
Questionner l'authenticité par la physique : le cas du mécanisme de Simon Le Noir

Augustin GOMAND

Rencontre régionale de l'AFAHA – 4 décembre 2022

Projet *Simon Le Noir*



La question de l'authenticité

Principe des analyses XRF

Protocole expérimental

L'acier et la rouille

La dorure

Procédé de dorure au mercure

Analyses

Les laitons

Fabrication du laiton au XVII^e siècle

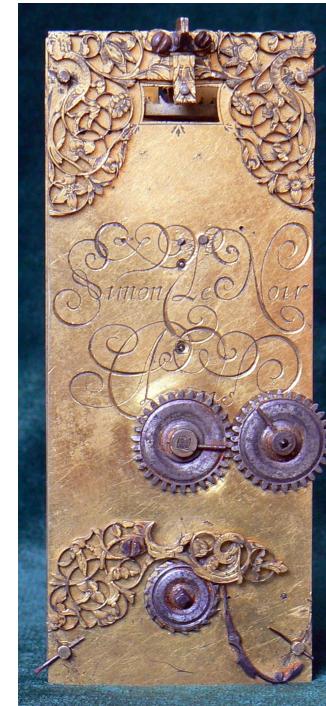
Analyses

Conclusion

2

Introduction : le projet Simon Le Noir

- Projet initié en octobre 2020 à la suite de la découverte d'un mécanisme signé Simon Le Noir (vue de dos sur la figure ci-contre)
- Mécanisme qui présente de nombreuses spécificités qui le distinguent des premières horloges à pendule connues (les pendules "religieuses") et le rattachent plutôt au style de la Renaissance
- Anecdote rapportée dans un manuscrit de Claude Raillard (~1720) : Simon Le Noir aurait été le premier à appliquer le pendule en France selon son fils, Jean-Baptiste
- Objectifs du projet :
 - Analyses détaillées du mécanisme, techniques et stylistiques
 - Recherches historiques sur Simon Le Noir et les premières horloges à pendule
 - Formulation d'hypothèses sur la place du mécanisme étudié dans l'histoire de l'horlogerie
- Premier article publié dans la revue *Horlogerie Ancienne* en juin 2022¹
- Site pour suivre l'avancement du projet : <https://agomand.github.io/asln/>
- Autres publications à suivre en 2023



¹ A. Gomand, *Simon Le Noir et l'application du pendule aux horloges : une histoire parallèle ?*, Horlogerie Ancienne, bulletin n°91, juin 2022

La question de l'authenticité : un bref historique

- Question récurrente quand on étudie un objet d'importance historique potentielle : l'objet est-il parfaitement authentique ? réparé ? reconstitué ? ou purement un faux ?
- Jusqu'à aujourd'hui, peu d'horloges soumises à des analyses d'authenticité exhaustives, toujours des pièces liées à une invention significative :
 - invention de l'horloge de poche = la montre → horloges portatives de Peter Henlein
 - application du pendule → régulateur de Jan van Call, **mécanisme de Simon Le Noir**
 - invention du ressort spiral...
- Méthodes d'analyse qui ont évolué au XXe siècle avec les progrès scientifiques :
 - analyses stylistiques et techniques (avant le XXe siècle) → utiles pour vérifier la **cohérence** avec l'époque de fabrication présumée MAIS analyses partiellement **subjectives**
 - analyses des matériaux par observation directe = microscopie optique (XXe siècle) → structure des matériaux qui peut être comparée avec les techniques et usages de l'époque MAIS analyses souvent **destructives** (coupes / prélèvements nécessaires)
 - analyses spectroscopiques / tomographiques (fin du XXe siècle) → composition chimique précise (quantifiée) + structure interne des matériaux par analyses **non-destructives** et parfaitement **objectives** → **sujet de cette présentation**

La question de l'authenticité : deux exemples

- Régulateur de Jan van Call : auparavant présenté comme l'horloge à pendule la plus ancienne connue
- Vendue par Sotheby's en 1986, achetée par le Science Museum, analysée par le British Museum
- Analyses globalement non concluantes² :
 - signatures gravées sur la dorure
 - spectroscopie : absence de mercure dans la dorure
 - dorure possiblement électrolytique...
 - anachronisme du curseur de réglage du pendule
 - pas d'histoire connue avant son achat...
- Probablement une reconstitution de neuf et d'ancien ou un travail de faussaire (hypothèse la plus partagée)

² Voir les articles publiés dans *l'Antiquarian Horology*, vol. 33-6 & 34-1, pour l'ensemble des discussions concernant cette horloge – photographie issue de l'article de S. Whitestone, *The van Call, a modern forgery*, AH 34-1, p.48



 **La question de l'authenticité**

Principe des analyses XRF

Protocole expérimental

L'acier et la rouille

La dorure

Procédé de dorure au mercure

Analyses

Les laitons

Fabrication du laiton au XVIIe siècle

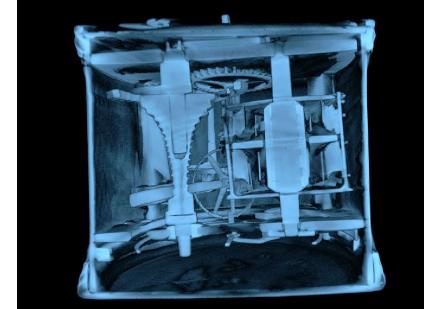
Analyses

Conclusion

5

La question de l'authenticité : deux exemples

- Tambourin signé "Petrus Hele" pour Peter Henlein, inventeur présumé de la montre vers 1500
- Horloge acquise en 1897 par le Germanisches Nationalmuseum
- Des soupçons très tôt sur son authenticité : signature qui recouvre les griffures → pas d'origine
- Analyses tomographiques menées en 2013 et 2014³
- Constat : trop nombreux ajustement du XIXe siècle, jusque dans la structure même de l'horloge (platines et bras des roues redécoupés, paliers déplacés...)
- Au mieux une horloge qui date bien du XVIe siècle mais fortement modifiée au XIXe siècle (et pas de Peter Henlein ?), au pire un pur travail de faussaire



