

Histoire et Archéologie des Techniques

La métallurgie TD

Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
UFR 03 – Histoire de l'art et archéologie
Licence 2, semestre 4 (2022-2023)

Valentin LOESCHER
Valentin.Loesch@etu.univ-paris1.fr



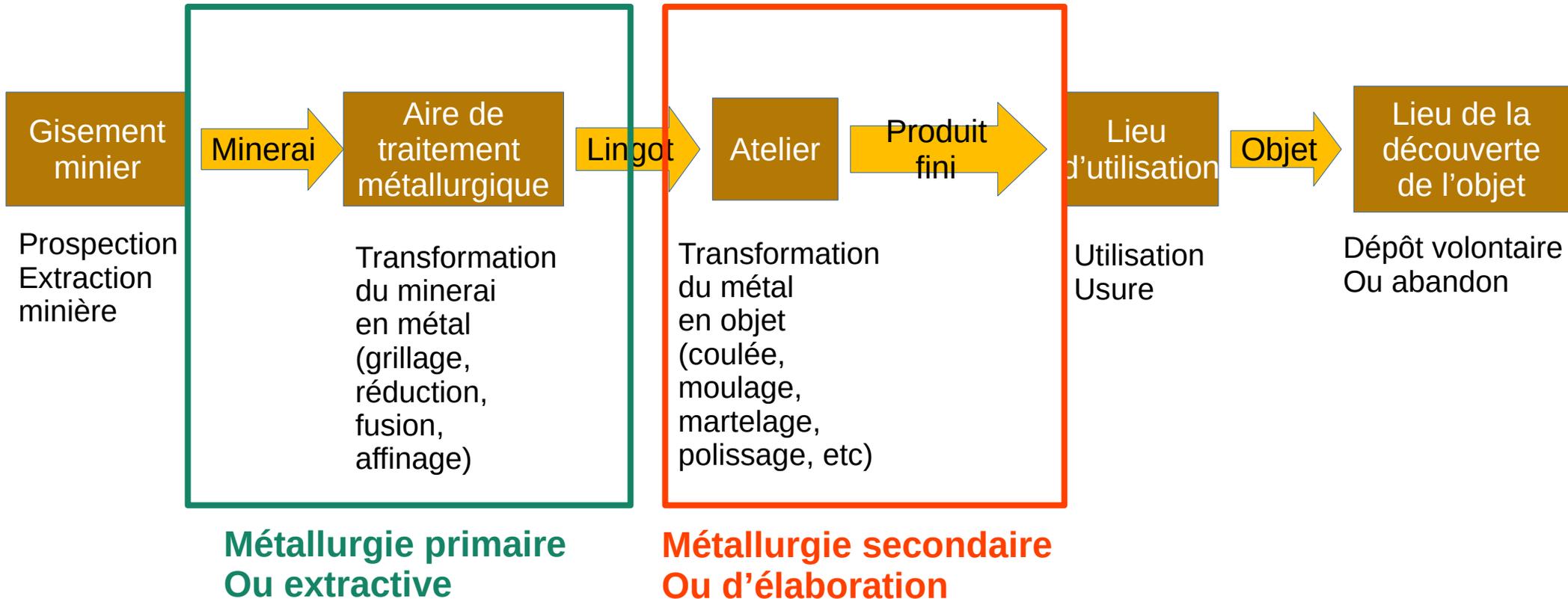
Plan du TD

- 1 – La métallurgie : quels vestiges archéologiques ?
- 2 – Exemple de fouille d'une structure métallurgique - Terrain et analyses
- 3 – Focus : technique de la fonte à la cire perdue

Introduction : Notions utiles

Métallurgie : industrie de la fabrication des métaux et alliages

Chaîne opératoire théorique de la métallurgie (d'après Ambert 2005)



Introduction : Notions utiles

Minerai : roche contenant des minéraux, notamment des métaux, en quantité suffisamment importante pour être exploitée.

Cuivre : Point de fusion = 1084°C

Étain : Point de fusion = 232°C

Fondant : produit qui sert à abaisser la température du point de fusion d'un autre élément.

ex : L'étain pour le cuivre 1150°C → 850°C

Alliage : combinaison d'éléments métalliques par fusion

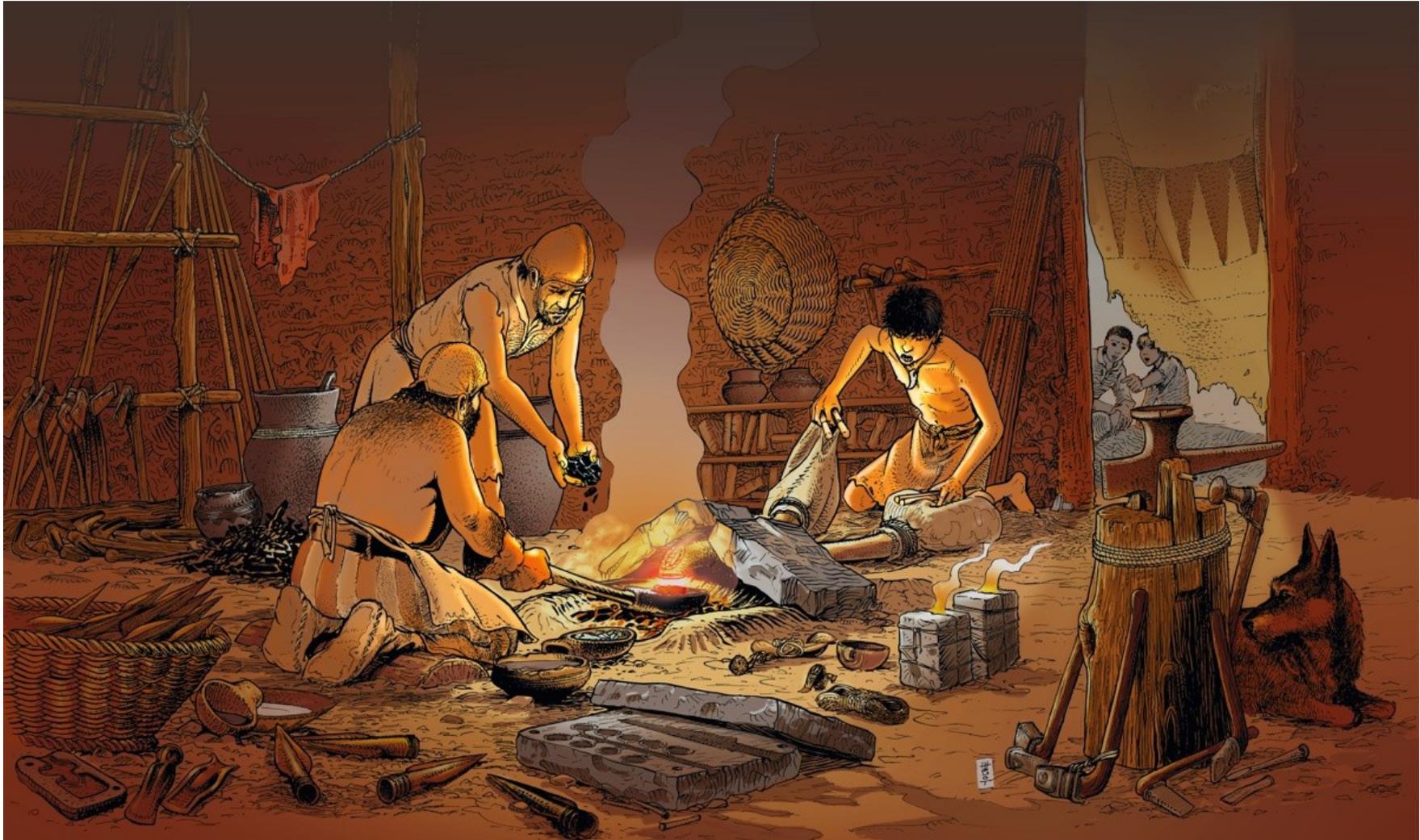
Alliages cuivreux :

