

PHYSIQUE pour tous !

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

De l'atome aux écomatériaux

PHYSIQUE pour tous !

Chapitre 3 - 1^{ère} partie

L'âge des matériaux monumentaux



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Matériaux

Béton romain

Verre soufflé

Acier damassé

Plomb, mercure

Comment

Amélioration des techniques

De la chimie sans le savoir

**Des matériaux modernes
avant l'heure !**

Énergie

Bas-fourneau

Bois

**Des matières premières
venues de loin**



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

Béton romain

→ mélange de chaux, pouzzolane
(cendre volcanique) et d'eau

Panthéon
de Rome



476

Pont du Gard



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Béton romain

→ mélange de chaux, pouzzolane (cendre volcanique) et d'eau de mer

**→ réaction pouzzolanique
(ou pourquoi le béton romain dure 2000 ans!)**

Pouzzolane = cendres volcanique contenant de 60 à 85 % de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3)



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Béton romain

SiO_2

Al_2O_3

+

CaO

+

H_2O

mélange
séchage

→

BÉTON (romain)



Pouzzolane (cendres volcaniques)



Chaux



Eau de mer





L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Par comparaison avec le béton moderne

SiO_2

+

CaCO_3

+

H_2O

mélange
séchage

→

BÉTON (moderne)



Sable de silice



Carbonate de calcium



Eau douce



Béton moderne



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Béton romain : le secret d'un béton de 2000 ans d'âge !

La réaction pouzzolanique produit principalement :

1. du silicate de calcium hydraté (C-S-H)



→ donne au béton sa résistance mécanique et sa durabilité

2. de l'aluminate de calcium hydraté (C-A-H)



→ contribue à la cohésion du matériaux



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Béton romain : le secret d'un béton de 2000 ans d'âge !

→ les Romains utilisaient de l'eau de mer pour mélanger leur béton



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Béton romain : le secret d'un béton de 2000 ans d'âge !

→ les Romains utilisaient de l'eau de mer pour mélanger leur béton

→ cette eau contient des ions chlorures (Cl^-) et magnésium (Mg^{2+}) responsables, lors du séchage des silicates de calcium hydratés, de la naissance de phases cristallines supplémentaires



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Béton romain : le secret d'un béton de 2000 ans d'âge !

- les Romains utilisaient de l'eau de mer pour mélanger leur béton
- cette eau contient des ions chlorures (Cl^-) et magnésium (Mg^{2+}) responsables, lors du séchage des silicates de calcium hydratés, de la naissance de phases cristallines supplémentaires
- ces dernières renforcent la structure du béton sur le long terme



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Béton romain : le secret d'un béton de 2000 ans d'âge !

- les Romains utilisaient de l'eau de mer pour mélanger leur béton
- cette eau contient des ions chlorures (Cl^-) et magnésium (Mg^{2+}) responsables, lors du séchage des silicates de calcium hydratés, de la naissance de phases cristallines supplémentaires
- ces dernières renforcent la structure du béton sur le long terme
- des chercheurs du MIT ont montré (2023) que ces cristaux bloquent la propagation des microfissures



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Béton romain : le secret d'un béton de 2000 ans d'âge !

- les Romains utilisaient de l'eau de mer pour mélanger leur béton
- cette eau contient des ions chlorures (Cl^-) et magnésium (Mg^{2+}) responsables, lors du séchage des silicates de calcium hydratés, de la naissance de phases cristallines supplémentaires
- ces dernières renforcent la structure du béton sur le long terme
- des chercheurs du MIT ont montré (2023) que ces cristaux bloquent la propagation des microfissures
- en présence d'eau, les C-S-H peuvent recristalliser et combler les fissures → auto-cicatrication !



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Béton romain : le secret d'un béton de 2000 ans d'âge !

Critère	Béton Romain (pouzzolanique)	Béton moderne
Durabilité	+2000 ans	50-100 ans
Émissions de CO ₂	Faibles (CaO et pas 'CaCO ₃ ')	Élevées (1 t. ciment = 1 t. CO ₂)
Résistance à l'eau	Excellente (étanche)	Moyenne (nécessite des adjuvants)
Auto-réparation	Oui (grâce aux C-S-H)	Non
Coût énergétique	Faible (cuisson à 800-900°C)	Élevée (cuisson à 1450°C)



L'Âge des Matériaux Monumentaux

TODAY

Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Béton romain : une source d'inspiration !

- aujourd'hui, les chercheurs tentent de réinventer le béton des Romains
- pour cela il faut trouver des sources locales de pouzzolane (ex. cendres volantes, argiles calcinées)
- bien que le coût initial soit plus élevé que le ciment industriel actuel, il sera rentable à long terme



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Béton romain : impacts environnementaux et sanitaires

- faible empreinte carbone
- la pouzzolane est un déchet naturel
- il est recyclable : il peut être concassé et réutilisé comme granulat (au contraire du béton armé!)
- si une armature métallique était présente, l'eau de mer pouvait la corroder
- risques sanitaires : la poussière de chaux irritait les poumons des ouvriers



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Verre soufflé et verrerie romaine

→ Sans le savoir, l'Homme utilisait déjà le verre depuis longtemps (obsidienne, verre naturel)



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Verre soufflé et verrerie romaine

- Sans le savoir, l'Homme utilisait déjà le verre depuis longtemps (obsidienne, verre naturel)
- mais il n'a commencé à fabriquer du verre que vers -3 500 en mélangeant du sable et du natron :





-52

Verre

→ Sar

→ ma



476

l)

natron



Dépôt de natron dans un cratère au nord du Tchad, en Afrique



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Verre soufflé et verrerie romaine

- Sans le savoir, l'Homme utilisait déjà le verre depuis longtemps (obsidienne, verre naturel)
- mais il n'a commencé à fabriquer du verre que vers -3 500 en mélangeant du sable et du natron



- le natron est un fondant naturel qui permettait de fondre la silice dès 800°C



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Verre soufflé et verrerie romaine

- Sans le savoir, l'Homme utilisait déjà le verre depuis longtemps (obsidienne, verre naturel)
- mais il n'a commencé à fabriquer du verre que vers -3 500 en mélangeant du sable et du natron



- le natron est un fondant naturel qui permettait de fondre la silice dès 800°C
- ce verre opaque de couleur vert-bleue permettait de conserver les aliments et boissons sans les gâter



L'Âge des Matériaux Monumentaux



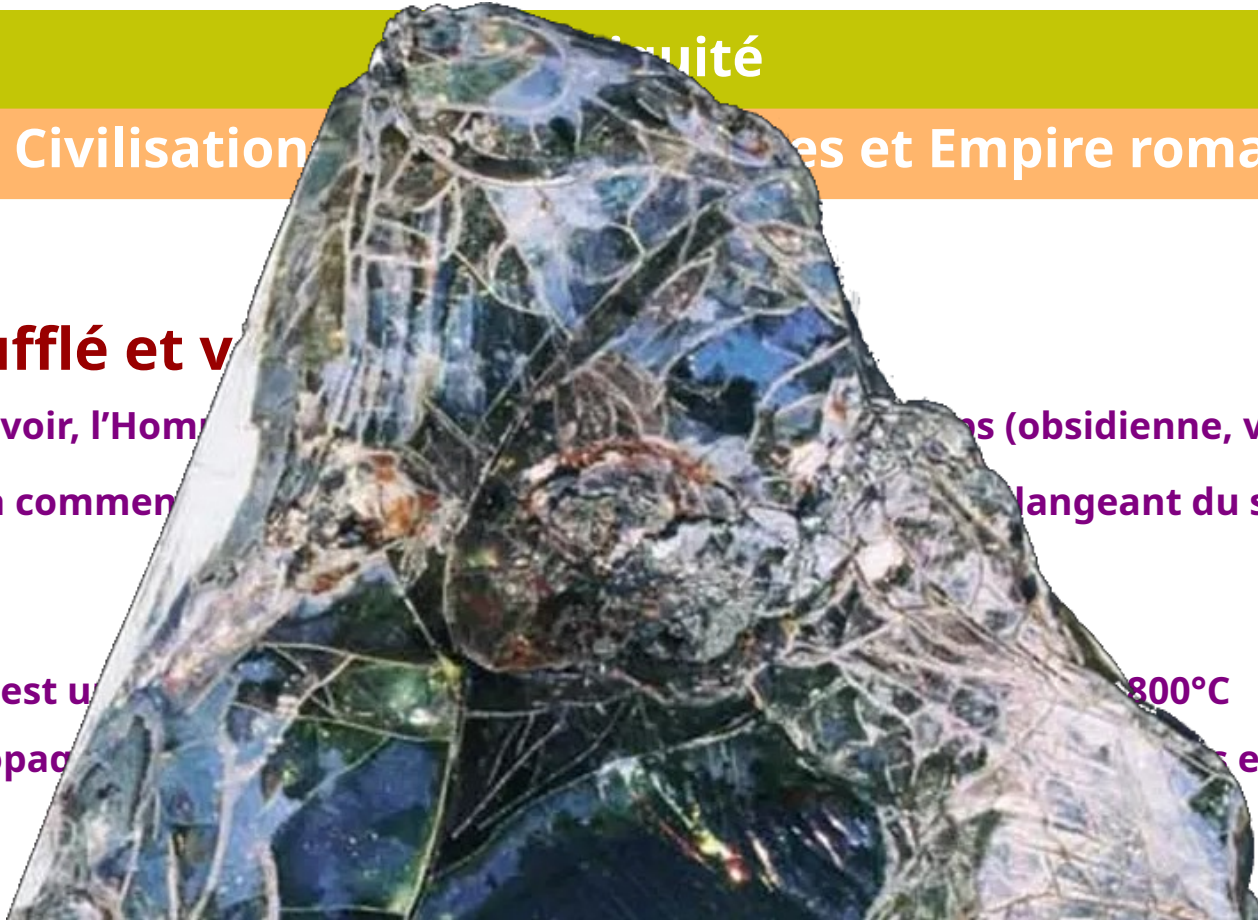
-52

476

Civilisation grecques et Empire romain

Verre soufflé et verre natron

- Sans le savoir, l'Homme utilise des verres (obsidienne, verre naturel)
- mais il n'a commencé à fabriquer du verre en mélangeant du sable et du natron qu'à partir du 3^e millénaire avant J.-C.
- le natron est un sel minéral obtenu par évaporation d'eau à 800°C
- ce verre opaque permettait de conserver les aliments et boissons sans les gâter



Bloc de verre au natron

de Strasbourg



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Verre soufflé et verrerie romaine

→ vers -1 500 on découvre le verre translucide



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

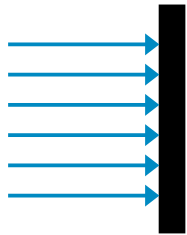
Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

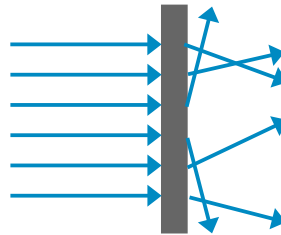
476

Verre soufflé et verrerie romaine

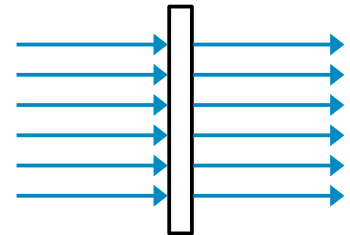
→ vers -1 500 on découvre le verre translucide ?



Opaque : la lumière
ne passe pas



Translucide : la lumière
est diffusée par le verre



Transparent : la lumière
passe directement



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Verre soufflé et verrerie romaine

→ vers -1 500 on découvre le verre translucide

→ le soufflage du verre est inventé vers -250 permettant de consommer moins de matière



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Verre soufflé et verrerie romaine

- vers -1 500 on découvre le verre translucide
- le soufflage du verre est inventé vers -250 permettant de consommer moins de matière
- cet art permet au verre de se démocratiser et se répandre dans toutes les strates de la société



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Verre soufflé et verrerie romaine

- vers -1 500 on découvre le verre translucide
- le soufflage du verre est inventé vers -250 permettant de consommer moins de matière
- cet art permet au verre de se démocratiser et se répandre dans toutes les strates de la société
- au premier siècle on découvre la possibilité de faire des vitres



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Verre soufflé et verrerie romaine

Verrerie romaine, 2ème S.



Aryballos,
Rome (0-100)



Modiolus,
Rome (0-100)



Fiole à
double
Anse,
Syrie, 4^e S.



de Strasbourg



Musée du forum
Palatin de Rome
(an 79)



Urne cinéraire
romaine en verre
soufflé (3^e S.)



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Les autres centres de production verriers

- Alexandrie, Égypte : centre verrier majeur de -300 à 400.
 - des fours et des scories ont été retrouvés dans le quartier de Kom el-Dikka
 - des verres colorés (bleu cobalt, rouge) sont exportés dans tout l'empire romain



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Les autres centres de production verriers

- Alexandrie, Égypte : centre verrier majeur de -300 à 400.
 - des fours et des scories ont été retrouvés dans le quartier de Kom el-Dikka
 - des verres colorés (bleu cobalt, rouge) sont exportés dans tout l'empire romain
- Cologne, Allemagne Romaine : centre verrier majeur de 100 à 400.
 - les sols y sont riches en plomb et antimoine qui étaient des colorants



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

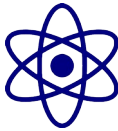
476

Les autres centres de production verriers

- Alexandrie, Égypte : centre verrier majeur de -300 à 400.
 - des fours et des scories ont été retrouvés dans le quartier de Kom el-Dikka
 - des verres colorés (bleu cobalt, rouge) sont exportés dans tout l'empire romain
- Cologne, Allemagne Romaine : centre verrier majeur de 100 à 400.
 - les sols y sont riches en plomb et antimoine qui étaient des colorants
- Venise, Italie : le plus grand centre verrier européen à partir de l'an 900 (îles de Murano).
 - détient un secret industriel, celui du « cristallo », un verre transparent et pur
 - impact : déforestation des îles de la lagune et importation de bois des Alpes



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

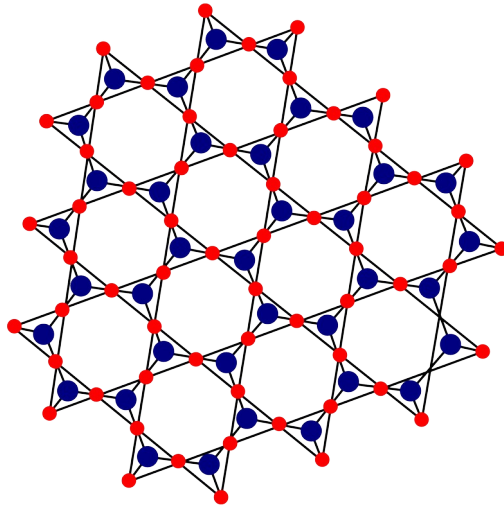
Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

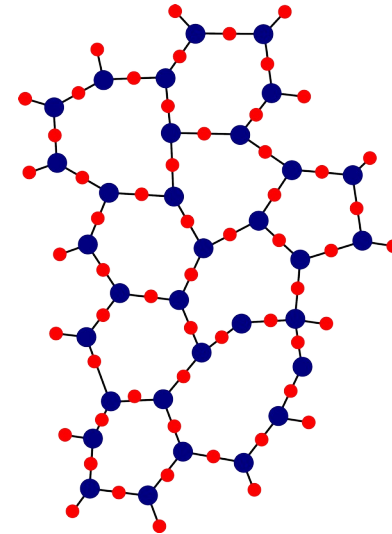
476

Rappel, le verre est un solide amorphe

cristal



amorphe





L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

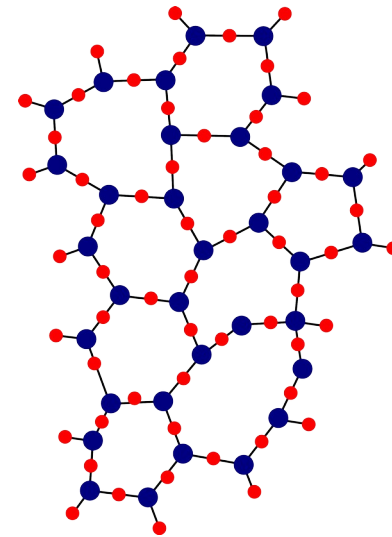
Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Rappel, le verre est un solide amorphe

- il est donc recyclable à l'infini par fusion
- mais les romains ne le faisaient pas systématiquement



amorphe



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Impacts environnementaux

→ bien que n'étant pas industrialisée, comme aujourd'hui, la production de verre à l'antiquité a eu des impacts locaux



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Impacts environnementaux

→ bien que n'étant pas industrialisée, comme aujourd'hui, la production de verre à l'antiquité a eu des impacts locaux

→ procédé de fabrication :

- sable de silice SiO_2 (70%) : sous forme de sable du Nil ou de Syrie, car silice très pure
- fondant : Natron, carbonate de sodium Na_2CO_3 (20%) naturel, extrait d'Égypte
- stabilisant : chaux CaO (10%) pour éviter que le verre ne se dissolve dans l'eau
- température de fusion : 800-900°C dans four en argile ou en pierre
- carburant : bois



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Impacts environnementaux

- le Natron égyptien était extrait des lacs salés (ex. Wadi Natrum)
- sa surexploitation dès le 1^{er} siècle a provoqué une pénurie et obligé à trouver un substituant (cendres de plantes, moins efficace)



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Impacts environnementaux

- le Natron égyptien était extrait des lacs salés (ex. Wadi Natrum)
 - sa surexploitation dès le 1^{er} siècle a provoqué une pénurie et obligé à trouver un substituant (cendres de plantes, moins efficace)
- sable : prélèvement massif de sable fluvial ou côtier (ex. delta du Nil)
 - érosion côtière et perturbation des habitats (ex. disparition de zones de pontes pour les tortues)



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Impacts environnementaux

- le Natron égyptien était extrait des lacs salés (ex. Wadi Natrum)
 - sa surexploitation dès le 1^{er} siècle a provoqué une pénurie et obligé à trouver un substituant (cendres de plantes, moins efficace)
- sable : prélèvement massif de sable fluvial ou côtier (ex. delta du Nil)
 - érosion côtière et perturbation des habitats (ex. disparition de zones de pontes pour les tortues)
- les Romains importaient du sable de Syrie pour sa pureté, épuisant les gisements locaux en quelques décennies



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Impacts environnementaux

→ Déforestation :

→ un four à verre consommait 10-20 stères de bois par jour pour atteindre 1000°C.



