

PHYSIQUE pour tous !

Cycle d'hiver : 20/27 janvier &
3/10 février 2026

De l'atome aux écomatériaux

PHYSIQUE pour tous !

Chapitre 2

Âge des métaux et des premières civilisations



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Préhistoire

Protohistoire

Âge du cuivre

-5 000

-3 300

-2 300

Matériaux

Les métaux natifs font leur apparition : cuivre, argent, or
Fabrication de verre non Translucide (émail)

Comment

Premières traces d'artisanat à base de métaux purs, poteries tournées et cuites au feu de bois puis glacées (émail)

Rappel !

Énergie

Feu de bois
Tour de potier à pied
Martelage à chaud de pépites
Cuisson au feu de bois

Pointe de flèche et hache en cuivre



Bracelet en calcaire tendre



Université

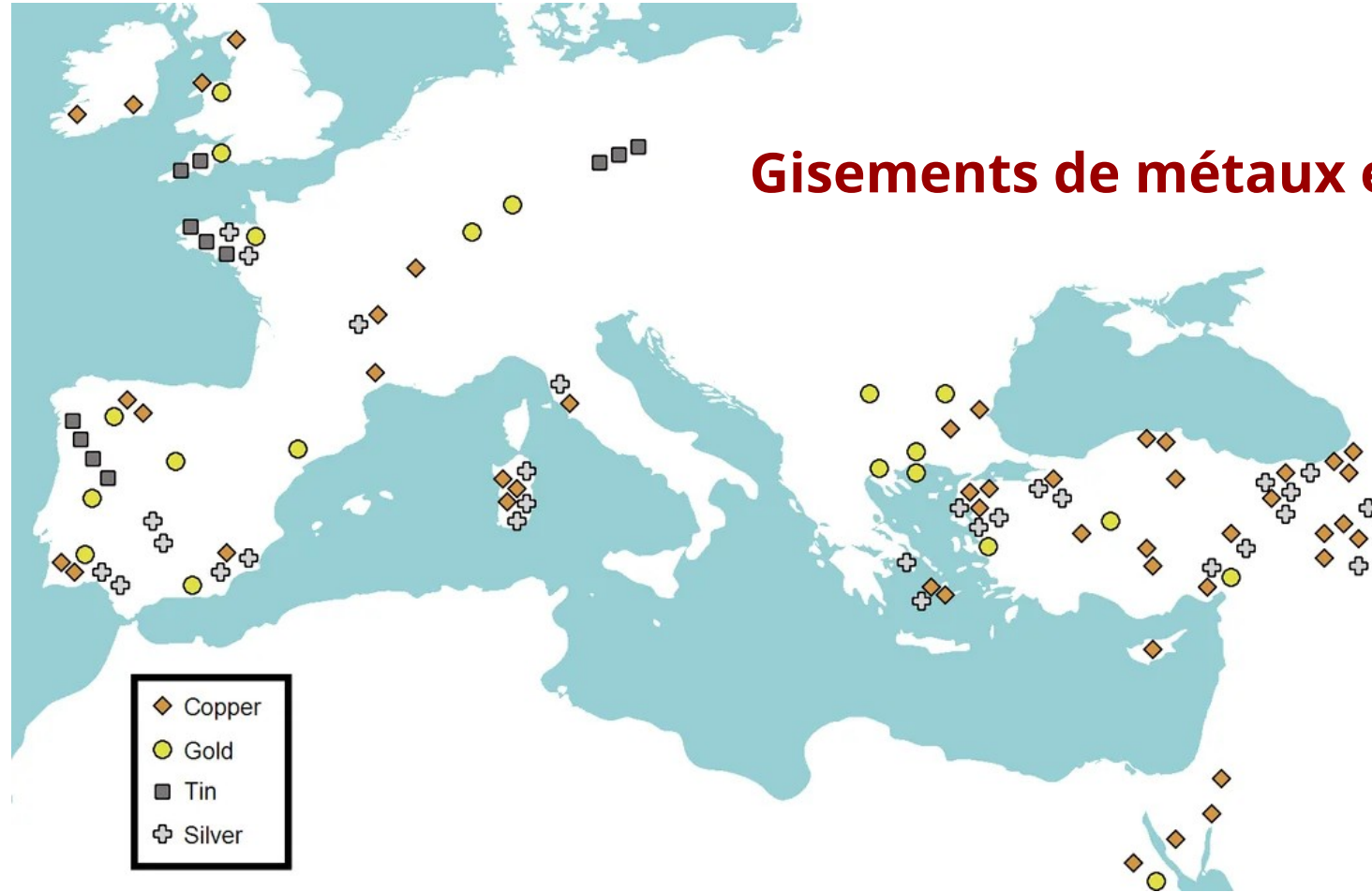
de Strasbourg



Poteries en argile tournée



Gisements de métaux en Europe





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

-1 200

Matériaux

Naissance de la métallurgie

Premiers alliages :

cuivre + étain = bronze

Or + argent = électrum

Utilisation d'oxydes comme colorants

Verre translucide

Pièces en bronze



Comment



Poteries tournées et sculptées



Énergie

Feu de bois

Premiers fours

Nouveaux outils de taille et de forge

Objets utilitaires

'durs' qui remplacent enfin la pierre





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

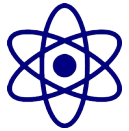
Âge du bronze

-2 300

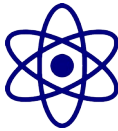
Plus généralement : c'est quoi un métal ??

-1 200





La liaison métallique

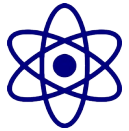


Le modèle de Drude (1900)



Paul Karl Ludwig Drude (1863-1906)

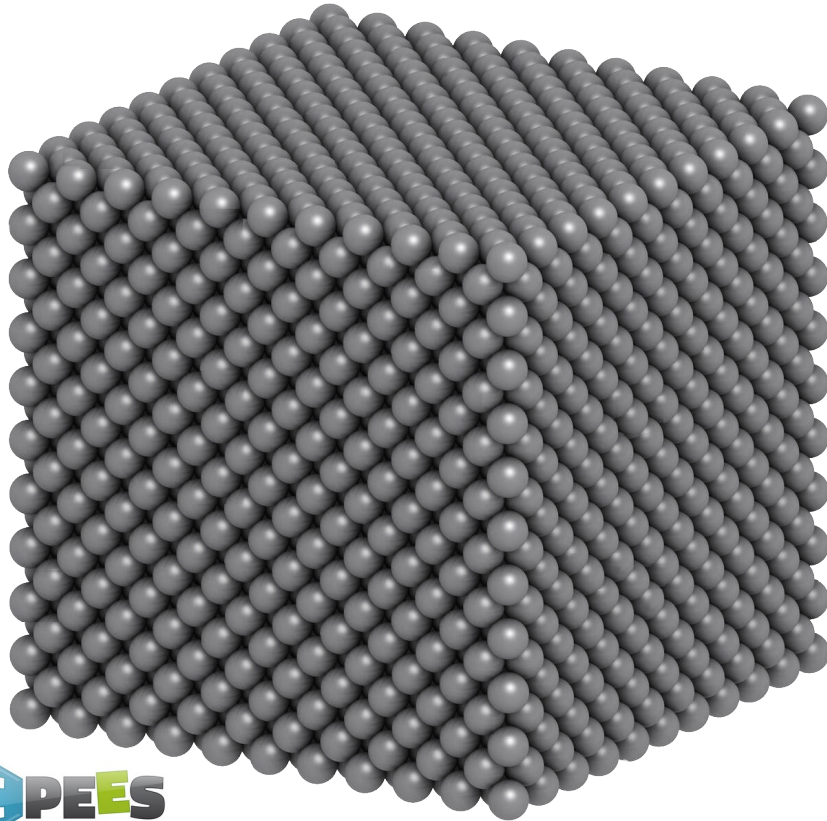
Physicien allemand spécialisé dans l'optique



La liaison métallique

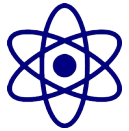


Le modèle de Drude (1900)

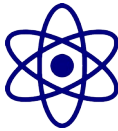


Un métal, c'est une structure compacte d'atomes qui s'empilent comme des billes dans une boîte

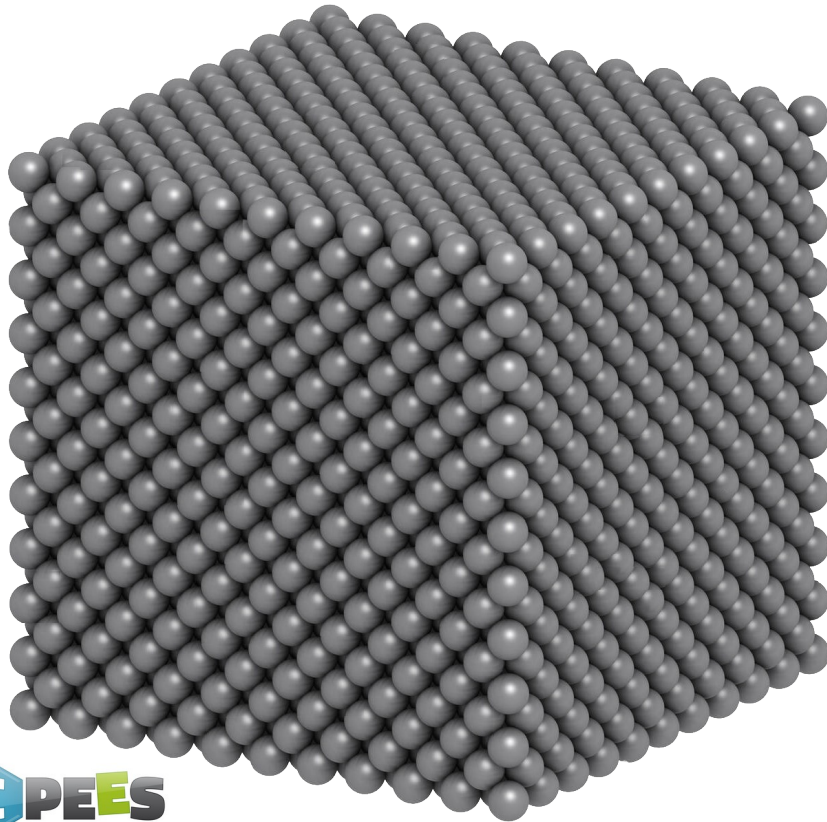
La liaison métallique les maintient ensemble. Mais quelle est-elle ?



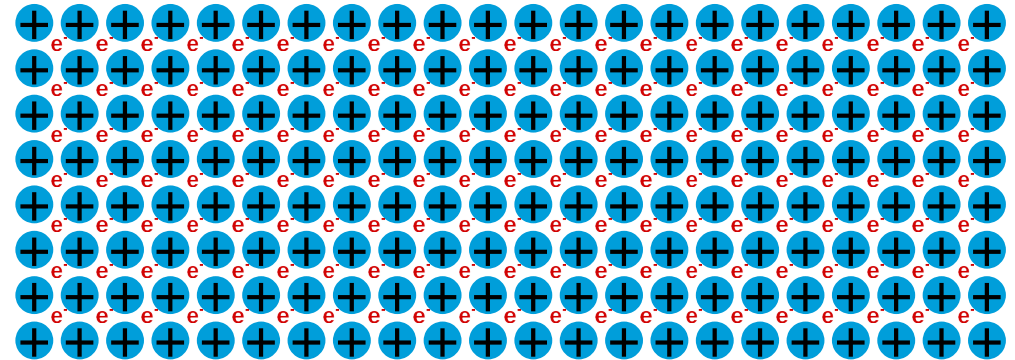
La liaison métallique

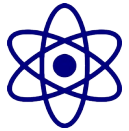


Le modèle de Drude (1900)

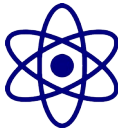


Un modèle qui fonctionne consiste à considérer que les atomes se comportent comme des cations après avoir placé dans un 'pot commun' leurs électrons de valence :





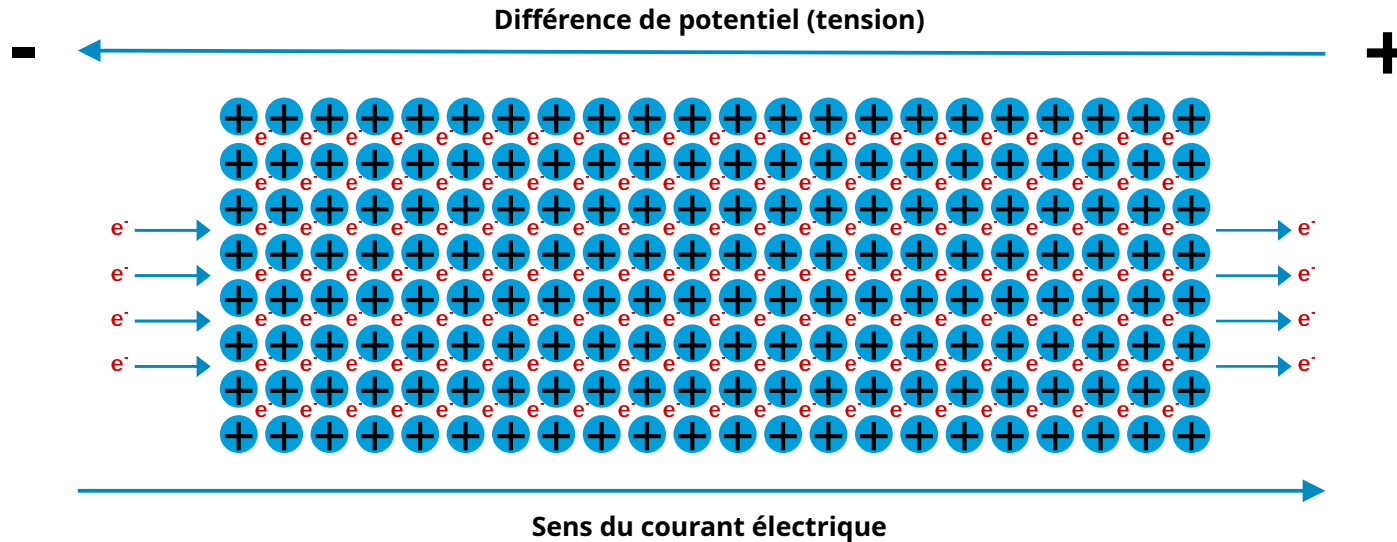
La liaison métallique

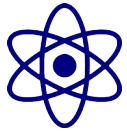


Le modèle de Drude (1900)

Et ça explique beaucoup de choses...

→ la conduction électrique :





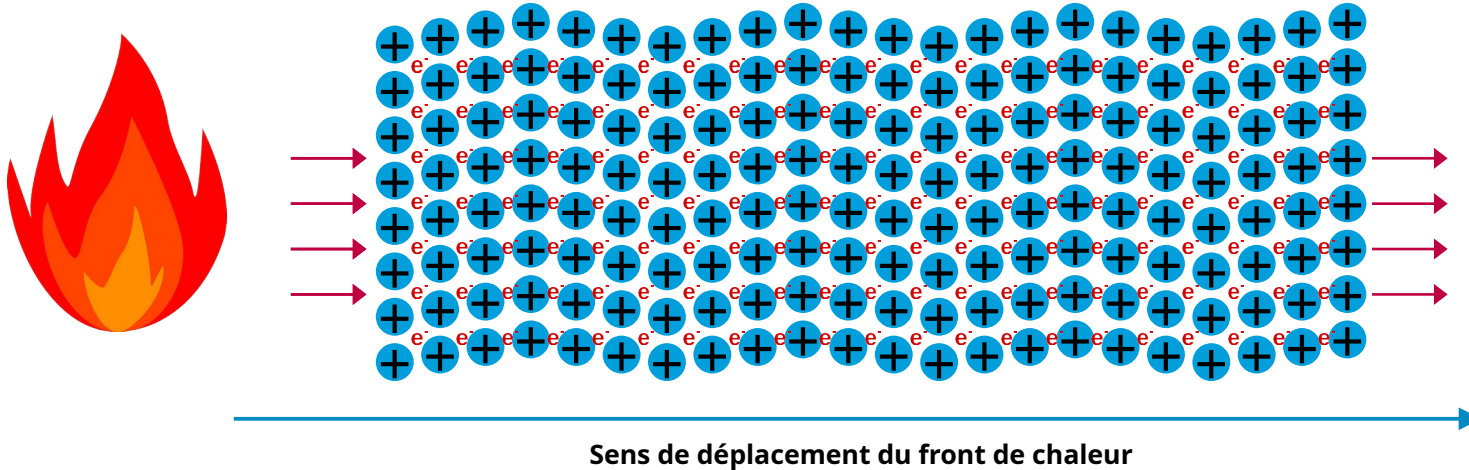
La liaison métallique

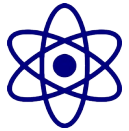


Le modèle de Drude (1900)

Et ça explique beaucoup de choses...

→ la conduction thermique :





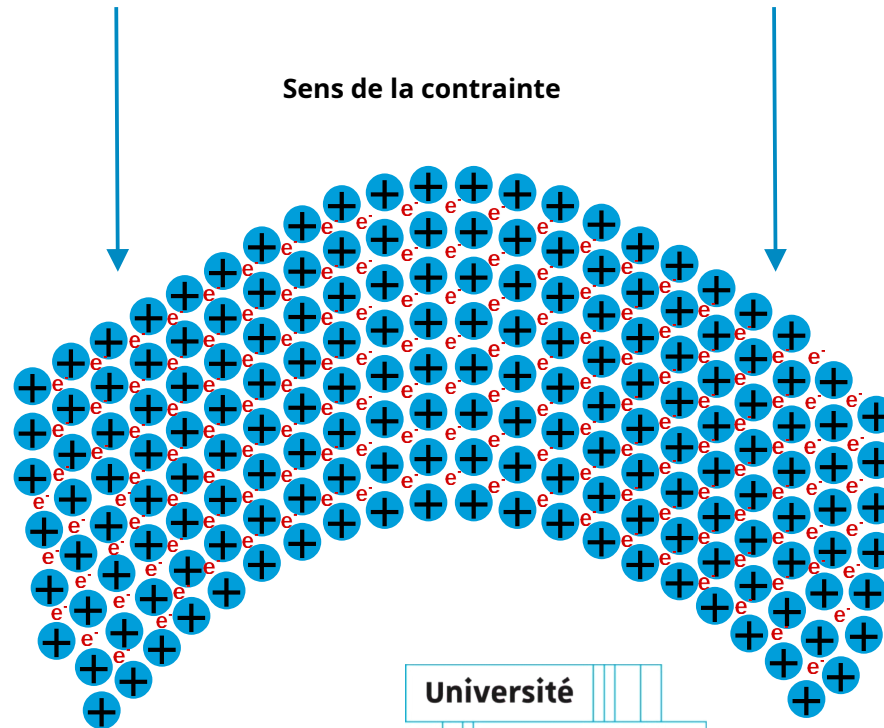
La liaison métallique

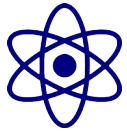


Le modèle de Drude (1900)

Et ça explique beaucoup de choses...