³ J. Ehrt, *Ein Mythos auf dem Prüfstand - Die Untersuchungen an der sogenannten Peter Henlein-Uhr des Germanischen Nationalmuseums Nürnberg* (Restaurierungsatelier Jürgen Ehrt, 2021) - photographies issues de <https://artsandculture.google.com/story/LAXxeqppGOtCLA>

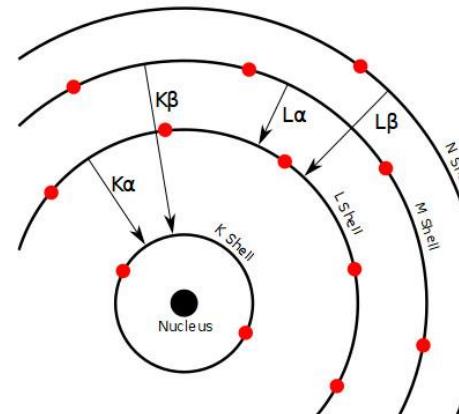
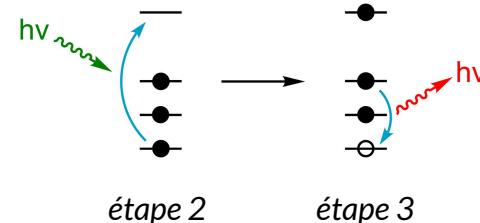
Principe des analyses XRF

- XRF = X-Ray Fluorescence : technique non-destructive d'analyse chimique des matériaux
 - Principe :
 1. On bombarde l'échantillon avec un rayonnement de haute énergie
 2. Des électrons sont arrachés aux atomes par effet photoélectrique → les atomes sont dans un état **instable**
 3. Des électrons des atomes viennent remplacer ceux qui ont été arrachés = transition électronique → émission d'un photon X **dont l'énergie est caractéristique de l'atome**
 4. Photons réémis captés par un détecteur qui mesure leur énergie (analyse en énergie = EDS)

Images : https://fr.wikipedia.org/wiki/Spectrom%C3%A9trie_de_fluorescence_des_rayons_X

Image du haut par Calvero, domaine public.

Image du bas par HenrikMidtiby. CC BY-SA 3.0



Introduction

La question de
l'authenticité**Principe des
analyses XRF**Protocole
expérimentalL'acier et la
rouille

La dorure

Procédé de dorure
au mercure

Analyses

Les laitons

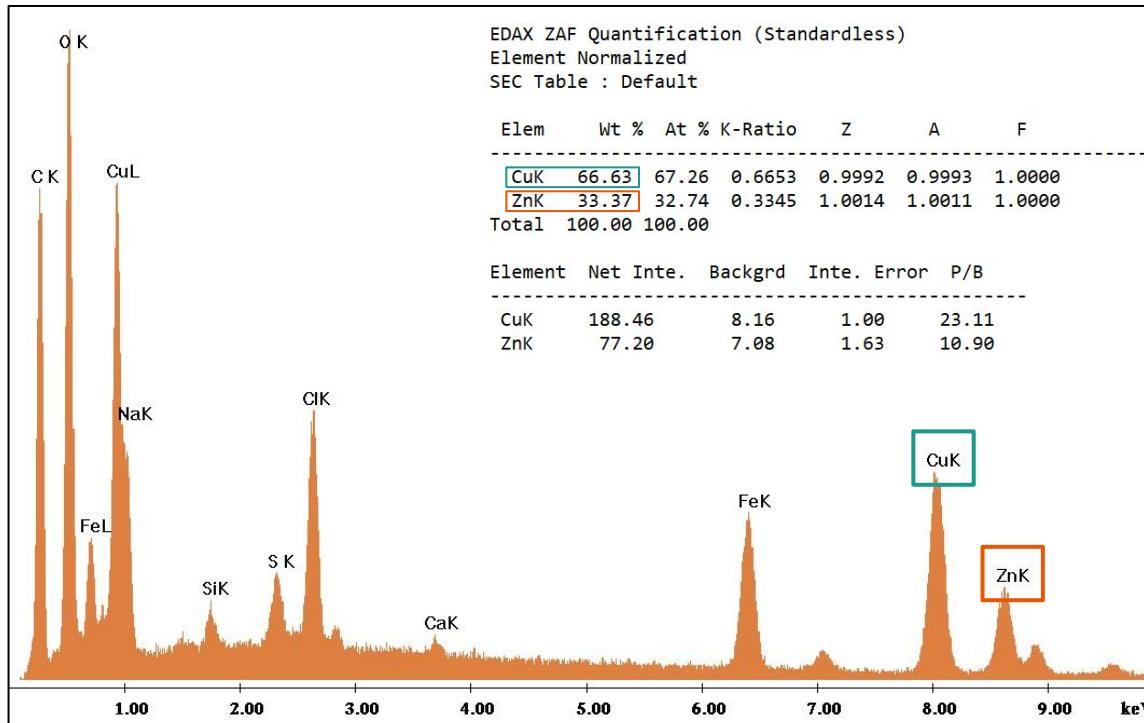
Fabrication du
laiton au XVII^e
siècle

Analyses

Conclusion

7

Principe des analyses XRF : exemple de spectre

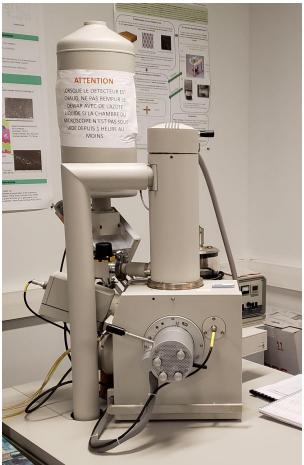
nombre de photons
déTECTÉS

énergie des photons

Protocole expérimental

- Mesures effectuées dans le microscope électronique du LGPM de CentraleSupélec⁴
- Protocole :

