile mis en mouvement par l'onde sonore, mais tantôt c'est la *pression* qui agit, tantôt la *vélocité* des molécules d'air.

Rappelons à ce propos que le son produit deux effets qui ne sont que deux aspects du même phénomène :

1° une modification momentanée de la pression atmosphérique en un point donné;

2° un déplacement longitudinal alternatif des molécules d'air.

On peut se servir de l'un et l'autre de ces phénomènes indépendamment ou simultanément pour mettre en mouvement l'organe mobile du microphone.

D'autre part, pour la transformation du mouvement mécanique en courant électrique, les moyens suivants peuvent être utilisés :

1° variation de la résistance ohmique d'un conducteur;

2° production d'un courant induit;

3° variation d'une capacité;

4° phénomène piézo-électrique.

I. — Microphone à charbon.

On peut le décrire schématiquement comme suit (fig. 198) : une capsule remplie de grains de graphite est fermée par une membrane qui s'appuie sur ceux-ci. La vibration de la membrane exerce une pression sur les granules, ce qui fait varier la résistance offerte au passage d'un courant à travers leur masse.

Ce type de microphone comporte de très nombreuses variantes. Il présente l'inconvénient de nécessiter une source de courant auxiliaire. Sa courbe de réponse (fig. 199) est irrégulière et, en outre, il a un taux de souffle élevé.

Son seul avantage est de fournir un signal BF important, nécessitant peu d'amplification.

Il convient surtout pour la parole et n'est plus guère utilisé que pour le téléphone.

Nous ne le citons donc que pour mémoire.

2. — Microphone électrodynamique.

L'induction électromagnétique étant réversible, un haut-parleur peut aussi bien être utilisé en récepteur qu'en émetteur d'ondes sonores. De fait, il fait fonction de microphone dans les installations d'interphone.

Le microphone électrodynamique a, toutes proportions gardées, la même constitution : il comprend une membrane portant une bobine qui se déplace dans l'entrefer d'un aimant permanent. Les mouvements de la bobine induisent dans l'enroulement un courant alternatif. Contrairement au système

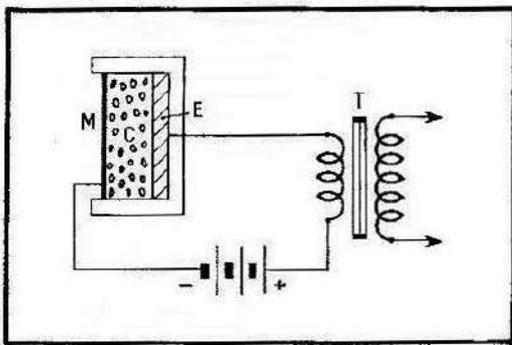
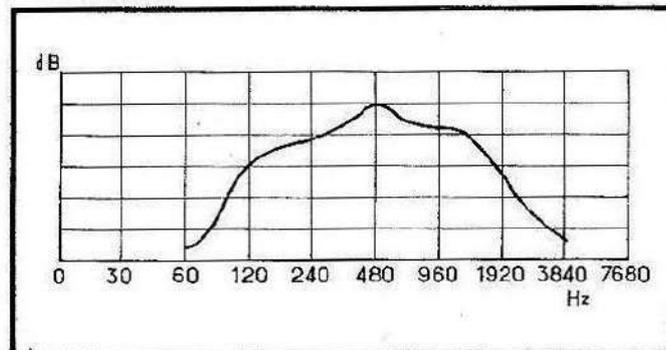


Fig. 198. — Principe d'un microphone à charbon. C : granulés de charbon de cornue. — E : électrode en graphite. — M : membrane. — T : transformateur rapport 1/50.

Fig. 199. — Courbe de réponse d'un microphone à charbon.



précédent, qui agit à la façon d'un robinet sur le courant provenant d'une source extérieure, ce microphone est un *générateur* d'énergie électrique.

La figure 200 représente un mode de construction assez courant.

La partie mobile est formée par un diaphragme en duralumin, de quelques dizaines de microns d'épaisseur, portant la bobine mobile et prolongé par un rebord ondulé.

Il est indispensable que ce diaphragme se meuve d'une pièce, sans se déformer par l'effet de la pression acoustique : c'est pourquoi on lui donne une forme bombée.

La flexion du rebord ondulé permet le déplacement. Il est également nécessaire que l'équipage mobile soit aussi léger que possible si l'on veut reproduire les fréquences élevées. A cet effet la bobine mobile n'est constituée que par les spires sans autre support qu'une imprégnation cellulosique. Le nombre de celles-ci étant, pour la même raison, réduit au minimum, la tension induite est faible : de quelques centièmes de volt pour une impédance (à 1000 Hz) de l'ordre d'une dizaine d'ohms.

La bobine est située dans l'entrefer d'un circuit magnétique comprenant un aimant au ticonal ou alliage analogue, ou encore, dans certains modèles,

en céramique magnétique (Ferroxdure). Le noyau épouse la forme intérieure de la membrane.

Le coussin d'air enfermé entre la membrane et l'armature polaire assure un certain amortissement au mouvement.

La cavité interne du microphone ne peut cependant être hermétiquement close, car non seulement sa résonance propre influencerait sur la courbe de réponse, mais de plus, la pression interne varierait avec la température ambiante, sans compter l'effet barométrique.

On pratique donc dans le boîtier un évent destiné à équilibrer les pressions et à modifier la résonance de la masse d'air enfermée.

Le microphone ainsi décrit est en principe omnidirectionnel.

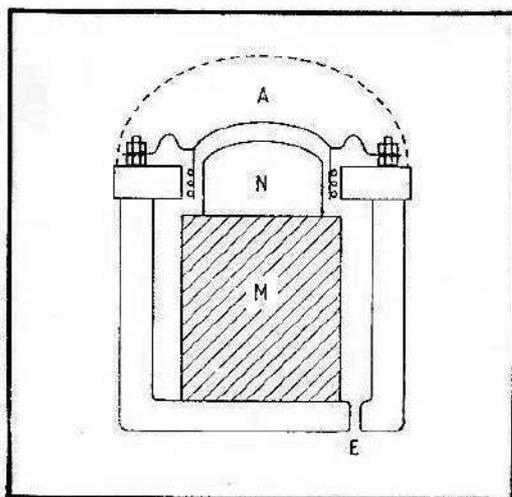


Fig. 200. — Coupe schématique d'un microphone électrodynamique. A : membrane en duralumin. — M : aimant en acier anisotropique ou céramique magnétique. — N : noyau. — E : évent d'égalisation de pression d'air.

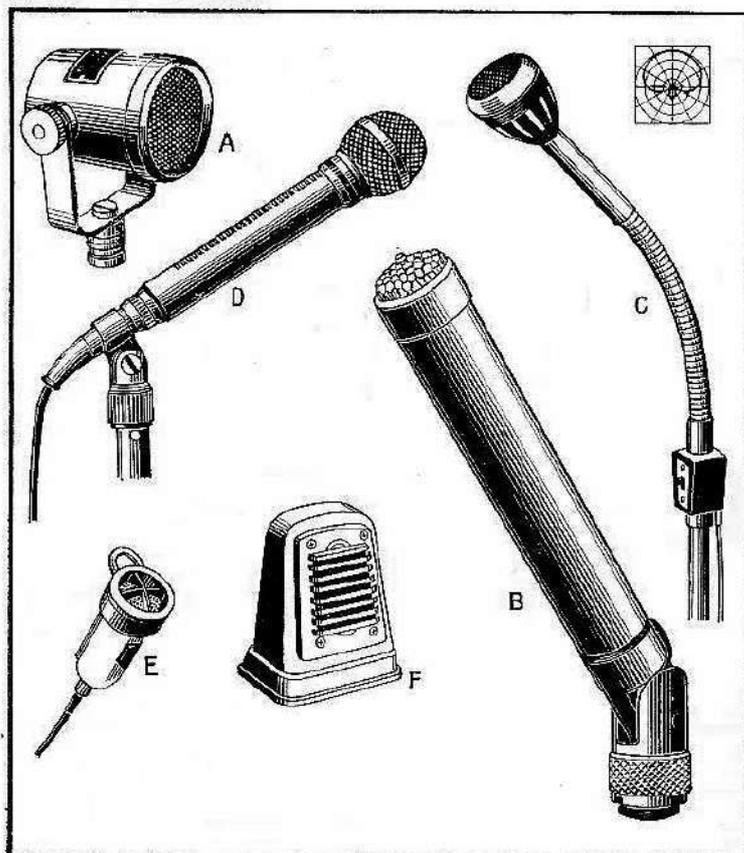


Fig. 201. — Divers modèles de microphones électrodynamiques. A : microphone omnidirectionnel à haute qualité pour usage général. — B : autre modèle universel omnidirectionnel. — C : microphone hypercardioïde anti-Larsen. — D : modèle cardioïde à très haute qualité pour télévision, cinéma ou radiodiffusion. — E : modèle à main pour reportages. — F : modèle de table pour emplois divers et, en particulier, pour l'enregistrement magnétique.

On peut cependant modifier ses caractéristiques polaires en pratiquant des ouvertures plus ou moins grandes dans le boîtier.

Cet appareil est d'un emploi courant en radiodiffusion, télévision, enregistrement et, en général, là où une bonne qualité de reproduction est exigée sans trop de complications.

Il en existe de nombreux modèles dont la figure 201 montre quelques exemples.

3. — Microphone à ruban.

C'est une variante du microphone électrodynamique.

Ici la bobine est remplacée par un très léger ruban métallique (fig. 202) placé entre les pièces polaires d'un aimant. Ce n'est plus la pression de l'air qui agit, mais le mouvement des molécules qui entraînent le ruban conducteur dans leur déplacement.

Le mouvement du ruban induit dans sa masse, en vertu de la loi de LAPLACE, un faible courant. L'impédance du conducteur étant extrêmement basse (environ 0,1 ohm), la tension aux bornes du microphone n'est que d'une fraction de millivolt et nécessite un transformateur-élévateur à grand rapport pour l'adapter au câble de liaison.

Un aimant très puissant est nécessaire pour obtenir un champ magnétique suffisant dans l'entrefer qui est obligatoirement fort large (fig. 203).

Vu l'extrême légèreté de l'élément mobile, le microphone à ruban est probablement le type susceptible de fournir la plus haute qualité de reproduction.

Il est largement utilisé dans le domaine professionnel, mais exclusivement pour les prises de son en studio ou dans les salles de concert. Le

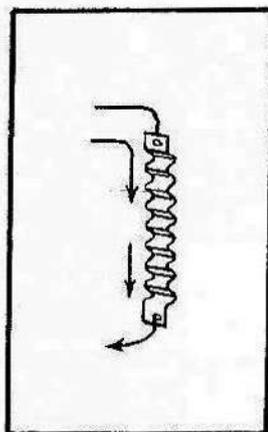


Fig. 202 (à gauche). —
Partie mobile d'un micro-
phone à ruban.

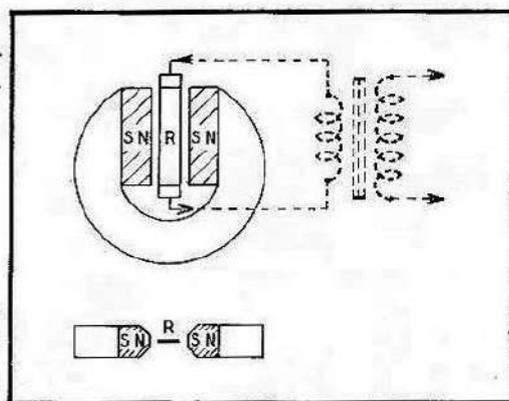


Fig. 203 (à droite). —
Principe de construction
d'un microphone à ruban.

haut-parleur à ruban est, en effet, particulièrement sensible au vent et ne convient pas pour le plein air.

Il est, par construction, bidirectionnel (fig. 204), mais il est possible, par certains artifices, de le rendre plus ou moins unidirectionnel.

La figure 205 montre la présentation habituelle du microphone à ruban.

4. — Microphone électrostatique ou à condensateur.

Il se compose d'une membrane métallique très mince (15 à 20 microns) tendue à très faible distance (environ 0,03 mm) d'une épaisse plaque perforée ou striée. Ces deux éléments forment les armatures d'un condensateur. Les

Fig. 204. — Diagramme polaire en 8 d'un microphone à ruban.

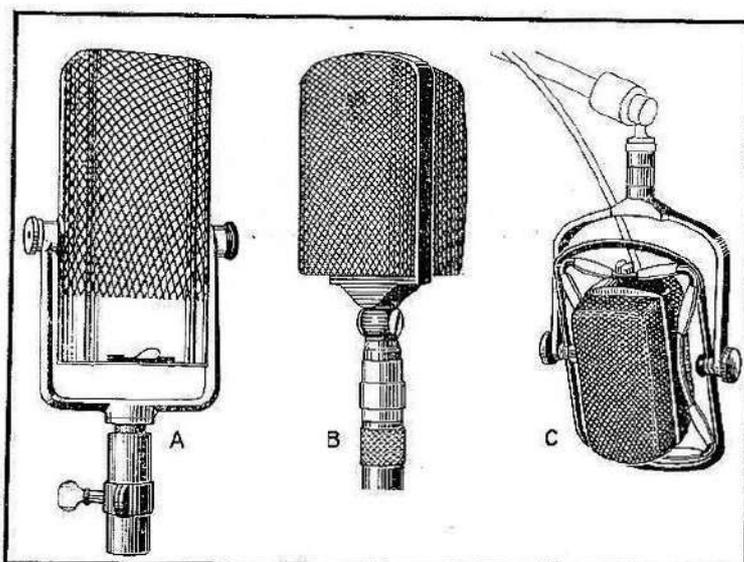
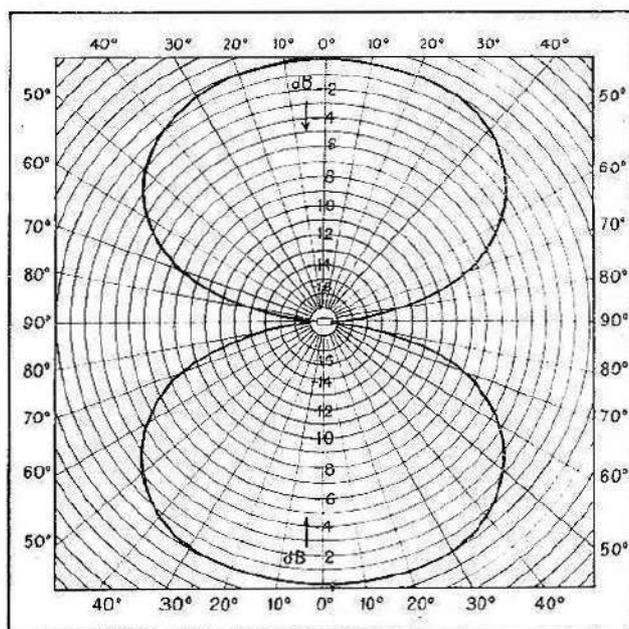


Fig. 205. — Microphones à ruban. A et B : montages sur pied. — C : montage suspendu. Les microphones à ruban doivent toujours pouvoir être orientés dans le plan vertical et horizontal.

vibrations de la membrane, en rapprochant et éloignant celle-ci de la plaque perforée, modifient en même temps la capacité.

En effet on a :

$$C = \frac{S \times 0,08}{d} \text{ pF}$$

où S est la surface en cm^2 des électrodes en regard et d la distance en cm entre elles.

Le condensateur constitué par le microphone est inséré dans un circuit comprenant une résistance et une source de tension (fig. 206).

A mesure que la capacité augmente ou diminue sous l'effet des vibrations, elle se charge ou se décharge et le courant résultant traverse R et fait varier la tension à ses bornes.

La tension de la source est généralement d'une centaine de volts et la capacité de l'ordre de 50 pF au repos.

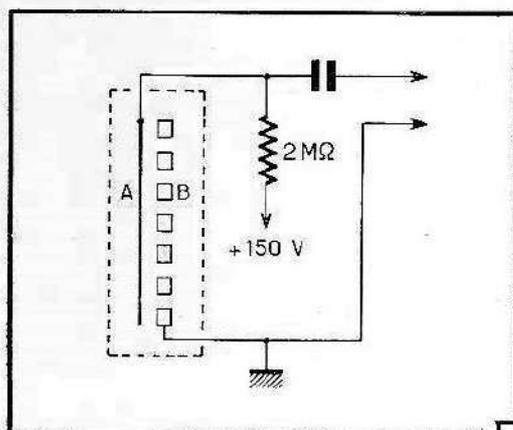
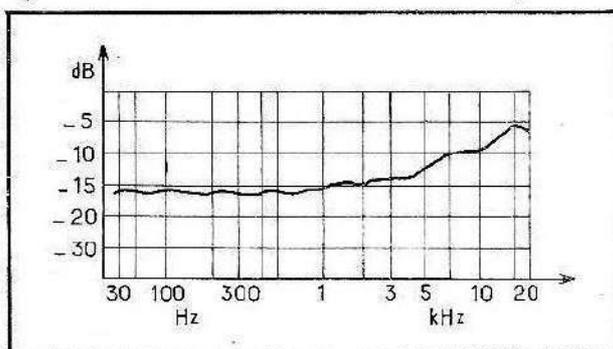


Fig. 206. — Principe du microphone électrostatique. A : membrane. — B : armature fixe.

Fig. 207. — Courbe de réponse d'un microphone électrostatique sans correction.



La valeur de R est de 2 ou 3 $M\Omega$. Une valeur plus élevée allongerait trop la constante de temps de l'ensemble RC, ce qui se traduirait par une baisse de rendement aux fréquences élevées.

La membrane possède évidemment une fréquence de résonance propre qui dépend de ses dimensions et de la tension mécanique qui lui est appliquée. On tâche de placer la résonance autant que possible au-delà des fréquences audibles. Elle est située dans la plupart des microphones entre 18 000 et 20 000 Hz.

Il en résulte une courbe de réponse comme celle de la figure 207 qu'on corrige dans les circuits de liaison.

Le microphone électrostatique possède une capacité faible et une impédance très élevée. Il s'ensuit que la moindre capacité fortuite extérieure affecte fâcheusement son rendement.

On est donc obligé de placer le premier étage amplificateur à proximité immédiate de la capsule (fig. 208).

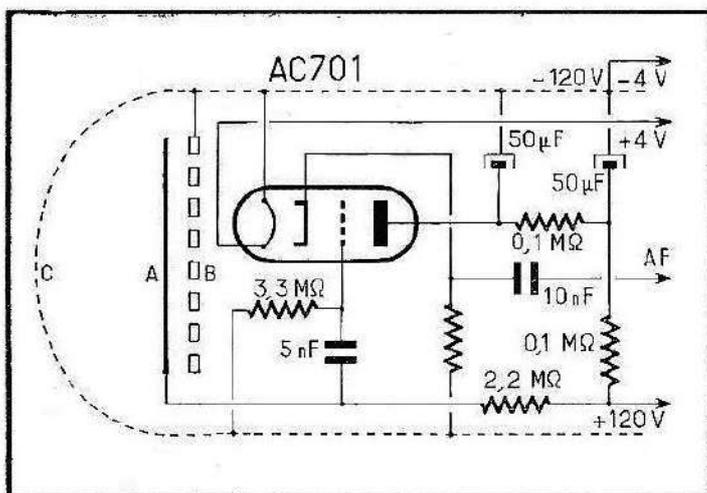


Fig. 208. — Préamplificateur d'un microphone électrostatique. A : membrane. — B : armature fixe. — C : boîtier tubulaire en acier doux.

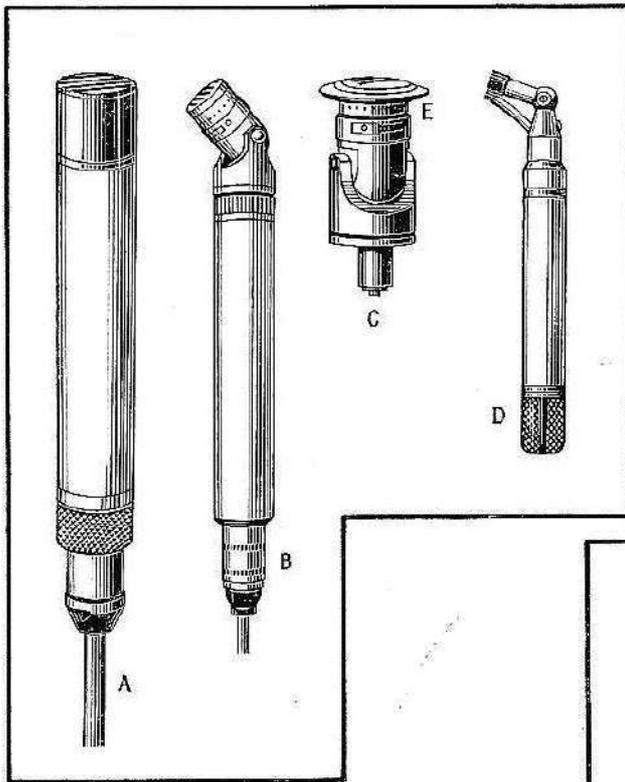
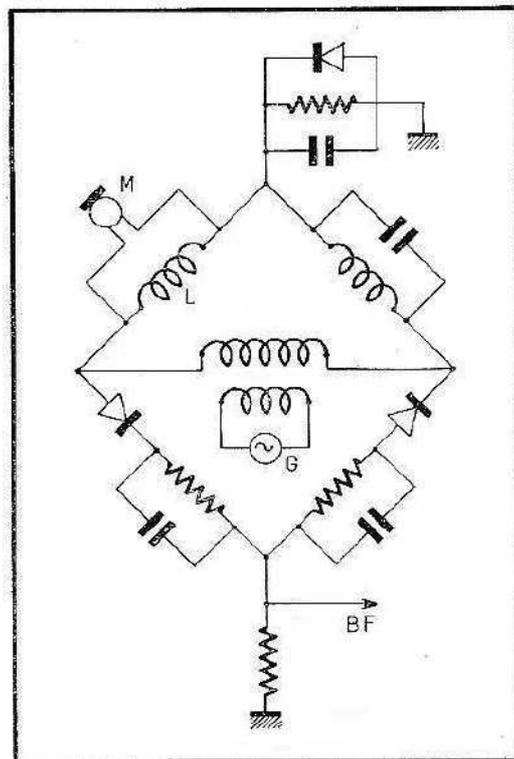


Fig. 209. — Microphones électrostatiques. A : modèle normal. — B : modèle à caractéristique directionnelle commutable. — C : l'écran E améliore la sensibilité unidirectionnelle. — D : microphone de studio à double membrane permettant d'obtenir une grande variété de diagrammes polaires.

Fig. 210. — Le microphone M constitue avec L un des bras d'un pont d'impédance alimenté en haute fréquence par un générateur G. Le déséquilibre périodique du pont produit un courant qui, détecté, restitue le signal B. F.



Dans la pratique, celle-ci est montée sur un boîtier cylindrique contenant un tube à faible souffle (par exemple 6AV6 = EF94 ou AC701 chauffé en continu). Le rôle de ce tube est non seulement d'amplifier le signal, mais aussi d'adapter l'impédance de sortie du microphone à celle du câble de liaison, au moyen d'un transformateur.

Un montage cathodyne permet de se passer de cette dernière pièce.

Dans certains modèles récents, le tube est remplacé par un transistor, ce qui simplifie l'alimentation.

Le microphone électrostatique possède d'excellentes caractéristiques. Les transitoires notamment sont particulièrement bien reproduits ainsi que la voix. Il est normalement omnidirectionnel mais on peut, grâce à certaines astuces, le rendre unidirectionnel.

D'autre part, en accolant dos à dos deux cellules électrostatiques on peut

obtenir des diagrammes polaires de toute forme. Il suffit pour cela d'agir sur la tension et la polarité de l'excitation de chacune de ces cellules.

On peut ainsi adapter ce microphone double à toutes les conditions de prise de son. C'est pourquoi, malgré la complication que représente le dispositif d'alimentation spécial, il est largement utilisé en radiodiffusion, dans l'industrie du cinéma et du disque (fig. 209).

Le microphone électrostatique peut être utilisé autrement que de la manière que nous venons de décrire.

On peut, par exemple, en l'insérant dans un circuit H. F., provoquer la modulation en fréquence d'un oscillateur. Le signal H. F. issu de celui-ci fournit, après détection, un signal B. F. qui correspond exactement au son recueilli.

Grâce à l'emploi de transistors l'alimentation de ce dispositif ne pose aucun problème.

Un autre système consiste à former, à l'aide du microphone, un des bras d'un pont d'impédance alimenté en H. F.

Le déséquilibre du pont provoque la naissance, dans la diagonale, d'un courant H. F. modulé en amplitude qu'on détecte à l'aide d'une diode (fig. 210).

5. — Microphone piézo-électrique.

Connu sous le nom de microphone à cristal, il est basé sur la propriété de certains cristaux de développer des charges électriques lorsqu'on les déforme dans une certaine direction, comme il a été expliqué au chapitre IX.

La figure 211 montre schématiquement la construction d'un microphone piézo-électrique.

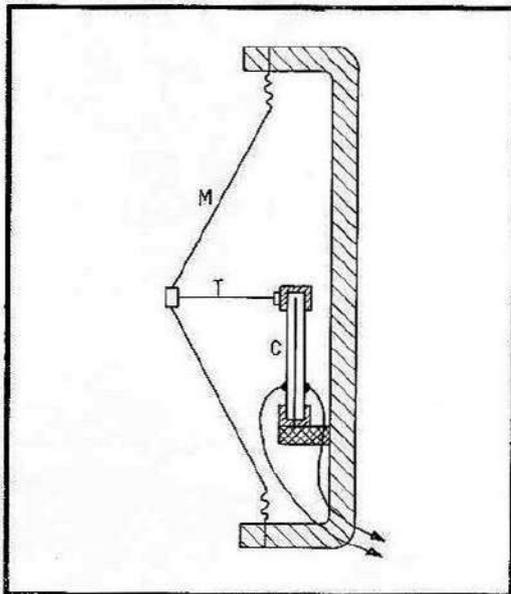


Fig. 211. — Principe d'un microphone piézo-électrique.

La pression acoustique agit sur une membrane en duralumin couplée au moyen d'une petite tige à une lame de cristal de sel de Seignette.

Le mouvement de la membrane fait fléchir celle-ci et il en résulte une différence de potentiel entre les faces opposées.

Celles-ci sont métallisées et en contact avec des conducteurs qui recueillent la tension résultante.

C'est là le modèle le plus courant, mais il existe des microphones où la pression acoustique agit directement sur le cristal.

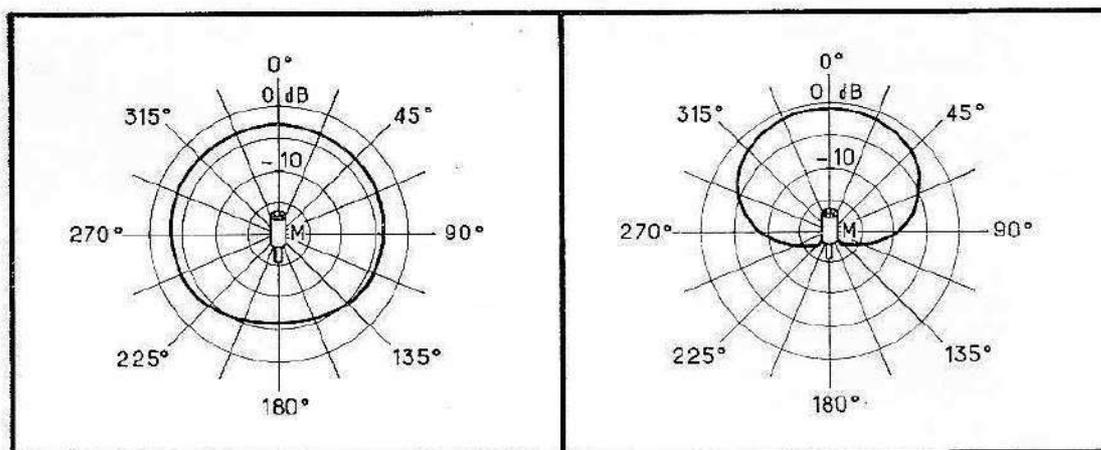


Fig. 212. — Diagramme polaire d'un microphone omnidirectionnel.

Fig. 213. — Diagramme polaire cardioïde.

L'impédance du microphone à cristal est élevée (de l'ordre de $0,1 \text{ M}\Omega$) et principalement capacitive. Il peut être comparé sous ce rapport au microphone électrostatique.

La tension efficace développée est cependant beaucoup plus élevée et peut atteindre $0,005 \text{ V}$. La courbe de réponse est satisfaisante et l'appareil est peu coûteux.

Le microphone à cristal peut être raccordé directement à l'entrée de l'amplificateur, à condition que l'impédance présentée au cristal ne soit pas inférieure à $0,5 \text{ M}\Omega$ et que la distance ne soit pas trop grande.

La simplicité de son emploi et son prix peu élevé donnent à ce type de microphone un large éventail d'emplois, notamment pour les reportages, les annonces publicitaires, l'enregistrement magnétique d'amateur.

La qualité du son n'est pas comparable à celle que fournissent les microphones professionnels à condensateur ou électrodynamiques, mais cependant suffisante pour beaucoup d'usages courants.

Le tableau ci-après résume les propriétés principales des divers types de microphones.

REPONSE EN DIRECTION DES MICROPHONES.

Par construction, les microphones peuvent être uniformément sensibles aux sons provenant de toutes directions, ou au contraire présenter un effet directionnel plus ou moins marqué.

D'autre part, cet effet peut être modifié pour un même microphone par divers moyens.

On entend par diagramme polaire une courbe réunissant tous les points situés sur un plan horizontal à partir desquels un son d'intensité et de fréquence déterminées produit une même tension à la sortie du microphone.

On distingue les microphones omnidirectionnels, dont la caractéristique de sensibilité est approximativement un cercle (fig. 212) ou même une sphère, si l'on envisage un espace à trois dimensions, et d'autre part les microphones à directivité marquée.

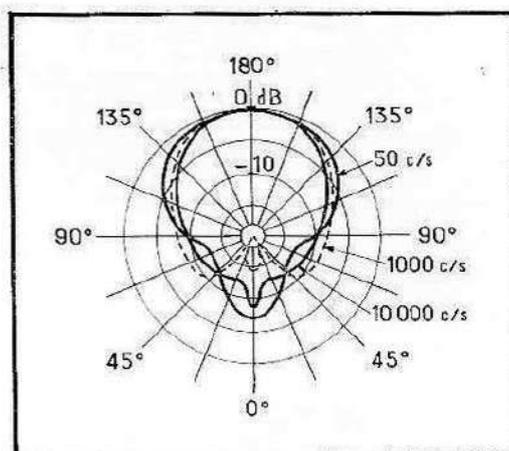
Le microphone à ruban possède par construction une caractéristique bidirectionnelle (fig. 204), car le son est capté de la même manière sur les deux faces du ruban. Un diagramme polaire semblable peut être obtenu en accolant deux microphones unidirectionnels dos à dos.

TYPE	TENSION V_0 de signal	dB par rapport à 0,006 W pour 1 dyne/cm	Rapport de transformateur de liaison	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS	OBSERVATIONS
A charbon	2	— 35	1/40	Bon marché, niveau de sortie élevé.	Mauvaise courbe de réponse, souffle, nécessite une source de courant.	Périmé pour la plupart des emplois.
A cristal	0,05	— 55	—	Prix peu élevé, niveau de sortie élevé, liaison directe possible.	Courbe de réponse irrégulière. Détérioration possible par température élevée.	Enregistrement d'amateur, sonorisations diverses.
Electro-dynamique	0,01	— 60	1/100	Excellente courbe de réponse, robuste.	Niveau de sortie faible et impédance très basse.	Convient pour tous usages.
A ruban	0,01	— 80	1/500	Très haute fidélité.	Niveau de sortie très faible. Impédance extrêmement basse. Grande sensibilité au vent.	Diagramme polaire en 8. Microphone de choix pour le studio.
Electro-statique	0,005	— 90	—	Très haute fidélité.	Nécessite une source de tension et un préamplificateur incorporé.	Usage général là où une haute fidélité est requise.

La caractéristique dite *cardioïde* est fréquemment utilisée pour atténuer l'effet du son frappant l'arrière du microphone par rapport à celui capté vers l'avant (fig. 213).

En poussant les choses plus loin on arrive à la caractéristique hypercardioïde (fig. 214).

Fig. 214. — Diagramme hypercardioïde.



Il existe des microphones à diagramme polaire réglable, ce qui permet de les adapter aux circonstances les plus diverses.

On peut, par exemple, munir un microphone électrostatique de deux membranes. La tension continue appliquée à l'une d'elles peut être variée et même inversée, ce qui a pour résultat de fournir, au choix, un diagramme bidirectionnel, omnidirectionnel ou une cardioïde, selon que les deux membranes travaillent en phase ou en opposition ou qu'une seule fonctionne.

L'ENREGISTREMENT MAGNÉTIQUE

I. — Généralités.

Ce procédé de mise en conserve des signaux sonores est basé sur le principe suivant : le courant acoustique, issu d'un amplificateur, passe dans une « tête » enregistreuse et y fait naître un champ magnétique alternatif dont les lignes de force pénètrent dans une couche de matière magnétique. Celle-ci, qui est appliquée à la surface d'un support, se déplace, à vitesse constante, devant le dispositif d'enregistrement. Il s'y forme par conséquent des zones magnétisées alternativement dans l'un et l'autre sens.

En la faisant défiler, à la même vitesse, devant une tête reproductrice on recueille, à la sortie de celle-ci, un courant variable qui reconstitue le signal primitif.

2. — Le ruban magnétique.

Le matériau magnétique peut être déposé sur différentes sortes de supports : ruban de diverses largeurs, cylindres, disques, selon les applications particulières de ce mode d'enregistrement. En ce qui concerne la technique du son, la forme habituelle est une bande de 6,25 mm de large.

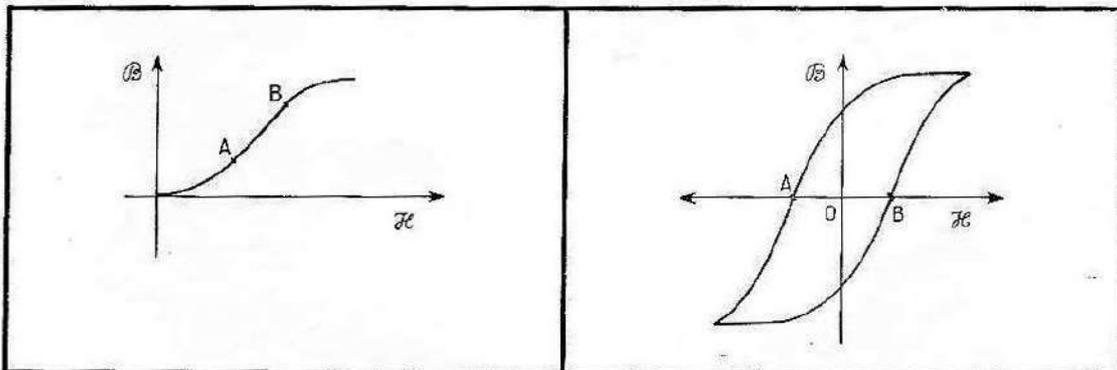


Fig. 215. — La partie AB de la courbe de magnétisation est la seule utilisable.

Fig. 216. — Cycle d'hystérésis d'un matériau magnétique à grande force coercitive. Le palier AB rend nécessaire une tension de polarisation.

Il va de soi que la bonne conservation des signaux enregistrés exige un matériau magnétique ayant une grande force coercitive.

Mais cela ne suffit pas. Nous avons vu, au chapitre VII, qu'en augmentant graduellement le champ inducteur on atteint une limite au-delà de laquelle l'aimantation cesse de croître : le matériau est saturé. Mais bien avant ce point la caractéristique s'infléchit (fig. 215). Il en est d'ailleurs de même dans le bas de celle-ci. Cette courbure est d'ailleurs d'autant plus accentuée que la force coercitive est plus grande. Le rapport champ/induction n'est linéaire que dans une partie relativement restreinte de la caractéristique.

Or toute non-linéarité dans un système introduit forcément une distorsion du signal qui le parcourt.

Il en résulte qu'en ce qui concerne l'enregistrement du son les propriétés de la couche magnétique ne peuvent être exploitées à fond. De plus, une force coercitive élevée coïncide malheureusement avec un palier important dans la courbe d'hystérésis et qui correspond à la rémanence (fig. 216).

Pour remédier à cette situation il est nécessaire d'amener le point de fonctionnement dans la zone rectiligne en superposant une tension de *polarisation* ou *prémagnétisation* au signal acoustique.

On pourrait employer à cet effet une tension continue, et cela a été fait autrefois, mais, dans ce cas, une partie seulement de la caractéristique est utilisable (fig. 217).

C'est pourquoi on se sert de préférence d'une tension alternative à fréquence ultra-sonore.

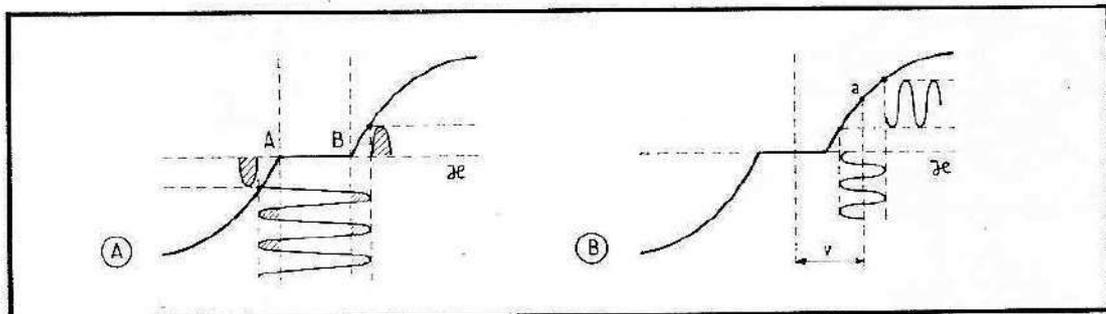


Fig. 217. — En a, à cause du palier AB le signal B. F. se trouve écrêté. — En b, une tension continue appliquée à la bande ne permet d'utiliser qu'une faible partie de la caractéristique.

Cette fréquence doit cependant être telle qu'elle ne puisse produire de battements audibles avec les harmoniques des sons à enregistrer. Pour cela il faut qu'elle soit de quatre à sept fois plus élevée que la plus haute fréquence à reproduire.

Si la courbe de réponse s'étend jusqu'à 15 kHz, ce qui est normal pour une reproduction à haute fidélité, la fréquence de la tension de polarisation devra être de l'ordre de 100 kHz.

Son amplitude devra, d'autre part, être suffisante pour recouvrir la partie horizontale de la caractéristique (fig. 218), ce qui revient à dire que sa tension de pointe doit être six ou sept fois plus élevée que l'amplitude maximum du signal à enregistrer.

Les deux parties rectilignes de la courbe sont alors utilisées. On peut très approximativement comparer l'effet obtenu à celui du montage de deux tubes en push-pull, classe B.

La couche magnétique du ruban est loin d'être homogène, malgré les grands progrès réalisés dans sa fabrication, et il en résulte un bruit de fond dont l'effet ne peut être combattu qu'en augmentant le rapport signal/bruit.

Or c'est ici qu'intervient à nouveau la tension de polarisation.

On constate, en effet, que la distorsion diminue à mesure qu'on en augmente la valeur.

D'autre part, la plus grande amplitude de signal B. F. qu'on peut enregistrer sans atteindre le niveau de la saturation, correspond à une valeur de la tension de polarisation qui n'est pas celle correspondant au minimum de distorsion.

Il est donc nécessaire de se contenter d'un compromis qui dépend de divers facteurs, notamment de la conception des têtes d'enregistrement et de reproduction, de la qualité de la bande et de la vitesse de défilement.

Au cours de l'enregistrement il se forme, dans la couche magnétique, une série d'aimants élémentaires de polarité alternativement N et S. Suivant l'intensité du courant B. F., l'effet magnétisant atteint une plus ou moins grande profondeur et l'énergie magnétique globale des pôles varie en conséquence. C'est ainsi que la dynamique de la matière enregistrée peut être, du moins dans de certaines limites, respectée. Les possibilités sous ce rapport sont en tout cas largement supérieures à celles des meilleurs disques.

La substance magnétique généralement utilisée est un oxyde de fer (Fe_2O_3) spécialement traité, qui se présente sous forme d'une poudre formée de cristaux allongés dont la plus grande dimension est de l'ordre du micron.

Ces cristaux sont anisotropiques, c'est-à-dire qu'ils s'aimantent plus facilement dans le sens de leur longueur.

Lors de la fabrication de la bande on s'arrange pour leur donner autant que possible l'orientation voulue.

La couche sensible est formée de ces cristaux mélangés à un liant qui assure l'adhésion au support. L'épaisseur de la couche est de l'ordre de 0,015 mm.

Le support est un ruban dont la matière est, selon les qualités et les fabricants, de l'acétate de cellulose, du chlorure de polyvinyle ou du polyester (mylar). Le tableau ci-dessous montre les mérites respectifs de ces trois produits :

	Résistance à l'humidité	Résistance à la rupture	Résistance à l'allongement	Tendance au bouclage	Effet de la température	Observations
Acétate	mauvaise	moyenne	bonne	oui	assez sensible	faible bruit de fond
Polyvinyle	bonne	bonne	moyenne	non	peu sensible	épaisseur irrégulière
Polyester (mylar)	très bonne	très bonne	faible	oui	pratiquement nulle	convient pour bandes extra-minces

La bande magnétique doit répondre à des exigences sévères : elle doit être flexible tout en étant aussi peu élastique que possible, ne présenter aucune variation d'épaisseur et posséder une grande résistance à l'allongement.

D'autre part, la couche de matière magnétique doit être parfaitement lisse pour que le frottement sur les têtes reste faible. Le liant doit assurer une cohésion telle qu'il ne puisse y avoir d'arrachements et que les dépôts aux endroits de frottement, résultant de l'usure de la couche, soient réduits au minimum.

Certaines bandes à usage professionnel sont enduites d'une matière lubrifiante qui diminue sensiblement le coefficient de frottement.

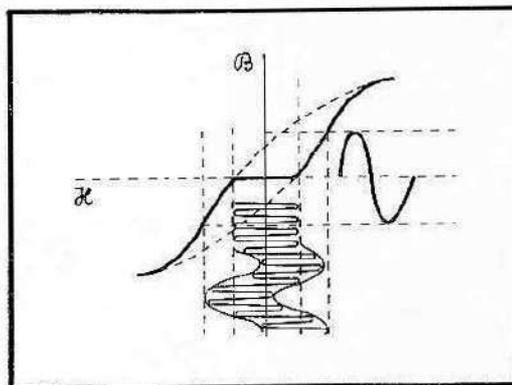
3. — L'enregistrement.

Les vitesses de défilement, la longueur de la bande et le diamètre des bobines ont fait l'objet d'une normalisation internationale. Celle-ci s'est toutefois faite suivant des standards américains, c'est-à-dire en pouces. Ces dimensions ont été, vaille que vaille, traduites en unités métriques pour l'emploi sur le continent européen. La correspondance n'est pas rigoureusement exacte et les valeurs sont légèrement arrondies.

Les vitesses aujourd'hui standardisées sont : 2,4 (15/16"), — 4,75 (15/8"), — 9,5 (3 3/4"), — 19 (7 1/2"), — 38 (15") — et 76 (30") cm/s.

La vitesse la plus lente n'est guère utilisée, sauf dans les dictaphones ou pour enregistrer des discours, conférences, etc. Celle de 4,75 cm/s permet déjà l'enregistrement de la musique avec une qualité qui correspond à celle de la radio en AM ou d'un disque à 78 tours. 9,5 cm/s est la vitesse norma-

Fig. 218. — Une tension de pré-magnétisation alternative permet d'utiliser les deux branches de la caractéristique.



lement utilisée dans les magnétophones domestiques à une seule vitesse. Elle permet une reproduction musicale convenable, sans prétendre à la haute fidélité. Celle-ci ne peut être obtenue que moyennant une vitesse de défilement de 38 cm/s, qui n'est d'ailleurs utilisée que dans les appareils professionnels. La vitesse de 19 cm/s constitue un bon compromis. Elle permet d'atteindre des fréquences de 15 kHz sur des magnétophones soignés. Les enregistrements de microsillons et de programmes de radio en FM faits à cette vitesse donnent une reproduction très proche de l'original. Quant à la vitesse de 76 cm/s elle est réservée à des emplois particuliers comme l'enregistrement dans les studios des programmes de radio et dans l'industrie du cinéma.

La durée d'audition dépend évidemment à la fois de la vitesse de défilement et de la longueur de la bande. Il se trouve actuellement sur le marché au moins trois sortes de bandes, considérées sous le rapport de l'épaisseur et, par conséquent, de la longueur qu'on peut enrouler sur une bobine d'un diamètre donné.

Il y a lieu toutefois de tenir compte du fait que, plus une bande est mince, plus elle a une tendance à l'allongement et plus elle possède d'élasticité. Les bandes ultra-minces présentent de plus l'inconvénient d'être d'une manipulation délicate, car elles sont susceptibles de se froisser et de former des boucles.

Le tableau ci-après montre les relations entre le diamètre des bobines, la catégorie des bandes et leur longueur.

Ici encore on a adopté des dimensions dérivées de normes américaines. A noter que les bobines de 25 mm sont souvent remplacées, dans les appareils

DIAMÈTRES NORMALISÉS des bobines		LONGUEUR de la bande		DURÉE D'AUDITION (MINUTES) pour les diverses vitesses de défilement (cm/s et pouces/s)				GENRE DE BANDE
pouces	cm	pieds (ft)	m	19	9,5	4,75	2,4	
				7 1/2	3 3/4	1 7/8	15/16	
3"	7,5	150	45	± 4	7,5	15	8 h	Normale
		225	67,5	± 5,5	11	22,5	30	Longue durée
		300	90	7,5	15	30	45	Extra-longue durée
		300	90	7,5	15	30	60	Normale
4"	10	450	135	11	22,5	45	60	Longue durée
		600	180	15	30	60	90	Extra-longue durée
		600	180	15	30	60	2 h	Normale
5"	13	900	270	22,5	45	90	2 h	Longue durée
		1200	360	30	60	2 h	3 h	Extra-longue durée
		1200	360	30	60	2 h	4 h	Normale
7"	18	1800	520	45	90	3 h	4 h	Longue durée
		2400	720	60	2 h	4 h	6 h	Extra-longue durée

professionnels, par des plateaux en métal qui facilitent les manipulations.

Le sens du défilement a été également normalisé : il se fait toujours, de nos jours, de gauche à droite. Cependant dans certains magnétophones allemands anciens la bande défile de droite à gauche. Les bandes enregistrées sur ces appareils ne sont évidemment pas utilisables sur un appareil moderne.

L'enregistrement peut se faire sur piste unique, mais, dans le but d'augmenter la durée d'audition, la plupart des magnétophones courants permettent l'enregistrement sur deux pistes. Ici deux variantes sont possibles : on utilise la deuxième piste en interchangeant les bobines, ou bien le mécanisme est conçu pour permettre de faire défiler la bande dans l'autre sens sans devoir enlever les bobines. Ce système est toutefois moins utilisé, car il impose des complications mécaniques et autres.

Les deux pistes peuvent aussi, si les têtes sont prévues en conséquence, permettre un enregistrement stéréophonique.

Dans ce cas la durée d'audition n'est évidemment pas augmentée par rapport à celle d'un enregistrement sur piste unique.

On ne s'est pas arrêté en si bon chemin et on trouve couramment sur le marché des magnétophones à quatre pistes, ce qui permet d'obtenir, au choix, un enregistrement stéréophonique dans chaque sens ou un enregistrement monophonique utilisant chaque fois deux pistes en parallèle. On a même prévu, dans certains appareils, la possibilité de placer quatre enregistrements monophoniques sur la même bande.

Il va de soi que plus une piste est étroite, plus faible est le courant induit dans la tête. Le rapport signal/bruit de fond devient en même temps moins favorable.

Les têtes doivent évidemment être pourvues d'un entrefer distinct pour chaque piste, ce qui complique leur fabrication. Un guidage très précis de la bande est nécessaire pour empêcher les pistes d'empiéter l'une sur l'autre.

On a aussi reproché aux enregistrements à quatre pistes une sorte d'effet d'empreinte entre pistes voisines.

Notons qu'il existe des magnétophones à pistes multiples munis d'un système d'entraînement « aller et retour » avec commutation automatique d'une piste à l'autre. Ces appareils, utilisés principalement à des fins publicitaires, peuvent fournir un programme continu de cinq ou six heures.

Un exemple de leur emploi est la sonorisation permanente d'un grand magasin.

4. — L'effacement.

Un des avantages de la bande magnétique sur les autres supports de la matière sonore est qu'elle peut être réutilisée indéfiniment après en avoir effacé l'inscription magnétique précédente.

L'effacement s'obtient en appliquant à la couche sensible une tension alternative suffisamment élevée pour dépasser le niveau de saturation. Après le passage de la bande devant la tête d'effacement les particules sont pratiquement démagnétisées. La faible aimantation rémanente qui peut subsister est dirigée en sens divers, de sorte que la résultante est presque nulle et que la bande peut être considérée comme vierge. La fréquence utilisée est la même que celle qui sert à la polarisation.

5. — Les têtes.

Les trois fonctions : effacement, enregistrement et reproduction se font au moyen d'éléments appelés têtes et qui, dans l'ensemble, se présentent sous la même forme.

Une tête se compose d'une bobine embrassant un circuit magnétique à très haute perméabilité (fig. 219). Celui-ci est constitué par un assemblage de très fines tôles en « permalloy », « mumétal » ou autre acier de même type. Cependant, dans certains modèles, le circuit magnétique est en ferrite.

Le circuit magnétique se referme sur un entrefer très étroit devant lequel défile la bande magnétique. L'entrefer est fermé par une lame de cuivre, ce qui empêche l'introduction de parcelles de matière magnétique détachées de

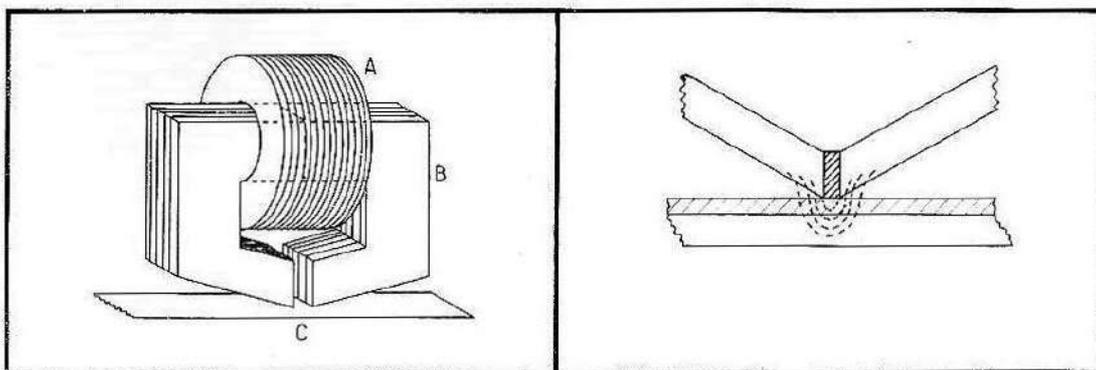


Fig. 219. — Principe d'une tête magnétique. A : bobine. — B : circuit magnétique à haute perméabilité. — C : entrefer.

Fig. 220. — Le métal diamagnétique qui remplit l'entrefer repousse vers l'extérieur le champ magnétique.

la bande. Cette lame possède en outre la propriété de repousser vers l'extérieur les lignes de force magnétique et de les faire ainsi pénétrer plus profondément dans la couche d'oxyde (fig. 220).

La largeur de l'entrefer détermine la qualité de la reproduction. Plus il est étroit, mieux les fréquences élevées sont reproduites pour une même vitesse de défilement. Mais on est limité dans cette voie par des difficultés mécaniques et aussi par la dimension des grains de la matière magnétique.

Il faut aussi tenir compte du fait que le champ magnétique extérieur qui passe dans la bande est d'autant plus faible que l'entrefer est plus étroit.

Inversement la tension induite dans la tête reproductrice diminue lorsque l'entrefer devient plus petit.

En effet on a :

$$E = B_m V \sin \left(\frac{\pi l}{\lambda} \right)$$

E : tension induite disponible aux bornes de la tête;

B_m : densité de flux maximum dans le matériau magnétique;

V : vitesse de défilement en cm/s;

l : largeur de l'entrefer en mm;

λ : longueur occupée par l'onde sur la bande.

Il y a donc une largeur d'entrefer minimum pratique en dessous de laquelle on ne peut descendre si l'on veut maintenir un rapport signal/bruit acceptable.

La formule montre en outre que la tension induite augmente à la fois avec la vitesse de défilement et avec la fréquence.

Il en résulte une caractéristique de reproduction indiquée par la figure 221.

On voit que, pour chaque vitesse, il existe une fréquence limite au-delà de laquelle la tension tombe rapidement.

D'autres facteurs interviennent encore pour accentuer cette chute des

fréquences élevées. Un aimant tend, dès sa formation, à se désaimanter sous l'influence de son propre champ magnétique. Cet effet est d'autant plus prononcé que les pôles sont plus rapprochés et, par conséquent, que les aimants élémentaires situés dans la bande sont plus courts. A cela s'ajoutent encore les pertes par hystérésis dans les têtes et l'influence dans celles-ci des capacités parasites.

On s'est arrêté généralement, pour la tête reproductrice, à une largeur d'entrefer de l'ordre de 5μ (0,005 mm). La largeur de l'entrefer de la tête d'enregistrement est moins critique. Il est toutefois à noter que dans beaucoup d'enregistreurs pour usage domestique, voire semi-professionnels, la même tête sert pour l'enregistrement et la reproduction. D'où nécessité d'un compromis.

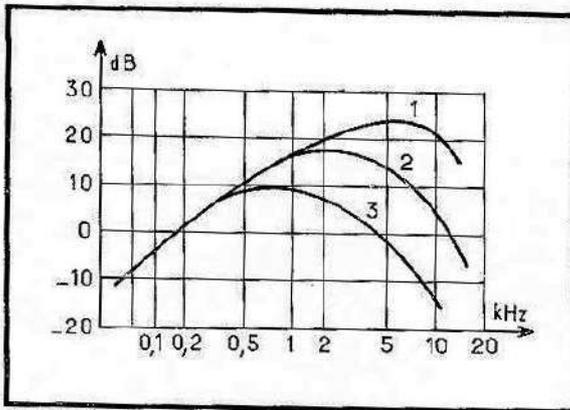
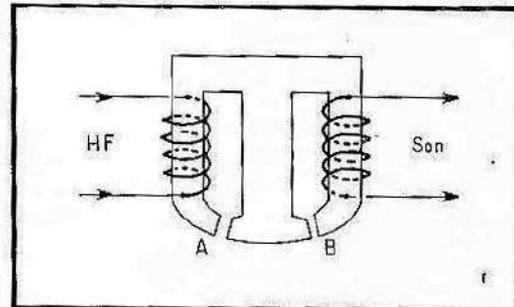


Fig. 221. — La tension induite dans la tête augmente avec la fréquence et avec la vitesse de défilement.

