A decorative graphic on the left side of the slide, consisting of a grid of squares in various shades of blue and grey, arranged in a stepped pattern.

PHYS-F-314

Electronique

Chapitre II

Les semi-conducteurs et les diodes

- Rappels de la structure atomique
- Semi-conducteurs (intrinsèques et extrinsèques)
- Semi-conducteurs de type N et de type P
- La jonction PN
- Caractéristique de la jonction PN
- La diode
- Applications

Références et illustrations:

HECHT « PHYSIQUE-2. Electricité et magnétisme » Ed. de boek

Th. L. Floyd « Electronique, Composants et systèmes d'application » Ed. Goulet

Structure atomique

- Un atome isolé se trouvera dans un de ses niveaux d'énergie, correspondant à certaines configurations de son nuage électronique
- Rappel: les électrons sont répartis en couche autour du noyau:

□ Couches pleines

□ Couches partiellement remplies: les électrons de valence

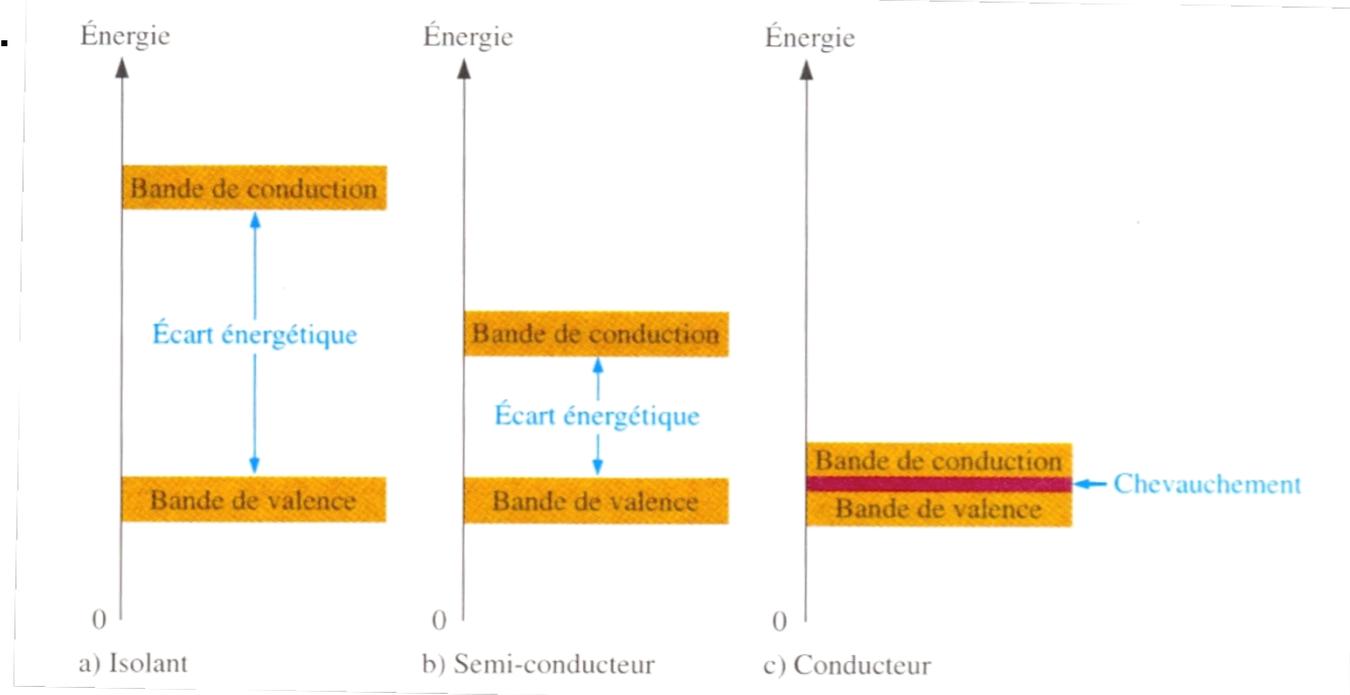
- Le silicium (Si) et le germanium (Ge) ont 4 électrons de valences