 1. Grattage des pièces avec un morceau de bois dur pour retirer les impuretés de surface
 2. Montage des pièces sur des plots en aluminium avec des pastilles de carbone et des ressorts



⁴ <https://lgpm.centralesupelec.fr/sites/lgpm/files/inline-files/ESEM.pdf>

Introduction

La question de
l'authenticitéPrincipe des
analyses XRF **Protocole
expérimental**L'acier et la
rouille

La dorure

Procédé de dorure
au mercure

Analyses

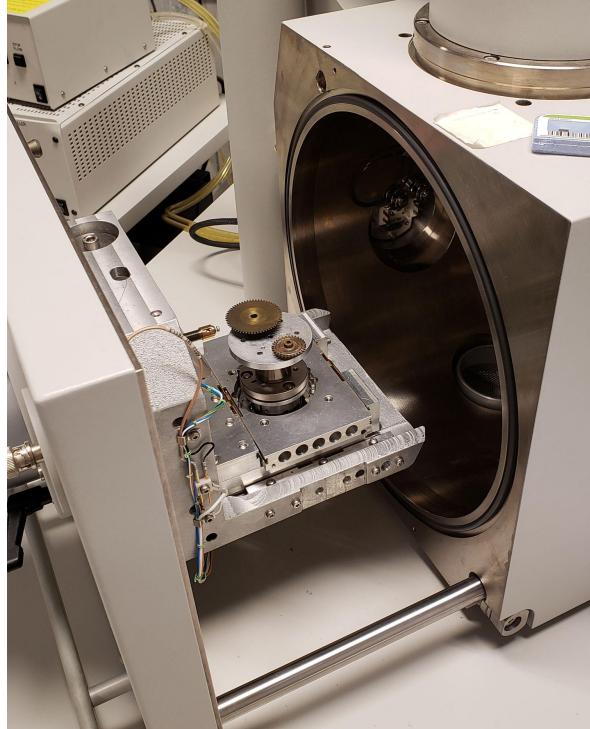
Les laitons

Fabrication du
laiton au XVII^e
siècle

Analyses

Conclusion

Protocole expérimental

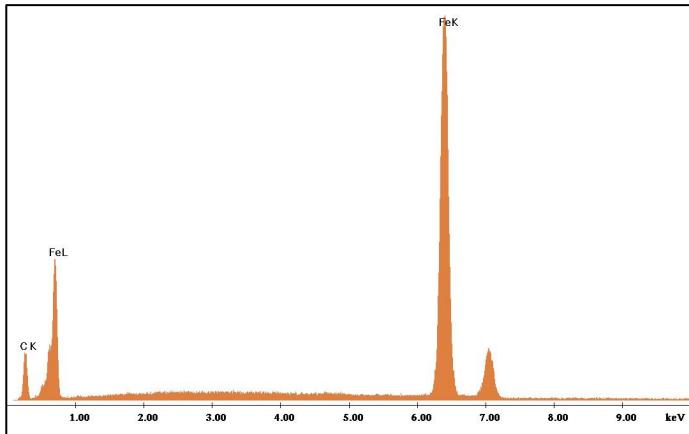


Protocole expérimental

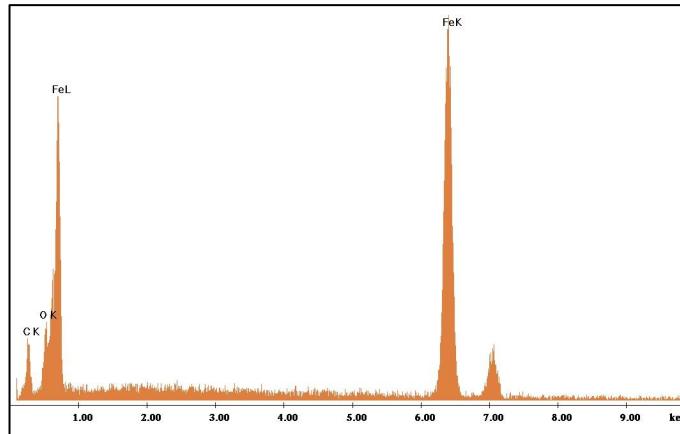
3. Spectre relevé pendant 60 secondes (rayon incident d'énergie 20 keV)
 4. Opération (3) répétée sur plusieurs zones de la pièce selon les résultats obtenus.
- Lors des analyses spécifiques de la rouille ou des impuretés, l'opération (1) (nettoyage de la surface des pièces) n'a pas été appliquée.
-
- Objectifs des analyses :
 - composition de l'acier et des produits de corrosion → acier simple ? rouille naturelle ?
 - composition de la dorure → présence de mercure ?
 - compositions des laitons → cohérentes avec celles des laitons utilisés au XVIIe siècle ?
 - + comparaison à d'autres résultats relevés sur des horloges & instruments scientifiques de la même époque (en cours).
 - Objectif final : questionner l'authenticité du mécanisme de manière objective et scientifique

L'acier et la rouille : mesures sur les pivots

- Premières mesures effectuées sur des parties en acier “polies” par les frottements (pivots)
- Constat : éléments visibles = fer, carbone, oxygène (cause oxydation), parfois du cuivre (cause frottements dans les paliers en laiton) → pas d’éléments d’addition comme le chrome, le nickel, le manganèse... ajoutés à partir du XIX^e siècle⁵, d'où **acier simple** comme attendu



