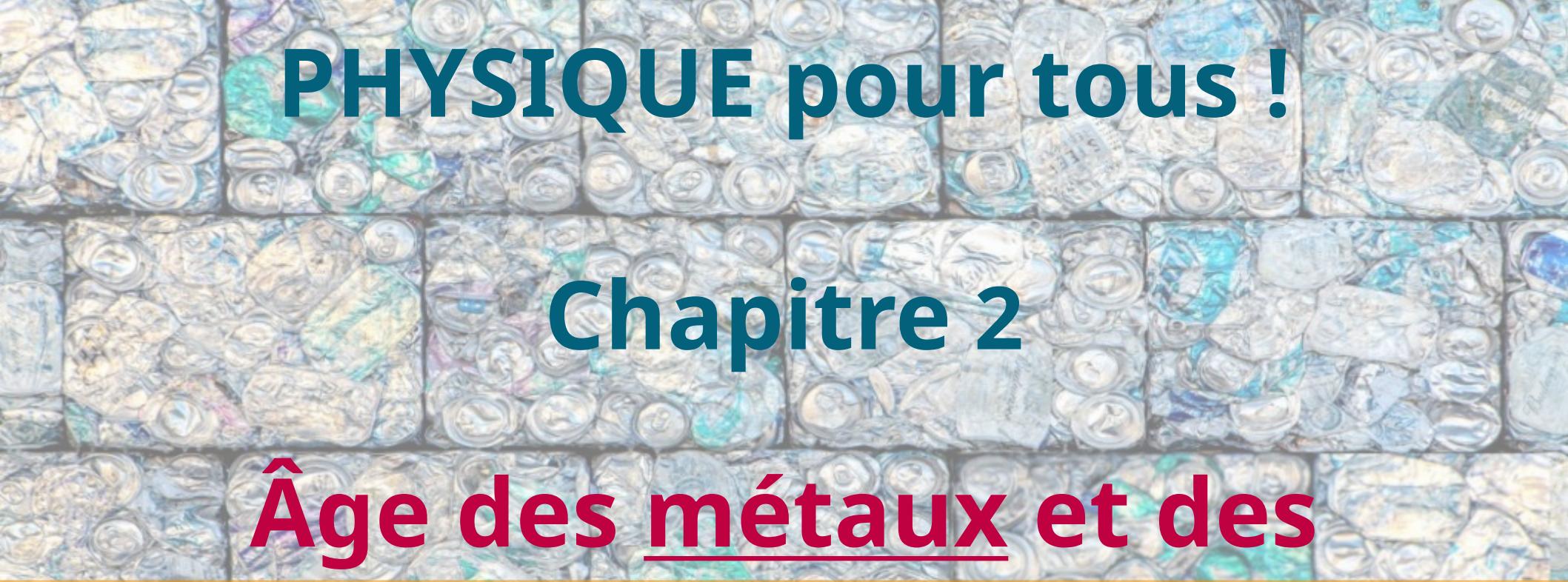


PHYSIQUE pour tous !

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

De l'atome aux écomatériaux



PHYSIQUE pour tous !

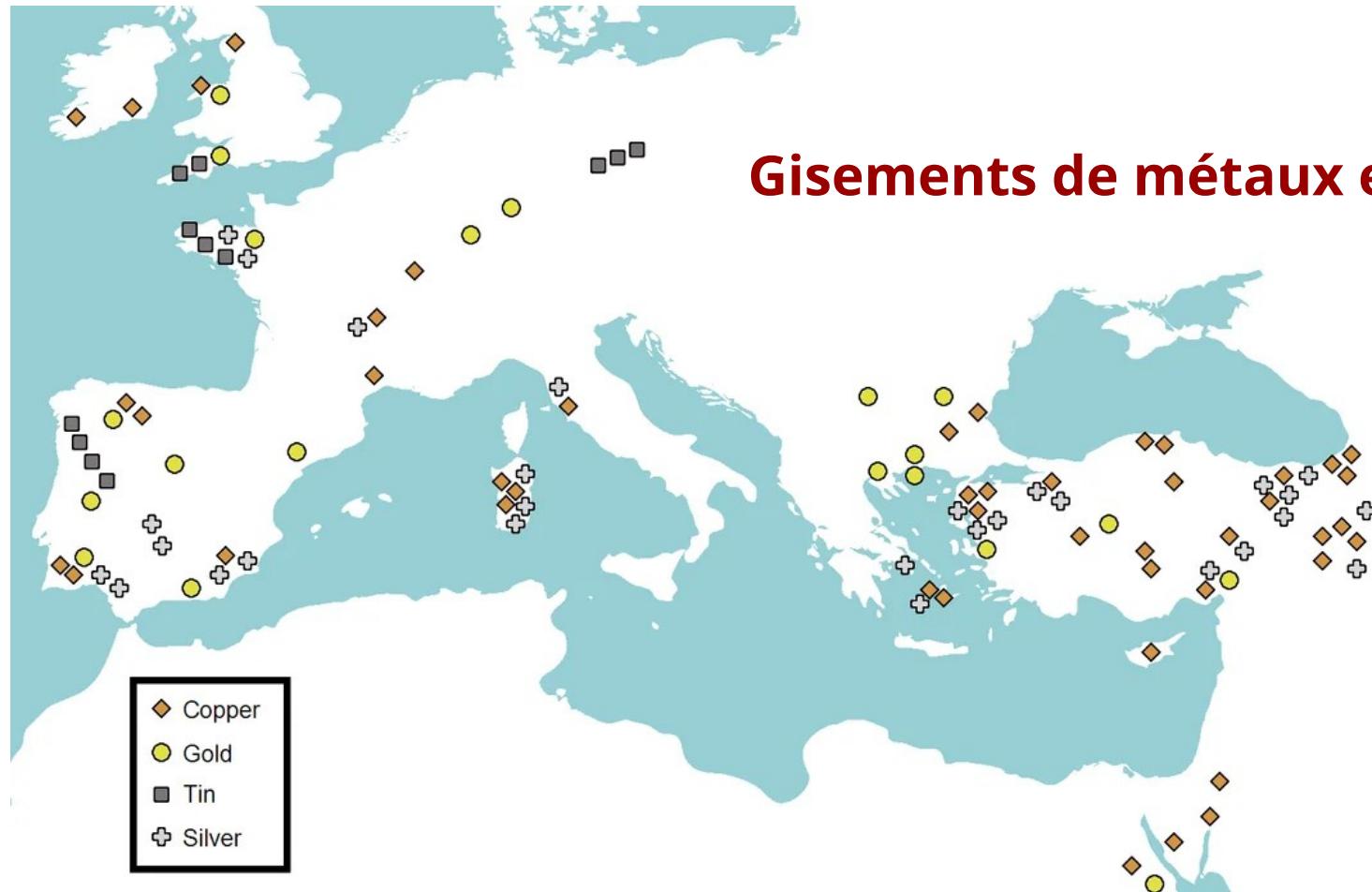
Chapitre 2

Âge des métaux et des premières civilisations



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations





Gisements de métaux en Europe



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Matériaux

Naissance de la métallurgie

Premiers alliages :

cuivre + étain = bronze

Or + argent = électrum

Utilisation

colorants

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 pie



Université
de Strasbourg

Physique pour tous - Thierry DINTZER





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

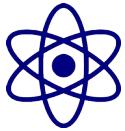
Âge du bronze

-2 300

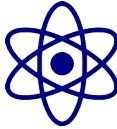
Plus généralement : c'est quoi un métal ??

-1 200





La liaison métallique

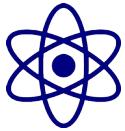


Le modèle de Drude (1900)

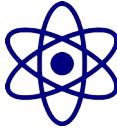


Paul Karl Ludwig Drude (1863-1906)

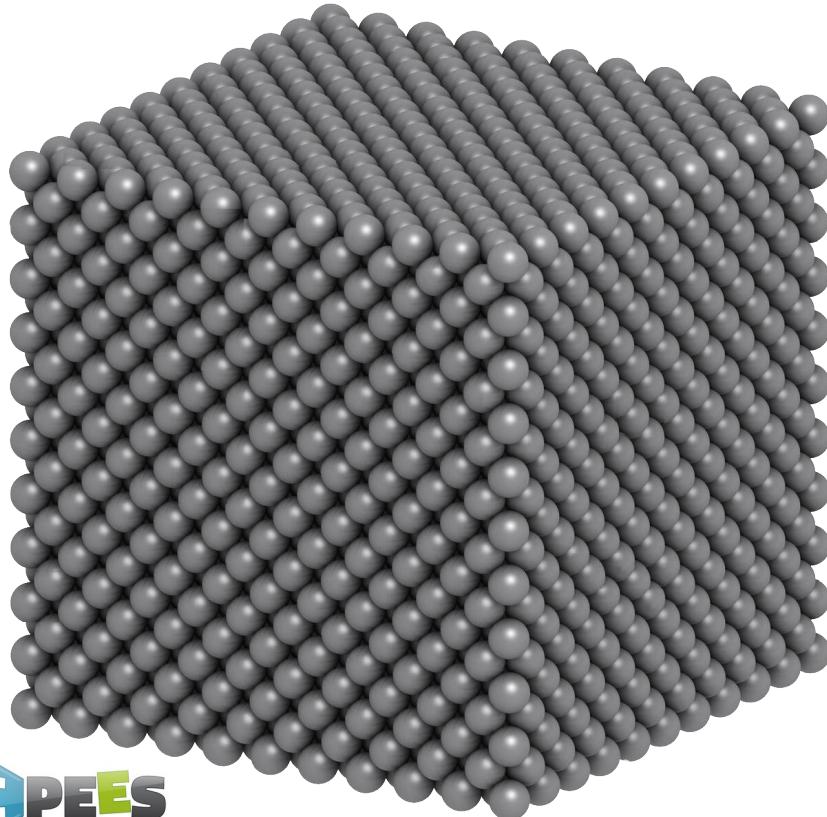
Physicien allemand spécialisé dans l'optique



La liaison métallique

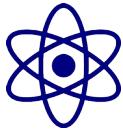


Le modèle de Drude (1900)



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

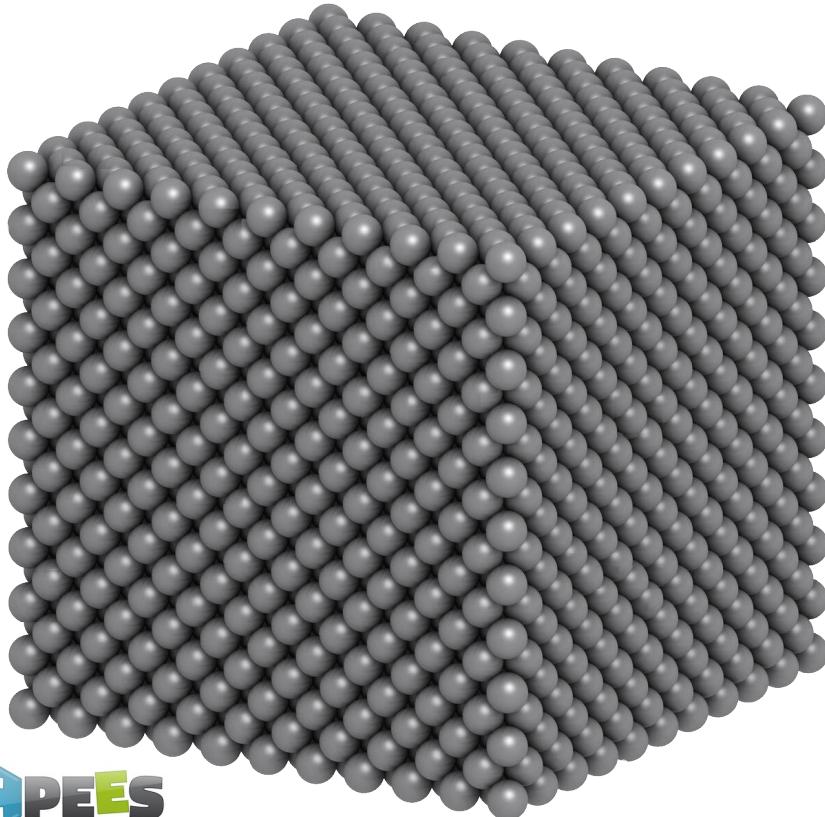
La liaison métallique les maintient ensemble. Mais quelle est-elle ?



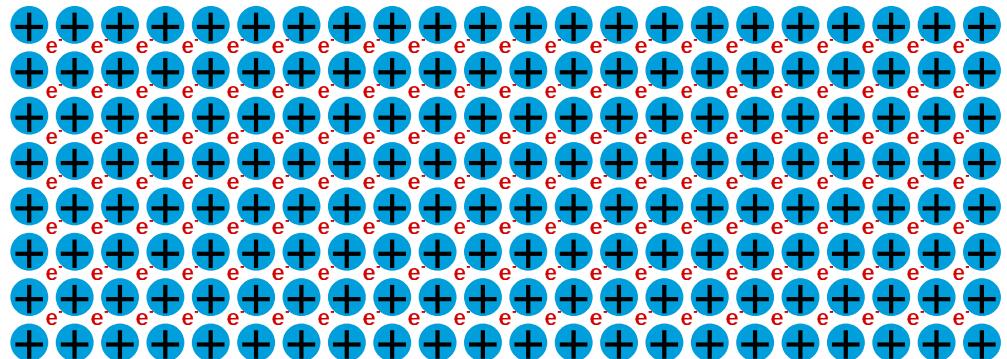
La liaison métallique

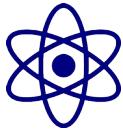


Le modèle de Drude (1900)

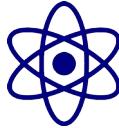


Un modèle qui fonctionne consiste à considérer que les atomes se comportent comme des cations après avoir placé dans un 'pot commun' leurs électrons de valence :





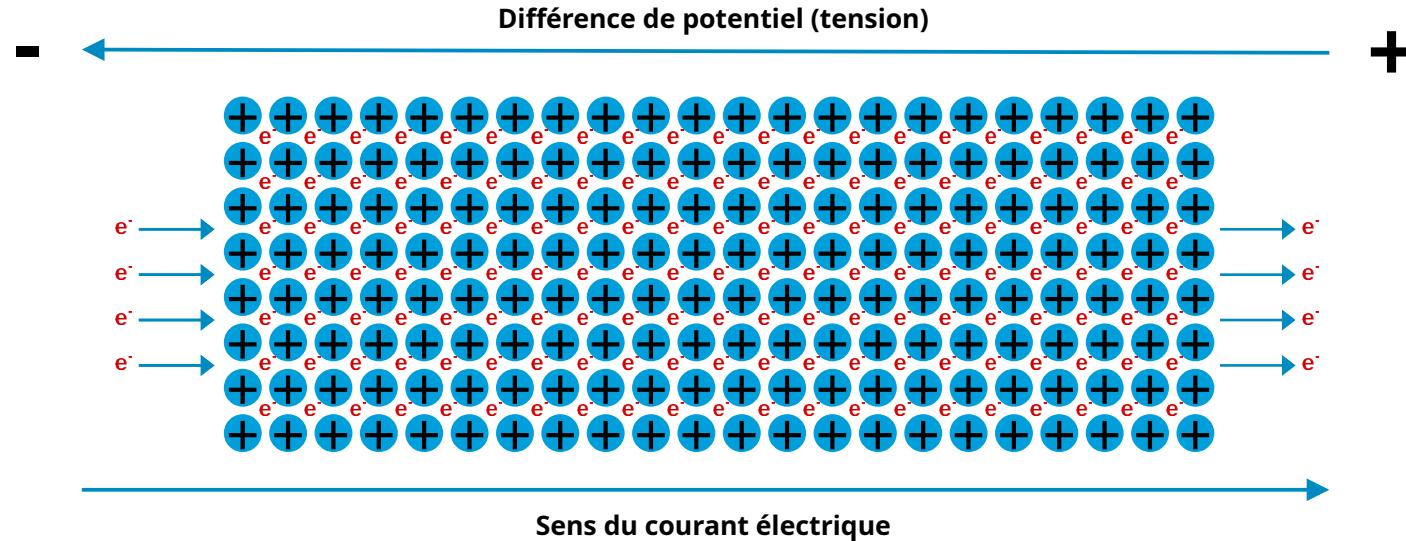
La liaison métallique

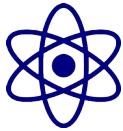


Le modèle de Drude (1900)

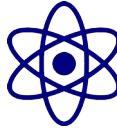
Et ça explique beaucoup de choses...