On s'éloigne
du noyau

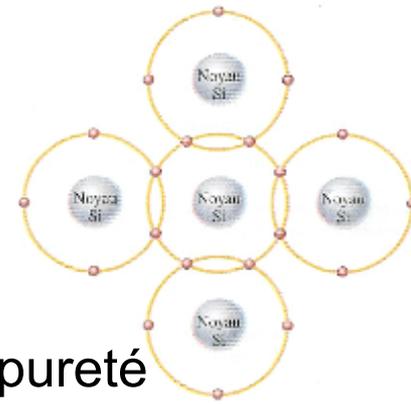
- Conducteurs:
 - Ils sont caractérisés par des atomes ayant 1 électron de valence faiblement lié
- Isolants:
 - Généralement composés de plusieurs éléments, les électrons de valence sont fort liés
- Semi-conducteurs:
 - Un semi-conducteur à l'état pur n'est ni un bon conducteur ni un bon isolant
 - Les semi-conducteurs à élément unique se caractérisent par des atomes possédant 4 électrons de valences

Bandes d'énergie dans un cristal

- Les électrons de valence sont donc confinés dans une bande d'énergie appelée *couche de valence*.
- Lorsqu'un électron acquiert assez d'énergie (d'une source externe), il peut quitter la couche de valence, devenir libre et exister dans ce qu'on désigne la *bande de conduction*.
- En terme d'énergie, la différence entre la bande de valence et la bande de conduction est appelée *écart énergétique*.
- Une fois dans la bande de conduction, l'électron est libre de se déplacer à travers le matériau.



Les semiconducteurs intrinsèques



■ Dans un cristal (par exemple de Si/Ge)

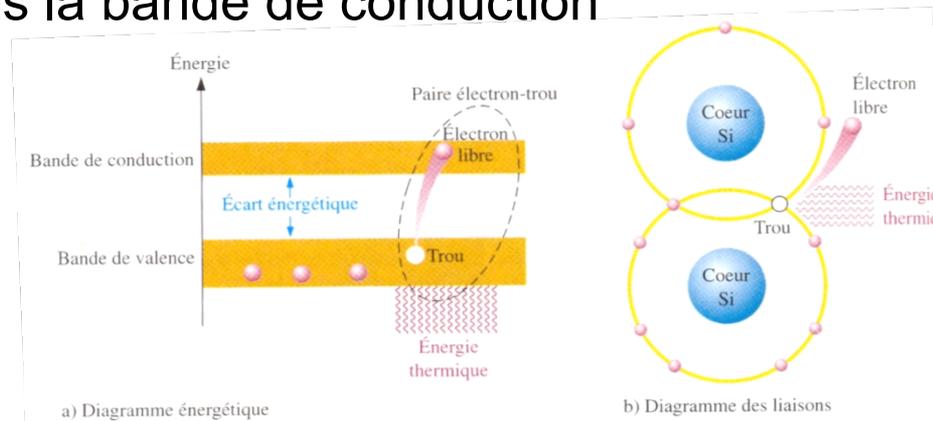
- Chaque atome partage ses 4 électrons de valence avec ses 4 atomes voisins
- Ce sont les liens covalents

■ Un cristal est dit *intrinsèque* quand il ne possède aucune impureté

■ Dans un cristal (en général)

- il y a dégénérescence des niveaux d'énergie des orbites
 - => formation de bandes d'énergie (cfr page précédente)
- A $T = 0K$, les bandes sont occupées jusqu'au niveau de Fermi E_F
 - Chaque bande d'énergie est séparée des bandes adjacentes par un écart énergétique dans lequel aucun électron ne peut exister

■ Dans un cristal de Si pur à température ambiante, de part l'énergie thermique **quelques** électrons de valence absorbent suffisamment d'énergie pour passer dans la bande de conduction

