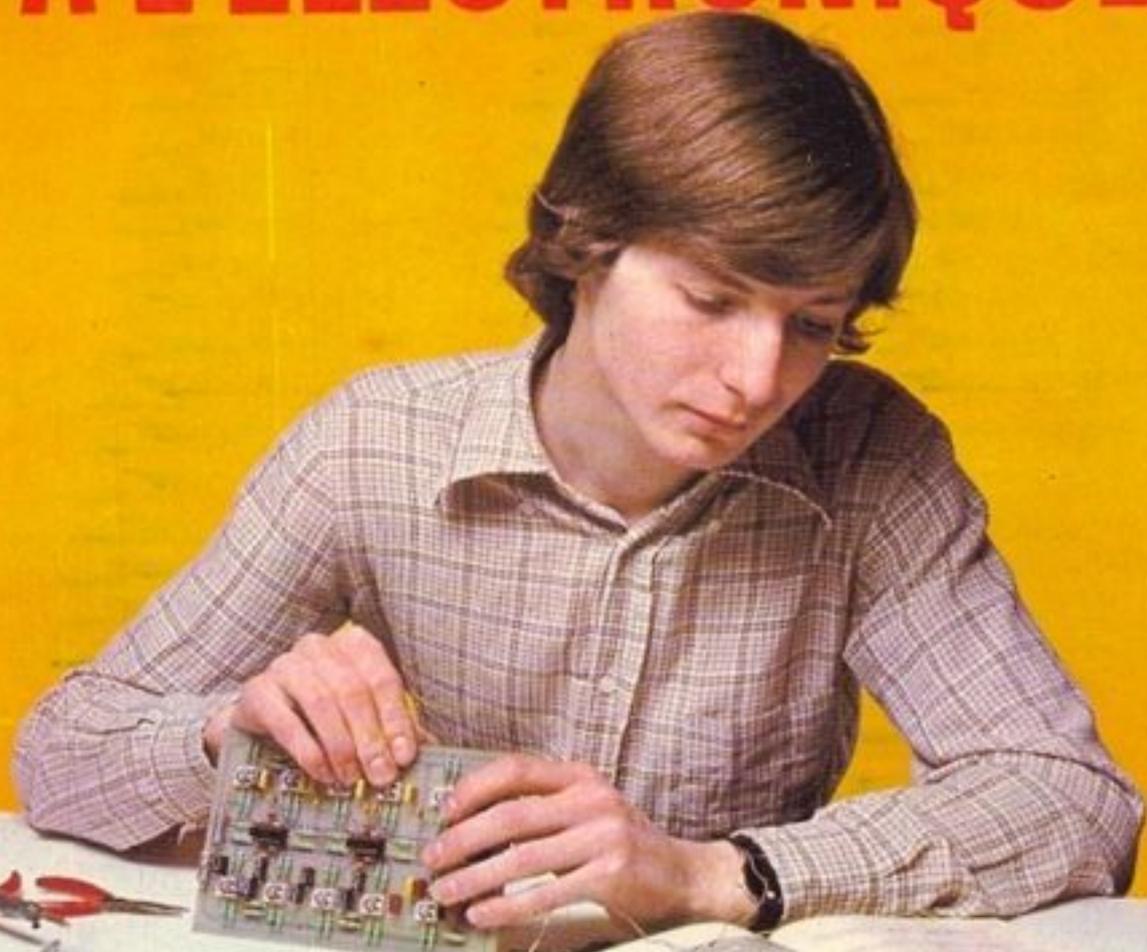


# INITIATION A L'ÉLECTRICITÉ ET A L'ÉLECTRONIQUE

F. HURÉ



**200 MANIPULATIONS  
SIMPLES D'ÉLECTRICITÉ  
ET D'ÉLECTRONIQUE**

**Editions Techniques et Scientifiques Françaises**

INITIATION A L'ÉLECTRICITÉ  
ET A L'ÉLECTRONIQUE

200 MANIPULATIONS  
SIMPLES D'ÉLECTRICITÉ  
ET D'ÉLECTRONIQUE

## AUTRES OUVRAGES DE FERNAND HURÉ

*édités par E.T.S.F.*

**Dépannage et mise au point des Radiorécepteurs à transistors**

**Montages simples électroniques à transistors**

**200 montages O.C. (en collaboration avec R. Piat)**

**Initiation pratique à l'emploi des circuits intégrés digitaux**

**Montages pratiques à circuits intégrés pour l'amateur**

**Traité expérimental de logique digitale**

**Sécurité automobile — 25 montages électroniques**

**Performances automobiles — 25 montages électroniques**

**Réalisation de 25 appareils de mesure**

Photo de couverture : Studio S.P.E., Paris

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que « les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1er de l'Art. 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les Art. 425 et suivants du Code Pénal.

**ISBN 2.85535-014-X**

© 1983 – E.T.S.F.

# TABLE DES MATIÈRES

## CHAPITRE PREMIER

### *LE COURANT ELECTRIQUE*

*Pages*

Qu'est-ce que l'électricité.....	11
Conductibilité et courant électrique.....	14
Sources de puissance .....	15
Mesure du courant.....	17
Force électromotrice.....	18
Le matériel de démonstration .....	18
Circuit électrique.....	21
Notion de résistance.....	24
Contrôle de l'intensité du courant électrique .....	26
Mesure de l'intensité .....	28
Contrôle de la tension.....	29
Circuit série .....	29
Circuit parallèle.....	31
Circuit série - parallèle .....	35
Résistance d'un conducteur .....	35
La loi d'Ohm.....	37
Vérification de la loi d'Ohm .....	37
Applications de la loi d'Ohm.....	38
Notion de la puissance électrique .....	39
Calcul de la puissance dissipée dans une résistance.....	41

## CHAPITRE II

### *CHAMP MAGNETIQUE*

Magnétisme .....	43
Aimants artificiels.....	43
Aimants naturels.....	43
Pôles d'un aimant.....	43
Action réciproque des pôles.....	44
Champ magnétique.....	45

Matérialisation du champ magnétique d'un aimant.....	45
Action du champ magnétique sur un conducteur.....	46
Champ magnétique.....	47
Champ magnétique d'un courant rectiligne.....	48
Champ magnétique autour d'une bobine.....	49
L'électro-aimant.....	50
Aimantation permanente et aimantation temporaire.....	52

### CHAPITRE III

#### *COURANT ALTERNATIF*

Courant continu et courant alternatif.....	53
Production du courant alternatif.....	53
Valeur efficace.....	55
Etude des propriétés du courant alternatif.....	56
Réalisation de l'alimentation 6 V courant continu, courant alternatif.....	57
Principe de fonctionnement des appareils de mesure de précision pour courant continu et courant alternatif.....	58
Le contrôleur universel.....	60
Propriétés du courant alternatif.....	61
Résistance en courant alternatif.....	62
Intensité et tension.....	62
Puissance dans les circuits parcourus par des courants alternatifs.....	63
Calcul de la résistance dans un circuit à courant alternatif.....	63
Self et inductance.....	64
Induction dans un circuit à courant continu.....	64
Self-induction dans un circuit parcouru par un courant alternatif.....	65
Effets d'une self inductance dans un circuit.....	67
Induction mutuelle.....	68
Fonctionnement du transformateur.....	69
Rapport de transformation.....	70
Action du transformateur.....	70
Capacité et condensateur.....	72
Capacité d'un condensateur.....	73
Disposition des condensateurs.....	74
Réactance capacitive.....	75
Impédance.....	76
Self et capacité dans un circuit.....	79

## CHAPITRE IV

### SEMICONDUCTEURS

La diode détectrice .....	83
Jonction P-N .....	84
Utilisation de la diode .....	87
Filtrage .....	88
Redressement par pont .....	89
Courbe caractéristique .....	89
Puissance de la diode .....	91
Réalisation d'une alimentation basse tension .....	92
Montage à pont.....	94
Diodes zener .....	96
Stabilisation de tension.....	97
Diodes Varicap .....	100
Diodes Led.....	101
Couples de jonctions .....	102
Fonctionnement du transistor.....	103
Amplification de tension .....	104
Amplification de courant.....	104
Réalisation pratique des transistors.....	105
Symboles employés pour représenter les transistors.....	105
Les polarités à appliquer.....	106
Mode de branchement des transistors.....	106
Emetteur commun ou émetteur à la masse.....	106
Etude des propriétés fondamentales du transistor.....	107
Polarisation du transistor.....	109
Amplification en tension d'un transistor .....	110
Montage à base commune .....	113
Montage à collecteur commun.....	113
Couplage entre transistors.....	114
Amplificateur à couplage direct.....	115
La configuration Darlington .....	118
Injecteur de signal .....	120
Amplification basse fréquence .....	121
Amplificateur à deux étages, classe A.....	121
Amplificateur de puissance.....	123
Réalisation d'un amplificateur complémentaire.....	124
Le transistor utilisé comme commutateur électronique .....	125

Le multivibrateur bistable.....	126
Le trigger de Schmitt .....	127
Niveau de seuil inférieur et niveau de seuil supérieur .....	128
Fonctionnement du circuit .....	129
Déclenchement du bond - montage .....	130
Oscillateurs sinusoïdaux .....	131
Oscillateurs LC .....	131
Circuit RC .....	132
Circuit d'expérimentation.....	132
Le transistor à effet de champ .....	133
Les photorésistances.....	140
Le thyristor .....	143
Triac et diac.....	147
Les circuits intégrés.....	151
Le transistor unijonction.....	153
L'opto-électronique.....	158

## PRÉFACE

*Le but que nous nous sommes proposé en écrivant cet ouvrage est double : faire connaître les principes de base de l'électricité et de l'électronique par des manipulations simples, et amener nos jeunes lecteurs à l'étude et à la réalisation des circuits électroniques compliqués.*

*Cet ouvrage s'adresse à tous ceux qui désirent apprendre d'une manière plaisante les lois élémentaires de l'électricité et de l'électronique, que les manuels classiques présentent le plus généralement de façon abstraite et aride.*

*Par là même, nos lecteurs se familiariseront avec la lecture des schémas, la connaissance du rôle exact des différents éléments d'un circuit. Sans doute alors voudront-ils pousser plus avant l'étude de cette science moderne qu'est l'électronique.*

*Ce faisant, notre ouvrage ne prétend pas constituer un cours, mais vise à donner les éléments indispensables à une étude élémentaire des principes théoriques fondamentaux à tous ceux qui, sans se destiner aux carrières de l'électronique, veulent y trouver une source d'intérêt, de découverte, de distraction et d'étude.*

*Ceux par contre qui désirent s'orienter vers ces techniques y trouveront les principales notions de base qui leur permettront de faire la preuve de leur facilité d'assimilation avant d'aborder ensuite l'étude des ouvrages spécialisés.*

*Pour toutes ces raisons, ce manuel devrait trouver sa place dans les établissements du premier et du second degré, dans les écoles techniques dont les programmes laissent une place de plus en plus importante aux travaux scientifiques et expérimentaux. Pour une dépense modique, il est facile de se procurer le matériel nécessaire pour que les élèves soient eux-mêmes des expérimentateurs actifs, et non des spectateurs passifs.*

*L'électronique offre un vaste champ de recherches et d'expériences. Puisse ce modeste ouvrage vous inciter à le défricher avec passion.*

**F.H.**

# CHAPITRE PREMIER

## LE COURANT ÉLECTRIQUE

### Qu'est-ce que l'électricité ?

Pour bien comprendre les phénomènes électriques que nous allons exposer, il est nécessaire de dire quelques mots sur la constitution physique de la matière.

Un corps quelconque est constitué d'une multitude de particules, identiques entre elles, appelées « molécules ». La molécule est par définition la plus petite partie d'un corps pur qui puisse exister en possédant les propriétés de ce corps.

Une image simple vous permettra de mieux comprendre ce que représente la molécule. Examinons de loin un tas de blé : il nous paraît homogène. Approchons-nous et examinons-le en détail. Il apparaît constitué d'une multitude de grains, sensiblement identiques entre eux et séparés par des espaces remplis d'air.

Ce tas peut être divisé en tas de plus en plus petits jusqu'au moment où l'un de ceux-ci ne comporte qu'un seul grain. Là s'arrête notre fractionnement, car si l'on coupe ce grain en deux, chaque partie ne possède plus les propriétés du grain de blé, notamment son pouvoir de germination. Le grain de blé occupe dans le tas une place comparable à la molécule dans un corps.

La molécule n'est pas l'état le plus fragmentaire de la matière, elle est constituée par la juxtaposition d'éléments complexes encore plus petits appelés *atomes*.

### L'atome

Un corps simple est constitué d'une seule sorte d'atomes : l'hydrogène ne renferme que des atomes d'hydrogène, l'oxygène que des atomes d'oxygène.

On a longtemps considéré qu'il existe 92 corps simples. Avec l'aide des puissants moyens modernes de recherche, ce nombre atteint aujourd'hui une centaine.

Qu'est-ce que l'atome, c'est-à-dire la plus petite partie d'un corps simple que l'on puisse obtenir ?

Chaque atome est constitué d'un noyau central autour duquel tournent un ou plusieurs électrons (fig. I-1). On peut le comparer à un système solaire en miniature où le noyau tiendrait la place du soleil et les électrons, celle des planètes.

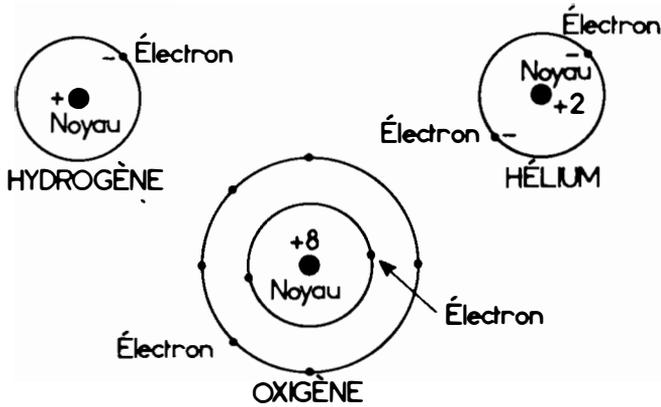


Fig. 1-1.

### Noyau et électrons

Revenons à l'atome. Il comporte, comme nous l'avons vu, un noyau chargé positivement autour duquel gravitent des électrons qui constituent des charges négatives neutralisant les charges positives du noyau.

Ce dernier est lui-même constitué d'un système complexe de neutrons et de protons ; cependant, pour ce qui nous intéresse, nous pouvons ignorer cette distinction et considérer le noyau comme un corps simple renfermant une charge électrique positive.

Les charges d'électricité d'un proton et d'un électron sont égales et de signes contraires. Comme l'atome est électriquement neutre, le nombre de protons est égal au nombre d'électrons. Ainsi l'atome d'hydrogène qui possède un noyau composé d'un proton représentant une unité de charge positive a également un électron ; le noyau d'oxygène qui a 8 protons possède 8 électrons libres. Le nombre d'électrons libres qui tournent autour du noyau est toujours égal au nombre de protons du noyau. Ce nombre est appelé nombre atomique.

Les électrons se répartissent autour du noyau par couches concentriques. Même dans des substances d'une pureté élevée, comme par exemple un fil de cuivre ou d'aluminium, on constate toujours des mouvements de déplacement des électrons périphériques de tous les atomes. Ces électrons sont appelés électrons libres. Le phénomène peut s'expliquer par la diminution de la force d'attraction vers le noyau central. Au cours de leur rotation, ces électrons se détournent facilement de leur orbite et sont tout aussi facilement attirés dans l'orbite externe d'un autre atome. Il se produit ainsi continuellement des attractions et des libérations d'électrons libres dans la masse de la matière, ce qui fait que cette dernière est dans un continuel état de déséquilibre électrique. C'est le déplacement des électrons libres qui constitue le courant électrique.

*Charges électriques.* — Si des électrons quittent leur orbite, ils créent un déséquilibre électrique, en laissant derrière eux un manque d'électrons. Par contre, il existe un excès d'électrons dans l'orbite où ils ont été attirés.

Le manque d'électrons provoque une charge positive ; l'excès d'électrons provoque une charge négative. Ainsi, pour provoquer une charge positive, ou une charge négative, il suffit de détourner des électrons dans un sens ou dans un autre.

Pour obliger des électrons à quitter leur orbite, c'est-à-dire pour obtenir des charges électriques, on peut utiliser différentes formes d'énergie telles que le frottement, l'énergie chimique, le champ magnétique, etc.

*Charges électriques obtenues par frottement.* — En frottant deux matières l'une contre l'autre, on peut obliger des électrons libres d'une matière à quitter leur orbite pour passer dans la seconde.

On provoque ainsi une perte d'électrons dans la première, soit une charge positive, et un excès d'électrons dans la seconde, soit une charge négative.

Expérience. — Préparons d'abord de minuscules petits morceaux de papier et disposons-les sur une table.

1° Frottons un stylo à bille en matière plastique sur un vêtement de laine et approchons-le des morceaux de papier. Ceux-ci sont attirés et se fixent sur le stylo (fig. I-2). Le stylo s'est électrisé par frottement.

2° Répétons la même opération avec un tube de verre. Le même phénomène se reproduit (fig. I-3).

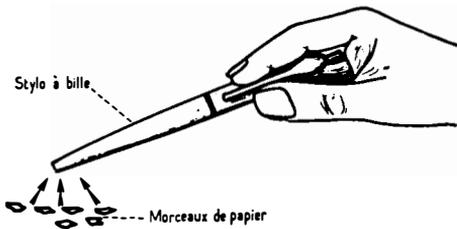


Fig. I-2.

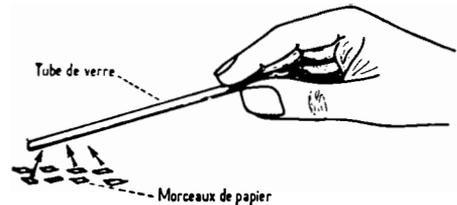


Fig. I-3.

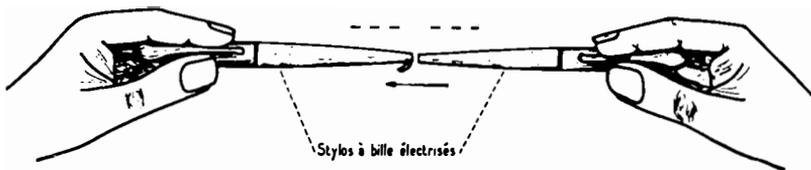


Fig. I-4.

3° Approchons de notre premier stylo à bille auquel adhèrent encore quelques papiers, un second stylo que nous avons également frotté. Les morceaux de papier s'écartent de ce dernier qui semble les repousser. On observe un mouvement de répulsion (fig. I-4).

4° Approchons le second stylo du tube de verre encore garni de petits papiers. Ceux-ci s'orientent vers le stylo et certains même passent sur celui-ci. On observe un mouvement d'attraction (fig. I-5).

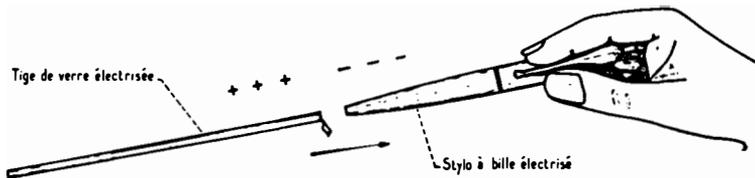


Fig. 1-5.

Comment expliquer ces phénomènes ?

Nous pouvons conclure que les charges d'électricité développées par le frottement du stylo et du tube de verre ne sont pas identiques.

Dans le premier cas, des électrons ont quitté ce tissu de laine pour le stylo : celui-ci est chargé négativement. Dans le second cas, c'est le verre qui a perdu des électrons : il est chargé positivement.

Les petits papiers ayant une charge électrique neutre sont aussi bien attirés par le stylo que par le bâton de verre, parce que le premier est chargé négativement, le second positivement par rapport à ceux-ci.

*Conclusion.* — *Des charges de signes contraires s'attirent ; des charges de même signe se repoussent.*

### Conductibilité et courant électrique

Considérons un fil d'un métal quelconque, de cuivre par exemple. Il existe, dans sa structure cristalline, des interstices entre lesquels les électrons passent suivant un parcours absolument arbitraire et désordonné, mais ayant toujours comme champ d'action, le fil ; autrement dit, le fil constitue un guide pour les électrons en dehors duquel il ne leur est pas possible de sortir. Les électrons qui font partie des atomes de cuivre ont une possibilité particulière de se séparer de l'un pour se placer sur l'orbite externe de l'autre. Ce mouvement désordonné peut être coordonné par un moyen extérieur au fil de cuivre ; en effet, si les électrons qui circulent dans des directions arbitraires sont opposés à un certain nombre d'autres électrons, introduits dans le fil qui leur sert de guide, ceux-ci sont tous obligés de se déplacer dans une seule direction à cause de la forte répulsion qui s'exerce entre eux. Si le moyen auquel on recourt pour introduire dans le fil ces électrons permet une alimentation continue, en circuit fermé, on a un flux continu des électrons qui parcourent tout le circuit à une certaine vitesse. Ce flux s'appelle communément « courant électrique ». Le générateur qui alimente en électrons le circuit constitué par le fil de cuivre peut être un générateur électrique chimique, c'est-à-dire un accumulateur ou une batterie.

Les figures I-6 et 7 donnent une idée sommaire de ce qui se passe. On y remarque que l'affirmation longtemps émise du sens du courant qui traverse un fil électrique allant du pôle positif au pôle négatif est erronée, et on en déduit le contraire.

La répulsion qui s'exerce entre les électrons émis dans le fil et ceux qui y existent déjà, et entre les premiers et ceux qui succèdent donne naissance à un mouvement de translation qui se transmet par répulsions successives avec une

rapidité vertigineuse d'une extrémité à l'autre du conducteur ; ce mouvement d'ensemble fait pénétrer au pôle positif autant d'électrons qu'il en part du pôle négatif.

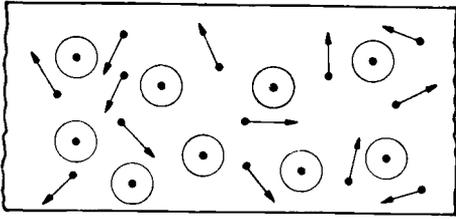


Fig. I-6.

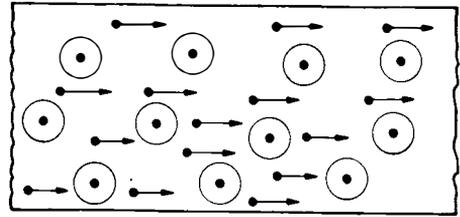


Fig. I-7.

### Résistance et résistivité d'un conducteur

Le flux d'électrons, dans un conducteur, est freiné dans sa marche selon les caractéristiques de la matière constituant le conducteur le long duquel s'effectue le transport du courant. Un corps isolant présente un formidable obstacle à ce passage, tandis qu'un corps bon conducteur offre un passage beaucoup plus facile. Nous dirons donc qu'un corps isolant présente une résistance électrique très supérieure à celle d'un corps conducteur.

### Source de puissance

Comme une automobile a besoin d'essence, tout appareil électronique a besoin d'une source de puissance qui est le courant électrique. Les sources de courant les plus couramment utilisées dans les appareils électroniques sont les batteries de piles ou d'accumulateurs et les générateurs de courant alternatif que nous étudierons plus loin.

Les batteries ou piles sont utilisées dans la plupart des appareils de radio à transistors. Cette source de courant continu est due à des phénomènes chimiques qui se manifestent pendant un certain temps. Lorsque ces phénomènes cessent par suite de l'inactivité d'un ou de plusieurs des composants, la pile ne délivre plus de courant et celle-ci doit être remplacée.

Une pile ne fonctionne donc que pendant un temps donné ; de plus elle ne peut fournir une tension et une intensité élevées. Un élément de pile est caractérisé par la tension et l'intensité maximales qu'il peut fournir. La tension d'un élément est de l'ordre de 1,5 volt. Nous verrons plus loin comment on peut grouper plusieurs éléments pour obtenir une tension supérieure.

Si nous observons une pile pour lampe de poche, nous constatons qu'elle comporte à la partie supérieure une languette courte qui constitue le pôle positif et une languette longue qui constitue le pôle négatif. En réunissant ces deux pôles par un conducteur, une ampoule par exemple, le circuit électrique ainsi constitué est traversé par un courant qui se manifeste dans l'ampoule par l'éclairage du filament porté au rouge.

## Composition d'une pile

La pile que nous employons dans les lampes de poche est composée de trois éléments identiques (fig. I-8). Chacun de ces éléments se compose :

- 1° D'une enveloppe cylindrique de zinc constituant l'électrode négative.
- 2° Un bâton de charbon disposé au centre constituant l'électrode positive.
- 3° Un électrolyte, source de l'action chimique, qui est du chlorure d'ammoniaque.
- 4° Un dépolarisant entourant le bâton central, le bioxyde de manganèse.

L'électrolyte a pour rôle de provoquer une réaction chimique entre les deux électrodes. Son action consiste à transporter des électrons de l'une à l'autre et à transformer ainsi l'énergie chimique en énergie électrique.

Le fonctionnement peut s'expliquer d'une façon simple. Lorsque les deux électrodes sont libres, c'est-à-dire que le circuit électrique n'est pas fermé, les électrons sous l'action de l'électrolyte s'accumulent autour de l'électrode négative jusqu'à ce que les deux électrodes soient entièrement chargées.

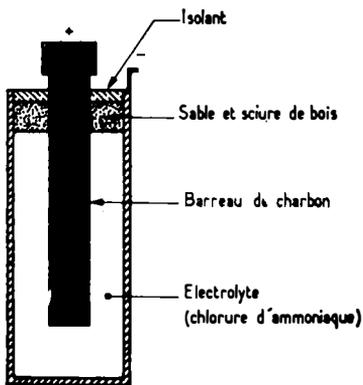


Fig. I-8.

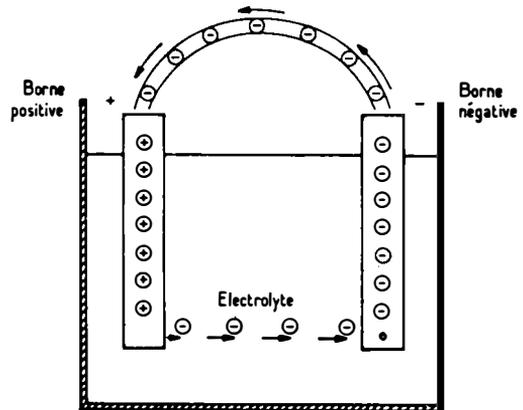


Fig. I-9.

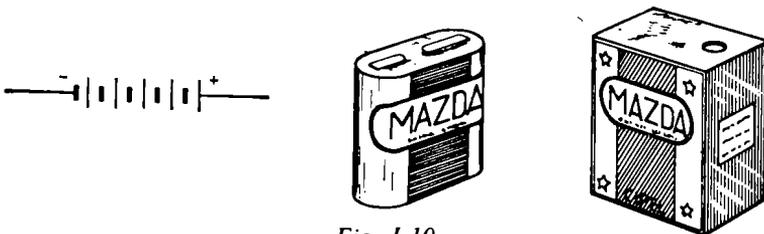


Fig. I-10.

Si nous réunissons ensuite par un fil extérieur l'électrode négative à l'électrode positive, comme l'indique le schéma de la figure I-9, les électrons quittent l'électrode négative pour rejoindre l'électrode positive à l'extérieur et l'électrolyte transporte les électrons de l'électrode positive à l'électrode négative à l'intérieur.

L'action chimique de la pile maintient les deux charges à leur valeur initiale. Dès que l'action chimique ralentit puis cesse, les charges s'égalisent, le courant diminue et cesse et la tension entre les deux bornes retombe à zéro.

La figure I-10 nous indique à côté de la représentation réelle la représentation schématique d'une pile.

### Quantité d'électricité

Pour mesurer des quantités de charge électrique, on ne peut le faire en nombre d'électrons, celui-ci constituant une unité trop petite. Aussi utilise-t-on une unité beaucoup plus grande, *le coulomb*.

Un coulomb équivaut à  $6,28 \times 10^{18}$  électrons, c'est-à-dire à 6,28 millions de millions de millions d'électrons.

### Mesure du courant

On peut mesurer le débit d'une conduite d'eau, c'est-à-dire le nombre de litres ou de mètres cubes qui passent dans une conduite pendant l'unité de temps.

Le courant électrique étant un déplacement d'électrons, on peut de même, mesurer le débit d'un courant, c'est-à-dire le nombre d'électrons qui circulent dans un conducteur pendant l'unité de temps, la seconde.

En électricité, le débit s'appelle *l'intensité* (symbole I). L'unité d'intensité est l'ampère (A). L'ampère est l'intensité d'un courant qui transporte un coulomb par seconde.

Comme il existe des unités plus petites que le mètre pour la mesure des petites longueurs, on utilise également des sous-multiples de l'ampère pour la mesure des courants faibles.

On utilise fréquemment le *milliampère* qui est le millième d'ampère (mA) et le *microampère* qui est le millionième d'ampère ( $\mu A$ ).

Exemple :

$$150 \text{ mA} = 0,15 \text{ A}$$

$$150 \mu A = 0,15 \text{ mA}$$

$$0,25 \text{ A} = 250 \text{ mA} = 250\,000 \mu A.$$

*Mesure de l'intensité.* — L'appareil de mesure employé pour mesurer l'intensité d'un courant est un ampèremètre. Il est basé sur la déviation d'un cadre mobile, parcouru par le courant à mesurer, placé entre les pôles d'un aimant. La déviation est proportionnelle à l'intensité du courant. Une aiguille solidaire du cadre, se déplace devant un cadran convenablement gradué.

Il existe des ampèremètres pour courants continus, d'autres pour courants alternatifs. Dans ce dernier cas, l'intensité étant variable, l'appareil indique une grandeur moyenne qui s'appelle l'intensité efficace. Nous verrons plus loin ce qu'on entend par cette appellation.

Il existe également des ampèremètres permettant à la fois la mesure des courants continus et des courants alternatifs. C'est ce modèle que nous utilisons au cours de nos démonstrations.

### **Force électromotrice**

Nous avons vu que sous l'action chimique de l'électrolyte, les électrons quittaient l'électrode positive d'une pile pour s'accumuler autour de l'électrode négative. Il existe ainsi un excès d'électrons, autour de cette électrode, qui constitue une charge négative.

On peut obtenir la formation de charges par d'autres sources d'énergie — dont la plus intéressante est le magnétisme — que nous étudierons plus loin.

Dans tous les cas, la forme d'énergie initiale est transformée en énergie électrique par la formation d'une charge électrique.

Lorsqu'on réunit les deux électrodes d'un générateur, les électrons se déplacent, à l'extérieur, de l'électrode négative à l'électrode positive, sous l'action de l'énergie accumulée sous forme de charge électrique.

Cette énergie électrique est désignée sous le nom de force électromotrice (f.e.m., symbole  $E$ ). C'est elle qui en provoquant le mouvement d'électrons crée le courant électrique.

Toute charge électrique constitue une réserve d'énergie potentielle. La force électromotrice d'une charge ou son potentiel se mesure en *volts* (V).

La force électromotrice maintient entre deux charges une différence de potentiel que l'on appelle aussi tension. Entre deux points parcourus par un courant, c'est-à-dire entre deux points de charges inégales, il existe toujours une différence de potentiel.

De même que pour les unités de mesure d'intensité, il existe des unités plus petites que le volt.

Le millivolt est le millième du volt (mV). La microvolt est le millionième de volt ( $\mu$ V).

Exemple :  $0,4 \text{ V} = 400 \text{ mV} = 400\,000 \mu\text{V}$

$10\,000\,000 \mu\text{V} = 10\,000 \text{ mV} = 10 \text{ V}$

### **Notre matériel de démonstration**

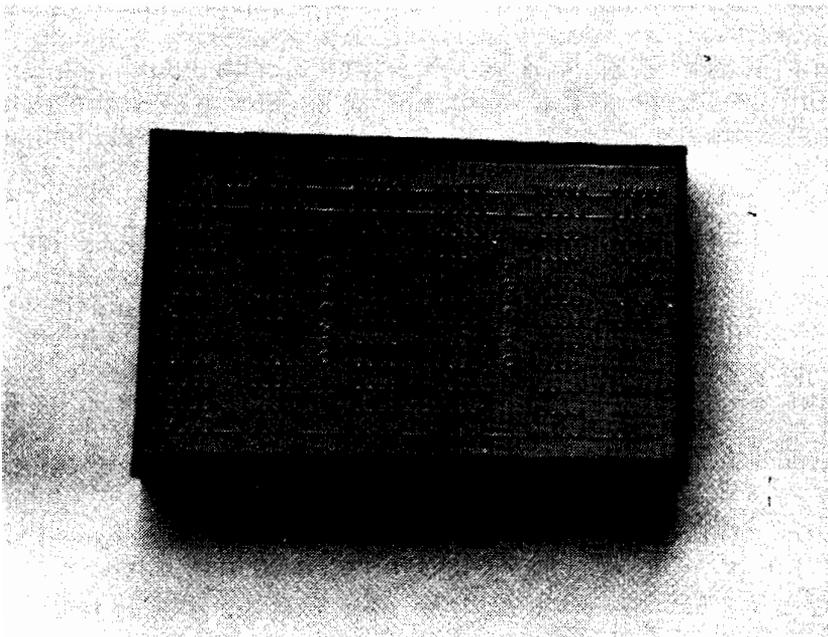
Nos premières démonstrations exigeront un matériel réduit et d'un prix peu élevé. Précisons également que les tensions utilisées sont basses et qu'elles ne peuvent absolument pas constituer le moindre danger, même dans le cas d'une erreur de branchement ou d'un contact accidentel.

*Piles.* — Les piles sont des sources de courant continu servant à l'alimentation des postes portables. Elles sont le plus souvent composées d'éléments disposés en série ou en parallèle. Nous verrons plus loin ce qui caractérise ces circuits. Ainsi, la classique pile de poche de 4,5 V comporte trois éléments de 1,5 V disposés en série.

*Support.* — Notre méthode d'initiation consiste à faire réaliser aux débutants quelques circuits simples à partir desquels nous observerons les phénomènes électriques et en tirerons les lois élémentaires. Ce procédé est beaucoup plus attrayant que la méthode empirique qui place le jeune étudiant en face d'une analyse rébarbative.

Cependant le problème des soudures reste une opération délicate, surtout pour les composants utilisés au cours de l'expérimentation.

La boîte de Circuit-Connexion n-DEC a été étudiée pour permettre les essais dans les meilleures conditions de fiabilité et de rapidité. Tous les problèmes de soudure sont éliminés puisqu'il suffit d'introduire les composants discrets dans les alvéoles prévus à cet effet, et qu'il est ainsi possible d'utiliser ces mêmes composants sur d'autres circuits.



*Fig. I-11.*

La photographie de la figure I-11 illustre l'aspect pratique de cette boîte et la figure I-12 donne le croquis grandeur nature afin de se rendre mieux compte de la facilité d'insertion des composants.

Le fonctionnement de ces boîtes repose sur le principe des pinces en alliage cuivre/nickel disposées dans des alvéoles en nylon. Ces pinces sont reliées entre elles par des barrettes formant un groupe de cinq pinces. Les différents groupes sont disposés parallèlement et forment ainsi un ensemble de circuits.

Sur le dessus de la boîte, des traits en relief visualisent les liaisons des pinces. Des trous de 1,2 mm de diamètre permettent d'introduire les fils des com-

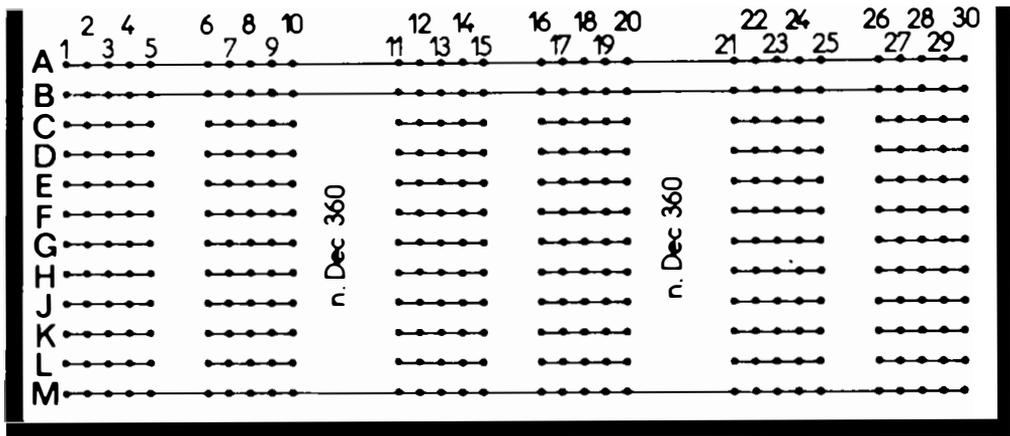


Fig. I-12.

posants dans ces dernières. Leur longueur est de 9,5 mm afin qu'elles puissent subir sans déformation des utilisations répétées. Cette très grande longueur permet d'introduire des fils de 1 mm de diamètre, ce qui autorise l'emploi de tous les composants, sans risque de détérioration des pinces.

Les traits en relief indiquent les pinces reliées entre elles. Tous les contacts sont repérés à l'aide de lettres et de chiffres.

#### Utilisation

Tous les composants discrets, résistances, condensateurs, diodes, transistors peuvent être utilisés sur la n-DEC 360 contacts. Il suffit d'introduire le fil de connexion du composant dans l'alvéole choisi en prenant soin de repérer les autres possibilités de liaison. La pince située en-dessous assure un excellent contact. Pour changer de composant, il suffit de tirer sur le fil.

Dans ces conditions, on peut laisser aux composants leur longueur totale de connexion, en vue d'une réutilisation pour une réalisation ultérieure.

Quelques précautions sont à observer dans l'utilisation de la boîte. Pour les liaisons électriques, il faut n'utiliser que des fils à un conducteur.

N'utiliser jamais de mauvais fils pliés ou déformés, vous risqueriez d'endommager les pinces.

Les fils des composants ayant des gouttes de soudure doivent être rejetés.

Les fils couverts de graisse ou de colle doivent être nettoyés afin que ces produits ne viennent isoler les contacts des pinces. Pour assurer un bon contact, pousser verticalement le fil dans le trou. Ne pas mettre deux fils dans le même trou.

L'espacement entre chaque alvéole est de 2,54 mm, et entre chaque rangée de 5,08 mm, si bien qu'on est à même d'insérer très facilement les différents composants, y compris les transistors.

(1) Sieber-Scientific, St-Julien-du-Gua, 07190 St-Sauveur-de-Montagut, ou A.C.E.R., 42, rue de Charol, 75010 Paris.

Des connexions mobiles, réalisées avec des fils de quelques centimètres de long, terminés par des fiches bananes à chaque extrémité, permettent d'assurer des liaisons de rangée à rangée.

Les connexions avec des éléments extérieurs comme les piles, les appareils de mesure, les potentiomètres s'effectueront à l'aide de fils d'une quinzaine de centimètres de long terminés par des pinces crocodiles à une extrémité.

## Circuit électrique

Cette première manipulation a pour but de familiariser notre lecteur avec la réalisation d'un circuit électrique complet, l'utilisation des éléments les plus élémentaires et leur représentation schématisée.

Dans cette expérience, et les suivantes, nous utiliserons un générateur électrique, c'est-à-dire un appareil qui fournit de l'électricité. Nous nous servirons d'une pile pour lampe dont la tension est de 4,5 V, ou de plusieurs piles 1,5 V que nous grouperons suivant un mode déterminé que nous étudierons plus loin.

Remarquons que les deux bornes de la pile sont constituées par deux lames de laiton. La plus courte correspond à la borne positive parfois signalée par le signe +, la plus longue à la borne négative marquée du signe -.

D'autre part, on utilisera pour nos premières manipulations quelques supports en matière plastique, pour ampoule de cadran, auxquels on aura soudé deux fils de connexion rigides, de 5 cm de longueur environ, qui seront introduits dans les pinces (fig. I-13).

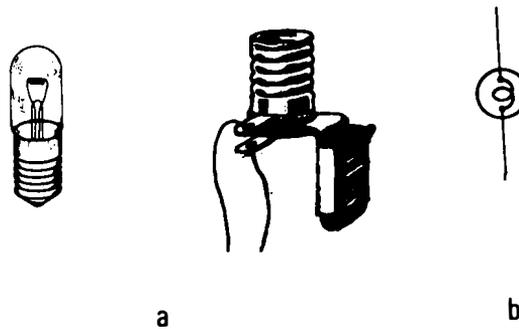


Fig. I-13.

## Réalisation du circuit

Réalisons un circuit électrique simple. Pour cela, disposons un interrupteur unipolaire entre les pinces C5 et C6, l'un des contacts de l'interrupteur étant réuni par un fil à la pince C5, l'autre à la pince C6. La pince J1 est connectée au pôle positif de la pile, la pince C1 au pôle négatif. A l'aide des fils de connexion munis de fiches bananes, relierons J5 à J6.

Introduisons les deux extrémités des fils d'un des supports de lampe précédemment préparé en J10 et C10 et vissons dans celui-ci une ampoule 4 V-300 mA. L'interrupteur est ouvert.

Ce circuit est représenté schématiquement à la figure I-14. Les traits gras représentent les connexions externes à la boîte. Les coordonnées des pinces sont données à titre purement indicatif pour familiariser nos lecteurs avec l'utilisation de la boîte de connexion, mais on peut réaliser le circuit différemment.

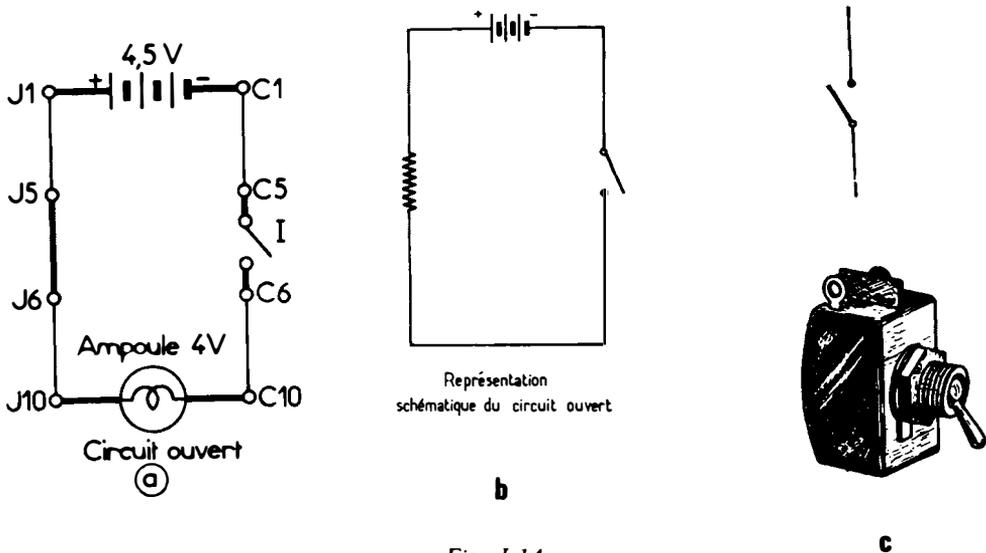


Fig. I-14.

Un tel montage constitué d'une lampe reliée aux deux pôles d'une pile constitue un *circuit électrique*.

1° Fermons l'interrupteur ; la lampe s'allume. Le courant part du pôle négatif (—) de la pile, traverse la lampe et retourne au pôle positif (+) de la pile, à l'extérieur, puis du pôle positif au pôle négatif à l'intérieur de la pile.

*Le circuit électrique est fermé.* Le circuit est représenté à la figure I-15.

2° Ouvrons l'interrupteur ; le filament de la lampe s'éteint. Le courant électrique ne circule plus.

*Le circuit électrique est ouvert.* L'interrupteur est donc un dispositif qui permet de fermer ou d'ouvrir à volonté un circuit électrique.

Le circuit électrique peut s'ouvrir accidentellement :

- si le filament de la lampe est coupé, on dit qu'il est grillé ;
- si un des fils du circuit est coupé ou une de ses extrémités « en l'air », c'est-à-dire détachée ou relâchée de la borne à laquelle il était fixé.

Toute interruption dans le circuit interrompt la circulation du courant.

3° Fermons à nouveau l'interrupteur. Au bout de quelques instants, touchons l'ampoule. Nous constatons que celle-ci s'échauffe.

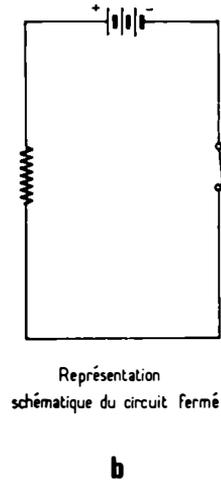
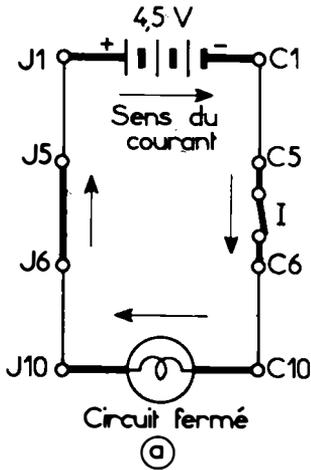


Fig. I-15.

L'énergie électrique fournie par la batterie se manifeste :

1° Par des effets lumineux : l'ampoule s'allume.

2° Par des effets calorifiques : l'ampoule s'échauffe.

Elle se transforme en deux autres formes d'énergie : chaleur et lumière.

L'ampoule s'échauffe par suite de la chaleur rayonnée par le filament ; celui-ci est porté à l'incandescence par le passage du courant. La chaleur dégagée se dissipe dans l'air et l'ampoule atteint une température d'équilibre. Le filament constitué d'un conducteur très fin oppose une forte résistance au passage du courant.

Si l'on maintient le circuit fermé, le phénomène se poursuit pendant une période de temps aussi prolongée que s'effectue l'action chimique de la batterie qui a pour effet d'entretenir le mouvement d'électrons.

La batterie est alors usée et il convient de la remplacer.

*La pile est un appareil qui transforme de l'énergie chimique en énergie électrique. Cet appareil est appelé générateur électrique.*

4° Modifions le circuit de la manière suivante. Enlevons l'interrupteur précédemment disposé entre C5 et C6. Supprimons la liaison directe entre J5 et J6. Plaçons l'interrupteur entre J5 et J6, c'est-à-dire entre le pôle positif et le filament et réunissons C5 et C6 (fig. I-16).

Fermons l'interrupteur. La lampe s'éclaire de la même façon que précédemment.

Ceci prouve que l'interrupteur peut être disposé en n'importe quel point du circuit. Dès que ce dernier est coupé, les manifestations de chaleur et de lumière constatées cessent immédiatement. Le courant ne circule plus.

5° Réunissons pour un court temps, les pinces J6 et C6 à l'aide d'un fil de cuivre. Aucun courant ne passe dans la lampe. Fermons l'interrupteur. Nous ne

constatons aucun autre phénomène apparent. Cependant notre pile est en court-circuit et se décharge rapidement, le pôle positif étant relié directement au pôle négatif.

Cette disposition doit être évitée à tout prix dans toute installation électrique. Un courant très intense s'établit puisqu'aucune résistance n'est en série dans le circuit.

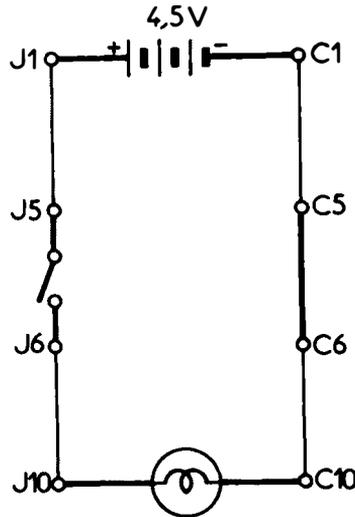


Fig. I-16.

Un court-circuit peut se produire accidentellement ; c'est le cas notamment si deux fils non isolés arrivent en contact accidentel. Nous verrons plus loin comment les fusibles protègent les installations contre les courts-circuits.

### Notion de résistance

Reprenons le montage de la figure I-14.

1° Remplaçons le fil réunissant les pinces J5 et J6, tout d'abord par un fil de matière plastique, ensuite par un morceau de fil de maillechort ou un fil de fer fin et long, par exemple, et fermons l'interrupteur dans les deux cas.

Nous constatons tout d'abord que la lampe ne s'allume pas, donc le courant ne passe pas.

Ensuite, que la lampe s'éclaire faiblement ; donc le courant passe difficilement. Nous dirons que le fil de fer offre une plus grande résistance que le cuivre au passage du courant.

*Conclusion.* — Tous les corps ne permettent pas le passage du courant électrique de la même façon.

Les corps isolants, comme le caoutchouc, le verre, offrent une forte opposition à la circulation du flux des électrons. Ce sont les *corps mauvais conducteurs* ou isolants.

Les corps bons conducteurs comme les métaux offrent une faible opposition à la circulation du flux d'électrons. Cette opposition à la circulation du courant est appelée *résistance*. Celle-ci est une grandeur mesurable. L'unité de résistance est l'*ohm* (symbole  $\Omega$ ). Plus la valeur en ohms d'une résistance est élevée, plus celle-ci s'oppose au passage du courant.

Le sous-multiple de l'ohm est le *microhm* (symbole  $\mu\Omega$ ) qui vaut un millionième d'ohm.

Le multiple est le *mégohm* (symbole  $M\Omega$ ) qui vaut un million d'ohms.

Lorsqu'un conducteur est parcouru par un courant il s'échauffe d'autant plus que sa résistance est élevée. Ainsi l'élément chauffant d'un fer à repasser est constitué d'un fil à très grande résistance. L'énergie électrique est ainsi dissipée sous forme de chaleur.

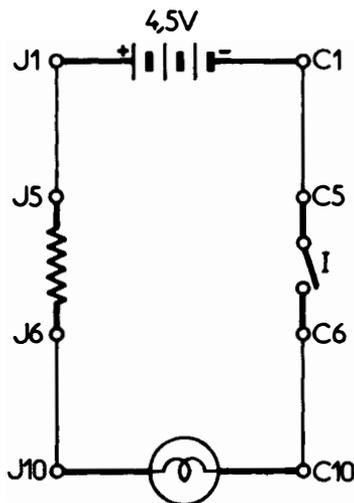


Fig. I-17.

### Résistance dans un circuit

Notre boîte-connexion est montée comme l'indique la figure I-17.

1° Disposons une résistance de  $10\ \Omega$ -1 W entre les pinces J5 et J6. Fermons l'interrupteur. La lampe n'éclaire pas normalement parce que la résistance s'oppose au passage du flux de courant.

