



Archéométrie et ingénierie inverse pour reconstituer le savoir-faire des horlogers d'antan au XVIIe siècle : les projets Simon Le Noir et ArcheHor

Augustin GOMAND – CHRONOSPEDIA

Journée ESPADON – 17 janvier 2025



Contexte et enjeux

Analyse des techniques horlogères

Authentifier

Reconstituer

Caractériser

L'héritage du projet : ArcheHor

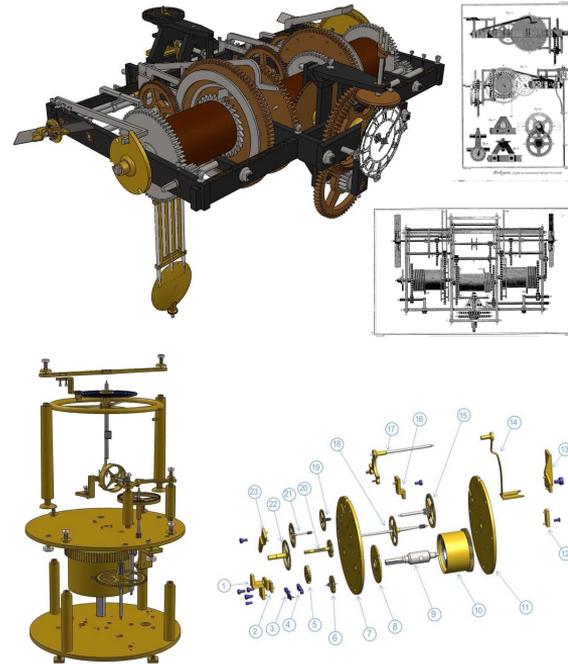
Créer une base de données

Approfondir les analyses

Pérenniser les données

CHRONOSPEDIA

- Projet humaniste de **préservation et de transmission du savoir-faire horloger** qui s'appuie sur les dernières innovations (3D, RV, RA, archivage...)
- Coordinateurs : François SIMON-FUSTIER (l'Horloger de la Croix Rousse), Konstantin PROTASSOV (professeur UGA)
- CHRONOSPEDIA regroupe **plus d'une quarantaine de structures** : musées (Musée du Temps de Besançon...), établissements d'enseignement (Lycée Diderot, Grenoble INP...), instituts de recherche (LS2N, INIST...), etc.
- Les activités de CHRONOSPEDIA sont aujourd'hui centrées sur la **création de modèles 3D de mécanismes d'horloges** (modélisation directe / par photogrammétrie) pour aider à la compréhension de leur fonctionnement et au diagnostic des pannes → approche pédagogique
- Autres activités : base de données des sons d'horloges anciennes (Maison des Sciences de l'Homme), thèse en cours sur l'AI dans la rétro-ingénierie... + **support au Projet Simon Le Noir**
- Site : <https://chronospedia.com/s/chronospedia/page/home>



Contexte et enjeux

Analyse des techniques horlogères

Authentifier

Reconstituer

Caractériser

L'héritage du projet : ArcheHor

Créer une base de données

Approfondir les analyses

Pérenniser les données

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 assez différent des premières horloges à pendule connues, qui se rattache plutôt au style de la période précédente
- 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
- Objectifs du projet :
 - Analyses détaillées du mécanisme, techniques, stylistiques et scientifiques
 - 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
- Premiers articles publiés dans la revue *Horlogerie Ancienne* en 2022 ¹ et 2023 ² et dans la revue *Antiquarian Horology* en 2024 ³
- Site : <https://agomand.github.io/asln/>
- Autres publications à suivre en 2025



¹ [1] Gomand, A., 2022. *Simon Le Noir et l'application du pendule aux horloges : une histoire parallèle ?* *Horlogerie Ancienne* 91, pp. 16-44

² [2] Gomand, A., 2023. *Compléments dans l'affaire Simon Le Noir*. *Horlogerie Ancienne* 93, pp. 16-42

³ [3] Gomand, A., 2024. *Experimenting with the pendulum: the work of Tito Livio Burattini (1617-1681)*. *Antiquarian Horology* 45 (1), pp. 63-87

