

Propriétés électriques des métaux

- Ordre atomique et theorie des bandes
- Théorie classique de la conductivité (modèle de Drude ou de l'électron libre)
- Mobilité des électrons
- Résistivité et température
- Conductivité des alliages (règle de Nordheim)

Contenu du cours: variation

Date	Thème
12 Sept	Introduction, que c'est les propriétés fonctionnelles Chapitre 1. Introduction au cours Chapitre 2. Structure de la matière solide
19 Sept	Chapitre 3. Conduction dans les métaux
26 Sept	Chapitre 4. Conduction dans les matériaux ioniques + Introduction au propriétés diélectrique
3 Oct	Chapitre 5. Constants diélectriques + Introduction au propriétés optiques
10 Oct	Chapitre 6. Modèle classique interaction + Propriétés optiques électrons libres
17 Oct	Serie nr 1 d'exercices
31 Oct	Visites laboratoires
7 Nov	Chapitre 7. Bandes et effet sur les propriétés optiques et électriques
14 Nov	Pitch visite
21 Nov	Chapitre 8: Propriétés magnétiques
28 Nov	Chapitre 9: Propriétés thermiques
5 Dec	Série nr 2 exercices
12 Dec	Chapitre 10: Propriétés des matériaux nano
19 Dec	Simulation Examen + Q&A

INDIQUEZ ICI VOTRE PRESENCE POUR LES VISITES AUX LABORATOIRES AVANT LE 30/09:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1_IIQf9p2XSAOpb5OhQCipG4Aj4RdC8BrT4MKFvgq5Tw/edit?usp=sharing

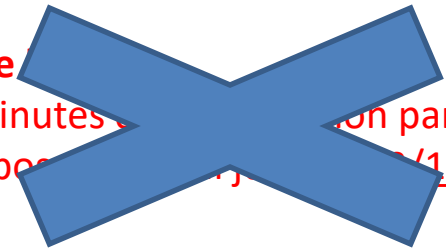
Activité évalué pendant le semestre

Série nr 1:

- Disponible sur Moodle le 10/10
- Rendu sur Moodle le 31/10 à 13h00

Pitch de

- 5 minutes par groupe
- Diapositives disponibles sur Moodle le 11/11 à 13h00



Série nr 2:

- disponible sur Moodle le 28/11
- Rendu sur Moodle le 12/12 à 13h00

Avec TAs

Avec TAs

Avec TAs

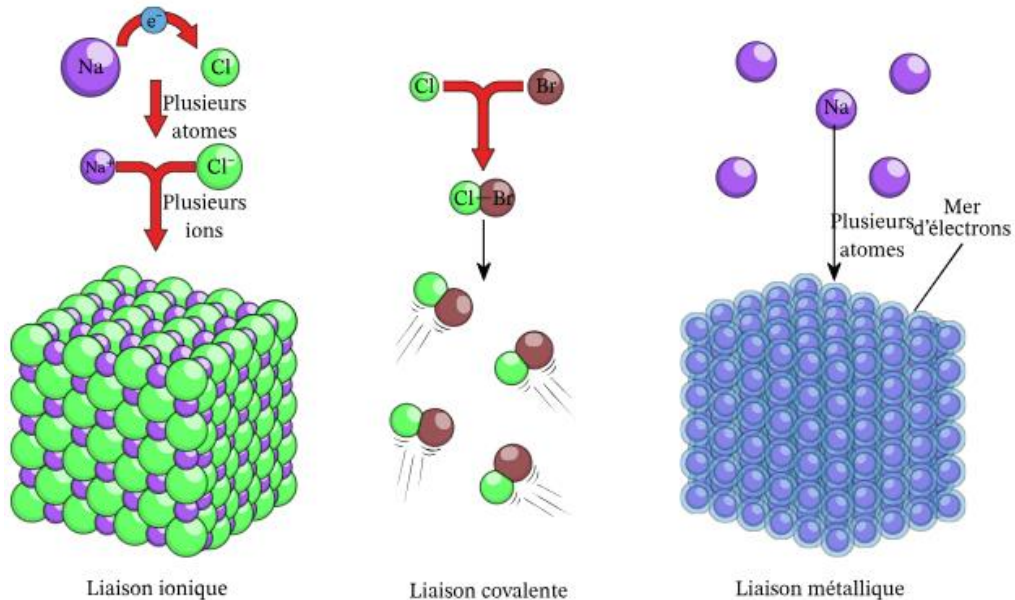
Le cours de la semaine passée en bref

Periodic table of the elements

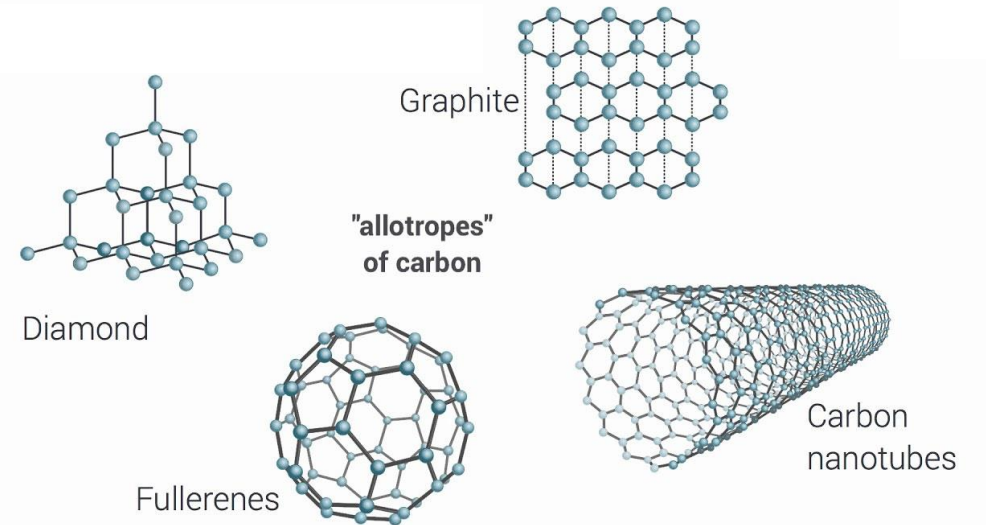
<div> <div>Alkali metals</div> <div>Alkaline-earth metals</div> <div>Transition metals</div> <div>Other metals</div> <div>Other nonmetals</div> <div>Halogens</div> <div>Noble gases</div> <div>Rare-earth elements (21, 39, 57-71) and lanthanoid elements (57-71 only)</div> <div>Actinoid elements</div> </div>																	
group 1*	2											13	14	15	16	17	18
1	2											5	6	7	8	9	10
1	H											B	C	N	O	F	He
2	Li	Be											13	14	15	16	17
3	Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al	Si	P	S	Cl
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At
7	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Og
<div>lanthanoid series 6</div> <div>actinoid series 7</div>																	
<div>58 Ce</div> <div>59 Pr</div> <div>60 Nd</div> <div>61 Pm</div> <div>62 Sm</div> <div>63 Eu</div> <div>64 Gd</div> <div>65 Tb</div> <div>66 Dy</div> <div>67 Ho</div> <div>68 Er</div> <div>69 Tm</div> <div>70 Yb</div> <div>71 Lu</div>																	
<div>90 Th</div> <div>91 Pa</div> <div>92 U</div> <div>93 Np</div> <div>94 Pu</div> <div>95 Am</div> <div>96 Cm</div> <div>97 Bk</div> <div>98 Cf</div> <div>99 Es</div> <div>100 Fm</div> <div>101 Md</div> <div>102 No</div> <div>103 Lr</div>																	

*Numbering system adopted by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). © Encyclopædia Britannica, Inc.

Nature chimique



Les liaisons

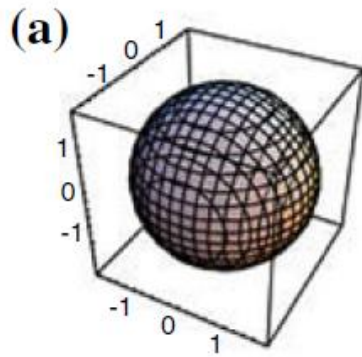


© my-gcscience.com

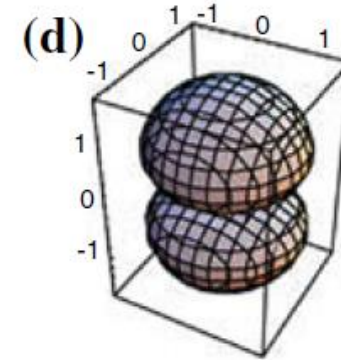
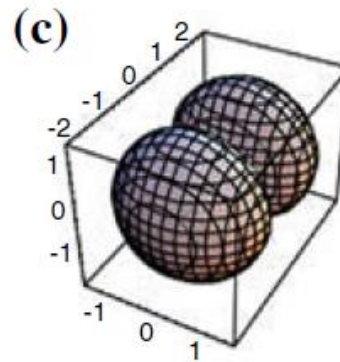
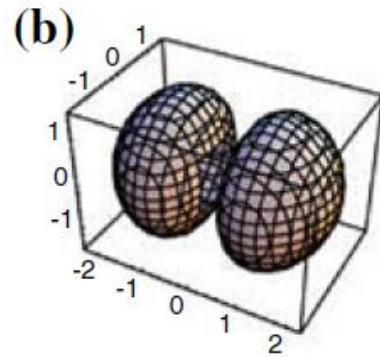
L'ordre des atomes