2° Remplaçons la résistance précédente par une autre de  $20\ \Omega$ -1 W. Fermons l'interrupteur. La valeur de la résistance est si élevée qu'elle limite le courant à une faible valeur. Ainsi, une très faible partie seulement est transformée en lumière.

*Conclusion.* - Pour réduire l'intensité d'un courant, il suffit d'intercaler dans le circuit, un ou plusieurs conducteurs offrant une résistance connue, appelés résistances.

3° Disposons une ampoule 2 V-0,1 A dans le support et une résistance de  $10\ \Omega$ -1/4 W entre les pinces J5 et J6. Fermons l'interrupteur. Après quelques minutes, la résistance s'échauffe légèrement.

Ouvrons le circuit et disposons à la place de l'ampoule précédente une ampoule 2 V-0,5 A. Fermons l'interrupteur. Après quelques minutes, la résistance est brûlante. Celle-ci laisse passer un courant plus élevé, elle rayonne davantage de chaleur.

Cet effet calorifique s'appelle l'effet Joule. Il dépend : 1° de la valeur de la résistance ; 2° de l'intensité du courant ; 3° du temps de passage du courant.

### Contrôle de l'intensité du courant électrique

Nous avons vu précédemment que l'introduction d'une résistance dans un circuit électrique limitait l'intensité du courant qui traverse ce circuit. Pour contrôler l'intensité et la valeur de l'énergie absorbée par un élément, on utilise donc des résistances. Celles-ci n'ont pas toujours une valeur fixe car il est souvent nécessaire d'ajuster la valeur employée afin de régler avec précision le courant.

Les résistances peuvent se classer suivant les types suivants :

— Les résistances au carbone à couche ou au carbone aggloméré, composées d'un bâtonnet de céramique recouvert d'une couche d'un composé chimique à base de carbone, ou d'un bâtonnet de matière à base de carbone (fig. I-18).

RÉSISTANCE FIXE		
RÉSISTANCE VARIABLE A COLLIER		
POTENTIOMÈTRE RHÉOSTAT		

Fig. I-18.

— Les résistances bobinées, constituées par un fil résistant enroulé sur un tube de verre ou de céramique.

— Les résistances à colliers. Ce sont des résistances bobinées comportant un ou plusieurs colliers mobiles que l'on déplace pour fixer la valeur de la résistance.

— Les rhéostats et potentiomètres sont des résistances variables à curseur. Les modèles non bobinés sont constitués d'un cercle en matière isolante, portant une piste graphitée sur laquelle appuie un curseur. Il est donc possible ainsi de disposer de la totalité, ou d'une partie seulement, de la tension appliquée aux bornes de la résistance. Les modèles bobinés, comme leur nom l'indique, sont constitués d'un fil résistant enroulé sur un support de porcelaine ; la prise s'effectue par un curseur se déplaçant sur l'enroulement.

Le potentiomètre comporte généralement un interrupteur commandé par l'axe qui, au-delà de la position minimum assure l'ouverture ou la fermeture d'un circuit, qui est souvent celui de l'alimentation, permettant ainsi la mise en marche ou l'arrêt du poste.

1° Enlevons la résistance fixe disposée entre les pinces J5 et J6 et remplaçons-la par un potentiomètre de  $100\ \Omega$  monté en résistance variable comme l'indique le schéma de la figure I-19.

Disposons dans le support de lampe, une ampoule 4 V-300 mA et fermons l'interrupteur.

2° Tournons le potentiomètre de façon à obtenir le maximum d'illumination de la lampe. Dans cette position nous constatons que la portion de résistance disposée dans le circuit est nulle.

3° Tournons le potentiomètre dans l'autre sens. L'éclat de la lampe diminue progressivement et le minimum d'éclairément est obtenu quand toute la résistance est insérée dans le circuit.

Ainsi si l'on tourne lentement le contact mobile du potentiomètre de droite à gauche, on passe successivement d'intensité maximale à l'intensité minimale.

Nous allons maintenant mesurer cette intensité.

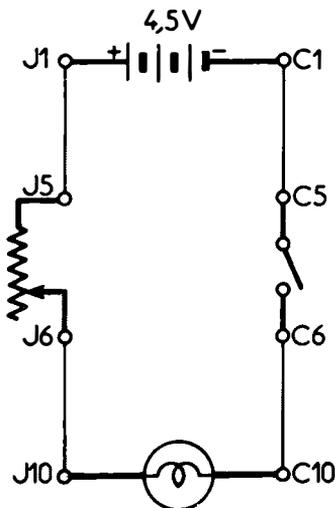


Fig. I-19.

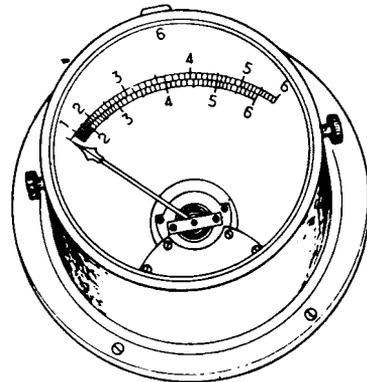


Fig. I-20.

## Mesure de l'intensité

On mesure l'intensité du courant avec un ampèremètre (fig. I-20). Son fonctionnement est basé sur la déviation d'un cadre mobile entre les bornes duquel circule le courant à mesurer. La déviation est d'autant plus importante que le courant est intense. Une aiguille, solidaire du cadre, se déplace devant un cadran gradué sur lequel on lit directement l'intensité.

Pour mesurer une intensité, on coupe le circuit et on relie les deux bornes de l'ampèremètre aux deux extrémités obtenues par la coupure du circuit.

Complétons notre boîte-connexion par l'adjonction d'un ampèremètre comme l'indique le schéma théorique de la figure I-21. L'appareil devra pouvoir mesurer les courants entre 0 et 0,5 A. Si l'on dispose d'un contrôleur universel, les mesures qui suivent pourront s'effectuer avec plus de précision. Il y aura lieu de respecter les polarités, la fiche rouge correspondant à la borne positive et la borne noire à la borne négative, et de disposer l'instrument sur la gamme 0-500 mA.

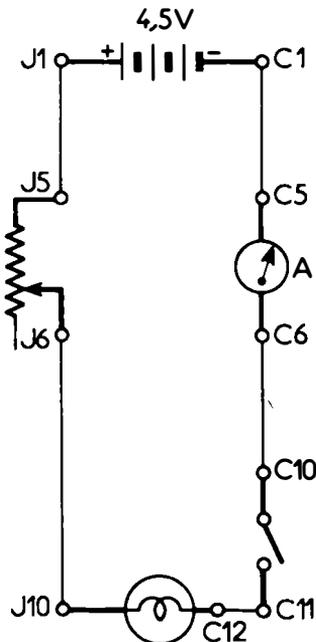


Fig. I-21.

Manœuvrons le potentiomètre : nous constatons que l'intensité du courant varie entre 100 et 200 mA.

Bien entendu, l'ampèremètre et le potentiomètre pourraient être placés en tout autre point du circuit.

*L'ampèremètre se branche toujours en série dans le circuit dont on veut mesurer l'intensité du courant qui traverse celui-ci.*

## Contrôle de la tension

La tension exigée par un élément d'un circuit n'est pas toujours disponible. Nous avons vu précédemment qu'une résistance disposée en série dans le circuit permet de limiter l'intensité. Nous allons voir qu'elle permet également de régler la tension.

Une résistance possède sa propre valeur ohmique et le courant qui la traverse provoque à ses bornes une chute de tension afin que la tension appliquée à l'élément du circuit ne soit pas excessive.

Voyons par exemple, comment utiliser une ampoule prévue pour une tension de 2 V avec une batterie de 6 V.

Utilisons le circuit de la figure I-17. Introduisons dans le support de lampe une ampoule 2 V-100 mA et entre les pinces J5 et J6 une résistance de 40  $\Omega$ .

1° Fermons l'interrupteur. La lampe prévue pour une tension de 2 V fonctionne effectivement avec une tension de 6 V. La valeur de la résistance est telle qu'elle provoque une chute de tension de 4 V à ses bornes afin que la tension appliquée aux bornes de la lampe soit effectivement de 2 V et le courant limité à une intensité de 100 mA pour que celle-ci fonctionne dans des conditions normales. Nous verrons plus loin comment on peut calculer la valeur de la résistance nécessaire.

Ainsi, une résistance a pour rôle de régler la tension et le courant afin de placer les éléments d'un circuit dans leurs conditions normales de fonctionnement.

## Circuit série

Les différents éléments d'un circuit électrique peuvent être disposés en série, en parallèle ou en série parallèle. Ces différentes dispositions offrent des caractéristiques différentes. Nous commencerons par l'étude du circuit série.

Les piles sont le plus souvent composées d'éléments disposés en série. Ainsi, la classique pile de poche comporte trois éléments de 1,5 V disposés en série. Dans cette disposition le pôle positif + d'un élément est toujours relié au pôle négatif - de l'élément voisin (fig. I-22).

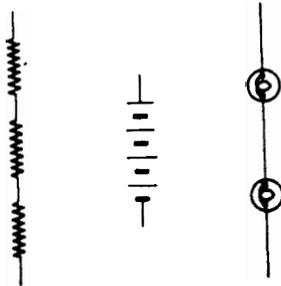
Si chaque élément fournit la même tension, la tension totale obtenue est égale à la tension d'un élément multipliée par le nombre d'éléments.

La tension (ou différence de potentiel) aux bornes d'un circuit se mesure à l'aide d'un voltmètre. Son apparence est la même que celle d'un ampèremètre, mais les graduations du cadran sont indiquées en volts. Par ailleurs son branchement est très différent. Alors que le premier était disposé en série dans le circuit, après coupure du circuit, le voltmètre, se monte en dérivation, c'est-à-dire sans interruption du circuit.

Notre boîte-connexion étant maintenant complètement équipée comme l'indique la figure I-23, nous allons étudier les différentes caractéristiques du circuit série.

1° Groupons en série deux éléments de pile 1,5 V en utilisant par exemple un coupleur ou en soudant un fil de connexion entre le + de l'un et le - de

l'autre et appliquons les bornes du voltmètre ou du contrôleur en position « volts » gamme 6 V aux pôles extrêmes. Celui-ci indique une tension de 3 V ( $1,5 \times 2$ ). Groupons trois éléments, la tension est de 4,5 V ( $1,5 \times 3$ ) et avec quatre éléments la tension est de 6 V ( $1,5 \times 4$ ).



Circuits série

Fig. I-22

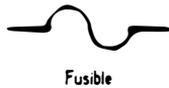


Fig. I-24.

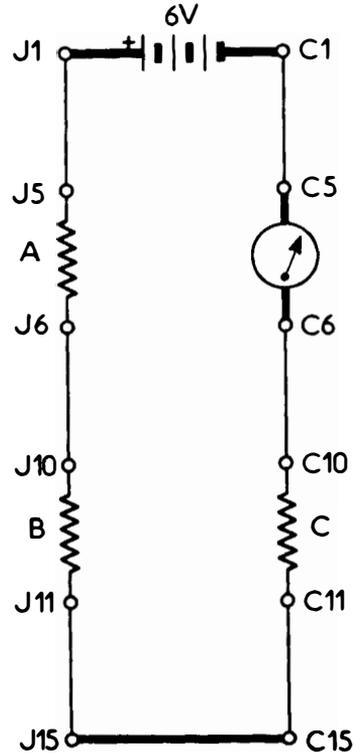


Fig. I-23

*Si l'on groupe plusieurs éléments de pile en série, la tension obtenue est égale à la somme des tensions de chacun des éléments.*

2° Disposons trois résistances de  $20 \Omega$ -2 W chacune, comme l'indique la figure I-23. Le générateur est constitué par quatre éléments de 1,5 V en série; la tension aux bornes est de 6 V. L'ampèremètre ou le contrôleur universel utilisé sur l'échelle 0,5 A à fond d'échelle est intercalé dans le circuit.

L'ampèremètre indique que l'intensité du courant qui traverse le circuit est peu élevée (100 mA environ), alors que dans un circuit série ne comportant qu'une seule résistance de  $20 \Omega$ , elle s'élève à 300 mA.

*Si dans un circuit série alimenté par une source de tension de valeur fixe, l'intensité du courant qui le traverse diminue, c'est que la résistance totale du circuit augmente.*

3° Disposons l'ampèremètre entre les pinces C5 et C6, puis entre J15 et C15, en refermant chaque fois le circuit. L'intensité est toujours la même en n'importe quel point du circuit.

L'intensité qui traverse les différents éléments d'un circuit série est partout la même.

4° Enlevons la résistance A et remplaçons-la par une résistance de valeur plus faible,  $10 \Omega$  par exemple. L'intensité du courant augmente.

5° Remplaçons la résistance B par une seconde résistance de  $10 \Omega$ . L'intensité accuse une nouvelle augmentation ( $150 \text{ mA}$  environ).

*Conclusion.* — *L'intensité du courant circulant dans un circuit série augmente quand la résistance du circuit diminue.*

*La résistance totale du circuit est égale à la somme des résistances disposées dans le circuit.*

6° L'intensité étant la même en tous les points d'un circuit série, chaque élément du circuit doit pouvoir supporter l'intensité maximale qui parcourt le circuit.

Dans un circuit électrique, c'est le fusible qui assure la fonction de protection contre une intensité excessive.

Si un fusible prévu pour supporter une intensité de  $0,5 \text{ A}$  est disposé dans un circuit traversé par un courant sensiblement plus élevé, il fond et le circuit est coupé.

La représentation schématique d'un fusible est indiquée à la figure I-24.

7° Replaçons en A, B, C, une résistance de  $20 \Omega$ - $1 \text{ W}$ ; la tension du générateur est de  $6 \text{ V}$ .

Mesurons la tension aux bornes des différentes résistances. Les résultats sont les suivants :

Aux bornes de	A = 2	V <sub>1</sub>
	B = 2 V	V <sub>2</sub>
	C = 2 V	V <sub>3</sub>

Mesurons maintenant la tension entre les pinces suivantes, et consignons les résultats dans le tableau ci-dessous :

entre	J <sub>1</sub> et C <sub>1</sub> = 6 V	VT
	J <sub>5</sub> et J <sub>6</sub> = 2 V	V <sub>1</sub>
	J <sub>5</sub> et J <sub>11</sub> = 4 V	V <sub>4</sub>
	J <sub>5</sub> et C <sub>10</sub> = 6 V	VT

Ces différentes mesures peuvent être schématisées suivant la figure I-25. Les différentes résistances de valeurs égales sont désignées par  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ . Le mouvement d'électrons provoqué par la force électromotrice de la pile doit vaincre les résistances successives. Il en résulte chaque fois une diminution de la force initiale que l'on désigne sous le nom de chute de tension

Aux bornes de chaque résistance  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , la chute est de  $2 \text{ V}$ . Aux bornes de  $R_1$ ,  $R_2$ , cette chute est de  $4 \text{ V}$  et pour l'ensemble  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , elle est égale à  $6 \text{ V}$ , c'est-à-dire à la tension appliquée aux bornes du circuit.

Nous pensons que nos lecteurs sont maintenant familiarisés avec l'utilisation de notre boîte-connexion, et nous nous contenterons à l'avenir de représenter le schéma électrique de nos montages en leur laissant le soin de passer à la réalisation pratique.

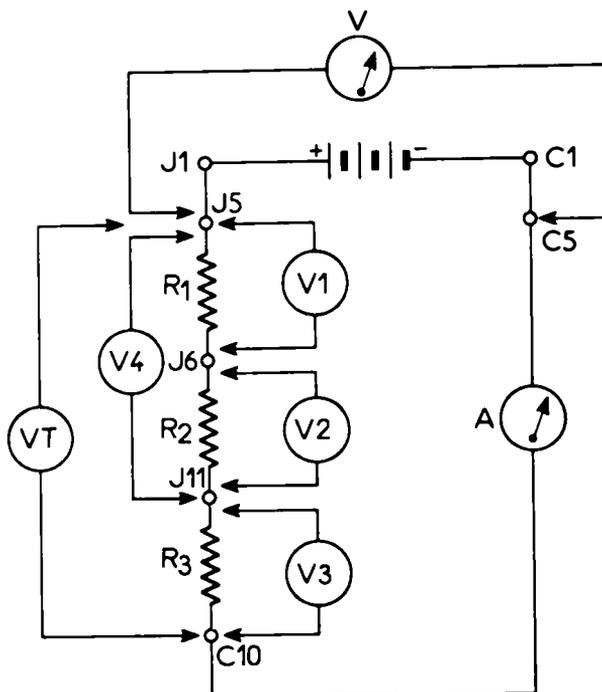


Fig. I-25.

### Circuit parallèle

1° Groupons en parallèle trois éléments de pile 1,5 V. Pour cela réunissons ensemble tous les pôles positifs d'une part, et tous les pôles négatifs d'autre part.

Mesurons la tension à l'aide d'un voltmètre. Celle-ci est de 1,5 V (fig. I-26).

Si l'on groupe plusieurs éléments en parallèle, la tension est égale à celle d'un élément.

2° Nous avons établi précédemment (fig. I-23) qu'avec une seule résistance de  $20 \Omega$  disposée dans un circuit série alimenté sous 6 V, l'intensité s'élevait à 300 mA.

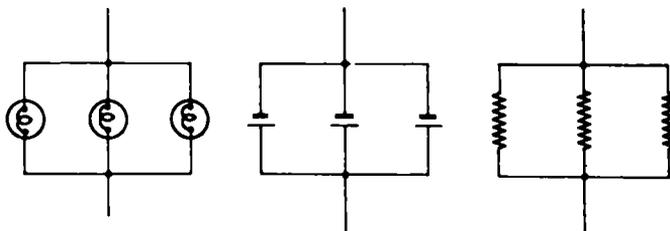


Fig. I-26.

Prenons maintenant deux résistances identiques de  $20\ \Omega$  chacune que nous disposons en parallèle, comme l'indique la figure I-27. On constate que dans ces conditions, l'intensité s'élève à 600 mA. Tout se passe comme si la valeur de la résistance était divisée par 2.

*Règle.* — Si l'on dispose deux résistances égales en parallèle, la valeur de la résistance équivalente est égale à  $R$  divisée par 2.

$$R \text{ équivalente} = \frac{R}{2}$$

Avec trois résistances égales nous aurons :

$$R \text{ équivalente} = \frac{R}{3}$$

d'où la règle générale  $R \text{ équi} = \frac{R}{n}$

( $R$  = résistance d'un élément,  $n$  = nombre d'éléments.)

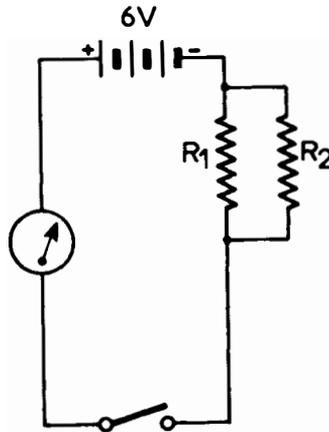


Fig. I-27.

*Formule générale.* La formule qui permet d'obtenir la valeur équivalente  $R_{\text{equi}}$ , c'est-à-dire la valeur de la résistance unique qui produirait les mêmes résultats que les résistances  $R_1, R_2, R_3 \dots$  disposées en parallèle, est la suivante :

$$\frac{1}{R_{\text{equi}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Dans le cas de deux seules résistances en parallèle, on peut utiliser la formule simplifiée

$$R_{\text{equi}} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

*Applications.* — Soient deux résistances égales en parallèle, de valeur  $R = 1\ 000\ \Omega$  chacune.

$$R_{\text{equi}} = \frac{1\ 000 \times 1\ 000}{2\ 000} = 500\ \Omega$$

La valeur de la résistance équivalente est égale à  $\frac{R}{2}$ .

— Soit un groupement en parallèle de trois résistances :

$$R_1 = 200 \Omega ; R_2 = 500 \Omega ; R_3 = 1\,000 \Omega$$

$$\frac{1}{R_{\text{equi}}} = \frac{1}{200} + \frac{1}{500} + \frac{1}{1\,000}$$

Réduisons au même dénominateur :

$$\frac{1}{R_{\text{equi}}} = \frac{5}{1\,000} + \frac{2}{1\,000} + \frac{1}{1\,000}$$

$$\frac{1}{R_{\text{equi}}} = \frac{8}{1\,000}$$

$$R_{\text{equi}} = \frac{1\,000}{8} = 125 \Omega$$

*Remarque :* Si l'on groupe plusieurs résistances de valeurs différentes, la résistance équivalente est toujours inférieure à la valeur de la plus faible résistance.

3° Revenons au schéma de la figure I-27. Mesurons la tension aux bornes de  $R_1$ - $R_2$ . Celle-ci est toujours de 6 V.

4° Disposons aux bornes de  $R_1$ - $R_2$  une troisième résistance de 100  $\Omega$ , par exemple. Le courant augmente de nouveau.

5° En partant du circuit de la figure I-27, déplaçons l'ampèremètre pour le disposer dans la branche A, comme l'indique la figure I-28.

La valeur indiquée est celle de l'intensité du courant qui traverse  $R_1$ .  $I_1 = 300$  mA.

5° Disposons l'ampèremètre dans la branche B.  $I_2 = 300$  mA.

*Conclusion.* — Lorsque plusieurs résistances sont montées en parallèle, le courant total débité par le générateur augmente et se partage dans les différentes branches du circuit, mais la résistance totale diminue.

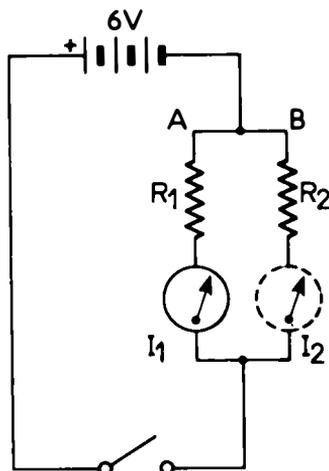


Fig. I-28.

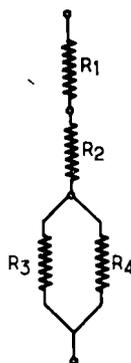


Fig. I-29.

## Montages mixtes

Certains circuits comprennent à la fois des montages série et parallèle. Un exemple en est donné à la figure I-29. Pour calculer la valeur de la résistance équivalente, il faut distinguer les différents groupements et appliquer les formules citées précédemment.

Dans le cas de la figure I-29 :

$$RT = \underbrace{\frac{R_1 + R_2}{\text{groupement}}}_{\text{série}} + \underbrace{\frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4}}_{\text{groupement parallèle}}$$

$$\text{Soit } R_1 = 1\,000 \, \Omega$$

$$R_2 = 700 \, \Omega$$

$$R_3 = 600 \, \Omega$$

$$R_4 = 600 \, \Omega$$

$$RT = 1\,000 \, \Omega + 700 \, \Omega + 300 \, \Omega = 2\,000 \, \Omega$$

### Récapitulation des caractéristiques du circuit série

*Résistance.* La résistance totale de plusieurs résistances disposées en série est égale à la somme de toutes les résistances.

*Intensité.* L'intensité est la même en tous les points du circuit.

*Tension.* La tension, exprimée en volts, aux bornes de chaque résistance, dépend de la valeur de la résistance. Cette valeur est appelée chute de tension.

### Récapitulation des caractéristiques du circuit parallèle

*Résistance.* La résistance équivalente est inférieure à la valeur de la plus faible résistance.

*Intensité.* Le courant se partage dans les différentes branches du circuit.

*Tension.* La tension est toujours la même aux bornes de chaque branche.

### Résistance d'un conducteur

1° Réalisons le circuit représenté à la figure I-30 comportant une pile de 6 V, un rhéostat, un ampèremètre et une résistance en série.

Réalisons trois résistances à l'aide d'un fil de maillechort de 0,25 mm de diamètre et ayant respectivement 0,25 m, 0,50 m, 1 m que l'on enroule, à spires non jointives sur un morceau de carton. L'intensité du courant est maintenue constante en agissant sur le rhéostat.

Plaçons successivement les trois résistances et notons pour chacune d'elles, la différence de potentiel à leurs extrémités. Celle-ci augmente suivant la longueur du fil.

*Conclusion.* La résistance d'un conducteur dépend de sa longueur.

2° Conservons le même montage que précédemment. Réalisons à nouveau trois résistances, avec du fil de même nature et de même longueur que nous choisirons de 0,50 m, mais ayant des diamètres de section différents 2/10, 4/10, 8/10. L'intensité du courant est toujours maintenue à la même valeur et mesurons la différence de potentiel aux bornes de chacune de ces résistances.

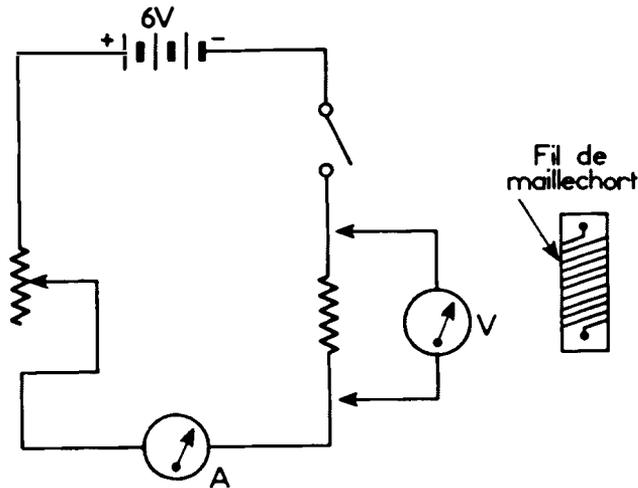


Fig. I-30.

Les valeurs relevées au voltmètre sont d'autant plus élevées que la section est faible. C'est donc que la résistance est également plus élevée, pour les faibles sections que pour les sections plus importantes.

*Conclusion.* La résistance d'un conducteur est inversement proportionnelle à sa section.

3° Dans cette troisième manipulation, nous allons réaliser, toujours de la même façon, trois résistances constituées d'un fil de même longueur, mais de nature différente. Prenons par exemple, un mètre de fil de cuivre pour la première, de fer pour la seconde, de ferro-nickel pour la troisième. L'intensité est toujours maintenue à la même valeur par la manœuvre du rhéostat.

Relevons les différences de potentiel aux bornes de chacune d'elles. Les valeurs relevées sont faibles pour le fil de cuivre, plus élevées pour le fil de fer et beaucoup plus encore pour le fil de ferro-nickel. On en déduit que la résistance du fil de ferro-nickel est plus grande que celle du fil de fer qui est elle-même plus élevée que celle du fil de cuivre.

*Conclusion.* — La résistance d'un conducteur dépend de sa nature.

Les différents conducteurs se caractérisent par leur coefficient de résistivité. Celle-ci s'exprime généralement en microhms-centimètre ( $\mu\Omega\text{-cm}$ ) ou en ohms-centimètre ( $\Omega\text{-cm}$ ).

Ainsi un fil de cuivre de  $1\text{ cm}^2$  de section et de 1 cm de longueur a une résistance de 1,6 microhm. La résistivité du cuivre est de  $1,6\ \mu\Omega\text{-cm}$ . Celle de l'aluminium est de  $2,5\ \mu\Omega\text{-cm}$ , celle du ferro-nickel de 80.

*Résumons.* — La résistance d'un fil conducteur homogène :

- est proportionnelle à sa longueur ;
- est inversement proportionnelle à sa section ;
- dépend de la résistivité du conducteur,

$$R_{(\text{ohms})} = \rho \frac{l \text{ (cm)}}{S \text{ (cm}^2\text{)}}$$

4<sup>o</sup> Disposons comme résistance une boucle de fil de ferro-nickel. Mesurons l'intensité et chauffons le fil à l'aide d'une lampe à alcool. Nous observons une diminution de l'intensité.

*Conclusion.* — La résistance d'un conducteur augmente avec la température.

### La loi d'Ohm

Nous avons vu, au cours des manipulations précédentes, que l'intensité du courant, dans un circuit électrique, dépend de la tension et de la résistance. Il existe une relation fondamentale entre ces différentes valeurs. On l'appelle loi d'Ohm, du nom du physicien qui l'a exprimée pour la première fois.

Cette loi s'énonce de la manière suivante :

*Dans un circuit électrique, l'intensité du courant est directement proportionnelle à la tension appliquée à ses bornes et inversement proportionnelle à la résistance.*

Sous une forme mathématique, on peut écrire

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

I = intensité, exprimée en ampères, A.

U = tension, ou différence de potentiel, exprimée en volts, V.

R = résistance, exprimée en ohms,  $\Omega$ .

Cette loi peut s'exprimer sous deux autres formes :

1<sup>o</sup> 
$$U = I \times R$$

$$\begin{array}{ccccc} \text{Tension} & = & \text{Intensité} & \times & \text{Résistance} \\ \text{(V)} & & \text{(A)} & & \text{(\Omega)} \end{array}$$

2<sup>o</sup> 
$$R = \frac{U}{I}$$

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

### Vérification de la loi d'Ohm

Reprenons le montage de la figure I-21. La source de tension est fournie par deux éléments de pile 1,5 V, soit 3 V.

1<sup>o</sup> Disposons une ampoule 6 V dans le support, et tournons le rhéostat vers la gauche, de façon qu'aucune résistance ne soit en circuit. Fermons l'interrupteur. Le filament rougit faiblement, l'intensité est faible.

2° Remplaçons la pile de 3 V, par une autre de 6 V. Le filament éclaire brillamment ; l'intensité augmente.

*Conclusion.* — *L'intensité varie dans le même sens que la tension ; si la tension augmente, l'intensité augmente. Si la tension diminue, l'intensité diminue également.*

3° Introduisons dans le circuit une résistance de plus en plus grande en tournant l'axe du rhéostat de gauche à droite.

Le filament brille de moins en moins intensément, l'intensité diminue avec l'élévation de la résistance.

*Conclusion.* — *L'intensité diminue si la résistance augmente, l'intensité augmente si la résistance diminue.*

## Applications de la loi d'Ohm

### I. Calcul de l'intensité

1° Le montage est celui de la figure I-31. La tension de la pile est de 6 V. Introduisons une résistance de  $10\ \Omega$  dans le circuit.

$$I = \frac{E}{R} = \frac{6}{10} = 0,6\ \text{A}, \text{ valeur que nous contrôlons à l'ampèremètre.}$$

2° Introduisons une seconde résistance de  $10\ \Omega$  en série dans le circuit.

La résistance totale est maintenant de  $20\ \Omega$ .

$$I = \frac{E}{R} = \frac{6}{20} = 0,3\ \text{A}, \text{ nouvelle valeur lue à l'ampèremètre.}$$

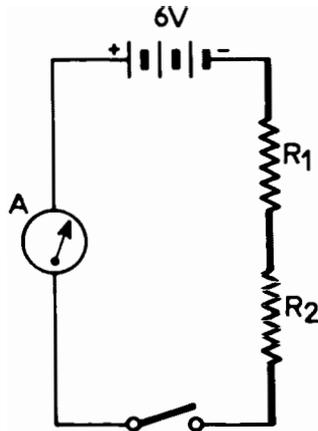


Fig. I-31.

### II. Calcul de la résistance.

3° Reprenons le montage utilisé au (1°) et disposons dans le circuit une résistance de valeur inconnue. Fermons l'interrupteur. L'intensité lue à l'ampèremètre est de 0,5 A. Avec le voltmètre, mesurons la chute de tension aux bornes de la résistance ; nous lisons 6 V.

Appliquons la formule  $R = \frac{E}{I} = \frac{6}{0,5} = 12 \Omega$ .

4° Ajoutons une autre résistance de valeur inconnue en série avec la précédente.

Lisons l'intensité  $I = 0,3 \text{ A}$  et la chute de tension entre les bornes opposées de ces deux résistances.  $V = 6 \text{ V}$ .

$$\text{d'où} \quad R_1 + R_2 = \frac{6}{0,3} = 20 \Omega$$

$$R_2 = 20 \Omega - 12 \Omega = 8 \Omega.$$

Ces valeurs peuvent être vérifiées à l'ohmètre, comme nous le verrons plus loin.

Comme on le voit, la loi d'Ohm peut servir à calculer la valeur de la résistance à disposer dans un circuit pour obtenir une intensité voulue, calculer la valeur d'une résistance lorsque celle-ci est inconnue...

### **Calcul de la tension à appliquer aux bornes d'un circuit**

Soit à calculer la tension nécessaire pour permettre un flux de courant d'intensité voulue à travers une résistance donnée.

Soit une résistance  $R$  de  $20 \Omega$  devant être traversée par un courant de  $0,3 \text{ A}$ .

D'après la loi d'Ohm, nous écrivons :

$$U = I R = 20 \times 0,3 = 6 \text{ V}.$$

Pour une résistance de  $20 \Omega$  et un courant de  $0,5 \text{ A}$

$$U = 20 \times 0,5 = 10 \text{ V}.$$

Ce que nous pouvons vérifier à l'aide du montage précédent.

### **FORMULES A RETENIR**

$$U \text{ ou } E = I R$$

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

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

### **Notion de puissance électrique**

Supposons que dans un immeuble en construction, un maçon soulève à l'aide d'une poulie, une charge de  $20 \text{ kg}$  à une hauteur de  $10 \text{ m}$ .

Pour soulever la charge l'homme doit exercer une force de  $20 \text{ kg}$ . Il accomplit, quel que soit le temps de la montée, un travail :

$$W = 20 \times 10 = 200 \text{ kgm}.$$

En face, dans un autre immeuble, le même travail est effectué par un moteur. La charge et la hauteur étant identiques, le travail effectué est le même.

Mais alors qu'il faut 25 secondes au premier, il suffit de 5 secondes au second pour faire le même travail. Nous dirons que le moteur est plus puissant que le maçon.

De même, dans un circuit électrique, il y a transport d'électrons. Un même nombre d'électrons peut se déplacer, d'un point à un autre, en des temps différents. La même quantité de travail est effectuée chaque fois, mais la vitesse avec laquelle ce travail est effectué s'appelle puissance.

On appelle puissance d'un générateur, l'énergie totale fournie par ce dernier en une seconde. Celle-ci peut se transformer en énergies de natures différentes : énergie calorifique (lampes), énergie mécanique (moteur), etc.

### Unité de puissance

L'unité de puissance est le watt (symbole W). La puissance développée dans un circuit est égale au produit de la tension ou différence de potentiel par l'intensité.

$$P = U I$$

watts = volts  $\times$  ampères.

L'indication de la puissance en watts de certains appareils constitue un facteur très important qu'il convient d'observer dans leur utilisation afin d'éviter qu'ils soient endommagés.

Les résistances utilisées dans les circuits radioélectriques se caractérisent par leur valeur de résistance en ohms et leur puissance en watts. Cette dernière notion indique la quantité d'énergie électrique pouvant être transformée en chaleur sans que l'élévation de température qui en résulte risque de l'endommager. Des résistances de même valeur ohmique peuvent avoir des valeurs différentes de puissance en watts. Plus la puissance d'une résistance en watts est élevée, plus ses dimensions sont importantes afin qu'elle puisse dissiper une plus grande quantité de chaleur.

L'utilisation des fusibles disposés en série dans les circuits électriques pour assurer leur protection repose sur ce principe. Si l'intensité s'élève au-delà d'une limite autorisée, l'élévation de température est telle que le métal du fusible fond et le circuit est ainsi automatiquement ouvert.

Le multiple du watt (W) est le kilowatt (kW) = 1 000 W ; le sous-multiple est le milliwatt (mW) =  $\frac{1}{1\,000}$  W.

Nous avons vu que  $P = U I$ .

Mais nous savons que  $U = I R$  (Loi d'Ohm). En remplaçant U par sa valeur  $I R$ , nous obtenons une seconde formule permettant le calcul de la puissance.

$$P = U I$$
$$P = I^2 R$$

## Calcul de la puissance dissipée dans une résistance

1° Reprenons le montage de la figure I-31. La tension appliquée aux bornes est de 9 V.  $R_1 = 30 \Omega$ ;  $R_2 = 30 \Omega$ .

La résistance totale du circuit  $R_T = 60 \Omega$ .

$$I = \frac{U}{R} = \frac{9}{60} = 0,15 \text{ A ou } 150 \text{ mA, valeur vérifiée à l'ampèremètre.}$$

La puissance dissipée dans  $R_1$  et dans  $R_2$  est :

$$P = I^2 R = 0,15 \times 0,15 \times 30 = 0,675 \text{ W.}$$

2° Supprimons l'ampèremètre et refermons directement le circuit. Avec le voltmètre, mesurons la tension aux bornes de  $R_1$  et de  $R_2$ . Nous trouvons  $U = 4,5 \text{ V}$ .

La puissance dissipée dans  $R_1$  et dans  $R_2$  est

$$P = U I = 4,5 \times 0,15 = 0,675 \text{ W.}$$

ce calcul, obtenu avec l'autre formule, confirme le précédent.

*Remarque.* — Dans ce montage, pour ne pas chauffer, les résistances seront calibrées pour une puissance de 1 W.

3° Mettons en  $R_1$  une résistance calibrée 0,5 W, et en  $R_2$  une résistance calibrée 0,25 W.

Au bout d'un certain temps, nous constatons que  $R_1$  s'échauffe légèrement,  $R_2$  beaucoup plus.

Si l'expérience se prolongeait,  $R_2$  risquerait d'être endommagée.

*Règle.* — Pour éviter d'endommager une résistance, on la choisira toujours d'une puissance supérieure à la puissance dissipée.

*Nota.* — Il est aussi intéressant de pouvoir calculer l'intensité qu'une résistance de puissance et de valeur donnée peut laisser passer sans danger. On utilisera pour cela la formule

$$I = \sqrt{\frac{W}{R}}$$

Soit une résistance de  $25 \Omega$ , de puissance 20 W.

$$I = \sqrt{0,8} = 0,9 \text{ A.}$$

4° Enlever la connexion disposée à la place de l'ampèremètre et la remplacer par un fusible calibré pour une intensité de 0,5 A. Le courant passe normalement.

5° Remplacer le fusible précédent par un fusible 0,1 A. Le fusible fond (« saute ») au bout d'un certain temps parce que l'intensité qui le traverse est supérieure à la valeur pour laquelle il est calibré.



## CHAPITRE II

### MAGNETISME

Le magnétisme ou étude des propriétés des aimants revêt une importance exceptionnelle en électricité. En dehors des piles et des accumulateurs que nous avons utilisés jusqu'à maintenant comme source de tension et dont le domaine d'application est assez limité, la totalité de l'énergie électrique provient de générateurs ou d'alternateurs dont le principe de base repose sur les propriétés magnétiques des aimants.

*Aimants naturels.* — Certains échantillons de minerais de fer attirent la limaille de fer qui se dispose en forme de houppes sur certaines parties de leur surface. Ces aimants naturels furent découverts pour la première fois près de la ville de Magnésia en Asie Mineure, d'où le nom de magnétisme donné à ce pouvoir d'attraction.

La première utilisation des aimants naturels a été faite par les Chinois et par les premiers navigateurs qui remarquèrent qu'un aimant naturel, libre de ses mouvements, se dirige vers le Nord par suite de la force d'attraction de la Terre qui constitue elle-même un immense aimant naturel.

Les premières boussoles furent constituées d'aimants naturels en forme de barreau suspendu.

*Aimants artificiels.* — Frottons un morceau de fer avec un aimant naturel en le faisant glisser toujours dans le même sens et plongeons-le dans la limaille. Celle-ci adhère également : le barreau de fer s'est aimanté.

Le fer s'aimante bien, mais son aimantation est temporaire.

Effectuons la même opération avec un morceau d'acier, celui-ci possède à son tour des propriétés magnétiques qu'il gardera longtemps. On l'appelle aimant permanent.

*Pôles d'un aimant.* — Disposons sur une feuille de papier des aimants de différentes formes : barreau, aimant en U, en fer à cheval et saupoudrons de limaille de fer. Nous remarquons que la limaille ne se fixe qu'aux extrémités.

Ces points sont les « pôles » de l'aimant. On distingue ainsi un « pôle nord » et un « pôle sud » (fig. II-1).

Prenons une cuvette remplie d'eau ; disposons sur la surface un bouchon et sur ce bouchon, une aiguille aimantée. Celle-ci s'oriente. Lorsque l'aimant peut s'orienter librement, le pôle nord se dirige vers le Nord.



Fig. II-1 b.

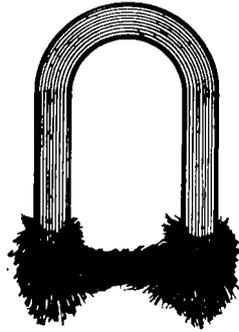


Fig. II-1 a

### Action réciproque des pôles

Prenons deux barreaux aimantés et rapprochons-les de manière que le pôle nord de l'un soit en face du pôle sud de l'autre. Les deux pôles s'attirent et les aimants se rapprochent. Faisons la même expérience en présentant le pôle nord de l'un au pôle nord de l'autre. Les aimants se repoussent et il est impossible de maintenir le contact entre l'un et l'autre (fig. II-2 a et b).

*Conclusion.* — Deux pôles de noms contraires s'attirent ; deux pôles de même nom se repoussent.

*L'aimant brisé.* — Prenons une aiguille à tricoter en acier aimantée. Brisons-la en deux parties. Nous constatons à l'aide de la limaille de fer que chacune d'elles possède un pôle nord et un pôle sud. Nous sommes en présence de deux aimants. Si nous brisons à nouveau ces aimants en deux parties, nous obtenons quatre aimants possédant aussi deux pôles différents.

Nous pouvons continuer le fonctionnement indéfiniment dans la mesure où les morceaux obtenus ont une longueur raisonnable (fig. II-3).

*Conclusion.* — Il est impossible d'isoler un pôle nord ou un pôle sud.

Replaçons bout à bout en les collant sur une planchette les morceaux de l'aiguille ainsi obtenus en rapprochant les extrémités qui ont été séparées. Nous reconstituons l'aimant primitif ayant un pôle nord et un pôle sud (fig. II-4).

*Conclusion.* — Un aimant peut être considéré comme étant constitué de petits aimants placés bout à bout et orientés de la même façon.

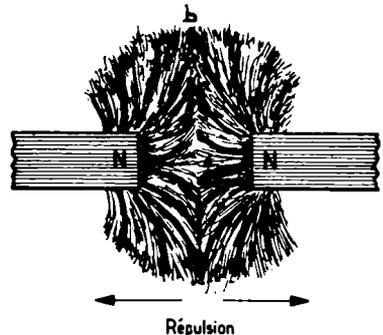
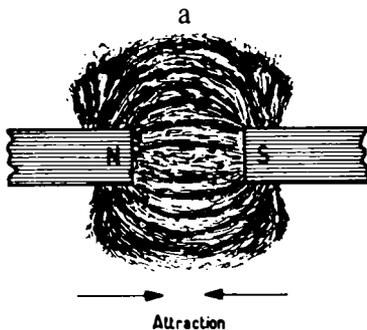


Fig. II-2.

## Champ magnétique

Disposons une aiguille aimantée sur une table. L'aiguille s'oriente dans la direction nord-sud. Approchons progressivement un barreau aimanté. Lorsque celui-ci est suffisamment près, l'aiguille oscille, dévie légèrement et s'oriente dans une direction différente de la direction nord-sud. Cette région de l'espace dans laquelle se fait sentir l'action de l'aimant s'appelle *le champ magnétique de l'aimant*.

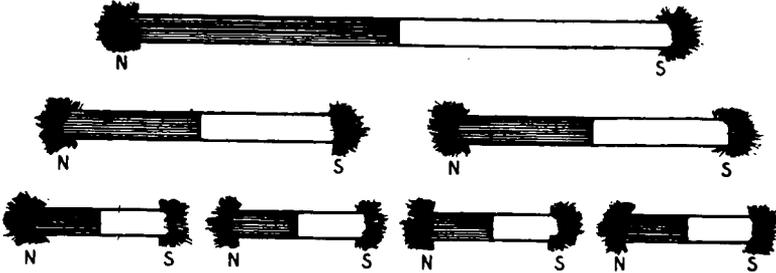


Fig. II-3.

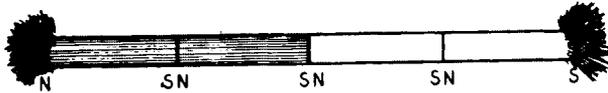


Fig. II-4.

Reculons le barreau aimanté ; l'aiguille reprend alors la direction nord-sud. Elle est alors seulement soumise à l'action magnétique terrestre.

### Matérialisation du champ magnétique d'un aimant

Prenons un barreau aimanté et disposons au-dessus une plaque de verre que nous saupoudrons de limaille de fer (fig. II-5 a). Nous constatons que celle-ci ne se répartit pas également sur la plaque. Elle se dispose suivant des lignes qui semblent sortir d'un pôle et rentrer dans l'autre. Ces lignes sont très resserrées au voisinage des pôles.



Fig. II-5 a

Elles représentent le spectre magnétique de l'aimant ; chaque ligne matérialise une ligne de force qui compose le champ magnétique de l'aimant (fig. II-5 b et 5 c).

Si on prend une aiguille aimantée et qu'on la déplace dans un champ magnétique celle-ci prend la direction de la ligne de force sur laquelle elle est placée comme on peut le voir sur la figure II-6.

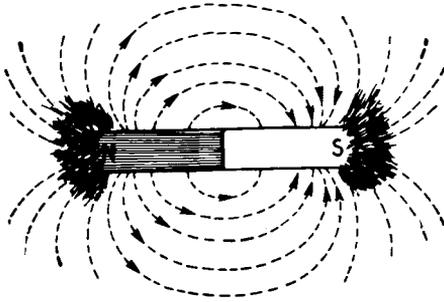


Fig. II-5 b

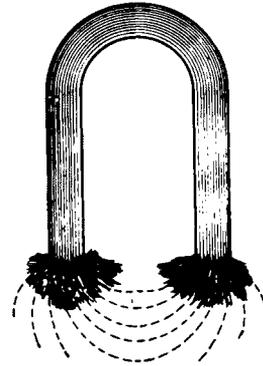


Fig. II-5 c

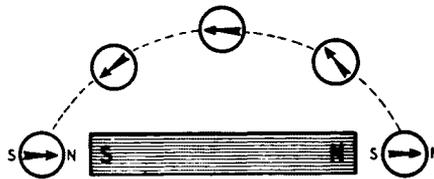


Fig. II-6.

### Action du champ magnétique sur un conducteur

On peut obtenir une variation du champ magnétique sur un conducteur qui se trouve dans son champ, soit par le déplacement rapide de l'aimant par rapport au conducteur, soit inversement par le déplacement rapide du conducteur à proximité immédiate de l'aimant qui reste fixe. C'est une des méthodes employées pour produire de l'électricité.

Prenons un fil de cuivre isolé de deux à trois mètres de long que nous enroulons en forme de bobine à spires jointives dont les extrémités sont réunies aux bornes d'une ampoule à faible intensité 2,5 V-50 mA, comme le montre la figure II-7, ou mieux, aux bornes d'un microampèremètre, et disposons à proximité un aimant puissant.

1° Déplaçons très rapidement un des pôles de l'aimant devant la bobine. Le filament de l'ampoule rougit très légèrement ou l'appareil de mesure accuse de petites impulsions indiquant un passage rapide de courant dans la bobine.

2° Répétons la même manœuvre en déplaçant cette fois la bobine, l'aimant restant fixe. Nous constatons le même phénomène.

Remarquons que ce déplacement doit s'effectuer de manière que le circuit, ou une partie de celui-ci, ait à couper des lignes de force afin que le flux qui traverse la bobine varie.

*Conclusion.* — Un fil conducteur se déplaçant à l'intérieur d'un champ magnétique est traversé par un courant électrique dû au déplacement d'un flux d'électrons.

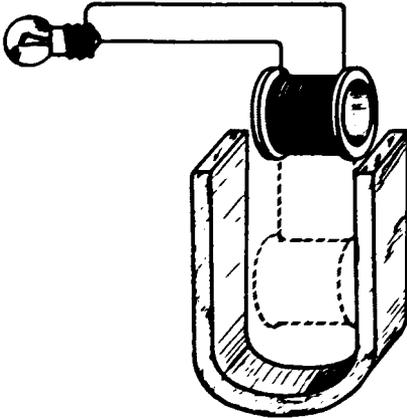


Fig. II-7.

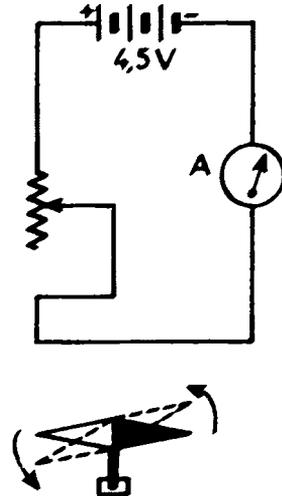


Fig. II-8.

### Champ magnétique

Nous avons vu précédemment que le déplacement d'un fil électrique à l'intérieur d'un champ magnétique donnait naissance à un courant. On peut penser qu'un courant traversant un conducteur produit à son tour un champ magnétique. C'est ce que nous allons vérifier.

Réalisons le dispositif de la figure II-8 et plaçons une aiguille aimantée de manière que le fil de cuivre reliant l'ampèremètre au rhéostat de  $100 \Omega$ , soit parallèle à l'aiguille et légèrement au-dessus.

1° L'interrupteur est ouvert ; l'aiguille aimantée est normalement orientée N.-S. Le rhéostat est entièrement en circuit, c'est-à-dire que son axe a été tourné au maximum vers la gauche.

2° Fermons l'interrupteur. L'intensité du courant est peu élevée. L'aiguille dévie légèrement. Le pôle nord dévie vers la gauche.

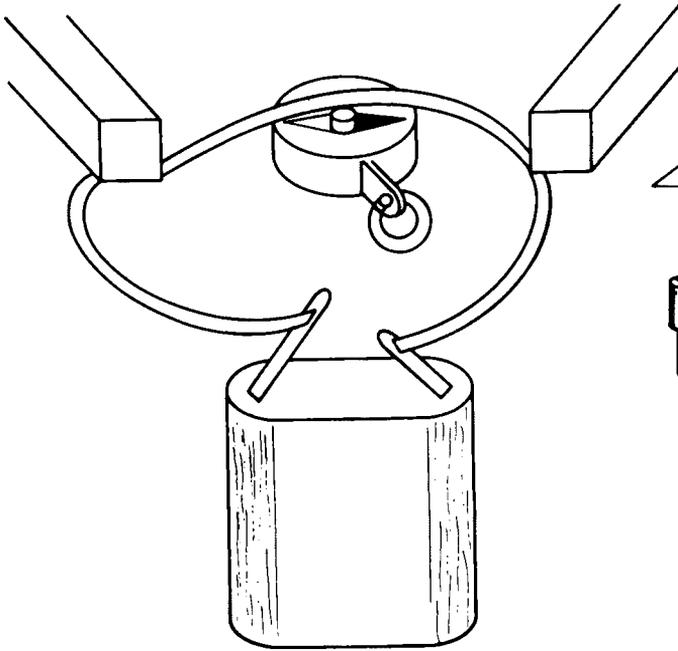
3° Tournons le rhéostat vers la droite et augmentons ainsi progressivement l'intensité du courant. La déviation s'accroît.