Courbe 1 : vitesse 19 cm/s.
 Courbe 2 : vitesse 9 cm/s.
 Courbe 3 : vitesse 4,5 cm/s.

Fig. 222 (ci-contre). — Tête combinée d'effacement, d'enregistrement et de lecture. A : effacement. — B : enregistrement et lecture.



Il existe généralement dans les têtes un deuxième entrefer situé à l'opposé de celui dont nous venons de parler et dont le rôle est de retarder la saturation du circuit magnétique. Il est de peu d'importance du point de vue de la qualité de l'enregistrement, mais offre des facilités pour la construction de la tête.

On distingue les têtes à haute impédance, dont la bobine comprend un nombre élevé de tours, et les têtes à basse impédance qui nécessitent un transformateur pour assurer leur adaptation à l'étage de sortie de l'amplificateur. Ce dernier modèle se trouve surtout dans les enregistreurs professionnels. Une bobine à grand nombre de tours présente, en effet, une capacité répartie plus grande, ce qui nuit à la bonne reproduction des fréquences élevées.

La tête d'effacement présente des caractéristiques différentes de celles qui sont nécessaires pour l'enregistrement et la reproduction. Tout d'abord il faut considérer que, pour saturer la couche d'oxyde, il faut un champ magnétique relativement intense, et pour produire celui-ci, une puissance de l'ordre du watt est nécessaire. En principe la tête d'effacement doit donc posséder un circuit magnétique plus lourd que celui de la tête de reproduction, avec un entrefer plus large.

Signalons qu'il y a, sur le marché, des enregistreurs utilisant une tête unique pour l'effacement, l'enregistrement et la reproduction. Cette tête est munie de deux bobines et pourvue de deux entrefer de largeur différente (fig. 222).

Pour l'enregistrement stéréophonique on utilise des têtes spéciales qui renferment dans un même boîtier deux systèmes magnétiques distincts dont les entrefers sont dans le prolongement l'un de l'autre et correspondent aux deux pistes qui sont utilisées simultanément.

Suivant la classe de l'enregistreur, on trouve un nombre variable de têtes, depuis la tête unique décrite ci-dessus et qu'on rencontre surtout dans les dictaphones, jusqu'à la demi-douzaine et plus des appareils professionnels. Un bon enregistreur monophonique comprendra normalement trois têtes, étant donné que l'effacement, l'enregistrement et la reproduction demandent des entrefers de largeur différente si l'on veut atteindre la plus haute qualité de reproduction.

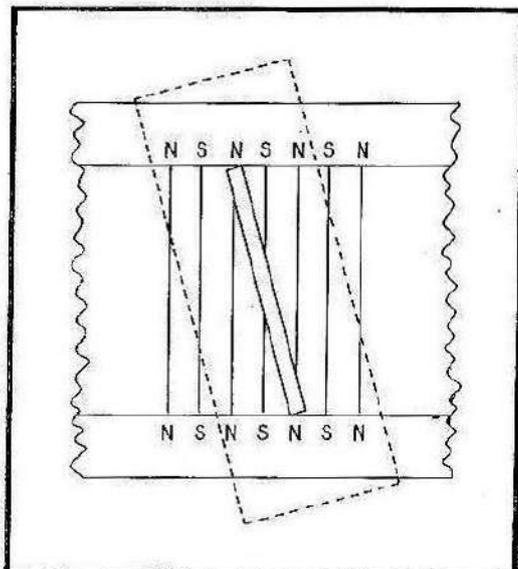


Fig. 223. — Si les entrefers d'enregistrement et de lecture ne sont pas rigoureusement parallèles, les fréquences aiguës sont sacrifiées.

Voici une combinaison type pour un enregistreur stéréophonique catégorie semi-professionnelle : deux têtes d'effacement (une par canal stéréo), une tête d'enregistrement avec deux entrefers de 14μ en ligne et une tête de lecture avec deux entrefers en ligne de $3,5 \mu$.

Cet arrangement permet les opérations suivantes : enregistrement en stéréophonie, enregistrement monophonique utilisant deux pistes (les bobinages des têtes mis en parallèle), enregistrement monophonique utilisant les quatre pistes (double durée d'audition), enregistrement monophonique sur une piste et d'un bruitage ou de signaux quelconques sur l'autre (par exemple signaux de synchronisation pour sonorisation de films), enregistrement d'un signal monophonique d'une piste sur l'autre avec mixage d'une nouvelle modulation.

Les appareils professionnels comportent généralement une tête de lecture supplémentaire permettant l'audition immédiate de la matière enregistrée afin d'en contrôler la qualité (« monitoring » dans la documentation anglo-saxonne).

Lorsque l'appareil ne comprend qu'une ou deux têtes la bande est pressée contre celles-ci au moyen d'un ressort portant un petit coussin de feutre. Ce système ne peut plus être utilisé dès que le nombre de têtes est plus élevé, car le freinage qui en résulterait serait excessif. On compte dès lors uniquement sur la tension de la bande, ce qui entraîne la nécessité de régler cette tension de façon très précise.

Signalons encore que l'application de la bande sur les têtes est parfois obtenue, dans les enregistreurs professionnels pour la radiodiffusion, par un moyen pneumatique qui crée derrière elles une légère dépression.

Du moment qu'il y a plusieurs têtes il devient nécessaire de prévoir un

réglage de l'orientation tant verticale (azimuth) qu'horizontale de celles-ci.

En effet les entrefers de la tête d'enregistreur et de la tête reproductrice doivent être rigoureusement parallèles, faute de quoi la zone aimantée « lue » par cette dernière ne coïnciderait pas avec celle qui a été enregistrée (fig. 223), d'où une sérieuse perte d'aiguës, et de la distorsion.

La figure 224 montre un exemple de dispositif permettant ces réglages.

Il est utile, si l'on veut utiliser un magnétophone à plusieurs fins, que les têtes soient facilement amovibles et interchangeables sans nuire à leur orientation, et cela est réalisé dans un certain nombre de magnétophones de qualité professionnelle.

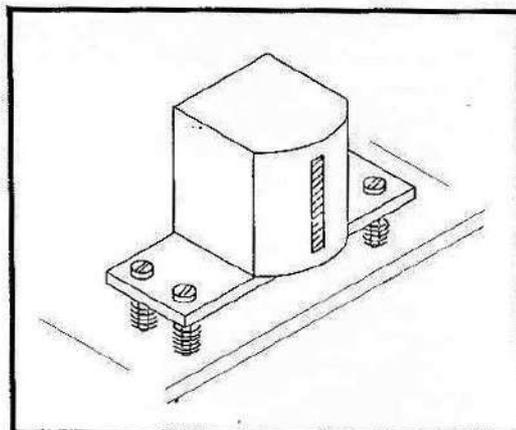
6. — La question du bruit de fond.

Malgré tout le soin apporté dans la fabrication des bandes, la couche magnétique n'est jamais absolument homogène. Les grains n'ont pas tous exactement la même grandeur et leur répartition n'est pas rigoureusement uniforme. Il en résulte qu'une bande vierge, même démagnétisée, contient encore de menus champs magnétiques résiduels de directions variées qui sont susceptibles d'engendrer, dans la tête reproductrice, des courants induits qui se traduisent par un bruit de fond audible.

Pour une bande de bonne qualité il ne devra cependant pas excéder — 55 dB.

Il s'y ajoute un bruit de fond dit de « modulation » qui résulte d'une sorte de modulation du bruit de fond par le signal durant l'enregistrement. C'est un phénomène très complexe qui ne doit cependant pas dépasser un niveau de — 40 dB par rapport au signal B. F.

Fig. 224. — Système à trois vis permettant d'orienter les têtes magnétiques.



La reproduction peut encore être troublée par une autre espèce de signal indésirable. Quand le ruban est enroulé sur lui-même, une partie des champs magnétiques d'une spire pénètre dans les spires voisines et peut y modifier à la longue, notamment sous l'influence d'une température élevée qui augmente l'agitation thermique, les champs magnétiques locaux. C'est ce qu'on nomme l'*effet d'empreinte*.

Ajoutons encore qu'un enregistrement peut être entièrement détruit en exposant la bobine à un champ magnétique intense, par exemple en la déposant auprès du transformateur d'alimentation d'un appareil quelconque.

7. — La mécanique.

Pour assurer un enregistrement et une reproduction parfaits, la vitesse de défilement du ruban magnétique devant les têtes doit demeurer rigoureusement constante.

Pour arriver à ce résultat plusieurs conditions doivent être réalisées :
Le moteur électrique assurant l'entraînement doit avoir une vitesse de rotation parfaitement régulière.

Le système d'entraînement lui-même doit tirer la bande sans vibrations ni possibilités de glissement.

Entre la bobine débitrice et le système d'entraînement il ne doit se produire aucun freinage irrégulier susceptible d'agir sur l'élasticité de la bande. Cette élasticité est faible dans les bandes de bonne qualité, mais suffisante toutefois pour provoquer, dans certaines circonstances, du « pleurage ».

Le système d'entraînement le plus utilisé se compose d'un axe appelé *cabestan* contre lequel la bande est pressée par un galet garni de caoutchouc. La vitesse périphérique du cabestan doit évidemment être égale à la vitesse linéaire que l'on désire imprimer à la bande.

L'axe du cabestan est toujours muni d'un volant suffisamment lourd pour assurer la régularité de la rotation. L'entraînement peut se faire directement par l'axe du moteur ou par l'intermédiaire d'un dispositif à friction ou d'une courroie.

L'entraînement direct exige un moteur relativement lent et par conséquent plus encombrant et plus coûteux.

Les magnétophones de la catégorie domestique la moins chère n'ont généralement qu'un seul moteur qui assure à la fois l'entraînement de la bande, son bobinage et son rebobinage.

Les appareils de classe supérieure ont souvent trois moteurs dont chacun est chargé d'une seule fonction.

Il existe aussi certains enregistreurs à deux moteurs dont l'un assure l'entraînement et l'autre les bobinages.

Deux types de moteurs sont utilisés dans les magnétophones courants : les moteurs synchrones et les moteurs à induction dont il existe plusieurs variétés.

La vitesse de rotation des premiers dépend uniquement de la fréquence du secteur et non de sa tension. Par contre celle des seconds dépend bien de la fréquence, mais est aussi susceptible de varier avec la tension et la charge. Hâtons-nous de dire que les écarts de tension de l'ordre de 5 % n'entraînent pas une variation de vitesse dont l'effet est perceptible à l'écoute.

Les moteurs synchrones à démarrage automatique sont nettement plus coûteux que les moteurs à induction, c'est pourquoi on ne les trouve que dans les magnétophones de classe tout à fait supérieure ou professionnels. Ils sont parfois d'une construction particulière : le rotor est externe et tourne autour d'un stator interne fixe. La carcasse extérieure forme alors volant et contribue à régulariser la rotation.

Les figures 225, 226 et 227 montrent schématiquement les systèmes de transmission et d'entraînement les plus couramment utilisés.

A partir d'une certaine classe les magnétophones modernes permettent de faire défiler la bande à plusieurs vitesses différentes.

Pour obtenir ce résultat on peut utiliser des rapports de transmission différents entre le moteur et le cabestan, comme dans une boîte de vitesses d'auto, ou encore agir sur la vitesse du moteur.

Il s'agit alors d'un moteur multipolaire dont on commute les enroulements du stator. Ce moteur est évidemment plus coûteux qu'un modèle plus simple.

8. — Les commandes.

Il y a lieu de distinguer les commandes purement mécaniques et celles qui correspondent à des circuits électriques.

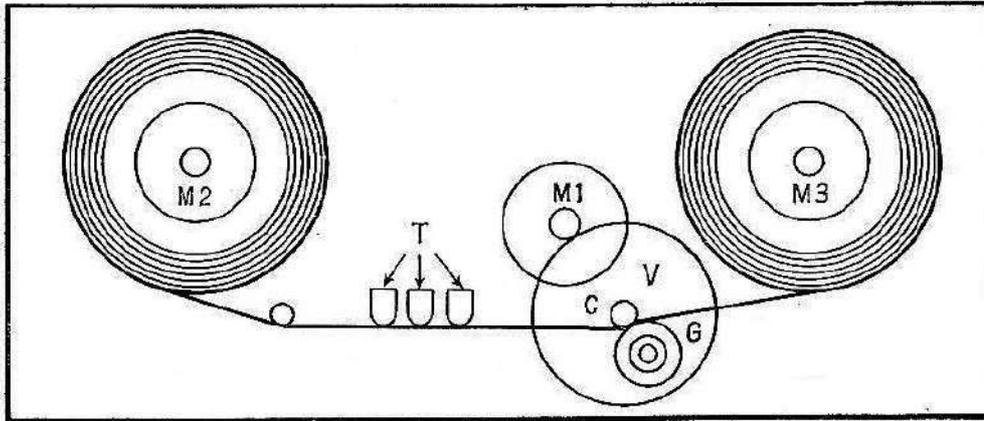


Fig. 225. — Représentation schématique du mécanisme d'un magnétophone à trois moteurs et trois têtes. M_1 : moteur principal. — M_2 et M_3 : moteurs assurant le réenroulement et le freinage des bobines. — V : volant. — C : cabestan. — G : galet presseur.

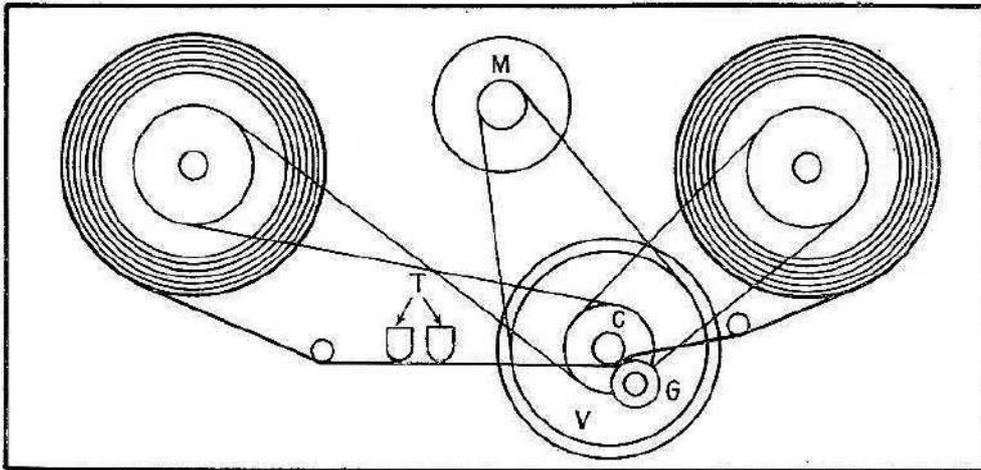


Fig. 226. — Représentation schématique du mécanisme d'un magnétophone à moteur unique et à deux têtes. M : moteur. — C : cabestan. — V : volant. — G : galet presseur.

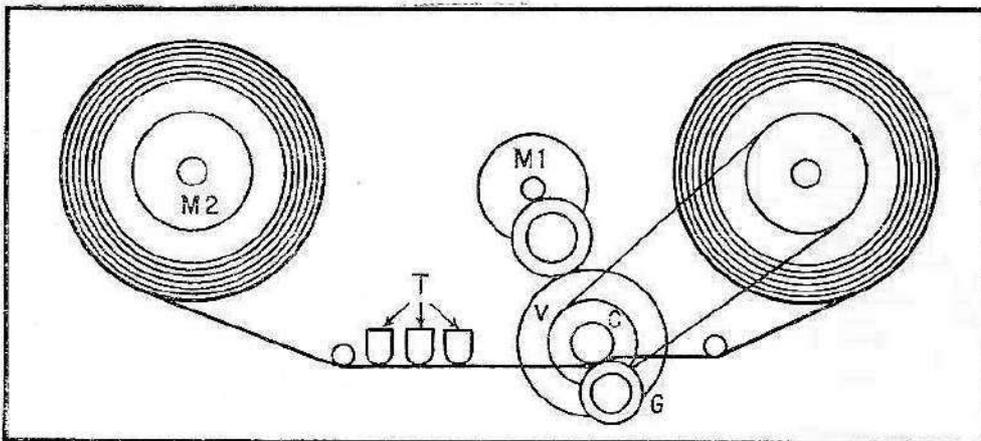


Fig. 227. — Représentation schématique du mécanisme d'un magnétophone à deux moteurs et à trois têtes. M_1 : moteur principal. — M_2 : moteur servant au freinage et au réenroulement. — V : volant. — C : cabestan. — G : galet presseur.

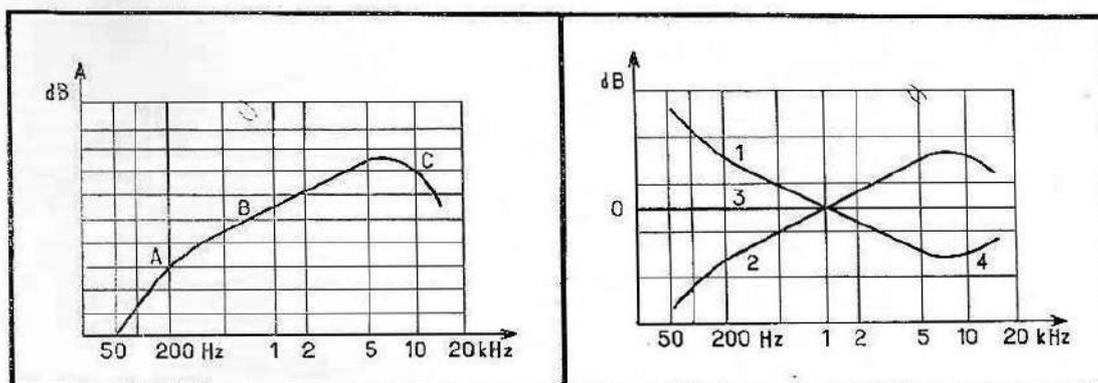


Fig. 228. — Courbe de réponse d'une tête reproductrice. Les parties A et C nécessitent une correction particulière.

Fig. 229. — L'amplificateur de reproduction présente une caractéristique descendante (1) pour corriger la caractéristique de la tête de lecture (2) et obtenir une reproduction uniforme (3). Toutefois le relèvement des aigües (4) est effectué à l'enregistrement.

Les premières doivent assurer les fonctions suivantes :

- Mise en marche pour enregistrement ou reproduction, arrêt;
- Rebobinage accéléré;
- Bobinage accéléré.

Il peut y avoir en outre un sélecteur de vitesses.

Suivant les modèles, les manœuvres sont effectuées par boutons-poussoirs séparés ou par mono-commande. Le premier système est nettement préférable.

A la mise en marche pour enregistrement ou reproduction, la bande est appliquée contre les têtes par des ressorts munis d'une garniture de feutre, ou simplement par la tension à laquelle elle est soumise et, simultanément, elle est pressée contre le cabestan par un galet garni de caoutchouc.

La bobine réceptrice est mise en rotation lente par l'entremise d'une

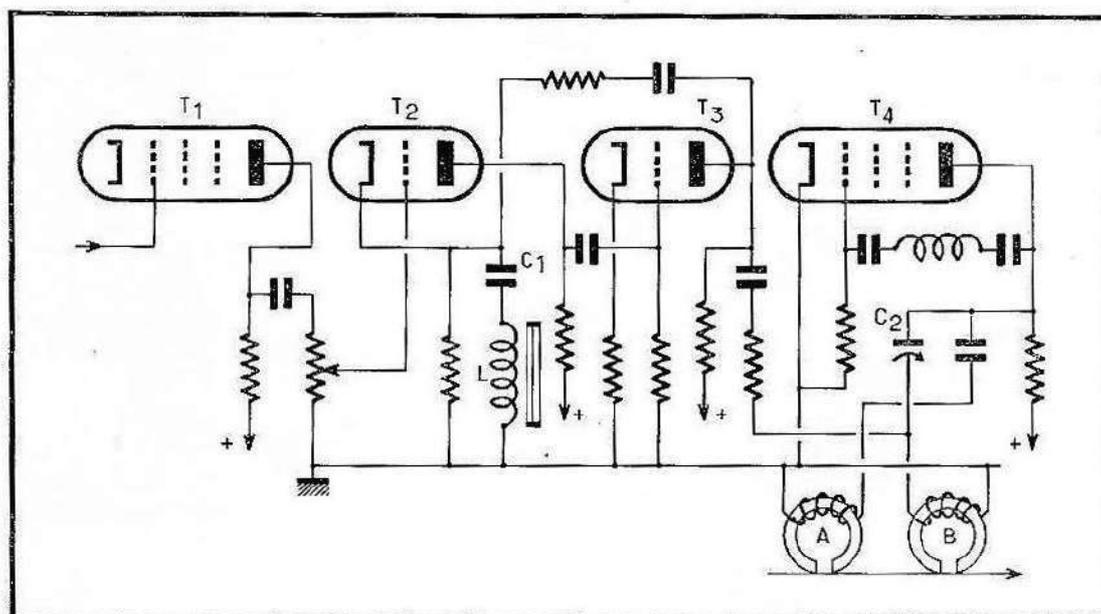


Fig. 230. — Schéma de principe d'un amplificateur d'enregistrement. A : tête d'effacement. — B : tête d'enregistrement. — C_1 - L_1 : filtre correcteur. — C_2 : condensateur ajustable réglant le niveau de prémagnétisation. — T_1 , T_2 , T_3 : tubes amplificateurs. — T_4 : tube oscillateur 80 kHz.

transmission à friction, une courroie ou, selon le cas, un moteur séparé. La bobine débitrice est libérée mais reçoit cependant un léger freinage pour maintenir la tension nécessaire. Ce freinage peut être obtenu par frottement, ou électriquement s'il s'agit d'un appareil à trois moteurs.

Après enregistrement ou reproduction, la commande de retour libère la bande ainsi que la bobine réceptrice qui peut tourner librement tout en étant légèrement freinée. La bobine débitrice est maintenant entraînée et tourne à vitesse accélérée dans le sens inverse.

Tous les enregistreurs possèdent une commande permettant le déroulement accéléré de la bande dans le sens de la marche, ce qui permet de choisir un passage particulier d'un enregistrement ou bien de continuer celui-ci après audition de la partie de la bande déjà enregistrée.

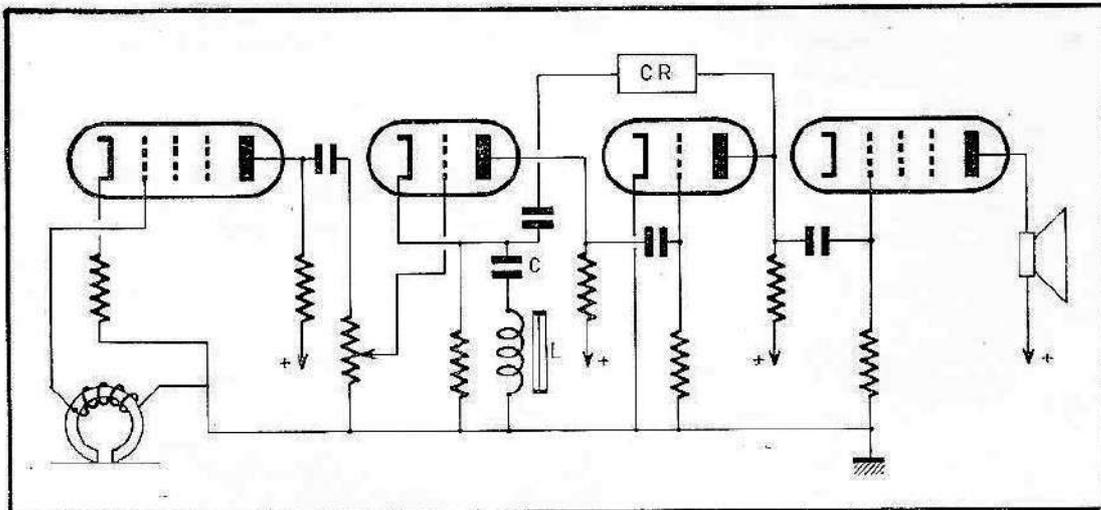


Fig. 231. — Schéma de principe d'un amplificateur de reproduction. C-L : filtre correcteur. — C-R : contre-réaction sélective.

Aux fonctions décrites ci-dessus correspondent des commutations électriques sur lesquelles nous reviendrons plus loin.

9. — La partie électronique.

L'enregistrement nécessite le passage dans la tête enregistreuse d'un courant B. F. supérieur à celui que peuvent fournir les sources habituelles : microphones ou lecteurs de disques.

D'autre part, la tension délivrée par la tête reproductrice est très faible (de 2 à 8 mV). Elle est en outre liée à la fréquence. Dans la partie rectiligne de la caractéristique elle augmente de 6 dB par octave (fig. 228). En dessous et au-dessus de celle-ci elle baisse rapidement.

Pour obtenir une tension de sortie uniforme à toutes les fréquences il faut donc une correction et, de plus, celle-ci devra être différente pour les parties A, B et C de la courbe.

Généralement la préaccentuation des aiguës s'effectue au moment de l'enregistrement, tandis que l'amplificateur de reproduction présente une caractéristique régulièrement descendante (fig. 229).

En outre, la correction des fréquences élevées doit être modifiée selon la vitesse de défilement.

L'amplificateur d'enregistrement prend généralement la forme de la figure 230, tandis que l'amplificateur de reproduction est ordinairement réalisé selon le schéma de principe de la figure 231.

Dans un but de simplification, la plupart des magnétophones à usage domestique n'ont généralement qu'un unique amplificateur servant pour l'enregistrement et la reproduction. Dans ce cas, un certain nombre de commutations supplémentaires est à prévoir.

L'effacement demande un oscillateur capable de délivrer une puissance de l'ordre du watt. La figure 232 donne le schéma de principe d'un oscillateur classique que l'on trouve fréquemment dans les magnétophones. L peut être un bobinage séparé ou bien l'enroulement contenu dans la tête elle-même (fig. 233).

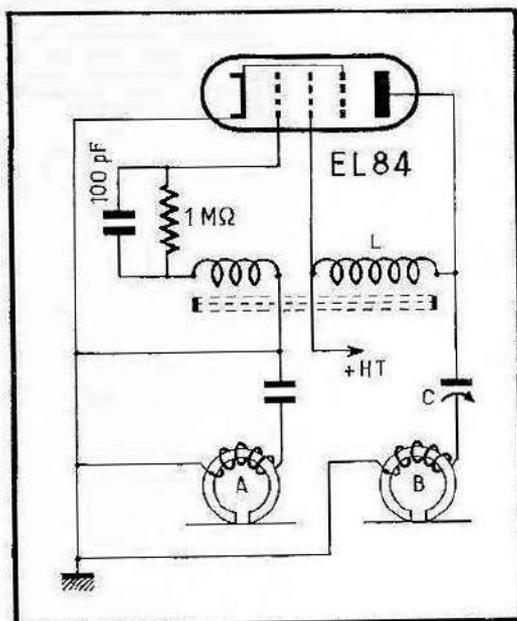
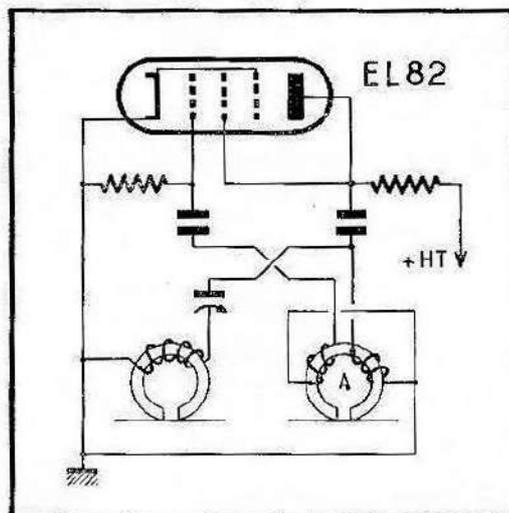


Fig. 233. — Oscillateur dans lequel le circuit oscillant est contenu dans la tête d'effacement (A).

Fig. 232. — Oscillateur d'effacement et de prémagnétisation. A : tête d'effacement. — B : tête d'enregistrement. — C : condensateur ajustable réglant le niveau de prémagnétisation.



Ce même oscillateur fournit la tension de prémagnétisation lors de l'enregistrement. Celle-ci est prélevée à travers un condensateur de faible capacité et qui est généralement ajustable pour permettre d'en régler le niveau.

Cette tension doit être rigoureusement sinusoïdale. C'est pourquoi, dans les magnétophones de classe supérieure, on trouve souvent un oscillateur équilibré (fig. 234) réalisé au moyen d'une double triode du type ECC82 ou analogue et parfois suivi d'un étage de puissance en push-pull.

Il est nécessaire de contrôler le niveau du signal B. F. appliqué à la tête durant l'enregistrement pour éviter de pénétrer dans la zone non linéaire de la courbe de magnétisation.

Dans les appareils courants on utilise à cette fin un tube indicateur cathodique, du type EM84, par exemple.

Dans les appareils professionnels on trouve un appareil de mesure connu sous le nom de modulomètre ou Vumètre, selon qu'il est étalonné en décibels ou en unités Vu, suivant les normes américaines.

La partie amplificatrice se termine, dans les magnétophones domestiques, par un étage de puissance et un haut-parleur.

Dans les appareils professionnels il existe ordinairement une sortie en basse impédance destinée à être reliée à une chaîne amplificatrice extérieure.

Le fonctionnement d'un magnétophone postule un certain nombre de commandes et de réglages dans la partie électronique.

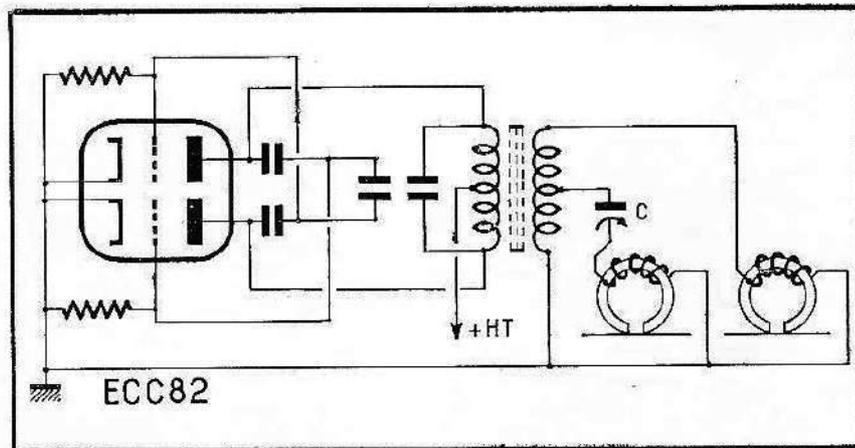
Il faut nécessairement un potentiomètre réglant le niveau d'entrée pour l'enregistrement qui, dans les amplificateurs combinés pour l'enregistrement et la reproduction, peut servir à régler le niveau de sortie.

Dans les appareils soignés le niveau de la tension de polarisation magnétique est également réglable, de manière à l'adapter aux caractéristiques de la bande.

Il y a aussi parfois un réglage de tonalité permettant de modifier le degré de préaccentuation des aiguës.

En plus de ces dispositifs il existe évidemment, dans tous les magnétophones, un certain nombre de commutations qui sont solidaires des commandes mécaniques et permettent l'enregistrement, la reproduction et le choix de la vitesse de défilement.

Fig. 234. — Oscillateur sinusoïdal équilibré. C : condensateur réglant le niveau de pré-magnétisation.



Les figures 235 et 236 donnent le schéma de la partie électronique d'un enregistreur dans les positions enregistrement et reproduction.

A) *Les connections sont réalisées pour l'enregistrement :*

T_1 est un tube préamplificateur relié à l'entrée « micro ».

T_2 forme un étage intermédiaire qui peut être commuté sur une entrée « radio » ou « gramophone ». Le gain subséquent postule cependant l'emploi d'un lecteur à cristal. Un lecteur magnétique à basse impédance devrait être connecté à l'entrée « micro ».

Les potentiomètres P_1 et P_2 permettent de mélanger les signaux sonores provenant de deux sources.

Le circuit anodique du tube suivant (T_3) comprend un réseau complexe auquel sont reliés la tête d'enregistrement, le tube indicateur et un ensemble RC qui forme une boucle de contre-réaction sélective. Le circuit accordé LC annule pratiquement la contre-réaction à une fréquence déterminée, laquelle est ainsi suramplifiée. Ce dispositif assure le relèvement des aiguës.

Cette correction peut être modifiée selon la vitesse de défilement par la mise en circuit des condensateurs C_1 et C_2 . Cette manœuvre est d'ailleurs commandée par le sélecteur de vitesses.

Le réseau anodique reçoit également, à travers le condensateur ajustable C_3 , la tension de pré-magnétisation fournie par l'oscillateur T_4 . Ce dernier est relié directement à la tête d'effacement.

On notera que l'oscillateur est un tube de puissance EL84.

B) *L'amplificateur est maintenant disposé pour la reproduction.*

La tête est branchée à la grille du tube d'entrée T_1 . Le circuit anodique de T_3 est modifié. Il comprend toujours le réseau de contre-réaction, mais la

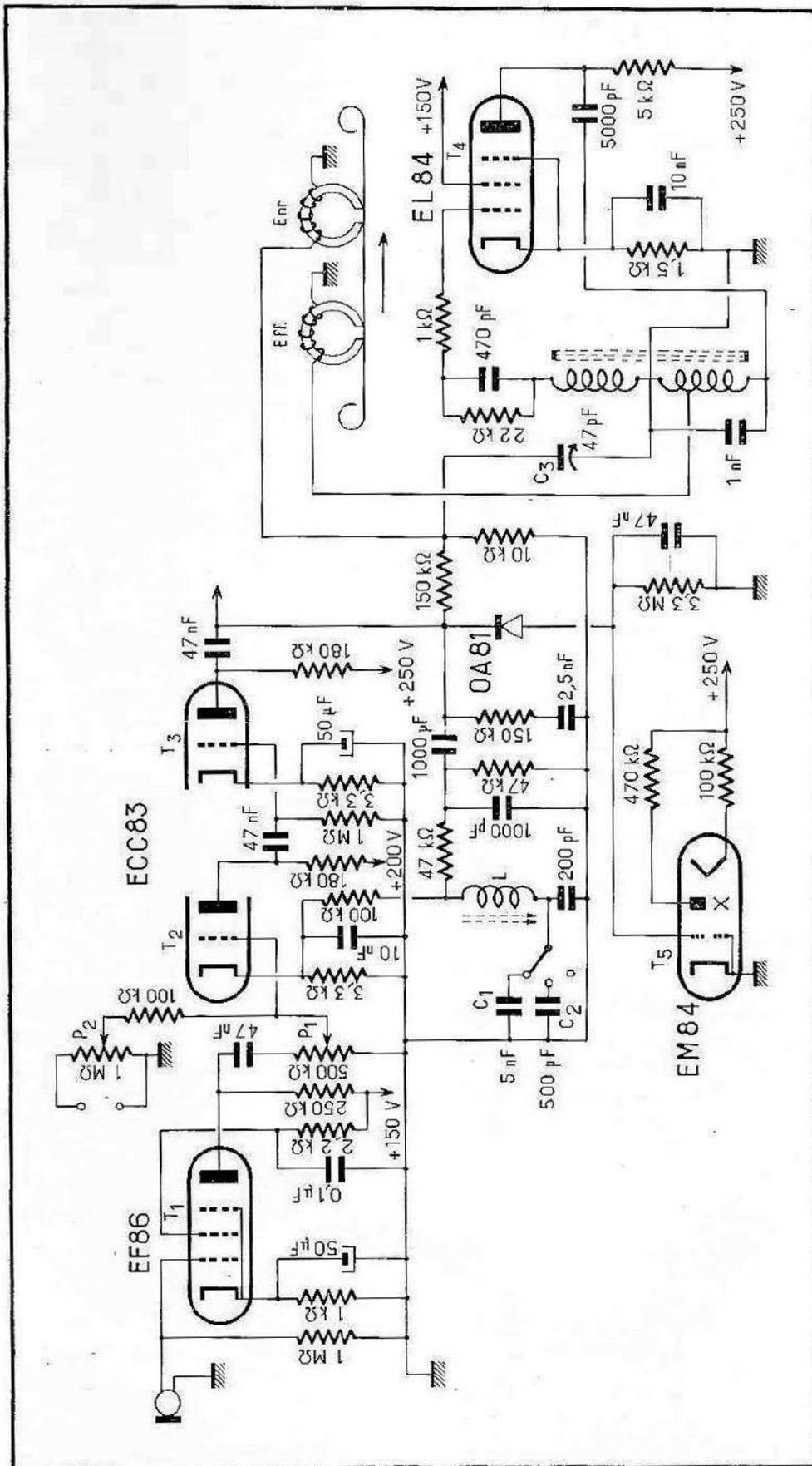


Fig. 235. — Amplificateur commuté sur la position « enregistrement ».

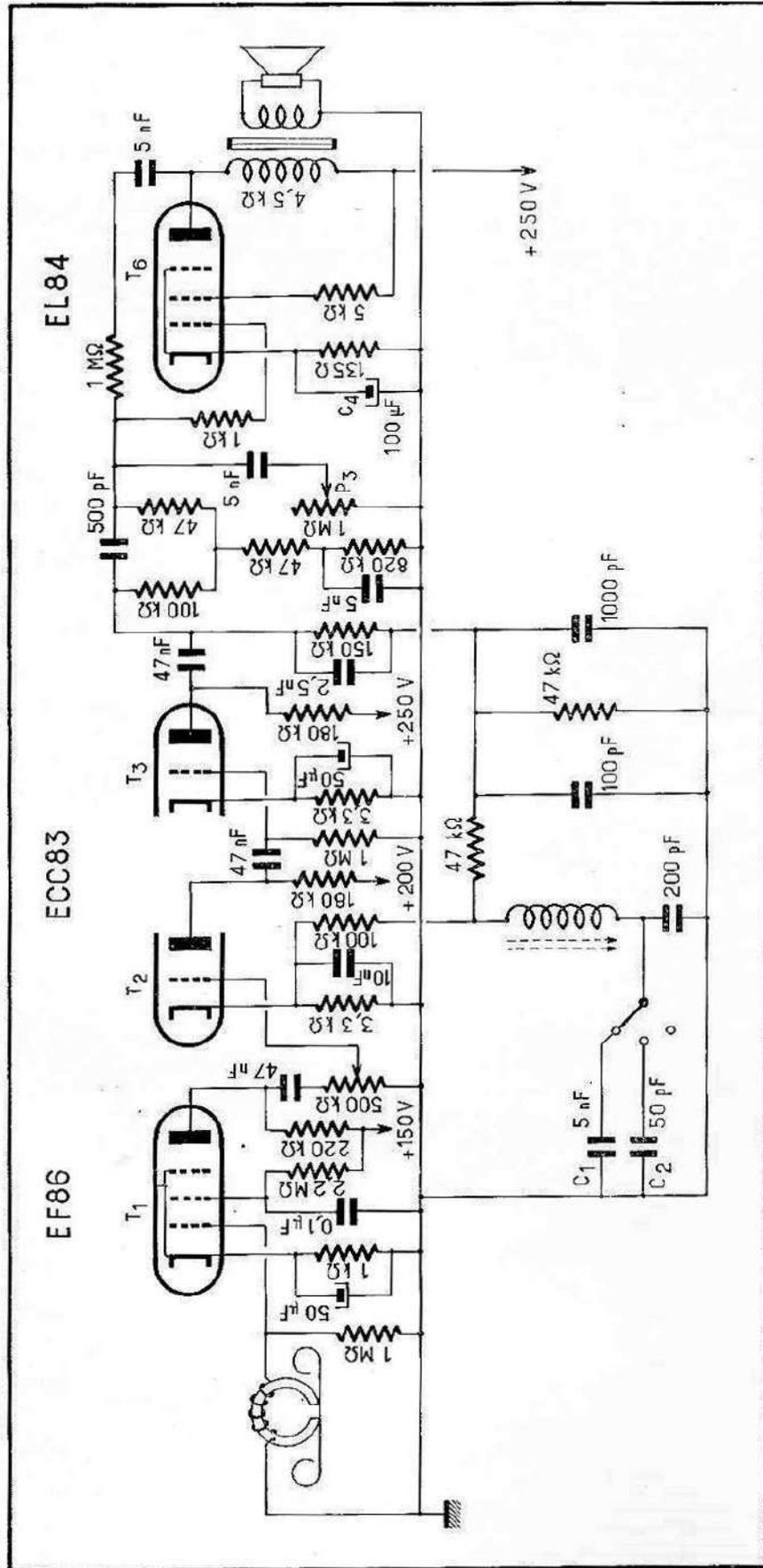


Fig. 236. — Amplificateur commuté sur la position « reproduction ».

valeur de certains éléments a été modifiée. Il est maintenant relié à l'étage de sortie à travers un filtre qui assure le relèvement des basses, de manière à donner à la reproduction une réponse uniforme de toutes les fréquences jusqu'à la limite imposée par les caractéristiques de la bande et la vitesse de défilement.

Une certaine correction supplémentaire peut être obtenue au moyen du contrôle de ton $P_3 - C_4$.

Le tube final EL84 fournit une puissance modulée de 4 watts. Une contre-réaction d'environ 15 dB appliquée à ce seul tube contribue à améliorer la courbe de réponse et confère au haut-parleur un amortissement convenable.

10. — Pleurage et autres défauts.

On entend par pleurage une variation périodique relativement lente du ton. Elle résulte d'une irrégularité de la vitesse de défilement de la bande devant la tête, soit à l'enregistrement, soit à la reproduction, les deux cas pouvant se combiner.

C'est, de toute façon, un défaut très désagréable.

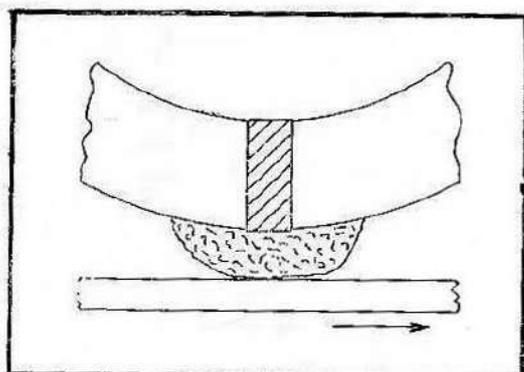


Fig. 237. — L'encrassement de la tête de lecture ou d'enregistrement, en éloignant la bande de l'entrefer, empêche la reproduction des fréquences élevées.

La cause la plus fréquente est, comme on s'en doute, une variation de la vitesse de rotation du moteur d'entraînement. C'est pourquoi le défaut se manifeste principalement dans les magnétophones bon marché, munis d'un moteur de puissance insuffisante.

Une autre cause, qui s'ajoute d'ailleurs généralement à la première, est l'élasticité de la bande.

Les bandes normales présentent, selon la nature du support, des coefficients d'allongement élastique compris entre 0,7 % et 2 % sous une charge de 1 kg appliquée pendant une minute.

Les bandes pour enregistrement de longue durée étant plus minces présentent, dans les mêmes conditions, des allongements notablement plus grands.

Si la bobine débitrice est trop freinée, ou si la bande subit entre celle-ci et le cabestan un frottement exagéré, il se produit des irrégularités de tension qui influencent la reproduction.

Une variation de la vitesse de défilement peut également être provoquée par le cabestan ou le galet presseur.

En effet, si le premier est excentré par suite d'usure ou pour une autre cause, l'entraînement se fait par saccades et il en résulte une sorte de trémolo dans la reproduction, connu sous le nom de scintillation.

Le même défaut peut avoir pour origine l'usure irrégulière de la garniture en caoutchouc du galet presseur.

Il importe de savoir que le pleurage et le scintillement sont d'autant moins sensibles que la vitesse de défilement est plus grande.

Le diamètre de l'axe d'entraînement joue aussi un rôle : s'il est trop petit la moindre excentricité aura un effet marqué sur la vitesse d'entraînement. De plus, la surface de contact avec la bande peut être trop faible pour l'entraîner sans glissement.

Un autre défaut que l'on peut parfois observer est la perte progressive des fréquences élevées. De la matière, enlevée à la bande par le frottement, finit par former sur les têtes un dépôt qui s'épaissit à la longue et éloigne la bande de l'entrefer (fig. 237). Le remède est simple : il suffit de nettoyer régulièrement les têtes à l'aide d'un pinceau trempé dans de l'alcool.

À aucun prix il ne faut utiliser pour ce travail un outil métallique.

Les têtes sont susceptibles d'être influencées par un champ magnétique extérieur, comme, par exemple, celui qui émane d'un moteur ou du transformateur d'alimentation de la partie électronique.

Pour cette raison elles sont soigneusement blindées.

Elles peuvent toutefois, dans certaines circonstances, acquérir une aimantation permanente qui nuit à la reproduction.

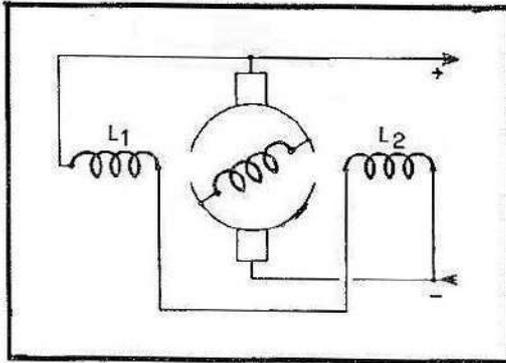


Fig. 238. — Principe du moteur à courant continu : L_1 L_2 sont les enroulements inducteurs.

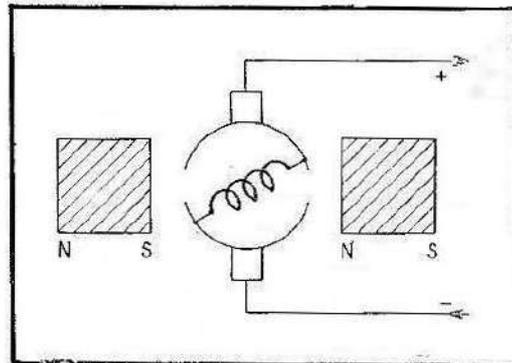


Fig. 239. — Moteur à courant continu dans lequel les bobines d'induction ont été remplacées par des aimants en ferrite.

Il existe dans le commerce un outil destiné à faire disparaître cette aimantation. Il consiste en une petite bobine dans laquelle on fait circuler le courant alternatif à 50 Hz du secteur et qu'on applique aux têtes pendant quelques secondes.

II. — Les magnétophones autonomes.

Il reste à parler d'une catégorie particulière d'enregistreurs dont l'emploi se répand de plus en plus : c'est celle des appareils autonomes fonctionnant sur piles ou batterie d'accumulateurs incorporées.

La réalisation de ces appareils n'a évidemment pu se faire que grâce à l'apparition du transistor.

Sauf qu'il y est fait usage de ce dernier au lieu de tubes, la partie électronique accomplit les mêmes fonctions que dans un magnétophone classique et possède des caractéristiques similaires.

La différence principale réside dans la partie mécanique. Le moteur doit être susceptible de fonctionner sur du courant continu et, de plus, sa consommation doit être réduite au strict minimum en raison de la faible réserve d'énergie électrique dont on dispose.

Mais ce n'est pas tout : un moyen doit être prévu pour assurer une vitesse de rotation extrêmement régulière.

Il y a évidemment un moyen de résoudre d'un coup ces problèmes, c'est d'utiliser le bon vieux moteur à ressort des anciens phonographes. Ce dernier a effectivement été employé dans les tout premiers modèles d'enregistreurs autonomes et peut-être l'est-il encore dans certains petits enregistreurs « de poche ».

Le moteur généralement utilisé est du type classique pour courant continu (fig. 238) qui comporte un collecteur et des balais. Un premier pas vers la diminution de la consommation est la suppression des enroulements inducteurs L_1 , L_2 et leur remplacement par des aimants permanents en ferrite (« ferroxdure ») (fig. 239). Cependant ce type de moteur n'a pas un couple absolument régulier : il a une tendance à vibrer légèrement. On y a remédié en grande partie en augmentant le nombre de pôles et en inversant la position des deux éléments constitutifs : les aimants inducteurs sont à l'intérieur et l'induit tourne à l'extérieur et forme volant.

Un moteur de ce type n'a, par lui-même, aucune régularité de marche : sa vitesse change avec la tension d'alimentation et la charge. Il ne peut être question ici de recourir au régulateur centrifuge d'autrefois opérant par freinage.

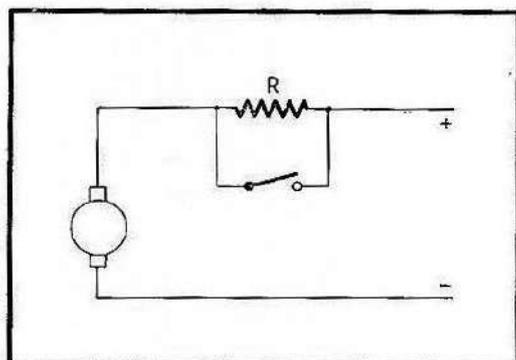


Fig. 240. — Régulation d'un moteur par résistance et rupteur centrifuge.

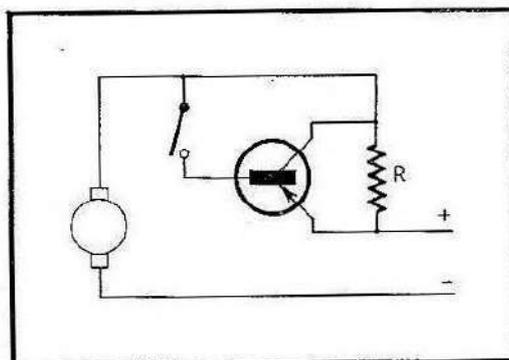


Fig. 241. — Un transistor permet une meilleure régulation et supprime l'étincelle de rupture.

Un premier moyen consiste à réduire le courant d'alimentation en insérant une résistance chaque fois que la vitesse tend à dépasser la limite imposée. Cette manœuvre est commandée par un rupteur s'ouvrant par la force centrifuge (fig. 240). Ce système ne peut toutefois assurer une régulation parfaite et il subsiste fatalement une certaine ondulation dans la vitesse de rotation.

Pour l'améliorer on peut faire usage d'un transistor dont le collecteur et l'émetteur sont branchés aux bornes de la résistance et la base au rupteur (fig. 241).

Quand celui-ci est fermé, la base est à la même tension que le collecteur et la résistance du transistor est pratiquement nulle.

Lorsque la vitesse du moteur dépasse la normale le rupteur s'ouvre. A ce moment la base du transistor est « en l'air » et sa résistance par rapport à R est très élevée, de sorte que le moteur ralentit et retombe à sa vitesse primitive.

Il est à remarquer que grâce à cette disposition le rupteur ne commande plus directement le courant alimentant le moteur.

Les parasites dus au courant de rupture et qu'on peut reprocher au

premier système sont de ce fait éliminés et le rupteur peut avoir une construction plus légère, tout en assurant un meilleur contact.

Cependant, si l'appareil ne sert que pour des reportages et des enregistrements où une grande fidélité n'est pas exigée, le défaut peut passer inaperçu.

Il existe plusieurs autres dispositifs de régulation, tous plus compliqués que celui que nous venons de décrire et qui utilisent des transistors. Enfin on emploie parfois un moteur synchrone du type « roue phonique », alimenté par un oscillateur à 400 Hz, lui-même stabilisé.

La force motrice dont on dispose étant, dans tous les cas, très faible, il va de soi que toutes les précautions possibles doivent être prises pour que le freinage de la bande magnétique soit réduit au minimum et de plus parfaitement uniforme.

On se contente généralement dans les enregistreurs autonomes de vitesses de défilement modestes : 2,4 et 4,75 cm/s, ou, au plus, 9,5 cm/s, de manière à obtenir une durée suffisante tout en utilisant des bobines de petit diamètre. Dans ces conditions on ne peut évidemment se montrer très exigeant sous le rapport de la fidélité.

LE DISQUE

Le disque est, de nos jours, une des sources de matière sonore les plus utilisées dans la technique professionnelle du son, sans parler de l'énorme développement de son emploi pour le délasserment privé.

Il présente vis-à-vis de la bande magnétique des avantages et des inconvénients qu'on peut résumer comme suit :

Disque

Usure inévitable à la longue malgré les meilleures précautions.

Conservation illimitée de la matière enregistrée.

Enregistrement nécessitant un équipement spécial.

Reproduction industrielle à nombreux exemplaires facile par pressage.

Manipulation très commode.

Etendue limitée de la bande de fréquences qu'on peut reproduire. Les meilleurs microsillons couvrent la gamme de 40 à 15 000 Hz.

Vitesse linéaire de lecture diminuant de la périphérie au centre du disque.

Bruit de fond augmentant avec l'usure et dépendant de la matière utilisée.

Impossibilité d'apporter des modifications après coup à l'enregistrement.

Bande magnétique

Usure pratiquement nulle.

Risque d'affaiblissement, à la longue, de l'enregistrement par démagnétisation spontanée. Danger d'effet d'empreinte. Détérioration accidentelle possible par le voisinage d'un champ magnétique extérieur.

Enregistrement simple et facile. Reproduction par le même appareil.

Copies fidèles difficiles à obtenir, sauf par réenregistrement.

Mise en place et enlèvement toujours assez compliqués.

Bande de fréquences s'étendant facilement de 30 à 18 000 Hz pour une vitesse de défilement de 38 cm/s.

Vitesse linéaire de lecture constante.

Bruit de fond très faible ne s'accroissant pas à l'usage.

Montages sonores très faciles à réaliser.

La reproduction uniforme de la bande de fréquences exige, tant à l'enregistrement qu'à la reproduction, des corrections assez compliquées.

Dynamique ne pouvant en pratique dépasser 35 dB.

Séréophonie soulevant des problèmes compliqués, réalisable seulement au détriment de la fidélité.

Les corrections nécessaires sont plus simples à réaliser.

Dynamique atteignant 60 dB.

Séréophonie facile à réaliser avec les mêmes qualités que la monophonie.

On peut en conclure que les deux sources de signaux sonores ne sont nullement concurrentes et que, selon le but que l'on se propose, l'une ou l'autre se trouvera la mieux appropriée.