Cuivre/Arsenic

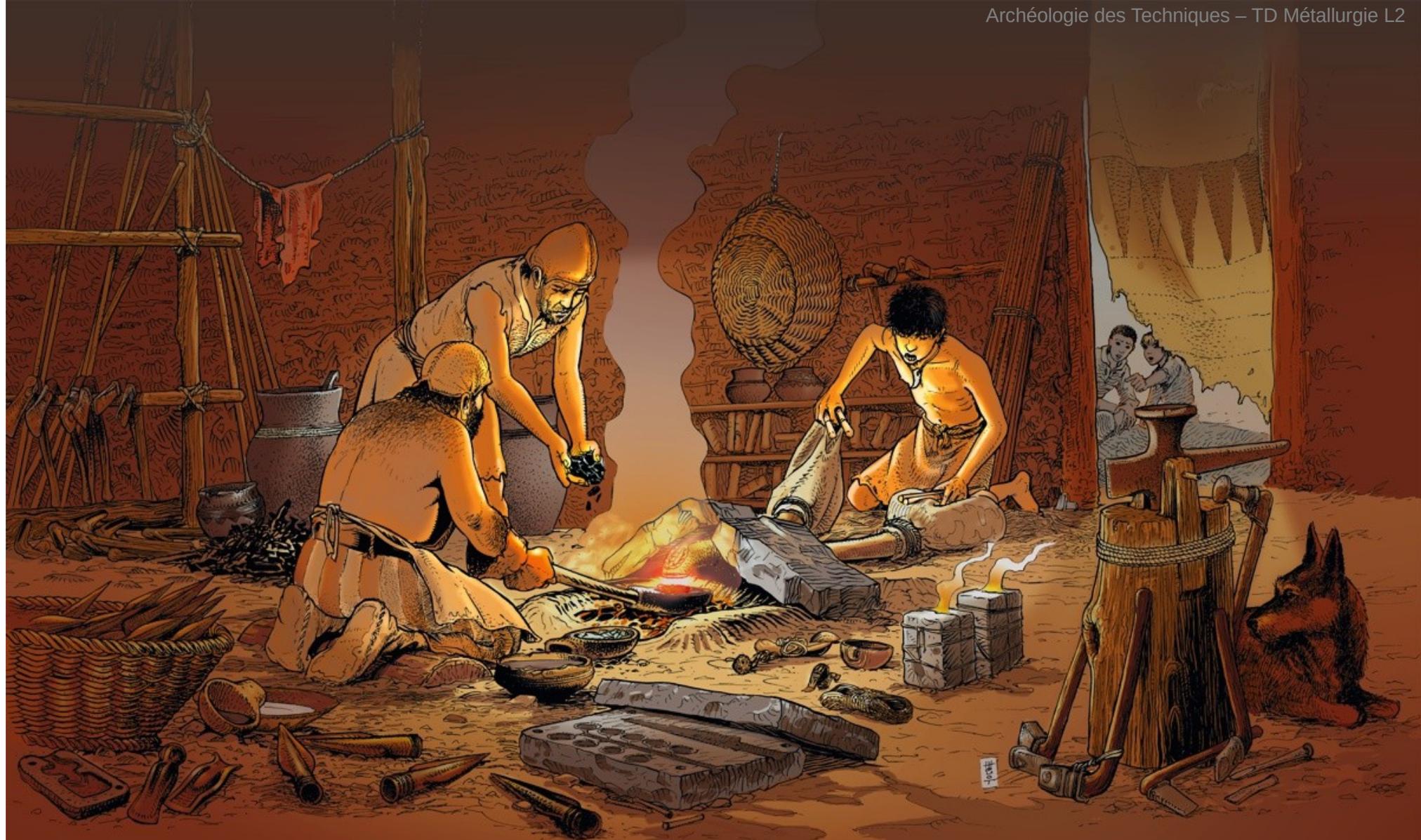
Cuivre/Étain

Cuivre/étain = **Bronze**

1. La métallurgie : quels vestiges archéologiques ?



Dessin d'un atelier de bronzier du Bronze Final – Dessin d'A. HOUOT dans Des Alpes au Léman, images de la Préhistoire - A. GALLAY 2008



1. La métallurgie : quels vestiges archéologiques ?

Tuyères

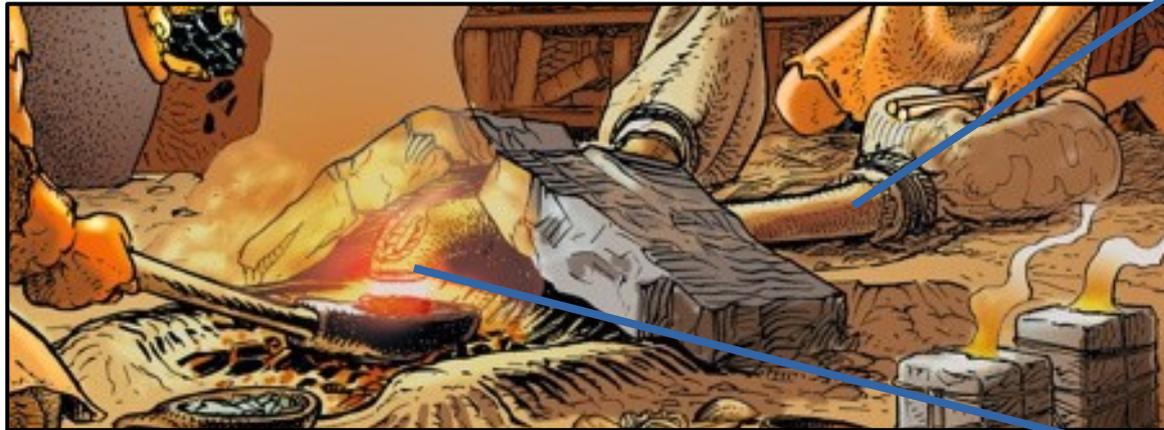
Ventilation forcée avec des soufflets à main



Bouches-du-Rhône, La Bastide Neuve (Bronze Ancien)



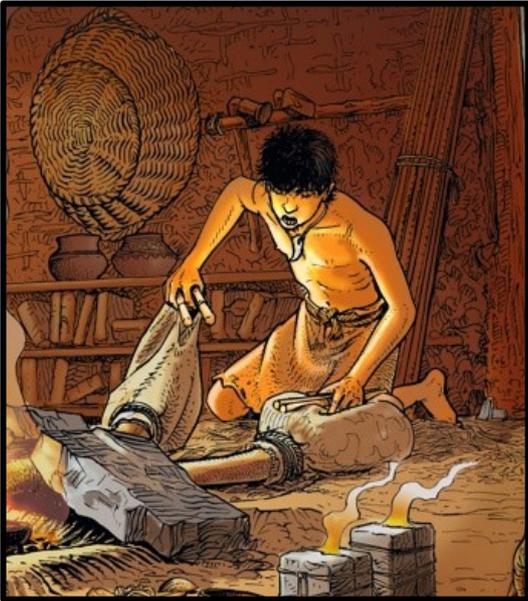
Lac de Genève (Bronze Final)



1. La métallurgie : quels vestiges archéologiques ?

Tuyères : alternative pour la ventilation

Ventilation forcée par le souffle humain
Souffleurs munis de pipes



VS



*Archéologie expérimentale
Archéosite d'Aubechies-Beloeil (Belgique)*

1. La métallurgie : quels vestiges archéologiques ?



Creusets d'un atelier de bronzier
(3e-1er s. av.) Calvados, Ifs, ferme gauloise
[Caen, Musée de Normandie]



Creuset expérimental lors de la coulée
(Arkheofabrik Clichés : Didier Barrau,
CG du Val-de-Marne)

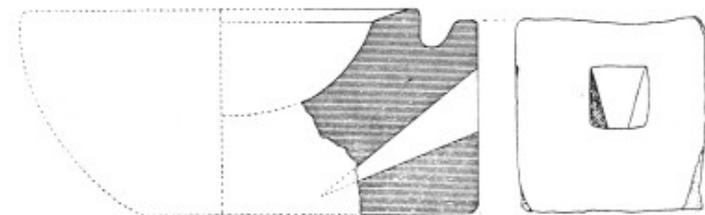
Creusets



Creuset d'Aghia Photia
(Crète)

MAI-II

[Musée d'Aghios Nikolaos]
(d'ap. Oberweiler 2005,
vol.III, C002)



Creuset de Kastri (Syros)

CA II-III

[Musée Athènes 5238]

(d'ap. Oberweiler 2005, vol.III, C003)

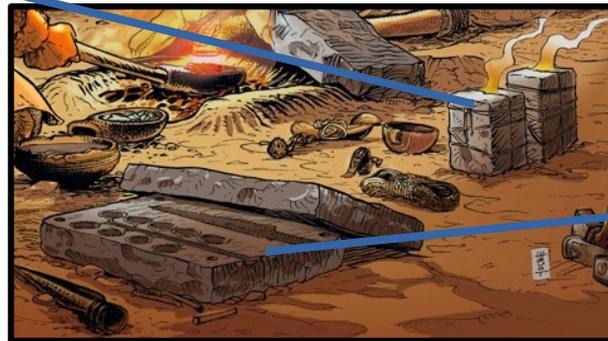
1. La métallurgie : quels vestiges archéologiques ?

Moules

monovalves
bivalves



*Moule bivalve en pierre
pour des haches à talon
Manche, Montaigu-la-Brisette
[Inrap, Hervé Paitier]*



*Moules monovalves
(~1850 av. J.-C.)
Crète, Malia, Quartier Mu, atelier de fondeur
[d'ap. Oberweiler 2005]*

1. La métallurgie : quels vestiges archéologiques ?

Charbon et foyer

- **Foyer** : Fosse avec un sol rubéfié et inclusions de charbons
- **Charbon** de bois et d'autres combustibles possibles (bois vert, crottin)



*Foyer de métallurgie extractive
La Capitelle du Broum (Hérault)*

1. La métallurgie : quels vestiges archéologiques ?

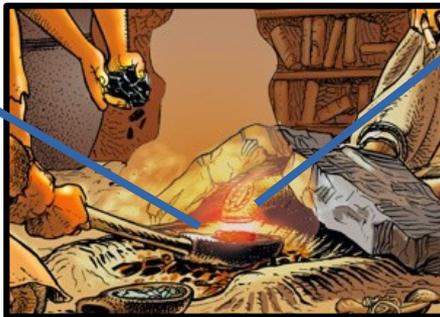
Déchets de fonte et d'extraction

Scories

« Résidu solide des opérations de traitement des minerais métalliques, de l'affinage et de la mise en forme de certains métaux, surnageant généralement dans le métal en fusion. »
Ce sont des amas d'oxydes et de silicates.