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Impacts environnementaux

→ Déforestation :

→ un four à verre consommait 10-20 stères de bois par jour pour atteindre 1000°C.

→ Les forêts autour d'Alexandrie et de Sidon (un centre verrier au Liban) ont été déboisées.

→ désertification locale et perte de biodiversité.



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Impacts environnementaux

→ Déforestation :

→ un four à verre consommait 10-20 stères de bois par jour pour atteindre 1000°C.

→ Les forêts autour d'Alexandrie et de Sidon (un centre verrier au Liban) ont été déboisées.

→ désertification locale et perte de biodiversité.

→ Comparaison moderne

→ Aujourd'hui, la production de verre consomme encore beaucoup d'énergie (1500°C), mais on utilise du gaz naturel. À l'époque, c'était le bois – une ressource renouvelable, mais surexploitée.



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Impacts environnementaux

→ Pollution atmosphérique :

→ La combustion du bois et la décomposition du Natron libéraient du CO_2 et du SO_2 .



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Impacts environnementaux

→ Pollution atmosphérique :

→ La combustion du bois et la décomposition du Natron libéraient du CO_2 et du SO_2 .

→ Impact local :

→ des brouillards acides se formaient autour des ateliers, un peu comme les smogs industriels modernes, mais à plus petite échelle.



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Impacts environnementaux

→ Pollution atmosphérique :

→ La combustion du bois et la décomposition du Natron libéraient du CO_2 et du SO_2 .

→ Impact local :

→ des brouillards acides se formaient autour des ateliers, un peu comme les smogs industriels modernes, mais à plus petite échelle.

→ pour preuve :

→ des couches de suie ont été détectées dans les ruines d'ateliers verriers à Pompei.



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Impacts environnementaux

→ Pollution des sols et de l'eau :

→ les scories de verre (déchets de fusion) et les résidus de Natron étaient souvent déversés près des ateliers.

→ cela rendait le sol alcalin (pH élevé) et impropre à l'agriculture.



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Impacts environnementaux

→ Pollution des sols et de l'eau :

→ les scories de verre (déchets de fusion) et les résidus de Natron étaient souvent déversés près des ateliers.

→ cela rendait le sol alcalin (pH élevé) et impropre à l'agriculture.

→ pour preuve :

→ des sites verriers près de Cologne, en Allemagne romaine, montrent des sols contaminés par des métaux lourds comme plomb, utilisé pour colorer le verre.



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Impacts sanitaires

→ Exposition aux poussières de silice :

→ silicose :

→ les artisans inhalaient des particules de silice lors du broyage du sable ou du soufflage.

→ symptômes :

→ toux chronique, fibrose pulmonaire (comme les mineurs modernes).



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Impacts sanitaires

→ Exposition aux poussières de silice :

→ silicose :

→ les artisans inhalaient des particules de silice lors du broyage du sable ou du soufflage.

→ symptômes :

→ toux chronique, fibrose pulmonaire (comme les mineurs modernes).

→ pour preuve :

→ des squelettes d'artisans verriers à Alexandrie montrent des lésions pulmonaires.



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Impacts sanitaires

→ Intoxication par les Métaux Lourds

→ plomb et arsenic :

→ ce sont des colorants pour le verre (jaune = plomb + antimoine ; rouge = cuivre + or).

→ risques :

→ Saturnisme (intoxication au plomb) → troubles neurologiques.

→ Cancer (arsenic) → espérance de vie réduite pour les verriers.



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Impacts sanitaires

→ Intoxication par les Métaux Lourds

→ plomb et arsenic :

→ ce sont des colorants pour le verre (jaune = plomb + antimoine ; rouge = cuivre + or).

→ risques :

→ Saturnisme (intoxication au plomb) → troubles neurologiques.

→ Cancer (arsenic) → espérance de vie réduite pour les verriers.

→ pour preuve :

→ des analyses de cheveux de momies égyptiennes (artisans) montrent des taux élevés de plomb.

→ un verrier romain avait une espérance de vie de 30-40 ans, contre 45-50 ans pour un paysan.



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

Comparaison avec la production moderne de verre

476

Critère	Antiquité	De nos jours
Température	800-1000°C (bois)	1500°C (gaz nat., électricité)
Émissions de CO ₂	Locales (déforestation)	Globales (1t. verre = 0,5t. CO ₂)
Ressources	Natron (épuisé), sable local	Calcin (verre recyclé), sable marin
Recyclage	Rare (déchets abandonnés)	70-90 % du verre est recyclable
Impacts sanitaires	Silicose, saturnisme	Silicose, cancers (arsenic dans certains verres spéciaux)



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

L'antiquité a vu l'émergence et la propagation de nombreux matériaux dont la période suivante, le moyen-âge, va grandement bénéficier !

PHYSIQUE pour tous !

Chapitre 3 - 2^{ème} partie

L'héritage toxique...



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Matériaux

Béton romain

Verre soufflé

Acier damassé

Plomb, mercure

Comment

Amélioration des techniques

De la chimie sans le savoir

**Des matériaux modernes
avant l'heure !**

Énergie

Bas-fourneau

Bois

**Des matières premières
venues de loin**



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Mercure et plomb, les 2 autres métaux lourds de l'Antiquité : Hg



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Mercure, ou vif-argent, ou argent liquide

→ à l'Antiquité, le mercure (Hg) était principalement produit à partir du cinabre, le sulfure de mercure (HgS) qui était alors le minéral le plus courant





L'Âge des Matériaux Monumentaux



Antiquité

Civilisations méditerranéennes et Empire romain

-52

476

Mercure, ou vif-argent, ou argent liquide

→ à l'Antiquité, le mercure (Hg) était principalement produit à partir du cinabre, le sulfure de mercure (HgS) qui était alors le minéral le plus courant

→ le cinabre était extrait dans plusieurs régions clés de l'Antiquité, notamment en Espagne :

- Almadén (Castille-La Manche) : plus grand gisement de cinabre antique !

 - exploité dès -500 par les Carthaginois, puis les Romains.

 - les mines étaient si riches qu'elles ont été exploitées jusqu'au XX^e S. !!

- Sisapo (actuelle Almodovar del Campo) : autre site majeur en Espagne romaine



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Mercure, ou vif-argent, ou argent liquide

→ Italie :

- Monte Amiata (Toscane) : exploité par les Étrusques et les Romains
- Pouzzoles (près de Naples) : cinabre utilisé pour les pigments vermillons

→ Turquie :

- Smyrne (actuelle Izmir) : mines exploitées pour le mercure et le vermillon

→ Chine :

- Province du Hunan : mine exploitée dès la dynastie Han (-206 à 220) pour le cinabre, utilisé en médecine traditionnelle



L'Âge des Matériaux Monumentaux



mercure, ou vif-argent, ou argent liquide

Méthodes d'extraction :

→ creusement de galeries :

→ mines souvent souterraines avec galeries étroites creusées à la main (outils en bronze ou en fer)

ex. à Almadén, les esclaves et les prisonniers creusaient des puits jusqu'à 50 à 100 m de profondeur !



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Mercure, ou vif-argent, ou argent liquide

Méthodes d'extraction :

→ creusement de galeries :

→ mines souvent souterraines avec galeries étroites creusées à la main (outils en bronze ou en fer)

ex. à Almadén, les esclaves et les prisonniers creusaient des puits jusqu'à 50 à 100 m de profondeur !

→ le minerai de cinabre était ensuite broyé manuellement dans des mortiers en pierre pour le réduire en poudre

→ la poudre était ensuite lavée pour éliminer les impuretés (argile, quartz)



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Mercure, ou vif-argent, ou argent liquide

Production du mercure à partir du cinabre :

→ procédé de grillage (calcination sous air) :





L'Âge des Matériaux Monumentaux



Mercure, ou vif-argent, ou argent liquide

Production du mercure à partir du cinabre :

→ procédé de grillage (calcination sous air) :



→ le four était chauffé avec du bois ou du charbon de bois

→ le mercure gazeux se condensait sur les parois froides du four ou des condenseurs en terre cuite, où il était récupéré sous forme liquide

→ le dioxyde de soufre (SO₂) était libéré dans l'atmosphère (pollution locale)

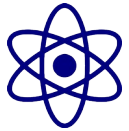


L'Âge des Matériaux Monumentaux

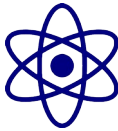


Mercure, ou vif-argent, ou argent liquide

→ Pline l'Ancien, 23-79, relate dès l'Antiquité romaine l'utilisation du mercure pour extraire l'or et l'argent par amalgamation :



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Mercure, ou vif-argent, ou argent liquide

L'Amalgamation : or

- le mercure entre en contact avec les particules d'or présentes dans les sédiments ou dans le minerai broyé ;
- il se forme un "amalgame", mélange d'environ 50% de mercure et 50% d'or ;
- pour récupérer l'or, il faut ensuite chauffer l'amalgame à 350°C pour que le mercure s'évapore.





L'Âge des Matériaux Monumentaux



Mercure, ou vif-argent, ou argent liquide

Autres utilisations du mercure à l'Antiquité :

→ le cinabre broyé comme pigment :

→ peintures murales ou pour l'écriture (ex. fresques de Pompéi)





L'Âge des Matériaux Monumentaux



Mercure, ou vif-argent, ou argent liquide

Autres utilisations du mercure à l'Antiquité :

- le cinabre broyé comme pigment :
 - peintures murales ou pour l'écriture (ex. fresques de Pompéi)
- médicaments, cosmétique :
 - le mercure servait d'antiseptique ou de purgatif ! (*Dioscoride*, 1^{er} siècle)
 - maquillage



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Mercure, ou vif-argent, ou argent liquide

Autres utilisations du mercure à l'Antiquité :

- le cinabre broyé comme pigment :
 - peintures murales ou pour l'écriture (ex. fresques de Pompéi)
- médicaments, cosmétique :
 - le mercure servait d'antiseptique ou de purgatif ! (*Dioscoride*, 1^{er} siècle)
 - maquillage
- rituels funéraires :
 - le mercure liquide était placé dans les tombes pour sa symbolique et pour une meilleure conservation du corps (ex. *tombes étrusques* en Italie)



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Mercure, ou vif-argent, ou argent liquide

Autres utilisations du mercure à l'Antiquité :

- instruments :
 - thermomètres primitifs
- miroirs (alliage mercure-étain)
(ex. miroirs romains, I^{er}-IV^e S.)





L'Âge des Matériaux Monumentaux



Impacts environnementaux du Hg

Pollution locale :

- émissions de SO_2 à cause du grillage du cinabre, responsable de :
 - pluies acides locales (dégradation des sols)
 - problèmes respiratoires chez les mineurs et les riverains



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Impacts environnementaux du Hg

Pollution locale :

- émissions de SO_2 à cause du grillage du cinabre, responsable de :
 - pluies acides locales (dégradation des sols)
 - problèmes respiratoires chez les mineurs et les riverains

Rejets de mercure :

- vapeurs de Hg : une partie du mercure s'échappait dans l'atmosphère lors du grillage
 - scories : les résidus de fusion, riches en Hg, Pb et As, étaient abandonnés près des mines :
 - contamination des sols et des nappes phréatiques
- ex. les sols autour de Almacén contiennent encore des concentrations élevées de Hg (jusqu'à 1000 ppm, contre 0,1 ppm en zone non polluée !)



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Impacts sanitaires du Hg

Saturnisme et intoxications :

→ symptômes :

- tremblements : maladie des chapeliers romains qui utilisaient Hg pour le feutre
- troubles rénaux et neurologiques (encéphalopathie)
- dermatites (contact avec le mercure liquide)



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Impacts sanitaires du Hg

Saturnisme et intoxications :

→ symptômes :

- tremblements : maladie des chapeliers romains qui utilisaient Hg pour le feutre
- troubles rénaux et neurologiques (encéphalopathie)
- dermatites (contact avec le mercure liquide)

Populations exposées :

- mineurs : inhalation de vapeurs de Hg et SO₂
- artisans : peintres (vermillon), orfèvres (amalgamation)
- esclaves : condamnés aux mines, ils avaient une espérance de vie de 2 à 3 ans !!



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Dimension sociétale et économique de l'utilisation de Hg

Commerce et pouvoir :

→ réseaux commerciaux :

- le mercure était échangé dans tout l'Empire romain, grâce à des routes reliant :
 - Almacén à Rome pour les pigments et la médecine,
 - Smyrne à Alexandrie pour les cosmétiques.



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Dimension sociétale et économique de l'utilisation de Hg

Commerce et pouvoir :

→ réseaux commerciaux :

- le mercure était échangé dans tout l'Empire romain, grâce à des routes reliant :
 - Almacén à Rome pour les pigments et la médecine,
 - Smyrne à Alexandrie pour les cosmétiques.

Monnaie d'échange :

- le mercure liquide était parfois utilisé comme moyen de paiement (rare)



L'héritage toxique...

TODAY

Et le mercure aujourd'hui ?

→ l'utilisation du mercure a duré jusqu'à aujourd'hui



L'héritage toxique...

TODAY

Et le mercure aujourd'hui ?

→ l'utilisation du mercure a duré jusqu'à aujourd'hui

→ l'extraction d'or des mines d'Amérique Latine du XVI^e au XIX^e siècle ont rejeté des milliers de tonnes de mercure dans l'environnement



L'héritage toxique...

TODAY

Et le mercure aujourd'hui ?

- l'utilisation du mercure a duré jusqu'à aujourd'hui
- l'extraction d'or des mines d'Amérique Latine du XVI^e au XIX^e siècle ont rejeté des milliers de tonnes de mercure dans l'environnement
- empoisonnement des mineurs (tremblements, troubles neurologiques...)



L'héritage toxique...

TODAY

Et le mercure aujourd'hui ?

- l'utilisation du mercure a duré jusqu'à aujourd'hui
- l'extraction d'or des mines d'Amérique Latine du XVI^e au XIX^e siècle ont rejeté des milliers de tonnes de mercure dans l'environnement
- empoisonnement des mineurs (tremblements, troubles neurologiques...)
- contamination des sols et des cours d'eau



L'héritage toxique...

TODAY

Et le mercure aujourd'hui ?

→ son utilisation historique (thermomètres, piles...) a laissé une pollution durable ;



L'héritage toxique...

TODAY

Et le mercure aujourd'hui ?

- son utilisation historique (thermomètres, piles...) a laissé une pollution durable ;
- toxique et bioaccumulable, Hg est aujourd'hui interdit dans la plupart des applications ;



L'héritage toxique...

TODAY

Et le mercure aujourd'hui ?

- son utilisation historique (thermomètres, piles...) a laissé une pollution durable ;
- toxique et bioaccumulable, Hg est aujourd'hui interdit dans la plupart des applications ;
- la convention de Minamata (2017) bannit le mercure dans l'extraction minière et les produits grand public ;



L'héritage toxique...



Et le mercure aujourd'hui ?

- son utilisation historique (thermomètres, piles...) a laissé une pollution durable ;
- toxique et bioaccumulable, Hg est aujourd'hui interdit dans la plupart des applications ;
- la convention de Minamata (2017) bannit le mercure dans l'extraction minière et les produits grand public ;
- Hg s'accumule dans les chaînes alimentaires (poissons, mammifères marins) ;



L'héritage toxique...

TODAY

Et le mercure aujourd'hui ?

- son utilisation historique (thermomètres, piles...) a laissé une pollution durable ;
- toxique et bioaccumulable, Hg est aujourd'hui interdit dans la plupart des applications ;
- la convention de Minamata (2017) bannit le mercure dans l'extraction minière et les produits grand public ;
- Hg s'accumule dans les chaînes alimentaires (poissons, mammifères marins) ;
- la baie de Minamata, au Japon, est le site contaminé qui a donné son nom à la convention ;



L'héritage toxique...

TODAY

Et le mercure aujourd'hui ?

→ cas de l'orpaillage illégal en Amazonie :



L'héritage toxique...

TODAY

Et le mercure aujourd'hui ?

→ cas de l'orpaillage illégal en Amazonie :

→ des mineurs illégaux utilisent Hg pour amalgamer Au des sédiments des rivières



L'héritage toxique...

TODAY

Et le mercure aujourd'hui ?

→ cas de l'orpaillage illégal en Amazonie :

→ des mineurs illégaux utilisent Hg pour amalgamer Au des sédiments des rivières

→ puis ils chauffent pour évaporer le Hg et récupérer l'or pur



L'héritage toxique...

TODAY

Et le mercure aujourd'hui ?

→ cas de l'orpaillage illégal en Amazonie :

→ des mineurs illégaux utilisent Hg pour amalgamer Au des sédiments des rivières

→ puis ils chauffent pour évaporer le Hg et récupérer l'or pur

→ 90 % du Hg utilisé est rejeté dans l'environnement (air, sols, eaux)



L'héritage toxique...

TODAY

Et le mercure aujourd'hui ?

→ cas de l'orpaillage illégal en Amazonie :

- des mineurs illégaux utilisent Hg pour amalgamer Au des sédiments des rivières
- puis ils chauffent pour évaporer le Hg et récupérer l'or pur
- 90 % du Hg utilisé est rejeté dans l'environnement (air, sols, eaux)
- 100 à 200 tonnes de Hg sont ainsi rejetés annuellement en Amazonie (source : PNUE 2019)



L'héritage toxique...

TODAY

Et le mercure aujourd'hui ?