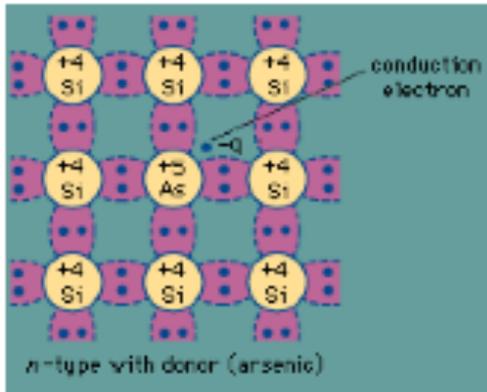


Les semiconducteurs intrinsèques II

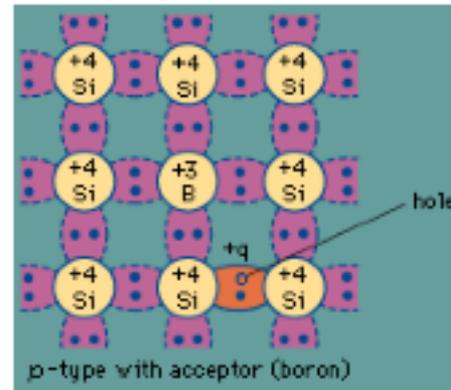
- Lorsqu'un électron de valence « bondit » dans la bande de conduction, il laisse un espace vacant dans la bande de valence, appelé « trou ».
- Lorsqu'on applique une tension à travers une pièce de Si, les électrons libérés dans la bande de conduction, libres de se mouvoir, sont attirés vers la borne +
 - Au niveau de la bande de valence, un *courant de trou* se produit
-  ■ Les électrons de valence sont toujours fortement liés à leurs atomes. Cependant un électron de valence peut se déplacer dans un trou à proximité laissant lui-même un trou.
- Remarques:
 - Dans un isolant, la bande de conduction est séparée par une grande bande interdite, « large » de 10 eV ou plus.
 - Dans les semi-conducteurs, la bande d'énergie interdite est plus étroite, ~ 1 eV, cependant à $T=300\text{K}$, $E_{\text{cin}} \sim 0,026$ eV \Rightarrow très peu d'électrons peuvent franchir ce « gap » \Rightarrow très faible courant

Semiconducteurs extrinsèques & dopage

- On fabrique les composants tels que les transistors et les diodes en utilisant des semi-conducteurs extrinsèques c-à-d dont la conductivité est due à des impuretés.
- On prépare le semi-conducteur en ajoutant un petit nombre ($1/10^6$) d'atomes étrangers: c'est le processus de dopage



Dopage à l'Arsenic
-> dopage type-n



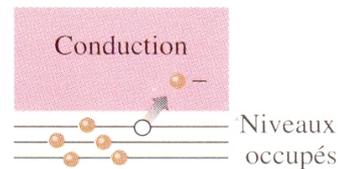
Dopage au Bore
-> dopage type-p

- Le dopage peut être créé de deux manières:
 - Si le cristal est dopé avec des atomes possédant un électron de valence supplémentaire, cet électron ne sera pas lié à un atome en particulier et pourra se déplacer librement à travers le réseau: *type-n*
 - Si le cristal est dopé avec des atomes possédant un électron de valence de moins, il y aura donc un trou parmi les électrons de valence. Ce trou peut être rempli par un électron de valence d'un atome voisin, mais cela créera un autre trou. Ce trou peut être vu comme une charge positive mobile: *type-p*

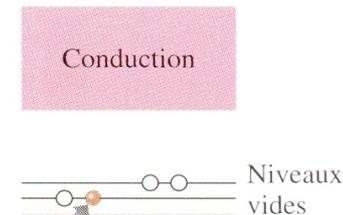
Du point de vue des bandes d'énergie:

- Type-n: les atomes d'impureté (appelés donneurs) produisent des niveaux remplis au-dessous de la bande de conduction. Les électrons de ces niveaux peuvent donc atteindre aisément ($\sim 0,05$ eV) la bande de conduction. Ce sont les porteurs de charge mobiles.
 - Les électrons sont dans ce cas appelés *porteurs majoritaires*. Cependant il existe aussi quelques trous créés par l'énergie thermique. Ces trous qui ne proviennent pas des impuretés sont appelés porteurs *minoritaires*.
- Type-p: les atomes d'impureté (appelés accepteurs) produisent des niveaux vides au dessus de la bande de valence. Les électrons de la bande de valence peuvent atteindre ces niveaux aisément ($\sim 0,05$ eV) . Les trous laissés derrière eux dans la bande de valence sont les porteurs de charge mobiles.
 - Les trous sont dans ce cas appelés *porteurs majoritaires*. Cependant il existe aussi quelques électrons créés par l'énergie thermique. Ces électrons libres qui ne proviennent pas des impuretés sont appelés porteurs *minoritaires*.