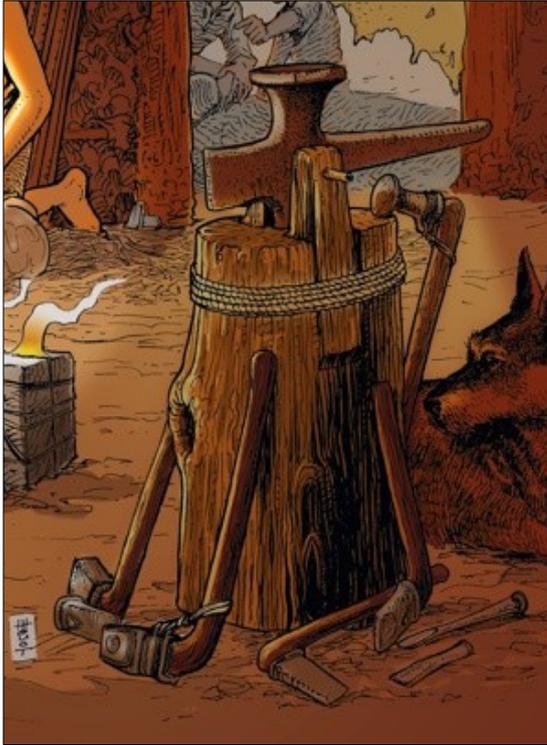


Gouttelettes de métal



1. La métallurgie : quels vestiges archéologiques ?

Outils



*dépôt d'outils métalliques de la Petite Laugère
Génelard, Saône-et-Loire
[Châlons-sur-Saône, Musée Vivant Denon]*

1. La métallurgie : quels vestiges archéologiques ?

Outils

dépôt d'outils métalliques de la Petite Laugère
Génélard, Saône-et-Loire
[Châlons-sur-Saône, Musée Vivant Denon]



1. La métallurgie : quels vestiges archéologiques ?

Outils



Tas



Fig. 1 – L'enclume en bronze des Gravières à Fontanières (Creuse) (cliché : D. Dussot).

(tiré de Dussot, Gomez de Soto 2021)

1. La métallurgie : quels vestiges archéologiques ?

Outils



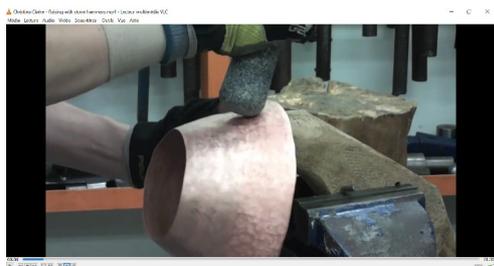
Marteaux à douille

Tas

Matrices

1. La métallurgie : quels vestiges archéologiques ?

Outils



Expérimentation dinanderie
@ C. Clarke



Expérimentation hache
en cuivre natif
[Lien vidéo @ V. Martin](#)



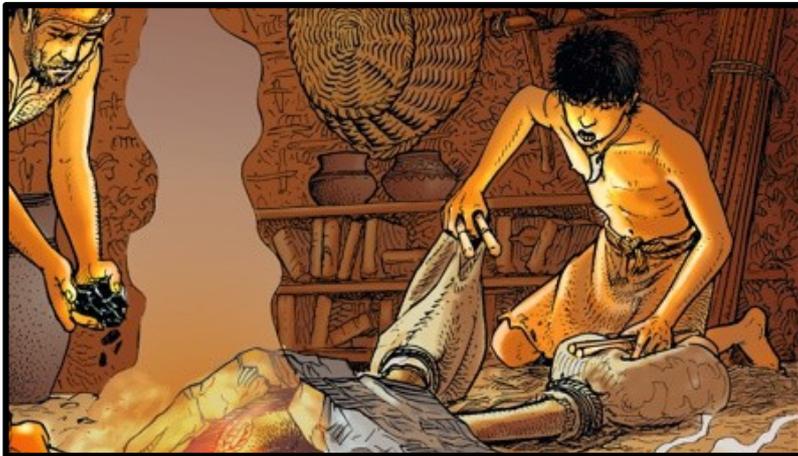
Différents percuteurs en pierre et en bronze employés pour la métallurgie
(d'ap. Boutoille 2015, fig.2 et 4)

1. La métallurgie : quels vestiges archéologiques ?

Lingots



*Lingot en « peau de bœuf » de Kato Zakros (Crète)
Bronze Final*



*Fragments de lingots de bronze du dépôt de Bierberthal (Alsace)
fin Bronze Moyen – début Bronze final
(SRA Franche-Comté, J.-F. Piningre)*

2. Fouille d'une structure métallurgique

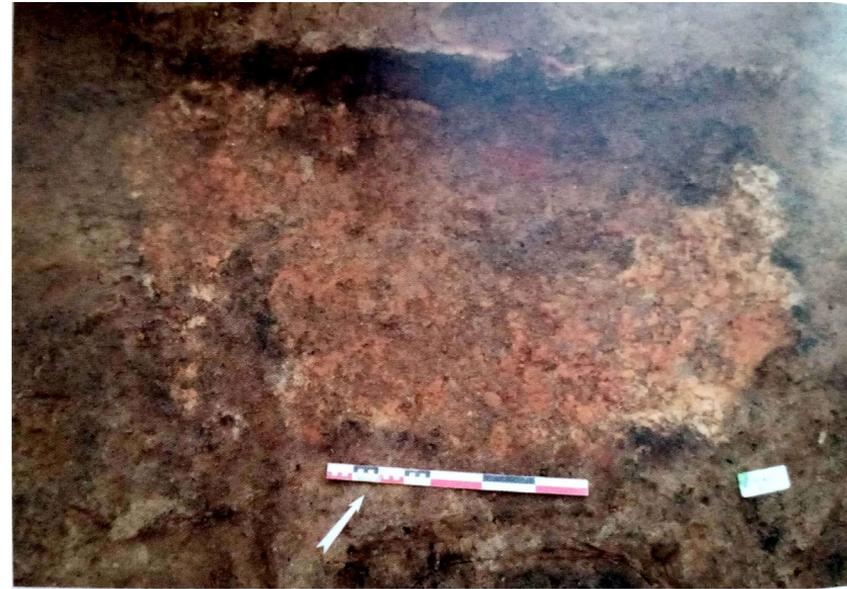
2.1 Metz, ZAC du Sansonnet



Vestiges d'une forge
Metz, ZAC du Sansonnet (France, Moselle)
Bronze Final (1350-1250 av.J.-C.)

2. Fouille d'une structure métallurgique

2.1 Metz, ZAC du Sansonnet : les vestiges archéologiques



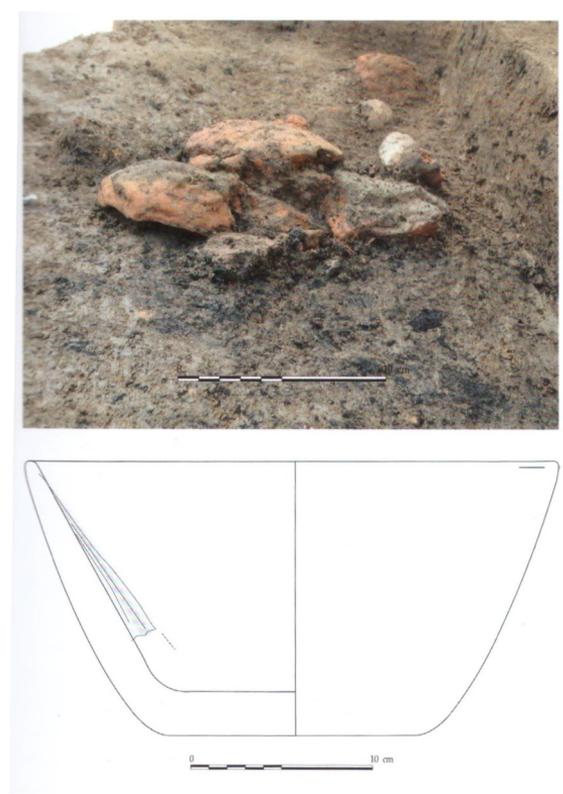
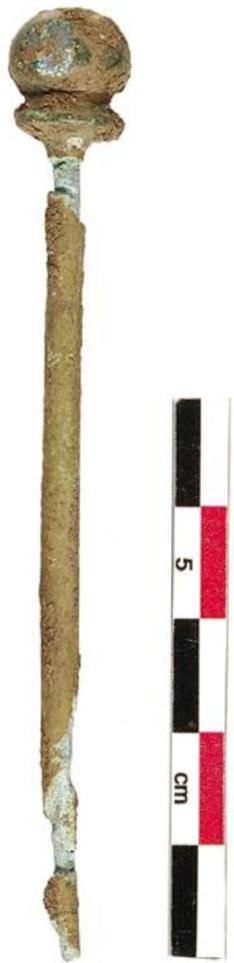
Foyer métallurgique

Lentille ovale rubéfiée

Inclusions : charbons, scories, gouttelettes de métal

2. Fouille d'une structure métallurgique

2.1 Metz, ZAC du Sansonnet : les vestiges archéologiques



2. Fouille d'une structure métallurgique

2.1 Metz, ZAC du Sansonnet : les vestiges archéologiques

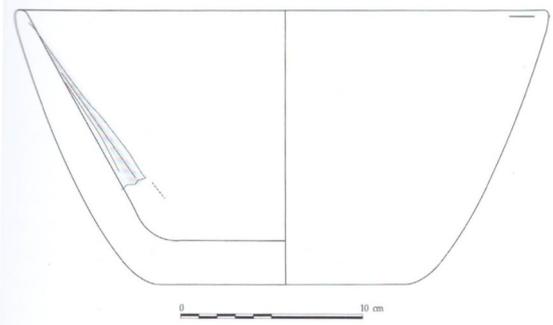
outils, déchets et objets finis



Épingle en bronze



Poids de balance



Creuset reconstitué



(haut) gouttelette de bronze
(bas) gouttelette d'or



2. Fouille d'une structure métallurgique

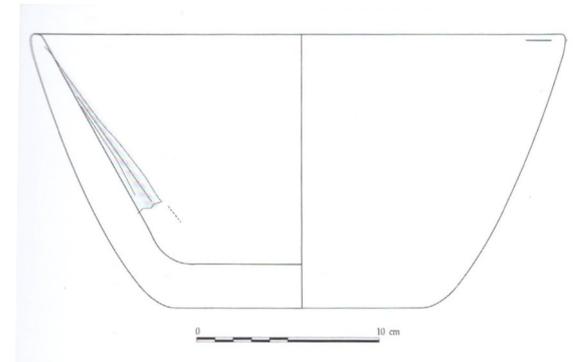
2.2 Metz, ZAC du Sansonnet : analyses et interprétations

Sur le terrain :

- **Foyer** - mesures : 1,2x0,85m
→ plus grand que nécessaire pour travail des objets usuels type haches/bracelets/épingles.
- **Stratigraphie**
→ au nord du foyer, une banquette = réaménagement du foyer où on a creusé une tranche longue et étroite.

