

Paléométallurgie

UNIVERSITÉ PARIS 1 PANTHÉON-SORBONNE
LICENCE D'ARCHÉOLOGIE (SEMESTRE 6 – 3^E ANNÉE)
ARCHEOMETRIE
F. GILIGNY V. 1

1. Définitions
2. Problématiques
3. Approches analytiques et archéométrie
4. Histoire (Europe et Proche-Orient)

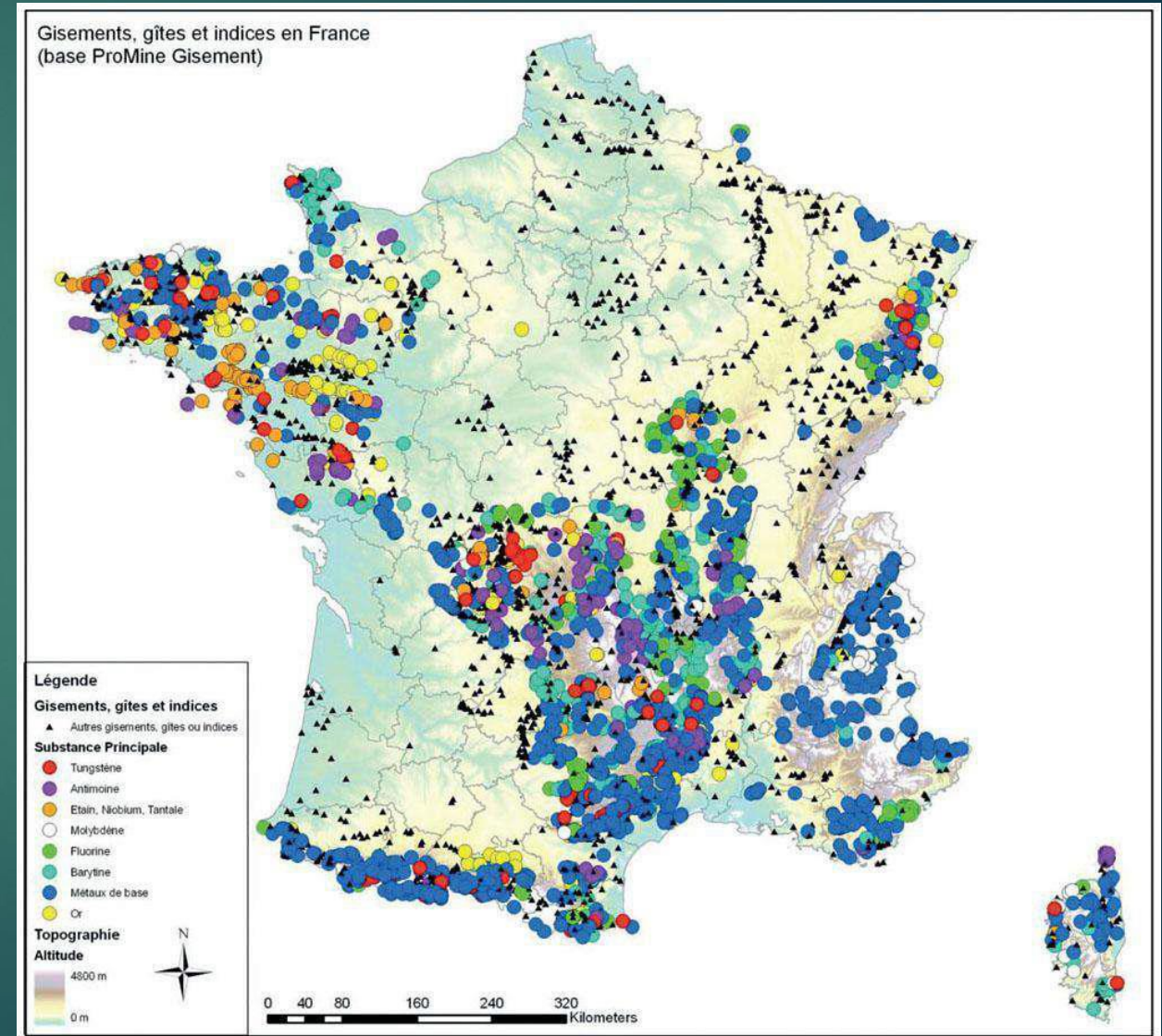
1. Définitions

- ▶ Le terme **métal** vient de metallon en grec exprime le fait d'aller chercher autre chose (meta) ailleurs (allon). On y retrouve bien l'idée de prospection. Un métal est un élément chimique qui possède un certain nombre de propriétés chimiques, physiques et mécaniques :
 - il est solide à température ambiante (sauf le Mercure),
 - il réfléchit la lumière: c'est l'éclat métallique
 - il est bon conducteur de chaleur et de l'électricité
 - il est malléable (travaillable au marteau)
 - il est ductile (on peut l'étirer)
 - il est tenace (résistant à la rupture)
 - Il est caractérisé par une densité et un point de fusion (ce qui permet de le transformer en liquide et de le couler)
- ▶ La **Paléométallurgie** est l'ensemble des démarches et méthodes mises en oeuvre pour l'étude des chaînes opératoires, de l'organisation des activités de production et de la destination (fonctionnelle et spatiale) des métaux.

Où trouve t-on les métaux sur Terre ?

- Les métaux sont issus de magmas

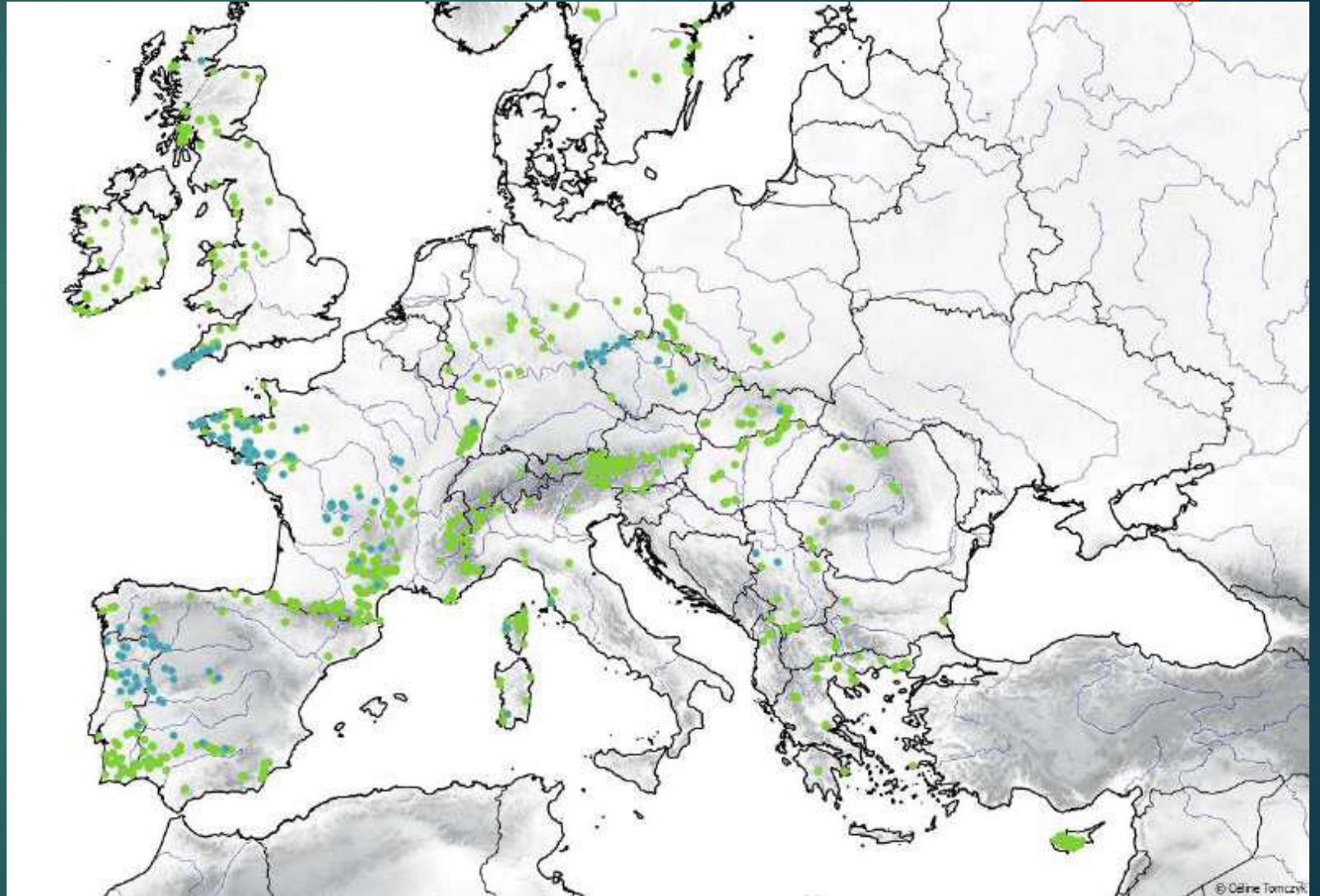
Le type de métal présent dépend du type de magma -> On ne trouve pas tous les métaux aux mêmes endroits



Minéraux de Cu + basalte



Minéraux de Sn + granite



► Carte des sources de cuivre (vert) et d'étain (bleu) en Europe (ProMine : <https://promine.com/fr/>)

Espèces minérales (=minéraux)

« Oxydes » secondaires



Limonite
 $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$



Hématite
 Fe_2O_3



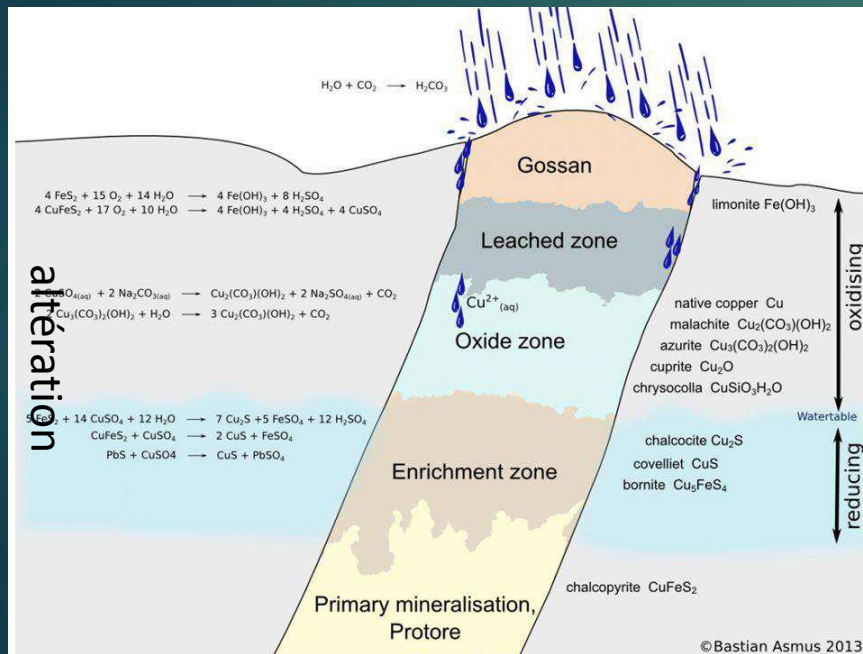
Malachite
 $\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$



Pyrite
 FeS_2



Chalcopyrite
 CuFeS_2

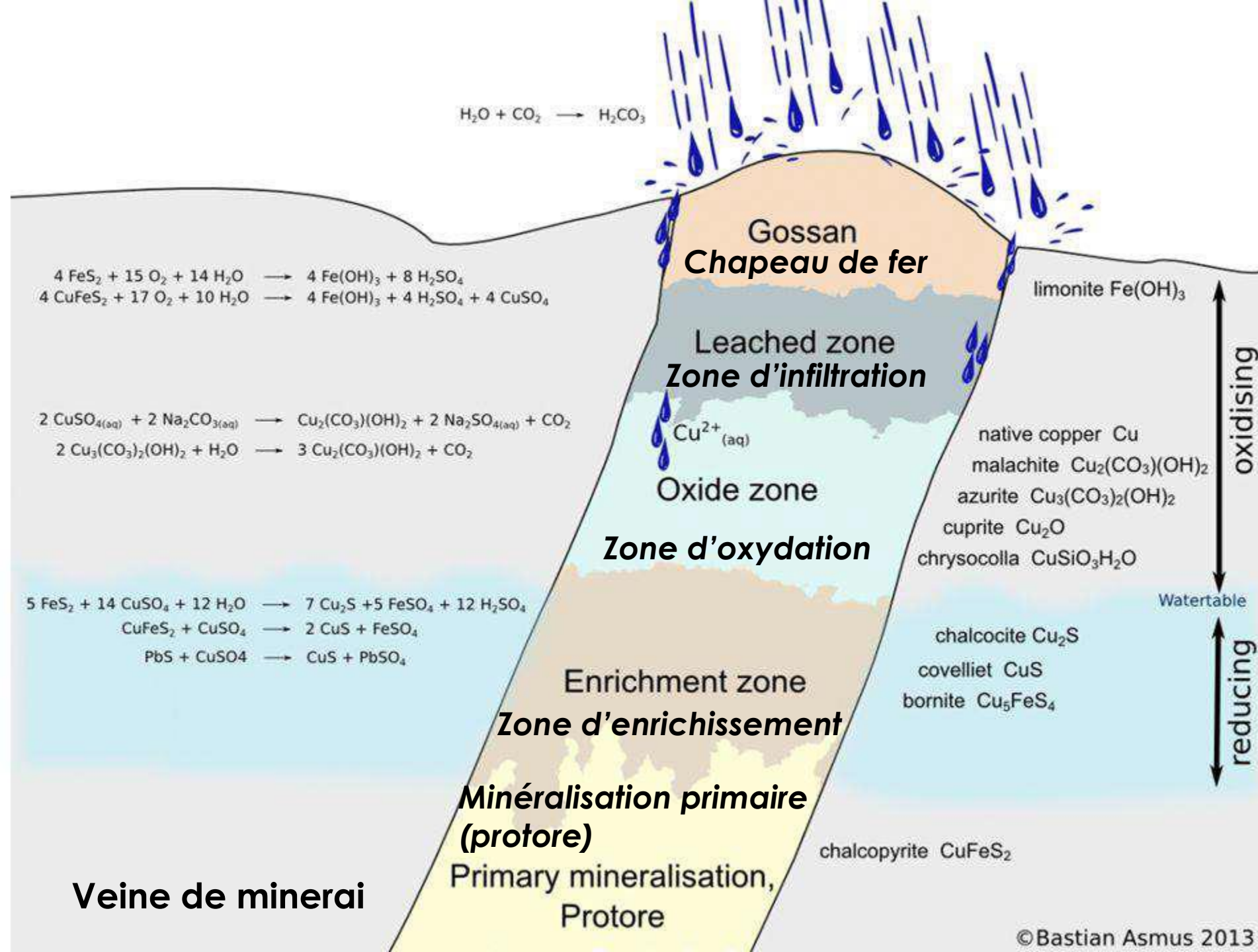


Sulfures primaires

► Phénomène d'Altération supergène : « Le processus supergène suppose une prédominance de circulation d'eau météorique concomitante avec l'oxydation et l'altération chimique de métaux. La descente des eaux météoriques entraîne alors l'oxydation de minerai primaire (hypogène) »

► Il en résulte un enrichissement en minerai (plusieurs % en plus)

► <https://fr.wikipedia.org/wiki/Superg%C3%A8ne>



Formes que peut prendre le métal

- ▶ Les métaux sont, dans les conditions normales de température et de pression des solides cristallins (sauf le mercure)
- ▶ **Ils sont présents à l'état naturel sous différentes formes :**
 - Pur
 - Associés à d'autres éléments métalliques
 - Associés à des éléments non-métalliques (oxydes, carbonates, sulfures)

✓ Les alliages

Les alliages cuivreux (Cuivre associé à un ou plusieurs autres éléments Bronze)

Change les caractères : le point de fusion du cuivre peut être abaissé, la fluidité augmentée (coulées plus faciles)

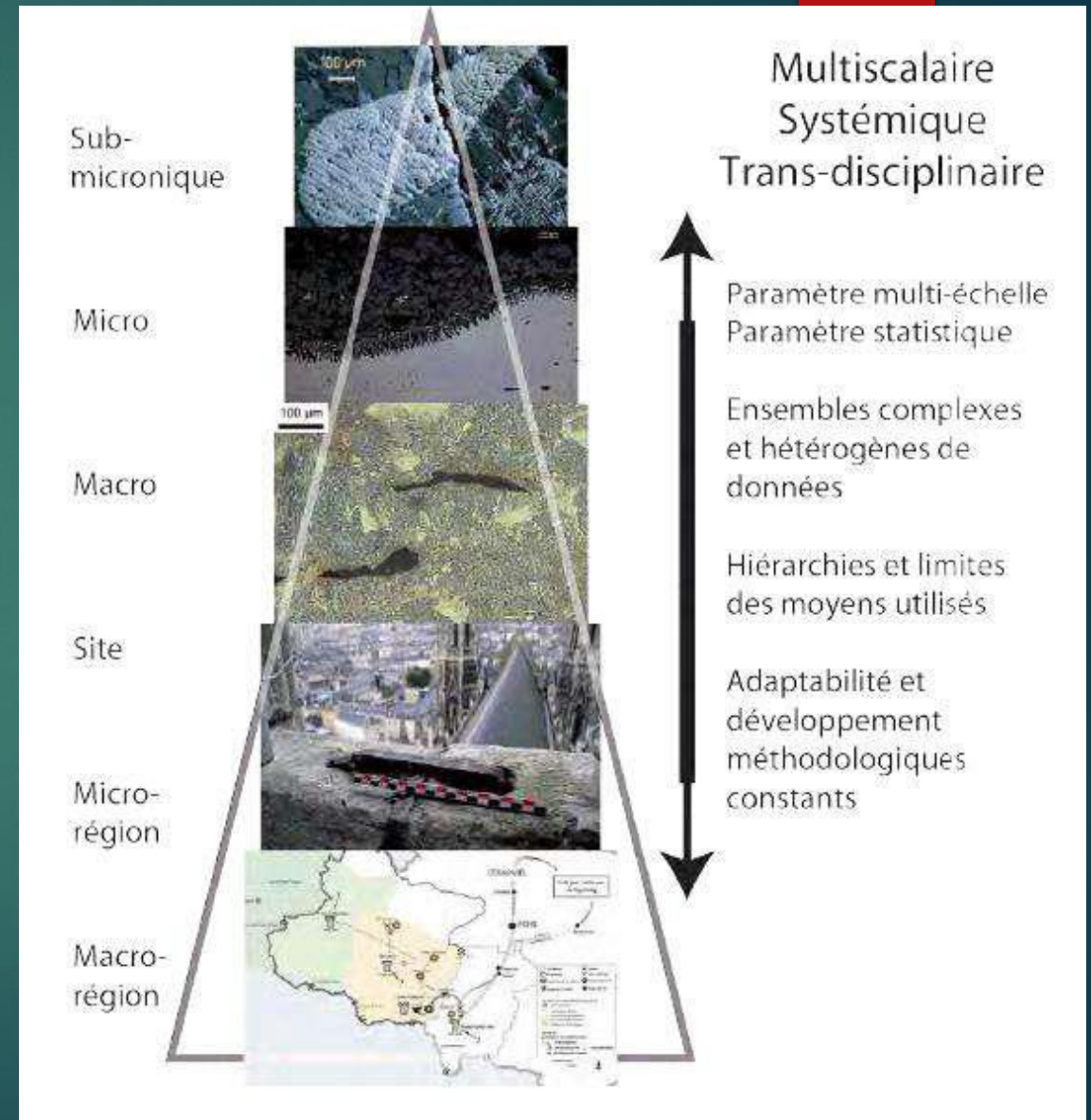
- Les alliages Cuivre + Etain = Bronze

- Les alliages Cuivre + Etain + Plomb =
Bronze à l'étain et au plomb

Les alliages Cuivre + Arsenic + Antimoine
(donnent un aspect argenté : 5 e mill BC)

