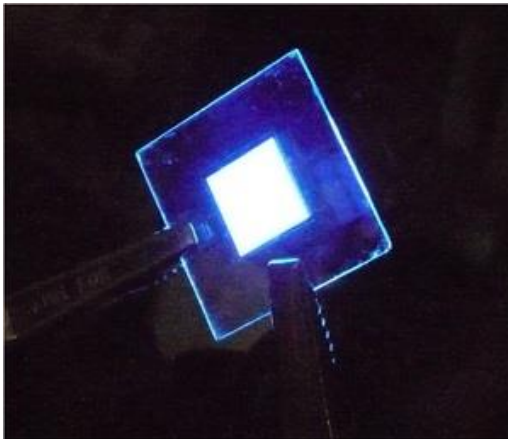
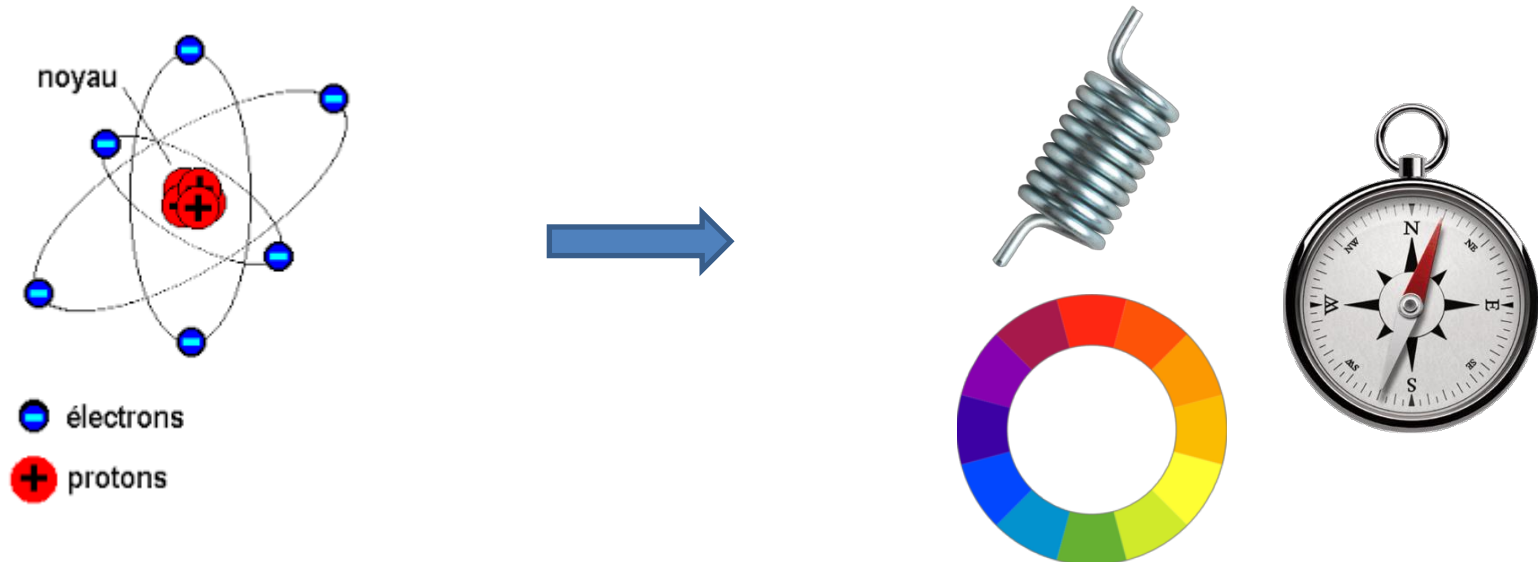


Physique du solide



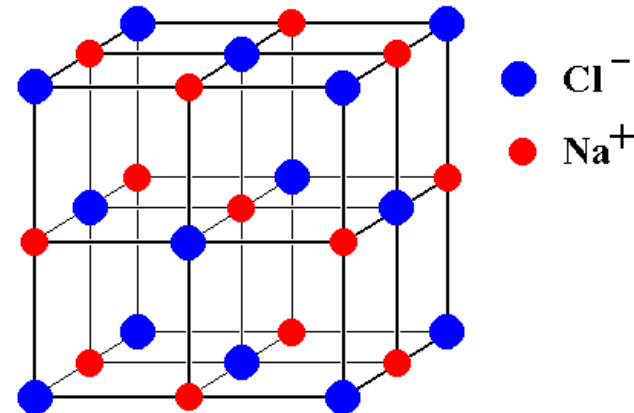
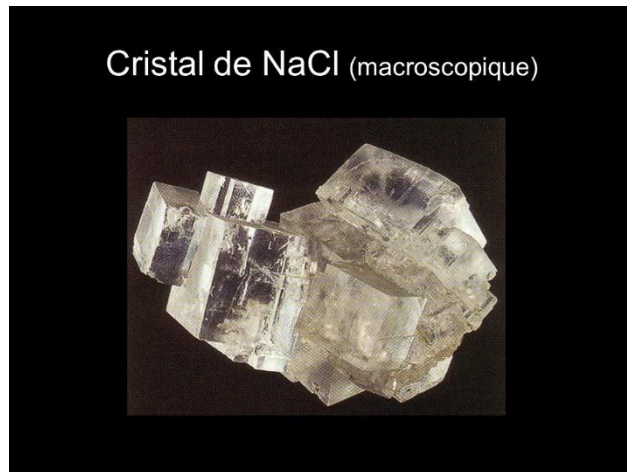
La physique du solide, qu'est-ce que c'est ?

Etude des propriétés fondamentales des matériaux solides
en **partant des propriétés à l'échelle atomique** pour
remonter aux propriétés à l'échelle macroscopique



Ce cours : étude des solides **cristallins**

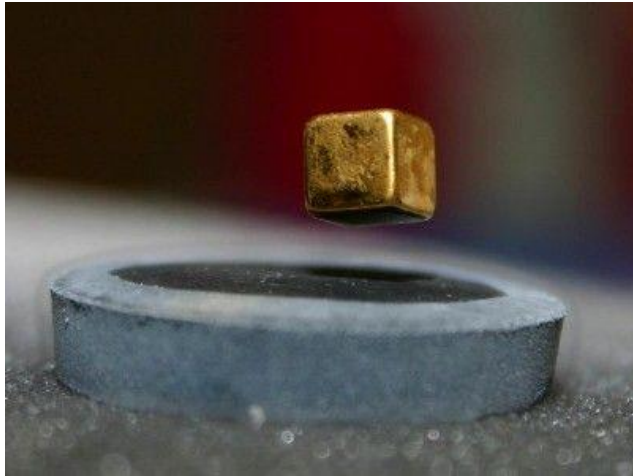
- *Métaux*
- *Cristaux ioniques (NaCl, nombreux oxydes ...)*
- *Cristaux covalents (diamant, silicium, germanium...)*



→ **Simplification théorique grâce à la périodicité du réseau cristallin**

La physique du solide, un domaine de recherche actif

~ un prix Nobel tous les 2 ans en lien avec ce domaine



Nobel 2022

Alain Aspect, John F. Clauser et Anton Zeilinger

"for experiments with **entangled photons**, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering **quantum information science**"

SUPRACONDUCTIVITE
ET LEVITATION

Au coeur des applications d'aujourd'hui et de demain

Nouveaux matériaux, miniaturisation, nouvelles fonctions ...

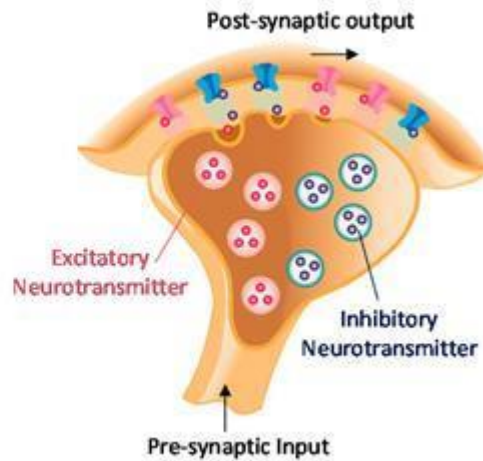
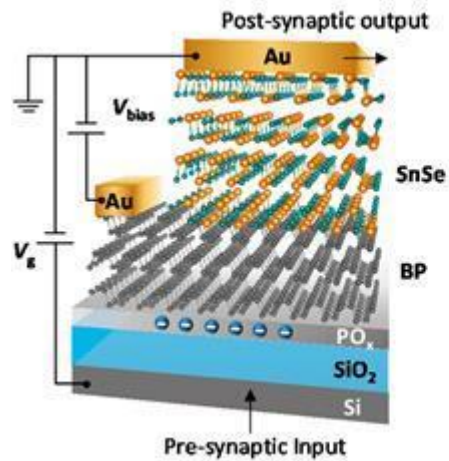


PHOTOVOLTAIQUE

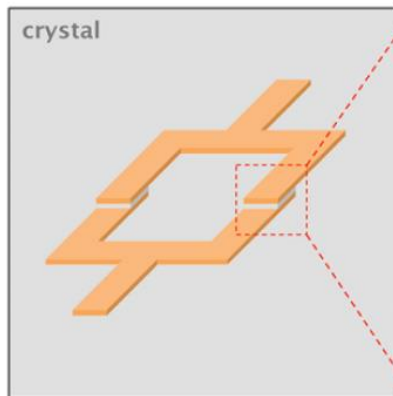
NANOTECHNOLOGIE



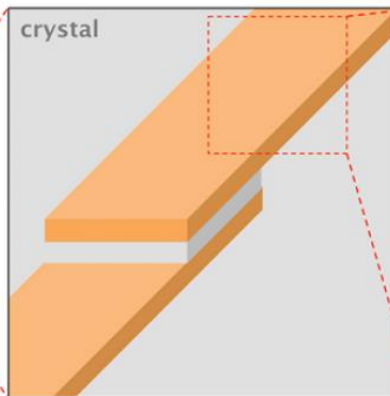
Au coeur des applications d'aujourd'hui et de demain



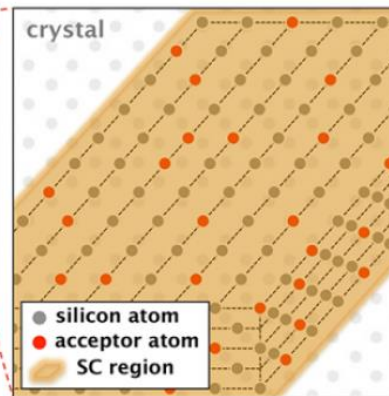
CIRCUITS
NEUROMORPHIQUES



Superconducting qubit
or SQUID sensor



Josephson tunnel
junction



Superconducting-
silicon "wire"

COMMUNICATION
QUANTIQUE

L'équipe enseignante

7 enseignant-e-s chercheur-euse-s Junia-IEMN dont 4 CNRS

Bruno Grandidier bruno.grandidier@junia.com / C662

Charles Croenne charles.croenne@junia.com / C354

David Mele david.mele@junia.com / C663

Isabelle Lefebvre isabelle.lebvre@junia.com / C667

Kekeli N'Konou kekeli.nkonou@junia.com / C666

Xavier Wallart xavier.wallart@junia.com / C662

Pascale Diener pascale.diener@junia.com / C664


Dates et modalités d'évaluation


8 cours et 8 TDs


TROIS EPREUVES


Interrogation	1H	date à préciser
Devoir surveillé	2H	date à préciser
Examen	3H	date à préciser


Cours et poly de TD sur Teams



Intranet



Activité



Conversation


Devoirs


Équipes


Calendrier

 Toutes les équipes




JUNIA_Physique du Sol... ...

Bloc-notes pour la classe

Devoirs



Évaluations

Insights

**Général** Publications Fichiers +

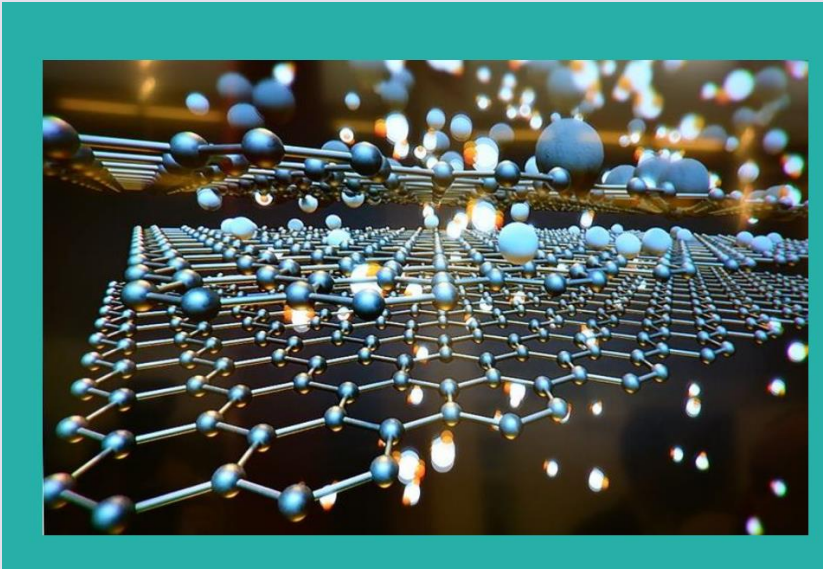
+ Nouveau ▾ ⬆️ Charger ▾ ↻ Synchroniser 🔗 Copier le lien ⬇️ Télécharger

Documents > **General**

 Nom ▾	Modifié ▾	Modifié par ▾
 Supports de cours		Pascale DIENER

Cours aussi disponible sur dokeos

Physique du Solide - 3ème Année ISEN -



https://dokeos.junia.com/fr/users/sign_in

Cours identique au cours en présentiel
Cours à suivre en présentiel et/ou sur Dokeos
!! La presence en TDs reste obligatoire

Pourquoi un cours en ligne ?

Objectifs

Garder le présentiel, tirer profit du numérique
pour un enseignement adapté à chacun

Apprendre à s'auto-instruire

Acquérir la discipline et la technicité nécessaires pour plus tard utiliser au mieux les ressources en ligne type MOOC

8 module Dokeos composé de
5-10 vidéo courtes (2 à 10mn)+ questions type QCM



A - Question 2

La capacité thermique est principalement liée :

- ☐ Aux vibrations du réseau cristallin
- ☐ A l'émission d'électrons
- ☐ A l'absorption de photons

Plan du cours

8 cours + 8 TDs

Panorama : semiconducteurs sans équations, du fondamental aux applications

Notions de base : cristallographie, modèle de Drude

Description quantique des électrons dans un solide

Structure de bandes électroniques (2 cours)

Phonons

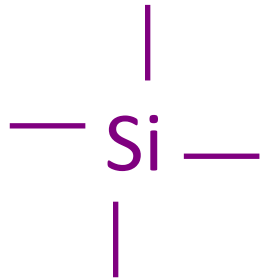
Semiconducteurs, propriétés électriques et optiques (2 cours)

Options de M1 à l'ISEN

- Physique des semiconducteurs
- Technologies quantiques
- Manipulation des Ondes et Composants
- Récupération d'énergie
- Communication quantique

Semiconducteurs sans équations

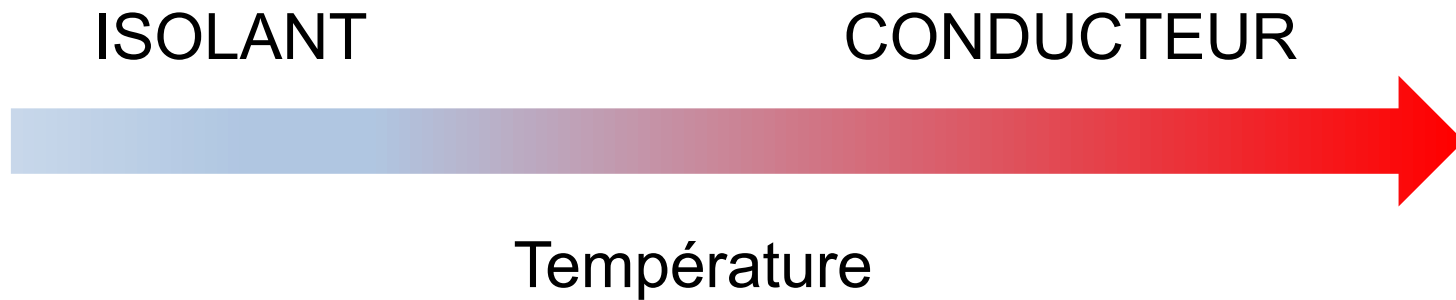
Du fondamental aux applications



Plan du cours :

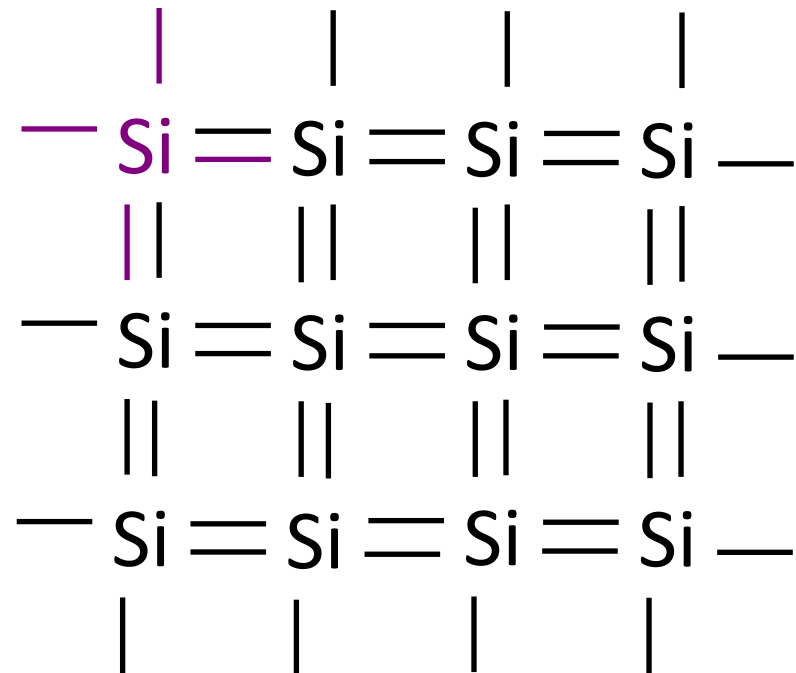
- Introduction à la physique du solide
- A. Semi-conducteur : une première définition
- B. Diagramme d'énergie
- C. Dopage
- D. Semiconducteurs usuels
- E. Jonctions PN
- F. LED
- G. Cellules solaires
- H. Transistors
- Résumé