En post-fouille et en laboratoire :

- **Charbon de bois**
→ C14 : entre 1378 et 1089 av. (Bronze Final)
→ Anthracologie pour connaître les essences utilisées (pas tous les mêmes propriétés calorifères)
- **Céramique**
→ Restauration / Céramologie : Reconstitution creuset quasi complet (image) → capacité 2,5L



2. Fouille d'une structure métallurgique

2.2 Metz, ZAC du Sansonnet : analyses et interprétations



*Reproduction expérimentale
d'épée en bronze
Université de Lorraine (épée
d'Obernai)
[photo : Denis Morin]*

Interprétation :

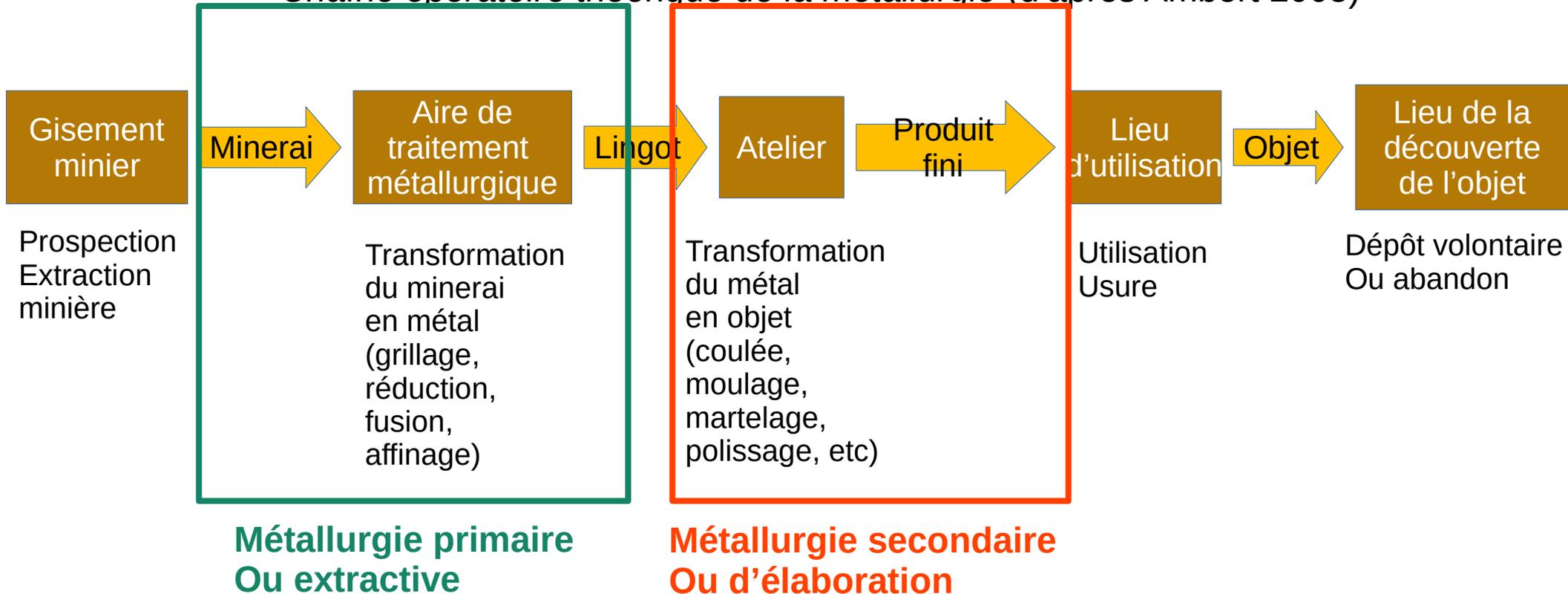
- Dimensions + stratigraphie foyer → Quel type d'objet long pourrait être fabriqué dans une telle fosse ? → adaptée fabrication d'épées (plus longue proche de 70cm)
- Capacité creuset 2,5L = 40aine de haches → probablement fabrication importante, objets en série
- gouttelettes d'or/poids de balance/épingles en bronze ? → fabrication d'éléments de parure en bronze et en or.

→ Un **atelier polyvalent de bronzier / orfèvre** qui a produit des épées et des bijoux.

2. Fouille d'une structure métallurgique

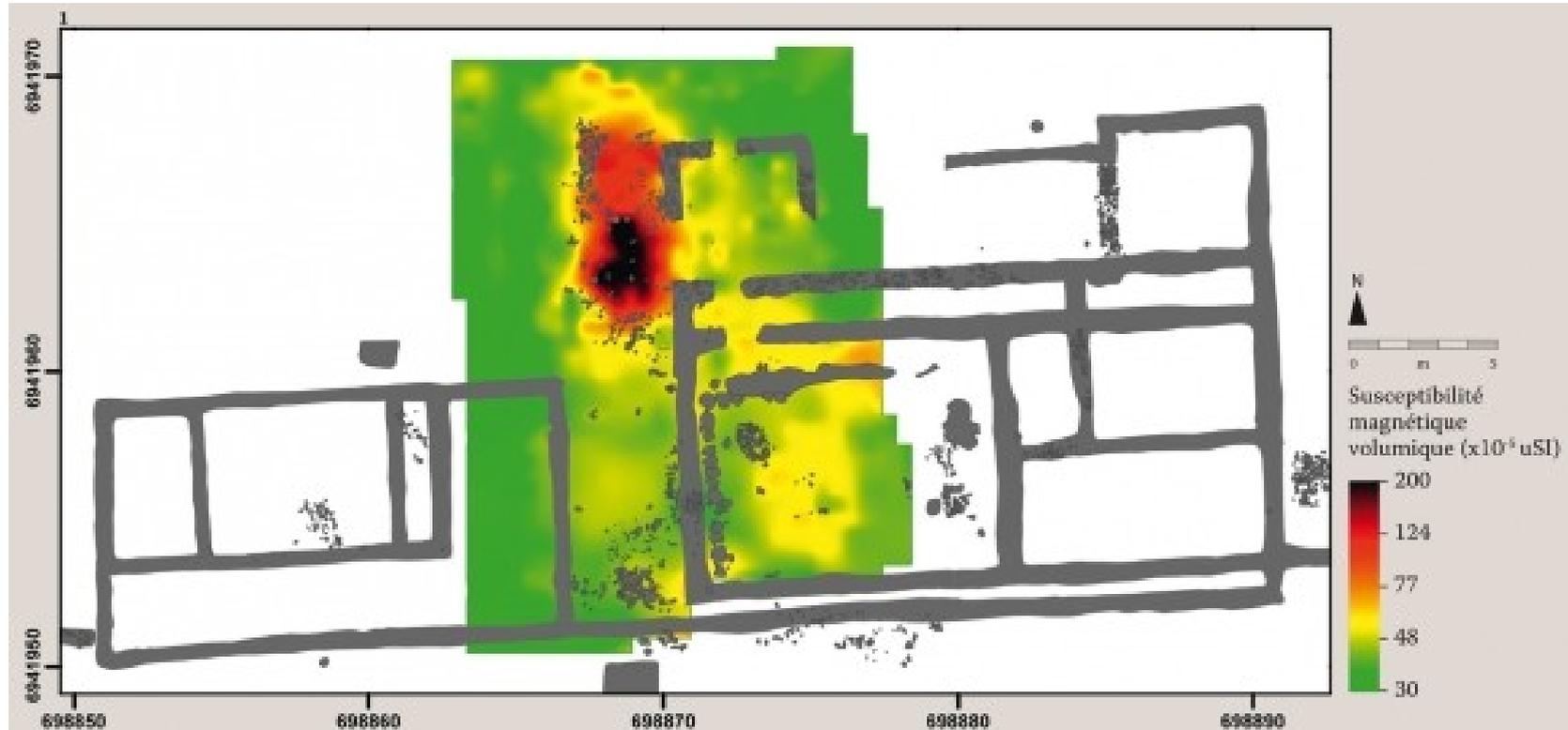
2.3 Terrain et analyses – Chaîne opératoire

Chaîne opératoire théorique de la métallurgie (d'après Ambert 2005)