4° Coupons le courant à l'aide de l'interrupteur. L'aiguille aimantée reprend sa position initiale.

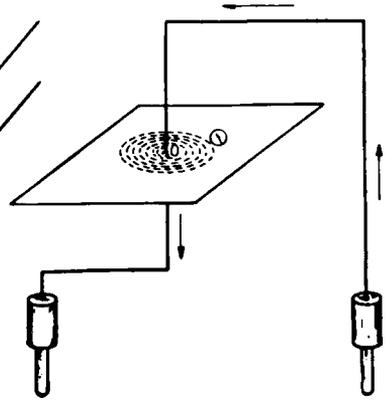
5° Invertissons les polarités de la pile. Fermons l'interrupteur. L'aiguille aimantée dévie à nouveau, mais en sens opposé.

Une version simplifiée de cette expérience est donnée à la figure II-9. Il suffit d'inverser le sens du fil pour obtenir une déviation opposée de l'aiguille aimantée.

*Conclusion.* — *Un courant électrique crée autour de lui un champ magnétique dont le sens dépend du sens du courant.*



*Fig. II-9.*



*Fig. II-10.*

### **Champ magnétique d'un courant rectiligne**

Pour matérialiser le champ magnétique du courant nous utiliserons le dispositif représenté à la figure II-10. Il comporte une plaque de plexiglas rigide traversée perpendiculairement par un conducteur dont les extrémités repliées se terminent par deux fiches que nous disposerons aux bornes d'une source d'alimentation. Faisons passer pendant quelques secondes seulement un courant assez intense de l'ordre de 5 ampères que nous pourrons obtenir en utilisant comme source de tension une batterie d'accumulateur de 6 V ou 12 V.

Fermons l'interrupteur et saupoudrons la plaque de limaille de fer en la tapotant légèrement de manière à favoriser l'orientation des grains de limaille.

La limaille se dispose en lignes concentriques autour du point 0, lignes qui représentent le champ magnétique autour du conducteur. Si on déplace une boussole autour du fil, l'aiguille s'orientera suivant la tangente à la ligne de force sur laquelle elle se trouve.

## Champ magnétique autour d'une bobine

Utilisons une feuille de plastique perforé et disposons 5 à 6 spires de 4 à 5 cm de diamètre. Cet enroulement s'appelle solénoïde (fig. II-11). 1° Le circuit est relié comme précédemment. Saupoudrons la plaque de limaille de fer et fermons le circuit. Nous constatons que les grains dessinent des lignes analogues aux lignes de force d'un barreau aimanté. Une boussole disposée sur une des lignes de force donne par sa pointe nord le sens de ces lignes ; l'aiguille s'aligne sur la direction du champ.

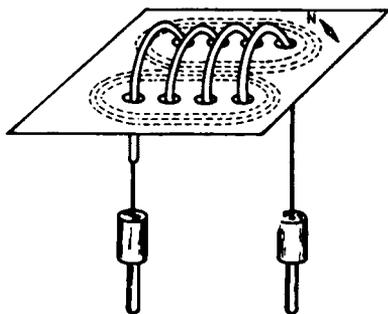


Fig. II-11.

*Conclusion.* — Une bobine parcourue par un courant se comporte comme un aimant.

2° Invertissons le sens du courant aux extrémités de la bobine. L'aiguille de la boussole oriente sa pointe nord en sens inverse.

*Conclusion.* — La polarité de la bobine dépend du sens du courant.

3° Augmentons le nombre de spires de la bobine, le nombre de lignes de force augmente également.

Une autre simple expérience montrant l'importance du champ magnétique provoqué par une bobine consiste à réaliser un enroulement très plat autour de la boussole précédente, à spires jointives, en utilisant par exemple, du fil émaillé de 0,2 mm. On constate que l'on augmente immédiatement la sensibilité de l'aiguille par rapport au courant. Avec une bobine de 50 spires, celle-ci sera 100 fois supérieure au résultat obtenu avec une seule spire. Il est ainsi possible de mettre en évidence des courants de quelques milliampères seulement.

*Conclusion.* — L'intensité du champ magnétique produit par un solénoïde traversé par un courant, est proportionnelle à l'intensité du courant et au nombre de spires.

## Pôle Nord et pôle Sud d'une bobine

Pour déterminer les pôles d'une bobine ou solénoïde on se sert d'une règle bien simple dite du bonhomme d'Ampère.

On suppose un observateur couché sur une spire, regardant à l'intérieur de la bobine, le courant conventionnel lui entrant par les pieds. Le pôle nord est à sa gauche (fig. II-12).

On emploie aussi la règle du tire-bouchon (fig. II-12). Le pôle sud correspond à la face devant laquelle il faut placer le tire-bouchon pour que celui-ci tourne

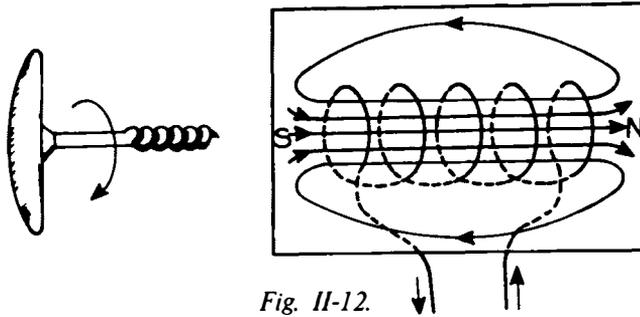


Fig. II-12.

dans le sens conventionnel du courant et s'enfonce dans le sens des lignes de force.

### L'électro-aimant

Tous les essais effectués jusqu'alors montrent que le courant électrique donne naissance autour de lui à un champ magnétique, et que ce champ est renforcé si on fait passer le courant à travers une bobine.

Cette dernière constatation nous permet également de mettre en évidence les propriétés du fer doux qui est capable de multiplier le champ magnétique en concentrant les lignes de force du champ.

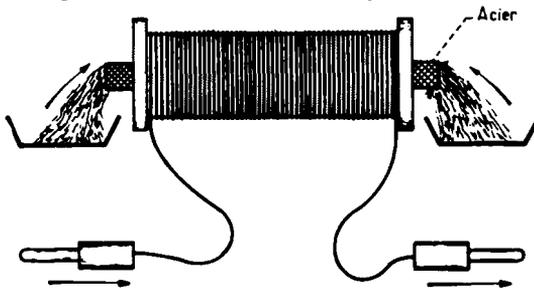


Fig. II-13.

Réalisons le montage de la figure II-13. Pour cela enroulons autour d'un tube en carton de 5 à 6 cm de longueur et de 1 cm de diamètre environ auquel on aura appliqué deux rondelles de carton aux extrémités, 3 ou 4 épaisseurs de fil émaillé de 0,2 à 0,3 mm, disposées à fil jointives. Chaque couche devra toujours être disposée dans le même sens, et les extrémités reliées à une source de courant de 6 V, à travers un interrupteur, et un rhéostat de 100  $\Omega$ .

Plaçons à l'intérieur de la bobine un barreau de fer doux dépassant légèrement à chaque extrémité.

L'ensemble bobine et noyau de fer constitue un électro-aimant.

1° Fermons le circuit à l'aide de l'interrupteur. Le barreau de fer doux attire la limaille de fer.

2° Coupons le circuit. La limaille de fer retombe. Le barreau n'est plus aimanté.

*Conclusion.* — L'aimantation du fer doux est temporaire.

3° Remplaçons le barreau de fer doux par un barreau d'acier.

Fermons le circuit. Le barreau attire la limaille de fer. Coupons le circuit. Le barreau est aimanté, la limaille est toujours attirée.

*Conclusion.* — *L'aimantation de l'acier est permanente.*

4° Approchons une aiguille aimantée des extrémités du barreau. Il y a attraction du pôle nord de l'aiguille aimantée d'une part et répulsion de l'autre. C'est le pôle sud de l'électro-aimant qui attire le pôle nord de l'aiguille ; l'autre est le pôle sud.

5° Invertissons le sens du courant. Les pôles sont également inversés. Le pôle nord est devenu le pôle sud et le pôle sud est devenu le pôle nord.

6° Le circuit est ouvert, le rhéostat au maximum de résistance. Plaçons l'aiguille aimantée à 50 cm environ d'une extrémité du barreau dont l'axe est approximativement perpendiculaire à l'aiguille aimantée.

Fermons le circuit et, à l'aide du rhéostat, augmentons progressivement l'intensité du courant. L'aiguille aimantée dévie d'abord de plus en plus vite, puis de moins en moins vite.

*Conclusion.* — *L'aimantation du fer croît avec l'intensité du courant jusqu'à ce que celui-ci soit saturé.*

7° Prenons un aimant en forme de U et réalisons deux bobines identiques sur une carcasse en carton comme précédemment. Enroulons le fil isolé de manière que le bobinage d'une carcasse soit en sens contraire du bobinage de l'autre (fig. II-14).

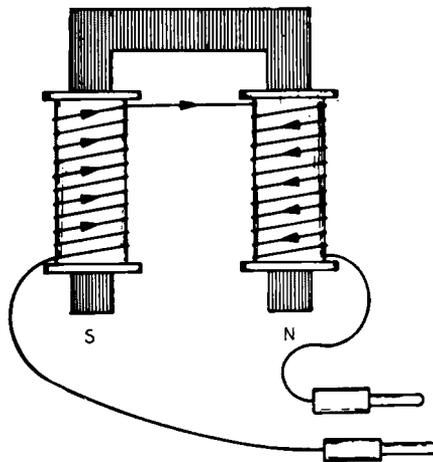


Fig. II-14.

Nous constatons que le champ est particulièrement intense entre les bornes de l'électro-aimant.

8° Invertissons le sens de l'enroulement dans une seule bobine. Le champ entre les bornes de l'électro-aimant est nul.

*Conclusion.* — *Pour que les pôles soient de noms contraires, il faut que les sens des enroulements soient contraires.*

On assiste à une concentration des lignes de force à l'intérieur du barreau. La propriété que possèdent certains métaux de se laisser traverser plus facile-

ment par les lignes de force que dans l'air s'appelle la *perméabilité*. Le contraire de la perméabilité est dite *réductance*. Un matériau ayant une faible réductance opère une plus forte concentration des lignes de force. L'acier a une plus grande réductance que le fer doux ; l'air a une réductance très élevée.

### Aimantation permanente et aimantation temporaire

Comment peut-on expliquer cette création d'aimants temporaires ou d'aimants permanents, à partir d'un état non magnétique alors qu'on ne peut constater aucun changement apparent ? Rappelons-nous que les corps sont formés de molécules. Le fer et l'acier, qui semblent constituer une masse compacte, sont un ensemble de particules distinctes maintenues juxtaposées par une force interne de cohésion, mais toutefois capables de mouvements d'oscillation autour de leur position. Chacune de ces particules peut posséder un pouvoir magnétique et constitue alors un aimant possédant un pôle nord et un pôle sud. Mais comme elles sont toutes en position désordonnée, leur action magnétique s'annule à l'extérieur. Cet état est représenté à la figure II-15 a. Mais sous une action extérieure, tel un champ magnétique suffisamment intense, toutes ces particules s'orientent, comme l'indique la figure II-15 b, et nous obtenons un aimant qui, dans certains matériaux comme l'acier, ne perd pas ses propriétés, parce que les particules n'ont pas l'entière possibilité de se remettre en désordre. Dans d'autres, au contraire, comme le fer doux, les particules reprennent leur position primitive, dès que le matériau ne subit plus l'action magnétisante.



Fig. II-15 a.

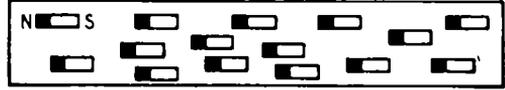


Fig. II-15 b.

## CHAPITRE III

### COURANT ALTERNATIF

*Courant continu et courant alternatif.* — Le courant électrique que nous avons utilisé jusqu'à maintenant, fourni par des piles ou des accumulateurs, est un *courant continu*, c'est-à-dire un courant ayant toujours le même sens. Rappelons que conventionnellement, le courant continu circule du pôle positif au pôle négatif à l'extérieur du générateur.

*Le courant alternatif*, au contraire, est un courant qui change régulièrement de sens, plusieurs fois par seconde.

Nous allons étudier la production du courant alternatif à l'aide d'une génératrice élémentaire constituée d'une seule spire de fil se déplaçant, en tournant autour d'un axe imaginaire, à vitesse constante, entre les pôles d'un aimant. Une seule spire est représentée pour la clarté du dessin, mais en réalité l'enroulement comporte plusieurs spires (fig. III-1).

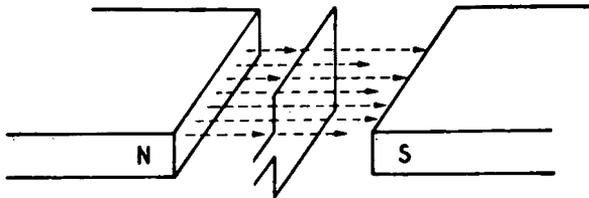


Fig. III-1.

#### Production du courant alternatif

Nous avons vu précédemment qu'une boucle de fil se déplaçant dans un champ magnétique est le siège d'une force électromotrice induite qui provoque la circulation d'un courant.

Étudions le phénomène au cours d'une rotation complète de 360 degrés. La figure III-2 représente le déplacement de la boucle à chaque quart de tour.

Supposons que la boucle se déplace dans le sens des aiguilles d'une montre, d'une position initiale A, à une position de retour A, en accomplissant un tour complet et en passant par les positions intermédiaires B, C, D.

Dans la position A, la boucle est perpendiculaire au champ magnétique. Aucune force électro-motrice n'est engendrée dans le conducteur et le courant induit est nul.

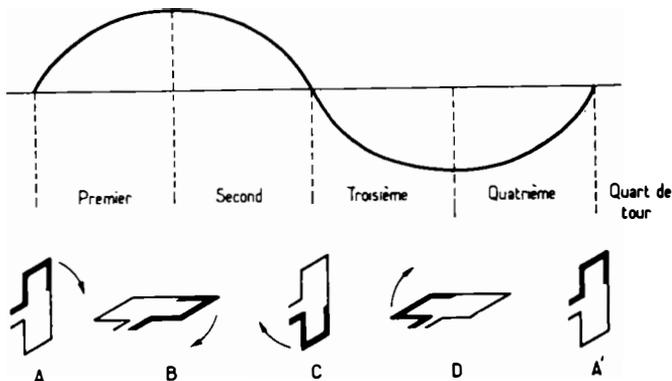


Fig. III-2.

Faisons tourner la boucle de  $90^\circ$ , de la position A à la position B ; le conducteur coupe de plus en plus de lignes de force pour passer de 0 au maximum. La f.e.m. induite passe également de 0 au maximum.

Remarquons qu'au cours de ce mouvement, la partie noire du conducteur coupe le champ magnétique de haut en bas, et la partie blanche de bas en haut. Les f.e.m. engendrées dans ces deux conducteurs s'ajoutent donc et il en est de même du courant.

La courbe indique comment la tension varie suivant la position de la boucle.

Celle-ci continue à tourner de la position B à la position C ; la rotation totale est alors de  $180^\circ$ . Dans la position C, la boucle est à nouveau parallèle au champ magnétique et ne coupe plus les lignes de force. La f.e.m. va passer du maximum à zéro, ainsi que le courant.

De la position C à la position initiale A, en passant par la position D, le même cycle recommence ; les conducteurs coupent à nouveau les lignes de force, mais en sens opposé ; le conducteur noir coupe les lignes de force de bas en haut et le conducteur blanc de haut en bas. Il en résulte un changement de la f.e.m. induite et du courant qui circule dans le conducteur. Celui-ci passera à nouveau par un maximum pour revenir à zéro.

Comme on le voit, en considérant la courbe de tension, la valeur et la polarité de la tension varient à chaque révolution complète. Nous ne sommes plus en présence d'une tension et d'un courant continus, mais d'une tension alternative, et d'un courant alternatif qui est successivement positif et négatif. La courbe de la figure III-2 correspondant à une révolution complète représente une période.

Le nombre de révolutions complètes de la boucle, au cours d'une seconde, correspondant au nombre de périodes par seconde s'appelle *fréquence* du courant. La fréquence d'un courant alternatif s'exprime donc en cycles/seconde (c/s) ou en Hertz (Hz).

En France, le courant alternatif est de 50 périodes par seconde. Aussi, dans une lampe alimentée par un courant alternatif 50 périodes, le courant change 100 fois de sens par seconde ; la lampe s'allume et s'éteint une centaine de fois. Mais le phénomène est invisible par suite de la persistance rétinienne et de l'inertie thermique.

Chaque demi-période d'un courant alternatif possède une valeur maximum, encore appelée valeur de crête, une positive dans la demi-période positive, l'autre négative dans la demi-période négative. La différence entre ces deux valeurs extrêmes est appelée valeur de crête à crête.

La valeur moyenne d'une demi-période d'un courant alternatif, toujours inférieure à la valeur maximum est égale à 0,637 de cette valeur. C'est la valeur obtenue en calculant la moyenne de toutes les valeurs enregistrées au cours d'une demi-période.

Si la valeur maximum d'un courant alternatif est de 1 A, sa valeur moyenne est de 0,637 ampère. Mais un courant alternatif de 1 A ne possède pas une puissance égale à celle d'un courant continu de 0,637 A. Aussi emploie-t-on pour les courants alternatifs, au lieu de la valeur moyenne de la courbe, la valeur efficace.

*Valeur efficace.* — Nous avons vu qu'un courant continu passant à travers une résistance était en partie transformé en chaleur. Cette énergie transformée peut être calculée avec la formule

$$P = I^2 R \text{ (W, A}^2, \Omega)$$

On conçoit qu'un courant alternatif dont la valeur maximum est de 2 A, traversant une résistance de 100  $\Omega$ , ne produira pas autant de chaleur qu'un courant continu de même intensité, pendant le même temps, puisque le courant alternatif ne conserve pas tout le temps cette valeur maximum.

Aussi sommes-nous amenés à étudier la valeur efficace du courant alternatif, c'est-à-dire la valeur du courant alternatif qui, dans une résistance donnée, délivre la même quantité de chaleur qu'un courant continu.

La valeur efficace d'un courant alternatif sinusoïdal est égale à 0,707 de sa valeur maximum. Si un courant alternatif a une valeur maximum de 1 A, sa valeur efficace est de 0,707 A. Ce qui signifie que dans une résistance donnée, il produit, pendant le même temps, la même chaleur qu'un courant continu de 0,707 A.

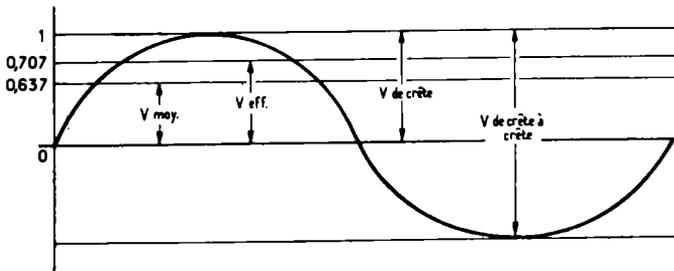


Fig. III-3.

Les voltmètres et ampèremètres utilisés pour la mesure des tensions et des intensités de courants alternatifs indiquent les valeurs efficaces.

Les différentes valeurs du courant alternatif sont représentées graphiquement à la figure III-3.

### **Exemples montrant les relations entre ces différentes valeurs**

Soit une tension alternative ayant une valeur  $V_p$  de pointe de 8,91 V.

La valeur efficace est égale à  $0,707 \times V_p$

$$V_{\text{eff}} = 0,707 \times 8,91 = 6,3 \text{ V}$$

La valeur moyenne est égale à 63,7 % de la valeur de pointe.

La tension moyenne est de  $0,637 \times V_p$

$$V_{\text{moy}} = 0,637 \times 8,91 = 5,61 \text{ V.}$$

La valeur pointe à pointe est égale au double de la valeur du maximum d'amplitude.

$$V. \text{ p. à p.} = 2 \times 8,91 = 17,82 \text{ V}$$

Toutes ces relations permettent de calculer une valeur quelconque à partir de la valeur moyenne ou de la valeur efficace. Par exemple, calculons la valeur de pointe d'un courant dont la valeur efficace est de 7,07 A.

$$I_p = 7,07 \times 1,414 = 10 \text{ A.}$$

La valeur moyenne de tension aux bornes d'une résistance est de 5,28 V. Quelle est la tension de pointe ?

$$V_p = 5,28 \times 1,57 = 8,29 \text{ V.}$$

Un courant dont l'intensité efficace est de 10 A circule dans un circuit. Quelle est la valeur du courant de pointe ? On l'obtient en multipliant la valeur efficace par 1,414. La valeur pointe à pointe est multipliée par 2.

$$I_{\text{pp}} = 10 \times 2,828 = 28,28 \text{ A.}$$

### **Tension, courant, résistance**

Les termes voltage ou tension, courant et résistance s'appliquent aussi bien aux tensions continues et aux tensions alternatives. Dans le cas des courants alternatifs, le générateur est caractérisé par la tension ou force électro-motrice qu'il délivre. Le courant qui circule dépend de la résistance du circuit et du voltage mesuré aux bornes du circuit.

### **Etude des propriétés du courant alternatif**

Pour étudier les différentes propriétés du courant alternatif nous utiliserons le courant du secteur. Mais celui-ci est dangereux à manipuler. Aussi devrions-nous abaisser la tension à l'aide d'un transformateur. Nous verrons plus loin sur quel principe réside cet appareil. Sachons seulement pour le moment qu'il comporte un enroulement primaire et un enroulement secondaire disposés sur un noyau de fer doux. Le rapport entre le nombre de tours de l'enroulement pri-

maire et celui de l'enroulement secondaire est tel que si l'on connecte le premier au secteur (110 ou 220 V suivant le cas) la tension alternative de sortie au secondaire est de 6,3 V. Cette tension est approximativement égale à la tension obtenue avec la batterie de pile 6 V.

Les ampoules, résistances, utilisées dans les circuits à courant continu sont également utilisables avec la tension alternative de 6,3 V.

### Réalisation de l'alimentation 6 V courant continu, courant alternatif

L'ensemble est représenté à la figure III-4. Il comprend :

- Un transformateur primaire 220 V, secondaire 6 V, pour l'obtention de la tension alternative.
- Quatre piles de 1,5 V connectées en série à l'aide d'un coupleur donnant une tension continue de 6 V.
- Un inverseur bipolaire à deux directions pour passer à volonté sur courant continu ou courant alternatif.
- Deux bornes isolées pour fiches bananes.

Le câblage à réaliser est visible sur la figure.

L'ensemble sera facilement disposé dans un coffret Teko modèle P/3.

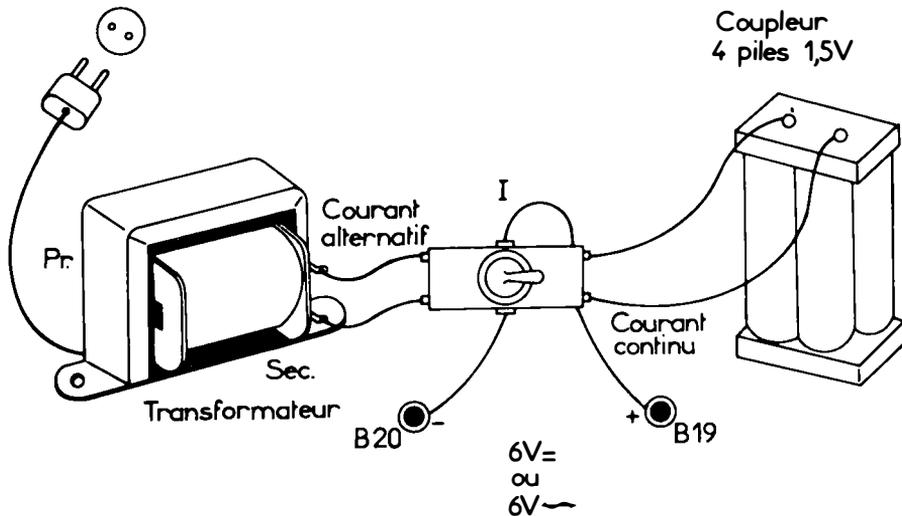


Fig. III-4.

Toutes les liaisons s'effectuent avec du fil isolé dont on supprime l'isolement sur quelques millimètres aux extrémités pour effectuer les soudures.

La liaison du primaire du transformateur avec le secteur s'effectue avec du fil particulièrement bien isolé prévu pour les tensions 110 ou 220 V.

Nous pouvons, avec cette alimentation, obtenir à volonté, une tension continue ou une tension alternative de 6 V, par la seule manœuvre de l'interrupteur I. Poussé vers la gauche, nous avons une tension alternative que l'on désigne par le signe  $\simeq$  poussé vers la droite, nous avons une tension continue que l'on désigne par le signe  $=$ .

### Principe de fonctionnement des appareils de mesure de précision pour courants continus et courants alternatifs

Dans presque tous les appareils de mesure modernes à aiguille, on utilise le galvanomètre à cadre mobile.

Le terme même de galvanomètre implique la mesure de l'intensité d'un courant électrique. Cette mesure est possible grâce à la force qui apparaît lorsqu'un conducteur parcouru par un courant  $I$  à mesurer est placé dans un champ magnétique  $H$ .

Pour trouver la direction de cette force, on utilise souvent la règle mnémotechnique des « 3 doigts de la main droite », où le pouce matérialise la direction du courant  $I$ , l'index la direction du champ magnétique  $H$ , le majeur indiquant alors la direction de la force  $F$  (fig. III-5).

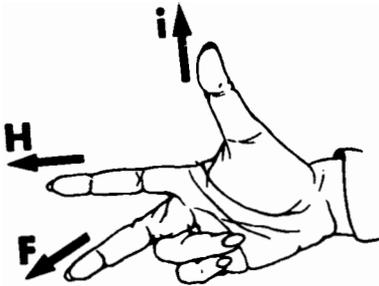


Fig. III-5.

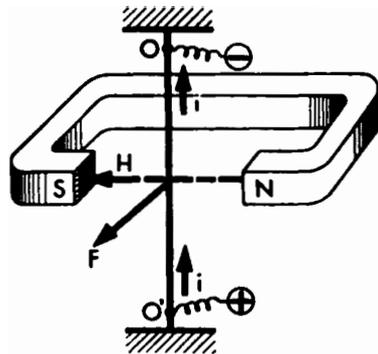


Fig. III-6.

Sous sa forme la plus simple, l'appareil de mesure magnéto-électrique est le galvanomètre. Un fil conducteur est modérément tendu entre deux points fixes  $O$  et  $O'$ , entre lesquels on applique une force électro-motrice ayant la polarité indiquée. Une intensité  $I$  parcourt le fil. Celui-ci passe dans l'entrefer  $NS$  d'un aimant permanent, entrefer où règne un champ  $H$  perpendiculaire à l'intensité  $I$ . Une force  $F$  apparaît dans le sens indiqué et tend à déformer le fil tendu ; celui-ci pouvant être très fin, la déformation peut être sensible et un déplacement du fil est observable (fig. III-6).

Deux points fondamentaux sont à souligner :

D'une part, si le sens du passage du courant est inversé, le sens du déplacement du fil est également inversé : le galvanomètre est un appareil polarisé, c'est-à-dire que le sens de la déviation dépend du sens de passage du courant. Nous retrouverons ceci à propos des mesures en courants alternatifs.

D'autre part, la force créée est proportionnelle à la fois à la valeur du champ magnétique  $H$  et à la valeur de l'intensité  $I$ . Si l'on peut admettre que le champ  $H$  est une constante, la force, et donc la déformation qui en résulte, dépendent uniquement de l'intensité  $I$ .

Un deuxième modèle d'appareil magnéto-électrique découle immédiatement du type précédent : c'est le galvanomètre bifilaire schématisé (fig. III-7). Au lieu d'être tendu entre les points fixes  $O$  et  $O'$ , le fil conducteur est suspendu entre deux points fixes en formant une boucle au niveau de l'entrefer  $NS$ . Le sens du courant  $I$  est différent dans les deux brins de cette boucle : comme l'indique la règle des trois doigts appliquée à la figure III-7, le fil situé à droite est soumis à une force  $F$  et le fil situé à gauche est soumis à une force  $F'$ .

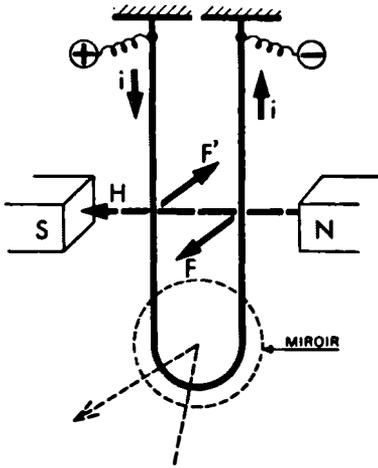


Fig. III-7.

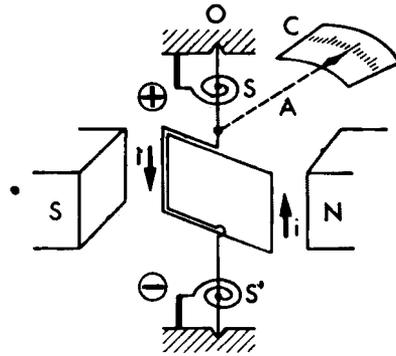


Fig. III-8.

Les forces  $F$  et  $F'$  constituent un couple moteur qui tend à faire tourner la boucle de fil. La valeur de ce couple est fonction à la fois de  $H$  et de  $I$ .

Pour s'affranchir de certaines servitudes inhérentes à ce mode de fonctionnement, la solution classique consiste à équilibrer rigoureusement par rapport à un axe  $OO'$ , une boucle rigide de fil et à réaliser le couple antagoniste indispensable par un ou deux ressorts spiraux. La figure III-8 schématise les éléments essentiels : entre les crapaudines  $O$  et  $O'$  qui matérialisent l'axe de rotation, l'ensemble conducteur rigide ayant la forme d'un cadre peut pivoter. Deux ressorts spiraux  $S$  et  $S'$  définissent la position de repos (ou de zéro) du cadre mobile en l'absence de tout courant dans le cadre ; dès qu'une rotation est créée, les spiraux fournissent un couple antagoniste qui augmente linéairement avec la rotation. Lorsque le couple antagoniste est égal et opposé au couple moteur dû à l'intensité dans le cadre mobile, l'équilibre est atteint ; il se traduit par l'immobilisation du cadre après une rotation  $\alpha$ . Une aiguille indicatrice  $A$ , solidaire du cadre mobile et se déplaçant devant un cadran fixe  $C$ , permet d'apprécier la rotation  $\alpha$ .

Chaque mesure de  $\alpha$  constitue une mesure du couple moteur exercé sur le cadre mobile - donc une mesure de l'intensité qui le parcourt.

Mais un galvanomètre basé sur ce principe offre une échelle de lecture non linéaire, dilatée à son début et resserrée vers la fin. Cette échelle de lecture, pour la plupart des mesures, peut présenter des inconvénients. Pour éliminer ceux-ci, il faut que le champ magnétique  $H$  reste constant et parallèle au plan du cadre mobile, dans tout l'espace balayé par le cadre durant sa rotation ; l'aimant doit être, pour cela, complété par des pièces polaires et un noyau.

La figure III-9 indique schématiquement la disposition adoptée. Des pièces polaires en fer doux N et S constituent avec un noyau cylindrique un entrefer de longueur constante. Quelle que soit la rotation du cadre mobile le champ magnétique  $H$  a une valeur constante et est toujours dirigé parallèlement au plan du cadre mobile.

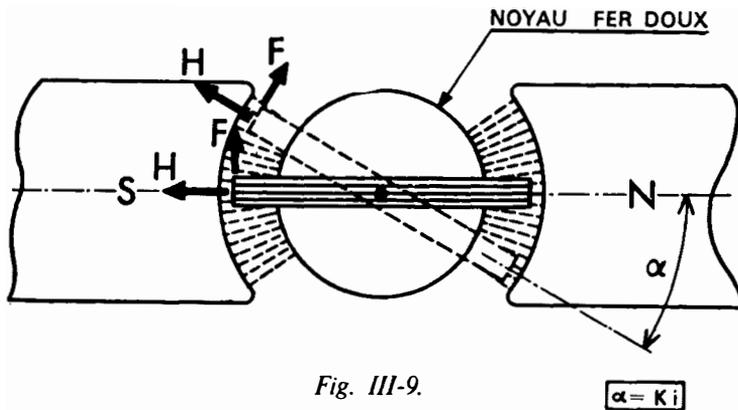


Fig. III-9.

### Le Contrôleur universel

Après tout montage, pour déceler les pannes ou anomalies d'un montage existant, pour effectuer les différentes mesures que nous nous proposons de faire, il faut recourir à un appareil de mesure simple. L'instrument le plus couramment répandu est le « tester » ou « Contrôleur Universel ».

Le Contrôleur réunit plusieurs instruments en un seul dans le but évident d'avoir à sa disposition plusieurs possibilités permettant de choisir celle qui est la mieux adaptée au contrôle que l'on veut effectuer.

Nos lecteurs connaissent le courant électrique. Qu'ils aient une notion plus ou moins exacte sur celui-ci, ils savent déjà que ce courant peut être mesuré : le Contrôleur Universel est précisément l'appareil qui permet d'effectuer ces mesures.

Rappelons que l'unité de mesure des tensions est le volt, celle des intensités est l'ampère et celle de la résistance est l'ohm. Toutes ces unités ou fractions de celles-ci ainsi que leurs multiples sont indiquées par le contrôleur.

Les contrôleurs multiples usuels présentent, pour la plupart, un grand nombre de douilles et de bornes de liaison, dont certaines doivent être reliées au circuit à mesurer, dans chaque cas, pour définir le calibre utilisé.

Il existe sur le marché de nombreux types de contrôleurs universels. Nous conseillons à nos lecteurs de faire dès maintenant l'acquisition d'un modèle de

qualité, présentant en courant continu une sensibilité de  $40\,000\ \Omega/V$ , car cet appareil sera indispensable pour les mesures que nous nous proposons d'effectuer sur les diodes et transistors.

### Propriétés du courant alternatif

1° Avec notre boîte-connexion, réalisons pratiquement le schéma de la figure III-10 qui comporte, comme on le voit, la source de tension alternative réalisée précédemment, un interrupteur unipolaire et un support de lampe. Disposons une ampoule 6 V-200 mA dans ce dernier. Fermons l'interrupteur. L'ampoule s'allume.

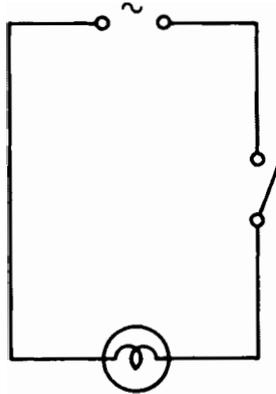


Fig. III-10.

2° Introduisons un rhéostat dans le circuit comme dans la figure I-19. Faisons varier le rhéostat. Remarquons que la brillance de l'ampoule varie comme dans le cas du courant continu. Les intensités et les tensions sont égales dans les deux cas.

3° Remplaçons le rhéostat par une résistance fixe de  $10\ \Omega$  et montons l'ensemble comme dans la figure I-17.

Fermons l'interrupteur et touchons l'ampoule après un court instant. Celle-ci reste froide. Enlevons l'ampoule 6 V et remplaçons-la par une ampoule 2,5 V-500 mA. Celle-ci s'échauffe.

*Conclusion.* — Comme le courant continu, le courant alternatif se transforme en chaleur et en lumière. La chute de tension aux bornes de la résistance est d'autant plus grande que l'intensité est élevée. La température est d'autant plus élevée que le temps de passage du courant est grand.

4° Disposer trois résistances en série comme dans la figure I-23. Comme dans le cas du courant continu, l'intensité est la même en tous les points du circuit et la résistance totale est égale à la somme des résistances disposées dans le circuit.

5° Mettre trois résistances en parallèle, comme dans la figure I-27. Placer d'abord une résistance de  $20\ \Omega$ , puis une seconde, puis une troisième. Comme avec le courant continu, la tension aux bornes reste constante, mais l'intensité s'élève.

6° Reprenons le circuit de la figure II-8 et remplaçons l'alimentation en courant continu par l'alimentation en courant continu-alternatif.

Répétons les mêmes expériences, d'abord en courant continu, ensuite en courant alternatif.

Nous constatons que sur cette dernière position :

1° L'aiguille de la boussole oscille et ne peut se maintenir dans une position stable parce que la polarité du courant change constamment.

2° La limaille de fer ne s'aligne pas suivant les lignes de force comme dans le cas du courant continu. En effet, l'alignement des particules change rapidement suivant la fréquence du courant alternatif.

### Résistance en courant alternatif

Lorsque les circuits parcourus par des courants alternatifs ne comportent que des résistances pures, à l'exclusion d'éléments tels que selfs et condensateurs dont nous étudierons plus loin les effets, toutes les lois et les règles observées au cours de l'étude des propriétés du courant continu s'appliquent également.

Une résistance pure s'appelle aussi résistance non inductive. Ainsi, une résistance à couche de carbone peut être considérée comme une résistance pure alors qu'une résistance bobinée ne l'est pas.

Nous appliquerons à nouveau la loi d'Ohm

$$U = I R$$

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

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

Cependant, il faut employer dans les calculs, les valeurs efficaces de tension et d'intensité. Ce sont d'ailleurs, en principe, toujours ces valeurs qui sont indiquées.

*Intensité et tension.* — Si on applique une tension alternative à un circuit ne comportant que des résistances pures, la tension partant de zéro s'élève jusqu'au maximum pour redescendre à zéro, atteindre un nouveau maximum mais en sens opposé, et revenir à nouveau à zéro, accomplissant ainsi une période complète. L'intensité du courant suit exactement les variations de la tension, s'élevant et redescendant avec elle, changeant de sens comme elle.

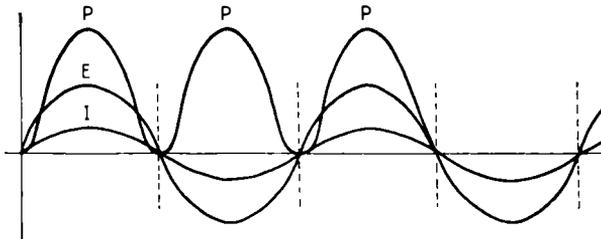


Fig. III-11.

Les courbes représentatives de tension et d'intensité sont représentées à la figure III-11. On dit que *ces deux courbes sont en phase*, parce qu'elles ont même fréquence, passent par des valeurs nulles au même instant en changeant également de sens.

### **Puissance dans les circuits parcourus par des courants alternatifs**

Les valeurs instantanées de puissance sont égales au produit des valeurs instantanées correspondantes de tension et d'intensité. Si les courbes de tension et d'intensité sont en phase, toutes les valeurs instantanées de puissance sont supérieures à zéro.

Nous avons appris en algèbre que le produit

$$\begin{aligned} + \text{ multiplié par } + &= + \\ - \text{ multiplié par } - &= + \end{aligned}$$

Mais ces valeurs peuvent être inférieures aux valeurs correspondantes de tension et d'intensité, si chacune de ces dernières est inférieure à 1. Exemple :  $0,9 \text{ V} \times 0,15 \text{ A} = 0,135 \text{ W}$ .

On appelle puissance moyenne la puissance effectivement utilisée dans un circuit. On la représente par une droite qui passe par la moitié des valeurs maximum instantanées dans les circuits à résistance pure.

On peut également obtenir cette valeur en effectuant le produit des valeurs efficaces de tension et d'intensité.

$$P = E \text{ eff} \times I \text{ eff.}$$

*Expérimentations.* — Réalisons le circuit de la figure I-27 en disposant deux résistances de  $20 \Omega$  en parallèle.

1° Alimentons le circuit en courant continu. Nous lirons  $I = 0,6 \text{ A}$  et  $U = 6 \text{ V}$ .  $P = 6 \times 0,6 = 3,6 \text{ W}$ .

2° Passons sur courant alternatif. Nous lirons encore, pour une valeur de tension efficace égale à  $6 \text{ V}$ ,  $I = 0,6 \text{ A}$  et  $U = 6 \text{ V}$ .  $P = 6 \times 0,6 = 3,6 \text{ W}$ .

La puissance utilisée est la même dans les deux cas.

### **Calcul de la résistance dans un circuit à courant alternatif**

Pour montrer l'utilité de l'application de la loi d'Ohm, résolvons le problème suivant. Quelle valeur de résistance faut-il disposer en série pour utiliser une ampoule  $2,5 \text{ V}$ - $300 \text{ mA}$  avec une tension alternative de  $6,3 \text{ V}$ .

La chute aux bornes de la résistance doit être de :

$$6,3 \text{ V} - 2,5 \text{ V} = 3,8 \text{ V}$$

$$R = \frac{E}{I} = \frac{3,8}{0,3} = 12,6 \Omega$$

*Remarque.* — Si nous avons fait l'acquisition du contrôleur nous effectuons dorénavant nos mesures avec cet appareil.

## Bobine traversée par un courant alternatif

Dans le chapitre II, nous avons étudié les effets magnétiques du courant électrique à travers un conducteur et nous avons vu que le flux magnétique était plus important et plus concentré lorsque le conducteur est enroulé en forme de spires. Cet enroulement est appelé bobine.

Quand une bobine est placée dans un circuit à courant continu, le champ magnétique est stationnaire parce que le courant a toujours le même sens. La grandeur du champ magnétique dépend de la valeur de l'intensité du courant qui traverse le conducteur. Dans le cas du courant alternatif, au contraire, le champ magnétique change continuellement à cause du changement de sens du courant. Cette particularité est à l'origine d'un phénomène important, la naissance d'une f.e.m. de self induction.

### Inductance dans un circuit à courant continu

Soit une bobine disposée dans un circuit alimenté par une tension continue (fig. III-12 a). La figure III-12 b nous donne la représentation réelle d'une bobine à fer.

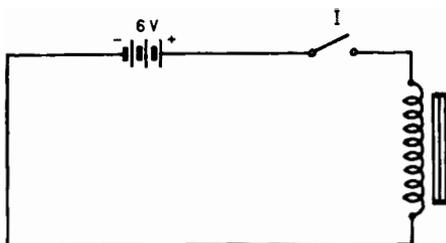


Fig. III-12 a



Fig. III-12 b

Lorsqu'on ferme l'interrupteur, le courant s'élève rapidement à sa valeur maximale, mais pas instantanément comme on pourrait le croire. Un champ magnétique s'établit autour du conducteur. Les différentes spires agissent les unes sur les autres et le champ magnétique s'étend progressivement.

Nous savons déjà que des courants d'induction prennent naissance lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ magnétique ou lorsque le champ magnétique qui l'entoure varie. Cette f.e.m. induite est si brève que nous ne pouvons la mesurer au voltmètre.

Au moment de la fermeture de l'interrupteur, il se crée ainsi une f.e.m. de self-induction encore appelée inductance, de sens opposé à celui du courant qui tend à s'opposer au passage de ce dernier.

Dès que le courant atteint sa valeur maximale, le champ magnétique ne varie plus et la f.e.m. de self-induction cesse.

De même, si l'on coupe le courant en ouvrant l'interrupteur, l'arrêt du courant n'est pas instantané. Le champ magnétique diminue en même temps que le courant et une nouvelle f.e.m. de self-induction, prolongeant le courant, se manifeste, mais cette fois en sens inverse de la précédente, jusqu'à ce que le courant retombe à zéro.

*Conclusion.* — Au moment de la fermeture du circuit, l'inductance s'oppose à l'établissement du courant inducteur ; au moment de la coupure, l'inductance a pour effet de le prolonger.

La courbe de ce phénomène est représentée figure III-13.

*Démonstration.* — Réalisons le circuit série de la figure III-14 composé d'une pile de 6 V, d'une bobine de filtrage utilisée dans l'alimentation des récepteurs de radio et d'un interrupteur. En parallèle à la bobine, disposons un support de lampe destiné à recevoir une lampe au néon dont la tension d'amorçage est de 60 V environ. La valeur de la tension d'amorçage est celle à partir de laquelle la lampe s'éclaire. L'interrupteur est fermé et la lampe ne s'éclaire pas.

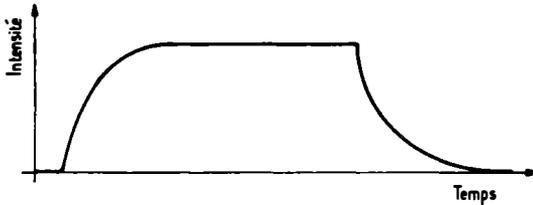


Fig. III-13.

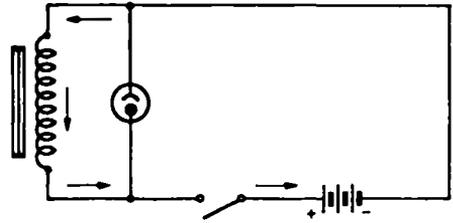


Fig. III-14.

Ouvrons l'interrupteur ; la lampe brille d'un bref éclat pendant un temps très court.

La f.e.m. induite provoquée par la suppression du champ magnétique de la bobine de filtrage est suffisante pour amorcer la lampe.

Comme l'intensité du courant s'exprime en ampères, le coefficient de self-induction d'une bobine s'exprime en une unité qui est le henry (H) ; on utilise également le millihenry ou millième d'henry (mH) et le micro-henry ou millionième d'henry ( $\mu\text{H}$ ).

L'inductance dépend de la forme et des dimensions du bobinage, de son diamètre et de celui du fil. Si le bobinage contient un noyau de fer doux, le coefficient de self-induction est considérablement augmenté.

### **Inductance dans un circuit parcouru par un courant alternatif**

Nous avons vu précédemment que lorsqu'on fait traverser un enroulement par un courant continu, l'intensité n'atteint pas immédiatement sa valeur maximale. Mais l'effet inductance ne se fait sentir que si l'on provoque ou interrompt le passage du courant.

Si le circuit est parcouru par un courant alternatif, au contraire, celui-ci croît, décroît et change de direction continuellement. Aussi, une bobine placée dans ce circuit a une action permanente. Le champ magnétique s'élève, décline et change de direction suivant les variations du courant. Celui-ci développe continuellement une f.e.m. d'induction aux bornes de la bobine. Cette f.e.m. est toujours d'une polarité telle qu'elle s'oppose au changement de sens du courant. Il se produit un décalage entre les amplitudes de l'intensité et celles de la tension. Ce retard

est provoqué par le courant de self-induction et l'on peut comparer son action à celle d'une résistance. On considère ainsi que la bobine possède une résistance ohmique (résistance mesurée en courant continu) et une résistance inductive ou réactance (résistance offerte au courant alternatif). La somme de ces deux résistances s'appelle impédance.

La valeur de la réactance est égale à

$$L \cdot 2 \pi F$$

où L est le coefficient de self-induction de la bobine en henrys, et F la fréquence en Hz. (Le produit  $2 \pi F$  se représente par  $\omega$  - lettre grecque oméga).

La réactance s'exprime en ohms.

L'impédance (résistance totale offerte par le circuit) se représente par la lettre Z et on l'évalue également en ohms :

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$$

R étant la valeur de la résistance ohmique de l'enroulement.

La formule  $U = I \cdot Z$  ressemble tout à fait à la formule de la loi d'Ohm.

La réactance et l'impédance dépendent directement de la self-induction et de la fréquence.

L'impédance est toujours plus grande que la résistance ohmique.

### *Vérification expérimentale*

Notre boîte-connexion sera montée suivant le schéma de la figure III-15.

1° Disposons une résistance de  $50 \Omega$ , 1 W et mettons une ampoule 6 V, 200 mA dans le support A.

Mesurons l'intensité en coupant le circuit et en le refermant à l'aide du contrôleur disposé sur la gamme 0,1 A courant continu.

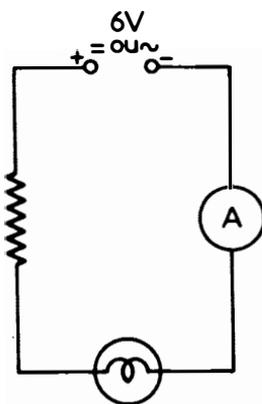


Fig. III-15.

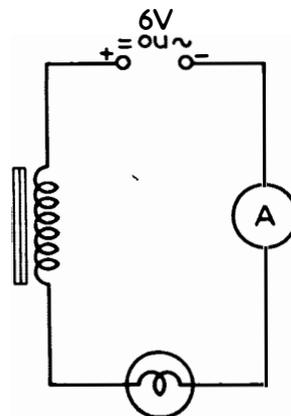


Fig. III-16.

Portons l'inverseur de l'alimentation sur la position courant continu, puis sur courant alternatif après avoir porté le contrôleur sur la gamme 0,1 A courant alternatif.

L'intensité est la même dans les deux cas.

2° Supprimons le milliampèremètre et refermons le circuit. A l'aide du contrôleur disposé en voltmètre, gamme 10 V courant continu, mesurer la chute de tension aux bornes de la résistance. Plaçons l'inverseur de l'alimentation sur courant continu.

Passons ensuite sur courant alternatif, le contrôleur étant lui-même disposé sur la gamme 10 V courant alternatif.

La chute de tension est la même.

*Conclusion.* — *L'effet d'une résistance est identique sur courant continu ou sur courant alternatif.*

3° Remplaçons la résistance de  $50 \Omega$  par une self à fer de 10 henrys (environ) présentant une résistance ohmique de l'ordre de  $50 \Omega$  suivant le schéma de la figure III-16.

a) En courant continu, la lecture de l'intensité est à peu près la même que précédemment (contrôleur sur continu).

b) En courant alternatif, l'intensité est beaucoup plus faible et presque nulle (contrôleur sur alternatif). L'ampoule ne s'allume pas.

4° Court-circuiter la self de filtrage en réunissant directement les bornes par un fil. L'intensité est la même que sur courant continu.

*Conclusion.* — La bobine agit comme une simple résistance en courant continu.

En courant alternatif la réactance inductive est égale à :  $6,28 \times 50 \times 10 = 3\,140 \Omega$ , ce qui explique la faible lecture de courant.