→ élasticité :





La liaison métallique

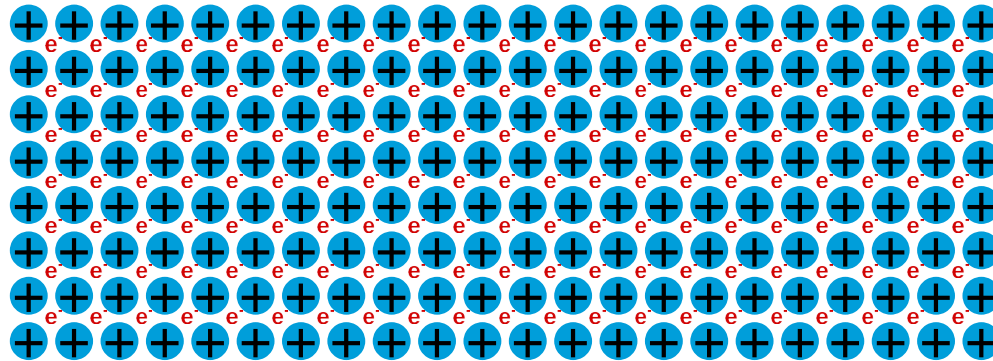


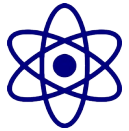
Le modèle de Drude (1900)

Et ça explique beaucoup de choses...

→ élasticité :

Lorsque la contrainte se relâche





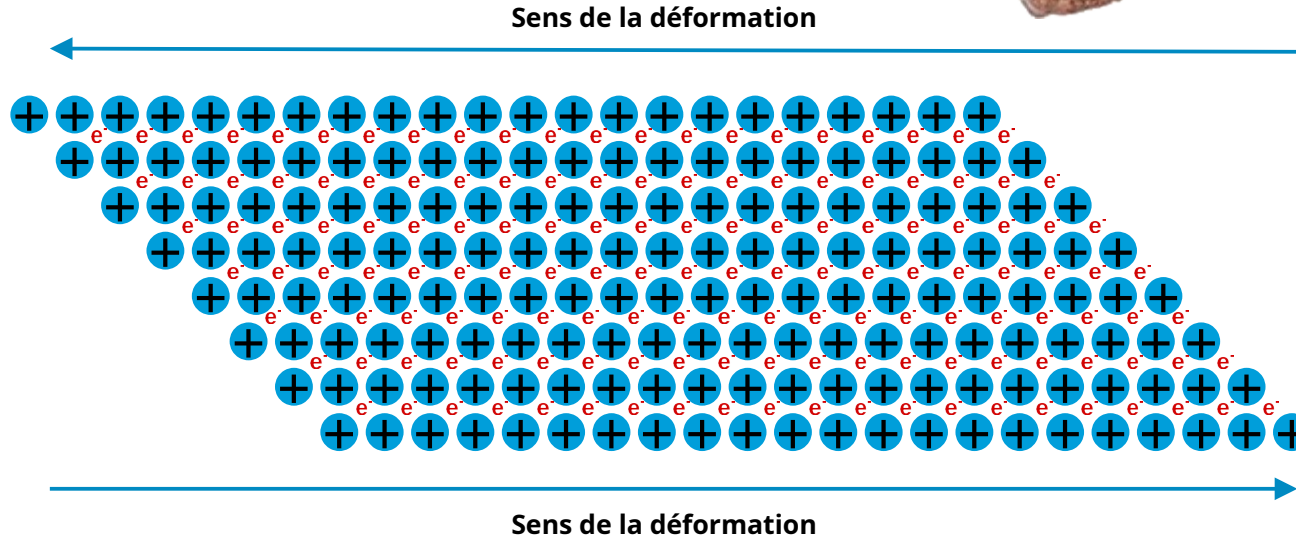
La liaison métallique

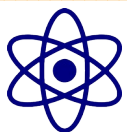


Le modèle de Drude (1900)

Et ça explique beaucoup de choses...

→ la malléabilité et la ductilité :





Notions essentielles pour comprendre les métaux



L'exemple du cuivre...

Cuivre

$8,96 \text{ g/cm}^3$

$T_F = 1\,085^\circ\text{C}$

Dureté : 3

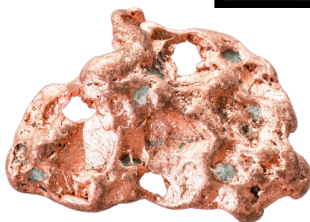
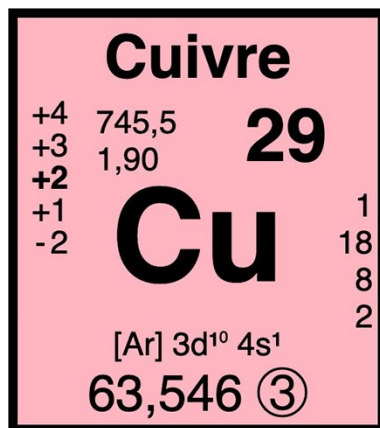
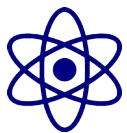


Tableau périodique des éléments chimiques

Groupe	I A	II A	III A	IV A	V A	VI A	VII A	VIII	IX	X	IB	II B	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII A
Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	Hydrogène 1 1,00794																	Hélium 2 4,002602
2	Lithium 3 6,941	Béryllium 4 9,0121831											Bore 5 10,811	Carbone 6 12,0107	Azote 7 14,00644	Oxygène 8 15,9994	Fluor 9 18,99840316	Neon 10 20,1797
3	Sodium 11 22,98976928	Magnésium 12 24,305											Aluminium 13 26,9815385	Silicium 14 28,0855	Phosphore 15 30,97376205	Soufre 16 32,065	Chlore 17 35,453	Argon 18 39,948
4	Potassium 19 39,0983	Calcium 20 40,078	Scandium 21 44,955908	Titane 22 47,867	Vanadium 23 50,9415	Chrome 24 51,9961	Manganèse 25 54,938044	Fer 26 55,845	Cobalt 27 58,933194	Nickel 28 58,6934	Cuivre 29 63,546	Zinc 30 65,38	Gallium 31 69,723	Germanium 32 72,630	Argent 33 74,921595	Sélénium 34 78,9718	Brome 35 79,904	Krypton 36 83,798
5	Rubidium 37 85,4678	Strontium 38 87,62	Yttrium 39 88,90584	Zirconium 40 91,224	Niobium 41 92,90637	Molybdène 42 95,94	Technétium 43 [98]	Ruthénium 44 101,07	Rhodium 45 102,90550	Palladium 46 106,42	Argent 47 107,8682	Cadmium 48 112,414	Indium 49 114,818	Étain 50 118,710	Antimoine 51 121,760	Tellure 52 127,60	Iode 53 126,90447	Xénon 54 131,29
6	Césium 55 132,90545	Barium 56 137,327	Lanthanides 57-71	Hafnium 72 178,49	Tungstène 73 183,84	Rhénium 74 186,207	Osmium 75 190,23	Iridium 76 192,222	Platine 77 195,084	Or 78 196,966569	Argent 79 196,966569	Cadmium 80 200,592	Indium 81 204,3835	Plomb 82 207,2	Bismuth 83 208,9804	Poivre 84 [209]	Atome 85 [210]	Radium 86 [222]
7	Francium 87 [223]	Radium 88 [226]	Actinides 89-103	Rutherfordium 104 [261]	Dubnium 105 [268]	Seaborgium 106 [269]	Bohrium 107 [270]	Hassium 108 [271]	Métastable 109 [272]	Darmstadtium 110 [281]	Rögenium 111 [282]	Copernicium 112 [285]	Nihonium 113 [286]	Flerovium 114 [289]	Moscovium 115 [291]	Livermorium 116 [293]	Tenneis 117 [294]	Oganeson 118 [294]
	Lanthane 57 138,90547	Cérite 58 140,116	Praseodyme 59 140,90766	Néodyme 60 144,242	Prométhium 61 [145]	Samarium 62 150,36	Europium 63 151,964	Gadolinium 64 157,25	Terbium 65 158,92535	Dysprosium 66 162,500	Holmium 67 164,93033	Erbium 68 167,259	Thulium 69 168,93422	Ytterbium 70 173,045	Lutécium 71 174,9668			
	Actinium 89 [227]	Thorium 90 232,0377	Protactinium 91 231,03688	Uranium 92 238,02891	Néptunium 93 [237]	Plutonium 94 [244]	Américium 95 [243]	Curium 96 [247]	Berkélium 97 [247]	Californium 98 [251]	Einsteinium 99 [252]	Fermium 100 [257]	Mendelevium 101 [258]	Noël 102 [259]	Lavrenium 103 [266]			
	Alcalins	Alcalino-terreux	Lanthanides	Actinides	Métaux de transition	Métaux pauvres	Métalloïdes	Autres non-métaux	Halogènes	Gaz nobles	Non classés	primordial	désintégration d'autres éléments	synthétique				



Notions essentielles pour comprendre les métaux



L'exemple du cuivre...

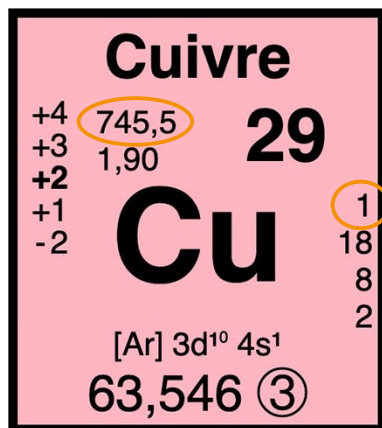
Pourquoi le cuivre est-il si bon conducteur électrique ?

Cuivre

8,96 g/cm³

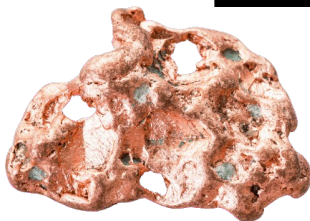
T_F = 1 085°C

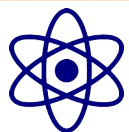
Dureté : 3



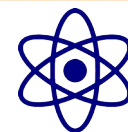
→ rôle de la structure électronique...

M → M⁺ : 745,5 kJ/mol





Notions essentielles pour comprendre les métaux



L'exemple du cuivre...

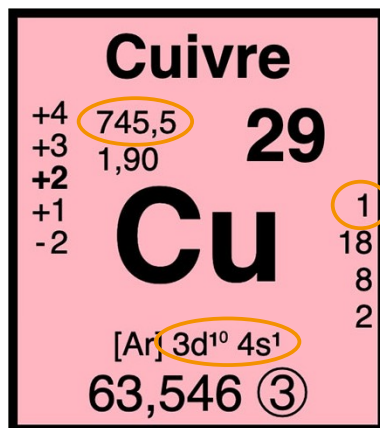
Pourquoi le cuivre est-il si bon conducteur électrique ?

Cuivre

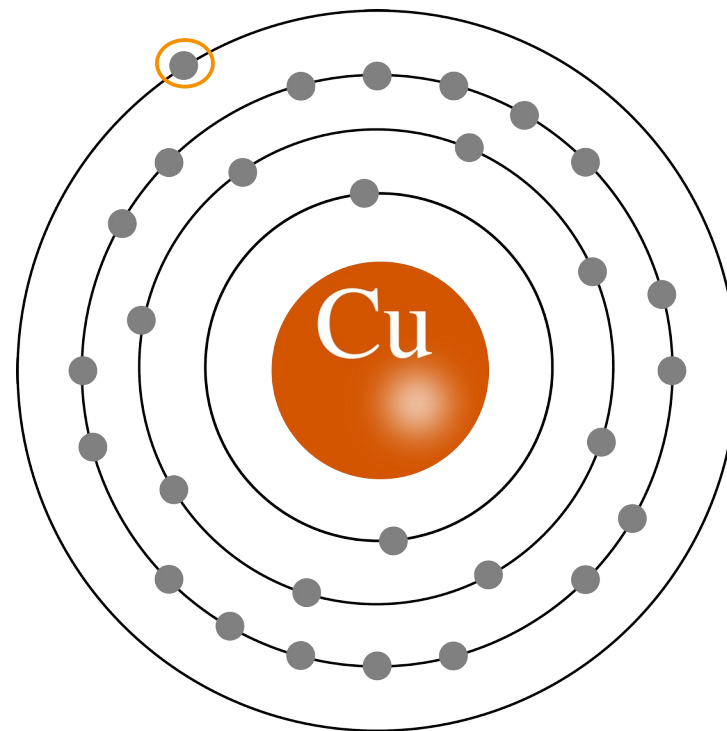
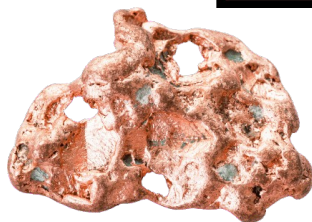
$8,96 \text{ g/cm}^3$

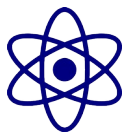
$T_F = 1\,085^\circ\text{C}$

Dureté : 3

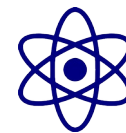


$M \rightarrow M^+ : 745,5 \text{ kJ/mol}$





Notions essentielles pour comprendre les métaux



L'exemple du cuivre...

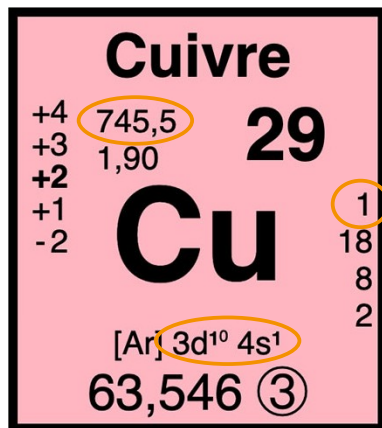
Pourquoi le cuivre est-il si bon conducteur électrique ?

Cuivre

8,96 g/cm³

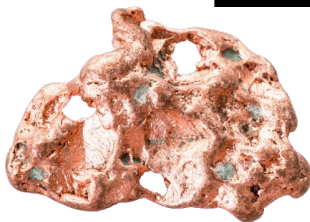
T_F = 1 085°C

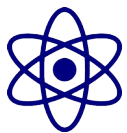
Dureté : 3



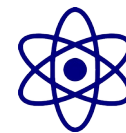
$M \rightarrow M^+ : 745,5 \text{ kJ/mol}$

- le cuivre n'a qu'un seul électron de valence (4s¹)
- faiblement lié, il peut se déplacer librement
- la 'mer d'électrons' de Cu est donc très bien fournie !





Notions essentielles pour comprendre les métaux



L'exemple du cuivre...

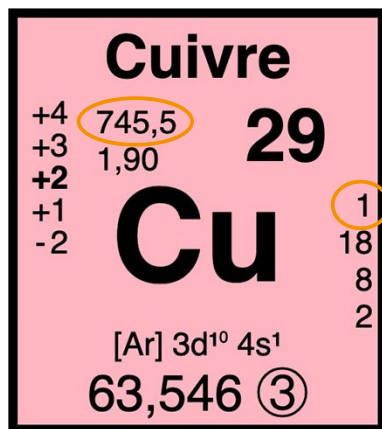
Pourquoi le cuivre est-il si bon conducteur électrique ?

Cuivre

8,96 g/cm³

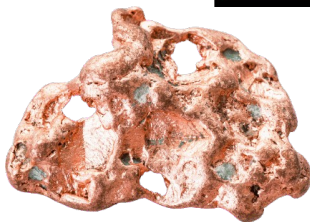
T_F = 1 085°C

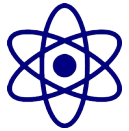
Dureté : 3



→ rôle de la structure cristalline...

M → M⁺ : 745,5 kJ/mol





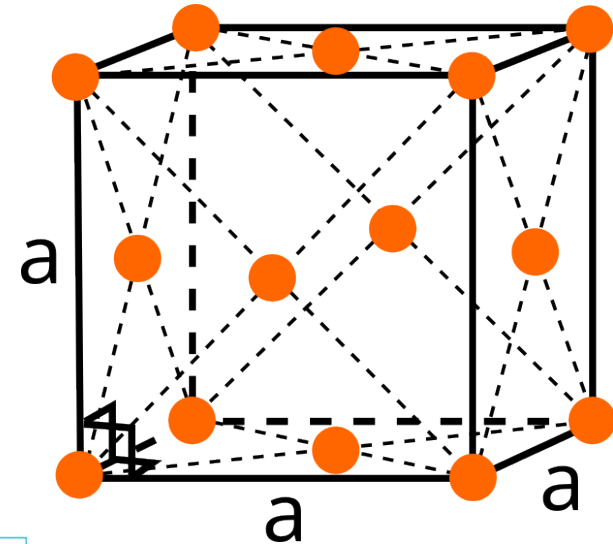
Notions essentielles pour comprendre les métaux

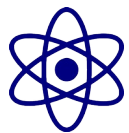


L'exemple du cuivre

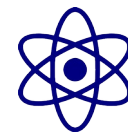
Pourquoi le cuivre est-il si bon conducteur électrique ?

- le cuivre a une structure cubique à faces centrées ;
- dans cette structure, chaque atome est entouré de 12 voisins ;
- cela favorise le partage des électrons ;

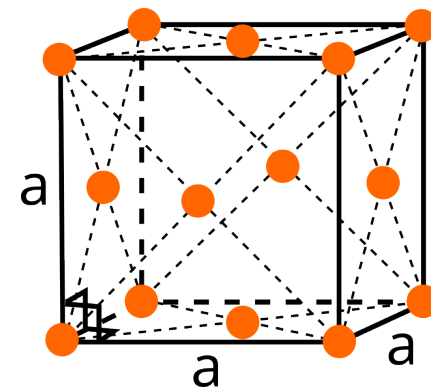
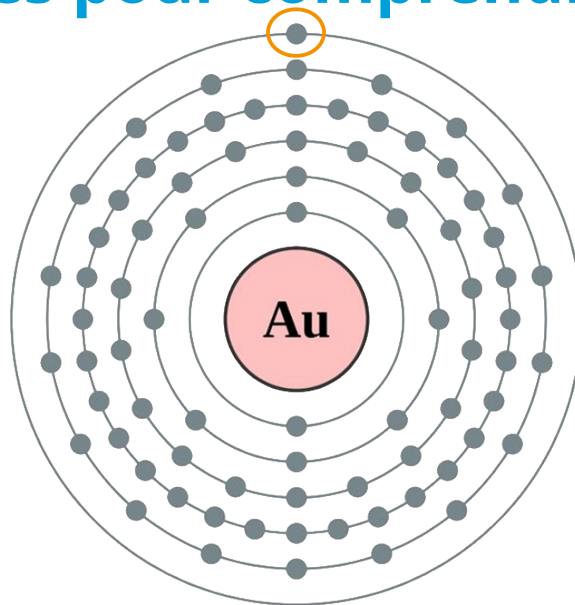




Notions essentielles pour comprendre les métaux



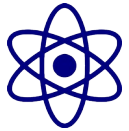
Au : le même en plus gros !



- tout comme Cu, l'or qu'un seul électron de valence ($6s^1$) ;
- et la même structure cristalline ;
- d'où l'excellente conductivité électrique et thermique de Au !

1s 2s 2p 3s 3p 4s 3d 4p 5s 4d 5p 6s...

Or			
+5	890,1	79	1
+3	2,54		18
+2			32
+1			18
-1			8
-2			2
-3			
[Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ¹			
196,966569			

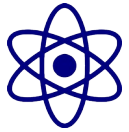


Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

→ La liaison métallique n'explique pas tout !



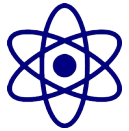
Notions essentielles pour comprendre les métaux



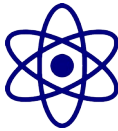
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

→ La liaison métallique n'explique pas tout !