→ la conduction électrique :





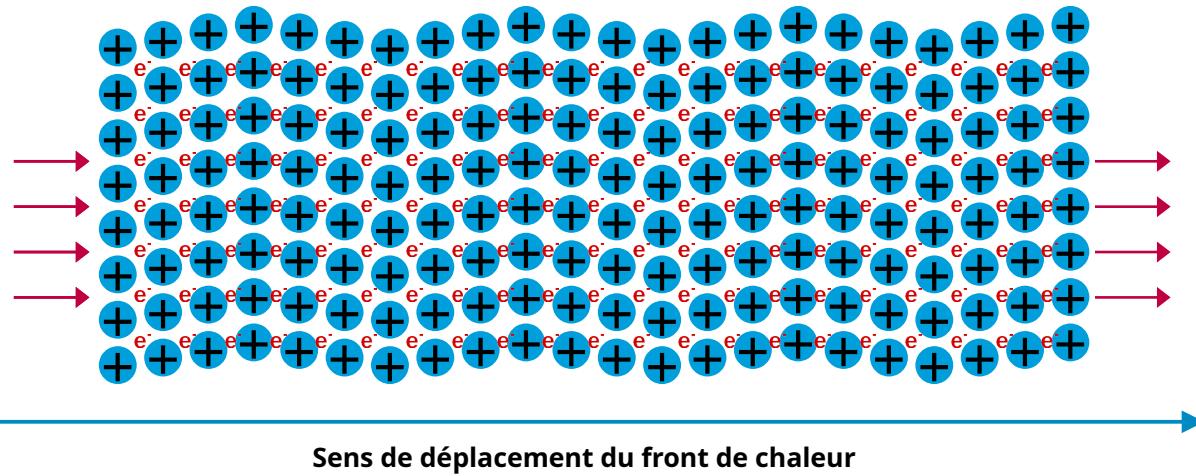
La liaison métallique

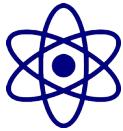


Le modèle de Drude (1900)

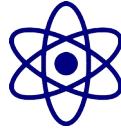
Et ça explique beaucoup de choses...

→ la conduction thermique :





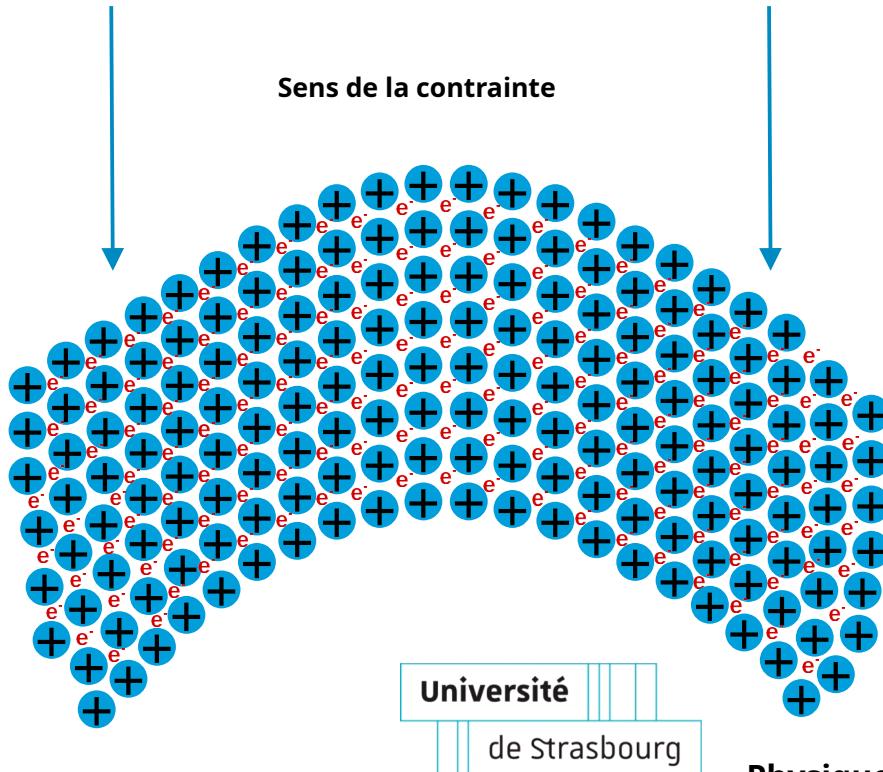
La liaison métallique

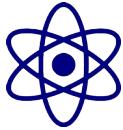


Le modèle de Drude (1900)

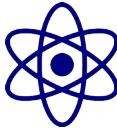
Et ça explique beaucoup de choses...

→ élasticité :





La liaison métallique

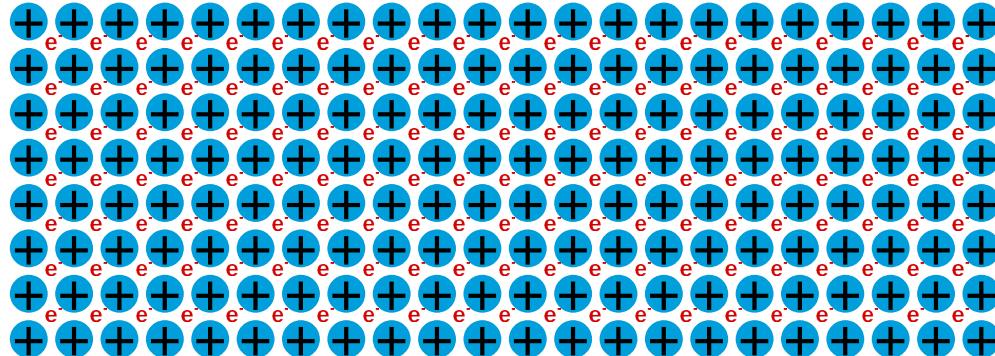


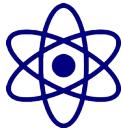
Le modèle de Drude (1900)

Et ça explique beaucoup de choses...

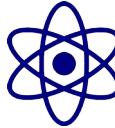
→ élasticité :

Lorsque la contrainte se relâche





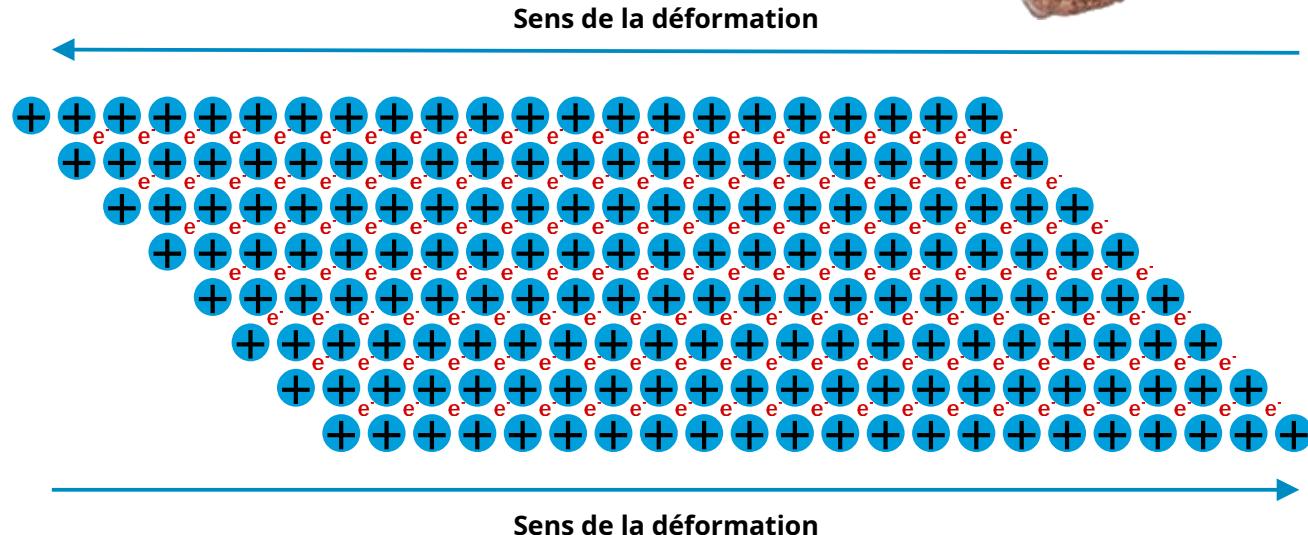
La liaison métallique

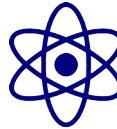
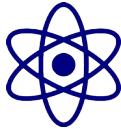


Le modèle de Drude (1900)

Et ça explique beaucoup de choses...

→ la malléabilité et la ductilité :





Notions essentielles pour comprendre les métaux

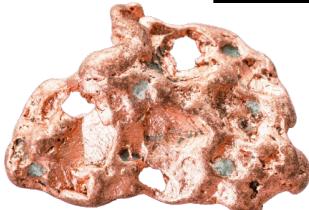
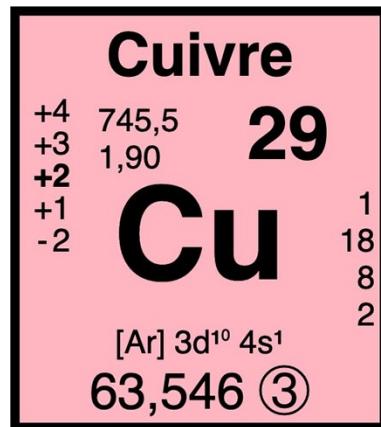
L'exemple du cuivre...

Cuivre

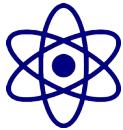
8,96 g/cm³

T_F = 1 085°C

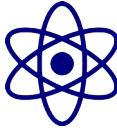
Dureté : 3



Université
de Strasbourg



Notions essentielles pour comprendre les métaux



L'exemple du cuivre...

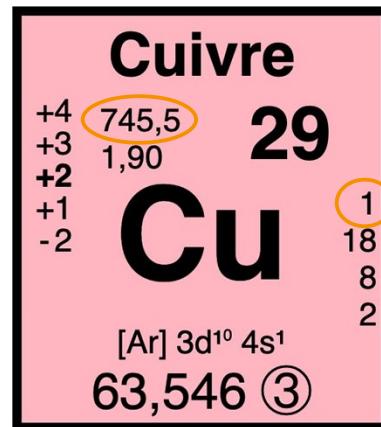
Pourquoi le cuivre est-il si bon conducteur électrique ?

Cuivre

8,96 g/cm³

T_F = 1 085°C

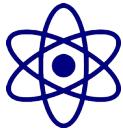
Dureté : 3



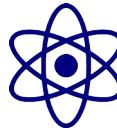
→ rôle de la structure électronique...



M → M⁺ : 745,5 kJ/mol



Notions essentielles pour comprendre les métaux



L'exemple du cuivre...

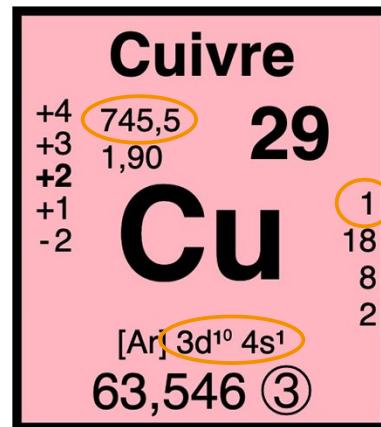
Pourquoi le cuivre est-il si bon conducteur électrique ?

Cuivre

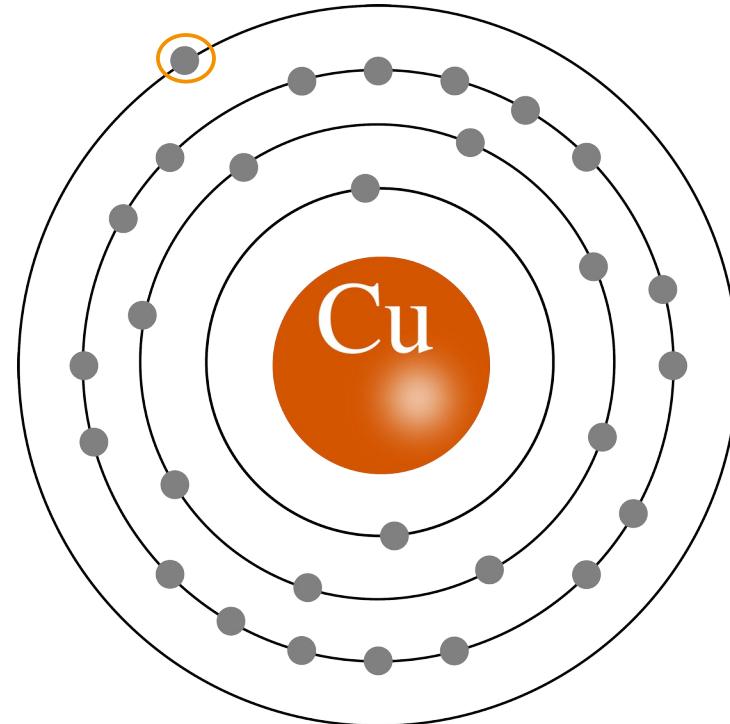
8,96 g/cm³

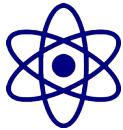
T_F = 1 085°C

Dureté : 3

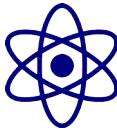


$M \rightarrow M^+$: 745,5 kJ/mol





Notions essentielles pour comprendre les métaux



L'exemple du cuivre...

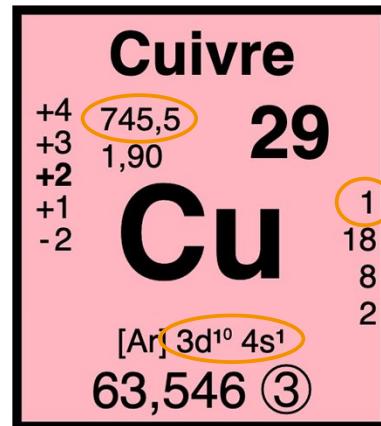
Pourquoi le cuivre est-il si bon conducteur électrique ?