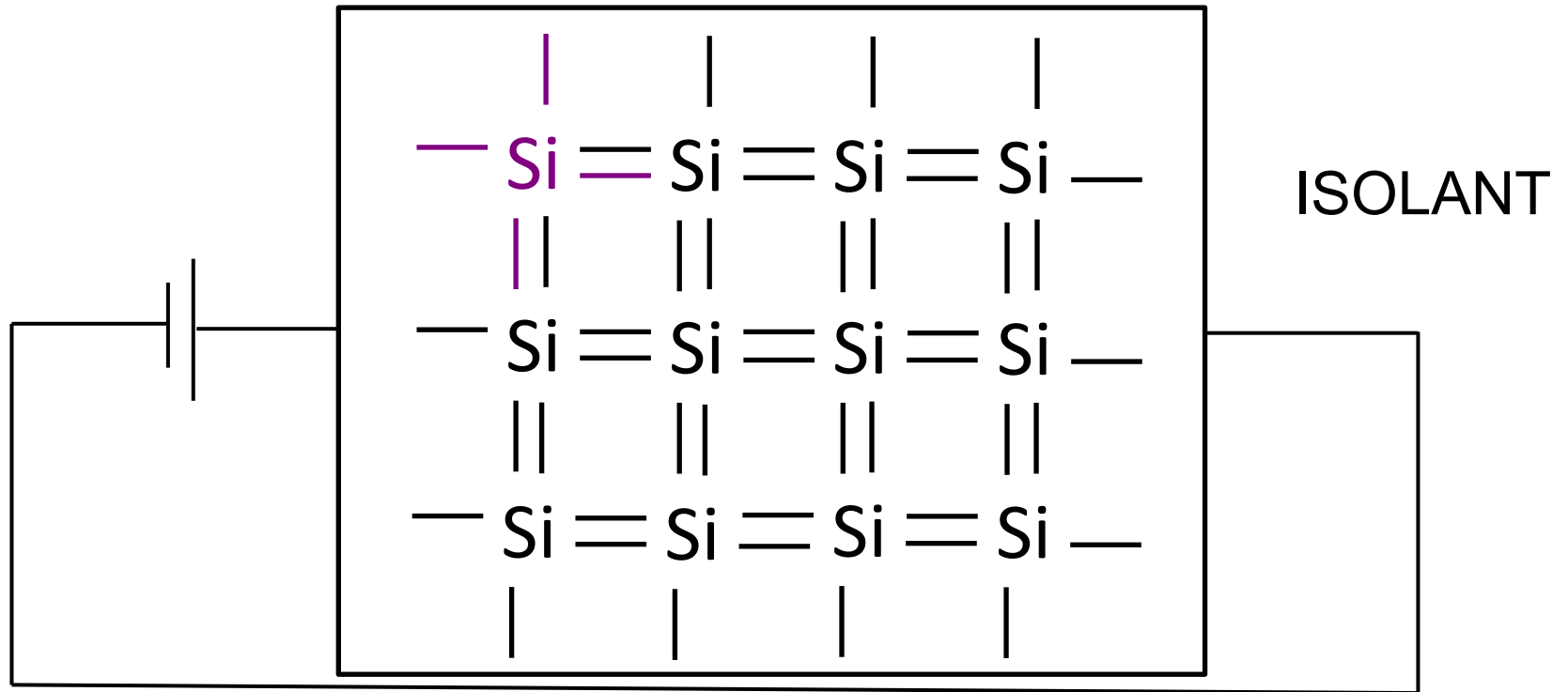
A. Qu'est-ce qu'un semiconducteur ?



Semiconducteur : matériau isolant à basse température et conducteur à haute température

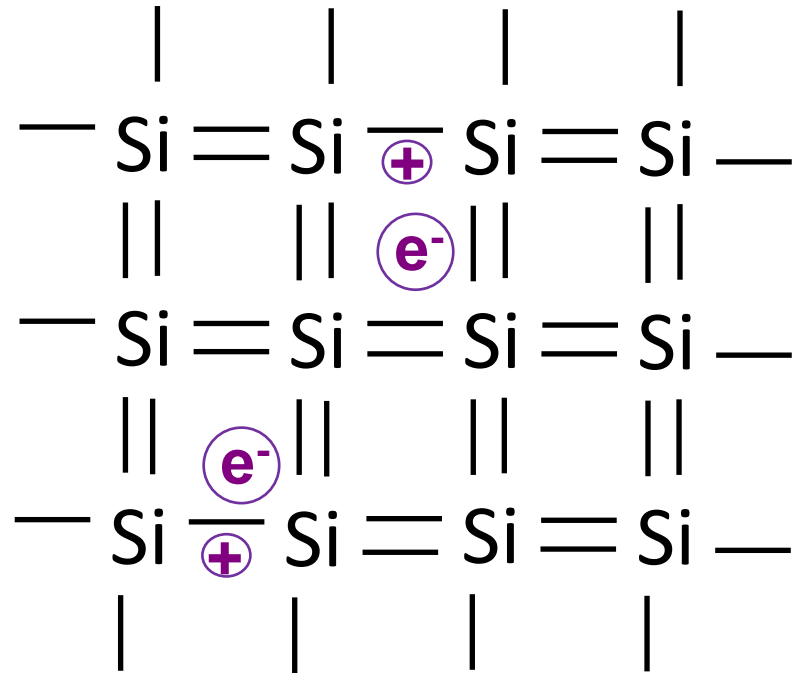
Exemple : silicium





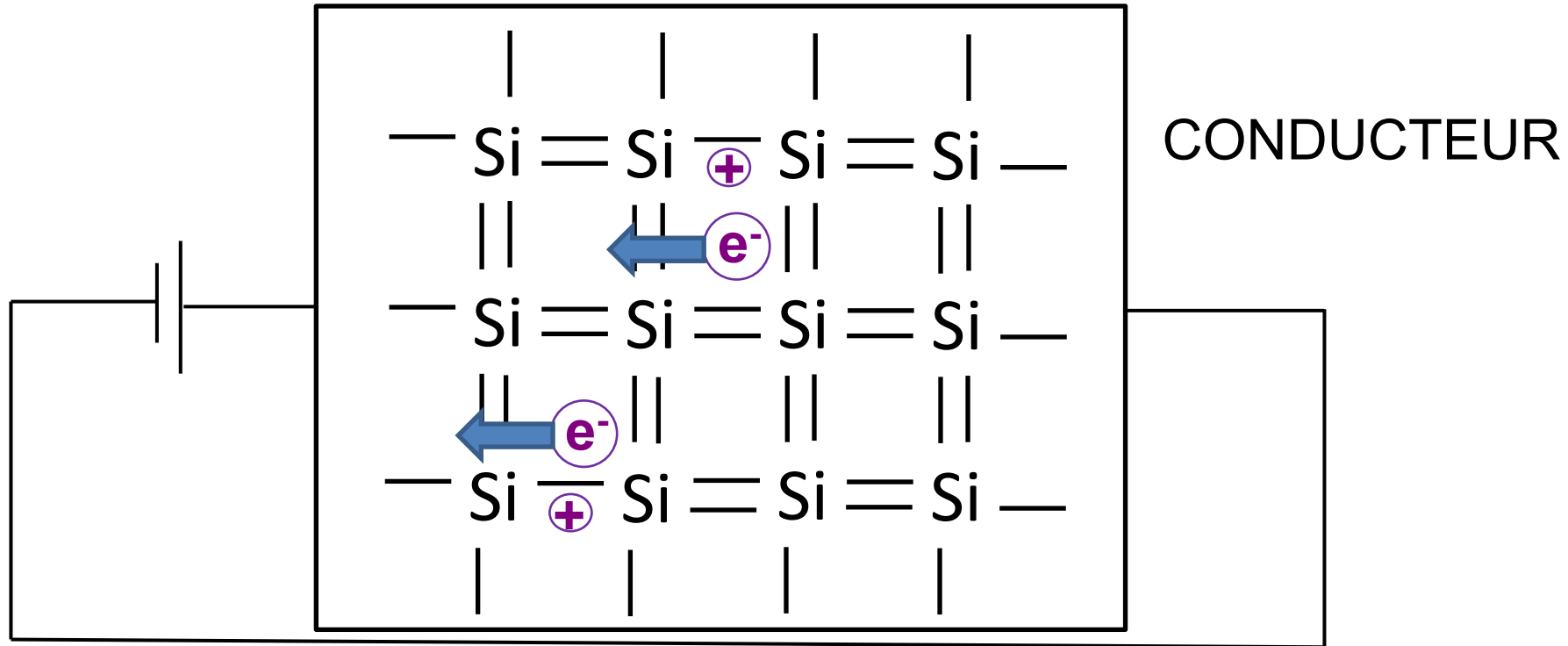
Il n'y a donc pas d'électrons en plus disponibles pour la conduction

Lorsqu'on chauffe



Avec la température, certains liens sont cassés, apparition de charges libres

Lorsqu'on chauffe

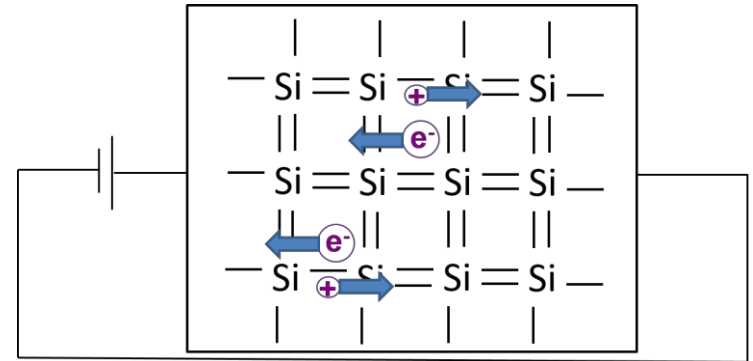


Les charges libres se déplacent lorsqu'on applique une tension : conduction

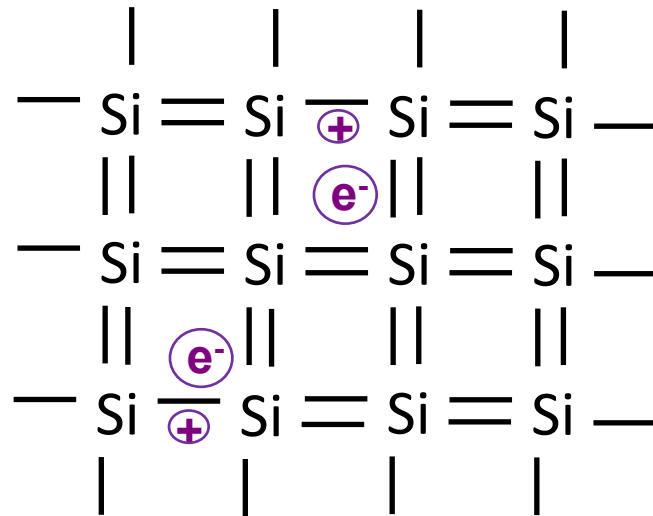
Remarque

La conduction apparaît lorsqu'on libère des charges

- avec la température
ou
- par absorption de lumière
ou
- avec une forte tension électrique

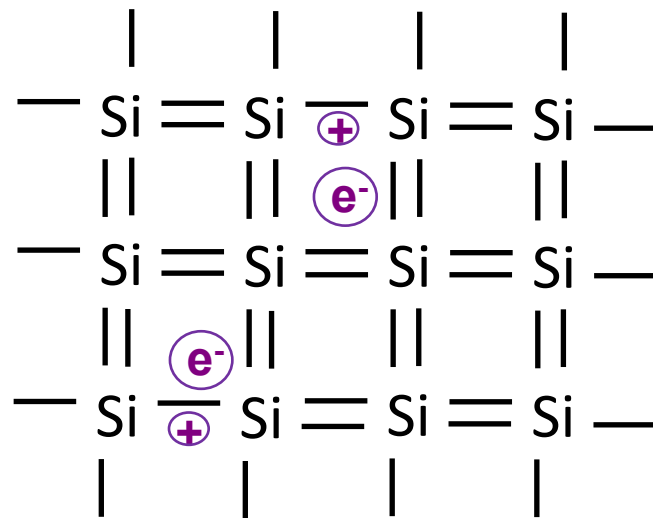


a. Un semiconducteur est un composé **conducteur/isolant** à basse température et **conducteur/isolant** à haute température



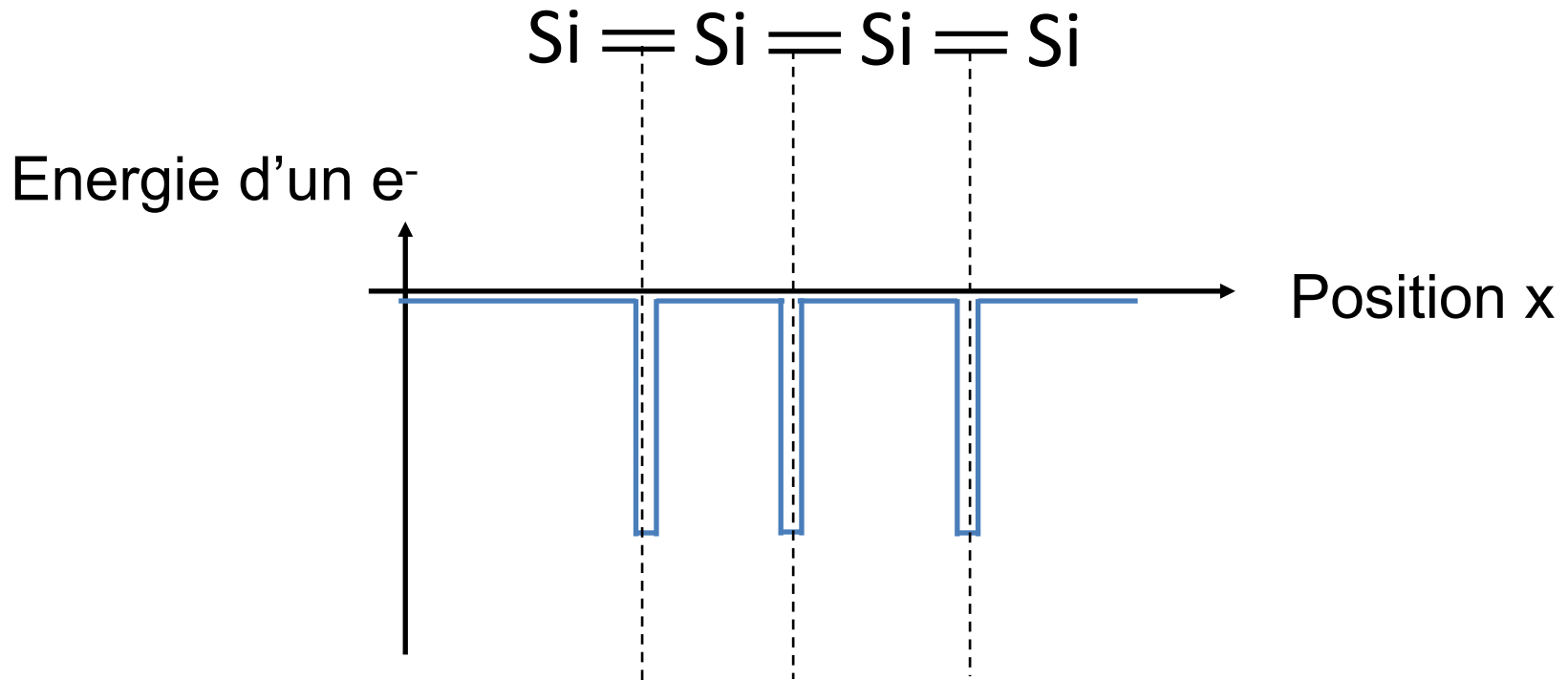
a. Réponse. Un semiconducteur est un composé **isolant** à basse température et **conducteur** à haute température

Explication. Certains des électrons qui participent à la cohésion atomique sont libérés avec l'agitation thermique et conduisent l'électricité

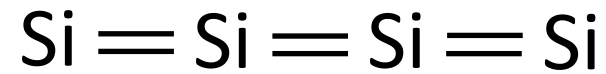


B. Diagramme d'énergie d'un semiconducteur

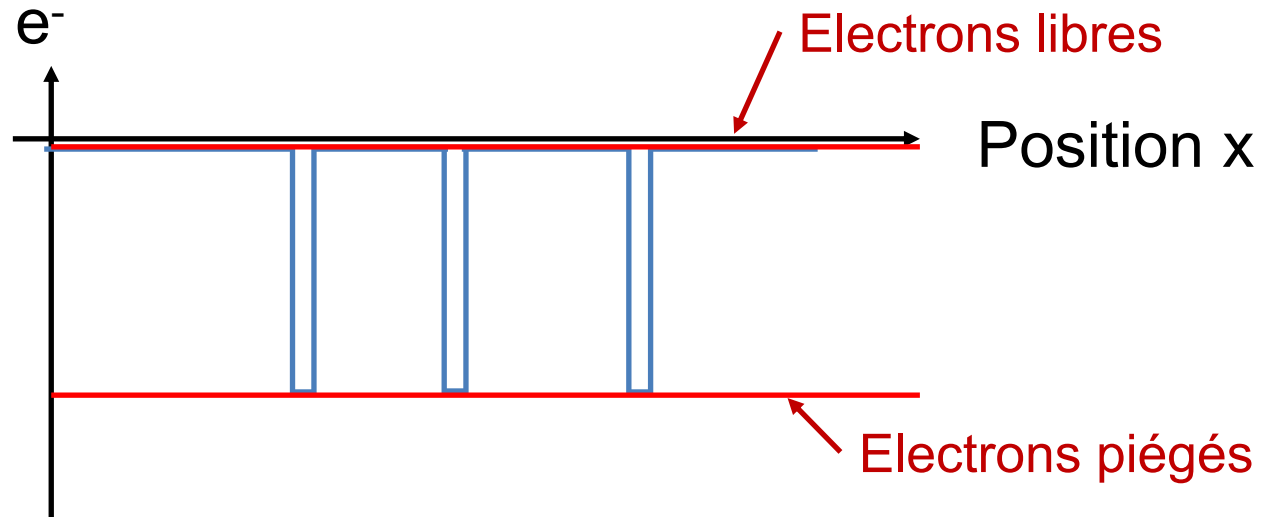
Une première approche qualitative

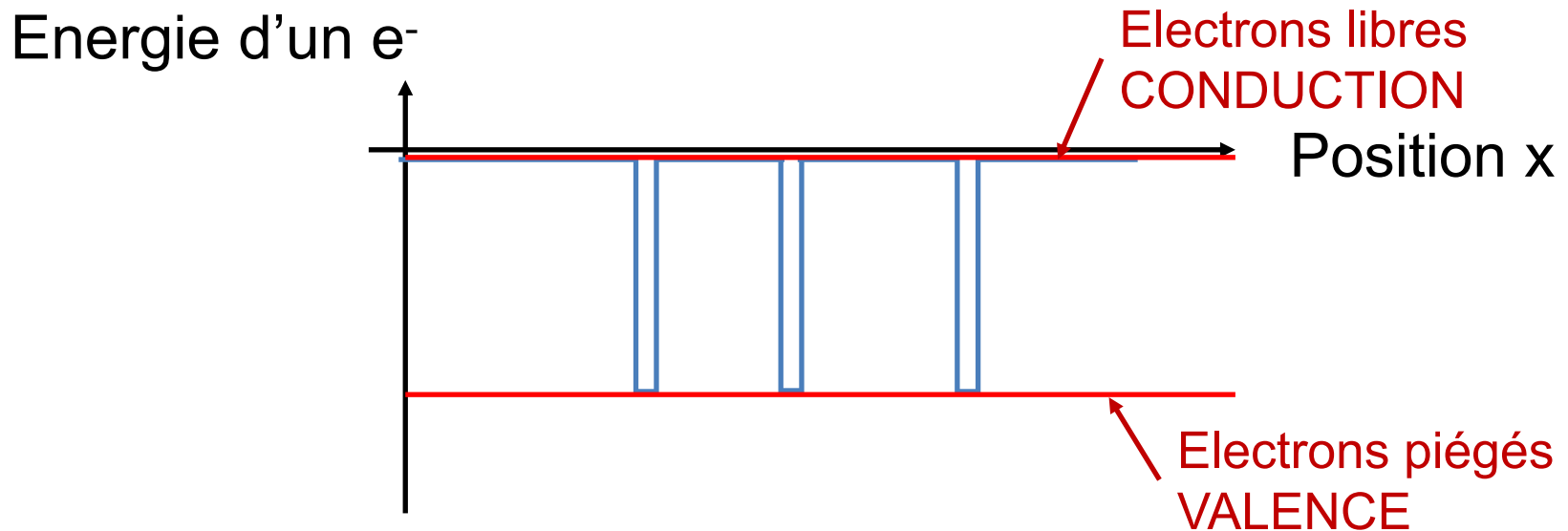
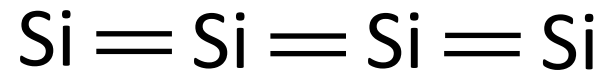