Contexte et enjeux du projet

- Analyse du mécanisme de Le Noir pour l'authentifier / identifier les éventuelles pièces apocryphes
- Classiquement, les horloges sont authentifiées en analysant l'architecture du mécanisme, son style et ses techniques de fabrication d'un point de vue macroscopique
- Problème : perfectionnement dans la fabrication des faux au XXe siècle (e.g. le régulateur de Jan van Call⁴ et le tambourin d'Henlein⁵, problème similaire pour les instruments scientifiques⁶)
- De la difficulté à authentifier un objet en l'absence de critères scientifiques d'authenticité... Problème classique en archéologie : techniques peu documentées, savoir-faire transmis par voie orale et lors du compagnonnage, uniquement au sein de la corporation + premiers traités d'horlogerie publiés au XVIIIe siècle mais souvent très théoriques = **quasi-absence de sources bibliographiques primaires**
 - nécessité de reconstituer le savoir-faire horloger en analysant directement les mécanismes
 - principe de l'**ingénierie inverse** couplée à l'**archéométrie** et l'**archéologie expérimentale**
 - le **mécanisme de Le Noir sert d'objet "témoin" pour la mise en place de protocoles archéologiques appliqués aux mécanismes d'horlogerie**

⁴ [4] Whitestone, S., 2013. *The van Call, a modern forgery*. Antiquarian Horology 34 (1), pp. 42-51

⁵ [5] Ehrt, J., 2021. *Ein Mythos auf dem Prüfstand [...]*. Restaurierungsatelier Jürgen Ehrt.

⁶ [6] De Clercq, P., 1999. *Scientific instruments - originals and imitations: the Mensing connection - proceedings of a symposium, held at the Museum Boerhaave, Leiden, 15-16 October 1999*

► **Analyse des techniques horlogères**

Authentifier

Reconstituer

Caractériser

L'héritage du projet : ArcheHor

Créer une base de données

Approfondir les analyses

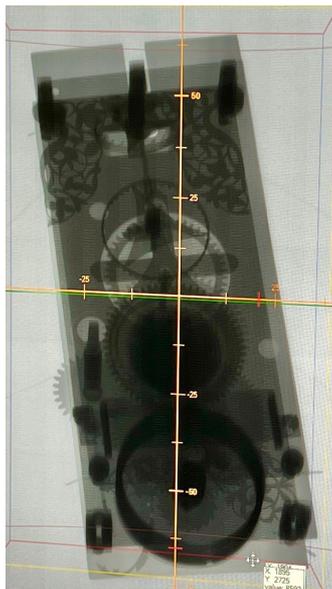
Pérenniser les données

Méthodes d'analyse utilisées

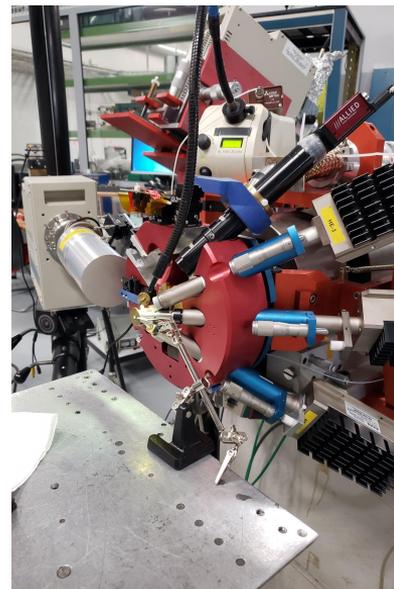
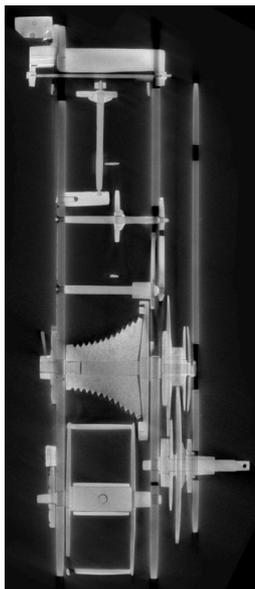
- Types d'analyses réalisées : examens au microscope optique / électronique (**gauche**), tomographies (**centre**), analyses de composition élémentaire par fluorescence via SEM-EDX, XRF, PIXE (**droite**)



Microscopie électronique (LGPM)



Tomographie (Zeiss)



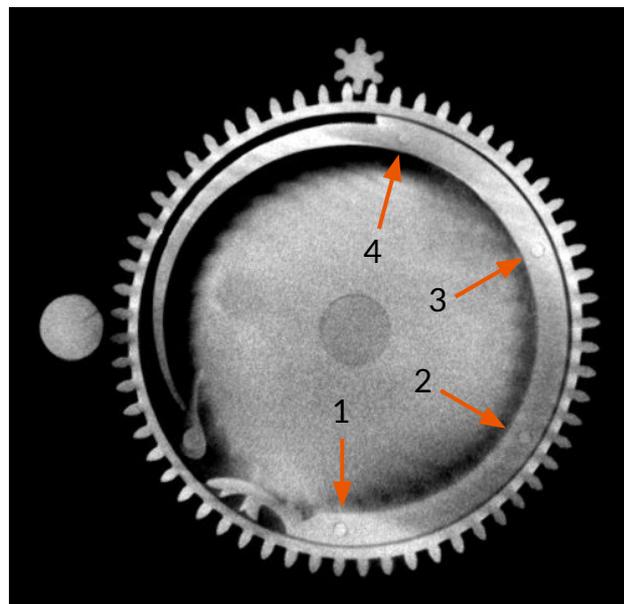
PIXE (NEW AGLAE, C2RMF)