→ cas de l'orpaillage illégal en Amazonie :

- des mineurs illégaux utilisent Hg pour amalgamer Au des sédiments des rivières
- puis ils chauffent pour évaporer le Hg et récupérer l'or pur
- 90 % du Hg utilisé est rejeté dans l'environnement (air, sols, eaux)
- 100 à 200 tonnes de Hg sont ainsi rejetés annuellement en Amazonie (source : PNUE 2019)
- 1600 sites d'orpaillages illégaux ont été recensés au Brésil en 2019 (source : INPE 2023)



L'héritage toxique...



Alternatives au mercure ?

- extraction sans mercure :
 - utilisation de cyanure (controversé)
 - ou de méthodes gravimétriques

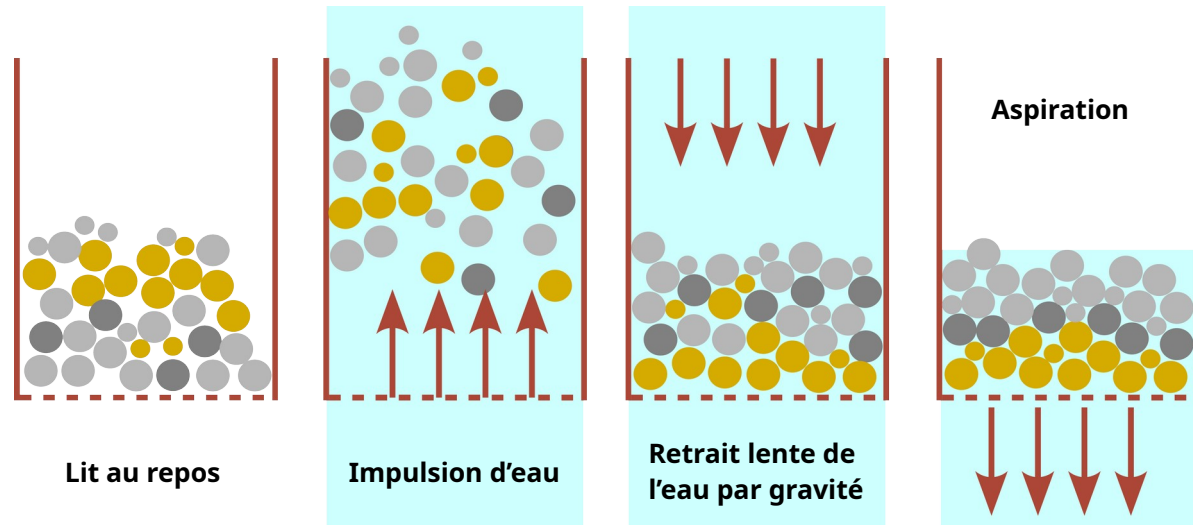


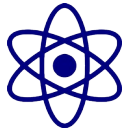
L'héritage toxique...

TODAY

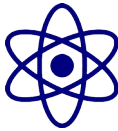
Alternatives au mercure ?

- extraction sans mercure :
 - utilisation de cyanure (controversé)
 - ou de méthodes gravimétriques



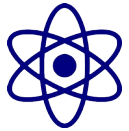


Notions essentielles pour comprendre les métaux

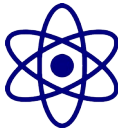


Pourquoi le mercure est-il si différent des autres métaux ?

→ le mercure : le métal le plus atypique !



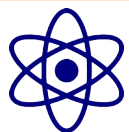
Notions essentielles pour comprendre les métaux



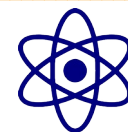
Pourquoi le mercure est-il si différent des autres métaux ?

→ le mercure : le métal le plus atypique !

→ la configuration électronique de Hg est $[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2$

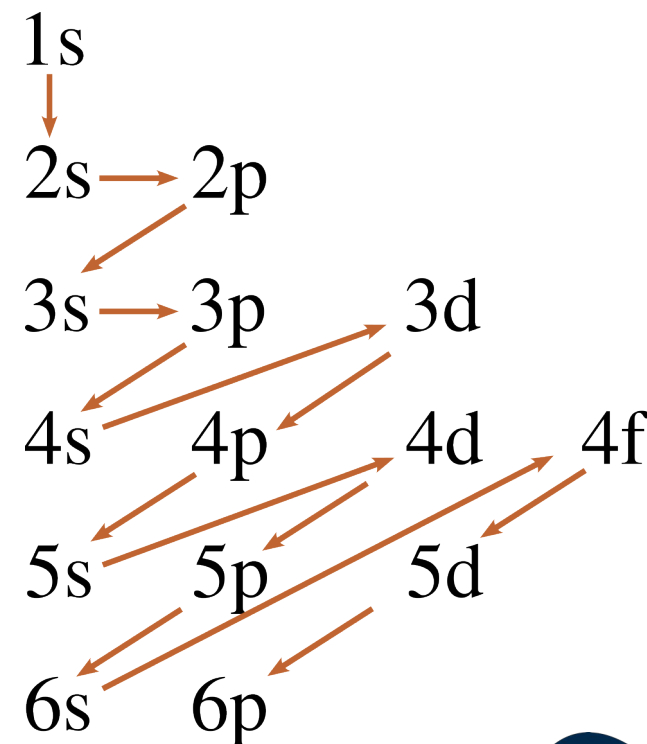


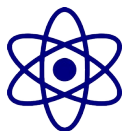
Notions essentielles pour comprendre les métaux



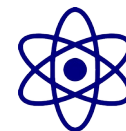
Pourquoi le mercure est-il si différent des autres métaux ?

- le mercure : l'étain poussé à l'extrême !
- la configuration électronique de Hg est $[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2$
- mais d'après la règle de Klechkowski :



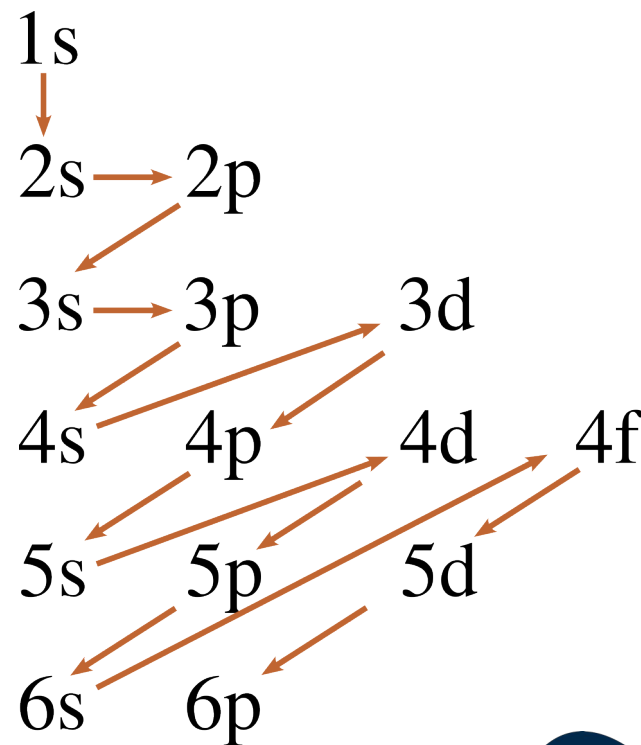


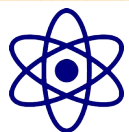
Notions essentielles pour comprendre les métaux



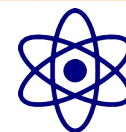
Pourquoi le mercure est-il si différent des autres métaux ?

- le mercure : l'étain poussé à l'extrême !
- la configuration électronique de Hg est $[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2$
- mais d'après la règle de Klechkowski :
- bien qu'appartenant à la 6ème couche électronique, les 2 électrons $6s^2$ sont plus fortement liés au noyau que les 4f et 5d



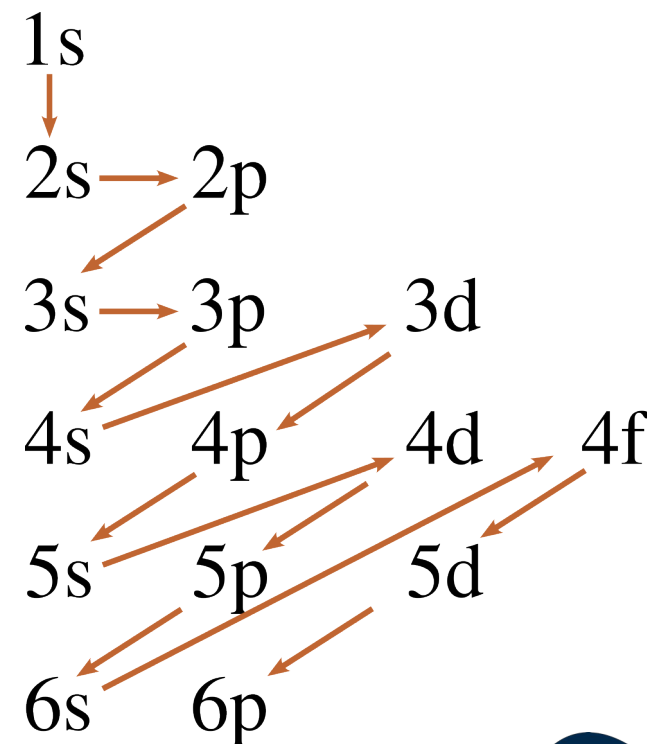


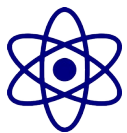
Notions essentielles pour comprendre les métaux



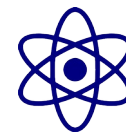
Pourquoi le mercure est-il si différent des autres métaux ?

- le mercure : l'étain poussé à l'extrême !
- la configuration électronique de Hg est $[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2$
- mais d'après la règle de Klechkowski :
- bien qu'appartenant à la 6ème couche électronique, les 2 électrons $6s^2$ sont plus fortement liés au noyau que les 4f et 5d
- ils ne peuvent donc pas être partagés dans une 'mer d'électrons'
- à cause de la contraction relativiste



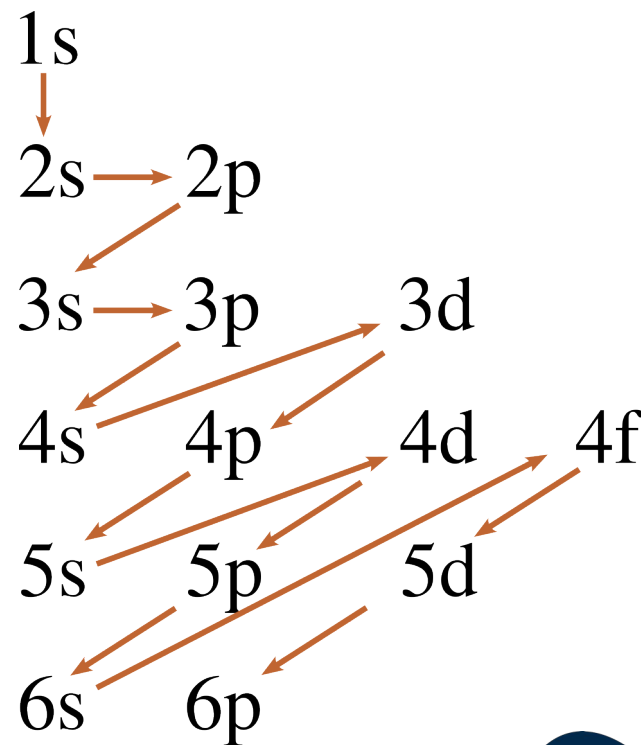


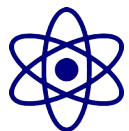
Notions essentielles pour comprendre les métaux



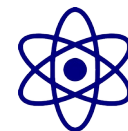
Pourquoi le mercure est-il si différent des autres métaux ?

→ Hg ne bénéficie donc pas d'une liaison métallique forte et les atomes ne sont pas fortement liés entre eux





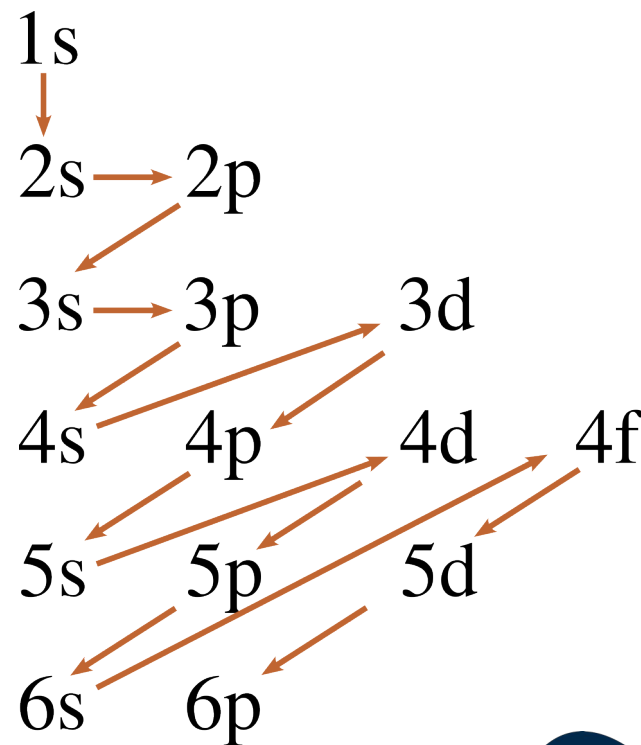
Notions essentielles pour comprendre les métaux

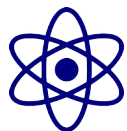


Pourquoi le mercure est-il si différent des autres métaux ?

→ Hg ne bénéficie donc pas d'une liaison métallique forte et les atomes ne sont pas fortement liés entre eux

→ c'est ce qui explique sa faible T_F ($-38,8^\circ\text{C}$)





Notions essentielles pour comprendre les métaux



Pourquoi le mercure est-il si différent des autres métaux ?

Propriété	Étain Sn	Mercure Hg
Structure à 20°C	Solide (étain blanc)	liquide
Point de fusion	231,9 °C	-38,8 °C
Densité	7,3 g.cm ⁻³	13,6 g.cm ⁻³
Dureté	Très faible (1,6 Mohs)	Liquide
Conductivité	Faible (métal pauvre)	Très faible (métal liquide)
Toxicité	Faible	Très élevée (vapeurs)



→ le plomb : juste sous l'étain...

Plomb

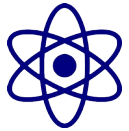
11,35 g/cm³

$$T_F = 327^\circ\text{C}$$

Plomb			
+4	715,6	82	4
+3	2,33		18
+2		Pb	32
+1			18
-1			8
-2			2
-4			
[Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ²			
207,2 (1)			

Tableau périodique des éléments chimiques

Tableau périodique des éléments chimiques																		VIII A																																																																																																																																			
Période →		1																		18																																																																																																																																	
↓		1																		18																																																																																																																																	
1	Hydrogène 1 H 1,00794																	Helium 2 He 4,002602																																																																																																																																			
2	Lithium 3 Li 6,941	Béryllium 4 Be 9,0121831															Bore 5 B 10,8115	Carbone 6 C 12,01106	Azote 7 N 14,00645	Oxygène 8 O 15,99940	Fluor 9 F 18,99840316	Neon 10 Ne 20,1797																																																																																																																															
3	Sodium 11 Na 22,98976928	Magnésium 12 Mg 24,305															Aluminium 13 Al 26,9815385	Silicium 14 Si 28,0855	Phosphore 15 P 30,973762	Soufre 16 S 32,065	Chlore 17 Cl 35,45	Argon 18 Ar 39,948																																																																																																																															
4	Potassium 19 K 39,0983	Calcium 20 Ca 40,078	Scandium 21 Sc 44,955908	Titane 22 Ti 47,87	Vanadium 23 V 50,9415	Chrome 24 Cr 51,9961	Manganèse 25 Mn 54,938044	Fer 26 Fe 55,845	Cobalt 27 Co 58,933194	Nickel 28 Ni 58,6934	Cuivre 29 Cu 63,546	Zinc 30 Zn 65,38	Gallium 31 Ga 69,7231	Germanium 32 Ge 72,630	As 33 As 74,9216	Sélénium 34 Se 78,9718	Brome 35 Br 79,904	Krypton 36 Kr 83,798																																																																																																																																			
5	Rubidium 37 Rb 85,4678	Sr 38 Sr 87,62	Yttrium 39 Y 88,90584	Zirconium 40 Zr 91,224	Niobium 41 Nb 92,90637	Molybdène 42 Mo 95,96	Technetium 43 Tc [98]	Ruthénium 44 Ru 101,07	Rhodium 45 Rh 102,90550	Palladium 46 Pd 106,42	Argent 47 Ag 107,8682	Cadmium 48 Cd 112,414	Indium 49 In 114,818	Sn 50 Sn 118,710	Antimoine 51 Sb 121,760	Tellure 52 Te 127,60	Iode 53 I 126,90447	Xénon 54 Xe 131,29																																																																																																																																			
6	Césium 55 Cs 132,90545	Baryum 56 Ba 137,327	Lanthanides 57-71		Hafnium 72 Hf 178,49	Tantale 73 Ta 180,94788	Tungstène 74 W 183,84	Rhénium 75 Re 186,207	Osmium 76 Os 190,23	Iridium 77 Ir 192,22	Platine 78 Pt 195,084	Or 79 Au 196,966569	Mercury 80 Hg 200,592	Thallium 81 Tl 204,3833	Pb 82 Pb 208,9804	Bismuth 83 Bi 208,9804	Po 84 Po [209]	Ast 85 At [222]	Rn 86 Rn [222]																																																																																																																																		
7	Francium 87 Fr [223]	Radium 88 Ra [226]	Actinides 89-103		Thorium 90 Th 232,0377	Protactinium 91 Pa 231,0368	Uranium 92 U 238,02891	Néptunium 93 Np [237]	Plutonium 94 Pu [244]	Americium 95 Am [243]	Curium 96 Cm [247]	Berkélium 97 Bk [247]	Californium 98 Cf [251]	Einsteinium 99 Es [252]	Fermium 100 Fm [257]	Mendelevium 101 Md [258]	No 102 No [259]	Lavenderium 103 Lv [261]																																																																																																																																			
Métaux																				Non métaux																																																																																																																																	
Alcalins																				Alcalino-terreux										Lanthanides										Actinides										Métaux de transition										Métaux pauvres										Métalloïdes										Autres non-métaux										Halogènes										Gaz nobles										Non classés										primordial										formation d'aides										synthèse									