### Effets d'une self inductance dans un circuit

Le circuit est réalisé suivant la disposition de la figure III-17. Il comporte en série une self à fer de 10 henrys  $50 \Omega$  et une résistance de  $50 \Omega$ .

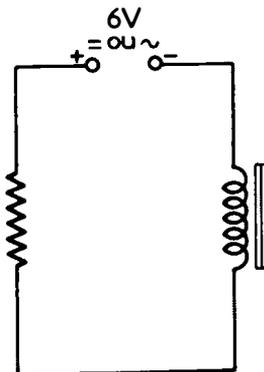


Fig. III-17.

1° Mettre l'interrupteur d'abord sur courant continu et mesurer la tension continue aux bornes de la self et aux bornes de la résistance de  $50 \Omega$ . Remarquez que les deux valeurs sont à peu près identiques, les différences ne pouvant résulter que d'une légère différence de valeur de la résistance ohmique de chacun des deux éléments.

2° Supprimer la connexion entre la self à fer et la résistance. Disposer le contrôleur entre ces deux points sur la position 0,1 A. Mesurer l'intensité du courant continu qui traverse le circuit. La valeur trouvée est de 60 mA environ. Remarquons que la self n'empêche pas le courant continu de circuler.

3° Calculons la valeur de cette intensité en utilisant la loi d'Ohm.

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{6}{100} = 0,060 \text{ A ou } 60 \text{ mA}$$

$R_1$  étant la résistance ohmique de la résistance et  $R_2$  la résistance ohmique de la self.

L'intensité du courant continu est seulement limitée par la résistance ohmique du circuit.

4° Enlevons le contrôleur, réunissons à nouveau la self à fer et la résistance et plaçons maintenant le commutateur sur courant alternatif.

Mesurons la tension aux bornes de la résistance. La valeur obtenue est beaucoup plus faible qu'en courant continu. Pourquoi ? C'est que la bobine s'oppose au passage du courant alternatif.

Mesurons la tension aux bornes de la bobine. La valeur est plus élevée qu'en courant continu parce que la résistance offerte au courant alternatif est très grande.

5° Mesurons comme en (2) l'intensité efficace du courant qui traverse le circuit. Nous pouvons également calculer cette intensité en mesurant la tension alternative aux bornes de la résistance et en appliquant la loi d'Ohm

$$I = \frac{E}{R} = \frac{0,1}{50} = 2 \text{ mA}$$

$E$  étant la différence de potentiel aux bornes de la résistance et  $R$  la valeur de cette résistance.

Constatons que la bobine limite l'intensité du courant qui traverse le circuit et pour en mesurer l'importance, reportons-nous à la manipulation (3).

### **Induction mutuelle**

On appelle induction mutuelle le phénomène qui consiste à transmettre une partie de l'énergie qui traverse un circuit à un autre circuit.

Une application pratique de l'induction mutuelle est le transformateur dont le principe va nous fournir une explication facile.

Un transformateur peut être considéré, dans sa forme la plus simple, comme deux enroulements conducteurs, électriquement indépendants, mais couplés l'un à l'autre, c'est-à-dire très proches l'un de l'autre. L'un des enroulements est appelé primaire, l'autre secondaire (fig. III-18).

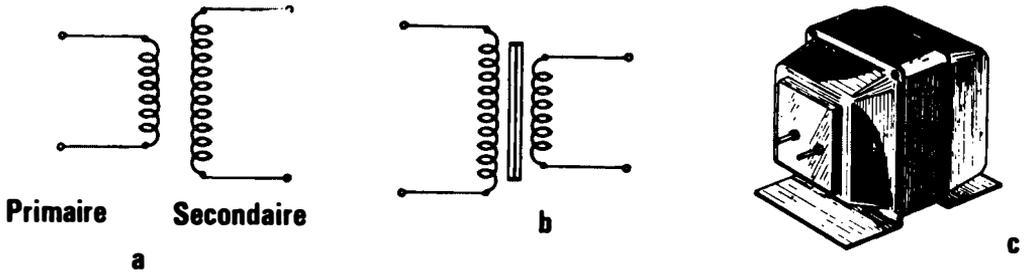


Fig. III-18.

Si le primaire est traversé par un courant alternatif, une force électromotrice alternative prend naissance aux bornes du secondaire parcouru par un courant induit.

Si le secondaire est relié à un circuit d'utilisation, celui-ci est parcouru par un courant alternatif.

L'explication en est bien simple.

Si l'on applique une tension alternative, de fréquence  $f$ , aux bornes de l'enroulement primaire, celui-ci est parcouru par un courant alternatif qui détermine la production d'un flux magnétique. Si les deux enroulements sont suffisamment voisins, le flux magnétique produit par le primaire traverse également le secondaire et y donne naissance à une force électromotrice de même fréquence.

Si le circuit de ce second enroulement est fermé sur un circuit électrique, celui-ci est parcouru à son tour par un courant induit, de même fréquence que celui qui traverse l'enroulement primaire.

Afin d'augmenter l'effet de self-induction, on dispose les deux enroulements sur un noyau de métal magnétique qui concentre le flux. La représentation schématique est alors indiquée figure III-18 b et la représentation réelle III-18 c.

### Fonctionnement du transformateur

Comment peut-on expliquer ce phénomène ? Lorsqu'on applique une tension alternative aux bornes du primaire, celui-ci est parcouru par un courant alternatif. Au cours de la première alternance (demi-période), le courant qui circule dans l'enroulement augmente très rapidement, puis ensuite de plus en plus lentement par suite du phénomène de self-induction. En effet, le courant provoque la naissance d'un flux magnétique qui produit une force électromotrice de sens opposé à celui du courant. Lorsque le courant atteint sa valeur maximale, les variations de flux sont faibles et du même coup, l'intensité du courant induit est nulle.

Le courant commence alors à diminuer dans le primaire et en même temps le flux magnétique, d'abord lentement, puis ensuite très rapidement.

Le courant induit dans le secondaire change de sens et augmente progressivement. Lorsque ce courant passe par zéro, le courant induit dans le secondaire passe par sa valeur maximale. Au cours de la seconde alternance, le courant dans le primaire change de sens, augmente rapidement puis lentement pour pas-

ser par la valeur maximale. Pendant ce temps, le courant induit dans le secondaire diminue et passe par zéro.

Ainsi, lorsque le courant est nul dans le primaire, il est maximum dans le secondaire et inversement lorsqu'il est nul dans le secondaire, il est maximum dans le primaire.

### Rapport de transformation

La f.e.m. obtenue aux bornes du secondaire dépend des caractéristiques des deux enroulements. Si ceux-ci sont identiques, la f.e.m. induite dans le secondaire est égale à la f.e.m. appliquée aux bornes du primaire. Mais si le nombre de spires de l'enroulement secondaire est double ou triple de celui de l'enroulement primaire, la f.e.m. induite est également double ou triple de celle appliquée. Ainsi, dans le cas d'un nombre de spires trois fois plus élevé, si on applique une tension alternative de 6 V au primaire on mesure une tension de 18 V au secondaire.

Soit  $E_1$  la tension appliquée au primaire et  $E_2$  la tension induite dans le secondaire, nous avons

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

$n_2$  étant le nombre de spires de l'enroulement secondaire et  $n_1$  le nombre de spires de l'enroulement primaire. Le rapport  $n_2/n_1$  est appelé rapport de transformation ou rapport du transformateur. Si ce rapport est supérieur à 1, c'est-à-dire si  $n_2$  est plus grand que  $n_1$ , le transformateur est dit « élévateur » et la f.e.m. induite au secondaire est plus élevée que celle qui est appliquée au primaire.

Si le rapport est inférieur à 1, par exemple 5/1, le transformateur est dit « abaisseur » et la tension recueillie au secondaire est plus petite que celle appliquée au primaire.

Un transformateur est toujours réversible, c'est-à-dire qu'il peut être monté en abaisseur ou en élévateur suivant que l'on considère comme enroulement primaire celui qui a le plus grand ou le plus petit nombre de spires.

Si on néglige les pertes inévitables, on peut considérer que la puissance dépensée dans le primaire est égale à la puissance recueillie dans le secondaire d'où

$$E_1 I_1 = E_2 I_2 \text{ soit } \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} \text{ ,}$$

En comparant cette formule avec la précédente on obtient la relation

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Ainsi la f.e.m. induite dans le secondaire est directement proportionnelle au nombre de spires, l'intensité en est inversement proportionnelle.

*Action du transformateur.* Le circuit est réalisé comme précédemment en remplaçant toutefois la bobine par un transformateur identique à celui déjà utilisé dans notre alimentation, à savoir un transformateur 6 V, mais qui sera monté cette fois en rapport élévateur.

Le circuit est représenté à la figure III-19. Il comporte essentiellement un transformateur dont le primaire est constitué par l'enroulement 6 V connecté à la source de tension 6 V continu. Le secondaire, c'est-à-dire l'enroulement 110 ou 220 V, est connecté aux bornes du contrôleur disposé sur la gamme 50 mV courant continu.

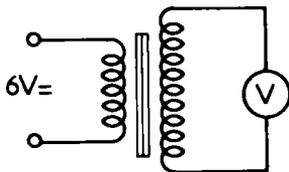


Fig. III-19.

1° Placer le commutateur de l'alimentation sur courant continu. Au moment de la fermeture, l'aiguille du contrôleur se déplace rapidement, puis revient lentement à sa position d'équilibre. Il n'y a pas de changement du champ magnétique, et en conséquence, aucune f.e.m. induite dans le secondaire.

2° Ouvrir rapidement le commutateur de l'alimentation courant continu (l'alimentation courant alternatif ne sera pas reliée au secteur pour éviter de passer sur alternatif). L'aiguille du contrôleur dévie rapidement à nouveau, mais en sens inverse au précédent, et revient encore lentement à sa position d'équilibre. Ce phénomène est dû à la rapide suppression du champ magnétique autour du primaire. Il en résulte un phénomène de self-induction qui affecte l'enroulement secondaire et induit pendant un très court instant une pointe de tension.

Avec des sources d'alimentation plus élevées et des rapports primaire secondaire plus grands, ces extra-courants de rupture peuvent être très importants.

L'expérience précédente doit être conduite rapidement, car la pile se trouve pratiquement en court-circuit.

*Conclusion.* — Le transformateur n'opère aucune action en courant continu, sauf au moment de l'ouverture et de la fermeture du circuit.

3° Conserver le montage précédent, mais disposer le contrôleur pour la mesure des tensions alternatives sur la gamme 250 V.

Porter le commutateur sur courant alternatif après avoir connecté l'alimentation au secteur. Mesurons la tension aux bornes du secondaire. Nous trouvons 220 V. Pourquoi cette tension est-elle si élevée ? Nous avons vu dans l'étude du fonctionnement du transformateur

$$\frac{E_s}{E_p} = \frac{n_2}{n_1} = \text{rapport du transformateur.}$$

4° Intercaler dans le circuit précédent un rhéostat de  $10 \Omega$  et le contrôleur disposé pour la mesure des courants, gamme 1 A, comme le schématise la figure III-20. Faisons varier la valeur de la résistance par la manœuvre du bouton de commande du curseur. Nous vérifions que la manœuvre du rhéostat modifie l'intensité du courant qui traverse le primaire.

Mesurons la tension aux bornes du secondaire et manœuvrons le rhéostat disposé dans le primaire. Cette tension varie suivant l'intensité du courant dans le primaire.

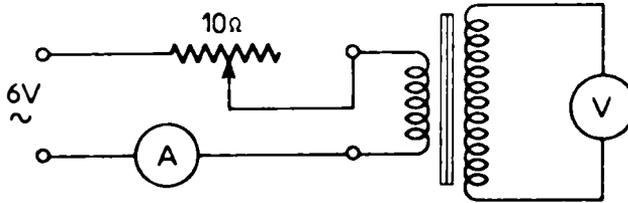


Fig. III-20.

5° Disposons une résistance de 10 000 Ω, 5 W aux bornes du secondaire et contrôlons l'intensité dans le primaire. Celle-ci augmente.

La présence d'une charge aux bornes du secondaire provoque une élévation du courant dans le primaire. Toute l'énergie produite par le secondaire est prélevée sur le primaire.

### Capacité et condensateur

Supposons deux plaques ou lames métalliques, disposées face à face, entre lesquelles se trouve une couche d'air isolante appelée diélectrique (selon le type de condensateur, le diélectrique peut aussi être du papier, du mica, de la céramique) et intercalons-les dans un circuit alimenté par une pile et comportant un interrupteur (fig. III-21). Le circuit étant ouvert les électrons ne peuvent circuler. Fermons l'interrupteur. La plaque reliée au pôle négatif de la batterie reçoit des électrons provenant de celle-ci, et en même temps, soutire des électrons à la plaque reliée au pôle positif. Au bout d'un certain temps, la tension entre les deux plaques est égale à celle de la pile. L'équilibre n'est pas instantané; en effet, une plaque doit se charger d'électrons pour devenir négative; l'autre doit perdre des

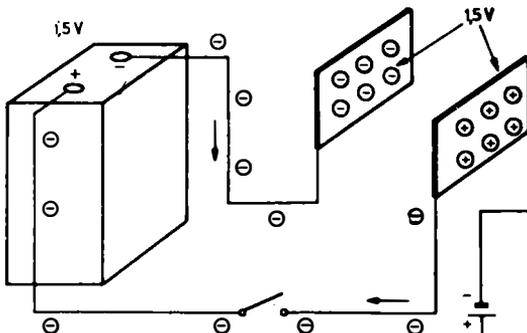


Fig. III-21.

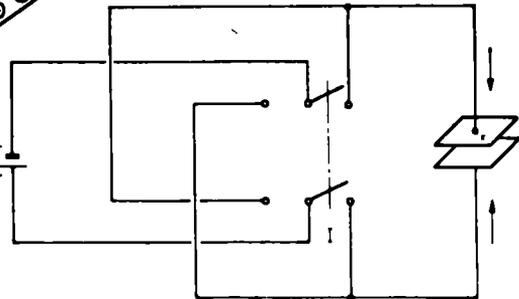


Fig. III-22.

électrons pour devenir positive. Le mouvement est d'abord intense, puis la charge partielle s'oppose à l'arrivée de nouveaux électrons ; le mouvement se ralentit puis cesse. On dit que le condensateur est chargé. L'action des deux charges est dite « capacité ». Elle tend à s'opposer à un changement de tension, comme l'inductance s'oppose à un changement de courant.

Si ensuite, on inverse le sens du courant, il se produira le phénomène inverse et il y aura un passage des électrons d'une plaque à l'autre à travers la batterie et ainsi de suite. C'est ce qu'on obtient avec le commutateur bipolaire disposé dans le circuit de la figure III-22.

Le système formé par les deux plaques s'appelle condensateur. Comme on peut le supposer, plus les plaques seront grandes, plus le nombre d'électrons déplacés sera important. Cette propriété se nomme « capacité du condensateur ».

On comprend facilement qu'au lieu d'intervertir le courant au moyen d'un commutateur, on puisse imaginer que ce mouvement se produise automatiquement en envoyant, dans le circuit, un courant qui change de sens périodiquement. Cette propriété, comme on le sait, est celle du « courant alternatif ». Un condensateur, disposé dans un circuit parcouru par un tel type de courant, n'empêche pas ce dernier de circuler ; en revanche, il interrompt un courant continu ; à partir du moment où la plaque connectée au pôle négatif s'est chargée d'électrons et ne peut plus en emmagasiner, il n'y a plus de courant dans le circuit.

Si on considère que dans un circuit parcouru par un courant alternatif le courant est limité par la capacité du condensateur, il est aisé d'imaginer que le courant passera d'autant plus facilement qu'on en inversera le sens. Autrement dit, un condensateur laisse circuler un courant alternatif avec d'autant plus de facilité que sa fréquence est élevée. Si cette fréquence est nulle (cas du courant continu) le courant est nul ; par contre, si la fréquence est très grande, le courant tendra à obtenir une plus grande valeur.

### Capacité d'un condensateur

Cette valeur peut se définir comme la quantité d'électrons qu'un condensateur peut emmagasiner. L'unité est le farad. On dit qu'un condensateur a une capacité d'un farad quand en appliquant une différence de potentiel de 1 V, se produit une charge de un coulomb.

Dans un condensateur, la charge  $Q$  coulomb s'exprime par la simple formule

$$Q = C \times U$$

où  $Q$  = quantité d'électricité exprimée en coulombs

$C$  = capacité en farads

$U$  = tension de charge en volts.

Le farad est une unité trop grande pour les applications pratiques de l'électricité en général et de la radio en particulier. On emploie

— le microfarad ou millionième de farad ( $\mu F$ )

2 farads = 2 000 000  $\mu F$  — 150  $\mu F$  = 0,000 150 farad.

— le picofarad qui est le millionième du microfarad (pF)  
 $200 \text{ pF} = 0,000 200 \mu\text{F}$  —  $2 \mu\text{F} = 2 000 000 \text{ pF}$ .

On emploie parfois le nanofarad qui vaut 1 000 pF (nF). La substance qui sépare les lames d'un condensateur ou diélectrique est un facteur de sa capacité. Cette valeur, appelée constante diélectrique de l'air est égale à 1. Ajoutons que celle du mica varie de 5 à 8, celle du quartz est de 5.

Le diélectrique est soumis à l'action des lignes de force du champ électrique d'un condensateur. A chaque demi-alternance, le diélectrique subit une dilatation qui tend à le rompre ce qui se produit si on applique au condensateur une tension plus grande que celle pour laquelle il a été prévu. Dans ce cas, le condensateur est inutilisable parce que le diélectrique est perforé en un ou plusieurs points.

Les condensateurs peuvent être fixes ou variables. Les condensateurs fixes sont ainsi dénommés parce que leur capacité est invariable. Ils peuvent se présenter sous la forme cylindrique, rectangulaire ou cubique (fig. III-23).

Dans les condensateurs variables, la surface en regard des plaques métalliques peut varier. On dispose de lames fixes régulièrement disposées entre lesquelles s'engagent plus ou moins par rotation d'un axe, une série de lames mobiles (fig. III-24).

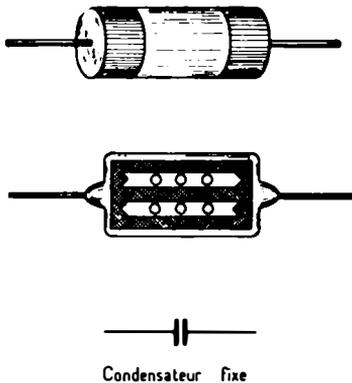


Fig. III-23.

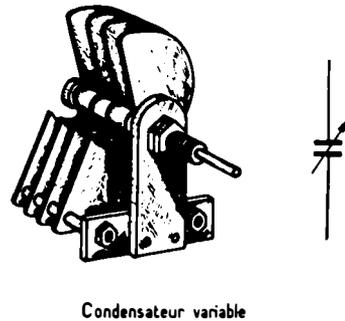


Fig. III-24.

Les condensateurs électrolytiques sont destinés à emmagasiner une grande quantité de charges électriques ; on les rencontre dans les circuits d'alimentation des récepteurs de radio. Le diélectrique est constitué par une couche d'oxyde qui se forme sur les surfaces opposées de deux rubans d'aluminium séparés par un électrolyte, quand ceux-ci sont soumis à un potentiel électrique déterminé.

### Disposition des condensateurs

Comme les résistances, les condensateurs peuvent être montés en série ou en parallèle, mais le résultat est exactement le contraire. Ces dispositions sont schématisées à la figure III-25.

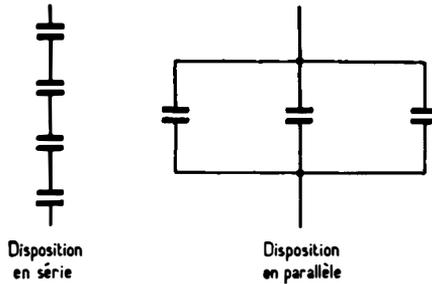


Fig. III-25.

Lorsqu'on monte plusieurs résistances en série, la résistance totale est égale à la somme des résistances. Au contraire, si l'on monte plusieurs condensateurs en série, la capacité totale diminue, comme si l'on avait augmenté la distance entre les plaques. La formule qui permet de calculer la valeur de la capacité équivalente ressemble à celle que nous avons utilisée pour le calcul de la résistance équivalente de plusieurs résistances en parallèle.

$$\frac{1}{C_{\text{equi}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

soit pour deux condensateurs en série :

$$C_{\text{equi}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Lorsqu'on monte plusieurs résistances en parallèle, la résistance équivalente diminue ; au contraire, si l'on monte plusieurs condensateurs en parallèle, la capacité équivalente est égale à la somme des valeurs de tous les condensateurs disposés en parallèle.

$$C_{\text{equi}} = C_1 + C_2 + C_3$$

*Réactance capacitive.* — De même que la réactance inductive est l'opposition offerte au courant par une bobine, on appelle réactance capacitive ou capacitance la résistance qu'un condensateur oppose au courant.

Si le courant est continu, il se produit seulement un bref courant qui charge le condensateur. La réactance est infinie.

Avec le courant alternatif, au contraire, le condensateur se charge et se décharge constamment, de telle sorte qu'il circule un courant. Comme nous l'avons vu précédemment le courant de charge et le courant de décharge sont plus élevés au début de la charge et de la décharge. La valeur moyenne du courant est donc d'autant plus élevée que l'inversion est fréquente, c'est-à-dire que la fréquence du courant est élevée. En conséquence, la réactance capacitive est d'autant plus faible que la fréquence augmente ou que la capacité est élevée. On obtient la valeur de la réactance capacitive exprimée en ohms à partir de la formule

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

formule dans laquelle  $X_c$  est la réactance capacitive,  $f$  la fréquence exprimée en périodes et  $C$  la capacité en farads.

Dans un circuit à inductance pure, nous avons vu que la courbe d'intensité était en retard sur la courbe de tension ; dans un circuit capacitif, l'intensité est en avance sur la tension (fig. III-26).

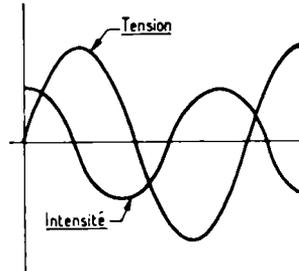


Fig. III-26.

Calculons par exemple la réactance capacitive d'un condensateur de  $22 \mu\text{F}$  (microfarad) utilisé dans le circuit servant à la démonstration suivante ; la fréquence de la tension alternative est de 50 cycles/seconde.

$$X_c = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 50 \times 0,000\,022} = 130 \text{ ohms environ.}$$

Que devient la résistance si la fréquence s'élève ? Supposons que celle-ci soit de 500 cycles/seconde. Dans ce cas la réactance est égale à :

$$X_c = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 500 \times 0,000\,022} = 13 \Omega$$

La réactance capacitive diminue avec la fréquence. Nous constatons que la nouvelle valeur est égale au dixième de la valeur précédente. Rappelons que si la valeur de la réactance capacitive décroît avec l'augmentation de la fréquence, la réactance inductive s'élève en même temps que la fréquence.

La loi d'Ohm est utilisée pour calculer le courant qui traverse le condensateur en fonction de la tension alternative appliquée et de la réactance capacitive.

La formule est la suivante :

$$I = \frac{U}{X_c}$$

formule dans laquelle :

$I$  est le courant qui traverse le condensateur exprimé en ampères.

$U$  la tension aux bornes du condensateur.

$X_c$  la réactance capacitive exprimée en ohms.

**Impédance.** Nous avons précisé précédemment ce qu'on appelle impédance d'une bobine. Celle-ci est égale à la somme de la résistance ohmique et de la réactance inductive. Dans un circuit comportant self et capacité, l'impédance du circuit peut être calculée par la formule.

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$$

dans laquelle

$Z$  est l'impédance exprimée en ohms.

$R$  la résistance exprimée en ohms.

$L\omega$  la réactance inductive en ohms.

$\frac{1}{C\omega}$  la réactance capacitive en ohms.

On obtient  $I = \frac{U}{Z}$

formule dans laquelle  $I$  est le courant en ampères.

$U$  la tension en volts.

$Z$  l'impédance en ohms.

### Démonstration

Notre boîte connexion sera disposée comme l'indique le schéma de la figure III-27. Un condensateur de  $22\mu\text{F}$  et une ampoule  $6\text{V}-300\text{mA}$  constituent les éléments du circuit connecté à l'alimentation  $6\text{V}$ .

1° Plaçons d'abord l'inverseur de l'alimentation sur courant continu. L'ampoule ne s'éclaire pas ce qui confirme que le courant ne passe pas. A l'aide du contrôleur sur calibre  $6\text{V}$ , mesurons la tension continue aux bornes de l'ampoule d'abord, du condensateur ensuite. Constatons qu'il existe bien une différence de potentiel aux bornes du condensateur et qu'il n'en existe pas aux bornes de l'ampoule.

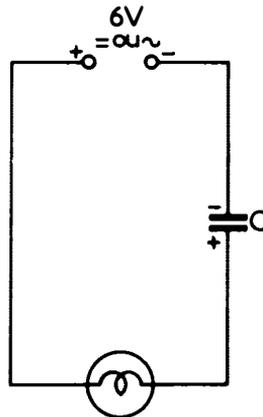


Fig. III-27.

2° Supprimons l'ampoule et fermons le circuit en insérant à sa place le contrôleur disposé sur l'échelle des intensités continues la plus basse. Fermons le commutateur et observons l'action de l'aiguille. Au moment de la fermeture, on constate un brusque déplacement de l'aiguille vers un certain maximum, puis

celle-ci revient lentement à zéro. Le condensateur s'est chargé, c'est-à-dire qu'il a emmagasiné une certaine quantité d'électricité, puis le courant a cessé.

3° Passons sur alimentation en courant alternatif. Nous constatons que l'ampoule éclaire faiblement, ce qui montre indiscutablement que le courant alternatif traverse le condensateur.

Disposons le contrôleur sur  $\simeq$  et mesurons la tension alternative aux bornes du condensateur et de l'ampoule. La valeur de la première est plus élevée que celle de la seconde.

4° Court-circuitons le condensateur avec une section de fil conducteur ; la luminosité de la lampe devient très vive, ce qui signifie que le condensateur introduit dans le circuit une certaine résistance qui prend le nom de « réactance ». Mesurons l'intensité du courant.

5° Remplaçons le condensateur de  $22 \mu\text{F}$  par un  $100 \mu\text{F}$ . La luminosité de la lampe est normale, ce qui prouve que la réactance diminue.

6° Procédons à nouveau aux mesures de tensions. Nous constatons que la tension alternative est plus élevée aux bornes de l'ampoule et moins élevée aux bornes du condensateur.

Mesurons à nouveau l'intensité du courant qui circule. Celle-ci est beaucoup plus élevée que précédemment en raison de la plus faible réactance et de la plus forte capacité.

### Démonstration

Ce simple circuit (fig. III-28) permet d'interpréter deux principes fondamentaux relatifs aux condensateurs : l'importance de la charge d'un condensateur et la barrière que celui-ci oppose au passage du courant continu. La tension de la pile est de 6 V. L'inverseur S permet de connecter la lampe à la borne positive ou à la borne négative de la pile. En série avec la lampe est disposé le conden-

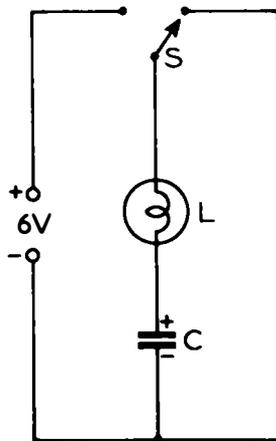


Fig. III-28.

sateur électrolytique C de 2000  $\mu\text{F}$ . Quand S est commuté vers la borne négative de la pile, le condensateur électrolytique C est déchargé. En connectant S vers la borne positive de la pile, la lampe s'allume immédiatement et s'éteint ensuite lentement, sans aucune autre intervention sur le circuit. Une telle condition électrique signifie que le condensateur C s'est chargé, en un premier temps, brusquement, et ensuite lentement. Quand la charge de C est complète, le courant ne traverse plus le circuit et la lampe reste éteinte. En commutant S vers la borne négative, la lampe s'allume et cette situation correspond à la décharge de C qui restitue au circuit la charge emmagasinée précédemment.

### Self et capacité dans un circuit

Les bobines et les condensateurs sont souvent utilisés dans un même circuit, on les utilise notamment dans les redresseurs de courant, dans les circuits amplificateurs des récepteurs de radio.

Comme on le sait, une bobine intercalée dans un circuit parcouru par un courant alternatif s'oppose au passage du courant d'autant plus que la fréquence est élevée. Inversement, comme nous venons de le voir, un condensateur permet le passage du courant alternatif et s'oppose au passage du courant continu.

L'effet de la bobine est donc opposé à celui du condensateur. On peut en conclure que pour une fréquence déterminée, il est possible de compenser leur action mutuelle. A ce moment-là seule intervient alors seulement la résistance du circuit, cette propriété s'appelle la condition de résonance ou résonance. Les bobines et condensateurs variables utilisés dans les appareils de radio, et en général, en électricité, n'ont d'autre objet que d'obtenir cette condition de résonance électrique des composants du circuit avec la fréquence du courant qui circule dans le circuit.

Bien que la réactance inductive et la réactance capacitive s'expriment toutes deux en ohms, leurs effets se retranchent. La réactance inductive se rapporte normalement à une réactance positive tandis que la réactance capacitive est appelée réactance négative. Quand les deux s'exercent en même temps, l'une peut annuler l'autre. Par exemple si un condensateur et une bobine disposés dans un même circuit ont exactement la même réactance, la réactance résultante est égale à zéro. Mais comme la réactance inductive et la réactance capacitive varient avec la fréquence, cette condition de résonance ne se produit que pour une fréquence bien déterminée. Celle-ci est appelé fréquence de résonance.

L'impédance du circuit est alors égale à

$$Z = \sqrt{R^2}$$

$$\text{ou } Z = R$$

L'opposition apportée au passage du courant résulte seule de la résistance ohmique ; ainsi, à la résonance l'impédance du circuit est égale à la résistance ohmique.

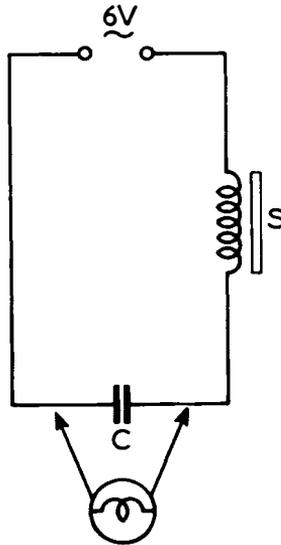
Il est intéressant de calculer la fréquence de résonance d'un circuit. Celle-ci est

$$f_r = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L C}}$$

formule dans laquelle  $f_r$  est la fréquence de résonance  
 $L$ , l'inductance en henrys,  
 $C$ , la capacité en farads.

### *Manipulation*

Le circuit sera monté suivant le schéma de la figure III-29. Il comporte une bobine à fer qui sera constituée par l'enroulement 6 ou 9 V d'un transformateur et par un condensateur disposé en série avec la bobine. Aux bornes de l'ensemble appliquons une tension alternative de 6 V.



*Fig. III-29.*

Une lampe de 6 V sera alternativement disposée aux bornes du condensateur et de la bobine.

1° Essayons plusieurs valeurs de capacité de 2 à 200  $\mu\text{F}$ . Pour une valeur déterminée de capacité, la lampe brille d'un vif éclat. La tension aux bornes du condensateur de 100  $\mu\text{F}$  dans notre cas, mesurée au contrôleur en fonction pour les tensions alternatives, est d'environ 16 V, soit environ trois fois supérieure à la tension d'alimentation.

2° Supprimons la bobine et refermons le circuit ; la lampe, aux bornes du condensateur, éclaire faiblement.

3° Supprimons le condensateur et refermons le circuit ; la lampe, aux bornes de la bobine, éclaire aussi faiblement.

En intercalant dans le circuit le contrôleur en fonction mesure des courants alternatifs sur la gamme 0,5 A, on pourra également mesurer les différentes intensités.

*Lorsque la tension aux bornes du condensateur et de la bobine est maximale, on dit que le circuit est en résonance.*

*Conclusion. — Quand une bobine et un condensateur sont en série dans un circuit parcouru par un courant alternatif des surtensions très importantes se produisent aux bornes de la bobine et du condensateur pour des valeurs déterminées de ceux-ci.*

Remarque. — Il est plus facile de réaliser cette manipulation sur une bobine de self à noyau de fer mobile dont on fait varier la self en retirant plus ou moins le noyau et un condensateur fixe de  $25\ \mu\text{F}$  par exemple. Pour une position déterminée du noyau on relèvera aux bornes du condensateur une tension très supérieure à celle de la source.

Mesurons la tension aux bornes de la bobine. En réglant la bobine, nous obtenons aussi une tension élevée.



# CHAPITRE IV

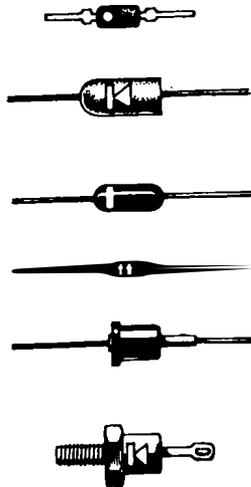
## SEMI-CONDUCTEURS

### La diode

Les diodes sont des composants électroniques dotés de deux électrodes : anode et cathode, dans lesquels le courant circule seulement dans un sens déterminé, à savoir l'anode vers la cathode.

Il existe différents types de diodes semiconductrices, de formes et de tailles différentes, en fonction de la puissance maximale que le composant est appelé à dissiper.

Les diodes à jonctions sont les plus utilisées en électronique. Constituées d'un barreau semi-conducteur comportant une zone de matériau dite N et l'autre P, elles se présentent pratiquement sous la forme d'un boîtier de verre ou de matière plastique d'où sortent deux fils correspondant l'un à l'anode, l'autre à la cathode. La figure IV-1 montre quelques types de diodes les plus courants.



*Fig. IV-1.*

La jonction P-N est obtenue sur un unique support de germanium ou, pour les types les plus récents, de silicium, dans lequel sont introduits, par des techniques particulières, deux types d'impuretés différentes qui constituent les deux zones N et P. Ces « impuretés », soigneusement dosées, antimoine ou arsenic en

N, indium ou gallium en P, sont séparées par une zone neutre pauvre, appelée jonction. Le silicium de type P transmet le courant par des charges positives par suite de l'absence d'électrons; dans un matériau de type N, la conduction est assurée par des électrons.

C'est donc, comme on le voit, le choix de l'impureté qui permet d'obtenir soit du silicium de type N, soit du silicium de type P. Quant à l'impureté, on l'appelle « accepteur » pour le silicium de type P par opposition à celui de « donneur » pour le silicium de type N. La représentation schématique est montrée figure IV-2.

Toutes les diodes se caractérisent par une résistance directe très faible et par une résistance inverse extrêmement élevée, ce qui signifie qu'elles se laissent traverser par un courant dans un sens et non dans l'autre.

### La jonction P-N

Maintenant que nous savons ce qu'on entend par silicium de type P et silicium de type N, il est possible d'examiner ce qui se produit si l'on place côte à côte une section de chacun de ces deux types. Nous obtenons, dans ce cas, une jonction P-N ou diode.

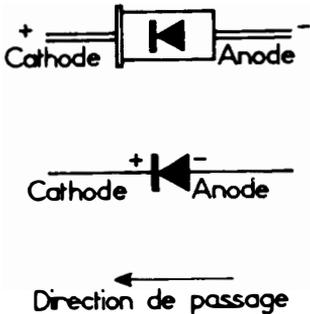


Fig. IV-2.

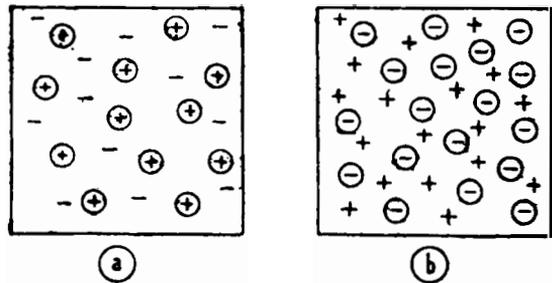


Fig. IV-3.

On représente schématiquement la structure cristalline de type P, ou de type N, en marquant seulement les atomes accepteurs ou donneurs, existant dans la structure, et les trous ou électrons mobiles. La figure IV-3 a représente le silicium de type N et la figure IV-3 b celui de type P.

Lorsque les deux types de silicium sont réunis de façon à constituer une jonction, on peut penser que les trous de silicium de type P et les électrons du silicium de type N traversent la surface de séparation et passent d'un côté à l'autre pour se combiner. Cette hypothèse est aujourd'hui contestée par certains qui expliquent le déroulement du phénomène de la façon suivante. A mesure que les électrons du silicium de type N s'approchent de la jonction, ils rencontrent une force répulsive des atomes de silicium de type P chargés négativement. Seuls, quelques électrons possèdent assez d'énergie pour traverser la jonction, mais la majorité reste du côté N. De la même façon, les trous du silicium de type P sont repoussés par la charge positive des atomes du silicium de type N

et se maintiennent de ce côté-ci de la jonction (fig. IV-4). Cette région étroite, d'épaisseur voisine de  $1\mu$  peut être considérée comme une couche d'arrêt.

Il existe donc, à l'équilibre, une barrière de potentiel, au niveau de la jonction, qui s'oppose à la migration des porteurs majoritaires. Cette barrière de potentiel peut donc se représenter schématiquement par une batterie dont la polarité est identique à celle des centres ionisés des deux régions de conductibilité opposée. Cette barrière de potentiel, si elle s'oppose à la diffusion des porteurs majoritaires, ne s'oppose pas, bien au contraire, à la diffusion des porteurs minoritaires. Nous pouvons, à l'aide d'une batterie extérieure, soit renforcer, soit diminuer l'action de cette barrière de potentiel.

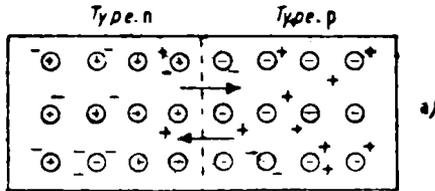


Fig. IV-4.

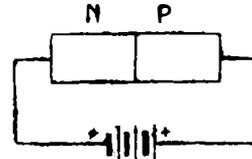


Fig. IV-5.

Si on relie le pôle positif d'une pile électrique à la région P, et le pôle négatif à la région N (fig. IV-5), les électrons de la région N sont fortement attirés par la surface positive P, et simultanément, les lacunes positives de la surface P sont attirées par les particules négatives de la surface N.

Les lacunes et les électrons tendent donc à se recombiner au voisinage de la jonction. Pour toute lacune provenant du silicium de type P, qui se combine avec un électron provenant du silicium de type N, un autre électron quitte le cristal P au voisinage de la borne positive et rentre par celle-ci dans la batterie. Il en résulte une nouvelle lacune qui à son tour se dirige vers la jonction. De même pour tout électron de la région N qui se combine avec une lacune, un électron provenant de la batterie entre dans la région N. Nous obtenons donc de cette façon un courant continu. Les polarités ainsi appliquées à N et P sont dites de sens direct. Dans ce sens, qui est celui de résistance faible de la jonction P-N, une très petite tension produit un notable courant d'électrons et de lacunes à travers le silicium. Si on augmente progressivement cette tension, on constate, à un certain moment, que le courant s'élève rapidement d'une façon telle que la chaleur dégagée peut entraîner la détérioration des cristaux. Ce moment correspond au point où les forces répulsives sont complètement annihilées (fig. IV-6).

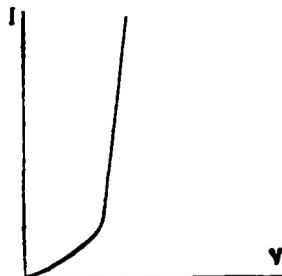


Fig. IV-6.

Si, au contraire, on renverse les polarités de la batterie, c'est-à-dire si l'on relie le silicium de type P au pôle négatif, et le silicium du type N au pôle positif, la couche d'arrêt devient plus épaisse et se comporte alors comme une forte résistance. Les lacunes du silicium du type P sont attirées par le  $-$  de la batterie et les électrons par le pôle  $+$ .

On obtient alors la conduction faible de sens inverse. Il ne passe pratiquement aucun courant dans le sens direct, mais seulement un faible courant inverse dû aux électrons libérés sous l'action de la chaleur ou de la lumière.

Le rapport de la résistance directe à la résistance inverse peut atteindre 10 000 et le rapport des courants, plusieurs centaines de millions. Il en résulte que la résistance opposée au passage du courant est très différente suivant la polarité de la tension extérieure.

La figure IV-7 indique l'allure du courant en polarisation directe à droite, et en polarisation inverse à gauche. Le courant direct croît indéfiniment avec la tension appliquée et n'est plus limité, pour les grandes valeurs de  $V$  que par la résistance ohmique du silicium. Le courant inverse, comme on le voit, est pratiquement constant pour une tension inverse de l'ordre d'une trentaine de volts (quelques mA). On sait toutefois qu'il croît rapidement avec la température. Cette augmentation a pour effet d'augmenter les pertes par effet Joule, et par suite, de donner naissance à une nouvelle élévation de température. Si cette chaleur n'est pas évacuée immédiatement, l'effet devient cumulatif et la diode est mise hors de service.

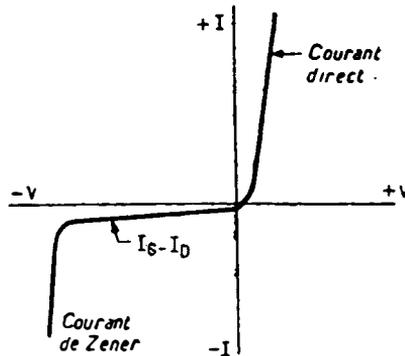


Fig. IV-7.

Si on se reporte à la figure IV-7, on constate qu'en augmentant la tension inverse appliquée à la jonction au-delà d'une certaine limite appelée tension de rupture, le courant inverse croît brutalement. La tension appliquée à la jonction refoule les électrons dans la région N et les trous dans la région P. Il ne subsiste à l'intérieur de la jonction que les donneurs et accepteurs ionisés. Il existe donc un champ électrique intense qui croît en fonction du potentiel appliqué. S'il dépasse une certaine valeur, il parvient à briser les liaisons interatomiques, ce qui provoque un effondrement de la résistivité. Ce phénomène porte le nom d'effet Zener. Il indique la tension inverse qu'il ne faut pas dépasser, sans risquer de détruire les liens de valence, d'où la brusque élévation du courant.

Rappelons-nous que la résistance de la jonction est fonction de la polarisation. Elle est élevée pour une polarisation inverse, elle est basse pour une polarisation directe.

## Utilisation de la diode

D'une analyse élémentaire, on peut conclure que la zone de jonction se comporte comme un interrupteur qui laisse passer le courant dans le sens direct et s'oppose à son passage en sens inverse. C'est la définition même du redresseur parfait.

Ainsi, nous pourrions utiliser la diode comme détectrice ou comme redresseur dont le rôle est de transformer une tension alternative en une tension continue. Elle ne laisse passer qu'une seule espèce d'alternances et présente une résistance infinie aux alternances de signe contraire.

Les montages à diodes redresseuses les plus couramment utilisés sont représentés à la figure IV-8 et à la figure IV-9.

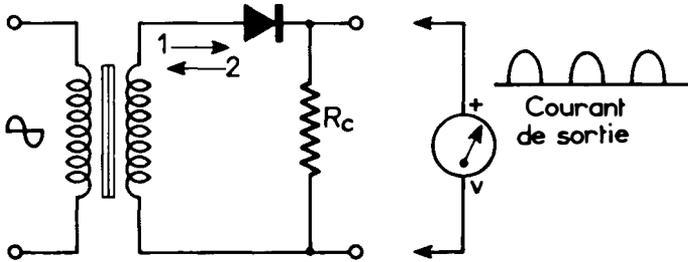


Fig. IV-8.

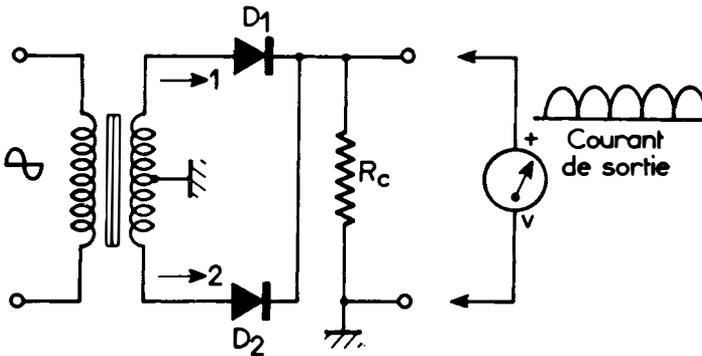


Fig. IV-9.

Le premier est un redresseur à simple alternance ; il ne laisse passer qu'une alternance sur deux. Il comporte un transformateur, une diode et une résistance de charge  $R_c$ .

Un oscilloscope relié aux bornes nous révélerait la forme du courant de sortie. Comme on le voit, seules subsistent les alternances positives. En effet, quand le courant circule dans le sens 1 à travers le transformateur, il circule à travers la diode qui n'offre qu'une très faible résistance, et la résistance  $R_c$ , aux bornes de laquelle il crée une différence de potentiel.

Dans le sens 2, au contraire, la diode n'est plus conductrice, et aucun courant ne circule dans  $R$ . La différence de potentiel aux bornes est nulle.

En raison de son inertie, le voltmètre ne peut suivre les variations instantanées de la tension de sortie et sa lecture ne donne que la valeur moyenne  $V_M$  représentée à la figure IV-10.

Le second montage (fig. IV-9) redresse les deux alternances grâce à l'utilisation de deux diodes. La tension efficace de sortie est plus élevée. Ce montage est appelé à double alternance ou va-et-vient. Le fonctionnement est facile à comprendre. Dans le sens 1, c'est la diode  $D_1$  qui est conductrice ; dans le sens 2, c'est la diode  $D_2$ .

La courbe montre la forme du courant de sortie.

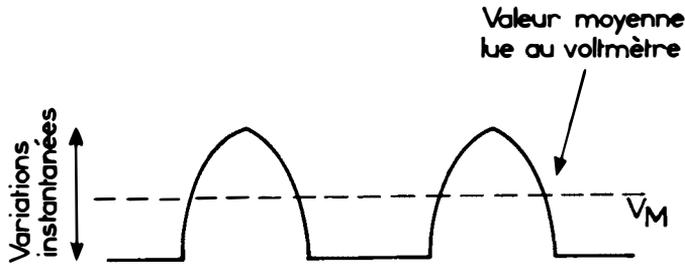


Fig. IV-10.

### Filtrage

Comme on le voit, le courant à la sortie du redresseur n'est pas absolument continu, mais plutôt un courant ondulé d'amplitude plus ou moins importante. Pour utiliser ce courant dans l'alimentation des récepteurs ou amplificateurs, il est nécessaire de supprimer cette ondulation, ou tout au moins, de l'affaiblir considérablement, de manière à avoir une tension continue de valeur constante.

Ce résultat est obtenu par l'adjonction d'un condensateur électrochimique C comme le montre le schéma de la figure IV-11.

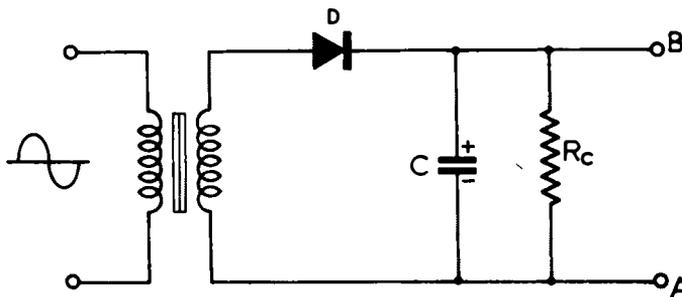


Fig. IV-11.

Le fonctionnement s'explique aisément. A chaque alternance positive, le condensateur se charge très rapidement à travers la diode D équivalente à une résistance de faible valeur. A chaque alternance négative, la diode polarisée en sens inverse offre une grande résistance et le condensateur se décharge lentement à travers  $R_c$ . La décroissance de la tension est d'autant plus lente que la

capacité du condensateur de filtrage est élevée, c'est-à-dire que la quantité d'énergie emmagasinée est grande.

En prenant pour C des valeurs croissantes,  $1\ \mu\text{F}$ ,  $10\ \mu\text{F}$ ,  $47\ \mu\text{F}$ , on constate que la tension de sortie V lue au voltmètre augmente, atteignant à partir d'une tension secondaire de 6 V, les valeurs respectives de 6 V, 8 V, 10 V environ.

On vérifiera que pour des valeurs égales de C, la tension moyenne de sortie est plus élevée dans le circuit de la figure IV-9 que dans celui de la figure IV-8.

### Redressement par pont

Ce mode de redressement à double alternance nécessite quatre diodes. Ce montage présente les mêmes caractéristiques que le précédent, mais les diodes se trouvant réparties par deux en série, sont soumises à une tension inverse moindre ce qui, dans les redresseurs à haute tension permet d'utiliser des modèles à tolérance moins élevée et meilleur marché.

Dans le sens 1, ce sont les diodes  $D_1$  et  $D_3$  qui conduisent ; dans le sens 2, ce sont  $D_2$  et  $D_4$  (fig. IV-12).

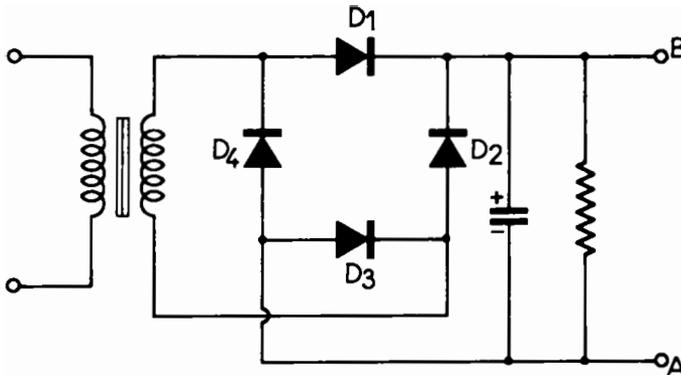


Fig. IV-12.

### Courbe caractéristique

Nous avons déjà eu l'occasion de constater qu'en connectant une diode et une pile suivant les polarités indiquées par la figure IV-13, on obtenait le passage d'un courant élevé.

Cette observation appelle cependant une précision ; ce phénomène ne se produit pas, en effet, pour toutes les valeurs de tension de la batterie. Effectivement, il est nécessaire de vaincre la tension de barrière qui, dans une diode au silicium, est d'environ 0,6 V, et dans une diode au germanium, de 0,2 V, avant d'obtenir la conduction électrique à travers la diode.