Les électrons sont piégés entre les atomes Si = puits de potentiel



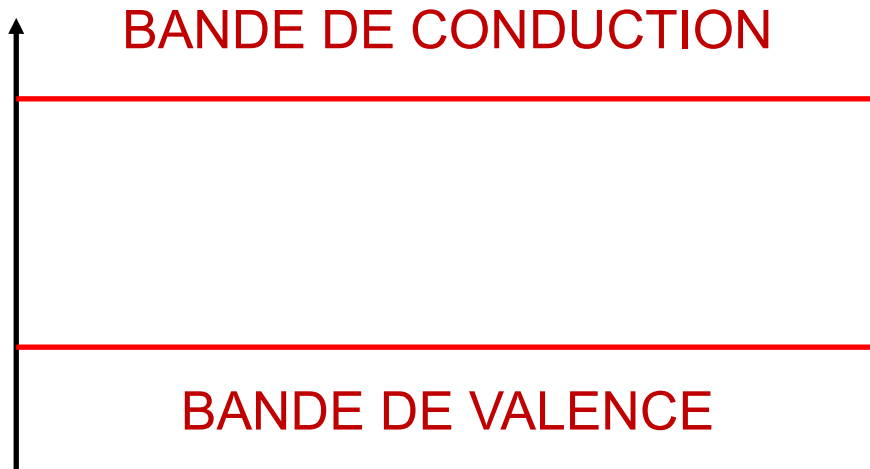
Energie d'un e^-





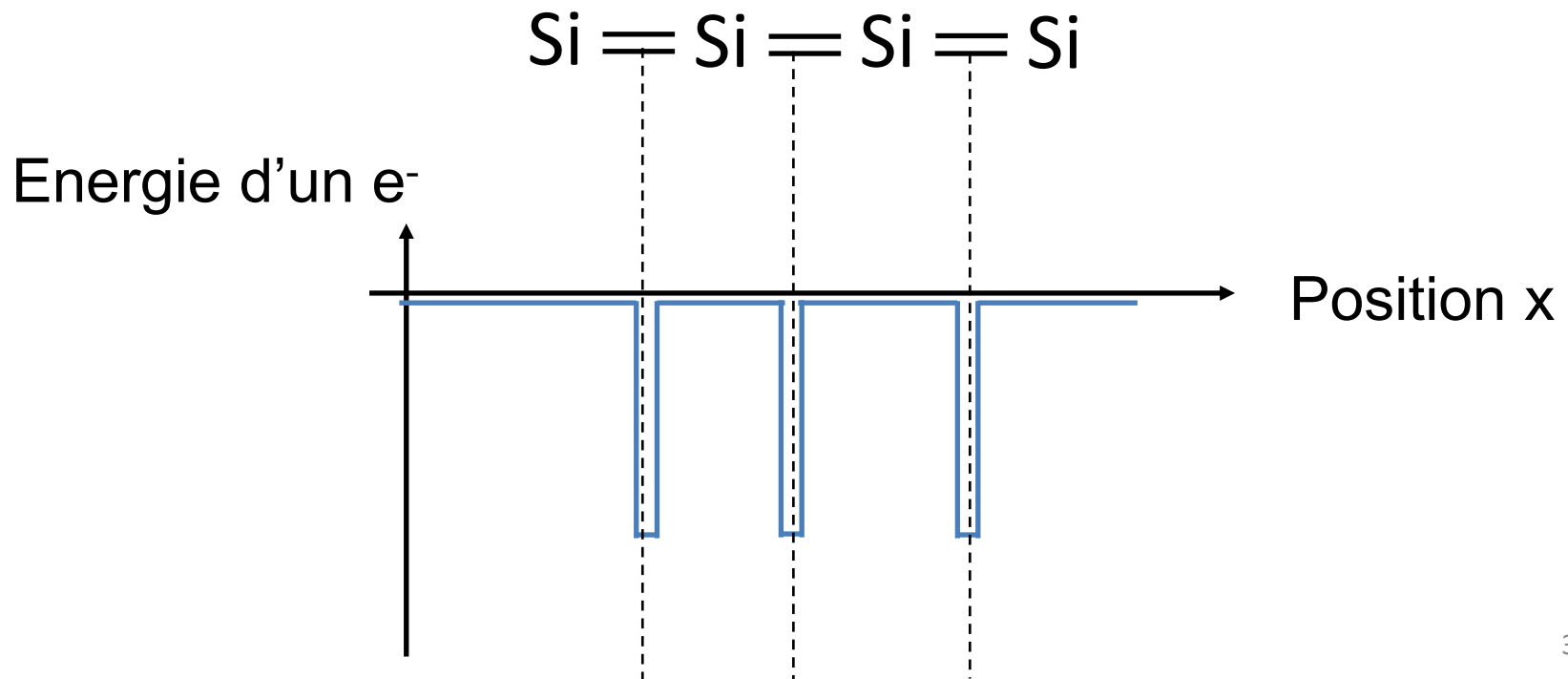
Structure de bande d'un semiconducteur

Energie



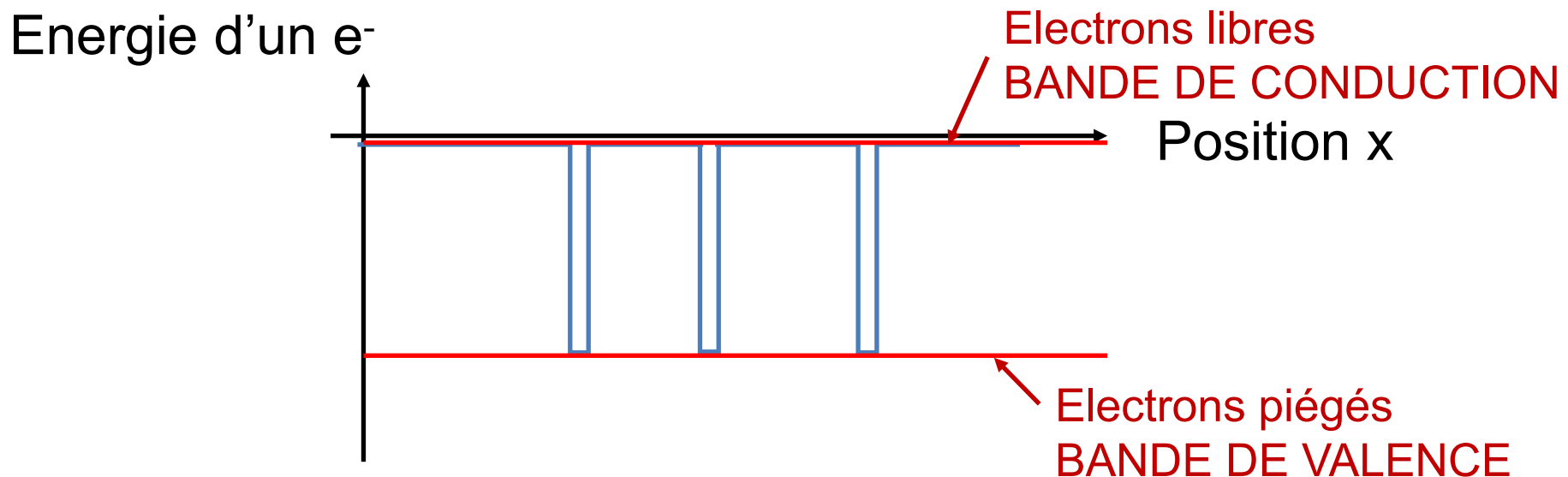
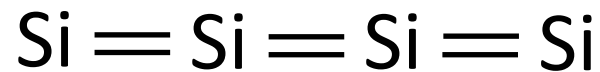
Il existe deux énergies caractéristiques dans un semi-conducteur ; l'énergie des électrons libres et celle des électrons piégés. L'énergie des électrons piégés est :

- a. Plus basse que celle des électrons libres
- b. Plus haute que celle des électrons libres



Réponse. L'énergie des électrons piégés est :

a. Plus basse que celle des électrons libres



Les électrons sont piégés entre les atomes Si = puits de potentiel

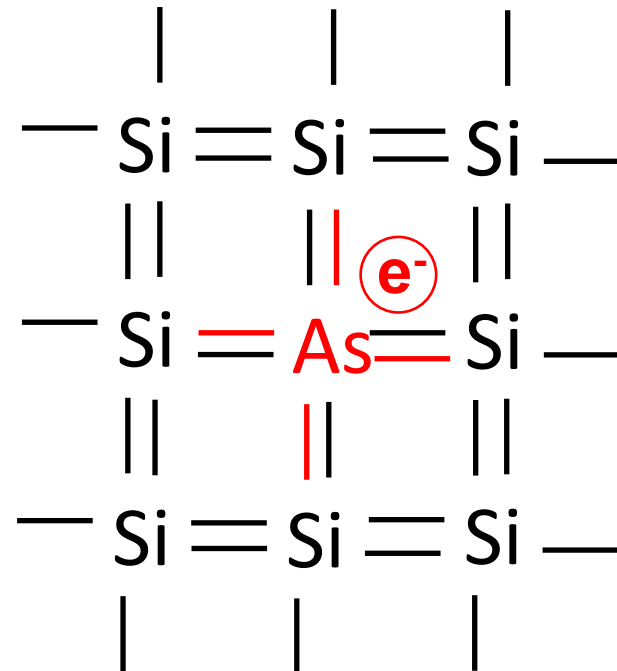
C. Dopage d'un semiconducteur

pour rendre un semiconducteur conducteur à température ambiante

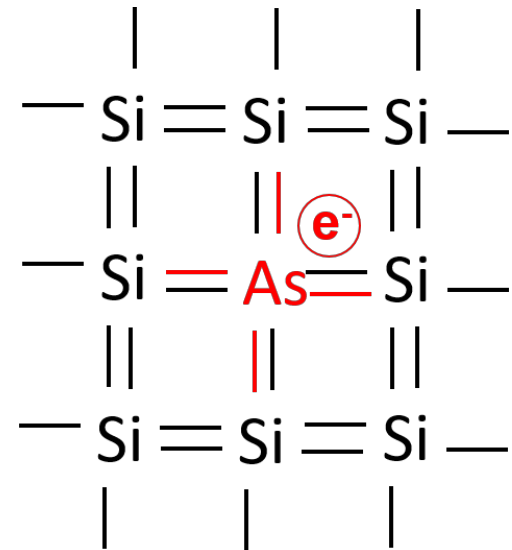
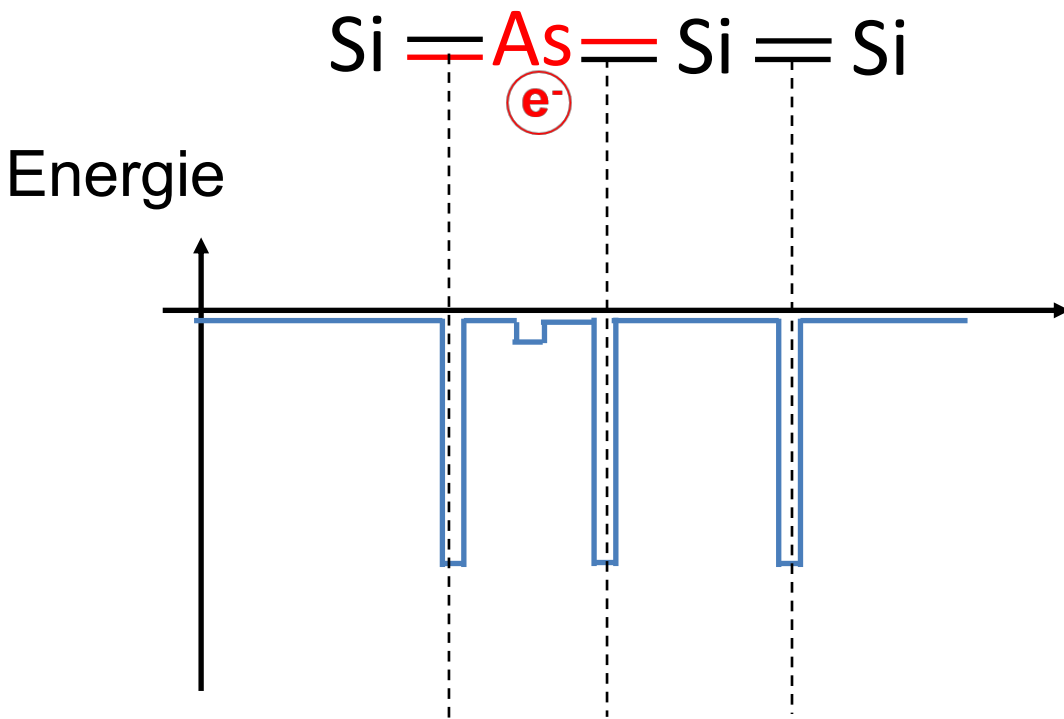
Exemple : dopage Si par As

As : 5 e⁻ (groupe V)

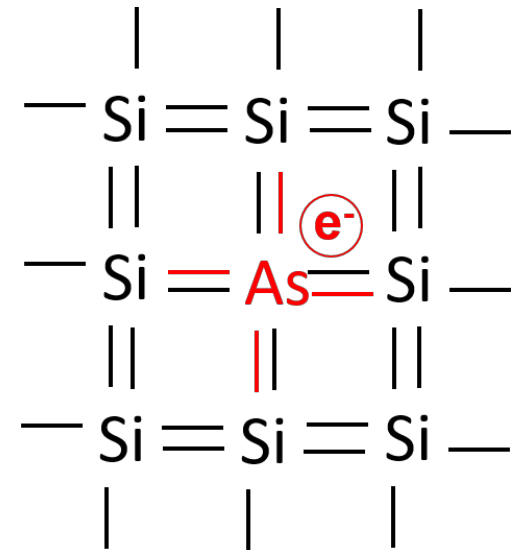
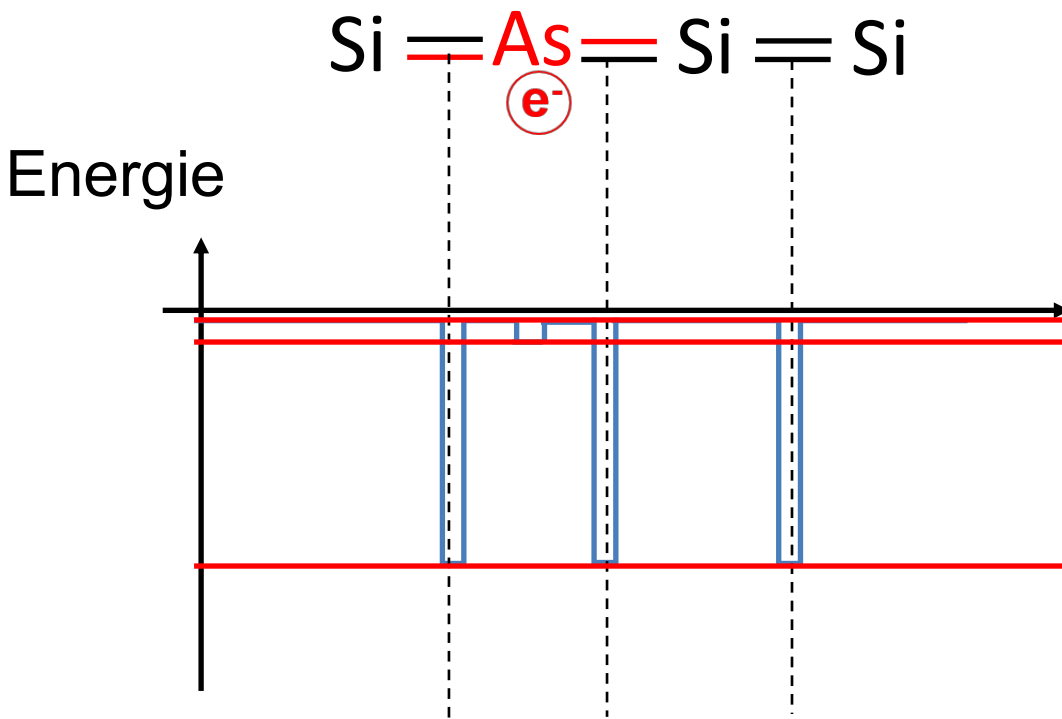
IIIA	IVA	VA
5 B	6 C	7 N
13 Al	14 Si	15 P
31 Ga	32 Ge	33 As



Dopage : implantation d'atomes correctement sélectionnés (nommés impuretés) pour augmenter le nombre de charges disponibles : 1 e⁻ en plus par atome As. 35

