

Semi-conducteurs et diodes

par D. DESMARAIS,

Faculté Saint-Jean, Université de l'Alberta
Edmonton, Alberta, Canada T6C 4G9.

Résumé.

Le but principal de cet article est d'introduire les élèves au niveau secondaire ou universitaire aux propriétés des semi-conducteurs et à leur application dans le cas des diodes.

I. FONDEMENTS DES SEMI-CONDUCTEURS.

Les métaux tels que l'aluminium et le cuivre servent à transporter un courant électrique dans les circuits. On qualifie ces métaux de conducteurs parce qu'ils offrent une résistance minimale au courant électrique. Par contre les matériaux tels que le verre, le caoutchouc et la céramique ne se prêtent pas à la conduction électrique; on qualifie ces substances d'isolants. Un troisième groupe de matériaux possède des caractéristiques qu'on peut placer entre celles des conducteurs et des isolants; on qualifie ces métaux de semi-conducteurs.

A. Les semi-conducteurs intrinsèques.

La structure cristalline du germanium est illustrée fig. 1.

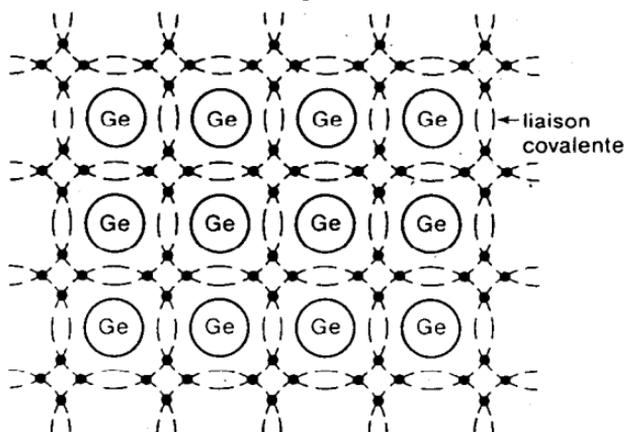


Fig. 1. — La structure du réseau cristallin du germanium. Seuls les électrons de valence sont indiqués pour plus de clarté.

On peut voir que chacun des atomes possède quatre électrons dans sa dernière couche (la couche de valence) qu'il partage avec ses quatre voisins immédiats. L'atome, en essayant de compléter sa couche de valence avec huit électrons, établit avec chaque voisin une liaison qualifiée de covalente. On dit que le germanium est un cristal à liaison covalente, tout comme le silicium.

Si on applique une différence de potentiel aux extrémités d'un cristal de germanium, on observe qu'un courant le traverse, quoique beaucoup plus faible que si on avait un conducteur métallique. La conductivité du germanium est située entre celle des isolants et des conducteurs, d'où le nom de semi-conducteurs. La conduction dans les semi-conducteurs est électronique, s'effectuant par le déplacement d'électrons libres. La conductivité des semi-conducteurs est inférieure à celle des métaux parce qu'il existe beaucoup moins d'électrons libres dans les semi-conducteurs que dans les métaux. Le mécanisme de production des électrons libres dans les semi-conducteurs est le suivant : Bien que les paires d'électrons covalents soient fortement liées aux noyaux, il existe cependant une certaine probabilité qu'un de ces électrons acquière une énergie thermique assez grande pour lui permettre de quitter la liaison. On appelle phonon cette quantité discrète de chaleur qui peut être absorbée par l'électron, tout comme on appelle photon une quantité discrète de lumière. Un électron ayant absorbé un phonon peut alors errer dans le réseau cristallin jusqu'au moment où il rencontre une autre liaison où manque déjà un électron.

En quittant la liaison, l'électron crée un trou et, comme ce trou change de place continuellement, on peut réellement parler d'un courant de trous tout autant que d'un courant d'électrons. Si un cristal de germanium est connecté à une source de potentiel comme le montre la fig. 2, les électrons (signes négatifs) seront attirés à la borne positive alors que les trous (signes positifs) seront attirés vers la borne négative. Il est

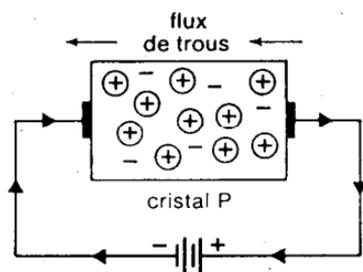


Fig. 2. — Conduction dans un cristal contenant des électrons et des trous.

important de noter que le courant électrique dans un semi-conducteur se compose également d'électrons et de trous, les électrons et les trous se déplaçant dans des directions opposées dans un circuit tel que celui de la fig. 2. Dans les métaux, par contre, le courant électrique est causé par les électrons libres seulement. La probabilité de création d'électrons libres par absorption de phonons augmente avec la température, de sorte que la conductivité des semi-conducteurs augmente elle aussi avec la température. Dans les métaux, au contraire, la conductivité diminue avec la température. On qualifie d'*intrinsèque* un semi-conducteur pur, ne comprenant que des atomes de la même sorte.