Cette affirmation est illustrée à la figure IV-14 sur laquelle les courbes mettent en évidence la conduction des diodes au silicium et au germanium. Dans les premières, la conduction commence dès que la tension est supérieure à 0,6 V ; dans les secondes, la conduction commence dès que l'on atteint 0,2 V. Il est

nécessaire de remarquer, en outre, que dans les diodes au silicium, une fois la valeur de seuil dépassée, on enregistre une nette conduction du composant tandis que dans les diodes au germanium, la conduction est plus progressive.

En dessous des tensions de barrière, les diodes se comportent pratiquement comme des isolants, étant donné que le courant est réduit à des valeurs extrêmement basses.

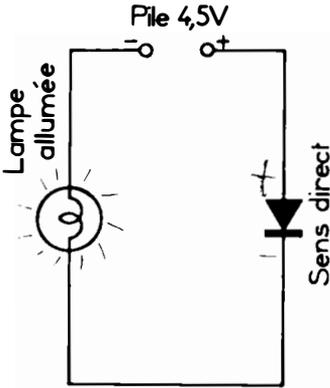


Fig. IV-13.

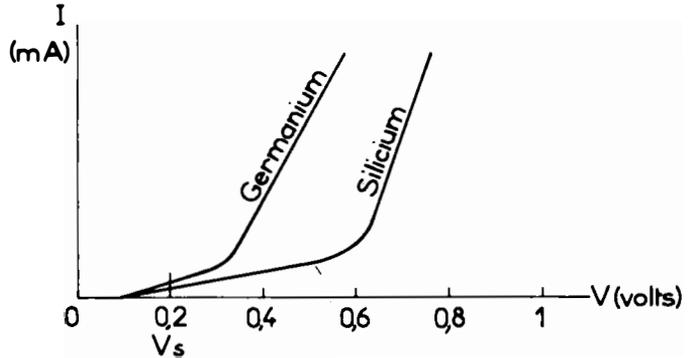


Fig. IV-14.

### Relevé de la caractéristique d'une diode

Cette courbe représente l'intensité  $I$  du courant circulant dans la diode en fonction de la tension  $V$  appliquée entre anode et cathode. Le montage est réalisé comme l'indique la figure IV-15.

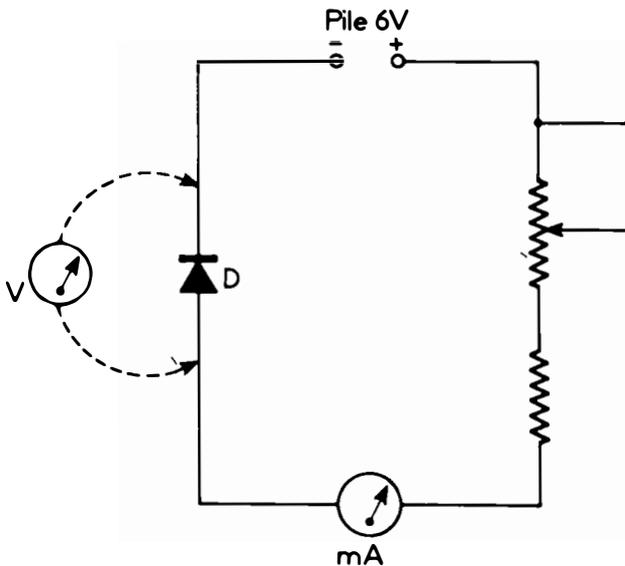


Fig. IV-15.

Le circuit comporte une pile de 6 V qui débite à travers une résistance variable constituée par un potentiomètre de  $22\text{ k}\Omega$  et une résistance fixe de protection de  $100\ \Omega$ , puis de la diode D. Un milliampèremètre disposé en série relève l'intensité du courant tandis que le voltmètre V, branché aux bornes de la diode, indique la différence de potentiel entre anode et cathode.

Si l'on ne dispose pas des deux appareils de mesure, on utilisera un contrôleur universel successivement en voltmètre puis en milliampèremètre.

Pour différentes positions du potentiomètre, on mesure d'abord l'intensité en disposant le contrôleur en position milliampèremètre, en série, puis, après avoir rétabli la continuité, la tension en position voltmètre, aux bornes de la diode.

L'examen de cette caractéristique confirme ce qui a été dit précédemment.

En inversant le sens de la diode, on pourrait de même, relever la caractéristique inverse.

### Puissance de la diode

Comme tous les composants électroniques, la diode semi-conductrice est caractérisée par la puissance maximale dissipable. Mais à ce sujet, il est nécessaire de préciser ce concept. En pratique, il existe deux puissances caractéristiques de la diode : la première est la puissance maximale que la diode réussit à faire dissiper sur une charge externe ; la seconde est la puissance dissipée intérieurement, laquelle dépend de la valeur maximale du courant qui traverse la diode.

Prenons un exemple. Considérons une diode BY 127 connectée dans un circuit alimenté sous une tension de 200 V et parcouru par un courant de 0,5 A. La puissance que la diode réussit à faire dissiper est de  $200\text{ V} \times 0,5\text{ A} = 100\text{ W}$ .

La puissance dissipée par la diode, au contraire, en tenant compte que la tension à ses bornes est de 0,6 V environ, est de  $0,6\text{ V} \times 0,5\text{ A} = 0,3\text{ W}$ , c'est-à-dire une valeur considérablement plus faible que la précédente.

En pratique, au lieu de faire référence à la puissance dissipée ou dissipable par une diode, on préfère faire appel aux valeurs maximales de courant et de tension qui donnent une indication plus claire des caractéristiques de la diode.

*Manipulations.* — Nos manipulations vont nous permettre d'étudier le comportement d'une diode disposée dans un circuit parcouru par un courant continu ou par un courant alternatif.

1<sup>o</sup> Connectons les deux extrémités d'une diode au silicium 1N914 dans un circuit comprenant une pile de 4,5 V et une ampoule pour lampe de poche 4,5 V, 0,2 A suivant la disposition représentée à la figure IV-13. La borne positive est reliée à l'anode et la borne négative à la cathode, c'est-à-dire en polarisation directe.

Le courant passe et l'ampoule s'éclaire.

2<sup>o</sup> Invertissons les polarités de la diode, comme le montre la figure IV-16. Dans cette seconde position, la diode est en polarisation inverse. Le courant ne passe pas, l'ampoule ne s'éclaire pas.

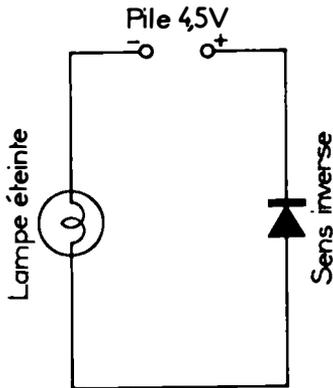


Fig. IV-16.

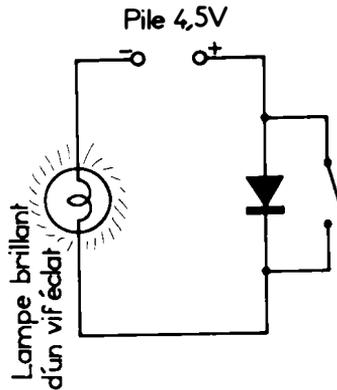


Fig. IV-17.

*Conclusion.* — Une diode ne laisse passer le courant que dans un sens.

3° Revenons au montage 1. Disposons un interrupteur en parallèle sur la diode D, comme l'indique la figure IV-17. L'interrupteur étant ouvert, la lampe éclaire comme dans les conditions initiales.

Fermons l'interrupteur (qui peut être constitué par une simple section de fil); la luminosité de la lampe augmente.

Nous venons ainsi de mettre en évidence la présence de la tension de barrière. La diode se comporte alors comme une résistance de faible valeur.

### Réalisation d'une alimentation basse tension monoalternance

Cette alimentation pourra servir comme source de tension dans les montages à transistors que nous réaliserons plus loin. Sa réalisation va nous permettre d'effectuer de très utiles mesures et des observations très intéressantes. Il s'agit d'un redresseur monoalternance. La diode sera choisie en fonction de l'intensité demandée; nous utiliserons une BY 127 ou type équivalent. Le montage est réalisé sur notre boîte-connexion.

1° Connectons à notre alimentation 6 V courant alternatif, une diode BY 127 et une résistance de  $300 \Omega$ -1 W, suivant le schéma de la figure IV-18. Le contrôleur est disposé sur l'échelle 50 mA.

2° Le primaire du transformateur est relié au secteur. Relevons sur le contrôleur la valeur du courant redressé. Celle-ci est d'environ 10 mA.

3° Plaçons un condensateur électrochimique de  $100 \mu\text{F}$ , en parallèle sur la résistance. On constate une augmentation de l'intensité du courant qui circule. Celle-ci atteint maintenant 20 mA. L'explication en est simple. La capacité de filtrage diminue le courant résiduel d'ondulation et la tension continue s'élève.

4° Supprimons l'ampèremètre et refermons le circuit à l'aide d'un cavalier. Mesurons la tension aux bornes de la résistance et relevons cette valeur: 9 V.

Enlevons le condensateur et effectuons la même mesure. Nous ne trouvons plus que 3 V. Le condensateur se charge à la valeur de pointe du courant alternatif et la tension continue est plus élevée lorsque le condensateur est en circuit. En prenant pour C différentes valeurs croissantes ( $2\ \mu\text{F}$ ,  $10\ \mu\text{F}$ ,  $100\ \mu\text{F}$ ) on constate que la valeur V lue sur le voltmètre croît également. L'explication en a été donnée précédemment.

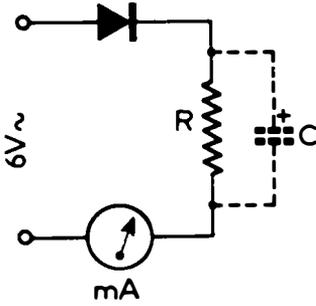


Fig. IV-18.

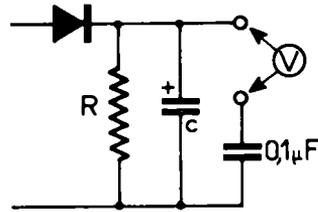


Fig. IV-19.

La capacité et la résistance constituent un filtre simple.

5° La tension alternative résiduelle est mesurée en disposant un condensateur de  $0,1\ \mu\text{F}$  au papier comme l'indique le schéma de la figure IV-19 et en connectant le contrôleur sur la sensibilité 10 V courant alternatif.

Effectuer la mesure avec le condensateur de  $100\ \mu\text{F}$  en circuit et hors circuit. Remarquez l'importante diminution de tension alternative avec le condensateur en circuit, par suite du filtrage opéré par ce dernier. La position des fiches n'a pas d'importance puisque nous sommes sur tensions alternatives.

6° Compléter le montage du redresseur suivant les indications de la figure IV-20. La cellule de filtrage est constituée d'une résistance de  $300\ \Omega$ -1 W et de deux condensateurs de  $100\ \mu\text{F}$ . Une résistance de charge de  $1\ \text{k}\Omega$  est disposée aux bornes de sortie.

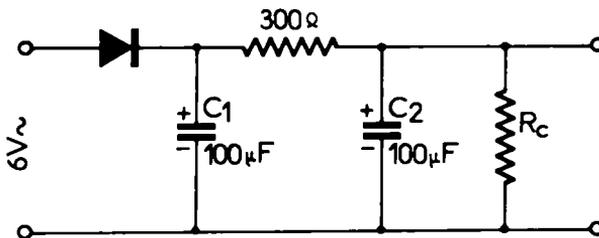


Fig. IV-20.

7° A l'aide du contrôleur, mesurer la tension continue à l'entrée et à la sortie du filtre, autrement dit aux bornes de  $C_1$  puis de  $C_2$ . On constate que la seconde mesure est inférieure à la première. Le deuxième condensateur fait baisser la tension aux bornes de la résistance ainsi que le courant qui la traverse.

8° A l'aide d'un condensateur de  $0,1 \mu\text{F}$  en série comme dans la manipulation précédente, mesurer la tension alternative résiduelle à l'entrée et à la sortie du filtre.

Nous constatons que le courant électrique d'ondulation est à peine perceptible à la sortie du filtre. Ainsi, on obtient la tension continue maximale aux bornes de  $C_2$ .

9° Enlevons la résistance de charge de  $1000 \Omega$  et remplaçons-la par une autre résistance de  $250 \Omega$ . Mesurons comme précédemment la tension continue et la tension alternative à la sortie. La substitution de la résistance de charge par une de plus faible valeur a pour résultat une chute de la tension continue.

Ainsi, si l'intensité utilisée par la charge diminue, la tension aux bornes diminue également, tandis que la composante alternative tend à augmenter.

10° Opérons maintenant de façon opposée et remplaçons la résistance de  $250 \Omega$  par une résistance de  $25\,000 \Omega$ . Celle-ci constitue la charge de la source d'alimentation. Si on mesure la tension continue aux bornes de sortie et la tension alternative, on constate que la première est élevée ( $8,5 \text{ V}$ ), tandis que la seconde est excessivement faible.

Cette dernière mesure montre que la tension continue aux bornes de l'alimentation dépend de la valeur de la charge et est d'autant plus élevée que l'autre est plus forte.

Nota. — Toutes les valeurs de tension ou d'intensité sont données à titre indicatif. Répétons qu'elles varient d'un type à l'autre.

### Montage à pont

Le rendement du circuit précédent est faible, puisque la diode ne laisse passer qu'une alternance sur deux. Le montage de la figure IV-21 est l'un des plus simples et des plus rationnels que l'électronique moderne permet de réaliser. Le montage en pont réalise le redressement des deux alternances.

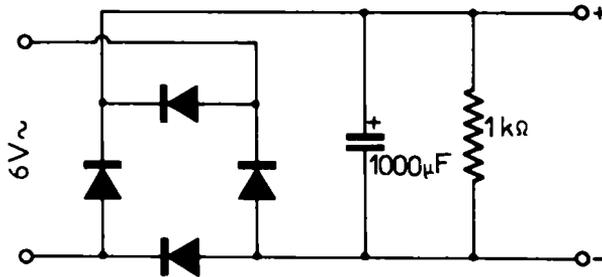


Fig. IV-21.

Le montage s'effectue encore sur la boîte connexion. Bien respecter les dispositions des diodes et remarquer que le pôle positif est prélevé sur le point commun des cathodes et le pôle négatif, sur le point commun des anodes.

## Manipulations

Tel qu'il est représenté, le montage permet d'alimenter les circuits à transistors. On répétera les opérations effectuées au montage précédent.

On comparera les résultats et on constatera que pour des valeurs égales de  $C$ , la tension moyenne est plus élevée que dans le cas du montage monoalternance.

Il est intéressant de comprendre le fonctionnement du redressement du courant et celui de la suppression de l'ondulation. Pour cela, il convient de se reporter aux figures IV-22 et IV-23 qui illustrent les deux conditions électriques possibles du transformateur d'alimentation, suivant que l'enroulement est traversé par la demi-onde positive ou négative de la tension alternative d'entrée.

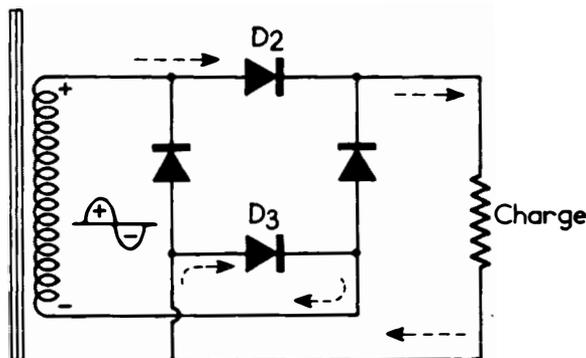


Fig. IV-22.

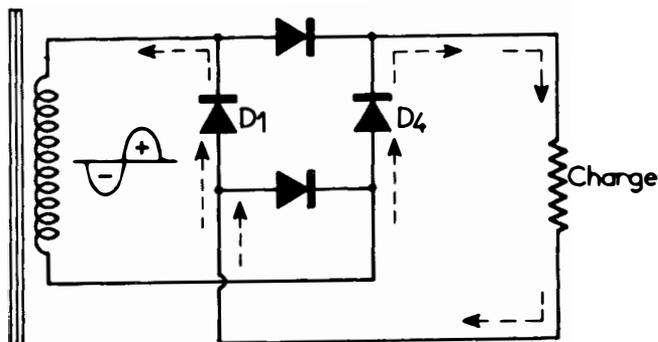


Fig. IV-23.

En présence de l'alternance positive, l'enroulement secondaire du transformateur se comporte comme un générateur de courant variable unidirectionnel, suivant la polarité indiquée sur le schéma. Dans ces conditions, le courant circule de la borne positive du transformateur à la diode redresseuse  $D_2$  qui est polarisée en sens direct, et par conséquent conductrice.

Le courant traverse cette diode, puis la charge, pour rentrer ensuite à travers la diode redresseuse  $D_3$ , sur la borne négative du transformateur.

Au cours de l'alternance négative de la tension (fig. IV-23) les polarités des extrémités de l'enroulement secondaire du transformateur sont inversées ; pour cette raison, le courant ne peut circuler à travers les deux diodes redresseuses citées précédemment. Le courant circule au contraire à travers la diode  $D_4$ , la charge et la diode  $D_1$ , pour rentrer ensuite dans le transformateur à travers l'extrémité négative.

De cette simple analyse du comportement du courant, on peut déduire que, à travers la charge, le courant circule toujours dans le même sens. C'est le principe de redressement à double alternance du courant alternatif.

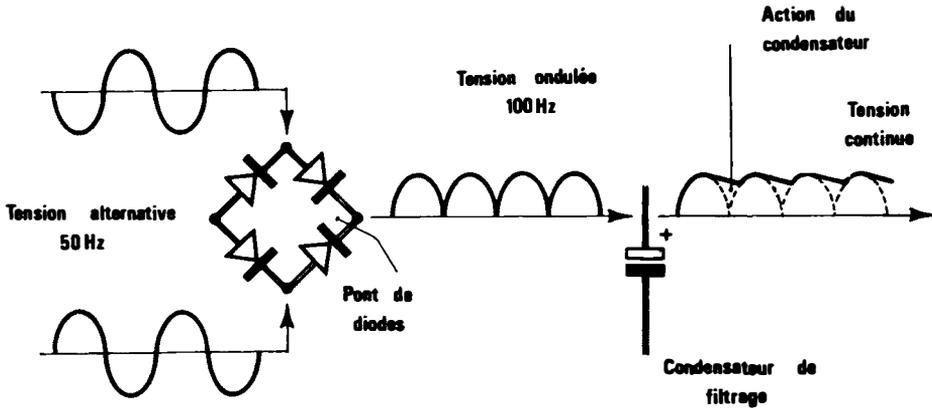


Fig. IV-24.

La figure IV-24 montre la forme d'onde du courant à l'entrée et à la sortie du pont redresseur. Comme on peut le constater, les deux alternances de la tension à 50 Hz sont réduites à un train d'alternances positives, c'est-à-dire à une tension ondulée unidirectionnelle à la fréquence de 100 Hz.

Mais la tension n'est pas encore comparable à une tension continue ayant une polarité bien déterminée. Pour obtenir cette condition, il est nécessaire d'insérer dans le circuit un condensateur électrolytique de filtrage qui se charge au cours des pointes positives de la tension et qui se décharge lorsque cette dernière est voisine de zéro.

Si la capacité du condensateur est suffisamment élevée, le temps de charge est très long et la décharge extrêmement brève, de sorte que la tension mesurée à ses bornes est dépourvue de toute ondulation et peut être considérée comme une tension continue.

### Diodes zener

L'un des paramètres caractéristiques des diodes est représenté par la tension inverse maximale que celles-ci peuvent supporter. Au-delà de cette limite, comme nous l'avons dit, on constate qu'un courant d'intensité élevée s'établit brusquement entre la cathode et l'anode, entraînant rapidement la destruction de la diode. Ce phénomène porte le nom d'effet Zener et la tension à laquelle il se produit est dite tension d'avalanche ( $V_Z$ ).

Toutefois, par un dopage approprié du cristal de silicium, c'est-à-dire en ajoutant à celui-ci quelques impuretés, il est possible de contrôler la réaction en chaîne de manière à éviter la destruction du composant ; mais il est évident que le dopage du silicium ne suffit pas parce qu'il faut aussi procéder à la limitation du courant qui traverse la diode à l'aide d'une résistance convenable.

De telles diodes, prévues pour fonctionner dans cette zone de la caractéristique s'appellent « diodes zener ». Celles-ci s'échelonnent, suivant les modèles, entre 4 et 25 V environ.



Fig. IV-25.

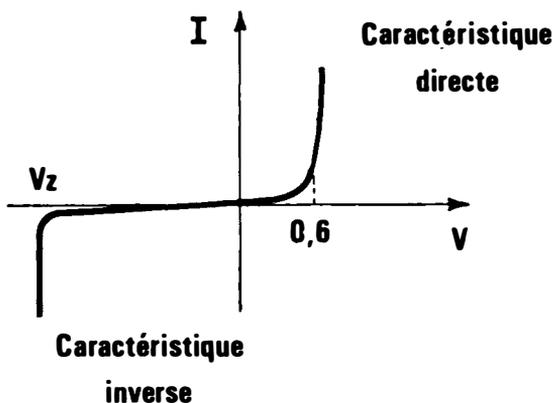


Fig. IV-26.

Le symbole représentant une diode zener est indiqué à la figure IV-25, tandis que la figure IV-26 montre la courbe caractéristique d'une diode zener qui, polarisée directement, se comporte comme une diode au silicium ordinaire, tandis que polarisée en sens inverse, elle ne conduit pas le courant jusqu'à la valeur de la tension zener. Mais lorsque cette valeur est atteinte, la diode entre rapidement en conduction. On remarque que si le courant inverse qui traverse la diode, varie considérablement, la tension aux bornes reste pratiquement toujours celle de zener, ce qui se traduit par un effet de stabilisation.

### Stabilisation de tension

Des dernières observations exposées, il est facile de déduire que l'emploi principal des diodes zener réside dans la réalisation d'alimentations stabilisées, dont la figure IV-27 donne un simple exemple.

En effet, en connectant une diode zener en parallèle à une charge déterminée, celle-ci évitera, évidemment, entre certaines limites, toute variation de tension due par exemple, à des variations de la tension d'alimentation.

La présence de la résistance  $R_z$  est absolument nécessaire, car elle a pour fonction de fixer la limite de courant admissible dans le circuit, tout en préservant l'intégrité de la diode zener.

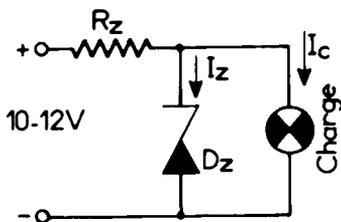


Fig. IV-27.

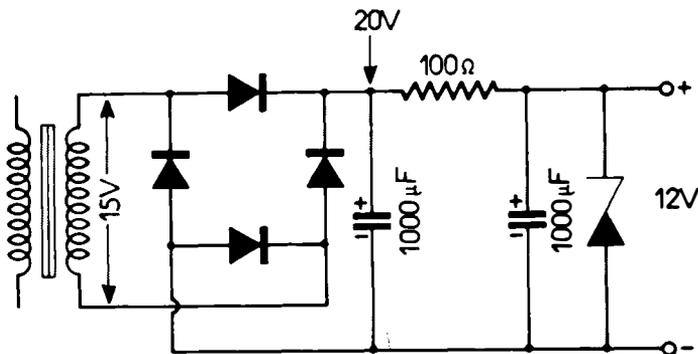


Fig. IV-28.1

Si on connectait par exemple une diode zener de 9 V, sans aucune résistance de protection, à une source d'alimentation de 10-12 V, il se produirait dans la diode zener un courant tellement intense qu'elle serait immédiatement détruite.

La résistance de zener doit être convenablement déterminée de manière à ne pas provoquer une excessive chute de tension.

La figure IV-28 donne le schéma d'une alimentation stabilisée classique permettant d'obtenir une tension de sortie de 12 V sous 400 mA.

### Manipulations

Notre circuit expérimental est représenté à la figure IV-29. La tension continue de 10 V est fournie par notre montage redresseur précédent. Aux bornes du condensateur, on dispose en série une résistance  $R$  de  $470 \Omega$ , un potentiomètre  $P$  de  $10 \text{ k}\Omega$  monté en résistance variable et une diode zener  $DZ$  de petite puissance, BZY 88 de la série 400 mW par exemple, ayant une tension zener d'environ 6 V.

La tension aux bornes est mesurée par le voltmètre  $V$  disposé sur échelle 10 V, tandis que le milliampèremètre disposé sur échelle 50 mA mesure l'intensité  $I$  du courant qui traverse la diode.

Si l'on ne dispose que d'un contrôleur, ce qui est généralement le cas, on pourra évidemment faire ces mesures successivement.

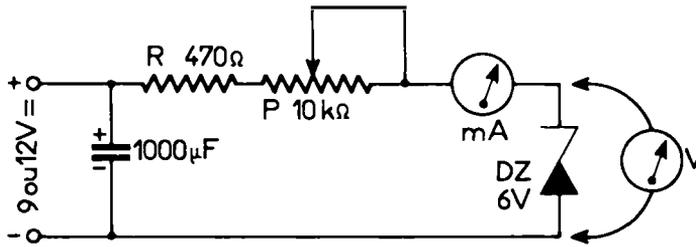


Fig. IV-29.

— Faisons varier progressivement P de 0 à 10 k $\Omega$ . L'intensité varie du maximum au minimum. Par contre la tension V varie très peu autour de la valeur nominale  $V_z$ .

— Remplaçons le transformateur de notre alimentation par un second transformateur délivrant au secondaire une tension de 12,14 ou 18 V ; la tension aux bornes de la diode ne varie pratiquement pas.

La tension de sortie reste pratiquement constante en dépit des variations du secteur.

Cette manipulation peut également être réalisée en supprimant la section alimentation à partir du secteur, et en disposant aux bornes du condensateur une source de tension de 13,5 V obtenue au moyen d'un groupement de piles 4,5 V.

— Pour vérifier les effets de stabilisation de la diode zener dans le cas où l'on se trouve en présence d'une charge variable, réalisons le circuit de la figure IV-30. L'élément de réglage est constitué par le potentiomètre P monté en résistance variable. En agissant sur ce dernier, il est possible de faire varier le courant de charge et ce fait sera mis en évidence car en modifiant le courant, la luminosité de  $L_{p2}$  qui n'est pas stabilisée par aucune diode zener variera en fonction de la valeur de résistance de  $P_1$ . La lampe  $L_{p1}$ , au contraire, restera constamment allumée, sans variations de luminosité, en raison de la stabilisation assurée par la diode zener DZ.

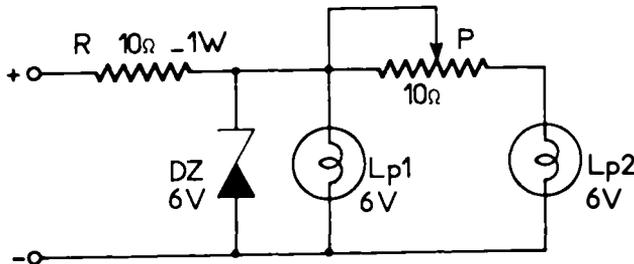


Fig. IV-30.

### Connexions de plusieurs diodes zener

Même si les diodes zener sont aujourd'hui produites suivant une grande variété de modèles pour des valeurs de tensions différentes (3-200 V) et différentes valeurs de puissance (200 mW-10 W), il peut arriver, pour des exigences

techniques particulières, d'être dans l'obligation de recourir à l'emploi de deux ou plusieurs diodes zener.

Par exemple, si l'on veut réaliser un projet nécessitant une diode zener de 15 V, et si l'on ne réussit pas à trouver dans le commerce un tel composant, le même résultat est obtenu en connectant en série deux diodes zener, une de 6 V et l'autre de 9 V. Dans ce type de connexion, la puissance se trouve répartie sur les deux diodes de manière directement proportionnelle à leur tension (fig. IV-31).

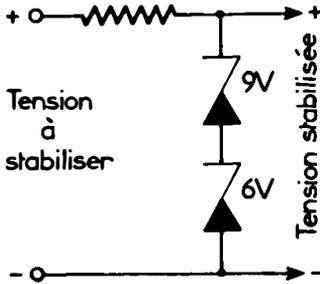


Fig. IV-31.

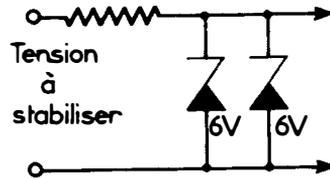


Fig. IV-32.

Au contraire, il n'est pas possible, dans certains cas, de connecter deux diodes zener en parallèle, afin d'augmenter la puissance totale dissipable. En effet, si on réalisait le circuit de la figure IV-32, en connectant en parallèle deux diodes zener de 9 V-10 W, afin d'obtenir une diode fictive de 9 V-20 W, il résulterait, qu'en raison d'inévitables différences de caractéristiques, l'une des deux diodes présenterait une tension de peu inférieure à celle de l'autre, et entrerait en conduction la première, supportant ainsi à elle seule, toute la charge.

### Diodes Varicap

La zone de jonctions P-N des diodes où s'établit la barrière constituée de deux couches de charges électriques de signes opposés peut être considérée comme un condensateur dont la capacité est normalement de quelques picofarads. Pour exploiter cette particularité il faut évidemment que le composant soit en polarisation inverse, de manière à ne pas conduire le courant et à déterminer les conditions correspondant à l'isolement entre les lames d'un véritable condensateur.

La caractéristique la plus saillante de cette capacité à l'état solide réside dans la variation de sa valeur en fonction de la tension appliquée à ses bornes.

Ce phénomène se produit normalement dans chaque diode, mais il est mis en évidence dans des composants spécialement conçus à cet effet : les diodes Varicap. L'action physique qui détermine les variations de capacité est assez complexe ; elle repose sur les propriétés de la barrière de potentiel. En effet, au fur et à mesure qu'augmente la tension inverse appliquée à la diode, la barrière repousse plus ou moins les charges qui constituent les armatures du condensateur, entraînant ainsi une diminution de capacité.

La diode Varicap se comporte donc comme un véritable condensateur variable dans lequel les variations de capacité sont obtenues en faisant varier par une commande automatique la tension aux bornes.

Les avantages de la diode Varicap sont évidents. Tout d'abord, elle permet d'éliminer l'encombrant condensateur variable, ce qui constitue une économie importante et ouvre la voie à la miniaturisation. En outre, il est possible d'obtenir une commande automatique de la capacité. Cette caractéristique est utilisée dans les récepteurs à modulation de fréquence dans lesquels la tension appliquée à la diode Varicap disposée dans le circuit oscillant de l'oscillateur local est commandée de manière à obtenir toujours le signal maximal.

La diode Varicap se représente schématiquement comme l'indique la figure IV-33.



Fig. IV-33.

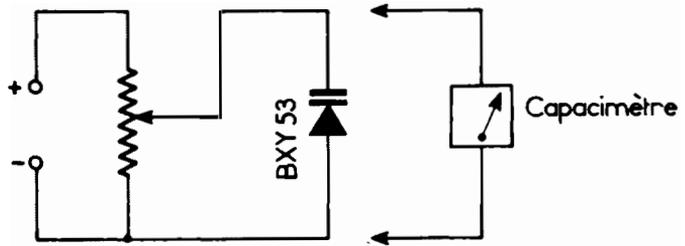


Fig. IV-34.

### Manipulation

Cette manipulation n'est possible que si l'on dispose d'un capcimmètre.

La diode Varicap est montée comme l'indique le schéma de la figure IV-34 dans un circuit comportant une source de tension continue de 9 ou 12 V et un potentiomètre de 100  $\Omega$ .

Plaçons le capcimmètre sur la gamme des picofarads aux bornes de la diode, et manœuvrons le bouton de commande du curseur du potentiomètre.

Quand le curseur est tourné vers la borne négative on obtient la valeur capacitive maximale. Inversement, quand le curseur est tourné vers la borne positive, on obtient la capacité minimale. Sur une position intermédiaire, la valeur de la capacité se situe à l'intérieur de la plage de variation.

### Diodes LED

Les diodes LED ou diodes émettrices de lumière sont des composants optoélectroniques, c'est-à-dire liés à la présence de radiations lumineuses. Elles présentent plusieurs caractéristiques intéressantes. Tout d'abord, leur durée est pratiquement illimitée. En outre les diodes LED sont des composants qui ne dissipent aucune chaleur à l'inverse des lampes à filament. Elles consomment peu d'énergie par rapport à la lumière émise et leurs dimensions sont extrêmement réduites.

Selon le matériau utilisé pour leur fabrication, elles émettent de la lumière visible (rouge, orange ou verte) ou de la lumière invisible (rayons infra-rouges). L'une des applications pratiques des diodes LED réside dans leur utilisation dans la constitution des segments lumineux des afficheurs à l'état solide. Leur tension d'alimentation est de l'ordre de 2,5 V pour les types à lumière rouge.

### Manipulation

Le montage simple de la figure IV-35 permet de vérifier les variations de luminosité d'une diode LED en fonction de la tension appliquée réglable au moyen d'un rhéostat de  $100\ \Omega$ . Une résistance fixe de protection permet de ne pas dépasser la tension maximale permise.

— Introduisons un milliampèremètre dans le circuit de manière à mesurer l'intensité du courant. La valeur maximale sera de l'ordre de 20 mA.

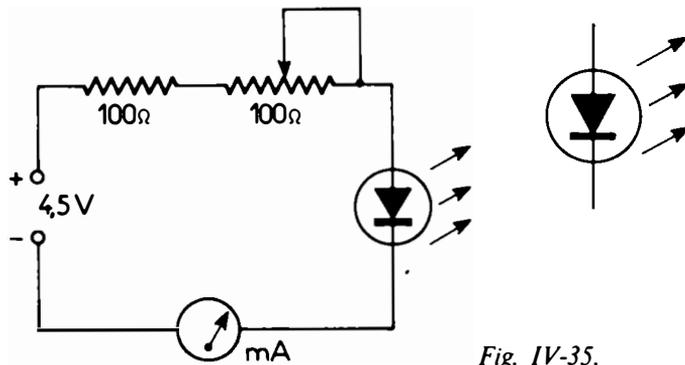


Fig. IV-35.

### Couples de jonctions

Dans des conditions déterminées, un couple de jonctions présente des caractéristiques particulières, par exemple lorsque les deux jonctions sont suffisamment voisines. Une mince lame de silicium de type P séparant deux sections de silicium de type N ou inversement constitue une double jonction. Dans le premier cas, nous avons un transistor N-P-N (fig. IV-36) et dans le second, un transistor P-N-P (fig. IV-37). Dans le premier cas également, une section de silicium N reçoit le nom d'émetteur, l'autre celui de collecteur et la section de type P, celui de base. Inversement, dans le transistor P-N-P, l'émetteur et le collecteur sont de type P, la base de type N.

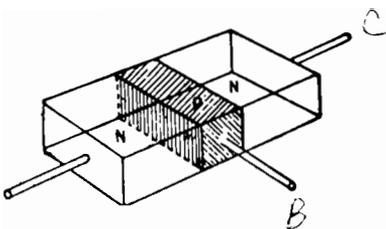


Fig. IV-36.

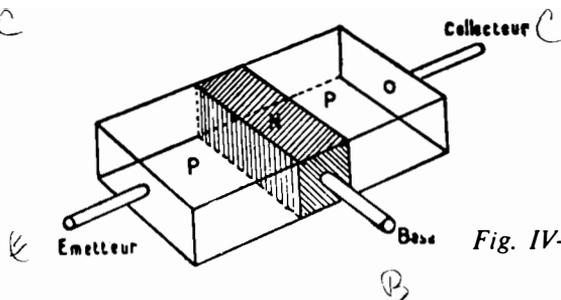


Fig. IV-37.

Un couple de jonctions ou transistor possède trois fils de sortie, chaque couche étant reliée extérieurement par un contact métallique.

Comme dans la diode à jonction précédemment étudiée, les deux extrémités du transistor N-P-N contiennent un excès d'électrons, tandis que la base possède un excès de lacunes. Il n'y a pas de combinaison entre les trous et les électrons aux deux jonctions pour les raisons que nous avons exposées précédemment.

### Fonctionnement du transistor

Pour comprendre le fonctionnement d'un transistor à jonctions, réalisons le montage amplificateur de la figure IV-38. Notre discussion s'applique à un transistor à jonctions N-P-N. Elle serait absolument identique pour un transistor à jonctions P-N-P à condition que les polarités de la batterie soient inversées.

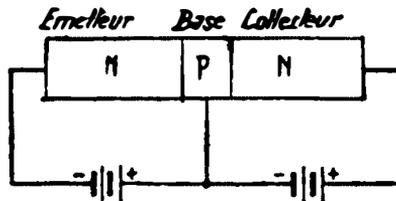


Fig. IV-38.

Comme on peut le constater sur la figure, nous voyons que la jonction émetteur-base est polarisée en sens direct, c'est-à-dire que le pôle positif de la batterie est relié à la base de type P et le pôle négatif à l'émetteur de type N. La jonction base-collecteur est polarisée en sens inverse, par une seconde batterie, c'est-à-dire que le collecteur de type N est relié au pôle positif et la base de type P au pôle négatif.

Puisque la jonction émetteur-base est polarisée en sens direct, c'est-à-dire de faible résistance, un courant s'établira à travers la jonction. Chaque fois qu'un électron provenant de l'émetteur tombe dans un trou de la base, il est remplacé par un autre électron provenant du pôle négatif de la batterie. Mais ce phénomène ne peut se prolonger que si une quantité équivalente d'électrons arrive à la borne positive. Aussi, pour chaque électron qui quitte la borne négative de la batterie, un électron provenant de la base du transistor arrive à la borne positive. Cette perte d'un électron crée dans la base un trou qui se dirige alors vers la jonction, pour se combiner, éventuellement, avec un électron provenant de l'émetteur. Il convient de remarquer que le nombre de lacunes engendrées dans la région P est bien plus grand que le nombre d'électrons libérés dans la région N. Le courant direct qui résulte de l'application de la tension directe est alors transporté presque exclusivement par des lacunes.

Par suite de la tension inverse appliquée au collecteur, on pourrait penser qu'aucun courant ne s'établit dans cette jonction. Il en serait pratiquement ainsi si la base était constituée d'une couche épaisse, et le seul courant traversant la double jonction serait le courant émetteur-base. Mais la base est mince, et les électrons qui ont quitté l'émetteur peuvent la traverser pour passer dans le collecteur, sous l'action des forces attractives dues à la polarisation positive de ce

dernier. Ils continuent ensuite leur chemin par le circuit extérieur et reviennent ainsi à l'émetteur. Cette situation s'explique fort bien si l'on considère que dans le circuit extérieur, les deux batteries sont montées en série. Comme la base est très mince, on peut admettre que le nombre de lacunes et d'électrons qui s'y combinent est faible, de l'ordre de 4 à 5 % du nombre total des électrons. Les 96 et 95 % qui restent continuent leur chemin comme nous l'avons vu. En conséquence, le courant de base est petit si on le compare au courant de l'émetteur, qui en grande partie passe dans le collecteur.

L'explication du fonctionnement d'un transistor P-N-P est sensiblement la même que la précédente avec cette différence que les lacunes sont les transporteurs de courant dans les sections de l'émetteur et du collecteur, tandis que dans la base, les transporteurs de courant sont les électrons. L'émetteur est toujours polarisé en sens direct : puisqu'il est de type P, il est relié à la borne positive de la batterie. Le collecteur est polarisé en sens inverse ; il est donc ici relié à la borne négative de la batterie et la borne commune des deux batteries en série est appliquée à la base.

L'émetteur positif repousse les lacunes vers la base. En même temps, la borne négative de la batterie chasse les électrons de la base vers la jonction base-émetteur.

Quand un trou et un électron se combinent à la jonction, un autre électron venant de l'émetteur entre par la borne positive de la batterie. Il se crée ainsi une lacune qui se dirige à son tour vers la jonction. En même temps, un autre électron quitte le — de la batterie et pénètre dans la base. Ainsi un courant circule dans le circuit émetteur-base.

Nous avons dit qu'un certain nombre de trous se combinent avec des électrons de la base. Cependant 90 % environ échappent à cette combinaison. Ils atteignent alors le collecteur où ils sont soumis aux forces attractives du négatif de la batterie. Un électron de la batterie vient neutraliser un trou. Au même instant, un électron quitte l'émetteur et par le circuit extérieur rejoint la batterie du collecteur. Il convient de remarquer que bien que les trous soient les transporteurs de courant, la conduction dans le circuit extérieur s'effectue par les électrons.

La polarité des tensions à appliquer aux différentes électrodes s'établit automatiquement en considérant que la jonction base-émetteur dans le circuit d'entrée peut être considérée comme une diode polarisée en sens direct et la jonction base-collecteur du circuit de sortie comme une diode polarisée en sens inverse.

La résistance d'entrée d'un transistor est déterminée par la résistance directe de diode émetteur-base et ainsi est très basse. L'impédance de sortie est, au contraire, déterminée principalement par la valeur de la résistance inverse de diode collecteur base et en conséquence, sa valeur est élevée.

### **Amplification de tension**

D'après ce que nous avons dit précédemment, si l'on utilise un courant d'émetteur deux fois plus grand ou deux fois plus petit, le courant de collecteur sera également, à première vue, doublé ou divisé par deux. Pour faire varier le

courant direct de l'émetteur, il suffit d'appliquer une très petite variation de tension entre l'émetteur et la base. Ces variations de courant du circuit collecteur-base peuvent être converties en variations de tension si l'on insère, dans le circuit collecteur-base comme cela se pratique avec les tubes à vide, une résistance de charge, correctement choisie, et d'assez forte valeur, relativement à la résistance d'entrée. La tension de sortie est alors, en général, très supérieure aux variations de tension appliquée entre émetteur et base.

L'amplification de tension, ainsi que l'amplification de puissance qui lui est proportionnelle sont d'autant plus grandes que le courant de collecteur est plus intense.

### Réalisation pratique des transistors

Dans la réalisation pratique des transistors, les deux électrodes supérieures ont reçu le nom d'émetteur et de collecteur, la troisième électrode porte le nom de base.

Pratiquement, ils se présentent sous différents boîtiers dont la figure IV-39 reproduit un type pour faible puissance, que nous aurons à utiliser dans nos différentes manipulations, ainsi que son brochage. Le symbole de représentation schématique est constitué par un cercle à l'intérieur duquel on figure les trois électrodes (fig. IV-40), base, émetteur et collecteur. La base est figurée par un trait. L'émetteur se distingue du collecteur par une flèche différemment orientée suivant qu'il s'agit d'un type NPN ou PNP. Elle est dirigée vers la base si l'émetteur doit être positif par rapport à la base et le collecteur négatif. Il s'applique aux transistors PNP. La flèche est de sens contraire dans le cas du transistor NPN.

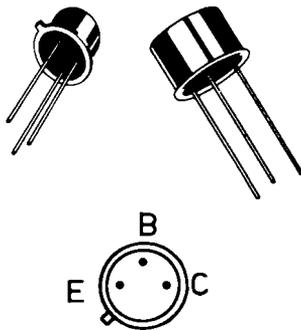


Fig. IV-39.

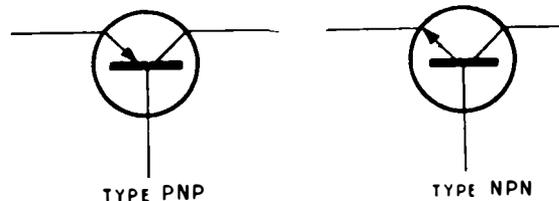


Fig. IV-40.

### Les polarités à appliquer

Dans le transistor, les polarités appliquées dépendent du type de transistor. On sait déjà que la polarisation doit être directe pour le circuit émetteur-base et inverse pour le circuit collecteur-base.

Si l'émetteur est de type P et la base de type N (transistor PNP) le courant ne s'établit que lorsque l'émetteur est relié au pôle positif et la base au pôle négatif. C'est évidemment l'inverse qui se produit avec un type NPN.

La polarité à appliquer au collecteur est aussi importante : elle dépend également du type de transistor utilisé et doit toujours être de sens inverse. Le pôle négatif est relié au collecteur si celui-ci est de type P et le pôle positif à la base qui est de type N (transistor PNP).

### Mode de branchement des transistors

Il existe trois montages fondamentaux des transistors désignés sous le nom d'émetteur commun (montage E), base commune (montage B) ou collecteur commun (montage C).

Nous n'étudierons ici brièvement que le montage à émetteur commun.

#### Emetteur commun ou émetteur à la masse

Ce montage est le plus fréquemment utilisé. Le schéma de principe est indiqué à la figure VI-41. L'entrée est reliée à la base et l'on fait la sortie sur le collecteur.

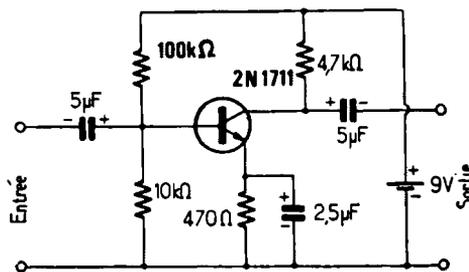


Fig. IV-41.

Le montage E fournit une amplification de courant statique, représentée par  $\alpha'$  ou  $\beta$ . L'amplification de courant  $\alpha'$  est supérieure à 100 avec les transistors 2N1711. Il convient de se rappeler que les transistors sont des dispositifs dont le fonctionnement est provoqué par des courants et non par des tensions. Il vaut donc mieux considérer l'amplification de courant et le gain de puissance par étage, plutôt que l'amplification de tension. Sur un montage émetteur à la masse, l'impédance d'entrée est plus élevée et l'impédance de sortie plus basse qu'avec le montage B. Les valeurs courantes sont de 400 à 2 000  $\Omega$  pour la première et 50 000 à 100 000  $\Omega$  pour la seconde. Comme l'impédance de sortie est plus élevée que l'impédance d'entrée, on aura une amplification de tension, et un gain de puissance correspondant, évalué en décibels par étage ; on note des valeurs de 500 et plus pour l'amplification de tension et 5 000 et plus pour le gain de puissance. Comme ces deux valeurs sont les plus intéressantes, on comprend pourquoi ce montage est le plus utilisé.

Le gain de tension est donné par la relation :

$$\text{Gain de tension} = I \text{ gain} \times R \text{ gain}$$

Le gain de courant représente le rapport entre les variations du courant collecteur et les variations correspondantes du courant de base :

$$\frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \beta$$

Le rapport  $\frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}$  est désigné par  $\alpha$ .

Pour un transistor 2N1711,  $\alpha$  est de 0,98 environ tandis que  $\beta$  peut atteindre 100. Ceci confirme que le courant de base est très faible (il est égal à la différence entre les courants collecteur et émetteur), et qu'il est nécessaire d'avoir une variation importante du courant collecteur pour provoquer une variation appréciable du courant de base et inversement.

### Etude des propriétés fondamentales du transistor

1° Réalisons le montage de la figure IV-42. Il comporte un transistor NPN de petite puissance, 2N1711, BC408 ou équivalent auquel on applique entre collecteur et émetteur une tension de 9 V (2 piles de 4,5 V en série). Une résistance de charge  $R_L$  de 470  $\Omega$  est placée dans le circuit collecteur, ainsi que le contrôleur universel utilisé pour la mesure des courants sur sa gamme la plus basse.

La base reste en l'air.

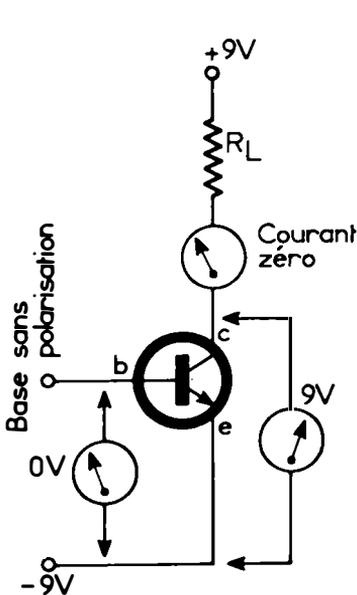


Fig. IV-42.

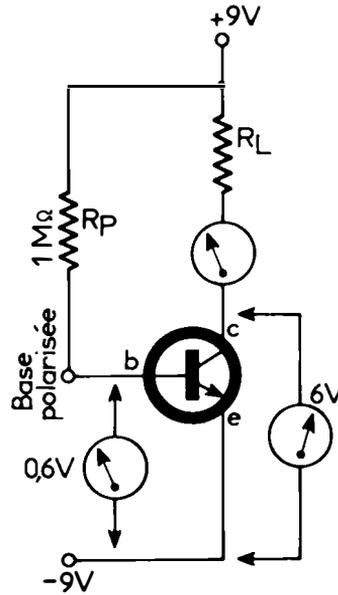


Fig. IV-43.

*Aucun courant ne circule entre collecteur et émetteur*

2° Complétons le montage précédent par l'adjonction d'une résistance de 1 M $\Omega$  entre la base et le + alimentation (fig. IV-43).

Nous constatons l'apparition d'un courant de collecteur dont la valeur est de quelques mA. Celle-ci varie avec le type de transistor utilisé.

Avec le contrôleur disposé sur  $V =$ , échelle 1,5 V, mesurons la tension entre base et émetteur ( $V_{BE}$ ); la valeur relevée est de l'ordre de 0,6 V, valeur pratiquement négligeable par rapport à la tension d'alimentation.

La loi d'Ohm nous permet de calculer l'intensité du courant qui traverse  $R_P$  à partir de la tension relevée à ses bornes :

$$I_{RP} = \frac{9 \text{ V}}{1 \text{ M}\Omega} = 9 \mu\text{A}$$

Ce courant n'est autre que le courant de base  $I_B$ .

*Une remarque s'impose : le courant de base est très faible par rapport au courant de collecteur*

Le premier,  $I_B$  sort par la base du transistor, et le second  $I_C$  circule de l'émetteur vers le collecteur.

En raison de la faible valeur du courant de base  $I_B$ , le courant d'émetteur  $I_E$  qui est la somme de  $I_B + I_C$  peut être considéré égal à  $I_C$ .

*Conclusion. — Le courant entre collecteur et émetteur ne circule que s'il existe un courant de base.*

3° Donnons à  $R_P$  différentes valeurs 330 k $\Omega$ , 390 k $\Omega$ , 470 k $\Omega$ , 560 k $\Omega$ . On constate que la tension  $V_{BE}$  reste pratiquement constante et égale à 0,6-0,7 V. Les courants de base correspondants sont donc 27, 23, 20, 16  $\mu\text{A}$ .