Authentifier par les techniques de fabrication

- Source primaire essentielle : manuscrit découvert dans les papiers du savant John Evelyn^{7,8} qui décrit en détail la fabrication de tous les composants d'une montre du milieu du XVIIe siècle ainsi qu'un grand nombre d'outils, de techniques métallurgiques, etc. → **peut être utilisé pour l'authentification**
- Exemples de techniques décrites dans le manuscrit et observées sur le mécanisme de Le Noir :

“...le ressort [de la roue de la fusée] est découpé en rond à partir d'un morceau de laiton, & bien martelé puis installé, & façonné avec des limes seulement, il est riveté dans la cuvette de la grande roue, avec 3 ou 4 rivets”⁹

→ ce ressort est bien riveté, les rivets sont recouverts par la dorure mais identifiables sur une vue en coupe (figure ci-contre)



⁷ [7] British Library : Add. MS 78425 – Papiers d'Evelyn (Evelyn Papers). Vol. CCLVIII, fol. 8 recto - 14 recto

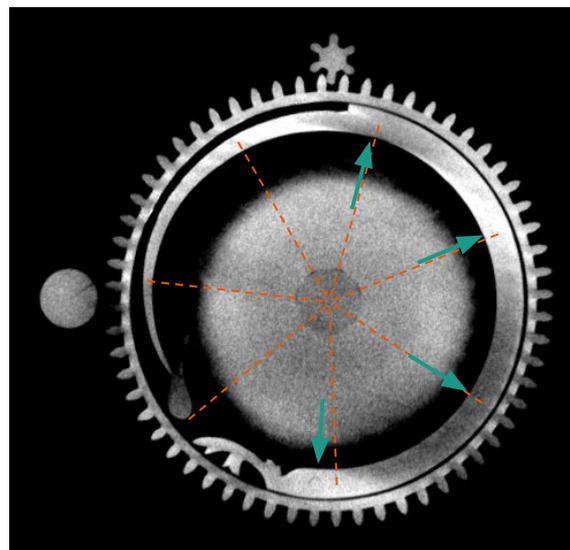
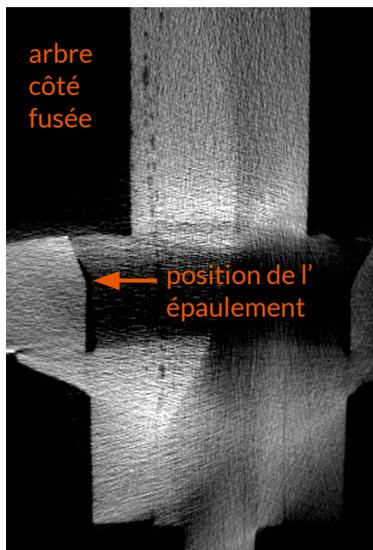
⁸ [8] Thompson, D., 2023. 'Summe Dyrections towards the makinge of a smale watch, of brass' – A guide to watchmaking techniques in the seventeenth century. Antiquarian Horology 44 (2), pp. 179-206

⁹ [7] Papiers d'Evelyn, folio 11 verso

Authentifier par les techniques de fabrication

“L'arbre de la grande roue y est d'une certaine manière riveté avec un épaulement laissé lors du tournage de l'arbre sans soudure d'aucun laiton à cet endroit”¹⁰

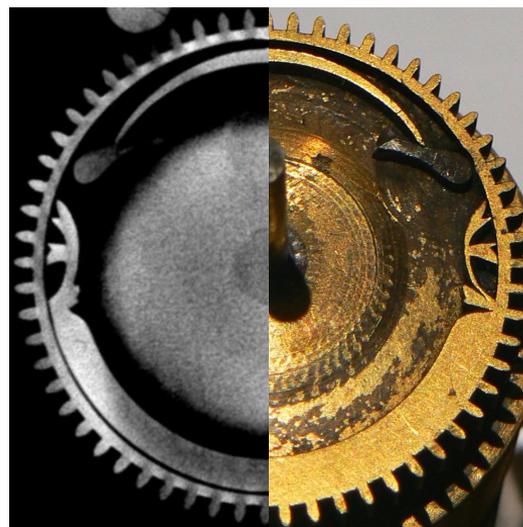
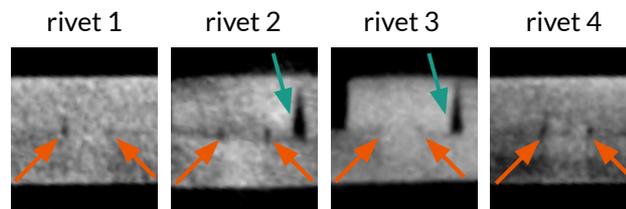
→ l'arbre de la fusée a un épaulement de forme heptagonale qui se loge dans la roue à mi-hauteur, les arêtes de l'épaulement sont dirigées vers les 4 rivets du ressort du cliquet qui ont pu servir de repères