Les orbitaux atomiques

Orbital s avec une symétrie sphérique

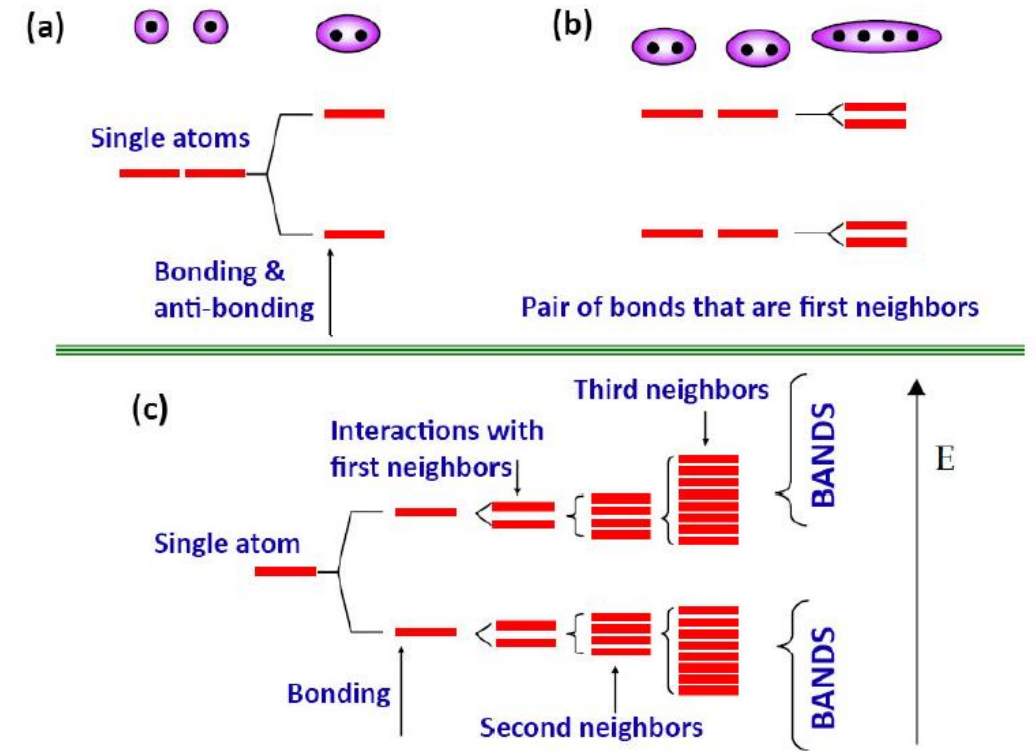
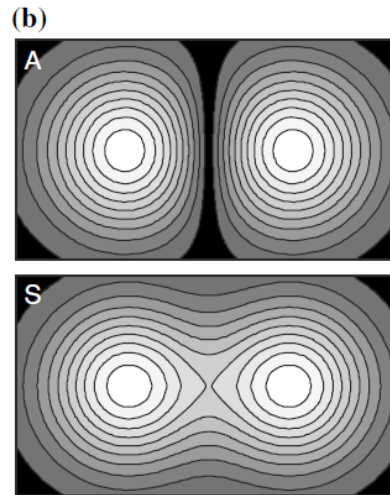
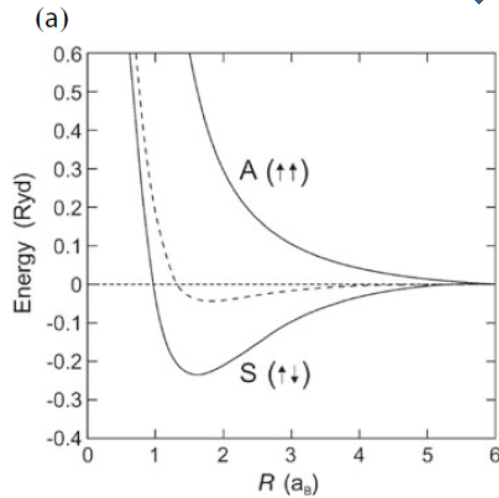
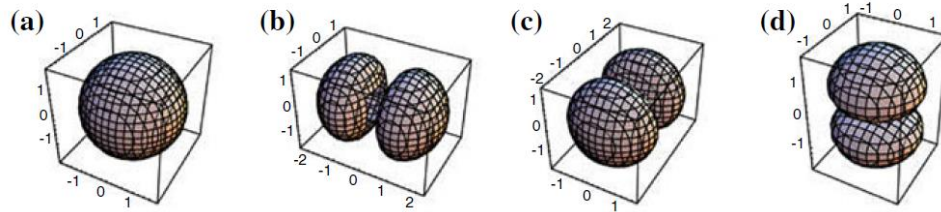


Orbitaux p avec deux lobes en direction x, y et z



La distribution des électrons dans les niveaux d'énergie atomique (configuration électronique) est liée à leur répartition dans l'espace. Les orbitaux atomiques décrivent les régions de positionnement probable des électrons

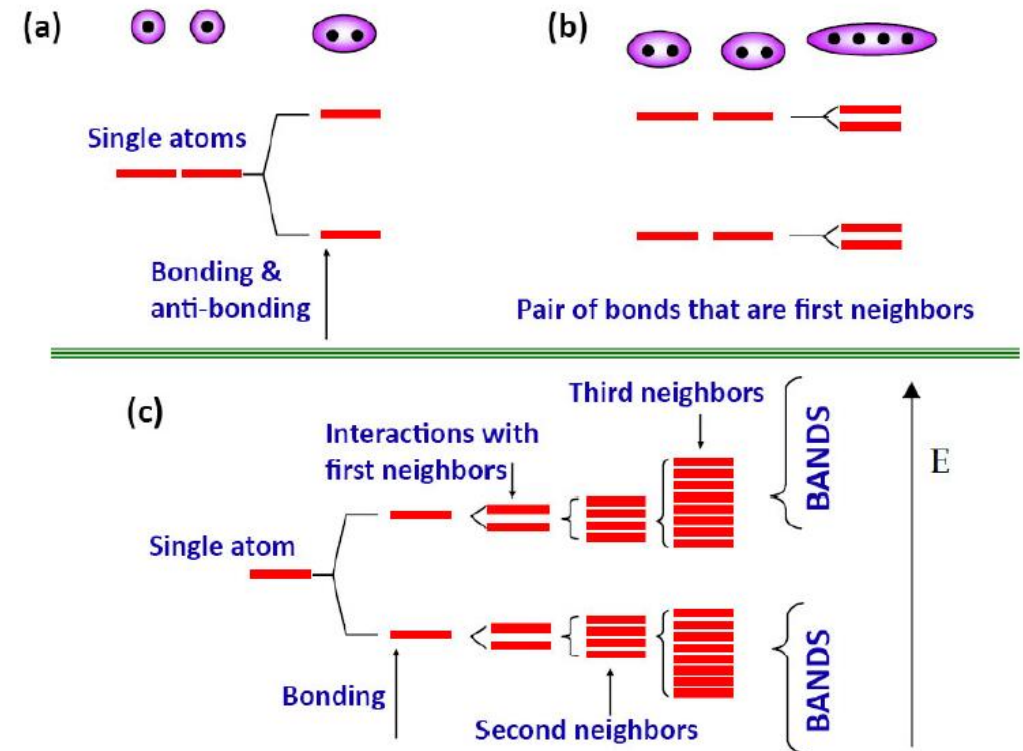
Les orbitaux moléculaires



Energie de liaison pour une molécule H_2

Ordre atomique

Les interactions entre les atomes
d'un solide définissent
l'environnement énergétique des
états électroniques (électrons) et
les modes vibrationnels du réseau



Symétrie de cristaux

Les cristaux sont des matériaux 3D, donc non seulement la distance entre les atomes, mais aussi la symétrie cristalline est importante