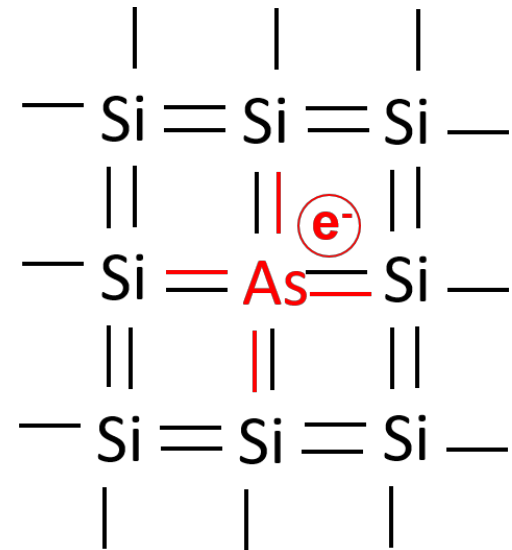
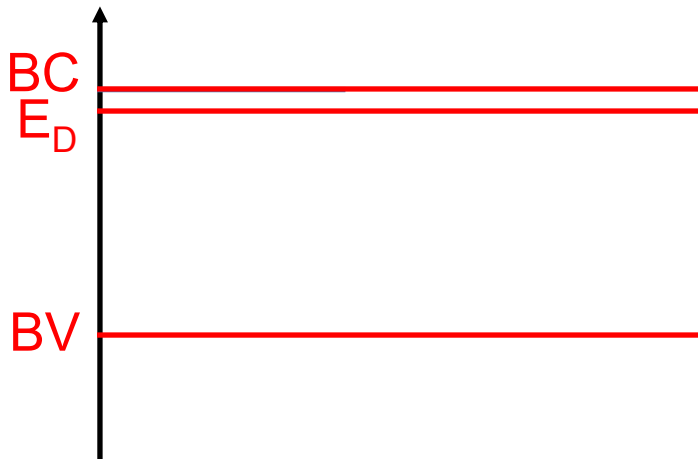


Les électrons supplémentaires issus du dopage sont très faiblement piégés



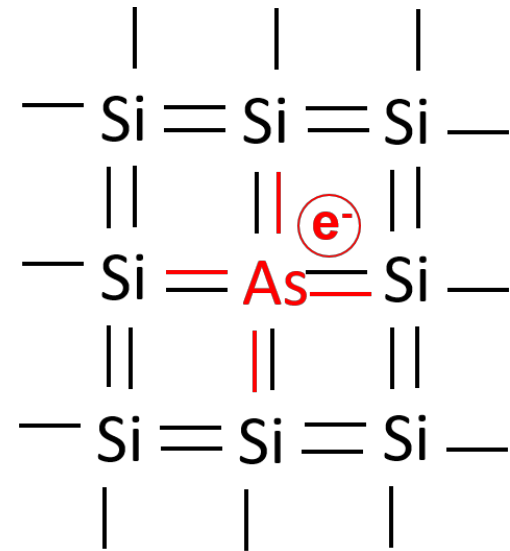
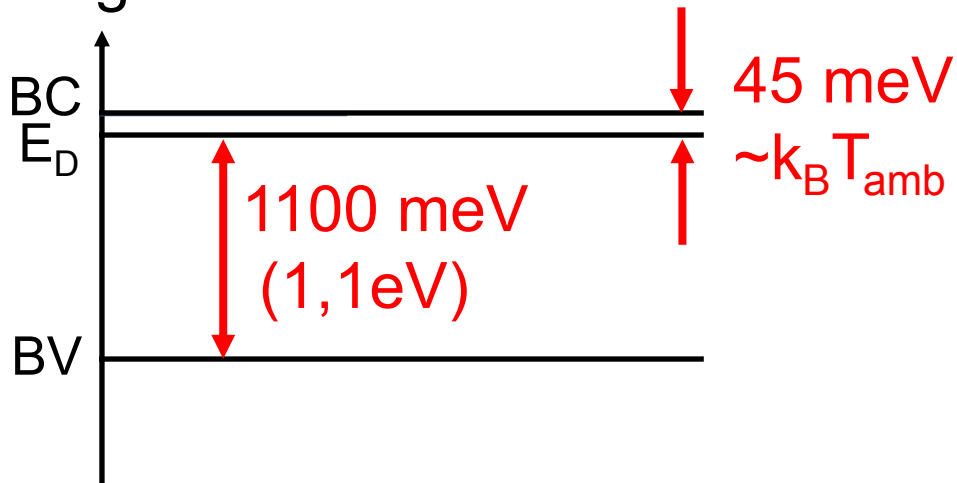
Le dopage As donne lieu à une énergie caractéristique supplémentaire, en dessous de la bande de conduction

Energie



E_D : niveau d'énergie "donneur" car l'arsenic donne un électron

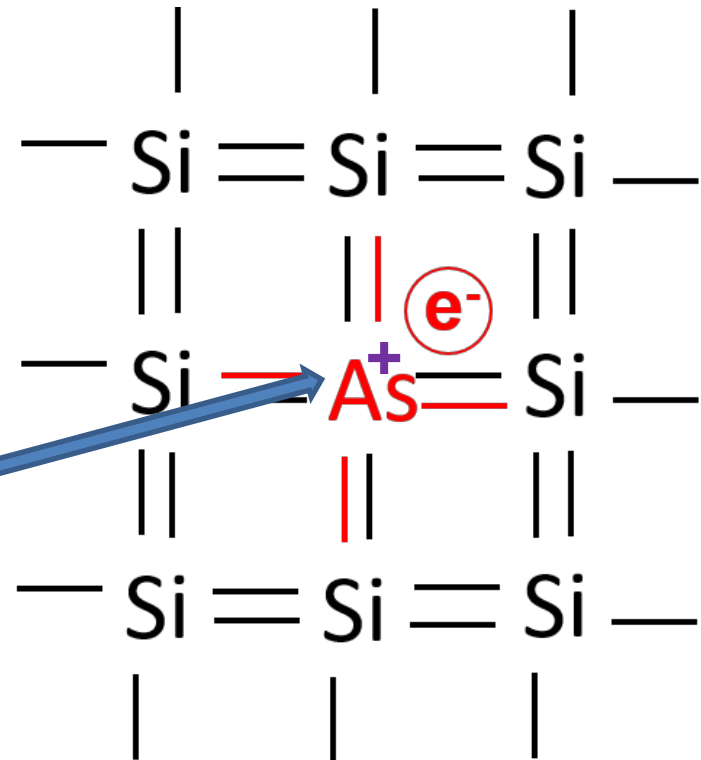
Energie



A temperature ambiante, les électrons issus des atomes donneurs sont libres

Remarque importante pour la suite :

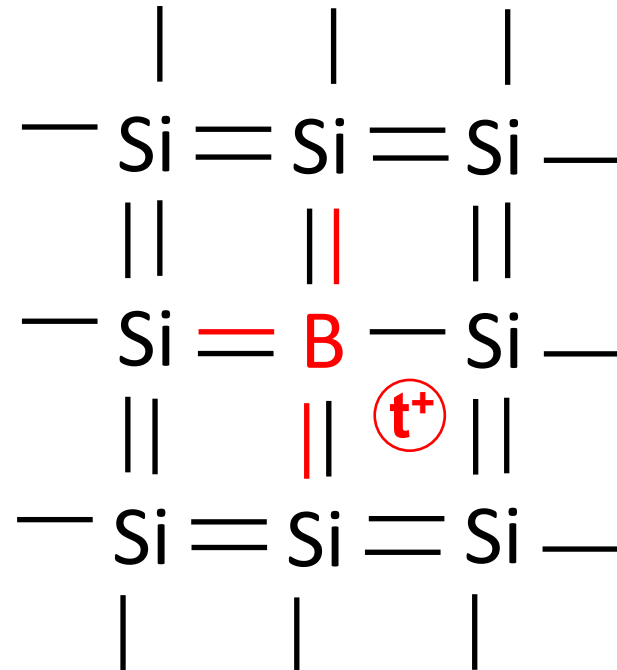
Lorsque l'e- de l'atome As
se déplace par conduction,
il laisse un **ion As chargé +**



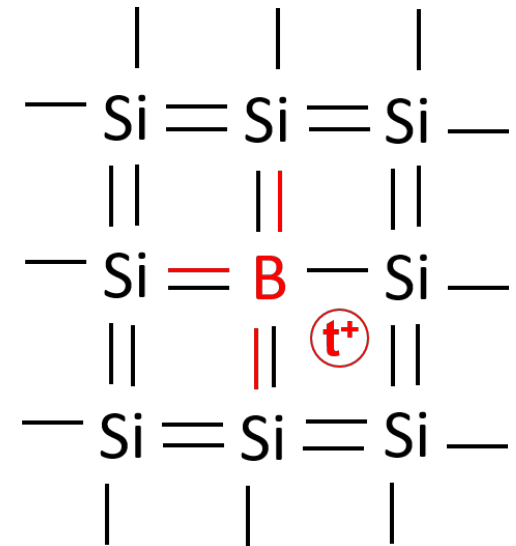
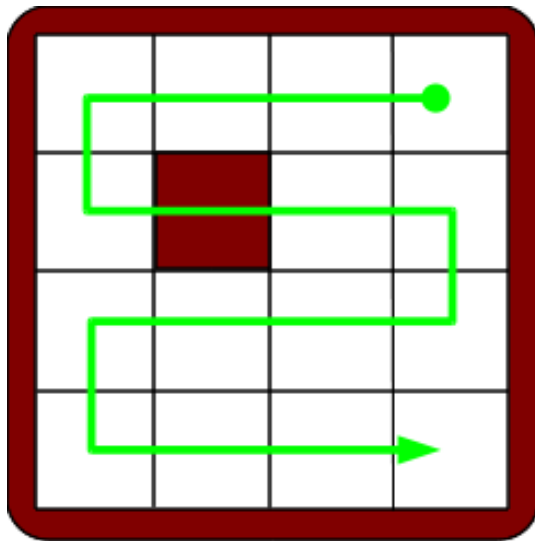
Exemple 2 : dopage Si par B

B : 3 e^- (groupe V)

IIIA	IVA	VA
5 B	6 C	7 N
13 Al	14 Si	15 P
31 Ga	32 Ge	33 As



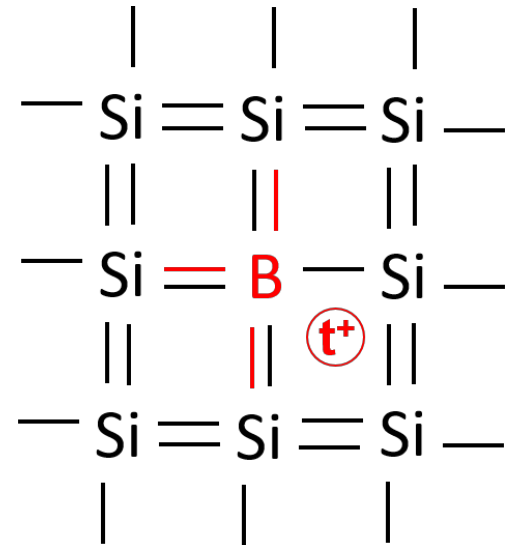
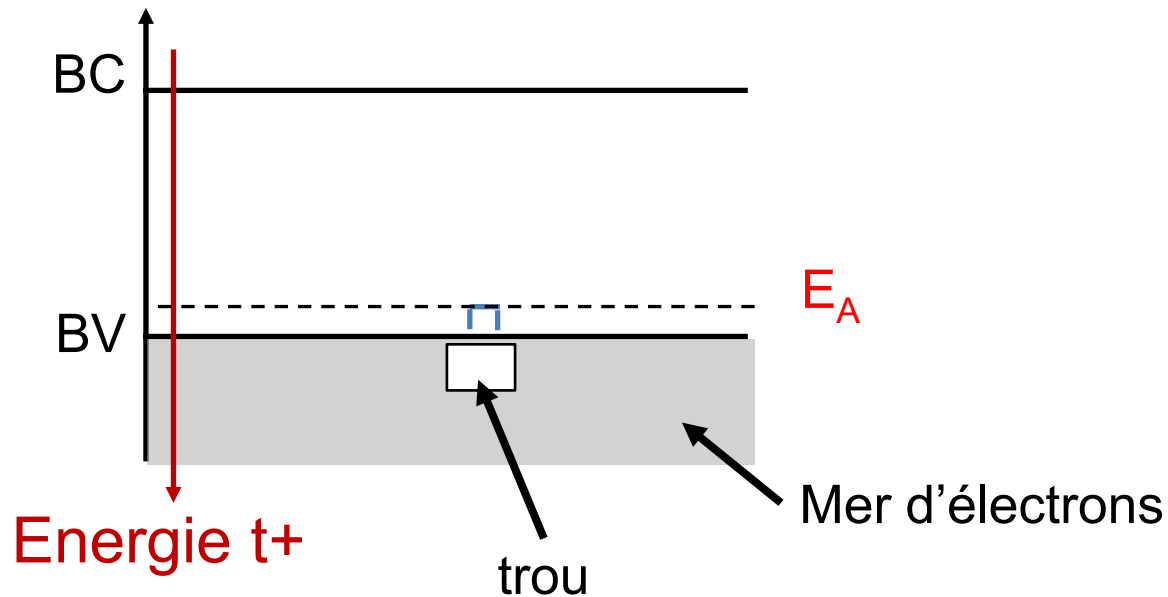
Il manque un electron
= présence d'un "trou" / d'une charge positive "t⁺"



Concept de conduction par les “trous” : jeu de taquin

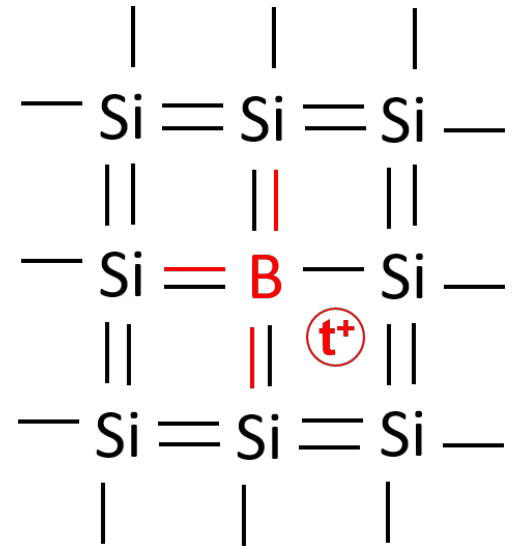
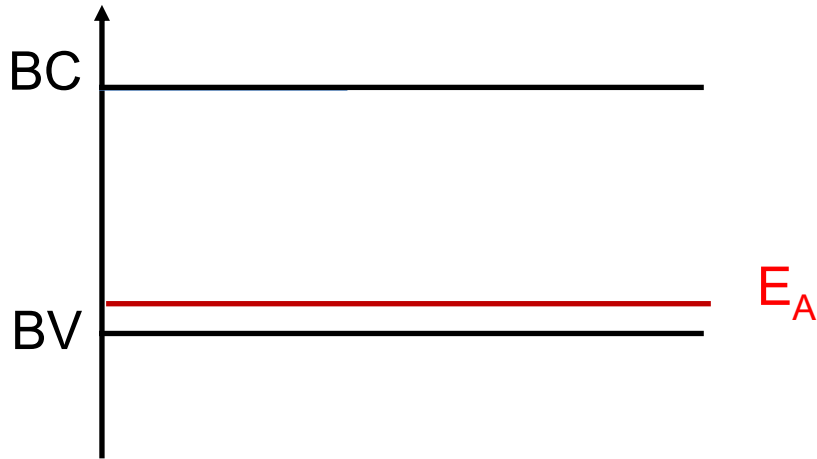
en déplaçant les pièces (électrons covalents) le trou se déplace

Energie e-



Les trous donnent lieu à des états faiblement liés proche de la bande de valence.

Energie e-

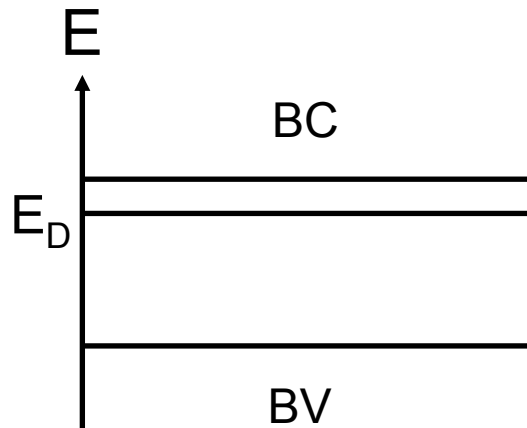


E_A : niveau d'énergie "accepteur" car le bore peut "accepter" un électron

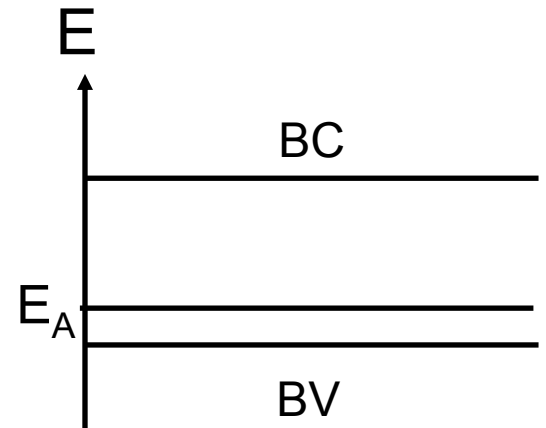
SC « intrinsèque »

SC « extrinsèque »

Energie



Impuretés de
type donneur
Dopage de type N



Impuretés de
type accepteur
Dopage de type P

Qu'est-ce que le dopage d'un semiconducteur ?

1. La transformation d'un conducteur en isolant
2. Un traitement chimique de purifier un semi-conducteur
3. L'effet de la température sur un semi-conducteur
4. L'ajout d'impuretés pour augmenter la conductivité

Réponse. Qu'est-ce que le dopage d'un semiconducteur ?

4. L'ajout d'impuretés pour augmenter la conductivité

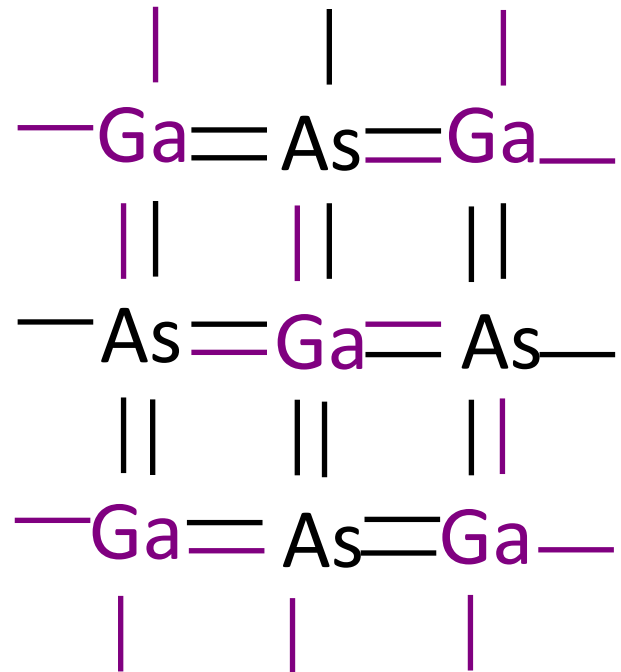
D. Quels sont les semiconducteurs usuels ?