B. Les semi-conducteurs extrinsèques.

La conductivité des semi-conducteurs peut être accrue d'une autre façon, en ajoutant certaines impuretés dans le cristal. On appelle ce procédé dopage et les semi-conducteurs ainsi dopés sont qualifiés de semi-conducteurs extrinsèques. Un cristal de germanium ou de silicium peut être dopé d'un matériau pentavalent tel que l'arsenic ou le phosphore, deux éléments possédant cinq électrons périphériques.

Un tel semi-conducteur aura une structure cristalline comme le montre la fig. 3, où un cristal de germanium a été dopé d'arsenic. A noter que l'atome d'arsenic a remplacé un des atomes de germanium et partage quatre de ses atomes de valence avec les atomes adjacents dans une liaison covalente. Son cinquième

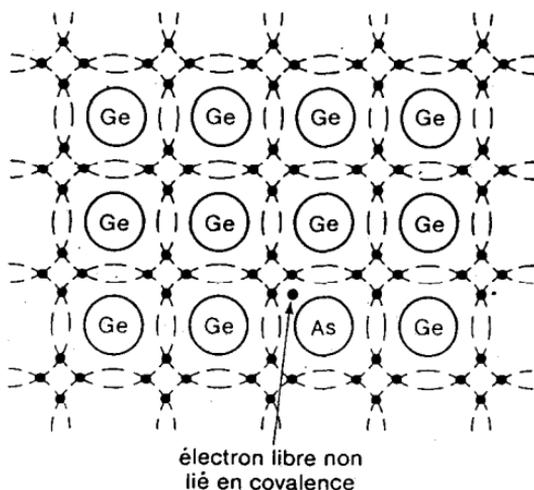


Fig. 3. — Dopage d'un cristal avec une impureté pentavalente pour produire des électrons libres.

électron de valence cependant est faiblement lié au noyau de l'atome d'arsenic et peut être libéré facilement. L'arsenic fournit donc un électron libre qui contribue à la conductivité du cristal de germanium. Un semi-conducteur à impuretés, dont le nombre d'électrons libres dépasse le nombre de trous, est un semi-conducteur de type N (négatif); l'impureté ajoutée est une impureté donneuse. La conduction dans un tel cristal est illustrée fig. 4. Les électrons sont les porteurs majoritaires. Il existe néanmoins quelques trous dus à l'excitation thermique et ces trous sont les porteurs minoritaires dans un cristal de type N.

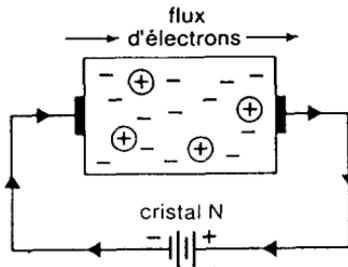


Fig. 4. — Conduction par électrons dans un cristal N.

On peut également doper un semi-conducteur en ajoutant un matériau trivalent tel que le gallium ou l'indium, éléments possédant trois électrons orbitaux externes. La fig. 5 montre un cristal de germanium dopé d'indium. Lorsque l'indium prend

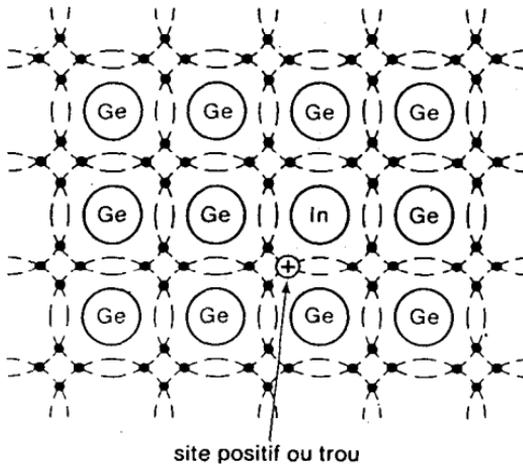


Fig. 5. — Dopage d'un cristal avec une impureté trivalente pour produire des « trous » ou « sites positifs ».