→ bien qu'elle explique la conductivité et la malléabilité générale des métaux,



Notions essentielles pour comprendre les métaux

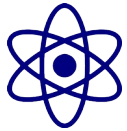


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

→ La liaison métallique n'explique pas tout !

→ bien qu'elle explique la conductivité et la malléabilité générale des métaux,

→ des différences spécifiques existent entre les métaux : densité, résistance mécanique, résistance chimique... qui s'expliquent par d'autres facteurs ;



Notions essentielles pour comprendre les métaux



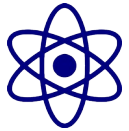
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

→ La liaison métallique n'explique pas tout !

→ bien qu'elle explique la conductivité et la malléabilité générale des métaux,

→ des différences spécifiques existent entre les métaux : densité, résistance mécanique, résistance chimique... qui s'expliquent par d'autres facteurs ;

→ notamment la structure cristalline...

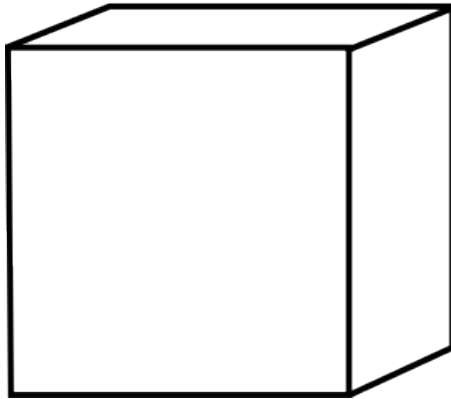


Notions essentielles pour comprendre les métaux

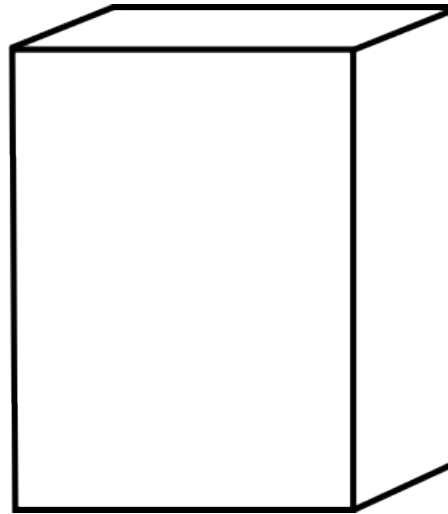


Base de la cristallographie

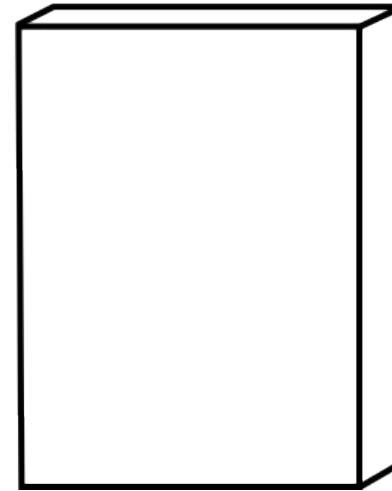
→ les systèmes cristallins orthogonaux :



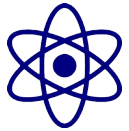
Cubique
 $a = b = c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



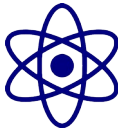
Tétragonal / quadratique
 $a = b \neq c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



Orthorhombique
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

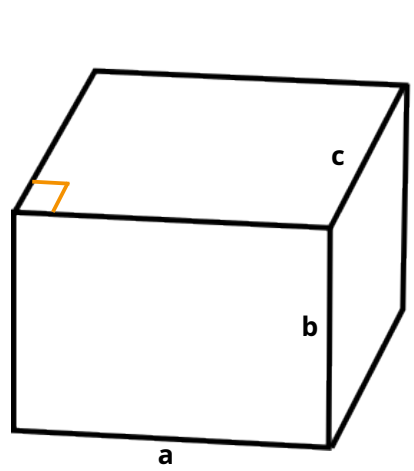


Notions essentielles pour comprendre les métaux

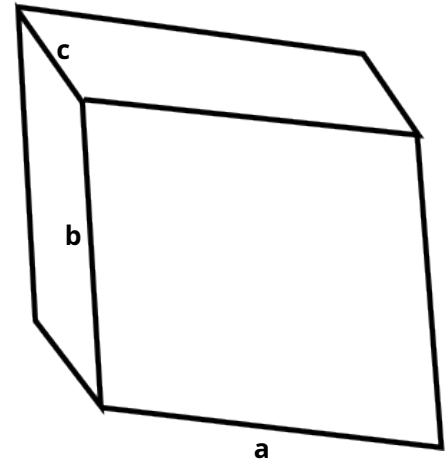


Base de la cristallographie

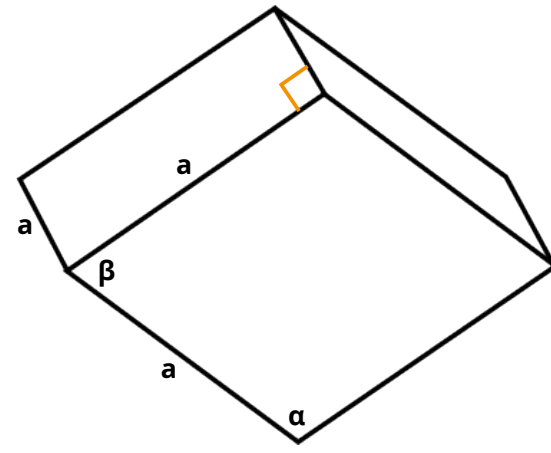
→ les systèmes cristallins non orthogonaux :



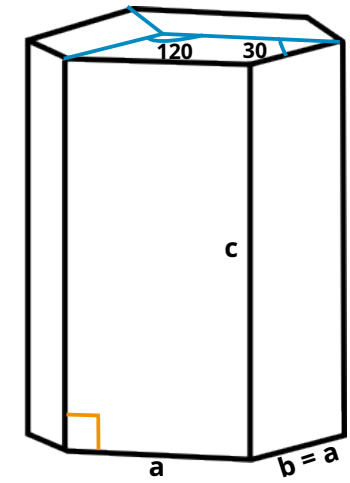
Monoclinique
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$



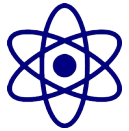
Triclinique
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$



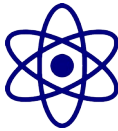
Rhomboédrique
 $a = b = c$
 $\alpha \neq \beta \neq \gamma = 90^\circ$



Hexagonal
 $a = b \neq c$
 $\alpha = 30^\circ ; \beta = 120^\circ ; \gamma = 90^\circ$

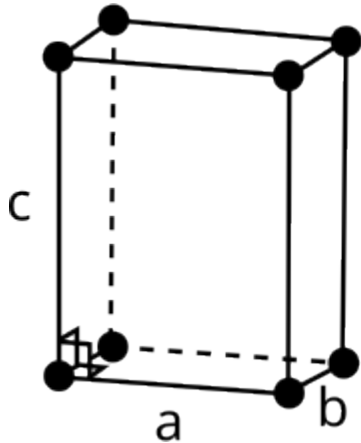


Notions essentielles pour comprendre les métaux

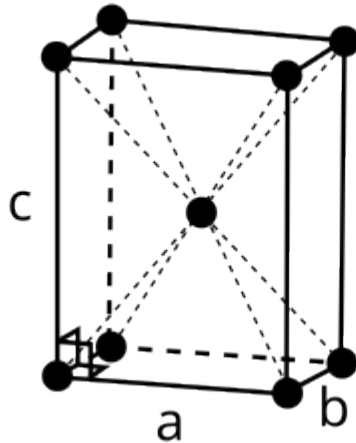


Base de la cristallographie

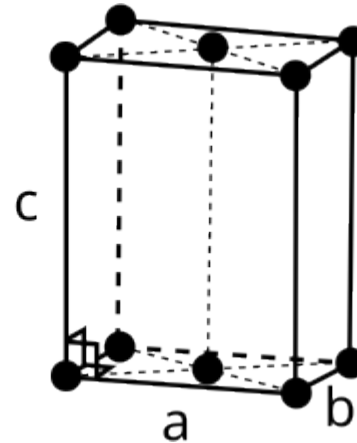
→ les 14 réseaux de Bravais, ou comment se remplit la maille cristalline :



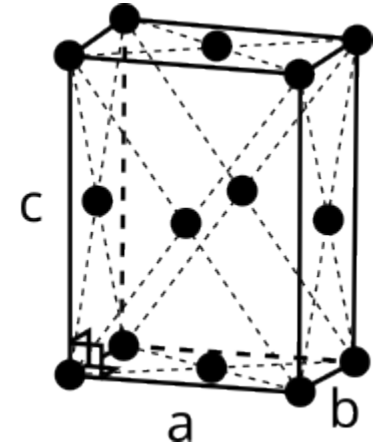
Simple



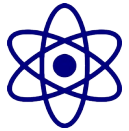
Centré



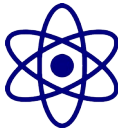
2 faces centrées



À faces centrées



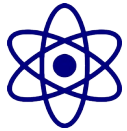
Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la structure cristalline :

→ CFC (Cu, Al, Ni, Au, Pt...) : dense et compacte, confère ductilité et bonne conductivité ;



Notions essentielles pour comprendre les métaux

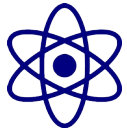


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la structure cristalline :

→ CFC (Cu, Al, Ni, Au, Pt...) : dense et compacte, confère ductilité et bonne conductivité ;

→ HC (Mg, Zn, Ti...) : dense mais avec moins de plans de glissement → moins ductile, moins bon conducteur ;



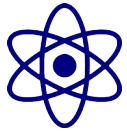
Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la structure cristalline :

- CFC (Cu, Al, Ni, Au, Pt...) : dense et compacte, confère ductilité et bonne conductivité ;
- HC (Mg, Zn, Ti...) : dense mais avec moins de plans de glissement → moins ductile, moins bon conducteur ;
- CC (Fe, W...) : moins compacte, plus résistante mécaniquement, moins bon conducteur ; mais T_f élevée;



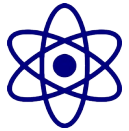
Notions essentielles pour comprendre les métaux



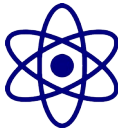
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la structure cristalline :

- CFC (Cu, Al, Ni, Au, Pt...) : dense et compacte, confère ductilité et bonne conductivité ;
- HC (Mg, Zn, Ti...) : dense mais avec moins de plans de glissement → moins ductile, moins bon conducteur ;
- CC (Fe, W...) : moins compacte, plus résistante mécaniquement, moins bon conducteur ; mais T_f élevée;
- un cas particulier que nous verrons plus loin : le mercure, Hg, qui est rhomboédrique

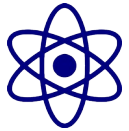


Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

L'insertion d'un autre élément dans une structure cristalline peut provoquer l'apparition de défauts : les dislocations...



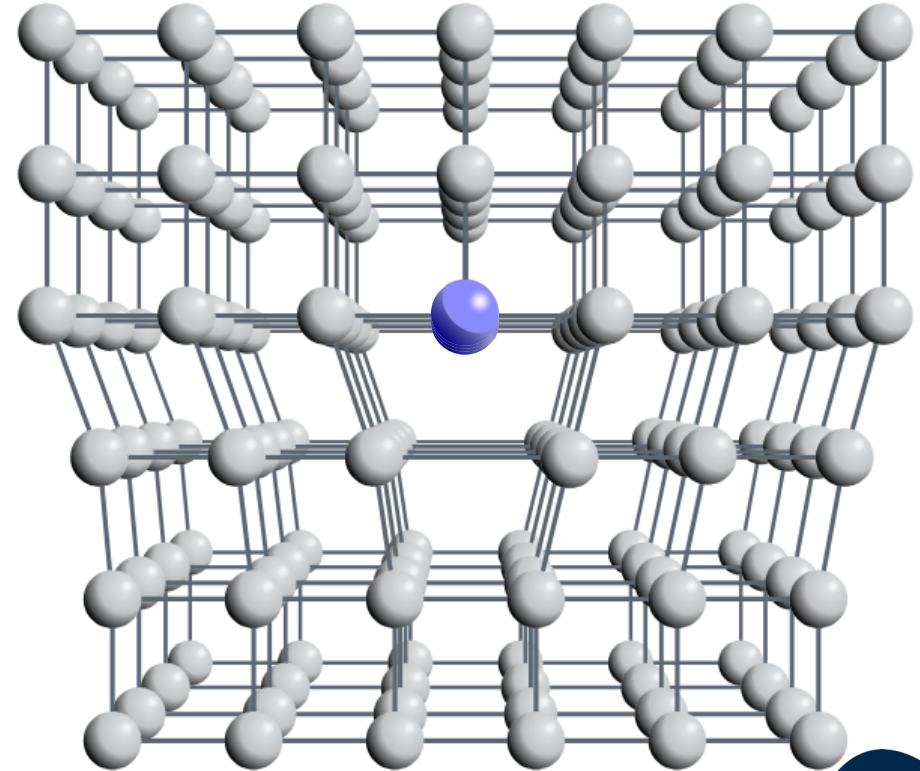
Notions essentielles pour comprendre les métaux

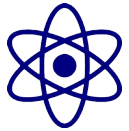


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

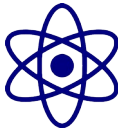
L'insertion d'un autre élément dans une structure cristalline peut provoquer l'apparition de défauts : les dislocations...

... qui influent sur la résistance mécaniques





Notions essentielles pour comprendre les métaux



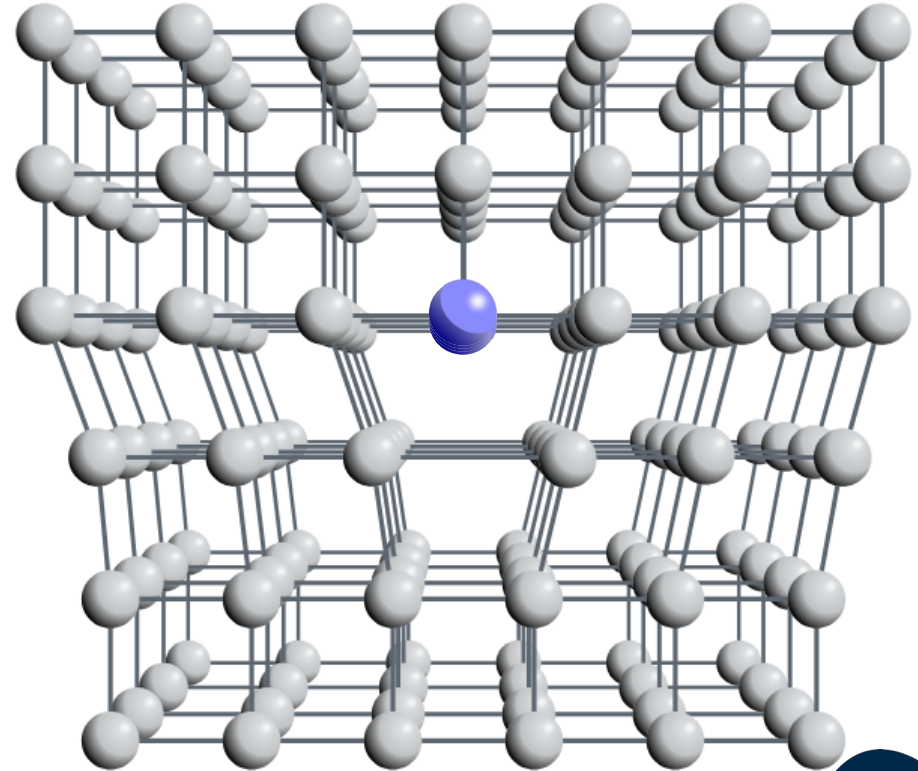
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

L'insertion d'un autre élément dans une structure cristalline peut provoquer l'apparition de défauts : les dislocations...

... qui influent sur la résistance mécaniques

ex. $\text{Zn} \rightarrow \text{Cu}$ = laiton qui a une structure et des propriétés différentes de Cu

→ le laiton est plus résistant que Cu pur mais moins bon conducteur





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



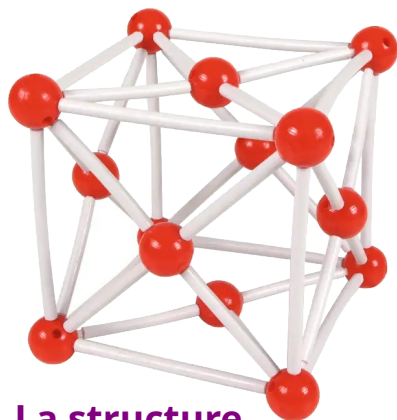
Protohistoire

Âge du bronze

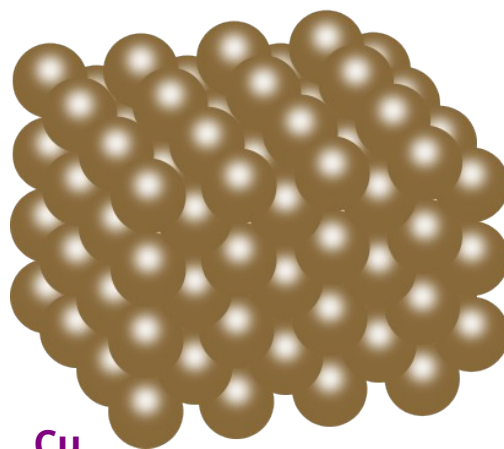
-2 300

Pourquoi le bronze ?

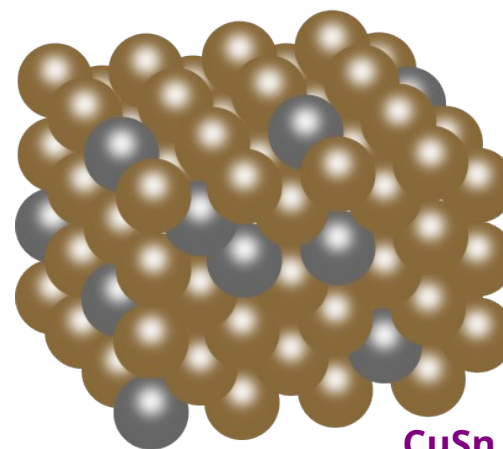
-1 200



La structure
CFC du Cu

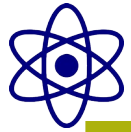


Cu



CuSn





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

-1 200

Le cuivre est mou et malléable ; l'alliage avec l'étain change les propriétés :





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

-1 200

Le cuivre est mou et malléable ; l'alliage avec l'étain change les propriétés :

Dureté Bronze = 4-5 > dureté Cuivre = 3





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

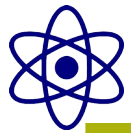
-1 200

Le cuivre est mou et malléable ; l'alliage avec l'étain change les propriétés :

Dureté Bronze = 4-5 > dureté Cuivre = 3

Résistance à la traction Bronze = 300-500 MPa > Cuivre = 200 MPa





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

-1 200

Le cuivre est mou et malléable ; l'alliage avec l'étain change les propriétés :

Dureté Bronze = 4-5 > dureté Cuivre = 3

Résistance à la traction Bronze = 300-500 MPa > Cuivre = 200 MPa

→ le Cu n'est donc pas idéal pour faire des armes ou des outils...