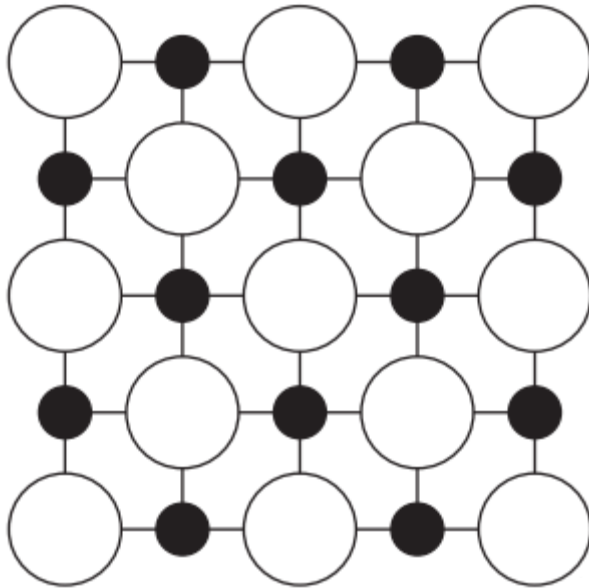
Principe de von Neumann :

Toute propriété physique macroscopique d'un matériau doit avoir au moins la symétrie de sa structure cristalline.

		primitif	bases-centré	centré	faces-centré
triclinique					
monoclinique		$\beta \neq 90^\circ$ $a \neq c$ 	$\beta \neq 90^\circ$ $a \neq c$ 		
orthorhombique		$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$
tétragonal		$a \neq c$ 		$a \neq c$ 	
hexagonal	rhombohédral	$\alpha \neq 90^\circ$ 			
	hexagonal	$\gamma = 120^\circ$ 			
cubique					

Exercice: Symétrie de cristaux (10 minutes)

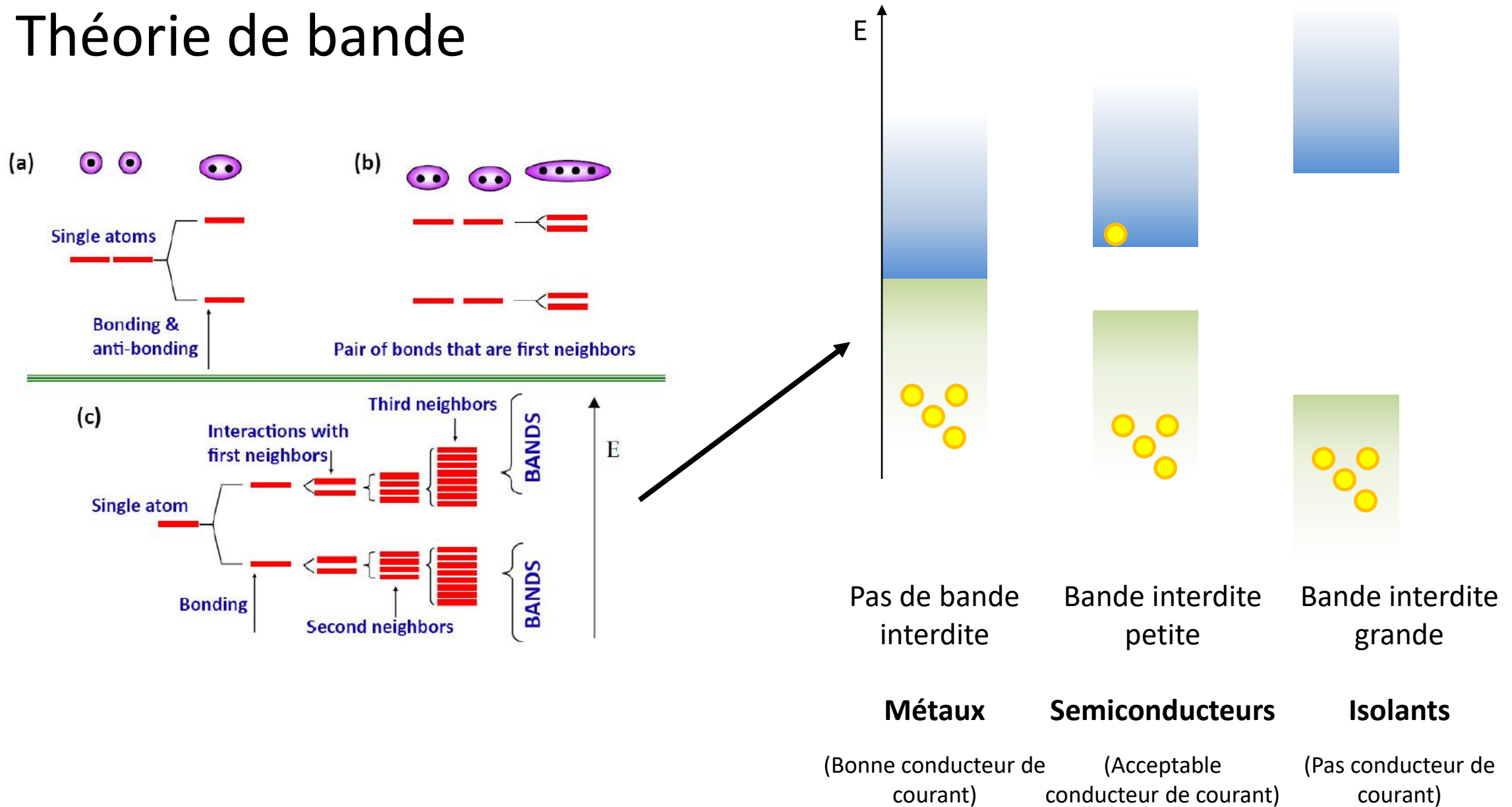
Na Cl



Q1: Pouvez-vous indiquer 2 directions équivalentes (D1, D2) et des directions non équivalentes (D1, D3) ?