2. Fouille d'une structure métallurgique

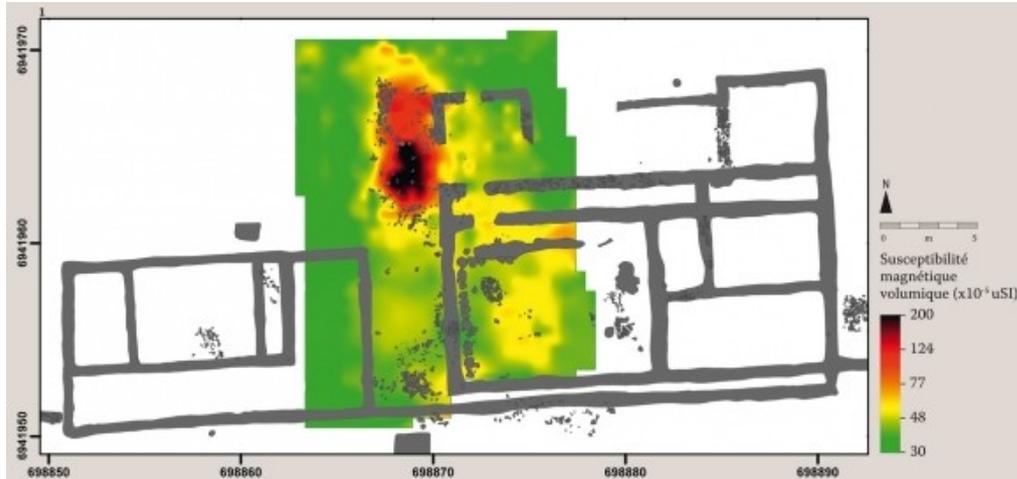
2.3 Terrain et analyses – Archéomagnétisme



*Cartographie de susceptibilité magnétique
(IIe s. ap.) Oise, Noyon, forge de villa gallo-romaine
[Hulin et al. 2014]*

2. Fouille d'une structure métallurgique

2.3 Terrain et analyses – Archéomagnétisme



*Cartographie de susceptibilité magnétique
(IIe s. ap.) Oise, Noyon, forge de villa gallo-romaine
[Hulin et al. 2014]*

Quand ? avant fouille ou sur surfaces décapées

Comment ça marche ? Susceptibilité magnétique = capacité d'un corps à s'aimanter sous l'action d'un champ magnétique.

La composition du sol influe sur ses propriétés mécaniques.

Il est notamment influencé par la présence d'oxydes et d'hydroxydes de fer.

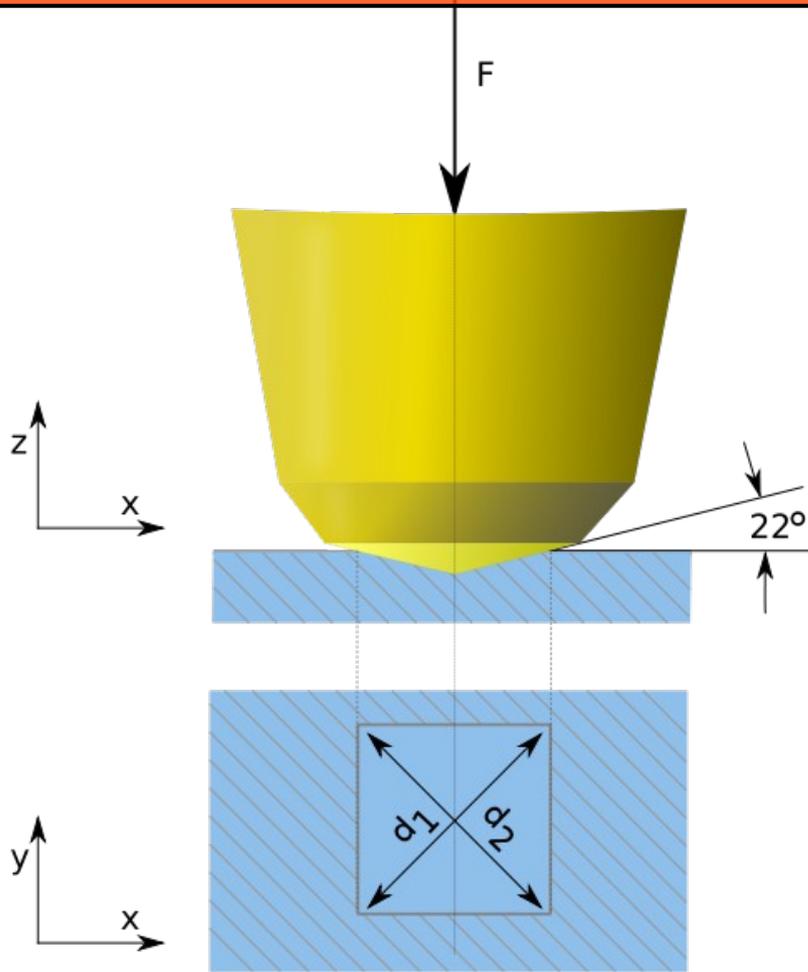
Outil : sonde de mesure électromagnétique

Intérêt :

- pour la métallurgie, en particulier du fer, donne des cartes de répartition des déchets (battitures, scories)
- peut fonctionner pour d'autres phénomènes que les activités métallurgiques : incendies, décomposition de déchets organiques...

2. Fouille d'une structure métallurgique

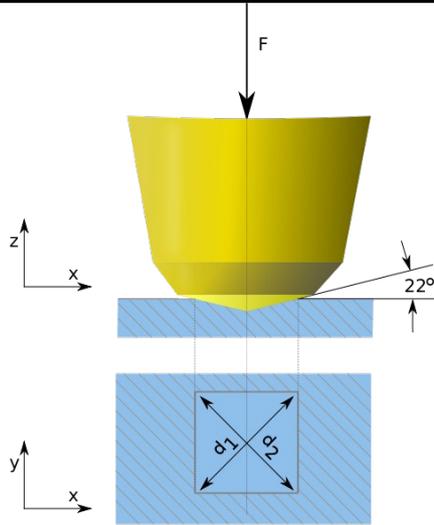
2.3 Terrain et analyses – Évaluation de la dureté



*Schéma du principe de la dureté selon l'Essai Vickers
Pénétrateur en diamant*

2. Fouille d'une structure métallurgique

2.3 Terrain et analyses – Évaluation de la dureté



Évaluation de la dureté = Résistance qu'oppose le métal à la pénétration d'un autre corps plus dur que lui

Comment ça marche ? Essai Vickers = pénétrateur en diamant qui fait une empreinte carrée à la surface appelée « S ». P = Force appliquée sur le pénétrateur. Dureté = rapport P/S .

Intérêt : dureté donnée à prendre en compte pour la mise en forme et l'utilisation de l'objet.

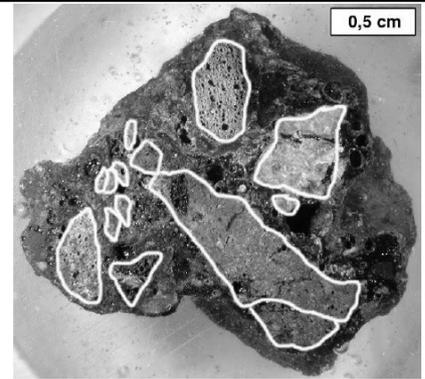


2. Fouille d'une structure métallurgique

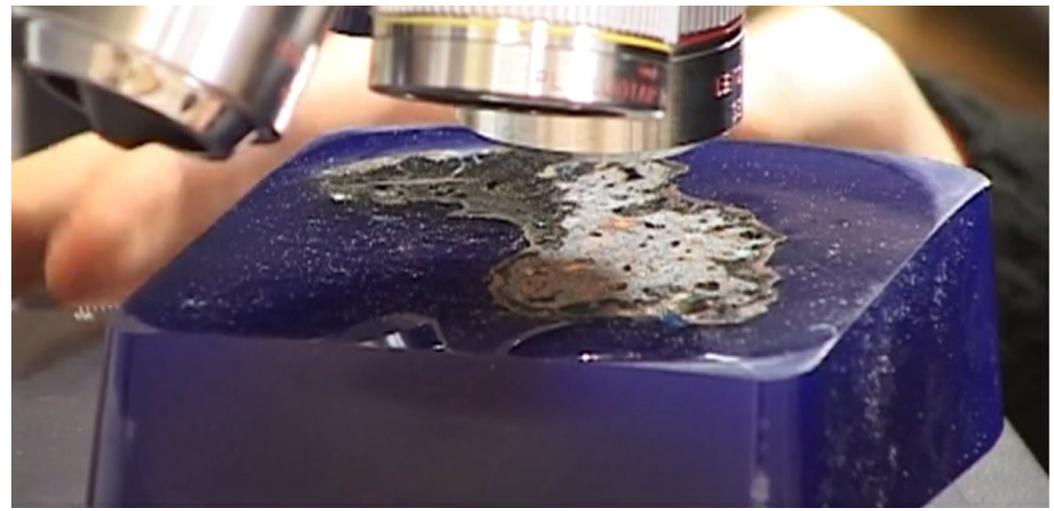
2.3 Terrain et analyses – Examen métallographique



Scorie



(d'ap. Bucher 2008)



Scorie découpée et placée sous résine
Documentaire INRAP – Nolwenn Zaour Paléométreurgiste



Expérimentation : barre forgée en bronze
Méandre Archéométreurgie (analyses IRAMAT)

2. Fouille d'une structure métallurgique

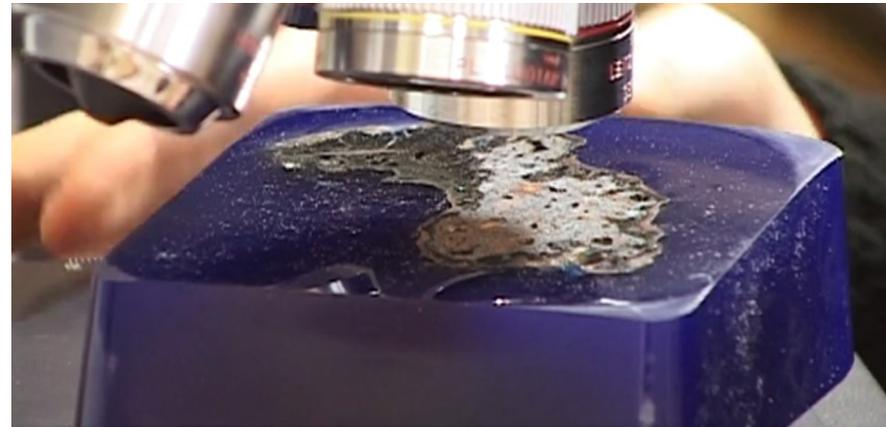
2.3 Terrain et analyses – Examen métallographique



Comment ça marche ? Échantillon issu d'un objet ou d'une scorie. Échantillon poli et mis sous résine pour être observé au microscope. L'application d'un acide dilué permet de faire ressortir la structure du métal.