2. Problématiques

- Technologie : reconstitution des chaînes opératoires de fabrication,
 - Contexte et organisation des activités de production
 - Provenance des matériaux
 - Chronologie des productions
-
- Des systèmes techniques complexes étudiés à plusieurs échelles à l'aide de plusieurs disciplines



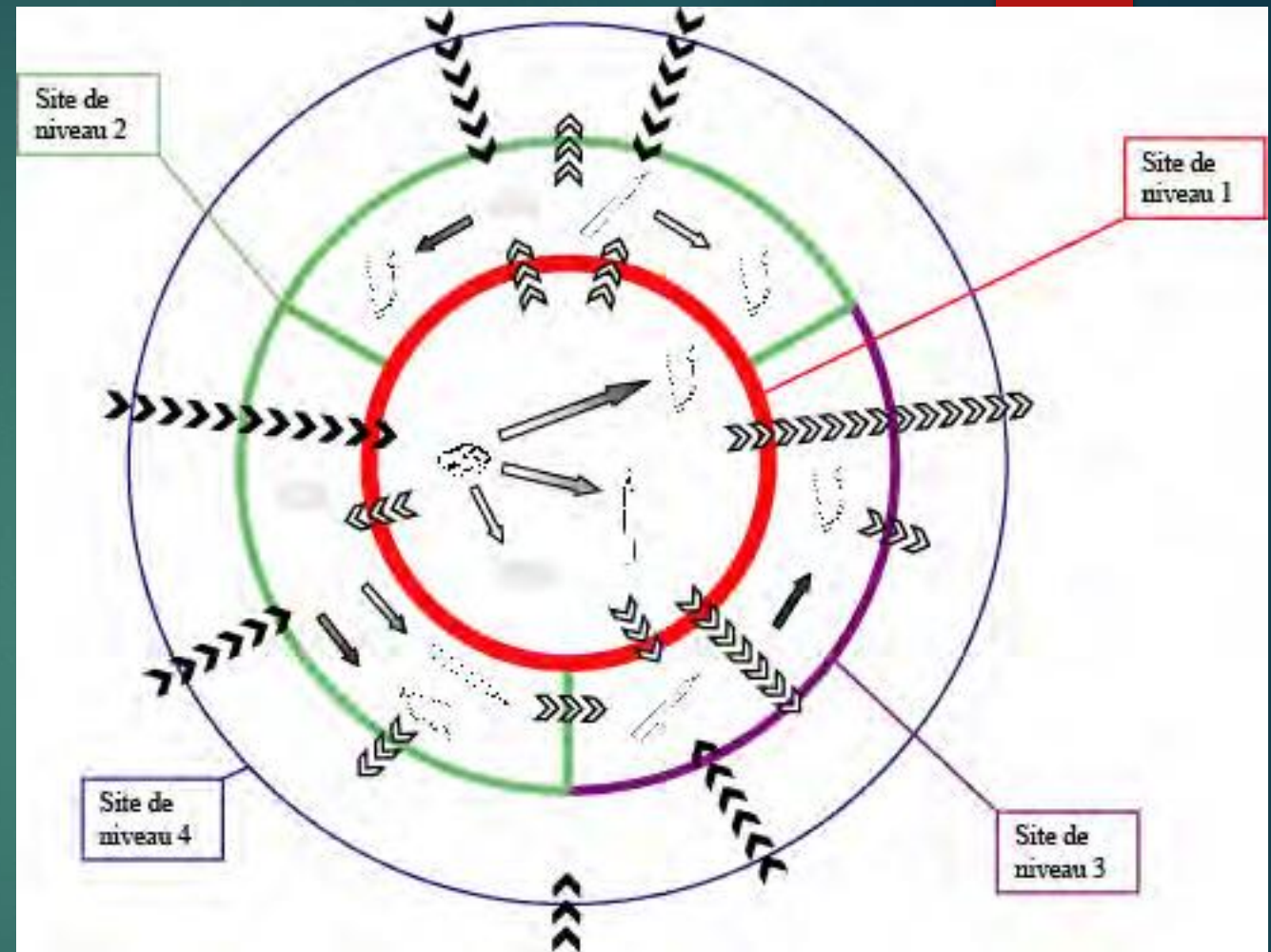
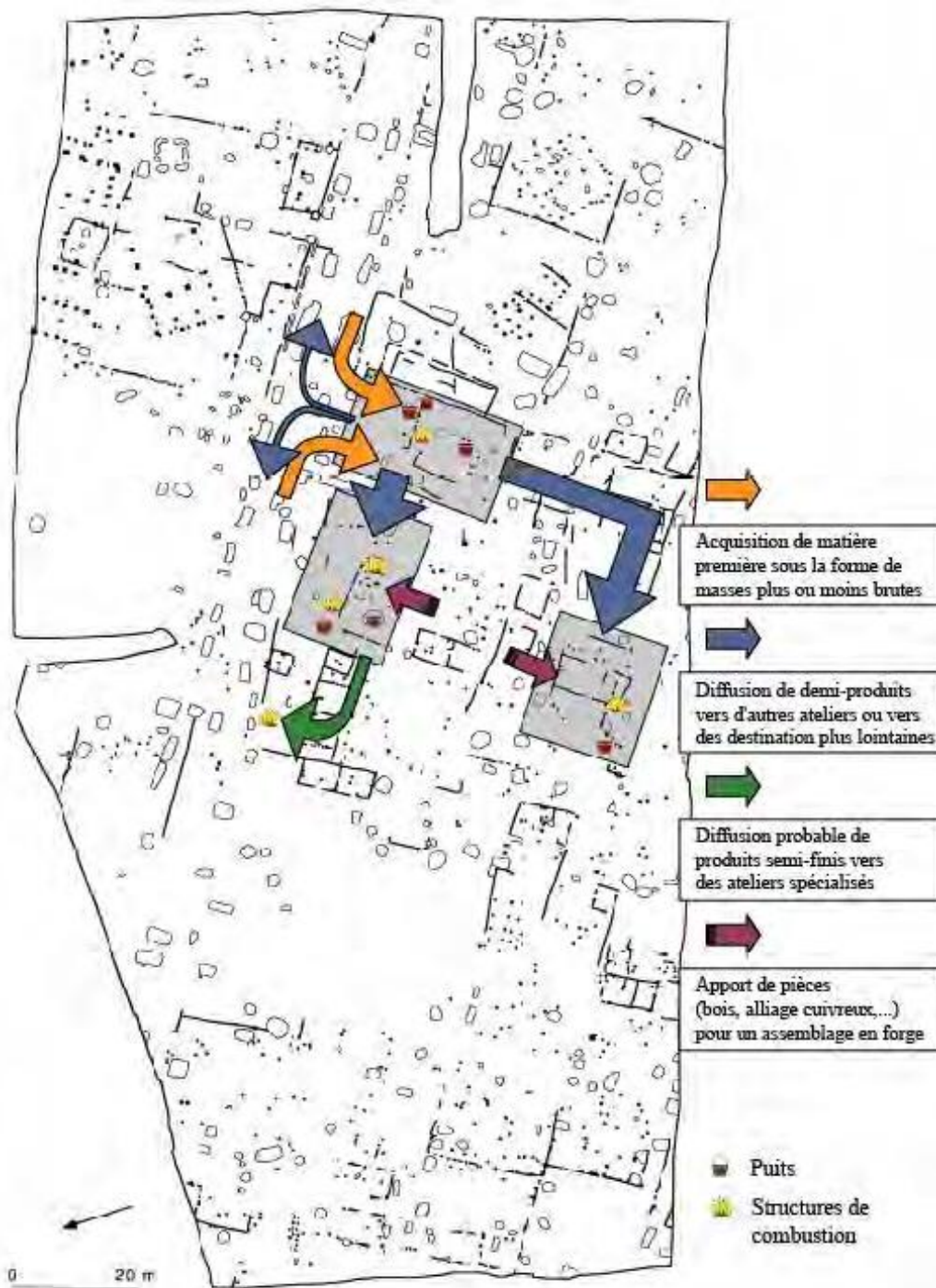
Approche technologique : reconstitution des chaînes opératoires

Sources et données	<i>Vestiges archéologiques (structures métallurgiques et minéralurgiques...), mobilier (déchets, produits finis,...) ; Sources historiques (Hérodote, Pline, Strabon, al-Hamdânî, Théophile, Biringuccio, Agricola,...)</i>
Objectifs	<i>Reconstituer les gestes techniques, comprendre les choix techniques, les aménagements (ventilation, gestion des déchets,...), les conduites d'opérations ; Restituer l'efficacité de l'opération (rendement, consommation de matières premières, ratés,...)</i>
Moyens	<i>Classification typologique et quantification des déchets, chutes, ébauches ; Examens structuraux et caractérisation chimique des matériaux ; Expérimentations archéométallurgiques ; Référentiel ethnographique (forgerons japonais, bronziers et forgerons africains,...)</i>

Contexte: Organisation des activités de production

11

Sources et données	<i>Distribution spatiale de la chaîne opératoire (structures de chauffe, surfaces de frappe, stockage, division spatiale des étapes de travail...) ; Caractérisation socio-économique des contextes ; Sources documentaires (districts métallurgiques de l'époque romaine ; chartes médiévales).</i>
Objectifs	<i>Relation entre unités d'un même site et caractérisation des activités ; Intégration des activités métallurgiques dans leur contexte socioéconomique : synthèse locale, régionale,... Evaluer le volume de production des ateliers, et partant des secteurs de production (importance relative) Evaluer le degré de spécialisation de la production (semi-produits, armement, quincaillerie, diversifiée...) Déterminer la destination du métal (économie rurale et locale, approvisionnement de centres de pouvoir,...)</i>
Moyens	<i>Classification et quantification des déchets, ébauches, ratés,... Caractérisation chimique des matériaux ; Modélisation des productions (détermination des volumes de déchets produits, calculs de rendement,...) Modélisation théorique de l'organisation des productions</i>



Une dépendance existe entre les sites et permet de reconstituer une organisation théorique des activités à l'échelle régionale

Reconstitution de l'organisation des activités sur l'Oppidum gaulois de Condé-sur-Suippe (02) (Bauvais S.)

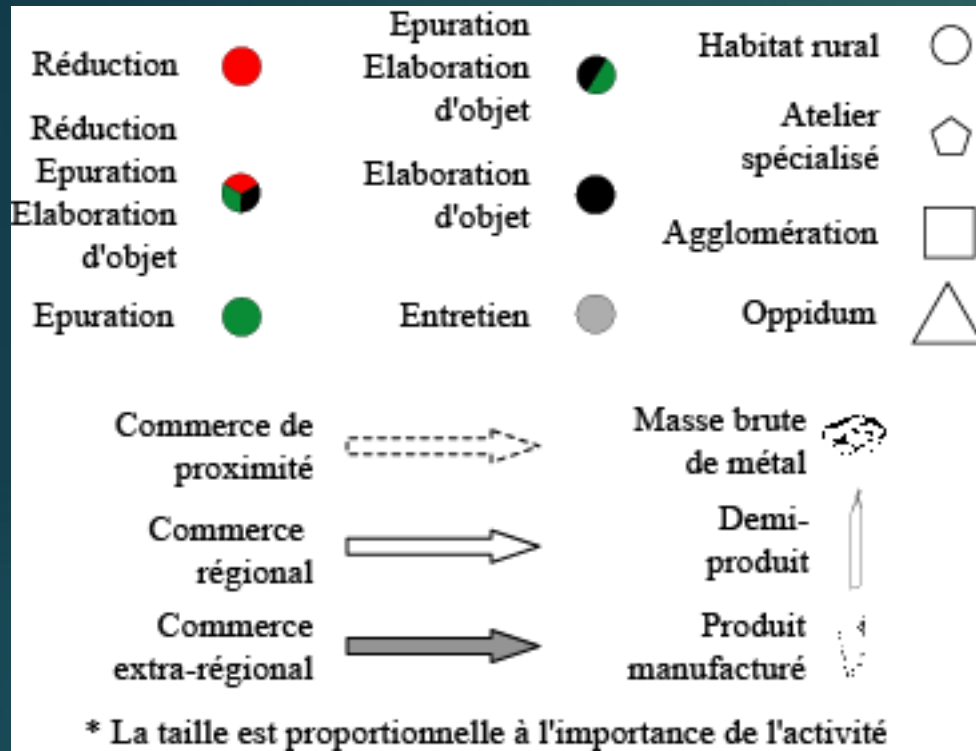
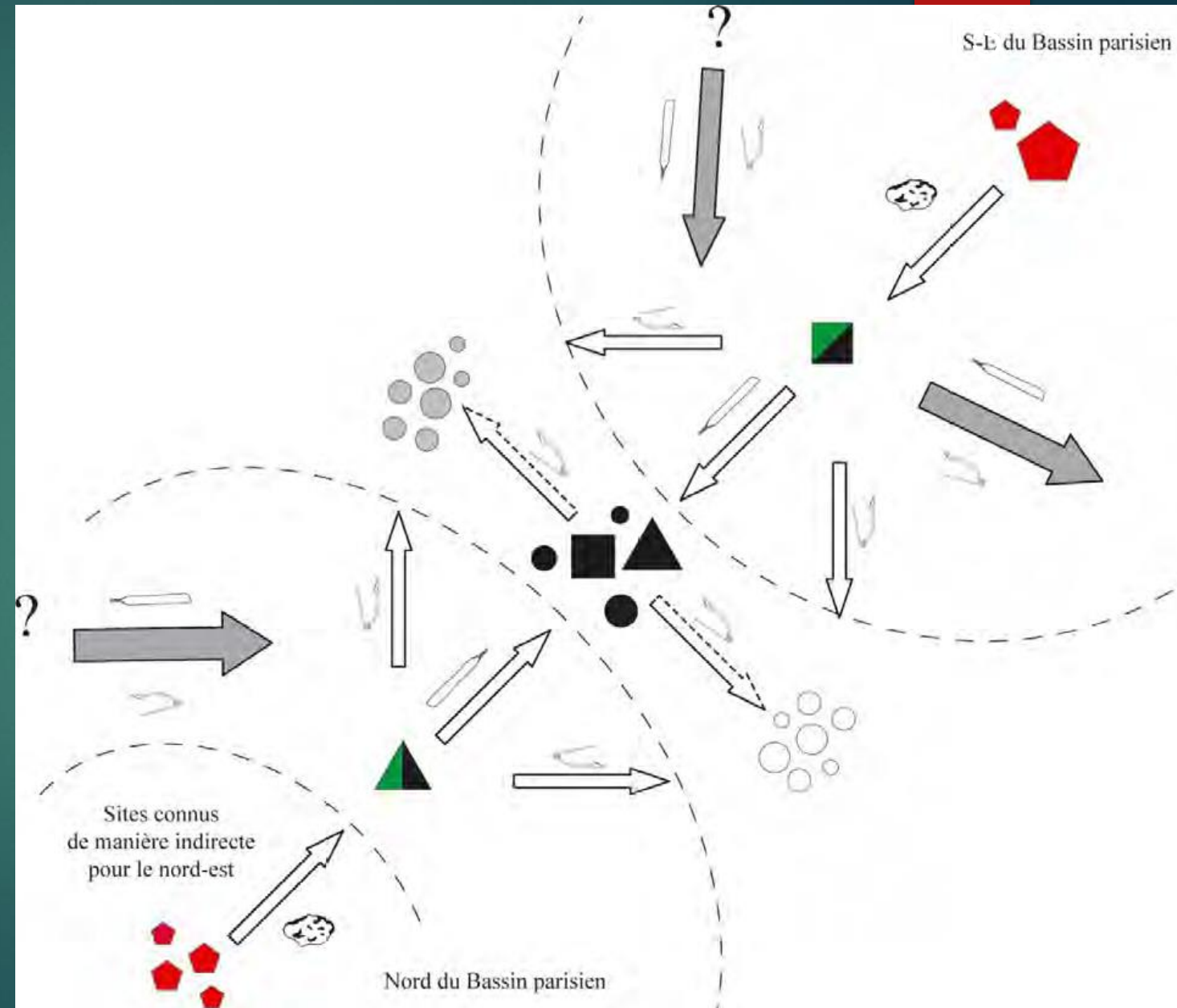


Schéma théorique d'organisation de la production sidérurgique dans le nord du Bassin parisien :
La Tène D1b / La Tène D2

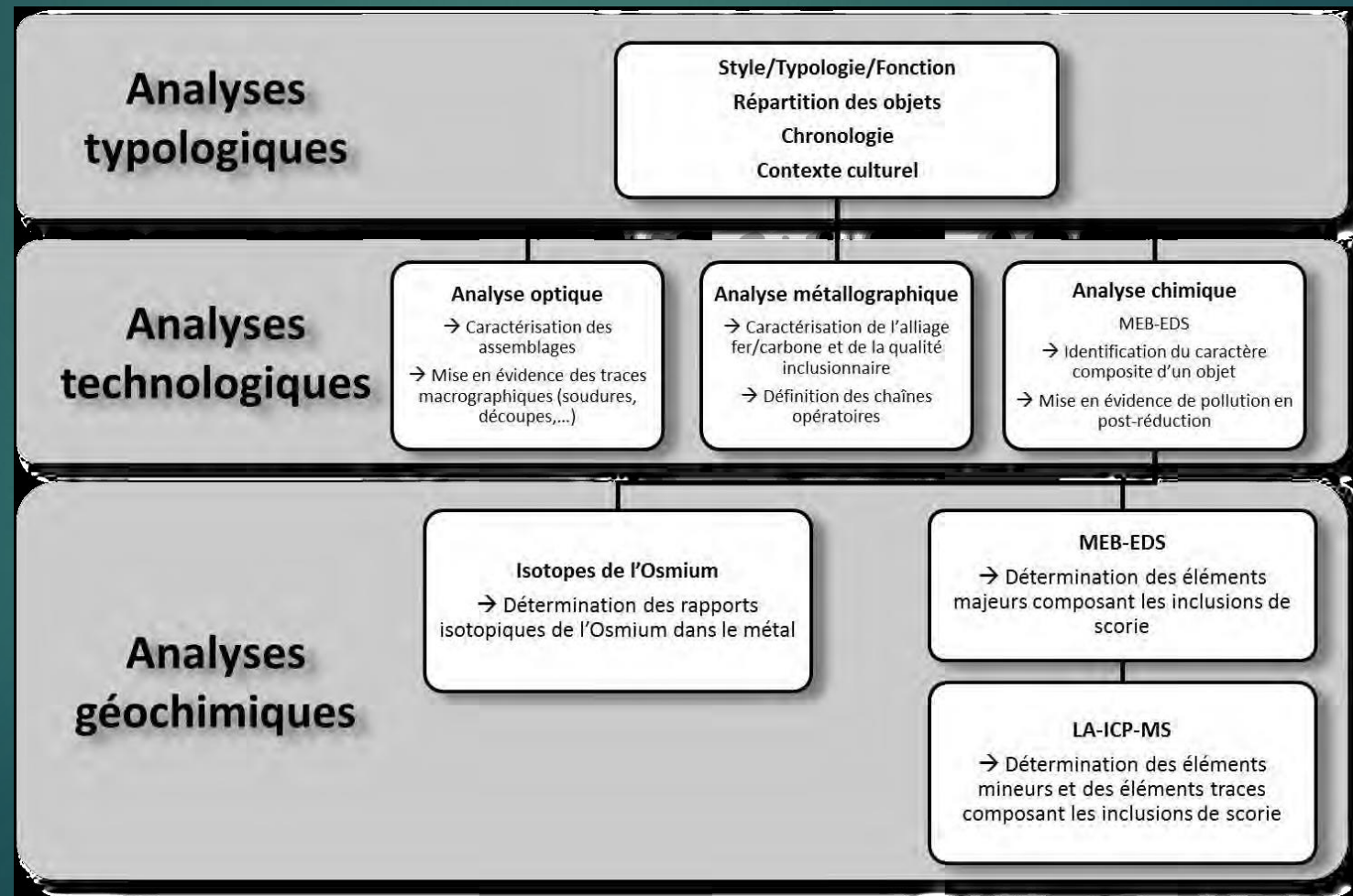


Provenance et destination des ressources et produits

Sources et données	<i>Mobilier (minerais exploités, déchets de production, semi-produits, produits finis) ; Sources documentaires (comptes, commissions de chantiers de construction,...)</i>
Objectifs	<i>Ampleur et organisation des réseaux d'échanges, définition des marchés, mise en évidence de relations commerciales</i>
Moyens	<i>Etudes stylistiques, typologies ; Etude des traditions technologiques ; Caractérisation chimique des matériaux</i>