Q2: Est-ce que les propriétés mesurées par D1 et D2 sont les mêmes ? Et les propriétés mesurées par D1 et D3 ?

Théorie de bande



Densité d'états

La densité d'états $g(E)$ correspond au nombre d'états trouvés dans une gamme d'énergies données.

Elle est définie de la façon suivante :

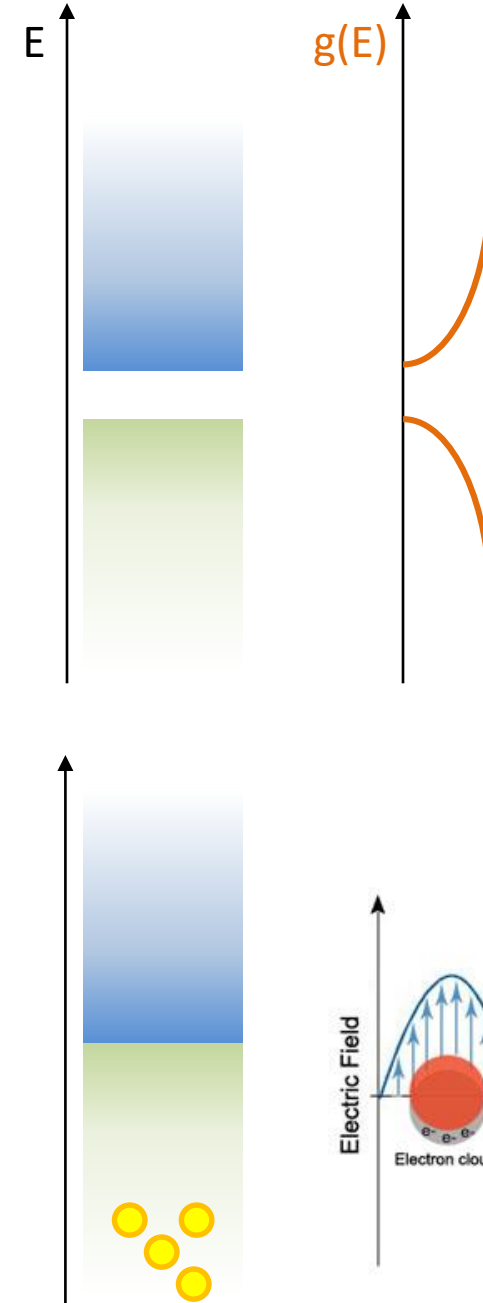
$$N = g(E) dE$$

Avec N le nombre d'états dans la gamme E et $E+dE$

Etats délocalisés et excitation collectives

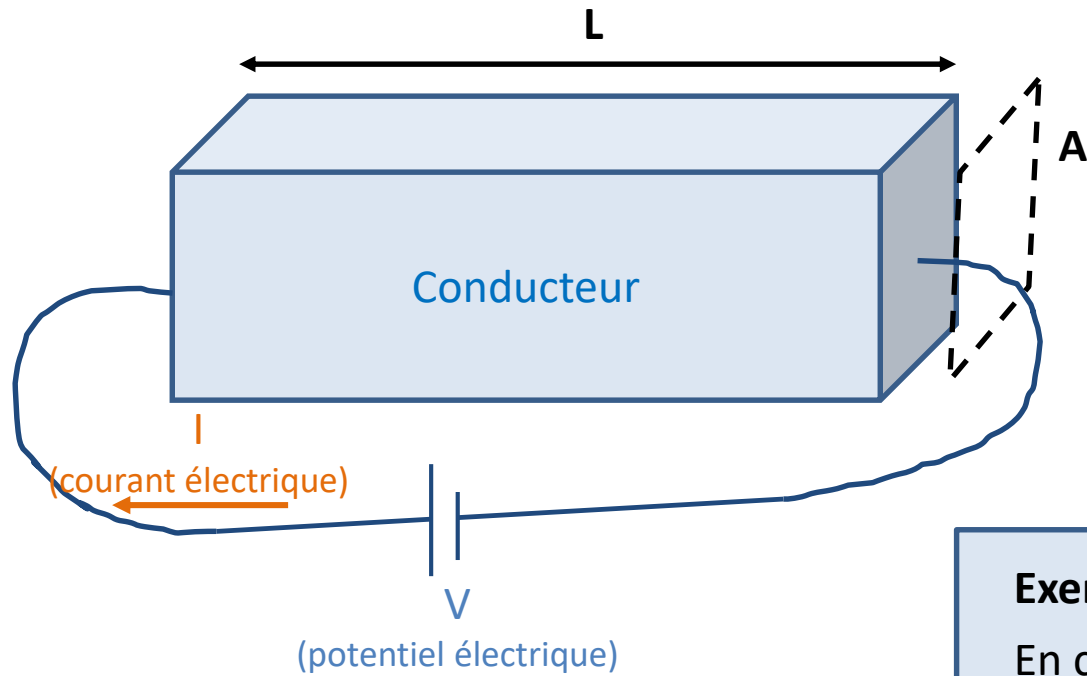
Les électrons délocalisés 'bougent', ils se propagent dans le solide grâce à la formation des bandes électroniques.

C'est cette délocalisation qui permet l'existence d'oscillations collectives dans la totalité du cristal plutôt que dans chaque atome.