la place d'un atome de germanium dans le cristal, il manque un électron pour compléter les quatre liaisons covalentes avec les atomes de germanium voisins. La liaison non satisfaite constitue un trou où peut se loger un électron d'une liaison voisine, créant ainsi un nouveau trou et ainsi de suite. L'effet sur la conduction est le même que dans le cas précédent. La seule différence ici est qu'il y a maintenant un surplus de trous. Un tel semi-conducteur à impuretés est dit de type P (positif); l'impureté ajoutée est une impureté acceptrice. La conduction dans un tel cristal est illustrée fig. 6. Les porteurs majo-

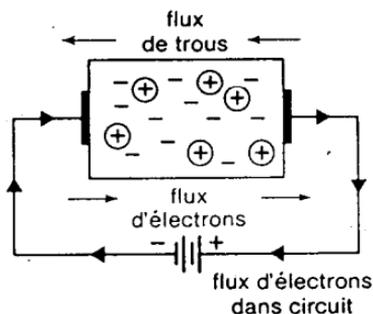


Fig. 6. — Conduction par trous dans un cristal P.

ritaires sont les trous. Il existera quelques électrons libres dus à l'excitation thermique. Ces électrons sont les porteurs mineurs dans un cristal de type P.

C. Les diodes à semi-conducteurs.

* La diode non connectée.

La diode est un dispositif à deux bornes ayant une faible résistance pour une différence de potentiel appliquée entre ses bornes et une résistance élevée si la polarité est renversée. La diode est formée lorsque deux cristaux de type N et de type P sont joints l'un à l'autre (fig. 7). Lorsqu'une telle jon-

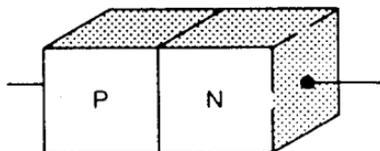


Fig. 7. — Diagramme d'un cristal à jonction PN.

tion est formée, il en résulte un comportement unique, illustré fig. 8. Au niveau de la zone de contact, un certain nombre d'élec-

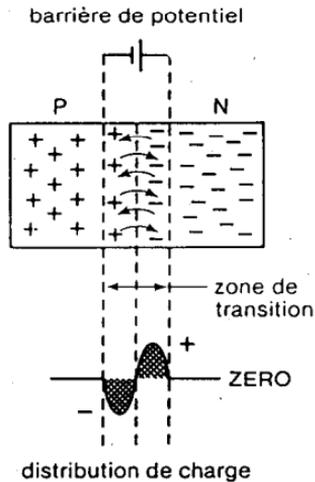


Fig. 8. — Ce diagramme montre la distribution de charge et la formation de la zone de transition causée par diffusion à travers une jonction PN.

trons du cristal N sont attirés à travers la jonction pour remplir les trous dans le cristal P. De même, un certain nombre de trous du cristal P sont attirés à travers la jonction pour neutraliser les électrons dans le cristal N. A cause de cet échange de porteurs, il en résulte une région de chaque côté de la jonction qui est libre de porteurs. On appelle cette région la zone de dépression de charge, la zone de charge spatiale, ou encore la zone de transition.

A cause de la diffusion des électrons et des trous à travers la jonction, il en résulte une chute de potentiel à travers la jonction, celle que pourrait créer la pile représentée sur la fig. 8. On appelle cette chute de potentiel barrière de potentiel. Sa polarité est indiquée dans l'illustration. Puisque des électrons ont laissé la région N, ce côté devient positif. Les trous ayant laissé la région P, ce côté devient négatif. Dans la fig. 8, un graphique au-dessous de la jonction montre la hauteur et la polarité de cette barrière de potentiel ainsi que de l'étendue de la zone de transition. Il est à noter cependant que la charge effective sur la diode ne change pas durant cette diffusion de charges ; la charge effective sur la diode est toujours nulle.

* *La diode sous tension.*

On dit qu'une diode est polarisée en sens inverse lorsqu'elle est connectée comme sur la fig. 9. En ce cas, la borne négative de la pile est connectée au cristal P et la borne positive au

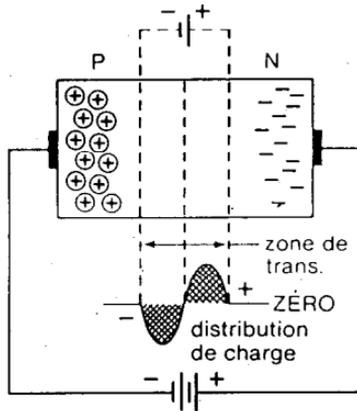


Fig. 9. — Diode polarisée en sens inverse. La zone de transition augmente.

cristal N. Les trous, étant positifs, sont attirés à la source négative; les électrons sont attirés à la source positive. La zone de transition devient plus étendue. La barrière de potentiel et la source de potentiel s'unissent pour empêcher tout transfert de porteurs majoritaires à travers la zone de transition. Il est à remarquer cependant qu'il existe un très faible courant, le courant de dispersion, causé par les porteurs minoritaires, les trous dans le cristal N et les électrons dans le cristal P.