Verge

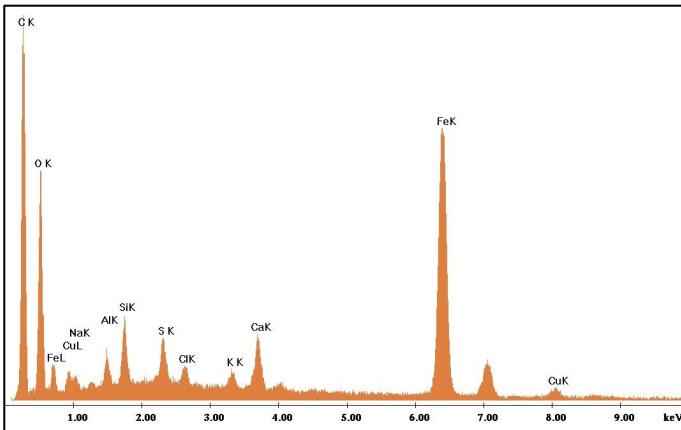


Roue de champ

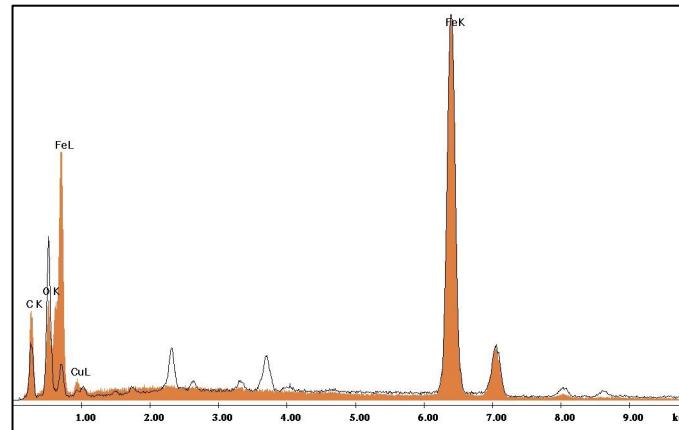
⁵ N. Chezeau, De Réaumur à la Première Guerre Mondiale : les étapes de la maîtrise de l'acier, l'essor des aciers spéciaux, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences – Chimie, vol. 15, juillet 2012

L'acier et la rouille : les produits de corrosion

- Mesures suivantes effectuées sur la rouille des pièces en acier
- **Constat** : nouveaux éléments qu'on n'avait pas relevés auparavant : sodium (Na), aluminium (Al), silicium (Si), soufre (S), chlore (Cl), potassium (K) & calcium (Ca)
- **Pas des éléments d'addition** car absents sur les zones "propres" et parfois relevés sur des pièces en laiton où la rouille est absente → **provenance extérieure**, mais quelle origine ?



Roue de remontage de droite



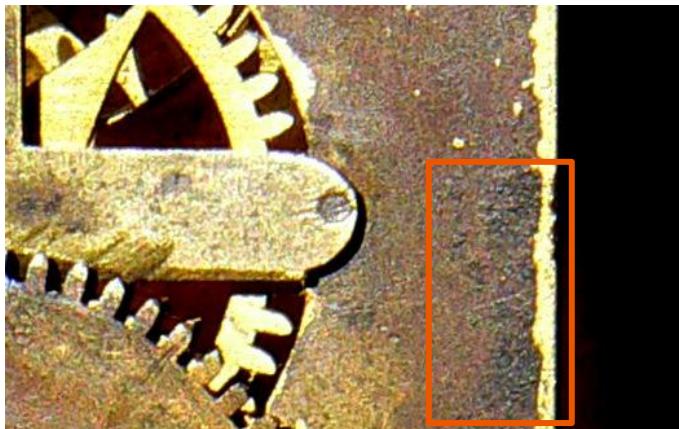
Superposition des spectres du rochet (trait noir) et
de l'arbre de remontage (orange)

Introduction

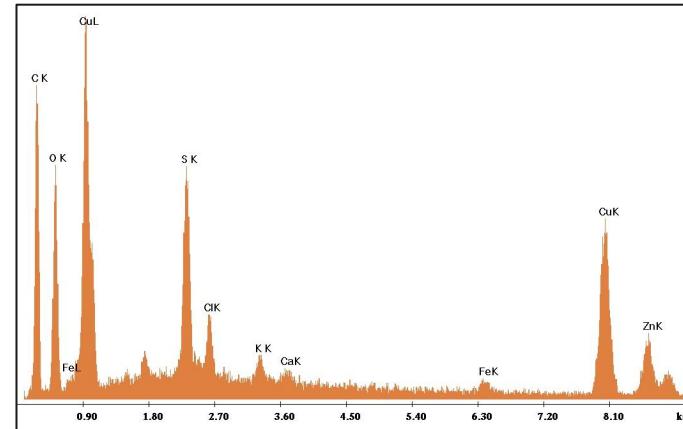
La question de
l'authenticitéPrincipe des
analyses XRFProtocole
expérimental

L'acier et la rouille : origine des impuretés

- Corrélation entre certains éléments, notamment les couples Al-Si & K-Ca → aluminosilicates ?
- Lors de sa récupération, le mécanisme était recouvert d'une couche de matière brune granulaire, de la terre ou un argile comme celui qu'on trouve dans des ciments ou des briques
- Matériaux cohérents avec la présence des couples Al-Si & K-Ca + soufre & oxyde de fer
- Hypothèse vérifiée par analyse d'une zone "sédimentaire" où la saleté s'était accumulée



Sédiments accumulés sur la platine avant



Spectre de la zone "sédimentaire"