Pause 5 minutes

Lois de Ohm



1ère Loi de Ohm

$$V = R * I$$

Ou R est la résistance de l'objet

2eme Loi de Ohm

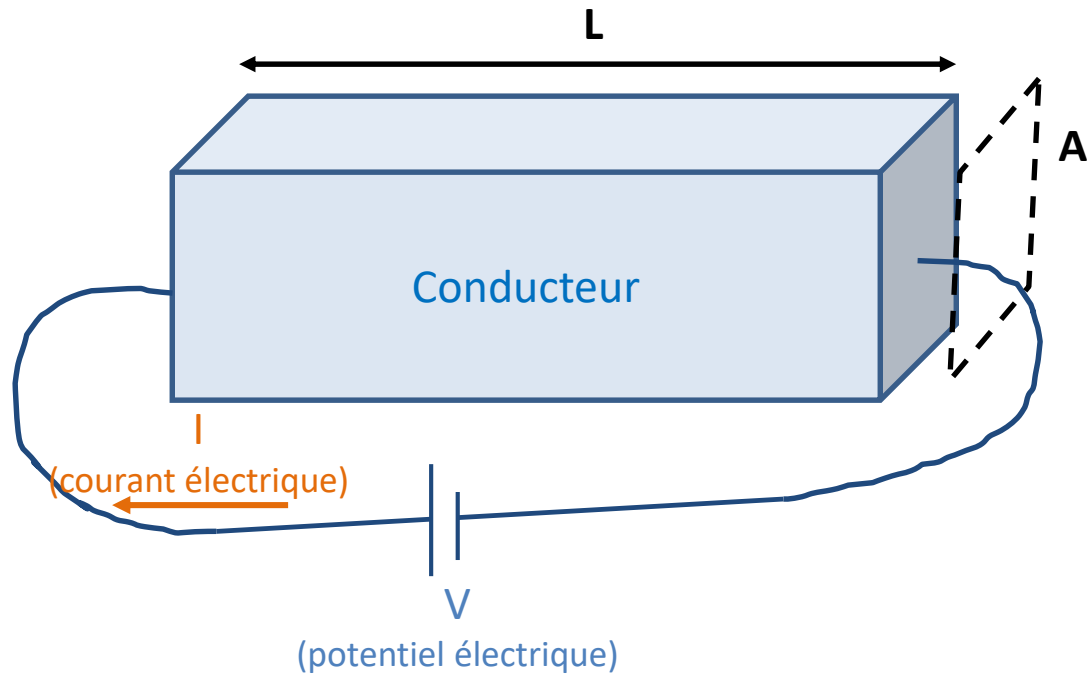
$$R = \rho * \frac{L}{A}$$

Ou L est la longueur de l'objet,
 A sa surface de la section transverse et
 ρ est la résistivité du matériau

Exercice (5 minutes)

En considérant $E = \frac{dV}{dx}$ (x est la direction de la courant),
pouvez-vous déduire la relation entre la densité de courant \mathbf{j} et
le champs électrique \mathbf{E} ?

Lois de Ohm



1ère Loi de Ohm

$$V = R * I$$

Ou R est la résistance de l'objet

2eme Loi de Ohm

$$R = \rho * \frac{L}{A}$$

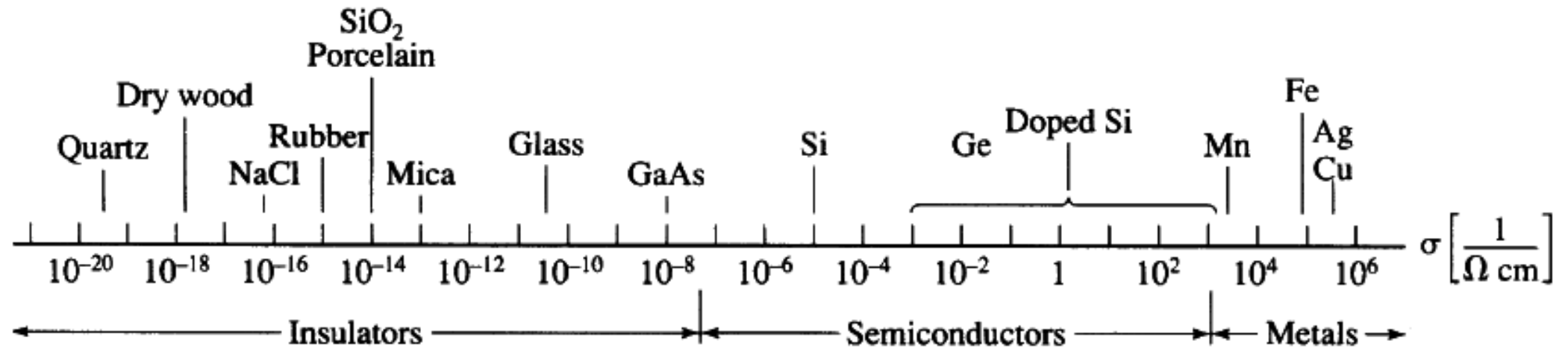
Ou L est la longueur de l'objet,
 A sa surface de la section transverse et
 ρ est la résistivité du matériel

$$E = \frac{dV}{dx} = \frac{dR}{dx} * I = \rho * \frac{1}{A} * I = \rho * j$$

$$j = \frac{1}{\rho} * E = \sigma * E$$

ou σ est la conductivité du matériau

Matériaux et conductivité



Q (5 minutes):

Sur la base de l'échelle de conductivité, indiquez les matériaux utilisés pour ::

- Fils de haute/basse tension
- Isolant de haute tension
- Cellule solaire

Modèle classique de la conductivité (modèle de Drude)