I. — L'enregistrement.

A) LA MACHINE A GRAVER.

Elle doit être d'une très grande précision et sa construction n'est pas simple. Une exigence primordiale est la régularité parfaite de la vitesse angulaire du plateau.

Le burin graveur produit, en traçant le sillon dans le « flan » en cire ou en matière cellulosique, un freinage important qui, de plus, n'est pas constant. Il varie, en effet, à tout instant, suivant l'amplitude des ondulations du sillon.

D'autre part le rayon du sillon diminue progressivement, de la périphérie au centre du disque, ce qui réduit corrélativement l'effort demandé au moteur. Celui-ci doit donc posséder une importante réserve de puissance pour assurer une parfaite uniformité de rotation.

Il est également indispensable d'utiliser un plateau très lourd constituant un volant efficace. Un poids de 25 kg n'est pas excessif pour l'enregistrement des microsillons à 33 1/3 tours. Dans les installations industrielles ce poids atteint parfois le double.

La tête de gravure est entraînée latéralement par un mécanisme à vis sans fin, commandé par un moteur indépendant. Elle est montée sur un bras pourvu d'une suspension flexible qui peut être réglée de manière à ajuster avec une grande précision la pression du burin sur la surface du disque.

La tête peut être du type électromagnétique ou électrodynamique. Dans le premier cas la partie mobile est une armature en fer doux, dans le second c'est une bobine placée dans l'entrefer d'un aimant comme dans un instrument de mesure.

Il existe aussi des graveurs piézo-électriques, mais ils semblent être d'un usage moins courant.

Dans le cas de l'enregistrement stéréophonique, les graveurs sont d'une construction beaucoup plus compliquée, car le burin doit exécuter un double mouvement.

La puissance électrique nécessaire pour actionner les graveurs varie considérablement d'un modèle à l'autre. Elle est néanmoins toujours de l'ordre de plusieurs watts.

En raison des importantes corrections nécessaires, que nous verrons plus loin, l'amplificateur d'enregistrement doit cependant avoir une puissance nominale au moins dix fois plus élevée que celle qui semblerait nécessaire à première vue : 30 watts est un strict minimum.

B) CARACTERISTIQUES DE LA GRAVURE.

Sauf cas spéciaux, la gravure des disques se fait toujours dans le sens latéral. Le sillon suit donc un tracé sinueux tout en conservant une profondeur uniforme.

Dans une tête d'enregistrement basée sur le magnétisme, l'équipage mobile oscille à *vitesse constante*, ce qui signifie que l'amplitude du mouvement est inversement proportionnelle à la fréquence du signal entrant, pour autant que celui-ci garde le même niveau.

Un enregistrement fait dans ces conditions, en admettant que ce soit possible, aboutirait à tracer des ondulations d'une telle amplitude que la pointe du lecteur ne pourrait les suivre; sans compter que, pour y faire place sur le disque, les sillons devraient être largement espacés, ce qui diminuerait la durée d'audition (fig. 242).

Enfin, aux fréquences élevées, l'inscription tomberait au niveau du bruit de surface.

Pour éviter cette sérieuse difficulté, on impose au signal une correction particulière qui a pour but de réduire l'amplitude du mouvement du graveur en dessous d'une certaine fréquence.

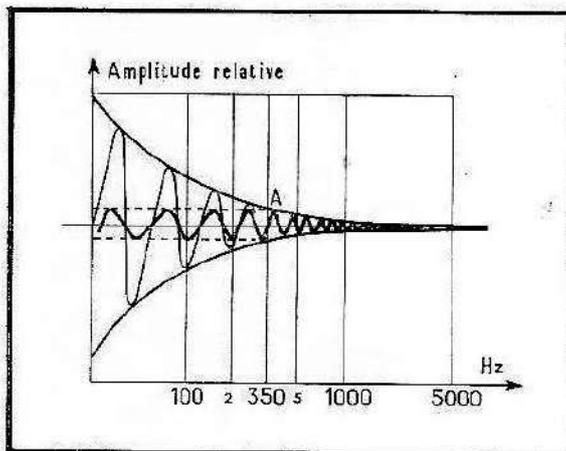


Fig. 242. — L'enregistrement à vitesse constante devient, en dessous d'une certaine fréquence, incompatible avec les possibilités techniques. C'est pourquoi à partir du point A on l'effectue à amplitude constante.

A partir de ce point de transition l'enregistrement se fait à *amplitude constante*. Cela veut dire que, pour un même niveau de signal, l'amplitude des ondulations gravées reste la même, quelle que soit la fréquence.

Au-dessus du point en question la gravure se fait à vitesse constante, mais avec un relèvement du niveau du signal vers l'aigu (fig. 243).

La vitesse de défilement du sillon sous le burin diminue progressivement du bord au centre du disque, au grand dam des fréquences élevées. On estime que, pour conserver une qualité acceptable à la reproduction, une spire ne peut avoir moins de 12 cm de diamètre en 33 1/3 tours, et 11 cm en 45 tours. Ce fait limite considérablement la surface utile. Il appelle de plus une correction supplémentaire dite « de rayon », qui consiste en un relèvement supplémentaire des aiguës à partir du dernier tiers de l'enregistrement.

L'amplificateur d'enregistrement présente donc une caractéristique d'ensemble régulièrement montante, sauf le palier de transition, situé ordinairement entre 500 et 1000 Hz (fig. 244).

Dans le but d'obtenir la plus longue durée d'audition possible, les disques microsillons sont enregistrés à *pas variable*. La distance entre les sillons diffère suivant l'amplitude du signal. En l'absence de celui-ci, ou lorsqu'il est très faible, la distance entre deux sillons successifs est de l'ordre de 0,05 mm. Elle peut atteindre 0,1 mm et plus lors des passages « fortissimi ».

Fig. 243. — Courbe de réponse théorique d'une tête de gravure.

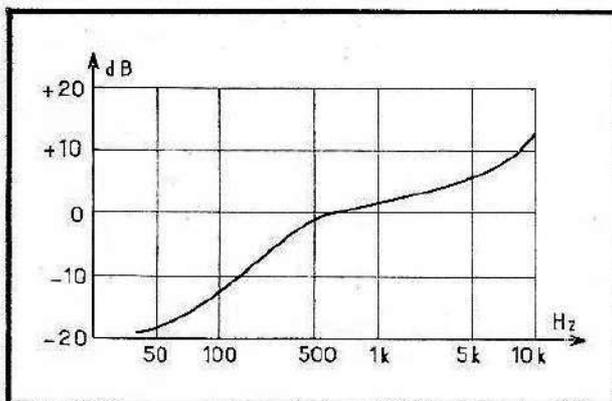
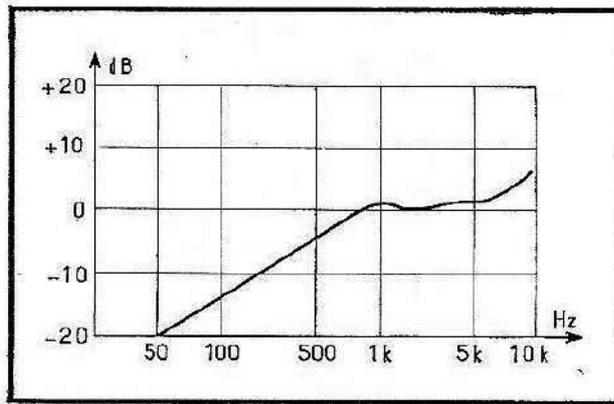
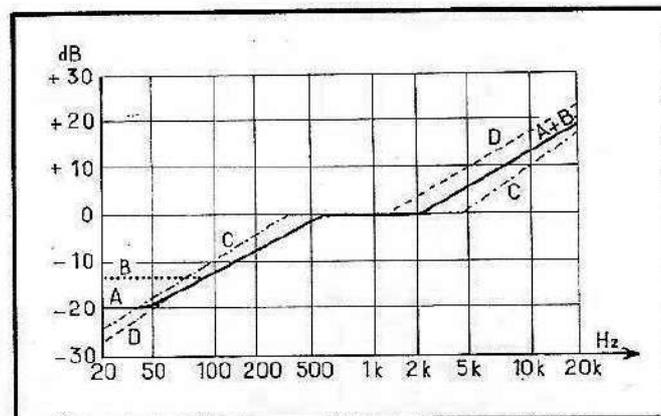


Fig. 244. — Caractéristique d'un amplificateur d'enregistrement.

Fig. 245. — Caractéristiques théoriques des différents systèmes de gravure. A : RIAA (Record Industry Advisory Association). — B : Columbia (U. S. A.). — C : AES (Audio Engineering Society). — D : NARTB (National Association of Radio and Television Broadcasters).



On obtient ce résultat au moyen d'un système électronique d'asservissement qui rend la vitesse de déplacement de la tête fonction de la fréquence à enregistrer.

Il n'y a pas de normes officielles ni de standardisation uniforme pour fixer les caractéristiques d'enregistrement.

En Amérique, divers organismes ainsi que d'importantes entreprises industrielles ont établi des normes qui se rapportent aux anciens enregistrements à 78 tours et aux microsillons à 45 et 33 1/3 tours. La figure 245 montre schématiquement les corrections les plus fréquemment utilisées. Les différences entre ces caractéristiques sont de peu d'importance pour l'utilisateur, car, comme nous le verrons, les corrections à la reproduction permettent d'y faire face sans difficulté.

La correction RIAA (CEI en Europe) tend cependant à devenir la règle universelle pour les microsillons. Elle correspond à -17 dB à 60 Hz.

C) LES MATIERES UTILISEES POUR LES DISQUES.

Selon que l'enregistrement est destiné à la fabrication de disques commerciaux ou qu'il doit servir à une lecture directe, on l'effectuera sur un « flan » en cire ou sur un disque métallique revêtu d'une couche d'un produit cellulosique (nitrate ou acétate).

La cire a l'avantage de permettre une gravure très fine, mais, étant relativement molle, elle ne permet pas une reproduction directe. Tout au plus peut-on faire un contrôle à l'aide d'un lecteur n'exerçant pas plus d'un ou deux grammes de pression sur la pointe.

Les disques en « acétate » sont plus durs à graver et demandent un chauffage du burin. Ils permettent une centaine d'auditions sans trop de détérioration, à condition que le lecteur utilisé ne demande qu'une pression de deux ou trois grammes sur la pointe.

La fabrication de la matrice de pressage des disques commerciaux se fait par une série d'opérations de galvanoplastie : de l'original on tire un contre-type appelé « père » qu'on pourrait déjà utiliser pour le pressage. On préfère toutefois le conserver en vue d'éditions ultérieures. De ce « père » on tire une « mère » qui est identique à l'original et qui donne naissance à son tour à une « fille », qui constitue la matrice servant au pressage en série.

La matière des anciens disques à 78 tours était à base de gomme-laque. L'usure était rapide et le bruit de surface très élevé.

Les disques modernes sont en une matière synthétique (vinylite) dont les propriétés physiques et mécaniques permettent d'obtenir une gravure beaucoup plus fine et un bruit de surface qui n'est plus que de — 40 dB.

D) LA MATIERE SONORE.

Les signaux alimentant les amplificateurs d'enregistrement ne proviennent jamais directement d'un microphone. Le temps est révolu où l'enregistrement se faisait à partir d'un studio. Aujourd'hui c'est par l'intermédiaire d'une bande magnétique que se fait la gravure.

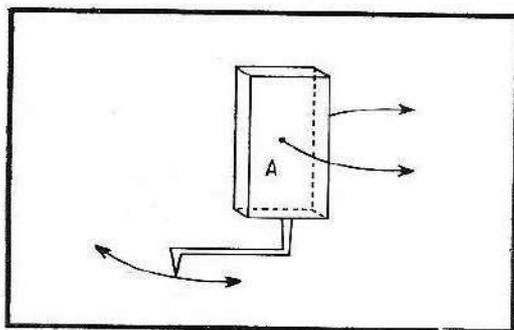


Fig. 246. — Principe d'une tête de lecture piézo-électrique. Le cristal bimorphe A subit une légère torsion quand la pointe suit le sillon.

La prise de son peut ainsi s'effectuer en un endroit totalement indépendant des installations de fabrication de disques et dans les conditions les mieux appropriées au sujet.

La bande magnétique permet, d'autre part, d'effectuer immédiatement toutes les rectifications nécessaires : éliminer les passages mal venus, faire des raccords, des surimpressions, bref, remanier à volonté la matière enregistrée. Comme la bande peut servir indéfiniment on peut, sans frais, recommencer autant de fois qu'il le faut un passage ou même une exécution entière, jusqu'au moment où l'on juge que la reproduction est parfaite.

La bande originale est alors envoyée au laboratoire spécialisé où l'on en tire des copies par réenregistrement. On peut encore à cette occasion procéder

à certaines rectifications et superposer, éventuellement, des effets d'ambiance ou d'écho.

Finalement l'édition définitive passe à l'atelier où se fait l'enregistrement et sert à moduler l'amplificateur alimentant la tête de gravure.

2. — La reproduction.

A) TÊTES DE LECTURE.

Le public continue à les appeler des « pick-up », mais pourquoi ne pas s'habituer au terme français, tellement plus descriptif, de « lecteur de disques »? A vrai dire, cet élément se compose de deux parties qui méritent d'être étudiées séparément : la tête et le bras qui, tout comme chez l'être humain, ont des fonctions nettement séparées.

Les têtes de lecture ont pour tâche de traduire, en un langage électrique, un simple sillon tracé dans une matière solide. Hélas! ce procédé de mise en conserve du son souffre d'un mal congénital qui est l'obligation de passer deux fois par une transmission *mécanique* avec tout ce que cela comporte de

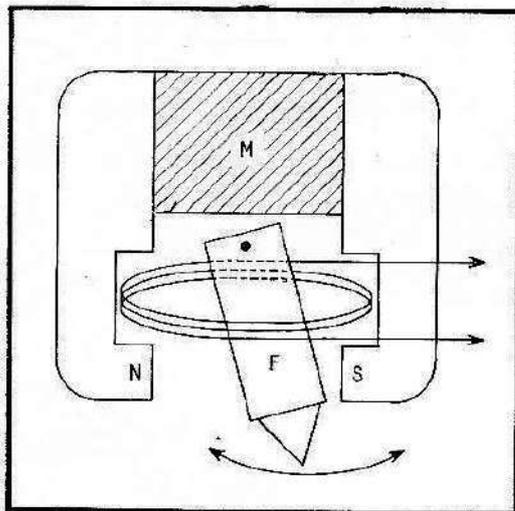


Fig. 247. — Principe de la tête de lecture à réluctance variable. M : aimant. — F : fer mobile.

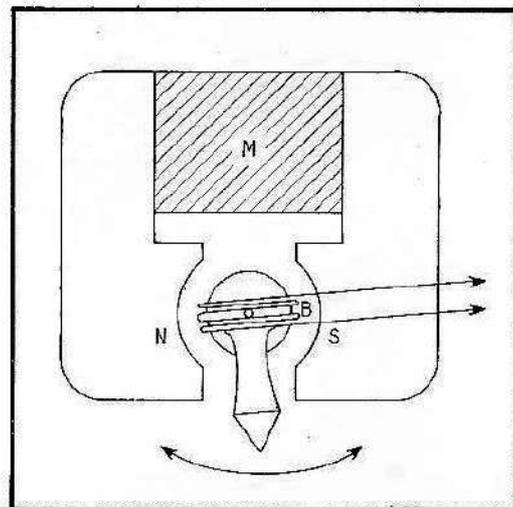


Fig. 248. — Principe de la tête de lecture électrodynamique. M : aimant. — B : bobine mobile.

complications pour éviter des phénomènes de résonance, l'usure des pièces en contact et assurer la translation de la modulation sonore sans rien perdre en chemin. Beaucoup de matière cérébrale a été dépensée pour résoudre ces problèmes, et on est arrivé aujourd'hui à un très honorable compromis.

Les têtes se divisent en deux catégories qui font appel à des propriétés physiques différentes : le magnétisme et la piézo-électricité (fig. 246). D'autres systèmes sont possibles mais ils n'ont, à notre connaissance, jamais été commercialisés.

Les têtes magnétiques se classent à leur tour en plusieurs variétés. On distingue les modèles à fer mobile, appelés aussi à réluctance variable (fig. 247), à bobine mobile ou électrodynamiques (fig. 248), et à aimant mobile ou magnétodynamiques (fig. 249).

Les caractéristiques principales des divers systèmes de lecteur sont résumées dans le tableau ci-après :

SYSTÈME	GENRE de réponse	VALEURS MOYENNES			OBSERVATIONS
		Pression sur la pointe (en grammes)	Tension de sortie mV _{eff}	Résistance de charge k Ω	
Fer mobile mono	vélocité	5,5	50	47	
— stéréo	—	3,5	25	47	
Bobine mobile mono	—	5	2	—	Nécessite
— stéréo	—	2	2	—	un transformateur
Aimant mobile mono	—	2	20	68	
— stéréo	—	1,5	10	68	
Piézo-électrique cristal mono	amplitude	3,4	1000	1 M Ω	Courbe de réponse
— — stéréo	—	2,5	500	1 M Ω	irrégulière
Piézo-électrique céramique mono ...	—	2,5	300	2 M Ω	Nécessite
— — stéréo ...	—	2	200	2 M Ω	correction spéciale

Du point de vue de l'usager le principe utilisé est de peu d'importance car les résultats qu'on peut obtenir n'en dépendent pas.

Ce qui importe avant tout c'est la réalisation *mécanique*, notamment la liberté de mouvement de la pointe de lecture, le poids de l'armature mobile et son amortissement et, enfin, le poids total de la tête.

On conçoit aisément que la liberté de mouvement doive être telle que la pointe puisse suivre, sans entrave, toutes les ondulations du sillon. Il faut aussi que l'armature mobile soit aussi légère que possible pour qu'elle ne s'oppose pas au mouvement par son inertie. Il est également nécessaire que la fréquence de résonance de l'ensemble mobile se situe en dehors de la gamme à reproduire. Au surplus, un léger amortissement est nécessaire pour éviter que, continuant sur sa lancée, la pointe ne saute du sillon lors du passage des ondulations de grande amplitude.

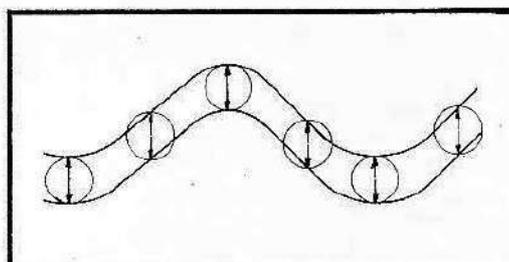
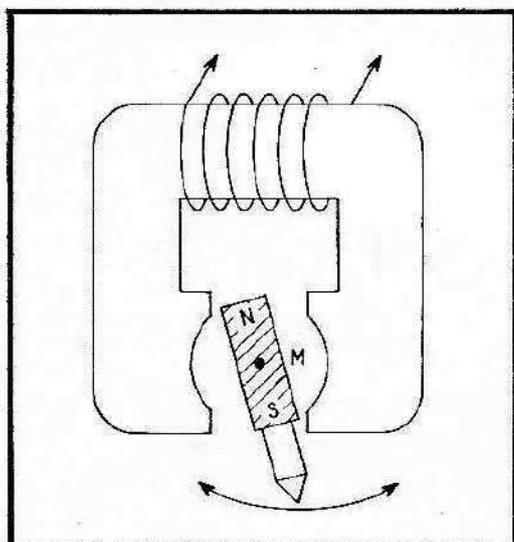


Fig. 250. — Le burin graveur restant toujours dans le même plan, les portions obliques du sillon sont forcément plus étroites.

Fig. 249 (ci-contre). — Principe de la tête de lecture magnéto-dynamique. M : aimant mobile.

Le poids total est également important. Une tête trop légère se laisse entraîner par les oscillations de l'équipage mobile et il se produit à certains moments des mouvements complexes qui tendent à faire dérailler la pointe. Une tête plus lourde s'oppose, par son inertie, aux sollicitations latérales.

La pointe ne doit pas seulement osciller dans un plan transversal. La possibilité d'un léger mouvement vertical doit également lui être donnée. La raison en est la suivante : lors de l'enregistrement le burin se présente tantôt normalement, tantôt obliquement par rapport à l'axe du sillon. Il en résulte que la largeur de celui-ci n'est pas constante (fig. 250).

Lorsque la pointe de lecture, dont la section horizontale est circulaire, passe dans une partie rétrécie, elle est soulevée. C'est ce qu'on appelle l'*effet de pinçage*. Si ce mouvement n'était pas possible, ou devait entraîner celui de toute la tête, le disque serait rapidement détérioré.

D'autre part, la construction de la tête doit être telle que le déplacement vertical de l'équipage mobile ne puisse avoir un effet magnétique ou piézo-électrique produisant un signal parasite. C'est là une très grosse difficulté. Le problème n'est d'ailleurs jamais complètement résolu et les têtes sont toujours plus ou moins sensibles aux sollicitations verticales.

B) LA POINTE ET LE SILLON.

La figure 251 montre la section d'un sillon de disque à $33 \frac{1}{3}$ tours et la position correcte de l'aiguille. On remarquera que le fond du sillon est arrondi ainsi que l'extrémité de la pointe et que celle-ci repose sur les flancs du sillon. Elle est ainsi parfaitement guidée dans les deux directions.

Le frottement de deux corps solides l'un sur l'autre produit inexorablement de l'usure. Et c'est toujours celui qui présente la moindre surface qui s'use le plus vite, même s'il est cent fois plus dur que l'autre.

La surface du sillon étant incommensurablement plus grande que celle de la zone de contact avec la pointe, c'est évidemment celle-ci qui s'use en premier lieu. Il vient un moment où, sa forme s'étant modifiée, la qualité de la reproduction en est affectée et, en outre, le sillon lui-même subit une détérioration qui va en s'accroissant. La figure 251 montre la forme que doit présenter l'extrémité d'une pointe de lecture neuve.

Tout ce que nous venons de dire concernant les microsillons s'applique aux anciens disques à 78 tours, sauf que les dimensions des sillons sont plus grandes et qu'il faut, en conséquence, se servir d'une pointe plus épaisse.

De nos jours on n'utilise plus que deux matières pour les pointes de lecture : le saphir synthétique et le diamant. Avec une excellente tête de lecture, correctement installée, et beaucoup de soins, on peut lire environ 300 faces de disques microsillons avec un saphir, après quoi il est indispensable de le changer.

Une pointe en diamant durera sept à huit fois plus longtemps, mais, lorsqu'elle sera usée, elle commettra plus de dégâts que le saphir. La pointe

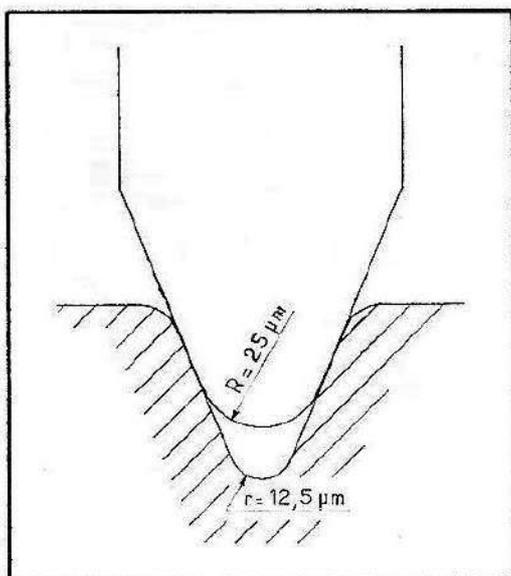


Fig. 251. — La pointe de lecture doit être guidée par les flancs du sillon et ne doit pas en toucher le fond. Les dimensions indiquées correspondent à celles en usage pour les microsillons monophoniques modernes.

en diamant est, malgré son prix beaucoup plus élevé, de plus en plus utilisée par les amateurs de haute fidélité, et c'est le seul choix possible pour le professionnel.

On comprendra aisément, après ce que nous venons de dire, que la pression exercée par la pointe sur le disque doit être aussi faible que possible et, en principe, limitée à celle qui est suffisante pour guider la tête en suivant exactement le sillon. On a pu descendre jusqu'à près d'un gramme dans certaines têtes modernes. La moyenne, pour les têtes courantes, est 2,5 grammes.

Pour la lecture des disques stéréophoniques dont la gravure est particulièrement délicate, il convient de ne pas dépasser ce dernier chiffre.

C) LA STERÉOPHONIE PAR DISQUE.

Comme nous l'avons expliqué par ailleurs, la stéréophonie nécessite la transmission simultanée de deux informations auditives. La chose est toute simple si l'on se sert d'une bande magnétique. Elle se complique singulièrement lorsque le support est un disque.

Le disque stéréophonique comprend deux gravures dans un même sillon. Pour réaliser ce tour de force il a fallu que le burin graveur exécute des mouvements complexes dont les composantes ont des amplitudes variables. Ces mouvements doivent évidemment être intégralement reconstitués par la pointe de lecture.

Le système actuellement généralisé se présente comme suit : le sillon s'ouvre sous un angle de 90° , il est tracé par un burin commandé par deux éléments magnétiques dont chacun lui impose un mouvement parallèle à une de ses arêtes coupantes et dirigé à 45° par rapport à la verticale (d'où le nom de 45/45 donné à ce système).

De cette façon, le burin inscrit sur chaque paroi du sillon une information qui correspond au signal reçu par l'un des systèmes magnétiques. Le sillon contient donc deux enregistrements distincts.

Voyons maintenant ce qui se passe à la lecture du disque : tant que les deux inscriptions restent identiques en amplitude, en fréquence et en phase, le mouvement de la pointe sera un simple déplacement latéral comme pour un enregistrement monophonique.

Si, l'amplitude et la fréquence restant constantes, les signaux sont en phase opposée, le déplacement de la pointe sera vertical.

Dans toutes les situations intermédiaires en amplitude, fréquence ou phase, le mouvement de la pointe tracera dans l'espace tantôt une droite oblique, tantôt un cercle, une ellipse ou quelque autre figure plus compliquée.

Ce mode d'enregistrement présente de très grandes difficultés, non seulement du point de vue mécanique, mais aussi pour éviter la diaphonie. Les ondulations du sillon sont plus petites que dans un enregistrement monophonique. Il en résulte que, pour les suivre, la pointe doit être plus fine. Le rayon de courbure de son extrémité ne devrait pas dépasser une quinzaine de microns. Une pointe en diamant paraît une nécessité absolue.

La limitation de l'amplitude des ondulations a pour conséquence que, dans l'état actuel de la technique, la dynamique d'un disque stéréophonique est inévitablement inférieure à celle d'un bon enregistrement monophonique.

En le commercialisant, les inventeurs du procédé stéréophonique ci-dessus ont annoncé sa compatibilité totale avec les enregistrements monophoniques, c'est-à-dire que :

1) un enregistrement stéréophonique peut être « lu » par une tête monophonique (en monophonie, bien entendu);

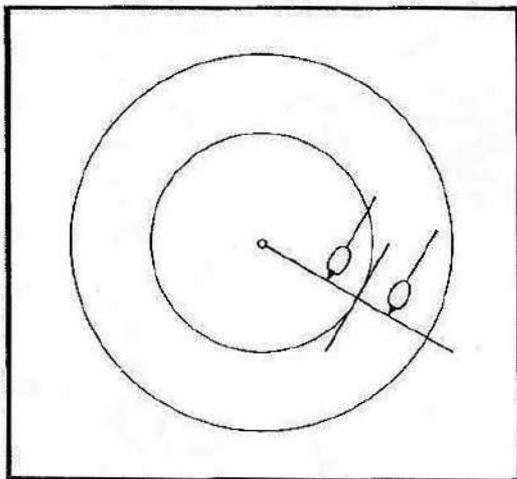


Fig. 252. — Le déplacement d'une tête de lecture devrait se faire suivant une ligne droite perpendiculaire à la tangente au sillon.

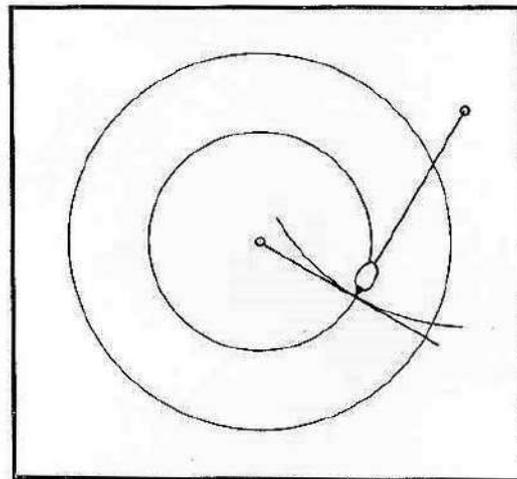


Fig. 253. — On choisit comme pis aller une spire située vers le milieu de l'enregistrement.

2) un enregistrement monophonique peut être « lu » par une tête stéréophonique;

Le 1) est *complètement faux*, à moins de consentir à une usure prématurée du disque tout en se contentant d'une reproduction à faible fidélité.

Le 2) n'est pas entièrement vrai : la reproduction est moins bonne à cause du débattement de la pointe au fond du sillon et du danger accru de « rumble » et autres interférences dues à la sensibilité verticale de la tête stéréophonique.

Ajoutons qu'une tête stéréophonique est forcément plus délicate et plus coûteuse qu'une tête monophonique. Elle contient deux systèmes électromagnétiques ou piézo-électriques distincts dont les sorties sont à connecter à deux chaînes d'amplification. Pour la lecture des disques monophoniques on réunit les deux sorties en parallèle.

D) LE BRAS.

Son rôle est très important dans l'ensemble des moyens conduisant à une reproduction de bonne qualité. Il doit assurer la position de la pointe de lecture sur le disque et permettre d'ajuster la pression qu'elle exerce sur celui-ci. Il doit aussi avoir une liberté de mouvement complète et un parfait équilibre dans le plan horizontal.

Au départ il y a un problème de géométrie : trouver, pour un bras d'une longueur donnée, la position la plus favorable de son pivot par rapport au centre du disque, c'est-à-dire celle qui causera la plus faible *erreur de piste*.

Le déplacement de la pointe de lecture devrait, théoriquement, s'effectuer perpendiculairement à la tangente au sillon (fig. 252) et suivre un rayon du disque, comme pour l'enregistrement.

Comme la tête décrit forcément un arc de cercle, il est facile de voir qu'il n'y a qu'une seule spire pour laquelle cette condition peut être réalisée. Dans toutes les autres positions de la pointe son mouvement se fera suivant un angle plus ou moins prononcé par rapport au rayon, ce qui est une cause de distorsion et augmente l'usure du disque.

L'alignement se fait en choisissant une spire située vers le milieu de l'enregistrement. L'arc de cercle décrit par la pointe passe alors à une certaine distance *en arrière* du centre du disque (fig. 253).

Pour réduire l'erreur de piste, la meilleure solution serait évidemment d'utiliser un bras aussi long que possible. C'est celle que l'on choisit pour les appareils professionnels.

On est cependant limité dans cette voie pour des motifs d'encombrement, notamment dans les appareils à usage domestique et, à plus forte raison, dans les électrophones.

Pour remédier dans toute la mesure possible à cette difficulté, on est amené à couder légèrement le bras ou à y fixer obliquement la tête, ce qui revient au même (fig. 254). La pointe de lecture doit, dès lors, se trouver sur un arc de cercle passant *au-delà* du centre du disque.

Cette disposition améliore l'alignement mais ne le rend cependant pas parfait. Au lieu d'une seule spire sur laquelle la position de la pointe est correcte il y en a maintenant deux.

Cet *angle de compensation* dépend de la longueur du bras et détermine le *dépassement* qui est la distance entre la pointe et le centre du disque sur une ligne passant par le pivot du bras (fig. 255).

Cette question est importante dans le cas où le bras n'est pas monté sur la platine, mais doit être fixé en un endroit déterminé en dehors du bâti.

La bonne conservation des disques dépend, comme nous l'avons dit plus haut, de la pression avec laquelle la pointe appuie sur le disque. La qualité de la reproduction en dépend également.

Pour ces raisons, il est très utile de pouvoir régler cette pression de manière à la ramener à la valeur appropriée aux caractéristiques de la tête.

Dans les bras des lecteurs de qualité courante il n'y a généralement qu'un simple ressort qui compense plus ou moins le poids de la tête. Parfois sa tension est réglable.

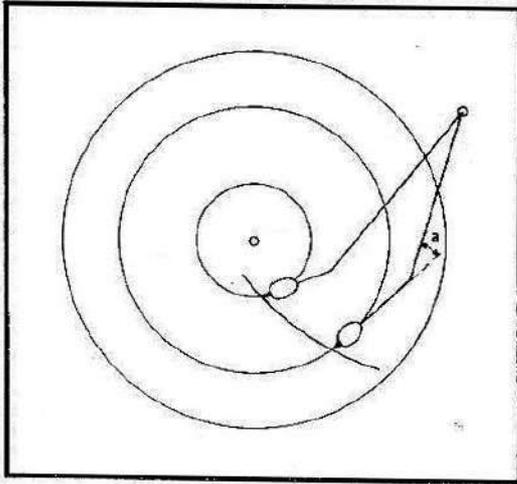


Fig. 254. — La moins mauvaise solution consiste à couder le bras ; α est l'angle de compensation.

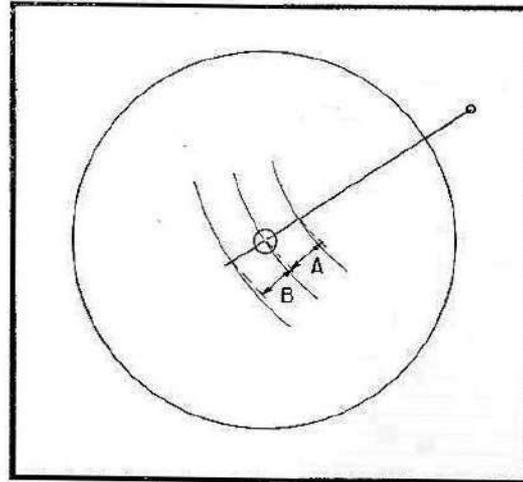


Fig. 255. — La distance entre l'aiguille et l'axe du plateau dépend à la fois de l'angle de compensation et de la longueur du bras.

Les bras de classe supérieure et, à plus forte raison, de qualité professionnelle, portent un contrepoids. La pression sur le disque peut être réglée soit en déplaçant légèrement celui-ci, soit, dans certains, en agissant, par l'intermédiaire d'une vis micrométrique, sur un petit poids auxiliaire. Il existe aussi des bras où le réglage s'effectue par la combinaison d'un contrepoids et d'un ressort.

On trouve dans le commerce des pesons spéciaux permettant de faire ce réglage avec la plus grande précision.

Un dernier raffinement, d'une utilité pratique contestable, est appliqué à certains bras de grand luxe. Il existe une tendance à l'entraînement du lecteur vers le centre de rotation, en l'absence de tout guidage par le sillon. Cet effet pourrait, à la longue, entraîner une légère usure supplémentaire d'un des côtés du sillon et, de l'avis de certains discophiles exigeants, produirait parfois une minime distorsion perceptible par une oreille exercée !

On a préconisé, pour compenser cette force centripète, une légère inclinaison de la table de lecture, mais les fabricants des bras en question ont trouvé mieux : ils les munissent d'un minuscule poids attaché à un fil de nylon qui, passant sur une poulie, exerce une traction antagoniste soigneusement dosée.

Une solution beaucoup plus simple consiste à incliner très légèrement l'axe de pivotement horizontal du bras, de manière à produire, pour celui-ci, une tendance à dériver vers l'extérieur sous l'effet de la pesanteur.

E) LE TOURNE-DISQUE.

On l'appelle aussi, selon sa classe, platine ou table de lecture. Le plus souvent le plateau, le mécanisme d'entraînement et le moteur sont montés sur un bâti métallique qui, dans les modèles domestiques ou même semi-professionnels, porte aussi le bras du lecteur.

Les modèles les plus courants sont à trois vitesses pour permettre l'emploi des vieux disques à 78 tours qui gardent sans doute, pour ceux qui en détiennent encore, une valeur sentimentale, documentaire ou historique!

Il est vraisemblable qu'à l'avenir on construira de plus en plus de tourne-disques à deux vitesses. Le mécanisme s'en trouvant simplifié, l'utilisateur bénéficiera d'une réduction de prix ou, au choix, de performances améliorées.

Du point de vue professionnel, les anciens disques sont de peu d'intérêt, c'est pourquoi certaines tables de lecture de grande classe n'ont qu'une seule vitesse.

Il existe une quatrième vitesse, à vrai dire peu utilisée, qui est de $16 \frac{2}{3}$ tours. Elle a été imaginée pour augmenter la durée d'audition, au détriment bien entendu de la qualité. Car il y a une limite matérielle à la finesse de l'inscription et même à la possibilité de lecture au-delà de certaines fréquences. Les disques enregistrés à cette vitesse paraissent surtout convenir à des emplois sans caractère artistique, comme l'enseignement des langues.

Les moteurs les plus fréquemment utilisés pour les tourne-disques sont du type à induction. Les appareils professionnels sont cependant équipés de moteurs synchrones à démarrage automatique.

Comme la vitesse du plateau doit rester rigoureusement constante, nous retrouvons ici la nécessité d'une certaine réserve de puissance. La consommation du moteur sera de 15, 25 ou 40 watts, suivant qu'il s'agit d'un électrophone, d'une platine de qualité supérieure ou d'une table semi-professionnelle.

Le couple moteur n'est malheureusement pas toujours parfaitement uniforme. Beaucoup de petits moteurs à induction tournent de manière plus ou moins saccadée, à cause de la légèreté du rotor. Les vibrations qui en résultent doivent être amorties dans la transmission.

Celle-ci s'effectue ordinairement par l'intermédiaire de galets garnis de caoutchouc ou d'une courroie. Les diverses vitesses sont obtenues en variant la démultiplication au moyen d'une poulie à gradins (fig. 256) dont la position est réglée par un sélecteur relié à un bouton situé sur la platine.

Aux précautions citées plus haut pour assurer une vitesse régulière il est désirable d'associer un plateau suffisamment lourd pour faire office de volant.

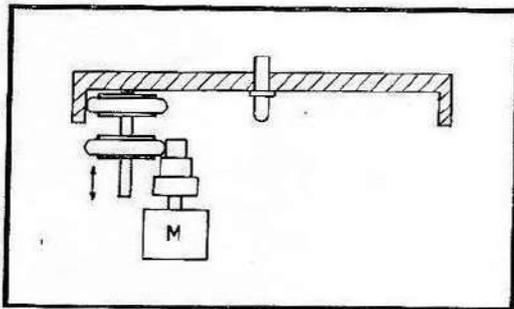


Fig. 256. — Une poulie à gradins permet de faire varier la vitesse de rotation du plateau.

Un poids de 3 kg n'est pas excessif. Les tables de lecture professionnelles ont des plateaux dont le poids est compris entre 5 et 10 kg, ce qui est entièrement satisfaisant.

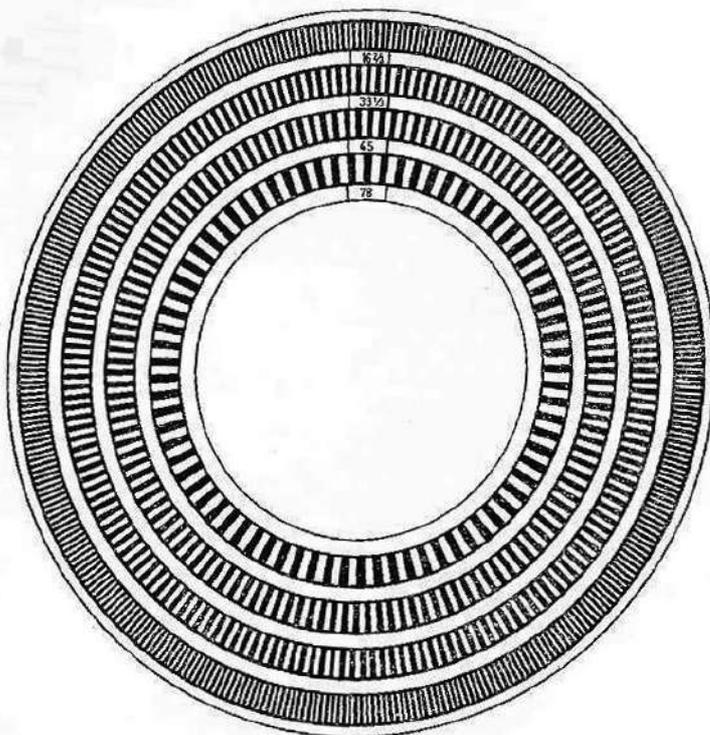
Certaines platines sont munies d'un réglage de vitesse. Celui-ci peut être obtenu électriquement ou par un frein magnétique. La variation possible est de l'ordre de plus ou moins 2 ou 3 %.

L'effet du réglage ne peut être contrôlé qu'à l'aide d'un stroboscope. Celui-ci est constitué par un disque portant des bandes radiales noires dont le nombre dépend de la vitesse à contrôler. On l'éclaire à l'aide d'un petit tube au néon. C'est le secteur à 50 Hz qui sert d'étalon. Quand la vitesse requise est atteinte, les bandes paraissent immobiles (fig. 257).

Les plateaux des tables professionnelles ont souvent des bandes stroboscopiques peintes sur leur bord.

Un autre point important est la nécessité de rendre la distance entre l'axe du plateau et le pivot du bras rigoureusement invariable.

Fig. 257. — Un disque stroboscopique éclairé par un tube au néon permet de régler avec précision la vitesse de rotation du plateau.



Dans certains modèles de tourne-disques, le bras du lecteur est monté sur le bâti; dans d'autres, il est nécessaire de le fixer sur la planche qui supporte la platine. Il faut alors que celle-ci y soit solidement vissée et non supportée par des tampons de caoutchouc ou tout autre système plus ou moins flexible.

Le moindre déplacement relatif du bras et du disque produit des variations dans la vitesse de défilement du sillon par rapport à la pointe. Les vibrations du moteur peuvent ainsi moduler le signal enregistré. Cela se traduit par une sorte de bourdonnement ou de ronflement connu dans le langage anglo-saxon sous le nom de « rumble », mot qui dit bien ce qu'il veut dire, puisque sa traduction littérale est roulement de charrette.

Ce vilain défaut peut se manifester même si le bras est monté sur la platine. Un lecteur sensible est susceptible de capter les vibrations mécaniques s'il répond aux mouvements verticaux de l'équipage mobile. Les lecteurs stéréophoniques sont, par leur principe même, encore plus sensibles à cet égard que les lecteurs monophoniques.

Avant d'aller plus loin, nous devons encore signaler cette monstruosité mécanique qu'est le changeur de disques. Si son existence pouvait se justifier à l'époque des disques à 78 tours dont la durée d'audition est très courte, il constitue de nos jours le meilleur moyen de mettre à mal les précieux microsillons dont la gravure demande qu'on y dépose la pointe de lecture avec toute la douceur d'une caresse!

Passe encore pour les petits changeurs spécialisés pour disques à 45 tours dont le rôle est d'animer les surprise-parties, mais aucun discophile sérieux ni, à plus forte raison, aucun professionnel ne songerait à utiliser un pareil engin.

F) LES CIRCUITS CORRECTEURS.

Nous avons expliqué qu'en raison de considérations mécaniques, l'enregistrement devait se faire selon certaines normes conduisant à une caractéristique de forme particulière. Il est évidemment indispensable, pour rétablir l'équilibre tonal, de corriger celle-ci en donnant à certains éléments de la chaîne une courbe de réponse inverse.

a) LECTEURS MAGNÉTIQUES.

Un lecteur basé sur le magnétisme, quel qu'en soit le système, fournit une tension de sortie proportionnelle à la *vitesse* de l'équipage mobile.

Pour obtenir une reproduction fidèle du son original on le fait donc suivre d'un filtre qui fait basculer la caractéristique d'enregistrement autour d'une fréquence d'environ 1000 Hz qui sert en quelque sorte de pivot (fig. 258).

De part et d'autre de cette fréquence de transition la pente de la courbe est de 6 dB environ par octave. Dans certains cas on impose à la courbe une inflexion particulière vers l'extrême grave (fig. 259).

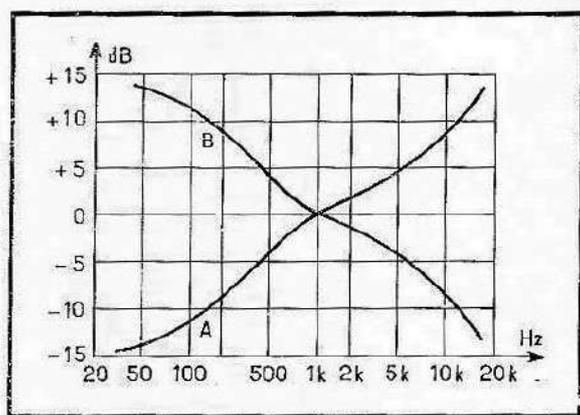
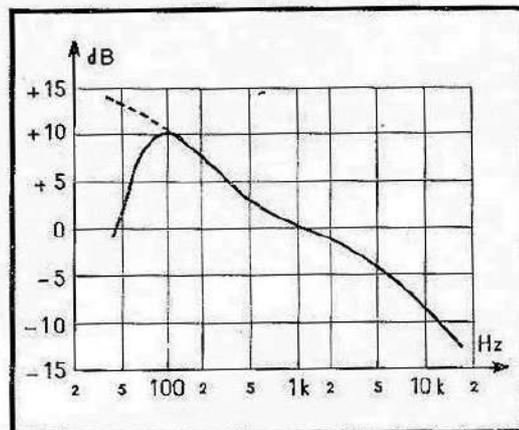


Fig. 258. — A : caractéristique d'enregistrement (moyenne des divers systèmes). — B : courbe de réponse corrigée de l'ensemble tête de lecture-préamplificateur.

Fig. 259. — L'inflexion de la courbe de réponse en dessous de 100 Hz sert à éliminer le ronflement et le « rumble ».



Elle a pour but d'atténuer les ronflements de secteur, le « rumble » et autres vibrations pouvant être transmis au lecteur et difficiles à éliminer par un autre moyen. Cela est particulièrement utile pour la reproduction des disques stéréophoniques.

La correction peut, en principe, s'effectuer à n'importe quel étage de la chaîne d'amplification.

Il est cependant habituel de la faire en un endroit où le signal n'est pas encore fortement amplifié.

Les platines équipées d'un lecteur magnétique sont souvent livrées avec un préamplificateur-correcteur dont la tension de sortie est de l'ordre du volt, ce qui simplifie le raccordement au reste de la chaîne d'amplification en rendant moins critique la longueur du câble.

La figure 260 montre un exemple de préamplificateur.

Les circuits de correction RC correspondent à diverses sortes de gravure et peuvent être mis en service selon le besoin au moyen d'un contacteur.

Un autre exemple de préamplificateur, dans lequel la correction s'obtient par contre-réaction sélective, est donné par la figure 261. Enfin la figure 262

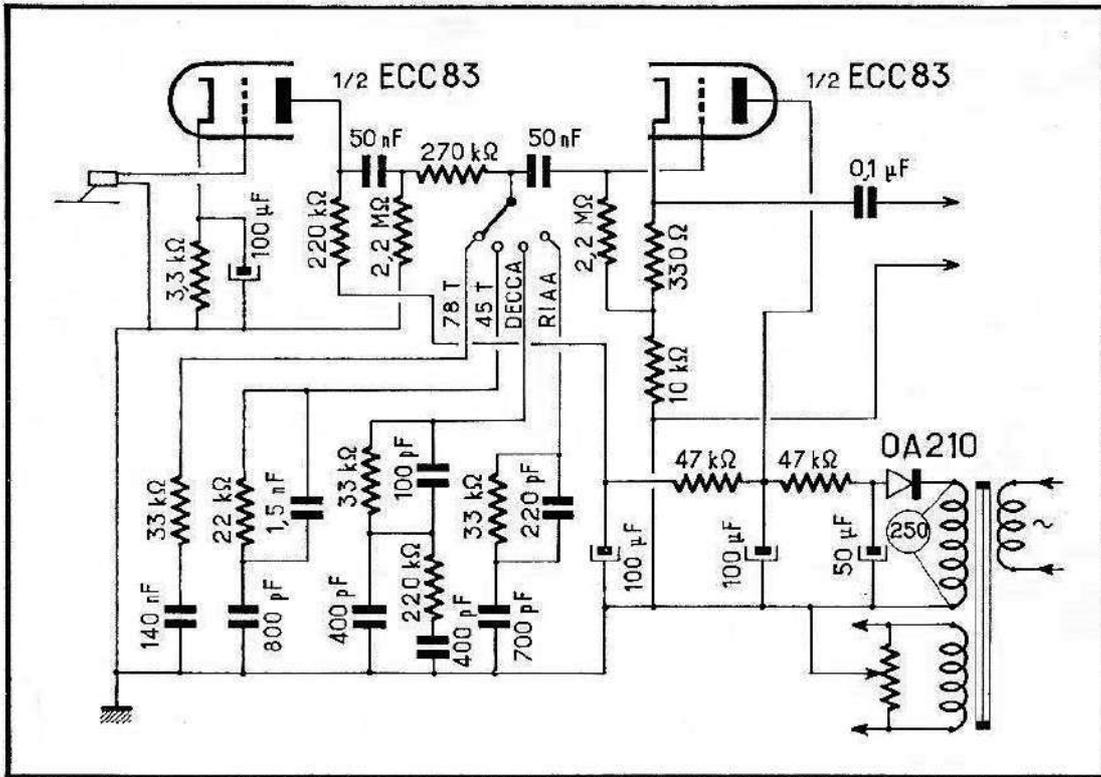


Fig. 260 (ci-dessus). —
Préamplificateur avec correction des divers systèmes d'enregistrement et alimentation indépendante.

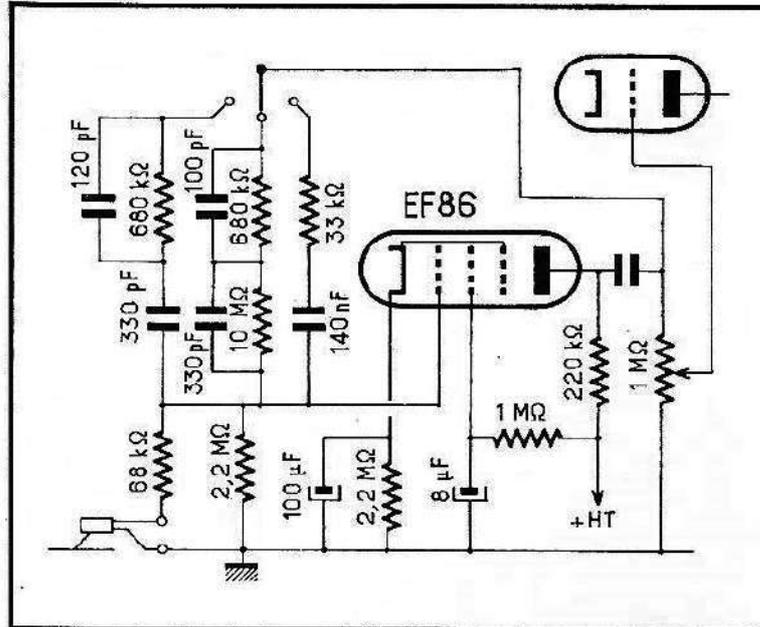


Fig. 261 (ci-contre). —
Préamplificateur avec correction par contre-réaction sélective.

montre le schéma d'un préamplificateur à transistors convenant à une tête magnétique (*).

b) LECTEURS PIÉZO-ÉLECTRIQUES.

Contrairement aux précédents, ces lecteurs fournissent une tension proportionnelle à l'amplitude, de sorte que leur caractéristique est descendante (fig. 263) et semblerait, à première vue, pouvoir se passer de correction.

(*) Adapté d'un article de E. VAROQUAUX et J.-F. DELPECH dans *Toute la Radio* (n° 269).

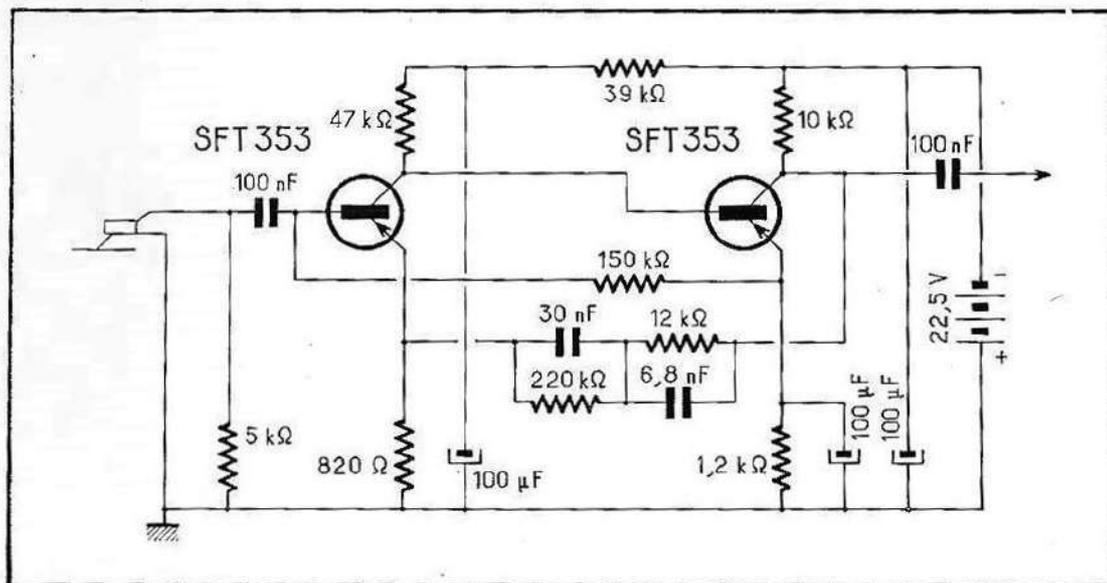


Fig. 262. — Préamplificateur à transistors.

La courbe, qui varie fortement d'un lecteur à l'autre, et même dans une même marque, n'est malheureusement pas du tout régulière. Elle contient des bosses et des fosses dues à des résonances. On ne peut, de ce fait, considérer ce genre de lecteur comme une source à haute fidélité.