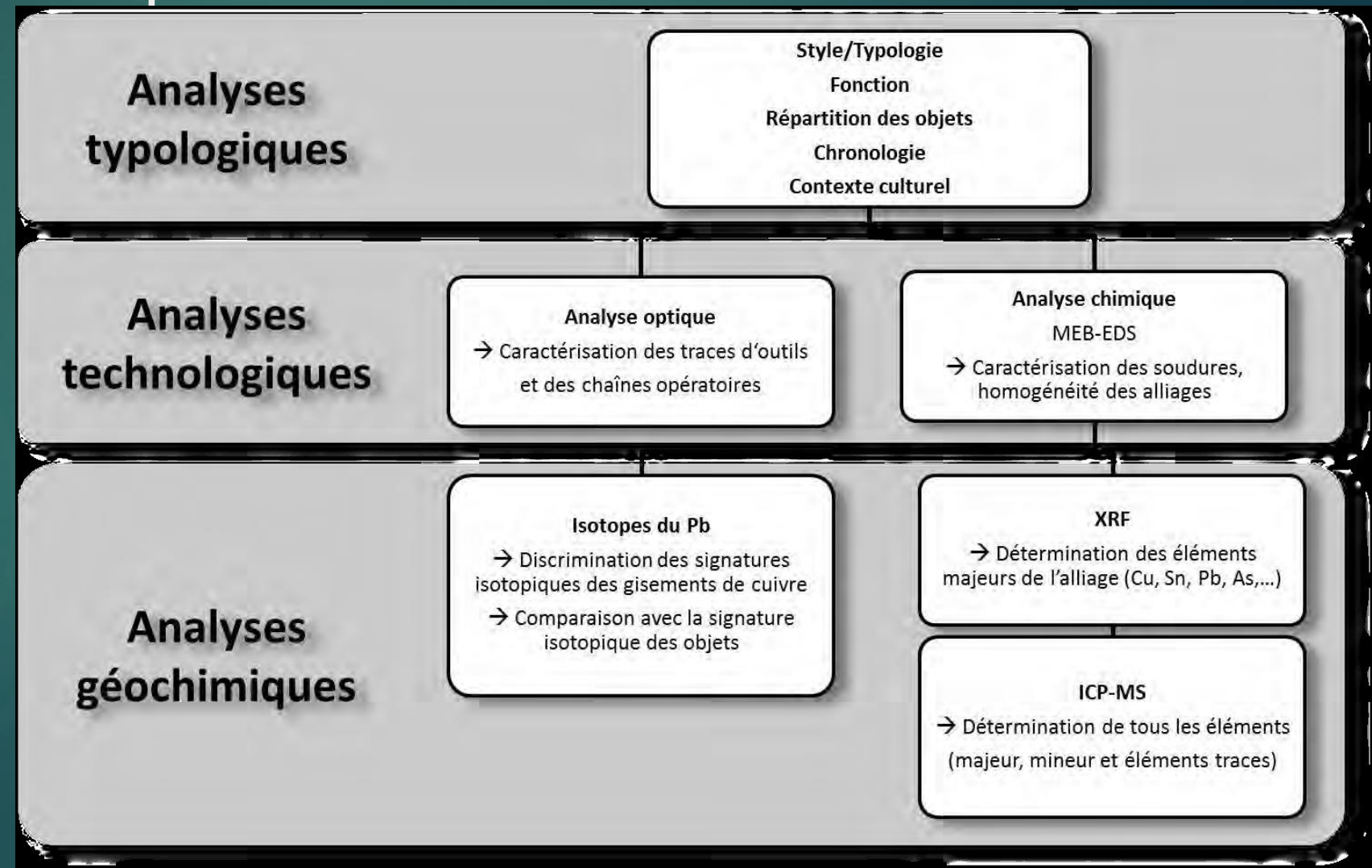
Provenance et destination des ressources et produits

Le Fer



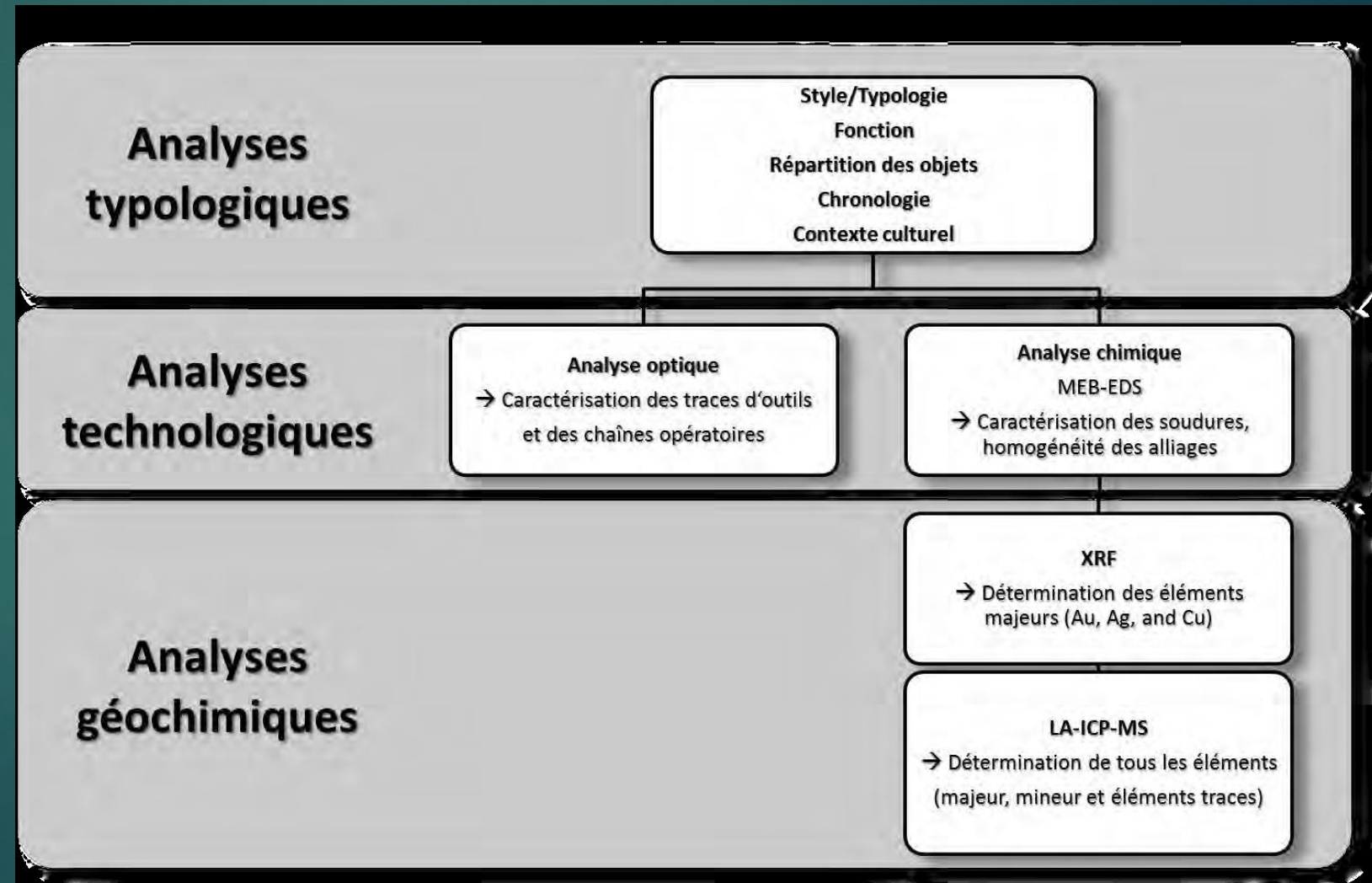
Provenance et destination des ressources et produits

Les alliages
Cuivreux



Provenance et destination des ressources et produits

L'or



Les apports des démarches pluridisciplinaires

- ▶ Le traitement des problématiques exposées est souvent impossible sans :
 - La détermination de la structure et de la composition chimique des matériaux pour la compréhension des procédés métallurgiques ;
 - L'ethnoarchéologie et l'expérimentation pour la reconstitution des savoir-faire



Melle, (Deux-Sèvres), le four de fonte à réverbère restitué sur la plateforme expérimentale de Melle, en juillet 2012

Florian Téreygeol ©

3. Approches analytiques

19

Approche structurale

- ▶ Reconnaissance des espèces minérales présentes dans un minerais (choix des ressources)
- ▶ Reconnaissance des espèces minérales présentes dans les déchets (procédés techniques et conditions opératoires)
- ▶ La structure des métaux influence directement leurs propriétés physiques (dureté, ductilité, élasticité, aspect,...)

Approche chimique

- Evaluer la qualité du matériau dans le cas d'un alliage
- Vérifier la valeur du matériau (notion de titre en numismatique)
- Restitution des paramètres opératoires (choix et gestes techniques)
- Provenance et circulation des matériaux

Préliminaires : typologie et morphologie

- Les formes d'outils et de lingots varient en fonction de la période et des aires culturelles



Lingots « peaux de boeuf »



Lingots « spangenbarren »



Types de haches de l'âge du Bronze en France

► Etudes des haches de l'âge du Bronze dans le nord de la France : Gabillot et al. 2019

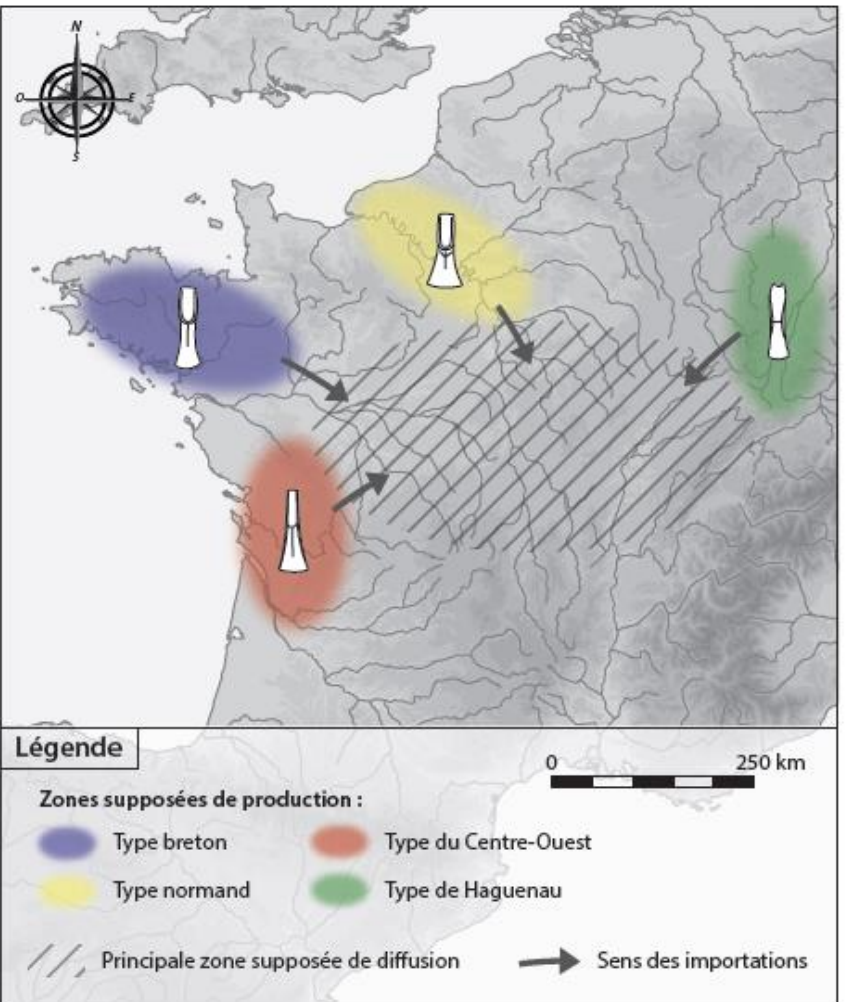
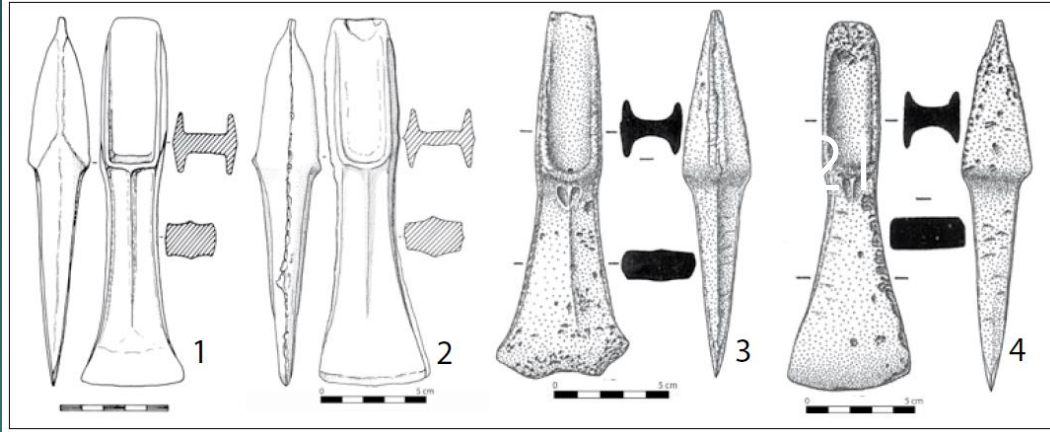


Fig. 1 – Carte schématique représentant le point de vue traditionnel de la production métallique au Bronze moyen entre la Manche et les Alpes (d'après Mordant, 1996 ; Gabillot, 1997 ; DAO A. Dumontet).

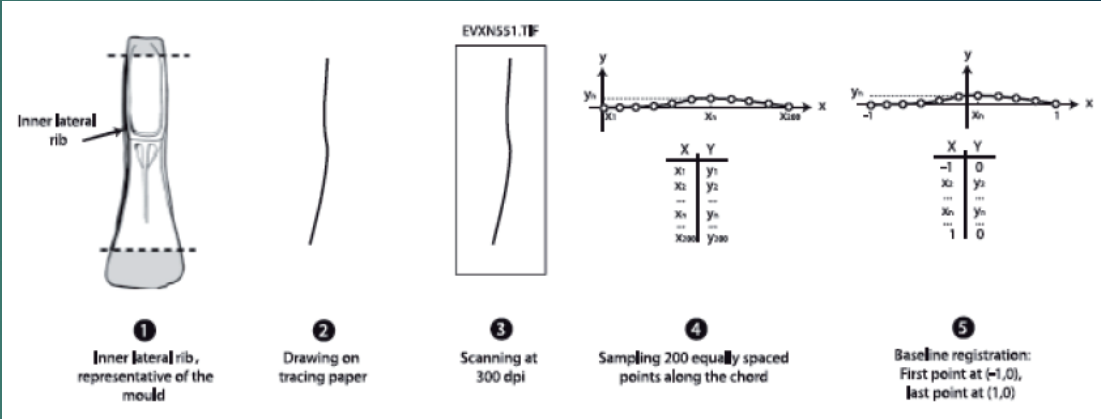
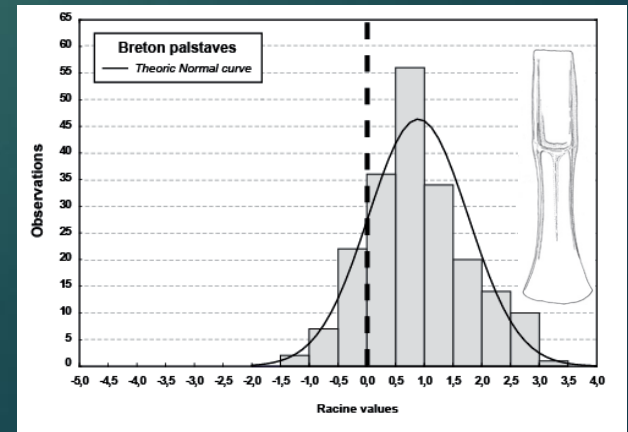
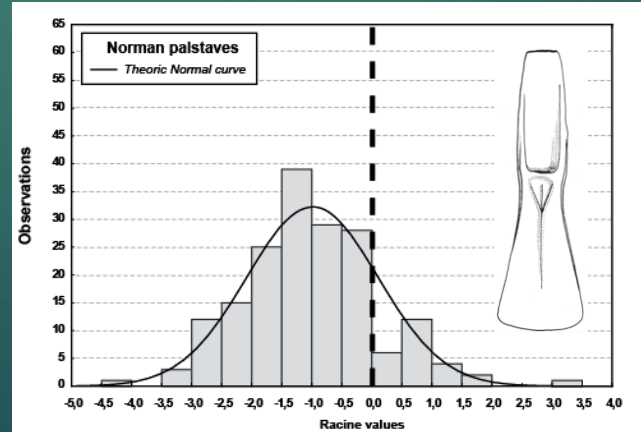


Fig. 4 – Schéma de l'extraction du descripteur archéologique et de sa décomposition en une suite polynômiale (d'après Monna *et al.*, 2013).