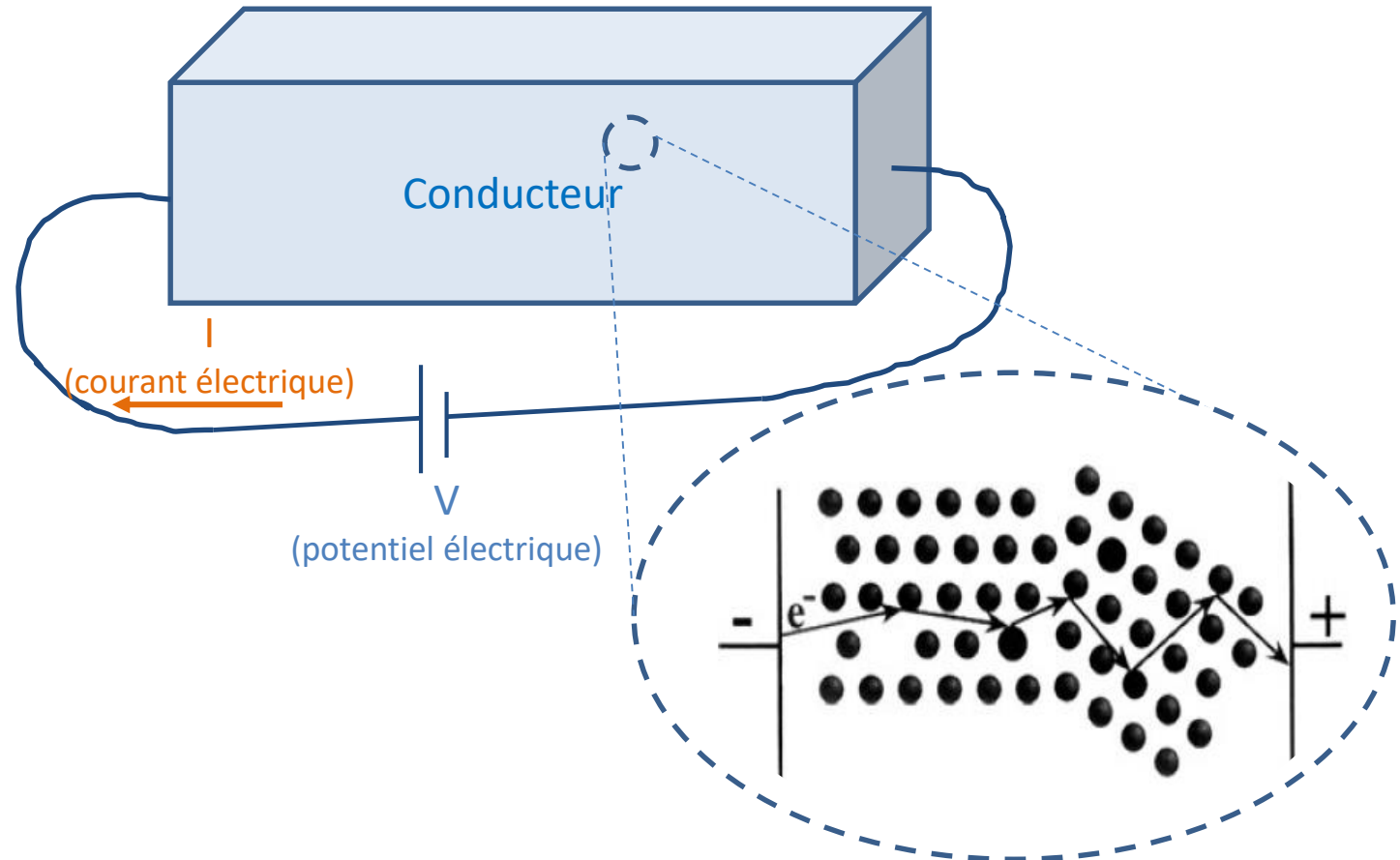
Le courant électrique est transporté par un gaz d'électrons ou plasma.

Celui-ci est formé par les électrons de valence des atomes du matériau conducteur. La densité d'électrons serait donc $N = N_v * \delta$

Où N_v est le nombre d'électrons de valence par atome et δ la densité atomique du matériau.

Avec des valeurs de N_v de l'ordre de 1 (métaux monovalent), ceci traduit à une densité d'électrons entre 10^{22} et 10^{23} atomes/cm³.

Les électrons dans le solide 'bougent' de façon indéterminée dans toutes les directions. Lorsque l'on applique un champ électrique, les électrons sont accélérés par une force égale à eE .



Modèle classique de la conductivité (modèle de Drude)

~~Modèle de mouvement des électrons par la Loi de Newton~~

~~$$m \frac{dv}{dt} = -eE$$~~

Modèle de mouvement des électrons par la Loi de Newton modifiée

$$m \frac{dv}{dt} + \gamma v = e * E$$

ou γv est une force de friction d'un milieu visqueux telle que:

$$\frac{dv}{dt} = 0 \rightarrow \gamma = \frac{eE}{v_f}$$

ou v_f est la vitesse à l'état stationnaire



$$v = v_f \left(1 - \exp \left(-\frac{eE}{mv_f} t \right) \right) \quad \left\{ \begin{array}{l} v = v_f \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau} \right) \right) \\ v_f = \frac{\tau e E}{m} \end{array} \right.$$

Modèle classique de la conductivité (modèle de Drude)

$$v_f = \frac{\tau e E}{m} \quad \text{ou } \tau \text{ est le temps moyen entre collisions}$$

$$j = \sigma E = N * v_f * e \quad \text{ou } N \text{ est la densité d'électrons libres}$$

$$\sigma = \frac{N * e^2 * \tau}{m}$$

La conductivité augmente:

- avec la densité d'électrons libres (N);
- quand τ augmente (s'il y a moins de collisions avec le réseaux cristalline)

Concepts liés:

1) Libre parcours moyen : la distance moyenne parcourue entre collisions $l = v_f \tau$

2) Mobilité : La mobilité (μ) est définie comme le coefficient de proportionnalité entre la vitesse moyenne des électrons et le champ électrique appliqué : $v_f = \mu E$ donc est étroitement lié au temps de relaxation τ .

En effet:

$$\begin{cases} \sigma E = N * v_f * e \\ v_f = \mu E \end{cases}$$



$$\sigma = N * \mu * e$$

Donc la mobilité quantifie la facilité avec laquelle les électrons peuvent se déplacer à travers un conducteur lorsqu'on applique un champ électrique.