Le lecteur piézo-électrique fournit une tension beaucoup plus élevée que le lecteur magnétique. Le signal qui en sort ne demande donc que relativement peu d'amplification. Ce fait, joint à la forme générale de sa courbe de réponse, désigne ce lecteur tout naturellement pour équiper les électrophones

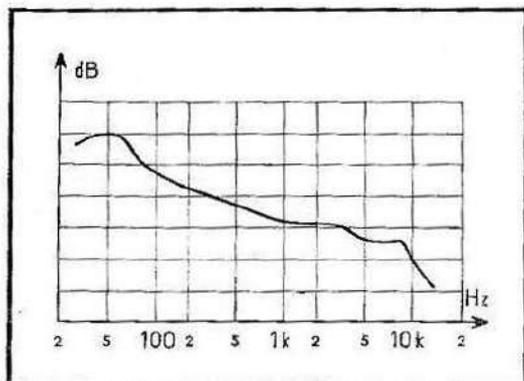


Fig. 263. — Caractéristique d'un lecteur piézo-électrique de bonne qualité.

ou être raccordé à des récepteurs de radio de qualité courante, c'est-à-dire là où l'on ne peut se montrer très exigeant du point de vue de la qualité du son.

Il existe cependant des lecteurs piézo-électriques d'où les principaux défauts ont été éliminés et qui fournissent une qualité de reproduction fort honorable, sans toutefois égaler les meilleurs lecteurs magnétiques.

Il existe néanmoins une astuce pour conférer à un lecteur piézo-électrique quelconque des caractéristiques qui se rapprochent de celles d'un système magnétique. Il suffit de le shunter par une résistance relativement faible par rapport à celle qui est théoriquement nécessaire : par exemple 47 kΩ. Dès lors l'amplificateur-correcteur utilisé pour un lecteur magnétique pourra être employé. En outre l'amortissement produit par la présence de cette résistance efface en grande partie les résonances indésirables.

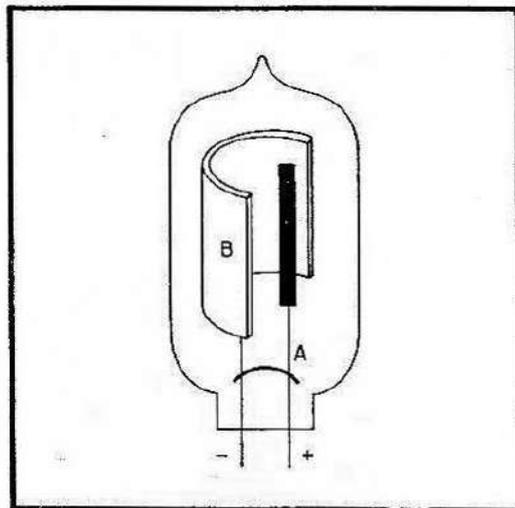
LES PROCÉDÉS OPTIQUES

Si l'on fait tomber un rayon de lumière sur certains métaux de la série des alcalins (sodium, potassium, cæsium) ou alcalino-terreux (calcium, strontium, barium) placés dans une ampoule vide d'air, on constate une émission d'électrons.

Ceux-ci peuvent être attirés vers une anode portée à une tension positive.

Une cellule photo-électrique se compose, en principe, d'une cathode formée d'une couche métallique déposée sur le verre ou d'une plaque recouverte de la substance active, et d'une anode qui a la forme d'une tige ou d'un grillage laissant passer la lumière (fig. 264).

Fig. 264. — Principe d'une cellule photo-électrique. A : anode. — B : plaque recouverte de substance émissive.



L'anode est portée à une tension positive de l'ordre de 50 à 100 V.

Le courant, qui s'établit à travers la cellule sous l'influence de la lumière, est extrêmement faible (quelques μA). Il est approximativement proportionnel à l'intensité lumineuse. La figure 265 donne des exemples de caractéristiques de cellules photo-électriques. Elles varient fortement suivant le type de cellule.

Les indications données par les fabricants se rapportent généralement à l'éclairage par un filament de tungstène à 2850 °K.

Pour augmenter la sensibilité, on introduit une faible quantité de gaz inerte (argon) dans l'ampoule. Il se produit alors un phénomène d'ionisation qui diminue la résistance interne.

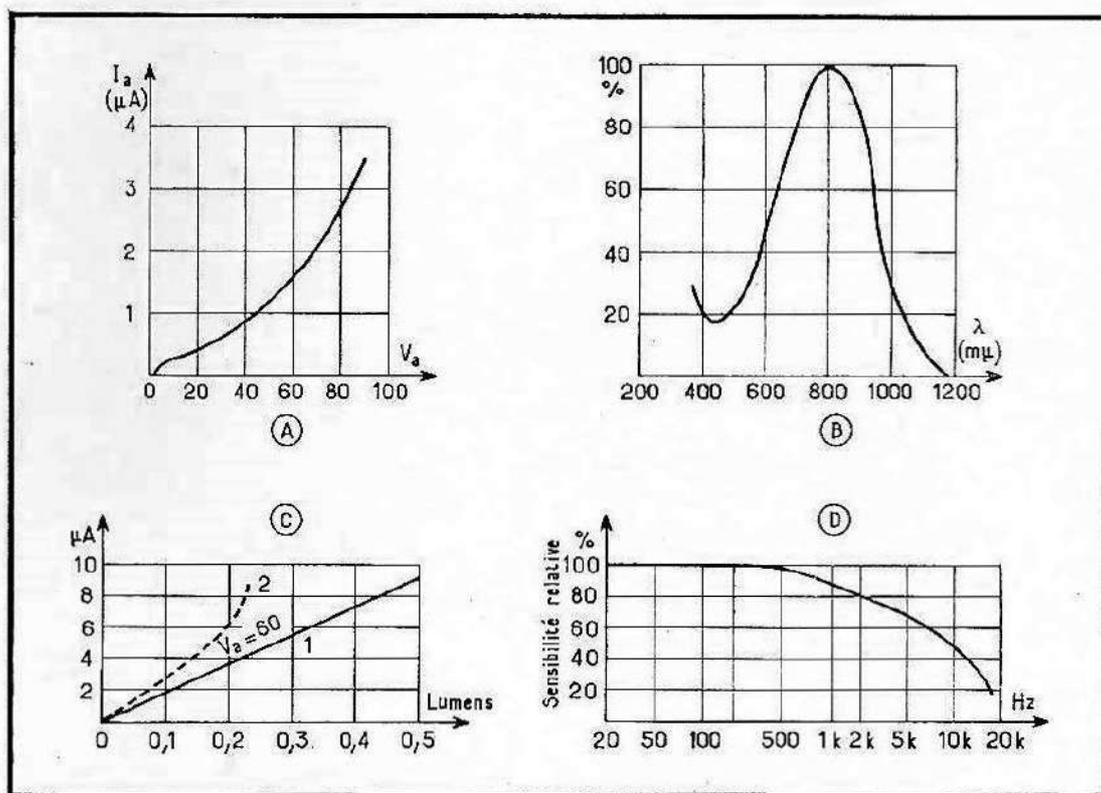


Fig. 265. — Caractéristiques d'une cellule photo-électrique à atmosphère gazeuse. En a, débit en fonction de la tension pour un éclairage de 0,025 lumens. — En b, sensibilité par rapport à la longueur d'onde de la lumière. — En c, courbe courant-lumière d'une cellule photo-électrique : 1) à vide ; 2) à gaz. — En d, courbe de réponse en fréquence d'une cellule photo-électrique à gaz (valeur moyenne).

Bien que les caractéristiques des cellules à gaz soient moins régulières que celles des cellules à vide, on les utilise à cause de leur plus grande sensibilité.

L'emploi de la cellule photo-électrique comme générateur de signaux à fréquence acoustique est réservé à la technique du cinéma.

Le film de cinéma porte, sur un de ses bords, une piste dont la transparence varie. Si l'on fait défiler le film devant une source lumineuse, les rayons qui le traversent seront plus ou moins arrêtés suivant l'opacité de la zone éclairée. La lumière sera ainsi *modulée*. En la faisant tomber sur la cathode d'une cellule photo-électrique, le courant anodique traversant celle-ci présentera les mêmes variations que la lumière.

La figure 266 montre comment une cellule photo-électrique est généralement couplée à un tube amplificateur. C doit avoir un isolement parfait.

Deux types d'enregistrement sont utilisés pour le film sonore : le procédé par variation de l'opacité de la couche sensible et le procédé où l'opacité est constante, mais où la largeur de la surface noircie varie. Les deux systèmes donnent des résultats pratiquement identiques.

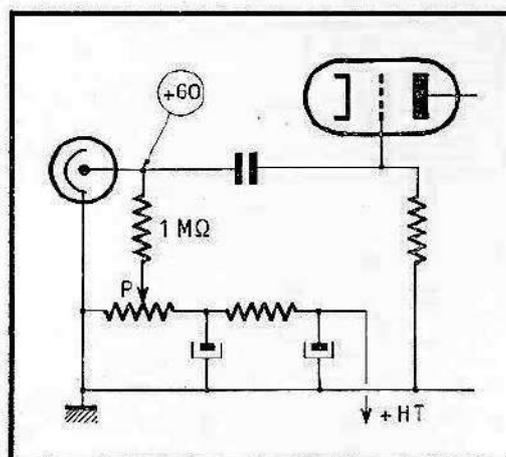
Durant la projection le film passe dans une tête de son où la partie éclairée de la piste est réduite à un trait extrêmement fin. Pour assurer l'entraînement à vitesse constante on lui fait décrire au préalable une large boucle qui absorbe les saccades du défilement des images. La figure 267 représente schématiquement le fonctionnement de la tête : la lumière, fournie par une ampoule A, est concentrée par un dispositif optique B et passe par une fente F dont l'image réduite est projetée sur le film. La lumière traversant

celui-ci vient impressionner la cellule C. Cette dernière est enfermée dans un blindage où elle ne peut être atteinte que par la lumière ayant traversé le film.

La qualité du son, et notamment la reproduction correcte des notes aiguës, dépend de la hauteur du trait lumineux. On comprend que si celui-ci était trop épais, il embrasserait plusieurs stries ou dentelures de la piste à la fois, et le son serait fortement altéré.

Le trait lumineux a d'ordinaire 0,002 mm de hauteur. On ne gagnerait rien à le réduire davantage, car la netteté de l'image est limitée par le grain de l'argent dans l'émulsion photographique. On obtient, dans ces conditions,

Fig. 266. — Couplage d'une cellule photo-électrique à la chaîne amplificatrice. — P : potentiomètre permettant d'ajuster la tension appliquée à l'anode.



une bonne reproduction des fréquences de l'ordre de 7000 ou 8000 Hz, ce qui satisfait suffisamment l'oreille pour permettre l'exploitation commerciale, sans pour cela pouvoir être qualifiée de haute fidélité.

Une variante de ce système consiste à projeter une image agrandie de la piste sur un écran placé devant la cellule, et percé d'une fente dont les dimensions correspondent au taux de l'agrandissement.

L'énergie fournie par une cellule photo-électrique est comparable à celle fournie par un microphone électrostatique. Il faut donc généralement deux étages de préamplification pour amener le signal au niveau du volt.

La haute impédance de la cellule impose des précautions spéciales d'isolement pour les connexions qui la relie à la lampe d'entrée. Généralement le préamplificateur, ou au moins le premier tube, doit se trouver dans son voisinage immédiat.

Le fil allant de la cellule à la grille doit être soigneusement blindé.

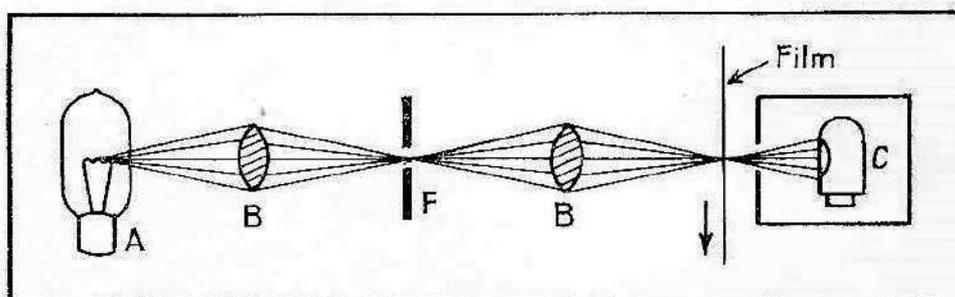


Fig. 267. — Principe d'une tête de lecture de cinéma. A : lampe à filament droit. — B : dispositifs optiques de concentration. — F : fente. — C : cellule photo-électrique.

Un tout autre système d'enregistrement sur film est le procédé Philips-Miller (fig. 268).

La piste est recouverte d'une couche de gélatine épaisse et opaque. Un outil graveur, de forme spéciale, actionné par un système électro-magnétique analogue à celui d'un graveur de disques, s'enfonce dans la couche et, par son mouvement, en enlève une partie. La pellicule est ainsi rendue transparente sur une plus ou moins grande surface.

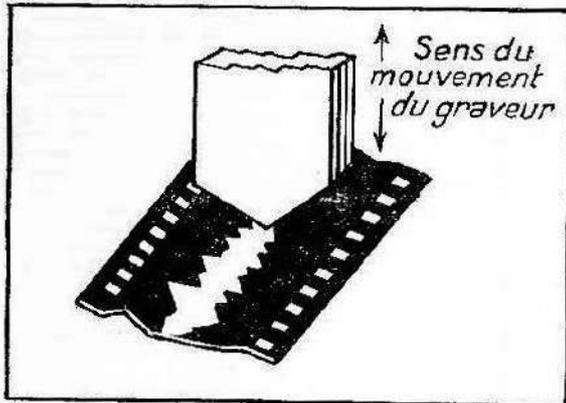


Fig. 268. — Système d'enregistrement mécanique sur film Philips-Miller.

On réalise ici *mécaniquement* ce que fait le pinceau de lumière dans l'enregistrement photo-électrique.

Pour la reproduction, on se sert d'une tête à cellule photo-électrique identique à celle utilisée pour ce dernier système.

Le film est immédiatement utilisable sans nécessiter de manipulations chimiques.

Il est possible, par voie photographique, d'en tirer des contre-types, mais il semble que la qualité obtenue par ce moyen est inférieure à celle que fournit le procédé optique.

EMPLOI DE LA RADIO

Dans certaines installations de distribution de son (hôtels, hôpitaux, grands magasins, lieux publics) on a recours aux programmes de radio pour fournir de la musique ou des informations.

Il est essentiel, dans ce cas, d'obtenir une réception absolument sans interférences ni parasites, aussi ne peut-il être question d'utiliser autre chose que des émissions en modulation de fréquence, en se limitant aux programmes des émetteurs proches, susceptibles de fournir un signal V. H. F. d'amplitude suffisante.

Pour ceux qui aimeraient s'initier à ce mode de transmission, nous recommandons la lecture de l'un ou l'autre ouvrage spécial (*).

Rappelons simplement que la transmission se fait en modulant non l'amplitude du signal, mais sa fréquence.

(*) Par exemple, *Technique de la Modulation de Fréquence*, par H. SCHREIBER, aux Editions Radio.

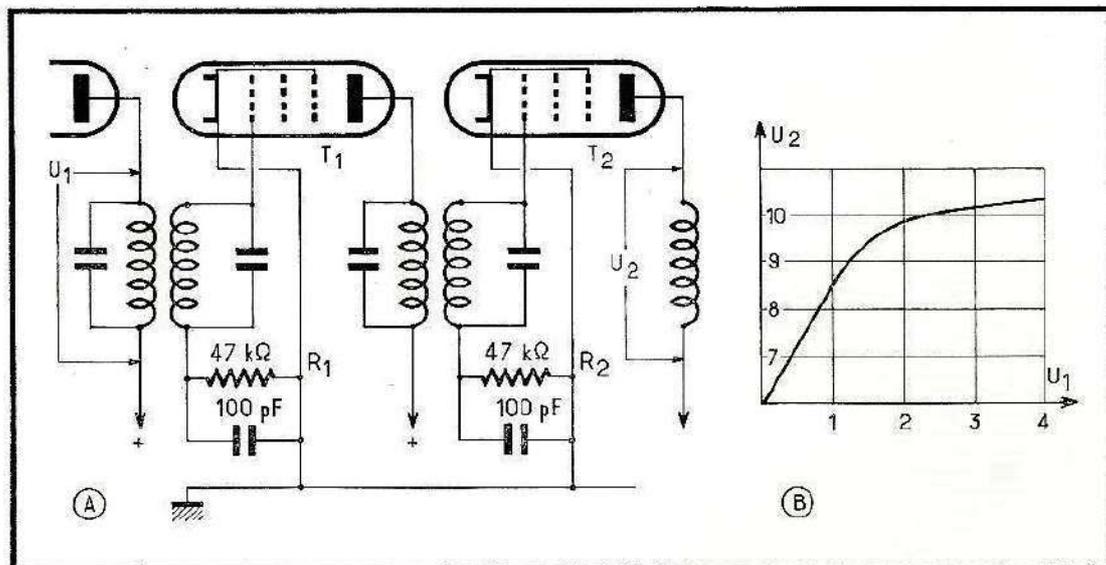


Fig. 269. — En a, le gain des tubes T_1 et T_2 est limité par l'effet du courant de grille dans les résistances R_1 R_2 . — En b, rapport entre le signal entrant et le signal sortant. Le gain tend vers l'unité au-delà d'un niveau d'environ 2 V à l'entrée.

Le récepteur contient un ou plusieurs étages limiteurs qui nivellent le signal capté (fig. 269). Les parasites, qui ne sont rien d'autre que des variations d'amplitude, sont ainsi éliminés pour autant que le signal ait l'amplitude voulue pour assurer son écrêtage. La détection se fait par un système qui répond aux variations de fréquence, mais très peu aux variations d'amplitude.

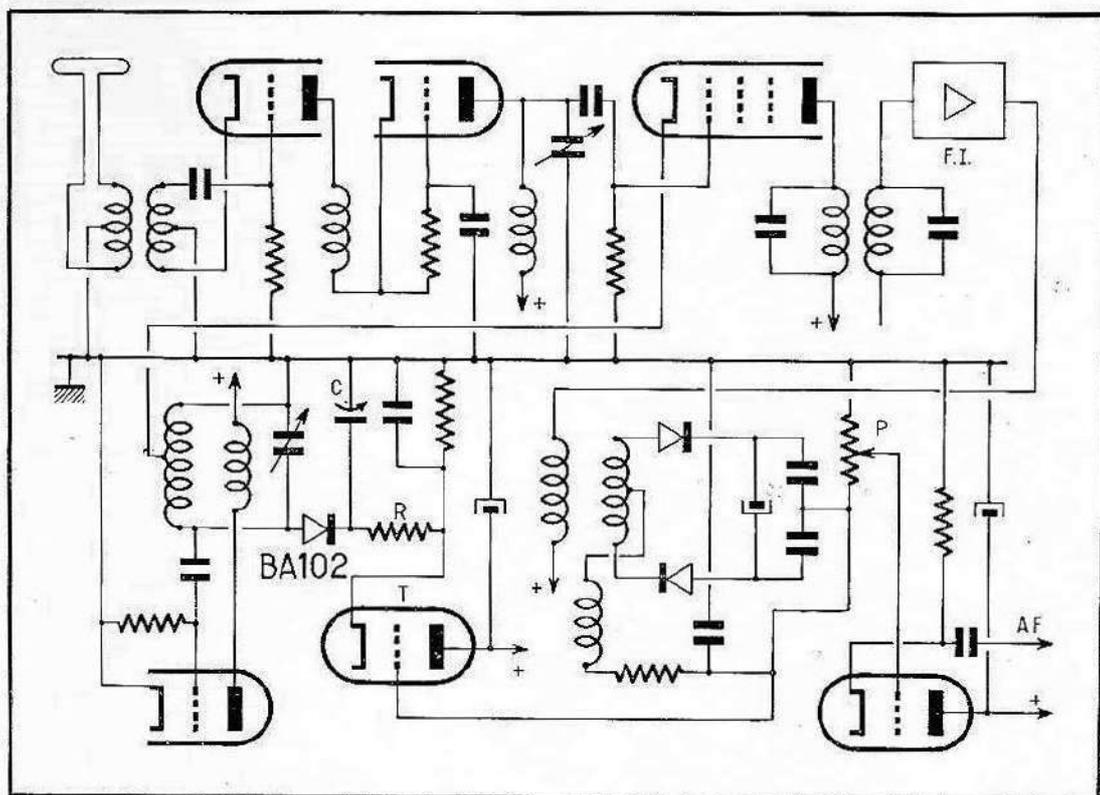


Fig. 270. — Schéma simplifié d'un « tuner » pour émissions en modulation de fréquence avec correction automatique d'accord. C fixe la limite de la correction de l'écart en fréquence.

La figure 270 montre le schéma très simplifié d'un « tuner », c'est-à-dire d'un récepteur sans amplificateur de puissance, destiné à être branché devant une chaîne d'amplification.

Un accord automatique bloquant, sur une certaine plage, la fréquence de l'oscillateur local est réalisé au moyen du circuit T. R. C. comprenant une diode du type « varicap » (BA102).

La sortie est à basse impédance et réglable au moyen du potentiomètre P.

L'accord est ordinairement indiqué par un tube EM84. Dans les appareils professionnels on utilise à cet effet un galvanomètre à zéro central.

LES APPLICATIONS

L'AMÉNAGEMENT ACOUSTIQUE

I. — Acoustique des salles et des espaces.

La transmission d'une vibration sonore commence là où le son est engendré (bouche d'un orateur, instrument de musique, etc.) et finit à l'oreille de l'auditeur. Si ce dernier se trouve dans le voisinage immédiat de la source du son, l'air seul sert d'intermédiaire, et les lois de l'acoustique sont seules en jeu; mais s'il est à grande distance, une chaîne de dispositifs électriques s'intercale entre lui et cette source.

Cette transmission ne peut être considérée comme parfaite que si l'impression produite sur l'auditeur lointain est *identique* à celle qu'il ressentirait s'il se trouvait dans le voisinage de la source du son. C'est là le seul critère valable de la qualité d'une installation.

Il convient cependant, revenant sur ce que nous avons dit plus haut, de noter que cela n'implique nullement que l'onde sonore perçue au point de réception doive être *physiquement identique* à celle émise à l'autre bout. La technique la plus perfectionnée ne saurait d'ailleurs atteindre ce résultat.

Le son qui atteint directement l'auditeur rapproché ou le microphone est déjà différent de celui engendré par l'instrument sonore, car il est influencé, pendant son trajet à travers l'air, par divers facteurs.

Chacun a pu se rendre compte de la grande différence qu'il y a entre un même son émis en plein air et dans un espace clos, et suivant qu'il s'agit d'une salle petite ou grande, meublée ou non.

Le son émis en plein air, loin de tout obstacle, se propage en tous sens et se perd dans l'espace : l'oreille ne perçoit donc qu'une seule impulsion pour chaque vibration émise. Par contre, dans un espace bordé de bâtiments élevés ou d'accidents de terrain importants, le son revient au bout d'un temps plus ou moins long après réflexion sur ceux-ci. Quand, en raison de la distance, le retard est de l'ordre d'une ou plusieurs secondes, le phénomène prend le nom d'*écho*.

Ce n'est là qu'une forme extrême d'un effet qui se produit chaque fois que le son frappe un obstacle.

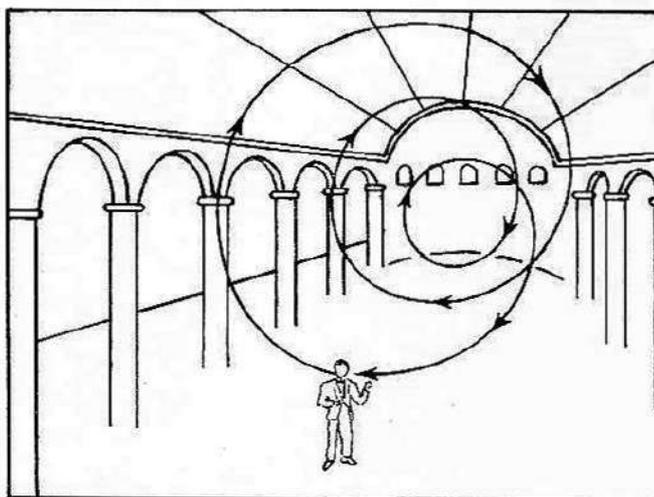
Dans un lieu clos l'oreille perçoit, outre le son direct, celui qui résulte de réflexions multiples et qui, de plus, est altéré par l'absorption sélective des surfaces réfléchissantes (fig. 271).

Si le son s'arrête brusquement on continue à le percevoir pendant un temps mesurable. Celui qu'il met pour tomber à — 60 dB par rapport à son niveau primitif est le *temps de réverbération* appelé aussi parfois *facteur d'écho*.

Il dépend des caractéristiques du lieu, du volume enclos et de la nature des parois. On peut le modifier profondément par divers procédés.

L'auditeur placé dans une salle perçoit d'abord le son direct, puis, successivement, des sons provenant de diverses directions et qui s'ajoutent au premier.

Fig. 271. — Dans un endroit clos le son subit des réflexions multiples.



Il s'ensuit un *renforcement* du son qui peut être très important. S'il s'agit d'un son continu, celui-ci s'enfle jusqu'à un certain maximum. Le temps nécessaire pour l'atteindre a une durée de même ordre que le temps de

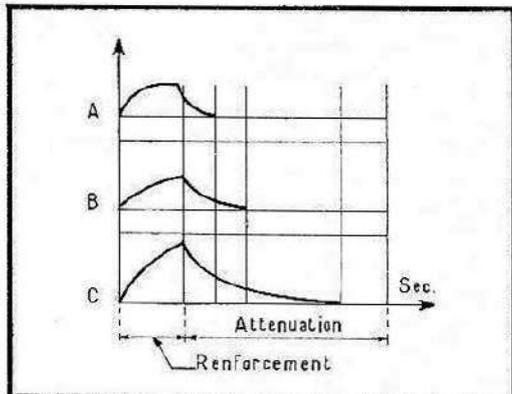
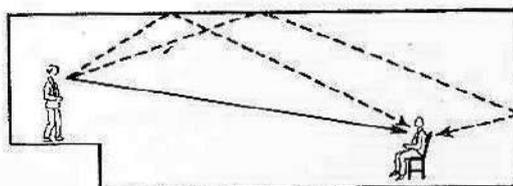


Fig. 272. — Temps de réverbération.
A : court (salle « sèche »). —
B : moyen (salle normale pour la voix). — C : long (caractéristique habituelle d'une salle de concert). On notera l'analogie de ces courbes avec la décharge d'un condensateur.

Fig. 273. — Le son réfléchi se confond avec le son initial quand il a parcouru moins de 34 mètres.



réverbération, mais, à cause des caractéristiques physiologiques de l'oreille, il est moins nettement perceptible.

Tout se passe comme si la salle formait en quelque sorte un réservoir de son qui met un certain temps à se remplir, puis, quand le son initial cesse, restitue ce qu'il avait emmagasiné (fig. 272).

Emettons un son bref (claquement des mains, par exemple) : suivant la distance parcourue par le son réfléchi, nous entendrons plusieurs sons distincts ou bien un son unique prolongé, parce que tous les échos sont emmêlés.

Le son réfléchi qui parvient à l'oreille moins d'un dixième de seconde après le son initial, c'est-à-dire après un parcours de moins de 34 mètres, se confond avec lui (fig. 273).

Des distances bien plus grandes peuvent être parcourues, même dans des salles de dimensions moyennes, au cours des réflexions multiples que subit le son lorsque les parois sont peu absorbantes. On saisit tout de suite l'importance de ce fait pour la clarté de la parole car, si le décalage est important, les syllabes successives viennent se superposer.

Par suite de l'effet cumulatif des réflexions venant de différentes parois, l'intensité sonore reçue indirectement par l'auditeur peut considérablement dépasser celle du son direct et complètement noyer celui-ci. En certains points d'une salle, le son peut être *concentré* comme l'est la lumière par un réflecteur. Cette propriété est parfois utilisée par les architectes dans la construction des salles de concert. Par une courbure ou une inclinaison convenable du plafond et par les proportions de la salle, on arrive à une répartition du son réfléchi, telle que les places les plus éloignées ne sont pas défavorisées.

Quand il s'agit de reproduction par haut-parleurs, la réflexion du son permet une économie de puissance qui n'est pas négligeable. Il y a effectivement une relation entre la puissance minimum indispensable et le facteur d'écho.

De ce que nous avons dit plus haut, on déduit qu'un écho simple, nettement distinct du son original, ne peut se produire que dans des locaux très vastes (cathédrales, grands halls) et en plein air par l'effet d'obstacles situés à une certaine distance. Dans les locaux plus petits, le son réfléchi une première fois atteint l'oreille en une faible fraction de seconde et se confond avec l'original. Les échos secondaires et tertiaires se suivent également de trop près pour créer une discontinuité dans le son. L'effet d'augmentation d'intensité sonore qui résulte de cette succession de réflexions est généralement désigné sous le nom de *résonance*.

On parle de la résonance d'une salle pour exprimer sa sonorité, mais il ne faut pas confondre cette expression avec celle appliquée à une lame vibrante, une colonne d'air (dans un tuyau d'orgue, par exemple) ou un circuit électrique, pour désigner une fréquence rigoureusement déterminée.

Des *ondes stationnaires* peuvent se former dans une salle. Cela se manifeste par le fait que, suivant la place où l'on se trouve, certains sons deviennent inaudibles, tandis que d'autres sont désagréablement renforcés. Ce phénomène n'est guère perceptible pour les notes aiguës, mais il peut être extrêmement gênant pour des notes graves.

Lorsque l'onde sonore frappe une paroi, une partie seulement de l'énergie totale forme l'onde réfléchie, le reste est absorbé. Suivant la nature de la paroi, cette absorption est plus ou moins grande. Les matières molles ou poreuses (les tentures, le feutre, etc.) absorbent beaucoup plus d'énergie que les matières dures (marbre ou béton, par exemple). Une surface rugueuse amortit davantage qu'une surface polie.

Nous avons là un moyen d'améliorer l'acoustique d'une salle, en diminuant le temps de réverbération ou en modifiant la répartition des sons réfléchis.

L'effet d'absorption n'est pas le même pour toutes les fréquences, et il en résulte que certaines fréquences peuvent paraître renforcées par rapport à d'autres qui sont exagérément amorties. La musique sera de ce fait plus ou moins *colorée*. Les étoffes, les tapis absorbent particulièrement les fréquences élevées.

Dans une salle trop drapée, la musique paraît sourde. Un revêtement en bois absorbe davantage les fréquences basses que les fréquences élevées. Il peut donc servir à corriger le défaut précédent.

Le coefficient d'amortissement d'un matériau est obtenu par comparaison avec un espace libre correspondant (une fenêtre ouverte, par exemple). Comme toutes les fréquences ne sont pas absorbées de la même manière, on prend comme base la fréquence de 500 Hz.

Si l'on considère que 1 implique une absorption totale et que 0 indique que toute l'énergie sonore est réfléchiée, nous trouvons les valeurs ci-dessous pour des produits courants :

Marbre	0,01
Béton	0,015
Maçonnerie courante	0,025
Plafonnage	0,03
Lambris en bois dur	0,08
Linoléum	0,1
Paillason	0,17
Tapis	0,2
Tenture	0,25
Meubles divers	0,3
Feutre	0,5
Public	0,9

Partant de ces données, on peut calculer approximativement le facteur d'écho d'une salle. On commence par déterminer l'amortissement total. Pour cela, on calcule l'absorption de chaque partie de la salle en multipliant la surface en m² par le coefficient approprié. On additionne ensuite le tout.

Soit, par exemple, une salle de 2000 m² dont la surface totale se décompose comme suit :

250 m ² de stuc (plafond)	coefficient 0,03 =	7,50
480 m ² de lambris (murs)	coefficient 0,08 =	37,40
140 m ² de tapis et tentures	coefficient 0,2 =	28,00
184 m ² de public, sièges, etc.	coefficient 0,6 =	110,40
		183,30
	AMORTISSEMENT TOTAL	183,30

On trouve alors le facteur d'écho au moyen de la formule :

$$\text{Facteur d'écho} = \frac{\text{capacité de la salle en m}^3}{\text{amortissement total} \times 6} \quad (*)$$

Ce qui donnerait, dans l'exemple ci-dessus :

$$\frac{2000}{183,30 \times 6} = 1,8 \text{ s}$$

Tout ce que nous avons dit jusqu'à présent conduit à la conclusion qu'il y a un facteur d'écho optimum et que celui-ci varie avec les dimensions de la salle. Il varie aussi suivant que l'on envisage principalement la parole ou la musique et suivant qu'il s'agit d'un endroit calme (église, théâtre) ou bruyant (restaurant, café).

(*) D'après BERGTOLD : *Raumakoustik*.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs les plus couramment admises :

VOLUME DE LA SALLE en m ³	FACTEUR D'ÉCHO OPTIMUM en secondes	FACTEUR d'amortissement moyen le plus favorable
50	0,7 à 0,9	0,15
100	0,7 à 0,95	0,16
200	0,7 à 1	0,18
500	0,75 à 1,1	0,2
1000	0,8 à 1,2	0,25
2000	0,8 à 1,3	0,3
5000	0,9 à 1,4	0,35
10 000	1 à 1,6	0,38
20 000	1,2 à 1,8	0,4

Le facteur d'amortissement *moyen* s'obtient en divisant l'amortissement total par la superficie totale en m².

Le chiffre trouvé dans notre exemple est trop élevé pour la grandeur de la salle. On devrait donc augmenter l'amortissement, soit en garnissant le plafond de matériaux appropriés, soit en drapant davantage les murs.

Pour les très grandes salles (plus de 20 000 m³), on doit tenir compte de ce que le son est atténué par son passage dans l'air, et un facteur de correction doit être introduit dans la formule donnée plus haut.

Celle-ci devient alors :

$$\text{Facteur d'écho} = \frac{\text{capacité de la salle en m}^3}{\text{superficie totale} \times K \times 6}$$

La valeur du facteur K dépend du facteur d'amortissement *moyen* suivant le tableau ci-dessous :

FACTEUR D'AMORTISSEMENT MOYEN	VALEUR CORRESPONDANTE DE K
0,1	0,11
0,15	0,17
0,2	0,23
0,3	0,35
0,4	0,5
0,5	0,7
0,6	0,9
0,7	1,2
0,8	1,6

Etant donné que la capacité de la salle croît comme le cube des dimensions linéaires, tandis que la surface des murs ne croît que comme le carré de celles-ci, le revêtement des surfaces par des produits absorbants doit être beaucoup plus soigneusement étudié pour les grandes salles que pour les petites. On devra faire appel à des matériaux dont le facteur d'amortissement est plus grand que celui des produits courants et même à des dispositifs architecturaux tels que des cannelures ou des redans dans le plafond.

Ce qui précède s'applique surtout aux cas où le son est uniformément diffusé dans toute la salle. On peut tenir cette condition pour vraie dans le plus grand nombre de salles de petite ou moyenne dimension. Dans les très grandes salles, par contre, on doit compter que le son ne sera pas régulièrement réparti : il y aura des régions privilégiées et d'autre défavorisées.

Pour remédier à cela, les revêtements amortissants devront être judicieusement distribués et non plus appliqués uniformément à toute la surface des murs.

Le calcul, par les méthodes ci-dessus, du facteur d'écho ne donne que des résultats approximatifs, mais cependant suffisants pour les cas les plus courants. Quand il s'agit de locaux très vastes ou présentant des anomalies acoustiques, les résultats devront être obtenus par une mesure directe au moyen d'un instrument approprié. On décèlera ainsi les zones où la résonance est exagérée et d'autres qui sont anormalement amorties.

L'industrie a mis sur le marché un grand nombre de produits spéciaux destinés à l'amortissement du son. Certains de ceux-ci existaient d'ailleurs bien longtemps avant qu'il ait été question d'amplification et servaient plutôt à l'isolement entre locaux.

Ces produits se présentent sous diverses formes : plaques de revêtement, rouleaux, enduits, etc.

Leur caractéristique générale est d'avoir une texture cellulaire ou de fournir une surface rugueuse.

Les matières les plus diverses sont utilisées pour leur fabrication : déchets de bois, matières cellulosiques, mousse de plastique, laine de verre, etc.

Les fabricants fournissent généralement les indications nécessaires quant à leur pouvoir absorbant à diverses fréquences.

Il y a généralement une grande différence entre le taux d'absorption des fréquences élevées et celui des fréquences basses, et cette différence varie considérablement d'un produit à l'autre.

C'est ainsi qu'on trouve pour le feutre et les tentures épaisses en général les moyennes suivantes :

FRÉQUENCE EN Hz	COEFFICIENT D'AMORTISSEMENT
120	0,13
250	0,41
500	0,56
1000	0,69
2000	0,70

Au-delà, l'amortissement tend rapidement vers l'unité.

Pour le liège, la progression est moins rapide :

FRÉQUENCE EN Hz	COEFFICIENT D'AMORTISSEMENT
120	0,16
250	0,21
500	0,26
1000	0,24
2000	0,27

L'amortissement reste presque constant jusqu'à 5000 Hz, puis augmente très vite.

Ce fait est utilement mis à profit pour corriger les particularités des salles.

Un autre moyen de modifier la résonance des salles consiste à faire dans les murs des ouvertures supplémentaires donnant par exemple dans un corridor ou un faux grenier.

Les ornements comme les cannelures, les colonnes, les cloisonnements, etc., permettent aussi, en rompant les surfaces et en modifiant ainsi les réflexions, de contrôler dans une grande mesure les caractéristiques acoustiques.

Il reste à signaler un phénomène particulier qu'on observe lorsque le temps qui s'écoule entre une première réflexion et le signal original est très court (de l'ordre de 40 à 50 ms).

Le son que l'on perçoit en premier lieu détermine alors la direction de la source. C'est l'effet Haas.

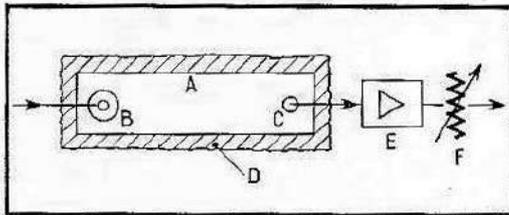


Fig. 274. — Système de retard acoustique. A : plaque métallique. — B : haut-parleur. — C : microphone. — D : coussin de mousse plastique entourant la plaque. — E : amplificateurs. — F : atténuateur réglant le niveau de la réverbération.

Il s'ensuit que, même si l'onde réfléchie est ressentie plus intensément par l'auditeur que le signal qui l'a provoquée, elle ne change pas son appréciation quant au point de départ du son.

Dans les conditions définies plus haut il ne peut exister de confusion entre une réflexion et le signal initial.

Ce fait permet de modifier profondément l'acoustique d'une salle sans imposer à l'auditeur une sensation désagréable de dispersion des ondes sonores.

Une salle de cinéma nécessite un traitement spécial. Il faut éviter en effet que son temps de réverbération allonge exagérément celui qui est déjà enregistré sur la pellicule. Il doit donc être relativement court et, de plus, sélectif pour s'accorder, dans la mesure du possible, avec les caractéristiques du son enregistré.

On donne souvent les indications suivantes : pour les salles de grandeur moyenne, 1,5 seconde à 500 Hz, 1,9 seconde à 50 Hz et 1,6 seconde à 8 kHz. Le résultat voulu s'obtient par le choix des matières de revêtement.

D'autre part, il est important d'empêcher le son d'être réfléchi par le fond de la salle. Cette partie doit être plus fortement garnie de matériaux absorbants.

L'effet directif des haut-parleurs peut être utilisé pour améliorer la répartition du son, mais, pour obtenir les meilleurs résultats, la collaboration de l'architecte est nécessaire.

Les salles de cinéma modernes ont généralement un plafond incurvé et des parois latérales s'ouvrant en éventail depuis l'écran. Cette disposition, qui rappelle une section de pavillon exponentiel, tend à produire un champ sonore uniforme.

Ajoutons encore que, dans les salles de cinéma, les haut-parleurs se trouvent normalement derrière l'écran qui est, en fait, une sorte de filtre acoustique qui défavorise la transmission des fréquences élevées. C'est pourquoi une compensation est nécessaire dans la reproduction du son. On l'obtient par un certain relèvement des aiguës à partir de 5 ou 6 kHz.

2. — La réverbération artificielle.

Nous n'avons parlé jusqu'à présent que de l'acoustique « naturelle » des salles, c'est-à-dire des propriétés résultant de leur volume et de la nature des parois.

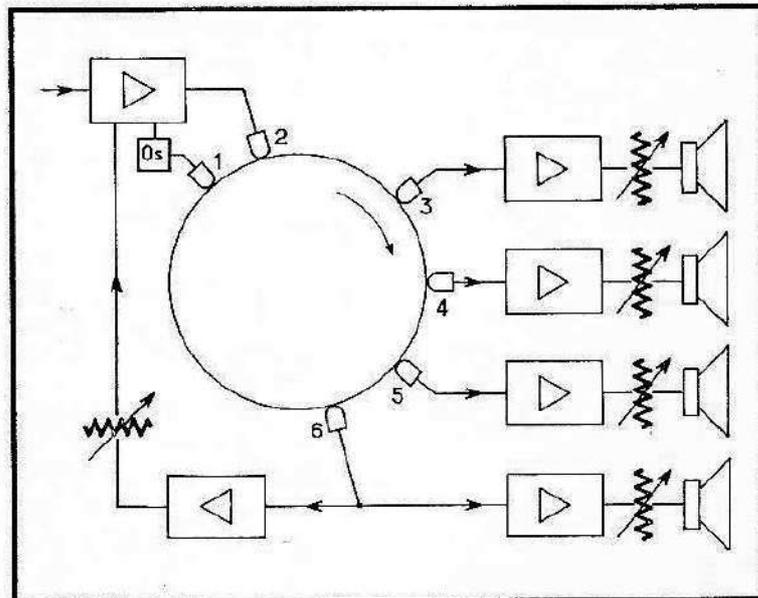
En revêtant celles-ci d'un matériau absorbant totalement le son, on obtient ce qu'on appelle une *chambre sourde*. Cette condition, d'ailleurs fort difficile à obtenir de manière complète, est utilisée pour de nombreux travaux acoustiques comme des essais de microphones et de haut-parleurs.

Un son émis dans une chambre sourde ne produit aucune réflexion et s'éteint immédiatement. Il donne l'impression d'avoir été produit en plein air dans un endroit totalement dépourvu d'obstacles et, par conséquent, d'échos.

Supposons que l'on place, à proximité de la source, un microphone relié, à travers une chaîne d'amplification, à un haut-parleur placé au fond de la chambre, et supposons aussi que, quelque part dans la chaîne, se trouve un dispositif qui retarde le signal de quelque 40 à 50 millisecondes.

Nous obtiendrons grâce au haut-parleur le même effet que celui que produirait une réverbération naturelle. On peut ainsi simuler les caractéristiques d'une salle, fût-ce même en plein air, en utilisant un nombre approprié de haut-parleurs. On peut aussi modifier, selon les besoins, l'acoustique d'une salle quelconque.

Fig. 275. — Principe de la machine à réverbération. 1 : tête d'effacement et de prémagnétisation. — 2 - 3 - 4 - 5 - 6 : têtes de lecture. Le signal sortant de la tête 6 peut être à volonté réintroduit, après amplification, dans la première tête d'enregistrement. On peut ainsi prolonger indéfiniment la réverbération.



Le retard dans la transmission d'un signal acoustique peut être obtenu par le moyen suivant : un haut-parleur est appliqué à une des extrémités d'une lame d'acier flexible suspendue et plus ou moins amortie par des coussins en mousse plastique. A l'autre extrémité se trouve un microphone qui recueille les vibrations qui se sont propagées à travers le métal (fig. 274).

Le temps que met le signal pour passer du haut-parleur au microphone peut être, selon les caractéristiques mécaniques de l'appareil, d'un nombre plus ou moins grand de millisecondes.

On préfère cependant à ce dispositif assez rudimentaire un magnétophone d'une espèce particulière.

Cet appareil, appelé parfois « roue phonique », utilise une boucle de

ruban magnétique qui passe successivement devant une tête d'enregistrement, plusieurs têtes de lecture et une tête d'effacement (fig. 275).

La vitesse de défilement généralement utilisée est de 76 cm/s.

Les têtes de lecture sont branchées sur une ou plusieurs chaînes d'amplification qui alimentent chacune un ou plusieurs haut-parleurs.

Une table de « mixage » permet de répartir, selon les besoins, le son prélevé aux différentes têtes.

Le son initial provenant du ou des microphones est enregistré sur la bande sans fin qui est « lue » avec un retard croissant par les différentes têtes.

Le signal sortant de la dernière tête de lecture peut, au besoin, être réinjecté dans la tête d'enregistrement et prolonger ainsi autant qu'on le désire les réverbérations fictives.

Les amplificateurs sont pourvus d'un contrôle de tonalité qui permet de réaliser une réverbération sélective.

En disposant les haut-parleurs de manière judicieuse on peut donner à une salle fortement amortie, dont la réverbération naturelle est déficiente, une acoustique convenant exactement au genre de programme qui doit y être exécuté.

Certaines précautions devront cependant être prises. Il faut notamment qu'en aucun endroit de la salle le son ne soit retardé de plus de 50 millisecondes. Faute de quoi certains auditeurs ne le percevraient plus comme une réverbération liée à l'ensemble du son, mais comme un écho isolé.

On peut en principe suivre les règles suivantes.

Le son retardé ne doit atteindre aucun auditeur avant le son direct.

Le délai maximum entre l'audition du son direct et la perception du son différé est de 50 millisecondes.

L'intensité du son des haut-parleurs ne peut en aucun cas dépasser de plus de 5 dB celle du son direct (*).

Inversement on peut corriger les effets désagréables d'une réverbération naturelle exagérée.

L'appareil, dans ce cas, a pour rôle de distribuer, à l'aide de haut-parleurs à effet directif accentué, le son initial amplifié et *retardé*. Le retard doit correspondre évidemment au temps que met le son pour parvenir directement à l'auditeur plus un léger décalage, afin de profiter de l'effet Haas. Le son réverbéré qui arrive à cet auditeur à contretemps et tend à brouiller le son direct est ainsi masqué et n'est plus gênant.

L'emploi de ce procédé de correction est utile dans les églises et autres lieux où le temps de réverbération est excessivement long.

Enfin la réverbération artificielle permet de créer, lors d'une représentation théâtrale ou d'un concert en plein air, l'illusion d'une salle fermée ou d'obtenir des effets particuliers saisissants.

Ces possibilités peuvent être exploitées à fond dans les spectacles « son et lumière » pour réaliser une ambiance sonore appropriée.

Il existe un autre moyen d'obtenir des effets de réverbération ou d'écho qu'on utilise surtout pour la radiodiffusion, l'enregistrement des disques ou dans l'industrie du cinéma. Il consiste dans l'emploi d'une chambre nue aux murs particulièrement réfléchissants dans laquelle on dispose un haut-parleur et un microphone.

Ce dernier recueille le son émis par le haut-parleur, plus toutes les réverbérations auquel il a donné naissance.

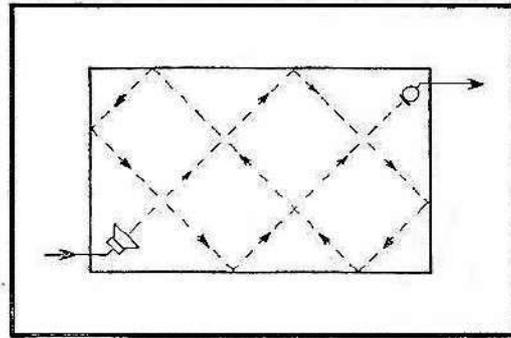
La position respective des deux appareils ainsi qu'un drapage partiel des murs permettent de contrôler le temps de réverbération (fig. 276).

(*) R. VERMEULEN, dans la *Revue technique Philips* (janvier 1956).

3. — Les installations de plein air.

La sonorisation des stades, des terrains de jeux, ou la réalisation de spectacles « son et lumière » doivent évidemment se faire selon des règles différentes de celles utilisées pour la distribution du son dans les locaux fermés.

Fig. 276. — Chambre d'écho. Le temps de réverbération dépend des positions respectives du haut-parleur et du microphone.



La puissance totale nécessaire est beaucoup plus grande et, d'autre part, une grande fidélité de reproduction n'est pas toujours recherchée et est, au surplus, difficile à obtenir.

Par mesure d'économie, lorsqu'il ne s'agit que de diffuser la parole, on atténue volontairement certaines fréquences, ainsi que nous l'avons expliqué dans un autre chapitre.

Le problème principal est d'assurer une répartition du son telle que tout l'espace réservé au public soit couvert, et ce aussi uniformément que possible.

Les haut-parleurs à compression munis de pavillons exponentiels courts ou à sections emboîtées (voir chapitre XII) sont les plus économiques sous le rapport de la puissance à utiliser, en raison de leur rendement élevé. Leur effet directif est souvent indispensable pour lutter contre certains échos. On utilise aussi de plus en plus les colonnes sonores, dont l'effet directif spécial est très avantageux.

Les figures 277 montrent des dispositions courantes pour de grands stades, vélodromes, champs de course, etc.

La distance entre haut-parleurs ne devrait, selon certains spécialistes, pas dépasser 25 mètres, si l'on veut une bonne intelligibilité à toutes les places. La vitesse du son est en effet assez faible pour qu'il y ait un décalage perceptible entre le son venant d'un haut-parleur situé à 150 mètres, par exemple, et un autre placé à 20 mètres de l'auditeur. Or il ne serait pas impossible, s'il avait un effet directif très marqué, que le premier fût perçu presque aussi fort que le second, ce qui produirait une confusion rendant la parole peu compréhensible.

Cet effet ne peut pas toujours être entièrement supprimé, mais il peut être atténué en disposant les haut-parleurs de manière à obtenir une nappe sonore plus ou moins homogène.

Pour cela le son doit être rabattu vers le sol de manière à limiter la portée de chaque haut-parleur à une zone qui n'est pas couverte par les haut-parleurs voisins.

Cette zone n'est évidemment pas nettement définie et, en fait, à certaines places on entendra toujours plusieurs haut-parleurs. Mais il faut éviter qu'on puisse entendre simultanément un haut-parleur très rapproché et un haut-parleur, ou un groupe de haut-parleurs, beaucoup plus éloigné.

4. — Puissance à utiliser.

Il est nécessaire, pour le calcul d'une installation d'amplification, de déterminer la puissance modulée qui devra être fournie aux haut-parleurs.

Elle ne pourrait être basée sur le niveau moyen du son à fournir, car ce qui importe c'est le niveau de crête (éclats de voix, fortissimi de la musique) qui est susceptible d'être atteint, même exceptionnellement, et que l'appareillage doit pouvoir reproduire sans distorsion.

C'est donc la puissance modulée maximum que l'amplificateur est capable de fournir qu'il faut connaître. C'est cette donnée qui sert d'ailleurs toujours à désigner les amplificateurs.

Pour évaluer la puissance nécessaire, on doit tenir compte des facteurs suivants :

A) RENDEMENT DES HAUT-PARLEURS.

C'est le rapport entre la puissance acoustique fournie et la puissance électrique absorbée. Nous avons vu que l'intensité sonore pouvait parfaitement s'exprimer en watts. Le rapport entre les deux quantités peut donc s'écrire en pourcentage.

Celui-ci est très faible et varie entre 2 et 5 % pour les petits haut-parleurs courants du type utilisé dans les récepteurs de radio, 5 à 15 % pour les modèles professionnels, et 15 à 30 % pour les types à compression avec pavillon exponentiel.

Il est difficile d'obtenir plus de précisions à ce sujet, car les fabricants ne publient pas cette indication, somme toute peu flatteuse pour leur amour-propre, et les mesures directes sont extrêmement difficiles à faire. Pour plus de sécurité il vaut toujours mieux considérer le chiffre le plus bas.

Ces chiffres sont d'ailleurs extrêmement trompeurs, car il n'y a pas de rapport direct entre la pression acoustique mesurée au voisinage immédiat de la membrane du haut-parleur et l'impression auditive ressentie à une certaine distance. Il faut en effet tenir compte des conditions d'utilisation (baffle plan, enceinte antirésonnante ou close, ou dispositif directif) et des caractéristiques de l'ambiance, que ce soit une pièce d'habitation, une salle ou le plein air.

Si l'on compare deux haut-parleurs dont le rendement est respectivement de 2 et de 10 %, on constatera que le second donne autant de puissance acoustique avec un amplificateur de 10 watts que le premier avec un amplificateur de 50 watts.

Dans chaque cas il n'y aura cependant qu'un watt transformé en énergie acoustique (*).

B) GENRE DE SON.

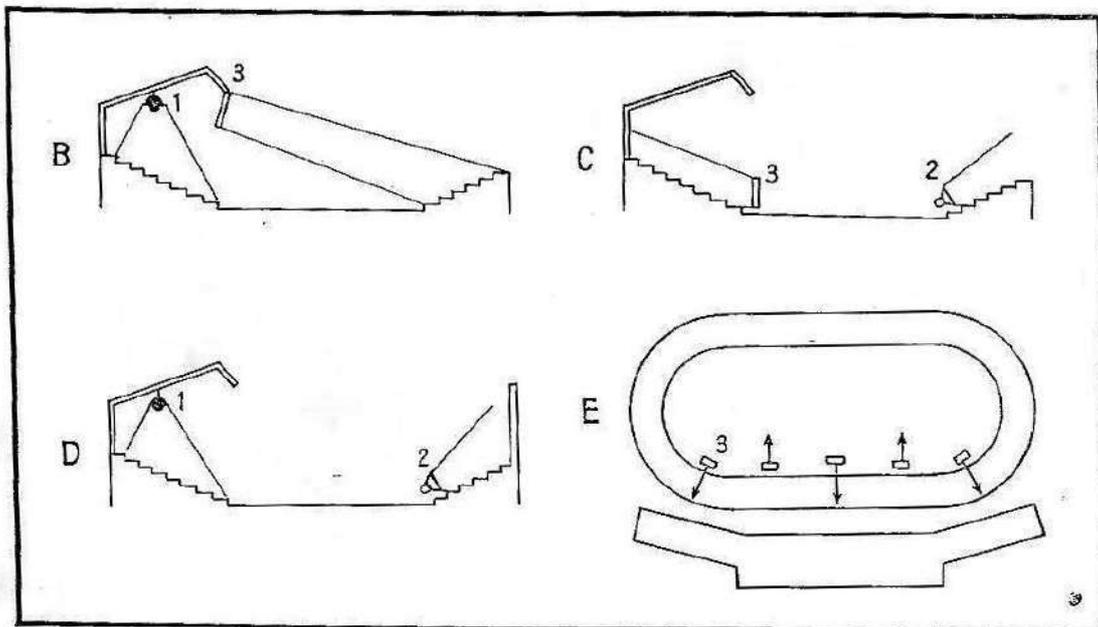
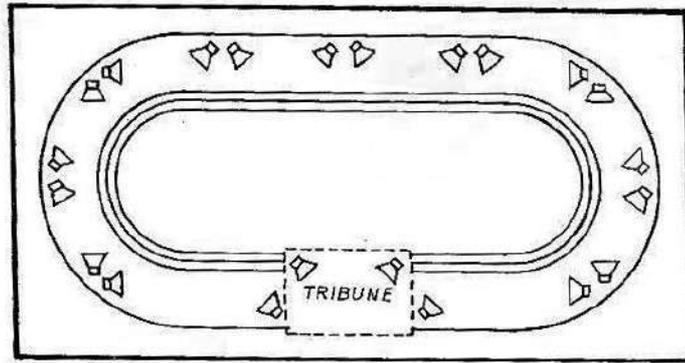
Les conditions changent suivant que l'on veut amplifier la parole seule, la musique, ou les deux. La parole nécessite moins de puissance que la musique, et on peut donc réaliser des économies de matériel quand elle est seule envisagée, comme, par exemple, dans des églises ou des salles de conférence. Mais son intelligibilité exige un meilleur traitement acoustique de la salle.