La dorure

Procédé de dorure
au mercure

Analyses

Les laitons

Fabrication du
laiton au XVII^e
siècle

Analyses

Conclusion 13

L'acier et la rouille : origine des impuretés

- De la poussière de brique se serait-elle accumulée dans la rouille lors de sa formation ?
- Rouille qui suit le contour des pièces (e.g. les dents des roues de remontage et la découpe des décos) → formée par **condensation**, cycles répétés chaud / froid = film d'eau (rosée ?) entre les décos / les roues et les platines
- Hypothèse renforcée par la présence de fissures sur certaines pièces → causées par l'humidité + réaction chimique avec de l'ammoniaque (traces d'azote relevées sur certains spectres)
- Propagation de la rouille dans une direction privilégiée → mécanisme stocké à l'**horizontal**
- **Conclusion :** le mécanisme a probablement été stocké dans un garage pendant plusieurs années ou décennies



Rouille sur la platine arrière avant nettoyage

La dorure : procédé de dorure au mercure

- Jusqu'au XIX^e siècle, la dorure était réalisée en mélangeant de l'or avec du mercure pour obtenir un amalgame qu'on appliquait au pinceau sur les surfaces à dorer, puis on chauffait le tout pour faire évaporer le mercure
- Rendu très esthétique mais méthode très toxique... abandonnée au XIX^e siècle au profit de la dorure par électrolyse
- Pour visualiser un exemple : https://www.youtube.com/watch?v=ES_NKoVW7Vo

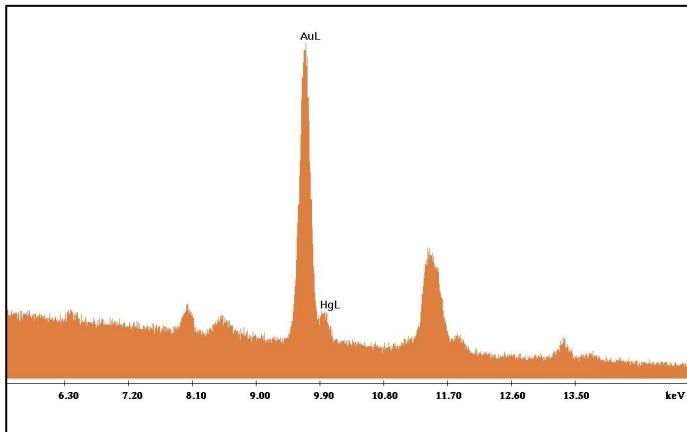


Images issues de la vidéo (lien ci-dessus), © Dirk Meyer

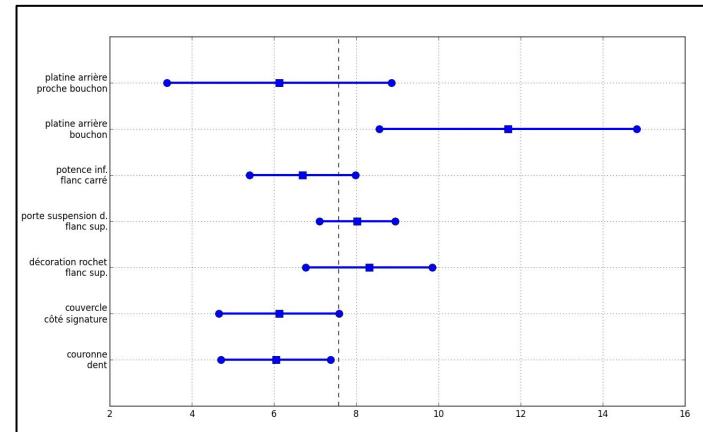
► Analyses

La dorure : analyses

- Mercure détecté en faible quantité → “bosse” à côté du pic de l’or (cf. figure de gauche)
- Toutes les pièces dorées analysées contiennent bien du mercure
- Concentrations relatives à celle de l’or regroupées dans la figure ci-dessous à droite, toujours supérieures à 5% → **confirmation qu'il s'agit bien d'une dorure au mercure**
- Concentrations initiales estimées avec la méthode de Margreiter⁶, cohérentes avec l’attendu



Sédiments accumulés sur la platine avant



Concentrations de mercure mesurées

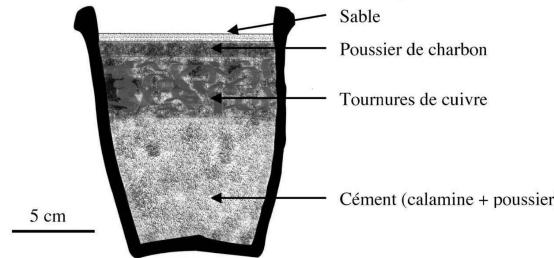
⁶ R. Margreiter et al., *Investigations on fire-gilding*, Archaeometry, juin 2022

Les laitons : fabrication du laiton au XVII^e siècle

- Cf. le *Dictionnaire de Chymie* de Macquer⁷ :

“On fait un **cement** composé d'une partie & demie de bonne **pierre calaminaire**, & autant de poudre de charbon pulvérisés ensemble : [...] on le met dans un pot de terre ou **creuset** : on y introduit une partie de **cuivre très pur, réduit en lames** : [...] on ferme le creuset, & on le chauffe seulement assez pour le faire bien rougir par dégrés. [...] Lorsqu'il est refroidi, on y trouve le **cuivre devenu jaune, augmenté d'un quart, & quelquefois d'un tiers de son poids**”

- Laiton dit “calaminaire” qui ne peut contenir qu'une quantité limitée de zinc : ~28% si le cuivre est en lames, ~33% s'il est en granules
- Expériences réalisées récemment⁸ pour reproduire cette méthode (images ci-contre)