L'Âge des Matériaux Monumentaux



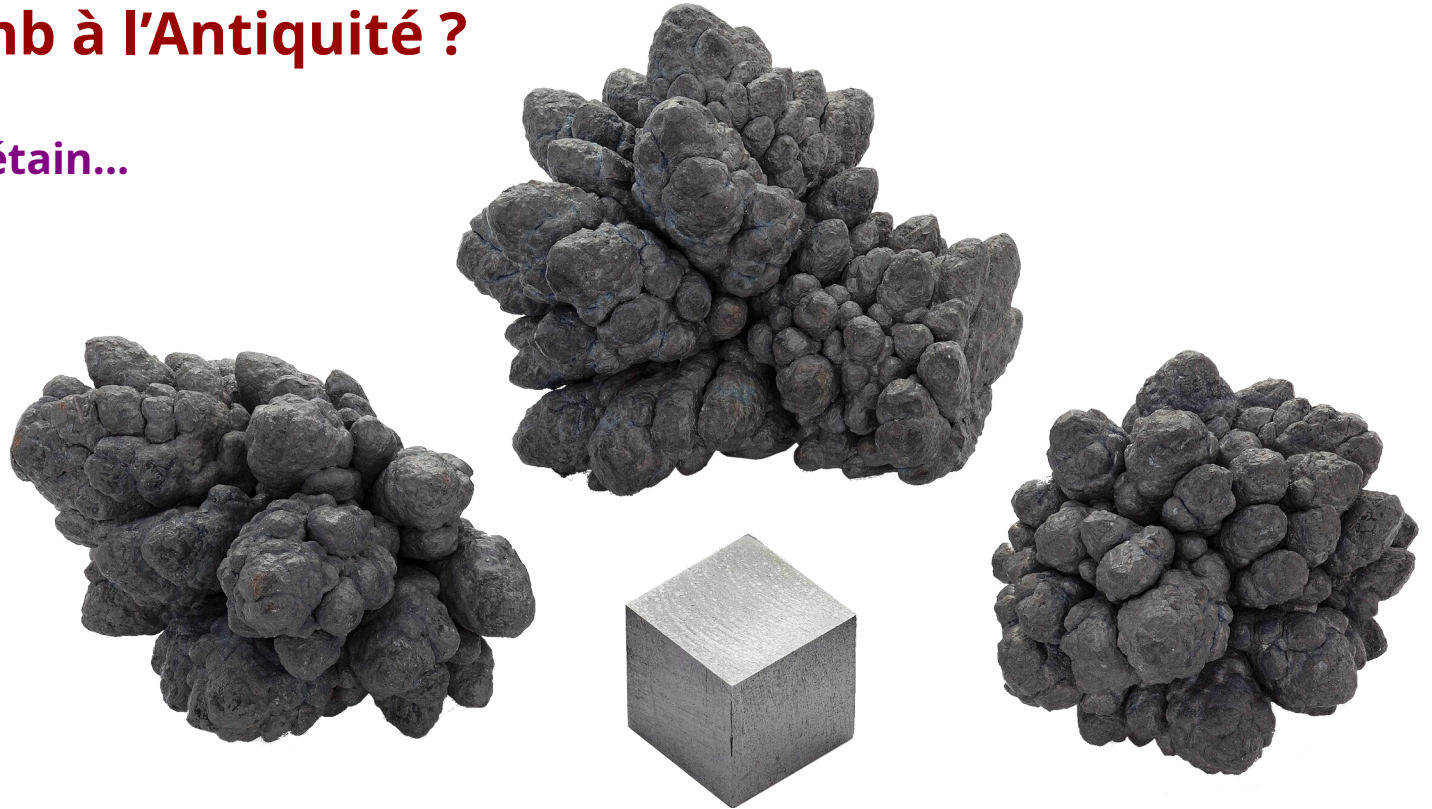
Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

→ le plomb : juste sous l'étain...

Plomb

$11,35 \text{ g/cm}^3$

$T_F = 327^\circ\text{C}$





L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

→ plomberie romaine :

→ conduites d'eau : des tuyaux en Pb (*fistulae*) servaient à distribuer l'eau dans les villes et les thermes (ex. les conduites du Palatin à Rome, les ruines de Pompéi)



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

→ plomberie romaine :

→ conduites d'eau : des tuyaux en Pb (*fistulae*) servaient à distribuer l'eau dans les villes et les thermes (ex. les conduites du Palatin à Rome, les ruines de Pompéi)

→ problème : le plomb se corrodait lentement, libérant des ions Pb^{2+} dans l'eau

→ responsables du saturnisme, l'empoisonnement au plomb



Utilisation du

→ plomberie romaine

→ conduites
villes et les t

→ problème

→ responsab



→ l'eau dans les
s de Pompéi)

→ dans l'eau



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

→ vaisselle et ustensiles :

→ le plomb servait à fabriquer des coupes, plats et cuillères

→ problème : la consommation de vin (acide) dans ces gobelets accélérât la dissolution du plomb



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

→ vaisselle et ustensiles :

→ le plomb servait à fabriquer des coupes, plats et cuillères

→ problème : la consommation de vin (acide) dans ces gobelets accélérât la dissolution du plomb

→ monnaie et alliages : le plomb était souvent allié à l'argent pour fabriquer des pièces de monnaie (ex. les deniers romains)

→ sous Néron les 'monnaies de Néron' contenaient jusqu'à 10 % de Pb



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

→ cosmétique et médecine :

→ fards et onguents : les Romains utilisaient des crèmes à base de plomb (ex. céruse, PbCO_3 pour blanchir la peau)

→ cela pouvait aboutir à des intoxications chroniques



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

→ cosmétique et médecine :

→ fards et onguents : les Romains utilisaient des crèmes à base de plomb (ex. céruse, PbCO_3 pour blanchir la peau

→ cela pouvait aboutir à des intoxications chroniques

→ médicaments :

→ le plomb était prescrit pour soigner les ulcères ou les maux de ventre (des textes du pharmacologue Dioscoride au 1^{er} siècle en témoigne)



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

→ sarcophages en plomb : utilisés pour les inhumations pour leur étanchéité

ex. sarcophage du consul Scipion Barbatus (3^e S. av. J-C)



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

→ sarcophages en plomb : utilisés pour les inhumations pour leur étanchéité

ex. sarcophage du consul Scipion Barbatus (3^e S. av. J-C)

→ émaillage des céramiques : Pb utilisé comme fondant pour les glaçures (permet d'abaisser la température de vitrification)



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

→ sarcophages en plomb : utilisés pour les inhumations pour leur étanchéité

ex. sarcophage du consul Scipion Barbatus (3^e S. av. J-C)

→ émaillage des céramiques : Pb utilisé comme fondant pour les glaçures (permet d'abaisser la température de vitrification)

→ peintures et pigments :

→ le minium (Pb_3O_4) : rouge vif, utilisé pour les fresques et les manuscrits

→ la céruse (PbCO_3) : blanc, utilisé pour les peintures murales (ex. fresque de Pompéi)



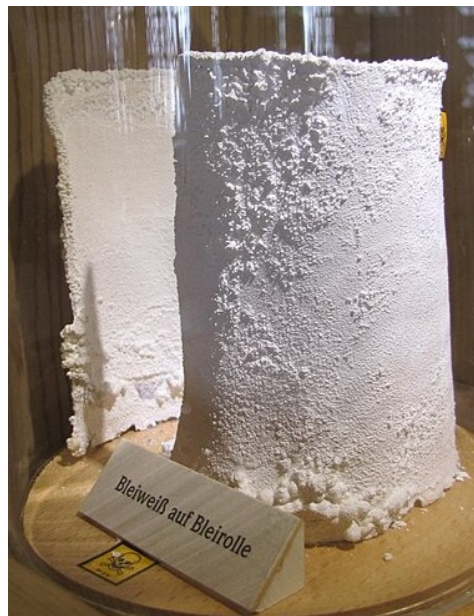
L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?



Sarcophage de Scipion Barbatus
(recouvert de plomb à l'intérieur)



La céruse, ou 'blanc de Saturne' ou
'blanc de plomb', un colorant très toxique !



Druse de minium sur de la cérusite



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

→ extraction et production du plomb dans l'Antiquité :



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

→ extraction et production du plomb dans l'Antiquité :

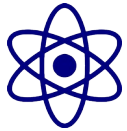
→ principaux gisements :

→ Espagne (Sierra Morena, Cartagena), plus grand producteur de plomb de l'Antiquité jusqu'au VIII^e. siècle

→ Grèce (Laurion, Attique) : mines célèbres dès -500 qui finançaient la puissance athénienne

→ Bretagne romaine (Mendip Hills, près de Bristol, R-U) : exploité au 1^{er} siècle, après la conquête romaine

→ Sardaigne : mines utilisées par les Phéniciens et les Romains



L'Âge des Matériaux Monumentaux

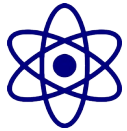


Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

→ extraction et production du plomb dans l'Antiquité :

→ les mines étaient souvent souterraines avec des galeries étroites creusées à la main

→ par ex. les mines de Laurion (Grèce) avaient des puits profonds de 100 m !



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

→ extraction et production du plomb dans l'Antiquité :

→ les mines étaient souvent souterraines avec des galeries étroites creusées à la main

→ par ex. les mines de Laurion (Grèce) avaient des puits profonds de 100 m !

→ fusion du minerai :

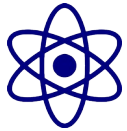
→ le minerai le plus courant était le galène, du sulfure de plomb, PbS

→ le galène était chauffé sous air afin de s'oxyder en PbO, puis réduit au charbon de bois



puis





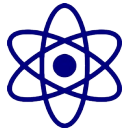
L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

→ coupellation

→ technique pour séparer l'argent souvent présent dans le galène



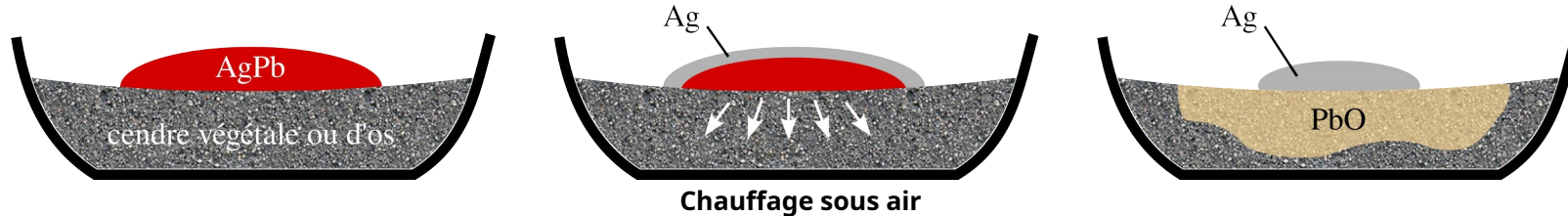
L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

→ coupellation

- technique pour séparer l'argent souvent présent dans le galène
- technique connue en Chine déjà en -3 000 !
- il arrive que le plomb se trouve parfois sous forme d'alliage avec de l'argent métallique
- l'alliage PbAg est alors longuement chauffé sous air pour que tout le Pb s'oxyde
- une fois l'opération terminée, l'argent et le PbO se sont séparés





L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

Chiffres clés :



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

Chiffres clés :

- 80 000 tonnes de plomb produites annuellement à l'apogée de l'Empire (1^{er} et 2^e S.)
- 10 millions de tonnes de plomb extraites durant toute l'Antiquité (estimation)



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

Chiffres clés :

- 80 000 tonnes de plomb produites annuellement à l'apogée de l'Empire (1^{er} et 2^e S.)
- 10 millions de tonnes de plomb extraites durant toute l'Antiquité (estimation)
- l'archéologie nous le prouve :
 - *des scories de fusion ont été retrouvées près des mines de Cartagène (Espagne)*
 - *et des isotopes du plomb dans les sédiments marins et les glaces polaires qui montrent un pic de pollution durant l'Antiquité*



L'Âge des Matériaux Monumentaux



Utilisation du plomb à l'Antiquité ?

Dimension sociétale et économique :

- commerce et pouvoir : le plomb était échangé dans toute l'Europe
- les lingots de plomb romains portaient des estampilles indiquant leur origine



Lingot de plomb de l'époque romaine, mines de Cartagène, Espagne



L'héritage toxique...



Impacts environnementaux du plomb:

Pollution des sols et des eaux : les rejets miniers

- les scories de fusion, riches en Pb et S, étaient souvent abandonnées près des mines
- contamination des sols
 - ex. les sols autour du Laurion (Grèce) contiennent encore des concentrations élevées de Pb : jusqu'à 10 000 ppm contre 50 ppm en zone non polluée



L'héritage toxique...



Impacts environnementaux du plomb:

Pollution des sols et des eaux : les rejets miniers

- les scories de fusion, riches en Pb et S, étaient souvent abandonnées près des mines
- contamination des sols
 - ex. les sols autour du Laurion (Grèce) contiennent encore des concentrations élevées de Pb : jusqu'à 10 000 ppm contre 50 ppm en zone non polluée

Les mines de plomb employaient des esclaves et des condamnés qui avaient une espérance de vie de 10 à 30 ans. Pline l'Ancien décrit les mines comme « un enfer sur terre » !



L'héritage toxique...



Impacts environnementaux du plomb:

Émissions atmosphériques

→ les fumées de fusion : le grillage de la galène (PbS) libérait du dioxyde de soufre (SO_2), un gaz toxique, et des particules de Pb

pour preuve :

les carottes de glace du Groenland montrent des pics de Pb coïncidant à l'apogée de l'Empire romain



L'héritage toxique...



Impacts environnementaux du plomb:

Déforestation

- les fours utilisaient du charbon de bois
- la fusion du plomb nécessitaient d'énormes quantités de charbon de bois
 - 10 kg de bois pour 1 kg de plomb
- les forêts autour de Cartagène (Espagne) ont été déboisées pour alimenter les fours



L'héritage toxique...



Impacts sanitaires : le Saturnisme Antique, une maladie de riches !

Symptômes et conséquences :

→ le saturnisme (intoxication au plomb) était probablement répandu dans l'Antiquité



L'héritage toxique...



Impacts sanitaires : le Saturnisme Antique, une maladie de riches !

Symptômes et conséquences :

- le saturnisme (intoxication au plomb) était probablement répandu dans l'Antiquité
- troubles neurologiques : maux de tête, convulsions, troubles de la mémoire



L'héritage toxique...



Impacts sanitaires : le Saturnisme Antique, une maladie de riches !

Symptômes et conséquences :

- le saturnisme (intoxication au plomb) était probablement répandu dans l'Antiquité
- troubles neurologiques : maux de tête, convulsions, troubles de la mémoire
- problèmes digestifs : douleurs abdominales, constipation



L'héritage toxique...



Impacts sanitaires : le Saturnisme Antique, une maladie de riches !

Symptômes et conséquences :

- le saturnisme (intoxication au plomb) était probablement répandu dans l'Antiquité
- troubles neurologiques : maux de tête, convulsions, troubles de la mémoire
- problèmes digestifs : douleurs abdominales, constipation
- anémie : le plomb inhibe la synthèse de l'hémoglobine



L'héritage toxique...



Impacts sanitaires : le Saturnisme Antique, une maladie de riches !

Symptômes et conséquences :

- le saturnisme (intoxication au plomb) était probablement répandu dans l'Antiquité
- troubles neurologiques : maux de tête, convulsions, troubles de la mémoire
- problèmes digestifs : douleurs abdominales, constipation
- anémie : le plomb inhibe la synthèse de l'hémoglobine
- stérilité : le plomb a un effet sur la fertilité masculine et féminine



L'héritage toxique...



Impacts sanitaires : le Saturnisme Antique, une maladie de riches !

Symptômes et conséquences :

- le saturnisme (intoxication au plomb) était probablement répandu dans l'Antiquité
- troubles neurologiques : maux de tête, convulsions, troubles de la mémoire
- problèmes digestifs : douleurs abdominales, constipation
- anémie : le plomb inhibe la synthèse de l'hémoglobine
- stérilité : le plomb a un effet sur la fertilité masculine et féminine

Et pourtant les Romains savaient que le plomb est dangereux !

→ Vitruve, au 1^{er} S. av J-C a écrit dans 'De Architectura' : « l'eau conduite par les tuyaux de plomb est malsaine »



L'héritage toxique...



Impacts sanitaires : le Saturnisme Antique, une maladie de riches !

Preuves archéologiques et historiques :



L'héritage toxique...



Impacts sanitaires : le Saturnisme Antique, une maladie de riches !

Preuves archéologiques et historiques :

→ les os des Romains montrent des taux de plomb 100x supérieurs à la normale !



L'héritage toxique...



Impacts sanitaires : le Saturnisme Antique, une maladie de riches !

Preuves archéologiques et historiques :

- les os des Romains montrent des taux de plomb 100x supérieurs à la normale !
- les Romains avaient l'habitude d'adoucir le vin avec un sirop, la « sapa », produit grâce à la réduction du jus de raisin non fermenté



L'héritage toxique...



Impacts sanitaires : le Saturnisme Antique, une maladie de riches !

Preuves archéologiques et historiques :

- les os des Romains montrent des taux de plomb 100x supérieurs à la normale !
- les Romains avaient l'habitude d'adoucir le vin avec un sirop, la « sapa », produit grâce à la réduction du jus de raisin non fermenté
- ce sirop permettait aussi d'améliorer la couleur, le bouquet et la conservation du vin



L'héritage toxique...