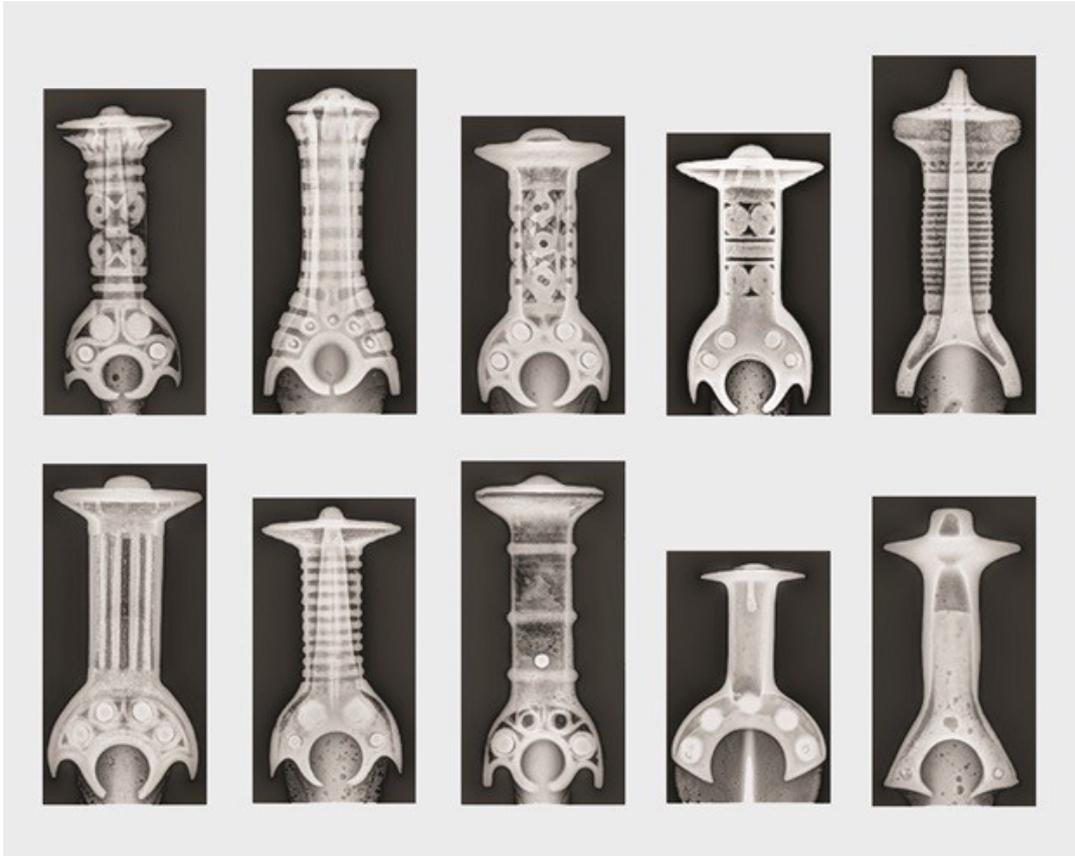
Intérêt : informe sur la structure du métal :

- propriétés / impuretés → travail du minerai
- techniques de mise en forme → moulage / martelage / recuit



2. Fouille d'une structure métallurgique

2.3 Terrain et analyses – Radiographie



Radiographie d'épées de l'âge du Bronze (1600-1100 av. J.-C.) au Danemark par FORCE Technology.

<https://forcetechnology.com/en/service-sector/cases/digital-xray-examination-of-swords-from-the-early-bronze-age>

2. Fouille d'une structure métallurgique

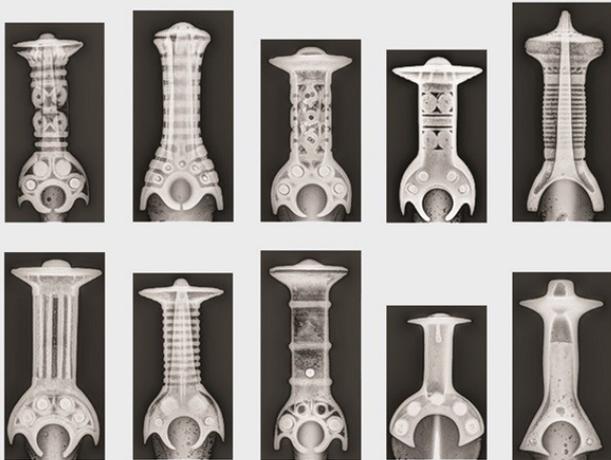
2.3 Terrain et analyses – Radiographie



Comment ça marche ? Radiographie par rayons X. Les rayons X traverseront plus ou moins facilement un objet en fonction de sa densité.

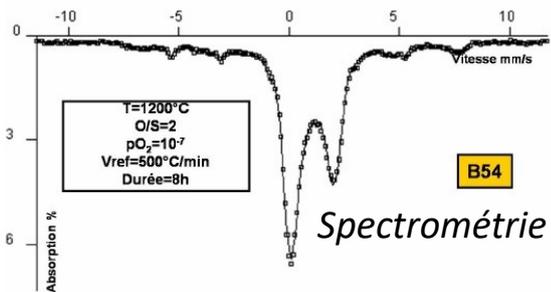
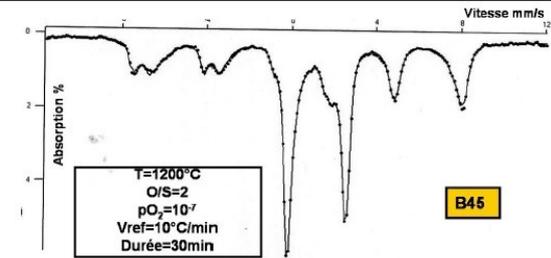
Intérêts :

- Révéler les structures internes
- Retrouver la forme d'objets corrodés
- Techniques du système d'emmanchement : coinçage, rivetage, soudure
- Détecter les faux

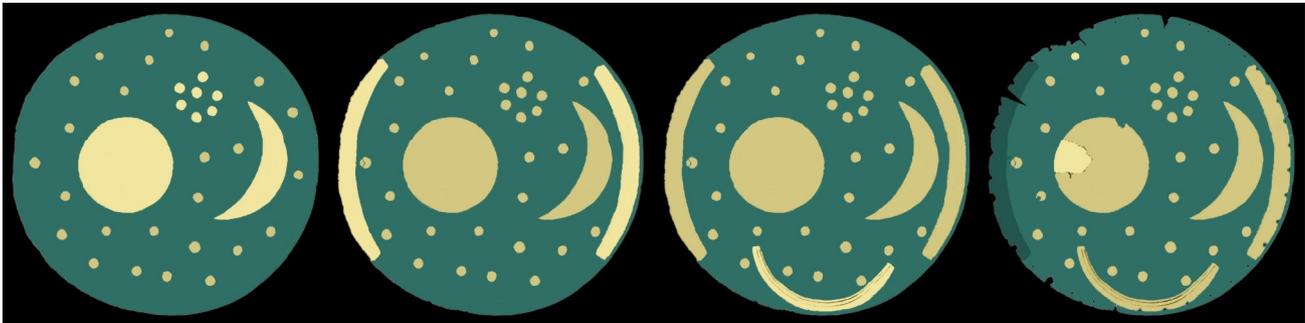


2. Fouille d'une structure métallurgique

2.3 Terrain et analyses – Analyses de composition



Spectrométrie d'absorption, comparaison de 2 éléments (d'ap. Boucher 2008)



1

2

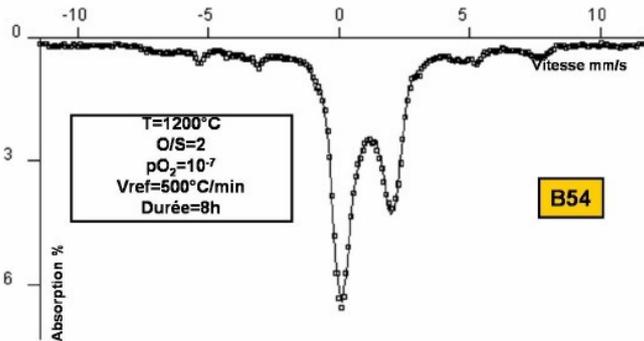
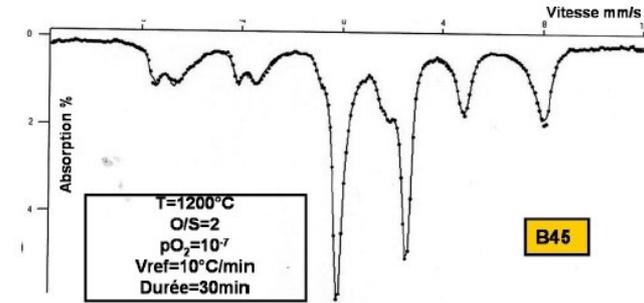
3

4

Disque de Nebra
 (Bronze Ancien-Moyen, ~1600 av. J.-C.)
 bronze et or
 2kg - D.32cm
 Saxe-Anhalt, Nebra-sur-Unstrut

2. Fouille d'une structure métallurgique

2.3 Terrain et analyses – Analyses de composition



Méthodes non destructives. 2 grandes catégories.