Cuivre

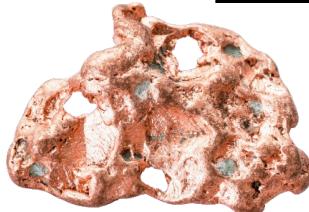
8,96 g/cm³

T_F = 1 085°C

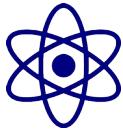
Dureté : 3



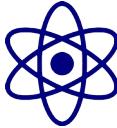
M → M⁺ : 745,5 kJ/mol



Physique pour tous - Thierry DINTZER



Notions essentielles pour comprendre les métaux



L'exemple du cuivre...

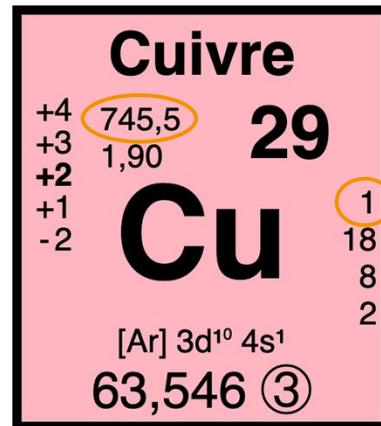
Pourquoi le cuivre est-il si bon conducteur électrique ?

Cuivre

8,96 g/cm³

T_F = 1 085°C

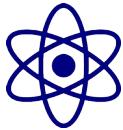
Dureté : 3



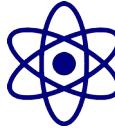
M → M⁺ : 745,5 kJ/mol



→ rôle de la structure cristalline...



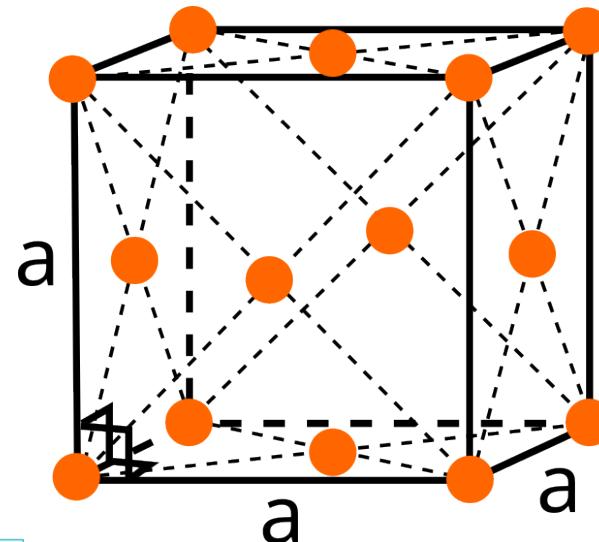
Notions essentielles pour comprendre les métaux

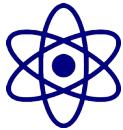


L'exemple du cuivre

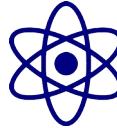
Pourquoi le cuivre est-il si bon conducteur électrique ?

- 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 ;

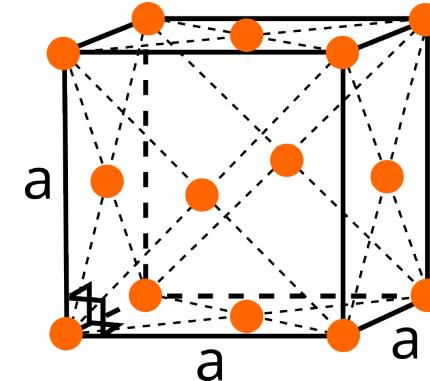
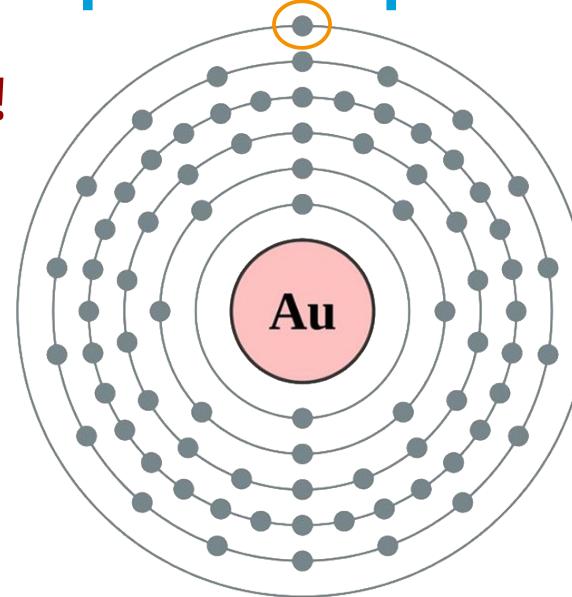




Notions essentielles pour comprendre les métaux

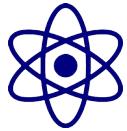


Au : le même en plus gros !

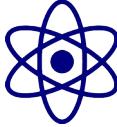


Or	
+5	890,1
+3	2,54
+2	
+1	
-1	
-2	
-3	
79	
Au	
	1
	18
	32
	18
	8
	2
[Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ¹	
196,966569	

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

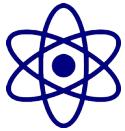


Notions essentielles pour comprendre les métaux

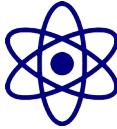


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

→ La liaison métallique n'explique pas tout !

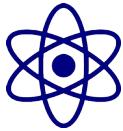


Notions essentielles pour comprendre les métaux

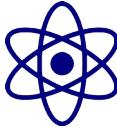


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

- La liaison métallique n'explique pas tout !
- bien qu'elle explique la conductivité et la malléabilité générale des métaux,

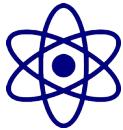


Notions essentielles pour comprendre les métaux

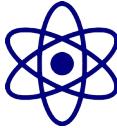


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

- 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 ;

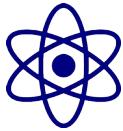


Notions essentielles pour comprendre les métaux

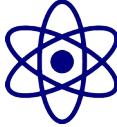


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

- 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...

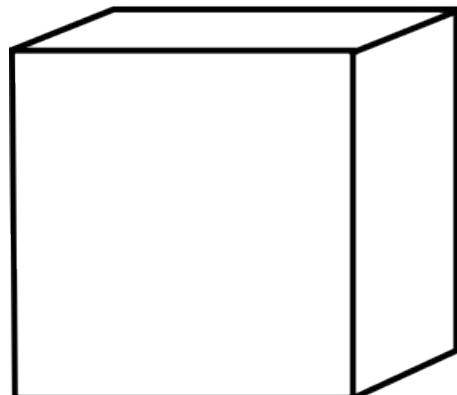


Notions essentielles pour comprendre les métaux

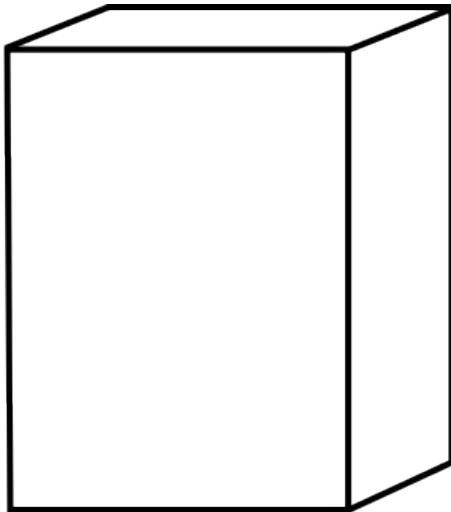


Base de la cristallographie

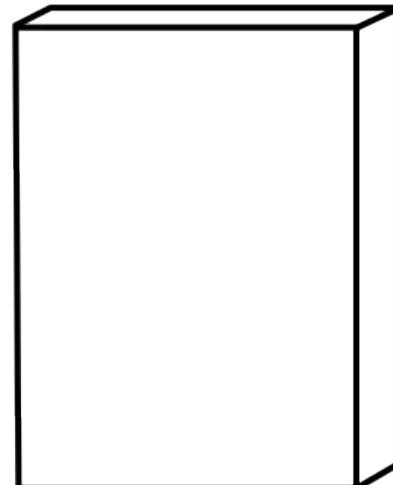
→ les systèmes cristallins orthogonaux :



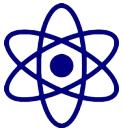
Cubique
 $a = b = c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



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



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

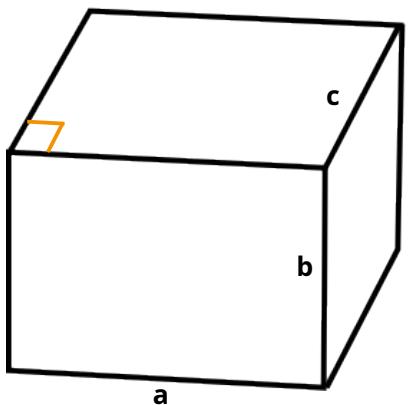


Notions essentielles pour comprendre les métaux

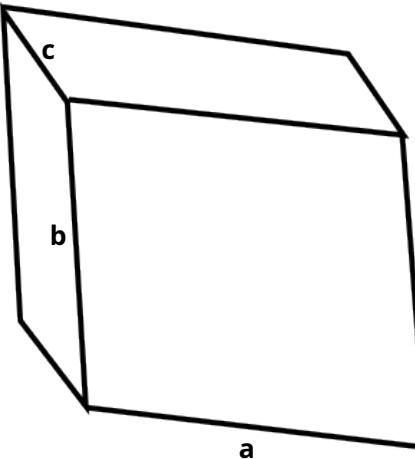


Base de la cristallographie

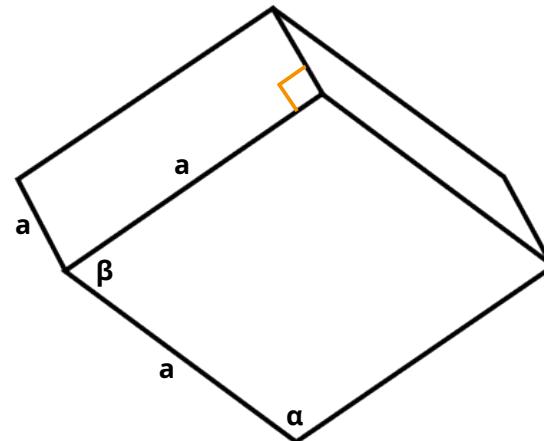
→ les systèmes cristallins non orthogonaux :



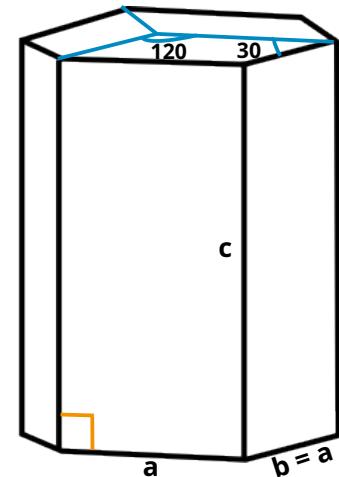
Monoclinique
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$



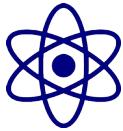
Triclinique
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$



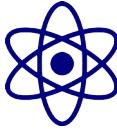
Rhomboédrique
 $a = b = c$
 $\alpha \neq \beta \neq \gamma = 90^\circ$



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

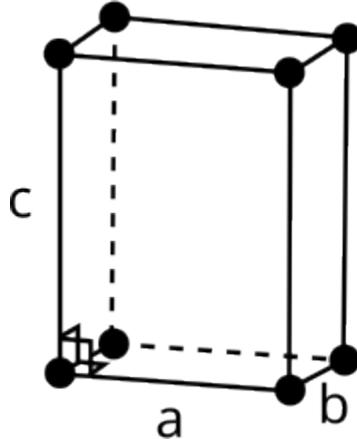


Notions essentielles pour comprendre les métaux

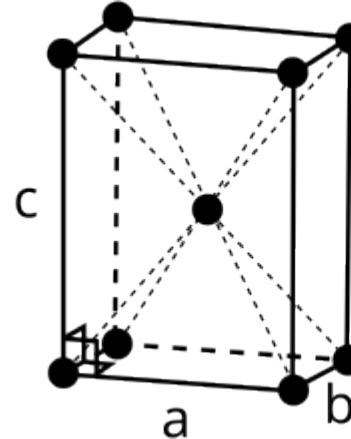


Base de la cristallographie

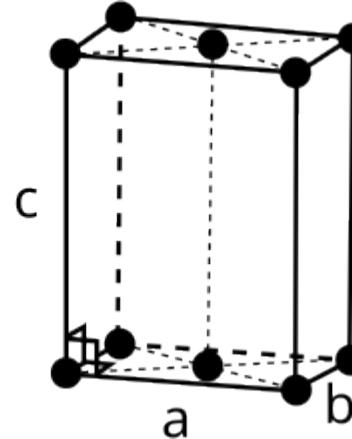
→ les 14 réseaux de Bravais, ou comment se remplit la maille cristalline :



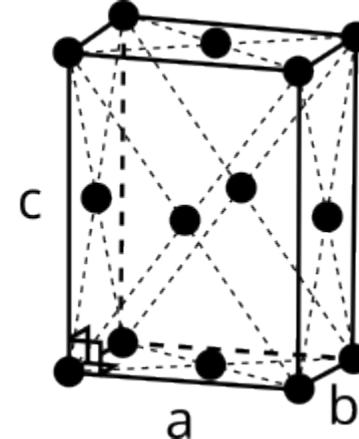
Simple



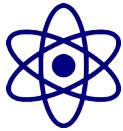
Centré



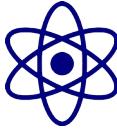
2 faces centrées



À faces centrées



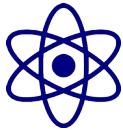
Notions essentielles pour comprendre les métaux



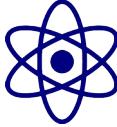
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la structure cristalline :

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



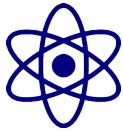
Notions essentielles pour comprendre les métaux



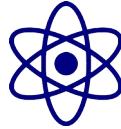
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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 ;



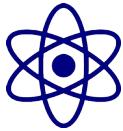
Notions essentielles pour comprendre les métaux



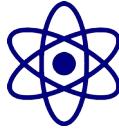
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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;



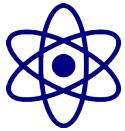
Notions essentielles pour comprendre les métaux



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

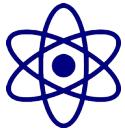


Notions essentielles pour comprendre les métaux

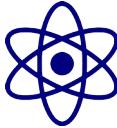


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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



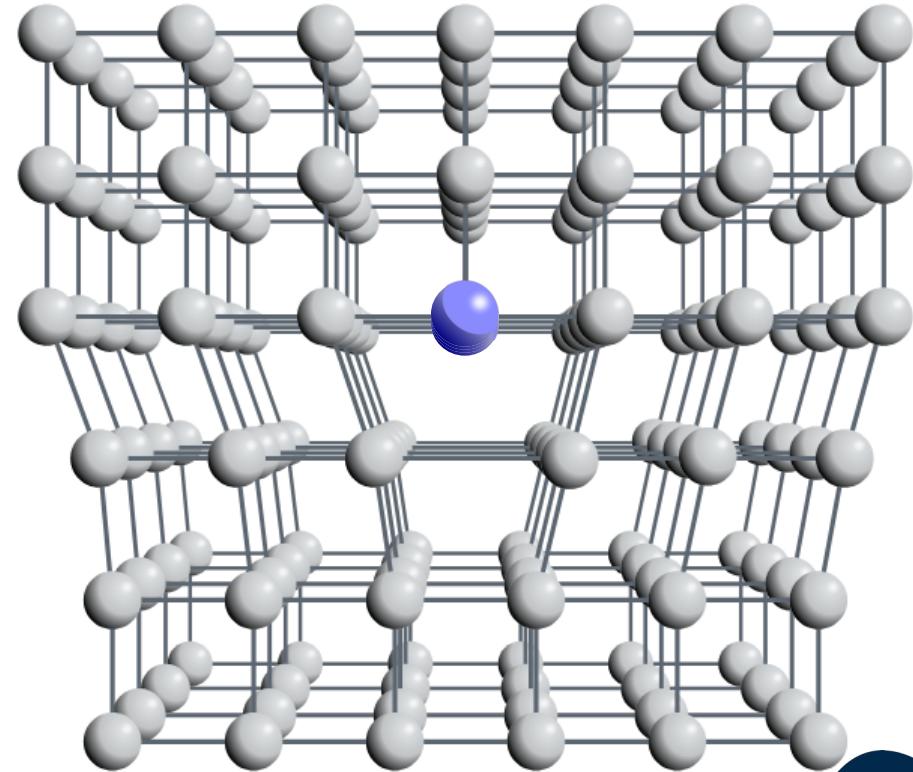
Notions essentielles pour comprendre les métaux

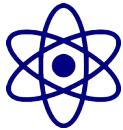


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

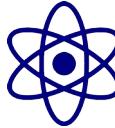
L'insertion d'un autre élément dans une structure cristalline peut provoquer l'apparition de défauts : les dislocations...