Disposition des éléments dans le creuset



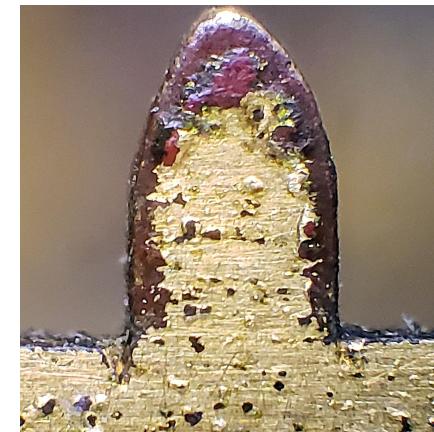
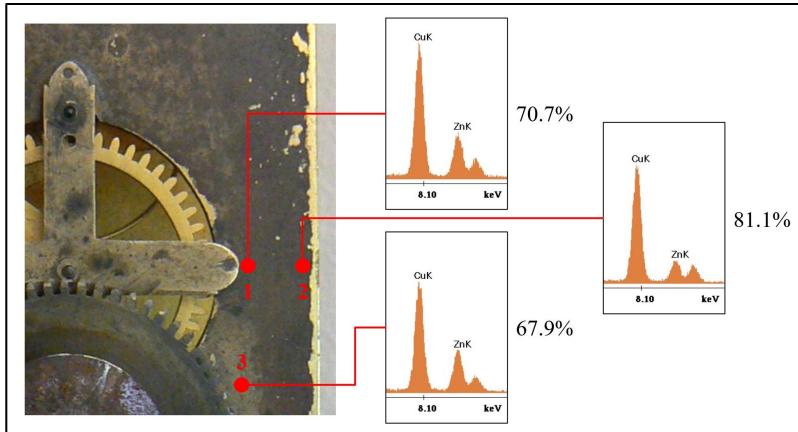
Masses métalliques obtenues après cémentation

⁷ P. J. Macquer, *Dictionnaire de Chymie* - volume 1 (Paris : chez Lacombe, 1766), p.320

⁸ A. Doridot, L. Robbiola & F. Tereygeol, *Production expérimentale de laiton par cémentation en creuset ouvert, avec du minerai de zinc, selon les recettes médiévales et modernes*, ArcheoSciences

Les laitons : analyses – limitation et incertitudes

- Contraintes géométriques du microscope : certaines pièces n'ont pas pu être analysées (e.g. les dents limées de la roue intermédiaire → inclinaison insuffisante)
- Altération de la composition originelle de zinc à cause de la **dézincification** = phénomène de corrosion différentielle qui fait perdre davantage de zinc que de cuivre au laiton
→ illustration avec 3 mesures effectuées sur la platine avant, résultats différents selon la zone
→ phénomène qui intervient également sous les couches de dorure, zones difficiles à analyser



Introduction

La question de
l'authenticitéPrincipe des
analyses XRFProtocole
expérimentalL'acier et la
rouille