On dit qu'une diode est polarisée en sens direct lorsqu'elle est connectée comme sur la fig. 10, la borne négative du cristal N, la borne positive au cristal P. En ce cas, les électrons du cris-

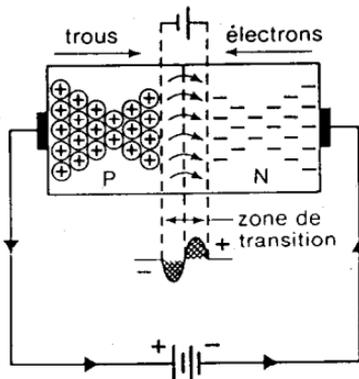


Fig. 10. — Diode polarisée en sens direct. La conduction dans le cristal P est due aux trous; dans le cristal N, elle est due aux électrons.

tal P sont attirés à la source positive. Pour chaque électron quittant le cristal P, un trou est créé dans le cristal P. Les trous se déplacent vers la jonction où ils sont comblés par les électrons venant du cristal N. Les électrons sont fournis au cristal N par la borne négative de la pile. La zone de transition devient moins large. La barrière de potentiel est réduite de beaucoup par la source de potentiel de polarité opposée. Un courant électrique circule alors dans la diode à jonction ainsi que l'indiquent les flèches dans le circuit externe.

On peut résumer l'opération d'une diode à jonction de la façon suivante. La diode est un dispositif électronique à sens unique puisqu'elle conduit un courant dans une direction seulement. Lorsqu'elle est polarisée en sens direct, le courant circule librement à travers la diode à cause de sa faible résistance. Lorsqu'elle est polarisée en sens inverse, le courant ne circule pas à travers la diode ; elle agit alors comme très haute résistance ou circuit ouvert.

Il est à remarquer qu'on peut se servir d'un ohmmètre ordinaire (mais non d'un ohmmètre électronique) pour vérifier l'état d'une diode. La résistance en sens direct d'une diode de silicium devrait être quelque peu plus élevée que la résistance en sens direct de la diode de germanium, mais ne devrait toujours pas dépasser les quelques centaines d'ohms. La résistance en sens inverse de la diode de silicium devrait être beaucoup plus élevée que la résistance en sens inverse de la diode de germanium (peut-être même infinie). La fig. 11 illustre le symbole et diverses formes de diodes.

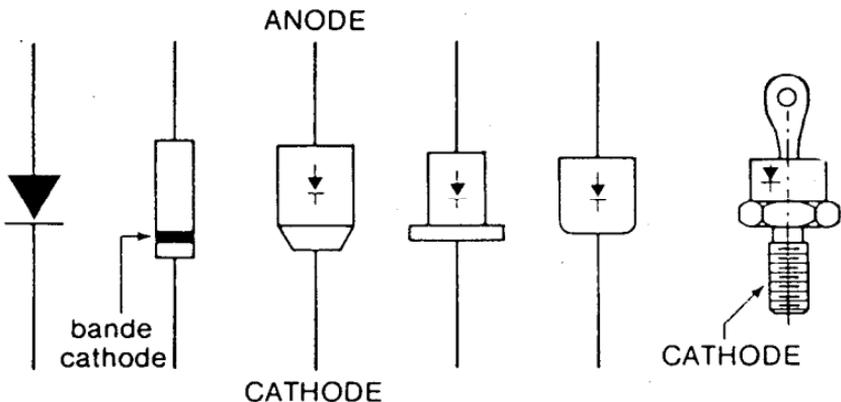


Fig. 11. — Symbole et diverses formes de diodes.