... qui influent sur la résistance mécaniques





Notions essentielles pour comprendre les métaux



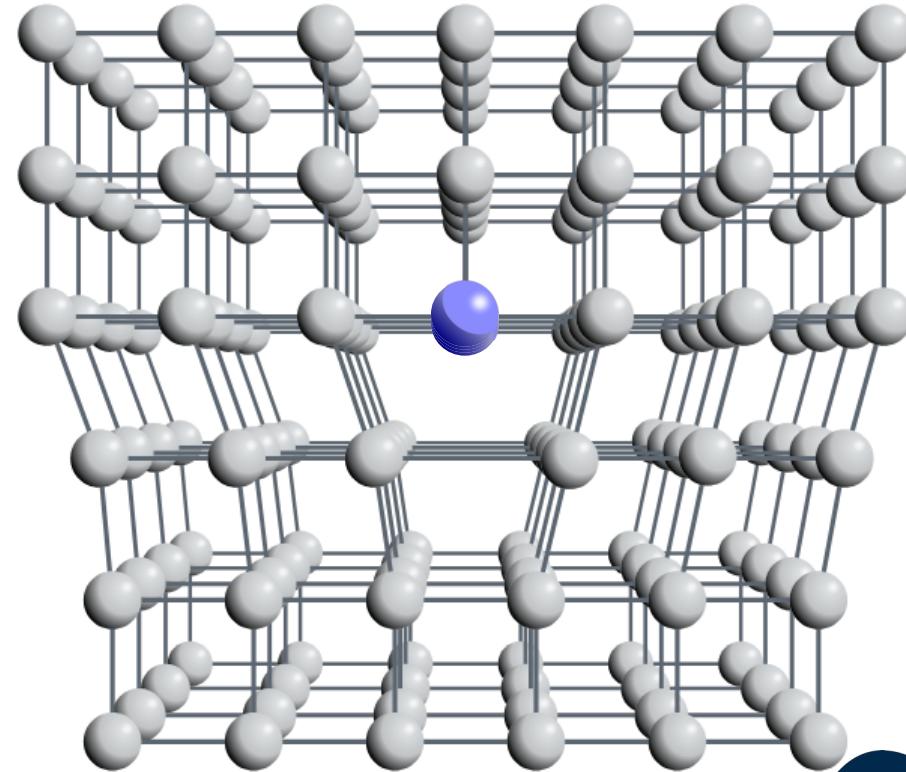
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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. Zn \rightarrow 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



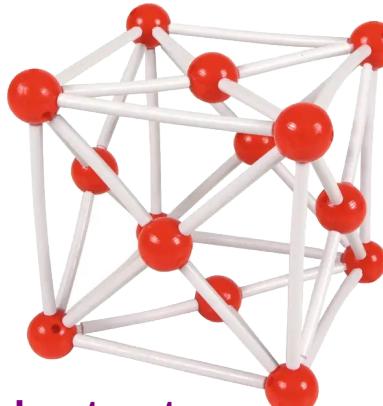
Protohistoire

Âge du bronze

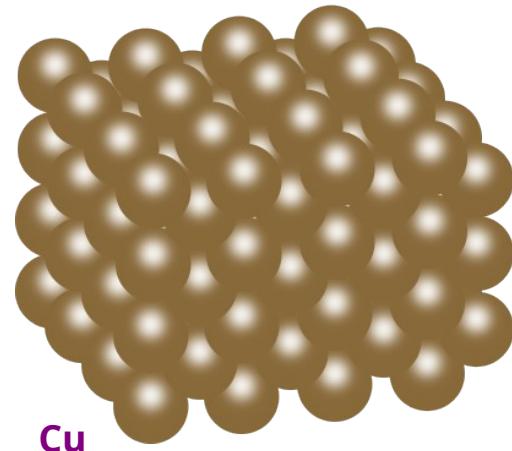
-2 300

Pourquoi le bronze ?

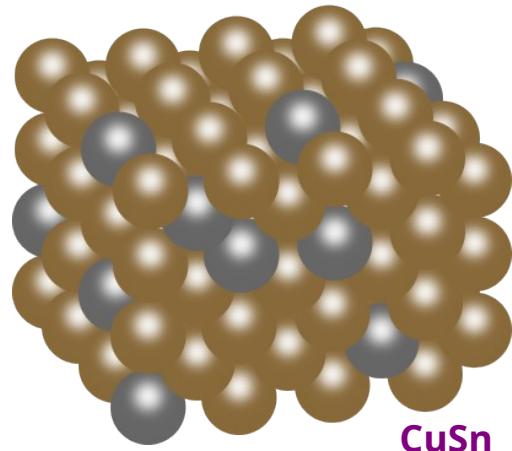
-1 200



La structure
FCC du Cu

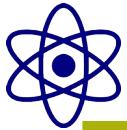


Cu



CuSn





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Pourquoi le bronze ?

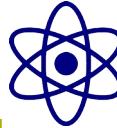
-1 200

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

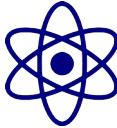
Le cuivre est mou et malléable ; l'alliage avec l'étain change les propriétés :

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 :

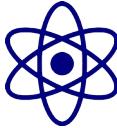
Dureté Bronze = 4-5 > dureté Cuivre = 3

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

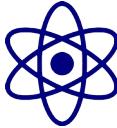
Résistance à la traction Bronze = 300-500 MPa > Cuivre = 200 MPa

→ 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

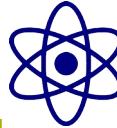
→ le Cu n'est donc pas idéal pour faire des armes ou des outils...

$T_{fusion} \text{ Cu} = 1085^\circ\text{C} > T_{fusion} \text{ Bronze} = 950^\circ\text{C}$ → 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...

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

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

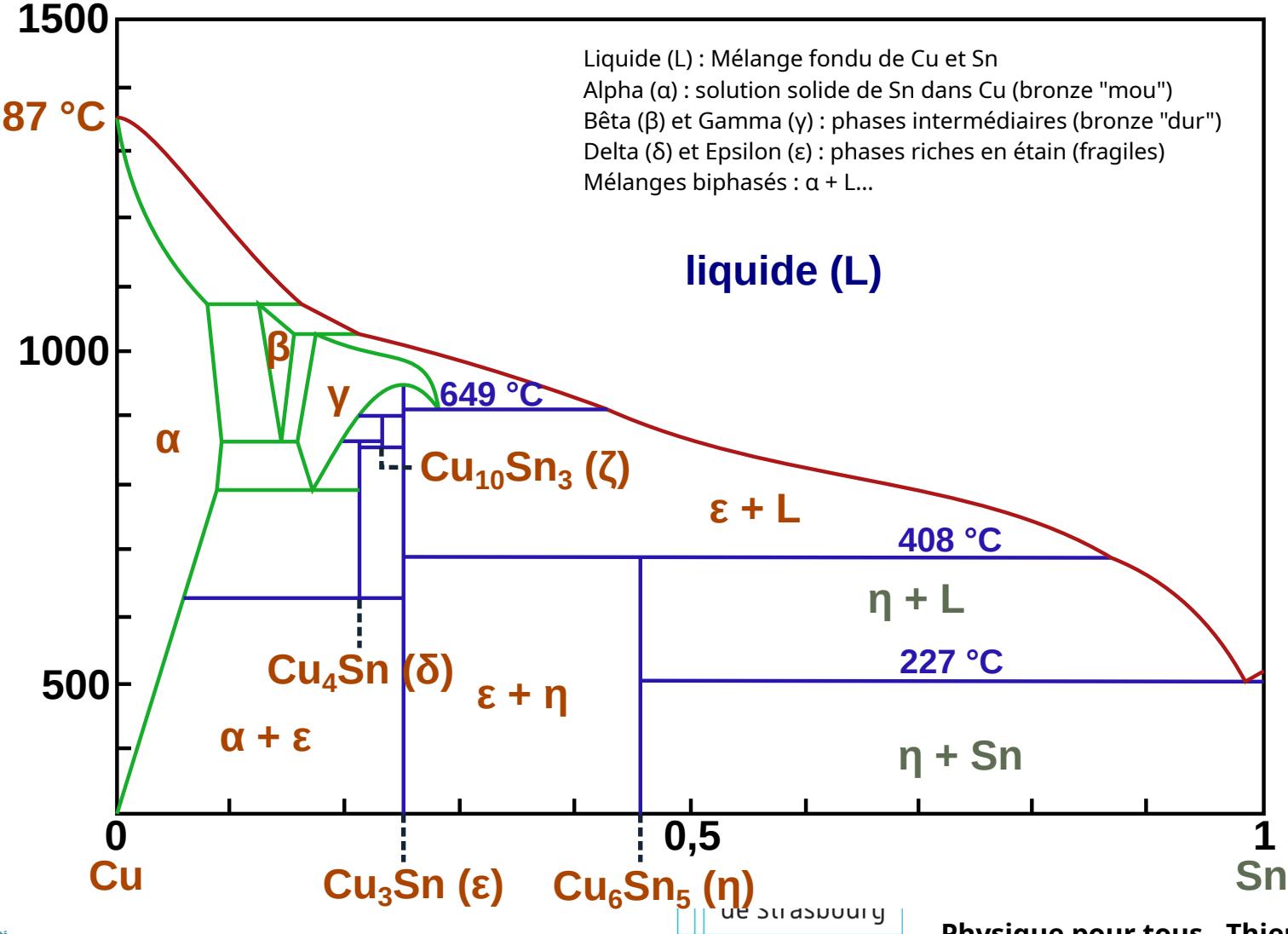




-2 300



Institut de Chimie et
Procédés pour l'Énergie,
l'Environnement et la Santé

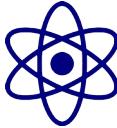


00





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 :

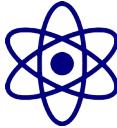
- malléable et ductile, peut être martelé ou étiré
- bonne conductivité électrique (même si les romaines ne s'en servaient pas pour cela !)

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 (~700°C au lieu de 1085°C), facilitant la coulée

Exemple historique : épées mycénienne (-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 :

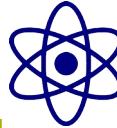
→ le mélange Cu-Sn est fondu entre 232° et 1000°C, selon sa composition, afin d'être coulé dans des moules

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°C	Malléable, bonne conductivité	Pièces de monnaie, ustensiles
β	15-25% Sn	520-798°C	Dure et résistante	Épées, armures (âge du bronze)
γ	~ 25 % Sn	586-677°C	Fragile, peu utilisée	Rarement exploité
Liquide L	variable	> 232-1000°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 ?

-1 200

Le cuivre natif est rare et a été rapidement épuisé.





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

civilisations



-1 200



Route(s) de l'étain





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)

cnrs



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)



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



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 taries. 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 taries. 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 taries. 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 minerai.*



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Transition vers l'Âge du Fer

-1 200

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



Protohistoire

Âge du bronze

-2 300

Transition vers l'Âge du Fer

-1 200

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

1^{er} Âge du fer

-1 200

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...



-500

Comment

Développement de la forge



Université
de Strasbourg

Antiquité

2^{ème} Âge du fer

-52

Énergie

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



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





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

1^{er} Âge du fer

Antiquité

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



Protohistoire

1^{er} Âge du fer

Antiquité

2^{ème} Âge du fer

-1 200

-500

-52

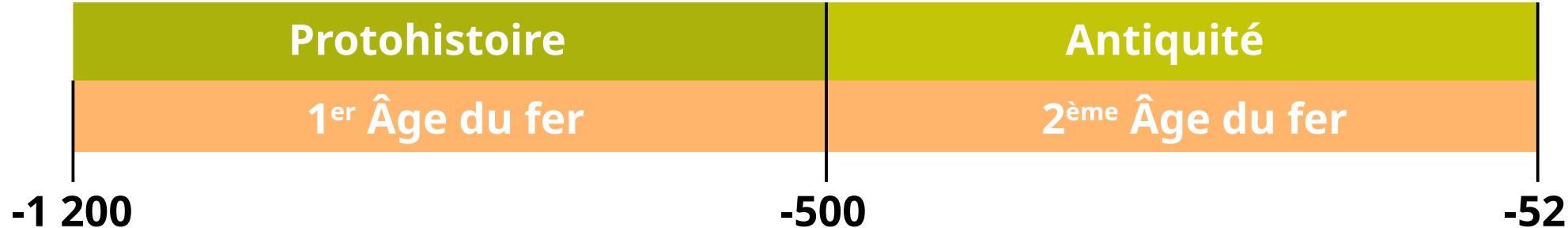
Naissance de la sidérurgie antique

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

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



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.

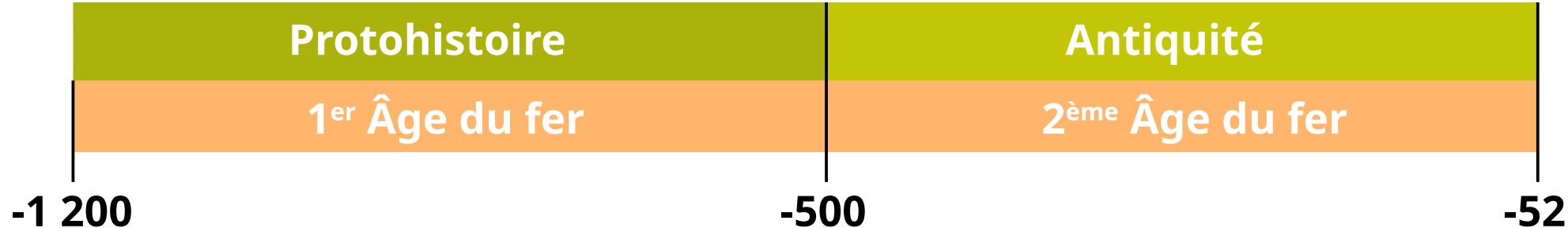
Le fer obtenus par réduction de mineraux dans un four remonterait à -3000 en Anatolie.