! Le matériau dopé reste neutre



Type-n



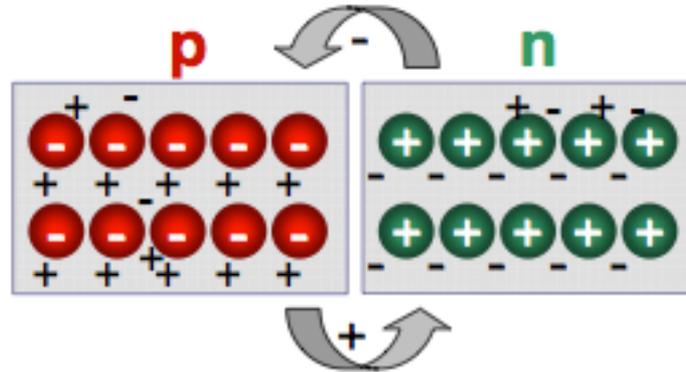
Type-p

Jonction p-n

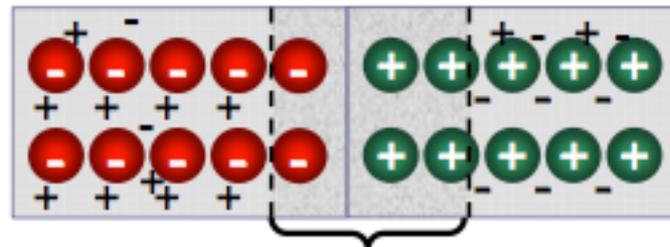
- Juxtaposition de 2 semi-conducteurs structurellement identique, mais l'un de type-n et l'autre de type-p.

- en pratique: on prend un semi-conducteur de type-p qu'on chauffe à $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ et on expose une des extrémités à de la vapeur d'As ou de P, qui diffuse à travers la surface. La couche supérieure se transforme ainsi en semi-conducteur de type-n.

- Les électrons de la région de type-n vont diffuser vers la région de type-p.



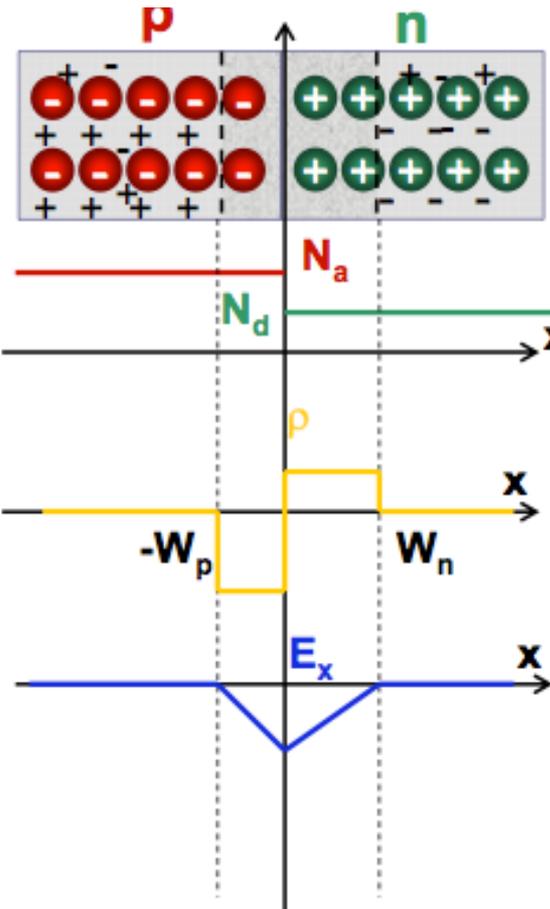
- La région de type-n devient positive à cause du manque d'électrons et la région du type-p devient négative à cause de l'excès d'électrons.



fine zone dépeuplée / d'appauvrissement

Jonction p-n

- Il en résulte une différence de potentiel qui arrête tout transfert supplémentaire de charges, créant ainsi une région dépourvue de porteurs de charge: la couche de déplétion
- La couche de déplétion constitue une région isolante et la jonction ressemble à un condensateur chargé.



Soit N_a , N_d , les **concentrations** d'accepteurs et de donneurs. Dans la couche de déplétion, la densité de charge vaut:

$$\begin{aligned} \rho(x) &= |q_e| N_d \text{ pour } 0 < x < W_n \\ \rho(x) &= -|q_e| N_a \text{ pour } -W_p < x < 0 \\ \rho(x) &= 0 \text{ ailleurs} \end{aligned}$$

Par conservation de la charge: $N_a W_p = N_d W_n$ où W_p et W_n sont les largeurs de la couche dépeuplée dans le type-p et le type-n, respectivement.