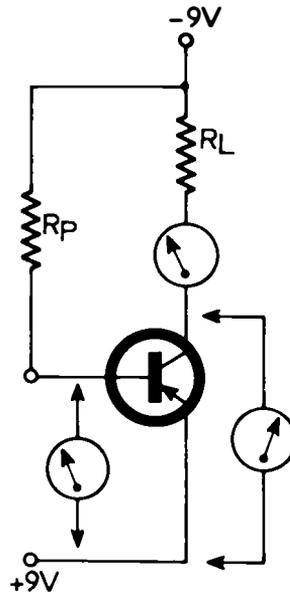


Fig. IV-44.

Mesurons pour chaque valeur de  $R$  le courant de collecteur  $I_C$  et calculons chaque fois le gain en courant  $\beta = I_C/I_B$ .

*On constate que  $\beta$  est pratiquement constant.*

4° Répétons cette opération avec différents autres types de transistors NPN de faible puissance. Nous pourrions relever leurs gains en courant  $\beta$ .

5° Renouvelons cette expérience avec un transistor PNP 2N1305, 2N1307 par exemple. La polarisation de la pile doit être inversée (fig. IV-44).

Dans cette configuration, le courant  $I_B$  sort par la base du transistor et le courant  $I_C$  circule de l'émetteur vers le collecteur.

### Polarisation du transistor

Quand on monte un transistor dans un circuit utilisateur, il est nécessaire de fixer à celui-ci un certain point de travail. En termes plus techniques, il est nécessaire d'établir la tension  $V_{CE}$  et la valeur du courant de collecteur dans les conditions de repos, quand le transistor ne reçoit aucun signal.

Pour fixer le point de travail, il est nécessaire de fournir à la base du transistor un certain courant qui sera prélevé sur le circuit d'alimentation ou sur une autre source d'énergie électrique.

De cette manière, le transistor est dit polarisé et les différents composants électroniques qui fournissent le courant de repos appartiennent au réseau de polarisation. Le courant fourni à la base est dit : « courant de polarisation ».

La figure IV-45 reproduit les méthodes de polarisation les plus communément utilisées dans le montage « émetteur commun ».

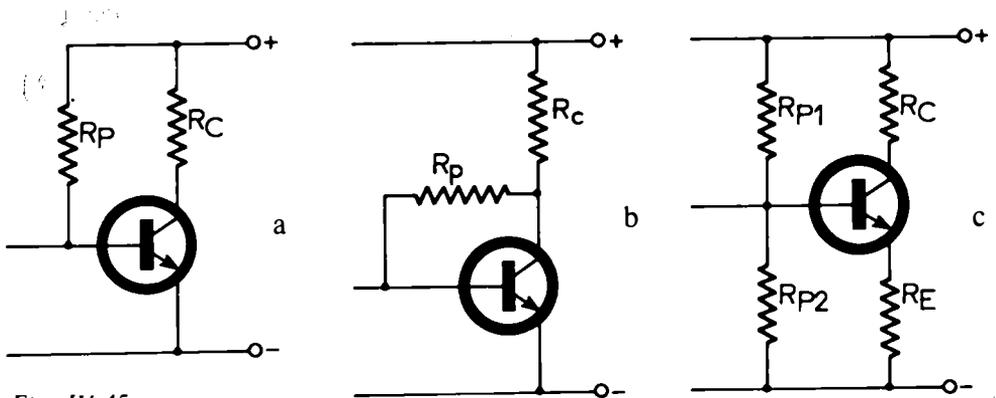


Fig. IV-45

A la figure IV-45 a, on reconnaît le montage utilisé pour l'étude des propriétés fondamentales du transistor. La polarisation de base est assurée par une seule résistance  $R_P$  connectée directement avec la ligne d'alimentation positive. Ce procédé offre une grande simplicité mais on peut lui reprocher un manque de stabilité parce que le gain du transistor varie avec les variations de température résultant de celles du courant de collecteur, du fait que le courant de base est constant.

Comme on le voit, le courant de collecteur est déterminé par le produit du gain du transistor par le courant de base. Donc, si le gain varie et le courant de base reste constant, le courant de collecteur change ainsi que le point de fonctionnement.

Pour remédier à cet inconvénient, on réalise le système de polarisation représenté à la figure IV-45 b. Celui-ci prévoit un système de contre-réaction déterminé par la connexion de la résistance de polarisation  $R_P$  directement sur le collecteur au lieu de la ligne positive.

Avec ce type de polarisation, si le courant de collecteur devait augmenter par effet de la température, la résistance de polarisation  $R_P$  serait alimentée par une tension de valeur plus faible, provoquant une diminution de la valeur du courant de polarisation et, en conséquence, une stabilisation du point de travail.

Sous l'effet de la température, en effet, on constate aux bornes de la résistance  $R_C$  une plus faible chute de tension. Ce procédé présente également un inconvénient. Celui-ci réside dans un moindre gain de l'étage amplificateur résultant de la présence des deux résistances en série.

La figure IV-45 c représente le système de polarisation plus complexe, mais aussi le plus efficace. Avec celui-ci on dispose de deux résistances de polarisation  $R_{P1}$ - $R_{P2}$  et une résistance d'émetteur  $R_E$  qui, dans certaines conditions, quand on veut obtenir d'un étage le maximum de gain, est couplée avec un condensateur électrolytique disposé en parallèle.

La fonction des deux résistances  $R_{P1}$ - $R_{P2}$  consiste à déterminer la tension de base tandis que la résistance  $R_E$  règle le courant d'émetteur, en introduisant une contre-réaction qui stabilise le point de travail.

### Amplification en tension d'un transistor

Un autre paramètre important dans l'étude des propriétés du transistor consiste dans la relation des variations du courant de base  $I_B$  avec celles de la tension  $V_{BE}$  entre base et émetteur.

Considérons le circuit de principe de la figure IV-46. La polarisation de base du transistor T est assurée par la résistance  $R_B$ . Soit  $\beta$  le gain en courant de T, le courant collecteur  $I_C$  a pour valeur :

$$I_C = \beta I_B$$

et la chute de tension aux bornes de la résistance de charge  $R_C$  est  $R_C I_C$ .

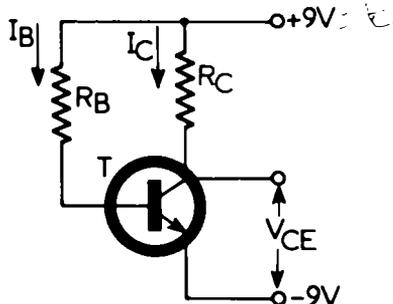


Fig. IV-46.

Si  $E$  représente la tension d'alimentation, la tension entre collecteur et émetteur  $V_{CE} = E - R_C I_C$ .

En choisissant convenablement la valeur  $R_B$ , il est possible d'obtenir que  $V_{CE}$  soit sensiblement égale à la moitié de la tension  $E$ .

A l'entrée, entre base et émetteur, on mesure une chute de tension continue  $V_{BE}$  qui dépend du courant de polarisation  $I_B$ .

Appliquons maintenant à l'entrée, à travers un condensateur  $C_1$ , dont la fonction est de s'opposer au passage des tensions continues, une faible tension alternative  $V_e$  dont l'amplitude ne dépasse pas une vingtaine de millivolts.

Le schéma de principe du circuit est celui de la figure IV-47. Cette tension alternative entraîne une variation du courant de base autour de sa valeur moyenne  $I_B$  et par voie de conséquence, une variation du courant collecteur autour de sa valeur moyenne  $I_C$ .

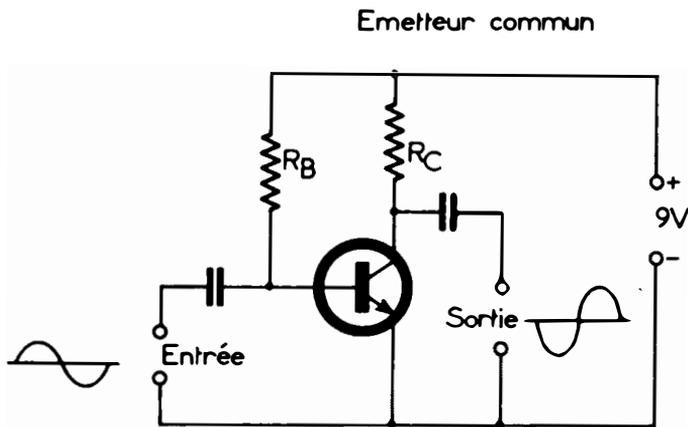


Fig. IV-47.

La chute de tension aux bornes de  $R_C$  et ainsi la tension  $V_{CE}$  subiront alors des variations alternatives  $V_s$ .

La tension alternative de sortie  $V_s$  peut être recueillie aux bornes d'un condensateur électrochimique  $C_2$ .

Le rapport entre la tension de sortie  $V_s$  et la tension d'entrée  $V_e$  s'appelle le gain en tension de l'amplificateur :  $G = V_s/V_e$ .

### Manipulation

Le circuit de vérification est celui de la figure IV-48.

Le transistor utilisé est un 2N1711.

1° Comme nous l'avons vu précédemment, la résistance de polarisation de base  $R_B$  est choisie de manière que la tension collecteur-émetteur au repos soit d'environ 4,5 V.

La tension alternative d'entrée est obtenue très simplement à l'aide d'un transformateur basse tension dont le secondaire délivre une tension de 6 V efficaces.

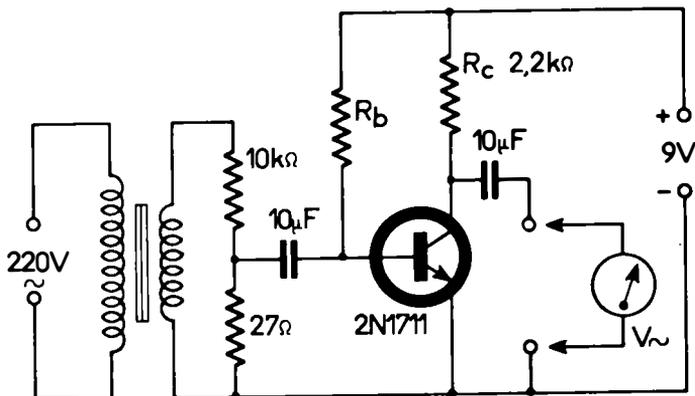


Fig. IV-48.

Avec le contrôleur disposé pour la mesure  $V_{\approx}$  on mesure la tension de sortie  $V_s$ .

Comme il est difficile de mesurer la tension d'entrée  $V_e$ , en raison de sa valeur peu élevée, celle-ci s'obtiendra de préférence par le calcul avec les valeurs de résistances choisies, cette valeur est de 16 mV environ.

Rappelons que le gain en tension =  $\frac{V_s}{V_e}$

2° Renouvelons cette manipulation avec des valeurs différentes de  $R_C$ , par exemple 1,5 k $\Omega$  et 2,7 k $\Omega$ . Il faudra bien entendu modifier également la résistance de base pour obtenir la polarisation de base correcte.

En comparant les différentes valeurs de gain obtenues, on constate que le gain croît avec la résistance de charge  $R_C$ .

Outre le phénomène de gain en tension, les variations de la tension de sortie sont déphasées de 180° par rapport aux variations d'entrée.

Ce phénomène d'inversion de phase peut s'expliquer facilement. Le circuit émetteur-base est polarisé en sens direct. De cette façon le pôle positif de la batterie repousse les trous en excès dans la base de type P vers la jonction, tandis que le pôle négatif repousse les électrons de l'émetteur dans la même direction.

Si on applique un signal sinusoïdal à la base, au cours de la demi-onde positive, il tend à augmenter le potentiel émetteur-base. Les électrons et les trous atteignent la jonction avec plus de facilité et le courant est plus intense. Le courant collecteur est, par suite, également plus élevé. La chute de tension à travers la résistance de charge est plus importante et le collecteur est à un potentiel moins positif.

Au cours du demi-cycle négatif, la tension émetteur-base diminue. Les trous de la base et les électrons de l'émetteur éprouvent plus de difficulté pour atteindre la jonction. Le courant émetteur-base diminue et par suite le courant collecteur. La chute à travers la résistance de charge est de moindre importance et le collecteur est à un potentiel plus positif. Ainsi donc le signal de sortie est déphasé de 180°.

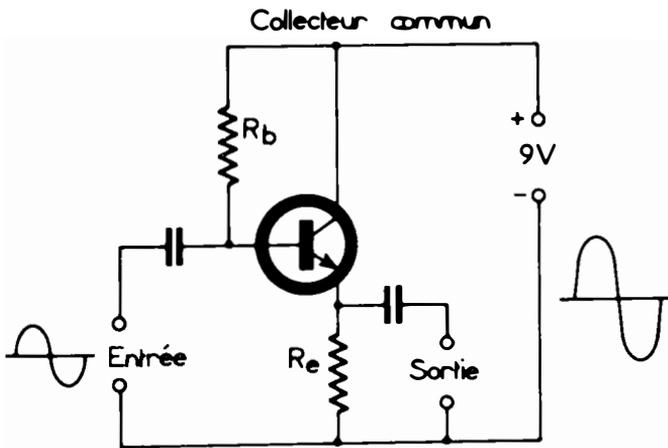
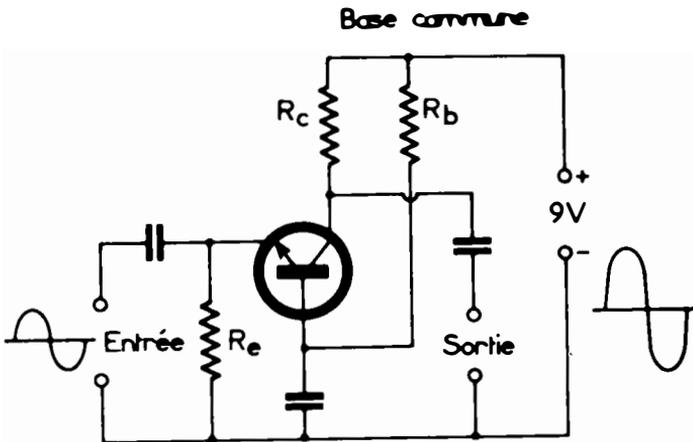
L'amplificateur à émetteur commun présente une impédance d'entrée de  $1000 \Omega$  environ et une impédance de sortie égale à  $R_C$ .

### Montage à base commune

Ce type de montage est illustré à la figure IV-49. Ce circuit est caractérisé par un gain de courant égal à 1 et par un gain de tension élevé.

La caractéristique la plus intéressante du montage à base commune consiste dans l'élévation du rapport des impédances d'entrée et de sortie puisque le circuit se comporte comme un transformateur élévateur d'impédance.

L'impédance d'entrée est de l'ordre de  $50 \text{ k}\Omega$  et celle de sortie de  $1 \text{ M}\Omega$ .



### Montage à collecteur commun

Le montage est parfois désigné sous le nom d'émetteur-follower. Cette configuration illustrée à la figure IV-50 est caractérisée par une impédance

d'entrée élevée égale au produit entre la résistance d'émetteur et le gain du transistor, et par une basse impédance de sortie.

Le gain de tension obtenu avec cette configuration est très voisin de 1. Le circuit n'amplifie pas, mais élève le gain de courant.

### Couplage entre les transistors

Il est assez rare qu'un seul transistor assure toutes les fonctions exigées par un circuit. On se trouve, au contraire, très souvent dans l'obligation de coupler deux ou plusieurs étages pour obtenir le résultat recherché. C'est le cas de l'amplificateur basse fréquence où un faible signal est appliqué à l'entrée et où il est nécessaire de recueillir à la sortie un signal amplifié capable de piloter un transducteur acoustique afin d'être facilement audible.

Il existe plusieurs modes de couplage, le plus couramment utilisé est le couplage par capacité.

### Couplage capacitif

Le système de couplage capacitif entre deux ou plusieurs étages à transistors est le plus simple de tous. Un exemple est donné à la figure IV-51. Comme on peut le noter, il est constitué de deux étages amplificateurs identiques au circuit classique d'un transistor monté en émetteur commun. La caractéristique fondamentale de ce système de couplage consiste dans l'amplification du seul courant alternatif. En effet, comme nous l'avons vu, les condensateurs ne se laissent pas traverser par les courants continus. Deux types de courants sont en effet en jeu dans les étages amplificateurs : les courants continus et les courants alternatifs. Le condensateur bloque la composante continue et laisse passer la composante alternative.

Le plus grand avantage de ce mode de couplage réside dans la grande souplesse des systèmes de polarisation des différents étages.

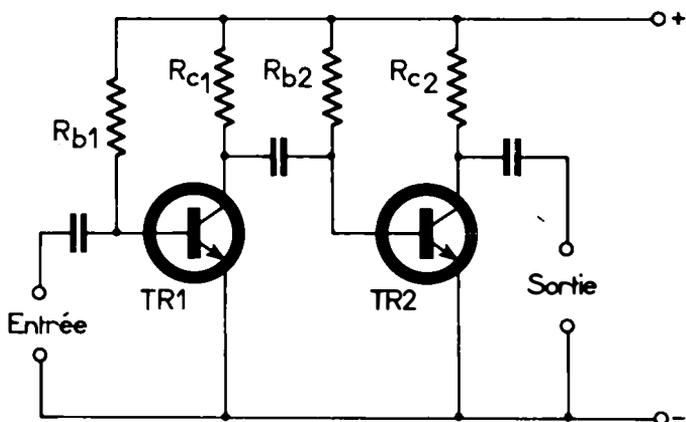


Fig. IV-51.

## Couplage direct

Quand on désire amplifier aussi la composante continue d'un signal, on recourt au couplage direct de l'entrée d'un étage avec la sortie de l'étage précédent, sans l'interposition d'un quelconque composant.

Le problème le plus difficile que présente ce type de couplage est sans aucun doute celui de la polarisation. Dans l'exemple de la figure IV-52, la résistance de collecteur du premier transistor sert aussi de résistance de polarisation pour l'étage suivant. Le problème dans ce type de couplage consiste à ne pas surcharger le transistor  $TR_1$  et à ne pas endommager la jonction base-émetteur de  $TR_2$ . C'est pourquoi il est nécessaire de porter la base du transistor  $TR_2$  au même potentiel électrique que présenterait le collecteur du transistor  $TR_1$  si ce dernier travaillait seul. Ce supplément de polarisation est obtenu en insérant sur l'émetteur du transistor  $TR_2$  la résistance  $R_e$ , couplée en parallèle avec un condensateur de type électrolytique et de valeur relativement élevée.

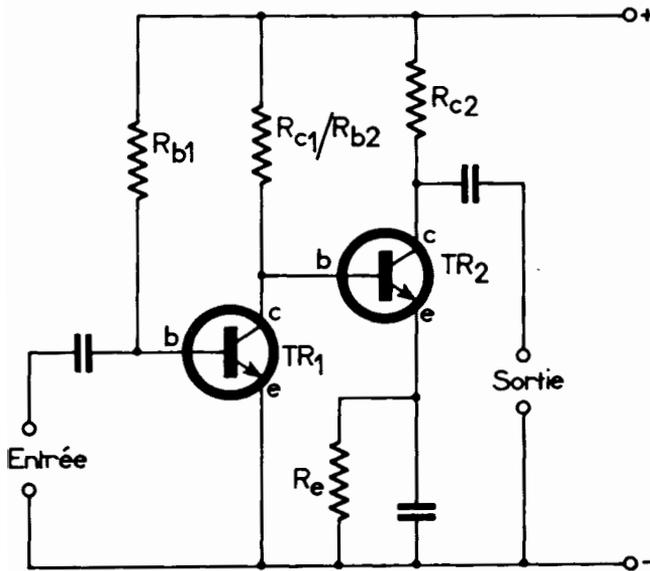


Fig. IV-52.

### Réalisation pratique d'un amplificateur à couplage direct

Il s'agit d'un circuit avec émetteur à la masse. Comme nous l'avons vu, il est possible de coupler directement le collecteur du premier transistor à la base de l'étage suivant. De plus, l'adjonction d'un condensateur de découplage de réaction permet de linéariser le fonctionnement de l'ensemble du circuit.

En observant le schéma de la figure IV-53, on note que la source de signal (microphone ou pick-up piézoélectrique) est appliquée directement entre la base et la masse du premier transistor  $TR_1$ , du type BC108, dont l'émetteur est aussi connecté directement à la masse. Autrement dit, il semble que ce transistor fonctionne sans aucune tension de polarisation, bien qu'une certaine polarisation

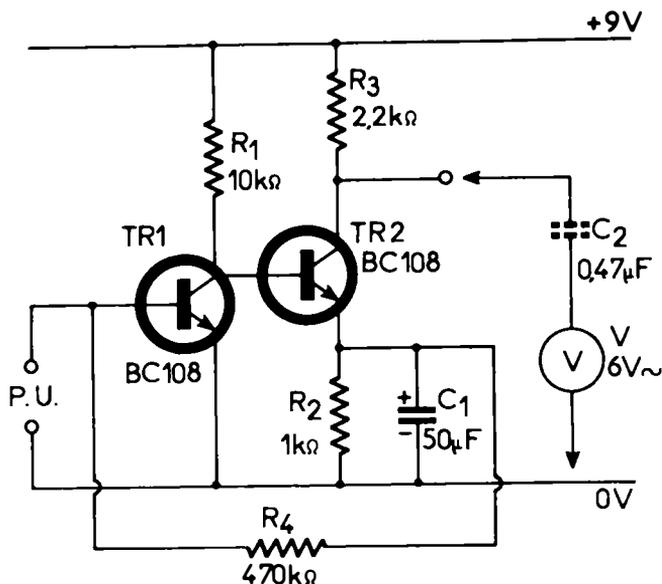


Fig. IV-53.

dérive du circuit constitué par  $R_4$  qui applique à la base une partie de la tension présente sur l'émetteur de  $TR_2$ .

Le collecteur du premier étage est relié directement à la base du second, tandis que  $R_1$  et  $R_3$  constituent respectivement les charges de collecteur des deux étages d'amplification.

Le second étage  $TR_2$  présente, au contraire, une certaine polarisation de base, due à la présence de  $R_2$  en série avec l'émetteur. En outre, en parallèle à cette résistance, est disposé un condensateur de  $50\mu\text{F}$  dont le rôle est de neutraliser la composante alternative aux bornes de  $R_2$  afin d'éviter des phénomènes de réaction négative qui réduiraient excessivement le gain de l'étage.

Le signal de sortie peut être prélevé directement sur le collecteur de  $TR_2$ , comme l'indique le voltmètre (V) appliqué précisément entre cette électrode et la masse, à travers la capacité  $C_2$ . Dans ce circuit,  $R_4$  sert aussi de circuit de réaction négative ayant précisément le rôle de linéariser le comportement de cet amplificateur en face des différentes fréquences du signal.

La figure IV-54 représente la version pratique de ce circuit réalisé sur une boîte de connexions Sieber, et indique de façon pratique la position à attribuer à chaque composant, en fonction des connexions internes de la boîte.

A la sortie de cet amplificateur, au lieu d'un transducteur, on a connecté un voltmètre pour tensions alternatives sur la gamme 6 V, de manière à vérifier la valeur de l'amplification, en évaluant avec une certaine approximation l'amplitude des signaux de sortie par rapport à l'amplitude des signaux d'entrée.

La figure IV-55 représente un autre circuit d'amplification, toujours du type à émetteur à la masse, mais fonctionnant cette fois avec quatre étages, qui est muni à la sortie d'un haut-parleur ayant une impédance de la bobine mobile de  $35\Omega$ .

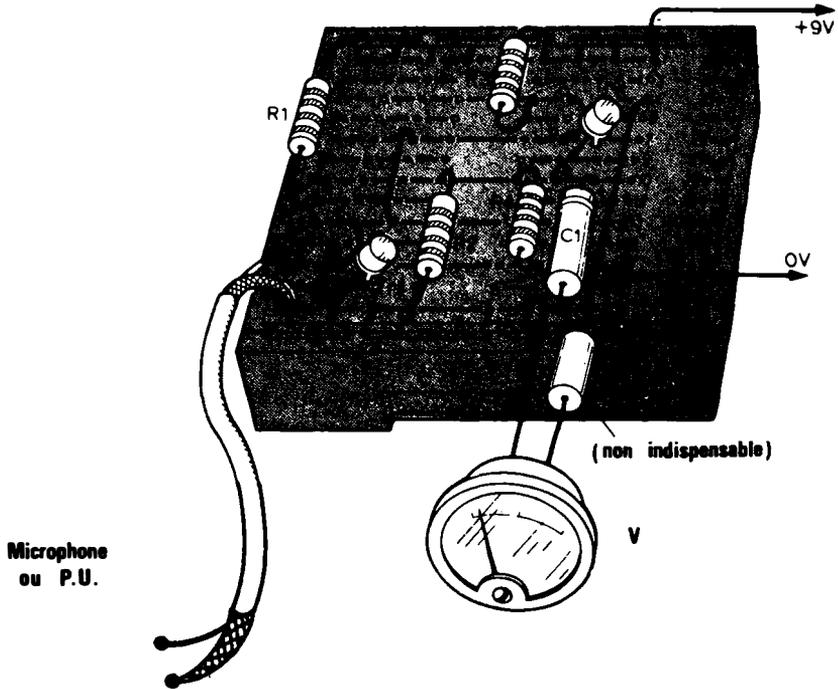


Fig. IV-54.

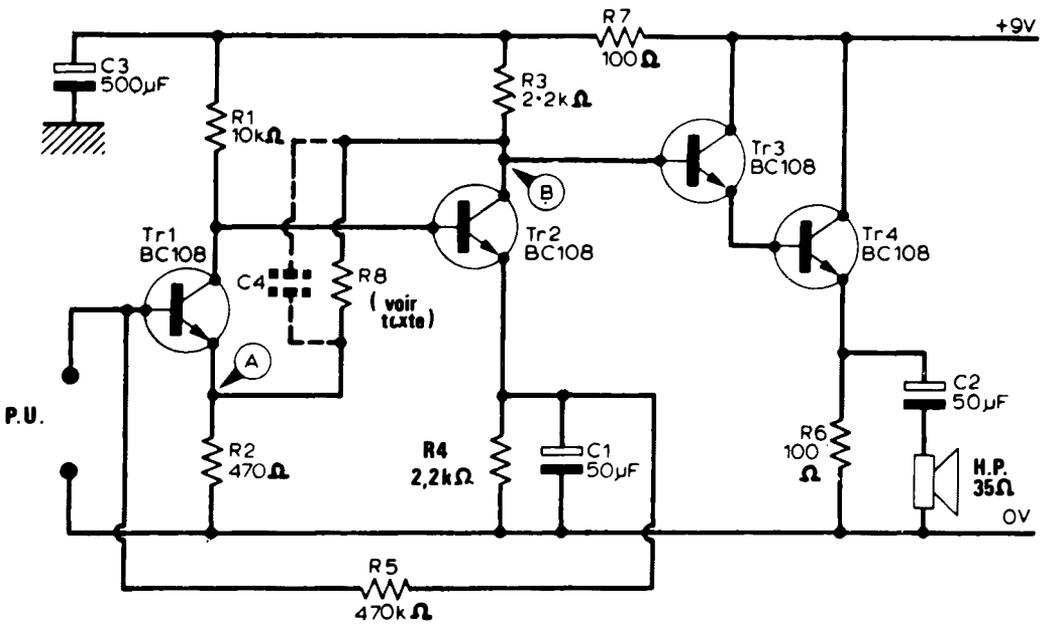


Fig. IV-55.

Dans ce second circuit,  $TR_1$  représente le premier étage d'amplification,  $TR_2$  le second,  $TR_3$  l'étage pilote et  $TR_4$  l'étage final de puissance.

Le signal appliqué à la base du premier étage passe directement au second à travers la connexion entre collecteur et base, et il en est de même entre collecteur et base du second et du troisième étage. L'émetteur de ce dernier aboutit directement sur la base de  $TR_4$  dont le circuit collecteur est privé de charge, celle-ci étant constituée par  $R_6$  en série avec l'émetteur.

Aux bornes de cette charge se présente donc un signal de sortie qui est utilisé directement par le haut-parleur à travers la capacité  $C_2$  de  $50\ \mu\text{F}$ .  $R_5$  constitue, comme dans le cas précédent, le circuit de réaction qui complète l'action du groupe  $R_8$ - $C_4$  ( $C_4$  pouvant être supprimé).

La valeur de  $R_8$  est très importante pour la détermination du gain ; par exemple, avec  $22\ \text{k}\Omega$ , le gain en tension du circuit est approximativement égal à 44. Si sa valeur est ramenée à  $10\ \text{k}\Omega$ , le gain n'est plus que de 22, avec cependant une amélioration de la qualité de l'amplificateur, autrement dit avec une diminution de la distorsion et une augmentation de la linéarité.

Le condensateur  $C_4$  permet éventuellement d'atténuer les fréquences aiguës. Une valeur de  $2200\ \text{pF}$  est bien adaptée.

Pour éviter l'emploi de  $C_4$  on peut obtenir un contrôle variable de la réaction qui agit donc ainsi comme contrôle de volume sans discrimination de fréquence. Il suffit en effet de remplacer  $R_8$  par une résistance de valeur fixe, de  $2,2\ \text{k}\Omega$  en série avec un potentiomètre graphite à variation logarithmique, de  $100\ \text{k}\Omega$ .

La disposition des éléments du circuit de la figure IV-55 est représentée à la figure IV-56. A remarquer le branchement du haut-parleur excité à travers un circuit dit « super alfa » dans le but d'éviter que le potentiel existant au point B puisse influencer le comportement de la charge de l'étage de sortie.

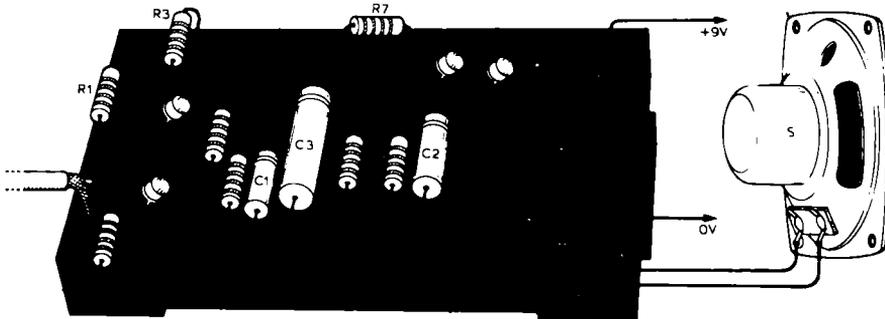


Fig. IV-56.

### La configuration Darlington

Dans cette configuration dite Darlington, on obtient à partir de deux transistors un transistor unique virtuel dont la base est celle de  $TR_1$ , l'émetteur celui de  $TR_2$  et le collecteur est commun aux deux semi-conducteurs (fig. IV-57).

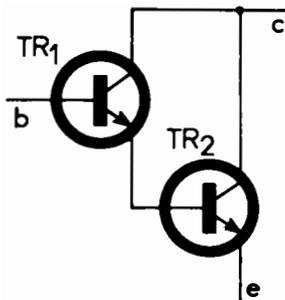


Fig. IV-57.

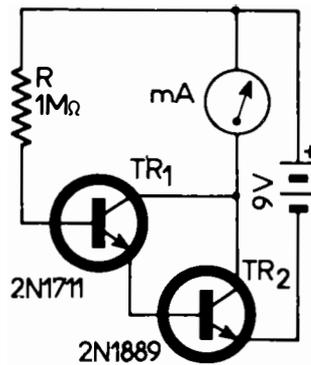


Fig. IV-58.

L'avantage de ce montage est de posséder un gain très élevé, approximativement égal au produit des gains de chacun des deux transistors, tout en conservant les caractéristiques du transistor de puissance offertes par TR<sub>2</sub>. La configuration Darlington permet donc d'obtenir un transistor de puissance de gain élevé.

Signalons que l'on trouve dans le commerce des transistors de puissance dans le boîtier desquels a déjà été réalisé le couplage Darlington.

### Manipulation

On pourra réaliser le montage de la figure IV-58 en prenant pour TR<sub>1</sub> un 2N1711 et pour TR<sub>2</sub>, un 2N1889 ou tout autre modèle équivalent. La résistance de polarisation de base est de 1 MΩ.

On procédera à l'exécution des mesures suivantes :

- intensité du courant qui circule dans le collecteur commun ;
- tension  $V_{BE}$  de chaque transistor ;
- tension entre base de TR<sub>1</sub> et émetteur de TR<sub>2</sub>, soit la tension  $V_{BE}$  de l'ensemble.

On remarque que cette dernière valeur est égale à la somme des deux tensions  $V_{BE}$  précédentes, soit 1,2 V environ.

Mesurons la tension aux bornes de R ; nous trouvons 7,8 V ce qui confirme la mesure précédente (7,8 V + 1,2 V = 9 V).

Par le calcul, nous trouvons la valeur du courant de base de  $I_{B1}$  :

$$\frac{7,8 \text{ V}}{1\ 000\ 000} = 7,8 \mu\text{A}$$

Le gain total est obtenu en appliquant la formule déjà citée :

$$\beta = \frac{I_C}{I_{B1}} = \frac{54 \text{ mA}}{7,8 \mu\text{A}} = 7\ 000 \text{ environ}$$

Ce gain peut varier suivant les transistors utilisés. Si l'on mesure séparément, comme nous l'avons fait au cours d'une manipulation précédente, le gain

de  $TR_1 = \beta_1$  et de  $TR_2 = \beta_2$ , on constate que :

$$\beta_{TOT} = \beta_1 \cdot \beta_2$$

### Remarque

La configuration précédente utilisait deux transistors NPN. Il est également possible de réaliser un transistor unique par l'association d'un PNP et d'un NPN (fig. IV-59) ou de deux PNP (fig. IV-60).

### Injecteur de signal

Ce générateur de signal n'a d'autre but que de nous permettre de vérifier la fonction d'une chaîne amplificatrice équipée de transistors.

La forme d'onde délivrée se caractérise par une grande richesse d'harmoniques. Le circuit est représenté à la figure IV-61. Il s'agit d'un circuit multivibrateur à deux transistors qui consiste essentiellement en deux étages amplificateurs à couplage par résistance-capacité, et dans lequel on a ajouté un condensateur de couplage entre le collecteur du transistor de sortie et la base du transistor d'entrée. De cette façon, on obtient une réaction positive qui donne naissance à des oscillations. La fréquence fondamentale de l'oscillation est déterminée par la constante RC des circuits et pour les valeurs du schéma, elle est de l'ordre de 4000 Hz. La réalisation à l'aide de notre boîte de connexions ne soulève aucune difficulté.

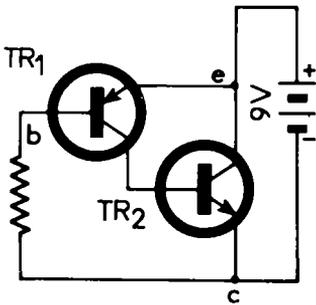


Fig. IV-59.

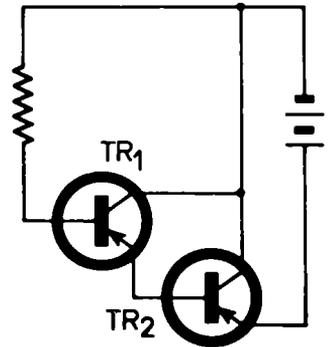


Fig. IV-60.

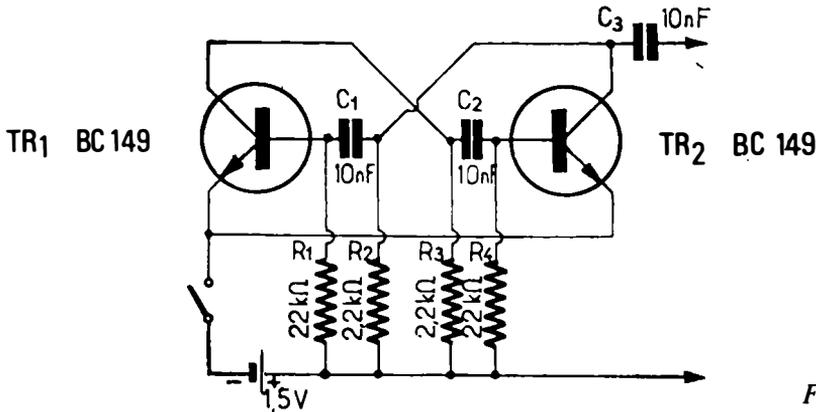


Fig. IV-61.

Une pince crocodile, reliée au moins de l'instrument constitue le fil commun de masse.

Le signal est prélevé à l'aide d'un condensateur de 10 000 pF et disponible sur une pointe de touche qui permet de l'appliquer en différents points d'un circuit.

### **Amplification basse fréquence**

On distingue deux grandes classes de fonctionnement en basse fréquence. Quel que soit le montage utilisé, les signaux appliqués agissent sur la conduction de la diode émetteur-base.

La classe A, qui est la seule employée dans les étages à un seul transistor, correspond à un point de fonctionnement dans lequel la diode émetteur-base reste conductrice pendant toute la durée du signal. Le signal de sortie est pratiquement de même forme que le signal d'entrée ; la distorsion est réduite, mais le rendement est faible. Les amplificateurs de la classe A sont recommandés pour les puissances réduites. La classe B correspond à un point de fonctionnement dans lequel la diode émetteur-base est bloquée pendant une demi-période. Pour cette raison, le signal de sortie ne comporte plus que des demi-ondes identiques aux demi-ondes correspondantes du signal d'entrée. Les amplificateurs classe B demandent à l'étage d'attaque, une certaine puissance basse fréquence. Ce montage donne une puissance élevée.

Le choix du mode de fonctionnement dépend évidemment de la puissance demandée.

On utilisera la classe A chaque fois que la puissance recherchée est moyenne et que l'on désire une faible distorsion. Par contre, on utilisera la classe B chaque fois que l'on recherche une puissance élevée, malgré la distorsion plus grande qui en résulte.

### **Amplificateur à deux étages Classe A**

Les premiers étages de tous les amplificateurs basse fréquence servent à fournir un signal suffisamment élevé aux étages suivants. En général, on utilise le circuit avec émetteur commun. Ce dernier, en effet, grâce à un coefficient d'amplification élevé, permet de réduire au maximum le nombre de transistors nécessaires.

On utilise habituellement, pour les étages basse fréquence, le couplage par résistance et capacité.

La figure IV-62 représente un simple amplificateur à deux étages couplés au moyen de résistance et capacité, la charge du dernier étage est constituée par l'impédance du haut-parleur.

Il s'agit naturellement d'un schéma extrêmement simple sur lequel ne figure aucun circuit de stabilisation du point de fonctionnement.

Par suite de la basse impédance d'entrée du transistor, les condensateurs de couplage devront être électrolytiques ; la valeur la plus courante est de l'ordre de 8 à 10  $\mu$ F.

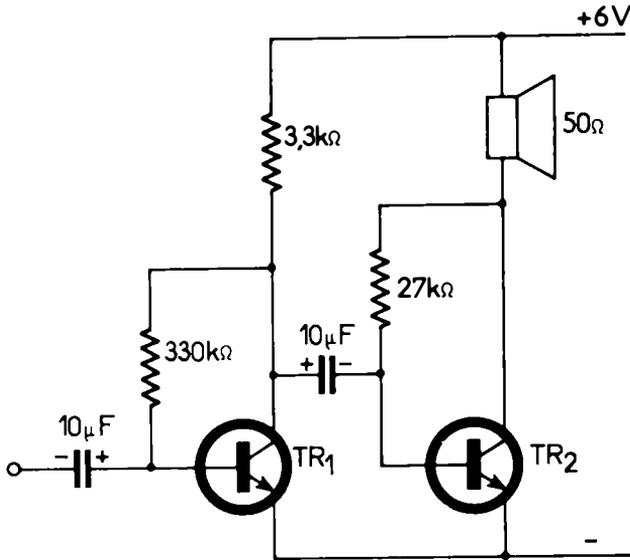


Fig. IV-62.

Un gain plus élevé peut être obtenu en couplant les étages au moyen de transformateurs. Mais ces derniers présentent des inconvénients soit d'ordre mécanique, soit d'ordre électrique. En dehors du poids et de l'encombrement excessif, du coût relativement élevé, le transformateur présente, en effet, l'inconvénient de ne pas offrir la même réponse à toutes les fréquences à amplifier. Pour cette raison, on préfère généralement le couplage à résistance et capacité.

Revenons au schéma de la figure IV-62. L'étage d'entrée est équipé du transistor TR<sub>1</sub>, type BC149. Le signal d'entrée est appliqué au condensateur électrochimique de 10 μF. La charge de collecteur est assurée par une résistance de 3,3 kΩ et la résistance de polarisation de base de 330 kΩ est branchée entre collecteur et base. Ainsi la base est portée à une tension positive par rapport au collecteur et à l'émetteur. Les tensions amplifiées apparaissent au collecteur de TR<sub>1</sub> et sont appliquées au deuxième transistor BC149, TR<sub>2</sub> par le condensateur électrochimique de 10 μF.

La charge de collecteur est assurée par le haut-parleur.

### *Expérience d'amplification double*

Dans cette expérience on compare deux amplifications d'un même signal délivré par le générateur décrit précédemment.

Appliquons la pince crocodile au moins et la pointe de touche du générateur au + du condensateur électrochimique du second étage.

Le haut-parleur donne un son faible. Le signal n'est amplifié que par un seul étage.

Portons maintenant la pointe de touche à l'entrée de l'amplificateur.

Le haut-parleur donne un son fort. Le signal est amplifié par les deux étages successifs.

Supposons que le gain  $\beta$  du premier étage soit égal à 50 et celui du second étage à 80, le gain total est de  $50 \times 80 = 4000$ .

Ces deux étages constituent le début d'une chaîne amplificatrice qui comprend des dispositifs amplificateurs successifs.

### Amplificateurs de puissance

L'étage final de puissance fonctionnant en classe B est équipé de deux transistors. Le haut-parleur est relié directement à l'étage de sortie.

Suivant le mode d'alimentation en courant continu des deux transistors de l'étage de sortie, on distingue les montages push-pull parallèle et série. Dans le montage push-pull parallèle, les deux transistors de l'étage de sortie sont en parallèle pour le courant continu et commandés en opposition de phase ; leur puissance de sortie est appliquée par l'intermédiaire d'un transformateur à une résistance de charge commune.

Dans le cas du montage push-pull série, les transistors sont montés en série pour le courant continu. L'une des bornes du haut-parleur est reliée au point milieu de la batterie ou encore par l'intermédiaire d'un condensateur, à l'un des pôles de la batterie, lorsque celle-ci ne présente pas de point milieu.

La combinaison de deux transistors PNP/NPN, appelés transistors complémentaires permet d'éviter le transformateur driver.

#### *Principe de fonctionnement d'un étage de sortie complémentaire*

Le fonctionnement d'un étage de sortie complémentaire s'explique facilement en se reportant au schéma de la figure IV-63.

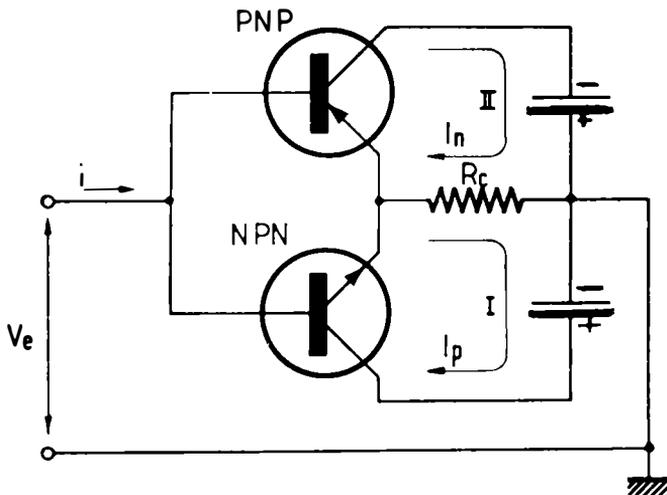


Fig. IV-63.

On y trouve un transistor PNP et un transistor NPN constituant l'étage de sortie de l'amplificateur. On n'a fait figurer que les éléments essentiels, en supprimant ceux intervenant dans le fonctionnement en régime continu.

Pendant l'alternance positive de la tension d'entrée  $V_e$  provenant de l'étage précédent, le transistor NPN est conducteur et l'autre PNP est bloqué. Il résulte un courant  $i_p$  qui traverse  $R_c$ , résistance de charge, montée entre les émetteurs et le point commun des deux batteries, ce courant circulant dans le sens indiqué par la flèche (I).

Pendant l'alternance négative de la tension d'entrée  $V_e$ , le transistor PNP est bloqué tandis que le transistor NPN est conducteur d'où le courant  $i_n$  circulant dans  $R_c$  en sens opposé, comme le montre la flèche (II). Les deux courants se « suivent » par conséquent dans la résistance de charge.

Le montage exige deux batteries montées selon le sens des polarités indiqué sur la figure.

En pratique on n'utilise qu'une seule batterie, comme nous allons le voir dans la réalisation pratique suivante.

### Réalisation d'un amplificateur complémentaire

Il s'agit là encore d'un montage d'études extrêmement simple qui peut être utilisé derrière une tête de pick-up de type piézoélectrique (fig. IV-64).

Dans ce cas, l'entrée s'effectue à travers un potentiomètre de  $2,5\text{ M}\Omega$  qui règle le niveau de la tension d'entrée suivant les indications de la figure IV-65.

Comme on peut le constater, le circuit ne comporte que deux transistors complémentaires au silicium, l'un de type NPN BC149, l'autre de type PNP, 2N2904.

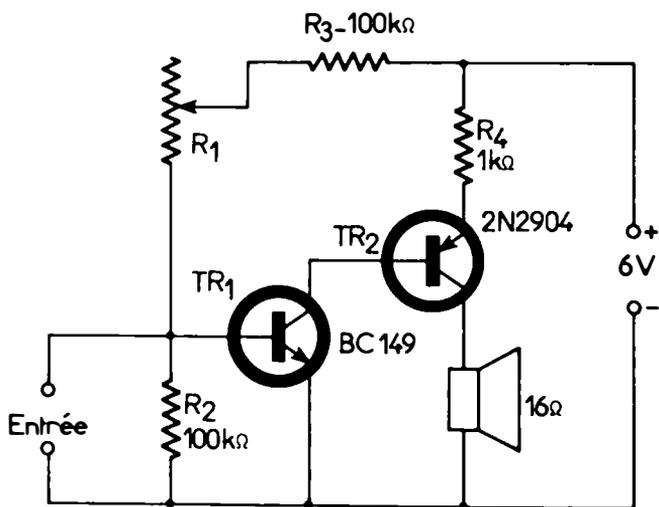


Fig. IV-64.

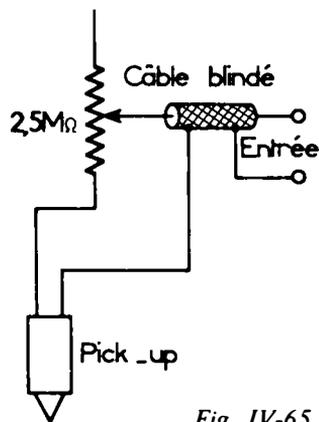


Fig. IV-65

La polarisation du circuit ou, autrement dit, la sensibilité est réglée au moyen du potentiomètre  $R_1$ .

La charge de collecteur est constituée par un petit haut-parleur d'impédance  $16\ \Omega$ , disposé directement dans le circuit collecteur de  $TR_2$ .

## Le transistor utilisé comme commutateur électronique

Le circuit représenté à la figure IV-66 est appelé multivibrateur comme nous avons déjà eu l'occasion de le voir (fig. IV-61).

Il se compose de deux transistors à jonction au silicium de type NPN, de deux condensateurs et de quatre résistances, deux de celles-ci étant représentées par les ampoules A1 et A2. Etudions le fonctionnement à un instant quelconque où le transistor TR<sub>1</sub> commence à conduire le courant ; on observe immédiatement que le potentiel de son collecteur devient plus négatif, et qu'ainsi aussi la base de TR<sub>2</sub>, reliée à l'armature négative de C<sub>1</sub> devient plus négative. Le collecteur de TR<sub>2</sub> devient ensuite plus positif et, à travers C<sub>2</sub>, fournit un plus fort courant à la base de TR<sub>1</sub>. Le phénomène régénératif conduit ainsi dans le temps de quelques microsecondes, les deux transistors aux deux conditions limites respectives : TR<sub>1</sub> entièrement conducteur et TR<sub>2</sub> entièrement bloqué. Il est évident que l'élévation de tension négative sur la base de TR<sub>2</sub> est égale à l'augmentation de tension négative sur le collecteur de TR<sub>1</sub>, c'est-à-dire pratiquement égale à la tension d'alimentation. Avec +6 V sur les collecteurs, la base de TR<sub>2</sub> est ainsi portée à -6 V.

Alors commence la décharge du condensateur C<sub>1</sub> chargé à 6 V avec polarité négative sur l'armature reliée à TR<sub>2</sub>, tendant à porter, comme condition finale, la charge du condensateur à la tension de 6 V, dans le sens opposé. A peu près à la moitié de la tension de décharge initiale commence la conduction de TR<sub>2</sub>. A ce moment, tout ce qui a été dit jusqu'alors se répète exactement en remplaçant TR<sub>1</sub> par TR<sub>2</sub> et C<sub>1</sub> par C<sub>2</sub>. Le phénomène se répète successivement et se traduit par l'éclairement intermittent des deux ampoules. Sur le schéma de la figure IV-66 les deux transistors sont des BC149 ou 2N1711 ou tout autre type équivalent. La fréquence des oscillations est déterminée par la constante de temps de C<sub>1</sub>-R<sub>1</sub> et R<sub>2</sub>-C<sub>2</sub>. Ces deux séries de composants ayant les mêmes valeurs, on obtient une cadence fixe et régulière de clignotement. Dans le cas où l'on désire établir des impulsions de rapport différent, il suffit de déséquilibrer les constantes de temps, donc de modifier les valeurs des résistances ou des capacités. Le remplacement dans l'une des branches du multivibrateur de la résistance fixe par une résistance variable de 10 k $\Omega$  permettra de modifier la cadence des clignotements.