D. Les caractéristiques de la diode.

La caractéristique typique d'une diode est illustrée à la fig. 12 A pour une diode de germanium, et à la fig. 12 B pour

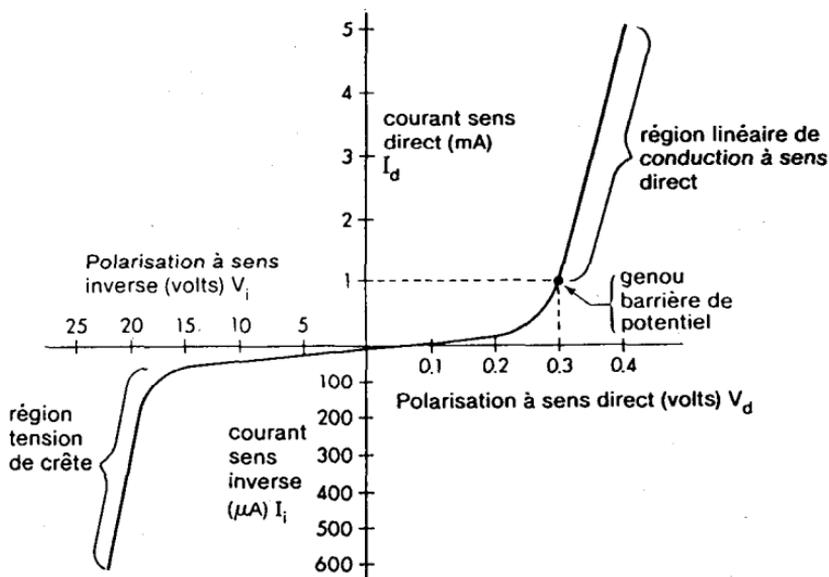


Fig. 12 A. — Caractéristiques V-I typiques de la diode de germanium.

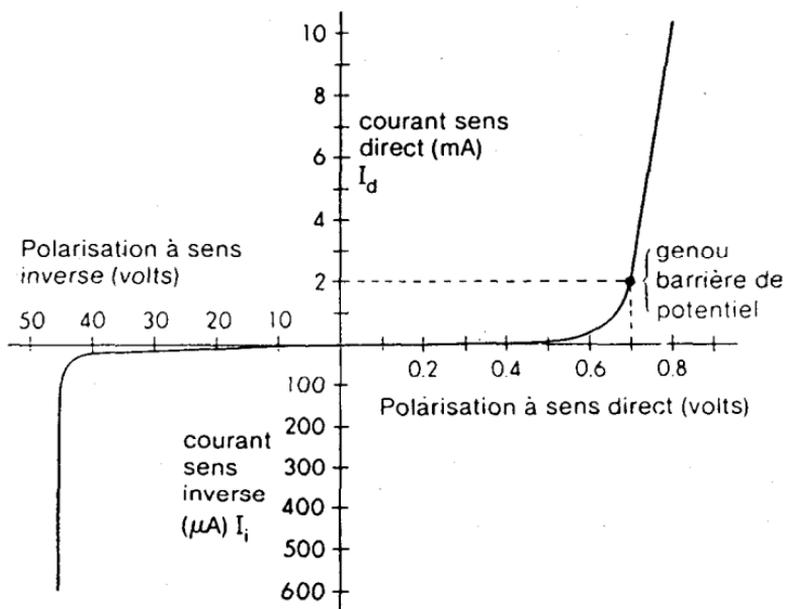


Fig. 12 B. — Caractéristiques V-I typiques de la diode de silicium.

une diode de silicium. Lorsqu'un potentiel de polarisation à sens direct est appliqué à la diode, la barrière de potentiel doit d'abord être surmontée. Alors la diode devient conductive et il existe une relation approximativement linéaire entre le potentiel et le courant.

A toute fin pratique, la barrière de potentiel à surmonter est d'environ 0,3 volt pour une diode de germanium et 0,7 volt pour une diode de silicium. Le courant traversant la diode augmentera alors d'un facteur d'environ cinq pour une augmentation dans le potentiel d'un dixième de volt.

Lorsqu'un potentiel à sens inverse est appliqué à la diode, il y aura passage d'un faible courant dû aux porteurs minoritaires, le courant de dispersion. Ce courant sera de quelques microampères pour la diode de germanium et de l'ordre de nanoampères pour la diode de silicium. Alors que le potentiel à sens inverse est augmenté, ce courant n'augmentera que peu jusqu'au point appelé tension inverse de crête, où il y aura une augmentation subite de courant. Cette augmentation soudaine dans le courant inverse est due au fait que le champ électrique devient assez puissant pour arracher beaucoup d'électrons aux atomes formant les cristaux N et P. Cette tension de crête est d'environ 20 volts pour les diodes de germanium et quelque peu plus élevée pour les diodes de silicium. Il est à remarquer que, dans des conditions ordinaires, une diode peut être endommagée par un courant excessif soit en sens direct, soit en sens inverse. Aussi les fabricants de ces dispositifs spécifient les limites permises de courant en sens direct et de tension inverse de crête.