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

-1 200

Le cuivre est mou et malléable ; l'alliage avec l'étain change les propriétés :

Dureté Bronze = 4-5 > dureté Cuivre = 3

Résistance à la traction Bronze = 300-500 MPa > Cuivre = 200 MPa

→ le Cu n'est donc pas idéal pour faire des armes ou des outils...

$T_{\text{fusion Cu}} = 1085^{\circ}\text{C} > T_{\text{fusion Bronze}} = 950^{\circ}\text{C} \rightarrow$ moins énergivore





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

-1 200

Le cuivre est mou et malléable ; l'alliage avec l'étain change les propriétés :

Dureté Bronze = 4-5 > dureté Cuivre = 3

Résistance à la traction Bronze = 300-500 MPa > Cuivre = 200 MPa

→ le Cu n'est donc pas idéal pour faire des armes ou des outils...

$T_{\text{fusion Cu}} = 1085^{\circ}\text{C} > T_{\text{fusion Bronze}} = 950^{\circ}\text{C} \rightarrow$ moins énergivore

Enfin, le bronze a une meilleure coulabilité ce qui permet de mieux remplir les moules.





-2 30



1084,87 °C

1500

1000

500

0
Cu

Cu_3Sn (ϵ)

Cu_6Sn_5 (η)

1
Sn

Liquide (L) : Mélange fondu de Cu et Sn
Alpha (α) : solution solide de Sn dans Cu (bronze "mou")
Bêta (β) et Gamma (γ) : phases intermédiaires (bronze "dur")
Delta (δ) et Epsilon (ϵ) : phases riches en étain (fragiles)
Mélanges biphasés : $\alpha + \text{L}$...

liquide (L)

α

β

γ

$\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$ (ζ)

Cu_4Sn (δ)

$\epsilon + \text{L}$

$\eta + \text{L}$

$\epsilon + \eta$

$\eta + \text{Sn}$

649 °C

408 °C

227 °C

231,87 °C



00





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

-1 200



Phase alpha :

Composition : 0-15 % d'étain dans du cuivre

Structure : les atomes d'étain se dissolvent dans le réseau cristallin de Cu (CFC)

Propriétés :

- malléable et ductile, peut être martelé ou étiré
- bonne conductivité électrique (même si les romains ne s'en servaient pas pour cela !)

Exemple historique : pièces de monnaie romaines



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

-1 200



Phase bêta :

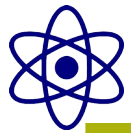
Composition : 15-25 % d'étain dans du cuivre

Structure : cubique centré, différente de celle de Cu ; plus dure et résistante que CFC

Propriétés :

- résistance mécanique élevée (idéal pour les armes, armures et outils)
- point de fusion plus bas que Cu ($\sim 700^{\circ}\text{C}$ au lieu de 1085°C), facilitant la coulée

Exemple historique : épées mycéniennes (-1600) et statues grecques



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

-1 200

Phase liquide :

Composition : étain dans du cuivre, le tout fondu

Utilisation :

→ le mélange Cu-Sn est fondu entre 232° et 1000°C, selon sa composition, afin d'être coulé dans des moules

Exemple historique : les cloches médiévales étaient coulées dans du bronze à 20-25 % de Sn pour leur sonorité.





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



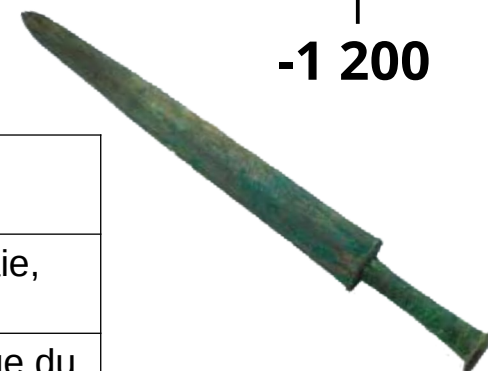
Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

-1 200

Phase	Composition (Sn)	Température	Propriétés	Applications historiques
α (Cu riche)	0-15% Sn	$< 700^{\circ}\text{C}$	Malléable, bonne conductivité	Pièces de monnaie, ustensiles
β	15-25% Sn	$520-798^{\circ}\text{C}$	Dure et résistante	Épées, armures (âge du bronze)
γ	$\sim 25\%$ Sn	$586-677^{\circ}\text{C}$	Fragile, peu utilisée	Rarement exploité
Liquide L	variable	$> 232-1000^{\circ}\text{C}$	Mélange fondu pour une coulée	Fabrication d'objets par moulage





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

Le cuivre natif est rare et a été rapidement épuisé.

-1 200





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

-1 200

Le cuivre natif est rare et a été rapidement épuisé.

Les mines de Chypre (le nom « cuivre » vient du latin *cuprum* qui signifie « métal de Chypre ») étaient déjà en déclin en -2 000.





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

-1 200

Le cuivre natif est rare et a été rapidement épuisé.

Les mines de Chypre (le nom « cuivre » vient du latin *cuprum* qui signifie « métal de Chypre ») étaient déjà en déclin en -2 000.

L'étain était disponible en grandes quantités : Cornouailles (Angleterre), Espagne, Anatolie (Turquie).





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

-1 200

Le cuivre natif est rare et a été rapidement épuisé.

Les mines de Chypre (le nom « cuivre » vient du latin *cuprum* qui signifie « métal de Chypre ») étaient déjà en déclin en -2 000.

L'étain était disponible en grandes quantités : Cornouailles (Angleterre), Espagne, Anatolie (Turquie).

Son exploitation a ouvert de nouvelles voies commerciales (route de l'étain : des Cornouailles à la Grèce).

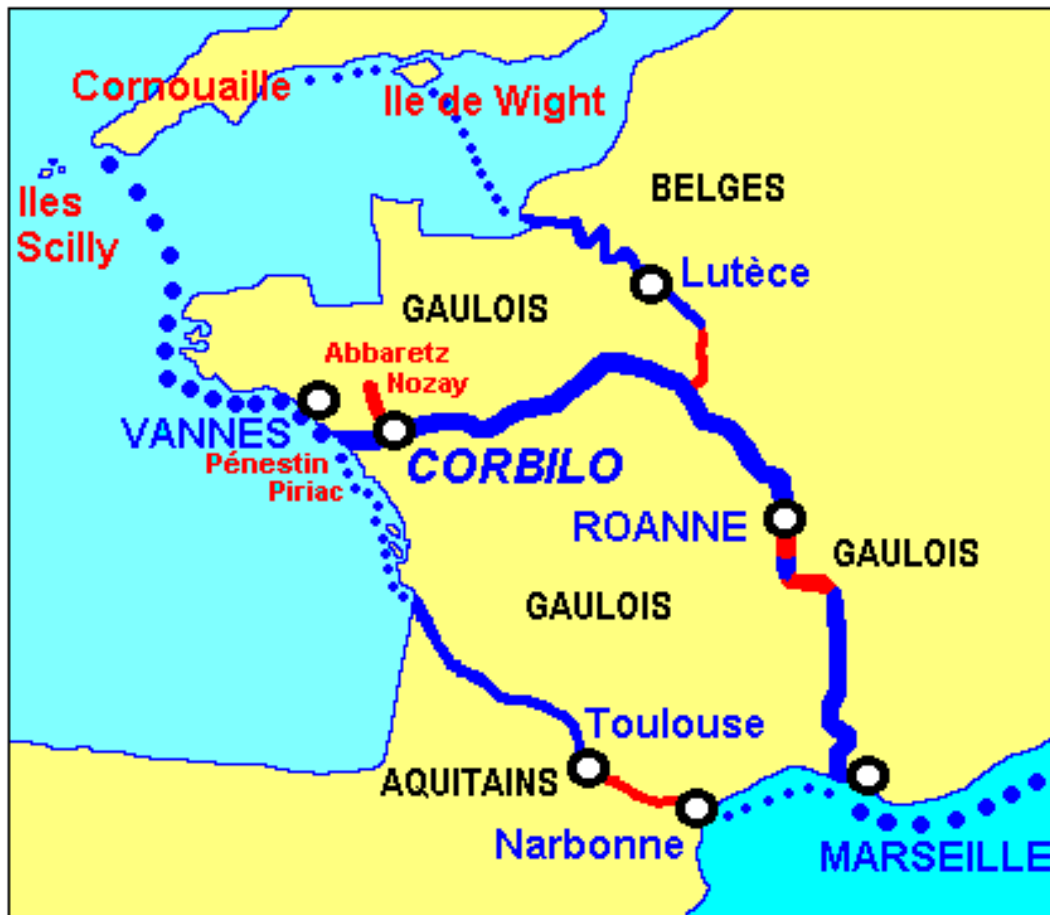




L'Âge des



-2 300



Route(s) de l'étain

civilisations



-1 200





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

-1 200

Casques
en bronze
(France)



Épée en
bronze



Les armes et armures en bronze sont plus légères que celles en cuivre.

Couteaux
en bronze





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

-1 200



Haches en bronze
(vers -1400, France)

La production d'outils agricoles en bronze permet l'augmentation des rendements des exploitations.



Roue en bronze



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

Casque Bronze
et or (France)



Vase en bronze
(Autriche)

Tête du Roi de
Ninive (Irak)



-1 200

On commence à fabriquer des objets de prestige et des bijoux en bronze



Broches et
bracelets
en bronze



Université

de Strasbourg



Char solaire
(Danemark)



Physique pour tous - Thierry DINTZER



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

-1 200



Monnaie : les premiers lingots-monnaies étaient en bronze



Lingot de bronze
proto-monnaie
(Jordanie, -1 000)



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

-1 200

Impact Environnemental ?

Déforestation : les fours à bronze consommaient énormément de bois car il fallait chauffer à plus de 1200°C : il fallait 10 kg de charbon de bois pour 1 kg de bronze !

→ en Crète, des forêts entières ont disparu pour alimenter les forges minoennes.



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

-1 200

Impact Environnemental ?

Déforestation : les fours à bronze consommaient énormément de bois car il fallait chauffer à plus de 1200°C : il fallait 10 kg de charbon de bois pour 1 kg de bronze !

→ en Crète, des forêts entières ont disparu pour alimenter les forges minoennes.

Pollution des sols : les scories (déchets de fusion) contenaient des métaux lourds (plomb, arsenic), toxiques pour les sols.

→ les scories de l'âge du bronze en Sardaigne montrent des taux élevés de plomb, responsable du saturnisme.



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

-1 200

Impact Environnemental ?

L'Âge du Bronze marque le début d'une logique encore actuelle : exploiter la Terre pour créer des matériaux 'supérieurs', au prix d'impacts environnementaux croissants !



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Transition vers l'Âge du Fer

-1 200

L'étain a fini par devenir rare. Vers -1 200, les routes de l'étain se sont tariées.
Le prix de l'étain a explosé, rendant le bronze trop cher.



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Transition vers l'Âge du Fer

-1 200

L'étain a fini par devenir rare. Vers -1 200, les routes de l'étain se sont tariées.
Le prix de l'étain a explosé, rendant le bronze trop cher.

→ On suppose que la raréfaction de l'étain est en partie responsable de la chute des civilisations Mycènes (Grèce, -1 600 à -1 100) et Hittites (Anatolie, -1 600 à -1 180) qui utilisaient énormément le bronze pour leurs épées, armures, chars et outils agricoles.



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Transition vers l'Âge du Fer

-1 200

L'étain a fini par devenir rare. Vers -1 200, les routes de l'étain se sont tariées.
Le prix de l'étain a explosé, rendant le bronze trop cher.

→ On suppose que la raréfaction de l'étain est en partie responsable de la chute des civilisations Mycènes (Grèce, -1 600 à -1 100) et Hittites (Anatolie, -1 600 à -1 180) qui utilisaient énormément le bronze pour leurs épées, armures, chars et outils agricoles.

→ On a retrouvé des mines d'étain en Autriche datant de l'Âge du Bronze, abandonnées faute de minerais.



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Le bronze a dominé pendant 1000 ans, mais son déclin montre une leçon intemporelle : quand une ressource devient rare, l'Homme innove... ou s'effondre. Le fer sera cette innovation, mais à quel prix environnemental ?



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



De nos jours, le bronze a été remplacé par l'acier (dont nous parlerons plus tard...) mais on le retrouve encore dans les cloches, les statues ou pour réaliser des alliages spéciaux comme le bronze d'aluminium.



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Antiquité

1^{er} Âge du fer

2^{ème} Âge du fer

-1 200

-500

-52

Matériaux

Le fer, plus dur et moins lourd que les métaux utilisés avant, ne s'obtient qu'au-delà de 900°C. Il permet la création d'objets au tranchants plus 'durs' inédit: rasoirs, épées, pointes de flèches...

Comment

Développement de la forge

Énergie

Charbon de bois
Bas fourneaux avec cheminée de 1-2 m de haut



Casque celté d'apparat en fer recouvert d'or (-500, France)



Serpes en fer



Épées en fer



Monnaie



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Antiquité

1^{er} Âge du fer

2^{ème} Âge du fer

-1 200

-500

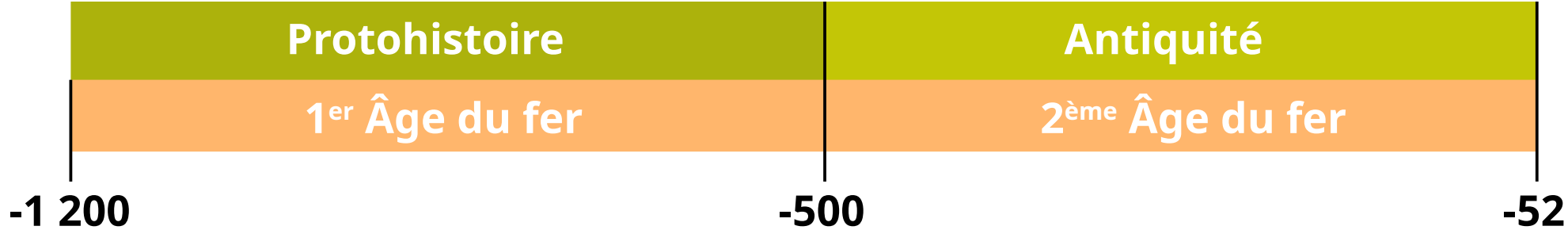
-52

Naissance de la sidérurgie antique

Le fer est travaillé depuis -4 000 mais il était d'origine météorique.



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Naissance de la sidérurgie antique

Le fer est travaillé depuis -4 000 mais il était d'origine météorique.

Le fer obtenu par réduction de minerai dans un four remonterait à -3000 en Anatolie.



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Antiquité

1^{er} Âge du fer

2^{ème} Âge du fer

-1 200

-500

-52

Naissance de la sidérurgie antique

Le fer est travaillé depuis -4 000 mais il était d'origine météorique.

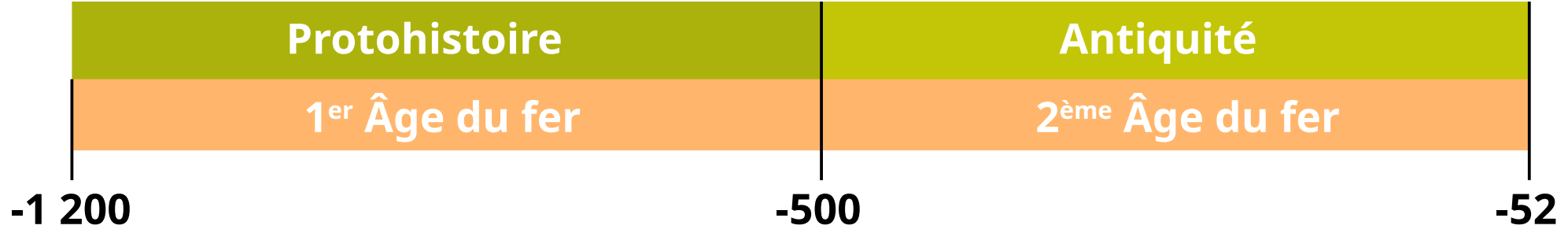
Le fer obtenu par réduction de minerai dans un four remonterait à -3000 en Anatolie.

Mais l'utilisation du bronze, plus facile à produire, a freiné le développement de la sidérurgie.

La métallurgie du fer supplante alors celle du bronze dans l'armement et l'outillage.



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Naissance de la sidérurgie antique

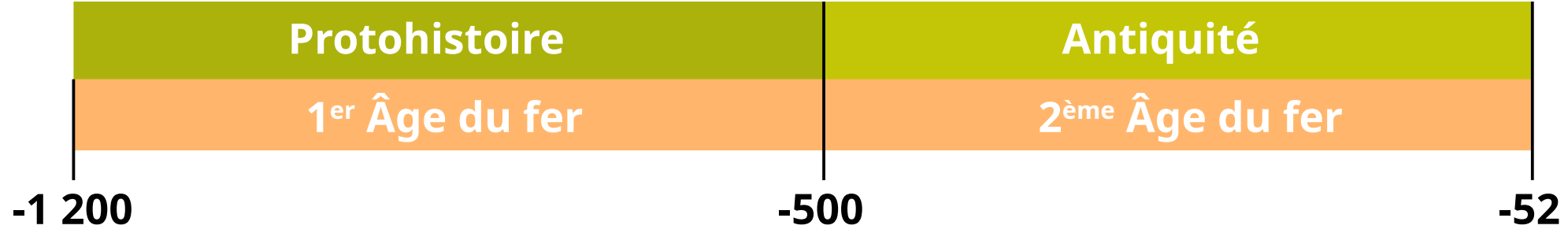
La Grèce passe à l'âge du fer vers -1 050, l'Europe centrale vers -800 : c'est l'âge du fer Celtique.

Ce dernier se caractérise par l'émergence de grand tumulus, où les élites sont enterrées avec leurs biens (parures, mobilier funéraire, char d'apparat...).

La civilisation Celte se développe également grâce à l'exploitation du sel qui permet de mieux de conserver la viande.



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Naissance de la sidérurgie antique

L'âge du fer se caractérise par l'apparition d'objets de prestige réservés à la classe dirigeante : épées, bracelets ou colliers.

Les outils en fer remplacent progressivement ceux en bronze, en commençant par les armes.

Le 2^{ème} âge du fer marque la naissance des villes et des États, ainsi que la circulation des marchandises et des techniques dans toute l'Europe.



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Exemple de
village Celte





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Antiquité

1^{er} Âge du fer

2^{ème} Âge du fer

-1 200

-500

-52

Naissance de la sidérurgie antique

L'Âge du fer s'achève avec la fin de la conquête de la Gaule par les Romains en -52.

Mais l'usage du fer va dominer le monde pendant toute l'antiquité gallo-romaine : de -52 à 478.

Puis pendant tout le moyen-âge : de 476 à 1492.