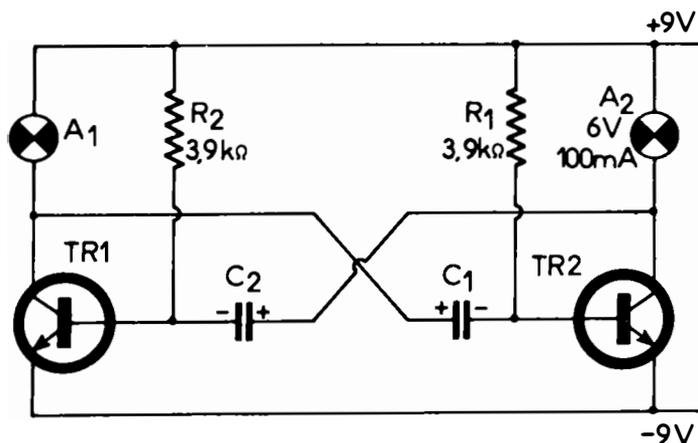


Fig. IV-66.

La valeur des éléments n'est nullement critique. Vous pouvez donc vous écarter des valeurs indiquées. Bien entendu le temps d'allumage et le temps d'extinction varieront en conséquence.

En observant les valeurs indiquées la lampe  $A_2$  s'allume environ une fois par seconde. La fréquence peut être modifiée en changeant les capacités. Si vous remplacez la lampe par un haut-parleur impédance 5 à 15 ohms, vous percevez les tops.

### Le multivibrateur bistable

Le schéma de base du multivibrateur bistable, connu sous le nom de multivibrateur Ecclès-Jordan (ou flip-flop) est celui de la figure IV-67. Celui-ci se présente pratiquement comme un amplificateur à deux étages, à couplage par résistances, dont la sortie est connectée à l'entrée. Les condensateurs C, qui peuvent être supprimés, ont seulement pour but d'augmenter la vitesse de commutation du circuit, parce qu'ils reportent rapidement sur les bases les tensions variables de collecteur. La valeur de C doit donc être faible pour que la constante RC soit peu élevée, afin de permettre ainsi des temps de charge et de décharge assez rapides entre les différentes opérations de commutation. Le multivibrateur bistable possède deux conditions de stabilité puisqu'à l'équilibre, un transistor reste indéfiniment conducteur tandis que l'autre est bloqué, jusqu'à ce qu'une impulsion de polarité convenable appliquée à la base, ou à l'émetteur, ou au collecteur, ne vienne inverser les états de fonctionnement. Cette nouvelle condition persiste encore indéfiniment jusqu'à ce qu'une autre impulsion n'inverse à nouveau les conditions de fonctionnement, et ainsi de suite.

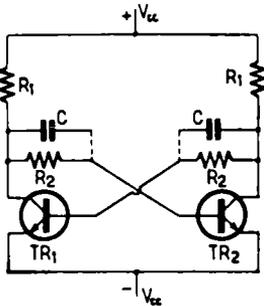


Fig. IV-67.

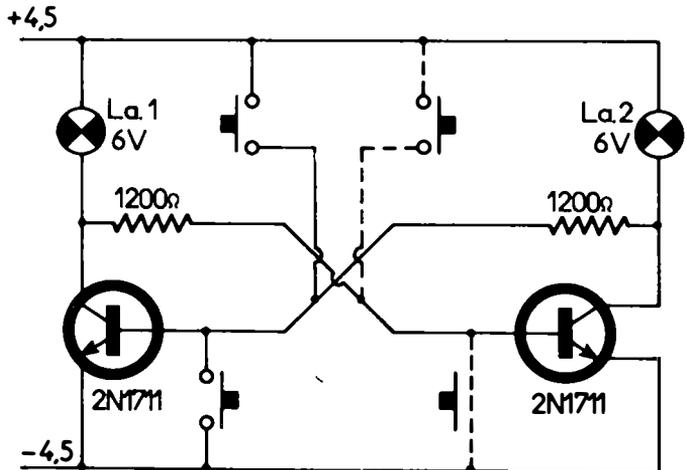


Fig. IV-68.

Considérons le circuit et supposons qu'au début  $TR_1$  soit conducteur et  $TR_2$  bloqué. Le potentiel légèrement positif sur le collecteur de  $TR_1$  est trop faible pour porter  $TR_2$  à saturation qui reste ainsi bloqué. Cet état se maintient jusqu'à ce qu'une impulsion négative soit appliquée sur la base de  $TR_1$ , ou une impulsion positive sur la base de  $TR_2$ . Voyons ce qui se produit si on applique une impulsion négative sur la base de  $TR_1$ ; celui-ci est bloqué parce que polarisé en sens

inverse, son potentiel de collecteur augmente et à travers  $R_2$ , il est alors capable de porter  $TR_2$  à l'état de saturation.

La même chose se produirait si on appliquait une impulsion positive sur la base de  $TR_2$ , puisque ce transistor serait entré en saturation et le potentiel de son collecteur aurait porté  $TR_1$  à l'interdiction.

### Manipulations

La boîte de connexions est montée suivant le croquis de la figure IV-68.

1<sup>er</sup> cas : La lampe  $La_1$  est allumée.

Pour éteindre, il suffit d'appliquer une impulsion positive sur la base de  $TR_2$ , ou une impulsion négative sur la base de  $TR_1$ , à l'aide du bouton poussoir approprié.

$La_2$  s'allume.

2<sup>e</sup> cas : La lampe  $La_2$  est allumée.

Pour l'éteindre, il suffit d'appliquer une impulsion négative sur la base de  $TR_2$ , ou une impulsion positive sur la base de  $TR_1$ .

Précisons que ce montage de base est sensible aux agents extérieurs, les circuits d'application étant plus compliqués. Il présente l'avantage de la simplicité et permet de vérifier la présence des deux états et le passage d'un état à l'autre.

### Le trigger de Schmitt

Le trigger de Schmitt constitue l'un des circuits que l'on rencontre fréquemment dans les différentes applications de l'électronique. Sa fonction consiste à discriminer en amplitude un signal appliqué à l'entrée, c'est-à-dire de distinguer si un signal est supérieur ou inférieur à un niveau de tension préfixé.

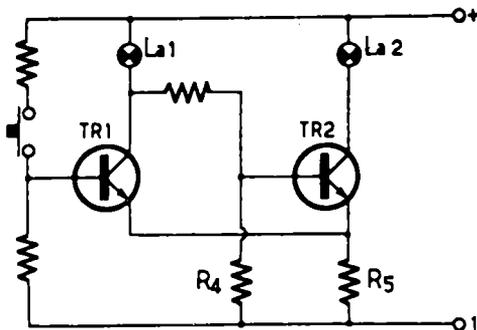


Fig. IV-69.

Analysons le fonctionnement d'un circuit typique à transistor NPN dans lequel toutes les tensions sont positives par rapport à la masse (fig. IV-69). Si l'entrée est inférieure à un niveau préfixé, que nous appellerons « niveau de seuil inférieur », l'étage d'entrée, c'est-à-dire le premier étage, sera bloqué et le second sera conducteur. Suivant la technologie adoptée en technique binaire, nous dirons que le trigger se trouve à l'état 0. Quand la tension d'entrée dépasse ce niveau

en courant continu, plus une certaine zone d'écart critique (comme nous l'expliquerons plus loin), l'étage d'entrée sera en conduction et le second étage se trouvera bloqué : le circuit passe à l'état 1.

Le point où l'on considère que le second état stable est atteint s'appelle « niveau de seuil supérieur ».

Le circuit trigger de Schmitt fourni donc à la sortie deux niveaux seulement : le niveau 0 et le niveau 1, en rapport étroit avec ce qui se produit dans les circuits de type logique (AND, OR, NAND, NOR, etc.).

Les niveaux 0 et 1 représentent évidemment seulement des indications symboliques, étant donné que les valeurs effectives de tension peuvent assumer des valeurs différentes ; par exemple, le 0 peut être représenté par la tension de 1 V, tandis que le 1 peut être représenté par une tension de 10 V.

La sortie du dispositif se porte brusquement de 0 à 1 dès que le signal d'entrée dépasse une certaine valeur de seuil ; le dépassement de cette valeur peut être de quelques millivolts seulement.

A la différence de ce qui arrive dans les circuits de comparaison, la sortie ne passe pas graduellement de 0 à 1, mais le passage se traduit par un « saut » qui caractérise précisément ce type de circuit. Le diagramme de la figure IV-70 interprète le fonctionnement du trigger de Schmitt. Tant que la valeur de la tension d'entrée reste au-dessous de la valeur de seuil, indépendamment du signal même, la tension de sortie reste bloquée à la valeur 0, tandis que lorsqu'on dépasse la valeur de seuil, le trigger entre brusquement en action en élevant à 1 la valeur de la tension de sortie.

### Niveau de seuil inférieur et niveau de seuil supérieur

Sur le diagramme de la figure IV-70, nous n'avons considéré qu'un seul niveau de seuil. Mais ceci, comme nous l'avons laissé entrevoir précédemment, ne correspond pas à la réalité. En effet, la valeur de seuil inférieur (c'est-à-dire du passage de 0 à 1) et la valeur de seuil supérieur (c'est-à-dire du passage de 1 à 0) ne coïncident jamais parfaitement, mais diffèrent entre elles d'une valeur généralement assez faible. Il y a, entre les deux, un phénomène d'hystérésis dû aux paramètres du circuit qui sont différents dans les deux conditions. Le diagramme de la figure IV-71, permet de mieux comprendre ce phénomène. Celui-ci représente l'allure de la tension de sortie  $V_s$ , en fonction de celle d'entrée  $V_e$ .

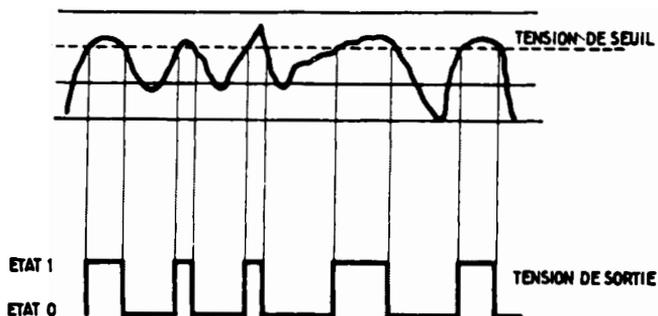


Fig. IV-70.

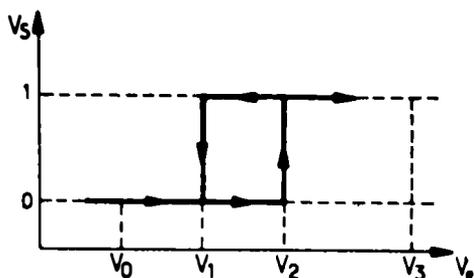


Fig. IV-71.

On peut noter qu'en appliquant un signal d'entrée de tension  $V_0$  très basse, la valeur de la tension de sortie correspondante est 0. En augmentant progressivement la valeur de la tension d'entrée, on atteindra une valeur de tension de seuil  $V_2$  qui marque le passage de la sortie 1 à l'état 1. En continuant à augmenter la tension d'entrée, en l'élevant par exemple à  $V_3$ , on ne constatera aucun changement à la sortie.

Si alors on ramène le signal d'entrée de  $V_3$  à  $V_2$  on constate que lorsque cette valeur est atteinte, la tension de sortie ne retourne pas à 0, mais reste à 1 jusqu'à ce qu'en diminuant encore le signal, on atteint une nouvelle tension de seuil  $V_1$ , qui détermine le retour de la tension de sortie à 0.

### Fonctionnement du circuit

Le circuit de trigger de Schmitt le plus classique est constitué de deux transistors couplés en courant continu, c'est-à-dire sans l'introduction de condensateurs entre étages. Dans ce type de circuit quand un transistor se trouve bloqué, c'est-à-dire qu'il ne conduit pas, l'autre est en saturation ou autrement dit, en état de forte conduction.

Sur le circuit trigger de la figure IV-69, on a inséré deux lampes  $La_1$ ,  $La_2$  pour contrôler visuellement les conditions de fonctionnement.

Lorsque le bouton-poussoir est relâché, c'est-à-dire quand la tension d'entrée est nulle,  $TR_1$  se trouve bloqué tandis que  $TR_2$  est saturé. En effet, la base de  $TR_1$  est au potentiel de masse à travers  $R_2$ . On ne constate aucun passage de courant collecteur, et la lampe  $La_1$  reste éteinte.

Par contre, à travers le diviseur constitué de  $R_3$ - $R_4$ , la base de  $TR_2$  est polarisée en sens direct. Ce transistor est donc conducteur, ce qui se traduit par l'allumage de la lampe  $La_2$ .

Si l'on appuie sur le poussoir, la situation s'inverse. La base de  $TR_1$  est correctement polarisée ; le transistor devient donc conducteur, et il s'établit un courant collecteur qui permet à la lampe  $La_1$  de s'allumer.

Comme la valeur de la résistance  $R_5$  est calculée de manière que, par effet du diviseur  $R_3$ - $R_4$ , la base de  $TR_2$  se trouve alors polarisée négativement par rapport à l'émetteur, ce transistor se trouve bloqué et la lampe  $La_2$  s'éteint.

Nous venons de voir les raisons pour lesquelles, dans un trigger de Schmitt, quand un transistor conduit, l'autre est bloqué.

Il nous reste à expliquer et à vérifier la caractéristique la plus importante, c'est-à-dire celle du bond quand la tension dépasse une certaine valeur de seuil.

Le circuit qui va nous permettre de vérifier pratiquement cette caractéristique est représenté à la figure IV-72.

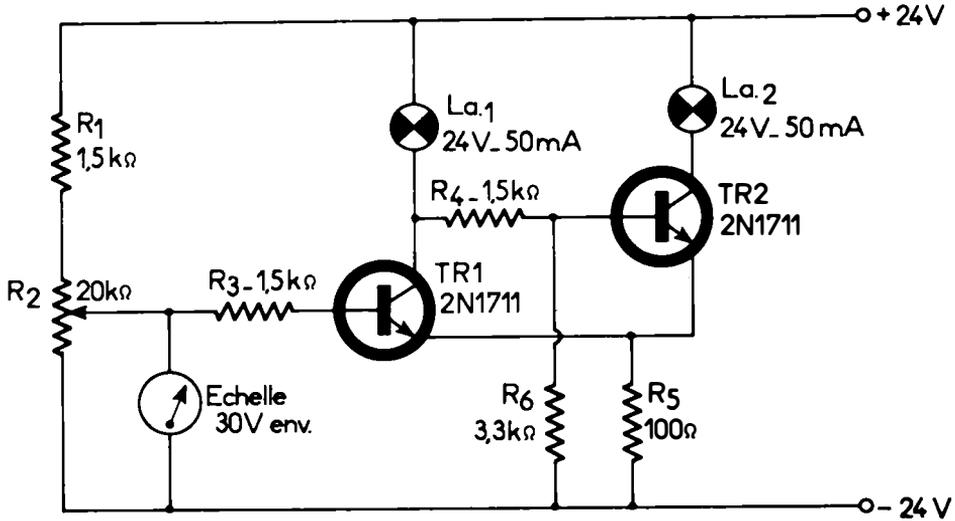


Fig. IV-72.

Celui-ci est exactement identique au précédent, à la seule différence près que la polarisation de TR<sub>1</sub> s'obtient à l'aide du potentiomètre R<sub>2</sub>, ce qui permet d'établir progressivement la conduction électrique de ce transistor.

Les résistances R<sub>1</sub>-R<sub>3</sub> servent à limiter le maximum de courant à travers TR<sub>1</sub>, tandis que R<sub>2</sub> permet de régler la sensibilité du trigger.

### Déclenchement du bond

Supposons que l'on fasse varier R<sub>2</sub>, en partant de la masse. La tension d'émetteur est alors de 5 V et le transistor TR<sub>1</sub> est bloqué. Quand la tension de base de ce transistor dépasse de 0,6 V la tension d'émetteur, celui-ci commence à devenir conducteur, tandis que la tension de collecteur de TR<sub>1</sub> diminue. En conséquence, on constate une diminution du courant de base de TR<sub>2</sub>, et une conduction plus basse qui se traduit par un abaissement de la tension aux bornes de R<sub>5</sub>.

Cette dernière condition électrique provoque une élévation de la tension de base de TR<sub>1</sub> et par suite, une augmentation de la conduction de TR<sub>1</sub> qui conduit à un cycle de réaction analogue à celui que nous avons évoqué.

Dès que TR<sub>1</sub> devient conducteur, se déclenche un mécanisme de réaction qui, rapidement, dans le temps de quelques millièmes de seconde, oblige le transistor TR<sub>1</sub> à la conduction totale, tandis que TR<sub>2</sub> se trouve bloqué, sans qu'il soit nécessaire d'augmenter ensuite la tension d'entrée.

Un phénomène analogue se produit au cours de la commutation inverse ; ainsi, également dans ce cas, dès qu'on tombe au-dessous de la valeur de seuil, on obtient une action d'inversion de la sortie.

En se servant d'un voltmètre, on pourra mesurer les deux valeurs de seuil, et au moyen d'essais successifs, déterminer la valeur de  $R_3$  la plus appropriée.

L'alimentation est obtenue au moyen de piles 4,5 V disposées en série, jusqu'à l'obtention d'une tension de 24-26 V environ.

Parmi les nombreuses applications du trigger de Schmitt, signalons le cas très intéressant d'un signal théoriquement rectangulaire, mais en réalité altéré par le passage dans des circuits capacitifs qui modifient la pente de fronts verticaux, qui est rétabli en signaux parfaitement carrés, complètement débarrassés de parasites.

### Oscillateurs sinusoïdaux

Les oscillateurs sinusoïdaux peuvent être considérés comme les circuits les plus importants de toute l'électronique parce que leur champ d'utilisation est si vaste qu'il intéresse pratiquement tous les secteurs électriques.

En radiotechnique par exemple, les circuits sinusoïdaux sont à la base des appareils récepteurs et émetteur. Ils sont indispensables dans les circuits à changement de fréquence.

En basse fréquence, les oscillateurs basse fréquence sont utilisés pour le contrôle des amplificateurs et des oscillateurs à fréquence ultra-sonique.

Les oscillateurs sinusoïdaux servent encore pour l'effacement des rubans magnétiques, et trouvent leur place dans les instruments de mesure de basse et haute fréquence.

### Oscillateur LC

Le plus élémentaire circuit oscillant couramment employé est simplement constitué par un condensateur C et par une bobine L disposés en parallèle. Ce circuit s'appelle aussi circuit LC ou antirésonnant (fig. IV-73).

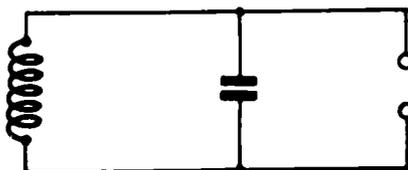


Fig. IV-73.

Si par un procédé quelconque, on applique un « choc » électrique au circuit LC, il se met à osciller électriquement avec sa fréquence et son amortissement propre, tout comme un pendule qui, écarté de sa position de repos, se met à osciller avec une fréquence qui dépend de sa longueur pour revenir au repos à cause de l'amortissement dû au frottement, à la résistance de l'air, etc.

En fait, il se produit un échange d'énergie entre condensateur et bobine, et inversement, sous forme de courant sinusoïdal.

Pour remédier à l'amortissement, il est donc nécessaire de redonner à chaque cycle, dans le circuit, une certaine quantité d'énergie. En pratique, une telle condition se vérifie automatiquement avec l'aide de composants actifs tels que le transistor.

L'introduction de composants actifs dans les circuits LC permet d'obtenir des circuits oscillants tels que le Colpitt, le Clapp, le Hartley, pour ne citer que les plus connus.

Les circuits oscillants de type inductif-capacitif trouvent leurs principales applications dans le secteur de la haute fréquence.

En effet, puisque la fréquence délivrée par le circuit est inversement proportionnelle aux valeurs de self et de capacité, pour obtenir des fréquences basses, il serait nécessaire de disposer de bobines trop encombrantes.

De plus, s'il est possible de faire varier la fréquence en haute fréquence par l'adoption de condensateurs variables de dimensions réduites, en basse fréquence il serait indispensable d'employer des condensateurs de grande capacité, donc lourds et encombrants.

Dans certains cas, quand l'utilisation des circuits LC est indispensable, on fait varier la fréquence du circuit en utilisant des bobinages à noyau réglable.

### Circuit RC

Les circuits à résistance-capacité sont plus souvent utilisés (fig. IV-74). Puisque le réglage des résistances est simplifié par l'usage des potentiomètres, il est facile de comprendre que l'emploi de ces composants permet une facile variation de la fréquence délivrée, tout en ramenant le circuit à des dimensions raisonnables. Le principe de base de ce type d'oscillateur est différent du précédent.

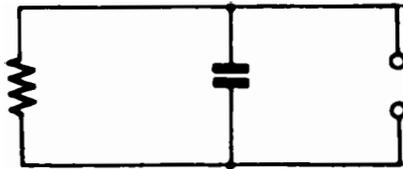


Fig. IV-74.

Dans les circuits self-capacité, le problème consiste à renforcer les oscillations spontanées créées par l'échange continu d'énergie entre le condensateur et l'inductance.

Dans les circuits à résistance-capacité, au contraire, il est nécessaire d'obtenir un amplificateur dans lequel la réaction devient positive à une certaine fréquence, de manière que le circuit se mette à osciller.

### Circuit d'expérimentation

Pour vérifier les notions précédentes, nous allons réaliser le circuit LC capable d'osciller dans la gamme des fréquences basses.

Pour vérifier le fonctionnement, il suffira d'écouter directement dans le casque, la note basse fréquence générée par le circuit.

Le schéma théorique est représenté à la figure IV-75. On peut immédiatement constater l'absence de bobinage. Cependant celui-ci existe. Il est constitué par les enroulements du casque qui devra obligatoirement être de type magnétique (impédance  $2\,000\ \Omega$ ).

L'inductance du casque donc, et la capacité résultant du branchement en série de  $C_1$  ( $10\,000\ \text{pF}$ ) et  $C_2$  ( $0,25\ \mu\text{F}$ ) constituent le circuit oscillant.

Comme nous l'avons déjà vu précédemment, la fréquence de résonance est  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

d'où l'on tire  $L = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 C}$

et  $C = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 L}$

Le transistor est de type NPN (BC109) et R a une valeur de  $4,7\ \text{k}\Omega$ .

Des formules précédentes, on voit qu'il est par exemple possible de calculer la valeur de l'inductance d'un circuit oscillant quand on connaît la valeur de la capacité C et celle de la fréquence délivrée que l'on peut mesurer avec un fréquencemètre par exemple.

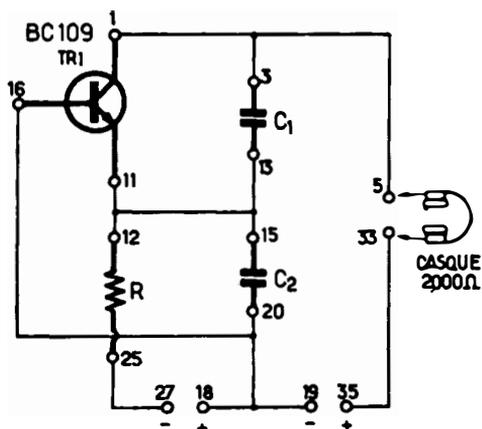


Fig. IV-75.

Le circuit représenté à la figure IV-75 constitue un oscillateur classique de type Colpitt. Son fonctionnement est basé sur le couplage direct entre collecteur et émetteur du transistor, à travers le condensateur  $C_1$ .

Quand une oscillation apparaît sur le collecteur de  $TR_1$ , celle-ci est reportée, avec la même phase sur l'émetteur, à travers le condensateur  $C_1$ . En raison de la propriété amplificatrice du transistor, l'oscillation revient au collecteur, en concordance de phase, mais avec plus d'amplitude. De cette façon, le circuit oscillant reçoit l'énergie nécessaire pour maintenir les oscillations.

### Le transistor à effet de champ FET

Depuis quelques années, un nouveau dispositif semi-conducteur a fait son apparition : le transistor à effet de champ pouvant fonctionner correctement

jusqu'à 500 MHz, désigné sous le sigle général F.E.T. dérivé de l'expression anglaise Field Effect Transistor.

Alors que dans le transistor à injection, les deux types de porteurs, à savoir des électrons (négatifs) ou des trous (positifs), participent au passage du courant, cette fonction n'est assurée dans le transistor à effet de champ que par un type de porteurs, c'est-à-dire des électrons ou des trous, selon que les uns et les autres sont majoritaires par suite du dopage choisi. C'est pourquoi les transistors à injection sont appelés bipolaires et les transistors à effet de champ, transistors unipolaires.

De même que le mot « injection », le terme « effet de champ » désigne le phénomène déterminant le fonctionnement du transistor considéré. Dans le transistor à effet de champ, un champ électrique commande le nombre de porteurs majoritaires disponibles dans une région semi-conductrice, et par suite, la résistance de cette région. Le champ est produit par une tension appliquée à une électrode de commande.

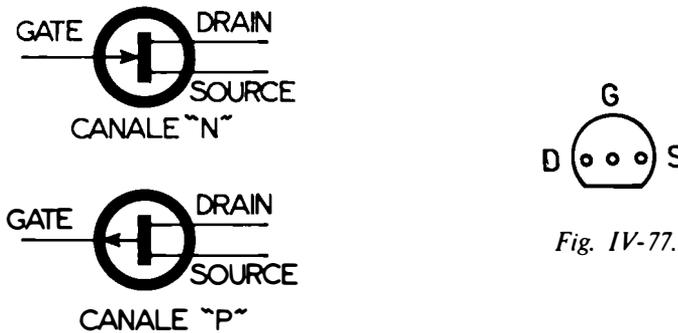


Fig. IV-76.

Fig. IV-77.

Il existe deux types de transistor à effet de champ, ceux à canal N et ceux à canal P. Les symboles de représentation sont indiqués à la figure IV-76 et la disposition des électrodes à la figure IV-77.

Les premiers, comme les transistors NPN sont généralement utilisés dans des circuits avec négatif à la masse, c'est-à-dire dans des circuits où le drain est alimenté avec une tension positive par rapport à la masse.

Les seconds, comme les transistors PNP, sont utilisés dans des circuits avec positif à la masse. Dans les FET à canal P, le drain doit donc être toujours négatif par rapport à la masse.

### Constitution d'un transistor à effet de champ

Le transistor à effet de champ le plus simple est constitué d'un petit barreau (ou canal) de matériau semi-conducteur du type N ou P au centre duquel un anneau semi-conducteur, de polarité opposée à celle du barreau, forme un étranglement de celui-ci. L'anneau et le barreau constituent une jonction PN qui sera polarisée en sens inverse. Le premier constitue l'électrode appelée gate ou porte. A une extrémité du barreau se trouve une borne ou élément terminal appelé

source, reliée au pôle négatif de la batterie d'alimentation, et qui constitue ainsi la source de courant.

A l'autre extrémité du barreau se trouve une autre borne appelée drain, reliée au pôle positif de la batterie, et forme ainsi la sortie de courant.

Le barreau peut être de type N ou P, mais c'est avec un barreau N que l'analogie avec le tube est la plus parfaite. Notre étude se rapportera donc à un transistor FET type N ; comme pour les transistors NPN et PNP, le fonctionnement d'un FET type P sera identique, à la condition d'inverser les polarités.

La tension appliquée à l'électrode de commande porte ou gate, dans le sens inverse par rapport aux deux jonctions PN, permet de faire varier l'épaisseur, c'est-à-dire module la section conductrice de ce canal, et par suite, sa résistance électrique, en créant une zone isolante plus ou moins étroite.

Cette situation est clairement illustrée par la figure IV-78 sur laquelle ont été représentées les modifications de la section conductrice pour une tension gate de 0 à -6 V. Les variations de tension du courant de gate vont entraîner des variations du courant circulant dans le canal.

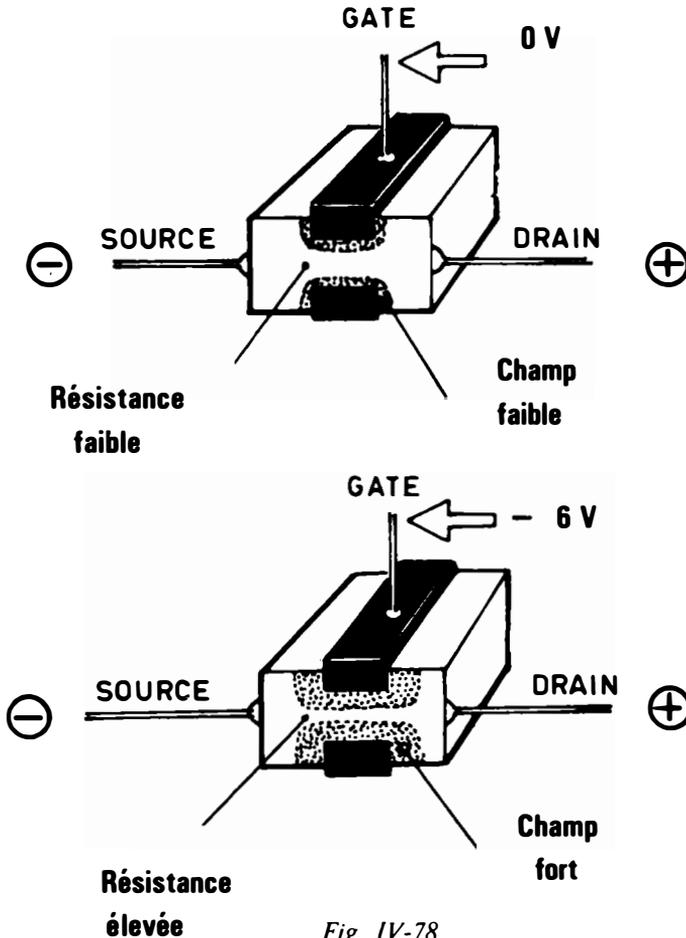


Fig. IV-78.

Précisons que l'alimentation se fait comme pour les transistors NPN ou PNP : le drain est toujours positif par rapport à la source S dans les FET à canal N, et par contre, dans les FET à canal P, le drain est toujours négatif par rapport à la source.

Les courants de drain et de source dépendent de la polarisation de porte. En règle générale :

- les courants de drain et de source augmentent si la tension de la gate se rapproche de celle du drain ;
- les courants de drain et de source diminuent si la tension de gate s'éloigne de celle du drain.

### **Principaux paramètres des FET**

Les principales grandeurs qui nous intéressent pour analyser le fonctionnement des FET sont les suivantes :

- $V_{gs}$  = tension entre gate et source
- $V_{ds}$  = tension entre drain et source
- $I_d$  = valeur du courant qui circule dans le drain.

Dans les conditions normales d'utilisation du FET, la valeur de ce courant est égale à celle du courant qui circule dans la source.

–  $I_{dss}$  = courant de drain obtenu avec les électrodes gate et source réunies entre elles, c'est-à-dire  $V_{gs} = 0$

–  $V_p$  = tension de Pinch-off. Cette tension n'est autre qu'une valeur particulière de  $V_{gs}$  pour laquelle on obtient le blocage complet du FET. En appliquant une telle tension entre gate et source, on n'observe aucun flux de courant à travers le drain, quelle que soit la valeur de la tension  $V_{ds}$  qui lui est appliquée, évidemment en se maintenant à l'intérieur des limites caractéristiques du composant.

–  $g_m$  = transconductance ou conductance mutuelle. Cette grandeur constitue l'un des paramètres les plus intéressants, comparable au facteur d'amplification du transistor. Lorsqu'il est connu, ce paramètre permet de calculer très simplement la valeur de l'amplification d'un étage conventionnel à FET, en multipliant  $g_m$  par la résistance connectée au drain du transistor à effet de champ.

–  $g_{m0}$  = valeur de la transconductance mesurée pour  $V_{gs} = 0$ . C'est cette valeur qui est mesurée, à cause des variations du point de travail du FET. La valeur de  $g_m$  n'est pas constante et sa connaissance n'apporterait qu'un faible intérêt si les conditions de la mesure n'étaient pas spécifiées.

Il existe différentes autres grandeurs caractéristiques telles que les courants de perte, les capacités entre les électrodes des composants et les résistances internes, mais ces paramètres sortent du cadre de notre étude.

### *Manipulations*

#### *1° Contrôle à l'ohmmètre*

Chaque FET est caractérisé par une unique jonction et le contrôle s'effectue comme pour une diode. Avant de vérifier l'efficacité de la jonction, il convient

de contrôler le fonctionnement correct du canal. Pour cela, il suffit de mesurer à l'ohmmètre la résistance entre drain et source, en court-circuitant entre elles les électrodes de gate et source (fig. IV-79). La mesure de la résistance doit être effectuée dans les deux sens, en intervertissant les pointes de l'ohmmètre ; la valeur de la résistance mesurée dans ces conditions varie suivant le type de FET ; dans tous les cas, celle-ci ne devra jamais être inférieure à quelques dizaines d'ohms ou supérieure à quelques milliers d'ohms. Avec un 2N3819, nous avons trouvé  $300 \Omega$ .

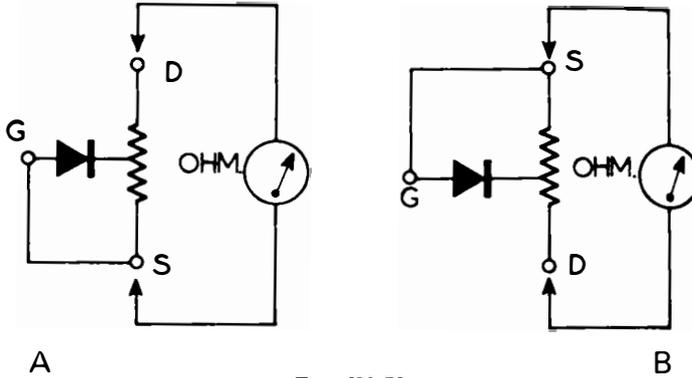


Fig. IV-79.

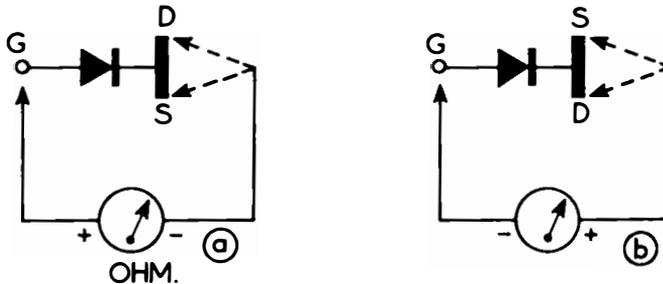


Fig. IV-80.

Ensuite on passe au contrôle de la jonction qui, comme l'indique la figure IV-80 pour un transistor FET à canal N sera effectué en mesurant la résistance entre gate et drain et entre gate et source. Cette mesure sera ensuite répétée en inversant les polarités de l'instrument. Si le FET est en bon état, on devra mesurer une faible résistance ( $400 \Omega$  sur notre échantillon), tandis qu'en inversant les pointes de l'instrument, la résistance devra être infinie.

## 2° Mesure du courant $I_{dss}$

Nous avons déjà dit que le sigle  $I_{dss}$  sert à indiquer le courant de drain obtenu avec les électrodes gate et source réunies entre elles, c'est-à-dire avec  $V_{gs} = 0$ . Le circuit résultant de cette définition est illustré à la figure IV-81. Le contrôleur est en fonction sur la gamme des mA. Le courant s'élève à quelques mA.

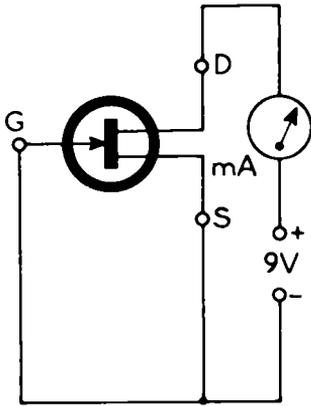


Fig. IV-81.

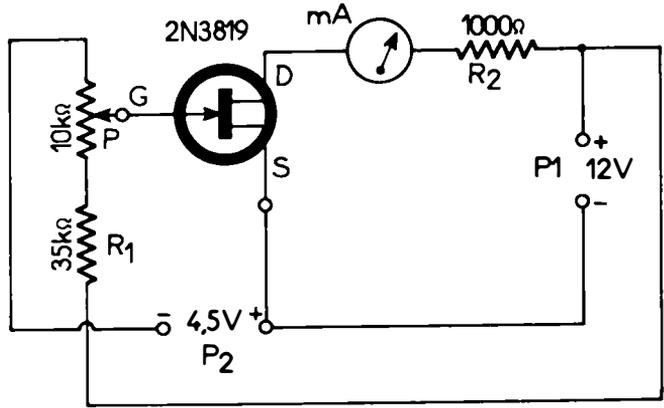


Fig. IV-82.

## 2<sup>e</sup> Série de mesures

Le schéma de principe avec lequel on peut effectuer cette nouvelle série de mesures est indiqué à la figure IV-82. Celui-ci est valable pour le contrôle d'un FET à canal N. La tension de gate dans ce cas doit être négative par rapport à la source, sinon le FET pourrait être irrémédiablement endommagé. Comme on le voit, la source S est reliée directement à la borne négative de l'alimentation. Le drain D est relié à la borne positive à travers le milliampèremètre et la résistance  $R_2$  qui limite le courant de drain.

La polarisation de gate est assurée par une batterie de 4,5 V dont la borne positive est reliée à la borne négative de la batterie d'alimentation de 12 V. La tension de polarisation peut varier à l'aide d'un potentiomètre dont le curseur est relié à la gate. La résistance  $R_1$  empêche que le curseur atteigne la ligne de tension négative d'alimentation, c'est-à-dire la masse, pour interdire toute augmentation importante du courant de drain.

Il est évident que si l'on tourne le bouton de P, le curseur permettra de polariser la tension de gate entre deux valeurs extrêmes qui, mesurées au voltmètre, dans notre cas, avec la valeur indiquée des composants, s'étendent entre + 0,8 V correspondant à la position inférieure du curseur et - 4,5 V pour la position supérieure.

La tension totale aux extrémités de l'ensemble série  $P_1$ - $R_1$  est de  $12 + 4,5 = 16,5$  V.

On procède aux mesures suivantes :

### a) Mesure de $I_d$

$I_d$  est le courant de drain qui circule à travers  $R_2$ . L'appareil de mesure est en fonction pour la mesure des intensités, sur la gamme 10 mA et placé en série dans le circuit de drain.

Portons le curseur en haut, donc à - 4,5 V par rapport à la ligne 0 V, le milliampèremètre ne bouge pas.

Le courant de drain, vérifié sur la gamme des  $\mu$ A commence à se manifester

pour une tension  $V_{gs}$  de  $-1,4$  V. Cette valeur correspond à la tension de pinch-off  $V_p$ .

Tournons le curseur vers le bas : le courant augmente progressivement pour atteindre, en fin de course, une valeur d'environ 8 mA.

Ces valeurs peuvent varier d'un échantillon à l'autre.

*b) Mesure de la tension de drain en fonction de la tension de gate*

Mesurons  $V_g$  (tension de gate) entre gate et ligne 0 V et notons le courant  $I_d$  correspondant, pour différentes positions du curseur P.

Notons ces valeurs sous forme de tableau.

(1)  $I_d = 8$  mA avec  $V_g = + 0,8$  V

(2)  $I_d = 5$  mA avec  $V_g = + 0,5$  V

(3)  $I_d = 3$  mA avec  $V_g = - 0,8$  V

(4)  $I_d = 1$  mA avec  $V_g = - 1,2$  V

On sait que  $R_2 = 1\ 000\ \Omega$ , la résistance de l'appareil de mesure étant négligeable.

$$\begin{aligned} \text{Nous pouvons écrire } V_d &= 16,5\ \text{V} - I_d R \\ &= 16,5\ \text{V} - (1000 \cdot 0,008) = 8,5\ \text{V} \\ &= 16,5\ \text{V} - (1000 \cdot 0,005) = 11,5\ \text{V} \\ &= 16,5\ \text{V} - (1000 \cdot 0,003) = 13,5\ \text{V} \\ &= 16,5\ \text{V} - (1000 \cdot 0,001) = 15,5\ \text{V} \end{aligned}$$

*c) Calcul du gain*

Au cours de la manipulation précédente, nous avons vu que  $V_d$  varie en fonction de  $V_g$ .

Si la variation de  $V_d$  est plus importante que celle de  $V_g$ , on peut en conclure qu'il y a gain.

Ce gain se désigne par  $G_v$ .

En faisant varier  $V_d$  de  $+0,8$  V à  $-1,2$  V, soit 2 V, la variation de  $V_g$  est  $8,5$  V  $- 15,5$  V = 7 V. En faisant abstraction du signe, on en déduit que le gain de tension  $G_v = 7 : 2 = 3,5$  environ.

Des valeurs plus élevées peuvent être obtenues avec des valeurs de  $R_2$  plus fortes.

### Applications du transistor FET

Le transistor à effet de champ possède surtout en haute fréquence, des qualités exceptionnelles parce qu'il est doté d'une résistance d'entrée élevée qui permet de réaliser des circuits très sélectifs et stables dans les récepteurs, sans avoir à recourir à la délicate prise intermédiaire sur les bobines pour réaliser l'adaptation d'impédance.

Il ne délivre en outre qu'un bruit interne insignifiant permettant d'améliorer considérablement le rapport signal/bruit des appareils dans lesquels il est utilisé comme préamplificateur, tant dans les appareils de réception que dans les installations basse fréquence à haute fidélité.

## Les photorésistances

Les photorésistances sont des composants qui présentent la propriété de modifier leur propre résistance électrique en fonction des variations de la lumière ambiante.

Comme tous les composants électroniques, les photorésistances sont représentées sur les schémas au moyen de symboles dont la figure IV-83 montre celui qui est le plus couramment utilisé. Les petites flèches rappellent les rayons de lumière qui viennent frapper la surface sensible.

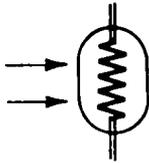


Fig. IV-83.



Fig. IV-84.

Ce composant peut se présenter sous différentes formes ; l'une des plus répandues est indiquée à la figure IV-84. Le boîtier dans lequel est inséré le composant doit évidemment être transparent pour laisser passer les rayons lumineux.

Les dimensions des photorésistances dépendent du type d'utilisation auquel elles sont destinées en fonction de la puissance maximale exigée.

Nos manipulations porteront sur un modèle à faible dissipation.

### Structure des photorésistances

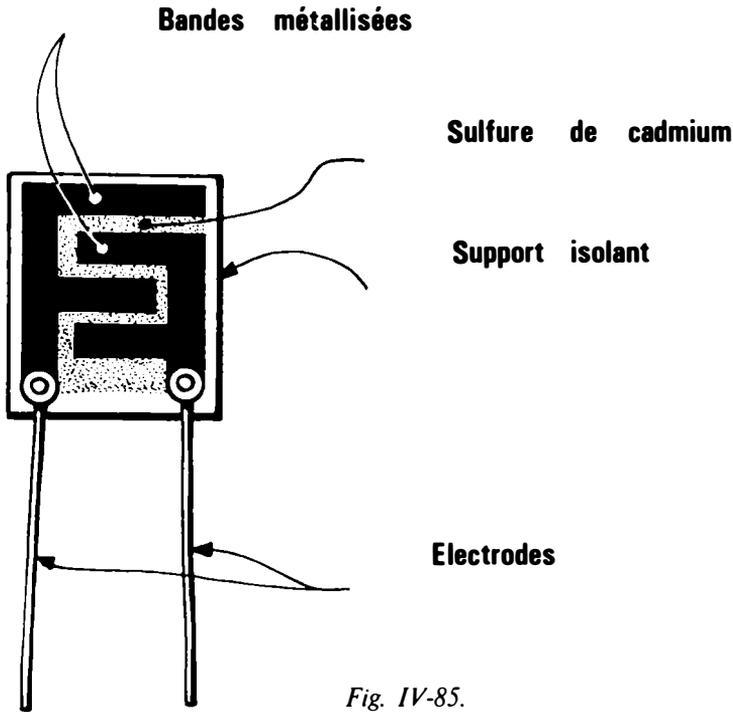
La constitution physique de ce composant est représentée à la figure IV-85. Sur un support isolant de céramique, mica, etc., est tout d'abord déposée une mince couche de sulfure de cadmium qui constitue l'élément sensible à la lumière. Sous l'action de cette dernière, il libère des électrons, ce qui modifie sa conduction électrique et par conséquent, sa résistance.

La couche de sulfure de cadmium est ensuite recouverte, d'une autre couche d'un matériau très conducteur (argent ou or) disposée sous la forme d'un double peigne. On réalise ainsi, entre les deux bandes conductrices qui constituent les électrodes de la photorésistance, une sorte de serpent de matériau photosensible qui, même sous des dimensions réduites, permet d'atteindre une grande sensibilité.

La photorésistance n'est pas un élément polarisé, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'ordre de branchement des électrodes.

### Caractéristiques électriques

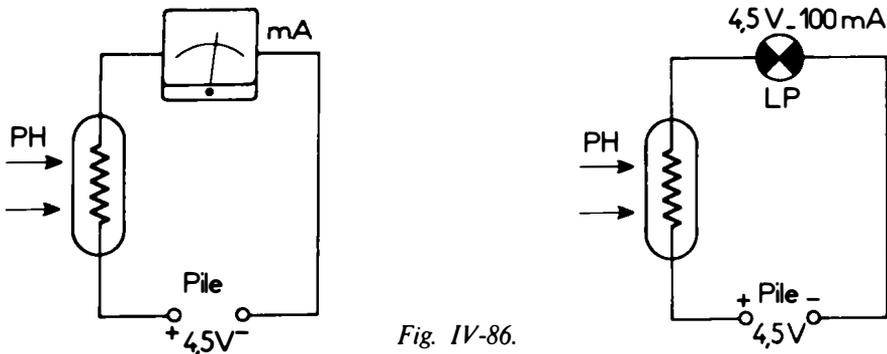
Rappelons que la photorésistance, comme nous l'avons dit en préambule est un composant dont la résistance interne varie en fonction des variations de lumière ambiante. Dans l'obscurité, celle-ci se comporte presque comme un isolant, offrant des valeurs de résistance élevée qui dépassent le million d'ohms, atteignant jusqu'à 10 M $\Omega$ .



Au fur et à mesure que la lumière augmente, la photorésistance devient de plus en plus conductrice jusqu'à atteindre, sous une lumière intense, des valeurs de quelques centaines d'ohms, voire de quelques dizaines d'ohms.

### *Manipulations*

1° Le simple circuit représenté à la figure IV-86 permet de vérifier les propriétés de la photorésistance, et surtout sa sensibilité à la lumière. On utilisera le type très répandu LDR03 et une pile de 4,5 V. En obscurcissant la photorésistance avec la main ou avec un écran, ou au contraire, en dirigeant sur sa surface une source lumineuse plus ou moins intense, on constate des variations de



l'aiguille du milliampèremètre disposé en série. Les différentes indications de ce dernier correspondent aux variations de résistance de la photorésistance en fonction des différentes intensités lumineuses perçues.

2° L'emploi des transistors permet d'amplifier considérablement la sensibilité des photorésistances.

Le circuit représenté à la figure IV-87 utilise deux transistors de type NPN connectés dans la classique configuration Darlington, de manière à obtenir un coefficient d'amplification élevé.

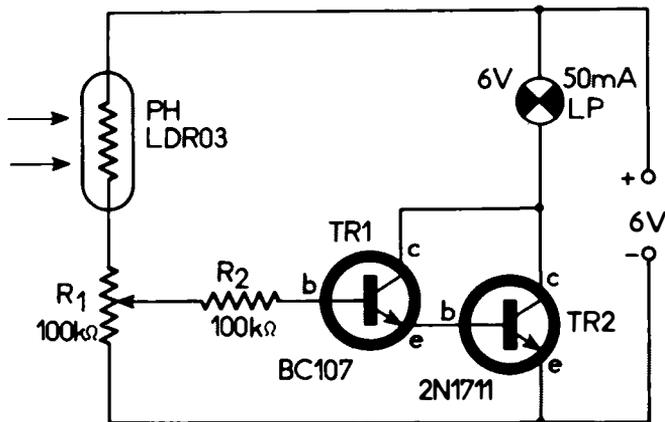


Fig. IV-87.

Voyons le fonctionnement de ce circuit. Quand la photorésistance PH se trouve dans l'obscurité, les deux transistors  $TR_1$ - $TR_2$  sont à l'état bloqué. Ceci en raison de la résistance élevée présentée par la photocellule qui ne peut fournir au transistor le courant de polarisation nécessaire.

Au contraire, quand la photorésistance se trouve en pleine lumière, sa valeur ohmique tombe à des valeurs très basses, rendant conducteurs les deux transistors  $TR_1$  et  $TR_2$ .

Dans ces conditions, on obtient l'allumage de la lampe LP connectée dans le circuit de collecteur des deux transistors. A la place de la lampe, on pourrait prévoir un relais qui serait alors excité.

Le potentiomètre  $R_1$  permet de régler la valeur de seuil d'entrée en fonction du circuit, tandis que la résistance  $R_2$  a seulement pour rôle de protéger le transistor  $TR_1$  contre les courants de base trop intenses découlant d'une illumination excessive de la photorésistance.

3° Le circuit de la figure IV-88 est tout à fait semblable au précédent. La seule différence réside dans le mode d'allumage de la lampe LP que l'on obtient, non plus lorsque la photocellule est éclairée, mais au contraire, lorsque la lumière diminue.

Une application pratique de circuit réside dans l'allumage automatique des lumières avec la tombée de la nuit.

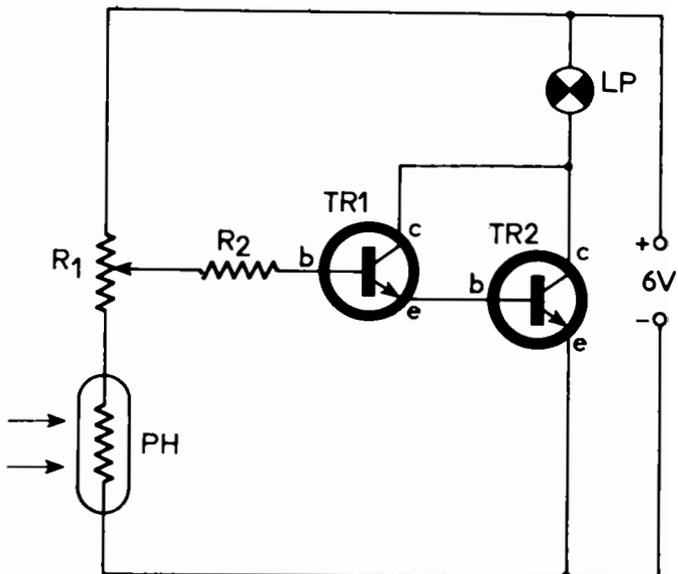


Fig. IV-88.

### Le thyristor

Le thyristor se comporte comme un commutateur unidirectionnel à semi-conducteur qui est normalement non conducteur, mais qui peut le devenir à la suite d'un signal de déclenchement convenable.