E. Application de la diode.

L'application la plus commune de la diode est comme dispositif de redressement. Le redressement est le procédé par lequel un courant alternatif est changé en un courant continu. On peut observer l'opération de la diode dans le circuit de la fig. 13. Le transformateur d'entrée fournit une tension alternative. Quand le cycle est positif, la diode est conductrice et un potentiel apparaît aux bornes de la résistance de charge R_c . Il est à remarquer que le sens du courant est le sens opposé du sens de déplacement des électrons dans le circuit. Quand le cycle est négatif, la diode est polarisée en sens inverse et n'est pas conductrice. Le potentiel aux bornes de R_c est alors zéro. Il en résulte une tension de sortie périodique de même fréquence que la tension d'entrée. Un tel redresseur s'appelle un redresseur monophasé, puisque seules les alternances positives apparaissent en sortie.

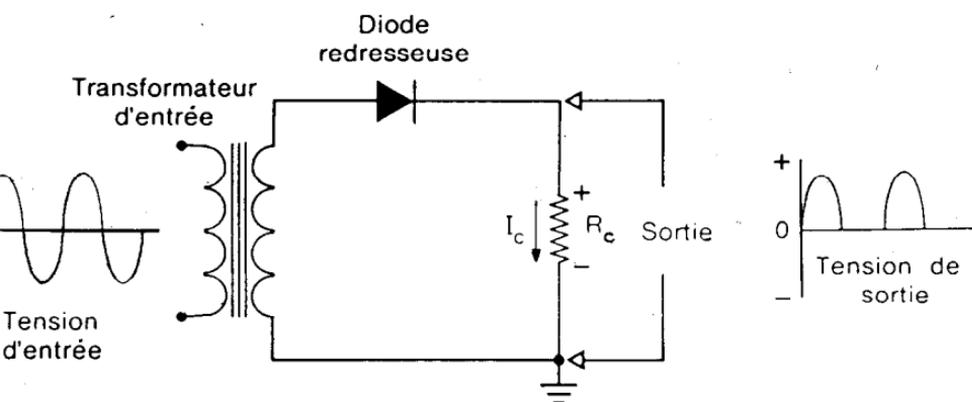


Fig. 13. — Redressement monophasé.

Le redresseur en pont illustré à la fig. 14 est un dispositif qui permet un flux d'électrons à travers R_c durant les alternances positives et négatives de la tension d'entrée. Un tel redresseur s'appelle un redresseur biphasé et requiert l'usage de quatre diodes.

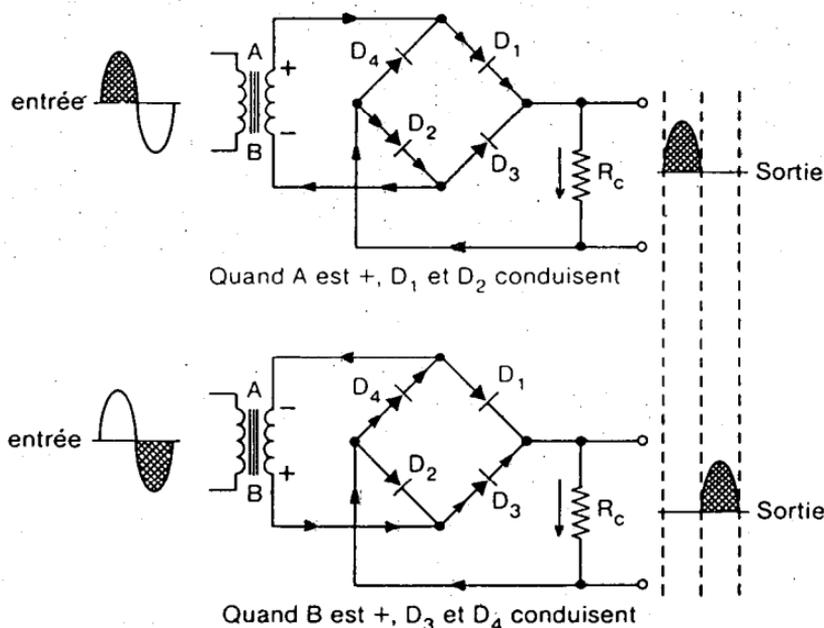


Fig. 14. — Redressement biphasé.