A. Approche structurale

Examen à l'oeil nu : étude macroscopique

- ▶ *Le premier examen à réaliser ; il est rapide, ne coûte rien et apporte quantités d'informations. Il permet d'effectuer un échantillonnage pertinent au sein d'un corpus d'étude.*
- ▶ *Basé sur la grille d'identification à disposition du pétrographe (texture, système cristallin, densité apparente, éclat, dureté,...)*
- ▶ *Peut s'avérer suffisant pour l'interprétation de l'échantillon (dépend du questionnement)*
- ▶ *Nécessite d'acquérir une pratique, de « se faire l'oeil »*
- ▶ *L'interprétation dépend beaucoup de l'opérateur!!*

A. Approche structurale

Macroscopie : identification de traces d'outils



Vix

Examen à la loupe binoculaire



Nordhouse

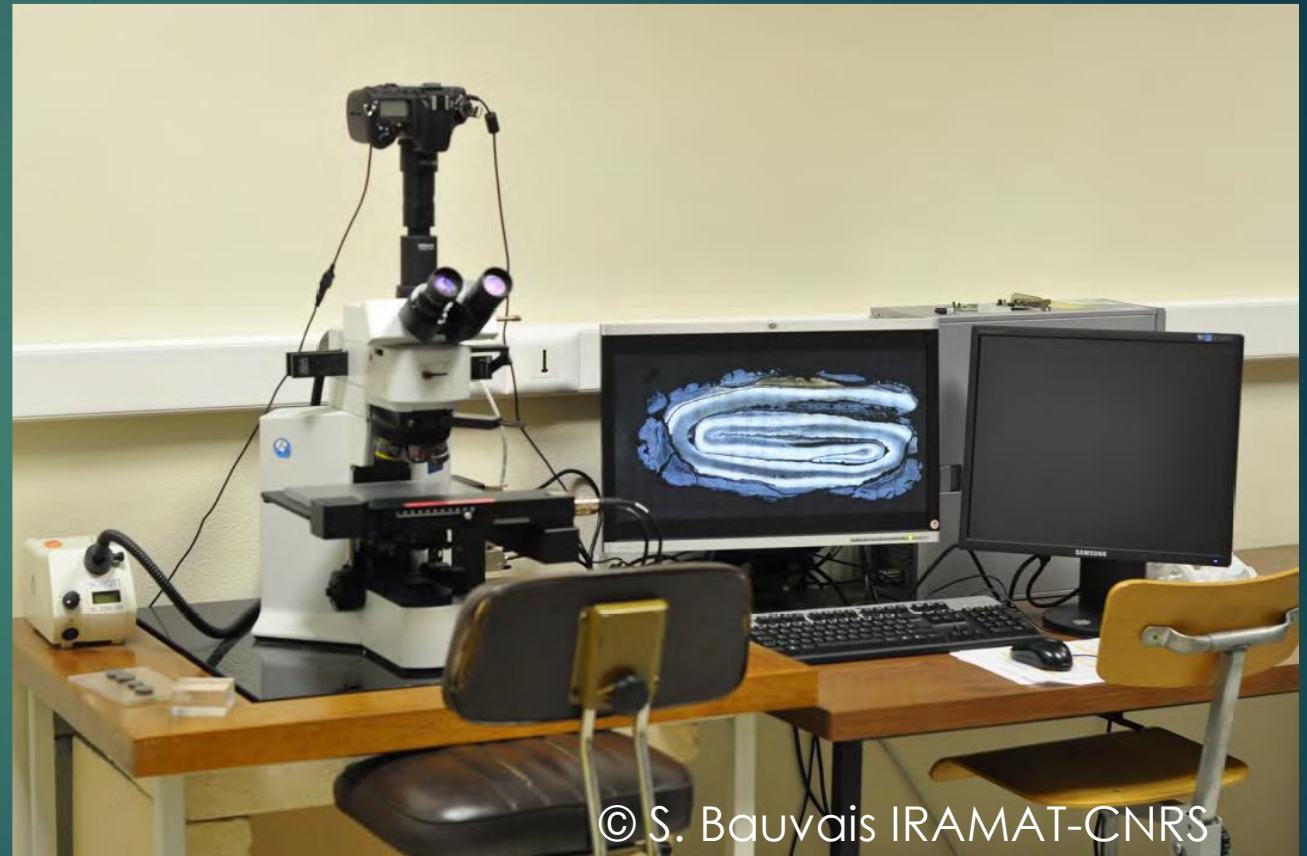
Prise d'empreinte au silicone

A. Analyse structurale

microscope optique à lumière réfléchie

- ▶ *Sur les scories on parle d'analyse pétrographique*
- ▶ *Sur le métal on parle d'analyse métallographique*

*Observation sur sections polies
Grandissement de x5 à x100*

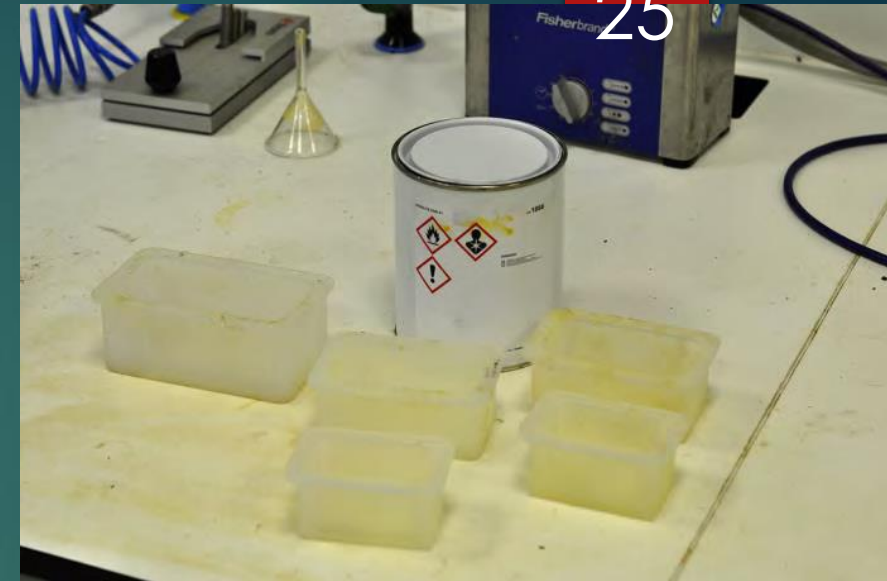


© S. Bauvois IRAMAT-CNRS

A. Analyse structurale

Procédures pour examen au microscope

- ▶ Documentation du déchet ou de l'objet avant prélèvement ou tronçonnage
- *Sablage complet (surface d'origine)*
- *Couverture photographique/3D*
- *Dessin et mesures*
- *moulage éventuel*
- ▶ Tronçonnage (disque diamant ou jet d'eau)
- *Choix de l'axe de coupe le plus pertinent*
- *Éventuellement consolidation avant tronçonnage*
- ▶ Polissage mécanique de la surface
- *Enrobage dans une résine thermo-durcissante*
- *Polissage mécanique jusqu'à poli miroir ($1\mu\text{m}$)*



Résine et moules d'enrobage

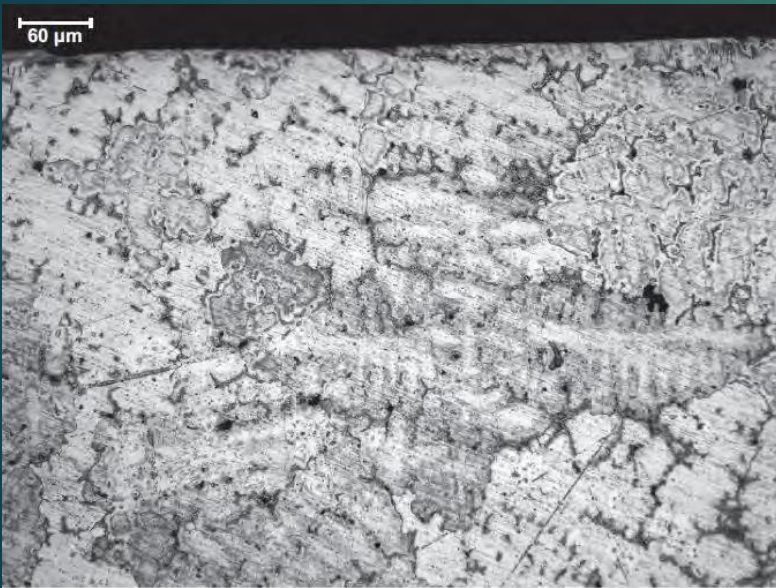


Trouneuse manuelle
(grande taille)

A. Analyse structurale

L'examen sous microscope sert à la restitution de la chaîne opératoire, en déterminant quelles transformations a subi le matériau

Degré de transformation du matériau :



*Alliage cuivreux
brut de coulée*



*Structure recristallisée
après recuit*



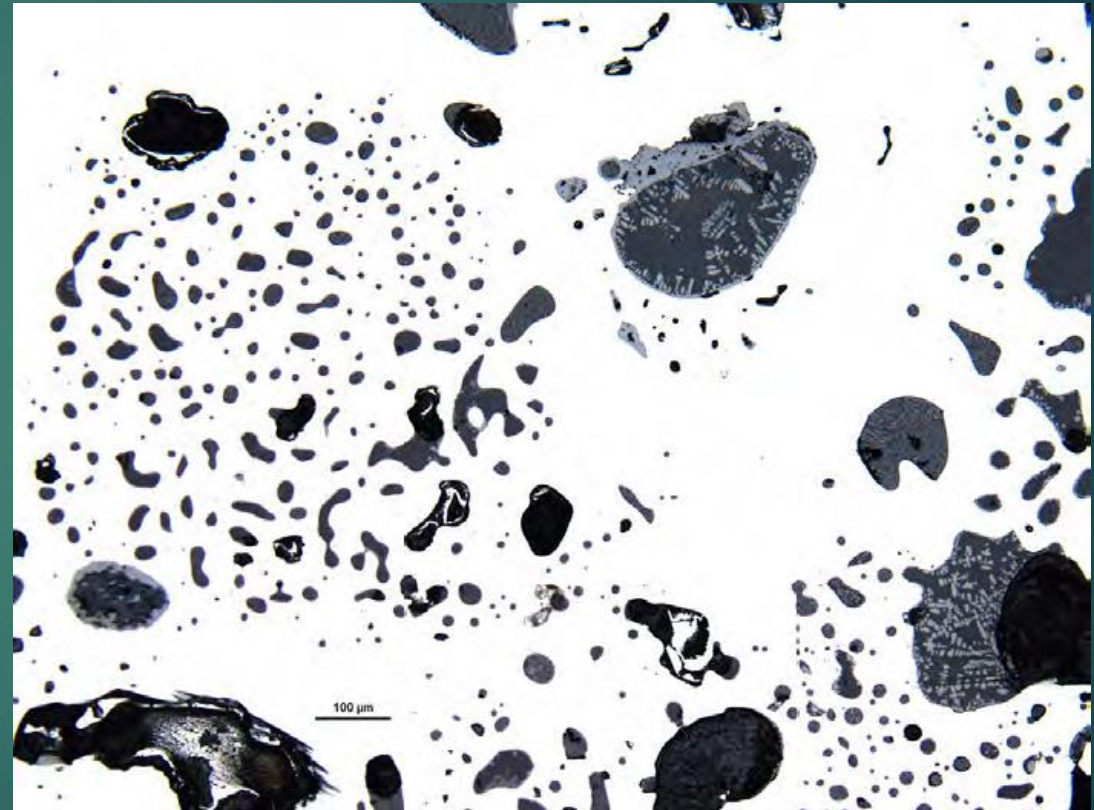
*Grains dont les macles
témoignent d'une déformation
à froid (tranche)*

A. Analyse structurale

qualité du matériau (par ex. taux d'impuretés)



Métal « propre », très peu d'impuretés



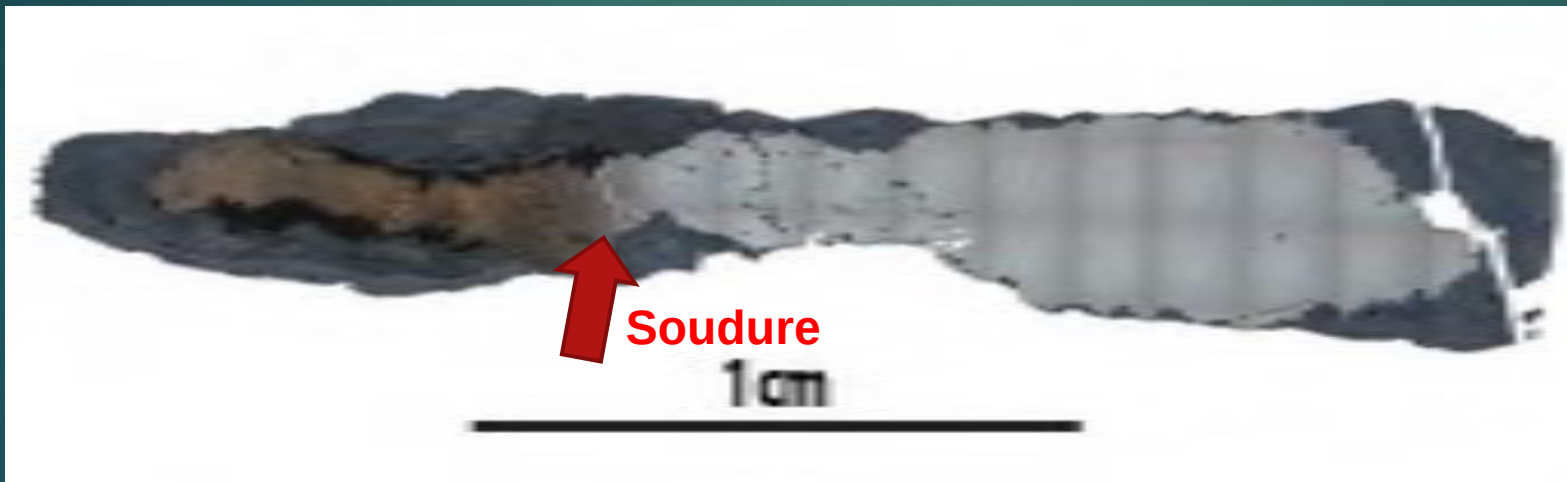
Métal « sale », beaucoup d'impuretés

A. Analyse structurale

► Identification de traitements particuliers

Tranchant aciéré

Lame en fer doux



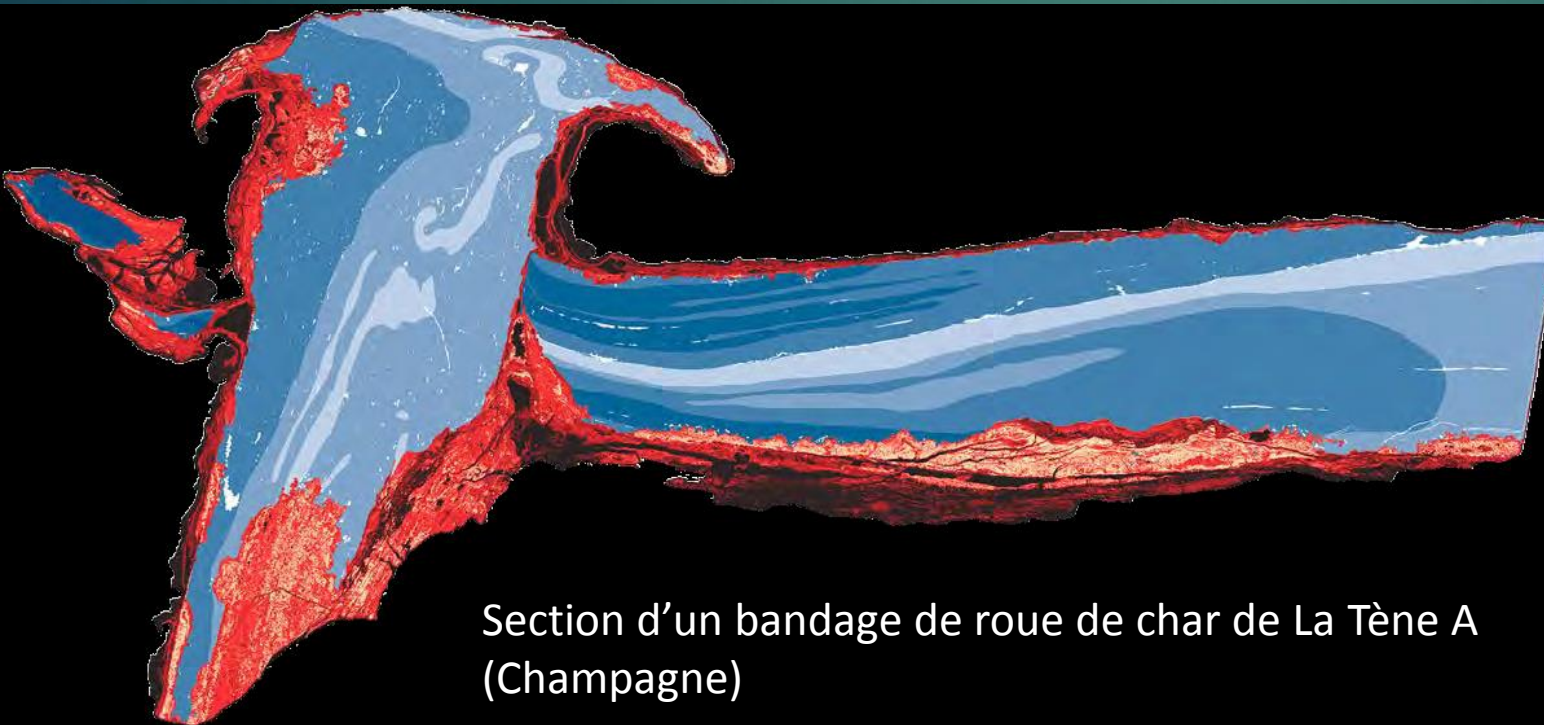
Lame de couteau à tranchant en acier rapporté

A. Analyse structurale

- Analyse d'image :
distribution et quantification
des alliages fer/carbone

<i>Bandage</i>	Surface (cm ²)	%
Ferrite	0.15	12.39
Acier non-tremvable	0.27	21.52
Acier-ferrite aciculaire	0.63	50.22
Acier hypoeutectoïde	0.18	14.03
Acier eutectoïde	0.02	1.85
Total	1.25	100

<i>Clou</i>	Surface (cm ²)	%
Ferrite	0.10	12.11
Acier non-tremvable	0.47	55.16
Acier-ferrite aciculaire	0.28	32.73
Total	0.86	100.00



Section d'un bandage de roue de char de La Tène A
(Champagne)

Limites de la coupe analysée			Porosités, cavités
Ferrite (0,02/0,1%C)			Acier non tremvable (0,1/0,3%C)
Acier-ferrite aciculaire (0,3/0,5%C)			Acier hypoeutectoïde (0,5/0,7%C)
Acier eutectoïde (0,7/0,9%C)			Acier hypereutectoïde (0,9/1,1%C)
Oxyhydroxyde de fer (produits de corrosion)			Oxyde de fer (produits de corrosion)
Milieu transformé			Scorie fayalitique
Scorie argilo-sableuse			Battitures
Charbon de bois			Roche

A Etude structurale

30

Radiographie et tomographie X

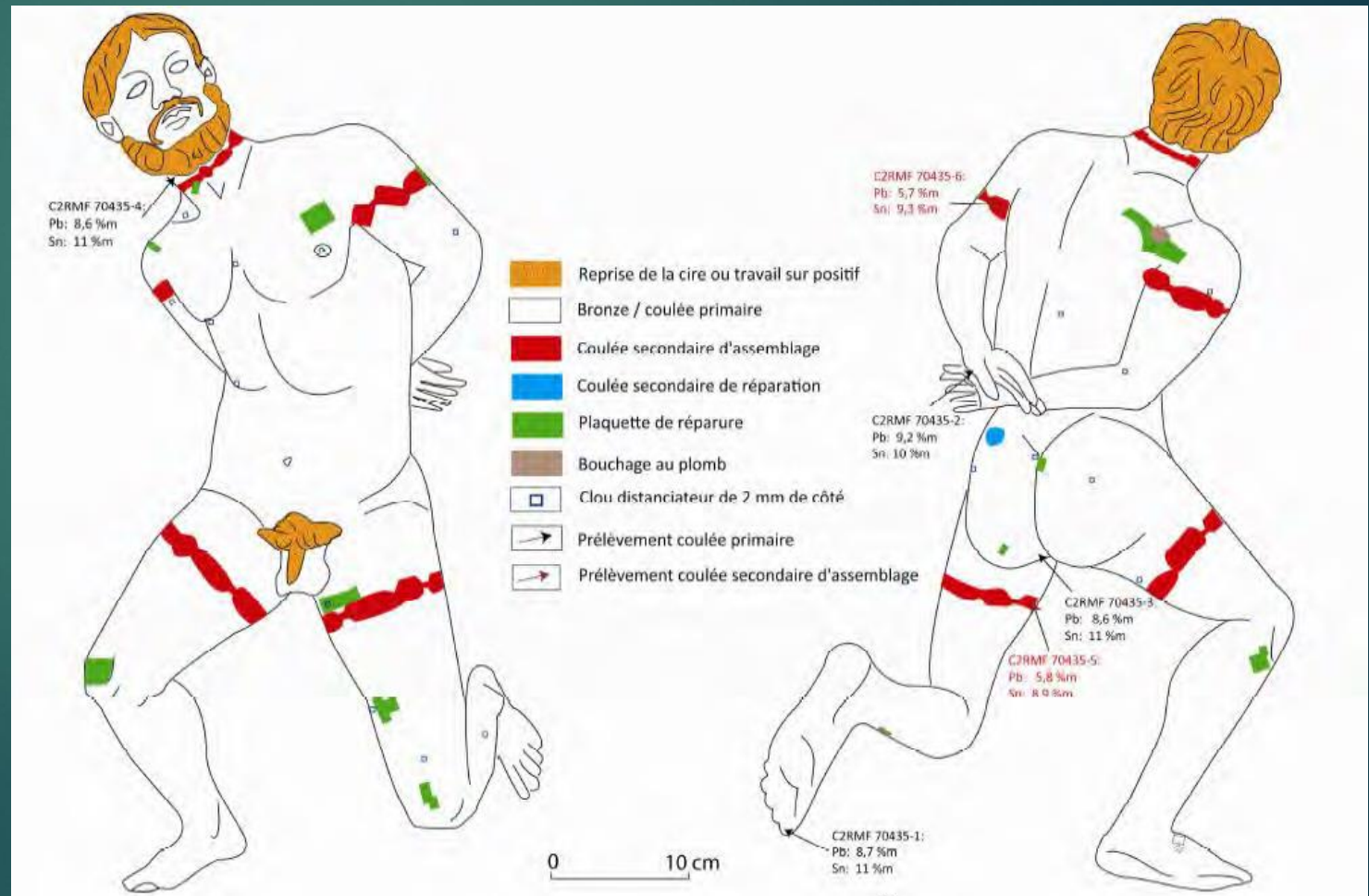
- Basée sur l'intensité des rayons incidents qui parviennent à traverser le matériau radiographié, imprimant des films sensibles.