Les thyristors peuvent contrôler des courants atteignant plusieurs ampères et fonctionner avec des tensions alternatives. Par conséquent, ils peuvent servir à commuter des puissances élevées, pour commander des moteurs électriques, des lampes, etc.

### Caractéristiques du thyristor

Le thyristor est doté de trois électrodes : l'anode, la cathode et la gate (ou porte). Son symbole est reproduit à la figure IV-89, et la disposition de ses électrodes figure IV-90.

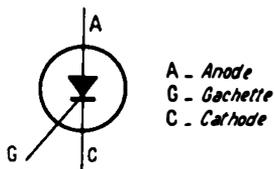


Fig. IV-89.

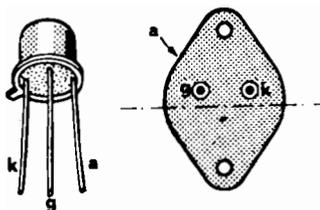


Fig. IV-90.

Il est constitué intérieurement de trois jonctions P-N qui forment un semi-conducteur de type P-N-P-N, semblable à deux diodes connectées en série.

L'électrode relative à l'anode aboutit au semi-conducteur P le plus extrême, tandis que la cathode est connectée au semi-conducteur de type N situé sur la

partie opposée. A la seconde section de matériau P est reliée l'électrode constituant la gate ou porte.

En appliquant sur l'anode une tension négative par rapport à la cathode, on n'observera aucune conduction de courant comme cela se produit dans une diode ordinaire et le thyristor constitue un interrupteur ouvert.

En inversant la polarité de la tension, le thyristor reste bloqué, contrairement à ce que l'on observe dans une diode normale avec laquelle on aurait une conduction électrique, mais ce blocage cesse par l'action d'une impulsion de commande positive sur l'électrode gate.

La commutation s'effectue en un temps extrêmement court, de l'ordre de  $0,5 \mu s$ . Une fois amorcé, le thyristor reste conducteur sans qu'il soit nécessaire de disposer d'une nouvelle tension de commande, et même si de nouvelles impulsions positives ou négatives lui sont appliquées.

Pour désamorcer un thyristor, c'est-à-dire pour le reporter à son état de blocage, on peut, soit réduire à zéro la tension entre anode et cathode, soit ramener l'anode négative par rapport à la cathode. Dans ce cas, la tension alternative se révèle très utile, parce que celle-ci passe par le zéro et inverse sa propre polarité après chaque demi-période.

Le thyristor se comporte donc comme un interrupteur électronique dont la fermeture est commandée par une impulsion positive tandis que l'ouverture peut être obtenue en ramenant à zéro la tension entre anode et cathode.

Nous avons vu que le transistor peut aussi se comporter comme un interrupteur, mais avec ce dernier, on ne peut commander que de petites puissances alors qu'avec le thyristor, on peut facilement commuter des puissances de plusieurs milliers de watts. Le transistor en outre nécessite une commande appliquée de façon continue tandis que le thyristor commute au moyen d'impulsions.

### Manipulations

1° Un premier examen consiste dans la mesure des valeurs de résistances entre les trois électrodes du composant à l'aide du contrôleur en fonction ohmmètre (fig. IV-91).

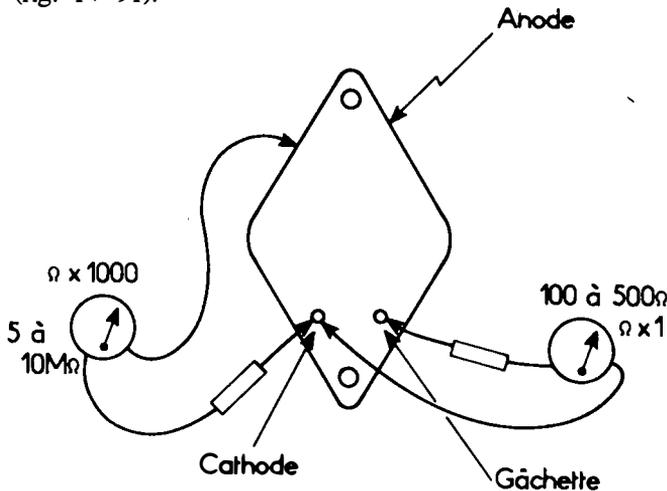


Fig. IV-91.

On mesurera d'abord la résistance entre cathode et anode sur la gamme  $\times 1000$  ou  $\times 10\,000$ . On doit relever une valeur comprise entre 5 et 10 M $\Omega$  indépendamment des polarités de l'instrument.

La seconde mesure consiste à mesurer la résistance entre cathode et gate, l'ohmmètre étant disposé sur la portée ohm  $\times 1$ . On peut relever deux indications légèrement différentes entre elles, suivant la disposition des points de l'instrument : de 100 à 500  $\Omega$  dans un cas, 10 à 50  $\Omega$  dans l'autre.

## 2° Etude pratique du fonctionnement du thyristor

Le schéma de principe du circuit permettant l'étude du fonctionnement du thyristor est indiqué à la figure IV-92. Il ne nécessite qu'un nombre limité de composants. Pour éviter tout risque de danger, nous avons choisi une tension d'alimentation de 6 V, mais cette valeur n'est pas impérative et pourrait tout aussi bien être de 12 ou 24 V.

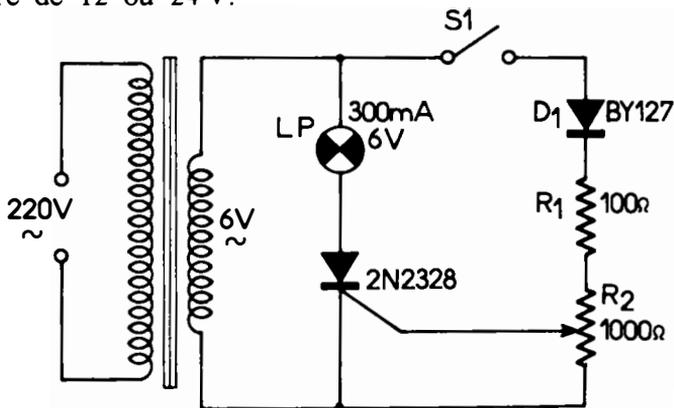


Fig. IV-92.

Un petit transformateur d'alimentation monté en rapport abaisseur ramène la tension 220 V à 6 V.

La ligne de contrôle proprement dite est constituée de la diode  $D_1$ , de la résistance  $R_1$  et du potentiomètre  $R_2$  connectés en série. La diode  $D_1$  redresse la tension alternative pour l'alimentation de la gate. La lampe LP indique par sa luminosité le passage du courant dont l'intensité est proportionnelle à l'intensité lumineuse de la lampe. Le curseur du potentiomètre sera tout d'abord tourné vers le haut (point commun  $R_1$ - $R_2$ ).

$S_1$  étant ouvert, aucune polarisation n'est appliquée à la gate, appelée aussi gachette, du thyristor. Aussi ce dernier est-il bloqué et la lampe éteinte.

Si  $S_1$  est fermé, au début de chaque alternance positive, le thyristor est bloqué et la totalité de la tension positive disponible est appliquée à la gachette par  $D_1$  et  $R_1$ .

Peu après le début de l'alternance, le thyristor se déclenche : il devient conducteur et la lampe s'allume. Au cours de cette conduction, sa tension d'anode devient pratiquement égale à zéro, entraînant ainsi la suppression du courant d'excitation de gate. La conduction dure pendant toute l'alternance et le thyristor ne se bloque qu'à la fin de celle-ci.

Ce phénomène se répète suivant la fréquence du secteur, le thyristor redevenant conducteur peu après le début de chaque alternance positive, tant que  $S_1$  est fermé.

La diode  $D_1$  redresse l'alternance positive et empêche qu'une polarisation inverse ne soit appliquée à la gate au cours des alternances négatives.

Remarquons que le thyristor n'est conducteur qu'au cours des alternances positives et se comporte comme un redresseur demi-onde. La lampe ne brille pas de son plus vif éclat quand  $S_1$  est fermé.

2° Etudions le fonctionnement du circuit en faisant varier la tension de commande par la manœuvre du potentiomètre  $R_2$ .

Le fonctionnement du circuit est très clairement indiqué à la figure IV-93 sur laquelle les diagrammes indiquent les différentes tensions correspondant aux trois principales positions du potentiomètre : curseur vers la masse, au centre, en haut.

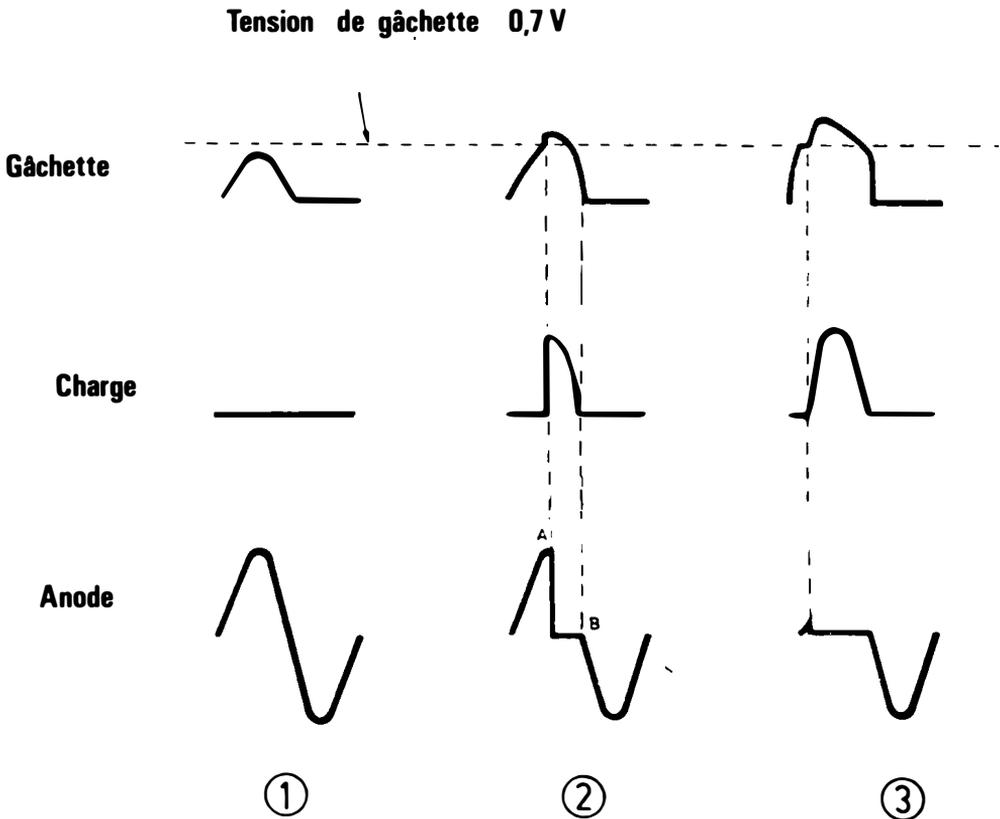


Fig. IV-93.

Quand le curseur du potentiomètre  $R_2$  est complètement tourné vers la masse, c'est-à-dire vers la cathode du thyristor, la tension de gate ne peut être que nulle ou très faible, inférieure à la tension de seuil pour laquelle l'amorçage s'effectue. Aucun courant ne traverse la charge.

Quand le potentiomètre est disposé à mi-course, la tension de gate dépasse la valeur caractéristique de seuil pendant un court instant provoquant l'amorçage du thyristor et le passage d'un certain courant, dès cet instant jusqu'au passage de la tension par zéro, dans la charge. Ce phénomène est illustré par le diagramme 2 de la figure IV-93. La valeur de seuil des thyristors est de l'ordre de 0,7 V. Comme le thyristor est alimenté en alternatif, la mise hors conduction se produit automatiquement au niveau zéro à la fin de chaque alternance positive.

Le diagramme 3 de la figure IV-93 se rapporte au cas où le curseur du potentiomètre  $R_2$  se trouve complètement tourné vers la résistance  $R_1$ . Dans ce cas, la diode s'amorce presque spontanément et on obtient le maximum de luminosité de la lampe LP.

### 3° Circuit à double alternance

La figure IV-94 représente un circuit de commutation à double alternance. La tension alternative de 6 V est redressée par le pont de diodes  $D_1$ - $D_4$ . Ce courant continu ondulé est alors appliqué au thyristor.  $S_1$  étant ouvert, aucun courant ne circule dans le pont ni dans la lampe.

Quand  $S_1$  est fermé, le thyristor devient conducteur peu après le début de chaque alternance et la lampe s'allume. Le thyristor devenant conducteur au cours de chaque alternance, la commande de gate est automatiquement supprimée.

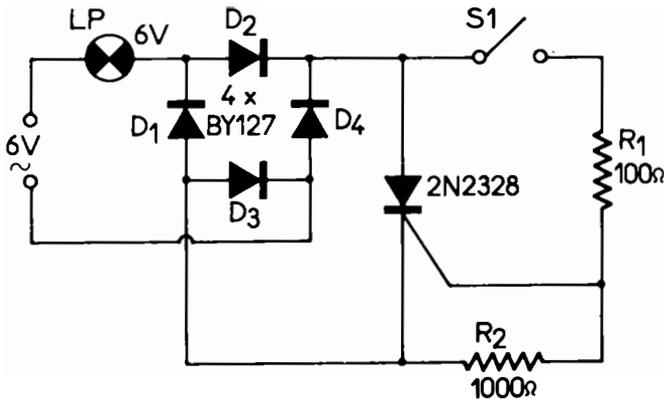


Fig. IV-94.

On remarquera que le thyristor étant conducteur pendant la presque totalité de chaque alternance, la lampe brille au maximum.

En disposant la lampe entre la sortie du pont et l'anode du thyristor, on aurait une alimentation de la charge en continu.

Les thyristors se présentent sous différentes formes ; nous avons reproduit à la figure IV-90 les boîtiers de deux types de moyenne puissance couramment répandus.

## Triac et Diac

Les triacs et les diacs sont les composants de base des différents types de régulateurs de courant destinés aux usages domestiques. Avec eux, il est possible

de réaliser un système moderne de réglage de luminosité remplaçant le plus classique interrupteur pour le contrôle des puissances de 100 W et plus, avec une indiscutable économie d'électricité.

### Principes physiques du triac

Le triac peut être considéré comme résultant de la connexion de deux thyristors en antiparallèle, c'est-à-dire que l'anode de l'une est connectée à la cathode de l'autre et inversement. C'est ce qu'indique clairement le symbole de représentation qu'indique la figure IV-97. On voit que ce composant, qui se présente sous l'aspect de la figure IV-95, comporte trois électrodes, A, K et gate.

Quand la tension entre gate et cathode K dépasse une certaine valeur de seuil, qui généralement est voisine de 0,7 V, la diode s'amorce en mettant pratiquement en court-circuit anode et cathode. De cette façon, on a un passage de courant dans la diode, comme s'il s'agissait d'un interrupteur fermé.

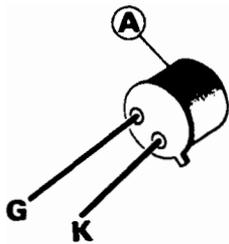


Fig. IV-95.

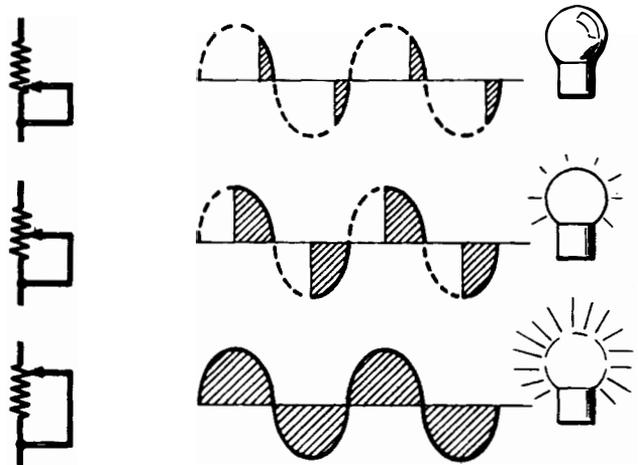


Fig. IV-96.

Si la tension appliquée entre anode et cathode s'annule pour une raison quelconque, même pour un temps très court (ce phénomène se produit automatiquement à chaque demi-période lorsqu'on alimente la diode en courant alternatif) la diode se désamorce et devient un interrupteur ouvert. Dans ces conditions, il est évident qu'il n'y a plus de passage de courant à travers l'élément de charge.

Si on veut régler le courant dans la charge qui se trouve en série avec la diode contrôlée, il suffit de faire amorcer la diode en un point bien déterminé de la sinusoïde, comme on peut le déduire de l'analyse de la figure IV-96. Ce dessin illustre l'exemple d'une charge constituée par une lampe, de manière que la plus ou moins grande luminosité de celle-ci indique l'intensité du courant qui traverse le circuit.

Ces trois diagrammes se réfèrent à trois positions différentes du curseur du potentiomètre permettant de régler la tension de gate correspondant à  $R_2$  du schéma de principe de la figure IV-97 d'un régulateur de tension.

Le premier diagramme est obtenu quand toute la résistance  $R_2$  est en circuit ; dans ce cas, la lampe représentée à droite reste éteinte. Avec le curseur tourné vers  $C_1$ , on constate un retard dans l'amorçage et celui-ci a pour effet de rendre la diode seulement conductrice pendant un très court instant. Il est évident que la luminosité de la lampe étant proportionnelle au temps d'amorçage (partie hachurée de la courbe) celle-ci reste éteinte.

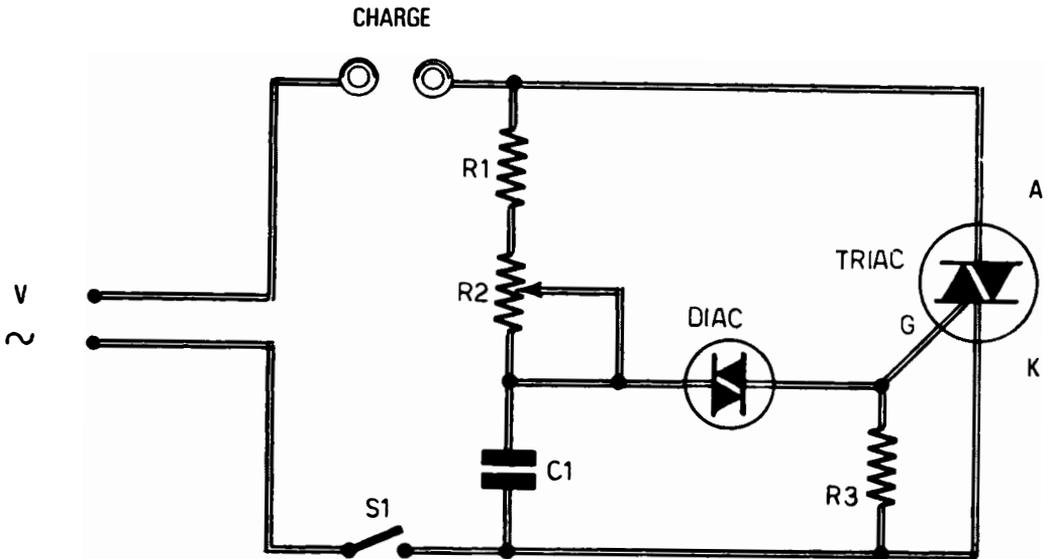


Fig. IV-97.

Dans le second cas, avec le curseur de  $R_2$  disposé en position centrale, on obtient une luminosité moyenne de la lampe ; l'amorçage, dans ce cas, est moins retardé et la diode reste conductrice pendant un temps plus long.

Dans le troisième cas, avec le curseur tourné complètement vers  $R_1$ , c'est-à-dire avec la mise hors service de  $R_2$ , on obtient la luminosité maximale de la lampe. Mais il convient tout de même de remarquer que l'illumination n'est pas absolument identique à celle que l'on obtiendrait sans l'insertion du régulateur. En effet, on enregistre une certaine diminution à peine perceptible par l'œil. Ce phénomène est dû au fait qu'un certain temps est toujours nécessaire, aussi court soit-il, pour pouvoir amorcer la diode. En conséquence, la sinusoïde ne peut être parfaite, mais amputée d'une petite portion immédiatement après le passage par zéro.

### Le diac

Un autre élément offrant un intérêt particulier est constitué par la diode diac.

Le rôle principal de ce composant, également à l'état solide, consiste à élever, à des valeurs de quelques dizaines de volts, la tension de seuil caractéristique du triac (0,7 V) de manière à obtenir un pilotage, même direct du compo-

sant, par la tension du secteur, sans avoir à recourir à des valeurs très élevées de la capacité du condensateur  $C_1$ .

### Mécanisme d'amorçage du triac

Reportons nous au schéma de principe d'un régulateur de la figure IV-97. Dès que l'onde sinusoïdale passe par le zéro, le triac se désamorce de telle sorte que le court-circuit étant supprimé, la tension du secteur est toute entière appliquée aux bornes de l'ensemble  $R_1$ - $R_2$ - $C_1$  qui constitue le véritable élément de réglage de l'appareil. Il en résulte que le condensateur  $C_1$  commence à se charger. Après un certain temps, la charge est complète et atteint la valeur de la tension de seuil nécessaire pour l'amorçage du triac.

Si on connectait directement le condensateur  $C_1$  à l'électrode G du triac, comme la valeur de seuil est de 0,7 V, pour obtenir le temps de retard désiré, on serait conduit à utiliser pour  $C_1$  un condensateur offrant une capacité très élevée. Au contraire, en utilisant un diac qui élève la tension de seuil, le temps de retard peut être obtenu avec des valeurs capacitives beaucoup plus faibles.

Mais revenons au second élément, dans l'ordre d'importance, du circuit régulateur de puissance électrique, le diac. Ce dernier peut être considéré comme la version à l'état solide de la lampe au néon, en ce qui concerne son fonctionnement, non sa luminosité. Comme la lampe au néon, le diac devient un élément conducteur dès que la tension appliquée aux bornes dépasse une certaine valeur. Au-dessous de celle-ci, le diac se comporte pratiquement comme un élément isolant. Mais le diac peut aussi être considéré pour le courant alternatif, comme une diode zener, étant donné que ses caractéristiques sont semblables à celles de cette dernière, sauf en ce qui concerne les polarités de la tension appliquée à ses bornes.

La figure IV-98 donne le schéma équivalent d'une diode diac. Celui-ci indique clairement le principe de fonctionnement et la parfaite analogie avec la diode zener.

### *Manipulation*

#### Etude du mécanisme d'amorçage du triac

Le mécanisme d'amorçage du triac peut facilement être mis en évidence avec le montage de la figure IV-99. Nous avons choisi une tension alternative de 6 V (ou de 12 V) pour des raisons de sécurité, mais le montage peut fonctionner avec des tensions plus élevées.

On remarquera que l'amorçage dépend de la position du curseur du potentiomètre de 1000  $\Omega$ .

Sur la position correspondant à la partie inférieure du schéma, la lampe est éteinte. On vérifie que la tension de gate est nulle.

En tournant progressivement le curseur, la lampe s'allume pour une certaine position. Mesurer la tension de gate qui s'élève à quelques dixièmes de volt. Cette valeur est la tension de seuil du triac.

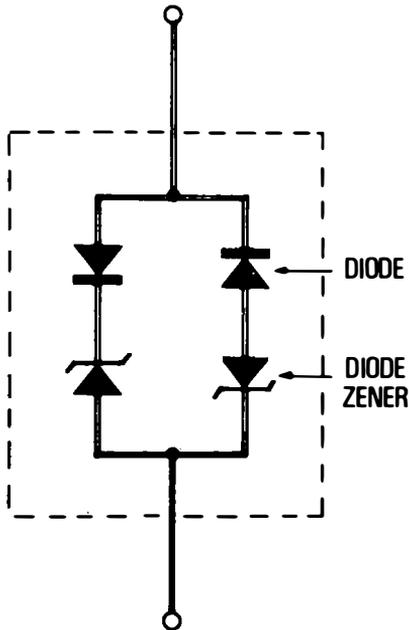


Fig. IV-98.

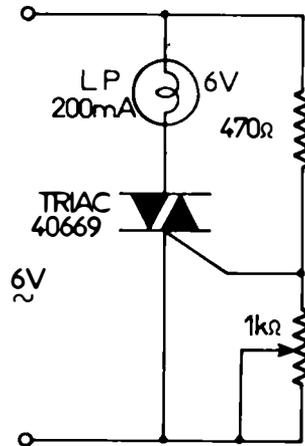


Fig. IV-99.

En poursuivant la rotation du curseur, on obtient la pleine illumination de la lampe.

### Pilotage par diac

On réalisera à titre expérimental le circuit de principe de la figure IV-97. Les valeurs des composants seront les suivantes :  $R_1 = 6,9 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $R_3 = 470 \Omega$ ,  $C_1 = 47 \text{ nF}$ , Diac = 40 583, Triac = 40 669.

Le circuit fonctionnant à partir du secteur 220 V, on observera les conditions d'isolement indispensables. Ce circuit peut servir à la commande de luminosité d'une lampe de 100 W, à la réduction de la vitesse des moteurs, au réglage de la température d'un fer à souder.

Il ne s'agit que d'un montage expérimental, le circuit d'utilisation devant obligatoirement comporter un circuit antiparasites.

### Les circuits intégrés

Un nouvel élément a récemment fait une introduction en force dans les circuits électroniques : le circuit intégré.

Un circuit intégré est un circuit obtenu en concentrant sur un même support semiconducteur plusieurs composants discrets, transistors, diodes, résistances, etc.

La plupart des circuits électroniques classiques habituellement utilisés, oscillateurs, amplificateurs, peuvent être réalisés sous forme intégrée en fournissant, sous

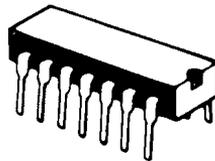
un faible encombrement, avec les mêmes caractéristiques, des fonctions identiques aux circuits homologues traditionnels réalisés à l'aide des composants discrets conventionnels.

Il convient de bien remarquer que le mot circuit intégré désigne davantage un nouveau procédé de fabrication et de câblage des composants électroniques qu'un nouveau composant.

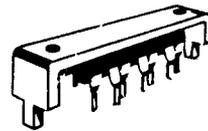
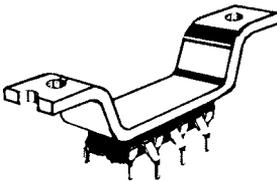
Cependant les circuits intégrés permettent la réalisation de montages que ne permettrait pas, ou difficilement, l'utilisation des composants traditionnels.

### *Qu'est-ce qu'un circuit intégré ?*

Un circuit intégré consiste principalement en transistors, résistances et diodes montés ou gravés sur un support ou « puce » très mince, de silicium, et reliés entre eux de façon à former un circuit, spécifique d'une fonction ou d'une opération particulière. Un montage utilisant un circuit intégré comprendra beaucoup plus de transistors et de diodes qu'un montage équivalent utilisant des composants conventionnels. Dans un CI, en effet, les transistors assurent de nombreuses fonctions : celles d'inductances, de condensateurs ou de résistances.



*Fig. IV-100*



*Fig. IV-101*

Les circuits intégrés se subdivisent en deux types fondamentaux : les CI linéaires et les CI digitaux. Les circuits intégrés linéaires sont essentiellement constitués par des amplificateurs à large bande pour faibles tensions, tandis que les circuits intégrés digitaux sont très répandus dans la réalisation d'appareils de mesure, horloges digitales, jeux vidéo, etc.

### *Les circuits intégrés logiques*

On peut dire qu'un circuit logique est un circuit pour lequel il n'existe aucune relation de forme entre le signal d'entrée et le signal de sortie. Le circuit de base est une porte NAND qui permet de réaliser toutes les autres fonctions. Ces circuits sont généralement alimentés sous 5 V.

## *Les circuits intégrés linéaires*

Dans un circuit linéaire le signal de sortie a la même forme que celui d'entrée ; il est seulement amplifié ou fourni sous une impédance différente. Les circuits intégrés linéaires sont des amplificateurs presque toujours à couplage direct et fonctionnent ainsi en amplificateurs à courant continu.

### *Présentation*

Les circuits intégrés digitaux se présentent généralement sous la forme d'un boîtier type dual-in-line ayant 14, 16 ou parfois, pour des fonctions complexes, jusqu'à 40 broches.

La figure IV-100 montre le type le plus courant à 14 broches. La distance entre une broche et la suivante de la même rangée est d'environ 2,54 mm, tandis que la distance entre deux rangées est d'environ 7,6 mm.

Les circuits intégrés linéaires se présentent également sous différents boîtiers plastiques ou métalliques dont la figure IV-101 montre quelques exemples.

Ces circuits intégrés offrent un vaste champ d'expérimentation que nous avons traité dans des ouvrages spécialisés auxquels nous prions nos lecteurs de bien vouloir se reporter (1).

## **Le transistor unijonction**

Bien que ne représentant pas un composant aussi répandu que le populaire transistor bipolaire et souvent mal connu, le transistor unijonction ou UJT est utilisé dans les oscillateurs de relaxation pour la production d'impulsions et de signaux en dents de scie.

Dans sa structure la plus simple, le transistor unijonction se présente sous la forme d'un barreau de silicium de type N à grande résistivité (de l'ordre de 100  $\Omega/cm$ ) aux extrémités duquel sont fixés des contacts purement ohmiques qui constituent les bases référencées base 1 ( $B_1$ ) et base 2 ( $B_2$ ). Une pointe d'aluminium pénètre dans une zone intermédiaire située plus près de  $B_2$  que de  $B_1$ , en formant une jonction PN, dont la partie P constitue la connexion d'émetteur (E). Cette jonction est unique d'où l'appellation « unijonction ». Cette situation est schématisée figure IV-102.

La représentation symbolique du transistor unijonction, qui est assez semblable à celle du FET, à la différence près que l'électrode comportant la flèche est disposée inclinée par rapport au barreau central plus gros, est donnée à la figure IV-103, ainsi que le brochage, vu par la partie inférieure du boîtier.

Avant d'analyser le fonctionnement de ce dispositif, il est nécessaire de définir trois paramètres, comme le montre la figure IV-104. On appelle  $V_{BB}$ , ou tension inter-base, la différence de potentiel appliquée entre  $B_1$  et  $B_2$ , cette dernière étant toujours positive par rapport à  $B_1$ .  $V_E$  est la tension d'émetteur, toujours en se servant de  $B_1$  comme référence des potentiels, et  $I_E$ , le courant d'émetteur.

---

(1) Les lecteurs qui désirent approfondir l'étude des circuits intégrés consulteront avec intérêt « **Initiation à l'emploi des circuits intégrés digitaux** » et « **Montages pratiques à circuits intégrés pour l'amateur** » de F. Huré. En vente chez votre libraire habituel.

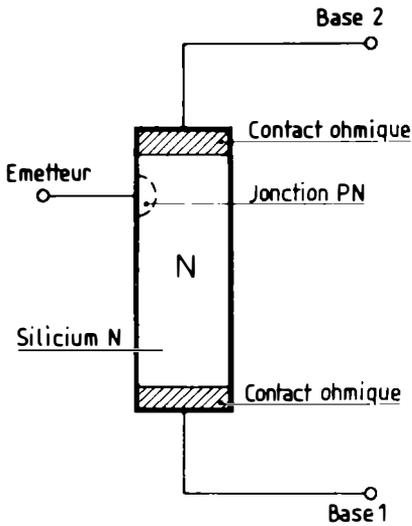


Fig. IV-102

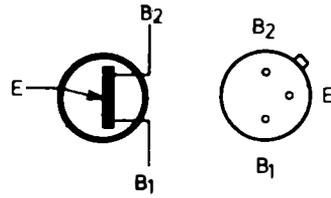


Fig. IV-103

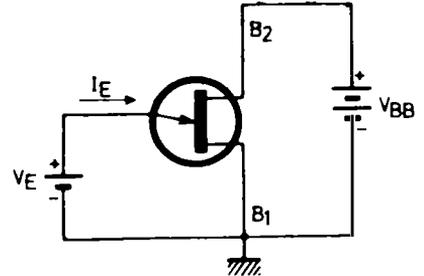


Fig. IV-104

La théorie du fonctionnement de l'UJT repose sur la variation de la conductibilité de l'espace compris entre la jonction d'émetteur et la base  $B_1$ , en fonction inverse du courant qui traverse le circuit.

Lorsque la jonction d'émetteur est en l'air, c'est-à-dire en l'absence d'injection de porteurs, la conductibilité du barreau est homogène. L'espace interbase peut être considéré comme un diviseur de tension résistif, et le potentiel de la jonction d'émetteur est une fraction de  $V_{BB}$ . Cette valeur constitue la tension de pic.

Appliquons alors à l'émetteur une tension positive  $V_E$ , inférieure à la tension de pic. La jonction émetteur-barreau, en polarisation inverse, ne laisse passer qu'un très faible courant.

Par contre, dès que la tension  $V_E$  atteint la tension de pic, la jonction  $E-B_1$  devient passante et des trous sont injectés dans le barreau. En raison du champ que crée la différence de potentiel  $V_{BB}$ , la base  $B_1$  attire les trous et la conductibilité du barreau augmente, ce qui entraîne une élévation du courant d'émetteur.

### Courbe caractéristique

Le circuit équivalent du transistor unijonction est indiqué par la figure IV-105. La diode  $D$  représente la jonction  $EB_1$  entre émetteur et base 1 lorsque l'UJT est à l'état passant (conducteur).

Si une tension  $V_{B_2B_1}$  est appliquée entre les deux bases  $B_1$  et  $B_2$ , on constatera qu'entre l'émetteur  $E$  et la base  $B_1$  apparaît une fraction de la tension  $V_{B_2B_1}$ , que nous désignerons par  $kV_{B_2B_1}$ , le facteur  $k$  appelé rapport intrinsèque ayant une valeur généralement comprise entre 0,5 et 0,8.

Tant que  $V_E$  est inférieur à cette valeur, la diode  $D$  se polarise à l'inverse et, par conséquent se bloque. Dans ces conditions, un courant inverse de très faible valeur circule dans la diode  $D$ .

Dès que  $V_E$  dépasse cette valeur, celle de  $R_{B1}$  diminue et le courant d'émetteur augmente.

Il y a alors apparition d'un phénomène d'avalanche.

Tout ceci est représenté par une caractéristique à résistance négative, suivie d'une partie représentant un fonctionnement de diode, comme le montre la figure IV-106.

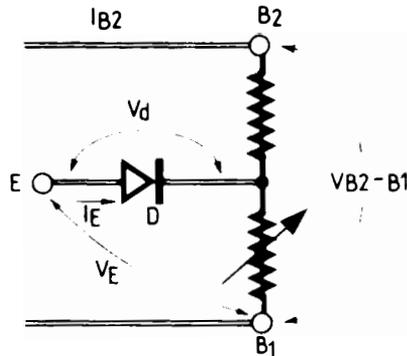


Fig. IV-105

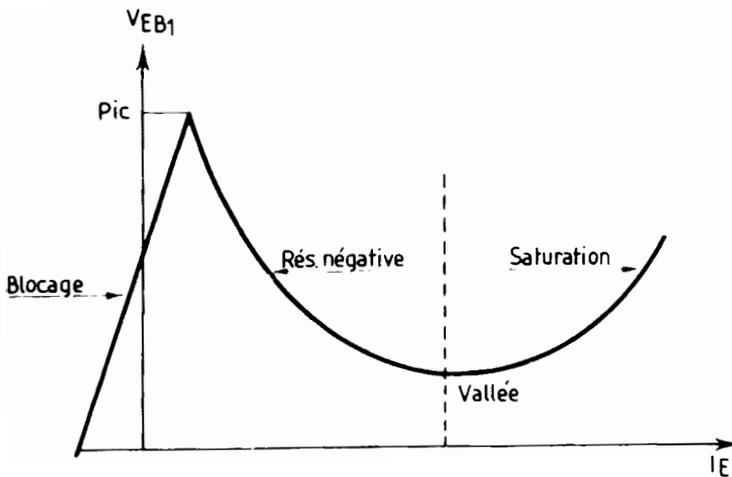


Fig. IV-106

Cette figure comporte deux axes de coordonnées, l'axe des ordonnées  $V_{EB1}$  (tension entre émetteur et base 1) et l'axe des abscisses  $I_E$ , le courant d'émetteur. En partant de gauche, la courbe présente une partie croissante où le courant augmente avec la tension. Le sommet de cette courbe est le PIC correspondant à une valeur maximale de  $V_{EB1}$ . A ce moment, la résistance interne devient négative et la courbe descendante indique que  $R_{B1}$  diminue lorsque  $I_E$  croît. Pour une certaine valeur de  $I_E$ , la variation de  $V_{EB1}$  s'inverse, la courbe redevenant montante. Il y a alors un point minimal nommé vallée.

La valeur de la résistance de base 1,  $R_{B1}$  dépend du courant d'émetteur  $I_E$ . Par exemple, pour passer de  $4\text{ k}\Omega$  à  $50\ \Omega$ ,  $I_E$  variera de zéro à  $50\text{ mA}$ . Lorsque  $I_{B2} = 0$ , la caractéristique de la jonction  $EB_1$  a l'allure de celle d'une diode normale.

### Application du transistor unijonction

L'utilisation la plus répandue du transistor unijonction réside dans l'établissement du circuit oscillateur à relaxation, dont un exemple classique est reproduit à la figure IV-107. Celui-ci permet d'interpréter le comportement de l'UJT.

Si un condensateur est disposé entre E et  $B_1$ , et qu'un courant de charge y circule, la tension aux bornes du condensateur croît exponentiellement jusqu'à atteindre, en un certain temps fixé par la constante RC, la tension de pic.

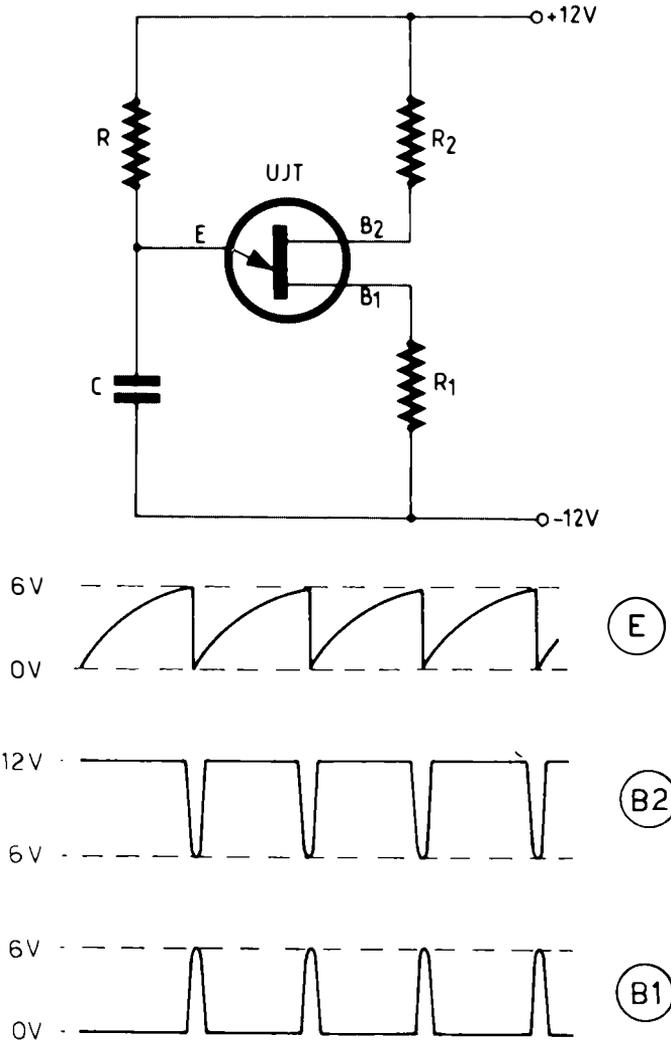


Fig. IV-107

A ce moment, la jonction E-B<sub>1</sub> devient passante et le condensateur se décharge brutalement, à travers l'espace émetteur-base 1, et éventuellement la résistance R<sub>1</sub>, puis le cycle repart à nouveau.

Cette décharge peut être utilisée pour commander l'amorçage d'un triac, par exemple dans un circuit temporisateur.

### Exemple pratique d'utilisation

Grâce à ses propriétés, l'UJT peut être utilisé avec succès dans des montages aussi divers que les suivants : oscillateurs, temporisateurs, circuits de déclenchement de thyristors, oscillateurs bistables, etc.

Le circuit de la figure IV-108 est facile à réaliser. Il s'agit d'un métronome électronique basé sur le principe de l'oscillateur à relaxation.

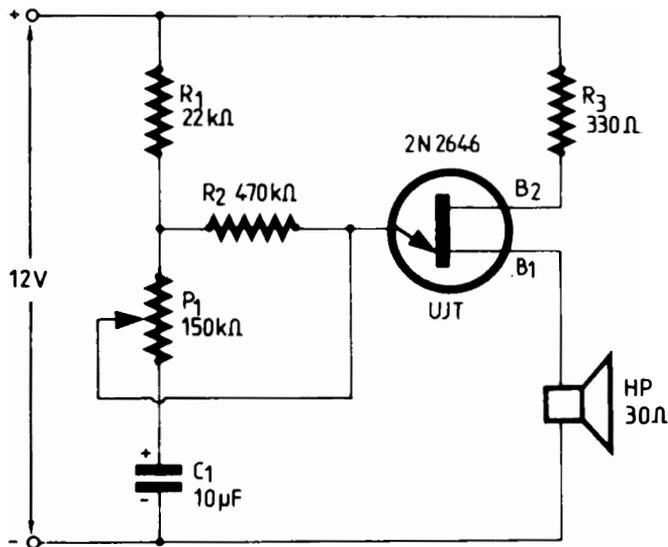


Fig. IV-108

Le générateur acoustique est piloté par le transistor UJT qui permet d'assurer la décharge périodique du condensateur électrolytique C<sub>1</sub>. En pratique, le condensateur se charge initialement à travers les résistances R<sub>1</sub>-P<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>.

Quand la tension aux bornes de C<sub>1</sub> atteint la valeur de la tension de pic du transistor unijonction, le circuit émetteur-base 1 devient conducteur et C<sub>1</sub> se décharge très rapidement à travers le haut-parleur, en produisant un toc caractéristique.

A la fin de la décharge commence un nouveau cycle de charge-décharge, entraînant la production d'un nouveau battement.

La fréquence des battements est réglée en agissant sur P<sub>1</sub>. Avec les valeurs portées sur le schéma, cette fréquence peut varier entre 42 et 208 battements à la minute, correspondant aux temps musicaux qui vont du « largo » au « presto ».

## Les produits optoélectroniques

L'optoélectronique regroupe tous les dispositifs dont le fonctionnement est lié à la présence de radiations lumineuses.

Avec le développement de la production des éléments à l'état solide capables d'émettre de la lumière ou de la détecter, l'optoélectronique a atteint, au cours des dernières années, un important développement. Ces composants sont très robustes, de petites dimensions et très fiables. En fonction de toutes ces caractéristiques, ceux-ci ont apporté une véritable révolution technologique dans le secteur industriel, permettant de résoudre de nombreux problèmes de contrôle à distance, de télécommunications.

Il existe deux grandes catégories de dispositifs optoélectroniques. Les éléments photosensibles sont des diodes et des transistors qui convertissent la lumière en courant électrique.

Les éléments photo-émetteurs ou électroluminescents sont des diodes qui convertissent la puissance électrique en lumière. La diode LED, que nous avons déjà étudiée, appartient à cette catégorie.

A la précédente se rattachent la photodiode et le phototransistor qui sont des capteurs dont nous allons étudier les propriétés.

### *Principe de base*

Tous les dispositifs optoélectroniques reposent sur un principe simple. Dans la structure cristalline des matériaux semiconducteurs, les électrons peuvent être propulsés hors de l'orbite de l'atome auquel ils appartiennent par l'application d'une quantité d'énergie externe assez faible. D'autre part, il faut rappeler que la lumière est composée de particules appelées « photons », chacune d'elles étant dotée d'une quantité d'énergie déterminée exclusivement par la valeur de la fréquence lumineuse, c'est-à-dire par la couleur de la lumière.

Quand on frappe avec des rayons lumineux un matériau semiconducteur, on provoque le choc des photons contre les électrons des atomes qui, en absorbant l'énergie des photons, réussissent à sortir de la structure cristalline, créant ainsi des électrons libres et des trous, pour former, s'ils sont soumis à un champ électrique, un courant électrique.

Même si le phénomène de la photoconduction peut être étendu à tous les semiconducteurs, il est nécessaire, pour sa manifestation, que ceux-ci soient dopés avec des impuretés particulières et que soient adoptées dès techniques de fabrication appropriées.

### *La photodiode au silicium*

Parmi les composants les plus simples et plus efficaces dans le domaine de l'optoélectronique, citons les diodes photosensibles ou photodiodes. Habituellement, le composant semiconducteur est le silicium convenablement dopé. Celui-ci présente une vaste gamme de longueurs d'ondes de fonctionnement qui rend son utilisation possible également dans le secteur de rayonnement invisible (infrarouge).

Les photodiodes sont actuellement produites suivant différents modèles, soigneusement encapsulés dans des boîtiers de plastique dont certains sont munis d'une

lentille dans le but d'augmenter la concentration de la lumière au point où est situé l'élément sensible.

Le symbole de représentation est celui de la figure IV-109 a.

### *Le phototransistor*

Le phototransistor est un composant moderne très semblable, en ce qui concerne son fonctionnement, à la photodiode qu'il a supplantée. Il est doté d'une sensibilité assez poussée et ses qualités sont supérieures à celles des autres dispositifs similaires.

Théoriquement, le phototransistor peut être conçu comme l'ensemble d'une photodiode servant d'élément pilote et d'un transistor. Le courant inverse de la photodiode traverse la base du transistor et est amplifié par ce dernier. Si la base du transistor n'est pas connectée, le fonctionnement du phototransistor est identique à celui de la photodiode. En effet, dans les conditions d'éclairage, en présence d'une tension positive appliquée à l'émetteur et d'une tension négative sur le collecteur, le phototransistor devient un élément conducteur.

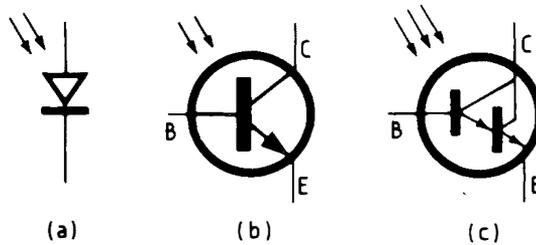


Fig. IV-109

Quand la base est connectée, on obtient la possibilité de piloter la conduction du transistor, selon la tension appliquée à la base, comme cela se produit dans un transistor normal. On réussit donc à moduler la sensibilité du dispositif à la lumière.

Le phototransistor est sensible au rayonnement infrarouge.

Le symbole de représentation est montré à la figure IV-109 b.

Lorsqu'on a besoin d'un signal électrique puissant à la sortie, on peut utiliser un phototransistor Darlington. Le symbole de représentation est celui de la figure IV-109 c. Comme on le voit, l'ensemble comprend deux transistors dont le premier est un phototransistor. La base B reçoit la lumière. Les deux autres électrodes sont E = émetteur et C = collecteur, les deux appartenant au transistor de sortie. Une lentille constitue la fenêtre de base recevant la lumière.

### *Circuit d'application*

Le circuit de la figure IV-110 va nous permettre de vérifier le fonctionnement d'un phototransistor assurant la commande d'un relais.

Le circuit est piloté par le phototransistor  $FT_1$ , monté dans un circuit à collecteur commun. Avec un tel montage, on diminue l'impédance de sortie ce qui permet d'exciter directement la gâchette du thyristor sans qu'il soit besoin d'autres étages amplificateurs.

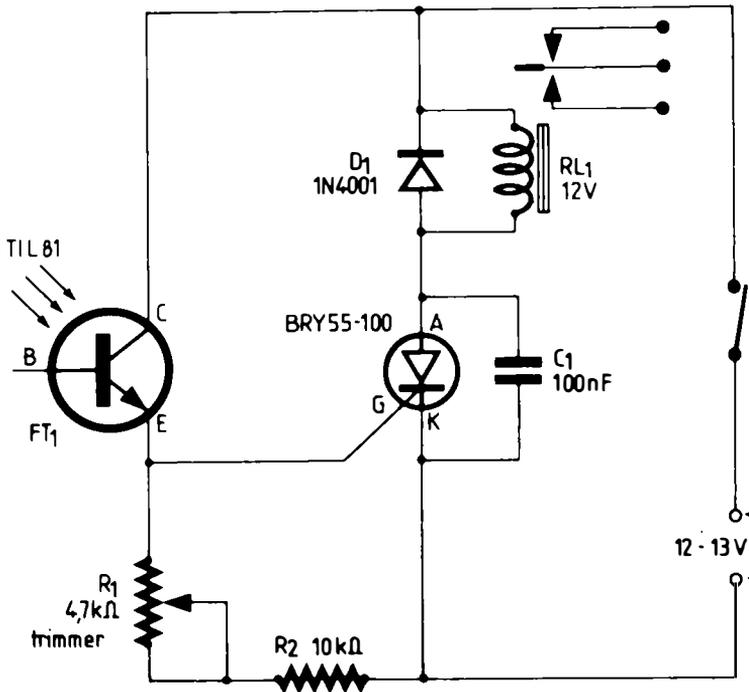


Fig. IV-110

En pratique, quand le phototransistor se trouve dans les conditions d'obscurité ou d'éclairage insuffisant, la tension de gate n'est pas assez élevée pour permettre la conduction du thyristor et le relais reste ouvert.

Au contraire, quand le phototransistor est suffisamment éclairé, sa résistance interne diminue au point de permettre le passage d'un courant de gâchette permettant l'amorçage du SCR. Le relais est alors excité.

Cet état persiste, même si le phototransistor est replacé dans l'obscurité.

Pour revenir aux conditions initiales, on devra interrompre le courant d'alimentation en agissant sur l'interrupteur  $S_1$ .

On peut également parvenir au même résultat en court-circuitant momentanément l'anode et la cathode du thyristor.

Le potentiomètre  $R_1$  permet de régler le seuil de sensibilité du dispositif, pour éviter, par exemple, les effets de la lumière ambiante. On le réglera de manière à faire déclencher le relais pour une intensité lumineuse déterminée.

La diode  $D_1$ , en parallèle aux bornes de la bobine d'excitation évite les phénomènes d'extra-courant de rupture.

Le circuit devra être alimenté avec une tension continue de l'ordre de 12 à 13 V.

Une application pratique de ce circuit trouve son utilisation dans l'ouverture automatique d'une porte de garage.