Elements du groupe IV

Germanium, Silicium, Diamant

IIIA	IVA	VA
⁵ B	⁶ C	⁷ N
¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P
³¹ Ga	³² Ge	³³ As

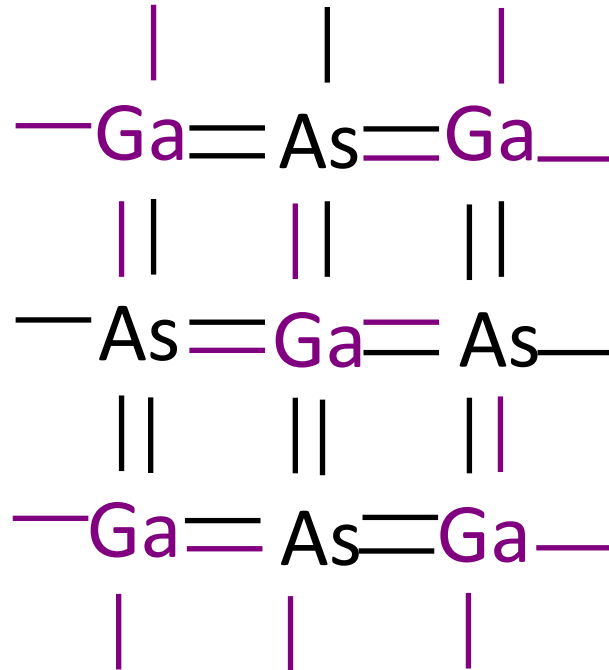
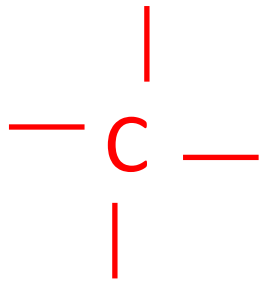
Semiconducteurs de type III-V



IIIA	IVA	VA
5 B	6 C	7 N
13 Al	14 Si	15 P
31 Ga	32 Ge	33 As

Autres III-V : GaP, AlP, GaAsP, GaAlAsP, ...

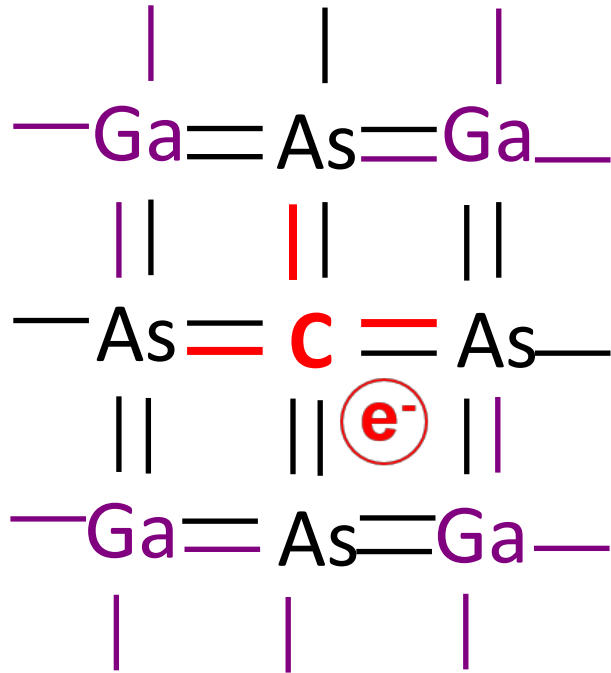
Question : que se passe t il lorsqu'on **dope avec du carbone** ?



IIIA	IVA	VA
⁵ B	⁶ C	⁷ N
¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P
³¹ Ga	³² Ge	³³ As

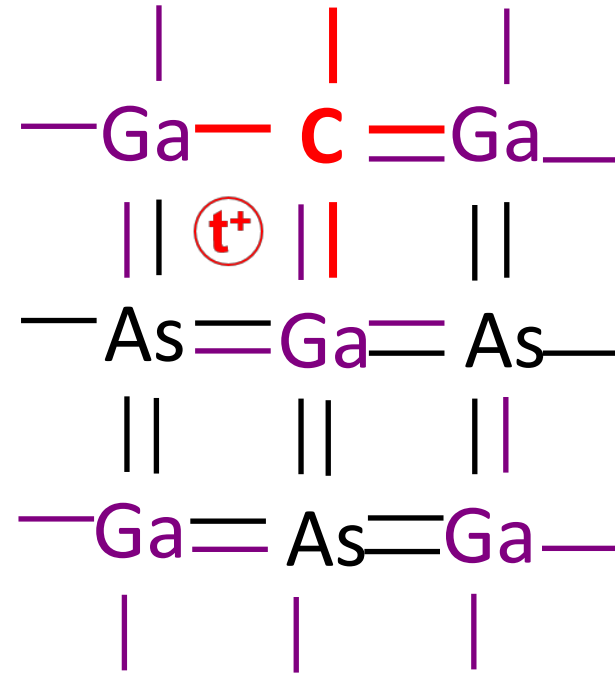
Cela depend si C remplace un Ga ou un As

C(4e-) remplace Ga (3e-)



Dopage de type N

C(4e-) remplace As (5e-)



Dopage de type P

En pratique : la substitution par C de As est plus favorable énergétiquement, c'est le cas 2 qu'on obtient

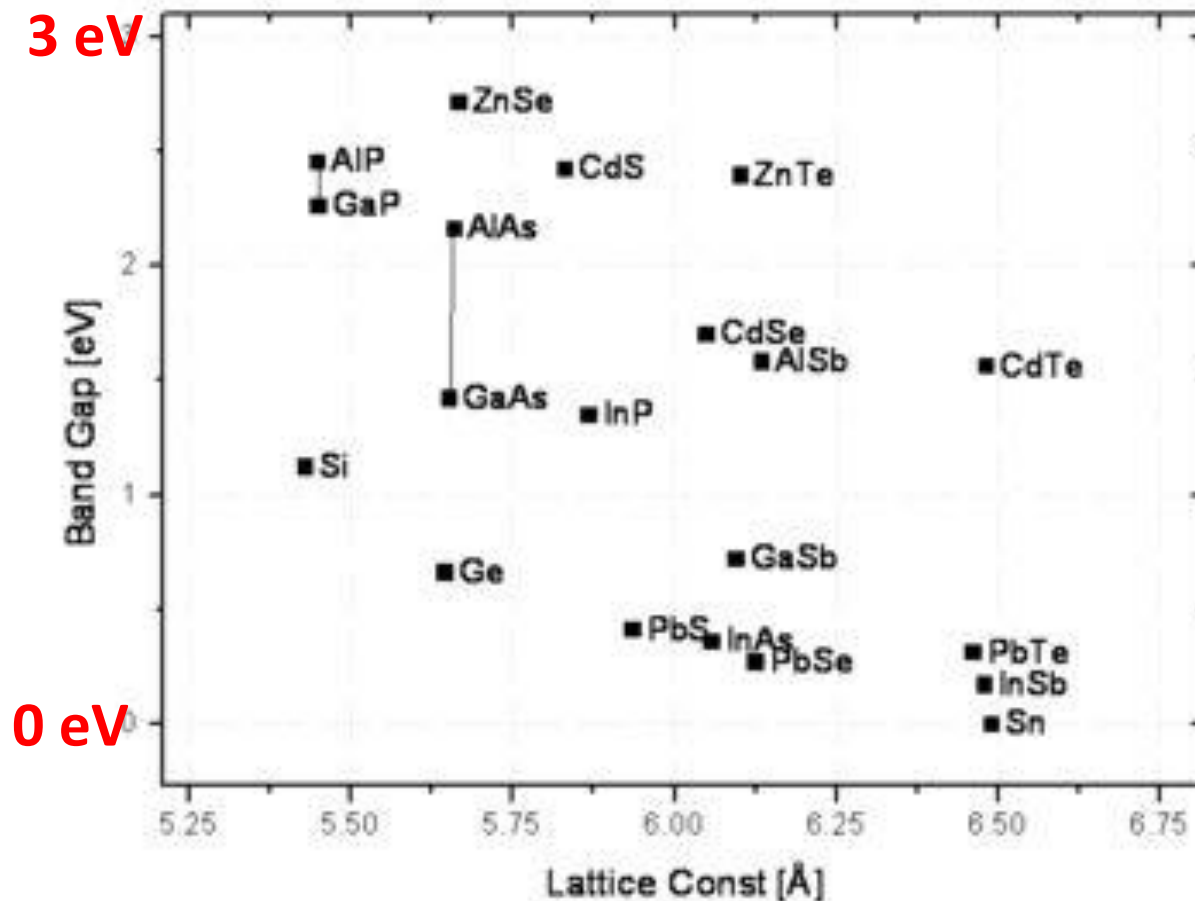
Semiconducteurs de type II-VI

	IIIA	IVA	VA	VIA
	⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O
	¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S
IIB	³⁰ Zn	³¹ Ga	³² Ge	³³ As
	⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb
				⁵² Te

Exemples : CdS, ZnO, HgCdTe

Pourquoi utiliser un semiconducteur ou un autre ?

Pour choisir le gap d'énergie



Les semiconducteurs usuels sont :

Le groupe IV

Les composés 3-5.....

Les composés 2-6.....

GaAs, GaP, AlP, GaAsP, ...

Germanium, Silicium, Diamant

CdS, ZnO, HgCdTe

	5	6	7	8
	B	C	N	O
	13	14	15	16
	Al	Si	P	S
IIB				
30	31	32	33	34
Zn	Ga	Ge	As	Se
48	49	50	51	52
Cd	In	Sn	Sb	Te

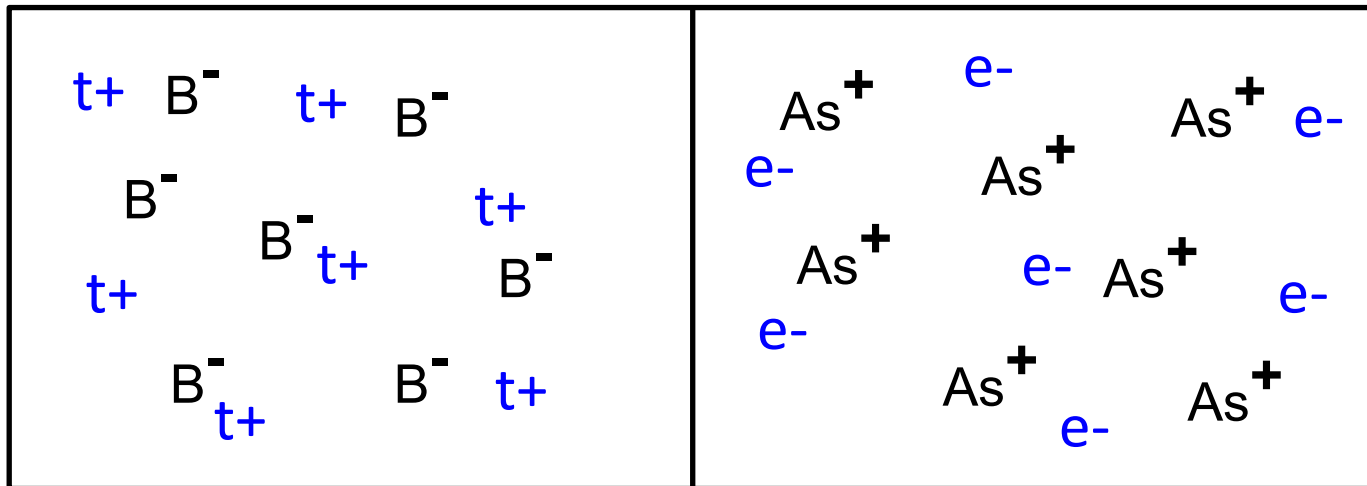
Explication. Le groupe IV correspond à la colonne du tableau périodique qui inclue le carbone (dont l'une des formes cristalline est le diamant), le silicium etc. Il s'appelle groupe IV car ces composés ont 4 électrons disponibles (électrons de valence) pour la cohésion du cristal. Les 3-5 sont des matériaux composés d'atomes de la colonne précédente et de la colonne suivante, les 2-6 sont composés de matériaux des colonnes du Zn et du O. Tous ces éléments existent avec une structure cristalline similaire, avec en moyenne 4 électrons de valence par atome.

	⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O	
	¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	
IIB	³⁰ Zn	³¹ Ga	³² Ge	³³ As	³⁴ Se
	⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te

E. Jonction PN

Type P

Type N



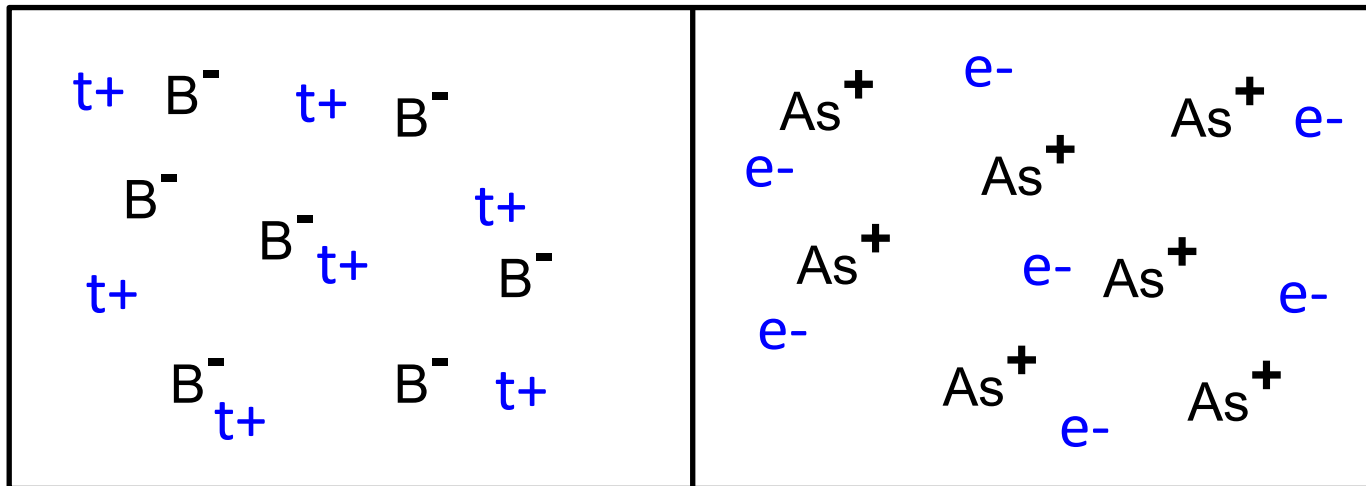
Si dopé B

Si dopé As

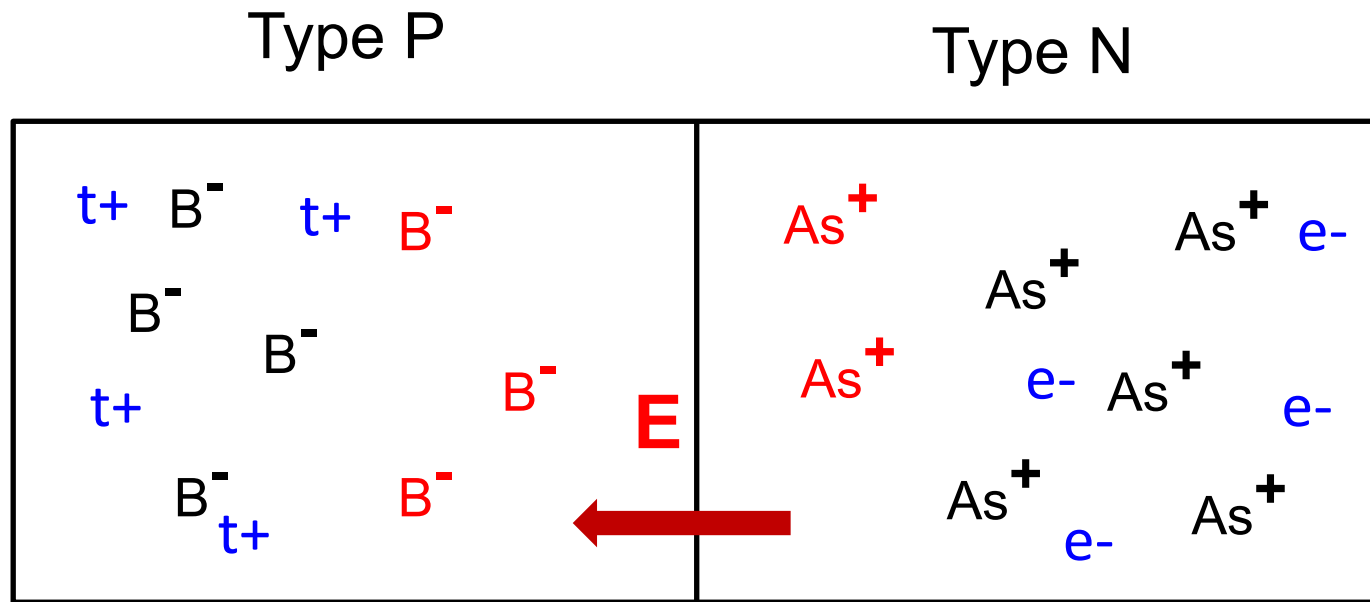
On connecte un SC de type P à un SC de type N
Que se passe-t-il ?

Type P

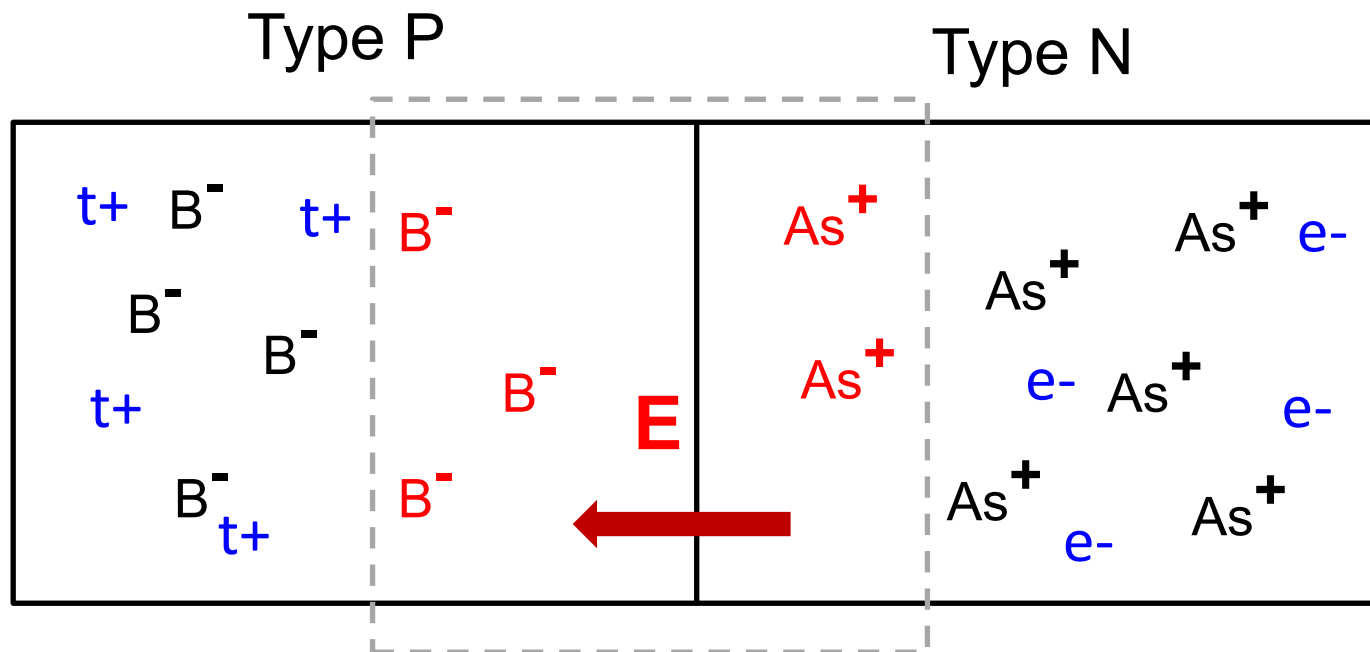
Type N



Les électrons et les trous se recombinent = forment des liens
Vont-ils tous se recombinaer ?