A Etude structurale

31

- Permet de restituer le plan de coulée, le montage, ainsi que les réfections, de statues antiques (Azéma 2013)

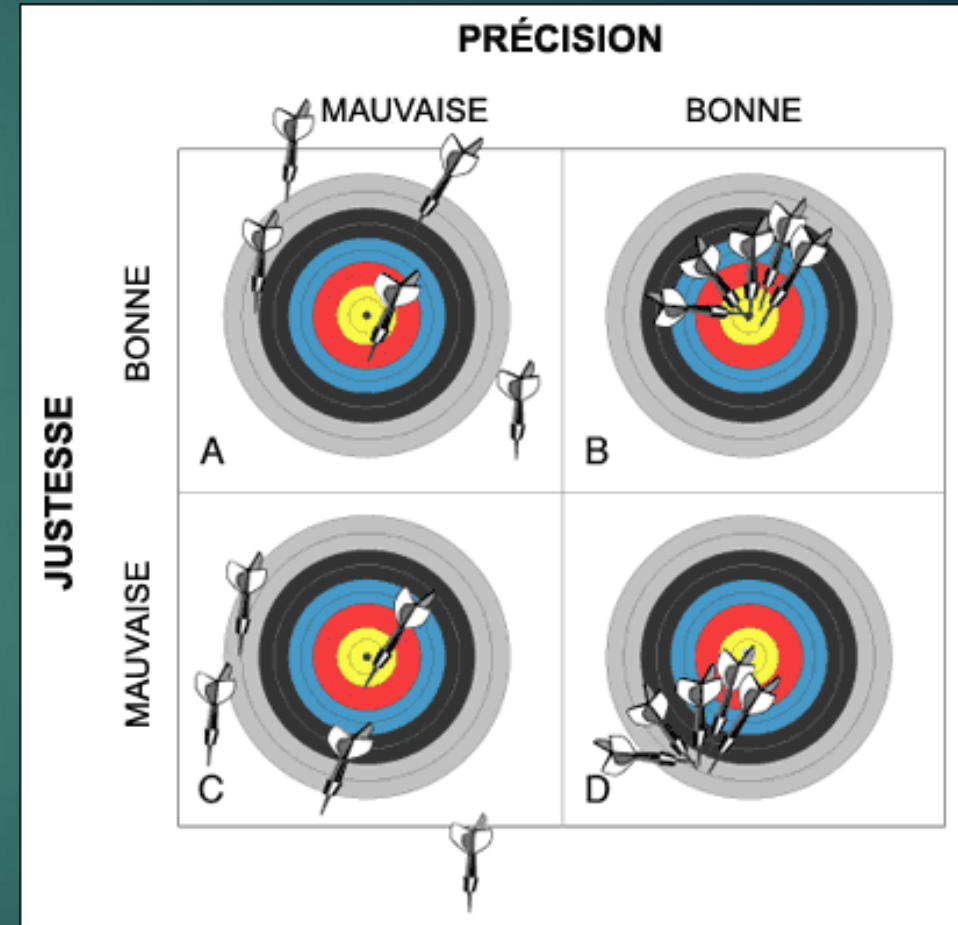


B. Les études chimiques

32

► Quelle(s) technique(s) employer ?

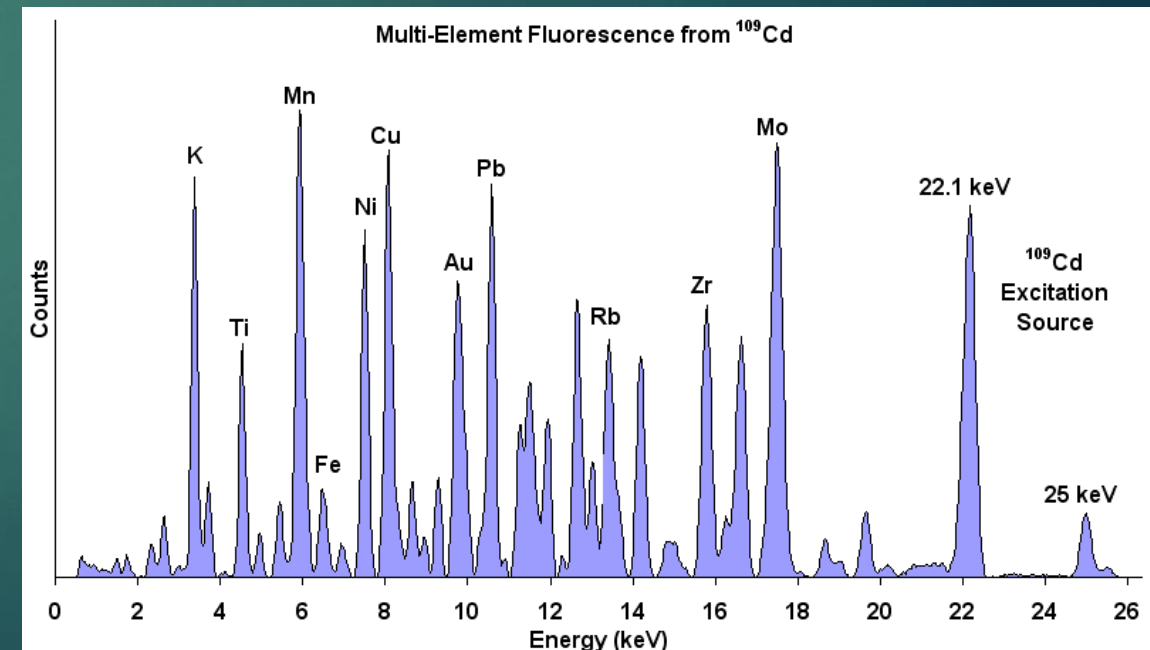
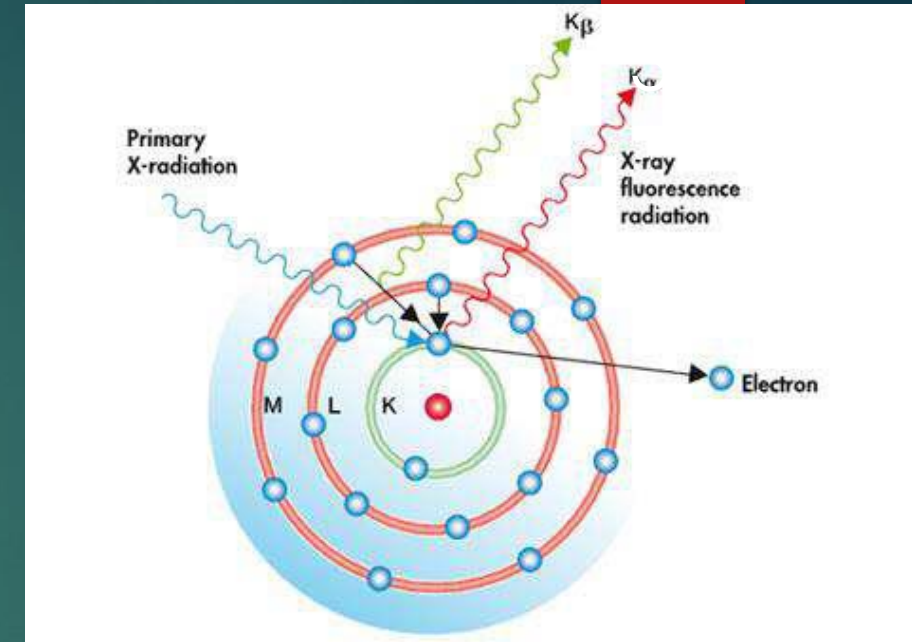
- L'information obtenue permet-elle de traiter la question posée ?
 - Disponibilité et accessibilité du dispositif analytique
 - Coût de l'analyse
 - Echantillonnage (analyses destructives, invasives, analyse in situ...)
 - Qualités intrinsèques du dispositif analytique (limites de détection, temps d'acquisition, panorama d'éléments, précision...)
- Comment juger de la qualité de l'information ?



B – Les études chimiques

Fluorescence X

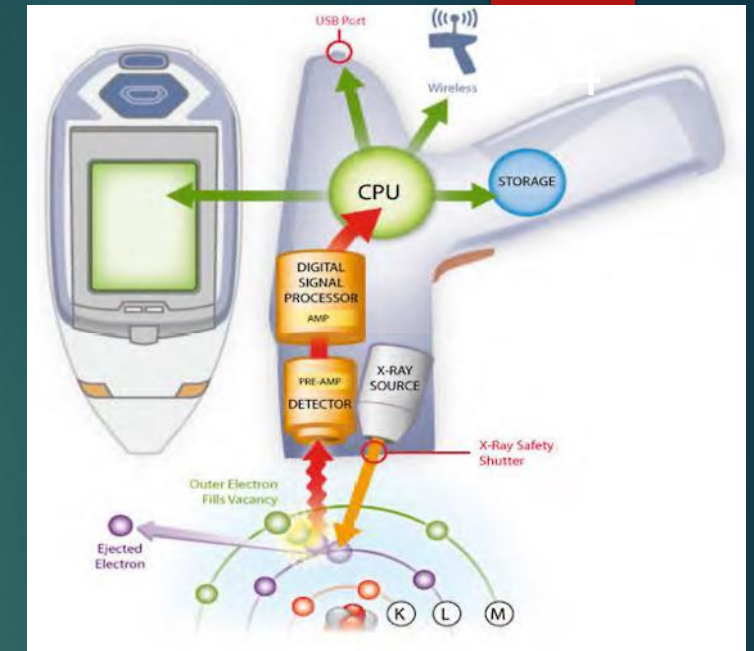
- ▶ **Principe** : le rayonnement incident (rayons X ou gamma) excite les atomes qui composent le matériau. Ces derniers retrouvent un état fondamental (repos) en réémettant un photon X collecté par le détecteur.
- ▶ Ce photon X possède une énergie et une longueur d'onde caractéristiques de l'élément chimique excité
- Rapide peu coûteux, non destructif
- Précision réduite (50 à 250ppm), fortement impacté par la taphonomie de l'objet
- Permet de renseigner rapidement les compositions : identification du métal ; indication des pratiques métallurgiques et la détermination rapide des alliages, mais limité pour les question de provenance
- Bon outil pour une première approche



B. Les études chimiques

► Fluorescence X portable

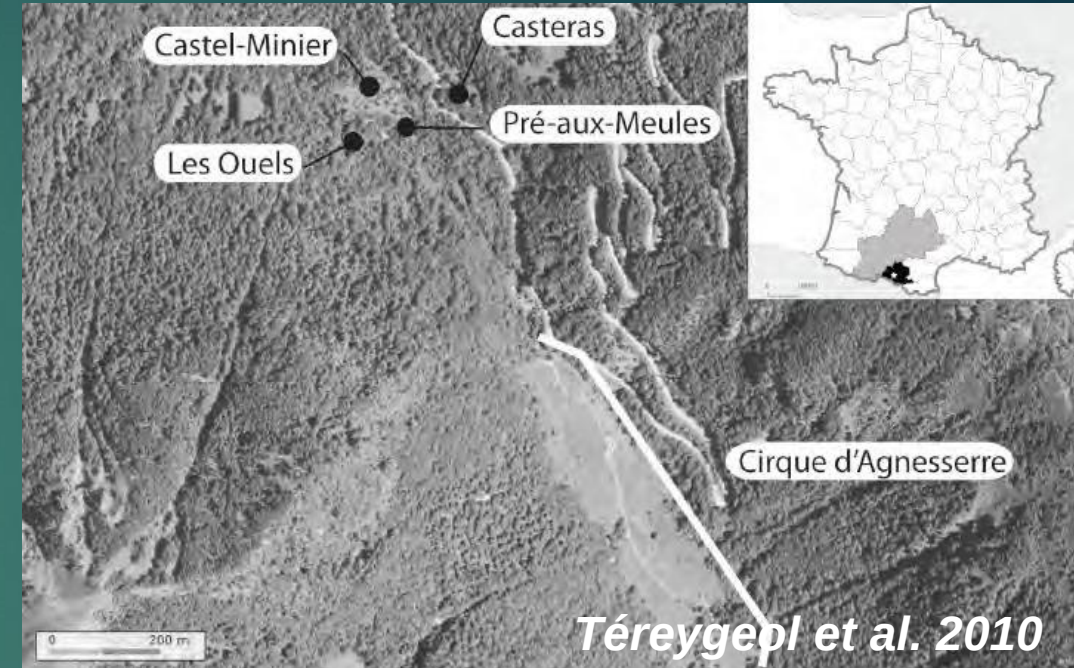
- Possibilité d'analyses *in situ*
- Non invasif (pas de préparation de l'échantillon, pas d'altération par le rayonnement)
- Limite de détection entre 50 et 250 ppm (dépendant des conditions)
- Temps d'acquisition court (1 à 2 minutes en général)
- Ne permet pas le dosage des éléments légers (limite inférieure à l'aluminium ou silicium)

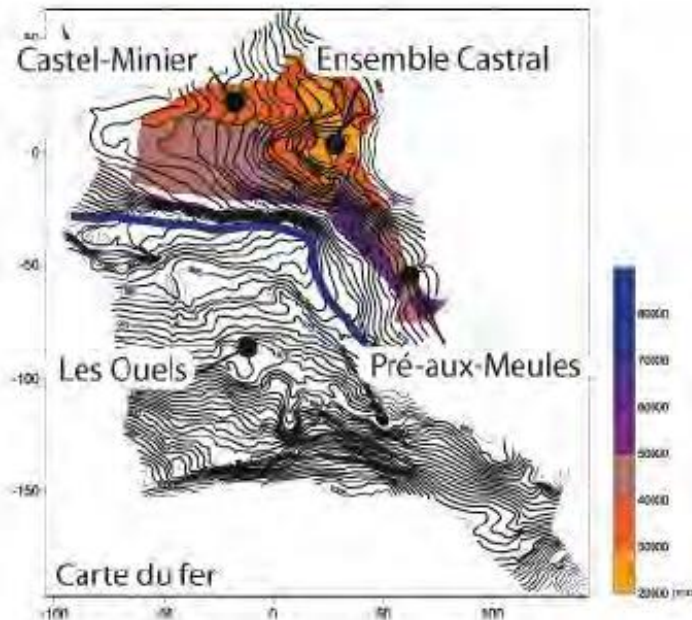
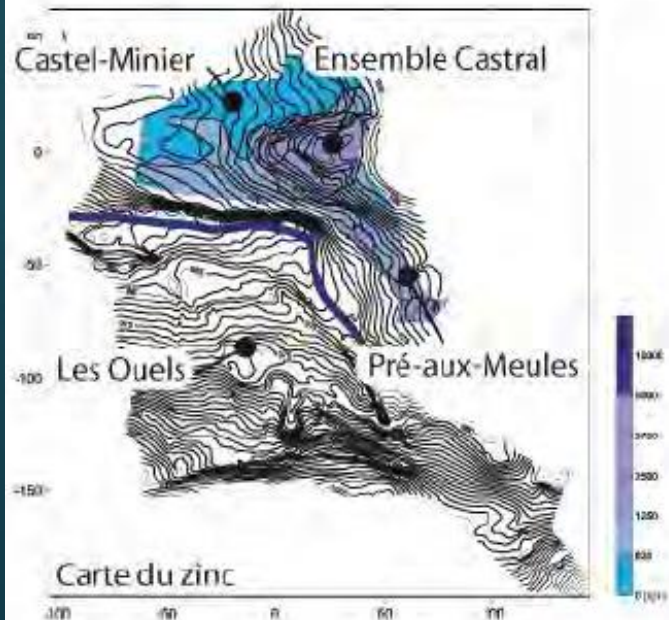
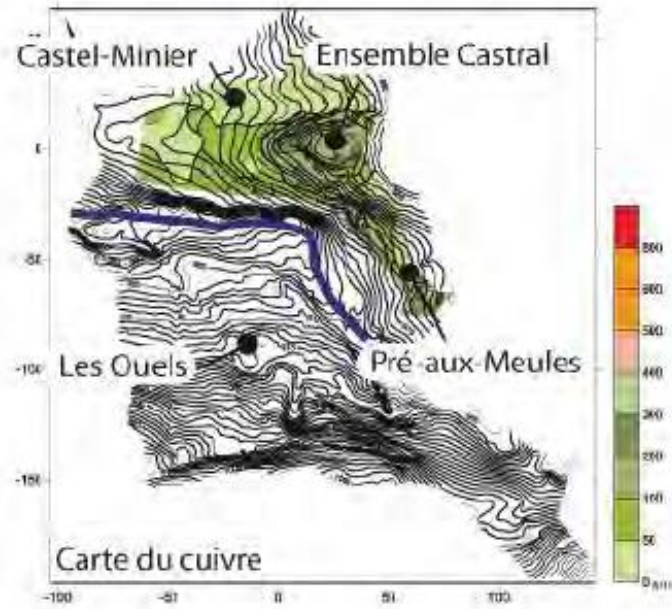
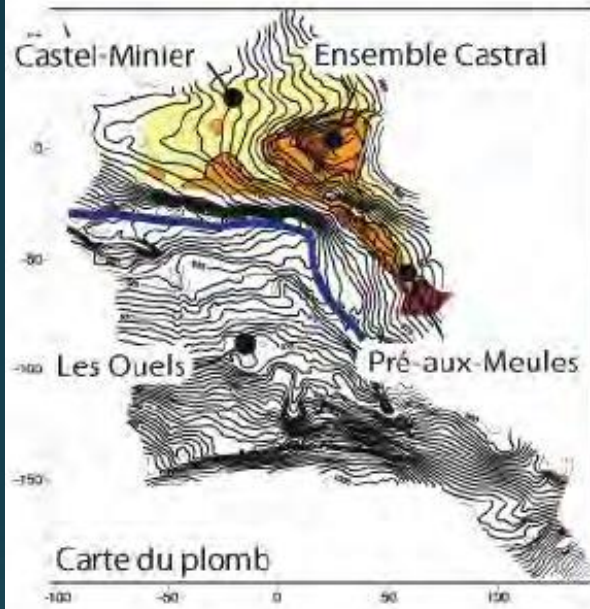