La dorure

Procédé de dorure
au mercure

Analyses

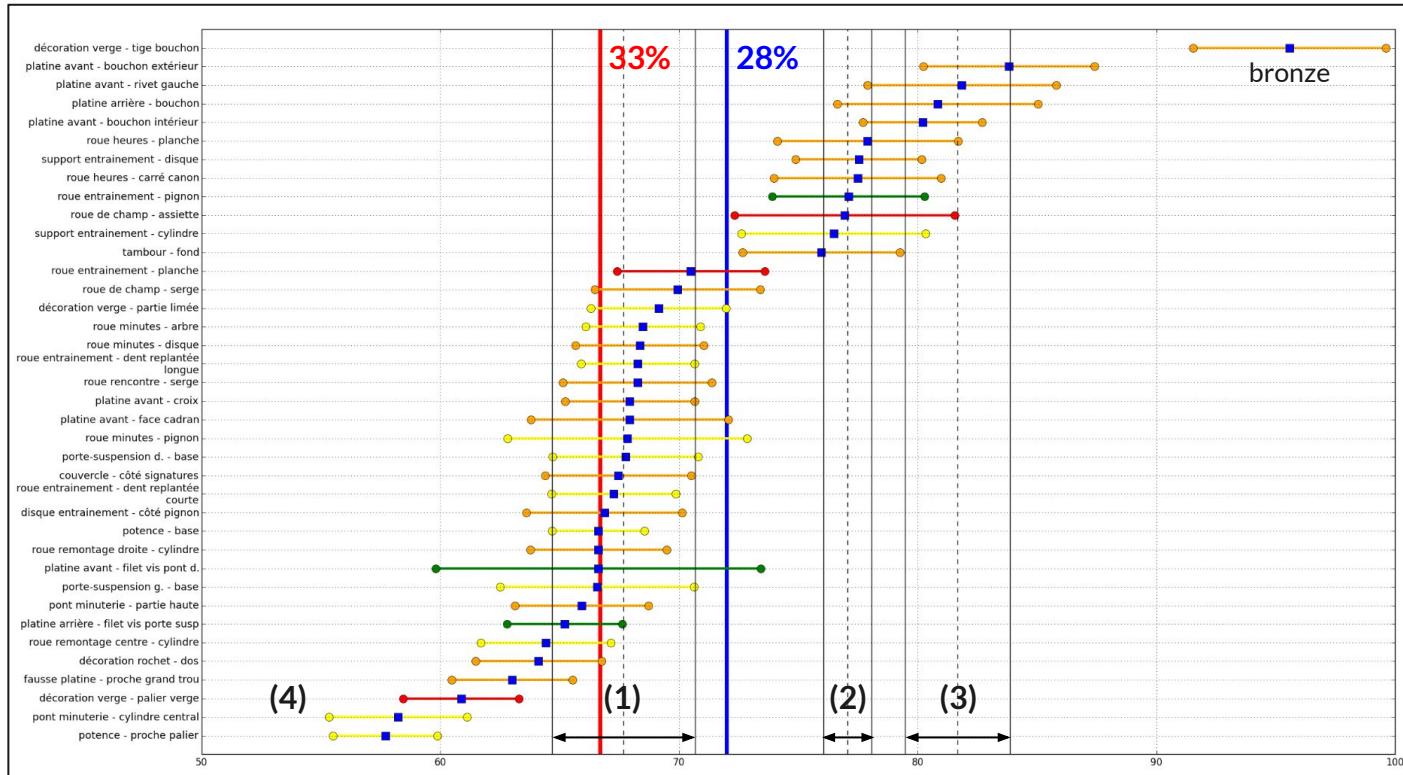
Les laitons

Fabrication du
laiton au XVII^e
siècle

► Analyses

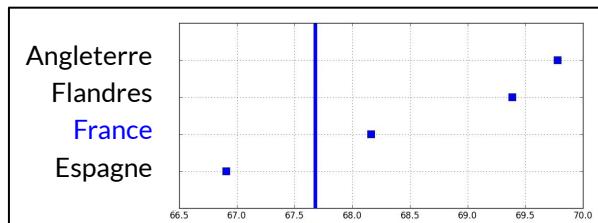
Conclusion 19

Les laitons : analyses – résultats globaux



Les laitons : analyses détaillées

- **Type 1** : majorité des pièces de structure (platines, ponts, plusieurs roues...)
 - laiton de qualité supérieure fabriqué à partir de cuivre granulaire, utilisé dès ~1560 en France pour produire des instruments scientifiques ⁹
 - concentration moyenne qui se rapproche le plus du laiton français (cf. figure ci-dessous)
 - **cohérent avec l'époque et le pays supposés de fabrication**



- **Type 2** : pièces non dorées, non visibles de dos (mobiles de la minuterie...)
 - laiton calaminé "classique" utilisé au XVI^e siècle, qualité moyenne
 - possiblement réservé aux parties non visibles du mécanisme ? Cas du barillet : couvercle de type 1 et doré, fond du tambour de type 2 et non doré ni visible... idem pour la roue d'entraînement : planche de type 1 & visible de dos, pignon de type 2 & invisible

⁹ M. Pollard & C. Heron, *Archaeological chemistry – 2nd edition* (RSC Publisher, 2008), p.195 (p.219 pour les concentrations par pays)

Introduction

La question de l'authenticité

Principe des analyses XRF

Protocole expérimental

L'acier et la rouille

La dorure

Procédé de dorure au mercure

Analyses

Les laitons

Fabrication du laiton au XVII^e siècle

► Analyses

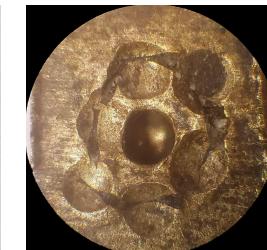
Conclusion 21

Les laitons : analyses détaillées

- **Type 3** : parties à “faible valeur ajoutée” (rivet, bouchons) montées sur plusieurs pièces de structure (pont en trident, pont de minuterie) et les décorations de la verge
 - laiton issu de refonte de laitons anciens = plus grande dispersion des concentrations & moins de zinc (évaporation pendant la refonte)
 - **utilisation de cuivre “brut” courante pendant la Renaissance car moins coûteux** (aussi sur Coster D4¹⁰)
- **Type 4** : regroupe tous les laitons avec $[Cu] < 66\%$
 - certaines pièces apocryphes ou réparées (pièce d'adaptation du canon des heures & réparation potence)
 - d'autres pièces supposées d'origine : peut-être un laiton nouveau de type “Prince Rupert” utilisé pour imiter l'or ? Cas du chapeau de la roue de remontage centrale : pièce en laiton qui ne pouvait pas être dorée (cause soudure) mais était visible de dos... aussi le cas du palier de la verge



Rivets cuivrés de l'horloge Coster “D4”

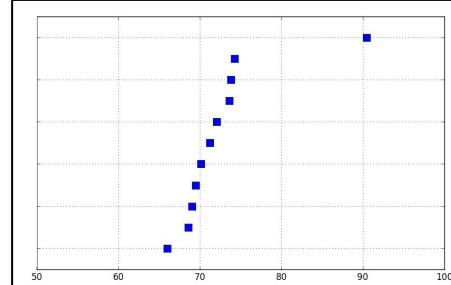


Potence de la roue de rencontre

¹⁰ K. Piggott, A Royal 'Haagseklok', Appendix Three, Open-Research. MEMORANDUM D4 : A Salomon Coster Pendulum Timepiece

Les laitons : analyses comparatives

- Presque pas de données publiées sur les horloges du XVII^e siècle → contact pris avec des experts et certains musées pour essayer de rassembler des données
- Etude de Gregory Bailey sur une horloge de table allemande de Johann Scheirer, vers 1675¹¹
→ les 3 principaux types de laitons semblent représentés, type 1 à majorité comme attendu
- Horloges de Thomas Tompion (1709) et George Graham (1722)¹² : principalement du laiton de type 2, [Cu] ~ 76%
→ **confirme l'utilisation du type 2 en horlogerie**
- Quid de l'utilisation colocalisée des types 1 & 2 ?
→ trigomètre français de Philippe Danfrie (1580)¹³ : les 2 types sont présents, type 1 avec [Cu] ~ 67-68% et type 2 avec [Cu] ~ 77-80% → **similaire au mécanisme de Le Noir**



Horloge de Johann Scheirer – analyses XRF

¹¹ G. Bailey, *About Time: Analysis and Conservation of a 17th-Century Table Clock*

¹² M. Pollard & C. Heron, *Archaeological chemistry – 2nd edition*, p.225

¹³ *ibid*, p.223

Conclusion : résumé des analyses

- Acier simple sans éléments d'addition significatifs
- Dorure au mercure, concentrations de mercure cohérentes avec la date de fabrication
- Plusieurs compositions de laitons :
 - **68% Cu / 32% Zn** : laiton de qualité supérieure pour les pièces de structure et les parties dorées, comme en usage au XVIIe siècle sur les instruments scientifiques
 - **77% Cu / 23% Zn** : laiton de qualité moyenne pour les pièces non dorées et non visibles
 - **>80% Cu / <20% Zn** : laiton de récupération = refonte de laitons anciens pour les petites pièces "à faible valeur ajoutée"
 - **<66% Cu / >34% Zn** : soit des laitons modernes = réparations au début du XXe siècle, soit des laitons du XVIIe siècle mais du type "Prince Rupert" récemment inventé ?