Comment ça marche ?

- **Spectrographie d'émission** : un échantillon est excité par un effet thermique (électrique ou laser). Lors du retour des atomes à leur état fondamental ils émettent un rayonnement dont la longueur d'onde est propre à chacun. C'est ce rayonnement qui est mesuré.
- **Spectrométrie d'absorption** : un échantillon est bombardé de rayons magnétiques, on mesure le taux d'absorption de ces rayons, qui est propre à chaque atome.

En bref, l'un mesure ce qui est renvoyé et l'autre ce qui est absorbé.

Résultats :

- Dosage des éléments principaux (Cu, Au, Pb, Sn)
- Éléments mineurs
- Éléments traces

Or les gisements se différencient par la teneur en **éléments mineurs et traces**.

2. Fouille d'une structure métallurgique

2.3 Terrain et analyses – Analyses de composition



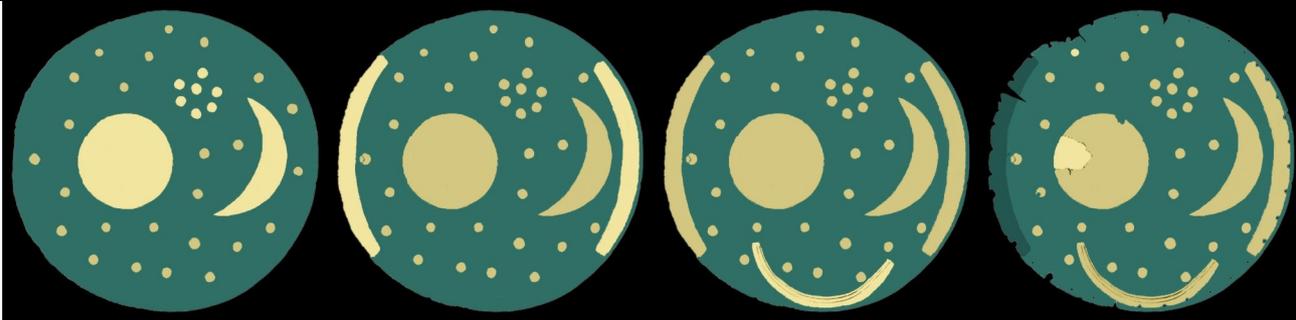
Exemple du Disque de Nebra :

Or analysé

Éléments mineurs = argent et étain

→ 3 groupes d'or de fabrication différente

→ interprétation : ajouts successifs en 3 étapes.



1

2

3

4

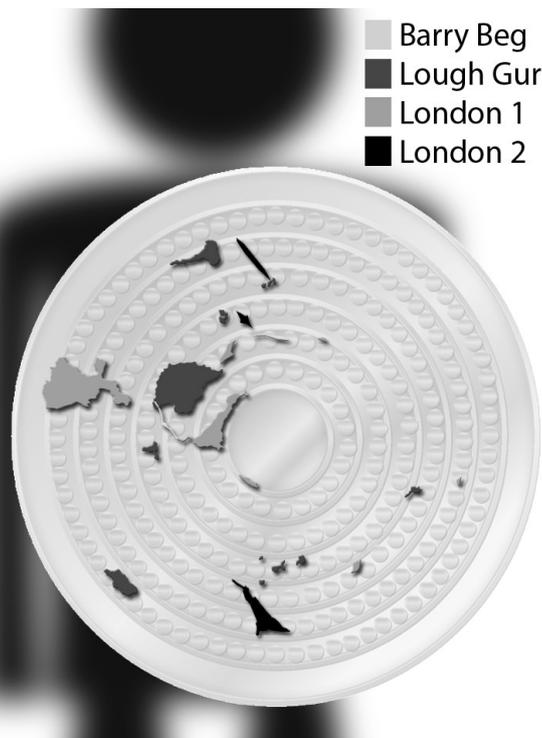
2. Fouille d'une structure métallurgique

2.3 Terrain et analyses – Tracéologie



Expérimentation et tracéologie sur les boucliers d'Irlande et de Grande-Bretagne

(Molloy 2009)



(Dolfini, Crellin 2016, fig. 4 et 6)

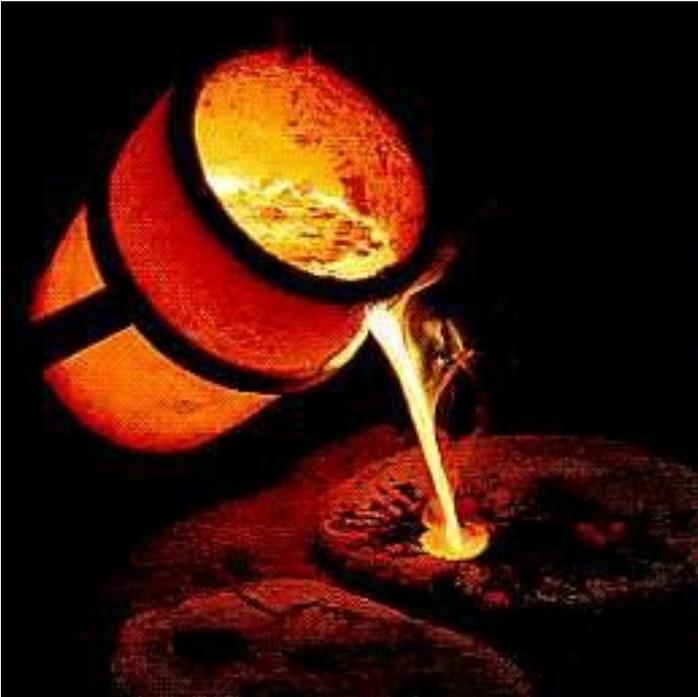


3. Techniques de fonte et fonte à la cire perdue

3.1 Les différentes techniques de fonte

Moule monovalve

Fonte du cuivre ou du bronze dans un moule en pierre ou en argile, formé d'une seule pièce

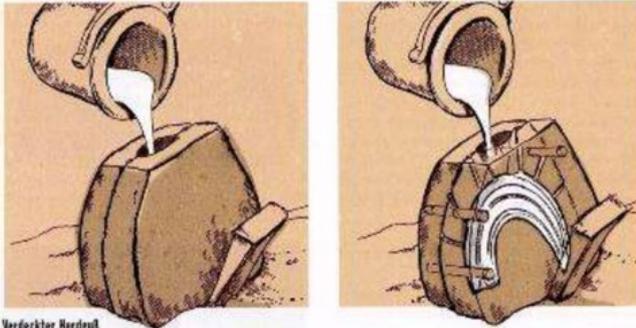


3. Techniques de fonte et fonte à la cire perdue

3.1 Les différentes techniques de fonte

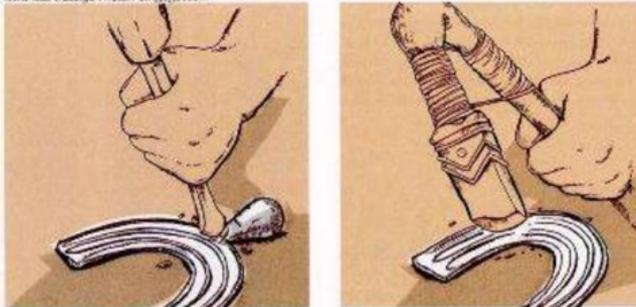
Moule bivalve

Fonte dans un moule en deux parties assemblées l'une contre l'autre au moment de la fonte.

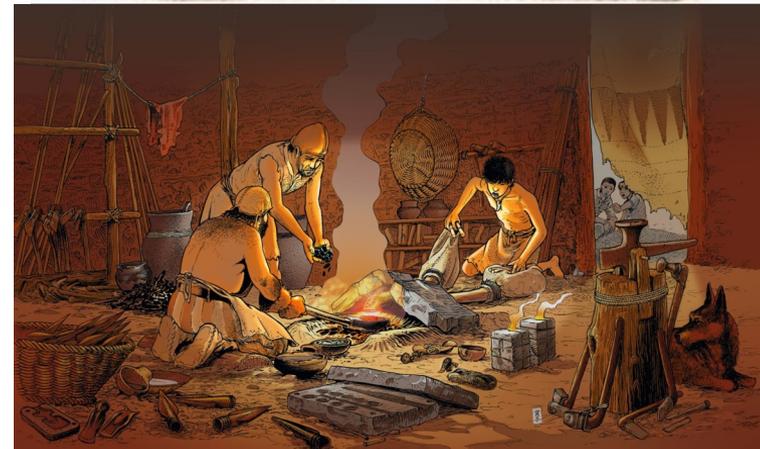


Verdeckter Herdguß

Zwei Formhälften werden benutzt: Damit die Luft während des Gießvorgangs aus der Form nach außen entweichen kann, sind schmale Entlüftungsrillen angelegt. Die Formhälften werden zusammengesetzt, leicht schicht gestellt und verkeilt. Paßzapfen, etwa aus Holz, erleichtern ihr Zusammenstellen. Durch den oben eingearbeiteten Gießkanal wird das flüssige Metall eingegossen.