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

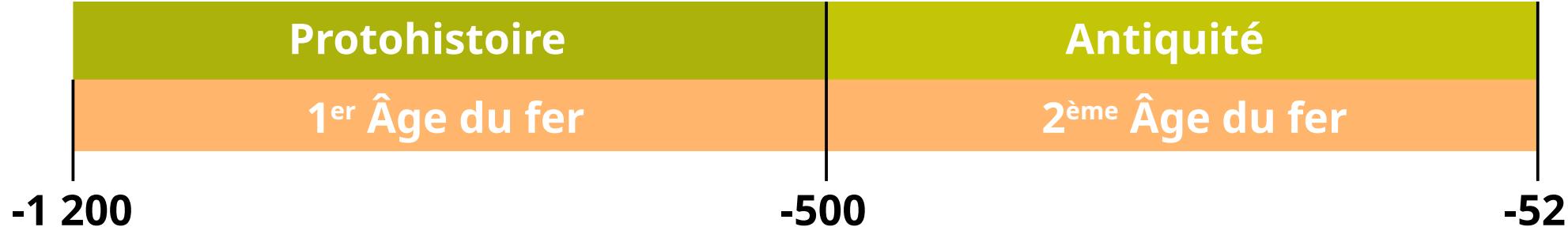
La Grèce passe à l'âge du fer vers -1 050, l'Europe centrale vers -800 : c'est l'âge du fer Celte.

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

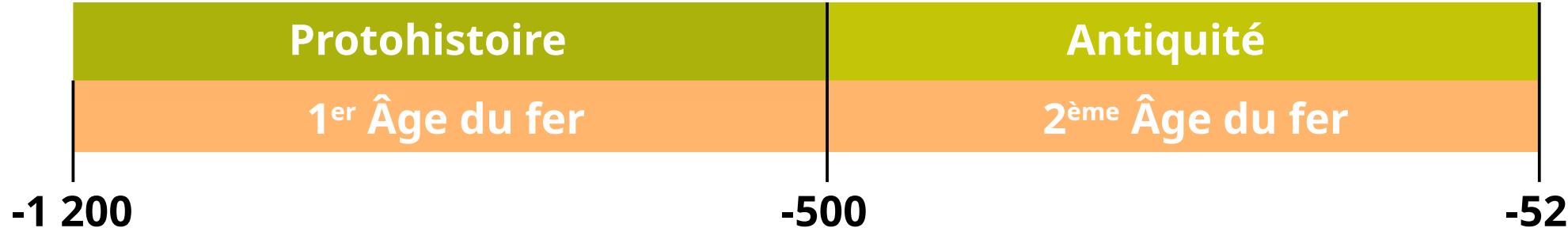


Exemple de
village Celte





L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Naissance de la sidérurgie antique

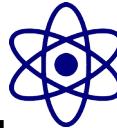
L'Âge du fer s'achève avec la fin de la conquête de la Gaule par les Romains en -52.

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

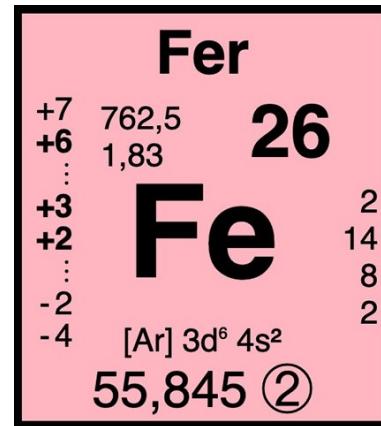
1^{er} Âge du fer

-1 200

Fer

7,87 g/cm³

T_F = 1 538°C



Antiquité

2^{ème} Âge du fer

-500

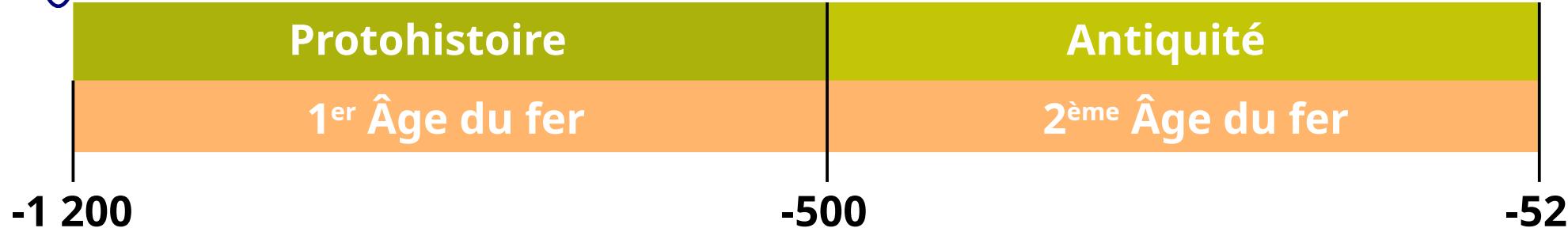
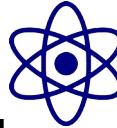
Tableau périodique des éléments chimiques

Groupe →		Tableau périodique des éléments chimiques																		VIII A																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Période																				18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
1	Hydrogène																			Hélium																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
	H																			He	40,062602																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
1	1,007975	II A																				18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
2	Lithium	3	Li	Béryllium	4	Be	nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
	6,9395	9,0121831	numéro atomique																		Hélium																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
3	11	Na	12	Mg	symbole chimique																		Néon																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
	22,9897692	24,3055	masse atomique relative (ou celle de l'isotope le plus stable)																		10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
4	19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	Vanadium	24	Manganèse	25	Manganèse	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Al	32	Si	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr	37	Krypton	38	Sr	39	Yttrium	40	Zr	41	Nb	42	Molibdène	43	Tc	44	Ruthénium	45	Rh	46	Palladium	47	Ag	48	Cadmium	49	In	50	Etain	51	Sn	52	Tellure	53	Iode	54	Xénon	55	Césium	56	Baryum	57	La	58	Sc	59	Y	60	Zr	61	Mo	62	Tc	63	Rh	64	Ag	65	In	66	Sn	67	Te	68	Iode	69	Xénon	70	Rb	71	Fr	72	Hf	73	W	74	W	75	Rh	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Ag	81	Pb	82	Bismuth	83	Po	84	Polonium	85	At	86	Rn	87	Rb	88	Ra	89	Fr	90	Ra	91	Pa	92	Th	93	U	94	Pa	95	Th	96	U	97	Pa	98	Th	99	U	100	Pa	101	Th	102	U	103	Pa	104	Rf	105	Db	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Ts	111	Rg	112	Cn	113	Nh	114	Mc	115	Lv	116	Ts	117	Ts	118	Og	119	Fr	120	Fr	121	Fr	122	Fr	123	Fr	124	Fr	125	Fr	126	Fr	127	Fr	128	Fr	129	Fr	130	Fr	131	Fr	132	Fr	133	Fr	134	Fr	135	Fr	136	Fr	137	Fr	138	Fr	139	Fr	140	Fr	141	Fr	142	Fr	143	Fr	144	Fr	145	Fr	146	Fr	147	Fr	148	Fr	149	Fr	150	Fr	151	Fr	152	Fr	153	Fr	154	Fr	155	Fr	156	Fr	157	Fr	158	Fr	159	Fr	160	Fr	161	Fr	162	Fr	163	Fr	164	Fr	165	Fr	166	Fr	167	Fr	168	Fr	169	Fr	170	Fr	171	Fr	172	Fr	173	Fr	174	Fr	175	Fr	176	Fr	177	Fr	178	Fr	179	Fr	180	Fr	181	Fr	182	Fr	183	Fr	184	Fr	185	Fr	186	Fr	187	Fr	188	Fr	189	Fr	190	Fr	191	Fr	192	Fr	193	Fr	194	Fr	195	Fr	196	Fr	197	Fr	198	Fr	199	Fr	200	Fr	201	Fr	202	Fr	203	Fr	204	Fr	205	Fr	206	Fr	207	Fr	208	Fr	209	Fr	210	Fr	211	Fr	212	Fr	213	Fr	214	Fr	215	Fr	216	Fr	217	Fr	218	Fr	219	Fr	220	Fr	221	Fr	222	Fr	223	Fr	224	Fr	225	Fr	226	Fr	227	Fr	228	Fr	229	Fr	230	Fr	231	Fr	232	Fr	233	Fr	234	Fr	235	Fr	236	Fr	237	Fr	238	Fr	239	Fr	240	Fr	241	Fr	242	Fr	243	Fr	244	Fr	245	Fr	246	Fr	247	Fr	248	Fr	249	Fr	250	Fr	251	Fr	252	Fr	253	Fr	254	Fr	255	Fr	256	Fr	257	Fr	258	Fr	259	Fr	260	Fr	261	Fr	262	Fr	263	Fr	264	Fr	265	Fr	266	Fr	267	Fr	268	Fr	269	Fr	270	Fr	271	Fr	272	Fr	273	Fr	274	Fr	275	Fr	276	Fr	277	Fr	278	Fr	279	Fr	280	Fr	281	Fr	282	Fr	283	Fr	284	Fr	285	Fr	286	Fr	287	Fr	288	Fr	289	Fr	290	Fr	291	Fr	292	Fr	293	Fr	294	Fr	295	Fr	296	Fr	297	Fr	298	Fr	299	Fr	300	Fr	301	Fr	302	Fr	303	Fr	304	Fr	305	Fr	306	Fr	307	Fr	308	Fr	309	Fr	310	Fr	311	Fr	312	Fr	313	Fr	314	Fr	315	Fr	316	Fr	317	Fr	318	Fr	319	Fr	320	Fr	321	Fr	322	Fr	323	Fr	324	Fr	325	Fr	326	Fr	327	Fr	328	Fr	329	Fr	330	Fr	331	Fr	332	Fr	333	Fr	334	Fr	335	Fr	336	Fr	337	Fr	338	Fr	339	Fr	340	Fr	341	Fr	342	Fr	343	Fr	344	Fr	345	Fr	346	Fr	347	Fr	348	Fr	349	Fr	350	Fr	351	Fr	352	Fr	353	Fr	354	Fr	355	Fr	356	Fr	357	Fr	358	Fr	359	Fr	360	Fr	361	Fr	362	Fr	363	Fr	364	Fr	365	Fr	366	Fr	367	Fr	368	Fr	369	Fr	370	Fr	371	Fr	372	Fr	373	Fr	374	Fr	375	Fr	376	Fr	377	Fr	378	Fr	379	Fr	380	Fr	381	Fr	382	Fr	383	Fr	384	Fr	385	Fr	386	Fr	387	Fr	388	Fr	389	Fr	390	Fr	391	Fr	392	Fr	393	Fr	394	Fr	395	Fr	396	Fr	397	Fr	398	Fr	399	Fr	400	Fr	401	Fr	402	Fr	403	Fr	404	Fr	405	Fr	406	Fr	407	Fr	408	Fr	409	Fr	410	Fr	411	Fr	412	Fr	413	Fr	414	Fr	415	Fr	416	Fr	417	Fr	418	Fr	419	Fr	420	Fr	421	Fr	422	Fr	423	Fr	424	Fr	425	Fr	426	Fr	427	Fr	428	Fr	429	Fr	430	Fr	431	Fr	432	Fr	433	Fr	434	Fr	435	Fr	436	Fr	437	Fr	438	Fr	439	Fr	440	Fr	441	Fr	442	Fr	443	Fr	444	Fr	445	Fr	446	Fr	447	Fr	448	Fr	449	Fr	450	Fr	451	Fr	452	Fr	453	Fr	454	Fr	455	Fr	456	Fr	457	Fr	458	Fr	459	Fr	460	Fr	461	Fr	462	Fr	463	Fr	464	Fr	465	Fr	466	Fr	467	Fr	468	Fr	469	Fr	470	Fr	471	Fr	472	Fr	473	Fr	474	Fr	475	Fr	476	Fr	477	Fr	478	Fr	479	Fr	480	Fr	481	Fr	482	Fr	483	Fr	484	Fr	485	Fr	486	Fr	487	Fr	488	Fr	489	Fr	490	Fr	491	Fr	492	Fr	493	Fr	494	Fr	495	Fr	496	Fr	497	Fr	498	Fr	499	Fr	500	Fr	501	Fr	502	Fr	503	Fr	504	Fr	505	Fr	506	Fr	507	Fr	508	Fr	509	Fr	510	Fr	511	Fr	512	Fr	513	Fr	514	Fr	515	Fr	516	Fr	517	Fr	518	Fr	519	Fr	520	Fr	521	Fr	522	Fr	523	Fr	524	Fr	525	Fr	526	Fr	527	Fr	528	Fr	529	Fr	530	Fr	531	Fr	532	Fr	533	Fr	534	Fr	535	Fr	536	Fr	537	Fr	538	Fr	539	Fr	540	Fr	541	Fr	542	Fr	543	Fr	544	Fr	545	Fr	546	Fr	547	Fr	548	Fr	549	Fr	550	Fr	551	Fr	552	Fr	553	Fr	554	Fr	555	Fr	556	Fr	557	Fr	558	Fr	559	Fr	560	Fr	561	Fr	562	Fr	563	Fr	564	Fr	565	Fr	566	Fr	567	Fr	568	Fr	569	Fr	570	Fr	571	Fr	572	Fr	573	Fr	574	Fr	575	Fr	576	Fr	577	Fr	578	Fr	579	Fr	580	Fr	581	Fr	582	Fr	583	Fr	584	Fr	585	Fr	586	Fr	587	Fr	588	Fr	589	Fr	590	Fr	591	Fr	592	Fr	593	Fr	594	Fr	595	Fr	596	Fr	597	Fr	598	Fr	599	Fr	600	Fr	601	Fr	602	Fr	603	Fr	604	Fr	605	Fr	606	Fr	607	Fr	608	Fr	609	Fr	610	Fr	611	Fr	612	Fr	613	Fr	614	Fr	615	Fr	616	Fr	617	Fr	618	Fr	619	Fr	620	Fr	621	Fr	622	Fr	623	Fr	624	Fr	625	Fr	626	Fr	627	Fr	628	Fr	629	Fr	630	Fr	631	Fr	632	Fr	633	Fr	634	Fr	635	Fr	636	Fr	637	Fr	638	Fr	639	Fr	640	Fr	641	Fr	642	Fr	643	Fr	644	Fr	645	Fr	646	Fr	647	Fr	648	Fr	649	Fr	650	Fr	651	Fr	652	Fr	653	Fr	654	Fr	655	Fr	656	Fr	657	Fr	658	Fr	659	Fr	660	Fr	661	Fr	662	Fr	663	Fr	664	Fr	665	Fr	666	Fr	667	Fr	668	Fr	669	Fr	670	Fr	671	Fr	672	Fr	673	Fr	674	Fr	675	Fr	676	Fr	677	Fr	678	Fr	679	Fr	680	Fr	681	Fr	682	Fr	683	Fr	684	Fr	685	Fr	686	Fr	687	Fr	688	Fr	689	Fr	690	Fr	691	Fr	692	Fr	693	Fr	694	Fr	695	Fr	696	Fr	697	Fr	698	Fr	699	Fr	700	Fr	701	Fr	702	Fr	703	Fr	704	Fr	705	Fr	706	Fr	707	Fr	708	Fr	709	Fr	710	Fr	711	Fr	712	Fr	713	Fr	714	Fr	715	Fr	716	Fr	717	Fr	718	Fr	719	Fr	720	Fr	721	Fr	722	Fr	723	Fr	724	Fr	725	Fr	726	Fr	727	Fr	728	Fr	729	Fr	730	Fr	731	Fr	732	Fr	733	Fr	734	Fr	735	Fr	736	Fr	737	Fr	738	Fr	739	Fr	740	Fr	741	Fr	742	Fr	743	Fr	744

Université
de Strasbourg



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



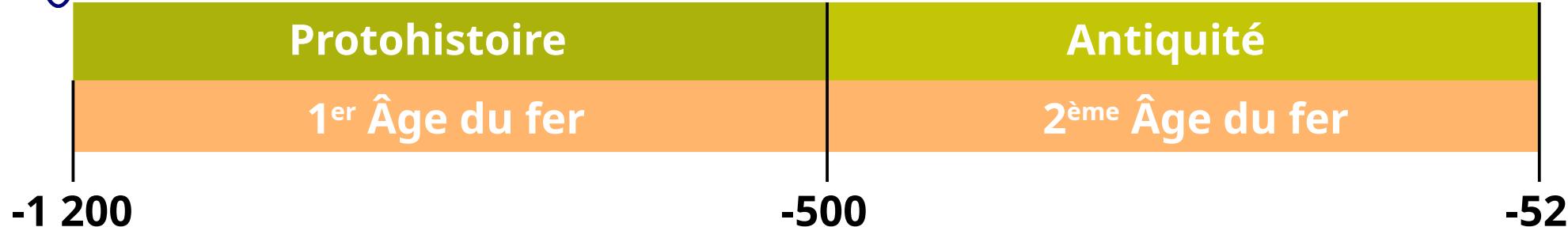
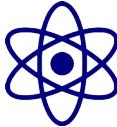
Naissance de la sidérurgie antique : les avantages du fer

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 !