Impacts sanitaires : le Saturnisme Antique, une maladie de riches !

Preuves archéologiques et historiques :

- les os des Romains montrent des taux de plomb 100x supérieurs à la normale !
- les Romains avaient l'habitude d'adoucir le vin avec un sirop, la « sapa », produit grâce à la réduction du jus de raisin non fermenté
- ce sirop permettait aussi d'améliorer la couleur, le bouquet et la conservation du vin
- la réduction, réalisée dans des pots ou bouilloires en plomb, conduisait à un sirop doux au goût sucré dû notamment à la présence d'acétate de plomb : $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$



L'héritage toxique...



Impacts sanitaires : le Saturnisme Antique, une maladie de riches !

Preuves archéologiques et historiques :

- les os des Romains montrent des taux de plomb 100x supérieurs à la normale !
- les Romains avaient l'habitude d'adoucir le vin avec un sirop, la « sapa », produit grâce à la réduction du jus de raisin non fermenté
- ce sirop permettait aussi d'améliorer la couleur, le bouquet et la conservation du vin
- la réduction, réalisée dans des pots ou bouilloires en plomb, conduisait à un sirop doux au goût sucré dû notamment à la présence d'acétate de plomb : $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$



L'héritage toxique...



Impacts sanitaires : le Saturnisme Antique, une maladie de riches !

Preuves archéologiques et historiques :

→ la consommation moyenne de vin dans l'Ancienne Rome a été estimée entre 1 et 5 litres par jour !



L'héritage toxique...



Impacts sanitaires : le Saturnisme Antique, une maladie de riches !

Preuves archéologiques et historiques :

- la consommation moyenne de vin dans l'Ancienne Rome a été estimée entre 1 et 5 litres par jour !
- un aristocrate romain consommant 2 litres de vin par jour préparé dans des récipients en plomb en ingérait 250 mg/jour contre 15 mg/jour chez les esclaves !



L'héritage toxique...



Impacts sanitaires : le Saturnisme Antique, une maladie de riches !

Preuves archéologiques et historiques :

- la consommation moyenne de vin dans l'Ancienne Rome a été estimée entre 1 et 5 litres par jour !
- un aristocrate romain consommant 2 litres de vin par jour préparé dans des récipients en plomb en ingérait 250 mg/jour contre 15 mg/jour chez les esclaves !
- Pline l'Ancien décrit la colique saturnique comme une pandémie !



L'héritage toxique...



Impacts sanitaires : le Saturnisme Antique, une maladie de riches !

Preuves archéologiques et historiques :

→ l'Empereur Claude était considéré d'une 'intelligence faible' et présentait une élocution difficile, des faiblesses musculaires, une allure gauche, des tremblements, des crises de rires inappropriées, des colères déplacées et bavait beaucoup. Or il était un énorme buveur !



L'héritage toxique...



Impacts sanitaires : le Saturnisme Antique, une maladie de riches !

Preuves archéologiques et historiques :

→ *l'Empereur Claude était considéré d'une 'intelligence faible' et présentait une élocution difficile, des faiblesses musculaires, une allure gauche, des tremblements, des crises de rires inappropriées, des colères déplacées et bavait beaucoup. Or il était un énorme buveur !*

→ on considère que près des 2/3 des empereurs romains (19/30) qui abusaient de la consommation de vin auraient montré des signes de saturnisme.



L'héritage toxique...

TODAY

Mercure et plomb, les 2 autres métaux lourds de l'Antiquité : Pb

Aujourd'hui :



L'héritage toxique...

TODAY

Mercure et plomb, les 2 autres métaux lourds de l'Antiquité : Pb

Aujourd'hui :

→ interdiction : Pb est banni des peintures et canalisations dans la plupart des pays



L'héritage toxique...

TODAY

Mercure et plomb, les 2 autres métaux lourds de l'Antiquité : Pb

Aujourd'hui :

- interdiction : Pb est banni des peintures et canalisations dans la plupart des pays
- pollution résiduelle :
 - sols contaminés près des anciennes fonderies
 - batteries au plomb-acide : peuvent être recyclées à 99 % mais cela peut poser problème dans certains pays mal équipés en infrastructures



L'héritage toxique...

TODAY

Mercure et plomb, les 2 autres métaux lourds de l'Antiquité : Pb

Aujourd'hui :

- interdiction : Pb est banni des peintures et canalisations dans la plupart des pays
- pollution résiduelle :
 - sols contaminés près des anciennes fonderies
 - batteries au plomb-acide : peuvent être recyclées à 99 % mais cela peut poser problème dans certains pays mal équipés en infrastructures
- alternatives : batteries lithium-ions, peintures sans plomb (à base de titane ou de zinc)



L'héritage toxique...

TODAY

Mercure et plomb, les 2 autres métaux lourds de l'Antiquité : Pb

Aujourd'hui :

- interdiction : Pb est banni des peintures et canalisations dans la plupart des pays
- pollution résiduelle :
 - sols contaminés près des anciennes fonderies
 - batteries au plomb-acide : peuvent être recyclées à 99 % mais cela peut poser problème dans certains pays mal équipés en infrastructures
- alternatives : batteries lithium-ions, peintures sans plomb (à base de titane ou de zinc)
- les Romains produisaient 80 000 tonnes de plomb par an... contre 5 millions aujourd'hui !

PHYSIQUE pour tous !

Chapitre 3 – 3^{ème} partie

Le Moyen Âge : l'âge des matériaux low-tech



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



476

1492

Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

Le Moyen-âge s'étale de la chute de l'Empire Romain d'Occident (476) jusqu'à la découverte de l'Amérique (1492)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Matériaux

Amélioration des matériaux
et techniques de l'Antiquité
→ métallurgie

Apparition du verre
plat soufflé

Torchis, pisé, bois,
galets

Acier

Comment

bas-fourneaux
avec soufflet



Armure de plates en fer



Énergie

Feu de charbon de bois
Énergie hydraulique



Maison en
pisé (adobe)
au chantier
Médiéval du
Guédelon
(Yonne)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 **Le torchis : le matériau low-tech par excellence !**

1492



Un village reconstitué du XIVème siècle



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

1492

Il sert de matériaux de remplissage dans les construction à pans de bois (colombages)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 **Le torchis : le matériau low-tech par excellence !**

1492

Il sert de matériaux de remplissage dans les construction à pans de bois (colombages)

→ la terre utilisée détermine la couleur du torchis



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 **Le torchis : le matériau low-tech par excellence !**

1492

Il sert de matériaux de remplissage dans les construction à pans de bois (colombages)

→ la terre utilisée détermine la couleur du torchis

→ il est préparé par malaxage manuel ou par piétinement



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 **Le torchis : le matériau low-tech par excellence !**

1492

Il sert de matériaux de remplissage dans les construction à pans de bois (colombages)

→ la terre utilisée détermine la couleur du torchis

→ il est préparé par malaxage manuel ou par piétinement

→ il existe différents types de torchis du fait que sa composition varie d'une région à l'autre



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 **Le torchis : le matériau low-tech par excellence !**

1492

Il sert de matériaux de remplissage dans les construction à pans de bois (colombages)

→ la terre utilisée détermine la couleur du torchis

→ il est préparé par malaxage manuel ou par piétinement

→ il existe différents types de torchis du fait que sa composition varie d'une région à l'autre

→ il peut être assimilé à un béton naturel



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



476

Le torc

Il sert de mat

→ la terre utilis

→ il est préparé

→ il existe diffé

→ il peut être a

1492

s (colombages)

n à l'autre





Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 **Le torchis : le matériau low-tech par excellence !**

1492

Recette :

→ 60-70 % de terre argileuse et d'eau + 20-30 % de paille ou foin haché + 5-10 % de chaux (parfois)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 **Le torchis : le matériau low-tech par excellence !**

1492

Recette :

→ 60-70 % de terre argileuse et d'eau + 20-30 % de paille ou foin haché + 5-10 % de chaux (parfois)

→ c'est un peu comme pour faire un gâteau !

→ terre = farine, paille = fruits secs, chaux = liant



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

1492

La structure support :

→ une ossature bois vient donner forme au mur



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 **Le torchis : le matériau low-tech par excellence !**

1492

La structure support :

→ une ossature bois vient donner forme au mur

→ une structure d'accroche appelée « lattis » est ajoutée par dessus l'ossature



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 **Le torchis : le matériau low-tech par excellence !**

1492

La structure support :

- une ossature bois vient donner forme au mur
- une structure d'accroche appelée « lattis » est ajoutée par dessus l'ossature
- le lattis est formée de bois tendre (châtaigner, noisetier, saule) qui est latté, barreaudé ou tressé



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le torchis : le matériau low-tech

llence !

1492



Mur en torchis au chantier
Médiéval du Guédelon (Yonne)



torchis façonné en boules
(Écomusée d'Alsace)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 **Le torchis : le matériau low-tech par excellence !**

1492

Application sur le lattis :

→ différentes techniques d'application existent mais la plus connue est la pose à cheval



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 **Le torchis : le matériau low-tech par excellence !**

1492

Application sur le lattis :

→ différentes techniques d'application existent mais la plus connue est la pose à cheval

→ des boudins de torchis (appelés 'torches') de 30 cm de long et 5 cm d'épais sont posés au fur et à mesure à cheval sur le lattis en les plaquant bien les uns contre les autres



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 **Le torchis : le matériau low-tech par excellence !**

1492

Application sur le lattis :

- différentes techniques d'application existent mais la plus connue est la pose à cheval
- des boudins de torchis (appelés 'torches') de 30 cm de long et 5 cm d'épais sont posés au fur et à mesure à cheval sur le lattis en les plaquant bien les uns contre les autres
- une fois en place, la matériau frais est aplani à la main



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 **Le torchis : le matériau low-tech par excellence !**

1492

Application sur le lattis :

- différentes techniques d'application existent mais la plus connue est la pose à cheval
- des boudins de torchis (appelés 'torches') de 30 cm de long et 5 cm d'épais sont posés au fur et à mesure à cheval sur le lattis en les plaquant bien les uns contre les autres
- une fois en place, le matériau frais est aplani à la main
- la paroi fait alors typiquement 20-30 cm d'épaisseur



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 **Le torchis : le matériau low-tech par excellence !**

1492

Application sur le lattis :

→ comme toute construction en terre crue, le torchis met 4 à 8 semaines pour sécher



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 **Le torchis : le matériau low-tech par excellence !**

1492

Application sur le lattis :

→ comme toute construction en terre crue, le torchis met 4 à 8 semaines pour sécher

→ il est ensuite possible d'appliquer un enduit de finition à la chaux



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476 **Le torchis : le matériau low-tech par excellence !**

1492

Application sur le lattis :

- comme toute construction en terre crue, le torchis met 4 à 8 semaines pour sécher
- il est ensuite possible d'appliquer un enduit de finition à la chaux
- la chaux durcit ensuite au contact du CO_2 de l'air



476

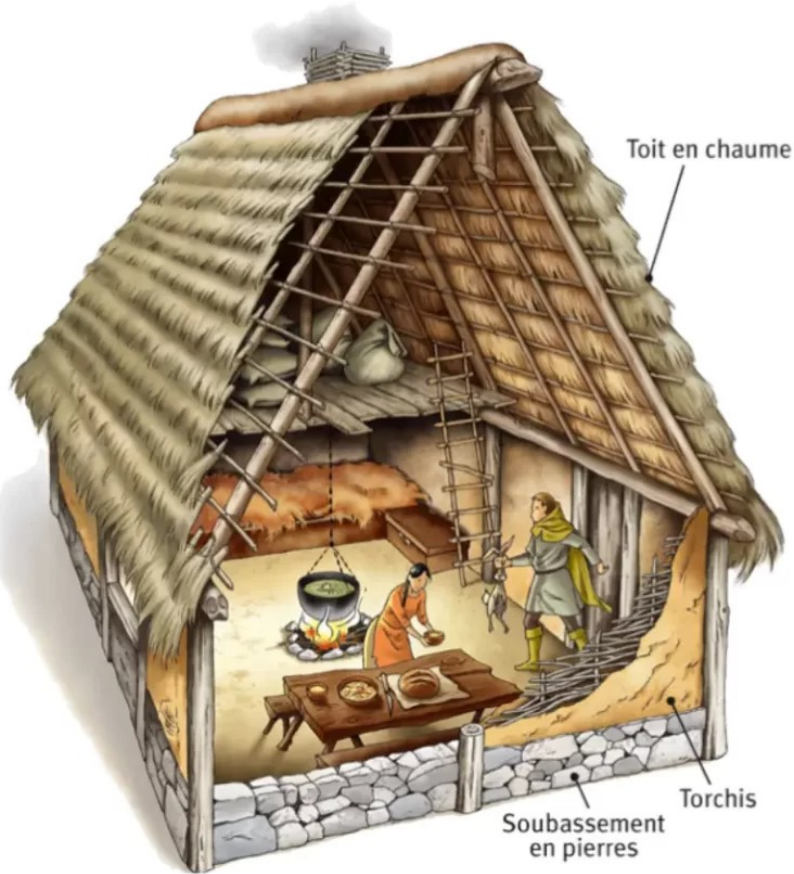


Schéma d'une maison paysanne du Moyen âge

des matériaux low-tech

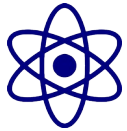
en-âge

iaux low-tech

n-tecl



92



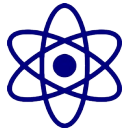
Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

La carbonatation de la chaux :

→ c'est le processus naturel et fondamental à la base de la durabilité des mortiers et bétons anciens (comme le béton romain) et des enduits traditionnels



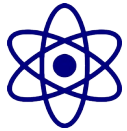
Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

La carbonatation de la chaux :

- c'est le processus naturel et fondamental à la base de la durabilité des mortiers et bétons anciens (comme le béton romain) et des enduits traditionnels
- ce mécanisme est crucial pour comprendre les matériaux de construction durables et les solutions de captation du CO₂ moderne telles qu'on les met en œuvre aujourd'hui !



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech

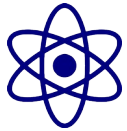


Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

La carbonatation de la chaux :

- c'est le processus naturel et fondamental à la base de la durabilité des mortiers et bétons anciens (comme le béton romain) et des enduits traditionnels
- ce mécanisme est crucial pour comprendre les matériaux de construction durables et les solutions de captation du CO₂ moderne telles qu'on les met en œuvre aujourd'hui !
- la chaux vive, CaO, est obtenue par calcination du calcaire à 900°C :





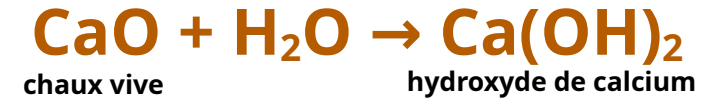
Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech

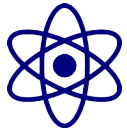


Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

La carbonatation de la chaux :

→ puis elle est hydratée pour former la chaux éteinte, Ca(OH)_2 :





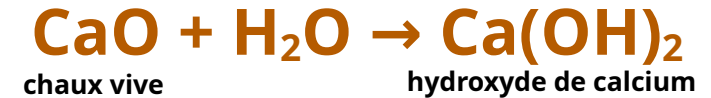
Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

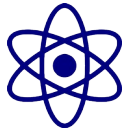
La carbonatation de la chaux :

→ puis elle est hydratée pour former la chaux éteinte, Ca(OH)_2 :



→ c'est l'extinction de la chaux vive

(ex. les Romains mélangeaient CaO à de l'eau dans des fosses d'extinction)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

La carbonatation de la chaux :

→ puis elle est hydratée pour former la chaux éteinte, Ca(OH)_2 :

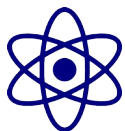
$$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$$

chaux vive hydroxyde de calcium

→ c'est l'extinction de la chaux vive

(ex. les Romains mélangeaient CaO à de l'eau dans des fosses d'extinction)

→ ensuite, la chaux éteinte, Ca(OH)_2 , en pâte ou en poudre, est mélangé à des agrégats (sables, pouzzolane) pour former un mortier



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

La carbonatation de la chaux :

→ puis elle est hydratée pour former la chaux éteinte, Ca(OH)_2 :

$$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$$

chaux vive hydroxyde de calcium

→ c'est l'extinction de la chaux vive

(ex. les Romains mélangeaient CaO à de l'eau dans des fosses d'extinction)

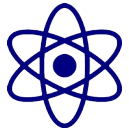
→ ensuite, la chaux éteinte, Ca(OH)_2 , en pâte ou en poudre, est mélangé à des agrégats (sables, pouzzolane) pour former un mortier

→ enfin, Ca(OH)_2 , réagit avec le CO_2 atmosphérique pour former un liant solide, le carbonate de calcium, CaCO_3 : c'est la carbonatation

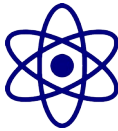


carbonate de calcium

(carbonatation)

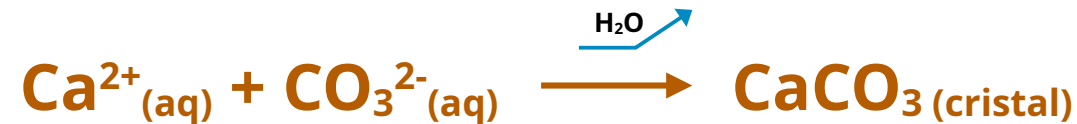


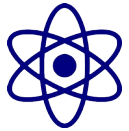
Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



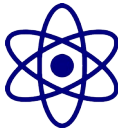
Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

En fait, ce sont les ions Ca^{2+} et CO_3^{2-} qui réagissent dans le milieu aqueux :