En intégrant l'équation de Poisson: $\Delta V(x) = \frac{\rho(x)}{\epsilon}$

On trouve le champ électrique E:

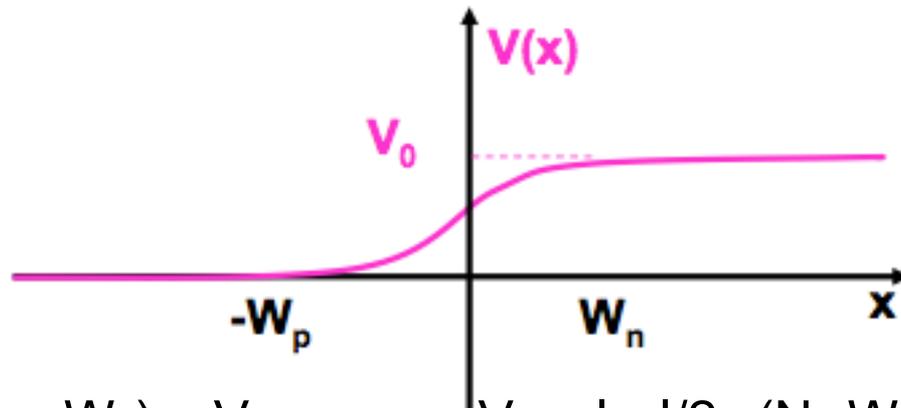
$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{dV(x)}{dx} = e \frac{N_d}{\epsilon} (x - W_n), \text{ pour } 0 < x < W_n \\ &\quad -e \frac{N_a}{\epsilon} (x + W_p), \text{ pour } -W_p < x < 0 \end{aligned}$$

Jonction p-n: barrière de potentiel

A partir de $E(x)$ on obtient $V(x)$; les constantes d'intégration sont fixées en imposant la continuité en 0 et en posant $V(x < -W_p) = 0$:

$$V(x) = -e \frac{N_d}{\epsilon} \left(\frac{x^2}{2} - W_n x \right) + e \frac{N_a}{2\epsilon} W_p^2, \text{ pour } 0 < x < W_n$$

$$V(x) = -e \frac{N_a}{\epsilon} \left(\frac{x^2}{2} + W_p x \right) + e \frac{N_a}{2\epsilon} W_p^2, \text{ pour } -W_p < x < 0$$



En posant $V(x = W_n) = V_0$, on a : $V_0 = |q_e|/2\epsilon (N_d W_n^2 + N_a W_p^2)$

□ $\rightarrow V_0$ est une caractéristique du semi-conducteur utilisé

□ La barrière de potentiel $V_0 \sim 0.7$ V pour le Si et ~ 0.3 V pour le Ge

Dans la couche de déplétion toute paire de porteurs thermiques migrera rapidement sous l'effet du champ $E \rightarrow$ existence d'un faible courant de fuite (quelques dizaines de nA)

La diode à jonction: polarisation

■ Jonction à l'équilibre:

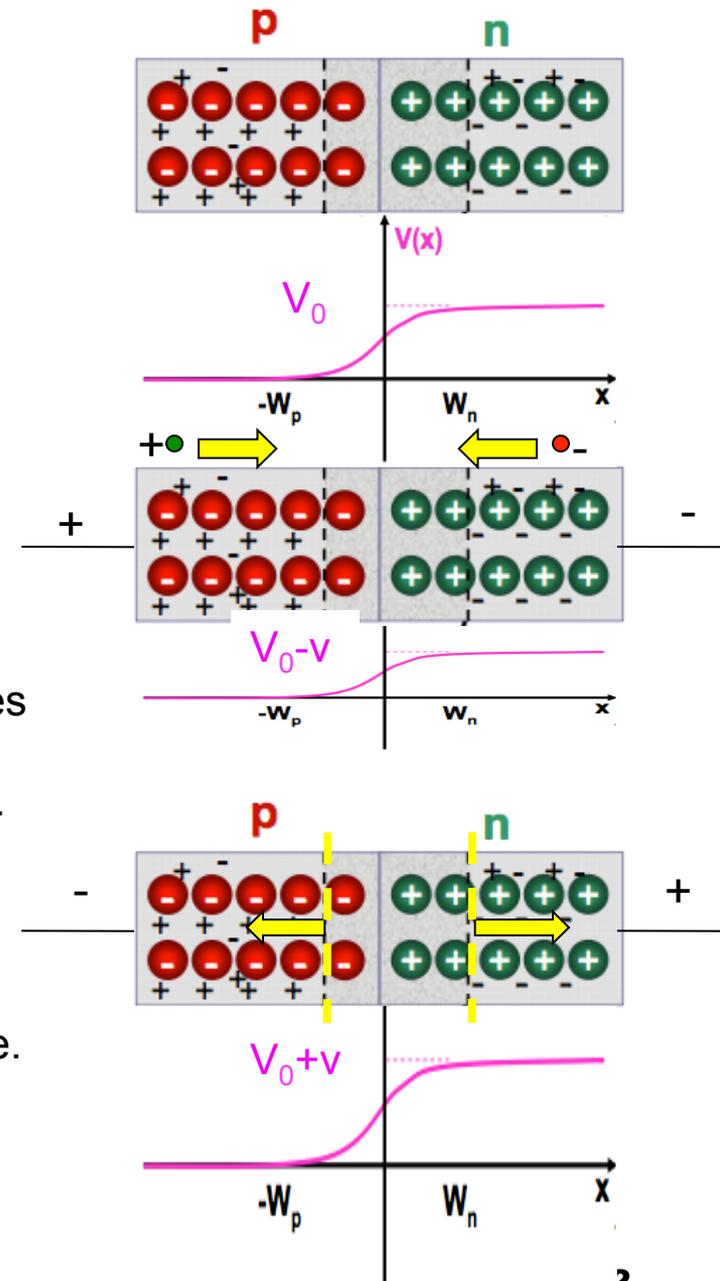
■ A présent polarisons notre jonction, en appliquant une différence de potentiel v :

□ Pôles + branchés à la région p (sens direct)

- La différence de potentiel (ddp) qui existait est réduite; elle vaut $V_0 - v$
- La borne positive repousse les trous vers la jonction où ils rencontrent les électrons repoussés par la borne négative. Un petit courant traverse ainsi la diode. La couche de déplétion se rétrécit.

□ Pôles - branchés à la région p (sens inverse)

- La ddp est augmentée; elle vaut $V_0 + v$
- Les électrons sont attirés de la jonction vers la borne positive, et les trous vers la borne négative. La zone de déplétion s'épaissit et seul un très faible courant peut traverser la diode.



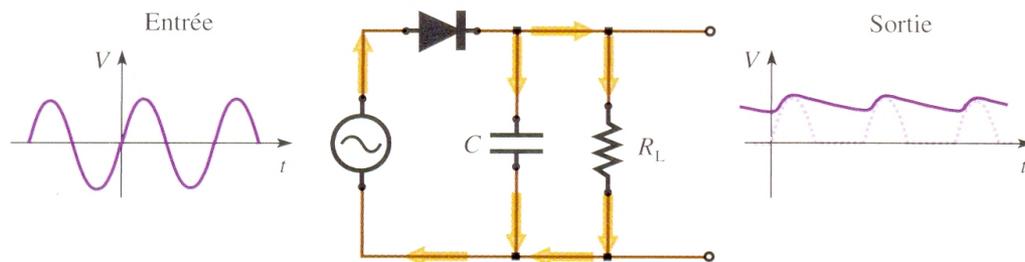
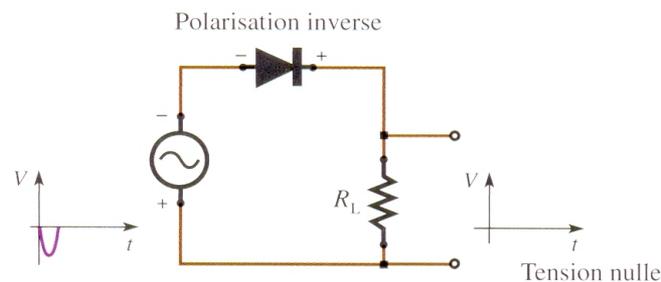
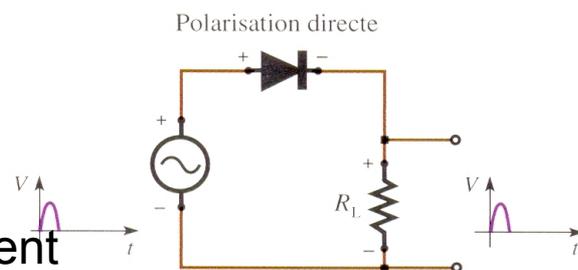
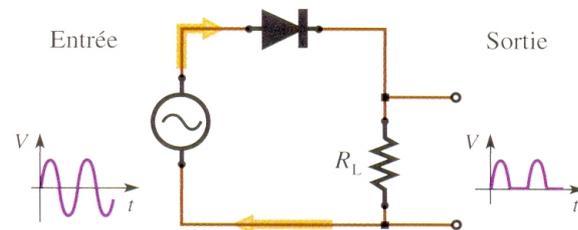
Application aux courants alternatifs : le redressement