→ analyses globalement concluantes qui confortent l'authenticité de (presque) toutes les parties du mécanisme

- Bonus : mode de stockage du mécanisme sur ces dernières décennies → probablement dans un garage où il a subi des variations de températures élevées et journalières, d'où condensation + fissuration de certaines pièces

Introduction

La question de
l'authenticitéPrincipe des
analyses XRFProtocole
expérimentalL'acier et la
rouille

La dorure

Procédé de dorure
au mercure

Analyses

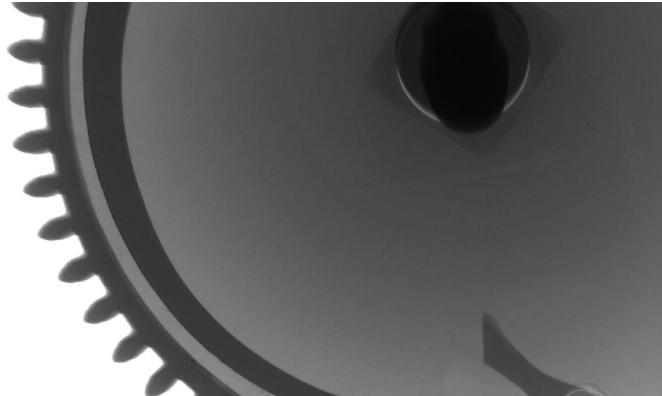
Les laitons

Fabrication du
laiton au XVII^e
siècle

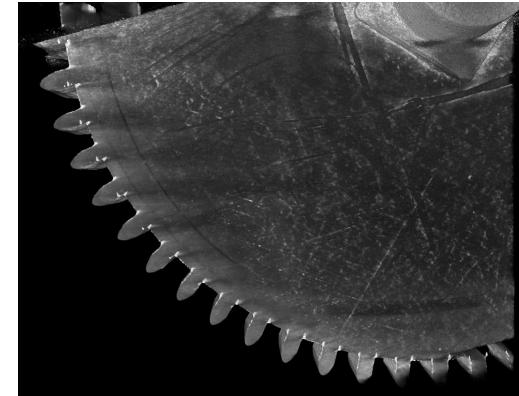
Analyses

Conclusion : perspectives

- Fin des analyses EDX pour quelques pièces restantes + pièces d'une religieuse d'Isaac Thuret
- Analyses détaillées des éléments trace (Ni, Ag, Bi, Pb, Sb) pour identifier le lieu d'extraction du cuivre & vérifier la cohérence totale de plusieurs pièces entre elles
- Tomographies déjà réalisées avec le LMPS de l'ENS Paris-Saclay → analyses en cours, utiles pour analyser les réparations antérieures / les inscriptions gravées



Scanner aux rayons X de la roue de la fusée



Reconstitution de la roue en 3D

Introduction

La question de
l'authenticitéPrincipe des
analyses XRFProtocole
expérimentalL'acier et la
rouille

La dorure

Procédé de dorure
au mercure

Analyses

Les laitons

Fabrication du
laiton au XVII^e
siècle

Analyses

Conclusion 25

Bibliographie

Sources par ordre de citation dans la présentation :

1. A. Gomand, *Simon Le Noir et l'application du pendule aux horloges : une histoire parallèle ?*, Horlogerie Ancienne, 91, juin 2022, en ligne : <https://agomand.github.io/asln/documents.html>
2. S. Whitestone, *The van Call, a modern forgery*, Antiquarian Horology, 34-1
3. J. Ehrt, *Ein Mythos auf dem Prüfstand - Die Untersuchungen an der sogenannten Peter Henlein-Uhr des Germanischen Nationalmuseum Nürnberg* (Restaurierungsatelier Jürgen Ehrt, 2021), en ligne : <https://www.uhrenrestaurator.de/de/ein-mythos-auf-dem-pruefstand>
4. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Spectrométrie de fluorescence des rayons X](https://fr.wikipedia.org/wiki/Spectrom%C3%A9trie_de_fluorescence_des_rayons_X)
5. <https://lgpm.centralesupelec.fr/sites/lgpm/files/inline-files/ESEM.pdf>
6. N. Chezeau, *De Réaumur à la Première Guerre Mondiale : les étapes de la maîtrise de l'acier, l'essor des aciers spéciaux*, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences – Chimie, 15, juillet 2012, en ligne : <https://doi.org/10.1016/j.crci.2012.04.008>
7. https://www.youtube.com/watch?v=ES_NKoVW7Vo

Bibliographie

8. R. Margreiter *et al.*, *Investigations on fire-gilding*, Archaeometry, juin 2022, en ligne : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/arcm.12797>
9. P. J. Macquer, *Dictionnaire de Chymie - volume 1* (Paris : chez Lacombe, 1766), en ligne : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k1520121f>
10. A. Doridot, L. Robbiola & F. Tereygeol, *Production expérimentale de laiton par cémentation en creuset ouvert, avec du minerai de zinc, selon les recettes médiévales et modernes*, ArcheoSciences, en ligne : <https://journals.openedition.org/archeosciences/107>
11. M. Pollard & C. Heron, *Archaeological chemistry – 2nd edition* (RSC Publisher, 2008)
12. K. Piggott, *A Royal 'Haagseklok'*, Appendix Three, Open-Research. MEMORANDUM D4 : A Salomon Coster Pendulum Timepiece, en ligne : <http://www.antique-horology.org/piggott/>
13. G. Bailey, *About Time: Analysis and Conservation of a 17th-Century Table Clock*, en ligne

Les figures qui ne sont pas associées à une référence sont de l'auteur.