Nach dem Erkalten wird die Form geöffnet und das Gußstück herausgenommen. Der Gußzapfen wird abgeschla-



3. Techniques de fonte et fonte à la cire perdue

3.1 Les différentes techniques de fonte

Moule bivalve

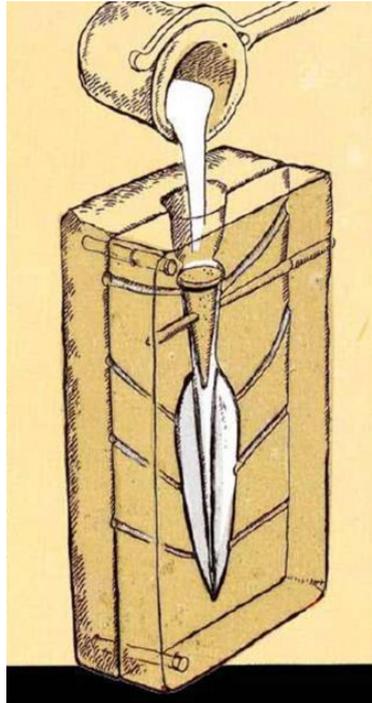
Fonte dans un moule en deux parties assemblées l'une contre l'autre au moment de la fonte.



3. Techniques de fonte et fonte à la cire perdue

3.1 Les différentes techniques de fonte

Cas particulier - Objets à douille



3. Techniques de fonte et fonte à la cire perdue

3.2 Fonte à la cire perdue



Vidéo 1

Bronze antique - fonte à la cire perdue

[Lien vidéo](#) @Teuta Osismi



Vidéo 2

Restitution de potées - technique de la cire retrouvée

[Lien vidéo](#) @Georges Verly



Vidéo 3

Archéologie expérimentale: bronziers d'hier et d'aujourd'hui

[Lien vidéo](#) @Archéosite Aubechies

Exercice : à partir des vidéos 1 et 2, donnez les différentes étapes du procédé de la fonte à la cire perdue.

Time code vidéo 1 : (0:40 – 2:40 ; 7:05-8:30 ; 9:25-12:48) ; vidéo 2 en entier

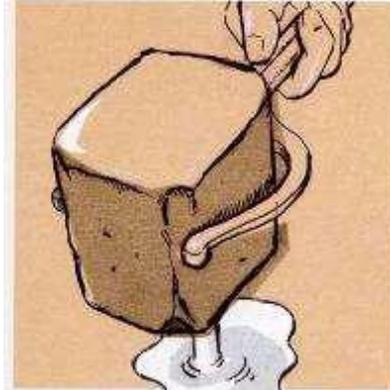
→ principe détaillé dans les diapo suivantes et démonstration commentée dans la vidéo 3.

3. Techniques de fonte et fonte à la cire perdue

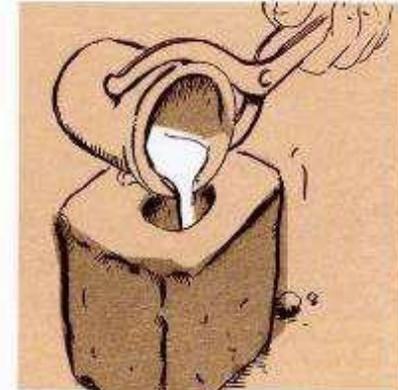
3.2 Fonte à la cire perdue

Étapes :

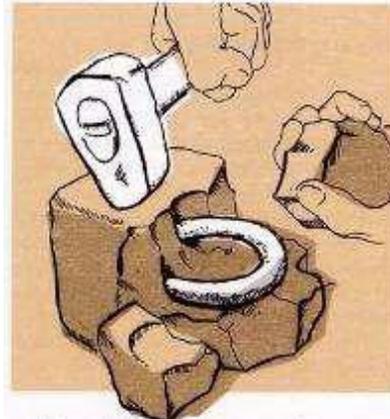
- 1 – Sculpture du modèle en cire
- 2 – Ajouts d'évents et de cône de coulée
- 3 – Création du moule
- 4 – Séchage du moule
- 5 - Décirage
- 6 – Fusion du métal
- 7 – Coulée du métal
- 8 – Refroidissement du moule
- 9 – Décochage
- 10 – Ébarbage et finitions



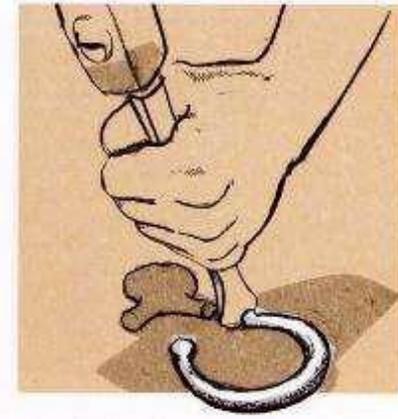
Die Tonform wird erhitzt. Dabei schmilzt das Wachs und läuft durch den Gußkanal ab. Zugleich verdampft die Feuchtigkeit im Lehm. Diese würde beim Guß schlagartig in Wasserdampf verwandelt werden und die



glühende Bronze aus der Form schüttern. Der entstandene Hohlraum wird mit flüssigem Metall ausgegossen.



Nach dem Erkalten wird die Form zerschlagen.



Der Gußzapfen wird anschließend abgearbeitet.

3. Techniques de fonte et fonte à la cire perdue

3.2 Fonte à la cire perdue

Étape 1 :
Sculpture en
cire des
modèles

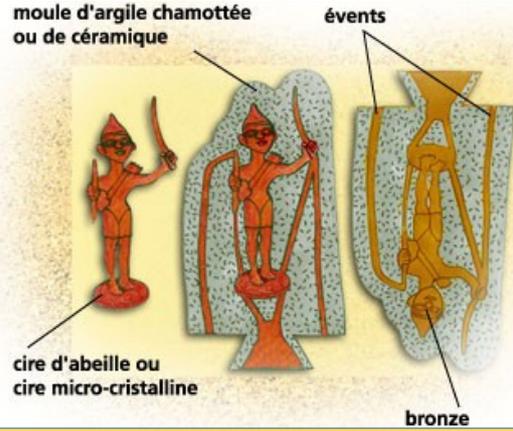


(Chatillon 2010)

3. Techniques de fonte et fonte à la cire perdue

3.2 Fonte à la cire perdue

(Étape 2 : Ajouts d'évents)



Étape 3 :

Création du moule (= chape = potée)

- barbotine
- argile grossière

Étape 4 : séchage



3. Techniques de fonte et fonte à la cire perdue

3.2 Fonte à la cire perdue

Aparté étapes 2/3

importance d'ajouter des événements et/ou d'avoir un moule assez poreux



@V. Loescher

3. Techniques de fonte et fonte à la cire perdue

3.2 Fonte à la cire perdue

Étape 5 :
Décirage des moules



(Chatillon 2010)

3. Techniques de fonte et fonte à la cire perdue

3.2 Fonte à la cire perdue

Étape 6 : fusion



Étape 7 : coulée



3. Techniques de fonte et fonte à la cire perdue

3.2 Fonte à la cire perdue

Étape 9 : Décochage



3. Techniques de fonte et fonte à la cire perdue

3.2 Fonte à la cire perdue

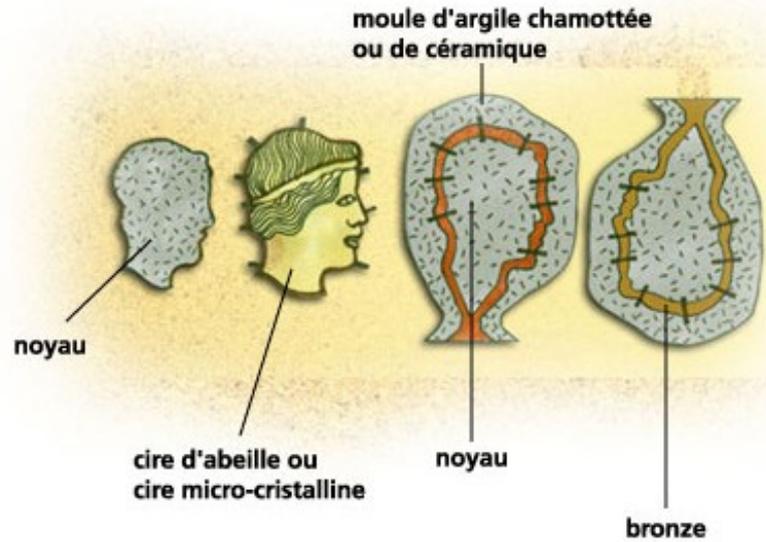
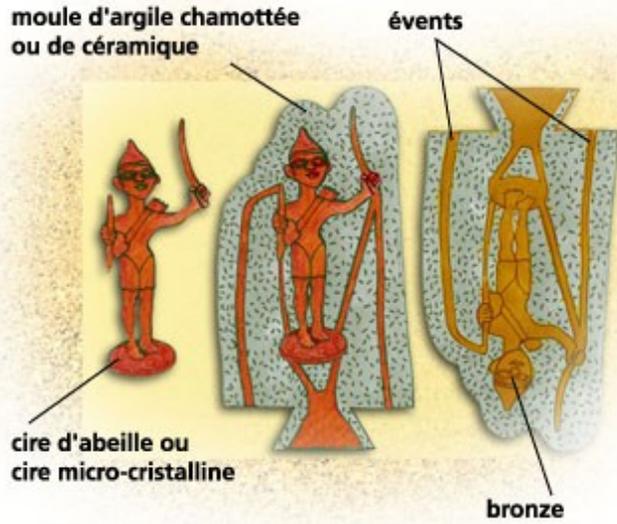
Étapes :

- 1 – Sculpture du modèle en cire
- 2 – Ajouts d'évents et de cône de coulée
- 3 – Création du moule
- 4 – Séchage du moule
- 5 - Décirage
- 6 – Fusion du métal
- 7 – Coulée du métal
- 8 – Refroidissement du moule
- 9 – Décochage
- 10 – Ébarbage et finitions



3. Techniques de fonte et fonte à la cire perdue

3.3 Fonte à la cire perdue : en creux sur positif



3. Techniques de fonte et fonte à la cire perdue

3.4 Fonte à la cire perdue : en creux sur négatif