La musique exige une forte puissance maximum, mais on peut réaliser un certain gain en admettant pour la salle un facteur d'écho plus grand.

Dans les cas où il faut pouvoir reproduire convenablement à la fois la parole et la musique, comme dans les cinémas, la puissance doit être calculée comme s'il s'agissait de musique seule, mais les exigences sont beaucoup plus grandes en ce qui concerne l'acoustique de la salle.

(*) N. H. CROWHURST, dans *Radio and Television News*.

Fig. 277. — Exemples de disposition des haut-parleurs dans un stade, un champ de courses ou un terrain de sport. En a (ci-contre) : emploi de haut-parleurs à pavillon court. — En b (ci-dessous) : combinaison de diffuseurs en cloche (1) et de colonnes sonores (3). — En c, colonnes sonores pour les tribunes (3) et pavillons réentrants (2) pour les gradins extérieurs. — En d, diffuseurs en cloche (1) pour les tribunes et pavillons réentrants (2) pour les gradins extérieurs. — En e, colonnes sonores de grande puissance sur un champ de courses.



Par contre, lorsqu'il ne s'agit que d'obtenir une sorte de décor musical, comme c'est le cas dans les cafés, restaurants ou tea-rooms, il suffit d'une puissance modeste.

C) CARACTERISTIQUES DE LA SALLE.

La puissance à utiliser est d'autant moins grande que la salle a plus de résonance, toutes autres choses restant égales. Cependant, il y a au facteur d'écho des limites qu'il ne faut pas dépasser. Nous en avons donné plus haut les valeurs optima. La puissance est donc surtout fonction du volume de la salle.

D) NATURE DE L'AMBIANCE.

Celle-ci peut être bruyante ou calme. Dans un restaurant, par exemple, le brouhaha confus des conversations et les bruits de vaisselle fournissent un bruit de fond dont le niveau peut atteindre 30 ou 40 phones. Dans un café donnant sur une rue à grande circulation, le niveau peut monter à 60 phones. Il est nécessaire que le niveau moyen de la musique dépasse celui du bruit de 10 à 15 phones au moins.

Il existe de nombreuses formules empiriques pour la détermination de la puissance nécessaire dans une installation. Généralement, les facteurs énumérés plus haut y figurent sous forme d'un nombre qu'on détermine au préalable, ou bien il s'agit de formules adaptées à un cas particulier.

En voici une, très simple, couramment utilisée dans la technique américaine, et que nous avons convertie en unités métriques :

$$\text{Intensité sonore (en watts)} = \frac{\text{volume en m}^3}{3500}$$

Comme il s'agit de watts acoustiques, il faut les multiplier par le rendement du haut-parleur.

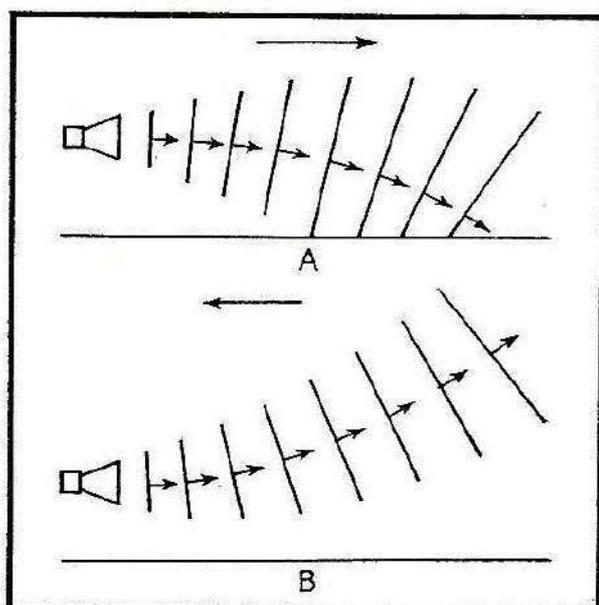


Fig. 278. — Suivant sa direction le vent rabat le son vers le sol ou renvoie vers le haut.

Cette formule ne convient que pour des salles de dimensions moyennes et dont le facteur d'écho ne dépasse pas 1,5 s.

Voici une autre formule simple utilisée par les acousticiens :

$$W = 0,005 \times n \times K$$

n est le nombre de places de la salle; la valeur du facteur K se déduit du tableau ci-dessous :

GENRE DE SON	K
Parole seule dans un local de dimensions moyennes	1 à 2
Musique dans une salle tranquille	2 à 3
Musique dans une salle bruyante (bruit de fond de 50 phones au maximum)	3 à 5

Les chiffres les plus bas sont à employer pour un facteur d'écho normal et des haut-parleurs à grand rendement (10 %), les chiffres les plus hauts pour une salle à faible facteur d'écho avec des haut-parleurs courants de bonne qualité (rendement 5 %).

Les formules suivantes fournissent une estimation plus précise et mieux adaptée aux conditions réelles :

Pour locaux calmes :

$$W = \frac{\text{volume en m}^3}{a \times \text{facteur d'écho} \times \text{rendement des haut-parleurs}}$$

$a = 8$ à 24 , suivant la nature du son.

Pour l'orchestre on prendra 8 , pour le cinéma 12 , et pour la parole seule, 24 .

Pour locaux quelconques :

$$W = \frac{\text{volume en m}^3 \times b}{a \times \text{rendement des haut-parleurs}}$$

$a = 10$ à 50 , suivant la nature du son.

On prendra : pour l'orchestre 10 , pour la musique douce 20 , pour la parole seule 50 .

b est à déterminer suivant le tableau ci-dessous (où $r =$ temps de réverbération) :

GENRE DE SON	NIVEAU DU BRUIT 10 phones			NIVEAU DU BRUIT 50 phones		
	$r < 1$	$r = 1 \text{ à } 1,5$	$r > 1,5$	$r < 1$	$r = 1 \text{ à } 1,5$	$r > 1,5$
Parole	4	2	1	5	3	(x)
Grand orchestre ..	5	3	2	8	5	3
Musique douce ...	6	4	2	9	6	3
Musique de dansc .	10	7	2	15	10	(x)

(x) Conditions défavorables.

Dans les installations de plein air, les conditions acoustiques sont très différentes de celles dont il faut se préoccuper dans les salles.

Le facteur d'écho ne peut plus entrer en considération, car dans une grande plaine il est inexistant, et dans d'autres conditions, il est très long et on ne peut, généralement, le modifier comme on le fait dans une salle.

Par contre, des facteurs nouveaux interviennent.

Nous avons déjà parlé du fait que l'intensité du son diminue comme le carré de la distance. Pour couvrir de grands espaces, il est donc tout à fait illogique de disposer en un certain point un ou deux haut-parleurs très puissants, car, dans ces conditions, les auditeurs rapprochés sont gênés par l'excès de puissance, tandis que ceux qui sont fort éloignés entendent à peine.

INFLUENCE DU VENT.

On se doute bien que la portée du son varie énormément avec la vitesse et la direction du vent. Si celui-ci souffle dans la direction que suit le son, il tend à porter celui-ci plus loin, mais il se produit aussi un autre effet : comme la vitesse du vent est ralentie au voisinage du sol, les ondes sonores subissent une déformation qui les incline vers le bas. Le son est ainsi rabattu sur le terrain et il y a, de ce fait, un gain supplémentaire (fig. 278).

Quand, par contre, le vent souffle dans la direction opposée, non seulement la portée est diminuée, mais encore, par un phénomène inverse, le son subit un effet de rebroussement qui en fait perdre une grande partie dans l'espace.

Un vent latéral emporte évidemment le son vers une destination autre que celle qui était prévue.

Ajoutons qu'au niveau du sol le vent est presque toujours variable, tant en direction qu'en intensité.

Pour ces raisons on doit renoncer, sauf pour des cas spéciaux (carillons électroniques, par exemple), à obtenir une grande portée. Il est préférable de distribuer la puissance disponible entre un nombre approprié de haut-parleurs judicieusement répartis.

La portée maximum sur laquelle on peut compter pour assurer une bonne audition est 150 mètres.

On considère que la réception est mauvaise quand la décroissance du son dépasse 5 phones par 100 mètres.

La puissance à utiliser varie énormément suivant la répartition des haut-parleurs, la présence ou l'absence de bâtiments ou de rideaux d'arbres et selon que l'on diffuse la parole ou la musique.

La formule la plus simple pour calculer la puissance nécessaire, applicable aux grands espaces découverts, est :

$$W = \frac{\text{superficie en m}^2}{20}$$

Pour un rassemblement dense des auditeurs ou une foule compacte, on peut utiliser la formule suivante dans laquelle il est considéré qu'il y a environ trois personnes par m² :

$$W = \frac{\text{nombre d'auditeurs}}{60}$$

Les formules suivantes s'adaptent mieux à des cas particuliers :

$$W = \frac{\text{superficie en m}^2 \times b}{a \times \text{rendement des haut-parleurs}}$$

$a = 20$ pour la musique et 100 pour la parole;

$b = 4$ pour la parole et 10 pour la musique par temps calme; 5 pour la parole et 15 pour la musique par mauvais temps ou ambiance bruyante.

$$W = \frac{\text{nombre d'auditeurs} \times b}{a \times \text{rendement des haut-parleurs}}$$

$a = 60$ pour la musique et 300 pour la parole;

$b = 4$ pour la parole et 10 pour la musique dans une ambiance calme; 5 pour la parole et 15 pour la musique dans une ambiance bruyante.

Pour s'adresser à de grandes masses de plusieurs milliers d'auditeurs, les techniciens spécialisés comptent comme suit :

20 000 personnes = 60 watts

50 000 personnes = 150 watts

100 000 personnes = 300 watts.

Et ainsi de suite, à raison de 3 watts par 1000 auditeurs.

Ces chiffres sont des moyennes entre des indications puisées à diverses sources. Ils conviennent uniquement pour la parole.

Pour diffuser de la musique ils devraient être au moins triplés.

Les diverses formules ci-dessus, empruntées aux techniques employées dans divers pays, permettront au technicien de se tirer d'affaire dans toutes les circonstances.

Il ne faut cependant pas perdre de vue qu'il s'agit de minima destinés à permettre d'obtenir un résultat acceptable avec la moindre dépense. S'il n'est pas prudent de descendre en dessous, il n'y aura jamais d'inconvénient à disposer d'une puissance beaucoup plus grande, quitte à n'en utiliser qu'une partie. Le reste constitue une réserve permettant de faire face à des circonstances imprévues.

LA DISTRIBUTION DU SON

I. — Les lignes de transmission.

Les diverses parties d'une installation d'amplification sont souvent, par nécessité, placées à une certaine distance l'une de l'autre. Elles doivent donc être réunies par des conducteurs plus ou moins longs. Les sources de courant phonique (microphones ou lecteur de disque) se trouvent d'ordinaire à plusieurs mètres de l'amplificateur, et entre celui-ci et les haut-parleurs il peut y avoir des centaines de mètres, voire des kilomètres. Le cas extrême est celui d'une radiodistribution urbaine : la technique devient alors celle de la téléphonie.

Les lignes qui servent à transmettre le signal d'un point à l'autre de l'installation donnent fatalement lieu à des pertes que l'on réduit au minimum en suivant des règles bien établies. Il est essentiel, au surplus, que ces pertes affectent uniformément toutes les fréquences.

Enfin, les lignes sont des portes par où peuvent entrer des perturbations, ce qui nécessite des précautions supplémentaires.

Une ligne présente une certaine résistance ohmique et une certaine self-induction.

On doit en outre tenir compte de la capacité entre les conducteurs ou entre ceux-ci et la masse. Il pourrait, enfin, y avoir des pertes par suite d'un isolement insuffisant.

On peut représenter une ligne de transmission par le schéma de la figure 279 où R est la résistance ohmique, L la self-induction, C la capacité entre conducteurs et r la perte à travers l'isolement.

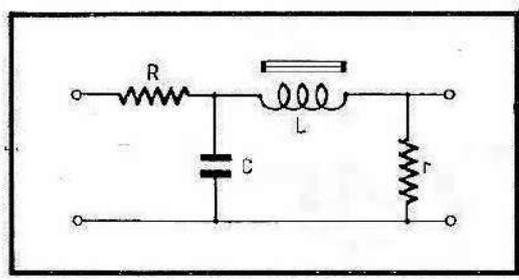


Fig. 279. — Représentation théorique d'une ligne de transmission. R : résistance ohmique. — L : self-induction. — C : capacité répartie. — r : pertes dans l'isolement.

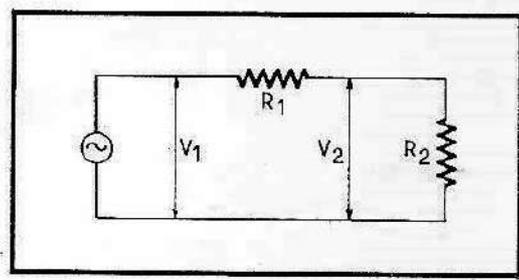


Fig. 280. — L'impédance de la ligne forme avec celle de l'appareil à alimenter un diviseur de tension.

Cet ensemble forme un filtre passe-bas et il en résulte que les pertes principales augmentent avec la fréquence.

Le facteur L peut être tenu pour négligeable dans le cas de la B. F., sauf sur de très grandes longueurs, et les pertes par défaut d'isolement représentées par r peuvent être réduites à peu de chose par l'emploi d'isolants de bonne qualité.

Représentons par R_1 (fig. 280) la résistance ohmique de la ligne et par R_2 l'impédance d'entrée de l'appareil que cette ligne alimente.

R_1 et R_2 forment un diviseur de tension, et il est évident que la tension U_2 sera plus petite que U_1 . Cependant, la chute de tension en ligne peut devenir négligeable à condition que R_2 soit grand par rapport à R_1 .

Considérons maintenant l'influence de C (fig. 279). Cette capacité est en parallèle avec R_2 . Pour une fréquence donnée, la fraction du signal qui y passera sera d'autant plus grande que son impédance est plus faible par rapport à R_2 , et cela conduit à donner à R_2 une valeur très faible. De toute évidence, il faut que la constante de temps de l'ensemble CR_2 soit telle que les plus hautes fréquences à transmettre n'en soient pas affectées.

Supposons que l'impédance de charge d'un étage de sortie soit de 5000Ω (fig. 281). Nous pourrions relier directement les anodes à un haut-parleur présentant, à travers le transformateur T , une impédance de 5000Ω . La bobine à prise médiane n'est là que pour éviter la nécessité d'un troisième fil, et son impédance, volontairement très élevée, peut être considérée comme ayant un effet négligeable sur l'impédance de charge. Nous aurions donc $R_2 = 5000 \Omega$, et comme la résistance de la ligne ne dépasse jamais quelques ohms, son effet serait nul.

Cependant, si nous utilisons pour cette liaison un câble isolé au caoutchouc d'une centaine de mètres de longueur, C pourrait atteindre $10\,000 \text{ pF}$. Or, à 4000 Hz , la réactance d'une capacité de cette valeur est 4000Ω . Il en résulte qu'à cette fréquence l'impédance totale ne serait que :

$$\frac{5000 \times 4000}{5000 + 4000} = 2200 \Omega \text{ environ}$$

soit moins de la moitié de ce qu'elle devrait être. Et cette situation irait en s'aggravant à mesure que la fréquence augmente, ce qui produirait une altération inadmissible de la courbe de réponse.

Cette solution ne pourrait donc être envisagée que pour des distances très courtes. Ajoutons que si la puissance de l'amplificateur était de 30 W , la tension alternative pourrait atteindre 400 V , ce qui poserait un problème d'isolement.

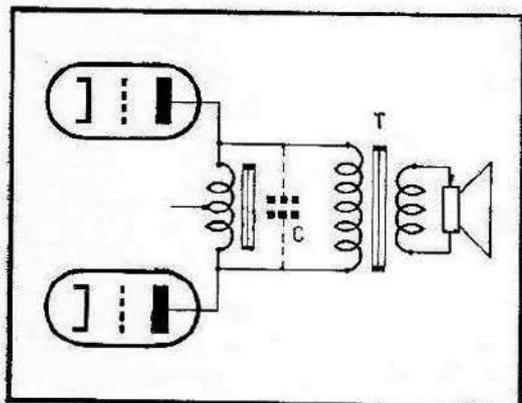


Fig. 281. — Sur une ligne à haute impédance la capacité est la principale cause de pertes.

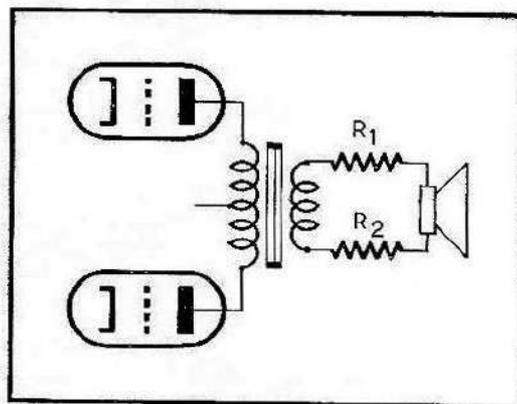
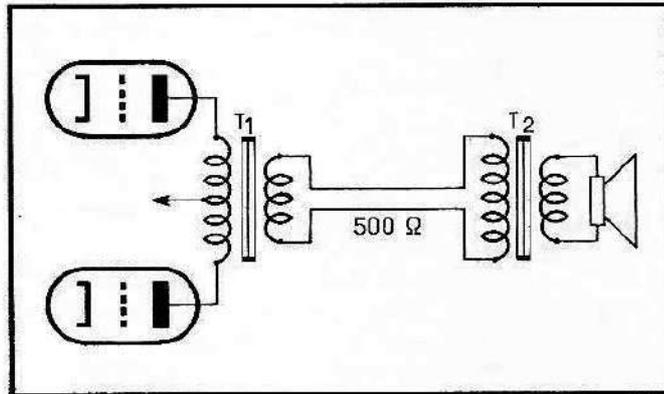


Fig. 282. — Sur une ligne à très faible impédance, la résistance ohmique est cause d'un affaiblissement inadmissible.

Plaçons, au contraire, le transformateur T dans l'amplificateur et relierons directement la bobine mobile du haut-parleur au secondaire (fig. 282). Admettons que l'impédance de la bobine soit 5Ω , ce qui est une valeur courante, et que la ligne soit réalisée en fil de cuivre de 1 mm de diamètre : si sa longueur est de 50 m, sa résistance ($R_1 + R_2$) sera de 2Ω environ. Nous aurons dans ce cas une chute de tension en ligne égale à $1/3$ environ de la tension disponible. Si la puissance fournie par l'étage final est 10 W, 2,8 W environ seront dissipés en pure perte dans les fils.

Comme l'impédance de la bobine mobile n'est pas constante et qu'elle diminue en même temps que la fréquence, la perte sera encore plus grande pour les notes graves.

Fig. 283. — Pour limiter les pertes on choisit une impédance de valeur moyenne.



Il existe des haut-parleurs dont l'impédance est plus faible que 5Ω . On peut aussi devoir relier plusieurs bobines mobiles en parallèle, on serait obligé alors, pour limiter les pertes, d'utiliser des fils d'une section énorme.

Cette solution non plus n'est pas utilisable, sauf pour des distances ne dépassant pas quelques mètres.

La solution pratique se trouve entre ces cas extrêmes : on abaisse l'impédance au départ de l'amplificateur et, au moyen d'un deuxième transformateur, placé à proximité immédiate du haut-parleur, on abaisse de nouveau l'impédance jusqu'à la valeur de la bobine mobile.

L'impédance intermédiaire, qui est celle de la ligne, a généralement une valeur comprise entre 200 et 1000Ω (fig. 283).

Ouvrons ici une parenthèse. Toute ligne de transmission possède une *impédance caractéristique* qui dépend de la valeur relative des facteurs self-induction, capacité, résistance ohmique et pertes dans l'isolement par *unité de longueur*.

Lorsqu'on peut tenir pour négligeables la résistance ohmique et les pertes, on peut l'exprimer par la formule :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ ohms}$$

Si le câble aboutit à un appareil dont l'impédance d'entrée est égale à son impédance caractéristique, on constate que le câble conserve la *même impédance* sur toute sa longueur. C'est-à-dire que celle que « voit » l'appareil branché à l'autre bout est la même que si le câble n'existait pas et que si les deux appareils se trouvaient reliés directement l'un à l'autre. Toutefois, la *tension du signal diminue* progressivement le long de la ligne, en raison de sa résistance ohmique et des pertes.

Cette question n'a cependant vraiment d'importance que lorsqu'il s'agit d'une transmission à très grande distance, comme, par exemple, entre les

studios de radiodiffusion et l'émetteur ou la radiodistribution et, bien entendu, le téléphone.

Quand les lignes servent à relier les parties de l'installation situées avant l'amplificateur principal, la résistance ohmique est moins nuisible, car l'intensité est très faible et la chute de tension négligeable. Mais un autre

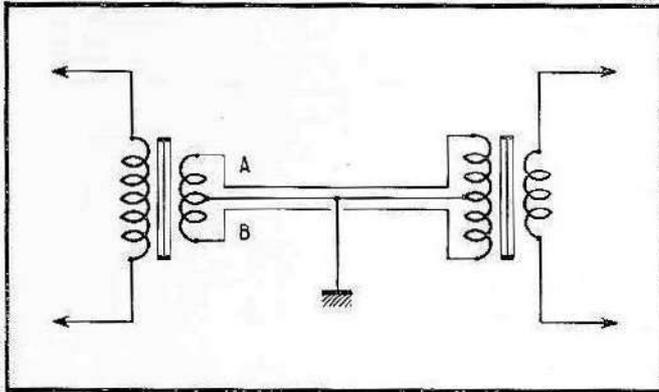


Fig. 284. — Ligne équilibrée.

point devient prépondérant : il faut que la ligne ne capte pas de parasites provenant du secteur ou des appareils électriques fonctionnant à proximité de l'installation.

La ligne peut être influencée électrostatiquement ou électromagnétiquement, c'est-à-dire par capacité ou par induction. Dans l'un comme dans l'autre cas, la tension de perturbation sera proportionnelle à l'impédance de la ligne et elle sera d'autant plus gênante que le signal à transmettre est plus faible.

On combat l'influence électrostatique en entourant la ligne d'un blindage mis à la masse. Cette protection est sans effet sur les perturbations induites. Celles-ci peuvent être réduites en torsadant les fils pour que chacun soit influencé de la même manière par les champs perturbateurs. Un procédé plus efficace consiste à munir les transformateurs d'une prise médiane du côté ligne. Ces prises sont reliées entre elles par un fil mis à la masse ou individuellement mises à la terre (fig. 284). Comme les courants perturbateurs agissent de la même manière sur A et sur B, les parasites qui sont induits dans ces fils sont en phase par rapport à la masse et s'annulent réciproquement dans les transformateurs.

Tenant compte de ce qui précède, voici quelques données pratiques :

La capacité entre les fils d'un câble de transmission doit être telle que sa réactance ($1/\omega C$) soit au moins égale à cinq fois l'impédance de la ligne à la plus haute fréquence que l'on veut transmettre. On se basera par prudence sur 10 000 Hz.

Pour les lignes alimentant des haut-parleurs, on utilise généralement, dans les installations temporaires, du fil double sous caoutchouc ou isolant synthétique.

La capacité entre fils du câble sous caoutchouc varie entre 50 et 100 pF par mètre.

Pour les installations fixes, on peut utiliser du fil sous tube ou sous plomb et d'une manière générale réaliser la ligne comme s'il s'agissait d'une installation d'éclairage.

Pour obtenir un rapport favorable entre tension de signal et tension perturbatrice, il est recommandé de placer le préamplificateur le plus près possible du microphone et de réserver la plus grande longueur de câble pour une partie de l'installation où le signal atteint déjà un niveau de l'ordre du dixième de volt.

Lorsque la distance est courte et le signal relativement faible — ce qui est le cas pour la liaison entre diverses parties d'une installation, par exemple d'un amplificateur à l'amplificateur principal, — on peut se passer d'un transformateur d'adaptation. On obtient une impédance de sortie relativement basse en prélevant le signal à la cathode d'un tube.

Le montage de la figure 285 équivaut à un transformateur abaisseur. Le gain du tube doit être considéré comme pratiquement nul.

On aura noté que cette disposition se retrouve dans divers schémas donnés dans la deuxième partie.

La transmission du son à grandes distances implique forcément l'emploi de câbles coaxiaux spécialement étudiés pour les fréquences acoustiques.

C'est le cas notamment pour la liaison entre les studios de radiodiffusion et les émetteurs, situés parfois à de nombreux kilomètres de distance.

En pratique, on adopte généralement une impédance de 150 ou 200 Ω pour les circuits peu amplifiés, 200 à 300 Ω pour les lignes allant du pré-amplificateur ou autres parties de l'installation à l'amplificateur principal, et enfin 500 à 1000 Ω pour la transmission du courant B. F. vers les haut-parleurs.

Mais ne perdons pas de vue que, dans ces dernières lignes, il passe parfois une intensité de plusieurs ampères. En conséquence on s'arrangera pour que la résistance ohmique totale de la ligne reste inférieure à 5 % de l'impédance d'adaptation. Si celle-ci est, par exemple, de 600 Ω , la résistance ohmique de la ligne ne peut dépasser 30 Ω .

La section du fil à utiliser s'obtient au moyen de la formule :

$$S \text{ (en mm}^2\text{)} = \frac{l}{57 \times R}$$

l est la longueur totale en mètres (aller et retour), R est la résistance en ohms.

Dans l'exemple ci-dessus, si la longueur de chaque fil était de 500 m, nous aurions :

$$\frac{1000}{57 \times 30} = 0,58 \text{ mm}^2$$

soit un diamètre de 0,85 mm environ. On utilisera donc sans inconvénient du fil de 1 mm, qui est une dimension courante.

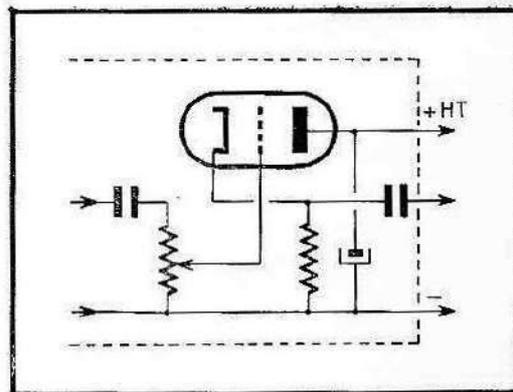


Fig. 285. -- Le montage cathodyne équivaut à un transformateur abaisseur d'impédance.

Nous savons que l'impédance de charge présentée à l'anode des tubes de sortie doit avoir une valeur déterminée dont il faut s'éloigner le moins possible. Cependant, l'impédance d'un haut-parleur électrodynamique normal tend à augmenter avec la fréquence. Il est donc nécessaire, quand on parle de l'impédance des lignes et des transformateurs d'adaptation, de spécifier la fréquence à laquelle cette valeur correspond. Généralement il est convenu qu'elle est de 1000 Hz (800 Hz dans certains pays).

De part et d'autre de cette fréquence d'adaptation, les valeurs ne sont plus rigoureusement exactes, mais les écarts ne sont pas suffisants pour nous préoccuper.

2. — Les transformateurs de ligne.

Nous venons de voir que les lignes reliant les diverses parties d'une installation devaient avoir une impédance relativement basse, comprise ordinairement entre 200 et 1000 ohms, parce que c'est le meilleur compromis entre les diverses causes de pertes.

Ces valeurs correspondent rarement à l'impédance de sortie ou d'entrée des appareils à réunir, de sorte que des transformateurs sont nécessaires pour les y adapter.

Un transformateur de ligne ne diffère pas essentiellement d'un transformateur de sortie. Il se compose en principe de deux enroulements dont l'un forme le primaire et l'autre le secondaire. Ces fonctions peuvent d'ailleurs être inversées.

Quand les deux circuits ne doivent pas être obligatoirement isolés l'un de l'autre on peut avantageusement utiliser un autotransformateur qui ne comprend qu'un seul enroulement muni d'un certain nombre de prises. Celui-ci est plus économique qu'un transformateur et son rendement est meilleur (fig. 286).

L'impédance qu'on peut mesurer aux bornes d'un des enroulements dépend de la résistance placée aux bornes de l'autre, multipliée ou divisée par le carré du rapport du nombre de tours.

On a :

$$Z_2 = Z_1 \cdot T^2 \text{ ou } \frac{Z_1}{T^2}$$

suivant que le nombre de tours d'un des enroulements est plus grand ou plus petit que celui de l'autre.

D'autre part, le rapport entre le nombre de tours est donné par la formule :

$$T = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$$

Le nombre de tours lui-même dépend des caractéristiques du circuit magnétique.

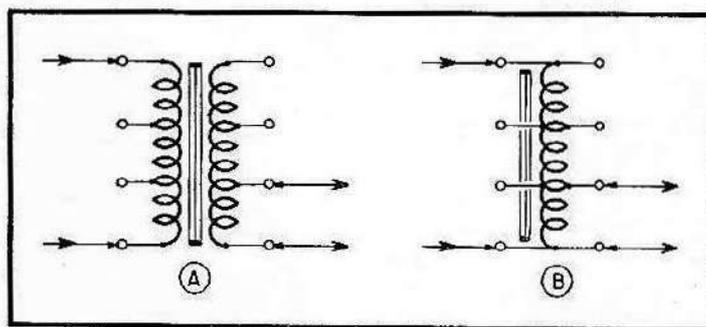


Fig. 286. — En A, l'adaptation des impédances au moyen d'un transformateur à prises. — en B, un autotransformateur est plus économique quand les circuits ne doivent pas être séparés l'un de l'autre.

Les mêmes formules s'appliquent à l'autotransformateur. Le rapport des impédances dépend du rapport entre le nombre de spires du circuit d'entrée et celui qui est inclus dans le circuit de sortie.

Un transformateur servant aux fréquences acoustiques doit conserver un rendement convenable sur une grande étendue de fréquences, et par conséquent sa self-induction doit être telle que l'impédance reste correcte à la fréquence la plus basse à transmettre.

Les transformateurs de ligne doivent être calculés suivant la puissance maximum à distribuer.

Leur capacité, sous ce rapport, dépend, comme pour les autres transformateurs, de la section du noyau.

Rappelons que, pour des tôles de *très bonne qualité*, on peut la déterminer empiriquement par la formule donnée au chapitre XIII.

Il n'y a aucun inconvénient à utiliser un transformateur plus gros qu'il n'est nécessaire, tandis qu'un modèle trop petit occasionnerait une perte de

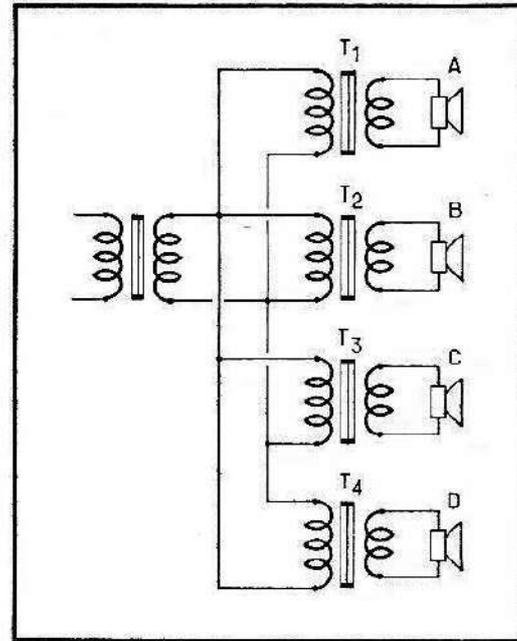


Fig. 287. — Couplage en parallèle de quatre haut-parleurs.

rendement et probablement de la distorsion par saturation partielle du noyau.

D'autre part, une impédance un peu trop élevée est moins nuisible qu'une impédance insuffisante.

3. — Adaptation des impédances.

Dans une installation de sonorisation, l'étage de sortie doit presque toujours « nourrir » un certain nombre de haut-parleurs et on demande souvent à quelques-uns de ceux-ci de fournir une puissance différente des autres. L'impédance totale formée par l'ensemble des haut-parleurs doit être ramenée à l'impédance de sortie de l'amplificateur. La figure 287 montre un montage très courant. L'impédance du secondaire du transformateur de sortie est de 500 Ω . Si l'on désire que les quatre haut-parleurs fonctionnent à la même puissance, les primaires des transformateurs T_1 , T_2 , T_3 et T_4 devront avoir une valeur telle que $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4 = 2000 \Omega$.

Ce que l'on peut vérifier à l'aide de la formule :

$$\frac{1}{Z_{\text{tot}}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4} = \frac{4}{2000} = \frac{1}{500}$$

D'autre part, si l'on a trois haut-parleurs munis de transformateurs dont les primaires sont respectivement de 400, 600 et 1000 Ω , on ne pourra plus brancher ceux-ci en parallèle sur la sortie de l'amplificateur, car l'impédance totale serait à peine de 300 Ω . On doit donc les relier suivant la figure 288.

B et C sont branchés en série et A est en parallèle sur eux. Cela donnera exactement 500 Ω , mais les haut-parleurs ne recevront pas le même nombre de watts : A recevra 50 %, B 30 % et C 20 % de la puissance totale.

Les cas de ce genre les plus compliqués peuvent être facilement calculés au moyen d'une méthode indirecte : on part de la puissance maximum donnée par l'amplificateur et, au moyen de la formule :

$$V = \sqrt{WZ}$$

on trouve la tension aux bornes de l'impédance de sortie (c'est-à-dire le secondaire du transformateur).

Pour trouver l'impédance de chaque haut-parleur, on se sert de la formule :

$$Z = \frac{V^2}{W}$$

où W est la puissance que ce haut-parleur doit recevoir.

Il va de soi que tous les haut-parleurs montés en parallèle reçoivent la même tension. Si un certain nombre sont en série, on les considère comme un tout et on partage ensuite entre eux l'impédance suivant une règle de trois.

Exemple. — Quatre haut-parleurs sont alimentés par un amplificateur fournissant 25 W; A et B reçoivent chacun 10 watts, C reçoit 4 watts et D le reste, soit 1 watt. C'est le cas qui se présente lorsque le son doit être distribué dans des locaux de grandeur différente.

Nous aurons :

$$V = \sqrt{25 \times 500} = 115 \text{ V}$$

Pour que A et B reçoivent chacun 10 watts, leur impédance doit être :

$$Z = \frac{V^2}{W} = \frac{115 \times 115}{10} = 1322 \Omega$$

Pour C on trouve :

$$Z = \frac{115 \times 115}{4} = 3306 \Omega$$

et pour D :

$$Z = 13\,225 \Omega$$

Dans la pratique, on peut largement arrondir les chiffres ainsi obtenus et, tenant compte de ce qu'il vaut mieux un léger excès d'impédance qu'une impédance insuffisante, nous prendrons :

$$\begin{array}{l} \text{A et B} = 1500 \Omega \\ \text{C} = 3500 \Omega \\ \text{D} = 15\,000 \Omega \end{array}$$

La combinaison de ces impédances donne 550 Ω , ce qui est tout à fait admissible.

Le même raisonnement permettrait de trouver que 14 haut-parleurs de 7000 Ω peuvent être montés en parallèle sur une ligne de 500 Ω . En leur distribuant 15 watts et en tenant compte des pertes, chaque haut-parleur recevrait environ 1 watt, ce qui réalise les conditions voulues pour une distribution de son dans un grand magasin, un hôtel, etc.

Pour simplifier encore les calculs, on détermine le *facteur d'adaptation* de l'amplificateur, qui est simplement sa puissance multipliée par l'impédance de sortie.

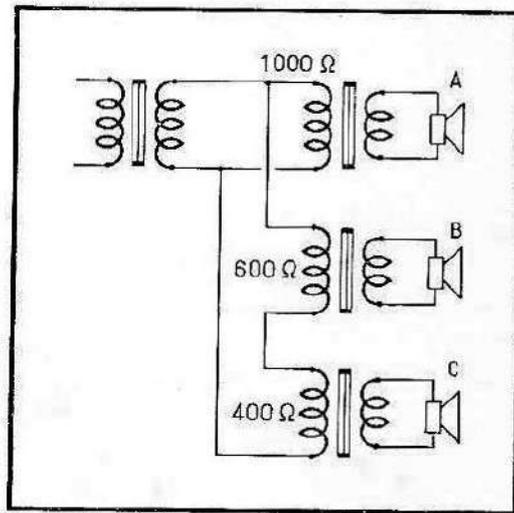
Un amplificateur de 20 watts dont l'impédance de sortie est 500Ω a un facteur d'adaptation de $20 \times 500 = 10\,000$; un amplificateur de 15 watts dont l'impédance de sortie est 1000Ω a un facteur d'adaptation de $15 \times 1000 = 15\,000$.

Pour trouver l'impédance des haut-parleurs à utiliser, il suffit de diviser ce nombre par la puissance que chaque haut-parleur doit absorber.

Soit, par exemple, cinq haut-parleurs à 2 W plus deux haut-parleurs à 5 W, soit au total 20 W, facteur d'adaptation 10 000.

$$\begin{aligned} 10\,000 : 2 &= 5000 \Omega \\ 10\,000 : 5 &= 2000 \Omega \end{aligned}$$

Fig. 288. — Trois haut-parleurs branchés sur une ligne de 500Ω .



Nous aurons donc cinq haut-parleurs de 5000Ω et deux haut-parleurs de 2000Ω . Le tout monté en parallèle aura une impédance globale de 500Ω et l'adaptation sera parfaite.

Les amplificateurs professionnels ont généralement une série de prises sur le transformateur de sortie : outre celles correspondant aux impédances habituelles des haut-parleurs, soit par exemple 5, 7 et 15Ω , on dispose, par exemple, d'une sortie de 1000Ω avec une prise à 500Ω et une prise à 250Ω .

Il existe des transformateurs d'adaptation qu'on peut intercaler dans la ligne et qui ont une série de prises tant au primaire qu'au secondaire. On peut ainsi élever ou abaisser l'impédance suivant les besoins.

Toutes sortes de combinaisons sont possibles, à condition de toujours présenter à l'amplificateur une impédance totale de la valeur voulue.

La relation entre le rapport des impédances et le rapport du nombre de tours ou rapport de transformation est donné par la formule :

$$T = \frac{n^2}{n'^2} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$$

Supposons que la ligne venant de l'amplificateur ait une impédance de 600Ω et que le groupe de haut-parleurs qu'il s'agit d'alimenter présente une

impédance de 200 Ω . Nous intercalerons dans la ligne un transformateur abaisseur dont le rapport sera :

$$T = \sqrt{\frac{600}{200}} = \sqrt{3} = 1,7$$

Pour concrétiser ce qui précède, nous donnons figure 289 le schéma d'une installation complète dans laquelle nous avons fait figurer à peu près tous les cas pouvant se rencontrer dans la pratique et telle qu'elle serait réalisée dans une grande foire ou une exposition.

Les microphones M_1 et M_2 se trouvent, chacun avec son préamplificateur, assez loin de l'installation centrale; par exemple, l'un dans une salle de concert et l'autre dans un kiosque d'où l'on désire retransmettre la musique. Le microphone M_3 sert à faire des annonces occasionnelles.

Le pointillé délimite la cabine de contrôle dans laquelle nous trouvons un pupitre de commande comprenant un mélangeur électronique B et un dispositif de réglage de tonalité. Les lecteurs de disques P_1 et P_2 sont reliés directement au mélangeur, la faible distance à laquelle ils sont placés n'entraînant aucune difficulté. Il en est de même du « tuner » de radio R et du magnétophone qui comprend ses propres amplificateurs d'enregistrement et de reproduction.

Un haut-parleur de contrôle E (moniteur) est relié à la sortie de l'amplificateur C. Celui-ci se trouve assez loin du mélangeur et y est, par conséquent, relié par une ligne de transmission.

L'amplificateur principal en classe A module deux étages de sortie classe B, D_1 et D_2 , de 100 et 50 watts respectivement. Ces derniers sont reliés à un réseau de distribution comprenant un certain nombre de haut-parleurs. D_1 alimente 30 haut-parleurs répartis en trois groupes de 10. De son côté, D_2 alimente 10 haut-parleurs répartis en trois groupes, dont deux de 3 et un de 4.

Voyons maintenant comment vont se répartir les impédances des différentes lignes et les transformateurs à utiliser : T_1 est réuni à T_4 et T_2 à T_5 par des lignes simples de 200 Ω soigneusement blindées. La ligne réunissant T_3 et T_6 est particulièrement longue, c'est pourquoi on utilise des transformateurs équilibrés à prise médiane. La ligne comprend un fil neutre mis à la terre.

T_7 est relié à T_9 par une ligne de 500 Ω rendue nécessaire par le fait que les amplificateurs de puissance se trouvent dans un local distinct de la cabine. L'amplificateur C se termine par un transformateur push-pull T_{10} dont le secondaire a 250 Ω pour s'adapter aux transformateurs T_{11} et T_{12} qui sont branchés en parallèle. Cet amplificateur fournit 15 watts qui sont uniformément répartis entre les deux étages de puissance.

Le haut-parleur de contrôle E ne demande qu'une faible puissance : il est alimenté par un transformateur de 3000 Ω . Cette valeur étant très grande par rapport à 250 Ω , l'impédance de la ligne n'en est pas sensiblement affectée. Ce haut-parleur reçoit environ 1 W. Il est muni d'un atténuateur.

L'étage de sortie D_1 fournit 100 W dans le transformateur T_{13} . Cette puissance est distribuée dans trois lignes dont une peut être mise hors circuit.

Chaque ligne alimente 10 haut-parleurs et présente une impédance de 1000 Ω . Lorsque les trois sont branchées en parallèle, l'impédance totale est de 333 Ω et une prise sur le secondaire correspondant à cette valeur est mise en circuit. Dans le cas où deux lignes seulement sont en fonction, l'impédance totale est de 500 Ω , et la totalité du secondaire est utilisée. De cette manière, l'adaptation reste correcte.

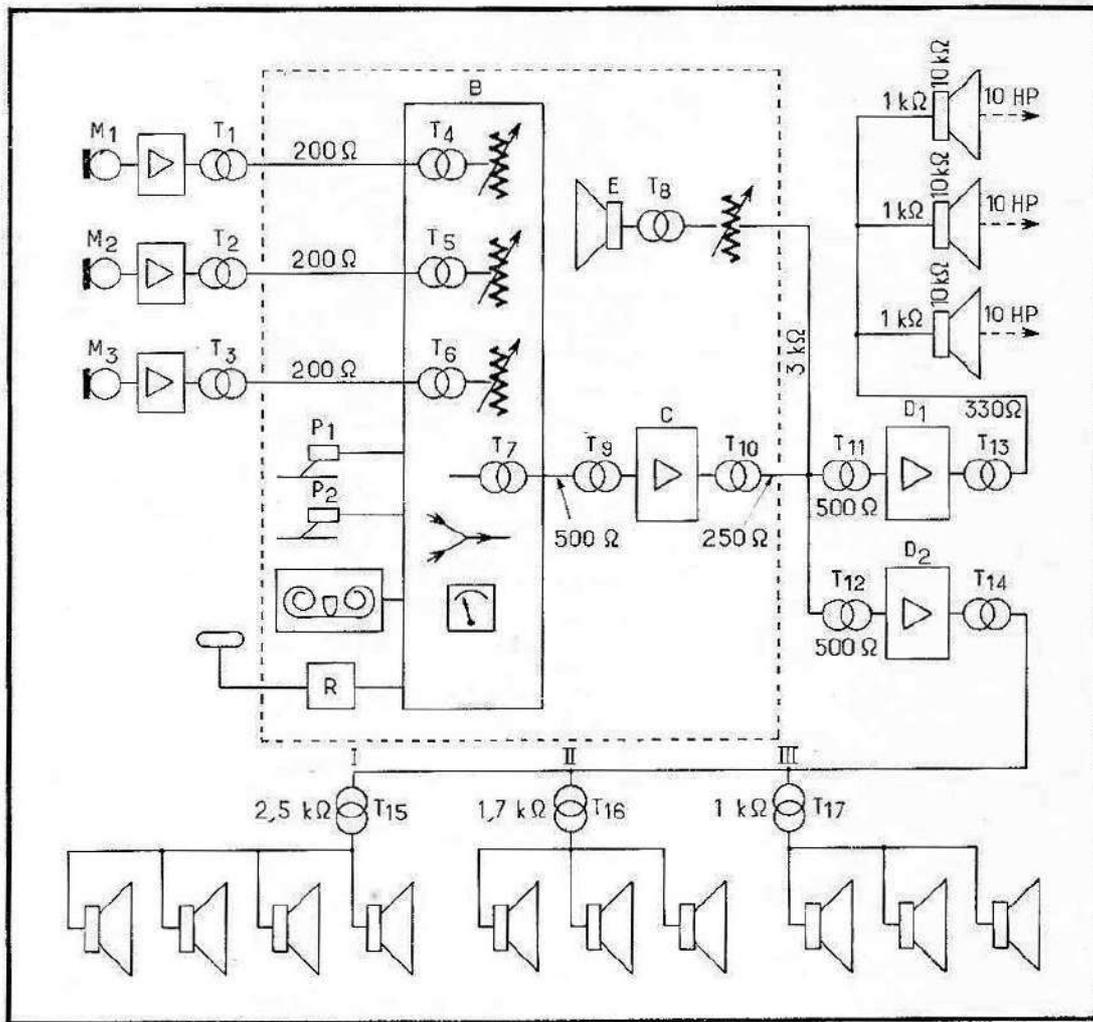


Fig. 289. — Installation importante dans une exposition ou une foire commerciale.

Les haut-parleurs ont $10\,000\ \Omega$ et ils reçoivent chacun $5\ \text{W}$ lorsque deux lignes sont utilisées, et $3,3\ \text{W}$ quand tous les haut-parleurs fonctionnent.

L'amplificateur D_2 fournit $50\ \text{W}$ seulement, mais n'alimente que 10 haut-parleurs. Ceux-ci sont répartis en trois groupes comportant un transformateur commun. Cette disposition est permise parce que les haut-parleurs de chaque groupe sont suffisamment rapprochés pour que la résistance de la ligne les réunissant soit négligeable par rapport à celle de la bobine mobile. Ce cas ne se présente que pour un groupe de haut-parleurs se trouvant dans une même salle. Les haut-parleurs ont tous une bobine mobile de $10\ \Omega$ (valeur choisie pour faciliter les calculs).

Ces haut-parleurs doivent fournir des puissances différentes en rapport avec la grandeur des locaux. Ceux du groupe I doivent recevoir chacun $3\ \text{W}$, sauf un seul qui ne doit recevoir que $1\ \text{W}$. Ceux du groupe II reçoivent $5\ \text{W}$ et ceux du groupe III, $8\ \text{W}$. Les groupes recevront donc respectivement 10 , 15 et $25\ \text{W}$.

L'impédance de sortie est de $500\ \Omega$. La distribution des impédances sera la suivante : groupe I : $2500\ \Omega$; groupe II : $1700\ \Omega$; et groupe III : $1000\ \Omega$, chiffres arrondis.

Dans le premier groupe, un des haut-parleurs est branché sur une prise au secondaire, de manière qu'il ne reçoive qu'un tiers du signal.

On admet, dans tous ces calculs, que les transformateurs sont parfaits et qu'il n'y a aucune perte en ligne, ce qui n'est évidemment pas exact. Même si les transformateurs sont correctement dimensionnés, leur rendement dépasse rarement 90 %. Il peut même tomber à 50 % dans un modèle de mauvaise qualité ou trop petit. En choisissant un amplificateur, il faut donc prévoir une réserve de puissance pour compenser les pertes.

Dans une installation comportant un certain nombre de haut-parleurs, il est souvent désirable de pouvoir régler la puissance individuelle de ceux-ci, voire même d'en mettre un ou plusieurs hors circuit, et que ces opérations soient possibles en cours de fonctionnement avec un minimum de variation de l'impédance totale.

La suppression d'un ou plusieurs haut-parleurs peut se faire en y substituant une résistance équivalente. Un réglage progressif s'obtient au moyen d'un atténuateur à impédance constante, dont le modèle en L est le plus simple (voir chapitre XIV/7).

Il va de soi que la puissance totale fournie par l'amplificateur est toujours absorbée par le système : ce qui n'est pas utilisé dans les haut-parleurs est dissipé en pure perte dans les résistances.

On pourrait aussi utiliser un autotransformateur à prises multiples, mais, dans ce cas, l'impédance présentée à la ligne change avec le réglage et modifie l'impédance totale. Il en résulte que lorsqu'on diminue le son d'un des haut-parleurs, les autres reçoivent un supplément de puissance.

Cet inconvénient n'est pas grave s'il ne s'agit de régler qu'un ou deux haut-parleurs dans une installation qui en comprend un grand nombre.

Dans le cas de la radiodistribution ou de haut-parleurs placés dans des chambres d'hôtel, l'emploi d'atténuateurs est indispensable. On réserve généralement l'autre système à des ajustements d'ensemble à faire en dehors des heures de fonctionnement.

4. — Distribution de son dans de grands immeubles.

Dans cette catégorie entrent, par exemple, hôtels, hôpitaux, grands magasins, écoles. On peut aussi y faire entrer les paquebots.

Ces installations se distinguent par un très grand nombre de haut-parleurs fonctionnant tous à puissance modérée. Dans les hôpitaux, on utilise aussi des casques.

Dans certaines installations on rend possible, en chaque endroit, le choix entre plusieurs programmes.

L'installation comprend toujours une « centrale » dans laquelle sont réunis les amplificateurs, dispositifs d'alimentation, de contrôle, et les sources de signaux B. F. On y trouve éventuellement un microphone pour permettre de faire certaines communications. De la centrale partent des lignes vers les haut-parleurs.

Voici, à titre d'exemple, la description d'une installation dans un grand hôtel (fig. 290). Celle-ci permet :

a) de fournir dans chaque appartement ou chambre deux programmes pouvant être pris au choix;

b) de fournir le son dans quatre locaux à usage commun : restaurant, café, bar et salon.

Les programmes peuvent être obtenus à partir d'émissions de radio, de disques, d'enregistrements sur magnétophone ou de musique fournie par l'orchestre de l'hôtel et captée, suivant l'heure, soit dans le restaurant, soit dans le café.

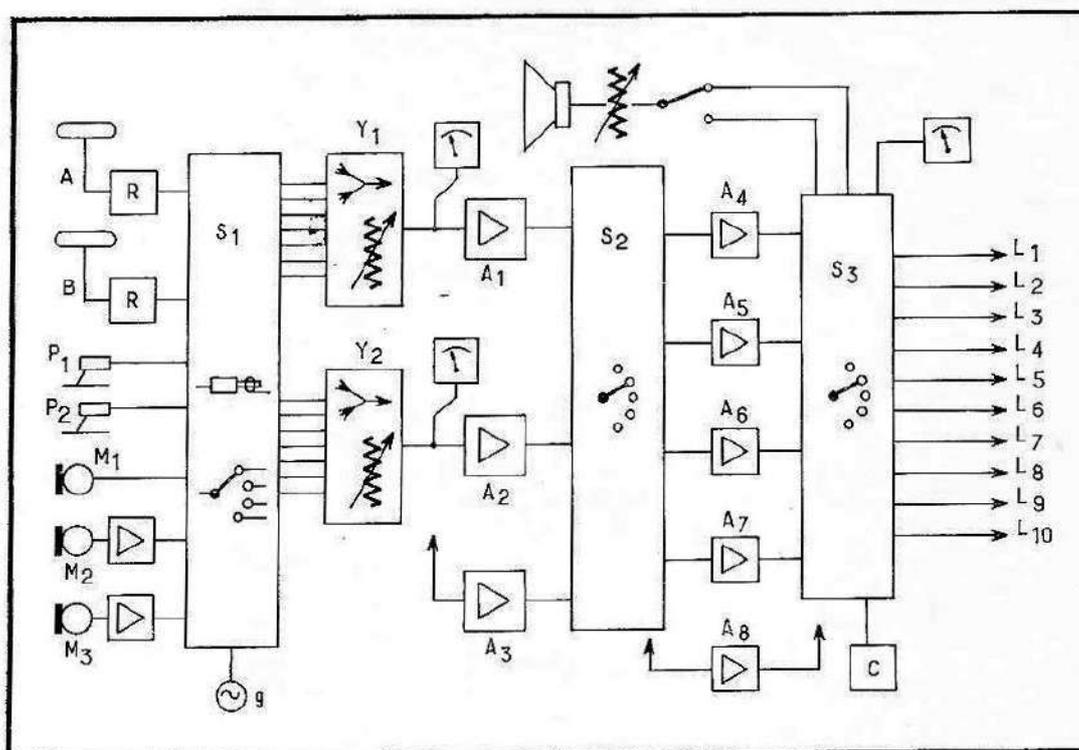


Fig. 290. — Distribution de son dans un grand hôtel ou un complexe d'immeubles.

A et B sont deux récepteurs de radio (tuners), P₁ et P₂ sont des lecteurs de disques montés sur platines professionnelles. M₁ est un microphone piézo-électrique permettant à la direction de faire des annonces diverses. M₂ et M₃ sont des microphones électrostatiques de haute qualité, placés respectivement dans le restaurant et le café, à proximité de l'orchestre. Ils sont accompagnés de leur préamplificateur à transistors.

Tous ces appareils sont réunis, dans la centrale, à un tableau de répartition S₁ permettant de les connecter à l'un ou l'autre des deux mélangeurs électroniques Y₁ et Y₂. Il y a un mélangeur par programme et chaque mélangeur possède sept entrées. Le tableau comporte des fiches ou « jacks », comme ceux utilisés dans la technique du téléphone. Chaque mélangeur est suivi d'un préamplificateur (A₁ et A₂). A₃ est un amplificateur de réserve du même type, pouvant instantanément être branché à la place de A₁ ou A₂ en cas de panne. Ces préamplificateurs sont réunis à un second tableau de distribution S₂, permettant de les brancher sur des amplificateurs de puissance A₄, A₅, A₆, A₇ et A₈. Ce dernier est tenu en réserve pour parer à une panne éventuelle d'un des autres.