Lorsque le point A au secondaire du transformateur est positif, les diodes D_1 et D_2 sont polarisées en sens direct et les deux conduisent un courant dans le sens des flèches. Quand B est positif et A négatif, les diodes D_3 et D_4 sont conductrices et produisent une tension aux bornes de R_c . Puisque les deux alternances de la tension d'entrée produisent une tension de sortie, ce dispositif est un redresseur biphasé. Il en résulte une tension périodique de fréquence doublée de la fréquence d'entrée. Les quatre diodes de la fig. 14 sont communément incorporées dans un seul dispositif appelé pont-redresseur biphasé.

II. EXPERIENCES SUR LA DIODE A SEMI-CONDUCTEURS.

Buts.

- A. Etudier les caractéristiques de diodes typiques de germanium et de silicium.
- B. Etudier le fonctionnement de la diode dans un redresseur monophasé.
- C. Etudier le fonctionnement de la diode dans un redresseur biphasé.

Appareil.

Source de tension c. c. d'environ 15 V, source de tension c. a. de 6,3 V, oscilloscope, multimètres, diodes de germanium et de silicium, pont-redresseur biphasé, support d'expérimentation, condensateur de 50 μ F, résistance 1 k Ω , rhéostat 1 k Ω .

A. Caractéristiques de diodes typiques.

1. Monter le circuit de la fig. 15 en se servant de la diode de germanium. R_1 est le rhéostat de 1 k Ω . On se sert de la borne positive et de la borne à terre comme bornes positive et négative d'une pile.
2. Le rhéostat étant ajusté pour un débit minimal de tension, appliquer une tension de 15 volts aux bornes de celui-ci. On se servira de ce rhéostat pour contrôler la tension aux bornes de la diode et ainsi le débit de courant dans le circuit.
3. Augmenter lentement le courant dans le circuit au moyen du rhéostat jusqu'à une lecture I_d de 0,2 mA à l'ampèremètre. Mesurer la chute de potentiel V_d aux bornes de la diode. Incrire ses lectures au tableau de la fig. 16. Répéter pour toutes les valeurs de courant I_d inscrites au tableau.

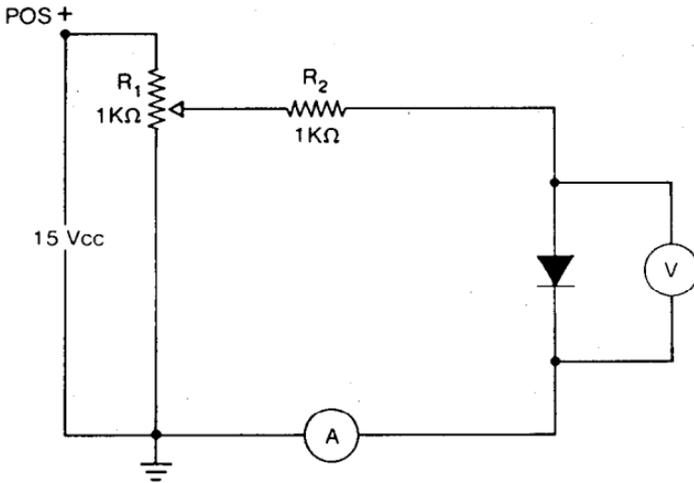


Fig. 15. — Caractéristiques des diodes.

Polarisation sens direct

	I_d (mA)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0
Germanium	V_d (volts)										
Silicium	V_d (volts)										

Polarisation sens inverse

	V_i (volts)	2	4	6	8	10	12	14
Germanium	I_i (μA)							
Silicium	I_i (μA)							

Fig. 16. — Caractéristiques V-I des diodes.

4. Remplacer la diode de germanium par la diode de silicium polarisée en sens direct. Répéter l'opération 3 pour la diode de silicium, en complétant le tableau de la fig. 16.
5. Insérer de nouveau la diode de germanium, polarisée cette fois en sens inverse. Ajuster le rhéostat pour une chute de potentiel V_i aux bornes de la diode de 2 volts. Faire lecture du courant I_i et inscrire au tableau de la fig. 16.
6. Répéter l'opération 5 pour la diode de silicium.
7. Faire deux graphiques, un pour la diode de germanium et un pour la diode de silicium. Inscrive sur l'axe des x les valeurs V_c et V_i et sur l'axe des y les valeurs I_d et I_i .

Afin de rendre plus évidente la relation entre tension et courant pour une polarisation inverse, on peut inscrire I_d en mA et I_i en μA sur l'axe des y.