¹⁰ [7] Papiers d'Evelyn, folio 10 recto

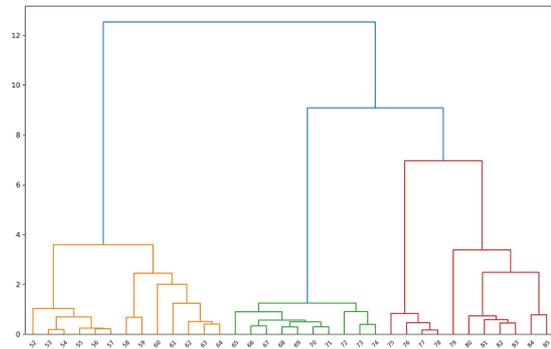
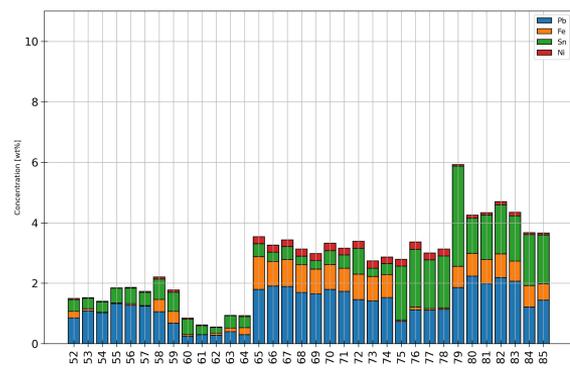
Reconstituer les techniques : ingénierie inverse

- Sur les vues de la roue de la fusée, on distingue des **chanfreins** au niveau de chaque rivet qui fixe le ressort à la roue
 - ces chanfreins ont servi à faciliter la mise en place du ressort en guidant son positionnement
 - on en déduit que les rivets ont d'abord été installés dans la roue avant que le ressort soit enfoncé dessus
- On observe un espace entre le ressort et le bord de la "cuvette" où il est logé, invisible de l'extérieur
 - le **flanc du ressort** est "biseauté" pour faciliter son installation dans la cuvette
 - le laiton a ensuite été martelé pour venir recouvrir le vide entre les 2 pièces, de manière à faire disparaître toute trace de l'assemblage
- On a donc finalement reconstitué l'ensemble du séquentiel de fabrication de cet assemblage



Caractériser les métaux : archéométrie

- Avec les analyses de fluorescence, on peut caractériser les compositions chimiques des laitons qui constituent les différentes pièces du mécanisme
→ permet de **classer les pièces en différents groupes** déterminés selon les concentrations élémentaires
- Principe des méthodes de **classification automatique** : “découvrir dans un univers donné des classes empiriquement utiles et objectivement définies” ¹¹
- Application à l’archéologie dans les années 1970, grâce aux développements de l’informatique ¹²
- Cas des laitons : classification ascendante hiérarchique (CAH) basée sur les valeurs centrées et normalisées des concentrations en zinc, plomb, étain, fer et nickel
→ construction de **dendrogramme** (exemple ci-contre pour un mécanisme attribué à Claude Raillard, daté vers 1660-62)

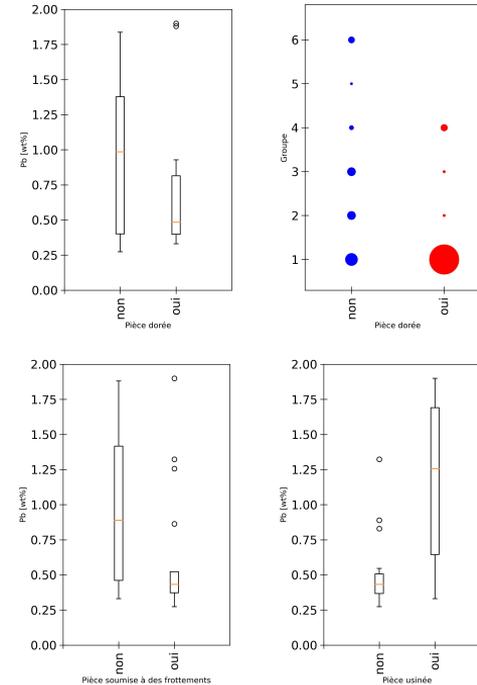


¹¹ [9] de la Vega, F., “Méthodes de classification automatique en archéologie”, in *Archéologie et calcul*, Union générale d’éditions, 1978.