1. Recombinaison d'une partie des e⁻ et t⁺ proches de la jonction
2. Les ions chargés proche de la jonction forment alors un champ électrostatique qui s'oppose au déplacement des charges restantes
3. Le processus s'arrête lorsque le potentiel électrique est égal à la différence d'énergie entre les e⁻ et les t⁺

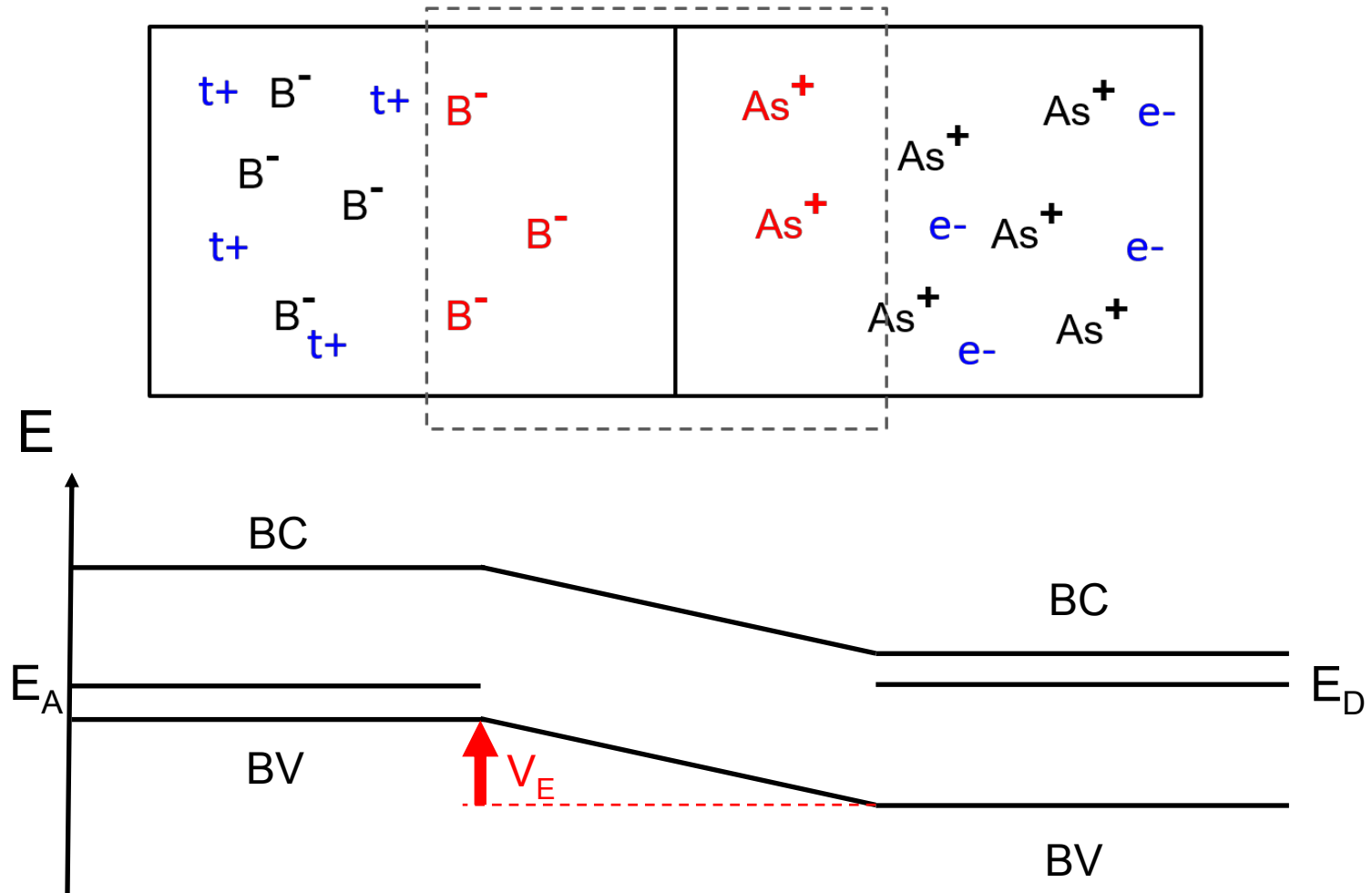


« ZONE DE DEPLETION »

Zone où les charges ont désertées / se sont recombinées

Zone isolante, avec un champ électrique intrinsèque (ions chargés restants)

Diagramme d'énergie



La jonction induit un fléchissement des bandes dans la zone de déplétion, correspondant au potentiel électrique V_E induit par les ions chargés.

Une jonction PN est une association d'un semi-conducteur dopé en électrons et d'un semi-conducteur dopé en trous. Proche de la jonction, les électrons et les trous **se recombinent/se multiplient**, donc ils ne compensent plus les charges électriques des ions correspondants. Les charges + et – des ions donnent lieu à l'apparition d'un champ **magnétique/électrique** à la jonction, sans qu'il y ait de différence de potentiel appliquée.

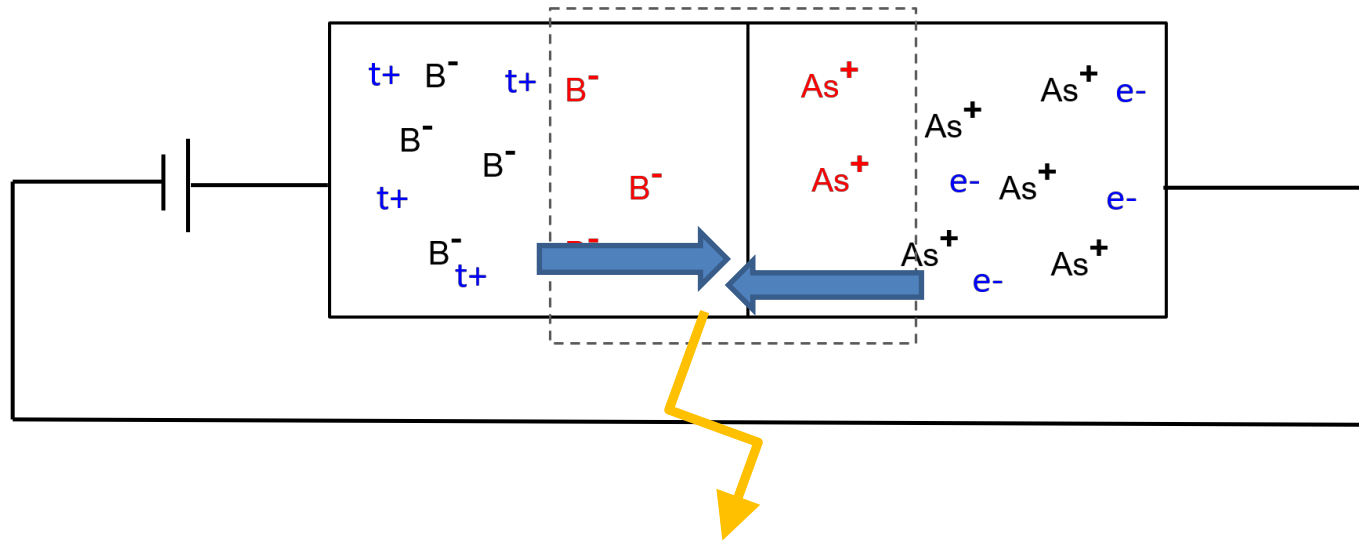
Réponse. Une jonction PN est une association d'un semi-conducteur dopé en électrons et d'un semi-conducteur dopé en trous. Proche de la jonction, les électrons et les trous **se recombinent/~~se multiplient~~**, donc ils ne compensent plus les charges électriques des ions correspondants. Les charges + et – des ions donnent lieu à l'apparition d'un champ **magnétique/~~électrique~~** à la jonction, sans qu'il y ait de différence de potentiel appliquée.

F. JUNCTION PN : APPLICATIONS

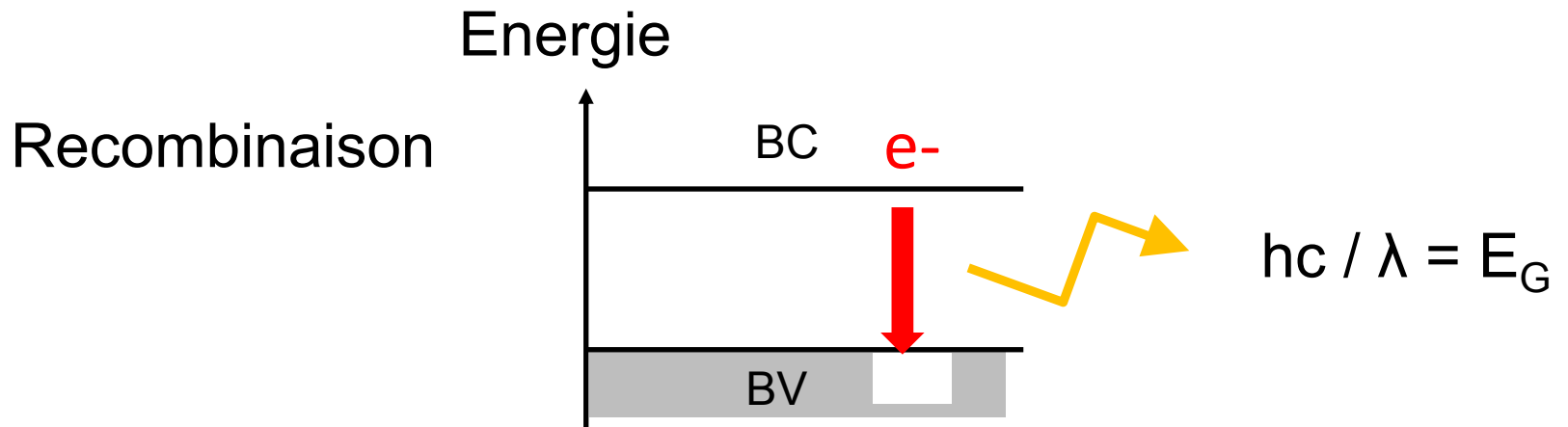
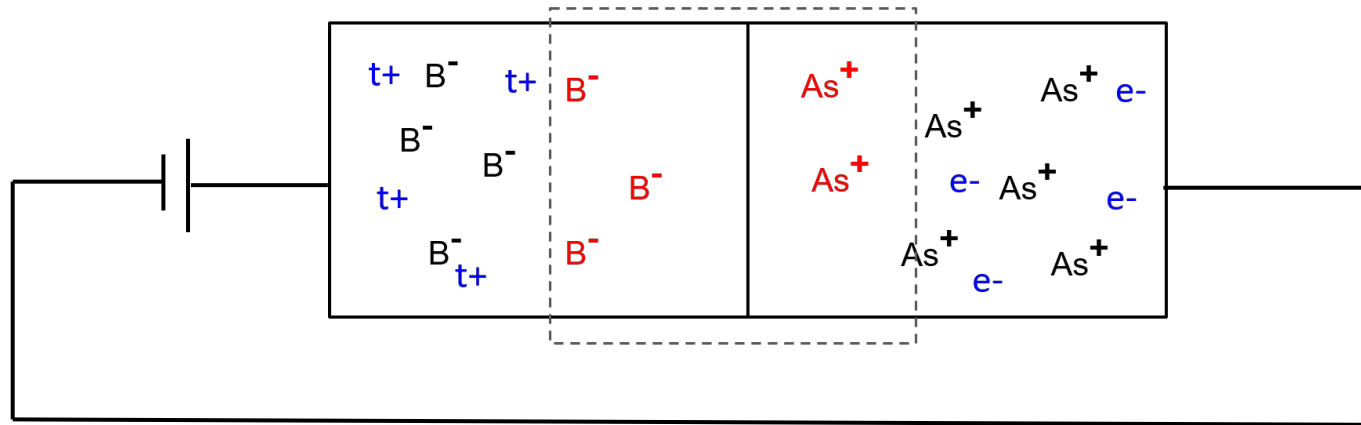
LED



Diodes électroluminescentes (LED)



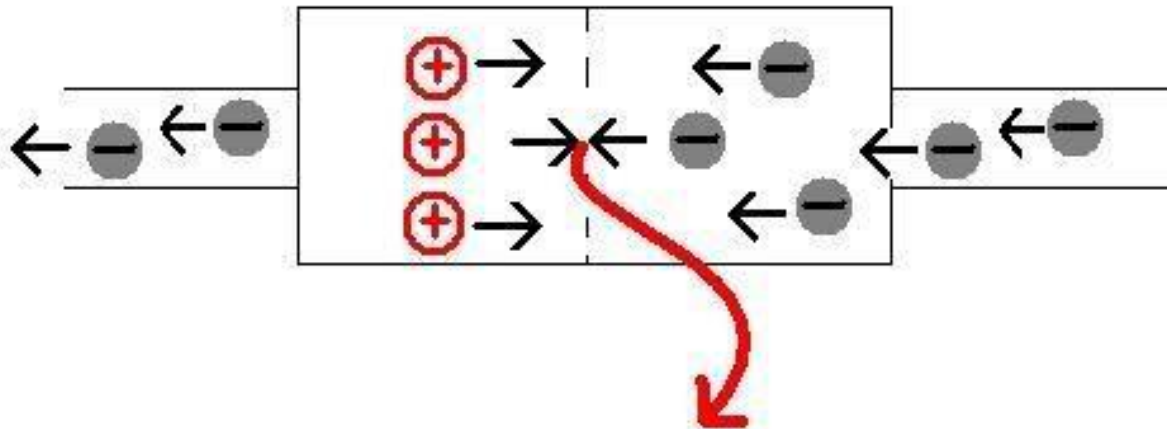
Tension appliquée → une partie des e^- et t^+ passent dans la zone de déplétion et se recombinent en émettant de la lumière



L'énergie du photon correspond à l'énergie du gap E_G entre BC et BV
 On choisit donc la couleur λ de la LED en choisissant le gap du semiconducteur 67

Remarque

Tous les matériaux semiconducteurs n'émettent pas de lumière



PHOTON VISIBLE ou **PHOTON INFRAROUGE** ou **PHONON**

Par exemple, Si n'émet pas de lumière. Lorsqu'il y a recombinaison, l'énergie induit des vibrations du réseau cristallin, appelées phonons.

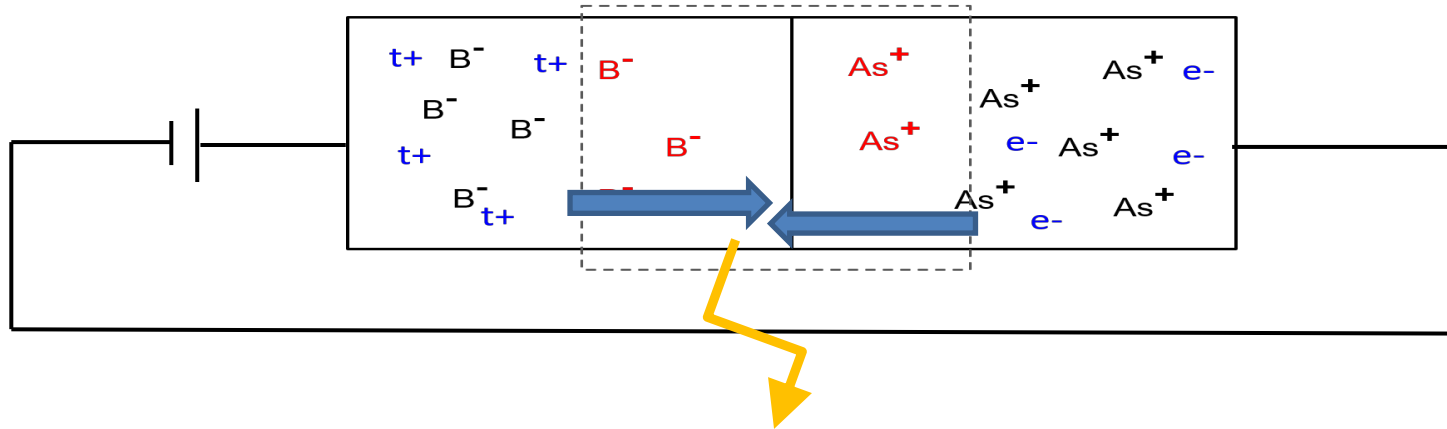
GaAs émet, mais dans l'infrarouge : ce sont les LED des télécommandes TV permettant de communiquer avec le poste.