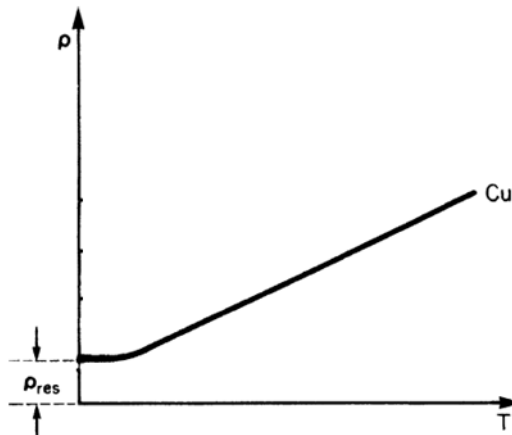
Résistivité et température dans les métaux

La résistivité des métaux décroît de façon linéaire avec la température jusqu'à une valeur finie.

$$\rho_2 = \rho_1 * [1 - \alpha(T_2 - T_1)]$$

Ou α est le **coefficient linéaire en température de la résistivité**. On peut comprendre ceci si on considère que les atomes ne restent pas immobiles dans leur position sur le réseau cristallin. Ils vibrent et oscillent autour de leur position d'équilibre.

La résistivité à $T=0K$, ρ_{res} , est considérée comme étant celle due aux imperfections du cristal et ne dépend pas de T .



Loi de Matthiesen

En considérant:

$$\sigma = \frac{N * e^2 * \tau}{m}$$

ou τ est le temps moyen entre collisions

Et:

$$f = \frac{1}{\tau}$$

ou f est la fréquence moyenne de collisions

Plusieurs source de collisions donne un fréquence de collision totale

$$f_{tot} = \sum_i \frac{1}{\tau_i} \quad \longrightarrow \quad \rho_{tot} = \sum_i \rho_i$$

Pour exemple dans le métaux:

$$\rho_{tot} = \rho_{th} + \rho_{imp} + \rho_{def}$$

Contribution thermique

Contribution impuretés

Contribution défaut réseau

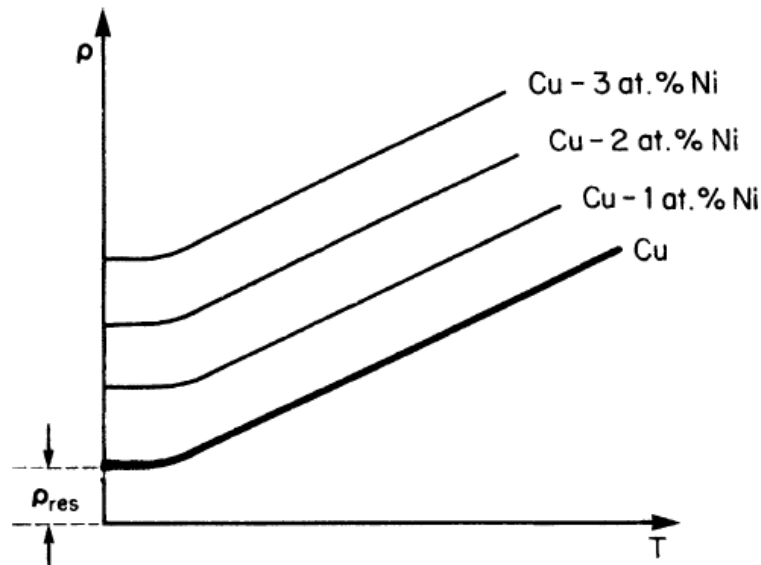
Résistivité dans les alliages métalliques

$$\rho_{tot} = \rho_{th} + \rho_{imp} + \rho_{def}$$

Contribution thermique

Contribution impuretés

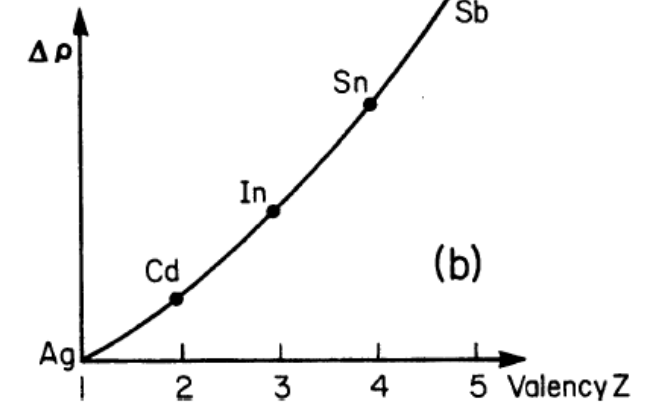
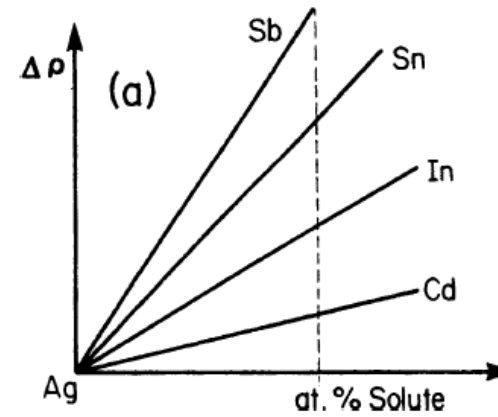
Contribution défaut du réseau



Résistivité en fonction de la température pour différentes compositions de l'alliage CuNi

Origines de ρ_{imp} :

1. Atomes de taille différente crée une forte variation dans le réseau. La probabilité de collision augmente
2. Les atomes ayant des nombres différents d'électrons de valence peuvent créer des charges locales.
3. Les atomes ayant des nombres différents d'électrons peuvent apporter ou enlever des électrons au total d'électrons libres.



Règle de Nordheim (alliages pas ordonné):

$$\rho = x_A \rho_A + x_B \rho_B + C x_A x_B$$

Ou C dépend du matériau.

Cette règle ne tient pas compte des changement dans la densité d'états ou de la formation de phases ordonnées.