¹² [10] Clarke, D.C., 1968. *Analytical Archaeology*. Methuen & Co Ltd, Londres.

Caractériser les métaux : archéométrie

- Les groupes de pièces et les concentrations des éléments constitutifs du laiton peuvent être mis en regard de leurs caractéristiques esthétiques et fonctionnelles
→ **analyse multifactorielle et tests ANOVA** pour quantifier l'influence d'un paramètre et comprendre selon quels critères les horlogers sélectionnaient les laitons qu'ils utilisaient
- Quelques exemples :
 - chez Le Noir, les pièces dorées contiennent généralement très peu de plomb, alors que les pièces non dorées contiennent du plomb en quantité variable (figures du haut)
→ utilisation probable de laiton pauvre en plomb pour éviter la formation de points sous la dorure ¹³
 - quand elles ne sont pas dorées, les pièces usinées contiennent plus de plomb que la moyenne (figures du bas)
→ l'ajout de plomb rend le laiton plus "usinable" et facilite le taillage des dentures (stratégie aussi observée sur les aciers, qui contiennent moins de carbone ¹⁴)



¹³ [11] Theophilus, Hawthorne, J.G., Smith, C.S., 2022. *On Divers Arts*. Dover Publications, New York.

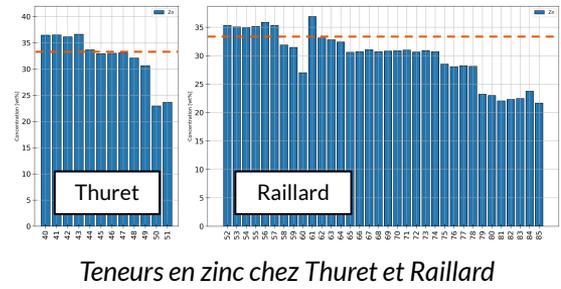
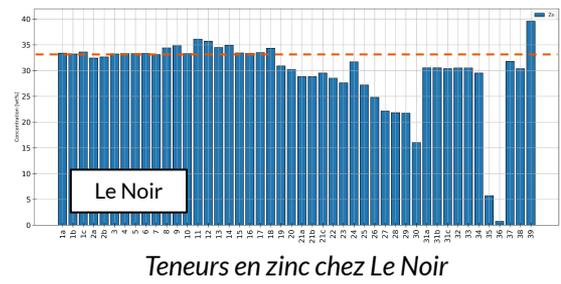
¹⁴ [12] Wayman, M.L. (Ed.), 2000. *The Ferrous Metallurgy of Early Clocks and Watches*. Occasional Paper 136. British Museum, Londres.

ArcheHor : Archéométrie pour l'Horlogerie

- Le Projet Simon Le Noir se focalise sur le mécanisme de Le Noir, mais l'analyse de ce mécanisme seul est vaine en l'absence de points de comparaison → très peu de données existantes dans la littérature, **l'horlogerie a rarement été étudiée d'un point de vue archéologique et scientifique**
- Dans cet objectif, deux autres mécanismes ont été analysés (Claude Raillard (attr.), 1660-62 & Isaac Thuret, 1670-75) → similitudes identifiées entre ces mécanismes et celui de Le Noir, notamment dans la composition des laitons, même fournisseur ?
- Les quelques autres données disponibles publiquement (compositions des laitons d'horloges britanniques et allemandes des XVIe, XVIIe & XVIIIe siècles) montrent des dispersions importantes → tendances difficiles à dégager sur un large intervalle spatio-temporel
- Nécessité de rassembler davantage de données pour affiner les analyses et en dériver des généralités
→ **objectifs d'ArcheHor : systématiser l'analyse scientifique des horloges anciennes** pour constituer une base de données importante qui permettra de **caractériser l'évolution des techniques de fabrication, le choix des matériaux, les conventions esthétiques...** en fonction des époques et des pays, en lien avec les progrès technologiques et à l'évolution de la place de l'horlogerie dans un contexte social, économique et politique en continuelle évolution
→ **plusieurs problématiques dérivent de ces objectifs**

Problématique 1 : créer une base de données

- En l'absence de base de données, interpréter les données disponibles sur des artefacts isolés est difficile, et leur généralisation est impossible
- Exemple de difficulté rencontrée :
 - Les laitons du mécanisme de Le Noir présentent des teneurs en zinc élevées, autour de 33%, et plusieurs pièces dépassent **cette limite** → en utilisant le critère de datation *terminus pre quem* classiquement considéré, ces pièces devraient être considérées comme apocryphes
 - En comparaison, dans les instruments scientifiques, on rencontre très rarement du zinc à plus de 33%¹⁵
 - Les analyses de deux autres mécanismes de la même époque (Raillard, c.1660 & Thuret, c.1670-75) montrent aussi des laitons à Zn > 33% → **généralité des mécanismes d'horlogerie français ? Impossible à savoir en l'absence de données supplémentaires**



¹⁵ [13] Pollard, A.M., Heron, C., 2008. *Archaeological Chemistry - 2nd edition*. RCS Publishing, Cambridge.