Chacun fournit une puissance de 50 W; il y a donc 200 W disponibles en fonctionnement normal.

Un troisième tableau répartiteur S₃ permet de distribuer la puissance dans les diverses lignes. Normalement A₄ et A₅ fournissent un programme, tandis que A₆ et A₇ fournissent l'autre. Chacune des lignes L₁, L₂, L₃, L₄, L₅, L₆ est double et transmet les deux programmes. Il y a une de ces lignes pour chaque étage et elles aboutissent à toutes les chambres.

L₇, L₈, L₉ et L₁₀ ne transmettent qu'un seul programme et desservent les locaux à usage commun. Le programme est sélectionné par l'opérateur dans la centrale.

Les tableaux S_2 et S_3 servent surtout à permettre la mise hors circuit d'un certain nombre d'amplificateurs aux heures creuses.

Un haut-parleur de contrôle est placé dans la centrale et peut être branché, au moyen d'un inverseur, sur l'un ou l'autre programme.

Un modulomètre peut être branché sur n'importe quel étage de sortie pour la vérification de la puissance.

Comme toute installation importante a besoin d'un contrôle périodique, un générateur B. F. à 1000 Hz, G, peut être branché sur l'installation pour permettre de vérifier les lignes et les autres parties.

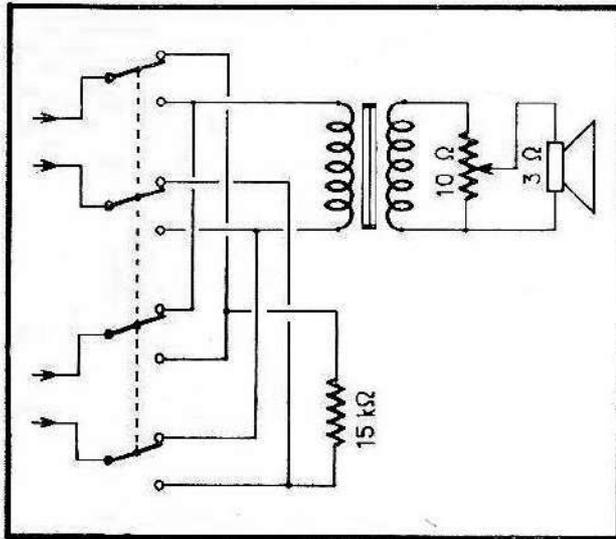


Fig. 291. — Haut-parleur de chambre avec sélecteur de programme et contrôle de volume sonore.

Une charge artificielle C, qui n'est rien d'autre qu'une résistance de forte dissipation avec des prises, peut être substituée à n'importe quelle ligne pour certains essais.

Les lignes L_7 , L_8 , L_9 et L_{10} reçoivent de 2 à 10 W suivant le local.

Aux chambres on distribue 0,3 W, puissance tout à fait suffisante, vu les conditions d'écoute et la nécessité de ne pas gêner le voisin.

Les haut-parleurs des chambres sont munis : 1° d'un commutateur sélecteur de programme; 2° d'un atténuateur pour le réglage de la puissance (fig. 291).

Le commutateur est obligatoirement quadripolaire, car un pôle commun pourrait occasionner de la diaphonie. Une résistance R est insérée dans la ligne inutilisée pour remplacer l'impédance du haut-parleur et maintenir l'impédance de la ligne à la valeur voulue. Chaque ligne dessert 50 haut-parleurs et son impédance nominale est 250 Ω . L'impédance des haut-parleurs, ainsi que la résistance R, est donc de 15 000 Ω .

Des installations fort semblables à celles-ci sont utilisées à bord des paquebots modernes.

Dans les hôpitaux, les haut-parleurs sont parfois remplacés par des casques. Ceux-ci ont généralement une impédance de l'ordre de 4000 Ω . La puissance nécessaire est de l'ordre de 5 à 15 mW par casque, ce qui peut être obtenu au moyen d'une tension de signal d'environ 6 V (6,3 V pour 10 mW).

Si l'amplificateur fournit 10 W, on aura une tension suffisante aux bornes d'un secondaire de 4 Ω , c'est-à-dire en utilisant la prise prévue pour la bobine mobile d'un haut-parleur, pour y relier plusieurs centaines de casques, chacun de ceux-ci étant muni d'un potentiomètre permettant d'ajuster le niveau du son.

5. — Les spectacles « Son et Lumière ».

La partie acoustique de ce genre d'installation réunit à peu près toutes les difficultés qu'on peut rencontrer en matière de distribution de son.

En effet :

La musique, qui est un élément important du programme, doit être reproduite avec le minimum de distorsion.

La parole doit être intelligible, tout en conservant aux diverses voix leur entière personnalité.

La répartition du son doit être sensiblement uniforme sur tout l'espace occupé par le public.

Les haut-parleurs doivent avoir un effet directif très net.

La puissance modulée nécessaire est très grande.

Une « régie » assurée par des techniciens qualifiés est indispensable pour lier correctement les effets lumineux aux émissions sonores.

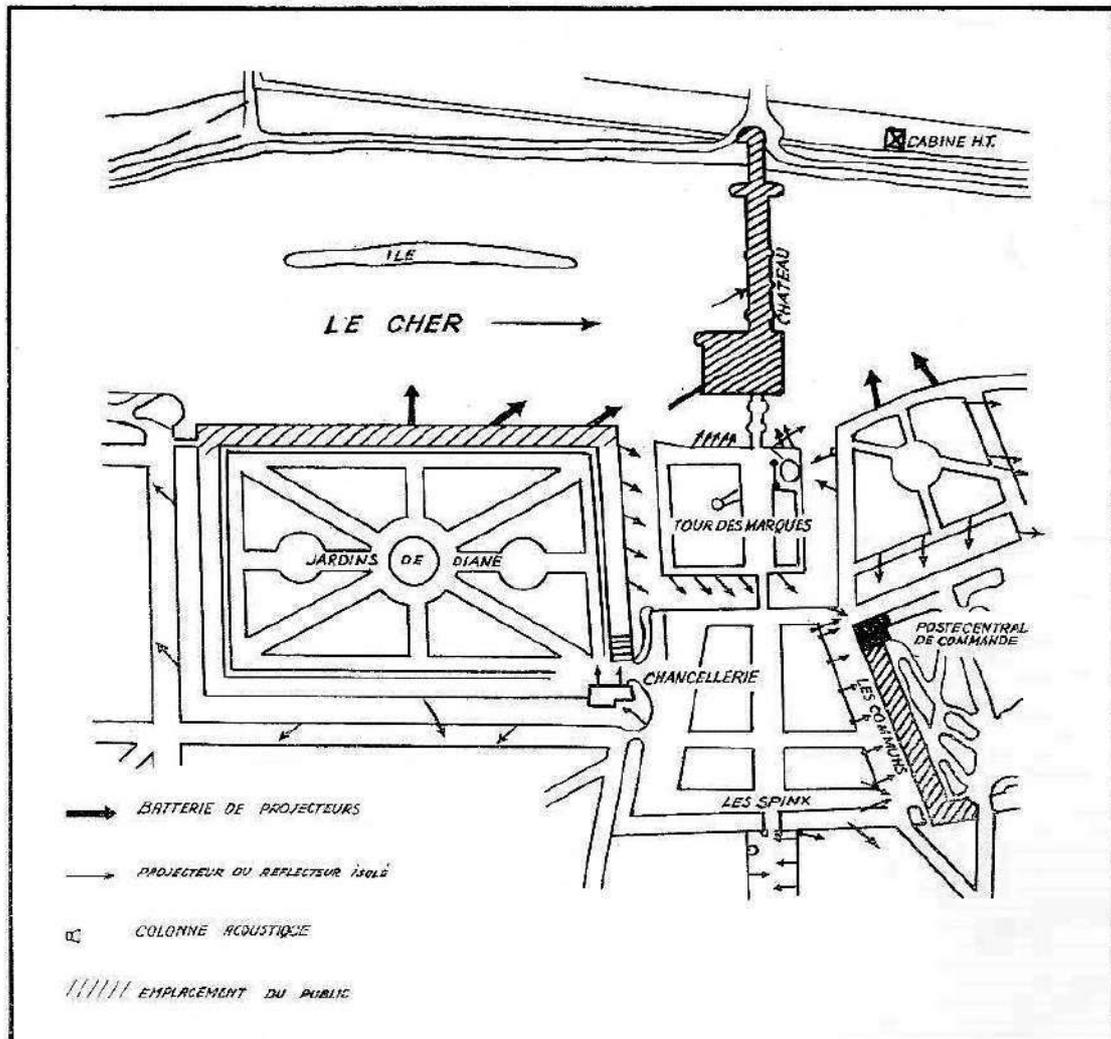


Fig. 292 a. — Spectacle « Son et Lumière » au château de Chenonceaux. Plan du site montrant l'emplacement des haut-parleurs et des projecteurs.

Nous ne pouvons mieux faire que de citer comme exemple l'installation qui a été réalisée au château de Chenonceaux (fig. 292 a) (*).

Le programme du spectacle comporte un texte monologué ou dialogué, alternant avec la musique appropriée, et accompagné d'une série de jeux de lumière portant sur l'extérieur du château et ses abords et assurant, par moments, un éclairage intérieur pour évoquer une présence dans la salle correspondante.

Un effet stéréophonique a été réalisé par l'emploi de deux chaînes d'amplification distinctes pouvant être commutées sur divers groupes de haut-parleurs.

On peut, par cet artifice, créer l'illusion du déplacement de la source du son et maints autres effets.

La puissance modulée, qui dépasse 800 watts, est fournie par huit amplificateurs.

Pour assurer la fidélité requise pour la reproduction de la musique il ne pouvait être question, dans une pareille installation, d'utiliser des haut-parleurs à compression munis de pavillons courts dont la fréquence de coupure se situe beaucoup trop haut. On a, en conséquence, adopté pour cet emploi des colonnes sonores comprenant chacune dix haut-parleurs dont la courbe de réponse satisfait aux conditions nécessaires. Ces colonnes, grâce à leur effet directif en éventail, permettent une répartition uniforme du son sur une large surface, tout en évitant d'indésirables effets d'écho.

Tout le scénario est enregistré sur bandes magnétiques à double piste. Les séquences passent automatiquement d'un point sonore à l'autre, selon les besoins, grâce à des commutateurs électroniques déclenchés par des signaux enregistrés sur la bande même.

Les jeux de lumière sont toutefois commandés manuellement. Les puissances en jeu sont trop importantes et les combinaisons à effectuer trop nombreuses pour pouvoir les réaliser automatiquement.

L'installation se compose d'une centrale où se trouvent les amplificateurs et les magnétophones ainsi que les pupitres de commande du son et des circuits d'éclairage.

Elle comprend en outre deux circuits microphoniques permettant d'une part les messages au public et, d'autre part, la liaison avec les services de sécurité.

Elle est desservie par deux opérateurs.

Les colonnes sonores sont réparties à travers les jardins et reliées à la centrale par des câbles enterrés.

L'ensemble absorbe, en fonctionnement, environ 85 kVA qui sont fournis par une cabine à haute tension équipée d'un transformateur de 100 kVA et qu'il a fallu installer spécialement.

Un autre exemple d'installation importante est celui réalisé pour la cathédrale Notre-Dame, à Paris.

Ici la puissance modulée totale est de 840 W. Elle est fournie par dix amplificateurs, dont huit de 70 W et deux de 140 W.

Six des amplificateurs de 70 W alimentent chacun une colonne sonore.

Les deux autres sont branchés sur des groupes de douze haut-parleurs de faible puissance.

Enfin les amplificateurs de 140 W alimentent chacun deux colonnes sonores en parallèle.

Ce qui caractérise cette installation, c'est l'automatisme quasi complet de son fonctionnement.

(*) D'après des documents aimablement mis à notre disposition par la *Compagnie Française Philips*.

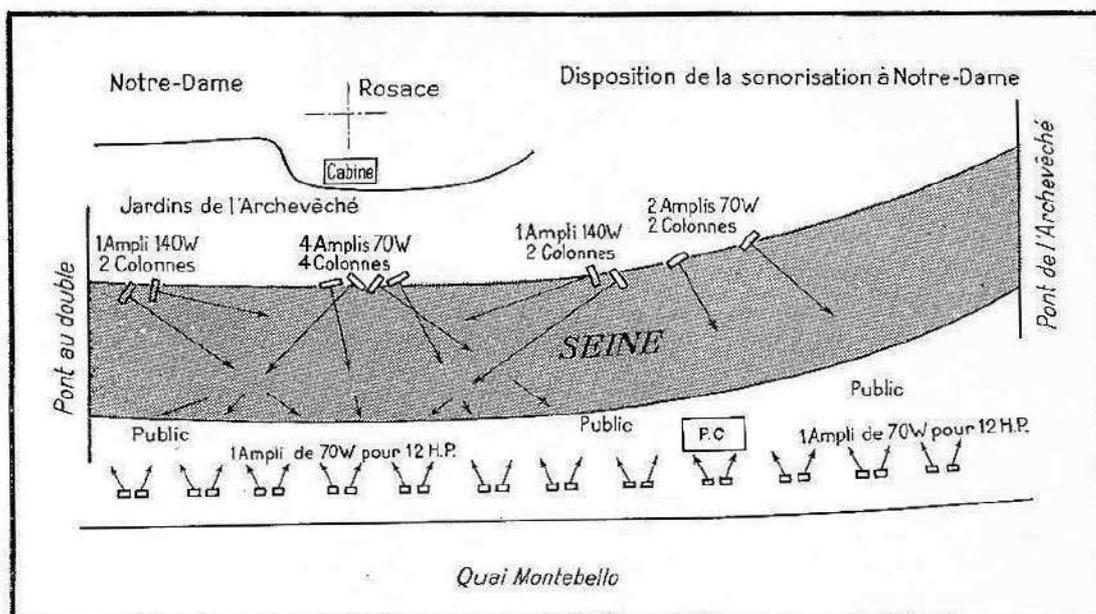


Fig. 292 b. — Disposition des haut-parleurs et colonnes sonores pour le spectacle « Son et Lumière » de Notre-Dame.

Tout le programme, qui retrace l'histoire de la cathédrale et son rôle dans divers épisodes de l'Histoire de France, est enregistré sur une bande magnétique à dix pistes.

Cinq de celles-ci sont utilisées pour le son, ce qui permet des effets stéréophoniques remarquables.

D'autres pistes portent les signaux qui déclenchent, par l'intermédiaire de relais, les commutations répartissant le son entre les groupes de haut-parleurs et règlent, par télécommande, les niveaux dans les divers canaux sonores.

Enfin une piste commande, par le même procédé, le déroulement des effets lumineux et la mise à feu, en clôture du spectacle, d'une série de pièces d'artifice.

La disposition des haut-parleurs sur les bords de la Seine est indiquée dans la figure 292 b.

Des dispositifs techniques analogues se retrouvent, avec diverses variantes, dans presque toutes les installations destinées à ce genre de spectacle.

On peut y rattacher la sonorisation, parfois complétée par des jeux de lumière, qui a été installée dans certains musées ou châteaux historiques et qui remplace le guide traditionnel. Ici aussi c'est ordinairement un magnétophone qui fournit les commentaires et conduit les visiteurs de salle en salle. Des dispositifs automatiques permettent de brancher l'amplificateur successivement sur les colonnes sonores correspondantes.

L'ART DE LA PRISE DE SON

Le son qu'on transmet, amplifie, reproduit ou diffuse a toujours pour origine première un microphone.

Les conditions dans lesquelles il est recueilli et son emploi subséquent varient toutefois à l'infini.

On peut, en première approximation, établir le classement suivant :

Prise de son en studio aménagé, en salle de concert ou au théâtre, pour radiodiffusion en direct ou enregistrement de musique ou de dramatiques;

Reportages en plein air ou en locaux non aménagés;

Discours ou cérémonies sur une place publique;

Sonorisation d'églises ou de salles de conférences et micro sur scène.

Il y a lieu de noter que, comme la prise de son en plein air présente de nombreuses difficultés, les extérieurs des films sont presque toujours post-sonorisés. La prise de son s'y rapportant a donc lieu dans des locaux aménagés en conséquence. Ce cas particulier se ramène donc à ceux de la radiodiffusion et de l'industrie du disque.

I. — Aménagement des studios.

Le temps de réverbération des locaux où se fait la prise de son est obligatoirement quelque peu différent de celui qui est considéré comme optimum pour une salle de concert ou un théâtre.

Un microphone ne réagit pas de la même manière qu'une oreille humaine et, d'autre part, il faut considérer que le son capté dans un studio, qu'il soit transmis par radio ou enregistré, est destiné à être écouté *ailleurs*, en un lieu qui a son acoustique propre et dont le temps de réverbération s'ajoute à celui du studio.

Ainsi qu'il a été expliqué au chapitre XX, le temps de réverbération optimum pour une salle dépend de ses dimensions et, d'autre part, de la nature du son qu'on y fait entendre. Il peut d'ailleurs être modifié selon les circonstances par une réverbération artificielle.

Le temps de réverbération des grandes salles de concert et des théâtres lyriques est toujours relativement long : 2 secondes et plus. A titre d'exemple, celui de la salle de l'Opéra de Bayreuth, considérée comme une des meilleures du monde, est de 2,2 secondes, et celui du célèbre Albert-Hall de Londres est de 2,9 secondes.

On considère souvent qu'un studio doit avoir une acoustique « sèche » pour que le son soit recueilli par le microphone avec le maximum de netteté. Cette opinion n'est toutefois pas universellement partagée.

Dans les « maisons de la radio » de tous les pays il existe des studios spécialisés de toutes grandeurs, adaptés à diverses catégories d'émissions. Certains ont un taux de réverbération réglable à l'aide de panneaux absorbants, amovibles ou orientables, ou d'ouvertures pouvant être démasquées selon les besoins.

Dans d'autres studios, les particularités acoustiques varient selon l'emplacement choisi pour la source de son et le ou les microphones : il s'y trouve une extrémité « sourde » et une autre « claire », grâce à des revêtements différents.

Les effets de la réverbération peuvent aussi être modifiés par l'emploi de microphones très directifs.

Les temps de réverbération généralement admis pour les différents studios de radiodiffusion, en tenant compte du volume qu'ils doivent avoir dans chacun des cas, sont donnés dans le tableau ci-dessous (*). Ils sont valables pour l'enregistrement des disques commerciaux.

Parole seule (studios pour nouvelles, discussions, etc.)	de 0,25 à 0,4 seconde
Dramatiques	de 0,2 à 0,8 — (varie considérablement selon le sujet)
Musique de chambre	1,4 seconde
Petit orchestre	1 à 1,7 seconde
Grand orchestre symphonique	1,8 à 2 —
Variétés	1 à 1,2 —
Orchestre de danse	1,6 à 1,7 —

En plus de leur conditionnement intérieur, les studios doivent être rigoureusement isolés acoustiquement des locaux voisins, afin qu'aucun son ou bruit n'y pénètre de l'extérieur.

On peut en effet, à la rigueur, tolérer dans une salle de spectacle une certaine rumeur ambiante de provenance extérieure ou intérieure. Si le niveau n'en est pas trop élevé on finit, par une adaptation inconsciente, par ne plus entendre que ce que l'on *veut* écouter.

Un microphone ne fait aucune discrimination de cette sorte.

Cependant, en le plaçant plus ou moins près de la source du son on peut modifier le rapport entre le son à capter et le bruit ambiant ou la réverbération. Ce moyen ne peut toutefois être utilisé pour une dramatique, à cause du déplacement des personnages, ni pour un orchestre dont la surface de rayonnement est trop grande.

La prise de son pour la télévision pose des problèmes particuliers, car elle s'effectue, tout au moins pour les émissions en direct, dans des locaux très vastes, encombrés par un énorme matériel technique et décoratif.

Pour que le temps de réverbération convienne aux dramatiques ou aux variétés, on est obligé d'en arriver à des revêtements massifs sur d'énormes surfaces, et cela d'autant plus que le microphone doit être tenu hors du champ de vision des caméras.

En outre, les changements de décor produisent inévitablement des modifications dans les propriétés acoustiques de l'endroit où la prise de son s'opère.

(*) Voir également à ce sujet Barell-Hadden : *High Quality Sound Production and Reproduction*.

2. — La place du microphone.

Considérons pour le moment le cas le plus simple : celui d'un speaker seul dans son studio ou, encore, parlant devant les caméras de la télévision. Ici il n'y a guère de difficulté : un microphone, ordinairement à caractéristique cardioïde, est placé à environ 50 cm du speaker, un peu plus bas que sa bouche et orienté vers lui.

La seule précaution à prendre est d'éviter de s'approcher trop près du microphone, parce que la membrane peut être entraînée non seulement par l'onde sonore, mais encore par le souffle, ce qui provoque une accentuation désagréable de certaines consonnes.

Il faut aussi que celui qui parle devant un micro évite de changer sa position, par exemple pour se pencher sur un manuscrit.

Le technicien de service peut évidemment remédier à un brusque changement d'intensité sonore, mais seulement avec un certain retard.

Pour une causerie à plusieurs personnages, la position du microphone qui paraît la plus favorable est à un mètre environ au-dessus de la table. Dans ce cas, un modèle omnidirectionnel s'impose.

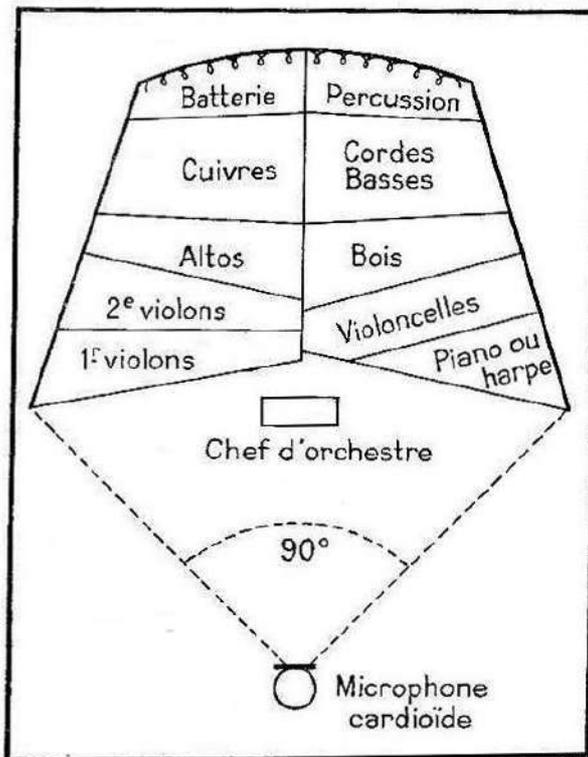


Fig. 293 a. — Emplacement des différentes parties d'un orchestre en utilisant un microphone cardioïde.

A partir du moment où l'emploi de plusieurs microphones est nécessaire, les choses se compliquent singulièrement.

Voici deux microphones placés à égale distance d'une source de son. Leurs membranes, frappées par la même onde sonore, exécuteront le même mouvement. Ils seront toujours en phase. Mais les courants B. F. qui en sortent peuvent entrer dans la chaîne d'amplification aussi bien en phase que déphasés de 180° , suivant la façon dont on a effectué le raccordement. Dans le premier cas, les signaux s'ajoutent; dans l'autre, ils s'annulent.

Généralement les microphones seront cependant correctement branchés parce que les constructeurs ont soin d'indiquer le sens qu'il faut respecter. Mais un autre cas se présente fréquemment : les microphones étant placés à des distances différentes de la source, le mouvement des diaphragmes est

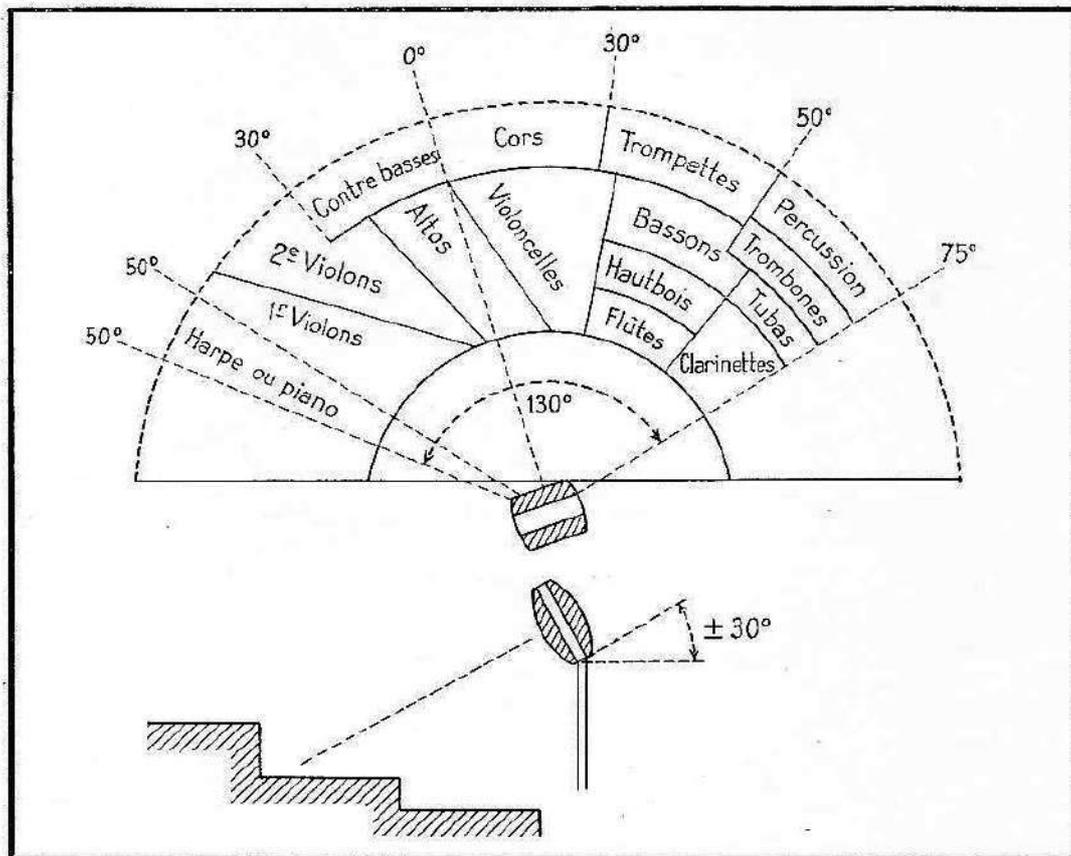


Fig. 293 b. — Disposition recommandée lorsqu'on utilise un microphone à ruban.

tantôt en phase, tantôt en opposition, selon la longueur d'onde. Il en résulte que certaines fréquences seront atténuées et d'autres renforcées. C'est une forme de distorsion particulièrement déplaisante.

Il serait donc désirable, lorsqu'on utilise plus d'un microphone, de pouvoir choisir des emplacements tels qu'une source ne puisse être « entendue » que par un seul microphone. Ce résultat est évidemment impossible à obtenir avec des microphones omnidirectionnels.

Pour cette raison on préconise souvent, et plus particulièrement aux U. S. A., l'emploi d'un microphone unique pour la prise de son d'un grand orchestre.

Le rapport entre les niveaux sonores des divers instruments est alors obtenu en disposant ceux-ci d'une certaine manière par rapport au microphone, lequel doit être placé à bonne distance de l'ensemble (fig. 293 a et b).

Une caractéristique cardioïde convient particulièrement pour cette disposition parce que les effets d'une réverbération excessive provenant du fond de la salle sont ainsi atténués. Le même procédé peut être utilisé pour une importante chorale.

L'utilisation d'un microphone unique n'est plus possible lorsqu'on doit mettre en évidence un soliste ou une partie quelconque d'une formation orchestrale.

C'est ici que les difficultés commencent. Il s'agit de jouer avec les diagrammes polaires et, de plus, de régler le niveau de sortie de chaque microphone indépendamment, dans la salle de mixage, de manière à conserver la relation voulue entre les différents groupes d'instruments et le soliste.

Le rayonnement acoustique des diverses sources est très varié. Les instruments de musique ont des diagrammes polaires particuliers dont le tech-

nicien du son doit tenir compte pour le placement des microphones. C'est ainsi que les fréquences élevées d'un violon se concentrent et se propagent dans une direction définie, et si l'on veut obtenir une reproduction uniforme du spectre sonore de cet instrument, le microphone devra se trouver dans une position approximativement perpendiculaire à sa face (fig. 294).

Le son du piano est l'un des plus difficiles à reproduire correctement, car il contient des impulsions à front raide. Il semble, de l'avis de certains spécialistes, que seul le microphone à ruban soit apte à lui rendre justice. On recommande de le placer à deux ou trois mètres de l'instrument, vers l'arrière pour un piano à queue, par devant et obliquement pour un piano droit (fig. 295).

Les « cuivres » (trompettes, trombones, etc.) rayonnent la plus grande partie de leur énergie sonore dans un tout petit angle et il faut que le microphone soit placé en dehors de celui-ci pour éviter toute surcharge (fig. 296).

Les « bois » (hautbois, basson, etc.) ne demandent aucune disposition particulière, car leur rayonnement est diffus.

Quand le soliste est un chanteur ou une chanteuse, une distance d'au moins un mètre du microphone est recommandée, de manière à éviter que

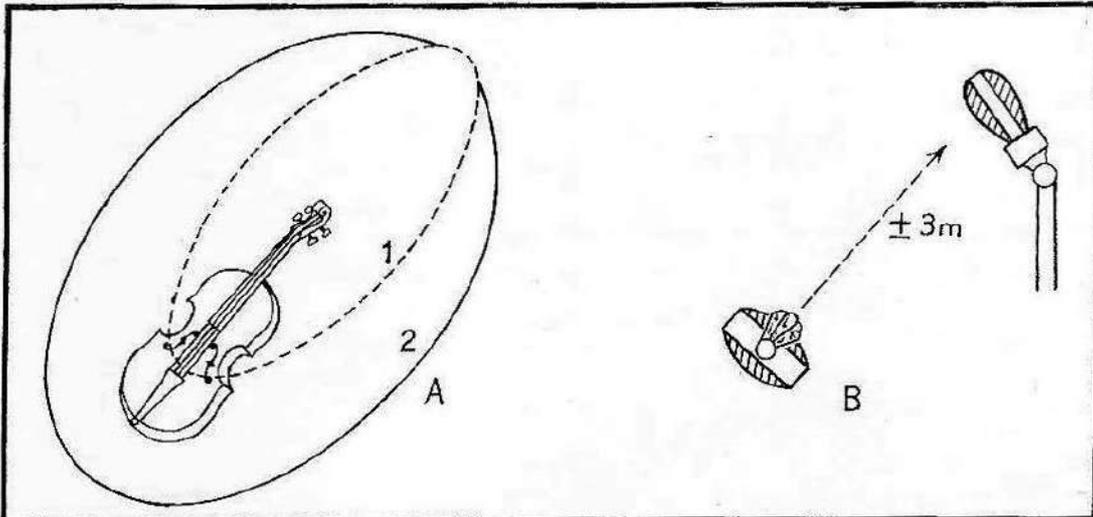


Fig. 294. — En a, diagramme polaire d'un violon : 1) pour les notes élevées ; 2) pour les sons graves. — En b, emplacement recommandé du microphone pour un bon équilibre tonal.

les mouvements de tête n'influencent de manière audible le niveau du signal sortant.

Dans certains cas on trouve même plus pratique de placer le soliste vocal et l'orchestre dans des studios séparés, le premier suivant l'accompagnement au moyen d'un casque.

3. — Retour sur la stéréophonie.

Nous avons expliqué, dans la première partie du livre, ce qu'est la stéréophonie et ce qu'elle n'est pas. Rappelons que son but est de procurer une impression d'espace, de donner une dimension à la matière sonore et de permettre, en outre, de localiser une source de son et d'en percevoir éventuellement le déplacement.

Le principe repose sur le fait qu'un son arrivant à nos deux oreilles ne les excite pas toujours d'une manière identique. Des différences d'intensité

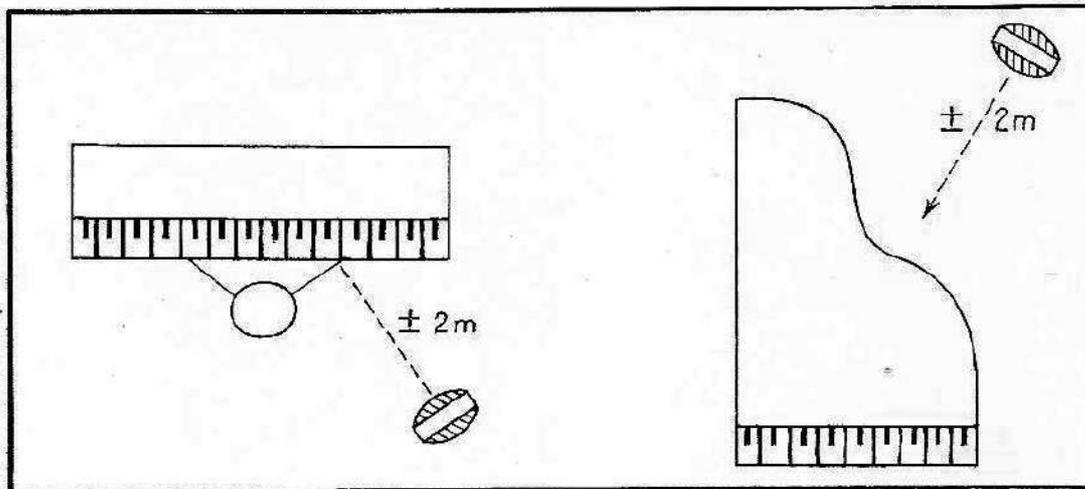


Fig. 295. — Emplacement du microphone par rapport au piano.

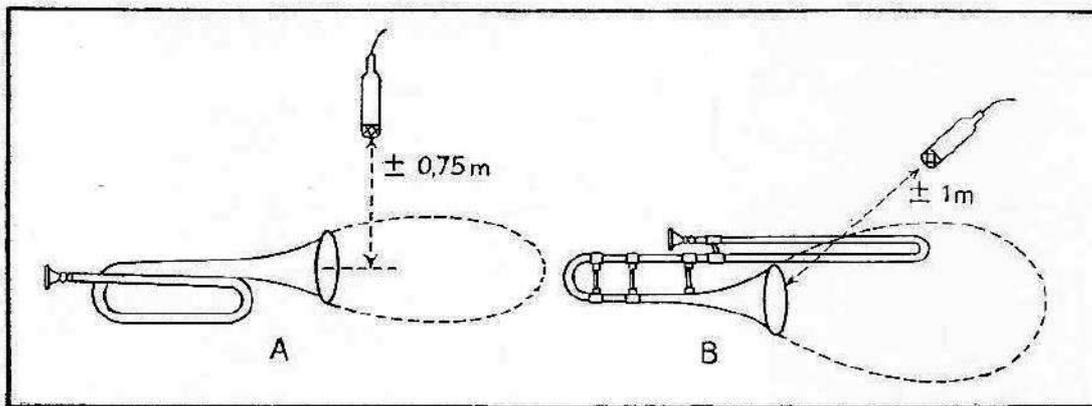
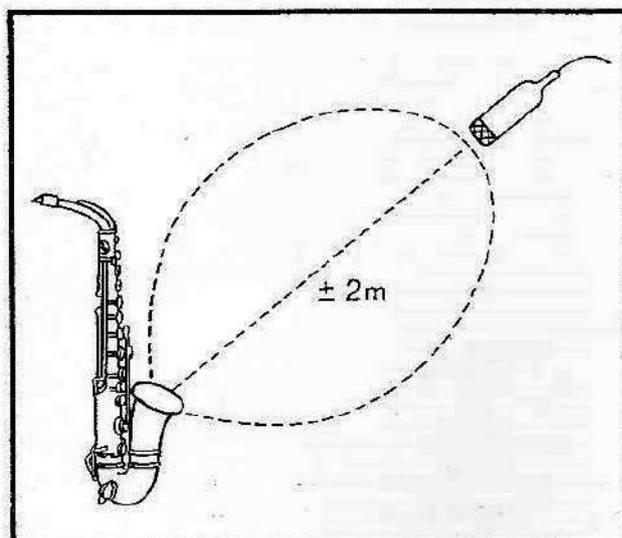


Fig. 296. — Le son des cuivres se concentre dans un secteur étroit. Emplacement du microphone préconisé : A) pour la trompette ; B) pour le trombone ; C) pour le saxophone (ci-contre).



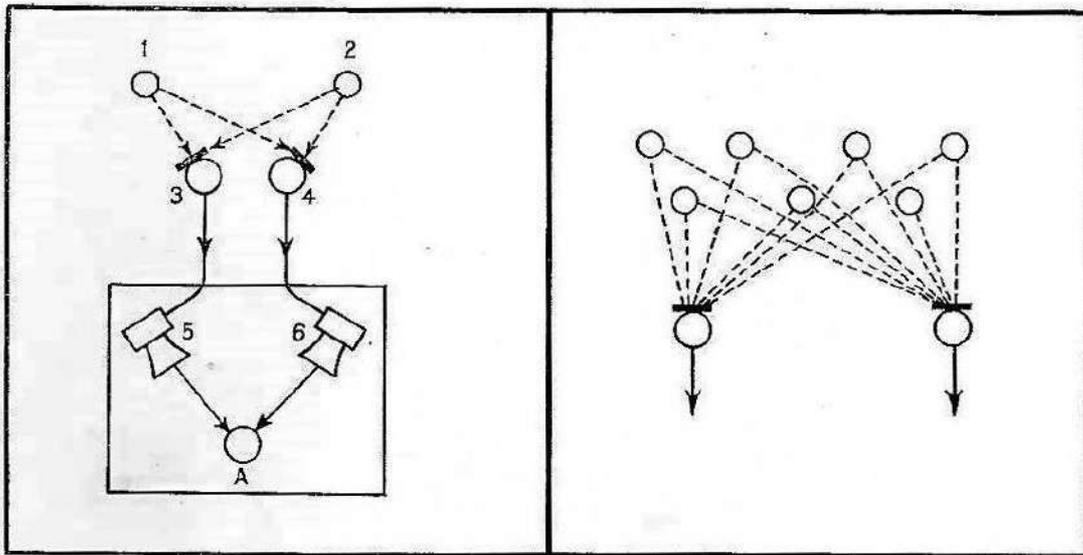


Fig. 297. — Principe de base de la stéréophonie. 1 et 2 : sources de son. — 3 et 4 : microphones unidirectionnels. — 5 : haut-parleur transmettant le son de la source 1. — 6 : haut-parleur transmettant le son de la source 2. — A : auditeur.

Fig. 298. — Prise de son stéréophonique selon le système dit AB.

ou de phase nous permettent, dans une certaine mesure, d'en déterminer la direction.

Il est à noter que c'est particulièrement la différence dans le *temps* mis pour arriver à chacune des oreilles qui permet la localisation de la source et, de plus, que cette différence ne commence à devenir perceptible qu'au-delà d'une fréquence située vers 800 Hz, c'est-à-dire lorsque la longueur d'onde est plus courte que la distance entre les deux oreilles (*).

(*) RAYLEIGH : *Theory of Sound*.

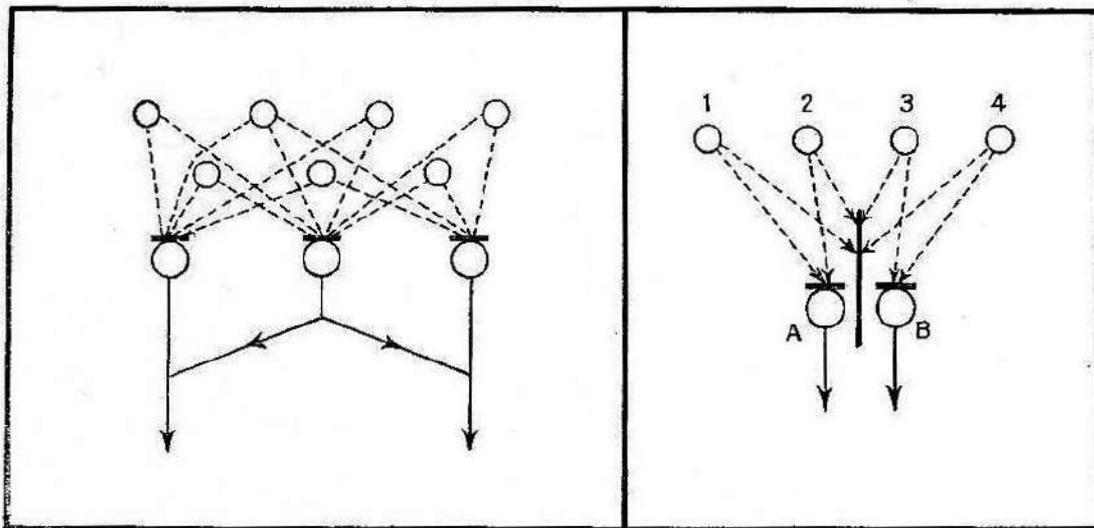


Fig. 299. — Un microphone supplémentaire est généralement nécessaire pour combler le « trou du milieu ».

Fig. 300. — « Tête artificielle » réalisée au moyen de deux microphones séparés par une cloison insonore.

Dans la pratique on constate que ce sont surtout les fréquences élevées qui permettent de déterminer la direction d'où vient le son et que, de plus, leur intensité doit varier. Un son pur continu comme celui que fournit un générateur B. F. est presque impossible à situer.

D'autre part, les sons graves ne provoquent presque aucun réflexe d'orientation et ne contribuent donc que faiblement à l'effet stéréophonique.

En principe, pour obtenir celui-ci, il faut recueillir le son dans deux microphones reliés par deux voies indépendantes à deux haut-parleurs convenablement disposés et orientés (fig. 297).

Les voies peuvent évidemment être des ondes porteuses ou être matérialisées par une bande magnétique ou un disque.

La prise de son stéréophonique peut s'effectuer de deux manières : la première consiste à employer deux microphones omnidirectionnels assez largement espacés (fig. 298). Cette disposition, appelée AB, présente cependant l'inconvénient de donner à l'auditeur l'impression d'un vide au milieu de l'image sonore. Pour y remédier on place un troisième microphone entre les deux autres et on le relie aux deux voies (fig. 299).

Bon nombre de disques stéréophoniques sont enregistrés selon ce système, parfois complété par des microphones « locaux » placés à proximité de certains instruments.

Le second système, qui est d'une application plus délicate, consiste à se rapprocher le plus possible des conditions dans lesquelles un auditeur, placé dans la salle, reçoit les sons. On utilise à cet effet deux microphones très proches l'un de l'autre.

Ils peuvent être omnidirectionnels et, dans ce cas, on les sépare par une cloison absorbante (fig. 300), mais actuellement on utilise surtout des microphones dont l'effet directif est très net. Deux microphones à ruban conviennent à cet usage (fig. 301), mais on utilise plus souvent deux microphones à caractéristique cardioïde (fig. 302). On a donné la dénomination XY à cette disposition.

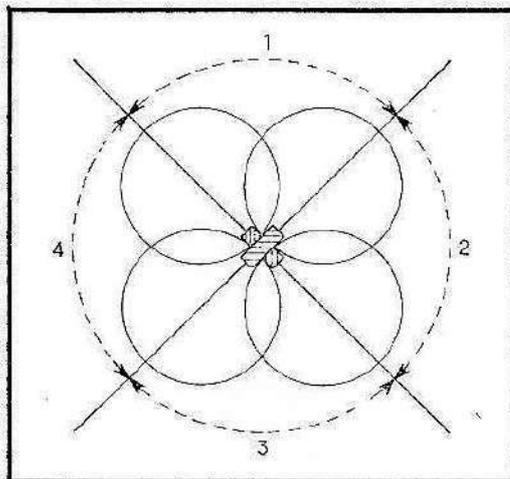
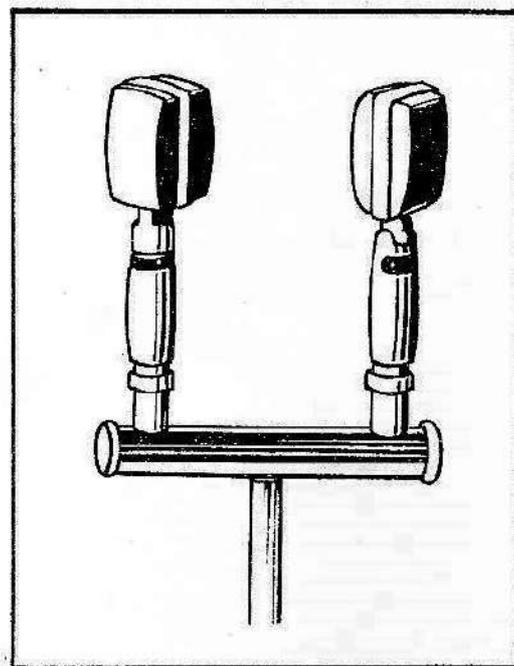


Fig. 301. — Système dit XY utilisant deux microphones à ruban placés à angle droit. — En a (ci-dessus), dans les angles 1 et 3, les membranes sont en phase. Ils sont en phase opposée dans les angles 2 et 4. — En b (ci-contre), les microphones à ruban orientables montés sur un support pour la prise de son stéréophonique XY.



Deux cellules, du type électrostatique, sont souvent montées dans un même boîtier et orientables l'une par rapport à l'autre.

Le système, que nous appellerons « central », implique que les axes des diagrammes polaires des microphones doivent former entre eux un angle dont la valeur dépend de l'étendue de la « nappe sonore » à embrasser (fig. 303).

Mais ici encore, si l'angle est trop grand on retrouve le « trou dans le milieu » dont les audiophiles se sont souvent plaints.

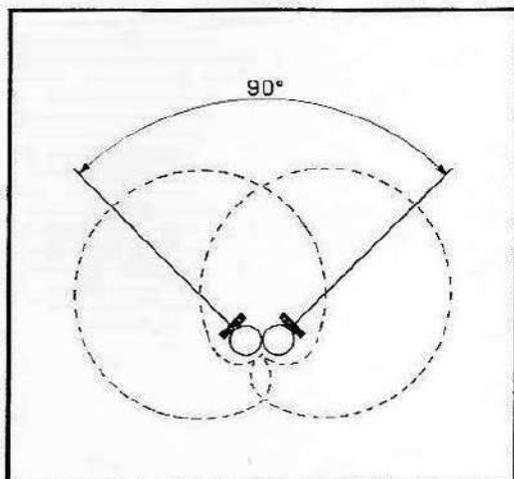


Fig. 302. — Utilisation de deux microphones à caractéristique cardioïde dans une disposition centrale.

On pallie ce défaut par l'emploi d'un troisième microphone soit cardioïde, soit à diagramme en huit, qu'on place à proximité immédiate du microphone double (système M. S.). D'autres combinaisons encore sont possibles. La figure 304 en montre un exemple.

Un inconvénient majeur du système central est que si un soliste, par exemple un chanteur, se trouve exactement au centre de l'angle de captation, et particulièrement s'il se trouve très près des microphones, sa voix sera transmise avec la même intensité par les deux voies, ce qui produira un effet déplorable.

Les microphones stéréophoniques placés à proximité l'un de l'autre sont reliés à un système particulier de contrôle qui permet de modifier l'angle de captation (fig. 305).

Nous voyons que si l'atténuateur $R_1 R_2$ est réglé au minimum, les deux

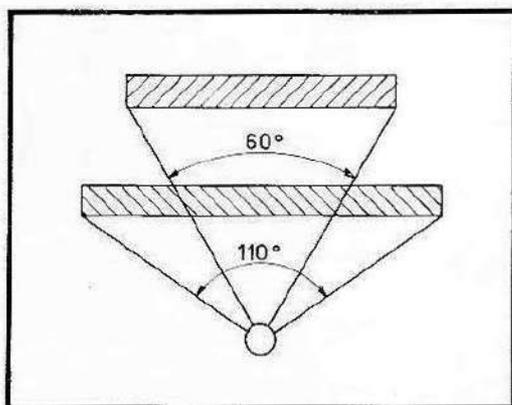


Fig. 303. — L'angle embrassé par les diagrammes polaires des deux microphones doit pouvoir varier selon les circonstances.

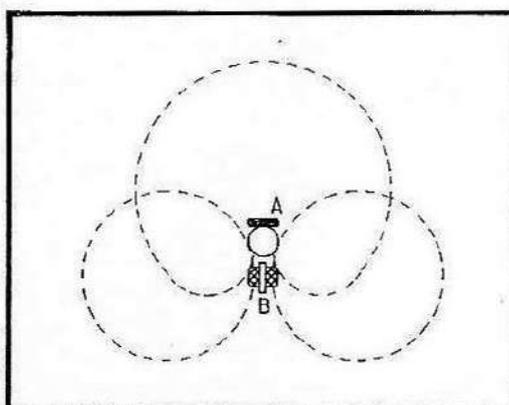


Fig. 304. — Prise de son stéréophonique selon le système MS. A : microphone cardioïde électrostatique. — B : microphone à ruban.

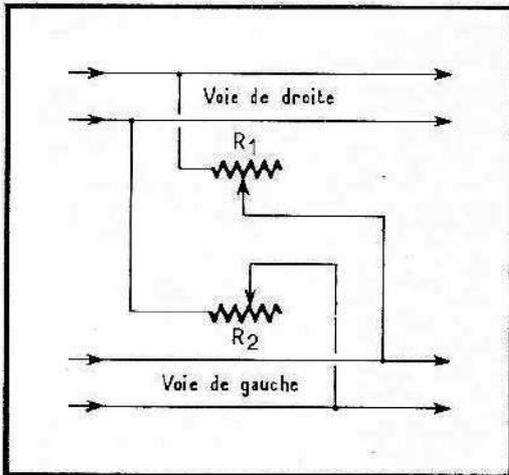


Fig. 305. — L'atténuateur formé par R_1 et R_2 permet de modifier le rapport entre les sons captés par les deux microphones et, par suite, le diagramme polaire de l'ensemble.

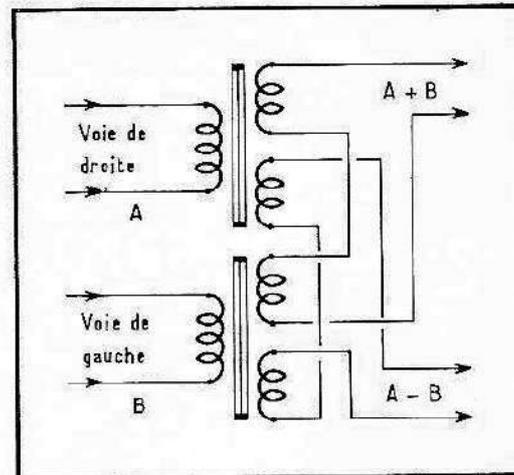


Fig. 306 a. — Les secondaires des transformateurs A et B fournissent la somme et la différence des deux signaux.

microphones se trouvent connectés en parallèle, et c'est alors comme si les deux voies étaient branchées sur un microphone unique dont le diagramme polaire serait orienté vers le centre du champ sonore.

Dans toutes les positions intermédiaires le diagramme sera plus ou moins étalé.

Un contrôle plus complet de l'angle de captation est possible en utilisant un dispositif permettant d'inverser la phase d'un microphone par rapport à l'autre. Cela revient à additionner ou à soustraire l'un de l'autre leurs signaux.

On utilise à cet effet deux transformateurs à double secondaire (fig. 306 a). Aux sorties on recueille deux signaux dont l'un est égal à la somme et l'autre à la différence des signaux. Deux atténuateurs (fig. 306 b) permettent de régler le niveau de ces signaux qui sont ensuite recombinaés et passent dans les deux voies stéréophoniques en conservant le rapport voulu.

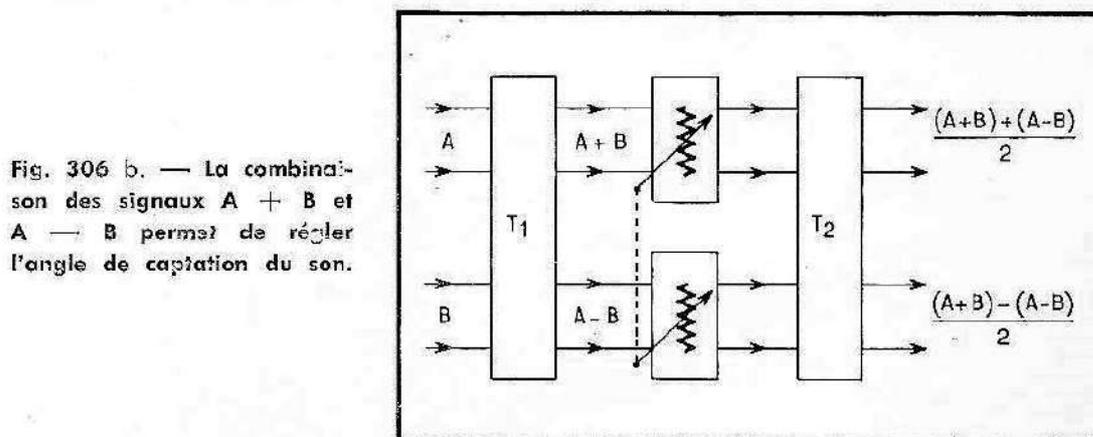


Fig. 306 b. — La combinaison des signaux $A + B$ et $A - B$ permet de régler l'angle de captation du son.

Pour mettre en évidence un soliste ou l'un ou l'autre instrument, on place à sa proximité immédiate un microphone supplémentaire très directif (microphone ponctuel). Son débit est contrôlé de manière à le superposer au signal recueilli par les autres microphones sans troubler l'image sonore principale. La répartition de ce signal entre les canaux s'effectue au moyen d'un double potentiomètre (fig. 307) permettant de « placer » subjectivement la source à l'endroit désiré.

4. — Les "effets" sonores.

Le son proprement dit s'accompagne souvent, dans les dramatiques ou les variétés, de bruits divers, dont certains sont enregistrés à part « d'après nature » et d'autres réalisés en studio.

Il existe dans le commerce de nombreux disques de bruitage qu'il est possible d'utiliser pour réaliser des enregistrements. Ils peuvent aussi être diffusés par haut-parleurs dans les coulisses, lors d'une représentation théâtrale.

On peut aussi recueillir, à l'aide d'un magnétophone, tous les bruits d'ambiance dont on peut avoir besoin.

Il n'en reste pas moins que, dans les studios de radiodiffusion, de télévision ou d'enregistrement de disques, on en « fabrique » aussi à partir des accessoires les plus inattendus.