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).

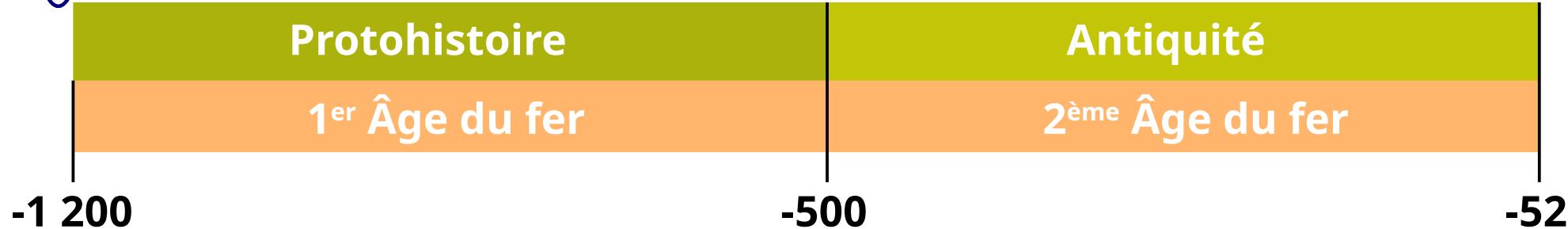
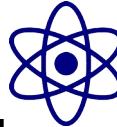
Mais il parvenait à réduire celui-ci: minerai + charbon → fer.

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 .



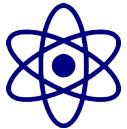
L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Naissance de la sidérurgie antique : fabrication du fer

Bas-fourneau primitif : mineraï + charbon → fer

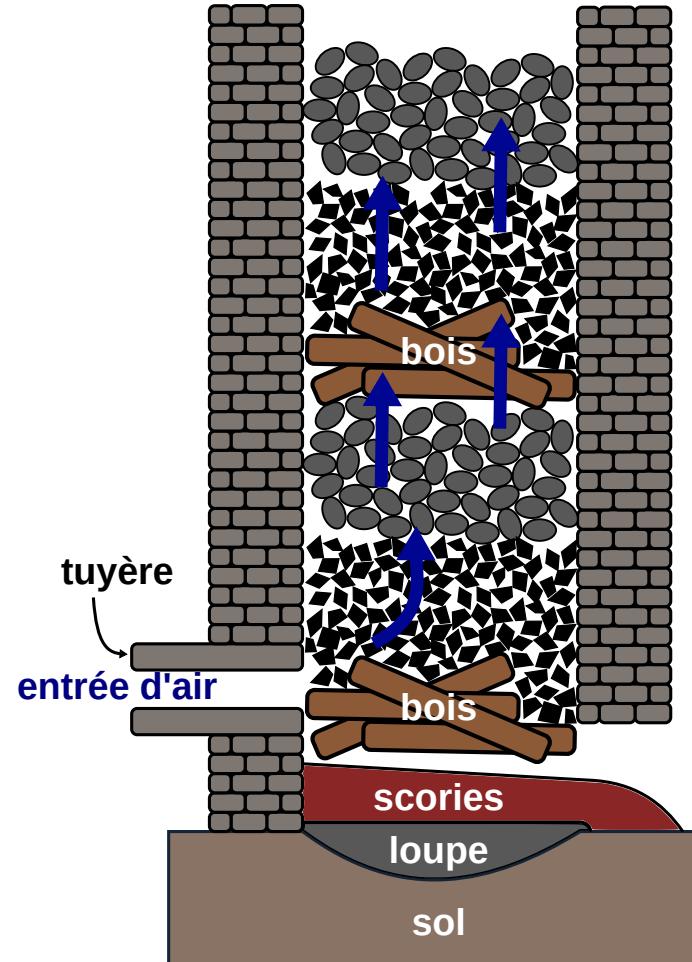
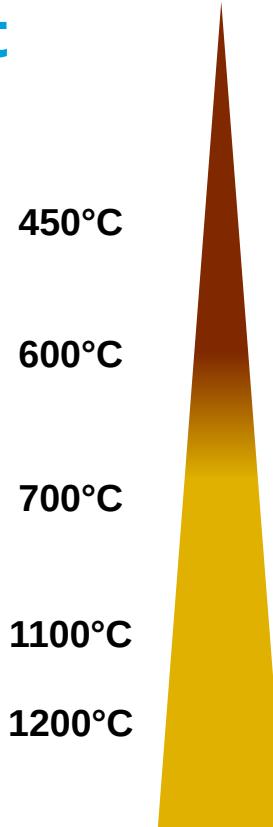




L'Âge des métaux et

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*



mineraux de fer

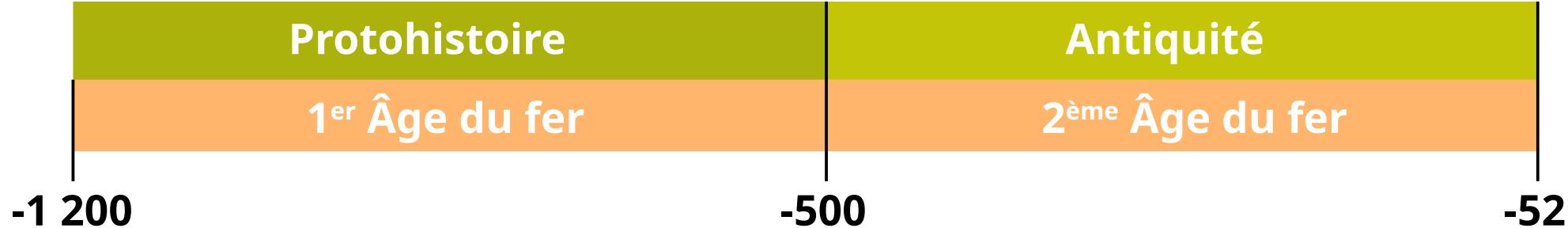
charbon de bois

mineraux de fer

charbon de bois



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



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)



Épées en fer
(Iran, - 1 000)



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



Protohistoire

1^{er} Âge du fer

-1 200

-500

Antiquité

2^{ème} Âge du fer

-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)



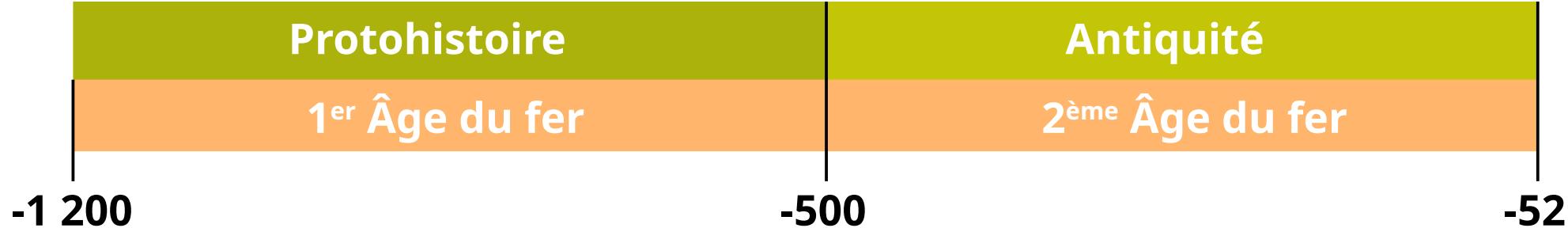
Coupe en verre (Assyrie, -700)



Céramique grecque (-700)



L'Âge des métaux et des premières grandes civilisations



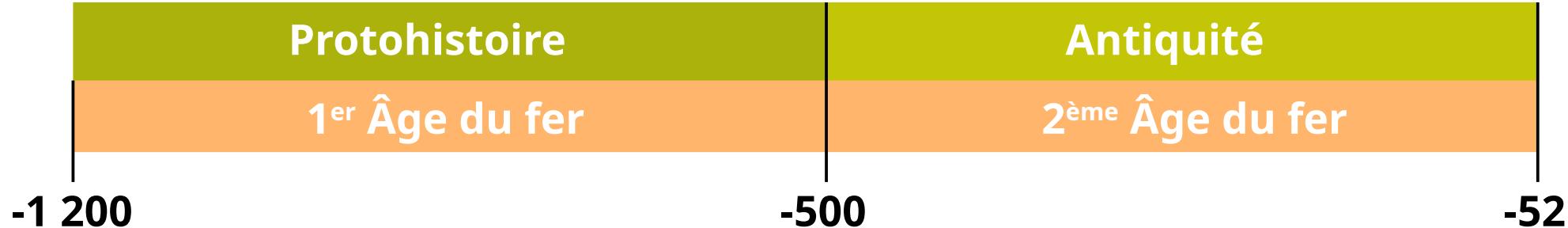
Seulement voilà... tout cela va mal finir...

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

1^{er} Âge du fer

Antiquité

2^{ème} Âge du fer

-1 200

-500

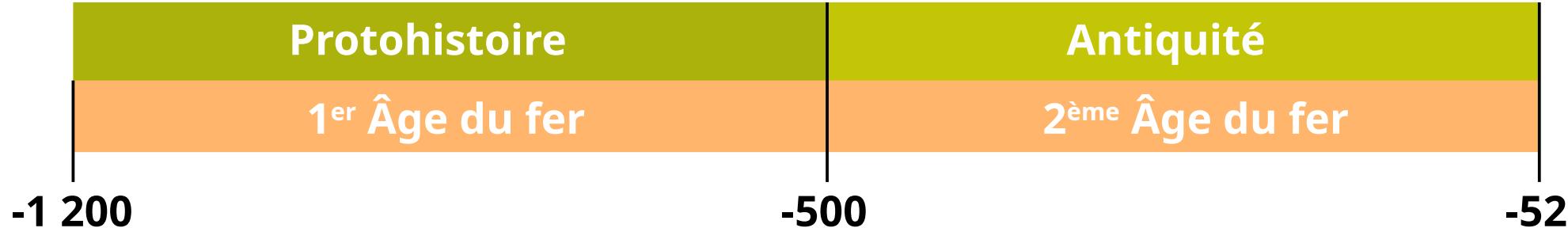
-52

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



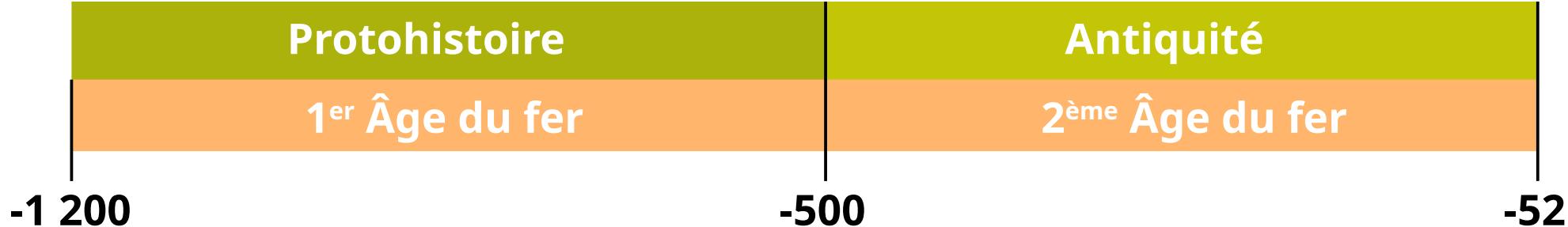
Une nouvelle ère commence...

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 Age.



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 Age.

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



Protohistoire

1^{er} Âge du fer

Antiquité

2^{ème} Âge du fer

-1 200

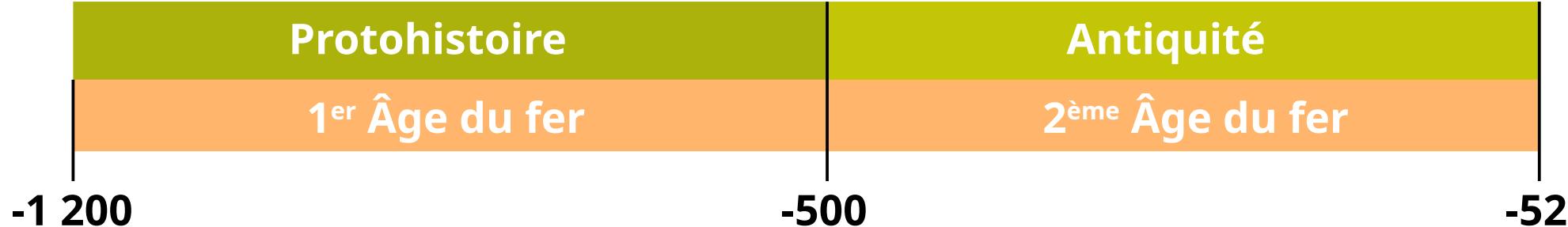
-500

-52

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)



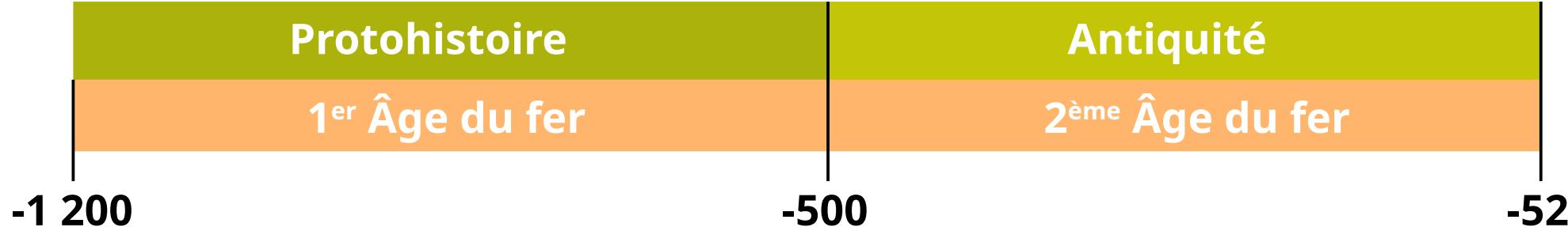
Impacts Environnemental et sanitaires ?