Un grand nombre d'appareils électriques ont besoin d'un courant continu; des redresseurs sont donc nécessaires pour les alimenter à partir d'une source alternative.

La diode à jonction est un redresseur simple

- Seule la partie positive du signal traverse la diode
- Si on ajoute un condensateur en parallèle avec R_L ,

La tension est positive et augmente pendant qu'il se charge. Lorsque la tension commence à diminuer, il se décharge à travers la résistance. Avec une longue constante de temps (RC), cette décharge sera tellement lente que la prochaine crête positive interrompt la décharge. La tension de sortie n'est pas exactement constante. Ce circuit est appelé redresseur simple.



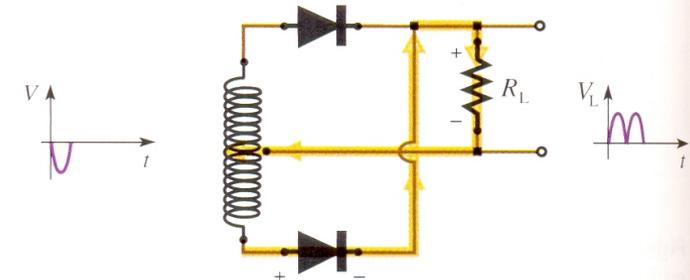
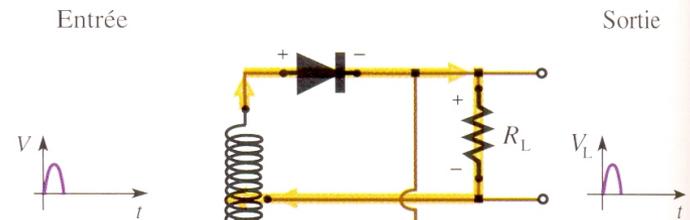
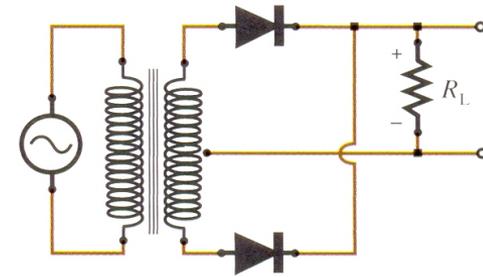
Si nous utilisons le modèle pratique de la diode, la tension de sortie est égale à la tension d'entrée diminuée de $\sim 0,7$ V (barrière de potentiel) 14

Redresseur double alternance

- Plus couramment utilisé dans les adaptateurs : le redresseur à double alternance avec 2 diodes et deux bobines
Le sens du courant dans la résistance est le même indépendamment du signe de la tension d'entrée.

-  la tension maximale de sortie va dépendre du rapport des nombres de spires (cf. le transformateur)

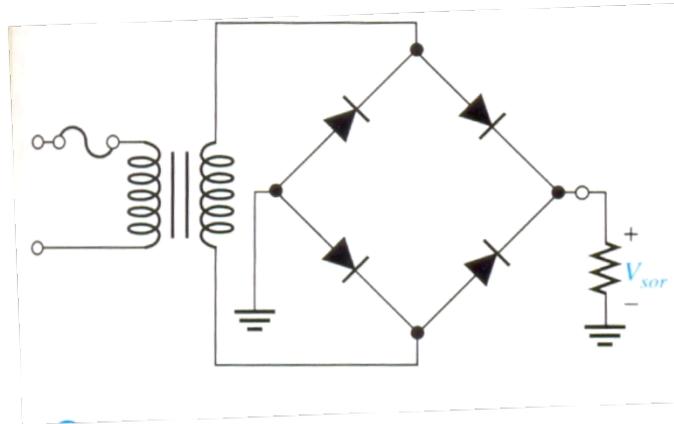
- Le signal de sortie n'est pas filtré; il pourrait l'être en ajoutant un condensateur



Redresseur double alternance en pont

Le pont de Graetz:

- Avec 4 diodes et un transformateur conventionnel



□ Exercice:

- Comment fonctionne-t'il ?