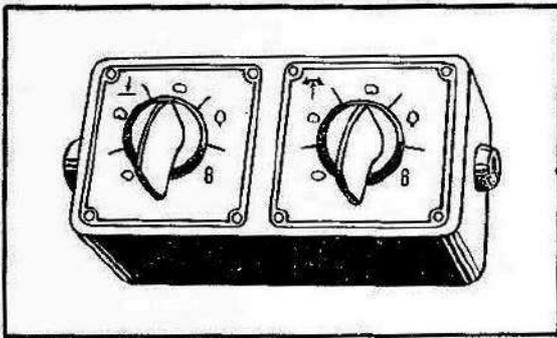


Fig. 306 c. — Atténuateur double permettant de modifier progressivement le diagramme polaire de chacune des cellules.

Nous ne citons que pour mémoire les bruits de pas, l'ouverture et la fermeture des portes, les bruits de serrure, de clefs ou de chaînes qui sont produits par des objets correspondants.

Nous extrayons d'un manuel à l'usage des techniciens de la B. B. C. (*) quelques « recettes » amusantes :

Passage d'un train : patin à roulettes qu'on fait mouvoir sur une planche.

Mitrailleuse : tambour sur lequel on a versé des plombs de chasse et qu'on frappe avec une baguette.

Coup de frein d'une auto : un gobelet renversé qu'on fait glisser sur une plaque de verre.

Bris du pare-brise d'une auto : un biscuit qu'on écrase tout près du microphone.

Bruits de la mer sur des galets : une poignée de fins plombs de chasse versés sur un tambour et qu'on fait rouler doucement d'un bord à l'autre.

Des pas dans la neige : un paquet d'ouate qu'on tord à proximité immédiate du microphone.

Avalanche : dix kilos de pommes de terre qu'on déverse dans une large bassine et qu'on remue.

Une vieille enseigne qui se balance dans le vent : grincement des dents d'une fourchette sur une assiette de faïence.

Nous laissons à l'imagination de nos lecteurs le moyen de « fabriquer » d'autres bruits suggestifs.

C'est toutefois le magnétophone qui permet de créer les effets les plus réalistes : applaudissements, bruits de foule ou de trafic, etc. Il permet en outre les manipulations les plus variées, comme l'enregistrement d'un son à une certaine vitesse et sa reproduction à une autre beaucoup plus grande

(*) BARRELL et HADDEN : *Sound Production and Reproduction*.

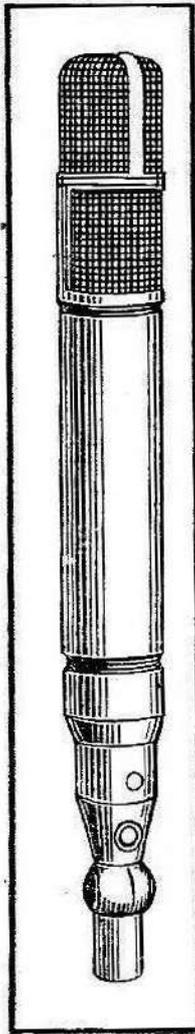


Fig. 306 d. — Microphone stéréophonique à deux cellules électrostatiques.

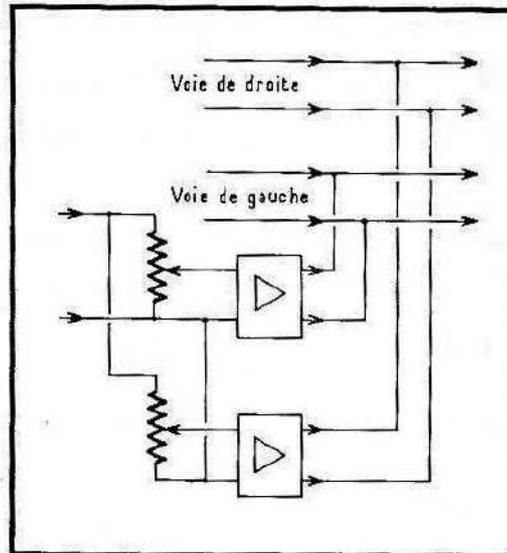


Fig. 307. — Répartition du son provenant d'un troisième microphone entre les deux voies à l'aide d'un double potentiomètre.

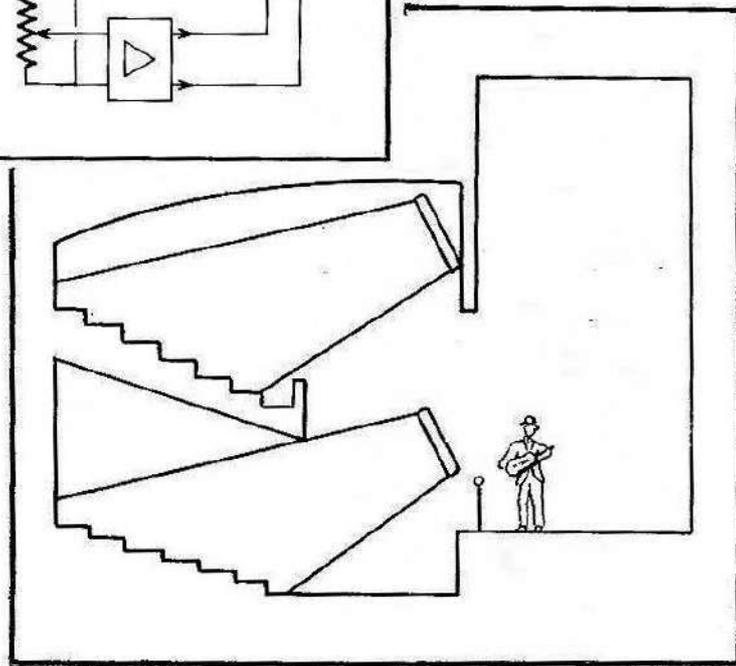


Fig. 308. — Exemple de placement de colonnes sonores dans une salle de spectacle.

ou plus petite, ou son retournement en déroulant la bande à l'envers, sans compter l'écho artificiel dont nous avons déjà parlé. De la « musique concrète » peut aussi être réalisée à l'aide d'enregistrements à partir d'oscillateurs B. F. riches en harmoniques et complétés par des filtres réglables.

5. — Le microphone dans la salle.

Tout ce que nous venons de dire se rapporte à la prise de son professionnelle pour la radiodiffusion et l'enregistrement des disques commerciaux.

Lorsque le son capté est destiné à l'usage sur place, dans le cas par exemple où le microphone et les haut-parleurs se trouvent dans la même salle, les règles sont très différentes.

Le chanteur de charme doit s'approcher de très près d'un microphone à effet directif très prononcé, de préférence hypercardioïde, et les haut-parleurs disposés dans la salle seront également à effet directif. Les colonnes fournissent actuellement la meilleure solution (fig. 308).

Il est à noter que le fait de parler très près du microphone augmente le rapport entre le son direct et la réverbération qu'il peut capter, mais modifie, dans une certaine mesure, le timbre de la voix en la rendant en apparence plus grave. On l'explique comme suit : on peut considérer la bouche comme un haut-parleur dont la tête constitue l'écran acoustique. Or la surface de celle-ci est évidemment très petite par rapport à la longueur d'onde des sons graves (voir ce que nous avons dit à ce sujet au chapitre XII), de sorte que ceux-ci ne sont pas rayonnés, au cours d'une conversation normale, dans la même proportion que les fréquences supérieures à, mettons 2000 Hz.

Si l'on se place très près du microphone, l'effet sélectif du « baffle » que constitue la tête disparaît et il n'y a plus d'atténuation des fréquences basses.

La distance entre la personne qui parle et le microphone, pour laquelle la relation entre le son direct et le son réverbéré est égale à l'unité, peut être calculée, en tenant compte du volume de la salle et du temps de réverbération, au moyen de la formule suivante (*) :

$$r = 0,057 \frac{V}{T}$$

V est le volume en m³ de la salle et T le temps de réverbération, r est le « rayon de réverbération » qui correspond au diagramme polaire du microphone suivant lequel l'identité dont nous venons de parler se produit. C'est également la distance la plus grande à laquelle on peut se placer pour éviter l'effet Larsen pour un temps de réverbération donné. Il y a lieu de remarquer qu'il existe de nombreux modèles de microphones « anti-Larsen » par construction et qui sont, par conséquent, peu sensibles aux bruits ambiants.

Néanmoins, quand un microphone doit fonctionner sur scène il est toujours utile que la paroi à laquelle il fait face soit aussi peu réfléchissante que possible; ce qui réduit encore les risques d'interférence.

Remarquons en passant qu'on peut obtenir un certain effet stéréophonique lorsqu'on doit amplifier le son d'un petit orchestre. On utilise pour cela deux microphones reliés par des chaînes d'amplification différentes à deux haut-parleurs ou groupes de haut-parleurs disposés de part et d'autre de la scène. On obtient par ce moyen l'illusion d'un élargissement de la formation musicale.

Dans les églises, il s'agit avant tout d'obtenir l'intelligibilité et, comme le temps de réverbération est ordinairement très long, on doit, pour éviter les réactions acoustiques, utiliser des haut-parleurs à grand effet directif. C'est pourquoi la colonne sonore est devenue d'un emploi général.

Ici le microphone ne peut être placé devant la bouche de l'orateur ni même se trouver à une position fixe.

On utilise généralement un petit microphone à cristal qu'on attache au vêtement et qui est relativement peu sensible. D'autre part, il est utile de placer dans la chaîne d'amplification des filtres destinés à couper les fréquences dangereuses du point de vue de l'effet Larsen.

LE MICROPHONE EN PLEIN AIR.

La prise de son pour des manifestations sur des places publiques (« public address », disent les Anglo-Saxons) nécessite certaines précautions particulières. Le temps de réverbération est très variable. Il est généralement très long et peut même prendre le caractère d'un écho. La réverbération peut aussi être inexistante si la place est très ouverte (fig. 309).

(*) P. F. WARNIG et H. I. GRIESE dans *Radio Mentor* (11-56 et 6-57).

Enfin il faut compter avec un autre ennemi : le vent. Certains microphones y sont très sensibles, ce qui se traduit par un bruissement caractéristique.

L'orateur ne peut compenser les bruits d'ambiance en s'approchant du microphone comme le ferait un chanteur de charme.

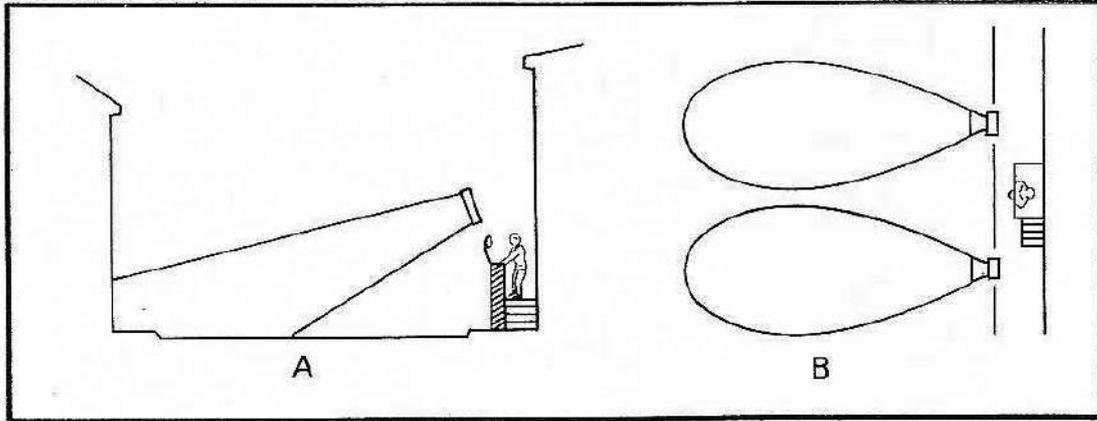


Fig. 309. — Exemple de placement de haut-parleurs pour manifestation en plein-air. En a, emploi d'une ou plusieurs colonnes sonores. Elles doivent être inclinées vers le sol. En b, haut-parleurs à pavillon court. Ces dispositions réduisent le danger d'effet Larsen.

Le microphone électrodynamique est celui qui paraît le mieux convenir pour cet emploi. Il en existe des modèles spéciaux peu sensibles au vent et aux bruits ambiants. On leur a donné une courbe de réponse présentant une coupure assez nette en dessous de 200 Hz et une baisse graduelle au-delà de 5000 Hz. Leur directivité aux fréquences qui correspondent à la parole est du type hypercardioïde ou s'en approche.

Aux autres emplois du microphone en plein air : interview, actualités pour la radio, la télévision ou le cinéma, enregistrement de bruits et sons divers pour bruitages, correspondent, par nécessité, des modèles de microphones différents.

L'équipement portatif transistorisé postule un microphone à cristal qui demande peu d'amplification.

Les prises de son faites depuis un car, qui contient tout l'équipement d'amplification nécessaire, permettent d'employer des microphones à haute fidélité.

Il semble cependant que le microphone électrodynamique ait généralement la préférence. Pour permettre la prise de son à une distance relativement grande du car, on a créé des modèles électrodynamiques dont le boîtier contient un préamplificateur à transistors. Le gain est de l'ordre de 500. Grâce à un niveau de sortie élevé, les pertes dans le câble deviennent négligeables.

LES MESURES EN B. F.

L'installation et l'entretien des installations d'amplification et de distribution de son impliquent la nécessité d'effectuer divers contrôles et mesures.

Il y a lieu de distinguer les contrôles permanents sur une installation en marche et les mesures et vérifications périodiques ou occasionnelles de toute nature, enfin les mesures à effectuer pour relever les caractéristiques de l'une ou l'autre partie d'une chaîne d'amplification.

I. — Contrôles permanents.

Une installation de distribution de son est formée d'un réseau complexe à travers lequel le signal acoustique chemine en subissant des variations de niveau à chaque étape.

Pour éviter de surcharger l'une ou l'autre partie de la chaîne, il est utile de pouvoir contrôler de manière continue le niveau du signal aux endroits critiques.

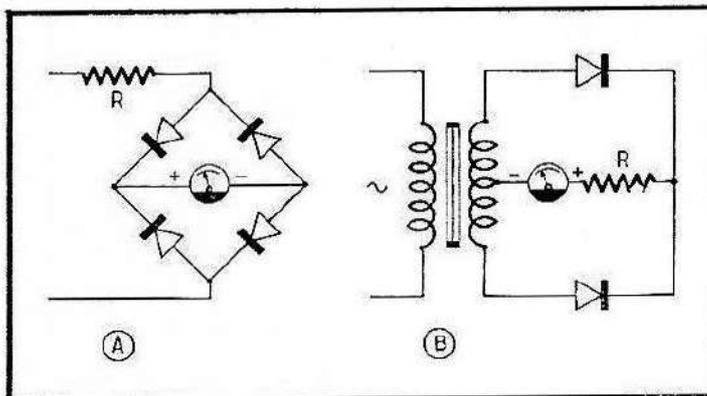


Fig. 310. — Disposition des redresseurs pour les mesures en alternatif. La résistance R sert à régler le tarage de l'instrument pour une gamme de tensions déterminée et assure en outre la compensation thermique. — En A, montage des éléments redresseurs en pont. — En B, redressement à deux éléments avec emploi d'un transformateur.

On utilise pour cela des appareils de mesure qui ne sont rien d'autre que des voltmètres spécialement étalonnés. Suivant le cas, on les baptise modulomètres ou décibelmètres, ou encore Vumètres, si c'est l'unité Vu qui est utilisée.

Les tensions à mesurer sont alternatives, on doit donc les redresser pour pouvoir les mesurer.

L'appareil généralement utilisé se compose d'un galvanomètre à cadre et de quatre éléments redresseurs disposés en pont (fig. 310). Dans certains appareils plus récents les redresseurs sont des diodes au germanium; plus

anciennement on a utilisé des redresseurs à l'oxyde de cuivre ou au sélénium. Il est nécessaire évidemment que l'appareil conserve sa précision sur toute l'étendue des fréquences acoustiques.

Comme les unités utilisées sont toujours des valeurs logarithmiques, les degrés du cadran ne sont pas régulièrement espacés.

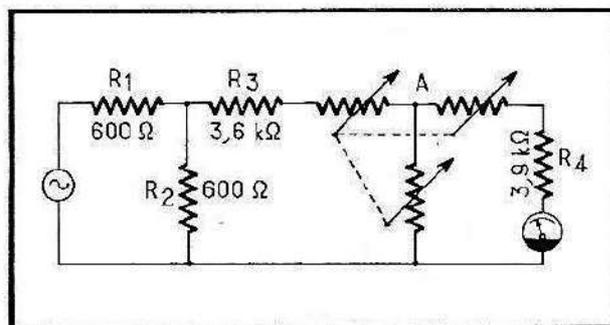
Nous avons expliqué au chapitre VI que l'emploi de ce genre d'unités est rendu nécessaire par les caractéristiques physiologiques de l'oreille (loi de Fechner).

Rappelons que, dans la technique de l'amplification du son, le niveau de référence est ordinairement 6 milliwatts dans une impédance de 500Ω , ce qui correspond à une tension de 1,732 V.

La technique anglaise et américaine utilise toutefois comme niveau de référence tantôt 1 milliwatt, tantôt 6 milliwatts dans 600Ω , et par conséquent une tension de 0,775 V ou de 1,9 V.

Il est à noter qu'une ligne téléphonique aérienne présente précisément une impédance caractéristique de 600Ω , ce qui explique l'origine de cette valeur de référence.

Fig. 311. — Principe du Vu-mètre : R_1 : résistance de la source. — R_2 : terminaison de la ligne. — R_3 : résistance d'adaptation. — R_4 : résistance de tarage de l'instrument de mesure. — A : atténuateur réglant le niveau du signal mesuré.



L'instrument de mesure doit posséder certaines caractéristiques particulières : sa résistance notamment doit être telle qu'elle ne modifie pas sensiblement l'impédance de la ligne sur laquelle il est branché.

On a standardisé aux U. S. A. une résistance d'entrée de 7500Ω . L'instrument lui-même a 3900Ω , mais est précédé d'un atténuateur en T qui amène la résistance totale à la valeur indiquée (fig. 311).

Cet atténuateur, qui est lui-même étalonné, permet d'ajuster la sensibilité de l'instrument selon les besoins, sans modifier la résistance totale.

Le galvanomètre doit avoir, d'autre part, un taux d'amortissement particulier, faute de quoi l'équipage mobile serait soumis à des vibrations rendant la lecture difficile.

On donne à ce sujet les indications suivantes : l'aiguille doit mettre 300 millisecondes pour parcourir les 99 % de sa position d'équilibre et le dépassement ne peut excéder 1,5 % (*).

D'autres appareils basés sur le même principe sont utilisés dans divers endroits d'une installation et ne sont pas forcément branchés sur une ligne de transmission de 500 ou 600Ω .

Un autre appareil de mesure qu'on trouve dans certains amplificateurs de puissance est un milliampèremètre inséré dans le circuit d'alimentation de l'étage de sortie. Il permet à la fois de vérifier l'état des tubes et d'avertir l'opérateur d'une surcharge éventuelle.

Il existe aussi, dans certains modèles d'amplificateurs, un milliampèremètre qui peut être inséré, à l'aide d'un commutateur, dans divers circuits et permettre de vérifier individuellement le fonctionnement de chaque étage.

(*) Renseignements aimablement donnés par les Ateliers Pekly.

Sur la table de régie et de mixage des studios de radiodiffusion ou d'enregistrement on trouve une série de décibelmètres ou modulomètres permettant le contrôle de toutes les voies qui y aboutissent ou en partent.

Nous ne citons que pour mémoire les voltmètres et ampèremètres branchés en permanence sur le courant de secteur et qu'on trouve dans toutes les installations d'une certaine importance.

Pannes des amplificateurs.

Les plus courantes sont les suivantes :

CAUSES	EFFETS POSSIBLES
1) Tube défectueux.	Arrêt, faiblesse et (ou) déformation du son, bruit de secteur.
2) Résistance coupée.	Arrêt, absence de tension dans une partie de l'amplificateur.
3) Résistance défectueuse.	Craquements, souffle.
4) Condensateur de couplage défectueux (fuite).	Distorsion, tube final excessivement chaud, baisse de la tension anodique, tension positive sur la grille d'un des tubes.
5) Condensateur de couplage défectueux (coupé).	Silence ou faiblesse avec perte totale des fréquences basses.
6) Condensateur électrolytique défectueux (perte de capacité).	Ronflement, « motor boating », accrochage, bruit anormal.
7) Condensateur électrolytique claqué.	Absence ou baisse considérable de la tension anodique. Echauffement du transformateur d'alimentation, destruction rapide du tube redresseur.
8) Transformateur d'alimentation défectueux (spires court-circuitées).	Echauffement considérable, baisse de la tension anodique.

Ces pannes causent presque toujours une anomalie dans les diverses tensions. C'est donc par la vérification de celles-ci qu'il faut commencer.

La figure 312 donne le schéma simplifié d'un amplificateur classique en indiquant les tensions qu'on doit y trouver.

Un écart de $\pm 20\%$ ne peut cependant être considéré comme anormal.

Les tensions indiquées sont toutes par rapport à la masse.

La mesure doit être effectuée au moyen d'un voltmètre ayant une résistance d'au moins $10\,000\ \Omega$ par volt.

2. — Contrôles intermittents ou occasionnels.

Lorsque l'installation d'un système d'amplification ou de distribution de son est achevée on doit normalement effectuer différentes mesures et vérifications.

Certaines d'entre elles doivent d'ailleurs être répétées périodiquement.

Il est, en particulier, nécessaire de disposer d'un signal d'une fréquence déterminée et d'amplitude mesurable à injecter dans le système, dont on

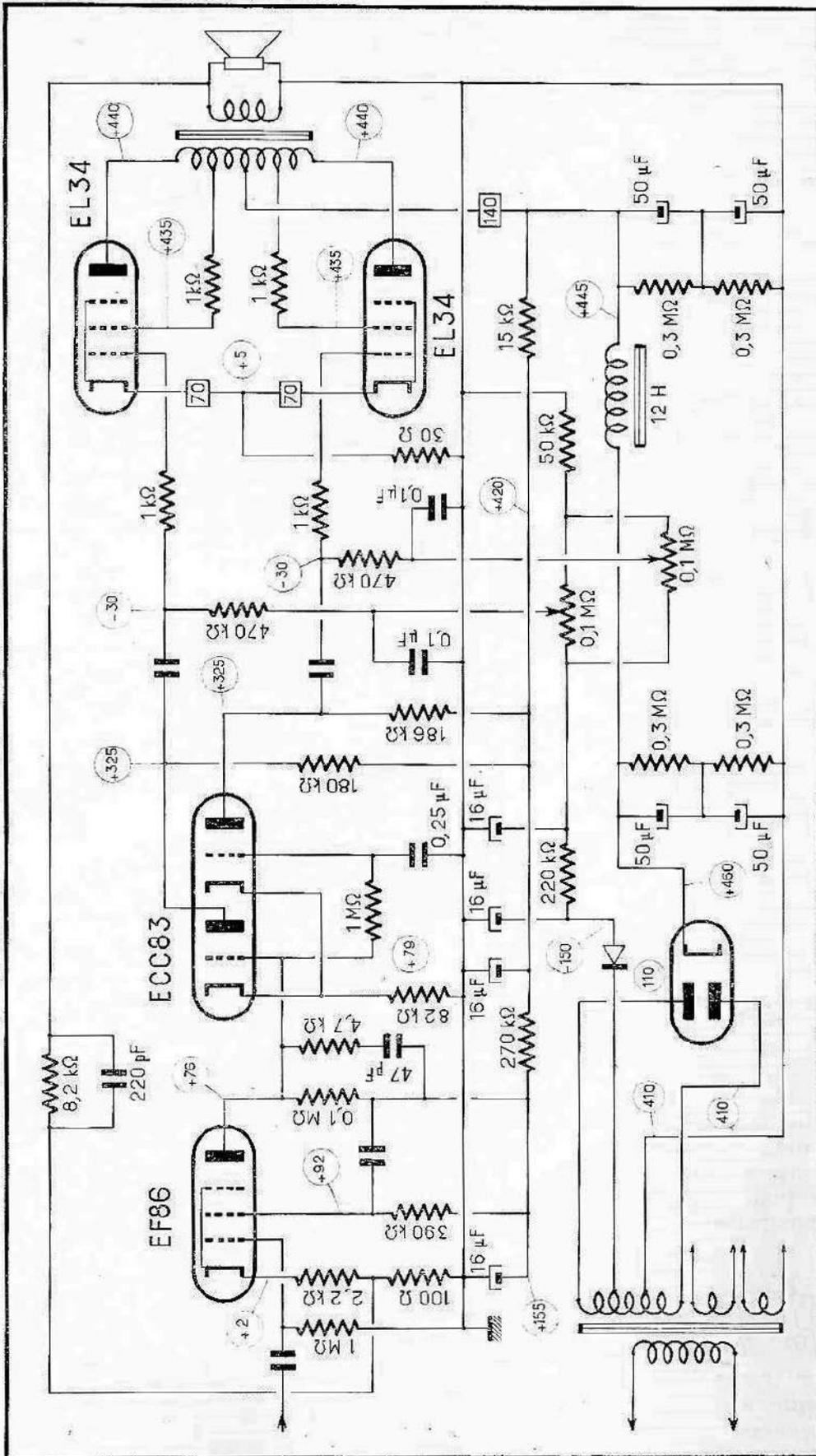


Fig. 312. — Amplificateur classique. Les tensions et intensités indiquées sont des valeurs moyennes. On peut admettre 10 % en plus ou en moins pour les tensions d'anode.

peut contrôler l'amplification à tous les points de l'installation et qui permette, en outre, de mesurer la puissance de sortie.

Ce signal est normalement fourni par un générateur B. F.

Pour un simple contrôle du réseau de distribution une seule fréquence, par exemple 1000 Hz, suffit.

Un générateur à fréquence fixe n'est pas bien compliqué et la figure 313 en montre un exemple.

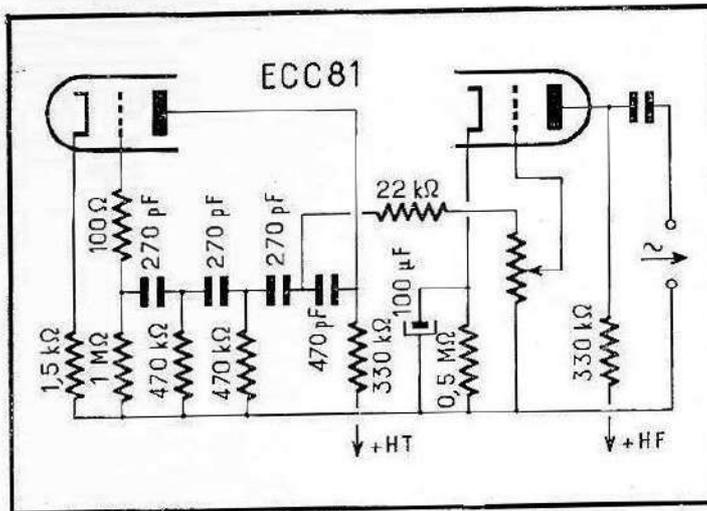
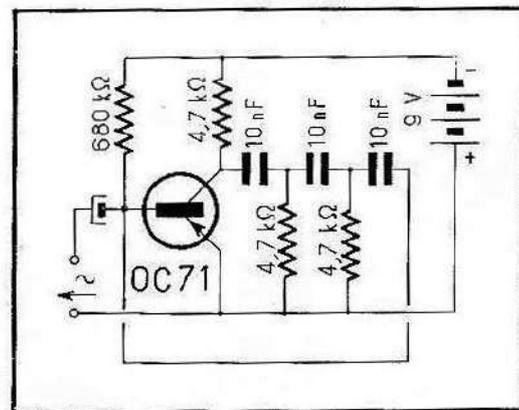


Fig. 313. — Générateur 1000 Hz à ligne de retard.

Fig. 314. — Générateur B. F. à transistors fournissant un signal d'environ 1000 Hz.



Cet appareil fournit un signal parfaitement sinusoïdal sous une tension de l'ordre d'un volt efficace.

Un appareil analogue est parfois installé à demeure dans la centrale d'un réseau de distribution de son.

La figure 314 donne le schéma d'une version transistorisée qui est d'un emploi plus commode pour les installations temporaires.

La mesure de la tension du signal à 1000 Hz en divers points de l'installation peut se faire à l'aide d'un simple voltmètre à redresseur ou d'un contrôleur universel.

3. — Mesures sur les amplificateurs.

a) BANDE PASSANTE.

Pour tracer la courbe de réponse d'un amplificateur ou d'un système quelconque, ainsi que pour se rendre compte de l'action du contrôle de ton, il est nécessaire d'utiliser un générateur B. F. réglable de façon continue entre 20 ou 30 Hz et 20 kHz environ.

Ce genre d'appareil est devenu aujourd'hui d'un prix très abordable grâce à l'utilisation de circuits RC. Des générateurs B. F. se trouvent sur le marché en pièces détachées (« Kits ») et sont très faciles à monter (fig. 315).

Un appareil de classe laboratoire n'est, en effet, pas nécessaire pour les travaux à effectuer par un installateur ou un usager de matériel d'amplification.

Pour toutes les mesures de tension ou d'intensité aux fréquences acoustiques il est conseillé d'utiliser un voltmètre électronique (fig. 316 et 317). Rares sont en effet les contrôleurs de qualité courante, si même il en existe, qui couvrent toute l'étendue du spectre sonore.

Le relèvement de la bande passante d'un amplificateur se fait en appliquant à l'entrée de l'amplificateur ou de la chaîne un signal dont on fait varier la fréquence depuis la plus basse jusqu'à la plus haute que le générateur puisse fournir, tout en maintenant son niveau rigoureusement constant à l'aide du voltmètre V_1 . Celui-ci est d'ailleurs contenu dans les générateurs d'une certaine classe (fig. 318).

Le haut-parleur ou le circuit d'utilisation est remplacé par une résistance de même valeur ohmique aux bornes de laquelle est branché le voltmètre V_2 . On lit sur celui-ci les variations de tension le long de la gamme,

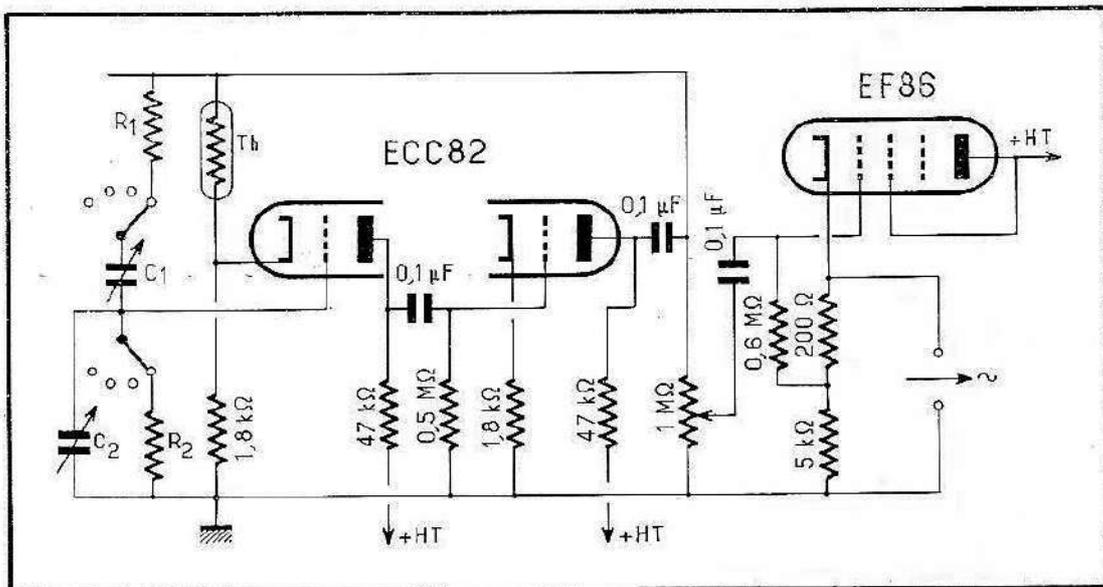


Fig. 315 (ci-dessus). — Générateur sinusoïdal type RC couvrant, en quatre gammes, l'ensemble du spectre sonore. Les fréquences sont déterminées par les résistances commutables R_1 et R_2 et les condensateurs variables C_1 et C_2 .

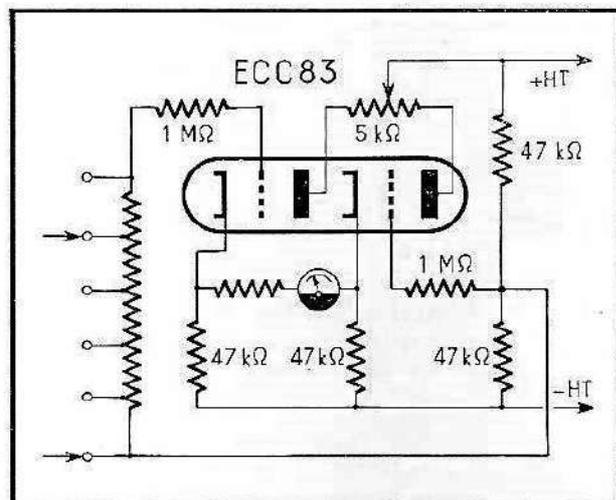


Fig. 316. — Schéma de principe d'un voltmètre électronique (VTVM en abrégé dans la documentation américaine ou anglaise).

ce qui permet de tracer, sur papier millimétré, une courbe représentative de la caractéristique en fréquence de l'amplificateur.

Pour ce travail il faut utiliser un signal d'entrée relativement faible, de manière à se maintenir loin de la puissance maximale de l'amplificateur, sous peine de fausser la mesure.

On peut recommencer l'opération avec différents réglages du contrôle de ton, pour se rendre compte de l'effet qu'il produit.

Un voltmètre étalonné en décibels permet de comparer la courbe tracée à celles qu'on trouve dans les documents techniques.

b) PUISSANCE.

Le même montage peut servir à déterminer la puissance maximale que l'amplificateur peut fournir sans atteindre un taux de distorsion inacceptable.

La résistance remplaçant le haut-parleur doit évidemment être capable de dissiper cette puissance.

La tension mesurée à ses bornes fournit la puissance par application de la formule :

$$W_0 = \frac{U^2}{R}$$

Pour mesurer la puissance utile d'un amplificateur, au lieu d'un simple voltmètre électronique, on utilise plus généralement un wattmètre (« output-meter » dans la littérature anglo-saxonne) dont la figure 319 montre le principe, et l'on opère à une fréquence de 400 ou de 1000 Hz.

c) DISTORSION.

La mesure précédente est sans grand intérêt si l'on ne détermine pas en même temps la distorsion, ce qui ne peut se faire convenablement qu'à l'aide d'un oscilloscope.

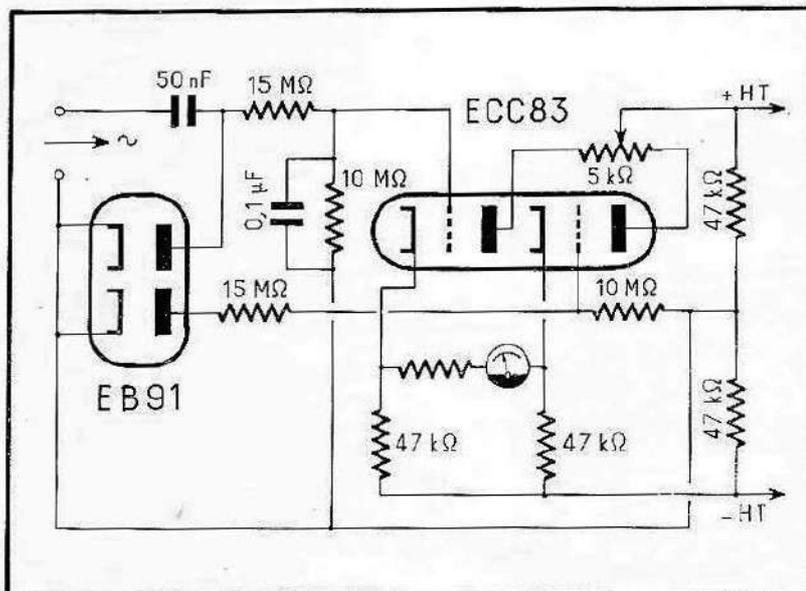


Fig. 317. — Voltmètre électronique muni d'un système redresseur pour les mesures en alternatif à toutes les fréquences acoustiques.

Malgré qu'il n'y ait apparemment en jeu que des fréquences relativement modestes, le choix de cet appareil n'est pas indifférent.

La matière sonore contient en effet, indépendamment des sons purs, des transitoires, et, en fait, un signal rigoureusement sinusoïdal est rarement présent dans une reproduction musicale.

Les générateurs décrits plus haut ne fournissent que des signaux sinusoïdaux. Pour juger des possibilités réelles d'un amplificateur ou d'un

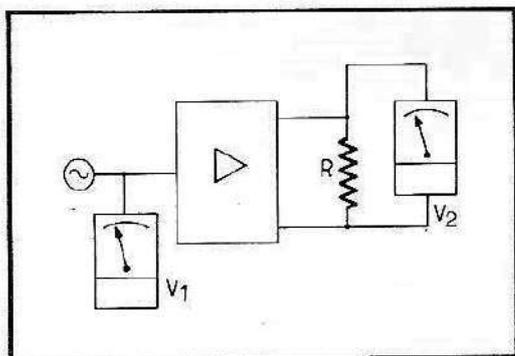


Fig. 318. — Mesure de la bande passante d'un amplificateur. Le niveau du signal entrant est contrôlé par le voltmètre V_1 et le niveau sortant par le voltmètre V_2 . R est une résistance remplaçant l'impédance de sortie (haut-parleur ou ligne).

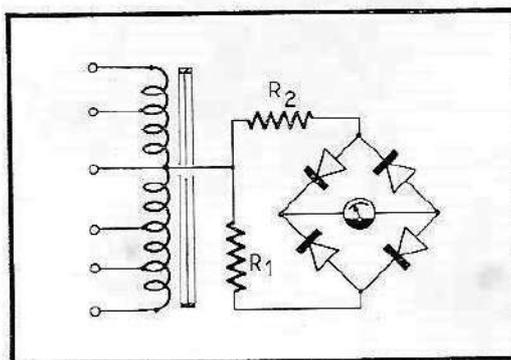


Fig. 319. — Principe d'un wattimètre de sortie. R_1 : résistance de charge. — R_2 : résistance (commutable) ajustant le calibre de l'appareil à la tension à mesurer.

ensemble on doit y faire passer des signaux rectangulaires, c'est-à-dire comportant des fronts raides, et il s'ensuit que l'oscilloscope, pour pouvoir reproduire ceux-ci correctement, doit avoir un temps de montée de tout au plus 0,1 microseconde.

Les signaux rectangulaires peuvent être obtenus à partir d'un générateur donnant des signaux sinusoïdaux en faisant passer ceux-ci à travers un circuit écrêteur.

Celui-ci peut être constitué par deux diodes qui décapitent les onduations sinusoïdales (fig. 320 a), ou une pentode sous-alimentée (b, c).

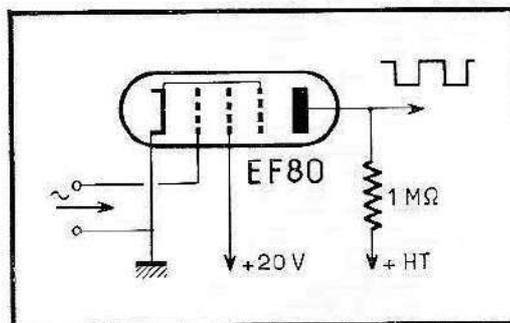
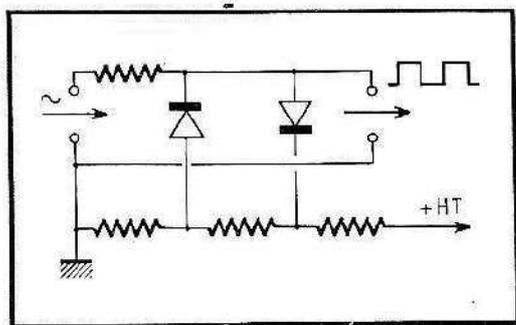
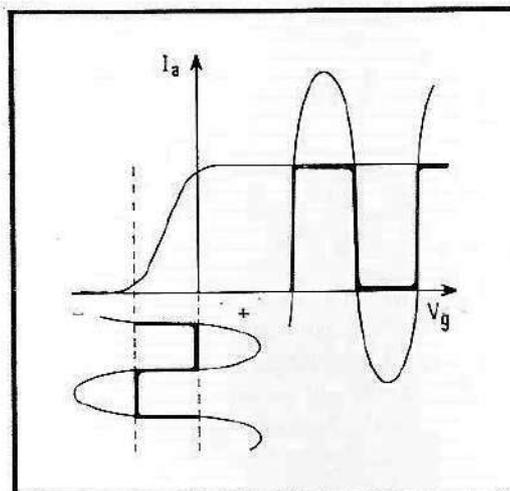


Fig. 320. — En a (ci-dessus), système écrêteur à diodes polarisées. — En b (ci-dessus, à droite), pentode sous-alimentée. — En c (ci-contre), caractéristique V_g/I_a résultante.



Dans ce montage la tension de grille-écran est très faible : 20 à 30 V par exemple, tandis que la résistance d'anode est très élevée, de l'ordre du mégohm.

Dans ces conditions chaque alternance négative du signal entrant fait tomber à zéro le courant d'anode, et chaque alternance positive qui amène la grille à la tension zéro par rapport à la cathode fait tomber à zéro la tension à l'anode.

Beaucoup de générateurs B. F. actuels contiennent un dispositif de ce genre et peuvent donc fournir au choix des signaux sinusoïdaux ou rectangulaires.

On peut d'autre part obtenir directement des signaux rectangulaires à l'aide du montage indiqué par la figure 321.

En combinant le générateur de signaux rectangulaires avec un voltmètre ou un wattmètre de sortie et un oscilloscope (fig. 322) on sera surpris de constater que les amplificateurs apparemment les plus soignés voient la puissance disponible *sans distorsion* diminuer rapidement en dessous de 200 Hz et au-dessus de 10 000 Hz (fig. 323).

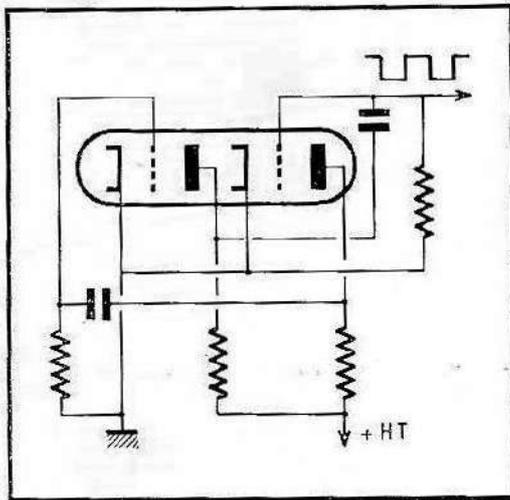
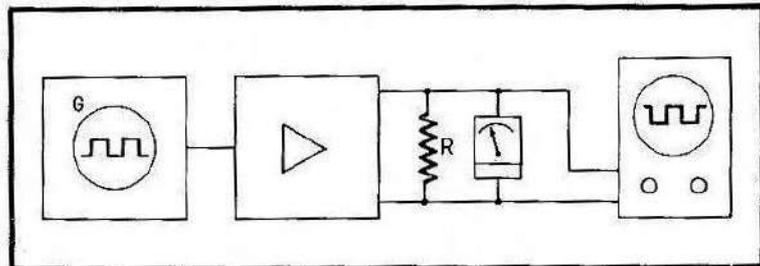


Fig. 321. — Multivibrateur produisant directement des signaux rectangulaires.

Fig. 322 a. — Contrôle de la distorsion dans un amplificateur. L'amplificateur reçoit du générateur G des signaux rectangulaires. La puissance de sortie mesurée aux bornes de la résistance R remplace le haut-parleur. La forme du signal est observée sur l'oscilloscope.



Certains auteurs, particulièrement aux U. S. A., préconisent, pour effectuer le contrôle de la distorsion, un signal en dents de scie qui, selon eux, fournit des informations plus complètes (fig. 324).

La figure 325 donne le schéma d'un générateur fournissant ce type de signal.

La distorsion peut aussi être mesurée au moyen d'un distorsiomètre.

Le principe de cet appareil, à travers lequel on fait passer le signal issu de l'amplificateur, consiste à éliminer la fréquence fondamentale à l'aide d'un filtre sélectif ou d'un pont (fig. 326 a) et à mesurer ce qui reste et qui n'est évidemment formé que d'harmoniques. La comparaison entre la tension totale et la tension restante donne le pourcentage global d'harmoniques (fig. 326 b).

Fig. 322 b. — En 1, forme régulière indiquant une distorsion nulle. — En 2, 3 et 4, formes correspondant à des distorsions.

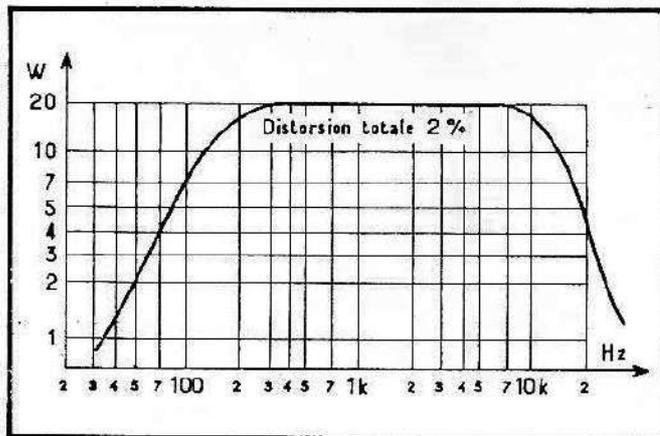
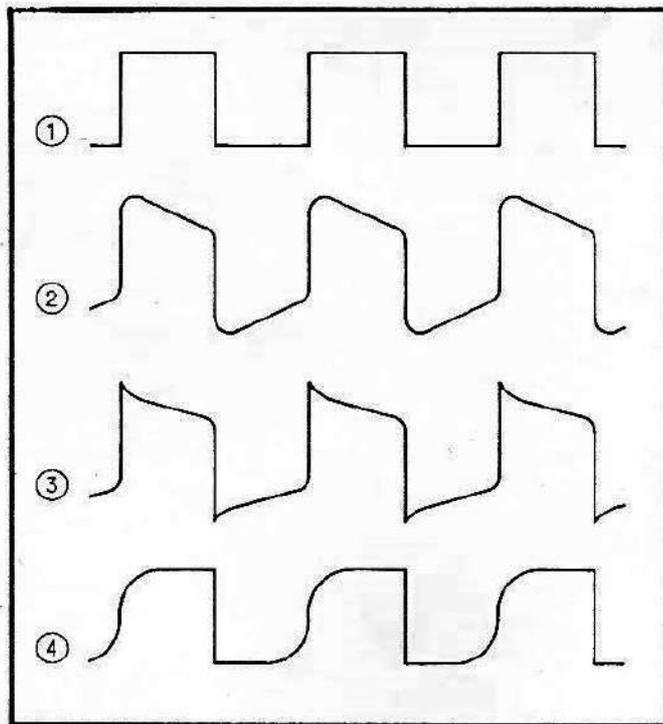


Fig. 323. — Courbe représentant la puissance, pour une distorsion totale de 2 %, qu'on peut tirer (à différentes fréquences) d'un amplificateur d'une puissance nominale de 30 W. On constate qu'à 50 Hz, la puissance disponible n'est plus que de 2 W. Vers le haut, l'amplificateur se comporte mieux. Les mesures ont été effectuées sur un amplificateur de très bonne réputation.

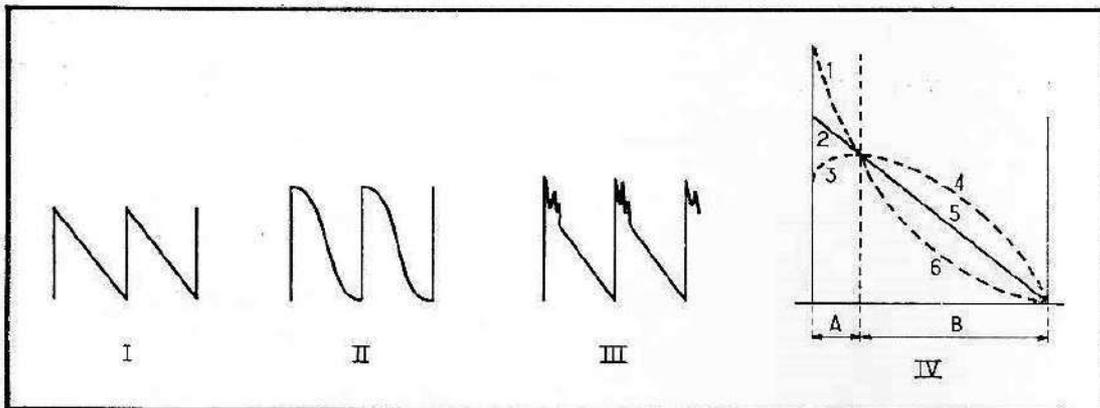


Fig. 324. — Signal B. F. en dents de scie. En I, forme normale. — En II, distorsion d'amplitude. — En III, manifestation d'une oscillation parasite à haute fréquence (contre-réaction mal réglée). — En IV, interprétation des déformations du signal : A) zone des fréquences élevées (1 : relèvement ; 2 : niveau constant ; 3 : abaissement). — B) zone des fréquences basses (4 : relèvement ; 5 : niveau constant ; 6 : abaissement).

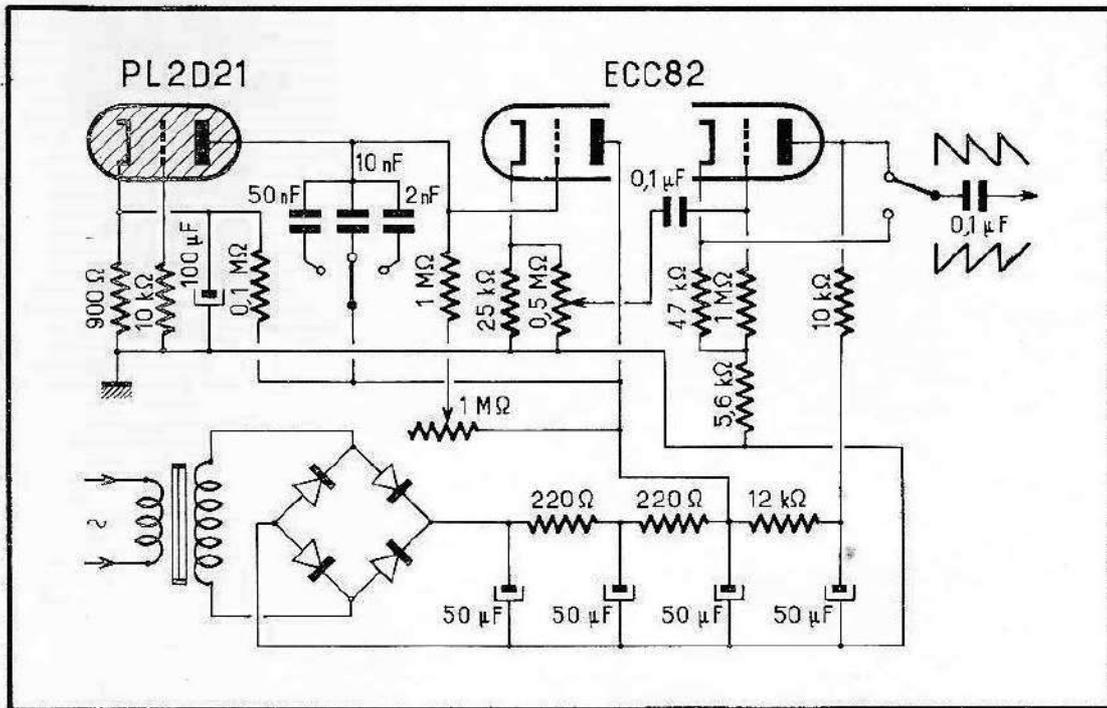


Fig. 325. — Schéma d'un générateur de signaux en dents de scie. Le même système est utilisé dans la base de temps de certains oscilloscopes.

On peut considérer que celui-ci ne doit pas dépasser 2 % pour une reproduction de qualité moyenne.

Pour la haute fidélité on doit être plus exigeant.

Le distorsiomètre ne fournit pas des renseignements aussi complets que l'analyse au moyen d'un oscilloscope.

Il nous reste à signaler que si l'on veut contrôler l'intermodulation il faut introduire simultanément dans l'amplificateur deux signaux et par conséquent utiliser deux générateurs B. F., ou bien un générateur spécial à double fréquence qui est un appareil fort coûteux (fig. 327).

Le réseau formé par $C_1 - C_2 - L_1 - C_3 - C_4$ et L_2 constitue deux filtres dont le premier est un passe-haut et l'autre un passe-bas.

On mesure d'abord la tension U_1 du signal entrant et celle du signal sortant de l'amplificateur U_2 , ensuite la tension U_3 à la sortie du réseau et la tension U_4 détectée par la diode D après le premier filtre.

La distorsion d'intermodulation est donnée par la formule :

$$\% \text{ de distorsion} = \frac{100 U_3}{U_4}$$

d) IMPEDANCE.

Pour vérifier si un réseau de distribution de son comprenant de nombreux haut-parleurs est adapté à l'impédance de l'amplificateur, on choisit une *tension d'adaptation* : généralement 100 V.

On place aux bornes de sortie une résistance de la valeur prévue, par exemple 500 ohms. On fournit à l'amplificateur un signal de 1000 Hz dont on règle le niveau pour obtenir 100 volts aux bornes de la résistance. Celle-ci est alors remplacée par le circuit d'utilisation.