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



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 :

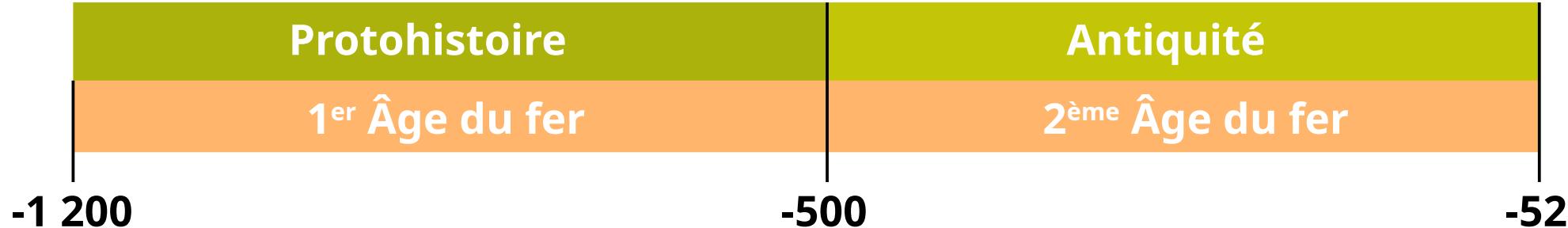
- les scories (déchets de fusion), riches en métaux lourds, contribuent à la pollution des sols
- CO₂ : la métallurgie de l'âge du fer marque le début des émissions de CO₂ par l'Homme
- naissance de la pollution atmosphérique

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

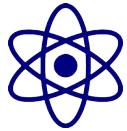
L'usage du fer va se poursuivre jusqu'à nos jours, contribuant au développement de l'Homme pendant l'antiquité et le moyen-âge.

Par ajout de carbone :

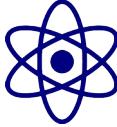
→ le fer va donner naissance à l'acier

Coût écologique du fer :

→ l'acier représente aujourd'hui 8 % des émissions mondiales de CO₂
→ il est l'équivalent du bronze d'hier

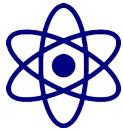


Notions essentielles pour comprendre les métaux

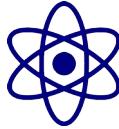


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la structure électronique :



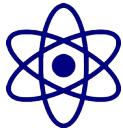
La liaison métallique



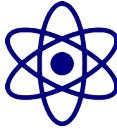
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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

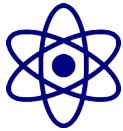


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

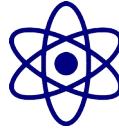
Rôle de la structure électronique :

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 :

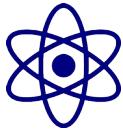
En 1900, Drude ignorait la notion de couches électroniques et surtout les règles de remplissage des sous-couches électroniques

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

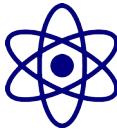
→ principe d'exclusion de Pauli (1925)

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

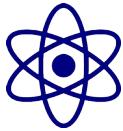
Ces règles sont nombreuses et composent ensemble la règle de l'Aufbau :

→ principe d'exclusion de Pauli (1925)

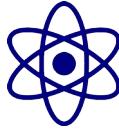
→ les 3 règles de Hund (1925)

Friedrich Hund
Physicien allemand
(1896-1997)





La liaison métallique



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

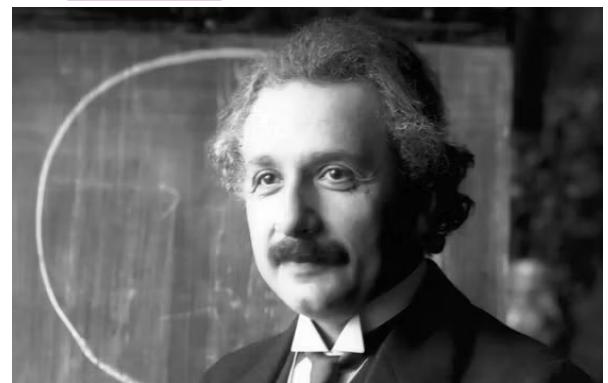
Rôle de la structure électronique :

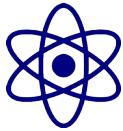
En 1900, Drude ignorait la notion de couches électroniques et surtout les règles de remplissage des sous-couches électroniques

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

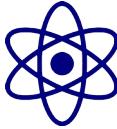
- principe d'exclusion de Pauli (1925)
- les 3 règles de Hund (1925)
- la contraction relativiste

Albert Einstein
Physicien allemand
(1879-1955)





La liaison métallique



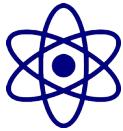
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la structure électronique :

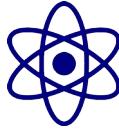
En 1900, Drude ignorait la notion de couches électroniques et surtout les règles de remplissage des sous-couches électroniques

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

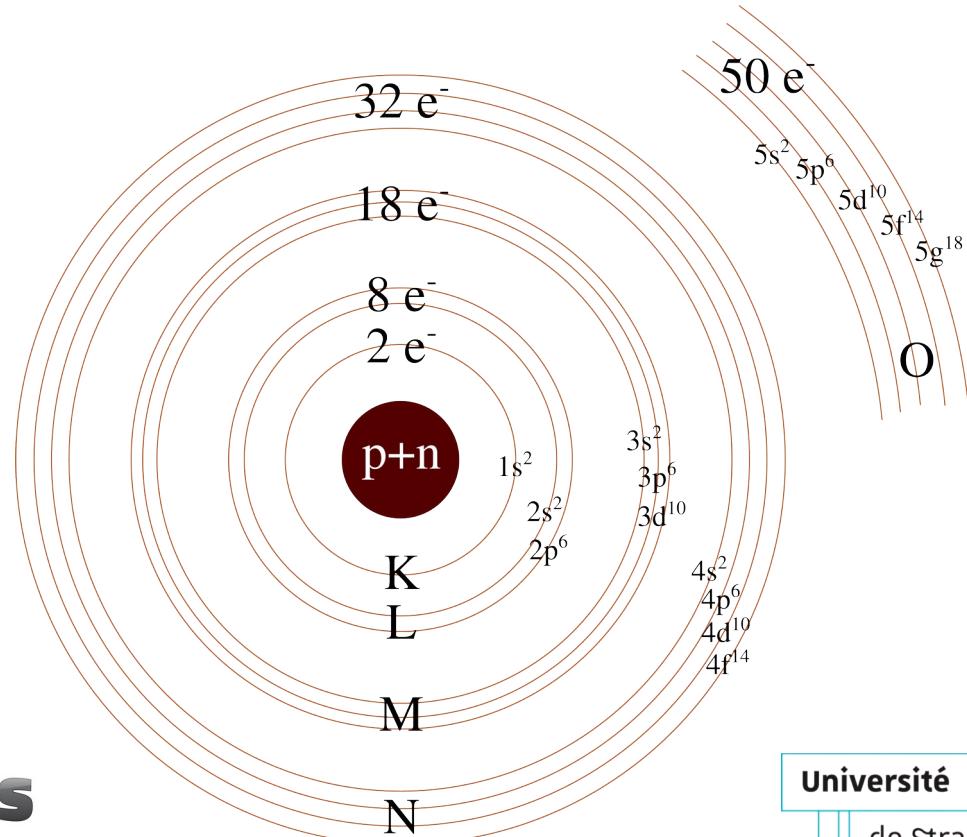
- principe d'exclusion de Pauli (1925)
- les 3 règles de Hund (1925)
- la contraction relativiste
- les règles de Klechkowski (1962)

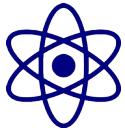


La liaison métallique



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

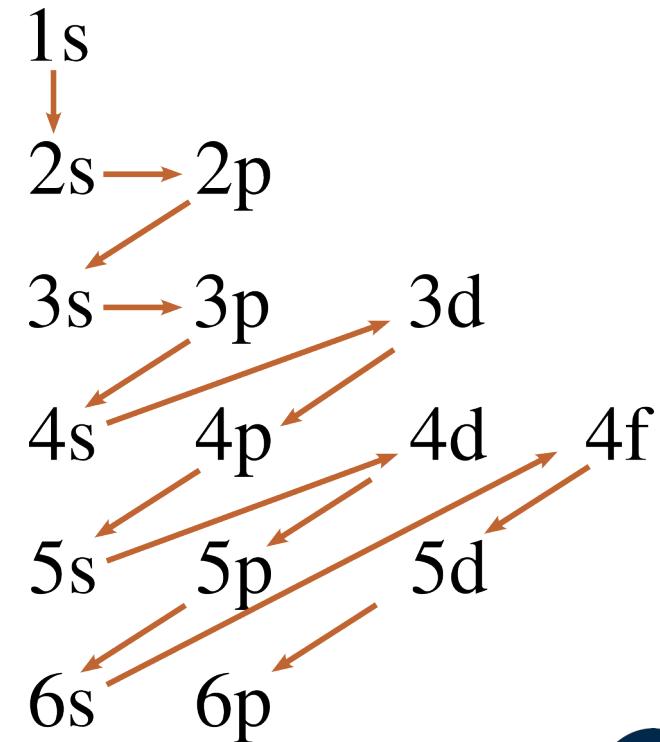
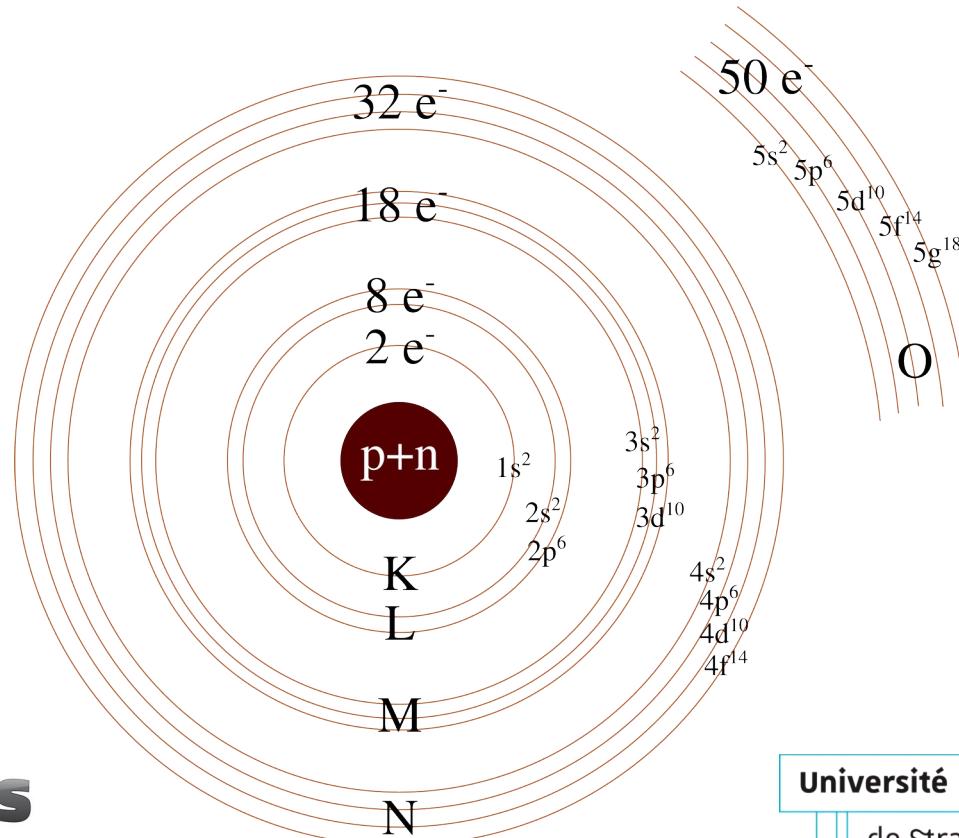


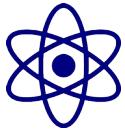


La liaison métallique

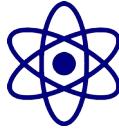


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?



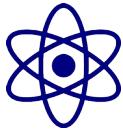


La liaison métallique

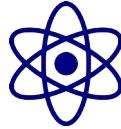


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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.



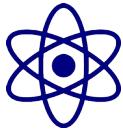
La liaison métallique



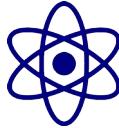
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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

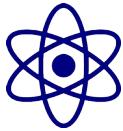


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

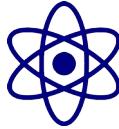
Pour les métaux, il y a notamment ces 2 règles :

→ 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 : [Ar] 3d⁵ 4s¹ (au lieu de 3d⁴ 4s²) car sous-couche d à demi-remplie plus stable
→ Cu : [Ar] 3d¹⁰ 4s¹ où la sous-couche d est totalement remplie
→ Gd : [Xe] 4f⁷ 5d¹ 6s² où la sous-couche f est remplie à moitié



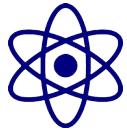
La liaison métallique



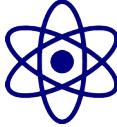
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

La preuve par l'expérience :

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

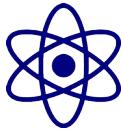


Notions essentielles pour comprendre les métaux

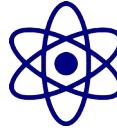


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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



Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pour
→ le

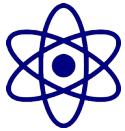
Période

	1	2	
	H 2,20	Be 1,57	
2	Li 0,98		
3	Na 0,93	Mg 1,31	
4	K 0,82	Ca 1,00	Sc 1,36
5	Rb 0,82	Sr 0,95	Y 1,22
6	Cs 0,79	Ba 0,89	La 1,1
7	Fr 0,7	Ra 0,9	Ac 1,1

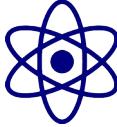
Groupe →

13	14	15	16	17	He									
B 2,04	C 2,55	N 3,04	O 3,44	F 3,98	Ne									
Al 1,61	Si 1,90	P 2,19	S 2,58	Cl 3,16	Ar									
Ga 1,81	Ge 2,01	As 2,18	Se 2,55	Br 2,96	Kr 3,00									
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
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
Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og

*	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



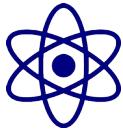
Notions essentielles pour comprendre les métaux



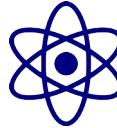
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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

→ un exemple avec Cu et Fe...



Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pour
→ le

Période

1	H 2,20	2	
2	Li 0,98	Be 1,57	
3	Na 0,93	Mg 1,31	
4	K 0,82	Ca 1,00	Sc 1,36
5	Rb 0,82	Sr 0,95	Y 1,22
6	Cs 0,79	Ba 0,89	La 1,1
7	Fr 0,7	Ra 0,9	Ac 1,1

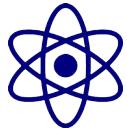
Groupe →

Cu : [Ar] 3d¹⁰ 4s¹

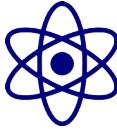
Fe : [Ar] 3d⁶ 4s²

Cu : [Ar] 3d ¹⁰ 4s ¹																	
Fe : [Ar] 3d ⁶ 4s ²																	
He																	
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
Ti 1,54	V 1,63	Cr 1,66	Mn 1,55	Fe 1,83	Co 1,88	Ni 1,91	Cu 1,90	Zn 1,65	Ga 1,81	Ge 2,01	As 2,18	Se 2,55	Br 2,96	Kr 3,00			
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			
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			
Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og			

*	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

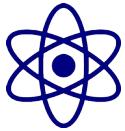


Notions essentielles pour comprendre les métaux

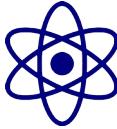


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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



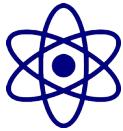
Notions essentielles pour comprendre les métaux



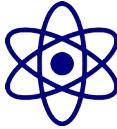
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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 : $4s^1 \rightarrow 4s^0$



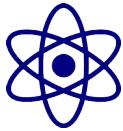
Notions essentielles pour comprendre les métaux



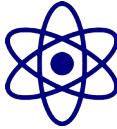
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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



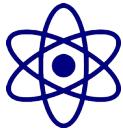
Notions essentielles pour comprendre les métaux



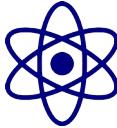
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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



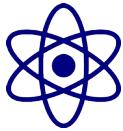
Notions essentielles pour comprendre les métaux



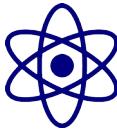
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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 : $4s1 \rightarrow 4s0$
- 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 ?

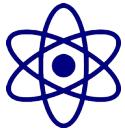
Cu et Fe : électronégativité proche (1,9 et 1,83) mais structure électronique différente :

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

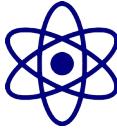
ex.

$[Ar] 3d^{10} 4s^0 \rightarrow Cu^+$ comme dans Cu_2O ou $CuCl$

$[Ar] 3d^9 4s^0 \rightarrow Cu^{2+}$ comme dans CuO ou $Cu(OH)_2$ ou $Cu(CO_3)$



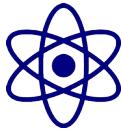
Notions essentielles pour comprendre les métaux



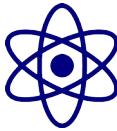
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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

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



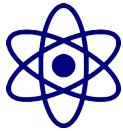
Notions essentielles pour comprendre les métaux



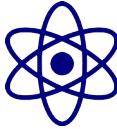
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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+}



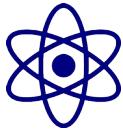
Notions essentielles pour comprendre les métaux



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 $3d^6$



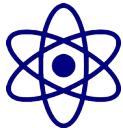
Notions essentielles pour comprendre les métaux



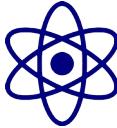
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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 : $4s2 \rightarrow 4s0 \rightarrow Fe^{2+}$
- 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



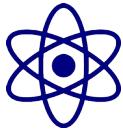
Notions essentielles pour comprendre les métaux



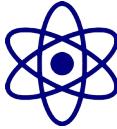
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Pour résumer :

- électronégativité de Cu → facilité à libérer l'électron 4s1 → 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)



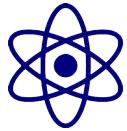
Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Pour résumer :

- électronégativité de Cu → facilité à libérer l'électron 4s1 → 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 4s² et faire 3d⁵
- mais réagit alors rapidement, notamment avec O : FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄

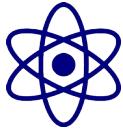


Notions essentielles pour comprendre les métaux

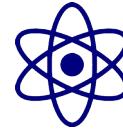


Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

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)

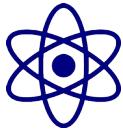
Tableau périodique des éléments chimiques

The table illustrates the periodic law, showing how properties of elements repeat every 7 periods. A pink arrow points from the element groups (Alcalins, Alcalino-terreux, Lanthanides, Actinides, Métaux de transition, Métaux pauvres, Métaalloïdes, Autres non-métaux, Halogènes, Gaz nobles, Non classés) to the corresponding groups in the periodic table. A legend at the bottom defines these groups.

Legend for groups:

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

Université
de Strasbourg



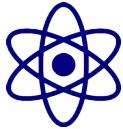
Notions essentielles pour comprendre les métaux



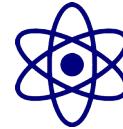
Pourquoi les métaux ont-ils des propriétés si différentes ?

Rôle de la masse atomique

- Lithium (0,53 g/cm³) : Léger, réseau CC, peu compact (2 atomes / maille) ;
- Or (19,3 g/cm³) : Lourd, atomes massifs, réseau CFC compact (4 atomes / maille) ;
- Cuivre (8,96 g/cm³) : 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

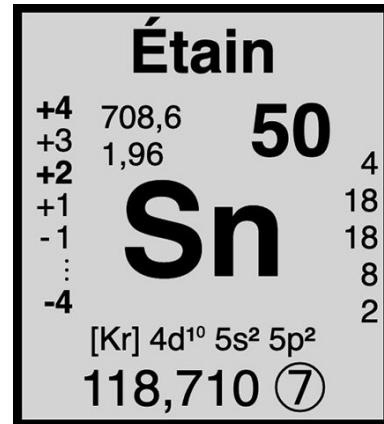
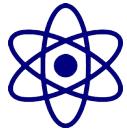


Tableau périodique des éléments chimiques

The periodic table is a grid of elements arranged by atomic number (1 to 118) and atomic weight. Elements are color-coded into groups: Alcalins (red), Alcalino-terreux (orange), Lanthanides (pink), Actinides (magenta), Métaux de transition (light blue), Métaux pauvres (light grey), Métaalloïdes (yellow-green), Autres non-métaux (light green), Halogènes (light blue), Gaz nobles (light green), Non classés (light grey), primordial (light grey), désintégration d'autres éléments (light grey), and synthétique (light grey). The table includes element names, atomic numbers, atomic weights, and some physical properties like melting and boiling points.

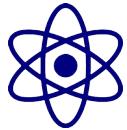


Notions essentielles pour comprendre les métaux



Quid de l'étain (Sn) ?

→ Sn ([Kr] 4d¹⁰ 5s² 5p²) a 4 électrons sur sa 5^{ème} couche



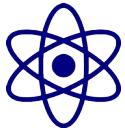
Notions essentielles pour comprendre les métaux



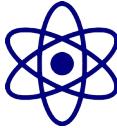
Quid de l'étain (Sn) ?

→ Sn ($[\text{Kr}] 4\text{d}^{10} 5\text{s}^2 5\text{p}^2$) 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)

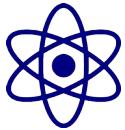


Notions essentielles pour comprendre les métaux

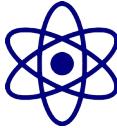


Quid de l'étain (Sn) ?

- Sn ($[\text{Kr}] 4\text{d}^{10} 5\text{s}^2 5\text{p}^2$) 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

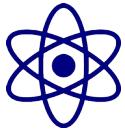


Notions essentielles pour comprendre les métaux



Quid de l'étain (Sn) ?

- Sn ($[\text{Kr}] 4\text{d}^{10} 5\text{s}^2 5\text{p}^2$) 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 ($[\text{Ar}] 3\text{d}^{10} 4\text{s}^1$), la dernière sous-couche de Sn est une p, pas une s

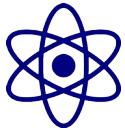


Notions essentielles pour comprendre les métaux

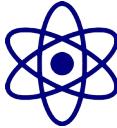


Quid de l'étain (Sn) ?

- Sn ($[\text{Kr}] 4\text{d}^{10} 5\text{s}^2 5\text{p}^2$) 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 ($[\text{Ar}] 3\text{d}^{10} 4\text{s}^1$), 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

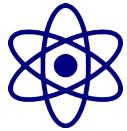


Notions essentielles pour comprendre les métaux

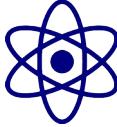


Quid de l'étain (Sn) ?

- Sn ($[\text{Kr}] 4\text{d}^{10} 5\text{s}^2 5\text{p}^2$) 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 ($[\text{Ar}] 3\text{d}^{10} 4\text{s}^1$), 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

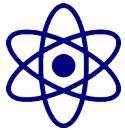


Notions essentielles pour comprendre les métaux

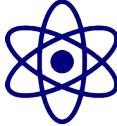


Quid de l'étain (Sn) ?

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

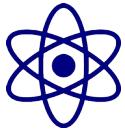


Notions essentielles pour comprendre les métaux

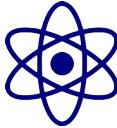


Quid de l'étain (Sn) ?

- 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)

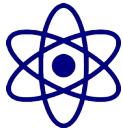


Notions essentielles pour comprendre les métaux



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)

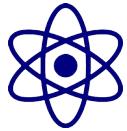


Notions essentielles pour comprendre les métaux



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)

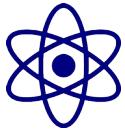


Notions essentielles pour comprendre les métaux

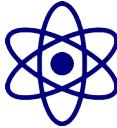


Quid de l'étain (Sn) ?

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

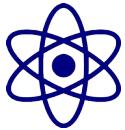


Notions essentielles pour comprendre les métaux



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

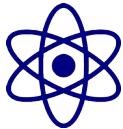


Notions essentielles pour comprendre les métaux

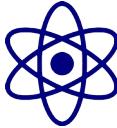


Quid de l'étain (Sn) ?

- 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 ;

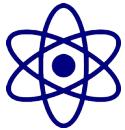


Notions essentielles pour comprendre les métaux



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 ;

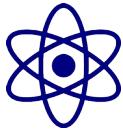


Notions essentielles pour comprendre les métaux

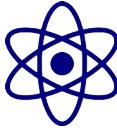


Quid de l'étain (Sn) ?

- 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...

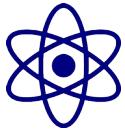
Hiver 1812. Napoléon Ier et ses armées sont chassés de Russie après leur tentative manquée d'obtenir la capitulation du tsar Alexandre Ier. Pour ajouter à la déculottée, les boutons en étain des uniformes des soldats se sont mis à tomber en poussière sous l'effet du terrible hiver russe...



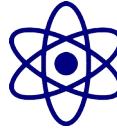
Étain blanc



Étain gris

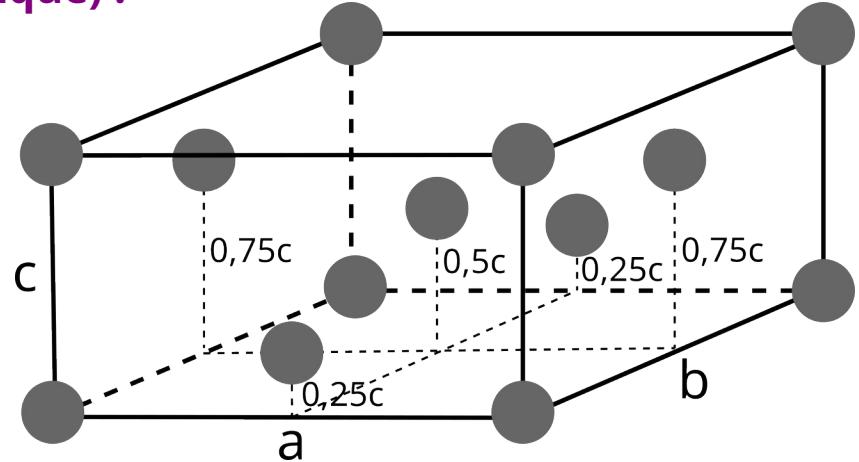


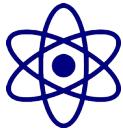
Notions essentielles pour comprendre les métaux



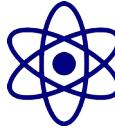
Propriétés mécaniques de l'étain

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





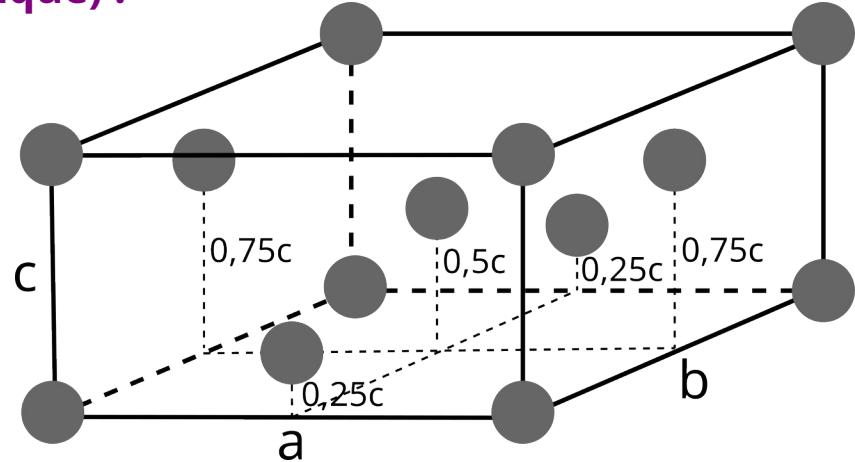
Notions essentielles pour comprendre les métaux



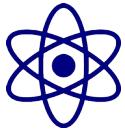
Propriétés mécaniques de l'étain

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

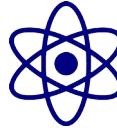
→ absence de liaisons covalentes fortes :
→ Sn est mou et facile à déformer



→ 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 ;



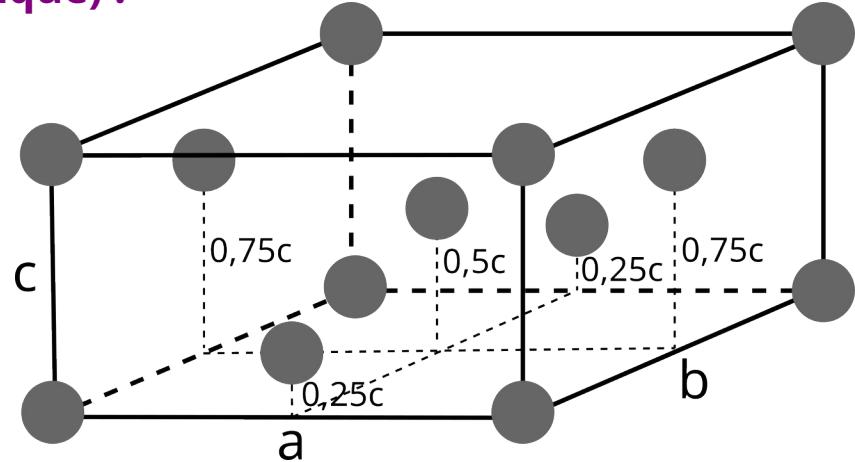
Notions essentielles pour comprendre les métaux



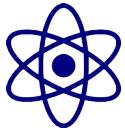
Propriétés mécaniques de l'étain

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

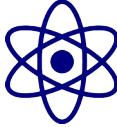
→ absence de liaisons covalentes fortes :
→ Sn est mou et facile à déformer



→ 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 mineraï 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 générait 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.



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 générait 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 , arséniates 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 générait 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 , arséniates 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 générait 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 , arséniates 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 !

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 !
- gisements de pépites très spécifiques, notamment en Bolivie, Cornouailles, Australie ;

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 minérais :
 - 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) ;

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...) ;

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'extract aussi par dragage de rivières (Indonésie) → dégradation de la biodiversité ;

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'extract 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%) ;

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'extract 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