B – Les études chimiques

► Prospection géochimique autour du complexe métallurgique de Castel- Minier (Ariège) par **Fluorescence X portable**

- Recherche des espaces dévolus à la métallurgie de l'argent (traitement de la galène PbS)
- Réalisation de cheminements avec prélèvements de sédiment à intervalles réguliers (10 mètres)
- Dosage de 4 éléments chimiques liés aux activités minéralurgiques et de métallurgie extractive





Résultats :

Mise en évidence des signatures de gisements

Seconde étape :

Prélèvement de plusieurs dizaines d'échantillons de scories de réduction provenant de ferriers distincts

- Dosage des éléments majeurs et mineurs pour restituer les conditions opératoires

- Traitement des résultats par analyses statistiques multivariées (ACP)

- Phasage des accumulations de déchets;

Résultats : évolution des procédés de réduction du minerai de fer

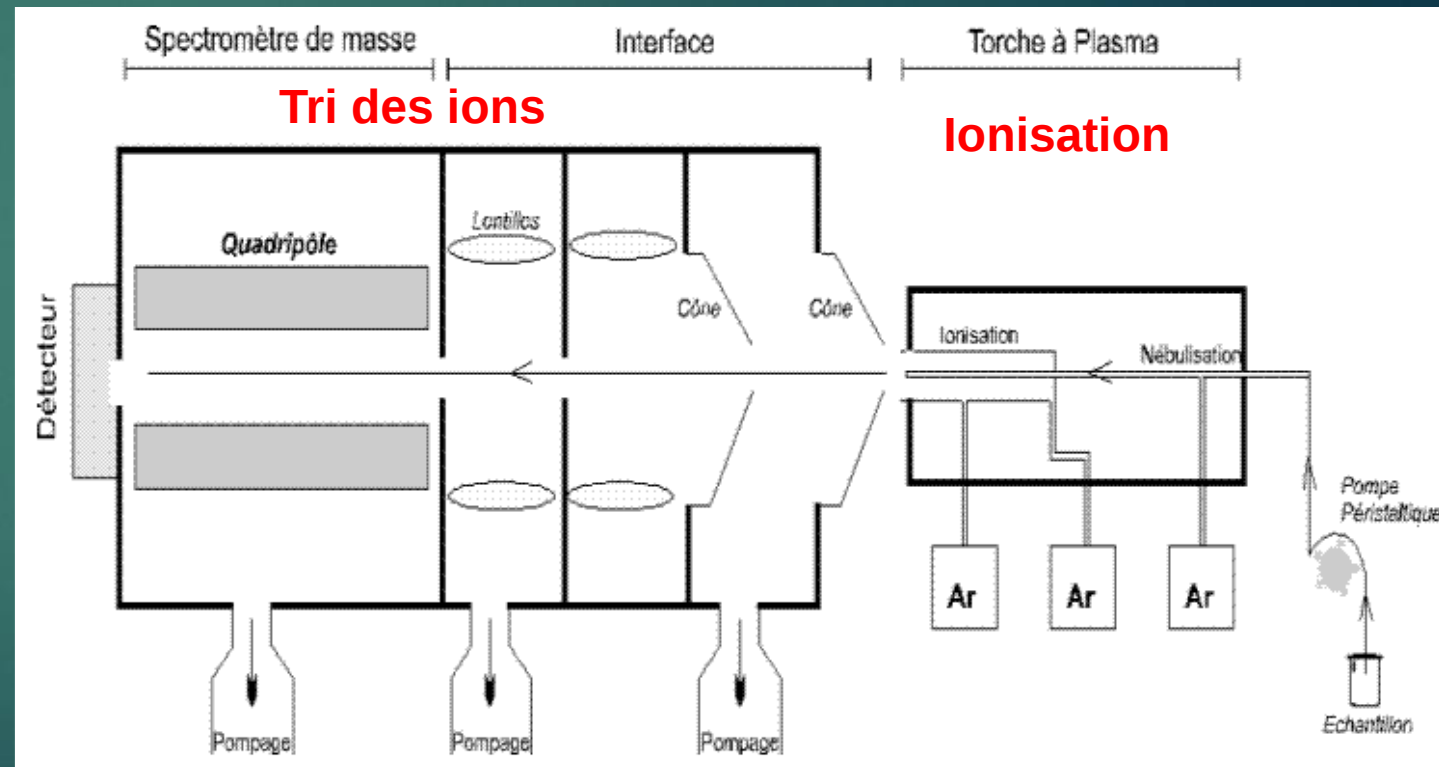
B – Les études chimiques

► Spectrométrie de masse (MS)

Principe : l'échantillon est ionisé (un électron est arraché de l'atome). Les ions sont « triés » par des champs électromagnétiques selon leur masse atomique et leur charge.

Caractéristiques :

- Nécessite la dissolution de l'échantillon (destructif)
- Mesure la **masse** et la **charge** des éléments
- Limites de détection très basses (inférieures au ppm)
- Temps de comptage court (de l'ordre de la minute)
- Permet de doser des **isotopes**



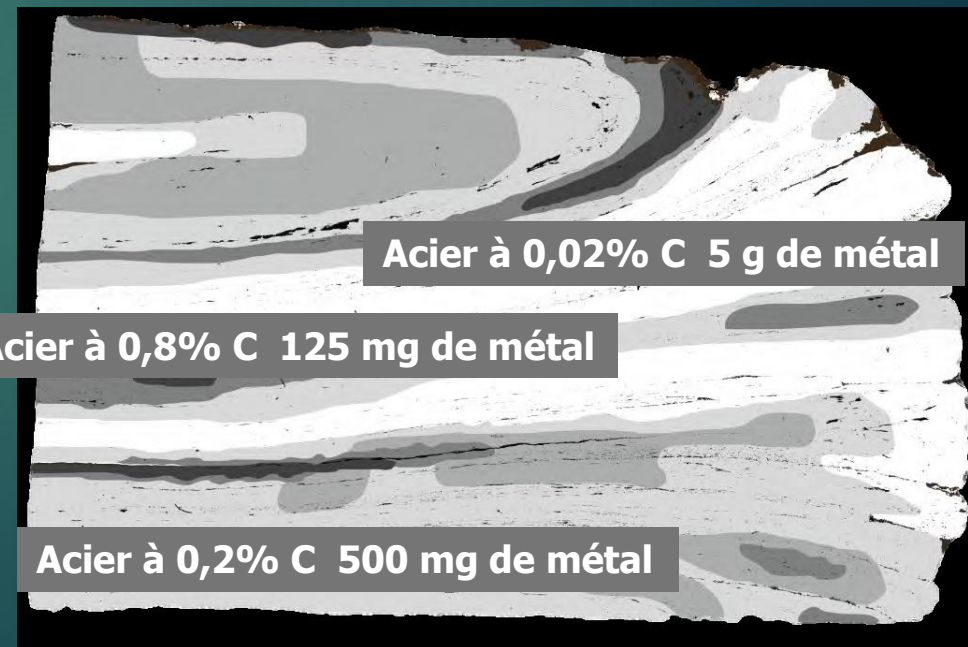
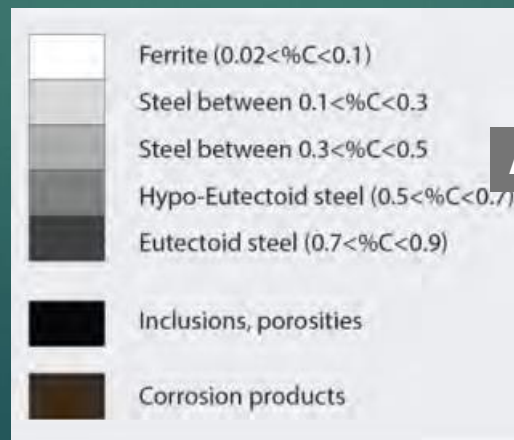
B – Les études chimiques

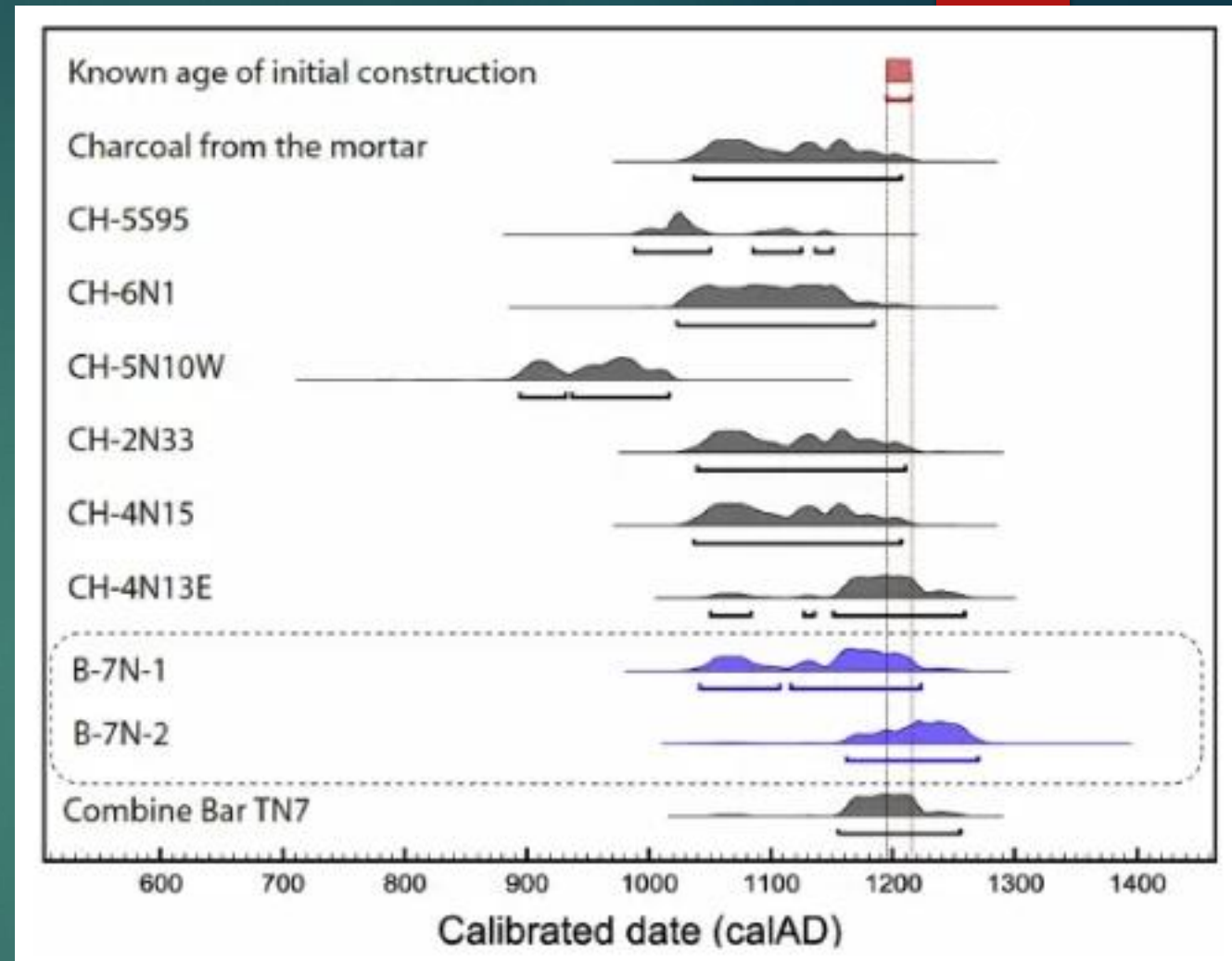
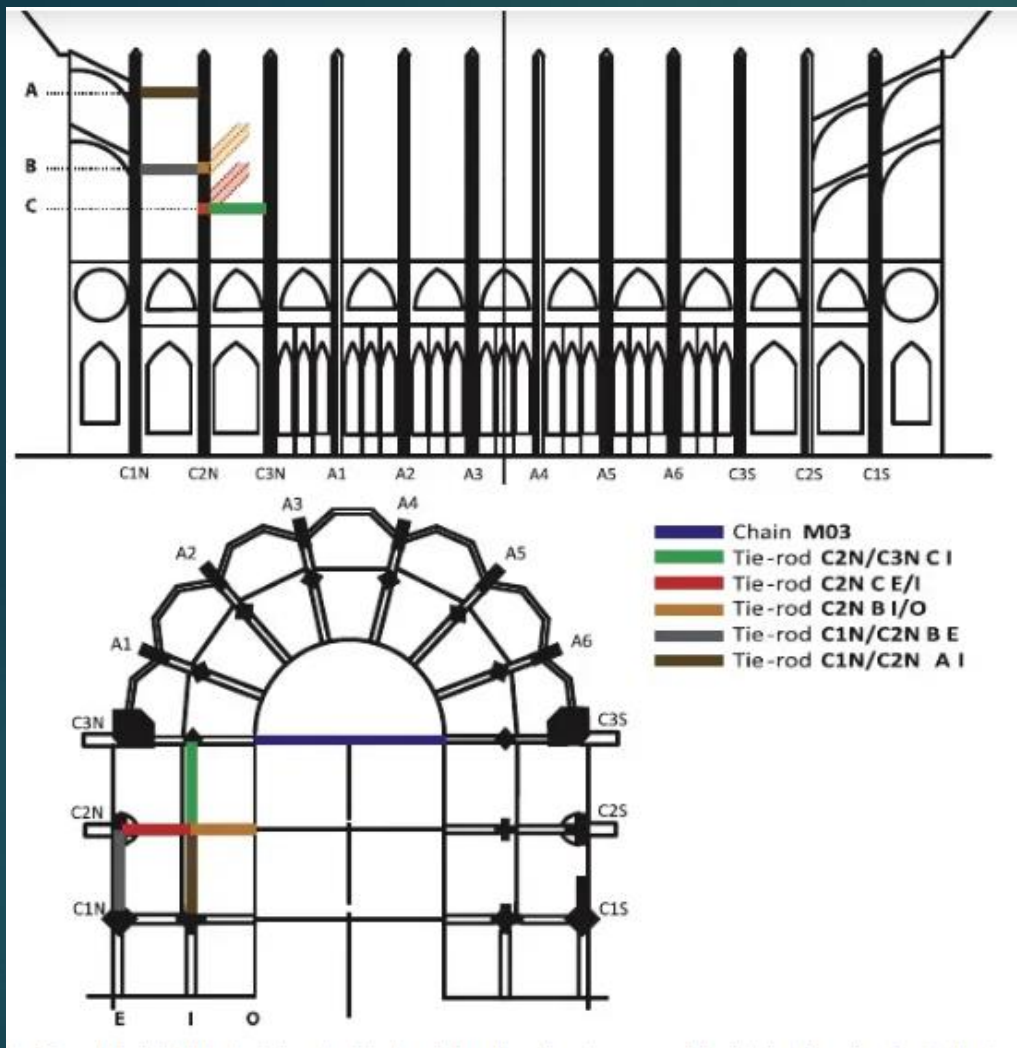
Sélection des zones à échantillonner par examen métallographique (1 mgr de carbone)

► Spectrométrie de masse par accélérateur (AMS)

Datation des alliages ferreux par radiocarbone (Leroy et al., 2015)

- Les produits sidérurgiques contiennent toujours une certaine quantité de carbone (min. 0,02 %)
- Le métal comporte souvent des plages plus aciérées (jusqu'à 1% C en sidérurgie ancienne)
- On date l'âge de bois, transformé en charbon, pour alimenter les structures de combustion (réduction ou forge).
- Le carbone contenu dans certains minerais (carbonates) n'influence pas significativement la date ; l'apport majeur provient du bois.





Les attaches en fer datent de la construction de la cathédrale de Bourges et ne sont pas postérieures. Elles fournissent un exemple de métallurgie du fer des 11^e et 12^e s. AD (Leroy et al. 2015)

calibrated radiocarbon dates (2s) for samples taken from the triforium chain (CH-), from the bar TN7 (B-7N-) and from the charcoal in the mortar of Bourges Cathedral. For the bar TN7, two measures were done on the same sample (in blue). They were combined with >95% probability to calculate a combined age density representative of the bar (1155 e 1257 calAD, 2s). The known age of initiation of construction (1195 e 1214) is represented in red. Calendar age ranges were calculated using Oxcal 4.2

B – Les études chimiques

40

► Spectrométrie PIXE (*Proton-Induced X-ray Emission*)

Caractéristiques :

- Non invasif
- Mesure **l'énergie** caractéristique des rayons X induite par un faisceau de protons
- Bonne résolution spatiale (surface de l'ordre du μm^2 jusqu'à plusieurs mm^2)
- Temps de comptage variable (de quelques minutes à plusieurs heures)
- Spectre d'éléments dosés large (de Na à U)
- Limite de détection basse (de l'ordre du ppm)
- Analyse limitée à la **surface** de l'objet



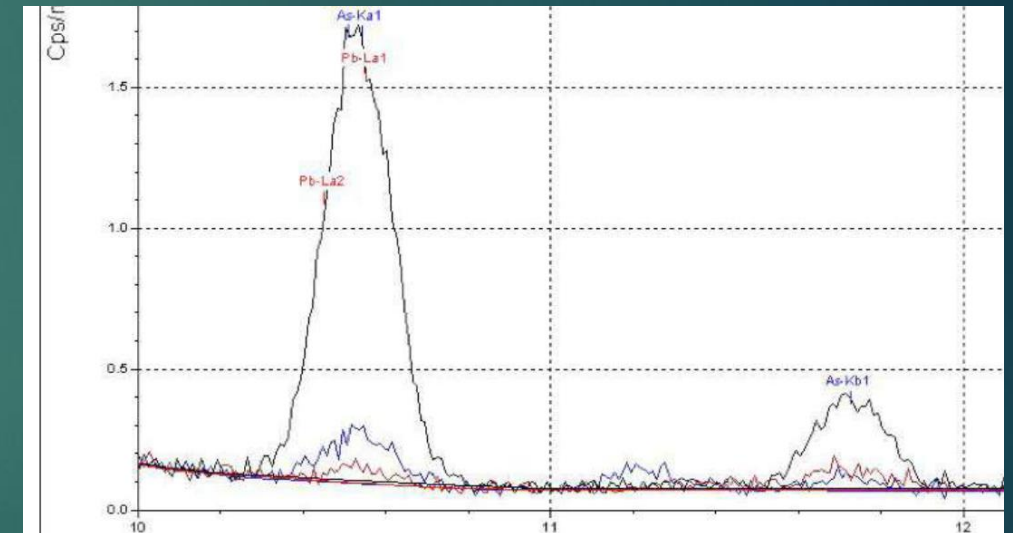
© NewAGLAE

B – Les études chimiques

41

► Spectrométrie optique (ICP AES)