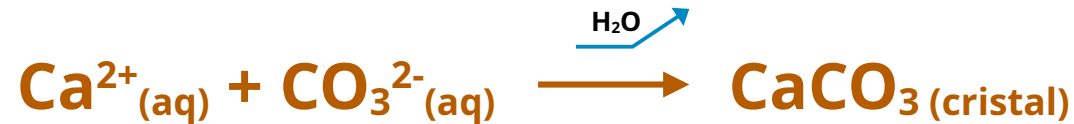


Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech

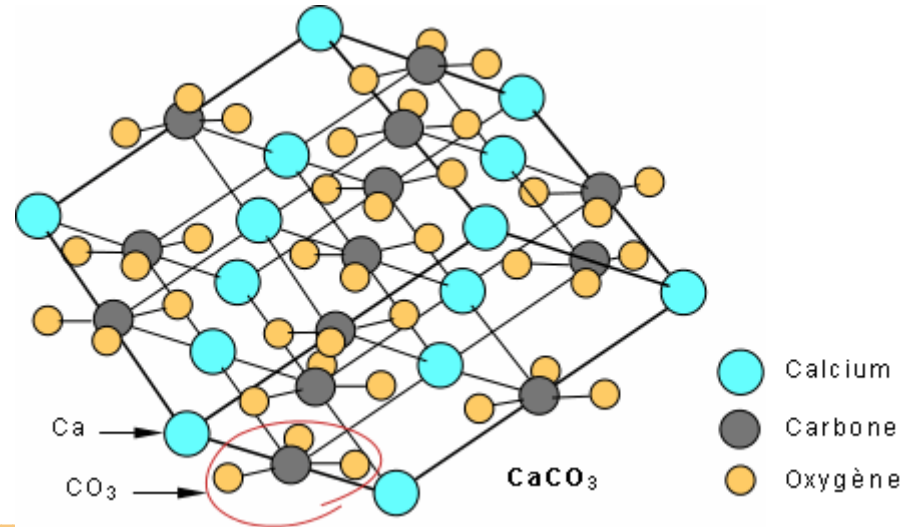


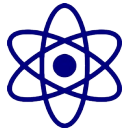
Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

En fait, ce sont les ions Ca^{2+} et CO_3^{2-} qui réagissent dans le milieu aqueux :



pour donner des cristaux de calcite (CaCO_3) de structure rhomboédrique :



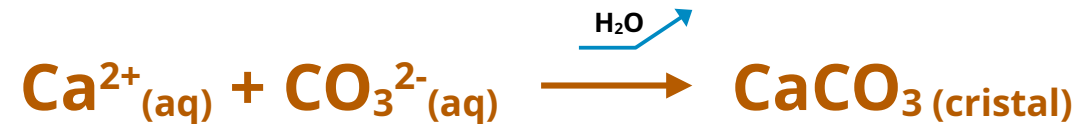


Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

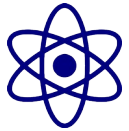
En fait, ce sont les ions Ca^{2+} et CO_3^{2-} qui réagissent dans le milieu aqueux :



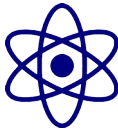
pour donner des cristaux de calcite (CaCO_3) de structure rhomboédrique :

→ ce sont ces cristaux qui donnent au matériau sa résistance mécanique

→ la carbonatation réduit également la porosité du matériaux, augmentant sa résistance mécanique

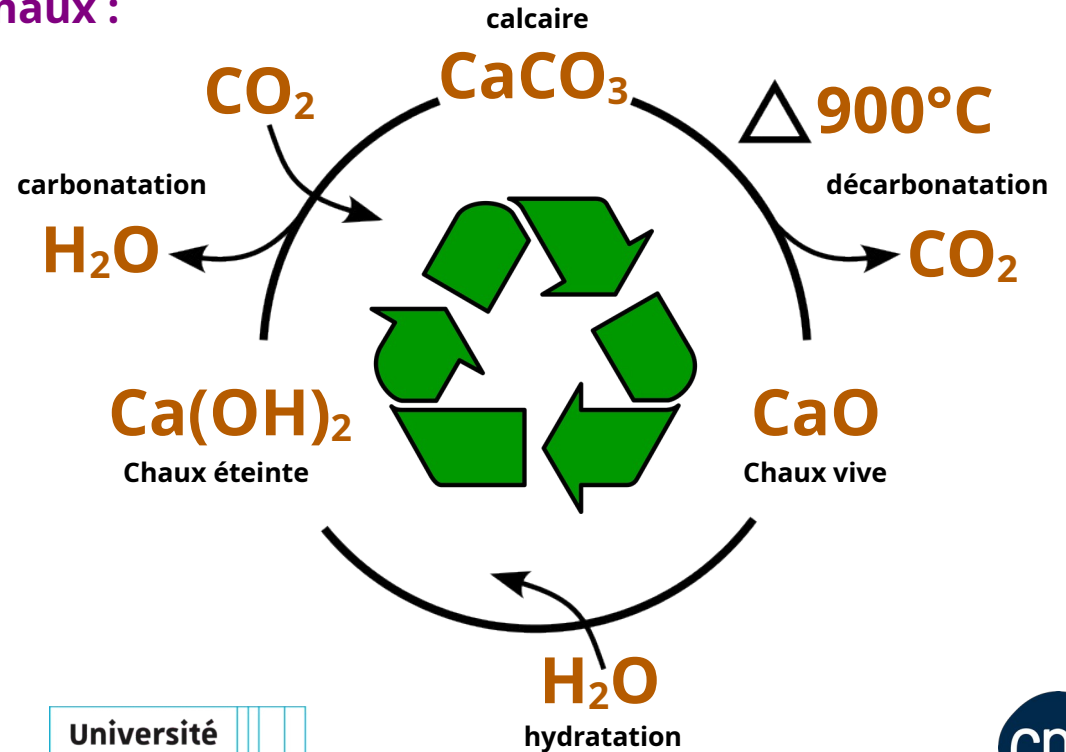


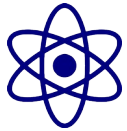
Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Ce processus constitue le cycle de la chaux :





Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech

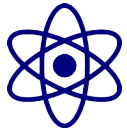


Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Pourquoi la carbonatation est-elle si importante ?

→ les Romains utilisaient un mélange de chaux, pouzzolane et eau pour créer un béton qui durcit avec le temps grâce à la carbonatation

→ le Panthéon de Rome (126 ap. J-C) utilise ce principe... il est toujours debout !



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



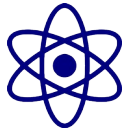
Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Pourquoi la carbonatation est-elle si importante ?

→ les Romains utilisaient un mélange de chaux, pouzzolane et eau pour créer un béton qui durcit avec le temps grâce à la carbonatation

→ le Panthéon de Rome (126 ap. J-C) utilise ce principe... il est toujours debout !

→ les enduits à la chaux respirent : ils laissent passer la vapeur d'eau



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

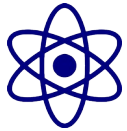
Pourquoi la carbonatation est-elle si importante ?

→ les Romains utilisaient un mélange de chaux, pouzzolane et eau pour créer un béton qui durcit avec le temps grâce à la carbonatation

→ le Panthéon de Rome (126 ap. J-C) utilise ce principe... il est toujours debout !

→ les enduits à la chaux respirent : ils laissent passer la vapeur d'eau

→ ils se réparent également, grâce à la carbonatation continue



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Pourquoi la carbonatation est-elle si importante ?

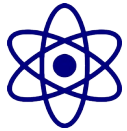
→ les Romains utilisaient un mélange de chaux, pouzzolane et eau pour créer un béton qui durcit avec le temps grâce à la carbonatation

→ le Panthéon de Rome (126 ap. J-C) utilise ce principe... il est toujours debout !

→ les enduits à la chaux respirent : ils laissent passer la vapeur d'eau

→ ils se réparent également, grâce à la carbonatation continue

→ ainsi, le bilan carbone est neutre !



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Pourquoi la carbonatation est-elle si importante ?

→ les Romains utilisaient un mélange de chaux, pouzzolane et eau pour créer un béton qui durcit avec le temps grâce à la carbonatation

→ le Panthéon de Rome (126 ap. J-C) utilise ce principe... il est toujours debout !

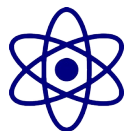
→ les enduits à la chaux respirent : ils laissent passer la vapeur d'eau

→ ils se réparent également, grâce à la carbonatation continue

→ ainsi, le bilan carbone est neutre !

→ la carbonatation re-fixe le CO_2 émis lors de la calcination du calcaire :

→ 1 tonne de chaux vive (CaO) peut séquestrer 0,78 tonnes de CO_2 lors de la carbonatation !



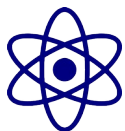
Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Comparaison de la chaux avec le ciment moderne :

Matériau	Émissions CO ₂ (kg/tonne)	Recyclabilité	Durabilité
Chaux	700–800	100% (cycle fermé)	Millénaires
Ciment Portland	900–1000	Partielle (clinker)	50–100 ans



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Propriétés du torchis :

Propriété	Avantages	Inconvénients
Isolation thermique	$\lambda = 0.1\text{--}0.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (comme la laine de verre)	Sensible à l'humidité (moisissures)
Biodégradable	100% naturel, compostable.	Durée de vie limitée (50–100 ans).
Résistance au feu	La chaux retarde la combustion	Se fissure à haute température
Acoustique	Bonne absorption des sons	—



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Impacts environnementaux : avantages

Bilan carbone neutre :

- le CO_2 libéré lors de la calcination est re-capturé lors de la décarbonatation
- $\sim 0 \text{ kg de CO}_2/\text{m}^3$ (contre 300 kg pour le béton)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Impacts environnementaux : avantages

Bilan carbone neutre :

- le CO_2 libéré lors de la calcination est re-capturé lors de la décarbonatation
 - $\sim 0 \text{ kg de CO}_2/\text{m}^3$ (contre 300 kg pour le béton)
- émission négative si la paille provient de cultures locales (car elle piège le CO_2)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Impacts environnementaux : avantages

Bilan carbone neutre :

- le CO_2 libéré lors de la calcination est re-capturé lors de la décarbonatation
 - $\sim 0 \text{ kg de CO}_2/\text{m}^3$ (contre 300 kg pour le béton)
- émission négative si la paille provient de cultures locales (car elle piège le CO_2)

Ressources :

- locales : la terre et la paille sont disponibles sur place (localement sourcés)
- eau : nécessite peu d'eau (par rapport au béton qui en réclame beaucoup plus)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Impacts environnementaux : inconvénients historiques

Déforestation :

- la cuisson de la chaux nécessitait 1 tonne de bois pour 100 kg de chaux
- déboisement massif : ex. les forêts autour de Rome ou en Forêt Noire



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Impacts environnementaux : inconvénients historiques

Déforestation :

- la cuisson de la chaux nécessitait 1 tonne de bois pour 100 kg de chaux
- déboisement massif : ex. les forêts autour de Rome ou en Forêt Noire

Pollution locale :

- les fours à chaux émettaient des poussières et du CO_2



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Dimensions sociétales :

Autoconstruction :

→ les paysans fabriquaient eux-mêmes leur torchis (pas de dépendance aux artisans)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Dimensions sociétales :

Autoconstruction :

→ les paysans fabriquaient eux-mêmes leur torchis (pas de dépendance aux artisans)

Symbolique :

→ le torchis était le matériaux des « pauvres » alors que la pierre était pour la noblesse !

→ mais au moins il était durable ! Certaines maisons datent du XIII^e siècle !

TODAY

Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech

TODAY

Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Le torchis aujourd'hui : une solution pour les limites planétaires !

Captation du CO₂ :

- la carbonatation de la chaux peut être utilisée pour séquestrer du CO₂ industriel
- par ex. pour faire du ciment bas-carbone

TODAY

Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech

TODAY

Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Le torchis aujourd'hui : une solution pour les limites planétaires !

Captation du CO₂ :

- la carbonatation de la chaux peut être utilisée pour séquestrer du CO₂ industriel
- par ex. pour faire du ciment bas-carbone

Matériaux biosourcés :

- combiner la chaux avec des fibres végétales (chanvre, lin) permet de concevoir des bétons écologiques



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Exemples historiques :



Normandie



Alsace



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Exemples historiques :



Maisons Tudor (Winchester, U-K)



Maison médiévale
à Strasbourg
(pas de pub...)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Exemples historiques :



Château de Ponthus de Tyard
à Bissy-sur-Fley (Saône-et-Loire)
(torchis sur mur extérieur)

TODAY

Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech

TODAY

Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

La chaux nous montre comment un matériau ancien peut inspirer des solutions durables pour demain !

TODAY

Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech

TODAY

Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

La chaux nous montre comment un matériau ancien peut inspirer des solutions durables pour demain !

Aujourd'hui, des startups réinventent ce principe pour créer des bétons bas-carbone.

TODAY

Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech

TODAY

Le torchis : le matériau low-tech par excellence !

Et si la clé pour lutter contre le changement climatique était déjà entre les mains des Romains ?



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le 'pisé' ou la brique crue:

1492



Maison en pisé
(Isère)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le pisé :

Murs de château en pisé
(Castille, Espagne)



1492



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

1492

Le pisé : définition, composition

→ À l'inverse du torchis qui sert de remplissage d'une structure en bois préexistante, le pisé permet de faire des murs monolithes, c'est-à-dire d'un seul bloc.



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

1492

Le pisé : définition, composition

- À l'inverse du torchis qui sert de remplissage d'une structure en bois préexistante, le pisé permet de faire des murs monolithes, c'est-à-dire d'un seul bloc.
- le pisé est également un matériau en terre crue ; il est composé de :
 - 70-80 % de terre argileuse (un liant naturel)
 - 20-30 % de sable ou gravier (pour le stabiliser)
 - des fibres végétales ou animales (paille, crin de cheval, 5-10%) contre les fissures



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

1492

Le pisé : définition, composition

- À l'inverse du torchis qui sert de remplissage d'une structure en bois préexistante, le pisé permet de faire des murs monolithes, c'est-à-dire d'un seul bloc.
- le pisé est également un matériau en terre crue ; il est composé de :
 - 70-80 % de terre argileuse (un liant naturel)
 - 20-30 % de sable ou gravier (pour le stabiliser)
 - des fibres végétales ou animales (paille, crin de cheval, 5-10%) contre les fissures
- une fois tassé, le mélange durcit comme de la pierre !



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le pisé : définition, composition

1492

"C'est comme un gâteau sec : terre = farine, sable = sucre, fibres = fruits secs, eau = lait."



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le pisé : définition, composition

1492

→ le terme de 'pisé' vient du verbe 'piser' d'origine latine (pinsare, 'battre') qui signifie tasser fortement



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

1492

Le pisé : définition, composition

→ le terme de 'pisé' vient du verbe 'piser' d'origine latine (pinsare, 'battre') qui signifie tasser fortement

→ le mélange était préparé à base de terre argileuse extraite près de rivières ou dans des carrières

→ les terres du bassin parisien ou de la vallée du Rhône étaient réputées !



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

1492

Le pisé : définition, composition

- le terme de 'pisé' vient du verbe 'piser' d'origine latine (pinsare, 'battre') qui signifie tasser fortement
- le mélange était préparé à base de terre argileuse extraite près de rivières ou dans des carrières
 - les terres du bassin parisien ou de la vallée du Rhône étaient réputées !
- la terre humidifiée était mélangée à la paille et au sable puis piétinée par des animaux (chevaux ou bœufs) ou des ouvriers



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le pisé : fabrication du pisé au Moyen-âge

1492

→ le mélange était versé par couches de 10 à 15 cm entre les planches de bois, appelées 'banches' puis tassé avec un 'pisoir', un outil en bois pesant de 5 à 10 kg



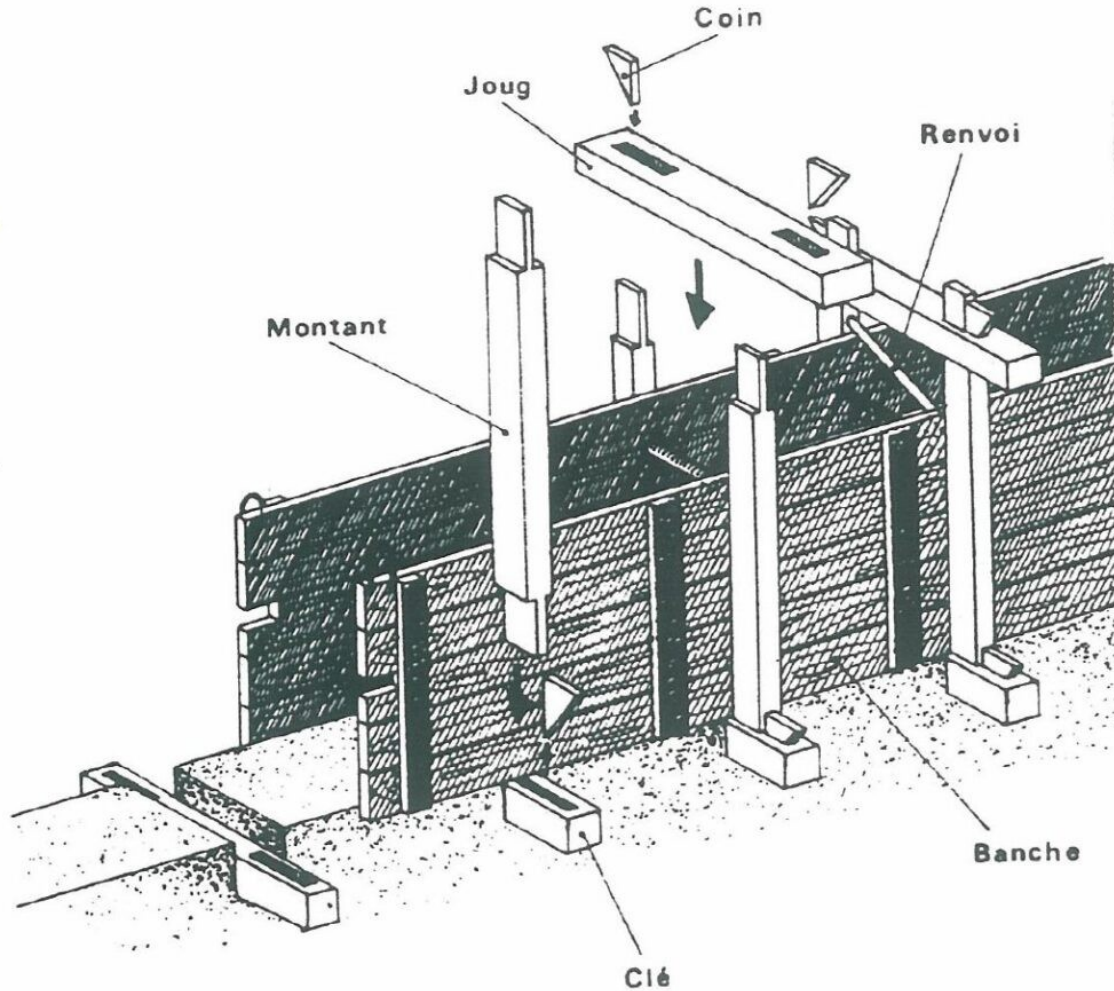
L



476

Le pi

→ le mélan
appelées 'b



w-tech



1492

ches de bois,
nt de 5 à 10 kg



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le pisé : fabrication du pisé au Moyen-âge

1492

→ le mélange était versé par couches de 10 à 15 cm entre les planches de bois, appelées 'banches' puis tassé avec un 'pisoir', un outil en bois pesant de 5 à 10 kg

→ chaque couche était laissée sécher 24 à 48h avant d'ajouter la suivante



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le pisé : fabrication du pisé au Moyen-âge

1492

- le mélange était versé par couches de 10 à 15 cm entre les planches de bois, appelées 'banches' puis tassé avec un 'pisoir', un outil en bois pesant de 5 à 10 kg
- chaque couche était laissée sécher 24 à 48h avant d'ajouter la suivante
- les banches étaient retirées après 3 à 7 jours, laissant un mur lisse et solide.