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Antiquité

1^{er} Âge du fer

2^{ème} Âge du fer

-1 200

-500

-52

Fer

7,87 g/cm³

T_F = 1 538°C

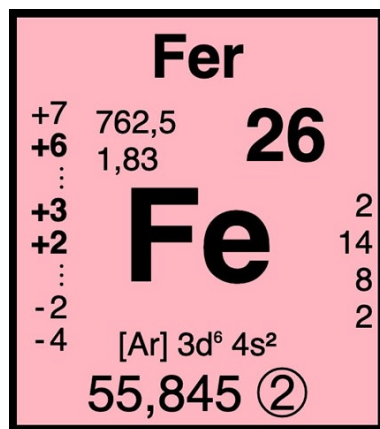


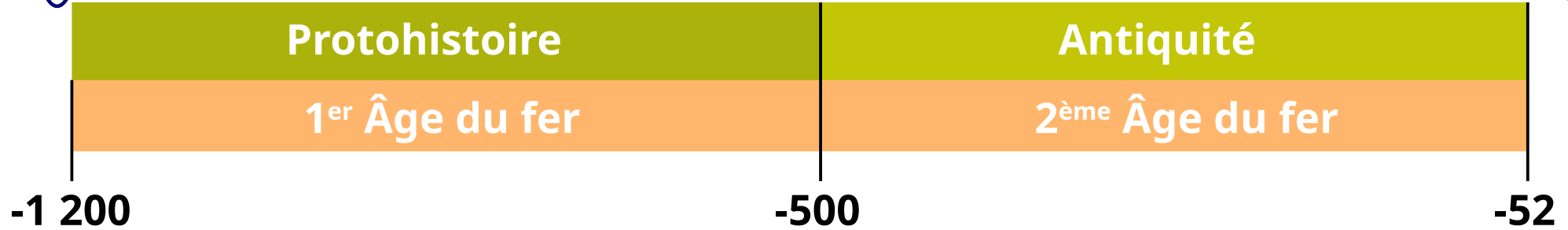
Tableau périodique des éléments chimiques

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Hydrogène 1 1,00794	Helium 2 4,002602																
Lithium 3 6,939	Béryllium 4 9,0121831											Bore 5 10,813	Carbone 6 12,0106	Azote 7 14,00644	Oxygène 8 15,9994	Fluor 9 18,99840316	Neon 10 20,17976
Sodium 11 22,98976928	Magnésium 12 24,305											Aluminium 13 26,9815385	Silicium 14 28,0855	Phosphore 15 30,97376209	Soufre 16 32,065	Chlore 17 35,453	Argon 18 39,948
Potassium 19 39,0983	Calcium 20 40,078	Scandium 21 44,955908	Titane 22 47,867	Vanadium 23 50,9415	Chrome 24 51,9961	Manganèse 25 54,938044	Fer 26 55,845	Cobalt 27 58,933194	Nickel 28 58,6934	Cuivre 29 63,546	Zinc 30 65,38	Gallium 31 69,723	Germanium 32 72,630	Arsenic 33 74,921595	Sélénium 34 78,9718	Brome 35 79,904	Krypton 36 83,798
Rubidium 37 85,4678	Strontium 38 87,62	Yttrium 39 88,90584	Zirconium 40 91,224	Niobium 41 92,90637	Molybdène 42 95,94	Technétium 43 [98]	Ruthénium 44 101,07	Rhodium 45 102,9055	Palladium 46 106,42	Argent 47 107,8682	Cadmium 48 112,414	Indium 49 114,818	Étain 50 118,710	Antimoine 51 121,760	Tellure 52 127,60	Iode 53 126,90447	Xénon 54 131,293
Césium 55 132,90545	Baryum 56 137,327	Lanthanides 57-71	Hafnium 72 178,49	Tantale 73 180,94788	Tungstène 74 183,84	Rhénium 75 186,207	Osmium 76 190,23	Iridium 77 192,225	Platine 78 195,084	Or 79 196,966569	Mercury 80 200,592	Thallium 81 204,383	Plomb 82 207,2	Bismuth 83 208,98040	Polonium 84 [209]	Astatoine 85 [210]	Radium 86 [226]
Francium 87 [223]	Radium 88 [226]	Actinides 89-103	Rutherfordium 104 [261]	Dubnium 105 [268]	Seaborgium 106 [269]	Borhrium 107 [278]	Hassium 108 [277]	Méitnium 109 [278]	Darmstadtium 110 [281]	Roentgenium 111 [282]	Copernicium 112 [285]	Nihonium 113 [286]	Flerovium 114 [289]	Moscovium 115 [293]	Livermorium 116 [293]	Tennesse 117 [294]	Oganesson 118 [294]
			Lanthane 57 138,90547	Cérium 58 140,116	Praseodyme 59 140,90766	Néodyme 60 144,242	Prométhée 61 [145]	Samarium 62 150,36	Europium 63 151,964	Gadolinium 64 157,25	Terbium 65 158,92535	Dysprosium 66 162,500	Holmium 67 164,93033	Erbium 68 167,259	Thulium 69 168,93422	Ytterbium 70 173,045	Lutécium 71 174,967
			Actinium 89 [227]	Thorium 90 232,0377	Protactinium 91 231,03688	Uranium 92 238,02891	Néptunium 93 [237]	Plutonium 94 [244]	Americium 95 [243]	Curium 96 [247]	Berkélium 97 [247]	Californium 98 [251]	Einsteinium 99 [252]	Fermium 100 [257]	Mendelevium 101 [258]	Nobélium 102 [259]	Lawrencium 103 [260]

Métaux : Alcalins, Alcalino-terreux, Lanthanides, Actinides, Métaux de transition, Métaux pauvres, Métalloïdes, Non métaux : Autres non-métaux, Halogènes, Gaz nobles, Non classés, primordial, désintégration d'autres éléments, synthétique



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



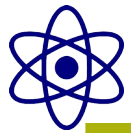
Naissance de la sidérurgie antique : les avantages du fer

Les gisements de fer sont 100x plus fréquents que ceux du cuivre ou de l'étain !

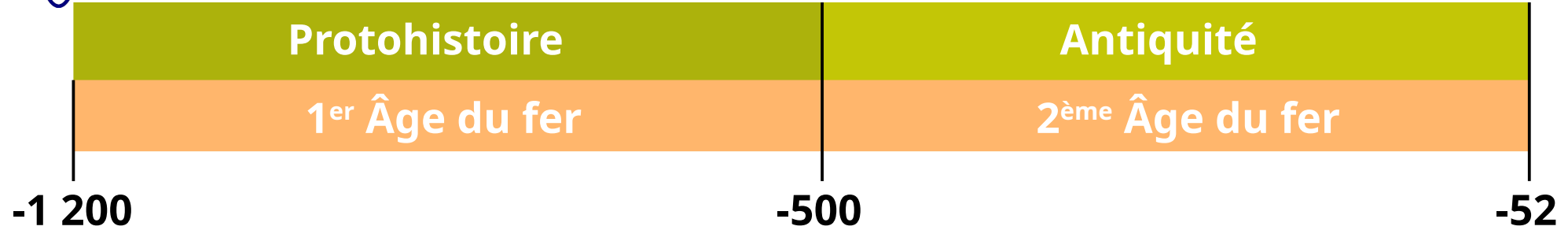
La dureté du fer est bien plus élevée : 6 sur l'échelle de Mohs au lieu de 4-5 pour le bronze

Il est plus résistant et a une meilleure tenue aux chocs (ex. épées, armures)

Invention du bas-fourneau pour réduire le fer car il faut dépasser 900°C !



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Naissance de la sidérurgie antique : fabrication du fer

Le bas-fourneau primitif atteignait 1 100 – 1 300°C ; insuffisant pour fondre le fer (1 538°C).

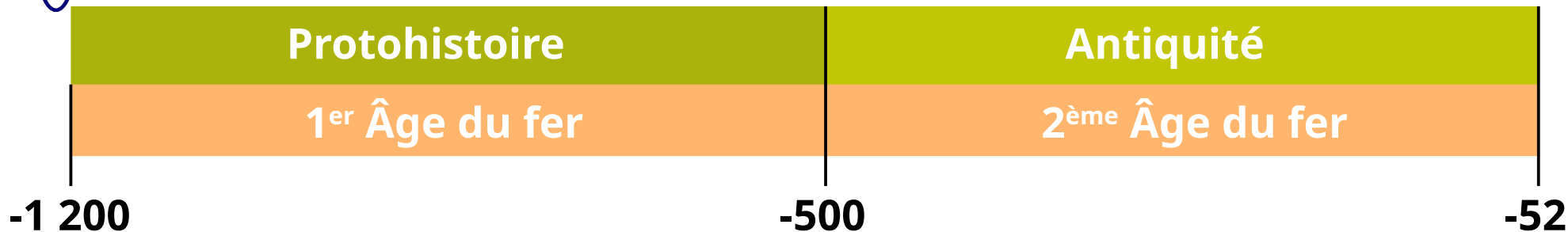
Mais il parvenait à réduire celui-ci: minerai + charbon → fer.

La combustion incomplète du charbon de bois produit du monoxyde de carbone : CO.

Qui vient réduire le minerai de fer qui est sous forme oxydée : Fe_2O_3 ou Fe_3O_4 .



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Naissance de la sidérurgie antique : fabrication du fer

Bas-fourneau primitif : minerai + charbon → fer





L'Âge des métaux et

Naissance de la sidérurgie antique : bas-fourneau (-1 200)

→ cheminée de 1 à 2 m de haut avec une porte en-bas

→ une tuyère vers le milieu permet l'apport d'air

→ le four est rempli par le haut

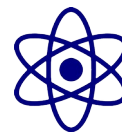
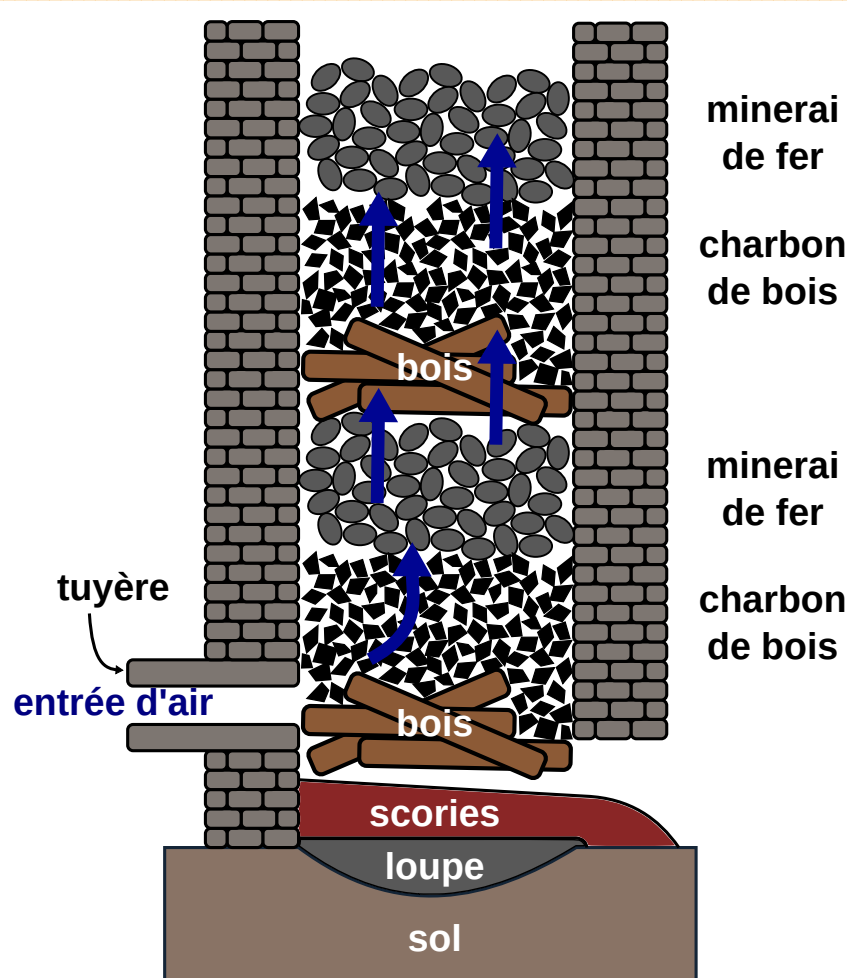
450°C

600°C

700°C

1100°C

1200°C





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Antiquité

1^{er} Âge du fer

2^{ème} Âge du fer

-1 200

-500

-52

Les premières grandes civilisations et capitales mondiales !

La maîtrise du bas-fourneau est une véritable révolution !

Le fer permet la production d'armes et d'armures moins épaisses et donc plus légères.

Les épées deviennent plus longues.



Hache en fer
(France)

Université

de Strasbourg



Épées en fer
(Iran, - 1 000)



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Antiquité

1^{er} Âge du fer

2^{ème} Âge du fer

-1 200

-500

-52

Les premières grandes civilisations et capitales mondiales !

La maîtrise du bas-fourneau permet aussi l'essor du verre soufflé.

Et les céramiques ne cessent de s'améliorer.



Bracelet
en verre



Bracelet de
Perles en verre
(France , -500)



Cruche
en verre
(Italie,
- 700)



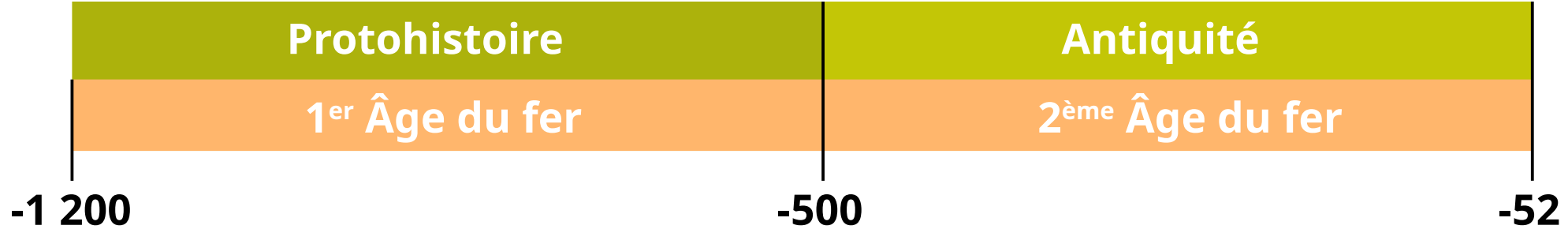
Coupe
en verre
(Assyrie,
- 700)



Céramique
grecque
(- 700)



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



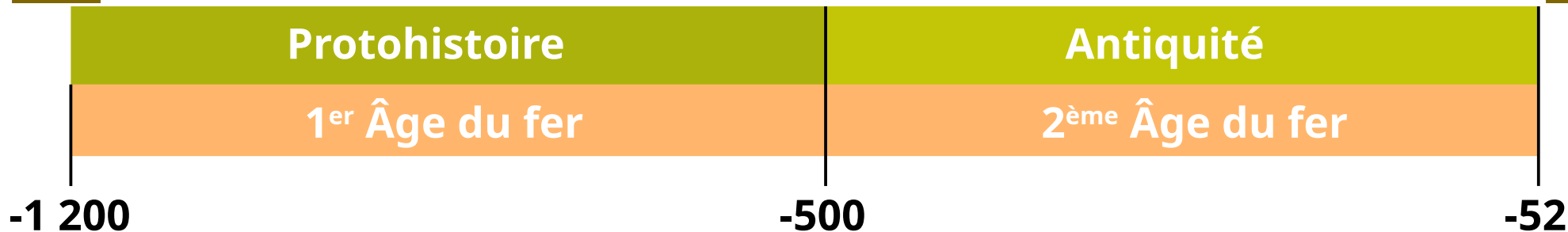
Seulement voilà... tout cela va mal finir...

L'Âge du fer a marqué une apogée de l'Europe et la civilisation celtique. Il s'achève sur une guerre de conquête !

On considère qu'il s'est terminé avec la conquête de la Gaule par Jules César en -52.



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Seulement voilà... tout cela va mal finir...

L'Âge du fer a marqué une apogée de l'Europe et la civilisation celtique. Il s'achève sur une guerre de conquête !

On considère qu'il s'est terminé avec la conquête de la Gaule par Jules César en -52.

20 ans plus tard, Auguste transforme la république romaine en Empire romain et termine d'assimiler les peuples d'Europe à la culture romaine.

L'Âge du fer marque donc la fin de la protohistoire et le début de l'histoire, avec l'Antiquité.



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Antiquité

1^{er} Âge du fer

2^{ème} Âge du fer

-1 200

-500

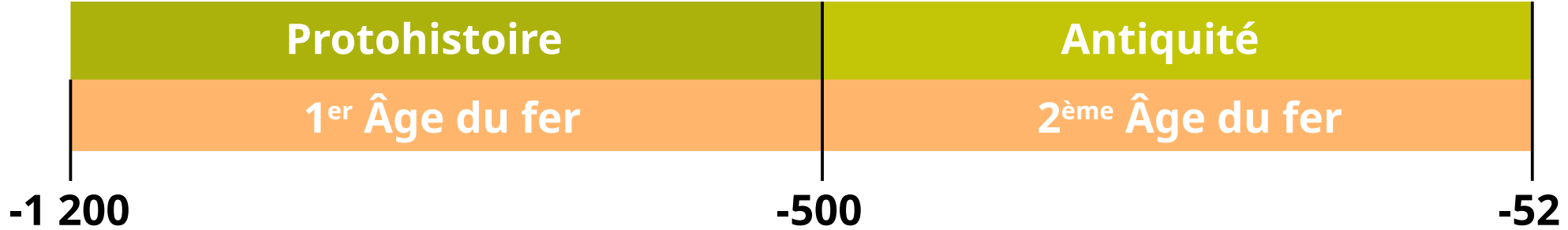
-52

Une nouvelle ère commence...

L'Homme se sédentarise et donne naissance à des communautés hiérarchisées structurées autour d'élites dirigeantes.



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



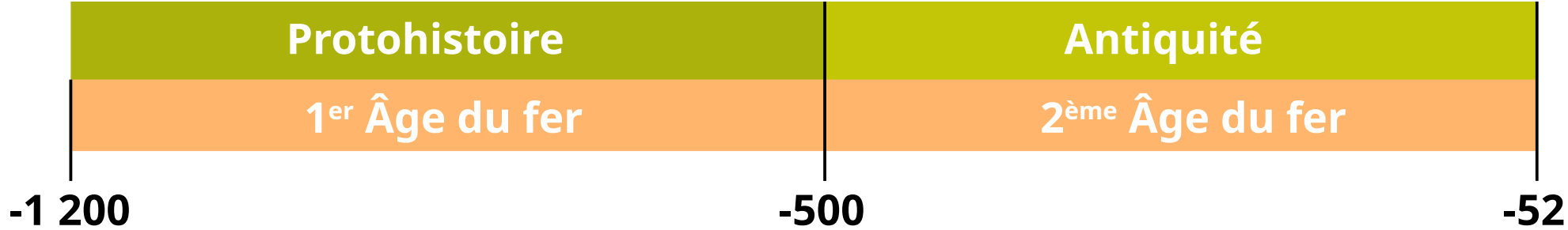
Une nouvelle ère commence...

L'Homme se sédentarise et donne naissance à des communautés hiérarchisées structurées autour d'élites dirigeantes.

Les progrès de la métallurgie permettent aux sociétés qui la maîtrisent de prospérer durant l'Antiquité, puis le Moyen Âge.



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Une nouvelle ère commence...

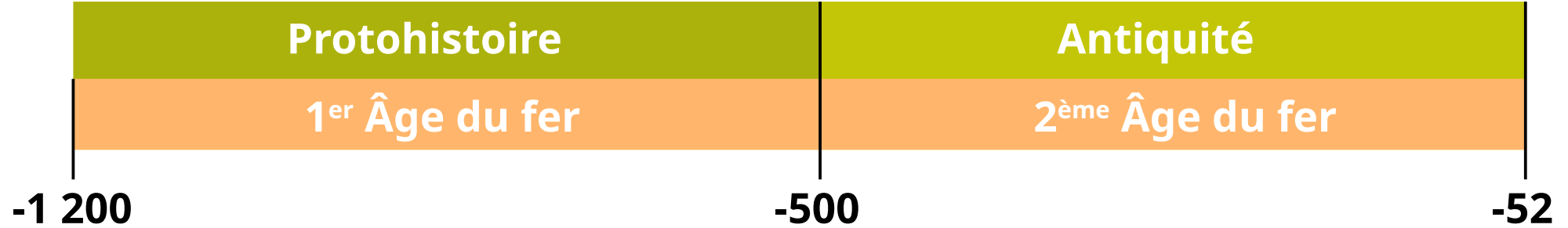
L'Homme se sédentarise et donne naissance à des communautés hiérarchisées structurées autour d'élites dirigeantes.