- **Avantage** : Bonne précision
- **Inconvénient** : Destructif, coûteux, long protocole
- Permet de renseigner précisément les compositions.
- Adapté pour la provenance
- Limites : le système optique laisse place à des interférences entre certains éléments



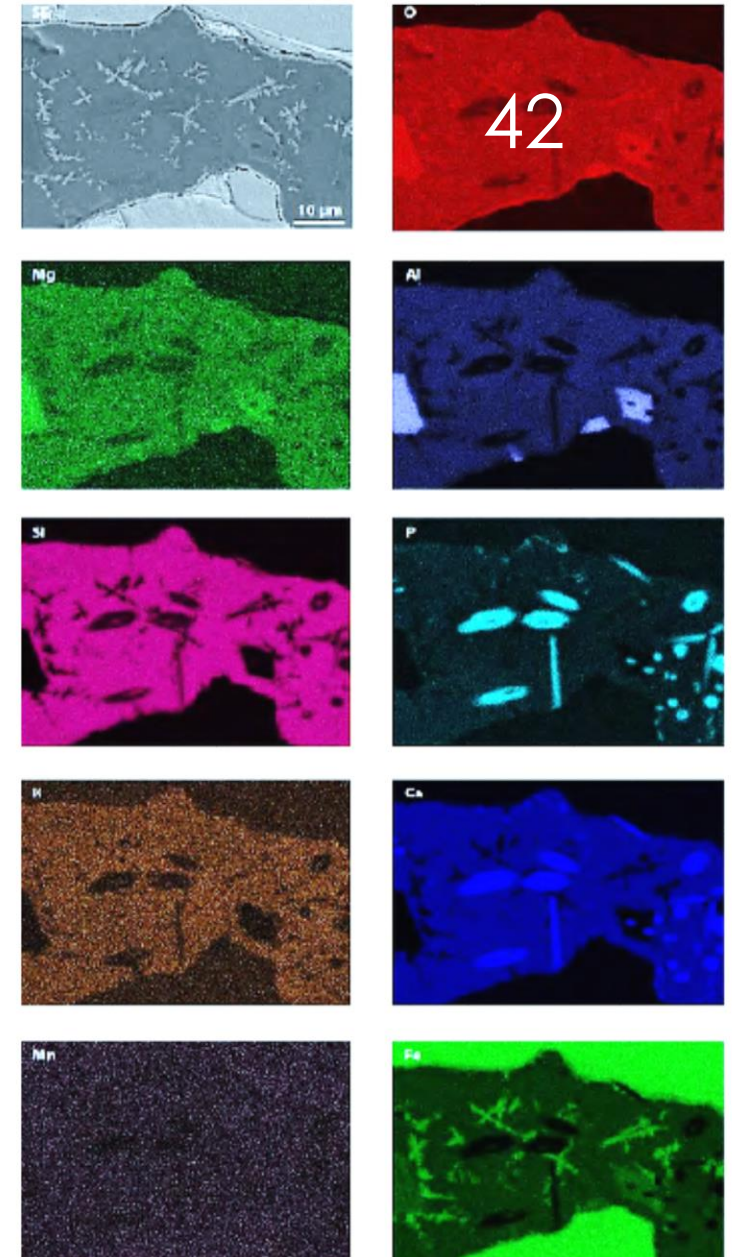
B – Les études chimiques

► Spectrométrie à dispersion d'énergie EDS

Analyse des inclusions de scorie présentes dans les produits ferreux

- Petites dimensions (quelques dizaines à centaines de μm), réparties de manière hétérogène dans la matrice
- Le chimisme est fortement lié au faciès pétrographique du matériau

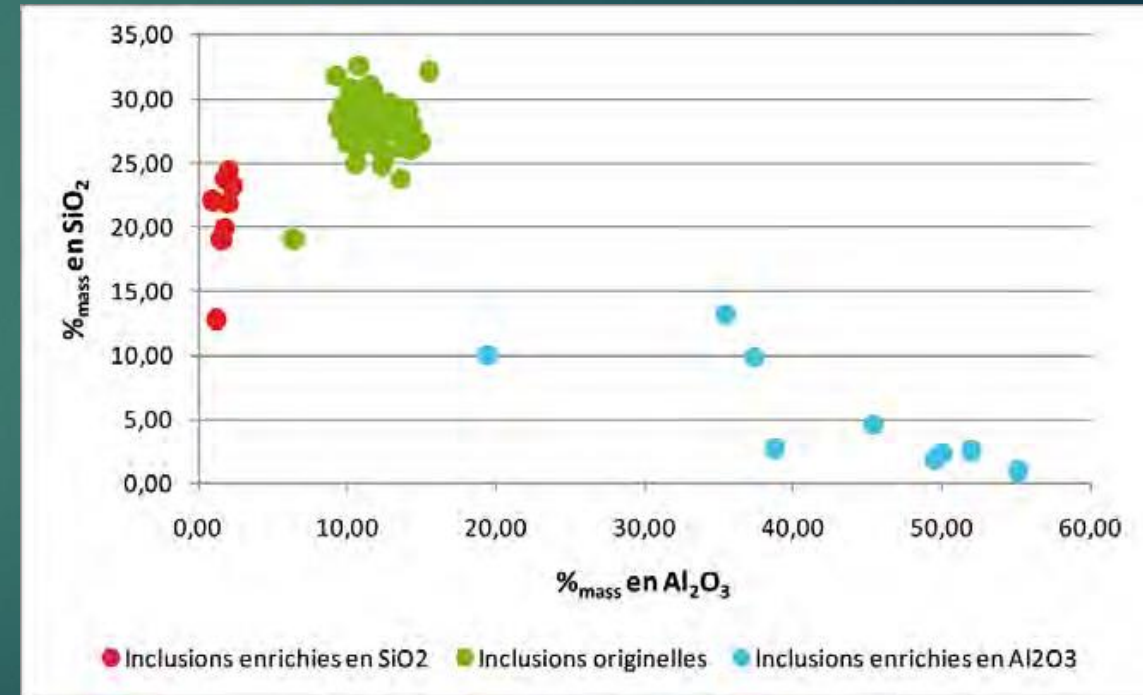
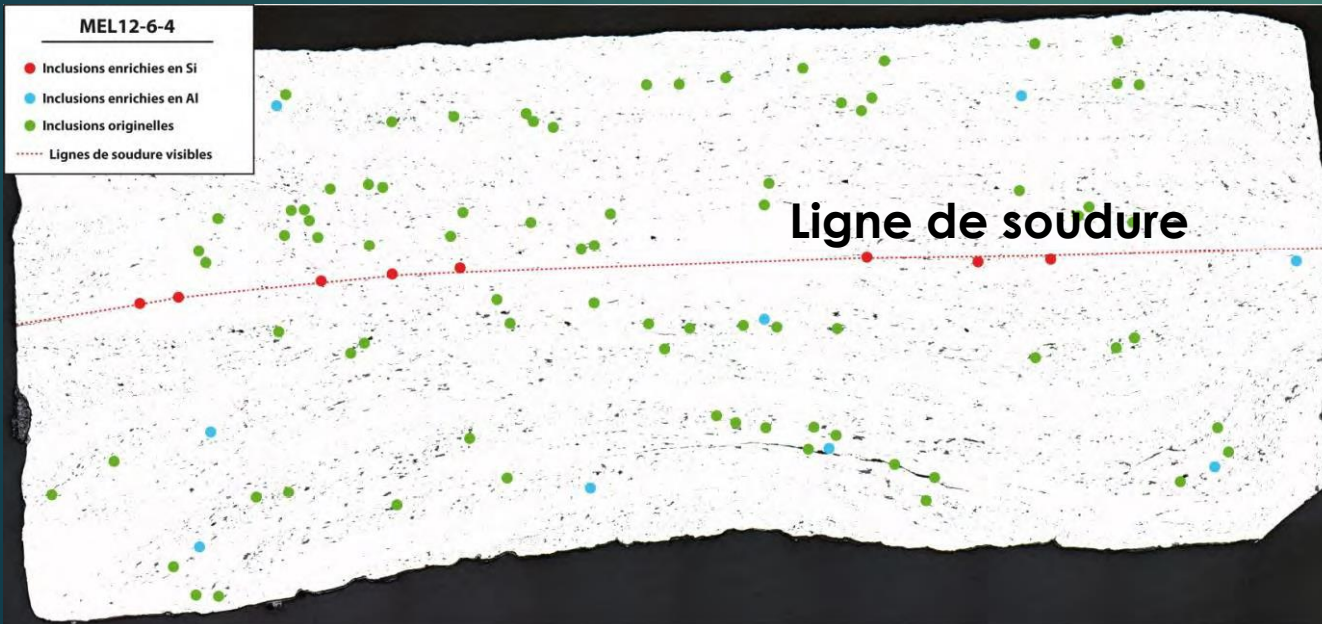
Le chimisme des inclusions permet de traiter de nombreuses problématiques, en particulier la restitution de la chaîne opératoire et la provenance des objets ferreux



B. Les études chimiques

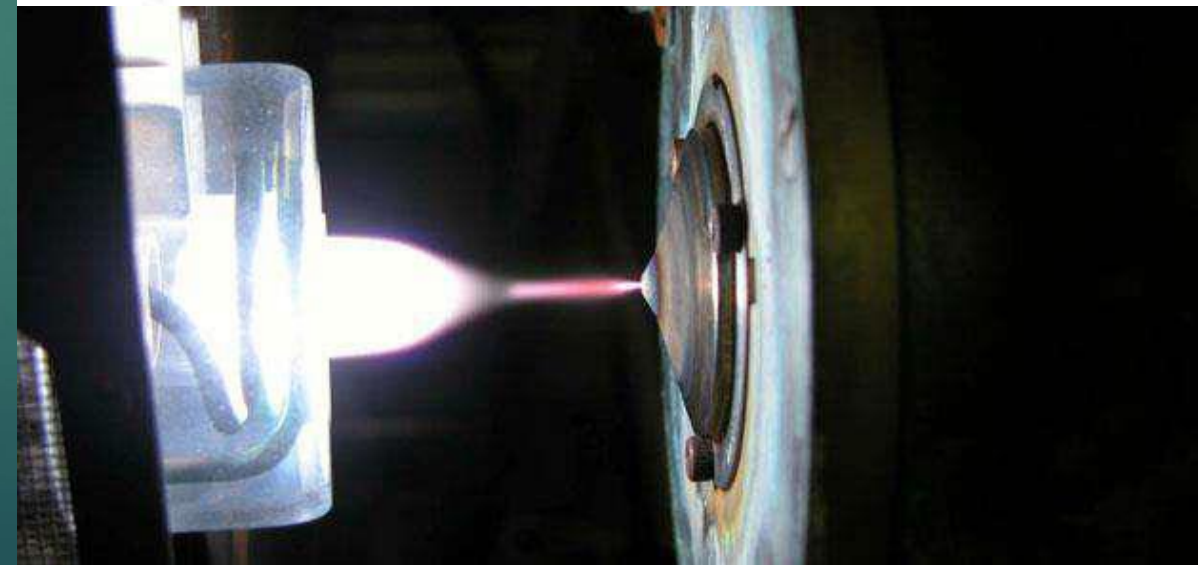
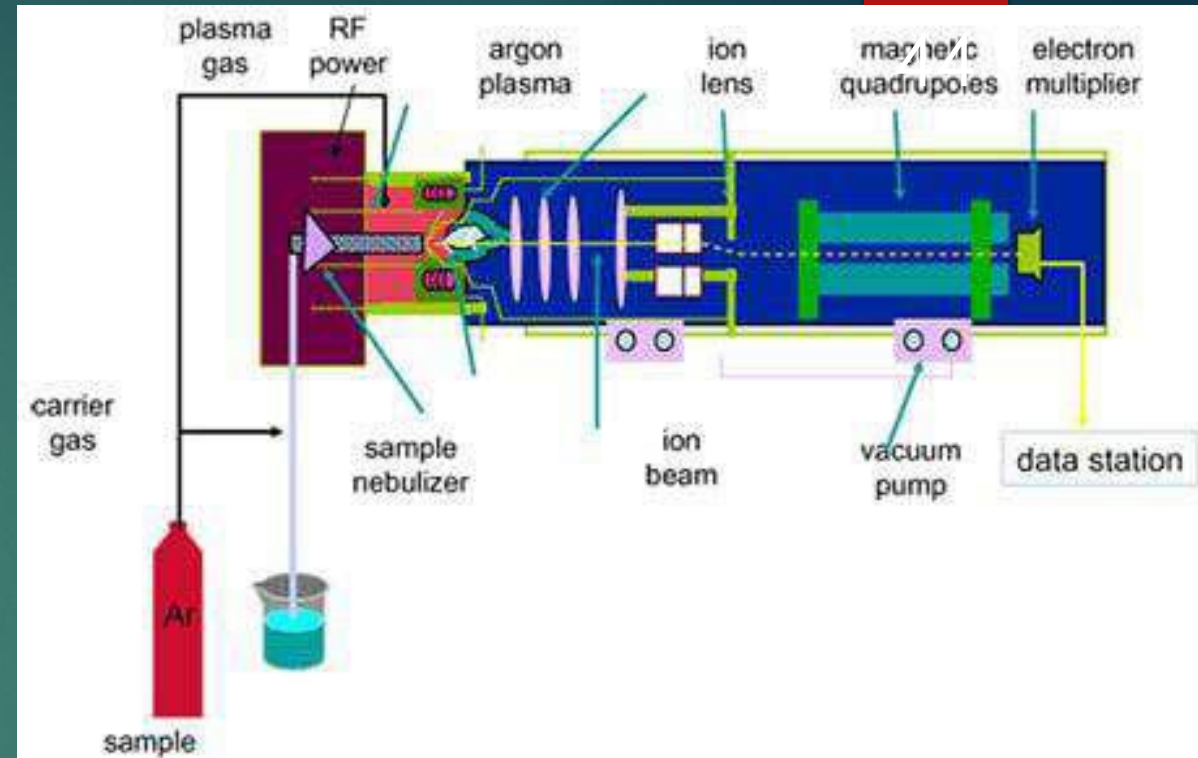
Spectrométrie EDS

Restitution de la chaîne opératoire – mise en évidence de soudures



B. Analyses chimiques

- ▶ **Spectrométrie de masse couplée à un plasma (ICP-MS)**
- ▶ *Caractérisation chimique de minerais et de déchets métallurgiques*
- ▶ Dosage des éléments majeurs et traces afin d'établir la signature chimique de systèmes de réduction du fer
- **Avantage** : Très bonne précision (de l'ordre du ppb soit 0.0000001 %)
- **Inconvénient** : Destructif, coûteux, long protocole
- **Principe** : l'échantillon est ionisé (un électron est arraché de l'atome). Les ions sont « triés » par des champs électromagnétiques selon leur masse atomique et leur charge
- ▶ Permet de renseigner précisément les compositions et déterminer des provenances

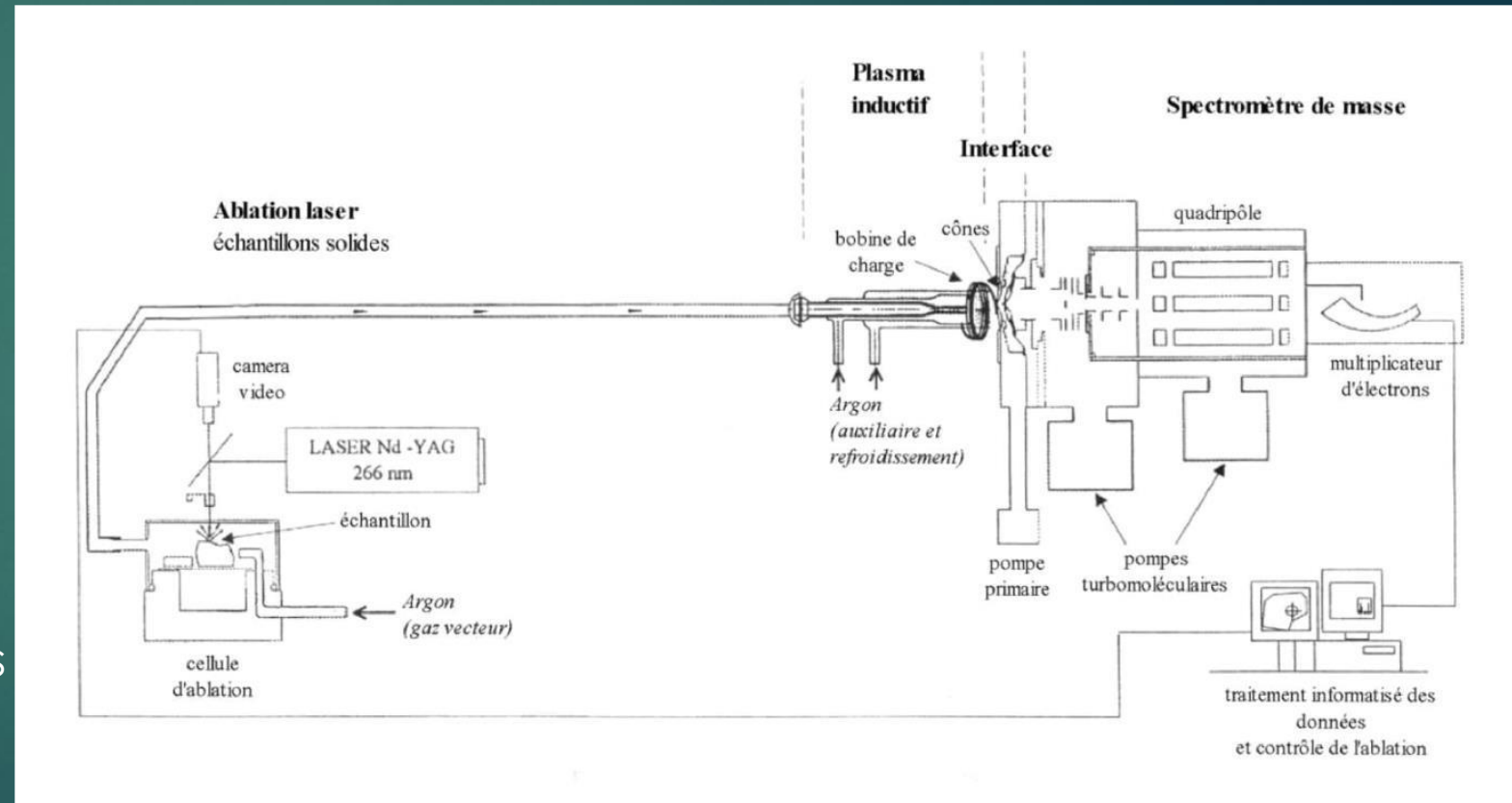


B. Analyses chimiques

► ICP-MS à ablation laser (LA-ICP-MS)

Caractéristiques :

- Micro-ablations à la surface de l'échantillon (non-destructif)
- Bonne résolution spatiale (on visualise la zone à analyser) ; quelques dizaines de microns
- Permet de réaliser des profils de concentration (de la surface vers le coeur de l'échantillon)
- Permet d'analyser des échantillons solides