Lorsqu'on applique une différence de potentiel à une LED, cela donne lieu à la recombinaison d'électrons et de trous. Cette recombinaison s'accompagne de l'émission d'un

- Électron
- Trou
- Photon
- Champ électrique

Lorsqu'on applique une différence de potentiel à une LED, cela donne lieu à la recombinaison d'électrons et de trous. Cette recombinaison s'accompagne de l'émission d'un

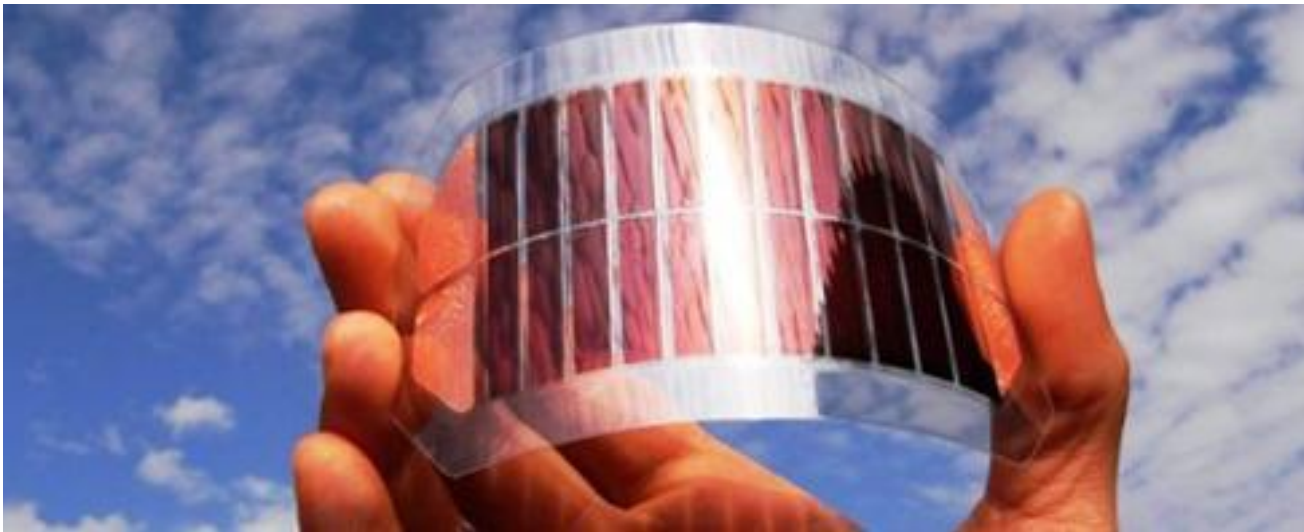
- Électron
- Trou
- **Photon**
- Champ électrique

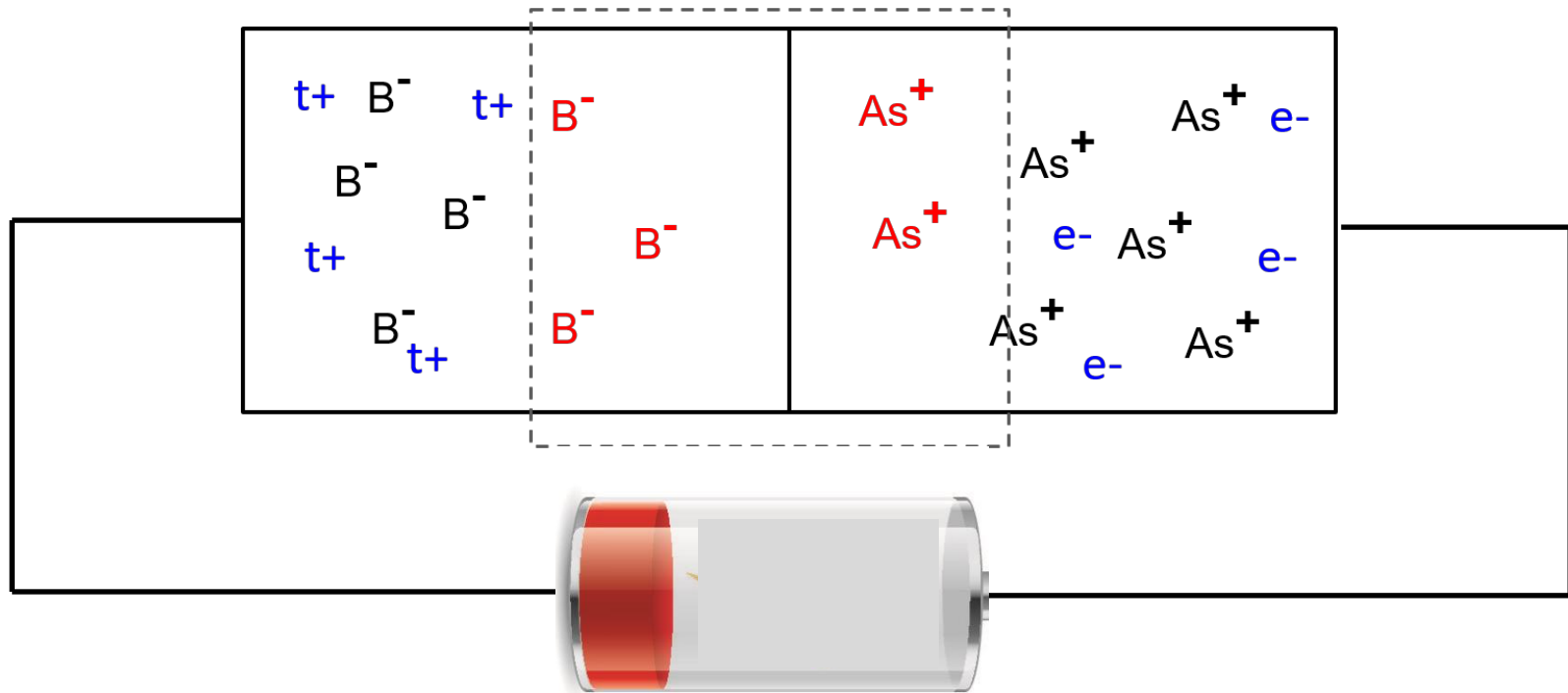


Tension appliquée \rightarrow une partie des e^- et t^+ passent dans la zone de déplétion et se recombinent en émettant de la lumière

G. JONCTION PN : APPLICATIONS

CELLULES SOLAIRES

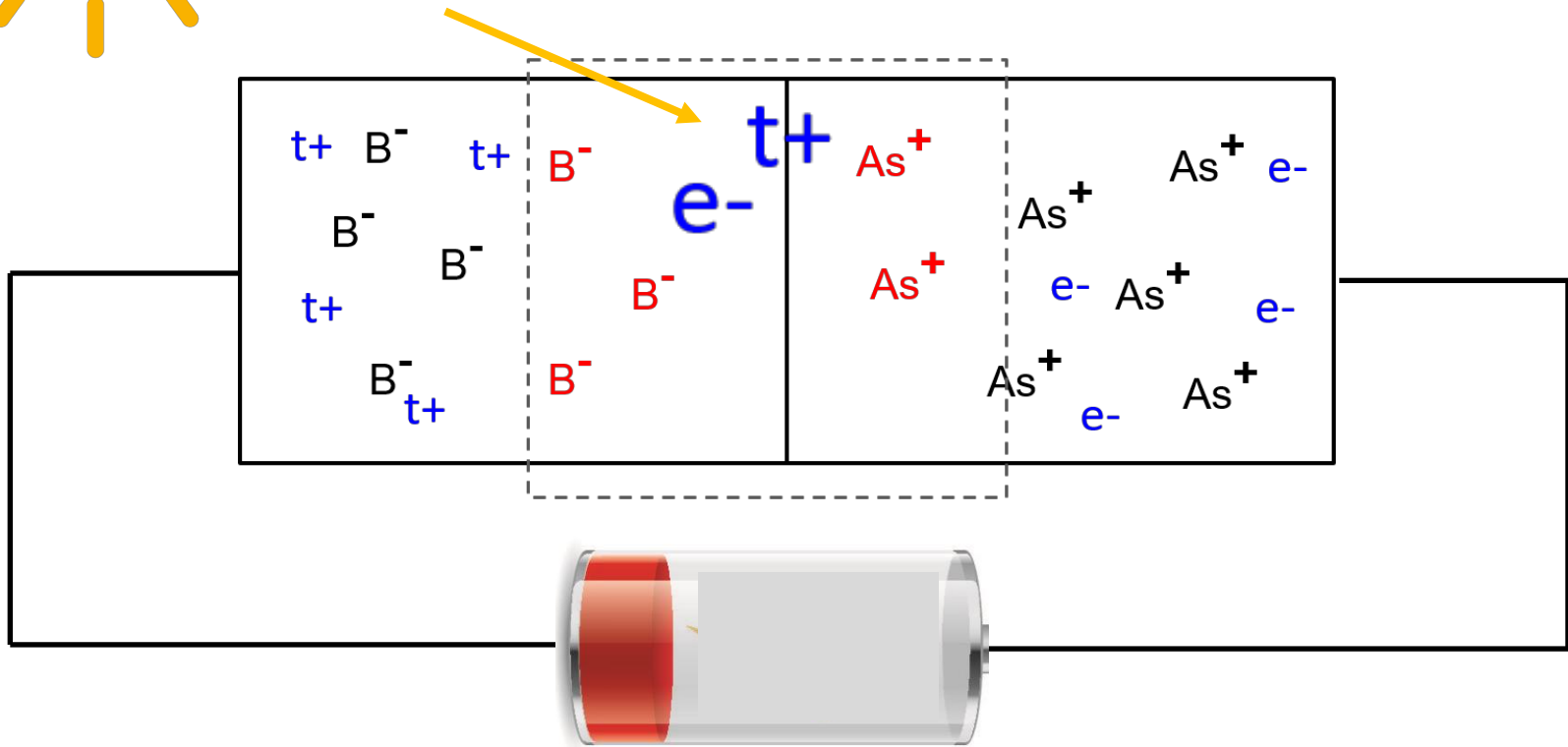




Cellules solaires à base de jonction PN



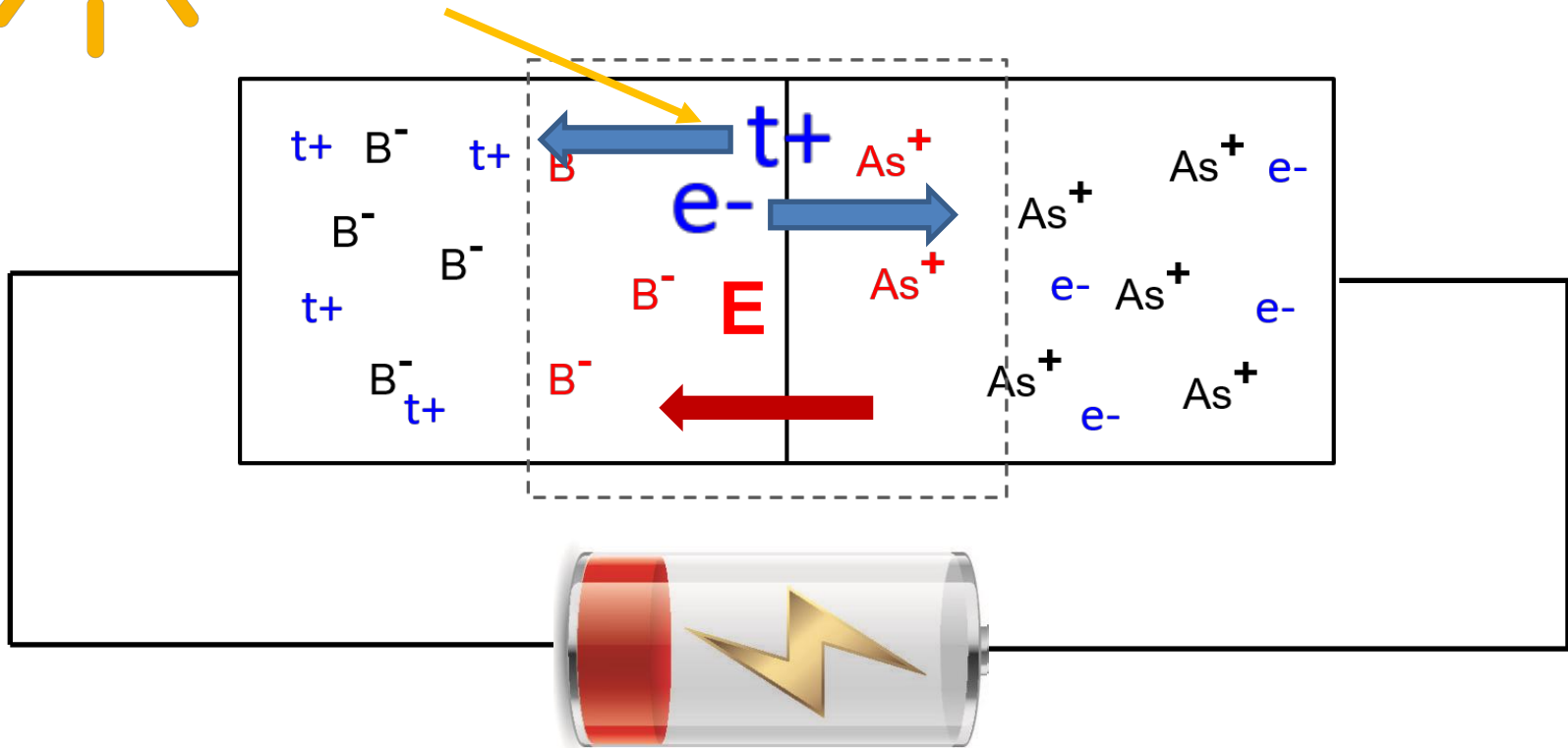
PHOTON \rightarrow ELECTRONS + TROUS



L'absorption de photons libère des électrons et des trous dans la zone de depletion.



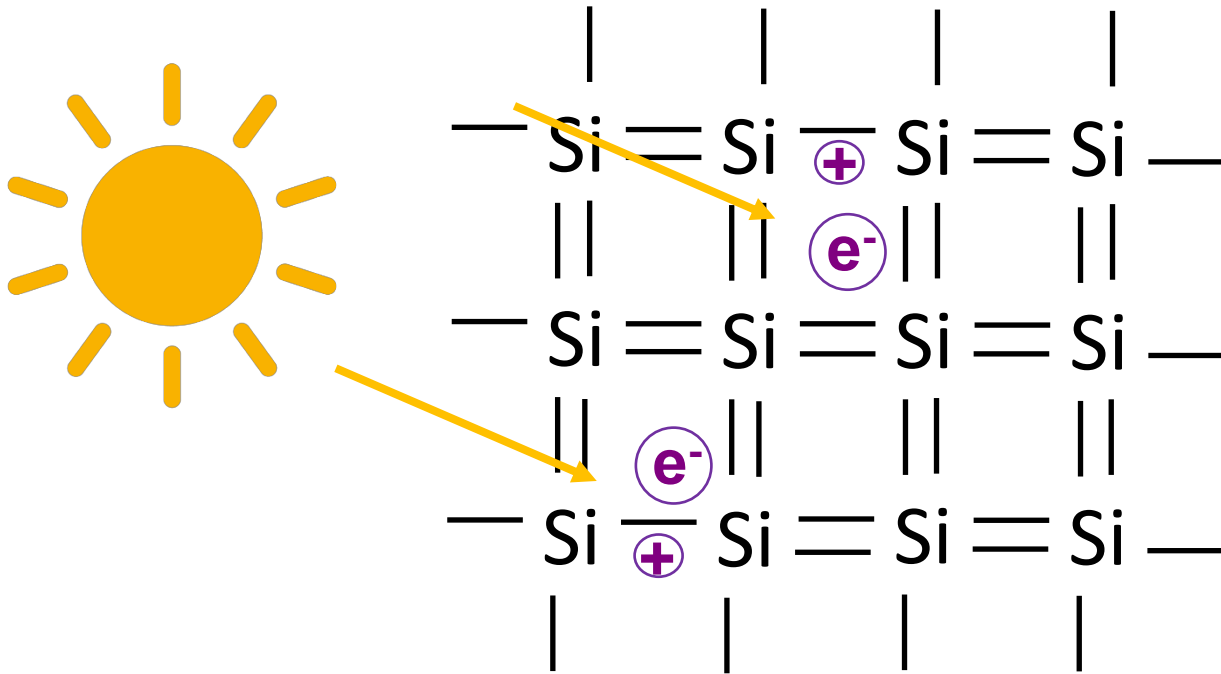
e^-/t^+ dans le champ $E \rightarrow$ Courant



Les électrons et les trous se déplacent sous l'effet du champ électrique des ions de la zone de depletion : un courant électrique apparaît.

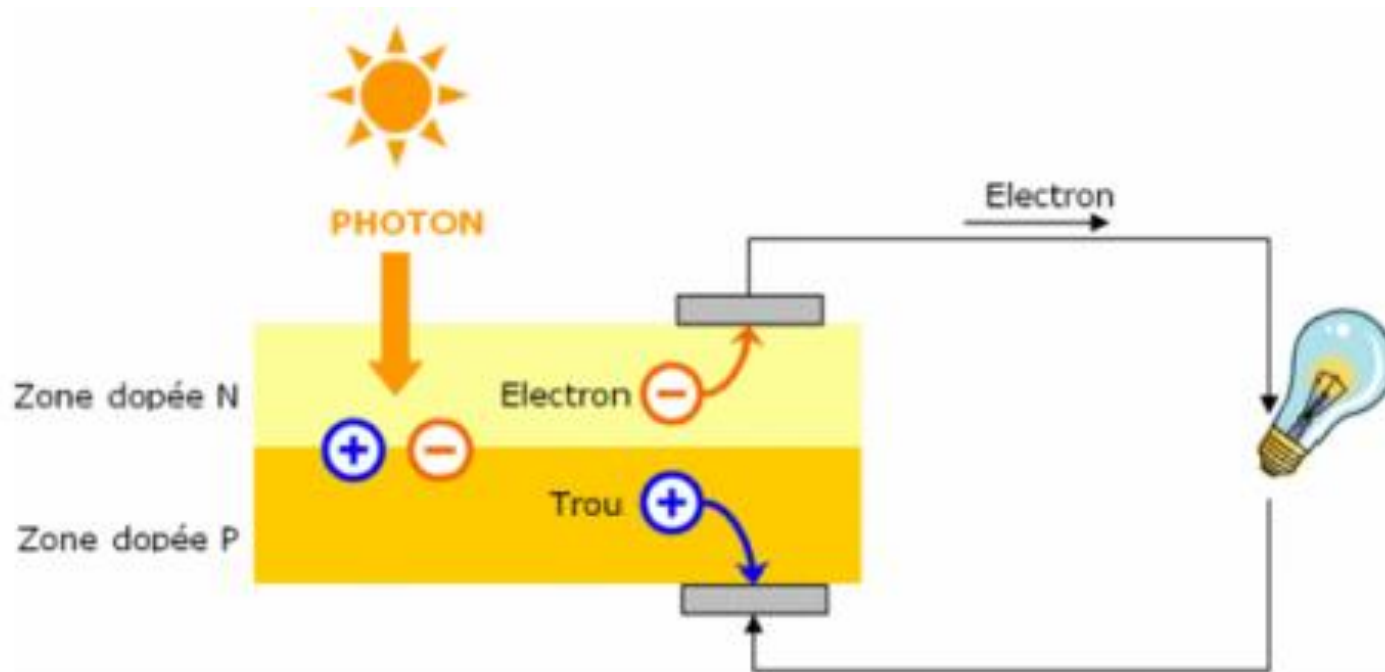
Remarque

Photon absorbés dans un **semiconducteur simple** (pas une jonction) ?



→ Libération de charges (e⁻ , t⁺) mais **pas de courant** car il n'y a pas de champ électrique intrinsèque

Optimisation des cellules solaires ?