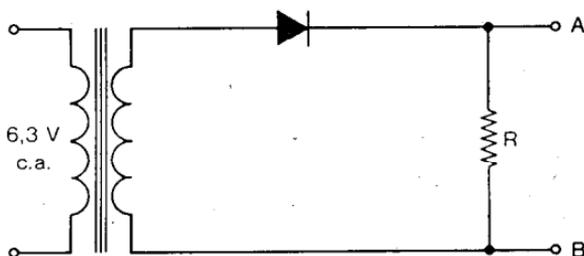


Fig. 17. — Redresseur monophasé.

B. Redresseur monophasé.

1. Monter le circuit de la fig. 17. La résistance R est de 1 k Ω .
2. A l'aide d'un oscilloscope connecté à A et B et calibré pour 2 volts/div, mesurer la tension crête-à-crête $V_{c.a.c}$ aux bornes de R.
3. Noter le temps de balayage du faisceau électronique à l'écran et calculer la fréquence de l'onde monophasée en se servant de la formule $\nu = 1/\tau$.
4. Mesurer la tension V_{moy} aux bornes de R avec un voltmètre, mode c. c. Il est à remarquer que :

$$V_{moy} = 0,318 V_{c.a.c}.$$

5. Placer un condensateur de 50 μF aux bornes de la résistance R. Observer à l'écran de l'oscilloscope l'effet du condensateur sur l'alternance de la tension de débit.
6. Mesurer la valeur crête-à-crête de la tension d'ondulation V_{ond} . Calculer la moyenne quadratique de cette tension d'ondulation V_{rms} où $V_{rms} = 1/2 (0,707) V_{ond}$. Il est à remarquer que V_{rms} est la tension mesurée par un voltmètre, mode c. a.
7. Calculer le pourcentage d'ondulation pour un redresseur monophasé avec le condensateur en parallèle :

$$\% \text{ d'ondulation} = \frac{V_{rms}}{V_{moy}} \times 100.$$

C. Redresseur biphasé.

1. Monter le circuit de la fig. 18. La source de tension alternative est de 6,3 V c.a., la résistance R est de 1 k Ω et

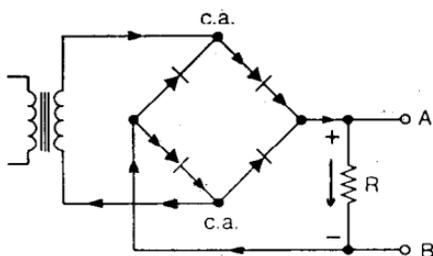


Fig. 18. — Redresseur biphasé.

les quatre diodes sont incorporées dans le pont-redresseur biphasé. Il est à remarquer qu'une des bornes du pont-redresseur est désignée par un signe positif. Les autres bornes sont désignées comme l'indique la fig. 19. On

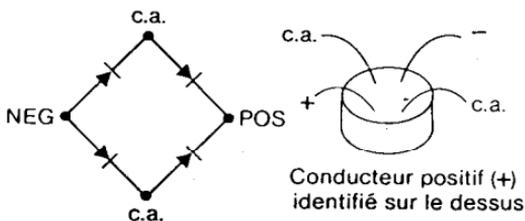


Fig. 19. — Montage du pont-redresseur.

- relie donc la source de tension c.a. aux bornes désignées c.a.
2. A l'aide de l'oscilloscope connecté à A et B, mesurer la tension crête-à-crête $V_{c.a.c}$ aux bornes de R.
 3. Calculer la fréquence de l'onde biphasée.
 4. Mesurer la tension V_{moy} aux bornes de R avec un voltmètre, mode c.c. Il est à remarquer que pour une onde biphasée, $V_{moy} = 0,637 V_{c.a.c}$.
 5. Placer un condensateur de 50 μF aux bornes de R et observer son effet sur la tension de débit.
 6. Mesurer la valeur crête-à-crête de la tension d'ondulation V_{ond} . Calculer la moyenne quadratique de cette tension d'ondulation V_{rms} où $V_{rms} = 1/2 (0,707) V_{ond}$.

7. Calculer le pourcentage d'ondulation pour un redresseur biphase avec condensateur en parallèle :

$$\% \text{ d'ondulation} = \frac{V_{rms}}{V_{moy}} \times 100.$$

8. Faire un tableau semblable à celui de la fig. 20, résumant les résultats obtenus dans les deux sections B et C.

	Redresseur monophasé	Redresseur biphase
V_{cc} (volts)		
Fréquence (Hz)		
V_{moy} (volts)		
V_{ond} (volts)		
V_{rms} (volts)		
% d'ondulation		

Fig. 20. — Résultats relatifs au redressement de courants alternatifs.