■ Diode Zener ()

- L'effet Zener est un peu différent du processus d'avalanche: si le champ E est suffisamment élevé, des électrons de la bande de valence passent spontanément dans la bande de conduction (pas besoin de collisions entre les porteurs et le réseau cristallin). Ce phénomène conduit à une multiplication rapide du nombre de porteurs de charge et on observe une brusque augmentation du courant inverse.
- Le processus d'avalanche ou l'effet Zener, s'il sont non destructifs, pour autant que la puissance dissipée ne dépasse pas une certaine limite, sont réversibles. Une diode Zener est conçue pour être opérée en polarisation inverse; elle est caractérisée par une tension remarquablement stable.

■ Diode Schottky ()

- Elle utilise une jonction métal-semiconducteur. Sa particularité est d'avoir un faible seuil de tension directe (0.15-0.45V). Cela leur permet grande rapidité de commutation, ce qui l'a rend très adaptée à la détection de signaux radio-fréquence (RF)

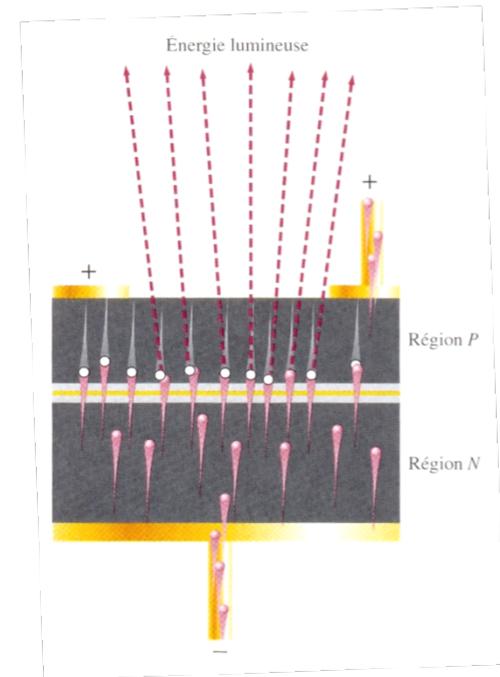
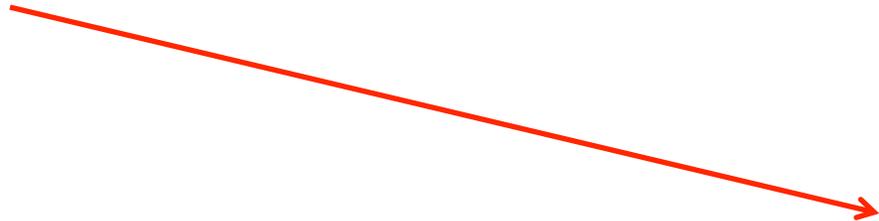
Diode électroluminescente ou LED



- Les recombinaisons électron-trou dans la jonction libèrent de l'énergie sous forme de lumière (électroluminescence)

- Différentes impuretés sont ajoutées lors du dopage pour établir la longueur d'onde de la lumière visible (ou infrarouge)

- Note: la lumière doit sortir du matériau => rendement interne faible si on n'adapte pas la géométrie



- La quantité de lumière est directement proportionnelle au courant traversant la diode

- Applications:

- Témoins lumineux

- Télécommande (infrarouge)

- Cellules photo-électriques

- Signaux routiers, éclairage (les LED permettent des économies d'énergie, mais ce sont surtout les coûts de maintenance qui baissent, du fait de leur robustesse.)

- ...

Évolution des couleurs des LED:

- La diode bleue n'apparaît sur le marché qu'en 1990 !
- Cette importante avancée permit le développement de la diode blanche, point de départ de nouvelles applications majeures : éclairage, écrans de téléviseurs et d'ordinateurs.

Evolution of Light-Emitting Diode Efficiency