Problématique 1 : créer une base de données

- Sous-problématiques à résoudre pour construire une base de données :

1. Disposer d'objets à analyser

→ collections muséales (Musée du Louvre, Musée de Cluses...)? collections particulières ?

2. Avoir les ressources humaines nécessaires et les appareils adéquats

- Jusqu'à présent, ce sont les objets qui ont été déplacés pour les analyses, pas les instruments
→ logique à inverser, bénéfice d'un laboratoire mobile (Patrimex / MobiFlu / autre) ?
- Temps "humain" fourni gracieusement par le MNHN, l'Institut Néel et le C2RMF
→ partenariat à construire pour des analyses régulières ? financement d'un master / d'une thèse ?

3. Définir un protocole opératoire généralisable, objectif, reproductible

→ contraintes : les parties analysées doivent être facilement accessibles, si possible sans démontage des mécanismes, elles doivent être représentatives des différents types de laitons du mécanisme et des différents procédés de mise en forme (martelage, pliage, usinage), tout en limitant le temps machine = nombre de points de mesure réduit MAIS suffisamment exhaustif pour permettre une analyse des dispersions des éléments traces secondaires...

→ protocole déjà testé sur le mécanisme de Thuret en partant des résultats observés chez Le Noir

Problématique 1 : créer une base de données

4. Regrouper les données existantes de la littérature

→ matrice en cours de construction pour regrouper les données disponibles sur les analyses des matériaux constitutifs des mécanismes d'horlogerie, toutes périodes chronologiques et zones géographiques confondues

→ globalement peu de données publiées, en particulier sur la période moderne (post-1600) et les laitons

→ interroger les musées sur des analyses réalisées en interne mais non publiées ?

5. Structurer les données et les rendre accessibles

→ passer par le consortium HumaNum 3D déjà utilisé par CHRONOSPEDIA ?

→ quel format, en particulier pour les fichiers XRF bruts ?

→ possibilité de chercher des éléments particuliers dans la base, génération automatique de statistiques...

Ce tableau résume les analyses de composition élémentaire réalisées sur des pièces d'horlogerie. Les lignes en orange concernent des objets qui sont en lien avec les mécanismes d'horlogerie mais qui ne sont ni des montres, ni des horloges. Les lignes en rouge concernent des objets "suspectes", pour lesquels l'authenticité n'est pas confirmée.