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



476

Le pisé : fa

→ le mélange éta
appelées 'banche

→ chaque couche

→ les banches éta

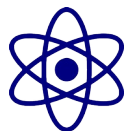


1492

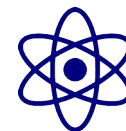
de bois,
e 5 à 10 kg

te

t solide.



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le pisé : propriétés

Comparaison avec le ciment moderne :

Propriétés	Valeur / Détails	Comparaison
Résistance mécanique	1-2 MPa (comme le béton léger)	Moins résistant que la pierre (10-50 MPa)
Isolation thermique	$\lambda = 0,3-0,7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	Équivalent à la brique (0,5 W/m.K)
Inertie thermique	Élevée (régule la température)	Idéal pour les climats chauds / froids
Durabilité	500 – 1000 ans	Résiste aux séismes si bien conçu
Perméabilité	« Respirant » (laisse passer la vapeur d'eau)	Évite les moisissures



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le pisé : utilisations médiévales

1492

Habitations paysannes et rurales :

→ Europe : Alsace, Provence, Espagne (ex. casas de adobe)



Le Moyen-âge : l'âge des ma



Moyen-âge

Âge des matériaux low-

476

Le pisé : utilisations médiévales

Habitations paysannes et rurales :

→ Europe : France, Provence, Espagne (ex. casas de adobe)

Grange en pan de bois avec
garnissage en briques crues
(Innenheim, Bas-Rhin)



492



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des m

476

Le pisé : utilisations m

Habitations paysannes et rurales

→ Europe : France, Provence, Espagne

21, avenue de la République
(Tassin, à côté de Lyon)

492



de Strasbourg



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le pisé : utilisat

Habitations paysannes et

→ Europe : France, Provence,

1492



Maison en pisé (Auvergne)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le

Habitat

→ Europe

1492



Maison en adobe (Renedo de Valdavia, Palencia, Espagne)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le

Habitat

→ Europe

1492



Puerta de Almodovar, dans le quartier juif (Cordoue, Espagne)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le pisé : utilisations médiévales

1492

Habitations paysannes et rurales :

→ Europe : Alsace, Provence, Espagne (ex. casas de adobe)

→ Afrique du Nord, les Ksars (villages fortifiés en pisé)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le

Habitat

→ Europe

→ Afrique



1492



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le pisé : utilisations médiévales

1492

Habitations paysannes et rurales :

→ Europe : Alsace, Provence, Espagne (ex. casas de adobe)

→ Afrique du Nord, les Ksars (villages fortifiés en pisé)

→ Grande muraille de Chine (dynastie Ming) : 30 % de la muraille étaient construits en pisé (le reste en pierres ou briques)

→ certaines sections datant du VII^e S. résistent encore !



476

L

Habit

→ Euro

→ Afri

→ Gran

reste



1492

e



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le pisé : impact environnemental

Avantages du pisé au Moyen-Âge :

- écologique et local : zéro transport, la terre étant prélevée sur place (pas de CO₂ lié au transport)
- biodégradable : le pisé peut retourner à la terre en fin de vie (contrairement au béton)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le pisé : impact environnemental

Avantages du pisé au Moyen-Âge :

- écologique et local : zéro transport, la terre étant prélevée sur place (pas de CO₂ lié au transport)
- biodégradable : le pisé peut retourner à la terre en fin de vie (contrairement au béton)
- économique et accessible : le pisé n'a pas besoin de cuisson (contrairement à la brique)
- main d'œuvre locale : les paysans pouvaient construire eux-même leur maison !



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le pisé : impact environnemental

Avantages du pisé au Moyen-Âge :

- écologique et local : zéro transport, la terre étant prélevée sur place (pas de CO₂ lié au transport)
- biodégradable : le pisé peut retourner à la terre en fin de vie (contrairement au béton)
- économique et accessible : le pisé n'a pas besoin de cuisson (contrairement à la brique)
- main d'œuvre locale : les paysans pouvaient construire eux-même leur maison !
- inertie thermiques : sous climat méditerranéen, le pisé gardait les maison fraîches
- sous climat continental, les habitations en pisé résistaient aux hivers rigoureux si bien protégées (enduit à la chaux)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le pisé : impact environnemental

Inconvénients du pisé au Moyen-Âge :

- sensibilité à l'eau : le pisé peut s'éroder car il se dissout sous une pluie battante ou une inondation
- la solution au moyen-âge consistait à appliquer un enduit à la chaux sur le pisé et en des toits très larges pour protéger les murs...



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le pisé : impact environnemental

Inconvénients du pisé au Moyen-Âge :

- sensibilité à l'eau : le pisé peut s'éroder car il se dissout sous une pluie battante ou une inondation
- la solution au moyen-âge consistait à appliquer un enduit à la chaux sur le pisé et en des toits très larges pour protéger les murs...
- un autre inconvénient était le temps de séchage du pisé : 1 semaine / couche, 1 mois / mur de 1 m
 - en comparaison, une maison en pierre prenait plusieurs années mais était plus résistante.



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le pisé : impact environnemental

Inconvénients du pisé au Moyen-Âge :

- sensibilité à l'eau : le pisé peut s'éroder car il se dissout sous une pluie battante ou une inondation
- la solution au moyen-âge consistait à appliquer un enduit à la chaux sur le pisé et en des toits très larges pour protéger les murs...
- un autre inconvénient était le temps de séchage du pisé : 1 semaine / couche, 1 mois / mur de 1 m
 - en comparaison, une maison en pierre prenait plusieurs années mais était plus résistante.
- résistance mécanique limitée → fragilité aux séismes ;
 - solution = armatures en bois (colombages)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le pisé : impact environnemental

Faible empreinte écologique :

→ bilan carbone : $\sim 5 \text{ kg CO}_2 / \text{m}^3$ (200 kg / m^3 pour le béton moderne!)

→ une maison en pisé de 100 m^2 émet 500 kg de CO_2 contre 20 tonnes pour une maison en béton !!



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le pisé : impact environnemental

Faible empreinte écologique :

- bilan carbone : $\sim 5 \text{ kg CO}_2 / \text{m}^3$ (200 kg / m^3 pour le béton moderne!)
 - une maison en pisé de 100 m^2 émet 500 kg de CO_2 contre 20 tonnes pour une maison en béton !!
- déforestation indirecte : besoin de bois pour les coffrages
 - impact : déforestation modérée d'autant plus que les coffrages peuvent resservir



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le pisé : impact environnemental

Faible empreinte écologique :

- bilan carbone : $\sim 5 \text{ kg CO}_2 / \text{m}^3$ (200 kg / m^3 pour le béton moderne!)
 - une maison en pisé de 100 m^2 émet 500 kg de CO_2 contre 20 tonnes pour une maison en béton !!
- déforestation indirecte : besoin de bois pour les coffrages
 - impact : déforestation modérée d'autant plus que les coffrages peuvent resservir
- recyclabilité : le pisé est un matériaux 'low-tech' et durable !
 - le pisé est 100 % recyclable : une maison démolie retourne à la terre
 - en comparaison, le béton nécessite des granulats neufs et beaucoup d'énergie pour être recyclé.



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le pisé : impact environnemental

Faible empreinte écologique :

- bilan carbone : $\sim 5 \text{ kg CO}_2 / \text{m}^3$ (200 kg / m^3 pour le béton moderne!)
 - une maison en pisé de 100 m^2 émet 500 kg de CO_2 contre 20 tonnes pour une maison en béton !!
- déforestation indirecte : besoin de bois pour les coffrages
 - impact : déforestation modérée d'autant plus que les coffrages peuvent resservir
- recyclabilité : le pisé est un matériaux 'low-tech' et durable !
 - le pisé est 100 % recyclable : une maison démolie retourne à la terre
 - en comparaison, le béton nécessite des granulats neufs et beaucoup d'énergie pour être recyclé.
- le pisé utilise des matériaux souvent disponibles à proximité → transport limité



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le pisé : aspect sociétal

Le pisé : le matériau des pauvres

- associé aux paysans et aux communautés rurales
 - la pierre était réservée aux châteaux et églises, symboles du pouvoir
- transmission du savoir : les techniques se transmettaient de génération en génération
 - pas de traces écrites avant le XV^e S.

Innovations modernes inspirées du pisé :

Brique de terre compressée (BTC) :

- la brique de terre compressée est la version moderne du pisé, avec stabilisants naturels (chaux ou ciment à faible dose)
- la BTC requiert l'utilisation d'une presse manuelle, mécanique ou hydraulique
- la matière utilisée est une terre sablo-argileuse souvent additionnée de ciment ou chaux (6-8%)
- l'utilisation d'une presse permet d'avoir des éléments parfaitement calibrés

TODAY

Le Moy

w-tech

TODAY

Innovations

Brique de terre com

→ la brique de terre com
ciment à faible dose)

→ la BTC requiert l'utili

→ la matière utilisée es

→ l'utilisation d'une pr



isants naturels (chaux ou

lique

ciment ou chaux (6-8%)

rés

Immeuble de l'Orangerie
(Lyon)

TODAY

Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech

TODAY



matériaux naturels (chaux ou

ou chaux (6-8%)

Immeuble Ikone
(Grenoble)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Comparaison pisé - torchis

1492

Critère	Pisé	Torchis
Composition	Terre + sable + fibres (5-10%)	Terre + paille (20-30%)
Résistance	1-2 MPa	0,1-0,5 MPa
Isolation	Élevée (inertie thermique)	Très élevée (fibres isolantes)
Durabilité	+ 500 ans	50-100 ans
Utilisation	Murs porteurs	Remplissage de colombages



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Pisé : conclusion

1492

"Le pisé médiéval montre comment nos ancêtres ont su construire des habitats durables avec des ressources locales. Mais avec la révolution industrielle, l'Homme va se tourner vers des matériaux plus résistants, comme l'acier et le béton... au prix d'un impact environnemental bien plus lourd. Comment réinventer ces techniques ancestrales pour répondre aux défis du XXI^e siècle ?"



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le bois : le matériau polyvalent !

1492



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le bois : le matériau polyvalent !

1492

Essences et techniques :

→ chêne : charpentes, meubles

→ sapin : toitures, planchers

→ châtaigner : poteaux, résiste aux insectes



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le bois : le matériau polyvalent !

1492

Essences et techniques :

→ assemblage : tenons-mortaise, queue d'aronde (sans clous)

→ traitement : bouillie bordelaise (sulfate de cuivre, CuSO_4) contre les champignons



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

1492

Es



mortaise

tenon

nt !

Queue d'aronde



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le bois : le matériau polyvalent !

1492

Propriété	Avantages	Inconvénients
Résistance	50 – 100 MPa (sens parallèle du fil)	Pourrit en milieu humide
Isolation	$\lambda = 0,12-0,18 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	Inflammable si non traité
Durabilité	+ 100 ans	insectes



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le bois : impact environnemental

Déforestation :

- 80 % des forêts européennes détruites entre 500 et 1850 !
 - ex. la Forêt Noire en Allemagne a perdu 50 % de sa surface au Moyen-âge



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le bois : impact environnemental

Déforestation :

- 80 % des forêts européennes détruites entre 500 et 1850 !
 - ex. la Forêt Noire en Allemagne a perdu 50 % de sa surface au Moyen-âge

Bilan carbone :

- stockage de CO_2 : 1 m³ de bois séquestre 1 tonne de CO_2
 - évidemment : tout est réémis si le bois est brûlé ou s'il pourrit !



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le bois : exemples historiques

Charpente médiévale :

→ Notre-Dame de Paris (chêne du XIII^e S.)





Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le bois : exemples historiques

Charpente médiévale :

→ Notre-Dame de Paris (chêne du XIII^e S.)

Navires vikings et caravelles

Drakkar en chêne
(IX^e – XI^e S.)



Caravelle
(XV^e S.)





Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le bois : exemples historiques

Charpente médiévale :

→ Notre-Dame de Paris (chêne du XIII^e S.)

Navires vikings et caravelles

Maisons à pans de bois

→ les pans de bois intégraient des colombages, colombes et colombelles, d'où la désignation plus commune de maisons à colombages



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le

Charpe

→ Notre

Navire

Maison

→ les pa
commu



tion plus

La Maison Penchée
(Rouen)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le bois :

Charpente mé

→ Notre-Dame de

Navires vikings

Maisons à pans

→ les pans de bois
commune de ma



désignation plus

La Maison du Dauphin
(Troyes)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

Fabrication :

- mélange de silice (sable, 70%), soude (natron ou cendres, 15%), chaux (10%)
- fondu à 1 000-1 200°C



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

Fabrication :

- mélange de silice (sable, 70%), soude (natron ou cendres, 15%), chaux (10%)
- fondu à 1 000-1 200°C

Technique du soufflage (Ier S. av. J-C., Syrie):

- le verre fondu est prélevé avec une canne à travers laquelle l'artisan souffle
- des outils en bois sont utilisés pour façonner les objets soufflés (vases, bouteilles)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

Les avancées du Moyen-âge :

→ amélioration de la qualité optique : du verre plus transparent, avec moins de bulles

→ le verre de l'Antiquité était épais et trouble du fait des bulles et impuretés



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

Les avancées du Moyen-âge :

- amélioration de la qualité optique : du verre plus transparent, avec moins de bulles
- le verre de l'Antiquité était épais et trouble du fait des bulles et impuretés
- au Moyen-âge, les fours deviennent plus chauds



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

Les avancées du Moyen-âge :

- amélioration de la qualité optique : du verre plus transparent, avec moins de bulles
 - le verre de l'Antiquité était épais et trouble du fait des bulles et impuretés
 - au Moyen-âge, les fours deviennent plus chauds
 - utilisation de bois de hêtre : meilleure combustion que le pin



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

Les avancées du Moyen-âge :

- amélioration de la qualité optique : du verre plus transparent, avec moins de bulles
 - le verre de l'Antiquité était épais et trouble du fait des bulles et impuretés
 - au Moyen-âge, les fours deviennent plus chauds
 - utilisation de bois de hêtre : meilleure combustion que le pin
 - ajout de cendre de fougère pour clarifier le verre (réduction du nombre de bulles)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

Les avancées du Moyen-âge :

→ amélioration de la qualité optique : une composition chimique mieux maîtrisée



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

Les avancées du Moyen-âge :

→ amélioration de la qualité optique : une composition chimique mieux maîtrisée

→ moins d'impuretés dans le verre (par ex. du fer, qui donne une couleur verte)
grâce à des sables plus purs (ex. sable de Fontainebleau ou de Venise)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

Les avancées du Moyen-âge :

- amélioration de la qualité optique : une composition chimique mieux maîtrisée
 - moins d'impuretés dans le verre (par ex. du fer, qui donne une couleur verte) grâce à des sables plus purs (ex. sable de Fontainebleau ou de Venise)
 - ajout de dioxyde de manganèse MnO_2 , pour neutraliser la couleur verte



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

La pyrolusite, le 'savon des verriers' :

→ l'ajout de pyrolusite permettait de rendre le verre plus transparent, en neutralisant sa couleur verte due à la présence de fer

Bloc de
pyrolusite MnO_2





Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

La pyrolusite, le 'savon des verriers' :

→ ce surnom donné à la pyrolusite lui vient de son rôle chimique dans la clarification du verre :



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

La pyrolusite, le 'savon des verriers' :

→ ce surnom donné à la pyrolusite lui vient de son rôle chimique dans la clarification du verre :

→ le verre était produit à partir de sable (silice, SiO_2) et de soude qui sert de fondant



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

La pyrolusite, le 'savon des verriers' :

→ ce surnom donné à la pyrolusite lui vient de son rôle chimique dans la clarification du verre :

→ le verre était produit à partir de sable (silice, SiO_2) et de soude qui sert de fondant

→ il était souvent de couleur verte ou brunâtre à cause des impuretés de fer (Fe^{2+} , Fe^{3+}) présentes dans le sable



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

La pyrolusite, le 'savon des verriers' :

→ ce surnom donné à la pyrolusite lui vient de son rôle chimique dans la clarification du verre :

→ le verre était produit à partir de sable (silice, SiO_2) et de soude qui sert de fondant

→ il était souvent de couleur verte ou brunâtre à cause des impuretés de fer (Fe^{2+} , Fe^{3+}) présentes dans le sable

→ la pyrolusite permettait de neutraliser cette couleur



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

La pyrolusite, le 'savon des verriers' :

→ la pyrolusite agit comme un oxydant puissant :

→ elle oxyde les ions ferreux Fe^{2+} , verts, en ions ferriques Fe^{3+} , jaunes, moins colorants



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

La pyrolusite, le 'savon des verriers' :

→ la pyrolusite agit comme un oxydant puissant :

→ elle oxyde les ions ferreux Fe^{2+} , verts, en ions ferriques Fe^{3+} , jaunes, moins colorants

→ elle décolore le verre en neutralisant les teintes indésirables, rendant le verre plus incolore et transparent, comme le 'cristallo' vénitien



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

La pyrolusite, le 'savon des verriers' :

→ la pyrolusite agit comme un oxydant puissant :

→ elle oxyde les ions ferreux Fe^{2+} , verts, en ions ferriques Fe^{3+} , jaunes, moins colorants

→ elle décolore le verre en neutralisant les teintes indésirables, rendant le verre plus incolore et transparent, comme le 'cristallo' vénitien

→ selon la réaction :





Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

La recette du cristallo :

→ Mélange de :

sable de quartz : SiO_2

cendre de fougère : source de potasse, K_2O , un fondant

pyrolusite, MnO_2 : pour décolorer le verre



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

Les avancées du Moyen-âge, pour résumer :

- amélioration de la qualité optique : une composition chimique mieux maîtrisée
 - moins d'impuretés dans le verre (par ex. du fer, qui donne une couleur verte) grâce à des sables plus purs (ex. sable de Fontainebleau ou de Venise)
 - ajout de manganèse pour neutraliser la couleur verte
 - résultat : un verre plus transparent et résistant



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

Les avancées du Moyen-âge : la méthode du 'manchon fendu'



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

Les avancées du Moyen-âge : la méthode du 'manchon fendu'

→ un cylindre de verre soufflé est créé



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

Les avancées du Moyen-âge : la méthode du 'manchon fendu'

→ un cylindre de verre soufflé est créé, appelé manchon

→ qui est ensuite transformé en tube par ouverture des deux extrémités



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

Les avancées du Moyen-âge : la méthode du 'manchon fendu'

→ un cylindre de verre soufflé est créé

→ qui est ensuite transformé en tube par ouverture des deux extrémités

→ une fois déplié, on obtient une galette de verre plat



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

Les avancées du Moyen-âge : la méthode du 'manchon fendu'

- un cylindre de verre soufflé est créé
- qui est ensuite transformé en tube par ouverture des deux extrémités
- une fois déplié, on obtient une galette de verre plat
- c'est une innovation clé pour les vitraux et miroirs !