Les progrès de la métallurgie permettent aux sociétés qui la maîtrisent de prospérer durant l'Antiquité, puis le Moyen Âge.

L'âge du fer marque aussi le début de l'écriture pour les civilisations européennes. Ainsi, vers -800, les Grecs adaptent l'alphabet phénicien à leur langage, et créent l'alphabet grec, qui donnera naissance à l'alphabet latin, servant de socle à une grande partie des langues occidentales.



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



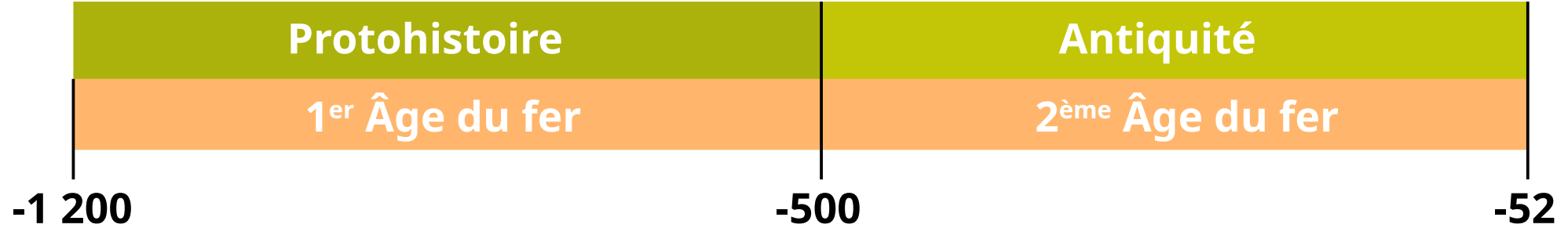
Impacts Environnemental et sanitaires ?

Déforestation : bas-fourneau = 5 à 10 kg de charbon de bois pour 1 kg de fer

→ nombreuses forêts européennes détruites pour alimenter les forges (ex. Allemagne)



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Impacts Environnemental et sanitaires ?

Déforestation : bas-fourneau = 5 à 10 kg de charbon de bois pour 1 kg de fer

→ nombreuses forêts européennes détruites pour alimenter les forges (ex. Allemagne)

Pollution :

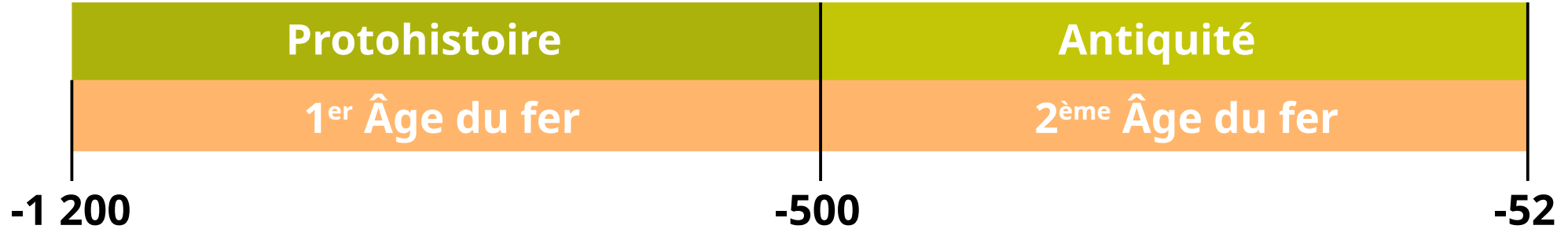
→ les scories (déchets de fusion), riches en métaux lourds, contribuent à la pollution des sols

→ CO₂ : la métallurgie de l'âge du fer marque le début des émissions de CO₂ par l'Homme

→ naissance de la pollution atmosphérique



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Impacts Environnemental et sanitaires ?

Déforestation : bas-fourneau = 5 à 10 kg de charbon de bois pour 1 kg de fer

→ nombreuses forêts européennes détruites pour alimenter les forges (ex. Allemagne)

Pollution :

→ les scories (déchets de fusion), riches en métaux lourds, contribuent à la pollution des sols

→ CO₂ : la métallurgie de l'âge du fer marque le début des émissions de CO₂ par l'Homme

→ naissance de la pollution atmosphérique

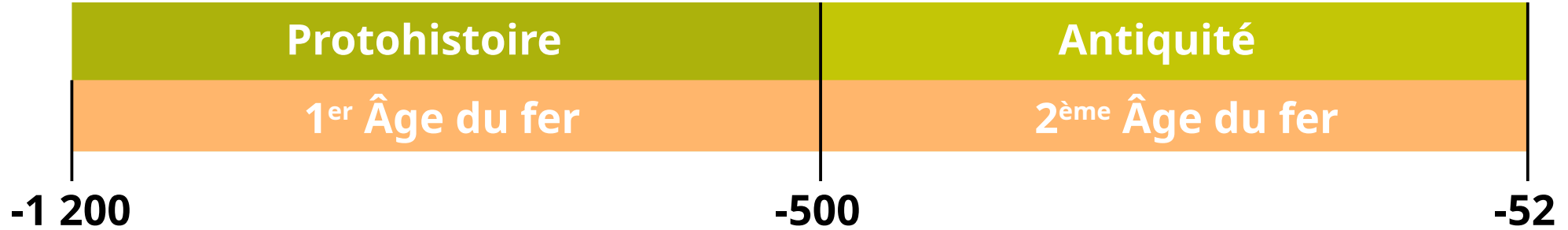
Santé :

→ Emphysème (maladie pulmonaire) des forgerons

→ premières pollutions des sols par les métaux lourds (plomb etc.)



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



L'héritage de l'âge du fer

L'usage du fer va se poursuivre jusqu'à nos jours, contribuant au développement de l'Homme pendant l'antiquité et le moyen-âge.

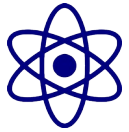
Par ajout de carbone :

→ le fer va donner naissance à l'acier

Coût écologique du fer :

→ l'acier représente aujourd'hui 8 % des émissions mondiales de CO₂

→ il est l'équivalent du bronze d'hier

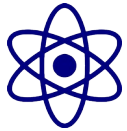


Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la structure électronique :



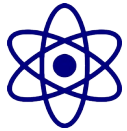
La liaison métallique



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la structure électronique :

En 1900, Drude ignorait la notion de couches électroniques et surtout les règles de remplissage des sous-couches électroniques



La liaison métallique

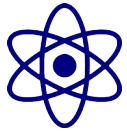


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la structure électronique :

En 1900, Drude ignorait la notion de couches électroniques et surtout les règles de remplissage des sous-couches électroniques

Ces règles sont nombreuses et composent ensemble la règle de l'Aufbau :



La liaison métallique



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la structure électronique :

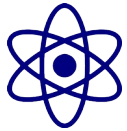
En 1900, Drude ignorait la notion de couches électroniques et surtout les règles de remplissage des sous-couches électroniques

Ces règles sont nombreuses et composent ensemble la règle de l'Aufbau :

→ principe d'exclusion de Pauli (1925)

Wolfgang Ernst Pauli
Physicien autrichien
(1900-1958)





La liaison métallique



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la structure électronique :

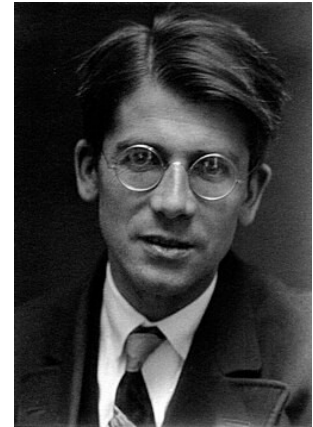
En 1900, Drude ignorait la notion de couches électroniques et surtout les règles de remplissage des sous-couches électroniques

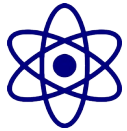
Ces règles sont nombreuses et composent ensemble la règle de l'Aufbau :

→ principe d'exclusion de Pauli (1925)

→ les 3 règles de Hund (1925)

Friedrich Hund
Physicien allemand
(1896-1997)





La liaison métallique



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la structure électronique :

En 1900, Drude ignorait la notion de couches électroniques et surtout les règles de remplissage des sous-couches électroniques

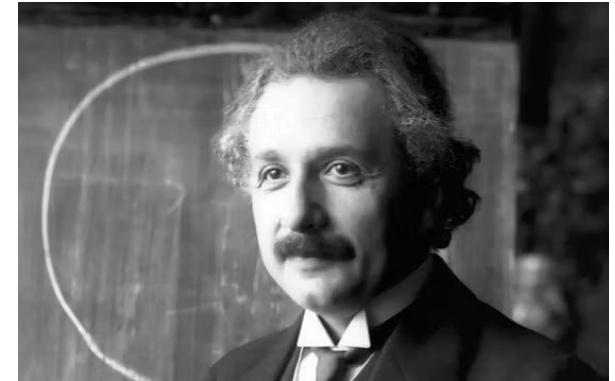
Ces règles sont nombreuses et composent ensemble la règle de l'Aufbau :

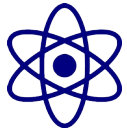
→ principe d'exclusion de Pauli (1925)

→ les 3 règles de Hund (1925)

→ la contraction relativiste

Albert Einstein
Physicien allemand
(1879-1955)





La liaison métallique



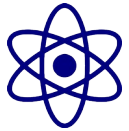
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la structure électronique :

En 1900, Drude ignorait la notion de couches électroniques et surtout les règles de remplissage des sous-couches électroniques

Ces règles sont nombreuses et composent ensemble la règle de l'Aufbau :

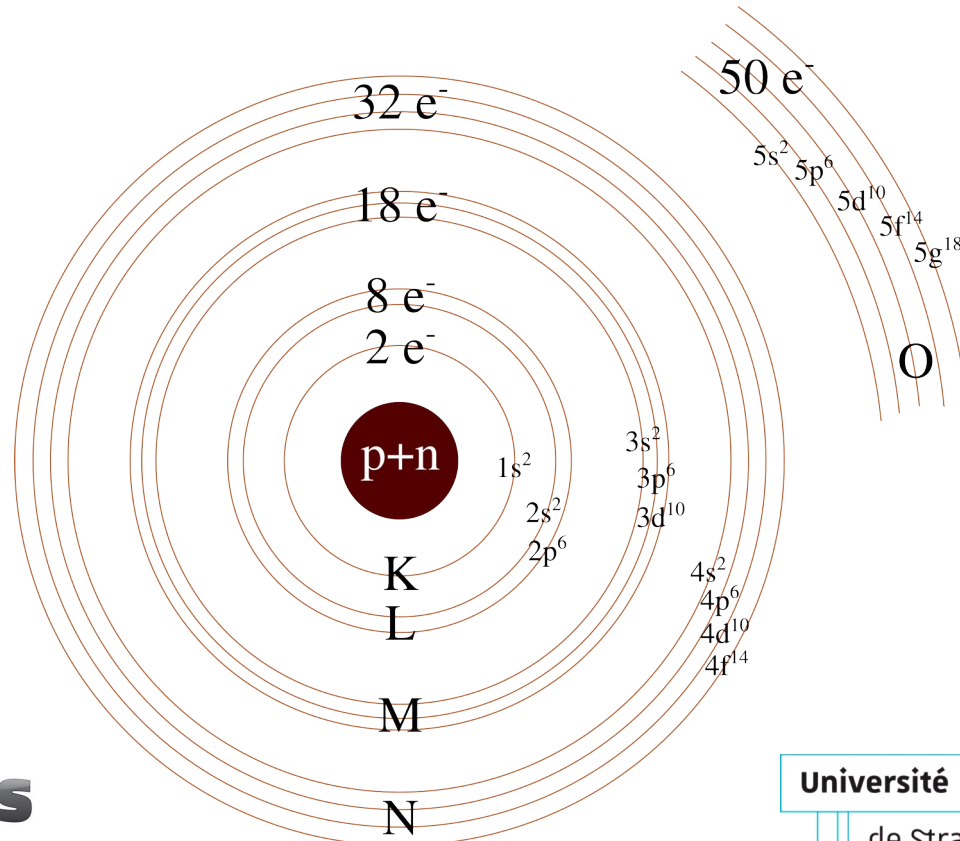
- principe d'exclusion de Pauli (1925)
- les 3 règles de Hund (1925)
- la contraction relativiste
- les règles de Klechkowski (1962)

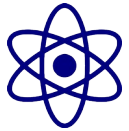


La liaison métallique



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

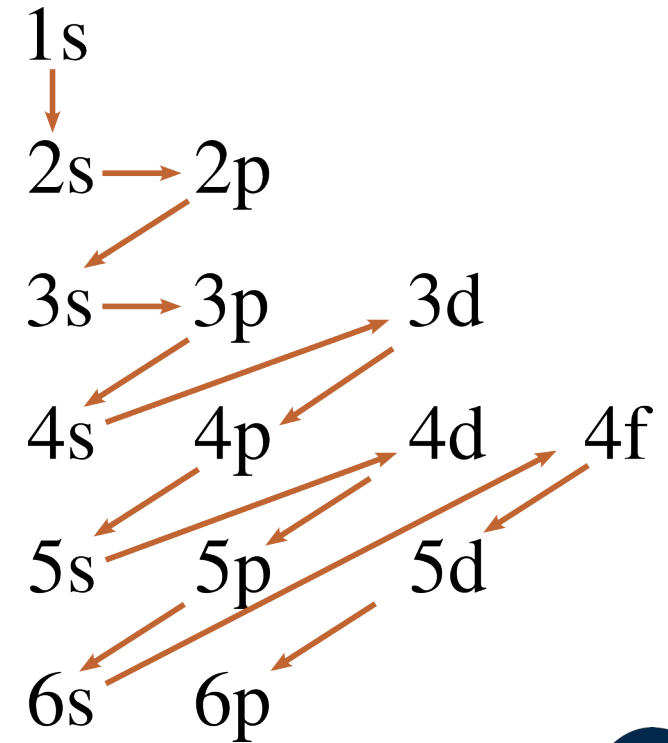
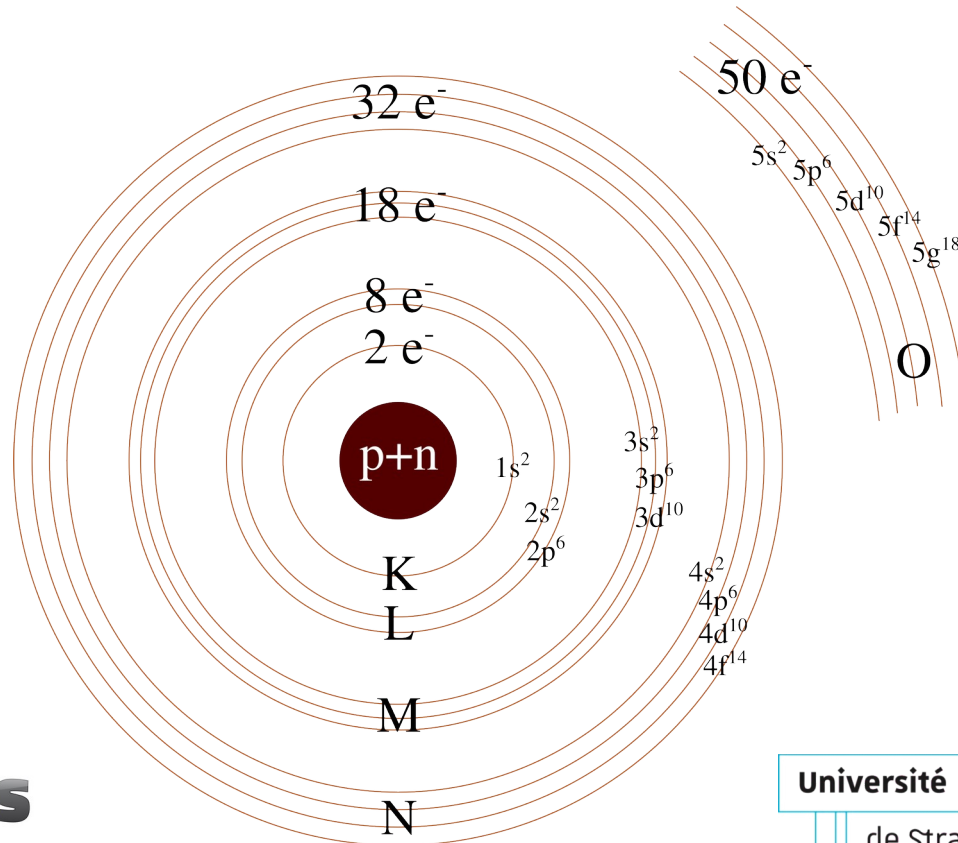


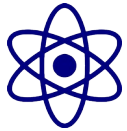


La liaison métallique



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?



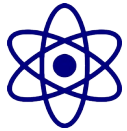


La liaison métallique



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Les règles de Klechkowski, ou règle de l'Aufbau (qui décrit l'ordre de remplissage des orbitales atomiques) et les règles de Hund (qui décrit la répartition des électrons dans les orbitales dégénérées) ne sont pas des lois démontrées comme un théorème en mathématiques. Ce sont plutôt des modèles empiriques basés sur des observations expérimentales et des calculs de mécanique quantique.



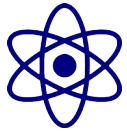
La liaison métallique



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Pour les métaux, il y a notamment ces 2 règles :

- Les électrons des couches internes "protègent" les électrons externes de la charge nucléaire, ce qui modifie l'ordre des énergies
ex : 4s se remplit avant 3d à cause de la contraction relativiste



La liaison métallique



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Pour les métaux, il y a notamment ces 2 règles :

→ Les électrons des couches internes "protègent" les électrons externes de la charge nucléaire, ce qui modifie l'ordre des énergies

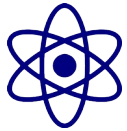
ex : 4s se remplit avant 3d à cause de la contraction relativiste

→ Les exceptions dues à la stabilité des sous-couche d et f remplies ou demi-remplies :

→ Cr : $[\text{Ar}] 3d^5 4s^1$ (au lieu de $3d^4 4s^2$) car sous-couche d à demi-remplie plus stable

→ Cu : $[\text{Ar}] 3d^{10} 4s^1$ où la sous-couche d est totalement remplie

→ Gd : $[\text{Xe}] 4f^7 5d^1 6s^2$ où la sous-couche f est remplie à moitié



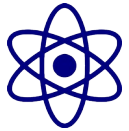
La liaison métallique



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

La preuve par l'expérience :

→ de nombreuses méthodes spectroscopiques (d'atomisation, d'absorption, d'émission, de fluorescence etc.) confirment les niveaux d'énergie prédits.