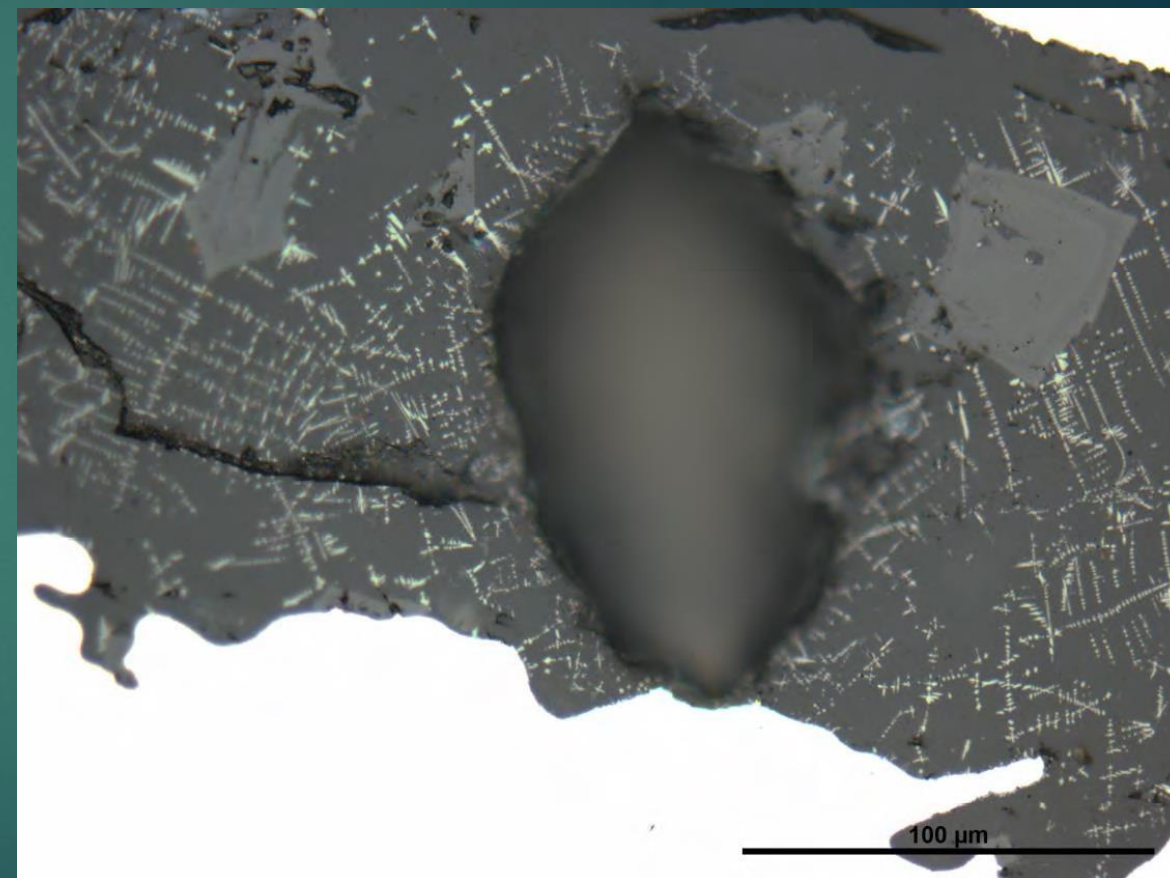
B. Analyses chimiques

► ICP-MS à ablation laser (LA-ICP-MS)

Analyse des inclusions de scorie présentes dans les produits ferreux

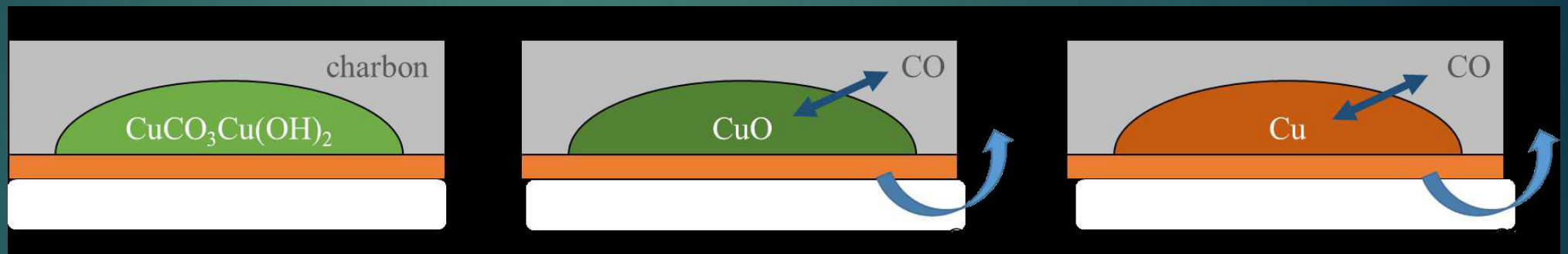
- Petites dimensions (quelques dizaines à centaines de μm), réparties de manière hétérogène dans la matrice
- Nécessité de doser les terres rares (éléments traces, teneurs de l'ordre du ppm ou quelques dizaines de ppm)

Détermination d'affinités chimiques entre objets ferreux et centres de production sidérurgiques pour déterminer la provenance des artefacts

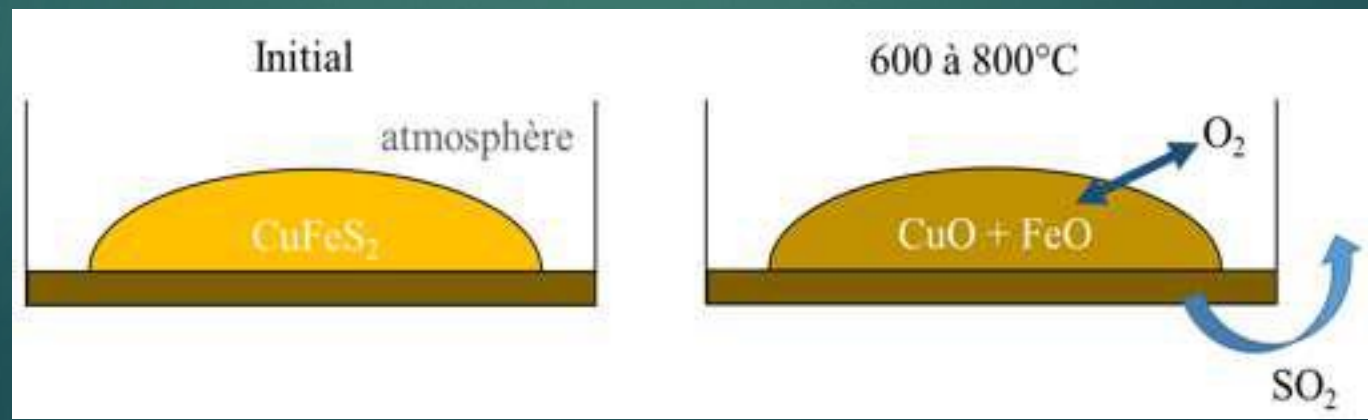


Procédés techniques : le cuivre

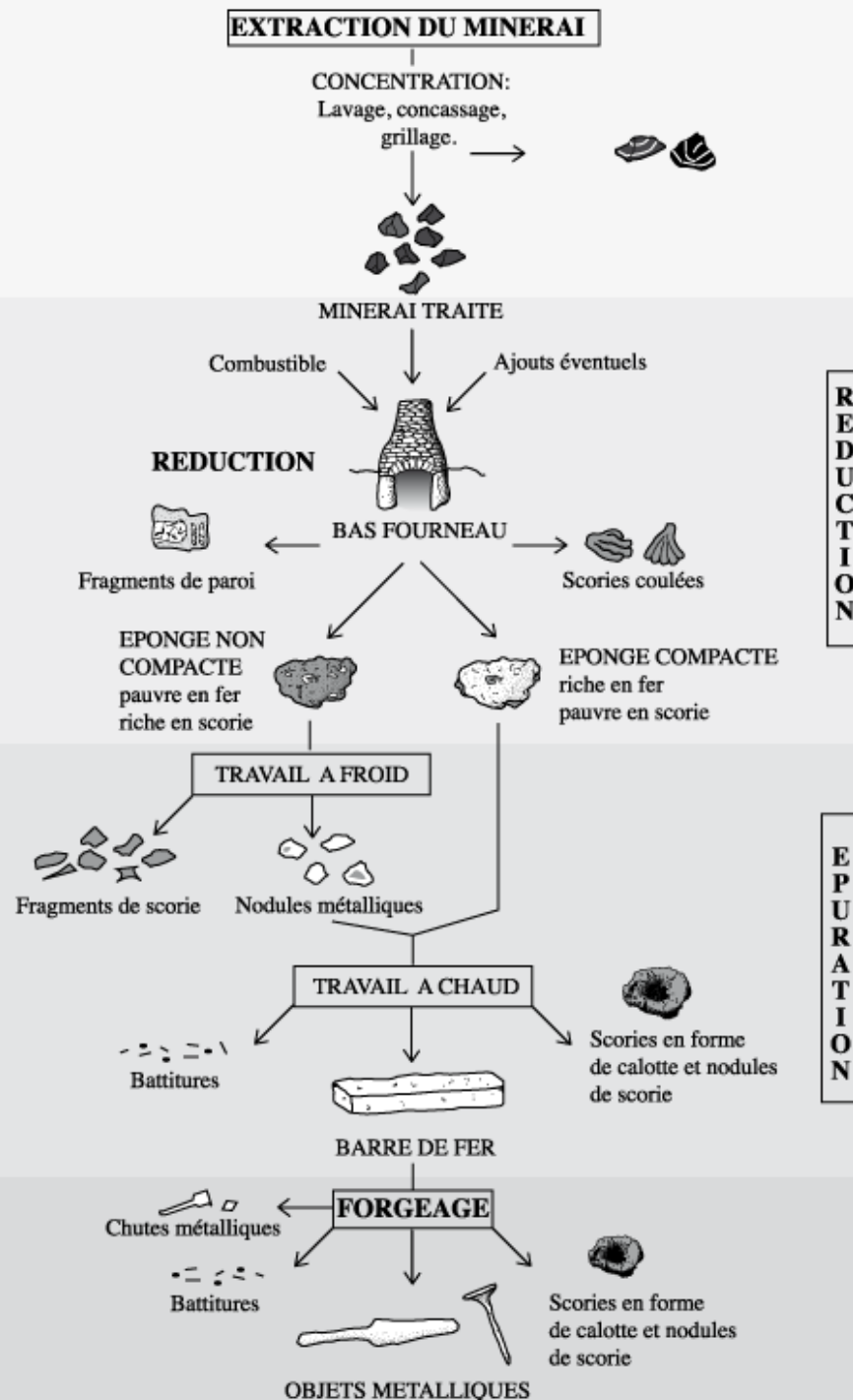
- RÉDUCTION : minéraux oxydés
les sulfures préalablement réduits ou les « oxydes »



Les minéraux sulfurés nécessitent un grillage pour enlever le S avant réduction



Chaine opératoire du fer



Minerai



Charbon de bois



Ajouts/fondants



Paroi fondue



Loupe métallique
(éléments réduits)



Scorie (oxydes)

4. Histoire de la métallurgie

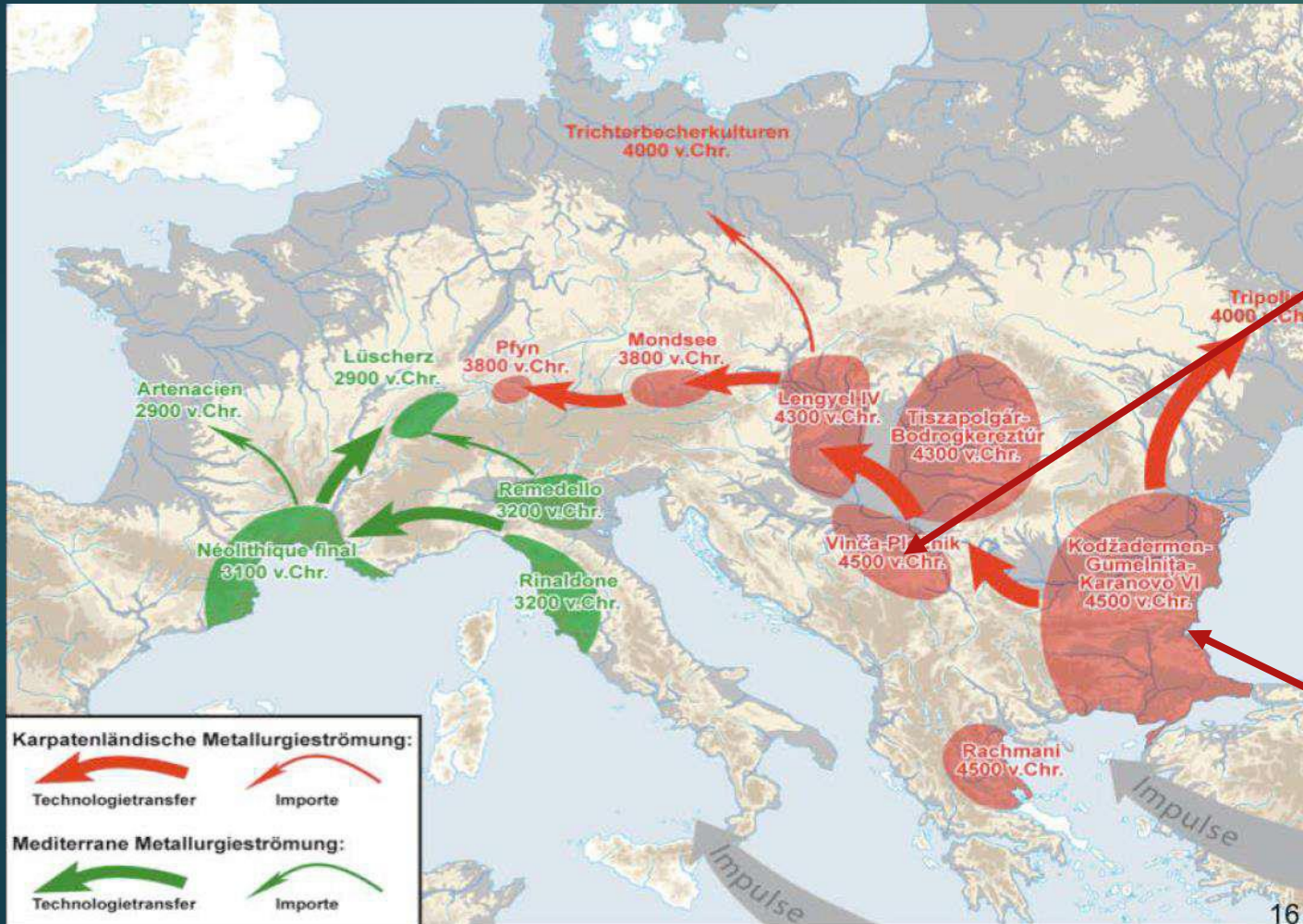
Les débuts de l'exploitation des métaux en Europe et au Proche-Orient



Cadre chronologique de l'évolution de la métallurgie base cuivre

Millénaire	Période	Phase technologique	Éléments caractéristiques
3	Bronze Ancien	5	Scorie liquide Exploitation et exportation de minerais
4	Chalcolithique	4	Scorie visqueuse Exploitation de minerais
5/6	Néolithique	3	Première métallurgie extractive
8	PPNB	2	Cuivre Natif
7/10	PPNB	1	Malachite

Cadre chronologique de l'évolution de la métallurgie base cuivre



4500 avant notre ère



Mines de Ai bunar



Nécropole de Varna

16

Cadre chronologique de la métallurgie du fer en Europe

► **Plusieurs foyers de découverte sont reconnus :**

- L'Anatolie vers le début du II^e millénaire (Hittites)
- L'Afrique (plusieurs foyers indépendants) : le Niger au début du 3^e millénaire, la République Centre Africaine au milieu du 3^e millénaire

► **Le fer est directement issu d'une évolution des techniques métallurgiques précédentes (cuivre et alliage cuivreux) :**

- **Les fours nécessaires sont déjà connus**
- **Les températures suffisantes sont acquises**



Aurélia Azéma, Benoît Mille, Fabien Pilon, Jean-Claude Birolleau et Laurent Guyard, « Étude archéométallurgique du dépôt de grands bronzes du sanctuaire gallo-romain du Vieil-Evreux (Eure) », *ArcheoSciences* [En ligne], 36 | 2012, mis en ligne le 30 décembre 2014, consulté le 12 février 2023. URL : <http://journals.openedition.org/archeosciences/3670> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/archeosciences.3670>

Bauvais, Sylvain, Berranger, Marion, Disser, Alexandre, Dillmann, Philippe, Leroy, Stéphanie et Fluzin, Philippe, "Le fer des principautés : "L'Économie du fer" dans le nord-est de la France au Hallstatt D et à La Tène A1", in : Brun, Patrice, Chaume, Bruno, Sacchetti, Federica, éd., *Vix et le phénomène princier, Actes du colloque de Châtillon-sur-Seine, 2016*, Pessac, Ausonius éditions, collection DAN@ 5, 2021, 219-258, [en ligne] <https://una-editions.fr/le-fer-des-principautes>

Bauvais, S. (2008) : "Du prestige à la proto-industrie : évolution des pratiques sidérurgiques au second âge du Fer dans le nord du Bassin parisien", *Arkeotek J.*, 2, 4.

Benoît, P. et Fluzin, P., éd. (1995) : *Paléométallurgie du fer et cultures. Symposium international du Comité pour la Sidérurgie Ancienne, Belfort – Sévenans*, Belfort-Paris.

Berranger, M. et Bauvais, S. (2020) : "Changements sociétaux et évolution de 'l'Économie du fer' du Hallstatt D à La Tène D dans le nord-est de la France", *BSPF*, 117,4, 641-671.

Dillmann P. , S. Leroy, A. Disser, S. Bauvais, E. Vega et P. Fluzin, « Dernières avancées des études sur la production, la circulation et la datation des métaux ferreux archéologiques », *Les nouvelles de l'archéologie* [En ligne], 138 | 2015, mis en ligne le 01 janvier 2016, consulté le 12 février 2023. URL : <http://journals.openedition.org/nda/2723> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/nda.2723>

Fluzin, P., Bauvais, S., Pagès, G., Berranger, M. et Dillmann, P. (2011) : "The multidisciplinary approach (archaeology and archaeometry) to bloomsmithing activities in France: examples of results from the last twenty years", in : Hošek et al., éd. *The archaeometallurgy of Iron – Recent Developments in Archaeological and Scientific Research*, Praha, p. 223-236.

Gabillot, M., Monna, F. et al. "Productions en série vers 1500 avant notre ère – Des règles de fabrication au Bronze moyen entre la Manche et les Alpes à la lumière d'une étude morphométrique", *Séances de la Société préhistorique française*, 2017, 10, p. 19-31. <https://www.fabricemonna.com/wp-content/uploads/2017/05/2017spf.pdf>

Leroy, S., L'Héritier, M., Delqué-Kolic, E., Dumoulin, J.-P., Moreau, C., Dillmann, P. Consolidation or initial design? Radiocarbon dating of ancient iron alloys sheds light on the reinforcements of French Gothic Cathedrals. *Journal of Archaeological Science* , 2015, 53, 190–201 DOI: [10.1016/j.jas.2014.10.016](https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.10.016)

Leroy, S., Hendrickson, M., Delqué-Kolic, E., Vega, E., Dillmann, P. First Direct Dating for the Construction and Modification of the Baphuon Temple Mountain in Angkor, Cambodia. *PLOS ONE* 10, **2015**, e0141052 DOI: [10.1371/journal.pone.0141052](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141052)

Téreygeol F., A. Arles, E. Foy, Nicolas Florsch et M. Llubes, « Dosages par fluorescence X portable d'ateliers médiévaux de production des métaux non-ferreux », *ArcheoSciences* [En ligne], 34 | 2010, mis en ligne le 11 avril 2013, consulté le 31 janvier 2022. URL : <http://journals.openedition.org/archeosciences/2802> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/archeosciences.2802>