Date / période (B.C.)	Dénomination	Fabricant	Origine	Matériau(s) analysé(s)	Collection	N° d'inventaire
400-600	Astrolabe à roues dentées	inconnu	Empire Byzantin	laiton	Science Museum	1960-1960
1500-1600						
1530	Montre de Philippe Milanonthon	inconnu	Allemagne	laiton, dorure	Walters Art Museum	55.17
1530 (p.)	Montre tambourin M49	inconnu	Allemagne / France	laiton, acier	Museo Poldi Pezzari Inv. 3325 cat. 155	
1540 (p.)	Montre tambourin M3	inconnu	Allemagne	laiton	Walters Art Museum	56.89
1550-1575	Horloge de table	inconnu	Allemagne	acier	British Museum	Ca13.320
1570-1580	Horloge de table	inconnu	Allemagne	acier	British Museum	1901.0115.1
1600-1700						
1600-1650	Horloge - Sphère de Genèse	inconnu	Japon	cuivre, laiton, plomb, dorure	Collection privée	n.a.
1640 (p.)	Horloge de table	Johann Sayer (attr.)	Allemagne	acier	British Museum	1961.0107.1
1646	Fascaline du chanoine Séguier	inconnu (horloger rouennais ?)	France	laiton	Musée des Arts et Métiers	19600.0000
<1652	Fascaline de Christine de Suède	inconnu (horloger rouennais ?)	France	laiton	Musée des Arts et Métiers	00823.0001
<1655	Fascaline du chevalier Durand-Pascal	inconnu (horloger rouennais ?)	France	laiton	Muséum Henri Lacaze	985-23
<1655	Fascaline de Marguerite Parier	inconnu (horloger rouennais ?)	France	laiton	Muséum Henri Lacaze	139
1657 ?	Horloge murale	Jan van Cell	Pays-Bas	laiton, acier, dorure	Science Museum	?
1658 ?	Horloge de table	Simon Le Noir	France	laiton, bronze, acier, dorure, soudures	Collection privée	n.a.
1660-1662	Horloge de table	Claude Rillard (attr.)	France	laiton, acier	Collection privée	n.a.
1670-1673	Horloge de table	Isaac Thuret	France	laiton, dorure	Collection privée	n.a.
1680-1685	Horloge de table	Johan Scheeler	Allemagne	laiton, verre, dorure, argenture, nulle, résine, soudures	Buffalo Museum of Science	C13020
1700-1800						
1700	Horloge de table	Thomas Tompion	Angleterre	laiton	Collection privée	n.a.
1722	Horloge de table	George Graham	Angleterre	laiton	Collection privée	n.a.
1730-1735	Horloge marine H1	John Harrison	Angleterre	laiton, bronze	Royal Museums Greenwich	2A/A0034
1737-1739	Horloge marine H2	John Harrison	Angleterre	laiton, bronze	Royal Museums Greenwich	2A/A0035
1740-1759	Horloge marine H3	John Harrison	Angleterre	laiton, bronze	Royal Museums Greenwich	2A/A0036
1747	Horloge murale cartel "Cressen"	Jean-Baptiste Hervé (horloger)	France	laiton	Musée de Marseille	n.a.
1760-1770	Montre	G. Taylor	Angleterre	laiton, dorure	Collection privée	n.a.
1700-1800	Horloge lanternne		Pays-Bas ?	laiton	Musée International d'Horlogerie de La Chaux-de-Fonds	
1800-1900						
1828	Montre - spirale	Jamies Springour	Angleterre	verre	British Museum	1905.1006.3073
1836	Montre - spirale	Edward Dent	Angleterre	verre	British Museum	1905.1006.3394
1835-1840	Montre - spirale	Edward Dent	Angleterre	verre	British Museum	1905.1006.3309
1900-2000						
1920	Montre marine	Thomas Mercer	Angleterre	or	Collection privée	n.a.
1920-1955 ?	Horloge Hgulateur	Louis Leroy (atelliers)	France	acier	Collection privée	n.a.
1921-1934	Horloge de table "Uniclock"	Universal Clock and Globe Corp	Etats-Unis	laiton, zinc, plastique	Buffalo Museum of Science	

Matrice des analyses de la littérature pour ArcheHor

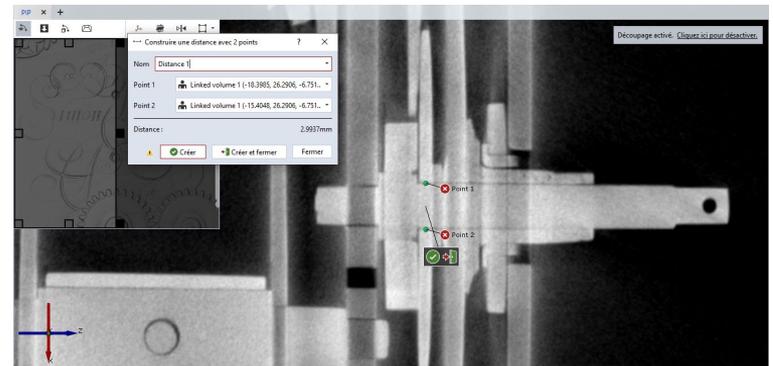
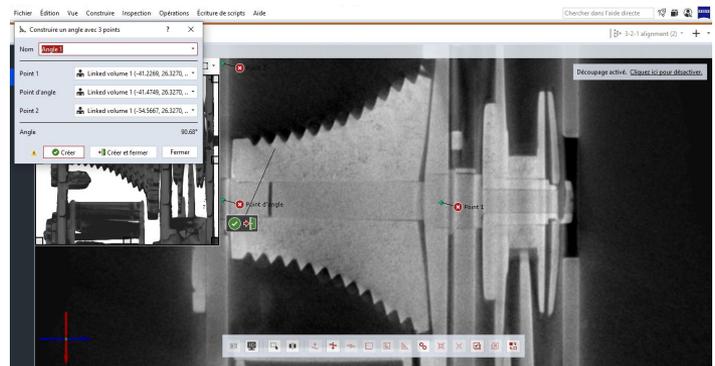
Problématique 2 : approfondir les analyses