- Zone de déplétion la plus grande possible (avec $N_A \neq N_D$)
- Augmentation de la mobilité des électrons
- Absorption de toutes les longueurs d'onde (choix des matériaux)

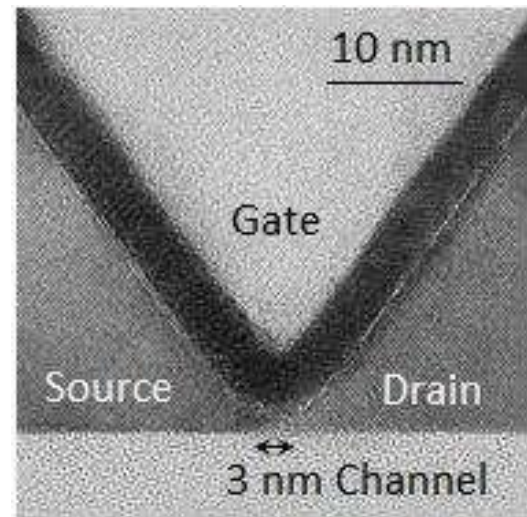
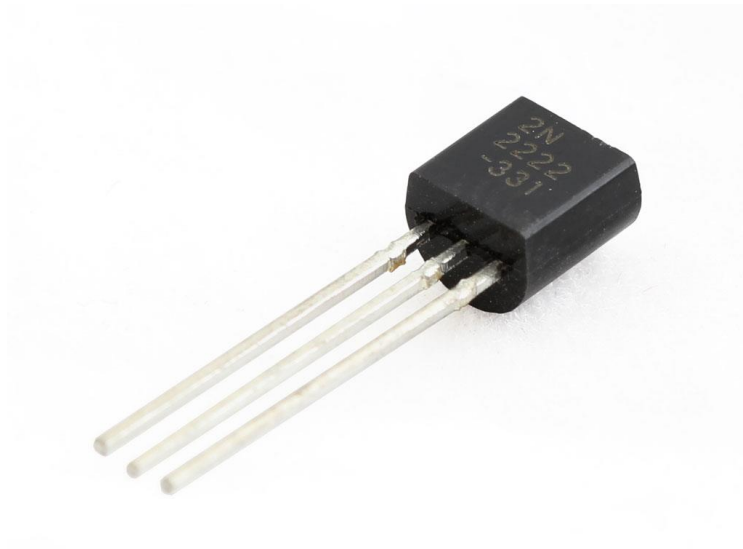
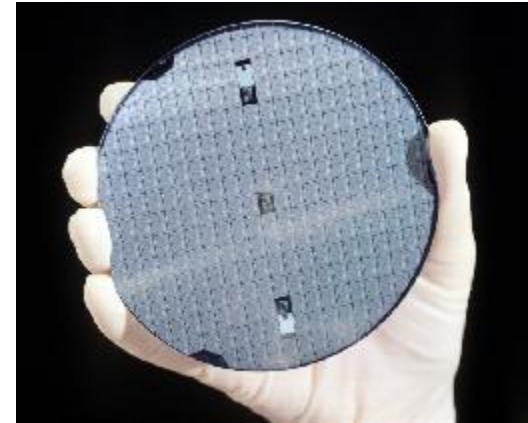
Dans une cellule solaire, l'absorption de lumière donne lieu à la création de paires électrons-trous. Les électrons et les trous se déplacent sous l'effet du champ électrique intrinsèque de la jonction PN, cela crée

- Une différence de potentiel électrique
- Un refroidissement de la jonction
- Une émission de photon
- Une dégradation de la cellule solaire

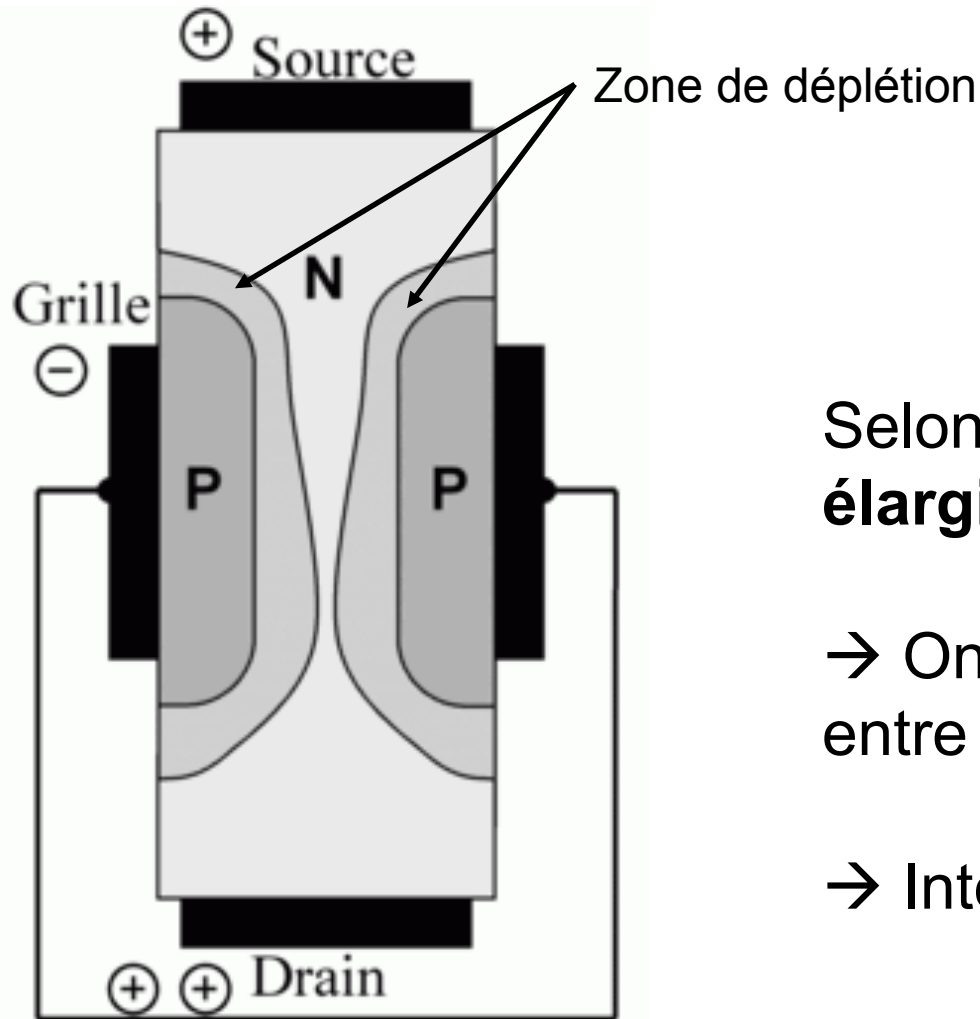
Dans une cellule solaire, l'absorption de lumière donne lieu à la création de paires électrons-trous. Les électrons et les trous se déplacent sous l'effet du champ électrique intrinsèque de la jonction PN, cela crée

- **Une différence de potentiel électrique**
- ~~- Un refroidissement de la jonction~~
- ~~- Une émission de photon~~
- ~~- Une dégradation de la cellule solaire~~

H. JUNCTION PN : APPLICATIONS TRANSISTORS



Transistor à effet de champ



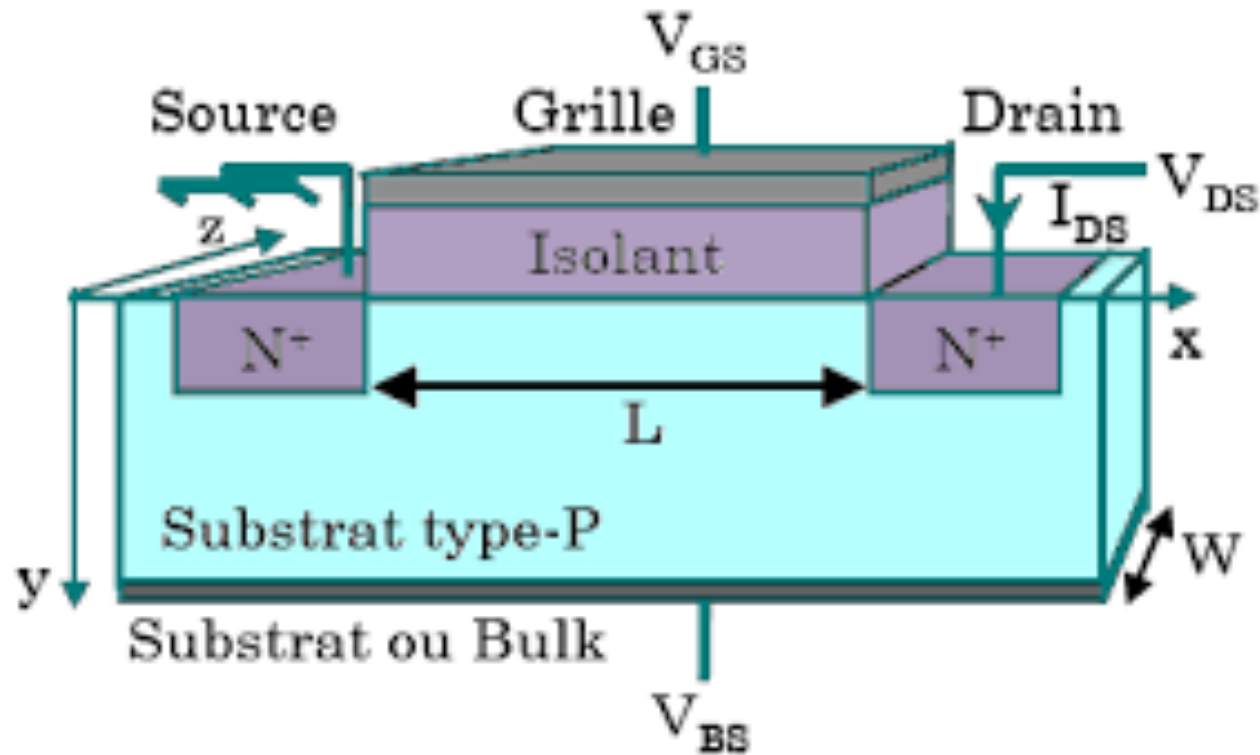
Selon la tension sur la Grille, **on élargit la zone de depletion**

→ On ouvre ou ferme le courant entre Source et Drain

→ Interrupteur

Transistor à effet de champ

adaptation de la géométrie pour circuits intégrés



Utilisation massive des transistors dans les circuits intégrés

Exemple

Microprocesseur Intel Core 2015 :

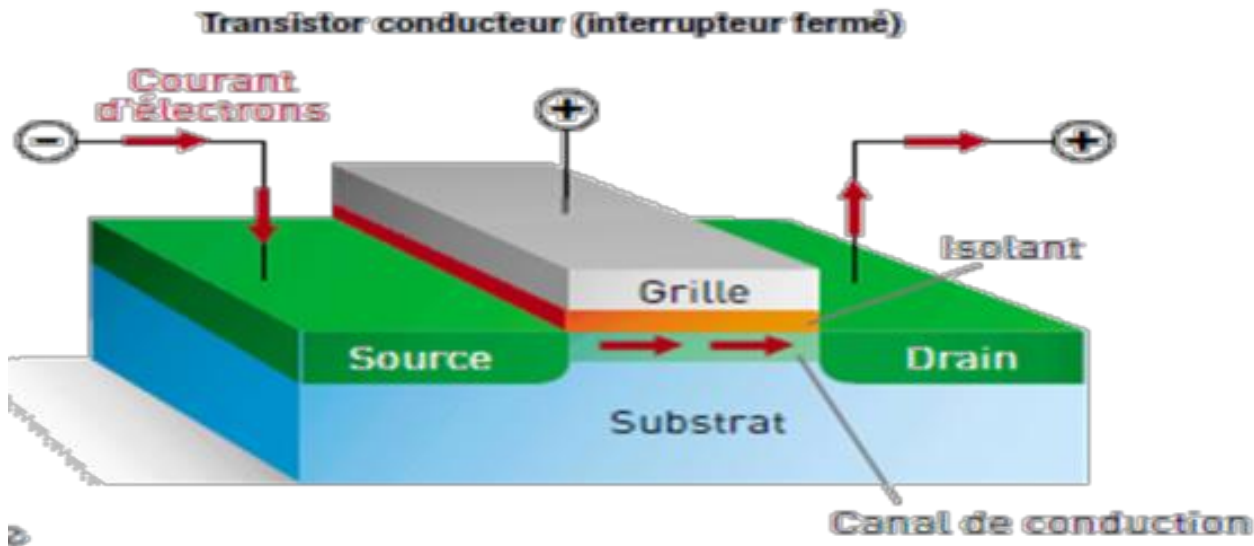
1 750 000 000 transistors



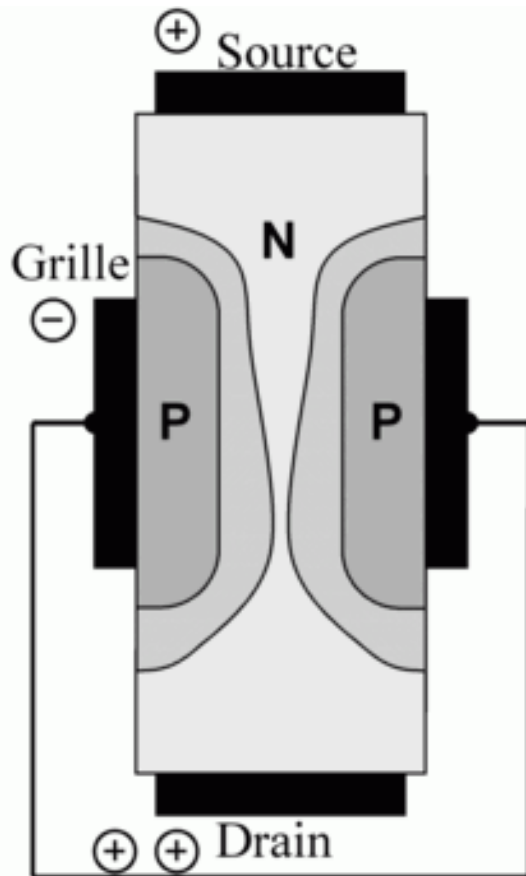
Optimisation de la vitesse des transistor

Comment diminuer le temps de switch ?

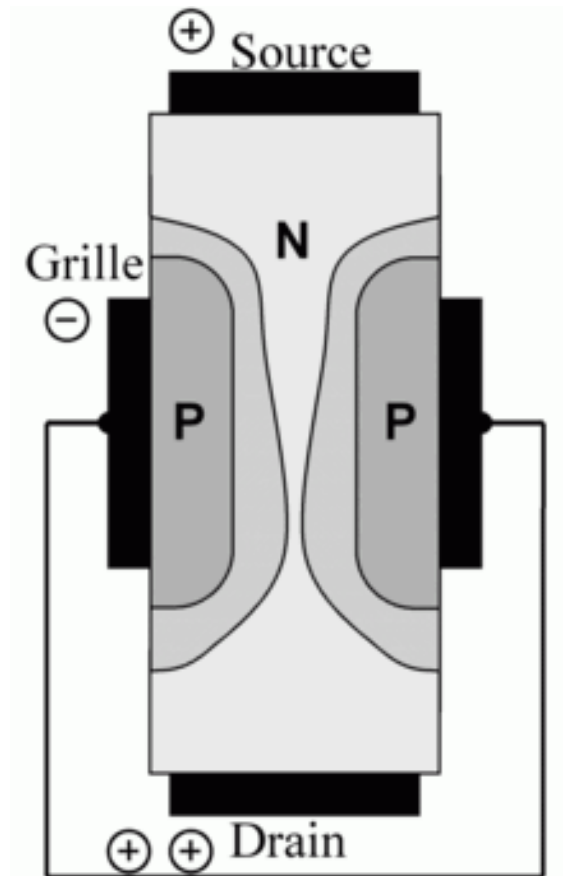
- Réduction des distances entre les bornes : miniaturisation
- Augmentation de la vitesse des électrons : matériaux



Dans le transistor schématisé, l'application d'une tension électrique adéquate permet d'augmenter la zone de déplétion (zone isolante) autour des deux jonctions PN. Cela permet de fermer le passage électrique entre source et drain. De fait, les transistors peuvent être vu comme des **interrupteurs/amplificateurs**.



Dans le transistor schématisé, l'application d'une tension électrique adéquate permet d'augmenter la zone de déplétion autour des deux jonctions PN. Cela permet de fermer le passage électrique entre source et drain. De fait, les transistors peuvent être vu comme des **interrupteurs/amplificateurs**.



SEMICONDUCTEURS SANS EQUATION, DU FONDAMENTAL AUX APPLICATIONS

RESUME

Description et concepts développés.

Ce cours introductif présente d'abord ce qu'est la physique du solide puis donne une première description qualitative du semi-conducteur et de ses applications. On s'affranchit des descriptions formelles détaillées pour donner une vue d'ensemble. L'objectif est d'appréhender le lien entre propriétés microscopiques (structure cristalline, diagramme d'énergie des porteurs de charge) et macroscopique (propriétés électriques et optiques) puis de voir comment ces propriétés sont directement mises à profit pour réaliser des dispositifs du quotidien : LED, cellule solaire, transistors. Dans ce cours, un grand nombre de notions clés sont abordées sur lesquelles on reviendra plus en détails dans les cours suivants.

Vocabulaire introduit dans ce cours

Semi-conducteur, Structure cristalline, liaison chimique, porteur de charge, électrons et trous, bande de valence et bande de conduction, dopage, semiconducteur intrinsèque et extrinsèque, groupe IV, groupe III-V et groupe II-VI, jonction PN, zone de déplétion, recombinaison de paires électrons trous, photons, phonons

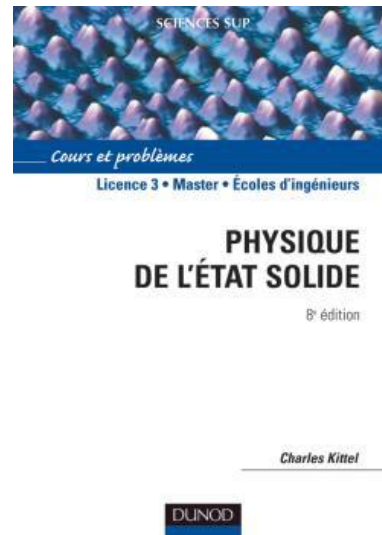
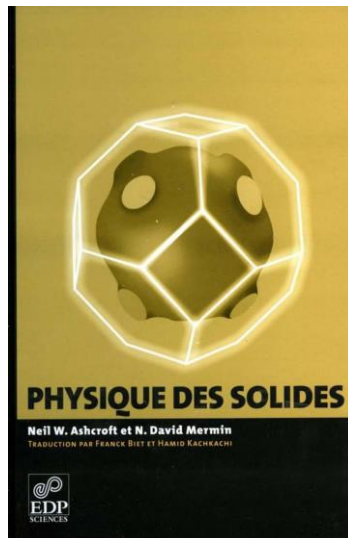
Savoir-faire.

- Appréhender le lien entre propriétés microscopiques, macroscopiques et applications
- Repérer quelques notions de base des semi-conducteurs : bande de conduction et valence, dopage

PHYSIQUE DU SOLIDE - BIBLIOGRAPHIE

LIVRES

- Ashcroft et Mermin, Physique des Solides (EDP Sciences, Les Ulis, 2002)
- Kittel, Physique de l'état solide (Dunod, 2006)



VIDEOS

- Solid State Physics in a Nutshell (Colorado School of Mines)
<https://cosmolearning.org/courses/solid-state-physics-nutshell/>
- (Cours 1) Introductory Lectures on Solid State Physics (K. M. Itoh)
https://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group/coursework/



<https://www.youtube.com/watch?v=6zh4IIQtNCI>

Visite de la salle blanche du CIME