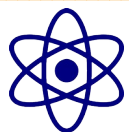


Notions essentielles pour comprendre les métaux

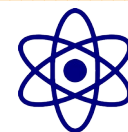


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de l'électronégativité (tendance à attirer les électrons) :



Notions essentielles pour comprendre les métaux



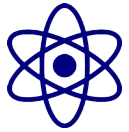
Pour
→ le

Période

Groupe →

	1																	18	
1	H 2,20	2																He	
2	Li 0,98	Be 1,57											13 B 2,04	14 C 2,55	15 N 3,04	16 O 3,44	17 F 3,98	Ne	
3	Na 0,93	Mg 1,31	3										Al 1,61	Si 1,90	P 2,19	S 2,58	Cl 3,16	Ar	
4	K 0,82	Ca 1,00	Sc 1,36	4	Ti 1,54	5 V 1,63	6 Cr 1,66	7 Mn 1,55	8 Fe 1,83	9 Co 1,88	10 Ni 1,91	11 Cu 1,90	12 Zn 1,65	Ga 1,81	Ge 2,01	As 2,18	Se 2,55	Br 2,96	Kr 3,00
5	Rb 0,82	Sr 0,95	Y 1,22		Zr 1,33	Nb 1,6	Mo 2,16	Tc 1,9	Ru 2,2	Rh 2,28	Pd 2,20	Ag 1,93	Cd 1,69	In 1,78	Sn 1,96	Sb 2,05	Te 2,1	I 2,66	Xe 2,60
6	Cs 0,79	Ba 0,89	La 1,1	*	Hf 1,3	Ta 1,5	W 2,36	Re 1,9	Os 2,2	Ir 2,20	Pt 2,28	Au 2,54	Hg 2,00	Tl 1,62	Pb 1,87	Bi 2,02	Po 2,0	At 2,2	Rn 2,2
7	Fr 0,7	Ra 0,9	Ac 1,1	**	Rf 1,3	Db 1,5	Sg 2,36	Bh 1,9	Hs 2,2	Mt 2,20	Ds 2,28	Rg 2,54	Cn 2,00	Nh 1,62	Fl 1,87	Mc 2,02	Lv 2,0	Ts 2,2	Og 2,2

*	Ce 1,12	Pr 1,13	Nd 1,14	Pm 1,13	Sm 1,17	Eu 1,2	Gd 1,2	Tb 1,1	Dy 1,22	Ho 1,23	Er 1,24	Tm 1,25	Yb 1,1	Lu 1,27
**	Th 1,3	Pa 1,5	U 1,38	Np 1,36	Pu 1,28	Am 1,13	Cm 1,28	Bk 1,3	Cf 1,3	Es 1,3	Fm 1,3	Md 1,3	No 1,3	Lr 1,3



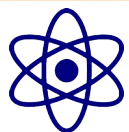
Notions essentielles pour comprendre les métaux



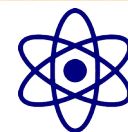
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Structure cristalline + structure électronique + électronégativité = propriétés des métaux !

→ un exemple avec Cu et Fe...



Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pour
→ le

Période

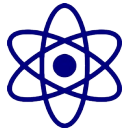
Groupe →

$\text{Cu} : [\text{Ar}] 3d^{10} 4s^1$

$\text{Fe} : [\text{Ar}] 3d^6 4s^2$

	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

*	Ce 1,12	Pr 1,13	Nd 1,14	Pm 1,13	Sm 1,17	Eu 1,2	Gd 1,2	Tb 1,1	Dy 1,22	Ho 1,23	Er 1,24	Tm 1,25	Yb 1,1	Lu 1,27
**	Th 1,3	Pa 1,5	U 1,38	Np 1,36	Pu 1,28	Am 1,13	Cm 1,28	Bk 1,3	Cf 1,3	Es 1,3	Fm 1,3	Md 1,3	No 1,3	Lr 1,3

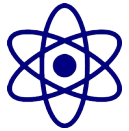


Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Cu et Fe : électronégativité proche (1,9 et 1,83) mais structure électronique différente :



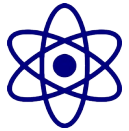
Notions essentielles pour comprendre les métaux



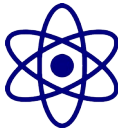
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Cu et Fe : électronégativité proche (1,9 et 1,83) mais structure électronique différente :

→ Cu, avec la structure $[Ar] 3d^{10} 4s^1$ va tendre à 'libérer' 1 électron : $4s^1 \rightarrow 4s^0$



Notions essentielles pour comprendre les métaux

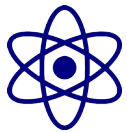


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

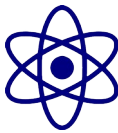
Cu et Fe : électronégativité proche (1,9 et 1,83) mais structure électronique différente :

→ Cu, avec la structure $[Ar] 3d^{10} 4s^1$ va tendre à 'libérer' 1 électron : $4s^1 \rightarrow 4s^0$

→ puisque sa sous-couche $3d^{10}$, stable, sera la dernière à être pleine



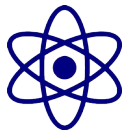
Notions essentielles pour comprendre les métaux



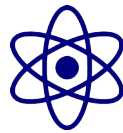
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Cu et Fe : électronégativité proche (1,9 et 1,83) mais structure électronique différente :

- Cu, avec la structure $[Ar] 3d^{10} 4s^1$ va tendre à 'libérer' 1 électron : $4s^1 \rightarrow 4s^0$
- puisque sa sous-couche $3d^{10}$, stable, sera la dernière à être pleine
- le Cu ne sera donc pas enclin à faire de liaison avec d'autres éléments



Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

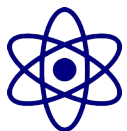
Cu et Fe : électronégativité proche (1,9 et 1,83) mais structure électronique différente :

→ Cu, avec la structure [Ar] 3d¹⁰ 4s¹ va tendre à 'libérer' 1 électron : 4s¹ → 4s⁰

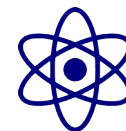
→ et sa sous-couche 3d¹⁰ sera alors la dernière à être pleine

→ le Cu ne sera donc pas enclin à faire de liaison avec d'autres éléments

→ à moins de croiser un élément très électronégatif, comme l'oxygène



Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Cu et Fe : électronégativité proche (1,9 et 1,83) mais structure électronique différente :

→ Cu, avec la structure [Ar] 3d¹⁰ 4s¹ va tendre à 'libérer' 1 électron : 4s¹ → 4s⁰

→ et sa sous-couche 3d¹⁰ sera alors la dernière à être pleine

→ le Cu ne sera donc pas enclin à faire de liaison avec d'autres éléments

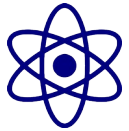
→ à moins de croiser un élément très électronégatif, comme l'oxygène

→ dans ce cas, il est capable de libérer encore 1 électrons de sa couche 3d car ces derniers ne sont pas très fortement liés :

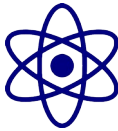
ex.

$[Ar] 3d^{10} 4s^0 \rightarrow Cu^+$ comme dans Cu₂O ou CuCl

$[Ar] 3d^9 4s^0 \rightarrow Cu^{2+}$ comme dans CuO ou Cu(OH)₂ ou Cu(CO₃)



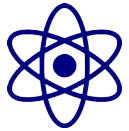
Notions essentielles pour comprendre les métaux



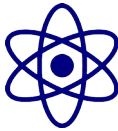
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Cu et Fe : électronégativité proche (1,9 et 1,83) mais structure électronique différente :

→ Fe, avec la structure $[Ar] 3d^6 4s^2$ va tendre à 'libérer' 2 électrons : $4s^2 \rightarrow 4s^0 \rightarrow Fe^{2+}$



Notions essentielles pour comprendre les métaux

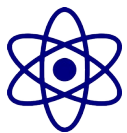


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

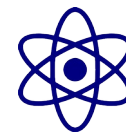
Cu et Fe : électronégativité proche (1,9 et 1,83) mais structure électronique différente :

→ Fe, avec la structure $[Ar] 3d^6 4s^2$ va tendre à 'libérer' 2 électrons : $4s^2 \rightarrow 4s^0 \rightarrow Fe^{2+}$

→ Fe peut donc naturellement réagir avec d'autres éléments sous sa forme Fe^{2+}



Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

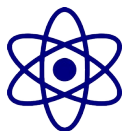
Cu et Fe : électronégativité proche (1,9 et 1,83) mais structure électronique différente :

→ Fe, avec la structure $[Ar] 3d^6 4s^2$ va tendre à 'libérer' 2 électrons : $4s^2 \rightarrow 4s^0 \rightarrow Fe^{2+}$

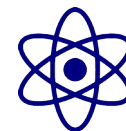
→ Fe peut donc naturellement réagir avec d'autres éléments sous sa forme Fe^{2+}

→ comme Cu, Fe peut aussi libérer encore un électrons $3d \rightarrow Fe^{3+}$

→ car une des règles de Hund dit que $3d^5$ est plus stable que $3d^6$



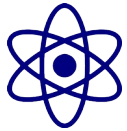
Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Cu et Fe : électronégativité proche (1,9 et 1,83) mais structure électronique différente :

- Fe, avec la structure [Ar] 3d⁶ 4s² va tendre à 'libérer' 2 électrons : $4s^2 \rightarrow 4s^0 \rightarrow Fe^{2+}$
- Fe peut donc naturellement réagir avec d'autres éléments sous sa forme Fe^{2+}
- comme Cu, Fe peut aussi libérer encore un électrons 3d $\rightarrow Fe^{3+}$
 - car une des règles de Hund dit que 3d⁵ est plus stable que 3d⁶
- Fe est donc plus réactif que Cu et impossible à trouver sous forme métallique



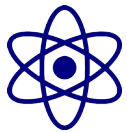
Notions essentielles pour comprendre les métaux



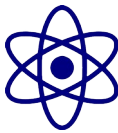
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Pour résumer :

- électronégativité de Cu → facilité à libérer l'électron $4s^1$ → bonne conductivité élect.
- sous-couche 3d pleine ($3d^{10}$) → bonne résistance naturelle à la corrosion (formation d'une couche de passivation, le vert-de-gris, un hydroxycarbonate de Cu)



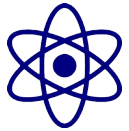
Notions essentielles pour comprendre les métaux



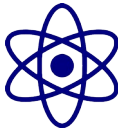
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Pour résumer :

- électronégativité de Cu → facilité à libérer l'électron $4s^1$ → bonne conductivité élect.
- sous-couche 3d pleine ($3d^{10}$) → bonne résistance naturelle à la corrosion (formation d'une couche de passivation, le vert-de-gris, un hydroxycarbonate de Cu)
- électronégativité de Fe → facilité à libérer les 2 électrons $4s^2$ et faire $3d^5$
- mais réagit alors rapidement, notamment avec O : FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4

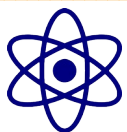


Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la masse atomique



Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la masse atomique

→ cas de Li (3), Cu (29) et Au (79)

Tableau périodique des éléments chimiques

Groupe → I A 1 II A 2 III A 4 V A 5 VI A 6 VII A 7 VIII 8 9 10 I B 11 II B 12 III B 13 IV B 14 V B 15 VI B 16 VII B 17 VIII A 18

Période ↓

1 Hydrogène 1 H 1,00795

2 Lithium 3 Li 6,9395 Béryllium 4 Be 9,0121831

3 Sodium 11 Na 22,98976928 Magnésium 12 Mg 24,3055

4 Potassium 19 K 39,0983 (1) Calcium 20 Ca 40,078 (4)

5 Rubidium 37 Rb 85,4678 (3) Strontium 38 Sr 87,62 (1)

6 Césium 55 Cs 132,905452 Baryum 56 Ba 137,327 (7)

7 Francium 87 Fr [223] Radium 88 Ra [226]

8 Scandium 21 Sc 44,955908 (5) Titane 22 Ti 47,867 (1) Vanadium 23 V 50,9415 (1) Chrome 24 Cr 51,9961 (6) Manganèse 25 Mn 54,938044

9 Fer 26 Fe 55,845 (2) Cobalt 27 Co 58,933194 Nickel 28 Ni 58,6934 (4)

10 Cuivre 29 Cu 63,546 (3) Zinc 30 Zn 65,38 (2)

11 Gallium 31 Ga 69,723 (1) Germanium 32 Ge 72,630 (8) Arsenic 33 As 74,921595 Sélénium 34 Se 78,971 (8) Brome 35 Br 79,904

12 Aluminium 13 Al 26,9815385 Silicium 14 Si 28,085 (1) Phosphore 15 P 30,9737620 Soufre 16 S 32,0675

13 Indium 49 In 114,818 (1) Étain 50 Sn 118,710 (7) Antimoine 51 Sb 121,760 (1) Tellure 52 Te 127,60 (3) Iode 53 I 126,90447

14 Cadmium 48 Cd 112,414 (4) Mercure 80 Hg 200,592 (2) Plomb 82 Pb 207,2 (1) Bismuth 83 Bi 208,98040

15 Polonium 84 Po [209] Astatine 85 At [210] Radon 86 Rn [222]

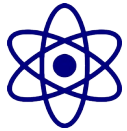
16 Lanthanides 57-71

17 Actinides 89-103

18 Lanthane 57 La 138,90547 Cérium 58 Ce 140,116 (1) Praseodyme 59 Pr 140,90766 Néodyme 60 Nd 144,242 (3) Prométhium 61 Pm [145] Samarium 62 Sm 150,36 (2) Europium 63 Eu 151,964 (1) Gadolinium 64 Gd 157,25 (3) Terbium 65 Tb 158,92535 Dysprosium 66 Dy 162,500 (1) Holmium 67 Ho 164,93033 Erbium 68 Er 167,259 (3) Thulium 69 Tm 168,93422 Ytterbium 70 Yb 173,045 Lutécium 71 Lu 174,9668

19 Actinium 89 Ac [227] Thorium 90 Th 232,0377 Protactinium 91 Pa 231,03588 Uranium 92 U 238,02891 Neptunium 93 Np [237] Plutonium 94 Pu [244] Américium 95 Am [243] Curium 96 Cm [247] Berkélium 97 Bk [247] Californium 98 Cf [251] Einsteinium 99 Es [252] Fermium 100 Fm [257] Mendelevium 101 Md [258] Nobelium 102 No [259] Lawrencium 103 Lr [261]

Métaux						Non métaux			primordial	désintégration d'autres éléments	synthétique
Alcalins	Alcalino-terreux	Lanthanides	Actinides	Métaux de transition	Métaux pauvres	Métalloïdes	Autres non-métaux	Halogènes			



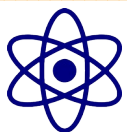
Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la masse atomique

- Lithium ($0,53 \text{ g/cm}^3$) : Léger, réseau CC, peu compact (2 atomes / maille) ;
- Or ($19,3 \text{ g/cm}^3$) : Lourd, atomes massifs, réseau CFC compact (4 atomes / maille) ;
- Cuivre ($8,96 \text{ g/cm}^3$) : Densité intermédiaire, réseau CFC compact.



Notions essentielles pour comprendre les métaux



Quid de l'étain (Sn) ?

Étain

7,29 g/cm³

T_F = 232°C

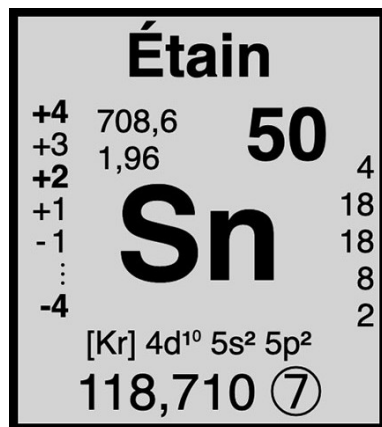


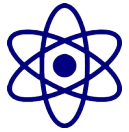
Tableau périodique des éléments chimiques

← nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa)
← numéro atomique
← symbole chimique
← masse atomique relative (ou celle de l'isotope le plus stable)
[CIAAW "Atomic Weights 2013" + rev. 2015]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H 1,00794	2 He 4,002602																
3 Li 6,941	4 Be 9,012182											5 B 10,81	6 C 12,011	7 N 14,00644	8 O 15,999	9 F 18,998403	10 Ne 20,1797
11 Na 22,989769	12 Mg 24,305											13 Al 26,9815385	14 Si 28,0855	15 P 30,973762	16 S 32,06	17 Cl 35,45	18 Ar 39,948
19 K 39,0983	20 Ca 40,078	21 Sc 44,955908	22 Ti 47,867	23 V 50,9415	24 Cr 51,9961	25 Mn 54,938044	26 Fe 55,845	27 Co 58,933194	28 Ni 58,6934	29 Cu 63,546	30 Zn 65,38	31 Ga 69,723	32 Ge 72,630	33 As 74,921595	34 Se 78,9718	35 Br 79,904	36 Kr 83,798
37 Rb 85,4678	38 Sr 87,62	39 Y 88,90584	40 Zr 91,224	41 Nb 92,90637	42 Mo 95,94	43 Tc [98]	44 Ru 101,07	45 Rh 102,90550	46 Pd 106,42	47 Ag 107,8682	48 Cd 112,414	49 In 114,818	50 Sn 118,710	51 Sb 121,760	52 Te 127,60	53 I 126,90447	54 Xe 131,29
55 Cs 132,90545	56 Ba 137,327	57-71 Lanthanides	72 Hf 178,49	73 Ta 180,94788	74 W 183,84	75 Re 186,207	76 Os 190,23	77 Ir 192,22	78 Pt 195,084	79 Au 196,966569	80 Hg 200,592	81 Tl 204,383	82 Pb 207,2	83 Bi 208,9804	84 Po [209]	85 At [210]	86 Rn [222]
87 Fr [223]	88 Ra [226]	89-103 Actinides	104 Rf [261]	105 Db [268]	106 Sg [271]	107 Bh [278]	108 Hs [285]	109 Mt [293]	110 Ds [295]	111 Rg [297]	112 Cn [298]	113 Nh [290]	114 Fl [295]	115 Mc [293]	116 Lv [293]	117 Ts [294]	118 Og [294]
105 La 138,90547	106 Ce 140,116	107 Pr 140,90766	108 Nd 144,242	109 Pm [145]	110 Sm 150,36	111 Eu 151,964	112 Gd 157,25	113 Tb 158,92535	114 Dy 162,500	115 Ho 164,93033	116 Er 167,259	117 Tm 168,93422	118 Yb 173,045	119 Lu 174,9668			
119 Ac [227]	120 Th 232,0377	121 Pa 231,03688	122 U 238,02891	123 Np [237]	124 Pu [244]	125 Am [243]	126 Cm [247]	127 Bk [247]	128 Cf [251]	129 Es [252]	130 Fm [257]	131 Md [258]	132 No [259]	133 Lr [260]			

Métaux: Alcalins, Alcalino-terreux, Lanthanides, Actinides, Métaux de transition, Métaux pauvres, Métalloïdes, Autres non-métaux, Halogènes, Gaz nobles, Non classés

primordial, intégration d'autres éléments, synthétique

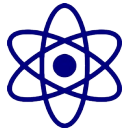


Notions essentielles pour comprendre les métaux



Quid de l'étain (Sn) ?

→ Sn ($[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^2 5p^2$) a 4 électrons sur sa 5^{ème} couche



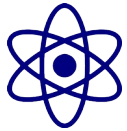
Notions essentielles pour comprendre les métaux



Quid de l'étain (Sn) ?

→ Sn ($[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^2 5p^2$) a 4 électrons sur sa 5^{ème} couche

→ mais de par sa taille, Sn ne peut pas faire 4 liaisons 100% covalentes (comme C ou Si)

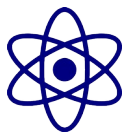


Notions essentielles pour comprendre les métaux

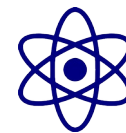


Quid de l'étain (Sn) ?