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science

1492

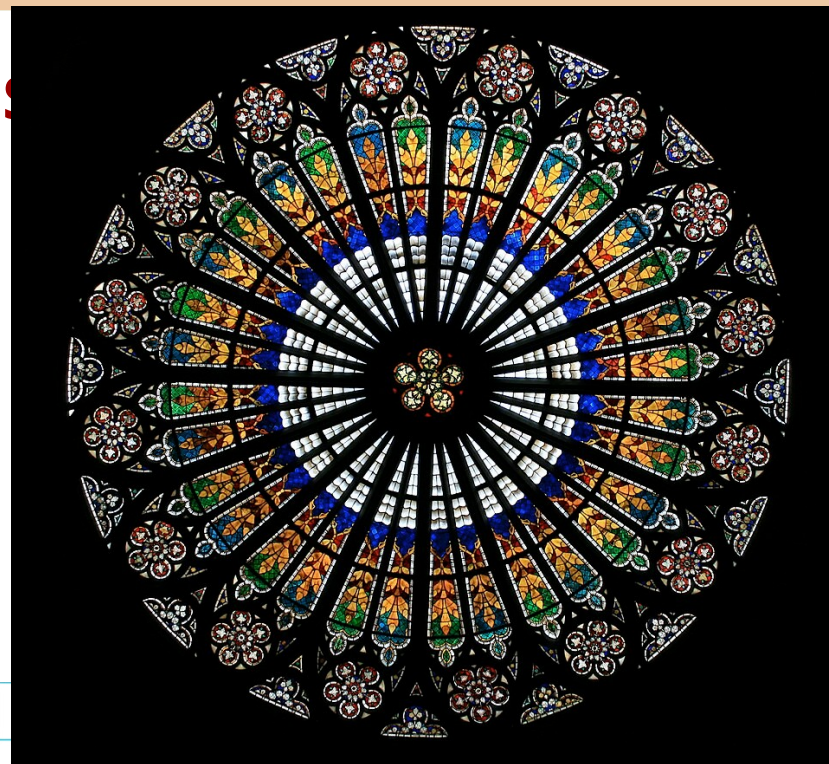
Applications :

→ vitraux des cathédrales

Rosace de la cathédrale
de Strasbourg (XII^e S.)

Oxydes métalliques :

- Co pour le bleu
- Cu pour le rouge





Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science

Applications :

→ vitraux des cathédrales

→ miroirs vénitiens (à partir du XV^e S.)

C'est au XVII^e S. que la production atteint son apogée.



1492



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

La spécialisation des centres de production

→ Venise et Murano : le monopole sur le verre de qualité !



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

La spécialisation des centres de production

→ Venise et Murano : le monopole sur le verre de qualité !

→ les verriers vénitiens développent des techniques secrètes
(ex. verre cristallo, transparent et incolore)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

La spécialisation des centres de production

→ Venise et Murano : le monopole sur le verre de qualité !

→ les verriers vénitiens développent des techniques secrètes
(ex. verre cristallo, transparent et incolore)

→ il est interdit d'exporter les savoir-faire sous peine de mort !!



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

La spécialisation des centres de production

→ Venise et Murano : le monopole sur le verre de qualité !

→ les verriers vénitiens développent des techniques secrètes
(ex. verre cristallo, transparent et incolore)

→ il est interdit d'exporter les savoir-faire sous peine de mort !!

Flasque gourde de pèlerin
Cristal de Venise avec dorure





Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

La spécialisation des centres de production

→ D'autres centres verriers

→ En Forêt Noire (Allemagne) : verres pour les lunettes (XV^e S.)

→ À Nevers, France : verre pour les bouteilles (XVI^e S.)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : le verre comme outil scientifique

1492

Invention des lunettes (XIII^e S.)

→ le verre soufflé poli à usage optique est inventé en Italie au XIII^e S.

→ par exemple, Nicolas de Cues (1401-1464) s'en servait étudier l'optique

→ incidence directe sur la science : Galilée (1564-1642) utilisera plus tard des lentilles vénitiennes pour sa lunette astronomique (1609)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : le verre comme outil scientifique

1492

Miroirs et exploration du monde

→ les miroirs vénitiens, apparus au XV^e S., sont la première production de miroirs plats avec du verre ultra-purs et de l'amalgamation de mercure pour le reflet

→ l'apparition de ces miroirs va permettre des observations plus précises que jamais (astronomie, anatomie)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le verre soufflé : l'Art et la Science !

1492

Propriété	Avantages	Inconvénients
Transparence	90 % de transmission lumineuse	Dur mais fragile
Inertie chimique	Résiste à la corrosion	Sensible aux chocs thermiques
Recyclabilité	100 % recyclable	Il faut chauffer à +1000°C



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le verre soufflé : impacts environnementaux

Déforestation et pollution

- bois : un four à verre consommait 10 à 20 stères de bois par jour !
 - déforestation massive autour des zones de production (ex. les forêts vénitiennes)
- émission de CO_2 : la combustion du bois libérait des tonnes de CO_2



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le verre soufflé : société et économie

Corporation des verriers

- statut élevé : les verriers étaient des artisans respectés (salaire élevé, exemptions fiscales...)
- à Venise, les verriers étaient confinés à Murano pour éviter la fuite des secrets !
- commerce : le verre vénitien était exporté dans toute l'Europe !
ex. les miroirs vendus dans les cours royales



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le verre soufflé : société et économie

Durabilité et recyclabilité

- le verre médiéval était 100 % recyclable, comme aujourd'hui
- les débris de verre étaient refondus pour faire de nouveaux objets
- à titre de comparaison, aujourd'hui seulement 70 % du verre est recyclé (OCDE, 2023)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le verre soufflé : société et économie

Limites planétaires

- déforestation : les fours à verre médiévaux préfigurent les défis industriels modernes comme la déforestation pour le papier
- pollution : les émissions de CO_2 des fours rappellent les enjeux actuels comme les cimenteries



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le verre soufflé : société et économie

La pyrolusite : la question du compromis !

La pyrolusite, le 'savon des verriers', illustre comment une simple impureté peut transformer un matériau ordinaire en une innovation révolutionnaire. Sans elle, les verres optiques de la Renaissance n'auraient pas existé, et Galilée n'aurait pas pu observer les lunes de Jupiter. Pourtant, son usage pose déjà la question des compromis entre progrès technique et santé environnementale – un dilemme toujours actuel avec les matériaux modernes."



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

L'Acier Damassé : l'Arme Légendaire !

1492



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

L'Acier Damassé : l'Arme Légendaire !

1492

Développement et utilisation de l'acier

- avec les progrès de la métallurgie à la fin du Moyen Âge, l'acier gagna en importance pour la fabrication d'armes
- l'acier, un alliage de fer et de carbone, offrait des avantages considérables en termes de dureté et de résistance par rapport au fer forgé pur
- l'art de produire de l'acier de haute qualité était un secret jalousement gardé par les meilleurs armuriers



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

L'Acier Damassé : l'Arme Légendaire !

1492

Développement et utilisation de l'acier

- les forgerons médiévaux développèrent diverses techniques pour augmenter la teneur en carbone
- notamment en insérant du fer dans du charbon ou des os pendant le chauffage
- l'acier résultant pouvait être encore amélioré par trempe ce qui conduisait à une combinaison optimale de dureté et de ténacité



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

L'Acier Damassé : l'Arme Légendaire !

1492

Fabrication

- fer (bas carbone) + charbon de bois (source de carbone) sont chauffés à 1 200 - 1 300°C dans un bas-fourneau
- le damassage est obtenu en alternant des couches de fer et des couches d'acier (fer + 0,5 à 1,5 % de C, soudées par martelage puis repliées pour créer des motifs
- l'acier damassé combine les avantages du fer et ceux de l'acier



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



476

L'A

1492





Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

L'Acier Damassé : l'Arme Légendaire !

1492

Propriété	Avantages	Inconvénients
Dureté	50 – 60 HRC (comme acier moderne)	Fragile si mal trempé
Résistance	Lames flexibles et tranchantes	Corrosion si mal entretenu
Motifs	Purement esthétiques	Difficiles à reproduire



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



L'acier damassé : impacts environnementaux et sanitaires

Déforestation :

→ 1 tonne de charbon de bois pour 100 kg d'acier

Pollution :

→ les scories (résidus de fusion) sont riches en métaux lourds (Pb, As)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

L'Acier Damassé : l'Arme Légendaire !

1492



Sabre Shamshir Arabe





Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

L'Acier Damassé : l'Arme Légendaire !

1492

Exemples historiques :

→ les sabres arabes (VIII^e – XVII^e S.) étaient légendaires pour leur tranchant

→ les épées Viking (Ulberht, IX^e S.) étaient faites d'un acier damassé importé du Moyen-Orient



Le Moyen Âge



476

L'Acier Dama

Exemples historiques

→ les sabres arabes (VIII^e s.)

→ les épées Viking (Ulber



x low-tech



1492

nchant

mporté du Moyen-Orient



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

L'Acier Damassé : l'Arme Légendaire !

1492

Dimension sociétale :

→ l'acier damassé était importé en Europe via les routes de la soie

→ coûteux, il était réservé aux élites (chevaliers, sultans)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

L'Armure de plates : XIII^e – XVI^e S.

Développement :

- apparues au XIII^e pour renforcer la cotte de mailles
- du fait des nombreuses guerres et le progrès des armes de tir
- la métallurgie et l'art de la forge ont conduit à des armures complètes et néanmoins légères





Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

L'Armure de plates : XIII^e – XVI^e S.

Le fer comme matériau de base :

- métal préféré des forgerons pour sa disponibilité et ses propriétés
- depuis l'Antiquité, l'extraction et le traitement du fer furent continuellement améliorés...
- ... jetant les bases d'armure sans cesse améliorées dont 'la plate' constitue l'apogée





Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

L'Armure de plates : XIII^e – XVI^e S.

Le fer comme matériau de base :

- la qualité du fer était cruciale pour la performance de l'armure
- les forgerons médiévaux étaient passés maîtres dans l'art de fondre le minerai de fer et affiner la fonte brute par des chauffages et des martelages répétés
- ce processus, appelé 'affinage', réduisait la teneur en carbone du fer, le rendait plus mou et améliorait sa capacité à être façonné





Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

L'Armure de plates : XIII^e – XVI^e S.

1492

Autres matériaux utilisés :

→ Le cuir était un matériau indispensable dans la fabrication des armures

→ il servait de support pour les plaques et éviter les frottements, ainsi qu'à faire des lanières

→ pour relier les plaques, on utilisait aussi des rivets en cuivre ou laiton (Cu + Zn)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

1492

Le Cuir : un matériau à part entière ?

Définition d'un matériau :

- un matériau est une substance utilisée pour fabriquer des objets, caractérisée par ses propriétés physiques et chimiques
- le cuir remplit ces critères



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le Cuir : un matériau à part entière ?

1492

Propriétés :

→ résistance à la traction : 20-40 Mpa (comme certains plastiques)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le Cuir : un matériau à part entière ?

1492

Propriétés :

→ résistance à la traction : 20-40 Mpa (comme certains plastiques)

→ le cuir est flexible : adaptable à des formes complexes comme des vêtements ou des chaussures



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

1492

Le Cuir : un matériau à part entière ?

Propriétés :

- résistance à la traction : 20-40 Mpa (comme certains plastiques)
- le cuir est flexible : adaptable à des formes complexes comme des vêtements ou des chaussures
- durabilité : plus de 50 ans , s'il est bien entretenu



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

1492

Le Cuir : un matériau à part entière ?

Propriétés :

- résistance à la traction : 20-40 Mpa (comme certains plastiques)
- le cuir est flexible : adaptable à des formes complexes comme des vêtements ou des chaussures
- durabilité : plus de 50 ans , s'il est bien entretenu
- d'origine animale, le tannage chimique ou végétal peut le rendre imputrescible



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le Cuir : un matériau à part entière ?

1492

Fabrication médiévale :

→ préparation : la peau était trempée dans de la chaux pour enlever les poils



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le Cuir : un matériau à part entière ?

1492

Fabrication médiévale :

→ préparation : la peau était trempée dans de la chaux pour enlever les poils

→ écorchage : c'est le nettoyage des résidus de chair



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

1492

Le Cuir : un matériau à part entière ?

Fabrication médiévale :

- préparation : la peau était trempée dans de la chaux pour enlever les poils
- écorchage : c'est le nettoyage des résidus de chair
- tannage : peut être végétal (écorce de chêne ou de mimosa) ou minéral (sels de chrome ; Moyen-âge tardif)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le Cuir : un matériau à part entière ?

1492

Fabrication médiévale :

- préparation : la peau était trempée dans de la chaux pour enlever les poils
- écorchage : c'est le nettoyage des résidus de chair
- tannage : peut être végétal (écorce de chêne ou de mimosa) ou minéral (sels de chrome ; Moyen-âge tardif)
- le graissage aux huiles essentielles permet de l'assouplir



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le Cuir : un matériau à part entière ?

1492

Fabrication médiévale :

- préparation : la peau était trempée dans de la chaux pour enlever les poils
- écorchage : c'est le nettoyage des résidus de chair
- tannage : peut être végétal (écorce de chêne ou de mimosa) ou minéral (sels de chrome ; Moyen-âge tardif)
- le graissage aux huiles essentielles permet de l'assouplir
- des teintures ocres ou indigos servaient ensuite à le mettre en couleur



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

Le Cuir : un matériau à part entière ?

1492

Usage	Exemple	Impact environnemental
Armures	Cuir bouilli (rigide comme du bois!)	Tannage végétal = faible impact
Parchemins	Peaux de veau / mouton	Déforestation pour l'élevage
Vêtements	Bottes, ceintures	Teintures toxiques (As)
Boucliers	Renforts en cuir + métal	/
Selles et harnachements	Équipement de cavalerie	/



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Le cuir : impacts environnementaux

Élevage intensif :

- déforestation pour faire les pâturages (ex. Angleterre médiévale)
- tannage minéral : pollution des rivières par les sels de chrome (à partir du XIV^e S.)
- alternatives : utilisation de cuir végétal, moins polluant mais plus long à fabriquer



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Moyen-âge

Âge des matériaux low-tech

476

1492

Le Cuir : un matériau à part entière ?

Dimension sociétale :

- tanneur : un métier méprisé (odeurs nauséabondes, travail dans des quartiers réservés, près des rivières)
- symbolique : robustesse (armures de cuir souple ou rigide) par opposition à la soie (noblesse)



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Matériau	Avantages	Inconvénients	Durabilité
Torchis	Biodégradable, isolant	Fragile à l'humidité	50 – 100 ans
Pisé	Inertie thermique, durable	Long séchage	+500 ans
Bois	Renouvelable, stocke le CO ₂	Déforestation	+100 ans
Verre	Recyclable, inerte chimiquement	Énergie-intensive	millénaires
Acier damassé	Résistant, esthétique	Polluant (scories)	siècles
Cuir	Flexible, résistant	Tannage polluant	+50 ans



Le Moyen-âge : l'âge des matériaux low-tech



Ces matériaux médiévaux montrent comment nos ancêtres ont su innover avec des ressources locales et limitées. Mais avec la révolution industrielle, l'Homme va découvrir des matériaux aux propriétés extraordinaires... et aux impacts dévastateurs. Comment concilier progrès technique et respect des limites planétaires ?