On raccorde ensuite aux transformateurs de ligne des résistances correspondant à l'impédance des haut-parleurs en choisissant les prises qui per-

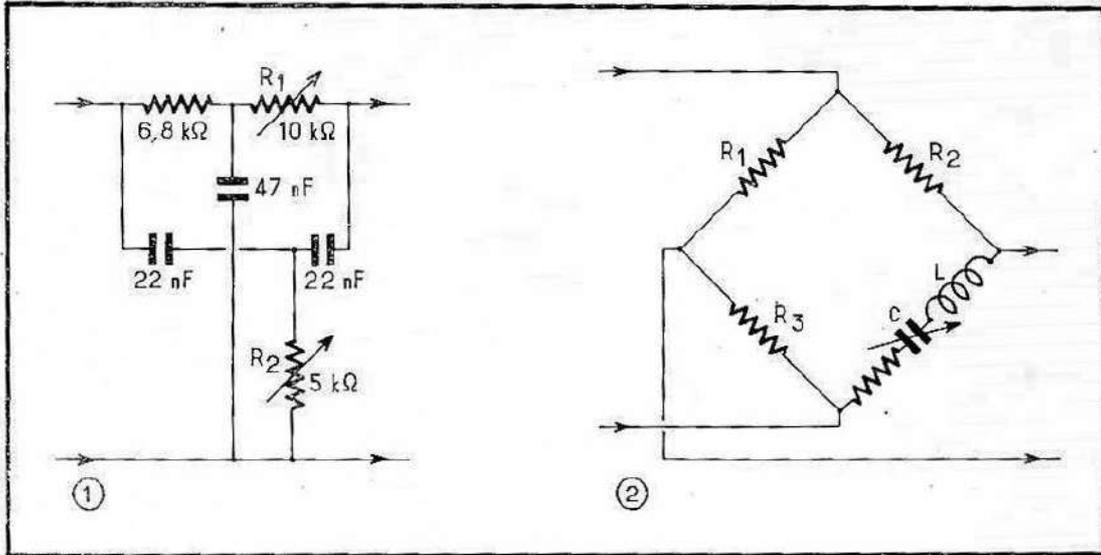


Fig. 326. — Principe du distorsiomètre.

En a (ci-dessus), filtres sélectifs : 1) en double T. On varie la fréquence en réglant R_1 et R_2 . — 2) en pont. La fréquence dépend du réglage de C.

En b (ci-dessous), mesure de la distorsion totale : 1) générateur sinusoïdal à 1000 Hz. — 2) amplificateur à contrôle. — 3) filtre sélectif. — 4) amplificateur de sortie. — 5) voltmètre électronique.

Un distorsiomètre comprend les appareils 3, 4 et 5 réunis dans le même coffret.

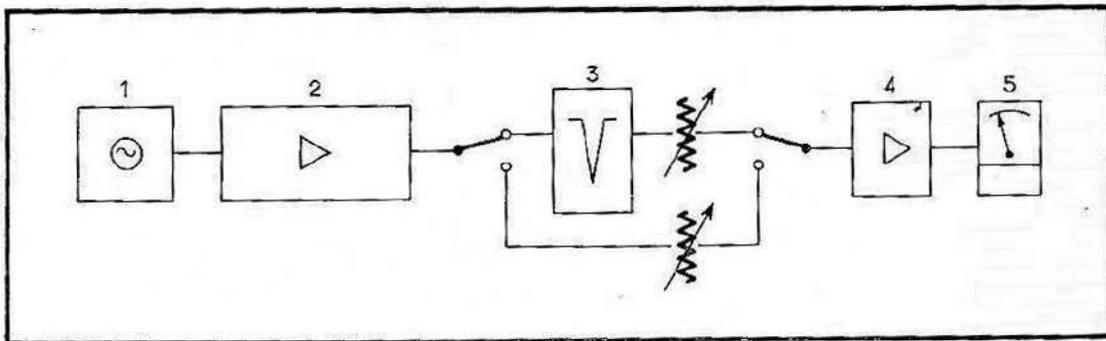
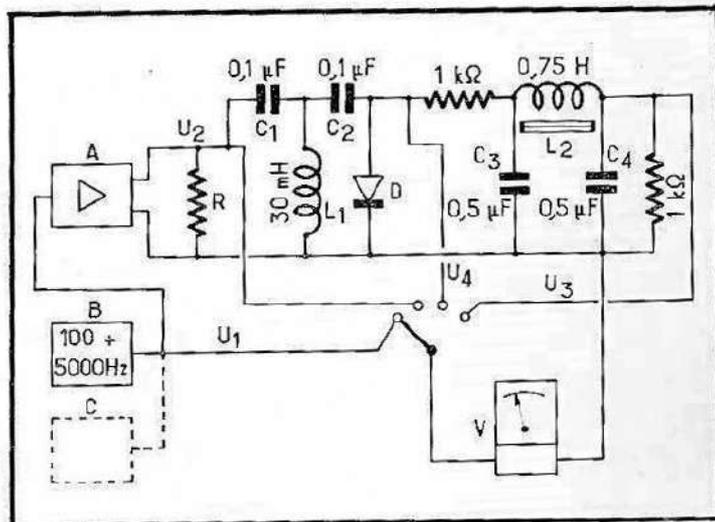


Fig. 327. — Mesure de la distorsion d'intermodulation. A : amplificateur à contrôle. — B : générateur à deux signaux. — C : générateur supplémentaire à utiliser lorsqu'on ne dispose pas d'un générateur à deux signaux. — D : détecteur. — R : résistance de charge. — V : voltmètre électronique. L'ensemble C_1, C_2, L_1 forme un filtre passe-haut et l'ensemble C_3, C_4, L_2 un filtre passe-bas.



mettent de retrouver une tension aussi proche que possible de 100 V à la sortie de l'amplificateur. Celui-ci est alors pratiquement adapté à l'impédance globale du réseau de distribution.

Finalement on enlève les résistances et on les remplace par les haut-parleurs, après quoi on fait un dernier essai.

4. — Vérification des composants.

Il peut être nécessaire de vérifier individuellement des composants, d'abord pour s'assurer de leur état, mais aussi, éventuellement, pour déterminer leurs caractéristiques lorsque les indications concernant celles-ci ont disparu.

Un contrôleur universel de bonne qualité, que chaque installateur ou technicien de service devrait posséder ou dont il devrait pouvoir disposer, permet de trouver avec une précision suffisante la valeur d'une résistance ou la capacité d'un condensateur.

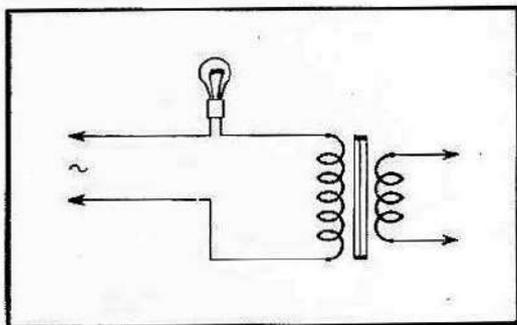


Fig. 328. — Méthode rudimentaire pour contrôler une bobine à fer. L'éclat de la lampe est un mauvais signe.

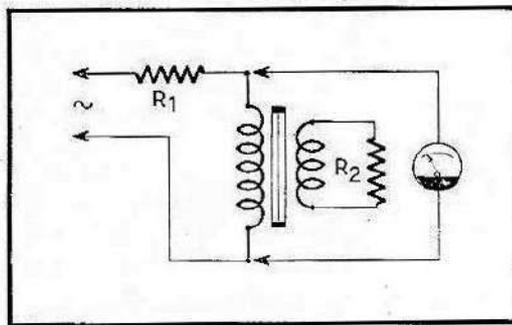


Fig. 329. — Méthode plus précise pour le même contrôle. R_1 doit avoir approximativement la même valeur que l'impédance présumée du primaire. R_2 équivaut à la charge qui serait normalement connectée au secondaire.

Pour se rendre compte de l'état de santé d'un transformateur il existe un moyen rudimentaire qui consiste à placer le primaire, ou le secondaire H. T. s'il s'agit d'un transformateur d'alimentation, en série avec une lampe d'éclairage de 40 watts et le secteur. Si le transformateur est normal, la lampe doit à peine rougir. Si elle brille d'un vif éclat, c'est qu'il y a des spires en court-circuit : le transformateur est hors service (fig. 328).

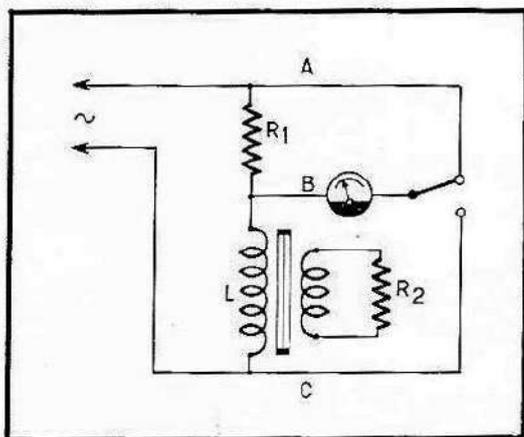


Fig. 330. — Dans ce montage, l'impédance du primaire est comparée à une résistance R_1 de valeur connue. R_2 est la résistance de charge du secondaire.

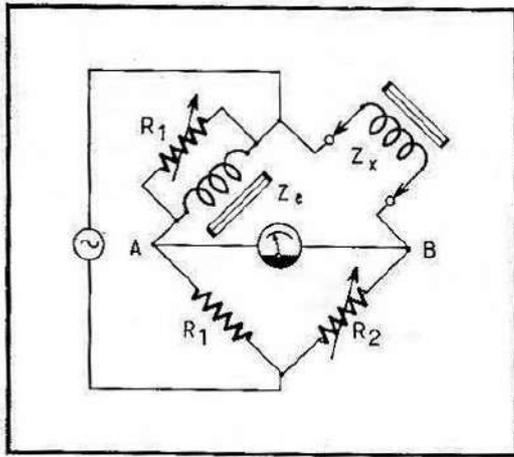


Fig. 331. — Mesure des impédances par la méthode du pont.

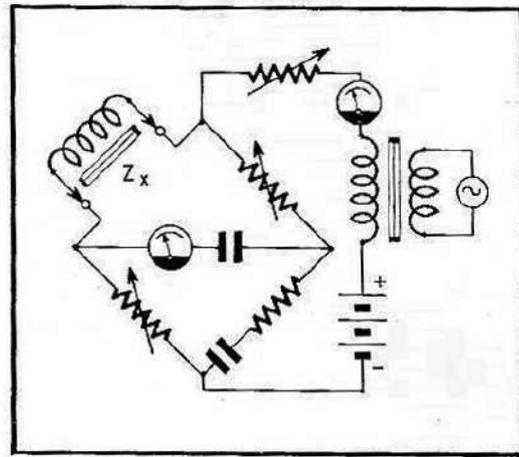


Fig. 332. — Mesure des impédances avec superposition d'un courant continu d'intensité réglable.

Un autre moyen consiste à mettre l'enroulement à vérifier en série avec une résistance (5000 Ω pour les transformateurs de sortie, 20 000 Ω pour les transformateurs de couplage) (fig. 329). Au moyen d'un voltmètre alternatif on mesure alors la tension aux bornes de l'enroulement.

Si le transformateur est sain elle sera, à peu de chose près, égale à celle du secteur. Elle sera au contraire relativement faible si le transformateur est défectueux.

La tension mesurée à l'autre enroulement permet de trouver le rapport de transformation. Rappelons que le rapport des tensions est égal au rapport du nombre de spires :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{S_1}{S_2}$$

Pour déterminer grossièrement l'impédance d'une bobine à fer on la compare avec une résistance de valeur connue (fig. 330). R_1 correspond à la valeur présumée de l'impédance. Quand on fait passer le courant du secteur à travers l'ensemble LR, on doit trouver entre A et B et entre B et C des tensions très voisines. Si tel n'est pas le cas, il faut chercher pour R_1 une autre valeur jusqu'à ce que ce résultat soit obtenu. Pour cette mesure le secondaire doit être connecté à une résistance dont la valeur correspond à celle du circuit d'utilisation.

On n'obtient toutefois par ce moyen que la valeur de l'impédance à la fréquence de 50 Hz. Si l'on veut voir ce qui se passe à d'autres fréquences il faut évidemment remplacer le secteur par un générateur B. F.

Les mesures ci-dessus ne donnent pas d'informations sur les diverses pertes, mais il ne s'agit ici que de dépannage ou de vérification.

La mesure précise d'un transformateur ne peut s'effectuer qu'au moyen d'un pont de mesure.

La figure 331 montre le principe d'un pont pour la mesure des impédances.

L'élément inconnu Z_x est en quelque sorte « pesé » par comparaison avec un élément de même nature Z_e servant d'étalon.

On équilibre le pont en réglant la résistance variable R_2 jusqu'au moment où l'instrument indicateur montre qu'il ne passe plus aucun courant entre A et B.

La valeur de Z_x se déduit de la relation :

$$\frac{Z_x}{Z_c} = \frac{R_1}{R_2}$$

d'où :

$$Z_x = Z_c \frac{R_1}{R_2}$$

Comme une bobine à fer ou un transformateur présente toujours une résistance ohmique appréciable qui influe sur la précision de la mesure, on la compense par la résistance R_2 à l'aide de laquelle on parfait l'équilibre.

Le pont est alimenté en courant alternatif.

On peut employer à cet effet le courant du secteur à 50 Hz, mais dans les appareils qu'on trouve dans le commerce la fréquence est généralement plus élevée : 1000 Hz, par exemple.

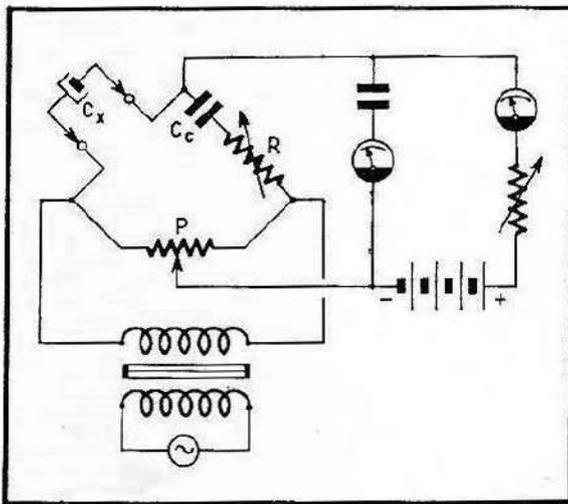


Fig. 333. — Mesure des condensateurs électrolytiques en Y superposant une tension continue réglable. C_c est le condensateur étalon.

Un générateur incorporé fournit le courant nécessaire.

Les bobinages que l'on peut devoir mesurer dans la technique de l'amplification sonore sont les transformateurs et les bobines de filtrage.

Ces dernières, ainsi que les transformateurs de sortie, sont normalement traversés par un courant continu plus ou moins intense.

Pour que la mesure soit correcte il faut les placer dans les conditions normales de fonctionnement.

La figure 332 montre le principe d'un pont dans lequel un courant continu réglable et mesurable est superposé à la tension alternative.

Les condensateurs électrolytiques se détériorent avec le temps et sont une fréquente cause de panne dans les amplificateurs.

D'une part, en vieillissant ils perdent graduellement leur capacité, et d'autre part, le courant de fuite a tendance à augmenter.

On peut mesurer les condensateurs électrolytiques au moyen d'un pont analogue à celui que nous venons de décrire (fig. 333). Une tension continue réglable leur est appliquée.

La résistance R est étalonnée en % et permet de mesurer le facteur de puissance, autrement dit le rendement du condensateur en tant qu'élément de filtrage.

MESURES ACOUSTIQUES.

Les caractéristiques acoustiques d'un lieu ou d'une salle ne peuvent s'apprécier correctement sans effectuer des mesures.

Celles-ci sont nécessaires particulièrement pour se rendre compte de l'effet produit par l'un ou l'autre revêtement et pour pouvoir effectuer les corrections nécessaires.

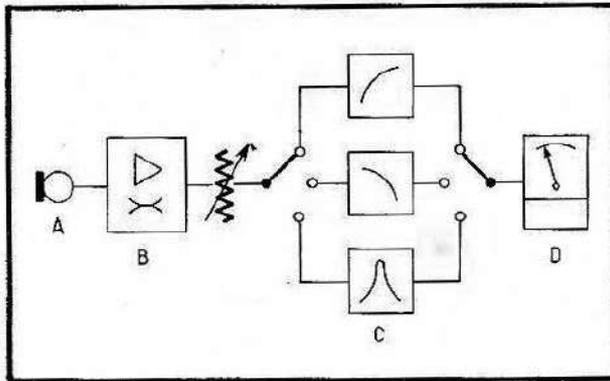
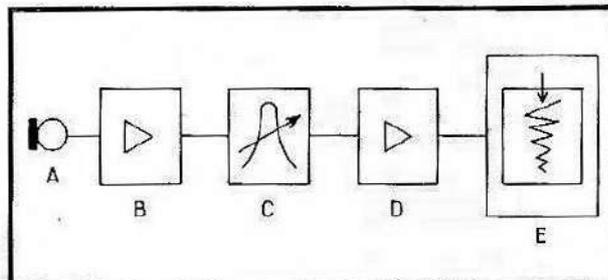


Fig. 334. — Principe du sonomètre. A : microphone. — B : amplificateur avec réglage facultatif de tonalité. — C : série de filtres permettant une analyse du bruit. — D : voltmètre électronique étalonné en décibels.

Fig. 335. — Principe de la mesure du temps de réverbération. A : microphone. — B : amplificateur. — C : filtre réglable. — D : amplificateur. — E : oscillographe enregistreur ou oscilloscope avec tube à longue persistance.



D'autre part, il est également nécessaire de mesurer en plusieurs endroits le niveau sonore produit par une installation d'amplification. Ce contrôle est particulièrement important en plein air.

On doit aussi, lorsqu'il s'agit d'installer un système d'appel ou de diffusion dans des endroits bruyants, mesurer le niveau moyen du bruit ambiant qu'il s'agit de couvrir.

La mesure du bruit ou du son se fait au moyen d'un *sonomètre* dont la figure 334 indique le principe.

Cet appareil comprend un microphone branché sur un amplificateur dont la sortie s'effectue sur un instrument de mesure gradué en décibels.

Les sonomètres ont généralement un contrôle de tonalité permettant d'obtenir une caractéristique de réponse selon la courbe Fletcher-Munson.

De plus ils comprennent souvent des filtres sélectifs permettant une analyse approximative de la composition du bruit.

Pour mesurer le temps de réverbération l'appareillage est plus compliqué et on emploie plusieurs méthodes.

La plus instructive se fait en utilisant un microphone suivi d'un amplificateur qui alimente un oscillographe enregistreur (fig. 335) ou, mieux encore, un oscilloscope muni d'un tube cathodique à longue persistance.

BIBLIOGRAPHIE

- R. BESSON. — *Théorie et pratique de l'amplification B. F.* (Editions techniques et Vulgarisations, Paris).
- R. BESSON. — *Toute la stéréophonie* (Editions Radio, Paris).
- G. A. BRIGGS. — *Haut-parleurs* (Editions Radio, Paris).
- G. A. BRIGGS. — *Reproduction sonore à haute fidélité* (Editions Radio, Paris).
- H. BURRELL-HADDEN. — *High quality sound, production and reproduction* (Iliffe et Sons, London).
- Carl G. DIETSCH. — *Broadcasting (radio engineering handbook)* (McGraw-Hill, New York).
- Marthe DOURIAU. — *Les disques et leur reproduction phonographique* (Librairie de la Radio, Paris).
- Marthe DOURIAU. — *La construction des petits transformateurs* (Librairie de la Radio, Paris).
- Alexander M. GEORGIEV. — *The electrolytic capacitor* (Murray Hill, New York).
- A. E. GREENLEES. — *The amplification and distribution of sound* (Chapman et Hall, Londres).
- X... — *Les secrets de l'amplification à haute fidélité* (Editions Radio, Paris).
- P. HEMARDINQUER. — *Les nouveaux procédés magnétiques* (Librairie de la Radio, Paris).
- Keith HENNEY. — *Radio engineering handbook* (McGraw-Hill, New York).
- Hugh S. KNOWLES. — *Loud speakers and room acoustics* (McGraw-Hill, New York).
- R. MIQUEL. — *Technique moderne du cinéma sonore* (Editions Radio, Paris).
- J. P. ŒHMICHEN. — *Emploi rationnel des transistors* (Editions Radio, Paris).
- J. RIETHMULLER. — *Pratique de la haute fidélité* (Editions Radio, Paris).
- H. SCHREIBER. — *Appareils à transistors* (Editions Radio, Paris).
- H. SCHREIBER. — *Technique et application des transistors* (Editions Radio, Paris).
- D. L. A. SMITH. — *Principles of High-Fidelity Sound Engineering* (Isaac Pitman, Londres).
- M. G. SCROGGIE. — *Technique de la radio* (Editions Radio, Paris).
- D. A. SNEL. — *Enregistrement magnétique du son* (Bibliothèque Technique Philips).
- F. E. TERMAN. — *Radio engineers handbook* (McGraw-Hill, New York).
-

FORMULES ET TABLEAUX DIVERS

I. - Formules se rapportant aux amplificateurs

1) AMPLIFICATION FOURNIE PAR UNE INSTALLATION.

$$A \text{ (en db)} = 10 \log \frac{W_2}{W_1} \quad (1)$$

W_1 : puissance à l'entrée en watts.

W_2 : puissance à la sortie en watts.

$$A \text{ (en db)} = 20 \log \frac{V_2}{V_1} \quad (2)$$

$$A \text{ (en db)} = 20 \log \frac{I_2}{I_1} \quad (3)$$

V_1 : tension d'entrée en volts.

V_2 : tension de sortie en volts.

I_1 : intensité d'entrée en milliampères.

I_2 : intensité de sortie en milliampères.

(2) et (3) ne s'appliquent qu'à des systèmes où l'impédance d'entrée et l'impédance de sortie sont égales.

Si leur valeur n'est pas la même, on calcule, dans chaque cas, la puissance au moyen d'une des formules :

$$W = I \times V$$

$$W = \frac{V^2}{Z}$$

$$W = I^2 \times Z$$

2) NIVEAUX ZERO USUELS DES ECHELLES EN DB.

Pour les installations d'amplification : 0,006 watt.

Pour les mesures acoustiques : 10^{-16} W par cm^2 .

Pour les microphones : 1 volt de tension de sortie à circuit ouvert pour 1 dyne par cm^2 .

3) CALCUL DES AMPLIFICATEURS.

Amplification fournie par un étage à résistances :

a) Triode :

$$A = \frac{\mu \times R_a}{R_a + R_i}$$

μ : coefficient d'amplification de la lampe.

R_a : résistance de charge.

R_i : résistance interne de la lampe.

b) Pentode :

$$A = \frac{S \times R_a \times R_i}{1000 (R_a + R_i)}$$

S : pente en mA/V.

4) ADAPTATION DE PLUSIEURS HAUT-PARLEURS.

$$Z_h = \frac{W_{tot} \times Z_a}{W_h}$$

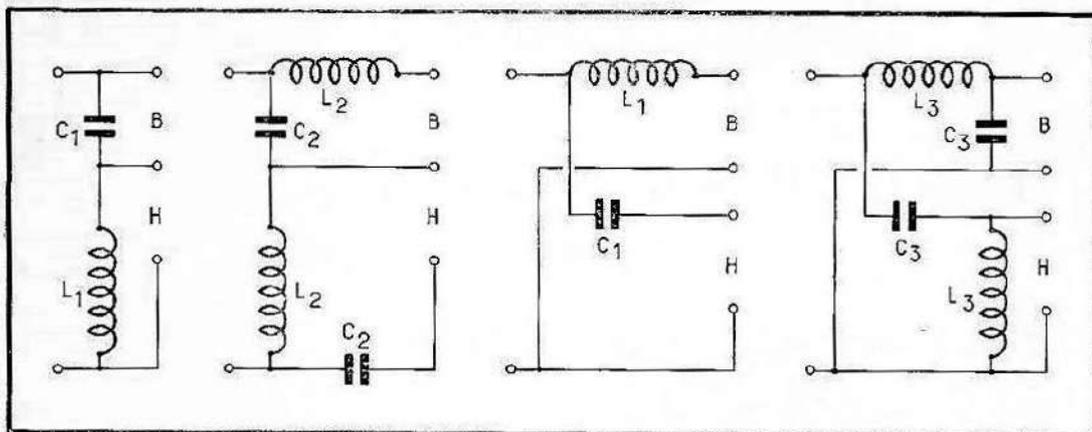
Z_h : impédance d'un haut-parleur.

Z_a : impédance de sortie de l'amplificateur.

W_{tot} : puissance fournie par l'amplificateur.

W_h : puissance désirée dans le haut-parleur.

5) FILTRES SEPARATEURS.



$$C_1 = \frac{1}{2 \pi f_c R_0} \text{ F.}$$

$$C_2 = \frac{228.000}{f_c R_0} \mu\text{F.}$$

$$C_3 = \frac{114.000}{f_c R_0} \mu\text{F.}$$

$$L_1 = \frac{R_0}{2 \pi f_c} \text{ H.}$$

$$L_2 = \frac{114 R_0}{f_c} \text{ mH.}$$

$$L_3 = \frac{228 R_0}{f_c} \text{ mH.}$$

R_0 = impédance combinée des deux haut-parleurs.

f_c = fréquence de coupure.

II. - Calcul de la puissance nécessaire

1) LOCAUX CALMES.

$$W_m = \frac{\text{capacité de la salle en m}^3}{a \times T \times \text{rendement du haut-parleur en \%}} \quad (1)$$

W_m : puissance maximum que l'amplificateur doit fournir.

a : facteur variable entre 8 et 24, suivant la nature du son amplifié (parole seule, musique, etc.).

T : temps de réverbération en secondes.

Le rendement des haut-parleurs ordinaires varie entre 1 et 5 % (voir chapitre XI).

2) *LOCAUX BRUYANTS.*

$$W_m = \frac{\text{capacité de la salle en m}^3 \times b}{a \times \text{rendement des haut-parleurs en \%}} \quad (2)$$

a est compris entre 10 et 50 suivant la nature du son amplifié.

b est un facteur variable dépendant de la rumeur d'ambiance et du temps de réverbération pour autant que ce dernier soit compris entre 2 et 15 secondes. Sa valeur est donnée par le tableau ci-après :

Temps de réverbération	Faible rumeur d'ambiance			Forte rumeur d'ambiance		
	Long	Moyen	Court	Long	Moyen	Court
Parole	1	2	4	2	3	5
Musique de concert	2	3	5	3	4	4
Musique de danse	2	7	10	7	10	15

3) *PLEIN AIR.*

$$W_m = \frac{\text{superficie en m}^2 \times b}{a \times \text{rendement des haut-parleurs en \%}}$$

a : compris entre 20 et 100.

b : de 4 à 15 (valeur moyenne 5 pour la parole et 10 pour la musique).

$$W_m = \frac{\text{nombre d'auditeurs} \times b}{a \times \text{rendement des haut-parleurs en \%}}$$

a : compris entre 60 et 300.

b : de 4 à 15 comme ci-dessus.

Formule simplifiée :

$$W_m = \frac{\text{nombre d'auditeurs}}{60}$$

Cette dernière formule convient pour une installation comprenant un grand nombre de haut-parleurs uniformément distribués sur le terrain.

III. - Formules et renseignements concernant les transformateurs de sortie

1) *RAPPORT DE TRANSFORMATION.*

$$T = \frac{\text{nombre de tours au primaire}}{\text{nombre de tours au secondaire}} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

$$V_2 = T \times V_1$$

$$I_2 = \frac{I_1}{T}$$

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2}$$

$$Z_2 = \frac{T \times V_1}{I_1/T} = \frac{T^2 \times V_1}{I_1}$$

$$Z_2 = T^2 \times Z_1$$

$$Z_1 = \frac{Z_2}{T^2}$$

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1}$$

2) SECTION DU NOYAU DES TRANSFORMATEURS DE SORTIE.

Section en cm^2 pour une puissance donnée :

$$S = \sqrt{\frac{W_m \times G \times 10^6}{f \times B \times D}}$$

G : rapport en poids cuivre/fer, normalement 1,5.

f : fréquence la plus basse à reproduire, 30 Hz pour les transformateurs de qualité.

B : induction magnétique en gauss.

D : densité de courant en A/mm^2 de section de fil.

Formule simplifiée pour transformateurs courants :

$$S = 2 \sqrt{W_m}$$

Dimensions courantes suivant la formule ci-dessus :

W_m (watts)	S (cm^2)	W_m (watts)	S (cm^2)
3	3,5	20	9
5	4,5	25	10
10	6,3	30	12
15	7,8	50	14

3) DETERMINATION DU NOMBRE DE TOURS.

$$n = \frac{10^8 \cdot 2}{\omega \times B \times S}$$

n : nombre de tours par volt.

$$\text{section du fil } d = \frac{I}{D} \text{ mm}^2$$

$$\text{diamètre du fil} = \frac{4d}{\pi} = \frac{4I}{\pi D} = \frac{1,27 I}{D} \text{ mm}$$

I : courant en ampères.

d : section du fil en mm^2 .

D : densité de courant en A/mm^2 .

= 1 à 1,5 pour transformateurs B. F.

= 1,5 à 2,5 pour transformateurs d'alimentation

4) RESISTANCE ET POIDS DU FIL EMAILLE POUR TRANSFORMATEURS.

Diamètre du fil nu - mm	Diamètre avec émail - mm	Section mm ²	Poids par m	Résistance par 100 m
0,05	0,08	0,00196	0,021	908
0,07	0,10	0,0038	0,040	468
0,08	0,115	0,0050	0,050	356
0,10	0,138	0,0078	0,080	228
0,12	0,163	0,0113	0,115	158
0,15	0,200	0,0177	0,18	100
0,18	0,236	0,0254	0,26	70
0,20	0,259	0,0314	0,30	57
0,22	0,282	0,038	0,38	47
0,25	0,316	0,05	0,49	36
0,28	0,35	0,06	0,6	29
0,30	0,37	0,07	0,7	25
0,35	0,43	0,10	0,95	18,5
0,40	0,49	0,12	1,2	14
0,45	0,54	0,16	1,5	11
0,50	0,60	0,2	1,9	9
0,60	0,70	0,28	2,7	6,3
0,70	0,80	0,38	4,6	3,6
0,80	0,90	0,50	5	3,5
0,90	1,00	0,64	6	2,8
1,00	1,13	0,78	7,5	2,3
1,20	1,35	1,10	10,00	1,6
1,50	1,65	1,75	16,00	1,00
2,00	2,20	3,15	30,00	0,56
2,50	2,80	5,00	46,00	0,35

5) PERTES DANS LE FER.

Rapport entre l'induction magnétique et les pertes dans le fer :

Induction en gauss	Perte par kg de fer (watts)	Induction en gauss	Perte par kg de fer (watts)
1000	0,25	10 000	3,4
2000	0,35	11 000	4
3000	0,6	12 000	5
4000	0,8	13 000	6
5000	1,15	14 000	7
6000	1,5	15 000	8
7000	1,9	16 000	9
8000	2,4	17 000	11
9000	2,8	20 000	14

Pour les transformateurs de couplage, l'induction est ordinairement de 2000 à 3000 gauss, pour les transformateurs de sortie 8000 à 10 000 gauss et pour les transformateurs d'alimentation environ 12 000 gauss.

On s'arrange normalement pour que les pertes dans le cuivre et les pertes dans le fer soient à peu près égales.

6) TRANSFORMATEURS D'ADAPTATION A PRISES.

Réduction désirée dB	Tension ou nombre de tours %	Impédance du primaire
0	100	100
3	70,7	200
6	50	400
9	35,3	800

IV. - Renseignements d'intérêt général*RELATIONS ENTRE DECIBELS, RAPPORTS DE PUISSANCE
ET RAPPORTS DE TENSIONS OU D'INTENSITES*

$$N = 10 \log \frac{P_2}{P_1} = 20 \log \frac{V_2}{V_1} = 20 \log \frac{I_2}{I_1}$$

dB	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{V_2}{V_1}$ ou $\frac{I_2}{I_1}$	dB	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{V_2}{V_1}$ ou $\frac{I_2}{I_1}$
0	1,00	1,00	16	40	6,3
1	1,26	1,12	18	63	7,9
2	1,59	1,26	20	100	10,0
3	2,00	1,59	22	160	12,6
4	2,5	1,59	24	250	16,0
5	3,2	1,78	26	400	20
6	4,0	2,00	28	630	25
7	5	2,24	30	1 000	32
8	6,3	2,51	32	1 590	40
9	7,9	2,82	34	2 510	50
10	10	3,16	36	3 980	63
12	16	4,0	38	6 310	79
13	20	4,5	40	10 000	100
14	25	5,0	45	31 600	178
			50	100 000	316

CODE DE COULEURS DES RESISTANCES

Premier chiffre : corps	Deuxième chiffre : bout	Derniers chiffres : point
0 - noir	0 - noir	rien - noir
1 - brun	1 - brun	0 - brun
2 - rouge	2 - rouge	00 - rouge
3 - orange	3 - orange	000 - orange
4 - jaune	4 - jaune	0000 - jaune
5 - vert	5 - vert	00000 - vert
6 - bleu	6 - bleu	000000 - bleu
7 - violet	7 - violet	
8 - gris	8 - gris	
9 - blanc	9 - blanc	

RAPPORT ENTRE DECIBELS, WATTS ET VOLTS

I

Niveau de référence 0 dB = 1 mW dans 600 ohms		dB	Niveau de référence 0 dB = 6 mW dans 500 ohms	
Watts	Volts		Watts	Volts
0,001 000	0,774 6	0	0,006 000	1,732 0
0,001 585	0,975 2	+ 2	0,009 509	2,181
0,002 512	1,228	+ 4	0,015 07	2,745
0,003 981	1,546	+ 6	0,023 89	3,456
0,006 310	1,946	+ 8	0,037 86	4,351
0,010 00	2,449	+ 10	0,060 00	5,477
0,015 85	3,084	+ 12	0,095 09	6,895
0,025 12	3,882	+ 14	0,150 7	8,681
0,039 81	4,887	+ 16	0,238 9	10,93
0,063 10	6,153	+ 18	0,378 6	13,76
0,100 0	7,746	+ 20	0,600 0	17,32
0,158 5	9,752	+ 22	0,950 9	21,81
0,251 2	12,28	+ 24	1,507	27,45
0,398 1	15,46	+ 26	2,389	34,56
0,631 0	19,46	+ 28	3,786	43,51
1,000	24,49	+ 30	6,000	54,77
1,585	30,84	+ 32	9,509	68,95
2,512	38,82	+ 34	15,07	86,81
3,981	47,87	+ 36	23,89	109,3
6,310	61,53	+ 38	37,86	137,6
10,00	77,46	+ 40	60,00	173,2
15,85	97,52	+ 42	95,09	218,1
25,12	122,8	+ 44	150,4	274,5
39,81	154,6	+ 46	238,9	345,6
63,10	194,6	+ 48	378,6	435,1
100,0	244,9	+ 50	600,0	547,7
158,5	308,4	+ 52	950,9	689,5
251,2	388,2	+ 54	1 507,0	868,1
398,1	488,7	+ 56	2 389,0	1 093
631,0	615,3	+ 58	3 786,0	1 376
1 000	774,6	+ 60	6 000	1 732

II

Niveau de référence : 0 dB = 1 milliwatt, 600 ohms		dB	Niveau de référence : 0 dB = 6 milliwatts, 500 ohms	
MILLIWATTS	VOLTS		MILLIWATTS	VOLTS
1,000	0,774 6	— 0	6,000	1,732 05
0,631 0	0,616 7	— 2	3,786	1,376
0,398 1	0,488 7	— 4	2,389	1,093
0,251 2	0,388 2	— 6	1,507	0,868 1
0,158 5	0,308 4	— 8	0,950 9	0,689 5
0,100 0	0,244 9	— 10	0,600 0	0,547 7
0,063 10	0,194 6	— 12	0,378 6	0,435 1
0,039 81	0,154 6	— 14	0,238 9	0,345 6
0,025 12	0,122 8	— 16	0,150 7	0,274 5
0,015 85	0,097 52	— 18	0,095 09	0,218 1
0,010 00	0,077 46	— 20	0,060 00	0,173 2
0,006 310	0,061 67	— 22	0,037 86	0,137 6
0,003 981	0,048 87	— 24	0,023 89	0,109 3
0,002 512	0,038 82	— 26	0,015 07	0,086 81
0,001 585	0,030 84	— 28	0,009 509	0,068 95
0,001 000	0,024 49	— 30	0,006 000	0,054 77
0,000 631 0	0,019 46	— 32	0,003 786	0,043 51
0,000 398 1	0,015 46	— 34	0,002 389	0,034 56
0,000 251 2	0,012 28	— 36	0,001 507	0,027 45
0,000 158 5	0,009 752	— 38	0,000 950 9	0,021 81
0,000 100 0	0,007 746	— 40	0,000 600 0	0,017 32
0,000 063 10	0,006 167	— 42	0,000 378 6	0,013 76
0,000 039 81	0,004 887	— 44	0,000 238 9	0,010 93
0,000 025 12	0,003 882	— 46	0,000 150 7	0,008 681
0,000 015 85	0,003 084	— 48	0,000 095 9	0,006 895
0,000 010 00	0,002 449	— 50	0,000 060 00	0,005 477
0,000 006 310	0,001 946	— 52	0,000 037 86	0,004 351
0,000 003 981	0,001 546	— 54	0,000 023 89	0,003 456
0,000 002 512	0,001 228	— 56	0,000 015 07	0,002 745
0,000 001 585	0,000 975 2	— 58	0,000 009 509	0,002 181
0,000 001 000	0,000 774 6	— 60	0,000 006 000	0,001 732
0,000 000 631 0	0,000 616 7	— 62	0,000 003 786	0,001 376
0,000 000 398 1	0,000 488 7	— 64	0,000 002 389	0,001 093
0,000 000 251 2	0,000 388 2	— 66	0,000 001 507	0,000 868 1
0,000 000 158 5	0,000 308 4	— 68	0,000 000 950 9	0,000 689 5
0,000 000 100 0	0,000 244 9	— 70	0,000 000 600 0	0,000 547 7
0,000 000 063 10	0,000 194 6	— 72	0,000 000 378 6	0,000 435 1
0,000 000 039 81	0,000 154 6	— 74	0,000 000 238 9	0,000 345 6
0,000 000 025 12	0,000 122 8	— 76	0,000 000 150 7	0,000 274 5
0,000 000 015 85	0,000 097 52	— 78	0,000 000 095 09	0,000 218 1
0,000 000 010 00	0,000 077 46	— 80	0,000 000 060 00	0,000 173 2
0,000 000 006 310	0,000 061 67	— 82	0,000 000 037 86	0,000 137 6
0,000 000 003 981	0,000 048 87	— 84	0,000 000 023 89	0,000 109 3
0,000 000 002 512	0,000 038 82	— 86	0,000 000 015 07	0,000 086 81
0,000 000 001 585	0,000 030 84	— 88	0,000 000 009 509	0,000 068 95
0,000 000 001 000	0,000 024 49	— 90	0,000 000 006 000	0,000 054 77
0,000 000 000 631 0	0,000 019 46	— 92	0,000 000 003 786	0,000 043 51
0,000 000 000 398 1	0,000 015 46	— 94	0,000 000 002 389	0,000 034 56
0,000 000 000 251 2	0,000 012 28	— 96	0,000 000 001 507	0,000 027 45
0,000 000 000 158 5	0,000 009 752	— 98	0,000 000 000 950 9	0,000 021 81
0,000 000 000 100 0	0,000 007 746	— 100	0,000 000 000 600 0	0,000 017 32

RELATIONS ENTRE IMPEDANCES, PUISSANCES ET TENSION

$$V = \sqrt{R W}$$

Ohms	1	1,5	2	2,5	3	4	5	8	10	15	16	50	100	200	250	500
Watts	VOLTS															
0,1	0,3	0,38	0,44	0,5	0,52	0,62	0,7	0,9	1	1,2	1,3	2,2	3,2	4,4	5	7
0,2	0,44	0,54	0,62	0,7	0,78	0,88	1	1,25	1,4	1,7	1,8	3,2	4,4	6,3	7	10
0,5	0,7	0,85	1	1,1	1,2	1,4	1,55	2	2,2	3,7	3,8	5	7	10	11	16
1	1	1,2	1,4	1,55	1,7	2	2,2	2,8	3,2	3,8	4	7	10	14	16	22
2	1,4	1,7	2	2,2	2,4	2,8	3,2	4	4,4	5,4	5,6	10	14	20	22	32
3	1,7	2,1	2,4	2,7	3	3,4	3,8	4,8	5,4	6,5	7	12	17	24	27	38
5	2,2	2,7	3,2	3,5	3,8	4,4	5	6,3	7	8,5	9	16	22	32	35	50
10	3	3,8	4,4	5	5,2	6,2	7	9	10	12	13	22	32	44	50	70
15	3,8	4,7	5,6	6	6,8	7,6	8,5	11	12	15	15,4	27	39	54	62	88
20	4,4	5,4	6,4	7	7,8	8,8	10	12,5	14	17	18	32	44	63	70	100
30	5,5	6,7	7,7	8,8	9,5	11	12	15,5	17,5	21,5	22	40	56	78	90	125
50	7	8,5	10	11	12	14	15,5	20	22	37	38	50	70	100	110	160
100	10	12	14	15,5	17	20	22	28	32	38	40	70	100	140	160	220
150	12	15	17	20	21,5	25	27	38	40	48	52	90	125	170	200	280
300	17	21	24	27	30	34	38	48	54	65	70	120	170	240	270	280
500	22	27	32	35	38	44	50	63	70	85	90	160	220	320	350	500

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE. — NOTIONS ESSENTIELLES.

Chapitre 1. — Vibrations et oscillations	8
Chapitre 2. — Nature physique du son	12
— La fréquence	13
— L'intensité	13
— Les harmoniques	14
— Les transitoires	14
— Le battement	15
— La réflexion	16
— Influence des obstacles	16
— Ondes stationnaires	17
— Ondes planes	18
— La résonance	18
— Effet Doppler	18
Chapitre 3. — Physiologie de l'ouïe	21
— Le son réel et le son subjectif	21
— Le point de vue des musiciens	22
Chapitre 4. — Altérations et distorsions	24
— La distorsion non linéaire	24
— La distorsion linéaire	25
— L'intermodulation	25
— Distorsion de phase	26
— Taux de distorsion	26
— Le bruit de fond	27
Chapitre 5. — La notion de haute fidélité	28
— Réalisme et illusion	28
— Le problème des transitoires	29
— La matière sonore	29
— La dynamique	33
— La stéréophonie	33
Chapitre 6. — Unités de mesures acoustiques	35
Chapitre 7. — Magnétisme et électromagnétisme	40
— Quelques définitions	42
— Inductance et impédance	44
— Remarques au sujet des unités magnétiques	45
— Les matériaux magnétiques	46
— Aimants permanents	47
— Circuits et noyaux magnétiques	48

Chapitre 8. — Théorie du condensateur	50
Chapitre 9. — La piezo-électricité	55
Chapitre 10. — L'essentiel de l'électronique	57
— Les tubes	57
— Les semiconducteurs	63

DEUXIÈME PARTIE. — LE MATÉRIEL.

Chapitre 11. — Le haut-parleur	68
— Le haut-parleur considéré comme un piston	68
— La mécanique du haut-parleur	70
— Les caractéristiques électriques	72
— Le problème de l'amortissement	74
— Le rendement des haut-parleurs	76
— Défauts des haut-parleurs	76
— Choix d'un haut-parleur	78
— Haut-parleurs spéciaux	79
Chapitre 12. — Enceintes acoustiques et pavillons	83
— L'enceinte close	84
— L'enceinte antirésonnante ou « bass reflex »	84
— Le labyrinthe acoustique	87
— La colonne sonore	87
— Le pavillon	89
— Les haut-parleurs en groupe	93
Chapitre 13. — Les transformateurs B. F.	97
— Le transformateur de sortie	97
— Les transformateurs de liaison	103
Chapitre 14. — L'amplification B. F.	104
— Amplification de tension	104
a) par tubes	104
b) par transistors	111
— Inversion de phase	113
— Amplification de puissance	119
— La contre-réaction	132
— Les préamplificateurs	138
— La correction de ton	140
— La commande de volume sonore	142
— Le mélange (« mixage »)	148
— Le réglage de contraste	150
— Alimentation et problèmes de découplage	153
— La stabilisation de tension	160
— L'importante question des masses	163
Chapitre 15. — Les microphones	165
— Microphone à charbon	165
— Microphone électrodynamique	166
— Microphone à ruban	168
— Microphone électrostatique ou à condensateur	168
— Microphone piezo-électrique	172

Chapitre 16. — L'enregistrement magnétique	176
— Généralités	176
— Le ruban magnétique	176
— L'enregistrement	179
— L'effacement	181
— Les têtes	181
— La question du bruit de fond	185
— La mécanique	185
— Les commandes	186
— La partie électronique	189
— Pleurage et autres défauts	194
— Les magnétophones autonomes	195
Chapitre 17. — Le disque	198
— L'enregistrement	199
— La reproduction	203
Chapitre 18. — Les procédés optiques	215
Chapitre 19. — Emploi de la radio	219

TROISIÈME PARTIE. — LES APPLICATIONS.

Chapitre 20. — L'aménagement acoustique	222
— Acoustique des salles et des espaces	222
— La réverbération artificielle	229
— Les installations de plein air	231
— Puissance à utiliser	232
Chapitre 21. — La distribution du son	237
— Les lignes de transmission	237
— Les transformateurs de ligne	242
— Adaptation des impédances	243
— Distribution du son dans de grands immeubles	248
— Les spectacles « Son et Lumière »	251
Chapitre 22. — Art de la prise de son	254
— Aménagement des studios	254
— La place du microphone	256
— Retour sur la stéréophonie	258
— Les « effets » sonores	264
— Le microphone dans la salle	265
Chapitre 23. — Contrôle et mesures.	
— Contrôles permanents	268
Pannes des amplificateurs	270
— Contrôles intermittents ou occasionnels	270
— Mesures sur les amplificateurs	272
a) bande passante	272
b) puissance	274
c) distorsion	274
d) impédance	278
— Vérification des composants	280
Formules et tableaux	285

LES MEILLEURS LIVRES DE RADIO

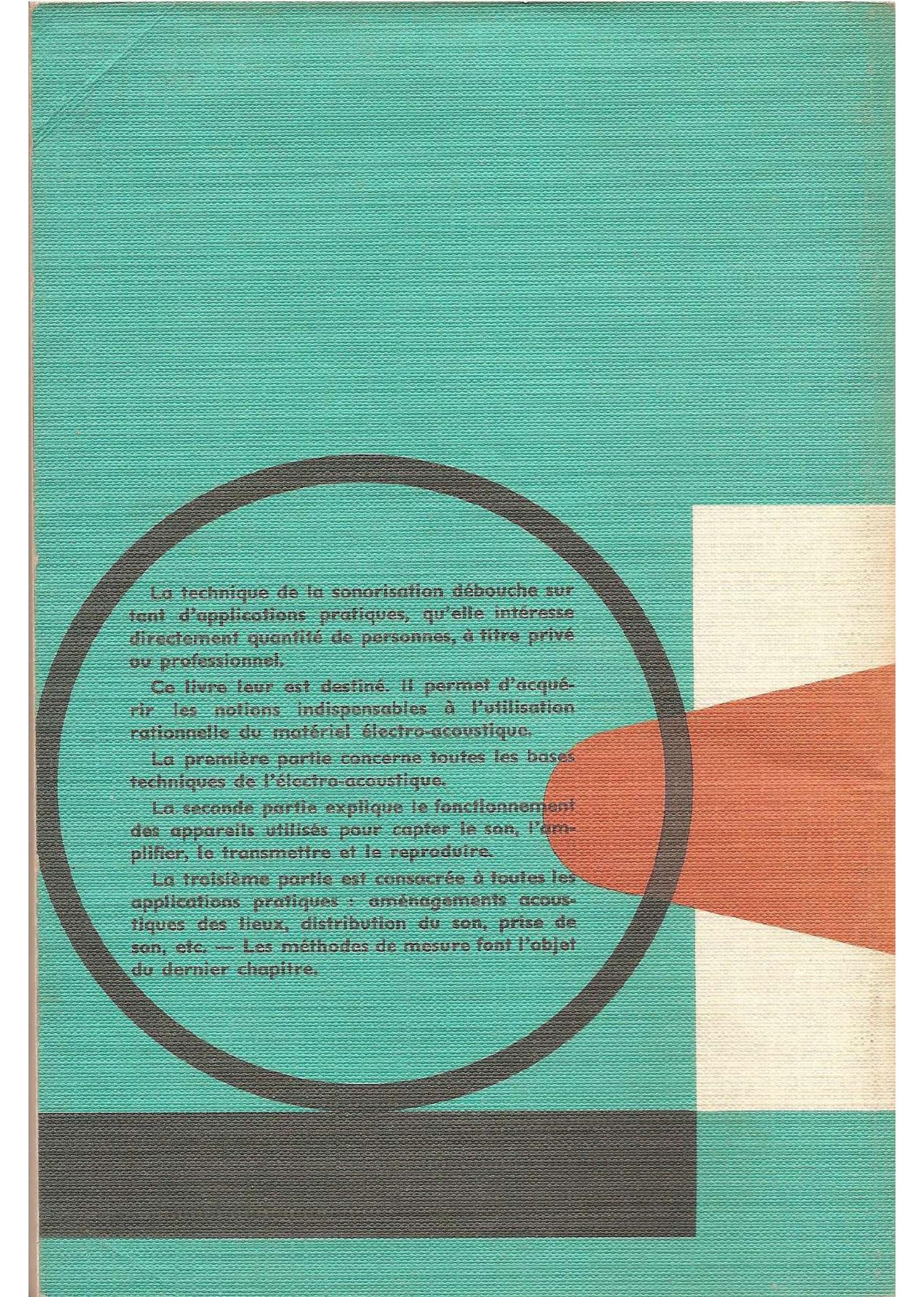
- EMPLOI RATIONNEL DES TRANSISTORS**, par J.-P. Géhminen — Livre de base traitant de toutes les applications des semiconducteurs dans tous les secteurs de l'électronique.
376 pages, format 16-24 30 F
- GUIDE MONDIAL DES TRANSISTORS**, par H. Schreiber. — Toutes les caractéristiques présentées d'une manière homogène ; types de remplacement ; tableaux par fonctions.
128 pages, format 13-21 12 F
- HAUT-PARLEURS**, par G.-A. Briggs. — Étude théorique des haut-parleurs et des enceintes acoustiques ; installation des salles ; stéréophonie.
336 pages, format 16-24 relié 27 F
- LA RADIO ?... MAIS C'EST TRÈS SIMPLE**, par E. Aisberg. — Le meilleur ouvrage d'initiation.
184 pages, format 18-23 7,50 F
- LA TÉLÉVISION ?... MAIS C'EST TRÈS SIMPLE**, par E. Aisberg. — Un ouvrage sérieux sous une forme agréable indispensable aux débutants en télévision.
168 pages, format 18-23 7,50 F
- LE TRANSISTOR ?... MAIS C'EST TRÈS SIMPLE**, par E. Aisberg. — La constitution d'un transistor, ses caractéristiques, son utilisation dans les récepteurs et montages électroniques.
148 pages, format 18-23 12 F
- LEXIQUE OFFICIEL DES LAMPES RADIO**, par L. Gaudillat. — Sous une forme pratique et condensée, toutes les caractéristiques de service, les culottages et équivalences des lampes européennes et américaines.
96 pages, format 13-22 6 F
- LE TRANSISTOR AU LABORATOIRE ET DANS L'INDUSTRIE**, par H. Schreiber. — Suite logique du célèbre ouvrage du même auteur : " Technique et Applications des Transistors ".
264 pages, format 16-24 24 F
- MÉMENTO RADIOTECHNIQUE**, par R. Aronssohn. — Documentation de la production de la Radiotechnique portant sur les caractéristiques de 1.600 tubes et 250 semiconducteurs.
320 pages, format 13,5-21 9 F
- MESURES ÉLECTRONIQUES**, par F. Haas. — Rôle et possibilités des appareils de mesure actuels ; méthodes pratiques de mesure des plus récents montages et de tous leurs éléments constitutifs (transistors, etc).
264 pages, format 16-24 27 F
- PRATIQUE DE LA HAUTE-FIDÉLITÉ**, par J. Riethmüller. — Étude critique de toutes les solutions permettant une meilleure reproduction sonore.
272 pages, format 16-24 21 F
- RADIO-TRANSISTORS**, par H. Schreiber. — D'une conception identique à celle de Radio-Tubes et de Télé-Tubes, cet ouvrage donne instantanément toutes les caractéristiques utiles d'un transistor.
144 pages, format 13-21 12 F
- RADIO-TUBES**, par E. Aisberg, L. Gaudillat et R. de Schepper. — Une documentation unique donnant instantanément et sans aucun renvoi toutes les valeurs d'utilisation et culottages de toutes les lampes usuelles. Reliure spéciale avec spirale en matière plastique.
168 pages, format 13-22 7,50 F
- REPRODUCTION SONORE A HAUTE-FIDÉLITÉ**, par G.-A. Briggs. — Tous les secrets de la réussite en basse fréquence dévoilés par le grand spécialiste anglais.
368 pages, format 16-24 18 F
- SCHÉMAS D'AMPLIFICATEURS B.F. à TRANSISTORS**, par R. Besson. — Amplificateurs pour radio, phono, prothèse auditive, préamplificateurs, interphones, etc...
48 pages, format 21-27 8,40 F
- NOUVEAUX SCHÉMAS D'AMPLIFICATEURS B. F. A LAMPES**, par R. Besson. — Nouvelle édition refondue. Une gamme complète d'amplificateurs à petite et grande puissance.
48 pages, format 21-27 6 F
- SHÉMATÈQUE**, par W. Sorokine. — Chacun des ouvrages donne à l'usage des dépanneurs, les schémas avec valeurs des récepteurs commerciaux de l'année correspondante.
Schémathèque 60 (64 p. 21-27) 9,60 F
Schémathèque 61 (64 p. 21-27) 10,80 F
Schémathèque 62 (64 p. 21-27) 10,80 F
Schémathèque 63 (64 p. 21-27) 10,80 F
Schémathèque 64 (64 p. 21-27) 12,00 F
- TECHNOLOGIE DES COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES**, par R. Besson. — Tous les renseignements utiles (normes ; valeurs d'utilisation ; conditions optimales d'utilisation ; modes de fabrication) sur les composants passifs : résistances, condensateurs, bobinages.
264 pages, format 16-24 27 F

(Ajouter 10 % pour frais d'envoi)

SOCIÉTÉ DES ÉDITIONS RADIO

9, Rue Jacob - PARIS-VI^e

C. P. Paris 1164-34



La technique de la sonorisation débouche sur tant d'applications pratiques, qu'elle intéresse directement quantité de personnes, à titre privé ou professionnel.

Ce livre leur est destiné. Il permet d'acquies les notions indispensables à l'utilisation rationnelle du matériel électro-acoustique.

La première partie concerne toutes les bases techniques de l'électro-acoustique.

La seconde partie explique le fonctionnement des appareils utilisés pour capter le son, l'amplifier, le transmettre et le reproduire.

La troisième partie est consacrée à toutes les applications pratiques : aménagements acoustiques des lieux, distribution du son, prise de son, etc. — Les méthodes de mesure font l'objet du dernier chapitre.