- Sn ($[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^2 5p^2$) a 4 électrons sur sa 5^{ème} couche
- mais de par sa taille, Sn ne peut pas faire 4 liaisons 100% covalentes (comme C ou Si)
- il va chercher à faire comme les métaux en rendant certains électrons libres

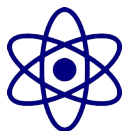


Notions essentielles pour comprendre les métaux

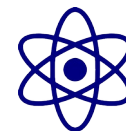


Quid de l'étain (Sn) ?

- Sn ($[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^2 5p^2$) a 4 électrons sur sa 5^{ème} couche
- mais de par sa taille, Sn ne peut pas faire 4 liaisons 100% covalentes (comme C ou Si)
- il va chercher à faire comme les métaux en rendant certains électrons libres
- mais contrairement à Cu ($[\text{Ar}] 3d^{10} 4s^1$), la dernière sous-couche de Sn est une p, pas une s

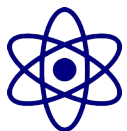


Notions essentielles pour comprendre les métaux

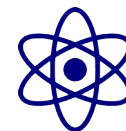


Quid de l'étain (Sn) ?

- Sn ($[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^2 5p^2$) a 4 électrons sur sa 5^{ème} couche
- mais de par sa taille, Sn ne peut pas faire 4 liaisons 100% covalentes (comme C ou Si)
- il va chercher à faire comme les métaux en rendant certains électrons libres
- mais contrairement à Cu ($[\text{Ar}] 3d^{10} 4s^1$), la dernière sous-couche de Sn est une p, pas une s
- Sn n'a donc pas d'électrons célibataires dans sa sous-couche externe après remplissage des sous-couches d car sa dernière

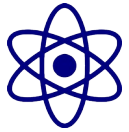


Notions essentielles pour comprendre les métaux



Quid de l'étain (Sn) ?

- Sn ($[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^2 5p^2$) a 4 électrons sur sa 5^{ème} couche
- mais de par sa taille, Sn ne peut pas faire 4 liaisons 100% covalentes (comme C ou Si)
- il va chercher à faire comme les métaux en rendant certains électrons libres
- mais contrairement à Cu ($[\text{Ar}] 3d^{10} 4s^1$), la dernière sous-couche de Sn est une p, pas une s
- Sn n'a donc pas d'électrons célibataires dans sa sous-couche externe après remplissage des sous-couches d car sa dernière
- il va donc adopter une liaison mi-métallique mi-covalente de faible force

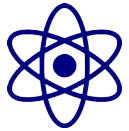


Notions essentielles pour comprendre les métaux

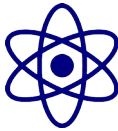


Quid de l'étain (Sn) ?

→ cela affaiblit la cohésion que sa "mer d'électrons" lui confère

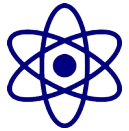


Notions essentielles pour comprendre les métaux



Quid de l'étain (Sn) ?

- cela affaiblit la cohésion que sa "mer d'électrons" lui confère
- et se traduit par une faible dureté (1,5 sur l'échelle de Mohs, contre 3 pour le cuivre)

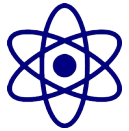


Notions essentielles pour comprendre les métaux



Quid de l'étain (Sn) ?

- cela affaiblit la cohésion que sa "mer d'électrons" lui confère
- et se traduit par une faible dureté (1,5 sur l'échelle de Mohs, contre 3 pour le cuivre)
- et une température de fusion basse (231,9 °C, contre 1 084 °C pour le cuivre)

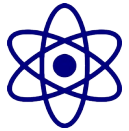


Notions essentielles pour comprendre les métaux

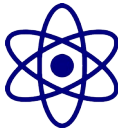


Quid de l'étain (Sn) ?

- cela affaiblit la cohésion que sa "mer d'électrons" lui confère
- et se traduit par une faible dureté (1,5 sur l'échelle de Mohs, contre 3 pour le cuivre)
- et une température de fusion basse (231,9 °C, contre 1 084 °C pour le cuivre)
- cela explique aussi que l'étain existe sous deux formes allotropiques à pression atmosphérique : l'étain blanc (β -Sn) et l'étain gris (α -Sn)

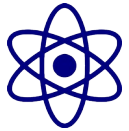


Notions essentielles pour comprendre les métaux



Quid de l'étain (Sn) ?

→ l'étain blanc est métallique, stable à température ambiante ;

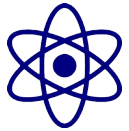


Notions essentielles pour comprendre les métaux

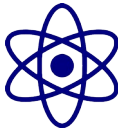


Quid de l'étain (Sn) ?

- l'étain blanc est métallique, stable à température ambiante ;
- sa structure cristalline tétragonale, moins compacte que la CFC de Cu, explique sa plus faible densité : 7,3 pour Sn contre 8,96 pour Cu

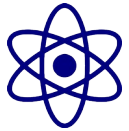


Notions essentielles pour comprendre les métaux

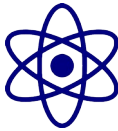


Quid de l'étain (Sn) ?

- l'étain blanc est métallique, stable à température ambiante ;
- sa structure cristalline tétragonale, moins compacte que la CFC de Cu, explique sa plus faible densité : 7,3 pour Sn contre 8,96 pour Cu
- l'étain gris est non-métallique et sa structure est cubique de type diamant ;

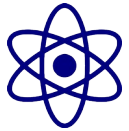


Notions essentielles pour comprendre les métaux

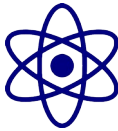


Quid de l'étain (Sn) ?

- l'étain blanc est métallique, stable à température ambiante ;
- sa structure cristalline tétragonale, moins compacte que la CFC de Cu, explique sa plus faible densité : 7,3 pour Sn contre 8,96 pour Cu
- l'étain gris est non-métallique et sa structure est cubique de type diamant ;
- l'étain gris est stable en-dessous de 13,2°C ;

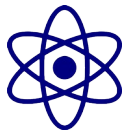


Notions essentielles pour comprendre les métaux

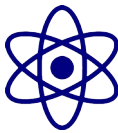


Quid de l'étain (Sn) ?

- l'étain blanc est métallique, stable à température ambiante ;
- sa structure cristalline tétragonale, moins compacte que la CFC de Cu, explique sa plus faible densité : 7,3 pour Sn contre 8,96 pour Cu
- l'étain gris est non-métallique et sa structure est cubique de type diamant ;
- l'étain gris est stable en-dessous de 13,2°C ;
- c'est pour cette raison que l'étain métallique soumis à de froides températures peut tomber en morceau → la 'maladie de l'étain'



Notions essentielles pour comprendre les métaux



La maladie de l'étain...

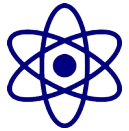
Hiver 1812. Napoléon Ier et ses armées sont chassés de Russie après leur tentative manquée d'obtenir la capitulation du tsar Alexandre Ier. Pour ajouter à la déculottée, les boutons en étain des uniformes des soldats se sont mis à tomber en poussière sous l'effet du terrible hiver russe...



Étain blanc



Étain gris

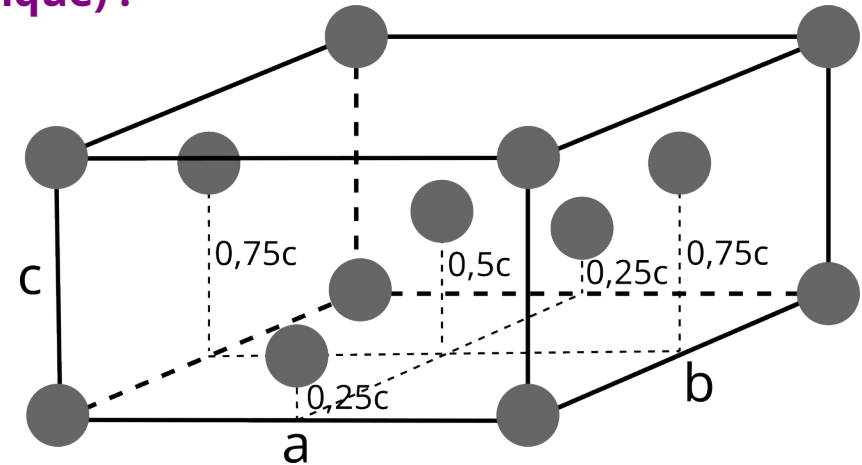


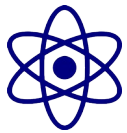
Notions essentielles pour comprendre les métaux



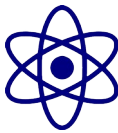
Propriétés mécaniques de l'étain

→ structure tétragonale de l'étain blanc (métallique) :





Notions essentielles pour comprendre les métaux

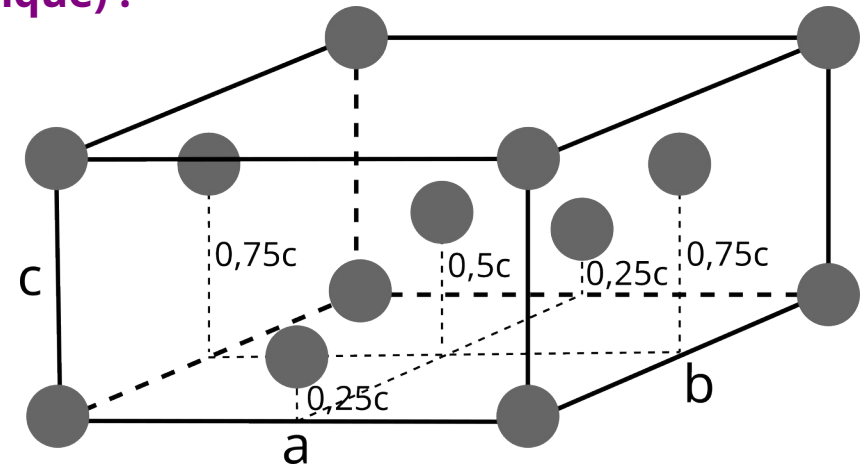


Propriétés mécaniques de l'étain

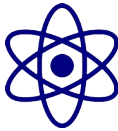
→ structure tétragonale de l'étain blanc (métallique) :

→ absence de liaisons covalentes fortes :

→ Sn est mou et facile à déformer



→ c'est cette propriété qui en a fait un métal idéal pour les alliages avec Cu dès l'Antiquité car il abaisse le point de fusion de Cu et améliore sa coulabilité sans nécessiter d'exercer des forces mécaniques importantes pour le travailler ;

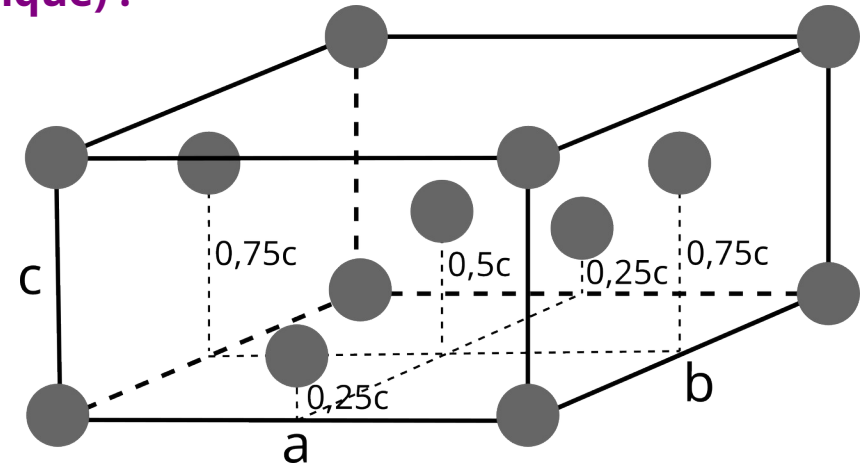


Propriétés mécaniques de l'étain

→ **structure tétragonale de l'étain blanc (métallique) :**

→ absence de liaisons covalentes fortes :

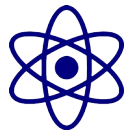
→ Sn est mou et facile à déformer



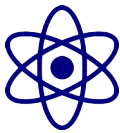
→ dès l'Antiquité, Sn a été le métal idéal pour des alliages avec Cu :

→ il abaisse le point de fusion de Cu et améliore sa coulabilité

→ **sans avoir à exercer des forces mécaniques importantes pour le travailler**



Notions essentielles pour comprendre les métaux



Comment l'étain était-il produit ?

- la cassitérite (SnO_2), principal minéral d'étain, était exploité dès -3000 ;
- les techniques anciennes consistaient à réduire SnO_2 par le charbon de bois :





Notions essentielles pour comprendre les métaux



Impact environnemental de la production d'étain à l'Antiquité



Notions essentielles pour comprendre les métaux



Impact environnemental de la production d'étain à l'Antiquité

→ déforestation massive pour produire le charbon de bois ;



Notions essentielles pour comprendre les métaux



Impact environnemental de la production d'étain à l'Antiquité

- déforestation massive pour produire le charbon de bois ;
- la réduction de SnO_2 génèrait des résidus solides (les scories) et des fumées toxiques riches en métaux lourds :
 - SnO_2 non réduit,
 - plomb (Pb) souvent présent comme impureté de la cassitérite,
 - arsenic (As) et antimoine (Sb) souvent associés aux gisement d'étain.



Notions essentielles pour comprendre les métaux



Impact environnemental de la production d'étain à l'Antiquité

- déforestation massive pour produire le charbon de bois ;
- la réduction de SnO_2 génèrait des résidus solides (les scories) et des fumées toxiques riches en métaux lourds :
 - SnO_2 non réduit,
 - plomb (Pb) souvent présent comme impureté de la cassitérite,
 - arsenic (As) et antimoine (Sb) souvent associés aux gisements d'étain.
- d'où les déchets toxiques : oxyde de plomb PbO , arsénates AsO_4^{3-} et stannates SnO_3^{2-} ;



Notions essentielles pour comprendre les métaux



Impact environnemental de la production d'étain à l'Antiquité

- déforestation massive pour produire le charbon de bois ;
- la réduction de SnO_2 génèrait des résidus solides (les scories) et des fumées toxiques riches en métaux lourds :
 - SnO_2 non réduit,
 - plomb (Pb) souvent présent comme impureté de la cassitérite,
 - arsenic (As) et antimoine (Sb) souvent associés aux gisement d'étain.
- d'où les déchets toxiques : oxyde de plomb PbO , arsénates AsO_4^{3-} et stannates SnO_3^{2-} ;
- pollution des sols par les scories ;



Notions essentielles pour comprendre les métaux



Impact environnemental de la production d'étain à l'Antiquité

- déforestation massive pour produire le charbon de bois ;
- la réduction de SnO_2 génèrait des résidus solides (les scories) et des fumées toxiques riches en métaux lourds :
 - SnO_2 non réduit,
 - plomb (Pb) souvent présent comme impureté de la cassitérite,
 - arsenic (As) et antimoine (Sb) souvent associés aux gisement d'étain.
- d'où les déchets toxiques : oxyde de plomb PbO , arsénates AsO_4^{3-} et stannates SnO_3^{2-} ;
- pollution des sols par les scories ;
- ce sont les premières pollutions industrielles liées à la métallurgie !

TODAY

Notions essentielles pour comprendre les métaux

TODAY

La production d'étain blanc aujourd'hui?

TODAY

Notions essentielles pour comprendre les métaux

TODAY

La production d'étain blanc aujourd'hui?

→ il peut se trouver à l'état natif mais c'est extrêmement rare !



Notions essentielles pour comprendre les métaux



La production d'étain blanc aujourd'hui?

- il peut se trouver à l'état natif mais c'est extrêmement rare !
- gisements de pépites très spécifiques, notamment en Bolivie, Cornouailles, Australie ;



Notions essentielles pour comprendre les métaux



La production d'étain blanc aujourd'hui?

- il peut se trouver à l'état natif mais c'est extrêmement rare !
- gisements de pépites très spécifiques, notamment en Bolivie, Cornouailles, Australie ;
- réactivité chimique élevée → on le trouve plutôt sous forme de minerais :
 - cassitérite (SnO_2), le minéral d'étain le plus courant et important économiquement ;
 - oxyde très stable, résistant à l'altération,
 - gisements alluvionnaires (rivières, sédiments);
 - stannite ($\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$) : sulfure mixte moins courant mais néanmoins exploité.

TODAY

Notions essentielles pour comprendre les métaux

TODAY

La production d'étain blanc aujourd'hui?

- l'étain est toujours extrait de la cassitérite, mais avec des méthodes industrielles :
- fours électriques puis réduction par le carbone ou l'hydrogène ;

TODAY

Notions essentielles pour comprendre les métaux

TODAY

La production d'étain blanc aujourd'hui?

- l'étain est toujours extrait de la cassitérite, mais avec des méthodes industrielles :
 - fours électriques puis réduction par le carbone ou l'hydrogène ;
- pose des problème de déforestation et de pollution des sols (Indonésie, Chine) ;



Notions essentielles pour comprendre les métaux



La production d'étain blanc aujourd'hui?

- l'étain est toujours extrait de la cassitérite, mais avec des méthodes industrielles :
 - fours électriques puis réduction par le carbone ou l'hydrogène ;
- pose des problème de déforestation et de pollution des sols (Indonésie, Chine) ;
- il est aussi extrait dans des zones de conflit (Rép. Démocratique du Congo...) ;



Notions essentielles pour comprendre les métaux



La production d'étain blanc aujourd'hui?

- l'étain est toujours extrait de la cassitérite, mais avec des méthodes industrielles :
 - fours électriques puis réduction par le carbone ou l'hydrogène ;
- pose des problème de déforestation et de pollution des sols (Indonésie, Chine) ;
- il est aussi extrait dans des zones de conflit (Rép. Démocratique du Congo...) ;
- s'extrait aussi par dragage de rivières (Indonésie) → dégradation de la biodiversité ;



Notions essentielles pour comprendre les métaux



La production d'étain blanc aujourd'hui?

- l'étain est toujours extrait de la cassitérite, mais avec des méthodes industrielles :
 - fours électriques puis réduction par le carbone ou l'hydrogène ;
- pose des problème de déforestation et de pollution des sols (Indonésie, Chine) ;
- il est aussi extrait dans des zones de conflit (Rép. Démocratique du Congo...) ;
- s'extrait aussi par dragage de rivières (Indonésie) → dégradation de la biodiversité ;
- son recyclage est très compliqué car il est souvent dispersé dans des alliages (- de 30%) ;



Notions essentielles pour comprendre les métaux



La production d'étain blanc aujourd'hui?

- l'étain est toujours extrait de la cassitérite, mais avec des méthodes industrielles :
 - fours électriques puis réduction par le carbone ou l'hydrogène ;
- pose des problème de déforestation et de pollution des sols (Indonésie, Chine) ;
- il est aussi extrait dans des zones de conflit (Rép. Démocratique du Congo...) ;
- s'extrait aussi par dragage de rivières (Indonésie) → dégradation de la biodiversité ;
- son recyclage est très compliqué car il est souvent dispersé dans des alliages (- de 30%) ;
- substituts : alliage sans Sn (ex. Cu-Ag) dans les soudures, biopolymères conducteurs pour l'électronique.

TODAY

Notions essentielles pour comprendre les métaux

TODAY

La prod



Mine d'étain
en Namibie