- Pour “augmenter” les données d’abord autour du mécanisme de Le Noir, d’autres méthodes d’analyse pourraient être exploitées pour approfondir la caractérisation des matériaux utilisés par les horlogers et la compréhension des techniques de fabrication associées
- Techniques d’analyses scientifiques exploitées jusqu’à présent :
 - composition élémentaire : SEM-EDX (acier, laiton, dorure, soudure, impuretés et oxydation superficielles), ED-XRF (acier, laiton, dorure, soudure), PIXE (laiton, dorure)
 - visualisation détaillée : MEB (vues superficielles), tomographie X
- Autres techniques d’analyses identifiées, potentiellement pertinentes :
 - XRD (ligne PUMA de SOLEIL ?) → identification de la technique de mise en forme des pièces ¹⁶
 - (LA)-JCP-MS (C2RMF ?) → analyse des isotopes du plomb contenu dans les laitons pour caractériser son origine géographique ? identification d’éléments-traces secondaires comme indicateurs de provenance ? analyse des aciers produits par cémentation, pour identifier un atelier de production ?...
 - ADN → origine animale de la corde qui relie le tambour à la fusée
- **Fort potentiel de l’archéologie expérimentale** : reproduire les techniques de fabrication avec les mêmes outils et contraintes des horlogers du XVIIe siècle pour mieux appréhender leur démarche et comprendre les choix qu’ils opéraient lors de la fabrication d’un mécanisme

¹⁶ [14] Stephenson, G.B., Stephenson, B., Haefner, D.R., 2001. *Investigations of Astrolabe Metallurgy Using Synchrotron Radiation*. MRS Bulletin 26 (1), pp. 19-23.

Problématique 3 : pérenniser les données

- Certaines données sont déjà disponibles dans un format générique *a priori* pérenne (.txt par exemple)
- D'autres données sont dans un format propriétaire, lié à l'appareil qui les a générés, e.g. les tomographies réalisées par Zeiss, lisibles uniquement avec le logiciel ZEISS INSPECT (ci-dessous)



- Dans le cas où le logiciel de Zeiss deviendrait obsolète, les tomographies ne pourraient plus être lues
 → perte d'information dramatique, d'où une nécessité de trouver un moyen pour convertir les fichiers originaux dans un format pérenne
 → pistes de réflexion à l'étude par CHRONOSPEDIA avec le consortium HumaNum 3D et le LS2N

Références

Sources par ordre de citation dans la présentation :

1. Gomand, A., 2022. *Simon Le Noir et l'application du pendule aux horloges : une histoire parallèle ?* Horlogerie Ancienne 91, pp. 16-44
2. Gomand, A., 2023. *Compléments dans l'affaire Simon Le Noir*. Horlogerie Ancienne 93, pp. 16-42
3. Gomand, A., 2024. *Experimenting with the pendulum: the work of Tito Livio Burattini (1617-1681)*. Antiquarian Horology 45 (1), pp. 63-87
4. Whitestone, S., 2013. *The van Call, a modern forgery*. Antiquarian Horology 34 (1), pp. 42-51
5. Ehrt, J., 2021. *Ein Mythos auf dem Prüfstand [...]*, Restaurierungsatelier Jürgen Ehrt
6. De Clercq, P., 1999. *Scientific instruments - originals and imitations: the Mensing connection - proceedings of a symposium, held at the Museum Boerhaave, Leiden, 15-16 October 1999*
7. British Library : Add. MS 78425 - Papiers d'Evelyn (Evelyn Papers). Vol. CCLVIII, fol. 8 recto - 14 recto
8. Thompson, D., 2023. 'Summe Dyrections towards the makeinge of a smale watch, of brasse' - *A guide to watchmaking techniques in the seventeenth century*. Antiquarian Horology 44 (2), pp. 179-206
9. de la Vega, F., "Méthodes de classification automatique en archéologie", in *Archéologie et calcul*, Union générale d'éditions, 1978

Références

10. Clarke, D.C., 1968. *Analytical Archaeology*. Methuen & Co Ltd, Londres
11. Theophilus, Hawthorne, J.G., Smith, C.S., 2022. *On Divers Arts: the Foremost Medieval Treatise on Painting, Glassmaking, and Metalwork*. Dover Publications, New York.
12. Wayman, M.L. (Ed.), 2000. *The Ferrous Metallurgy of Early Clocks and Watches*. Occasional Paper 136. British Museum, Londres.
13. Pollard, A.M., Heron, C., 2008. *Archaeological Chemistry – 2nd edition*. RCS Publishing, Cambridge.
14. Stephenson, G.B., Stephenson, B., Haeffner, D.R., 2001. *Investigations of Astrolabe Metallurgy Using Synchrotron Radiation*. MRS Bulletin 26 (1), pp. 19-23.

A l'exception de la planche 2 (images CHRONOSPEDIA), toutes les figures sont de l'auteur.